

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών

[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

Department of Electrical & Electronics Engineering

[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

*Επικοινωνίες και Δίκτυα Δεδομένων*

Master of Science in

*Data Communications and Networking*

## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*Μελέτη Προσομοίωσης και Μοντελοποίησης*

*Απωλειών Διάδοσης*

*σε Κανάλια Κινητών Επικοινωνιών*



Μεταπτυχιακός Φοιτητής: Κακάκης Στυλιανός, ΑΜ: DCOM-10

Επιβλέπων: Σαββαΐδης Στυλιανός, Καθηγητής

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2024



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών

[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244



UNIVERSITY OF WEST ATTICA

FACULTY OF ENGINEERING

Department of Electrical & Electronics Engineering

[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

*Επικοινωνίες και Δίκτυα Δεδομένων*

Master of Science in

*Data Communications and Networking*

## MSc Thesis

### *Propagation Loss Simulation Study and Modelling for Mobile Communication Channels*



Student: Kakakis Stylianos, Registration Number: DCOM-10

MSc Thesis Supervisor: Savvaidis Stylianos, Professor

ATHENS-EGALEO, FEBRUARY 2024



Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Στυλιανός Σαββαΐδης	Νικόλαος Σταθόπουλος	Στυλιανός Μυτιληναίος
Καθηγητής	Καθηγητής	Αναπληρωτής Καθηγητής



## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Κακάκης Στυλιανός του Αντωνίου, με αριθμό μητρώου DCOM-10, φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Επικοινωνίες και Δίκτυα Δεδομένων» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Τέλος, βεβαιώνω ότι η εργασία αυτή δεν έχει κατατεθεί στο πλαίσιο των απαιτήσεων για τη λήψη άλλου τίτλου σπουδών ή επαγγελματικής πιστοποίησης πλην του παρόντος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Κακάκης Στυλιανός





Copyright © Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και ΚΑΚΑΚΗΣ ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ

Φεβρουάριος, 2024

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον/την συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος μέλους ΔΕΠ, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

*Το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας αφορά την εκπόνηση μελέτης προσομοίωσης των απωλειών διάδοσης σε κανάλια κινητών επικοινωνιών με σκοπό την ανάπτυξη εμπειρικών μοντέλων υπολογισμού των εν λόγω απωλειών. Για την προσομοίωση των απωλειών διάδοσης θα χρησιμοποιηθεί 2D εμπορικό λογισμικό υπολογισμού των απωλειών διάδοσης, ώστε να παραχθεί ένα στατιστικά αξιόπιστο δείγμα εκτιμήσεων σε τυπικές συχνότητες λειτουργίας 2G-3G-4G-5G δικτύων κινητών επικοινωνιών. Με την επεξεργασία των υπολογιστικών εκτιμήσεων του λογισμικού θα αναπτυχθεί ένα εμπειρικό μοντέλο υπολογισμού των απωλειών διάδοσης το οποίο θα περιλαμβάνει τη μοντελοποίηση των κατά μέσο όρο απωλειών καθώς και των απωλειών σκίασης. Η άδεια χρήσης του εν λόγω λογισμικού (Atool) παρέχεται από την εταιρεία τηλεπικοινωνιών NOVA.*

## ΛΕΞΕΙΣ-ΚΛΕΙΔΙΑ

*Απώλειες διάδοσης, μοντελοποίηση, σκίαση, κινητές επικοινωνίες, δίκτυα 2G-3G-4G-5G*



## ABSTRACT

*The subject of this thesis is the simulation study of propagation losses in mobile communication channels in order to develop empirical models for the calculation of these losses. For the simulation of propagation losses, 2D commercial software for the calculation of propagation losses will be used to produce a statistically reliable sample of estimates at typical operating frequencies of 2G-3G-4G-5G mobile communication networks. An empirical model for the calculation of propagation loss will be developed by processing the software estimates, which will include modelling of average loss as well as shadowing loss.*

*The license to use this software (Atoll) is provided by the telecommunications company NOVA.*

## KEYWORDS

*Propagation loss, modelling, shadowing, mobile communications, 2G-3G-4G-5G networks*



## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

*Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον καθηγητή κ. Στυλιανό Σαββαΐδη για την καθοδήγηση, τον πολύτιμο χρόνο που διέθεσε και για την βοήθεια που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια σύνταξής της εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την εταιρεία τηλεπικοινωνιών NOVA για την άδεια χρήσης του εμπορικού λογισμικού που μου παρείχε, καθώς επίσης τον συνάδελφο και φίλο Ρωσσέτο Γουρνέλη για την στήριξη του.*





## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή.....	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Ερευνητικό Αντικείμενο – Κίνητρο – Μεθοδολογία.....	2
1.3 Δομής Εργασίας.....	3
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Εμπειρικά Μοντέλα Απωλειών Διάδοσης.....	4
2.1 Εισαγωγή.....	4
2.2 Παράμετροι Μοντέλων Απωλειών Διάδοσης.....	5
2.3 Εμπειρικά Μοντέλα Απωλειών Διάδοσης.....	6
2.4 Μοντέλα “Clutter Factor”.....	8
2.5 Το μοντέλο Okumura-Hata.....	10
2.6 Το μοντέλο COST 231-Hata.....	13
2.7 Το μοντέλο Lee.....	14
2.8 Κατηγορίες περιβάλλοντος.....	15
2.9 Μοντέλα ITU-R.....	17
2.9.1. Σύσταση P.1411 της ITU-R.....	17
2.9.2 Σύσταση P.1546 της ITU-R.....	17
2.10 Σύγκριση των Μοντέλων.....	18
2.11 Λογισμικά Υπολογισμού Απωλειών.....	19
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Σκίαση.....	20
3.1 Εισαγωγή.....	20
3.2 Στατιστικός Χαρακτηρισμός.....	21
3.3 Η Φυσική Υπόσταση της Σκίασης.....	23
3.4 Σκίαση: Επίδραση στην Κάλυψη στο Σύνορο του Κελιού.....	24
3.5 Σκίαση: Επίδραση στην Κάλυψη στο Σύνολο του Κελιού.....	26
3.6 Μεταβλητότητα Τοποθεσίας.....	29
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 - Μετρήσεις και Μοντέλα Διάδοσης σε κανάλια κινητών επικοινωνιών.....	31
4.1. Εισαγωγή.....	31
4.2. Μεθοδολογία Ανάλυσης Μετρήσεων.....	31
4.3 Σταθμός βάσης Α (Αστικό Περιβάλλον με Μέτριας Πυκνότητας Δόμηση).....	36
4.3.1. Μετρήσεις Atoll και Υπολογισμός Απωλειών Διάδοσης.....	36

4.3.2. Σταθμός Βάσης A: Μοντέλο “Power Law” .....	38
4.3.3. Σταθμός Βάσης A: Μοντέλο Clutter Factor .....	51
4.3.4. Σταθμός Βάσης A: Μοντέλο Okumura-Hata .....	59
4.3.5. Σταθμός Βάσης A: Μοντέλο COST231-Hata .....	63
4.3.6. Σταθμός Βάσης A: Μοντέλο Lee .....	67
4.4 Σταθμός Βάσης B (Αστικό Περιβάλλον με Πυκνή Δόμηση) .....	75
4.4.1. Μετρήσεις Atoll και Υπολογισμός Απωλειών Διάδοσης.....	75
4.4.2. Σταθμός Βάσης B: Μοντέλο “Power Law”.....	81
4.4.3. Σταθμός Βάσης B: Μοντέλο Clutter Factor .....	91
4.4.4. Σταθμός Βάσης B: Μοντέλο Okumura-Hata.....	99
4.4.5. Σταθμός Βάσης B: Μοντέλο COST231-Hata.....	103
4.4.6. Σταθμός Βάσης B: Μοντέλο Lee.....	107
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προεκτάσεις.....	116
5.1. Συμπεράσματα .....	116
5.2. Μελλοντικές Προεκτάσεις.....	122
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ .....	123
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	125
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	127

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 - Εισαγωγή

### 1.1 Εισαγωγή

Τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών αποτελούν την αιχμή της τεχνολογίας και ίσως την πιο συστηματικά και ραγδαία εξελισσόμενη τεχνολογία στον τομέα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών δικτύων. Η ιστορική εξέλιξη τους με αφετηρία τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας (2G δίκτυα) έως τα 4G και 5G δίκτυα έχει επεκτείνει τις προσφερόμενες συνδρομητικές υπηρεσίες περιλαμβάνοντας εκτός από τις παραδοσιακές υπηρεσίες φωνής (τηλεφωνίας) και ένα μεγάλο εύρος υπηρεσίες δεδομένων, όπως το video-audio streaming, web browsing, file transfer, e-gaming κοκ [1]-[4].

Τα δίκτυα διαφορετικών γενιών 2G-3G-4G-5G χαρακτηρίζονται από σημαντικές διαφοροποιήσεις σε ότι αφορά τις τεχνολογίες μετάδοσης και λήψης [1]-[5]. Παρά τις σημαντικές διαφορές μεταξύ των δικτύων όλων των γενιών, υπάρχει ένας κοινός τόπος σε ότι αφορά την αναγκαιότητα σχεδίασης τους βάσει ενός μοντέλου πρόβλεψης των απωλειών του ασύρματου καναλιού και της κάλυψης. Στα 2G δίκτυα κινητών επικοινωνιών τα μοντέλα πρόβλεψης απωλειών υποστηρίζουν σημαντικές σχεδιαστικές διαδικασίες που αφορούν την πιθανότητα κάλυψης, την επαναχρησιμοποίηση των συχνοτήτων για τη μείωση των παρεμβολών κοκ [4]-[5]. Στα 3G δίκτυα τα μοντέλα πρόβλεψης των απωλειών διάδοσης καθορίζουν τόσο τις επιδόσεις όσο και την χωρητικότητά τους, δεδομένου ότι η εκτίμηση των παρεμβολών αποτελεί κρίσιμη πτυχή της λειτουργίας τους [3]. Τέλος, τόσο η κάλυψη όσο και οι επιδόσεις των 4G-5G δικτύων συναρτώνται ισχυρά με τη χρήση αξιόπιστων μοντέλων διάδοσης [1]-[2].

Τυπικά, τα φαινόμενα διάδοσης στις κινητές επικοινωνίες διακρίνονται σε φαινόμενα μεγάλης και μικρής κλίμακας (Large-Small Scale Fading)[5]. Τα φαινόμενα μεγάλης κλίμακας αφορούν διαφοροποιήσεις μεταξύ θέσεων που απέχουν κάποιες δεκάδες μέτρα και ως εκ τούτου χαρακτηρίζονται από

σημαντικές αλλαγές στις συνθήκες διάδοσης, π.χ. εμπόδια μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού χρήστη. Αντίθετα, τα φαινόμενα μικρής κλίμακας (Small Scale Fading) σχετίζονται με διαφοροποιήσεις της στάθμης του λαμβανόμενου σήματος λόγω συμβολών των όρων της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation), οι οποίες είναι «ορατές» ακόμη με μικρές μετακινήσεις [5]. Σε ότι αφορά την πρόβλεψη των απωλειών διάδοσης που καθορίζουν την κάλυψη σε ένα σύστημα κινητών επικοινωνιών λαμβάνονται υπόψη μόνο τα φαινόμενα μεγάλης κλίμακας, διότι τα φαινόμενα μικρής κλίμακας θεωρούνται εκ των προτέρων δεδομένα και τυπικά αντιμετωπίζονται από τις τεχνικές μετάδοσης και λήψης.

Η δυνατότητα χρήσης υπολογιστικών μεθόδων για την πρόβλεψη των φαινομένων μεγάλης κλίμακας και των συναφών απωλειών διάδοσης που χαρακτηρίζονται από μια επαρκή αξιοπιστία, ταχύτητα και μικρό ή μηδενικό οικονομικό κόστος αποτελεί πάντα ένα επίδικο και ενδιαφέρον αντικείμενο. Η χρήση εμπορικών λογισμικών προσομοίωσης τα οποία υπολογίζουν με σημαντική ακρίβεια την κάλυψη συνήθως απαιτούν χρονοβόρους υπολογισμούς, σημαντικούς υπολογιστικούς πόρους και χρήση βάσεων δεδομένων για τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος διάδοσης (μορφολογία εδάφους, φυσικών και τεχνητών αντικειμένων), ενώ τέλος η άδεια χρήση τους είναι τυπικά υψηλή. Στο πλαίσιο αυτό, η χρήση αξιόπιστων εμπειρικών μοντέλων πρόβλεψης των απωλειών διάδοσης [Saunders] αποτελεί μία ενδιαφέρουσα εναλλακτική επιλογή.

## 1.2 Ερευνητικό Αντικείμενο – Κίνητρο – Μεθοδολογία

Το ερευνητικό αντικείμενο της παρούσας μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας εστιάζει στην μεθοδολογία της προσαρμογής των παραμέτρων υπαρχόντων εμπειρικών μοντέλων πρόβλεψης απωλειών διάδοσης σε μετρητικά δεδομένα απωλειών διάδοσης από ένα πραγματικό δίκτυο κινητών επικοινωνιών. Το κίνητρο για τη διεξαγωγή της προαναφερόμενης έρευνας εδράζεται στην αναγκαιότητα να αναπτυχθούν μοντέλα πρόβλεψης των απωλειών διάδοσης που

θα υλοποιούν αξιόπιστους, απλούς και ταχείς υπολογισμούς με ελάχιστο οικονομικό κόστος.

Η ερευνητική μεθοδολογία, ελλείπει δυνατοτήτων για την εκτέλεση μετρήσεων σε εξωτερικούς χώρους, χρησιμοποιεί ως μετρητικά δεδομένα τους υπολογισμούς ενός εμπορικού 2D λογισμικού (Atoll). Τα υπολογιστικά-«πειραματικά» δεδομένα του Atoll συλλέχθηκαν σε δύο ζώνες συχνοτήτων (900 MHz και 2100 MHz), σε διαφορετικές αποστάσεις (ανά 100 m σε ένα εύρος αποστάσεων 100 m-1000 m) με πολλαπλές (10) μετρήσεις ανά απόσταση και σε δύο διαφορετικά αστικά περιβάλλοντα διάδοσης: πυκνής και μέτρια πυκνότητας δόμησης. Στη συνέχεια, τα «πειραματικά» δεδομένα επεξεργάζονται προκειμένου να βελτιστοποιηθεί η παραμετροποίηση τεσσάρων διαφορετικών εμπειρικών μοντέλων διάδοσης: power law, clutter factor, Okumura-Hata και Lee [6].

### 1.3 Δομής Εργασίας

Η μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία οργανώνεται ως εξής:

Στο Κεφάλαιο 2 αναλύονται τα εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης των κατά μέσο όρο απωλειών που θα μελετηθούν.

Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται το φαινόμενο των απωλειών σκίασης και η πρόβλεψη των πιθανοτήτων κάλυψης σε ένα κελί για δεδομένες απώλειες σκίασης.

Στο Κεφάλαιο 4 υλοποιούνται οι «πειραματικοί» υπολογισμοί-μετρήσεις με τη χρήση του 2D λογισμικού Atoll και κατόπιν πραγματοποιείται η επεξεργασία των μετρητικών δεδομένων και ακολούθως η προσαρμογή της παραμετροποίησής τους.

Τέλος, στο Κεφάλαιο 5 συνοψίζονται τα συμπεράσματα της ερευνητικής μελέτης και καταγράφονται πιθανές μελλοντικές προεκτάσεις της.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Εμπειρικά Μοντέλα Απωλειών Διάδοσης

### 2.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθούν οι μέθοδοι πρόβλεψης των απωλειών διάδοσης σε κελιά των οποίων η ακτίνα είναι κατ' ελάχιστο της τάξης του 1 km. Τα κελιά αυτών των διαστάσεων χαρακτηρίζονται ως μακροκυψέλες (macrocells). Οι μακροκυψέλες και τα συναφή μοντέλα εκτίμησης των απωλειών διάδοσης χρησιμοποιούνται στα δίκτυα κινητών επικοινωνιών για την παροχή αρχικής κάλυψης σε μια ευρεία περιοχή. Ωστόσο, τα μοντέλα διάδοσης είναι επίσης εφαρμόσιμα σε συστήματα ιδιωτικών κινητών επικοινωνιών (TETRA) και επίγειων δικτύων μετάδοσης βίντεο και ήχου (Digital Video Broadcasting-DVB, Digital Audio Broadcasting-DAB) καθώς και σε εφαρμογές σταθερής ασύρματης πρόσβασης συμπεριλαμβανομένου του WiMax.

Τα μοντέλα πρόβλεψης απωλειών θα μπορούσαν να αναπτυχθούν για την πρόβλεψη της απώλειας σε κάθε προφίλ διαδρομής μεταξύ του σταθμού βάσης και κάθε δυνατής τοποθεσίας χρήστη. Ωστόσο, τα δεδομένα που περιγράφουν το έδαφος και τις διαταραχές του (clutter) θα ήταν πολύ μεγάλα και το απαιτούμενο υπολογιστικό κόστος θα ήταν ιδιαίτερα επαχθές. Ακόμα κι αν οι πόροι ήταν διαθέσιμοι, η σημαντική παράμετρος για τον σχεδιαστή μακροκυψέλης είναι η εκτίμησης της συνολικής περιοχής που καλύπτεται από τη συγκεκριμένη ένταση πεδίου σε συγκεκριμένες τοποθεσίες. Με αυτό το σκεπτικό τα μοντέλα στατιστικής φύσης είναι συνήθως τα καταλληλότερα και αυτά που ευρέως χρησιμοποιούνται στην πράξη.

Τα μοντέλα που παρουσιάζονται σε αυτό το κεφάλαιο εκτιμούν τις μέσες απώλειες διάδοσης σε μία μακροκυψέλη συναρτήσει της απόστασης, υπό την προϋπόθεση ότι το περιβάλλον που περιβάλλει τον σταθμό βάσης είναι αρκετά ομοιόμορφο. Κατά συνέπεια, η περιοχή κάλυψης που προβλέπεται από αυτά τα μοντέλα για έναν μεμονωμένο σταθμό βάσης σε μια περιοχή με σταθερό τύπο περιβάλλοντος θα προσεγγιστεί ως κυκλική. Αν και αυτό είναι ανακριβές, είναι

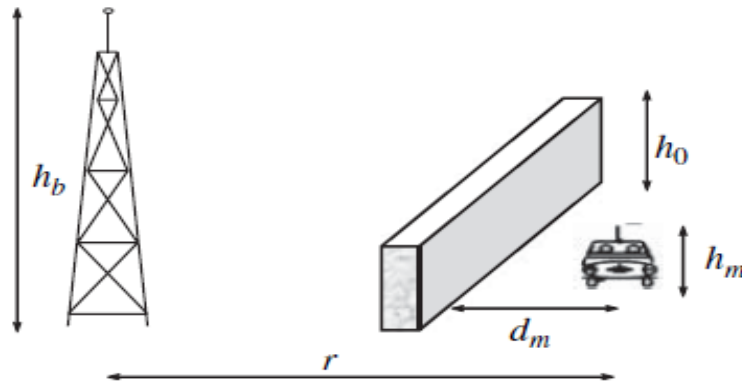
όμως χρήσιμο για τους σκοπούς μίας αρχικής διαστασιολόγησης των συστημάτων που υποστηρίζουν την ασύρματη κάλυψη.

## 2.2 Παράμετροι Μοντέλων Απωλειών Διάδοσης

Οι παράμετροι των μοντέλων πρόβλεψης των απωλειών διάδοσης που θα αναλυθούν στο παρόν κεφάλαιο απεικονίζονται στην Εικόνα 2.1 και περιγράφονται ακολούθως:

- $h_m$ : το ύψος κεραίας κινητού σταθμού πάνω από το τοπικό ύψος του εδάφους [m], το οποίο συνήθως λαμβάνει την τιμή 1.5 m.
- $d_m$  : η απόσταση μεταξύ του κινητού και του πλησιέστερου κτιρίου [m].
- $h_0$ : τυπικό (συνήθως το μέσο) ύψος των κτιρίων πάνω από το τοπικό ύψος του εδάφους [m].
- $h_b$  : ύψος κεραίας σταθμού βάσης πάνω από το τοπικό ύψος του εδάφους[m].
- $r$ : η κυκλική απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού[m].
- $R = r \times 10^{-3}$  : η κυκλική απόσταση μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού [km].
- $f$  : η φέρουσα συχνότητα [Hz]
- $f_c = f \times 10^{-6}$ : η φέρουσα συχνότητα [MHz]
- $\lambda$  : το μήκος κύματος ελεύθερου χώρου [m]

Τυπικά σε μία μακροκυψέλη το ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης είναι υψηλότερο από το ύψος των κτηρίων της περιοχής που καλύπτει, δηλ.  $h_b > h_0$  . Παρόλο που στην πράξη τα κτίρια δεν είναι τα μόνα εμπόδια, είναι συνήθως μακράν τα πιο σημαντικά σε τυπικές συχνότητες μακροκυψέλης. Στην πράξη, τα ύψη των σταθμών βάσης είναι περίπου 15-35 m εάν χρησιμοποιείται ιστός, ή τουλάχιστον 20 m, εάν αναπτύσσεται σε ταράτσα κτιρίου. Το πραγματικό ύψος του σταθμού βάσης μπορεί να αυξηθεί δραματικά με την τοποθέτησή του σε λόφο με θέα στην περιοχή που πρόκειται να καλυφθεί.



Εικόνα 2.1. Ορισμός των παραμέτρων για μοντέλα διάδοσης μακροκυψέλων [6]

### 2.3 Εμπειρικά Μοντέλα Απωλειών Διάδοσης

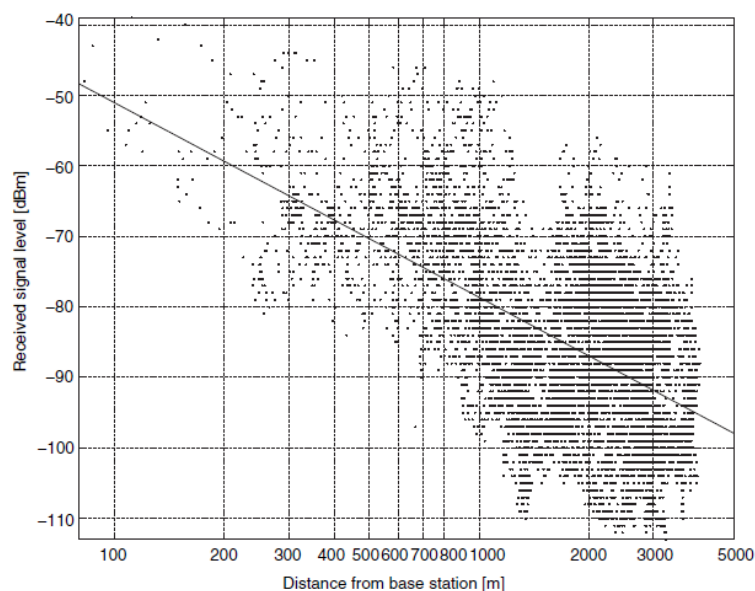
Τα θεωρητικά μοντέλα σε απλά περιβάλλοντα διάδοσης (απώλειες στον ελεύθερο χώρο και απώλειες διάδοσης πάνω από επίπεδη γη) καθώς και τα πιο ακριβή μοντέλα απωλειών σε ρεαλιστικά περιβάλλοντα επιχειρούν να λάβουν υπόψη τους όλους τους σημαντικούς μηχανισμούς και τα φαινόμενα της ηλεκτρομαγνητικής διάδοσης. Ωστόσο, η χρήση τέτοιων μοντέλων θα απαιτούσε λεπτομερή γνώση της θέσης, των διαστάσεων και των σχετιζόμενων παραμέτρων κάθε δέντρου, κτιρίου και χαρακτηριστικού εδάφους στην περιοχή που πρόκειται να καλυφθεί. Αυτό είναι υπερβολικά πολύπλοκο για να είναι πρακτικό και θα απέδιδε ούτως ή άλλως περιττή λεπτομέρεια, δεδομένου ότι ο σχεδιαστής του συστήματος δεν ενδιαφέρεται για τις συγκεκριμένες θέσεις που καλύπτονται, αλλά μάλλον για τη συνολική έκταση της περιοχής κάλυψης.

Ένας κατάλληλος τρόπος για να ληφθούν υπόψη με απλό τρόπο αυτές οι πολύπλοκες επιδράσεις είναι μέσω ενός εμπειρικού μοντέλου. Για τη δημιουργία ενός τέτοιου μοντέλου, συνήθως πραγματοποιείται ένα εκτεταμένο σύνολο πραγματικών μετρήσεων απωλειών διάδοσης, προκειμένου να αναπτυχθεί μία κατάλληλη συνάρτηση προσαρμοσμένη στις μετρήσεις. Η λόγω συνάρτηση χρησιμοποιεί μεταβλητές που είναι θεωρητικά αναμενόμενες και σχετίζονται με το συγκεκριμένο περιβάλλον διάδοσης, όπως για παράδειγμα τη φέρουσα συχνότητα και τα ύψη των κεραιών. Η έννοια της προσαρμογής της συνάρτησης στις μετρήσεις αφορά την ελαχιστοποίηση του σφάλματος μεταξύ του μοντέλου



πρόβλεψης και των μετρήσεων. Σημειώνεται ότι κάθε μέτρηση αντιπροσωπεύει το μέσο όρο ενός συνόλου δειγμάτων, τον τοπικό μέσο όρο (local average), το οποίο λαμβάνεται σε μια μικρή περιοχή (περίπου 10-50 m), προκειμένου να αφαιρεθούν οι επιδράσεις των διαλείψεων μικρής κλίμακας. Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale fading) [5] αφορούν τις συμβολές των όρων της πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation) και δεν λαμβάνεται υπόψη του στην κάλυψη δεδομένου ότι αποτελεί αναμενόμενο φαινόμενο που κατά κύριο λόγο απασχολεί τις τεχνικές εκπομπής και λήψης. Ως εκ τούτου τα μοντέλα στα οποία αναφερόμαστε χαρακτηρίζονται ως μοντέλα απωλειών μεγάλης κλίμακας (large scale fading) [5]-[6]. Αυτός ο τύπος μοντέλων μπορεί στη συνέχεια να χρησιμοποιηθεί για το σχεδιασμό συστημάτων που λειτουργούν σε παρόμοια με τις αρχικές μετρήσεις περιβάλλοντα.

Ένα πραγματικό παράδειγμα ενός εμπειρικού μοντέλου προσαρμοσμένο σε μετρήσεις παρουσιάζεται στην Εικόνα 2.2. Οι μέθοδοι υπολογισμού της πολύ μεγάλης διασποράς των μετρήσεων σε δεδομένη απόσταση αποτελούν αντικείμενο του κεφαλαίου 3.



Εικόνα 2.2 : Εμπειρικό μοντέλο διάδοσης μακροκυψελών: οι κουκκίδες είναι μετρήσεις που έγιναν σε προαστιακή περιοχή και η γραμμή αντιπροσωπεύει ένα εμπειρικό μοντέλο βέλτιστης διάδοσης [6].

Η απλούστερη μορφή για ένα εμπειρικό μοντέλο απωλειών διάδοσης είναι η ακόλουθη [6]:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{1}{L} = \frac{k}{r^n} \quad \text{ή σε λογαριθμική μορφή } L = 10 \log r + K \quad (2.1)$$

όπου  $P_T$  και  $P_R$  είναι η ενεργός ιστροπική μεταδιδόμενη και η προβλεπόμενη ιστροπική λαμβανόμενη ισχύς,  $L$  είναι η απώλεια διάδοσης,  $r$  είναι η απόσταση μεταξύ του σταθμού βάσης και του κινητού και  $K = -10 \log k$  και  $n$  είναι σταθερές του μοντέλου. Η παράμετρος  $k$  μπορεί να θεωρηθεί ως το αντίστροφο της απώλειας διάδοσης που θα παρατηρηθεί σε ένα μέτρο απόσταση ( $r = 1\text{m}$ ). Τα μοντέλα αυτής της μορφής θα αναφέρονται ως μοντέλα νόμου ισχύος (Power Law). Μια πιο κατάλληλη μορφή (σε dB) είναι η ακόλουθη [6]:

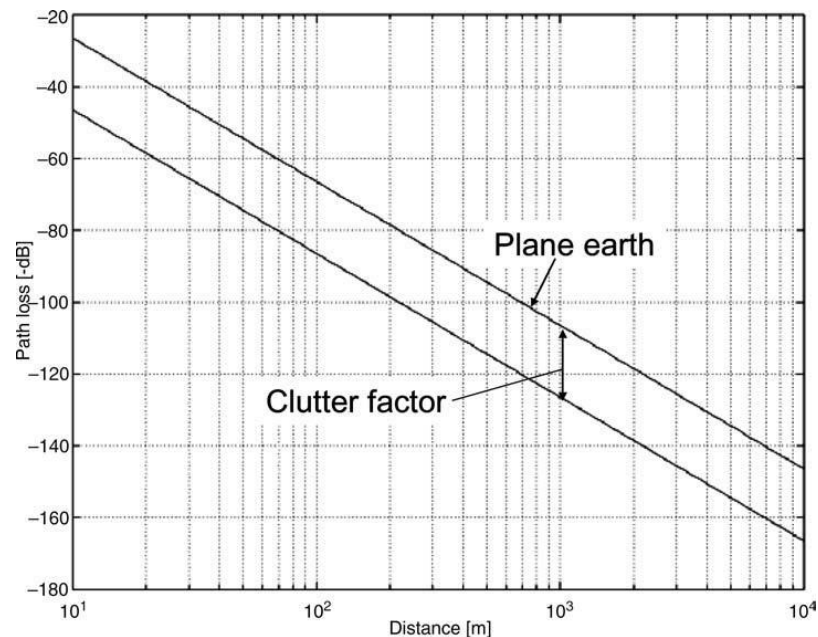
$$L(r) = L(r_{ref}) + 10n \log \left( \frac{r}{r_{ref}} \right) \quad (2.2)$$

όπου  $L(r_{ref})$  είναι η προβλεπόμενη απώλεια σε μια απόσταση αναφοράς  $r_{ref}$ . Οι απώλειες ελεύθερου χώρου καθώς και οι απώλειες επίπεδης γης μπορούν να εκφραστούν με αυτή τη μορφή. Η παράμετρος  $n$  είναι γνωστή ως συντελεστής απωλειών διάδοσης. Διαπιστώνεται από μετρήσεις ότι εξαρτάται από τις συναφείς παραμέτρους του συστήματος, όπως για παράδειγμα τα ύψη των κεραιών και το περιβάλλον. Ο συντελεστής απωλειών διάδοσης είναι κρίσιμος για τον καθορισμό της κάλυψης και της χωρητικότητας ενός κυψελοειδούς συστήματος.

#### 2.4 Μοντέλα “Clutter Factor”

Οι μετρήσεις που λαμβάνονται σε αστικές και προαστιακές περιοχές συνήθως αναδεικνύουν έναν συντελεστή απωλειών διάδοσης  $n$  κοντά στο 4, όπως ακριβώς και στις απώλειες επίπεδης γης, αλλά με μεγαλύτερη απόλυτη τιμή απωλειών - δηλαδή μεγαλύτερο  $K$  στην Εξίσωση (2.1). Αυτό έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ορισμένων μοντέλων που βασίζονται στον φορμαλισμό των απωλειών επίπεδης

γης και προσθέτουν (σε dB) έναν πρόσθετο όρο απωλειών που ονομάζεται “Clutter Factor”, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 2.3. Τα διάφορα μοντέλα διαφέρουν κυρίως στις τιμές που αποδίδουν στα  $K$  και  $n$  για διαφορετικές συχνότητες και περιβάλλοντα.



Εικόνα 2.3. : Μοντέλο “Clutter Factor”. Ο άξονας  $y$  σε αυτό το διάγραμμα είναι το αρνητικό της απώλειας διάδοσης σε dB προκειμένου να αναπαρασταθεί καλύτερα ο ρυθμός με τον οποίο μειώνεται με την απόσταση η λαμβανόμενη ισχύς.

Επομένως, το γνωστό μοντέλο απωλειών της επίπεδης γης τροποποιείται στο ακόλουθο εμπειρικό μοντέλο [6]:

$$L_{emp} = 40 \log r - 20 \log h_m - 20 \log h_b + K \quad (2.3)$$

όπου  $K$  είναι ο συντελεστής clutter [dB].

Ένα καλό παράδειγμα ενός μοντέλου “Clutter Factor” είναι η μέθοδος του Egli [7], η οποία βασίζεται σε ένα μεγάλο αριθμό μετρήσεων που έγιναν γύρω από αμερικανικές πόλεις. Τα συνολικά αποτελέσματα του Egli παρουσιάστηκαν

αρχικά σε μορφή νομογράμματος, αλλά στο [8] αναπτύχθηκε μια έκφραση αυτών των αποτελεσμάτων για ευκολότερο υπολογισμό:

$$L = 40 \log R + 20 \log f_c - 20 \log h_b + L_m \quad (2.4\alpha)$$

όπου

$$L_m = \begin{cases} 76.3 - 10 \log h_m, & h_m < 10 \\ 76.3 - 20 \log h_m, & h_m \geq 10 \end{cases} \quad (2.4\beta)$$

Σημειώστε ότι αυτή η προσέγγιση εμφανίζει μια μικρή ασυνέχεια στο  $h_m = 10$  m. Αν και οι απώλειες επίπεδης γης είναι ανεξάρτητες της συχνότητας, αυτό το μοντέλο εισάγει μια πρόσθετη εξάρτηση της μορφής  $f_c^{-2}$ , η οποία είναι περισσότερο ρεαλιστική με κριτήριο τις πραγματικές μετρήσεις. Για πολύ μεγάλα ύψη κεραιών, η απώλεια που προβλέπεται από την (2.4) μπορεί να είναι μικρότερη από την τιμή των απωλειών του ελεύθερου χώρου, και σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να χρησιμοποιείται η τιμή του ελεύθερου χώρου.

## 2.5 Το μοντέλο Okumura-Hata

Το μοντέλο του Okumura είναι μια πλήρως εμπειρική μέθοδο πρόβλεψης [9], η οποία βασίζεται εξ ολοκλήρου σε μια εκτεταμένη σειρά μετρήσεων που έγιναν στην πόλη του Τόκιο και σε ένα εύρος συχνοτήτων μεταξύ 200 MHz και 2 GHz. Στην περίπτωση του μοντέλου Okumura δεν γίνεται καμία προσπάθεια να βασιστούν οι προβλέψεις σε ένα φυσικό μοντέλο, όπως οι απώλειες επίπεδης γης. Οι προβλέψεις γίνονται μέσω μιας σειράς γραφικών παραστάσεων, οι σημαντικότερες από τις οποίες έχουν έκτοτε εκφρασθεί με τη μορφή συγκεκριμένου μαθηματικού φορμαλισμού από τον [10]. Η πληρότητα αυτών των δύο εργασιών κατέστησαν το μοντέλο Okumura-Hata ως ένα από τα πιο ευρέως αναφερόμενα μοντέλα πρόβλεψης των απωλειών διάδοσης σε περιβάλλοντα μακροκυψελών.

Οι αστικές τιμές των παραμέτρων στο μοντέλο που παρουσιάζεται παρακάτω έχουν τυποποιηθεί για διεθνείς χρήση [11]. Η μέθοδος περιλαμβάνει τη διαίρεση

της περιοχής πρόβλεψης σε μια σειρά κατηγοριών “Clutter” και εδάφους, λαμβάνοντας υπόψη τα λεγόμενα ανοικτά-αγροτικά, προαστιακά και αστικά περιβάλλοντα. Τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά για τα προαναφερόμενα περιβάλλοντα διάδοσης συνοψίζονται ως εξής:

- Ανοιχτή περιοχή: Ανοιχτός χώρος, χωρίς ψηλά δέντρα ή κτίρια στη διαδρομή, οικόπεδο που έχει καθαριστεί για 300-400 μ. μπροστά, π.χ. γεωργικές εκτάσεις, ορυζώνες, ανοιχτά χωράφια.
- Προαστιακή περιοχή: Προάστιο ή Χωριό ή αυτοκινητόδρομος διάσπαρτος με δέντρα και σπίτια, κάποια εμπόδια κοντά αλλά όχι πυκνά τοποθετημένα.
- Αστική περιοχή: Δομημένη πόλη ή μεγάλη κωμόπολη με μεγάλα κτίρια και σπίτια με δύο ή περισσότερους ορόφους, ή μεγαλύτερα χωριά με στενά σπίτια και ψηλά, πυκνά αναπτυγμένα δέντρα.

Ο Okumura θεωρεί τις αστικές περιοχές ως σημείο αναφοράς και εφαρμόζει διορθωτικούς συντελεστές για τη μετατροπή σε άλλες ταξινομήσεις. Αυτή είναι μια λογική επιλογή, καθώς οι περιοχές αυτές αποφεύγουν τη μεγάλη μεταβλητότητα που υπάρχει στις προαστιακές περιοχές ωστόσο, περιλαμβάνουν τις επιπτώσεις των εμποδίων καλύτερα από ό,τι θα αναλογούσε στις ανοικτές περιοχές. Ορίζεται επίσης μια σειρά τύπων εδάφους για τις περιπτώσεις που οι πληροφορίες αυτές είναι διαθέσιμες. Το ομαλό έδαφος λαμβάνεται ως σημείο αναφοράς και προστίθενται διορθωτικοί συντελεστές για τους άλλους τύπους.

Οι προβλέψεις του Okumura για τη μέση απώλεια διάδοσης υπολογίζονται συνήθως χρησιμοποιώντας τις προσεγγίσεις του Hata ως εξής [10]:

Αστικές περιοχές:  $LdB = A + B \log R - E$

Προαστιακές περιοχές:  $LdB = A + B \log R - C$  (2.5)

Ανοικτές περιοχές:  $LdB = A + B \log R - D$

όπου

$$A = 69.55 + 26.16 \log fc - 13.82 \log hb$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log hb$$

$$C = 2(\log(fc/28))^2 + 5.4$$

$$D = 4.78(\log fc)^2 - 18.33 \log fc + 40.94 \quad (2.6)$$

$$E = 3.2(\log(11.75hm))^2 - 4.97 \text{ για μεγάλες πόλεις , } fc \geq 300 \text{ MHz}$$

$$E = 8.29(\log(1.54hm))^2 - 1.1 \text{ για μεγάλες πόλεις , } fc < 300 \text{ MHz}$$

$$E = (1.1 \log fc - 0.7) hm - (1.56 \log fc - 0.8) \text{ για μεσαίες και μικρές πόλεις}$$

Το μοντέλο ισχύει κάτω από τις ακόλουθες προϋποθέσεις:

$$150\text{MHz} \leq fc \leq 1500\text{MHz} , 30\text{m} \leq hb \leq 200 \text{ m} , 1 \text{ m} < hm < 10 \text{ m} \text{ και } R > 1 \text{ km}.$$

Ο συντελεστής απωλειών διάδοσης δίνεται από το  $B/10$ , που είναι λίγο μικρότερο από 4, μειούμενο με την αύξηση του ύψους της κεραίας του σταθμού βάσης.

Το ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης  $h_b$  ορίζεται ως το ύψος πάνω από τη μέση στάθμη του εδάφους σε ένα εύρος 3-10 km από το σταθμό βάσης. Επομένως, το  $h_b$  μπορεί να μεταβάλλεται ελαφρώς ανάλογα με την κατεύθυνση του κινητού από το σταθμό βάσης. Ο συντελεστής κέρδους με το ύψος κυμαίνεται μεταξύ 6 dB ανά οκτάβα και 9 dB ανά οκτάβα καθώς το ύψος αυξάνεται από 30 m έως 1 km. Οι μετρήσεις δείχνουν επίσης ότι ο παράγοντας αυτός εξαρτάται από την απόσταση.

Ο Okumura διαπίστωσε ότι το κέρδος ύψους κεραίας κινητής τηλεφωνίας είναι 3 dB ανά οκτάβα μέχρι  $h_m = 3\text{m}$  και 8 dB ανά οκτάβα πέραν αυτού. Εξαρτάται εν μέρει από την αστική πυκνότητα δόμησης, ως αποτέλεσμα της επίδρασης των υψών των κτιρίων στη γωνία άφιξης της κυματικής ενέργειας στο κινητό και της σχετιζόμενης μεταβολής των απωλειών σκιάς (κεφάλαιο 3). Συνεπώς, οι αστικές περιοχές υποδιαιρούνται σε μεγάλες πόλεις και μεσαίες/μικρές πόλεις, όπου μια περιοχή με μέσο ύψος κτιρίου σε άνω των 15 μέτρων ορίζεται ως μεγάλη πόλη.

Στο αρχικό έργο του Okumura περιλαμβάνονται και άλλοι διορθωτικοί παράγοντες για τις επιδράσεις του προσανατολισμού των δρόμων (εάν μια

περιοχή έχει μεγάλο ποσοστό δρόμων που είναι είτε ακτινικοί είτε εφαπτόμενοι στην κατεύθυνση διάδοσης) και μια λεπτή διόρθωση για το λοφώδες έδαφος (χρησιμοποιείται εάν ένα μεγάλο ποσοστό δρόμων τοποθετείται είτε στις κορυφές είτε στις κοιλάδες των κυματισμών του εδάφους).

Η εφαρμογή της μεθόδου περιλαμβάνει αρχικά την εύρεση της βασικής μέσης έντασης του πεδίου σε ομόκεντρους κύκλους γύρω από το σταθμό βάσης, και στη συνέχεια την τροποποίησή τους ανάλογα με το έδαφος και των διορθωμένων γραφημάτων “Clutter”.

Οι προβλέψεις του Okumura έχουν επιβεβαιωθεί σε πολλές περιπτώσεις [12], ιδίως σε προαστιακές περιοχές. Ωστόσο, άλλες μετρήσεις αποκλίνουν από τις προβλέψεις του Okumura και ως αιτιολόγηση αναφέρεται η διαφορά στα χαρακτηριστικά της εξεταζόμενης περιοχής με το Τόκιο. Άλλοι συγγραφείς, όπως ο [13], προσπάθησαν να τροποποιήσουν τη μέθοδο του Okumura για να συμπεριλάβει ένα μέτρο της πυκνότητας των κτιρίων, αλλά τέτοιες προσεγγίσεις δεν βρήκαν κοινή αποδοχή.

Το μοντέλο Okumura-Hata, μαζί με τις σχετικές διορθώσεις, είναι πιθανώς το μοναδικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στη σχεδίαση πραγματικών συστημάτων. Αρκετά εμπορικά εργαλεία πρόβλεψης ουσιαστικά βασίζονται σε παραλλαγές αυτού του μοντέλου, βελτιστοποιημένες για τα συγκεκριμένα περιβάλλοντα για τα οποία προορίζονται, ως βάση των προβλέψεών τους.

## 2.6 Το μοντέλο COST 231-Hata

Το μοντέλο Okumura-Hata για μεσαίες και μικρές πόλεις επεκτάθηκε για να καλύψει τη ζώνη  $1500 \text{ MHz} < f_c < 2000 \text{ MHz}$  [14].

$$LdB = F + B \log R - E + G \quad (2.7)$$

Όπου

$$F = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log hb \quad (2.8)$$

Το  $E$  ορίζεται στην (2.6) για μεσαίες και μικρές πόλεις ενώ το  $G$  ορίζεται ως εξής:

$$G = \begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{μεσαίες πόλεις και προαστιακές περιοχές} \\ 3 \text{ dB} & \text{μητροπολιτικές περιοχές} \end{cases} \quad (2.9)$$

## 2.7 Το μοντέλο Lee

Το μοντέλο Lee είναι ένα μοντέλο “power law”, με παραμέτρους που λαμβάνονται από μετρήσεις συνδυαζόμενες με μία διαδικασία για τον υπολογισμό του πραγματικού ύψους της κεραίας του σταθμού βάσης, εφόσον ληφθούν υπόψη οι διακυμάνσεις του εδάφους [15]-[16]. Μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$L = 10n \log R - 20 \log h_{b(eff)} - P_0 - 10 \log h_m + 29 \quad (2.10)$$

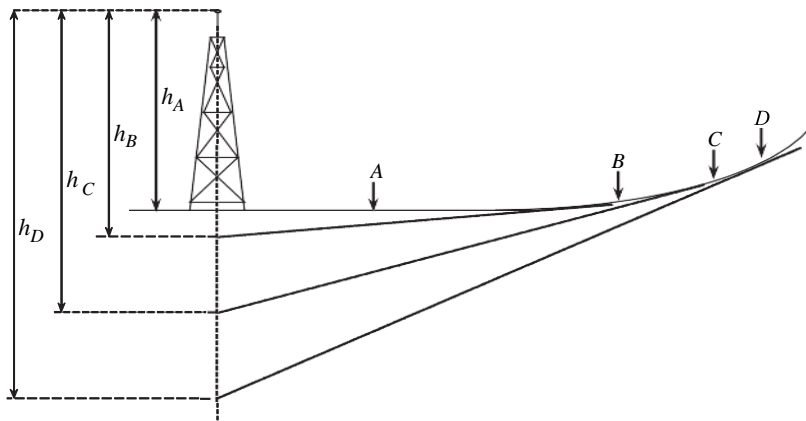
Όπου  $n$  και  $P_0$  δίνονται από μετρήσεις όπως φαίνεται στον πίνακα 2.1 και  $h_{b(eff)}$  είναι το πραγματικό ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης. Οι μετρήσεις έγιναν όλες στα 900 MHz και πρέπει να εφαρμοστούν συντελεστές διόρθωσης για άλλες συχνότητες. Οι εν λόγω συντελεστές διόρθωσης, όπως προκύπτει από τη μελέτη της διαθέσιμης βιβλιογραφίας δεν φαίνεται να έχουν καθοριστεί.

Το πραγματικό ύψος του σταθμού βάσης προσδιορίζεται με την προβολή της κλίσης του εδάφους στη κοντινή περιοχή του κινητού στη θέση του σταθμού βάσης. Η Εικόνα 2.4 δείχνει πώς αυτό το πραγματικό ύψος μεταβάλλεται για τέσσερις θέσεις κινητών σε έδαφος με ήπια κλίση.

Πίνακας 2.1. Παράμετροι Μοντέλου Lee [6]

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ			$n$	$P_0$
ΕΛΕΥΘΕΡΟΣ ΧΩΡΟΣ			2	-45
ΑΝΟΙΧΤΗ ΠΕΡΙΟΧΗ			4.35	-49
ΠΡΟΑΣΤΙΑΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ			3.84	-61.7
ΑΣΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ		Philadelphia	3.68	-70
		Newark	4.31	-64
		Tokyo	3.05	-84
		New York City	4.8	-77





Εικόνα 2.4 : Προσδιορισμός του πραγματικού ύψους της κεραίας του σταθμού βάσης για το μοντέλο του Lee [6].

## 2.8 Κατηγορίες περιβάλλοντος

Σε ένα εμπειρικό μοντέλο, είναι ζωτικής σημασίας να ταξινομηθεί σωστά το περιβάλλον στο οποίο το σύστημα λειτουργεί. Τα μοντέλα πρόβλεψης των απωλειών διάδοσης υποθέτουν ότι τα χαρακτηριστικά του εκάστοτε περιβάλλοντος εφαρμογής του είναι επαρκώς παρόμοια με εκείνα όπου ελήφθησαν οι μετρήσεις βάσει των οποίων αναπτύχθηκαν τα μοντέλα. Συνεπώς, με τη χρήση των προαναφερόμενων εμπειρικών μοντέλων θα επιτευχθούν καλά αποτελέσματα μόνο εάν επιλέγεται η σωστή ταξινόμηση του περιβάλλοντος. Οι κατηγορίες του περιβάλλοντος θα πρέπει επίσης να είναι επαρκής ώστε οι ιδιότητες των διαφορετικών θέσεων που κατατάσσονται στην ίδια κατηγορία να μην είναι πολύ μεταβλητές. Η απόφαση για την κατηγορία στην οποία εντάσσεται ένα περιβάλλον είναι συνήθως καθαρά υποκειμενική και μπορεί να διαφέρει μεταξύ ατόμων και χωρών. Για παράδειγμα, η Okumura-Hata χρησιμοποιεί τέσσερις κατηγορίες: μεγάλες πόλεις, μεσαίες-μικρές πόλεις, προαστιακές περιοχές και ανοικτές περιοχές.

Αν και οι αρχικές μετρήσεις έγιναν στο Τόκιο, το μοντέλο βασίζεται σε άλλα μέρη του κόσμου που έχουν χαρακτηριστικά, τα οποία είναι κατά κάποιον τρόπο παρόμοια με εκείνα του Τόκιο. Αν και αυτό είναι μια εξαιρετικά αμφισβητήσιμη υπόθεση, είναι ωστόσο αλήθεια ότι το μοντέλο έχει εφαρμοστεί με σημαντική επιτυχία.

Σε κάθε περίπτωση υπάρχουν πολλή πιο λεπτομερή σχήματα για την ποιοτική ταξινόμηση της χρήσης γης, όπως για παράδειγμα αυτό που παρουσιάζεται στον Πίνακα 2.2. Συχνά, τα σχήματα ταξινόμησης αντιστοιχούν σε πηγές δεδομένων, όπως η δορυφορική τηλεπισκόπηση δεδομένων που ταξινομούν τη γη ανάλογα με το βαθμό διασποράς που παρατηρείται σε διάφορα μήκη κύματος. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται τουλάχιστον η ανάγκη διαφορούμενων κρίσεων. Προκειμένου να βρεθούν καταλληλότερες παράμετροι μοντέλων, η αυξανόμενη τάση στη μακροκυβελική διάδοση τείνει προς μοντέλα που έχουν μια φυσική βάση (physical models), τα οποία όμως δεν αποτελούν αντικείμενο 'μελέτης στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Πίνακας 2.2 : Κατηγορίες χρήσης γης της British Telecom [17], [6]

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
0	Ποτάμια, λίμνες και θάλασσες
1	Ανοιχτές αγροτικές περιοχές, π.χ. χωράφια και ερημότοποι με λίγα δέντρα
2	Αγροτικές περιοχές, παρόμοιες με τις παραπάνω, αλλά με ορισμένες δασικές εκτάσεις, π.χ. πάρκα
3	Δασωμένες ή δασώδεις αγροτικές περιοχές
4	Ημιορεινές ή ορεινές αγροτικές περιοχές
5	Προαστιακές περιοχές, κατοικίες χαμηλής πυκνότητας και σύγχρονες βιομηχανικές περιοχές
6	Προαστιακές περιοχές, κατοικίες υψηλότερης πυκνότητας, π.χ. δημοτικά συγκροτήματα
7	Αστικές περιοχές με κτίρια έως τεσσάρων ορόφων, αλλά με κάποιο ελεύθερο χώρο μεταξύ τους
8	Αστικές περιοχές υψηλότερης πυκνότητας στις οποίες ορισμένα κτίρια έχουν περισσότερους από τέσσερις ορόφους
9	Πυκνές αστικές περιοχές στις οποίες τα περισσότερα κτίρια έχουν περισσότερους από τέσσερις ορόφους και ορισμένα μπορούν να χαρακτηριστούν ως ουρανοξύστες η κατηγορία αυτή περιορίζεται στα κέντρα λίγων μεγάλων πόλεων

## 2.9 Μοντέλα ITU-R

Συχνά είναι δύσκολο να επιλεγεί το καλύτερο μοντέλο για μια δεδομένη εφαρμογή από τα πολλά που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο. Οι συστάσεις της Διεθνούς Ένωσης Τηλεπικοινωνιών αποτελούν μια καλή πηγή αναφοράς σε αυτή την περίπτωση, καθώς συνοψίζουν σε απλή μορφή συνιστάμενες διαδικασίες. Μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν πάντα το ακριβέστερο μοντέλο για μια δεδομένη περίπτωση, αλλά έχουν το πλεονέκτημα ότι είναι ευρέως αποδεκτές και χρησιμοποιούνται για σκοπούς συντονισμού και σύγκρισης. Δύο συστάσεις είναι ιδιαίτερα σημαντικές για το παρόν κεφάλαιο και συνοψίζονται συνοπτικά παρακάτω.

### 2.9.1. Σύσταση P.1411 της ITU-R

Η σύσταση P. 1411 [18] περιέχει ένα μοντέλο σχετικό με εφαρμογές μακροκυψελών, το οποίο είναι εφαρμόσιμο σε συστήματα μη οπτικής επαφής που λειτουργούν από 20 m έως 5 km. Το μοντέλο είναι ουσιαστικά μία εκδοχή του φυσικού μοντέλου COST 231 Walfisch-Ikegami με απλοποιημένες και γενικές διαδικασίες υπολογισμού. Το εύρος εγκυρότητας των προβλέψεων του συγκεκριμένου μοντέλου αναφέρεται ως εξής:

- $h_b$  : 4 - 50 m,
- $h_m$  : 1 - 3 m,
- $f_c$  : 800 - 2000MHz

### 2.9.2 Σύσταση P.1546 της ITU-R

Για μεγαλύτερες αποστάσεις έως και 1000 km η σύσταση P. 1546 [19] περιέχει χρήσιμα μοντέλα. Το μοντέλο βασίζεται σε σειρές καμπυλών (ή πινάκων), που προέρχονται από μετρήσεις, επιτρέποντας προβλέψεις για μακροκυψέλες ευρείας περιοχής και για εφαρμογές εκπομπής και σταθερής ασύρματης πρόσβασης. Εκτός από τις βασικές καμπύλες πρόβλεψης υπάρχει μια σειρά μεθόδων διόρθωσης για να ληφθούν υπόψη παράγοντες όπως οι μεταβολές του εδάφους, το πραγματικό ύψος της κεραιάς του σταθμού βάσης, οι διαδρομές που

διασχίζουν συνδυασμούς ξηράς και θάλασσας και οι προβλέψεις για διαφορετικά ποσοστά διαθεσιμότητας χρόνου. Η μέθοδος δίνει παρόμοια αποτελέσματα με το μοντέλο Okumura-Hata για αποστάσεις έως 10 km. Συνολικά η μέθοδος ισχύει για  $f_c = 30$  MHz έως 3 GHz και αποστάσεις από 1 έως 1000 km. Ως εκ τούτου, είναι εφαρμόσιμη σε ένα ευρύ φάσμα τύπων συστημάτων, συμπεριλαμβανομένων μακροκυψελών ευρείας περιοχής, συστημάτων ιδιωτικής κινητής ραδιοεπικοινωνίας και επίγειων δικτύων μετάδοσης βίντεο και ήχου.

## 2.10 Σύγκριση των Μοντέλων

Οι προβλέψεις απώλειας διάδοσης των περισσότερων μοντέλων που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο συγκρίνονται στον Πίνακα 2.3. Συγκεκριμένα, καταγράφονται ανά παράμετρο ( $n, f_c, h_b, h_m$ ) οι εκθέτες της μεταβολής της απώλειας διάδοσης που προβλέπει κάθε μοντέλο. Για παράδειγμα, ένα -2 στη στήλη κάθε  $h_b$  σημαίνει ότι το μοντέλο προβλέπει ότι η απώλεια διάδοσης είναι αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου του ύψους της κεραίας του σταθμού βάσης. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δύσκολο να εκφραστεί η διακύμανση με αυτή τη μορφή, αλλά κατά τα άλλα είναι χρήσιμο ως μέσο σύγκρισης.

Πίνακας 2.3 : Σύγκριση των εμπειρικών μοντέλων διάδοσης [6]

Μοντέλο	$n$	$h_b$	$h_m$	$f_c$
Ελεύθερος χώρος	2	0	0	2
Επίπεδη γη	4	-2	-2	0
Power Law	ΔΠ	0	0	0
Clutter Factor	4	-2	-2	0
Okumura-Hata				
COST231-Hata	$\alpha$	$b$	Εξίσωση (1.5)	$\approx 2.6$
Lee	2-4.3	-2	-1	NS

ΔΠ = δεν προσδιορίζεται,  $\alpha = 4.5 - 0.66 \log h_b$ ,  $b = -1.38 - 0.66 \log r$

## 2.11 Λογισμικά Υπολογισμού Απωλειών

Οι μέθοδοι που περιγράφονται σε αυτό το κεφάλαιο εφαρμόζονται συχνότερα για πρακτικό σχεδιασμό στο πλαίσιο λογισμικού υπολογιστών. Η ανάπτυξη τέτοιου λογισμικού έχει παρακινηθεί και καταστεί δυνατή από διάφορους παράγοντες όπως:

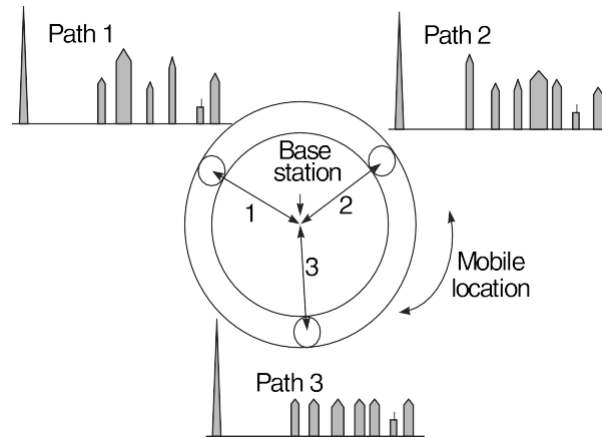
- η τεράστια αύξηση της ανάγκης για ακριβή και γρήγορο σχεδιασμό των δικτύων κάλυψης με κελιά,
- η ανάπτυξη γρήγορων και προσιτών υπολογιστικών πόρων,
- η ανάπτυξη γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, τα οποία καταγράφουν δεδομένα σχετικά με το έδαφος, το “Clutter” και τη χρήση της γης σε εύκολα προσβάσιμη και επεξεργάσιμη μορφή.

Τέτοιες τεχνικές έχουν εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα εμπορικά διαθέσιμων λογισμικών σχεδιασμού. Αν και οι περισσότερες εταιρείες του χώρου βασίζονται σε συνδυασμένα εμπειρικά και απλά φυσικά μοντέλα, αναμένεται ότι θα υπάρξει προοδευτική εξέλιξη στο μέλλον προς περισσότερο φυσικές ή φυσικό-στατιστικές μεθόδους, καθώς οι υπολογιστικοί πόροι συνεχίζουν να γίνονται φθηνότεροι, τα clutter δεδομένα βελτιώνονται σε ανάλυση και κόστος και καθώς η έρευνα αναπτύσσεται σε αριθμητικά αποτελεσματικούς αλγορίθμους πρόβλεψης απωλειών διάδοσης.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Σκίαση

### 3.1 Εισαγωγή

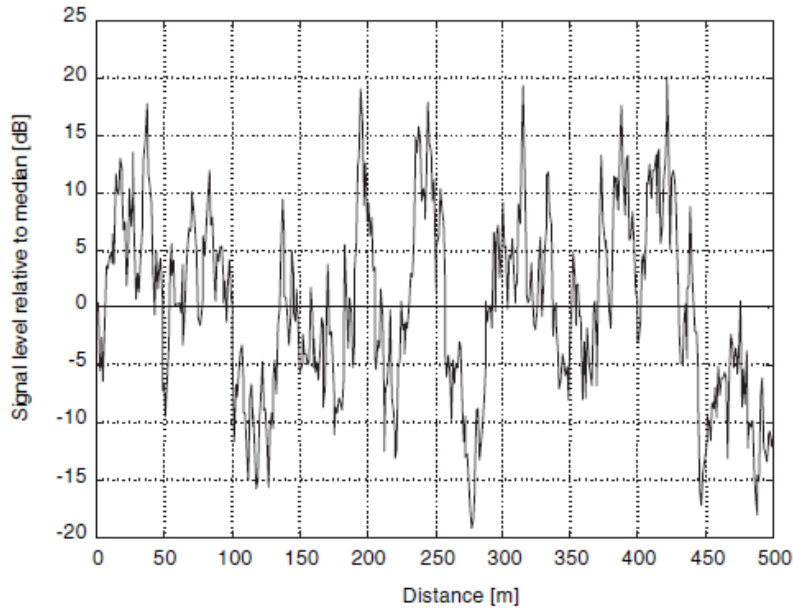
Τα μοντέλα της απώλειας διάδοσής μακροκυψέλης που περιεγράφηκαν στο κεφάλαιο 2 υποθέτουν πως η απώλεια διάδοσης είναι μία συνάρτηση που περιορίζεται σε παραμέτρους, όπως το ύψος της κεραίας, το περιβάλλον και η απόσταση. Η προβλεπόμενη απώλεια διάδοσης για ένα σύστημα που λειτουργεί σε συγκεκριμένο περιβάλλον θα είναι επομένως σταθερή για μία δεδομένη απόσταση βάσης-κινητού. Στην πράξη, παρ' όλα αυτά, το συγκεκριμένο είδος παρεμβαλλόμενων εμποδίων (κτίρια, δέντρα κ.τ.λ.) κατά μήκος μιας διαδρομής σε δεδομένη απόσταση θα είναι διαφορετικό για κάθε διαδρομή, προκαλώντας μεταβολές σε σχέση με την ονομαστική τιμή που αποδίδεται από τα μοντέλα απώλειας διάδοσης. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνεται από την μεγάλη διασπορά των μετρούμενων τιμών που είναι προφανής στις μετρήσεις Εικόνας 3.2. Είναι αναμενόμενο σε κάποιες διαδρομές να εμφανίζονται αυξημένες απώλειες, ενώ σε άλλες που η διάδοση είναι λιγότερο παρεμποδισμένη από ενδιάμεσα αντικείμενα οι απώλειες θα είναι μικρότερες, όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 3.1. Αυτή η διακύμανση των απωλειών σε διαφορετικές θέσεις της ίδιας απόστασης αποδίδεται στις αναμενόμενες διαφοροποιήσεις στο περιβάλλον που μεσολαβεί ανάμεσα στον κινητό χρήστη και τον σταθμό βάσης. Η σχετική διακύμανση των απωλειών αφορά το φαινόμενο της Σκίασης (Shadowing) [5]-[6]. Είναι ζωτικής σημασίας να ληφθεί υπόψιν εκ των προτέρων έτσι ώστε να προβλεφθεί η αξιοπιστία της κάλυψης που παρέχεται από οποιοδήποτε σύστημα κινητής τηλεφωνίας.



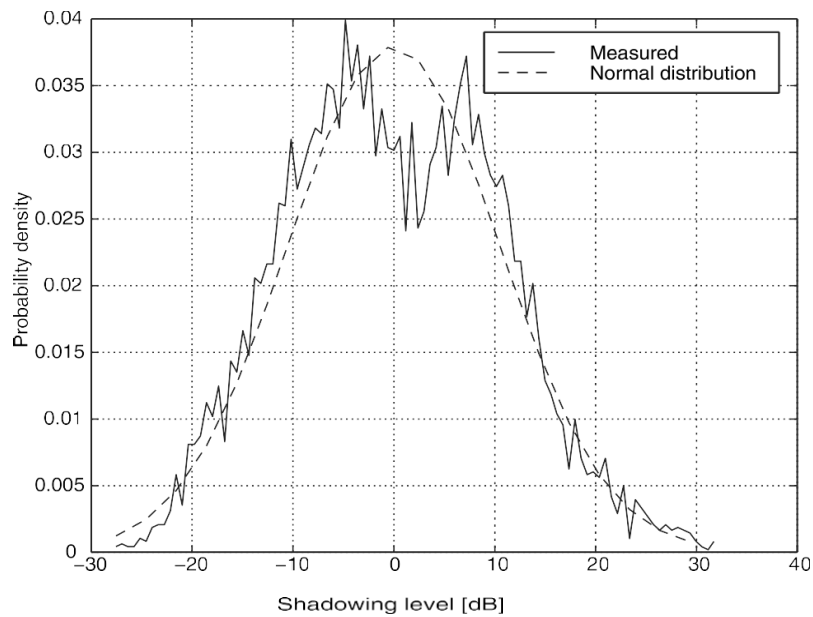
Εικόνα 3.1 : Διαφοροποίηση των προφίλ διάδοσης αι σε σταθερή ακτίνα από σταθμό βάσης [6].

### 3.2 Στατιστικός Χαρακτηρισμός

Αν ένα κινητό οδηγείται γύρω από έναν σταθμό βάσης (BS) σε σταθερή απόσταση, τότε το μέσο επίπεδο του τοπικού σήματος τυπικά θα εμφανίζει τα γενικά χαρακτηριστικά της Εικόνας 3.2, αφού αφαιρεθεί το μέσο επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος (50%) σε dB. Υπολογίζοντας τη συνάρτηση της πυκνότητας πιθανότητας των διακυμάνσεων του σήματος, προκύπτει ένα αποτέλεσμα ανάλογο αυτού της Εικόνας 3.3. Η κατανομή της διακύμανσης της ισχύος σήματος είναι *log-normal*, αυτό σημαίνει πως το σήμα μετρημένο σε dB υπακούει στην κανονική (Gaussian) κατανομή. Η στοχαστική αυτή διακύμανση είναι γνωστή ως Σκίαση. Η μεταβολή της λαμβανόμενης ισχύος λόγω σκίασης οφείλεται στη φυσική διαφοροποίηση της διαδρομής διάδοσης, όταν ο κινητός χρήστης μετακινείται σε διαφορετικές θέσεις που απέχουν σημαντική απόσταση μεταξύ τους, π.χ. σε αποστάσεις συγκρίσιμες με το πλάτος των κτηρίων και λόφων στην περιοχή του κινητού, συνήθως δεκάδες ή εκατοντάδες μέτρα.



Εικόνα 3.2: Τυπική μεταβολή της σκίασης συναρτήσει της θέσης του κινητού σε σταθερή απόσταση από τον σταθμό βάσης [6].



Εικόνα 3.3: Συνάρτηση για την πυκνότητα πιθανότητας της σκίασης [6].

Η τυπική απόκλιση  $\sigma_L$  της κανονικής κατανομής είναι γνωστή ως μεταβλητότητα τοποθεσίας και ουσιαστικά αποτελεί ένα μέτρο της ομοιομορφίας του περιβάλλοντος διάδοσης. Η μεταβλητότητα τοποθεσίας ποικίλει ανάλογα με την συχνότητα, το ύψος της κεραίας και το περιβάλλον. Είναι μεγαλύτερη στις κατοικημένες περιοχές και μικρότερη σε ανοιχτούς χώρους. Κυμαίνεται συνήθως μεταξύ 5-12 dB (παράγραφος 3.5). Η τιμή στις Εικόνες 3.2 και 3.3 είναι 8 dB.



### 3.3 Η Φυσική Υπόσταση της Σκίασης

Η εφαρμογή μιας *log-normal* κατανομής για τα μοντέλα σκίασης μπορεί να αιτιολογηθεί ως ακολούθως. Αν θεωρηθεί πως οι παράγοντες (εμπόδια) στην εξασθένιση του σήματος κατά μήκος της διαδρομής διάδοσης δρουν ανεξάρτητα, τότε η συνολική εξασθένιση  $A$ , ως αναλογία ισχύος, λόγω των  $N$  διακριτών παραγόντων  $A_1, \dots, A_N$  θα είναι απλά το γινόμενο των παραγόντων.

$$A = A_1 \times A_2 \times \dots \times A_N \quad (3.1)$$

Εκφράζοντας την εξίσωση (3.1) σε λογαριθμική μορφή καταλήγουμε σε ένα άθροισμα απωλειών των  $N$  διακριτών παραγόντων

$$L = L_1 + L_2 + \dots + L_N \quad (3.2)$$

Εάν οι  $L_i$  παράγοντες θεωρηθούν ως τυχαίες και ανεξάρτητες μεταβλητές, τότε το θεώρημα κεντρικού ορίου παραμένει σε ισχύ και το  $L$  είναι τυχαία *Gaussian* μεταβλητή. Επομένως το  $A$  πρέπει να είναι *log-normal*.

Στην πράξη, δεν συνεισφέρουν όλες οι απώλειες ισομερώς, με εκείνες που βρίσκονται πιο κοντά στην τοποθεσία του κινητού να είναι πιο πιθανόν να έχουν επίδραση στις μακροκυψέλες. Επιπλέον, οι επιδράσεις από μεμονωμένα εμπόδια δεν μπορούν απλά να προστεθούν, επομένως η υπόθεση της ανεξαρτησίας δεν είναι απόλυτα έγκυρη. Παρ' όλα αυτά, όταν ληφθούν υπόψη τα διαφορετικά κτήρια ως προς το ύψος, τις αποστάσεις και τις κατασκευαστικές μεθόδους, παράλληλα με την εξασθένιση λόγω των δέντρων, η συνάρτηση κατανομής των απωλειών σκίασης που προκύπτει είναι πράγματι πολύ κοντά στη *log-normal* [20] [21].

### 3.4 Σκίαση: Επίδραση στην Κάλυψη στο Σύνορο του Κελιού

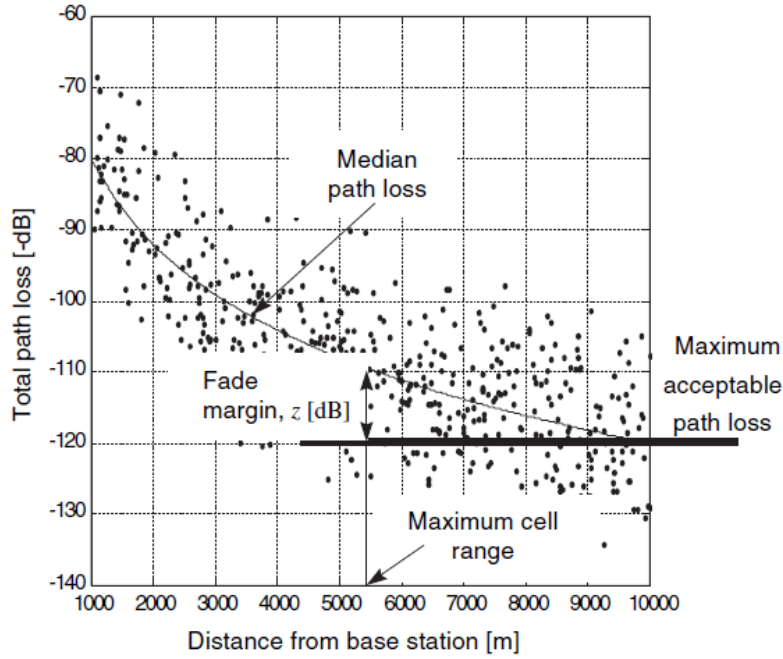
Όταν λαμβάνεται υπόψη η σκίαση, η συνολική απώλεια διάδοσης γίνεται τυχαία μεταβλητή και μπορεί να εκφρασθεί ως εξής:

$$L = L_{50} + L_S \quad (3.3)$$

όπου  $L_{50}$  είναι το επίπεδο που δεν υπερβαίνει το 50% των τοποθεσιών μιας δεδομένης απόστασης, όπως προβλέπεται από οποιοδήποτε βασικό μοντέλο απώλειας διάδοσης (η μέση τοπική απώλεια διάδοσης) που περιγράφεται στο κεφάλαιο 1. Το  $L_S$  είναι ο όρος που αντιπροσωπεύει τη σκίαση, ως μια τυχαία Gaussian μεταβλητή με μηδενική μέση τιμή και τυπική απόκλιση  $\sigma_L$ . Η συνάρτηση για την πυκνότητα πιθανότητας του  $L_S$  δίνεται επομένως από τη γνωστή Gaussian εξίσωση:

$$p(L_S) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{L_S^2}{2\sigma_L^2} \right] \quad (3.4)$$

Επομένως, για την παροχή αξιόπιστων επικοινωνιών σε δεδομένη απόσταση, είναι αναγκαίο να προστεθεί ένα επιπλέον περιθώριο εξασθένισης στο ενεργειακό ισοζύγιο της ζεύξης προκειμένου να αντισταθμιστούν οι απώλειες σκίασης με πιθανότητα ανάλογη της διαθεσιμότητας που απαιτείται από το σύστημα. Στην Εικόνα 3.4, η ακτίνα της κυψέλης θα ήταν περίπου 9.5 χλμ. αν είχε αγνοηθεί η σκίαση, και τότε μόνο το 50% των τοποθεσιών στην άκρη της κυψέλης θα είχε κάλυψη. Συμπεριλαμβάνοντας το περιθώριο εξασθένισης λόγω σκίασης, η ακτίνα της κυψέλης μειώνεται περίπου στα 5,5 χλμ. αλλά η αξιοπιστία της κάλυψης αυξάνεται σημαντικά, καθώς πολύ μικρότερο ποσοστό σημείων υπερβαίνουν την μέγιστη αποδεκτή απώλεια διάδοσης.



Εικόνα 3.4: Επίδραση του περιθωρίου σκίασης στην ακτίνα της κυψέλης [6].

Η πιθανότητα η σκίαση να αυξάνει την μέση απώλεια διάδοσης κατά τουλάχιστον  $z$ [dB] δίνεται από την ακόλουθη έκφραση:

$$\Pr[L_S > z] = \int_{L_S=z}^{\infty} p(L_S) dL_S = \int_{L_S=z}^{\infty} \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{L_S^2}{2\sigma_L^2}\right] dL_S \quad (3.5)$$

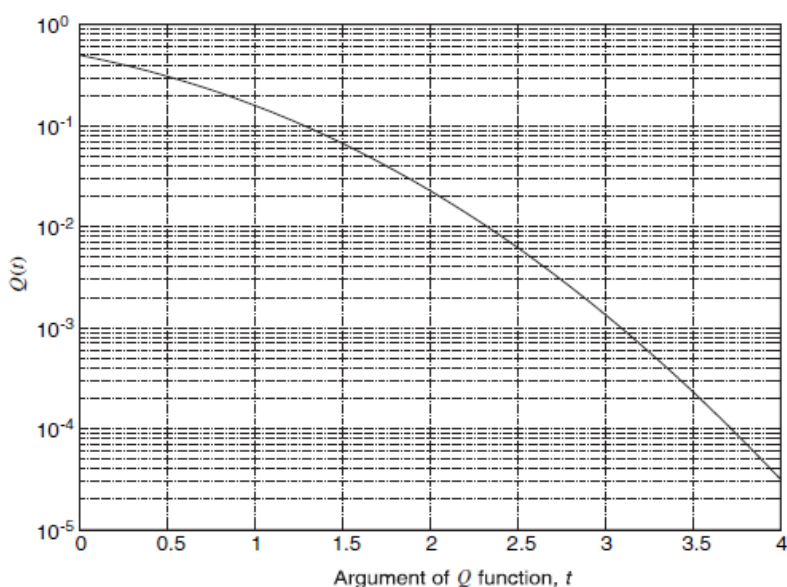
Εάν κανονικοποιηθεί η μεταβλητή ολοκλήρωσης  $z$  ως προς την μεταβλητότητα της τοποθεσίας  $\sigma_L$ , τότε η εξίσωση (3.5) μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

$$\Pr[L_S > z] = \int_{x=z/\sigma_L}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx = Q\left(\frac{z}{\sigma_L}\right) \quad (3.6)$$

όπου η συνάρτηση  $Q(\cdot)$  είναι η συμπληρωματική σωρευτική κανονική κατανομή. Οι τιμές για την  $Q$  υπολογίζονται από την  $erfc(\cdot)$ , την βασική συνάρτηση σωρευτικού σφάλματος, χρησιμοποιώντας την ακόλουθη σχέση:

$$Q(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x=t}^{\infty} \exp\left[-\frac{x^2}{2}\right] dx = \frac{1}{2} erfc\left(\frac{t}{\sqrt{2}}\right) \quad (3.7)$$

Η  $Q(t)$  αναπαριστάται γραφικά στην Εικόνα 3.5 και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εκτιμηθεί το απαραίτητο περιθώριο σκίασης για κάθε μεταβλητότητα τοποθεσίας  $\sigma_L$  σε συνάρτηση με την εξίσωση (3.7) θέτοντας  $t = z / \sigma_L$ .



Εικόνα 3.5: Η συνάρτηση  $Q$  [6]

Η σκίαση έχει ξεκάθαρα σημαντική επίδραση στη μείωση της ακτίνας της κυψέλης σε σχέση με την προβλεπόμενη τιμή. Είναι επίσης σημαντικό να έχουμε καλή γνώση της μεταβλητότητας της τοποθεσίας. Αυτό εξετάζεται στην ενότητα 3.5.

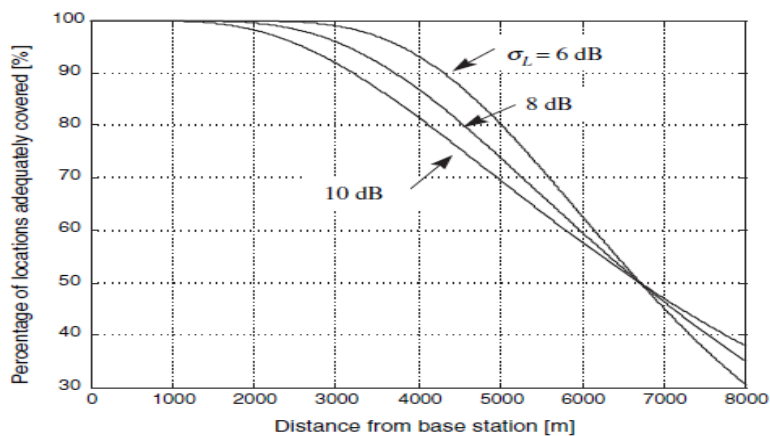
### 3.5 Σκίαση: Επίδραση στην Κάλυψη στο Σύνολο του Κελιού

Η Εικόνα 3.6 δείχνει ότι, παρόλο που οι τοποθεσίες στο σύνορο του κελιού μπορούν να έχουν μόνο μία πιθανότητα 90% επιτυχούς επικοινωνίας, τα περισσότερα κινητά θα βρίσκονται πιο κοντά στο σταθμό βάσης από αυτές, και συνεπώς θα επιτυγχάνουν σημαντικά καλύτερη κάλυψη. Είναι ίσως πιο κατάλληλο να σχεδιαστεί το σύστημα με όρους πιθανότητας κάλυψης που αφορούν την συνολική περιοχή του κελιού. Η ακόλουθη ανάλυση είναι παρόμοια με αυτήν του [22].

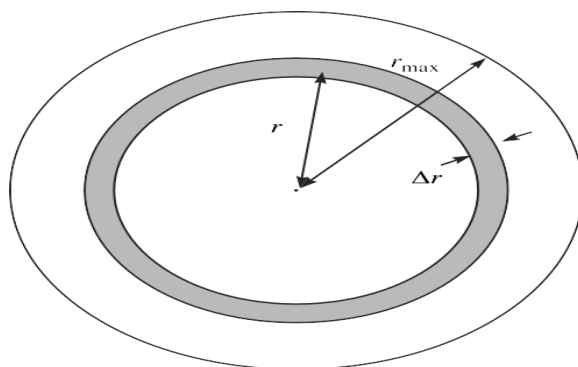
Η Εικόνα 3.7 δείχνει μία κυψέλη ακτίνας  $r_{max}$ , με έναν αντιπροσωπευτικό

δακτύλιο ακτίνας  $r$ , μικρού πλάτους  $\Delta r$ , μέσα στον οποίο το ενδεχόμενο κάλυψης είναι  $p_e(r)$ . Η περιοχή που καλύπτεται από τον δακτύλιο είναι  $(2\pi r)\Delta r$ . Το ενδεχόμενο κάλυψης για όλη την κυψέλη,  $p_{cell}$ , είναι τότε το άθροισμα της περιοχής που σχετίζεται με όλους αυτούς τους δακτυλίους με ακτίνα 0 έως  $r_{max}$ , πολλαπλασιασμένο με τα αντίστοιχα ποσοστά κάλυψης και διαιρεμένο με την ολική περιοχή της κυψέλης,  $(\pi r_{max}^2)$ . Καθώς η ακτίνα των δακτυλίων μειώνεται, το άθροισμα παίρνει μορφή ολοκληρώματος στο όριο  $\Delta r \rightarrow 0$ , και έχουμε την εξής διατύπωση:

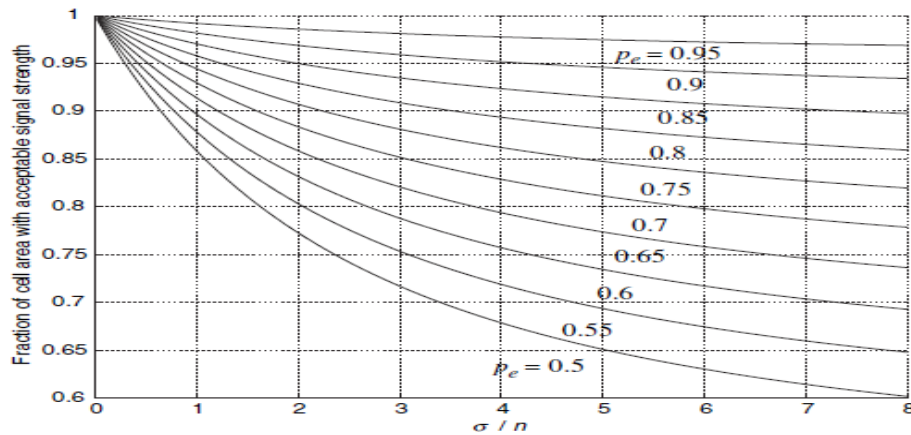
$$p_{cell} = \frac{1}{\pi r_{max}^2} \int_{r=0}^{r=r_{max}} p_e(r) \times 2\pi r dr = \frac{2}{r_{max}^2} \int_{r=0}^{r=r_{max}} r p_e(r) dr \quad (3.8)$$



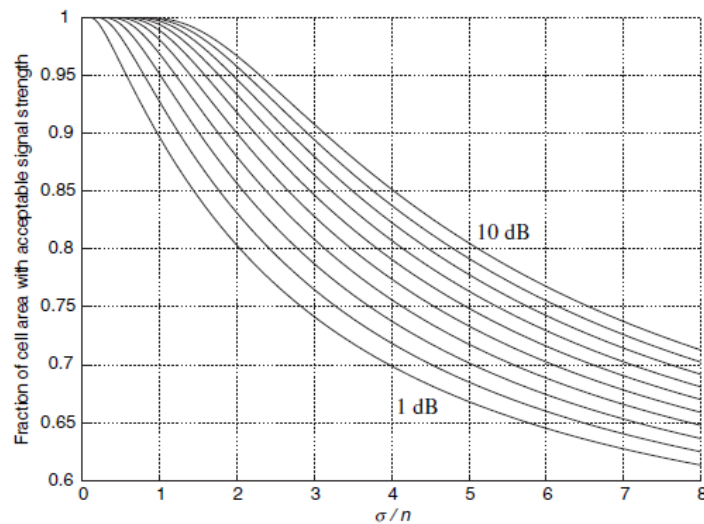
Εικόνα 3.6: Μεταβολή του ποσοστού κάλυψης με την απόσταση [6].



Εικόνα 3.7: Συνολική περιοχή κάλυψης κυψέλης αθροίζοντας παράγοντες από όλες τις αποστάσεις [6].



Εικόνα 3.8: Πιθανότητα διαθεσιμότητας στη συνολική περιοχή της κυψέλης, με παράμετρο  $p_e$ .



Εικόνα 3.9: Ενδεχόμενο διαθεσιμότητας σε όλη την περιοχή της κυψέλης, με παράμετρο το περιθώριο εξασθένισης, μεταβαλλόμενο μεταξύ 1-10dB σε βήματα του 1dB.

Λαμβάνοντας υπόψη την εξίσωση (3.7) προκύπτει :

$$p_{cell} = \frac{1}{2} + \frac{1}{r_{max}^2} \int_{r=0}^{r=r_{max}} r \operatorname{erf}\left(\frac{L_m - L(r)}{\sigma_L \sqrt{2}}\right) dr \quad (3.9)$$

όπου  $\operatorname{erf}(x) = 1 - \operatorname{erfc}(x)$ ,  $L_m$  είναι οι μέγιστες δυνατές απώλειες και  $L(r)$  είναι οι

μέσες απώλειες διάδοσης σε απόσταση  $r$ .

Η εξίσωση (3.9) μπορεί να υπολογιστεί αριθμητικά για οποιοδήποτε επιθυμητό μοντέλο απωλειών διάδοσης  $L(r)$ . Στην ειδική περίπτωση του μοντέλου απωλειών διάδοσης power law, το αποτέλεσμα μπορεί να προσδιοριστεί αναλυτικά εφόσον υιοθετηθεί η αντίστοιχη έκφραση για το power law μοντέλο απωλειών διάδοσης του Κεφαλαίου 1:

$$L(r) = L(r_{ref}) + 10n \log\left(\frac{r}{r_{ref}}\right) \quad (3.10)$$

όπου  $n$  είναι ο συντελεστής απωλειών διάδοσης.

Συνδυάζοντας, τις εξισώσεις (3.9) και (3.10), το τελικό αποτέλεσμα είναι:

$$P_{cell} = p_e(r_{max}) + 1/2 \exp(A) \times (1 - \operatorname{erf} b) \quad (3.11)$$

όπου

$$A = \left(\frac{\sigma_L \sqrt{2}}{10n \log e}\right)^2 + \frac{2M}{10n \log e}, B = \frac{\sigma_L \sqrt{2}}{10n \log e} + \frac{2M}{\sigma_L \sqrt{2}}, M = L_m - L(r)$$

Να σημειωθεί η ευθεία εξάρτηση του  $p_{cell}$  με το  $p_e(r_{max})$ , δηλ. την διαθεσιμότητα στο σύνορο της κυψέλης. Τα αποτελέσματα από την (3.11) απεικονίζονται στις Εικόνες 3.8 και 3.9.

### 3.6 Μεταβλητότητα Τοποθεσίας

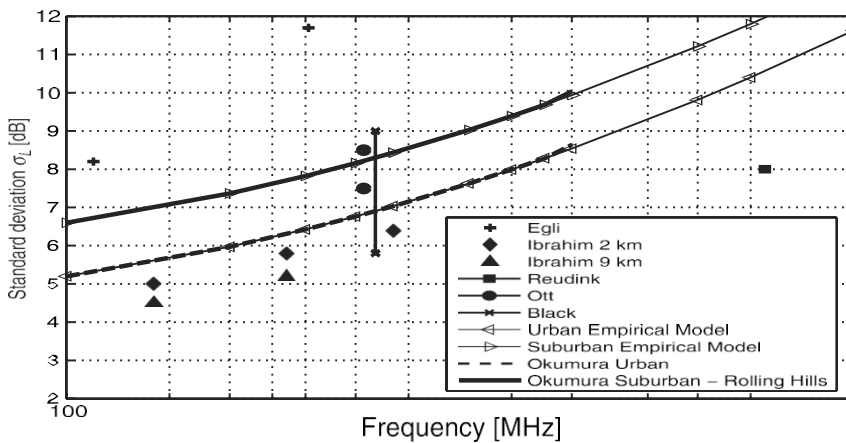
Η Εικόνα 3.10 δείχνει την μεταβολή στην μεταβλητότητα τοποθεσίας  $\sigma_L$  με την συχνότητα, όπως μετρήθηκε σε διάφορες μελέτες. Είναι προφανές πως υπάρχει η τάση η  $\sigma_L$  να αυξάνει με την συχνότητα και πως εξαρτάται από το περιβάλλον. Οι

προαστιακές περιοχές έχουν την τάση να παρουσιάζουν την ευρύτερη μεταβλητότητα, εξαιτίας της μεγάλης διαφοροποίησης στα χαρακτηριστικά των τοπικών παρεμβαλλόμενων εμποδίων. Οι αστικές περιοχές έχουν κάπως μικρότερη μεταβλητότητα, παρόλο που η συνολική απώλεια διαδρομής θα είναι μεγαλύτερη. Δεν έχει αναφερθεί συνεχής μεταβολή με εύρος. Οι μεταβολές στις μετρήσεις [Ibrahim, 83] στα 2-9 χλμ. οφείλονται στις διαφορές του τοπικού περιβάλλοντος. Να σημειωθεί επίσης πως είναι πιθανά δύσκολο να συγκριθούν τιμές από την βιβλιογραφία καθώς η σκίαση θα πρέπει κανονικά να εξαιρεί τις επιδράσεις της εξασθένησης σύνθετης διάδοσης, πράγμα το οποίο απαιτεί προσεκτική συλλογή στοιχείων σε κατάλληλη απόσταση.

Η Εικόνα 3.10 επίσης περιλαμβάνει γραφήματα από μια εμπειρική σχέση προσαρμοσμένα στις καμπύλες [Okumura, 68] ώστε να παρουσιάζονται ομαλές διακυμάνσεις έως 20 GHz. Αυτό δίνεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\sigma_L = 0.65(\log f_c)^2 - 1.3 \log f_c + A \quad (3.12)$$

όπου  $A=5.2$  στην αστική περιοχή και  $6.6$  στην προαστιακή περιοχή. Να σημειωθεί πως αυτές οι τιμές εφαρμόζονται μόνο σε μακροκυψέλες.



Εικόνα 3.10: Μεταβλητότητα τοποθεσίας έναντι συχνότητας. Τιμές μετρήσεων από [Okumura, 68], [Egli, 57],[Reudink, 72], [Ott, 74], [Black, 72] and [Ibrahim, 83]. [After Jakes, 94] [Okumura, 68].



#### 4.1. Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται οι μετρήσεις που ελήφθησαν μέσω του λογισμικού Atoll σε δύο διαφορετικούς σταθμούς βάσης, οι οποίοι έχουν επιλεγεί έτσι ώστε ο κάθε ένας από αυτούς να αντιστοιχεί σε διαφορετικό περιβάλλον ασύρματης διάδοσης (αστικό με μέτριας και υψηλής πυκνότητας δόμηση). Οι μετρήσεις-εκτιμήσεις του λογισμικού Atoll χρησιμοποιούνται ως πειραματικά δεδομένα προς επεξεργασία προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για τις βέλτιστες τιμές των εκάστοτε ελεύθερων παραμέτρων των ακόλουθων μοντέλων υπολογισμού των μέσων απωλειών ασύρματης διάδοσης:

- Μοντέλο “Power Law”
- Μοντέλο “Clutter Factor”
- Μοντέλο “Okumura-Hata” και “COST 231-Hata”
- Μοντέλο “Lee”

Ειδικότερα, στην ενότητα 4.2 παρουσιάζεται η μεθοδολογία επεξεργασίας των μετρήσεων, η οποία υιοθετείται για την επεξεργασία των μετρήσεων. Στις ενότητες 4.3 – 4.5 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της επεξεργασίας των μετρήσεων για τους δύο υπό εξέταση σταθμούς βάσης.

#### 4.2. Μεθοδολογία Ανάλυσης Μετρήσεων

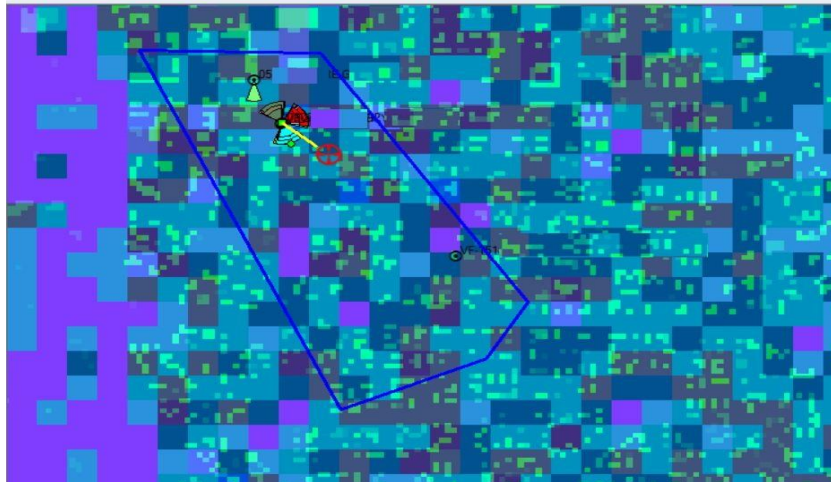
Για την λήψη των μετρήσεων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Atoll που είναι μια πλατφόρμα σχεδίασης και βελτιστοποίησης ασύρματων δικτύων και μας προσφέρει πραγματικές μετρήσεις διάδοσης μέσω προσομοίωσης όλων των τύπων δικτύωσης (2G-3G-4G-5G) .

Επιλέχθηκαν δύο σταθμοί βάσης εντός Ελλάδος , σε αστική και προαστιακή περιοχή.

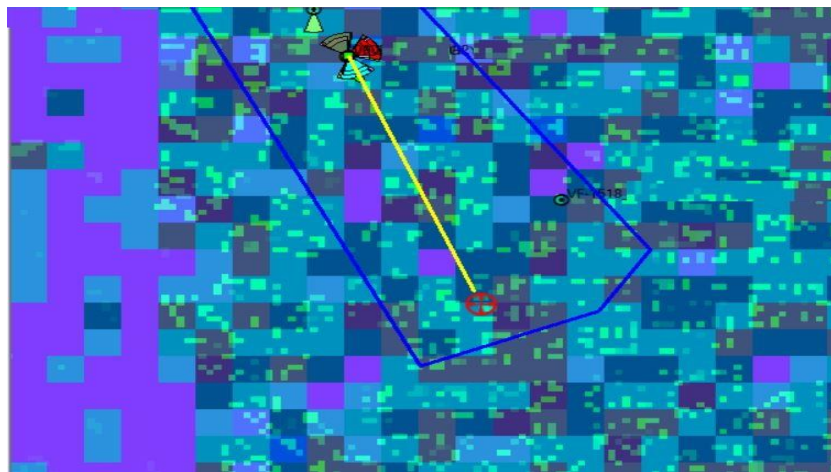
Η διαδικασία που ακολουθήθηκε στην καταγραφή των μετρήσεων είναι η εξής :

- Για κάθε ένα σταθμό βάσης ελήφθησαν «μετρήσεις» της ισχύος λήψης σε dBm μέσω του λογισμικού AtoI1 για 2 συχνότητες , 900MHz και 2100MHz .
- Καταγράφηκαν 10 διαφορετικά σημεία με βήμα ανά 100m (100m – 1000m) απόσταση κάθε ένα από το σταθμό βάσης.
- Σε κάθε σημείο καταγράφηκαν 10 μετρήσεις σε κυκλικό τόξο από τον σταθμό βάσης, συνολικά 100 μετρήσεις ανά σταθμό και συχνότητα.

Οι Εικόνες 4.1 και 4.2 καταγράφουν χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από τον ορισμό των δύο σημείων μέτρησης σε απόσταση από το σταθμό βάσης A 100 m και 500 m, αντίστοιχα.

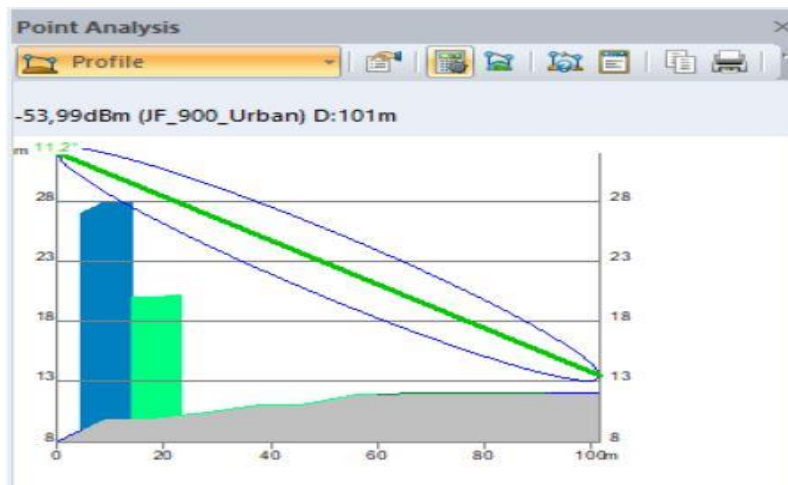


Εικόνα 4.1: Σημείο μέτρησης σε απόσταση 100m από τον σταθμό βάσης A – 900MHz

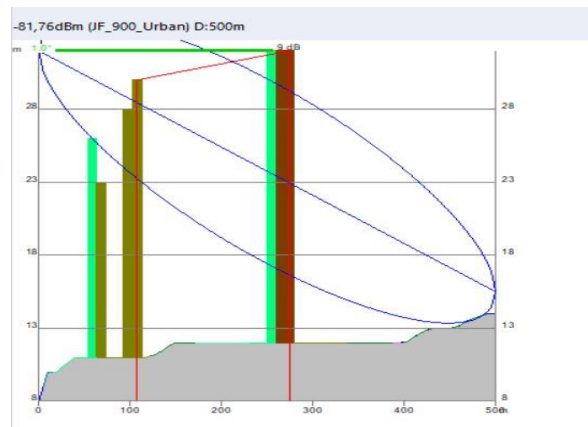


Σχήμα 4.2: Σημείο μέτρησης σε απόσταση 500m από τον σταθμό βάσης A – 900MHz

Μετά τον ορισμό του σημείου μέτρησης το λογισμικό προσομοίωσης Atoll μπορεί να υπολογίσει την λαμβανόμενη ισχύ σε αυτό το σημείο λαμβάνοντας και την παρουσία εμποδίων όπως για παράδειγμα τα διάφορα κτήρια, τα οποία μεσολαβούν μεταξύ του σημείου μέτρησης και της κεραίας του σταθμού βάσης. Η απεικόνιση της διαδρομής της ασύρματης διάδοσης για την περίπτωση των σημείων μέτρησης των Εικόνων 4.1 και 4.2 παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.3 και 4.4, αντίστοιχα. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στις Εικόνες 4.3 και 4.4 λαμβάνονται υπόψη τα κτήρια τα οποία παρεμβάλλονται στη ζεύξη και πραγματοποιούνται υπολογισμοί της ισχύος λήψης που λαμβάνει τιμές  $-53.99 \text{ dBm}$  και  $-81,76 \text{ dBm}$  , αντίστοιχα.



Εικόνα 4.3 : Απεικόνιση διαδρομής διάδοσης σε απόσταση 100m από το σταθμό Βάσης A και υπολογισμός λαμβανόμενης ισχύος στα 900MHz

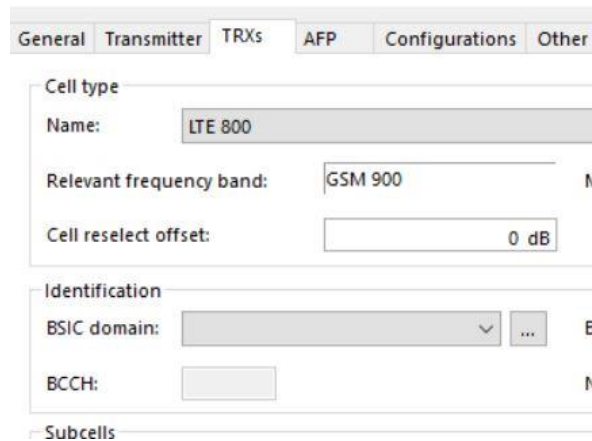


Εικόνα 4.4 : Απεικόνιση διαδρομής διάδοσης σε απόσταση 500m – 900MHz

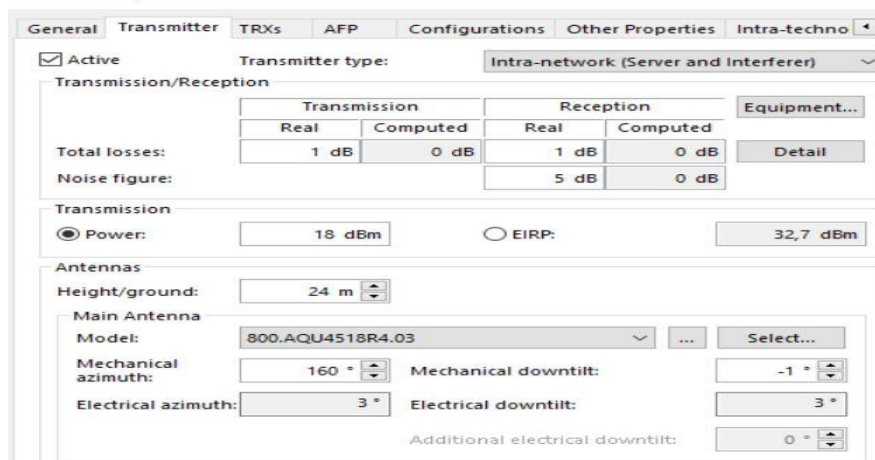
Σε κάθε σταθμό βάσης υπάρχουν στο Atoll καταχωρημένα στοιχεία σχετικά με τη λειτουργία του, τα οποία είναι απαραίτητα στον υπολογισμό διάδοσης:

- η συχνότητα λειτουργίας του  $f_c$
- το ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης  $h_b$
- την ισοδύναμη ιστροπικά ακτινοβολούμενη ισχύ ( $EIRP$ )
- τις απώλειες (Antenna Loss) σε σχέση με την EIRP τιμή, όταν ληφθεί υπόψη η κλίση της ζεύξης σε κάθε σημείο μέτρησης και επομένως όταν ληφθεί υπόψη το διάγραμμα ακτινοβολίας της εκάστοτε κεραίας

Οι Εικόνες 4.5 και 4.6 παρουσιάζουν χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από τα καταχωρημένα δεδομένα για τον Σταθμό Βάσης Α.



Εικόνα 4.5 : Συχνότητα εκπομπής 900MHz της κεραίας του Σταθμού Βάσης



Εικόνα 4.6 : Ύψος κεραίας 24m και EIRP 32,7 dBm για τον Σταθμό Βάσης Α – 900 MHz.

Σε κάθε ένα σημείο μέτρησης υπολογίζονται οι απώλειες διάδοσης λαμβάνοντας υπόψη τα δεδομένα για το EIRP του κάθε σταθμού βάσης, τις απώλειες της κεραίας (Antenna Loss, AL) και τέλος την εκτιμώμενη από το Atoll ισχύ λήψης  $P_r$ :

$$PL_{exp} (dB) = EIRP (dBm) - AL(dB) - P_r (dBm) \quad (4.1)$$

Εφόσον υπολογιστούν οι απώλειες διάδοσης για κάθε μία από τις προαναφερόμενες αποστάσεις (100 m – 1000 m), ακολούθως υπολογίζεται η μέση τιμή των απωλειών για τα 10 σημεία μετρήσεων που λαμβάνονται υπόψη. Με αναφορά στα υπολογιστικά δεδομένα για τις μέσες απώλειες διάδοσης εξετάζεται το κάθε ένα από τα υπό εξέταση μοντέλα διάδοσης. Για κάθε ένα από τα εν λόγω μοντέλα διάδοσης επιλέγεται μια ελεύθερη παράμετρος και επιχειρείται να προσδιοριστεί η βέλτιστη τιμή της για το εκάστοτε περιβάλλον (Αστικό, Προαστιακό) και συχνότητα διάδοσης (900 MHz και 2100 MHz). Ο προσδιορισμός της βέλτιστης τιμής υπολογίζεται με κριτήριο το ελάχιστο τετραγωνικό σφάλμα (Least Square Error, LSE) ανάμεσα στις εκτιμήσεις του μοντέλου και τους υπολογισμούς που βασίζονται στις πειραματικές μετρήσεις του Atoll.

Ο προσδιορισμός της βέλτιστης τιμής των ελεύθερων παραμέτρων των υπό μελέτη μοντέλων εκτίμησης των μέσων απωλειών διάδοσης δίνει τη δυνατότητα να υπάρξει μία θεωρητική εκτίμηση των μέσων απωλειών  $\overline{PL}_{est}$ . Αφαιρώντας τη θεωρητικά εκτιμώμενη τιμή απωλειών  $\overline{PL}_{est}$  από τις 1000 πειραματικές τιμές προκύπτουν 1000 πειραματικές τιμές σκίασης  $X_\sigma$ , ως εξής:

$$X_\sigma(dB) = PL_{exp} (dB) - \overline{PL}_{est}(dB) \quad (4.2)$$

Με τη χρήση του dfittool GUI της MATLAB οι 1000 πειραματικές τιμές σκίασης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υπολογιστεί η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση

της log-normal κατανομής, η οποία περιγράφει στατιστική πυκνότητα πιθανότητας των απωλειών σκίασης.

### 4.3 Σταθμός βάσης A (Αστικό Περιβάλλον με Μέτριας Πυκνότητας Δόμηση)

#### 4.3.1. Μετρήσεις AtoH και Υπολογισμός Απωλειών Διάδοσης

Οι μετρήσεις AtoH για την ισχύ λήψης στον Σταθμό Βάσης A και τη συχνότητα των 900 MHz καταγράφονται στους Πίνακες A.1 και A.2 του Παραρτήματος A. Με τη χρήση της εξίσωσης 4.1 υπολογίζονται οι απώλειες διάδοσης και καταγράφονται στους Πίνακες 4.1 (100 m – 500 m) και 4.2 (600 m – 1000 m).

Πίνακας 4.1. Πειραματικές τιμές AtoH σε αποστάσεις 100 m -500 m σε συχνότητα λειτουργίας 900 MHz.

Πειραματικές Απώλειες Διάδοσης – 900MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	74.37 dB	107.513 dB	106.969 dB	113.8154 dB	116.3559 dB
2	74.19 dB	78.057 dB	107.1368 dB	111.9854 dB	115.8064 dB
3	74.39 dB	106.8719 dB	107.6675 dB	110.5966 dB	115.507 dB
4	94.94 dB	82.7129 dB	112.5768 dB	114.0338 dB	119.6075 dB
5	93.75 dB	102.1395 dB	111.3987 dB	112.924 dB	118.4166 dB
6	74.60 dB	103.7657 dB	108.494 dB	114.0353 dB	119.1478 dB
7	74.28 dB	100.5784 dB	112.3579 dB	112.8266 dB	117.2592 dB
8	74.16 dB	99.9234 dB	108.828 dB	115.2126 dB	118.3896 dB
9	74.31 dB	81.9024 dB	108.6597 dB	114.2796 dB	113.6554 dB
10	74.10 dB	83.5402 dB	89.9887 dB	109.3062 dB	93.4439 dB

Πίνακας 4.2. Πειραματικές τιμές Atoll σε αποστάσεις 600 m -1000 m σε συχνότητα λειτουργίας 900 MHz.

Πειραματικές Απώλειες Διάδοσης – 900MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	119.0638 dB	119.5942 dB	123.6634 dB	113.8154 dB	116.3559 dB
2	119.4033 dB	120.6397 dB	127.348 dB	111.9854 dB	115.8064 dB
3	117.9391 dB	121.4877 dB	121.2171 dB	110.5966 dB	115.507 dB
4	117.6145 dB	119.3715 dB	120.0083 dB	114.0338 dB	119.6075 dB
5	119.8095 dB	118.5261 dB	121.3752 dB	112.924 dB	118.4166 dB
6	122.113 dB	122.6398 dB	120.4848 dB	114.0353 dB	119.1478 dB
7	117.3122 dB	123.9665 dB	126.5124 dB	112.8266 dB	117.2592 dB
8	122.5337 dB	121.7136 dB	127.2809 dB	115.2126 dB	118.3896 dB
9	122.4023 dB	113.9848 dB	123.2533 dB	114.2796 dB	113.6554 dB
10	110.0257 dB	123.695 dB	123.1511 dB	109.3062 dB	93.4439 dB

Με ανάλογο τρόπο υπολογίζονται οι πειραματικές απώλειες διάδοσης σε συχνότητα λειτουργίας 2100 MHz. Οι πρωτογενείς πειραματικές τιμές της λαμβανόμενης ισχύος καταγράφονται στους Πίνακες A.3 και A4 του Παραρτήματος A, ενώ οι υπολογιζόμενες τιμές απωλειών διάδοσης καταγράφονται στους Πίνακες 4.3 και 4.4.

Πίνακας 4.3. Πειραματικές τιμές Atoll σε αποστάσεις 100 m -500 m σε συχνότητα λειτουργίας 2100 MHz.

Πειραματικές Απώλειες Διάδοσης – 2100MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	83.0781 dB	112.9799 dB	115.4581 dB	119.980 dB	123.7321 dB
2	82.8859 dB	113.1731 dB	115.5808 dB	120.041 dB	123.7997 dB
3	83.0732 dB	111.9614 dB	115.0048 dB	119.001 dB	123.0944 dB
4	101.91 dB	91.8268 dB	118.8273 dB	121.905 dB	125.6519 dB
5	100.54 dB	108.4379 dB	118.3066 dB	120.465 dB	125.2246 dB

6	82.64 dB	109.7392 dB	115.5082 dB	121.286 dB	126.6845 dB
7	82.31 dB	107.2608 dB	117.994 dB	121.491 dB	124.3211 dB
8	82.39 dB	109.678 dB	118.0813 dB	123.665 dB	123.937 dB
9	82.31 dB	92.707 dB	117.7741 dB	121.139 dB	121.8141 dB
10	82.781 dB	93.6465 dB	100.0297 dB	117.72 dB	103.1576 dB

Πίνακας 4.4. Πειραματικές τιμές Atoll σε αποστάσεις 600 m -1000 m σε συχνότητα λειτουργίας 2100 MHz.

Πειραματικές Απώλειες Διάδοσης – 2100MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	126.2466 dB	127.3891 dB	130.7082 dB	131.4357 dB	135.0511 dB
2	125.6487 dB	128.3615 dB	136.0075 dB	129.7495 dB	132.8463 dB
3	125.3450 dB	129.3170 dB	130.4418 dB	127.1722 dB	131.6266 dB
4	125.2397 dB	127.8835 dB	128.1647 dB	130.0166 dB	132.5524 dB
5	125.9974 dB	126.6836 dB	129.0247 dB	132.0236 dB	135.2039 dB
6	128.1414 dB	131.7738 dB	128.6006 dB	132.2922 dB	137.1833 dB
7	123.8283 dB	131.9763 dB	133.8757 dB	131.5456 dB	133.3702 dB
8	128.9482 dB	128.0814 dB	134.2548 dB	133.1980 dB	135.8308 dB
9	128.2829 dB	123.6548 dB	130.5019 dB	133.1445 dB	130.9571 dB
10	120.5658 dB	131.7767 dB	131.7490 dB	129.6224 dB	132.8174 dB

#### 4.3.2. Σταθμός Βάσης A: Μοντέλο “Power Law”

Το “Power Law” ημιεμπειρικό μοντέλο, όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2, έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\overline{PL}_{est} = PL(R_0) + 10n \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (4.3)$$

όπου  $n$  είναι ο λεγόμενος συντελεστής απωλειών διάδοσης (path loss factor), του



οποίου η βέλτιστη τιμή θα εκτιμηθεί μέσω της επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων (βλέπε ενότητα 4.2), και  $PL(R_0)$  είναι οι απώλειες διάδοσης σε ένα επιλεγμένο σημείο αναφοράς που απέχει απόσταση  $R_0$  από τον Σταθμό Βάσης Α. Στην παρούσα μελέτη, η απόσταση αναφοράς επιλέχθηκε να λάβει την τιμή  $R_0 = 10$  m, διότι με αυτή μπορούν να εκτιμηθούν οι απώλειες διάδοσης με ακρίβεια κάνοντας χρήση της έκφρασης για τις απώλειες ελεύθερης διάδοσης:

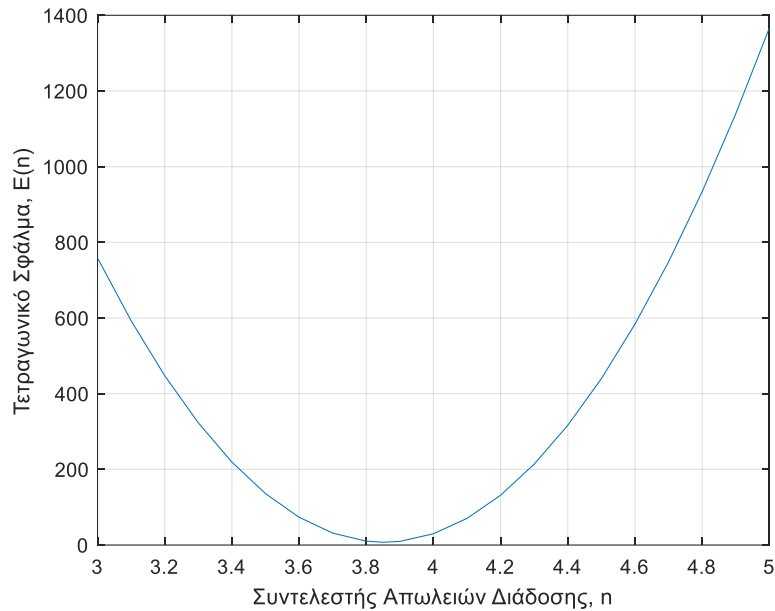
$$PL(R_0) = 92.45 + 20 \log[f_c(GHz)] + 20 \log[R_0(km)] \quad (4.4)$$

#### 4.3.2.1. Σταθμός Βάσης Α: Power Law - 900 MHz

Στη συχνότητα λειτουργίας των 900 MHz οι απώλειες ελεύθερης διάδοσης σε απόσταση  $R_0 = 10$  m, όπως υπολογίζονται από την εξίσωση (4.4), είναι 51.5 dB. Επομένως, στα 900 MHz η εξίσωση (4.3) εξειδικεύεται ως εξής:

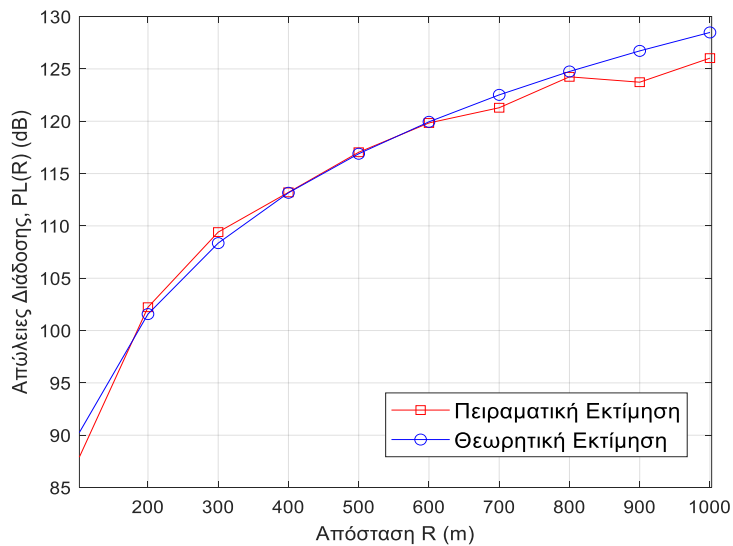
$$\overline{PL}_{est} = 51.5 + 10n \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (4.5)$$

Υπολογίζοντας τις θεωρητικά εκτιμώμενες τιμές  $\overline{PL}_{est}$  για ένα εύρος τιμών του  $n = 3 - 5$  και στη συνέχεια υπολογίζοντας το τετραγωνικό σφάλμα, μεταξύ της θεωρητικής εκτίμησης και της πειραματικής μέτρησης (Πίνακες 4.1 και 4.2), είναι δυνατός ο προσδιορισμός της τιμής  $n$  για την οποία ελαχιστοποιείται το τετραγωνικό σφάλμα. Η Εικόνα 4.7 απεικονίζει γραφικά τους προαναφερόμενους υπολογισμούς καταδεικνύοντας ότι η τιμή  $n = 3.85$  συνιστά τη βέλτιστη τιμή με κριτήριο την προσαρμογή των θεωρητικών εκτιμήσεων στις πειραματικές μετρήσεις.



Εικόνα 4.7. Τετραγωνικό σφάλμα E συναρτήσει συντελεστή απωλειών διάδοσης n

Η σύγκριση των απωλειών διάδοσης, όπως αυτές υπολογίζονται για  $n=3.85$ , με αυτές που προκύπτουν από το AtoI1 απεικονίζονται γραφικά στην Εικόνα 4.8. Σύμφωνα με τα γραφικά αποτελέσματα υπάρχει σημαντική ταύτιση και μόνο μετά τα 800 m φαίνεται να υπάρχει μία απόκλιση. Συγκεκριμένα, μετά τα 800 m φαίνεται ότι η θεωρητική εκτίμηση υπερτιμά τις απώλειες διάδοσης.



Εικόνα 4.8. Σταθμός Βάσης A – 900 MHz - Μοντέλο “Power Law”: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης

Δεδομένης της βέλτιστης τιμής του συντελεστή απωλειών διάδοσης  $n$  είναι δυνατός ο υπολογισμός των απωλειών σκίασης μέσω της εξίσωσης (4.2). Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των απωλειών σκίασης καταγράφεται στους Πίνακες 4.5 και 4.6 για αποστάσεις 100 m -500 m και 600 m – 1000 m, αντίστοιχα.

Πίνακας 4.5. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz – Μοντέλο “Power Law”

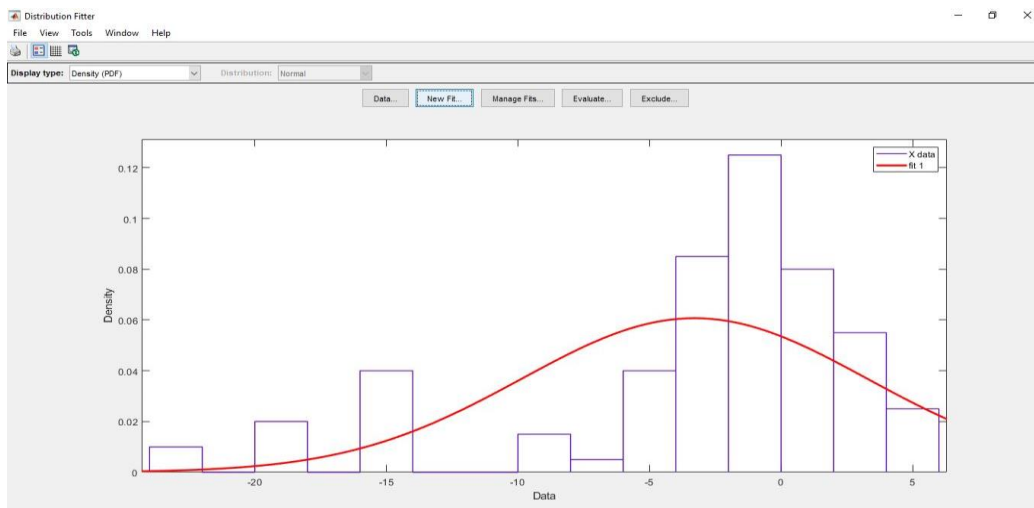
Απώλειες Σκίασης (Χσ)					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-15,6109 dB	5.9385 dB	-1,3850 dB	0,6512 dB	-0,5393 dB
2	-15,7916 dB	-23.5175 dB	-1,2172 dB	-1,1788 dB	-1,0888 dB
3	-15,5922 dB	5.2974 dB	-0,6865 dB	-2,5676 dB	-1,3882 dB
4	4,9571 dB	-18.8616 dB	4,2228 dB	0,8696 dB	2,7123 dB
5	3,7651 dB	0.5650 dB	3,0447 dB	-0,2402 dB	1,5214 dB
6	-15,3849 dB	2.1912 dB	0,1400 dB	0,8712 dB	2,2526 dB
7	-15,7049 dB	-0.9962 dB	4,0039 dB	-0,3376 dB	0,3640 dB
8	-15,8249 dB	-1.6511 dB	0,4740 dB	2,0485 dB	1,4944 dB
9	-15,6749 dB	-19.6721 dB	0,3057 dB	1,1155 dB	-3,2398 dB
10	-15,8821 dB	-18.0344 dB==	-18,365 dB	-3,8580 dB	-23,4513 dB

Πίνακας 4.6. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz – Μοντέλο “Power Law”

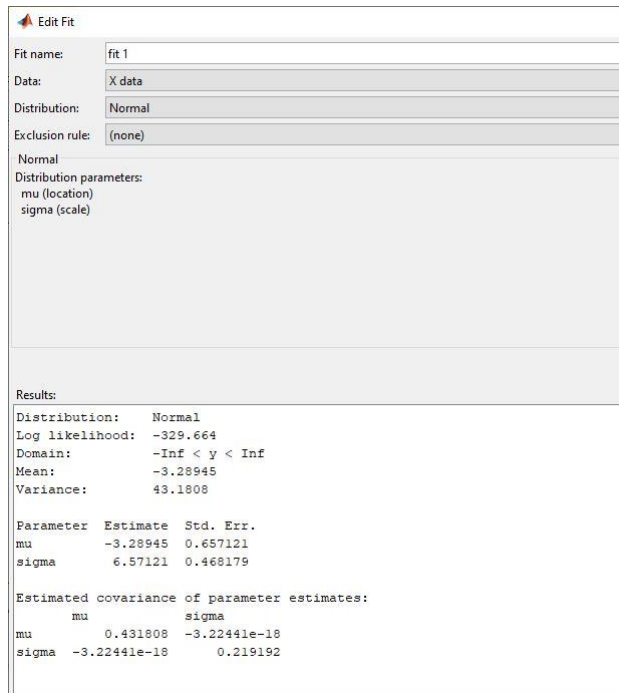
Απώλειες Σκίασης - (Χσ)					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-0,8799 dB	-2,9269 dB	-1,0904 dB	-1,8332 dB	-3,3105 dB
2	-0,5404 dB	-1,8814 dB	2,5942 dB	-5,0618 dB	-4,2726 dB
3	-2,0046 dB	-1,0334 dB	-3,5367 dB	-8,5644 dB	-5,0954 dB
4	-2,3292 dB	-3,1497 dB	-4,7455 dB	-4,2275 dB	-5,3805 dB

5	-0,1342 dB	-3,9950 dB	-3,3786 dB	-2,8617 dB	-0,0395 dB
6	2,1693 dB	0,1187 dB	-4,2690 dB	-2,3854 dB	0,1947 dB
7	-2,6315 dB	1,4454 dB	1,7586 dB	-3,4621 dB	-2,3132 dB
8	2,5900 dB	-0,8076 dB	2,5271 dB	-0,7094 dB	-0,0599 dB
9	2,4587 dB	-8,5363 dB	-1,5005 dB	-0,6674 dB	-6,6217 dB
10	-9,9180 dB	1,1739 dB	-1,6028 dB	-5,4716 dB	-3,8102 dB

Όπως ήδη έχει σχολιασθεί στην ενότητα 4.2, τα στατιστικά δείγματα των Πινάκων 4.5 και 4.6 μπορούν να γίνουν αντικείμενο επεξεργασίας από το Matlab GUI, το οποίο ενεργοποιείται από την εντολή `dfittoll`. Με την εισαγωγή των στατιστικών δειγμάτων και την επιλογή ανεύρεσης πλέον της σχετικής *log-normal* κατανομής σε σχέση με τα εισαγόμενα δεδομένα προκύπτουν τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στις Εικόνες 4.9 και 4.10. Τα αποτελέσματα των Εικόνων 4.9 και 4.10 δείχνουν μία ασύμμετρη *log-normal* συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας (ΣΠΠ) με μέσο όρο 3.3 dB και τυπική απόκλιση 6.6 dB.

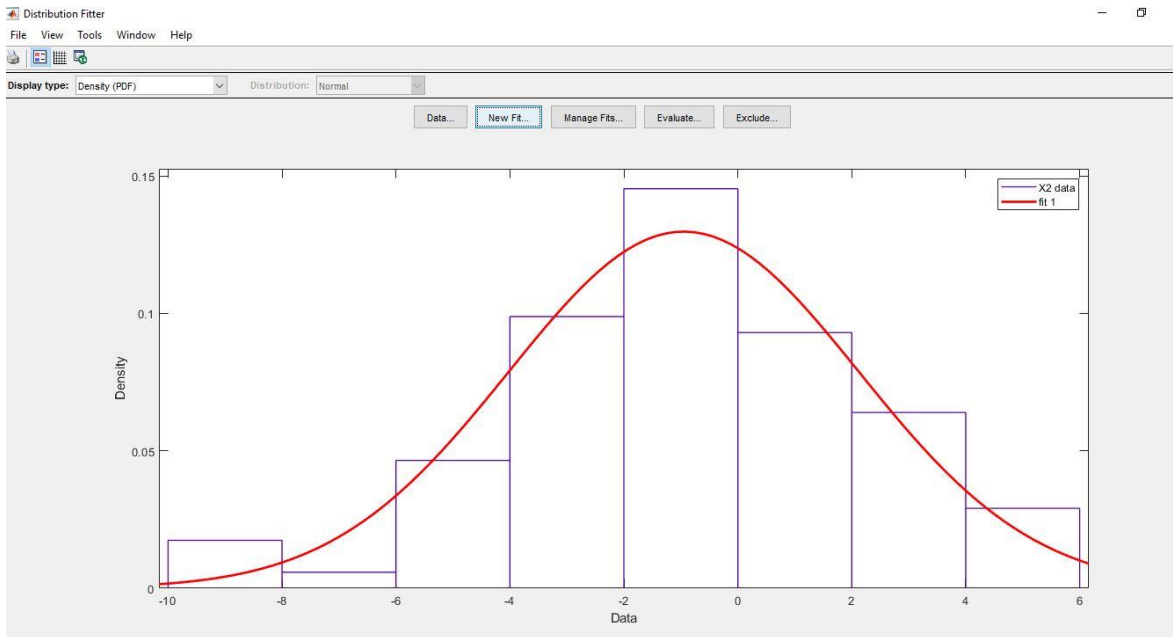


Εικόνα 4.9. Σταθμός Βάσης A – 900 MHz - Μοντέλο “Power Law”: Αρχικό Matlab γράφημα απωλειών Σκίασης

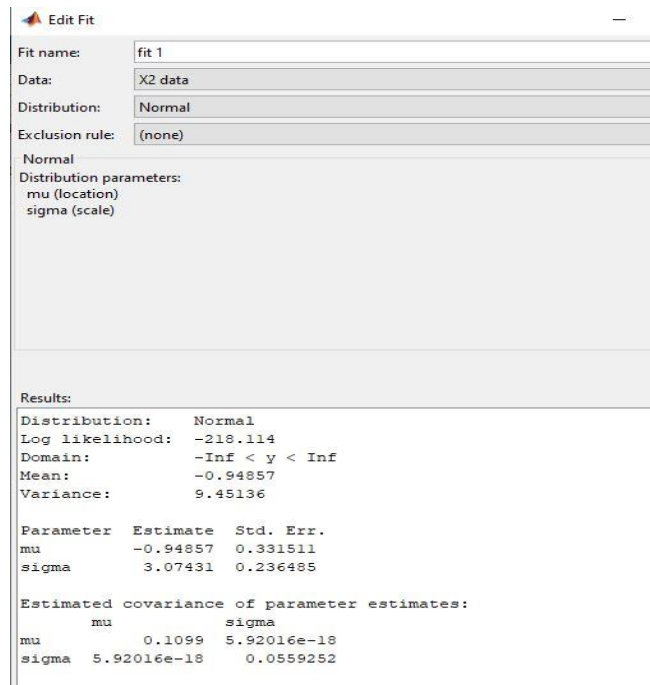


Εικόνα 4.10 : Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz - Μοντέλο “Power Law”: Αρχική εκτίμηση μέσου όρου και τυπικής απόκλισης για τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας απωλειών σκίασης

Η ασυμμετρία της ΣΠΠ οφείλεται στην ύπαρξη σημαντικών απωλειών σκίασης στα 100 m, όπως χαρακτηριστικά καταγράφεται στον Πίνακα 4.5. Με τη σειρά του, το γεγονός αυτό οφείλεται στην ύπαρξη σημαντικών εμποδίων (κτήρια), όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.3. Λόγω του σχετικά μικρού στατιστικού δείγματος η ύπαρξη αυτών των ακραίων τιμών επηρεάζει τη στατιστική ανάλυση. Σε ένα μεγαλύτερο δείγμα η βαρύτητα των ακραίων τιμών θα ήταν μικρότερη και κατ'επέκταση η εξαγωγή των στατιστικών συμπερασμάτων πιο αξιόπιστη. Με αφετηρία αυτήν τη διαπίστωση επιλέχθηκε μία στατιστική εξομάλυνση με την αφαίρεση των ακραίων τιμών από τα στατιστικά δεδομένα προς επεξεργασία. Κατόπιν αυτής της διαφοροποίησης των στατιστικών δεδομένων προκύπτουν τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στις Εικόνες 4.11 και 4.12. Σύμφωνα με τα εικονιζόμενα αποτελέσματα προκύπτει μία σημαντικά πιο συμμετρική κατανομή με μέσο όρο - 0.95 dB και τυπική απόκλιση 3 dB.



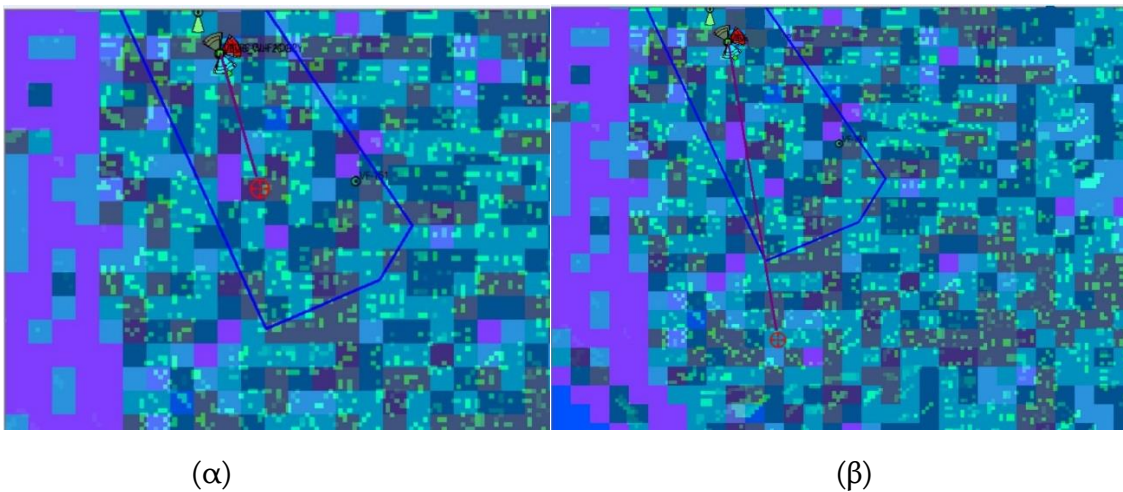
Σχήμα 4.11 Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz - Μοντέλο “Power Law”: Τελικό Matlab γράφημα απωλειών Σκίασης



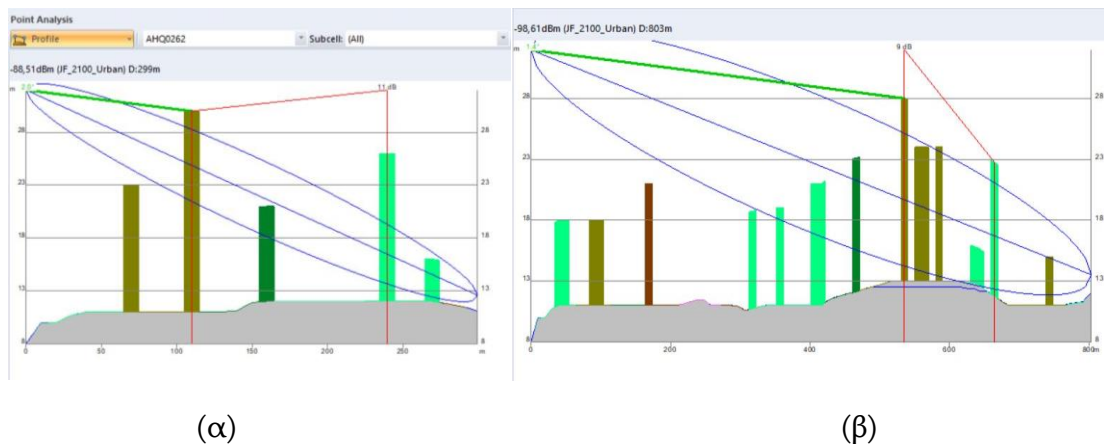
Σχήμα 4.12 : Τελικός μέσος όρος και τυπική απόκλιση

#### 4.3.2.2 Σταθμός Βάσης A: Power Law - 2100 MHz

Οι υπολογισμοί για το Σταθμό Βάσης A στη συχνότητα 2100 MHz είναι παρόμοιοι με αυτούς που ήδη έχουν αναλυθεί για τη συχνότητα 900 MHz. Οι Εικόνες 4.13 και 4.14 απεικονίζουν χαρακτηριστικά στιγμιότυπα από την εξαγωγή μετρήσεων μέσω του Atoll (Εικόνα 4.13) καθώς και από τα χαρακτηριστικά του ασύρματου περιβάλλοντος διάδοσης (Εικόνα 4.14).



Εικόνα 4.13. Σταθμός βάσης A-2100MHz: Μετρήσεις Atoll σε απόσταση (α) 300m και (β) 800 m.



Εικόνα 4.14. Σταθμός βάσης A-2100MHz: Διάγραμμα απεικόνισης διαδρομής σήματος σε αποστάσεις (α) 300 m και (β) 800m.

Το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων, τα οποία προκύπτουν από το λογισμικό Atoll, καταγράφονται στους Πίνακες 4.3 και 4.4 για αποστάσεις μετρήσεων 100 m – 500 m και 600 m – 1000 m, αντίστοιχα.

Τα καταχωρημένα δεδομένα για τον Σταθμό Βάσης Α στα 2100 MHz παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.15.

Active  Transmitter type: Intra-network (Server and Interferer)

Transmission/Reception

	Transmission		Reception		Equipment...
	Real	Computed	Real	Computed	
Total losses:	1 dB	0 dB	0 dB	0 dB	Detail
Noise figure:			2,8 dB	0 dB	

Transmission

Power: 15 dBm  EIRP: 32 dBm

Antennas

Height/ground: 24 m

Main Antenna

Model: 2100.AQU4518R4.03

Mechanical azimuth: 160 ° Mechanical downtilt: -1 °

Electrical azimuth: -1,5 ° Electrical downtilt: 3 °

Additional electrical downtilt: 0 °

Εικόνα 4.15: Ύψος κεραίας 24m και EIRP 32,7 dBm για τον Σταθμό Βάσης Α – 2100 MHz.

Στη συχνότητα λειτουργίας των 2100 MHz οι απώλειες ελεύθερης διάδοσης σε απόσταση  $R_0=10$  m, όπως υπολογίζονται από την εξίσωση (4.4), είναι 58.8 dB. Συνεπώς, στα 2100 MHz η εξίσωση (4.3) εξειδικεύεται ως εξής:

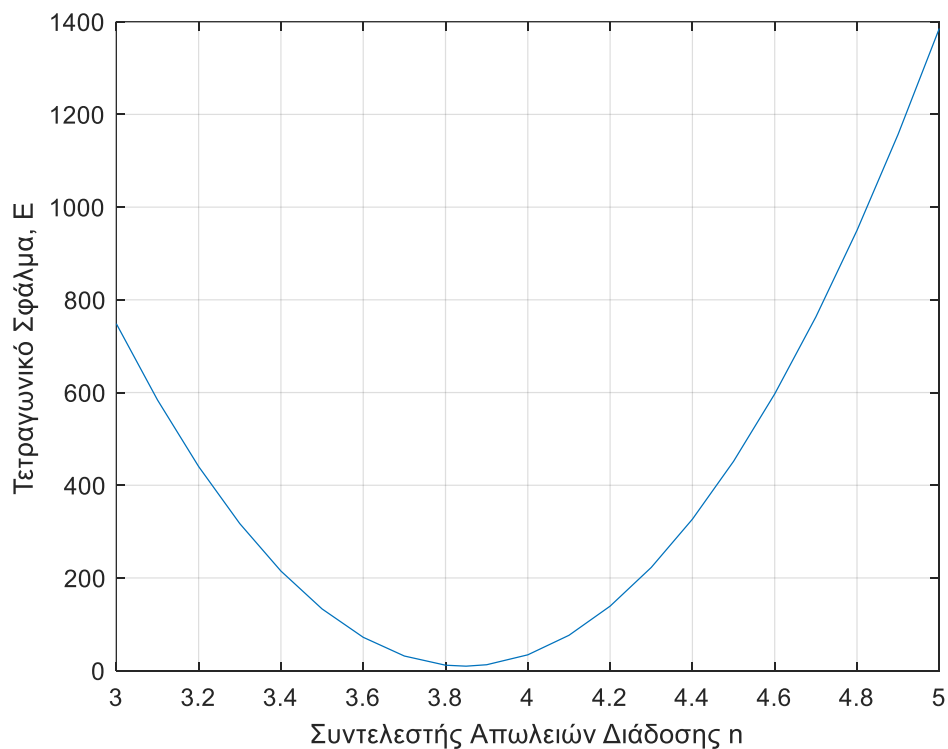
$$\overline{PL}_{est} = 58.8 + 10n \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (4.6)$$

Υπολογίζοντας το τετραγωνικό σφάλμα, μεταξύ της θεωρητικής εκτίμησης και της πειραματικής μέτρησης (Πίνακες 4.3 και 4.4) για ένα εύρος τιμών  $n=3 - 5$  προκύπτει

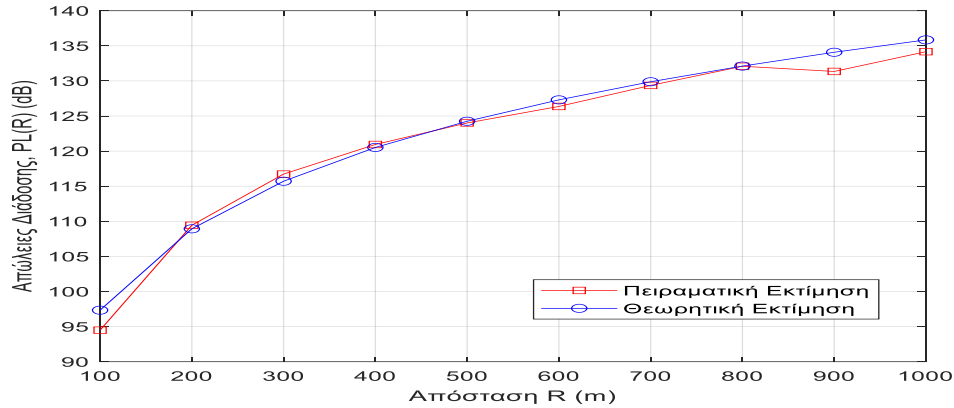


ότι η βέλτιστη τιμή είναι η  $n = 3.85$ . Η Εικόνα 4.16 απεικονίζει γραφικά τους προαναφερόμενους υπολογισμούς. Το γεγονός ότι η τιμή του  $n$  είναι ταυτόσημη με αυτήν που υπολογίστηκε στα 900 MHz υποδεικνύει ότι το περιβάλλον ασύρματης διάδοσης δεν χαρακτηρίζεται από σημαντική παρεμπόδιση της διάδοσης από εμπόδια και συνακόλουθα δεν εμφανίζονται σημαντικές απώλειες σκίασης. Ως εκ τούτου, η αλλαγή της συχνότητας δεν φαίνεται να διαφοροποιεί σημαντικά τα αποτελέσματα, τουλάχιστον, στο βαθμό που αυτό θα αναμενόταν λόγω της αύξησης της συχνότητας και των απωλειών περίθλασης και παρεμπόδισης.

Η Εικόνα 4.17 παρουσιάζει τη γραφική σύγκριση μεταξύ θεωρητικών εκτιμήσεων του μοντέλου “Power Law” και των πειραματικών δεδομένων που εξάγονται από το Atoll. Όπως και στην περίπτωση των 900 MHz υπάρχει αξιοσημείωτη σύγκλιση, η οποία υποβαθμίζεται ελαφρώς σε αποστάσεις μεγαλύτερες των 800 m.



Εικόνα 4.16. Τετραγωνικό σφάλμα  $E$  συναρτήσει συντελεστή απωλειών διάδοσης  $n$



Εικόνα 4.17. Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz – Μοντέλο “Power Law”: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης

Με δεδομένη την καλύτερη δυνατή επιλογή του  $n$  υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης (4.3) οι απώλειες σκίασης σε όλα τα σημεία μέτρησης (Πίνακες 4.3 και 4.4) στη συχνότητα 2100 MHz. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών καταγράφονται στους Πίνακες 4.7 και 4.8.

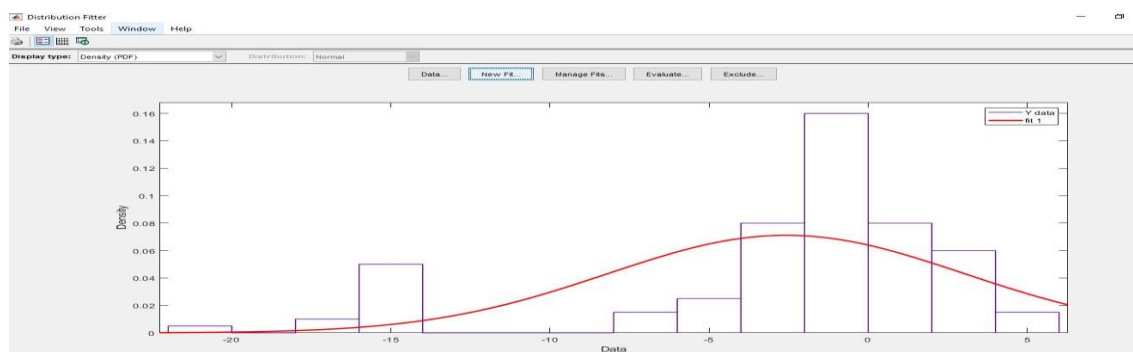
Πίνακας 4.7. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz - Μοντέλο “Power Law”

Απώλειες Σκίασης (Χσ)					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-14.2663 dB	4.046 dB	-0.2555 dB	-0.5432 dB	-0.5227 dB
2	-14.4585 dB	4.239 dB	-0.1328 dB	-0.4818 dB	-0.4551 dB
3	-14.2712 dB	3.027 dB	-0.7087 dB	-1.5224 dB	-1.1603 dB
4	4.5656 dB	-17.107 dB	3.1138 dB	1.3822 dB	1.3972 dB
5	3.1956 dB	-0.496 dB	2.593 dB	-0.0583 dB	0.9698 dB
6	-14.7044 dB	0.805 dB	-0.2054 dB	0.7624 dB	2.4298 dB
7	-15.0344 dB	-1.673 dB	2.2804 dB	0.9681 dB	0.0664 dB
8	-14.9544 dB	0.744 dB	2.3678 dB	3.1422 dB	-0.3177 dB
9	-15.0344 dB	-16.227 dB	2.0605 dB	0.6154 dB	-2.4406 dB
10	-14.5634 dB	-15.288 dB	-15.683 dB	-2.8037 dB	-21.0972 dB

Πίνακας 4.8. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης A – 2100 MHz-  
Μοντέλο “Power Law”

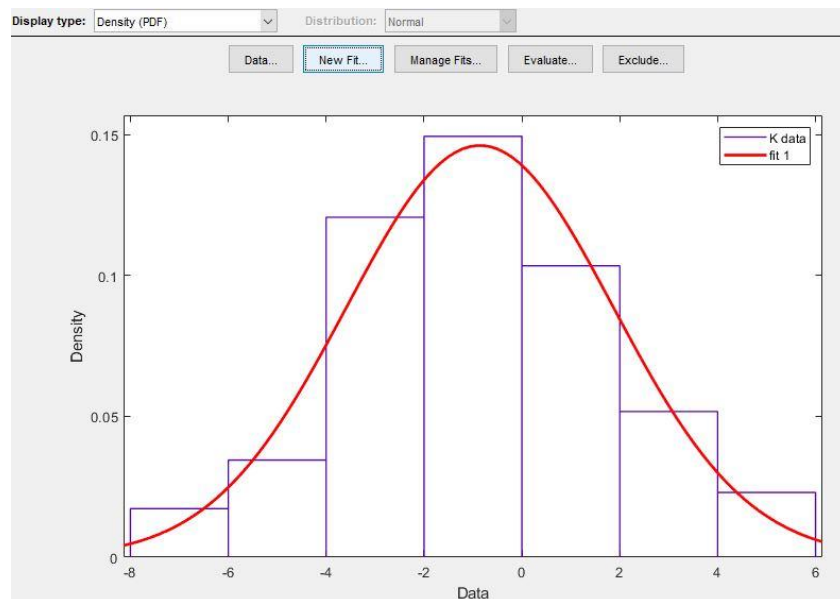
Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-1.0566 dB	-2.4916 dB	-1.4052 dB	-2.647 dB	-0.7933 dB
2	-1.6545 dB	-1.5192 dB	3.8941 dB	-4.3332 dB	-2.9981 dB
3	-1.9582 dB	-.5637 dB	-1.6715 dB	-6.9105 dB	-4.2177 dB
4	-2.0635 dB	-1.9971 dB	-3.9487 dB	-4.0661 dB	-3.292 dB
5	-1.3058 dB	-3.1971 dB	-3.0886 dB	-2.0592 dB	-0.6405 dB
6	0.8382 dB	1.8931 dB	-3.5128 dB	-1.7905 dB	1.3389 dB
7	-3.4749 dB	2.0956 dB	1.7623 dB	-2.5371 dB	-2.4742 dB
8	1.645 dB	-1.7993 dB	2.1414 dB	-.8847 dB	-0.0136 dB
9	0.9797 dB	-6.2259 dB	-1.6115 dB	-0.9383 dB	-4.8873 dB
10	-6.7374 dB	1.896 dB	-0.3644 dB	-4.4603 dB	-3.027 dB

Μετά την εισαγωγή των στατιστικών δειγμάτων των Πινάκων 4.7 και 4.8 προκύπτει η εξής εκτίμηση για τη log-normal ΣΠΠ: μέσος όρος  $\mu = -2.6$  dB και τυπική απόκλιση  $\sigma = 5.6$  dB. Το αποτέλεσμα αυτό αντιστοιχεί στο ιστόγραμμα και την καμπύλη της ΣΠΠ της Εικόνας 4.18.



Εικόνα 4.18. Σταθμός Βάσης A – Μοντέλο “Power Law”: Αρχικό Matlab γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης

Κατ' αναλογία με την επεξεργασία των αντίστοιχων μετρήσεων στη συχνότητα των 900 MHz, με την αφαίρεση των ακραίων τιμών που εντοπίζονται κυρίως σε απόσταση 100 m προκύπτει μία πιο συμμετρική εκτίμηση της ΣΠΠ με μέσο όρο  $\mu = -0.86$  dB και τυπική απόκλιση  $\sigma = 2.7$  dB. Τα σχετικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.19 και 4.20.



Εικόνα 4.19. Σταθμός Βάσης Α – Μοντέλο “Power Law”: Τελικό γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης σε συχνότητα 2100MHz

Results:		
Distribution:	Normal	
Log likelihood:	-210.292	
Domain:	-Inf < y < Inf	
Mean:	-0.858498	
Variance:	7.44782	
Parameter	Estimate	Std. Err.
mu	-0.858498	0.292587
sigma	2.72907	0.208697
Estimated covariance of parameter estimates:		
	mu	sigma
mu	0.0856071	-1.33394e-18
sigma	-1.33394e-18	0.0435545

Σχήμα 4.20 : Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης σε συχνότητα 2100MHz

### 4.3.3. Σταθμός Βάσης A: Μοντέλο Clutter Factor

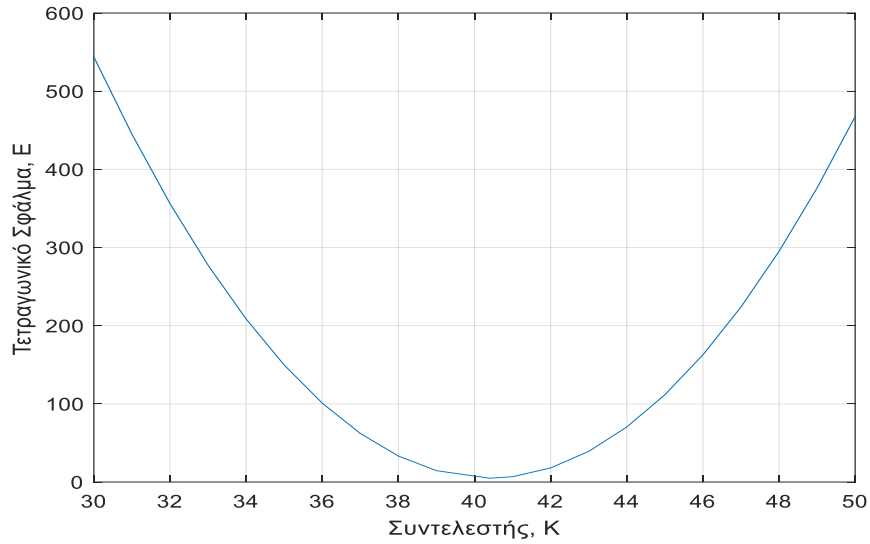
Το μοντέλο “Clutter Factor” όπως έχει ήδη αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2 έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\overline{P}_{L_{est}} = 40 \log(R) - 20 \log(h_m) - 20 \log(h_b) + K \quad (4.7)$$

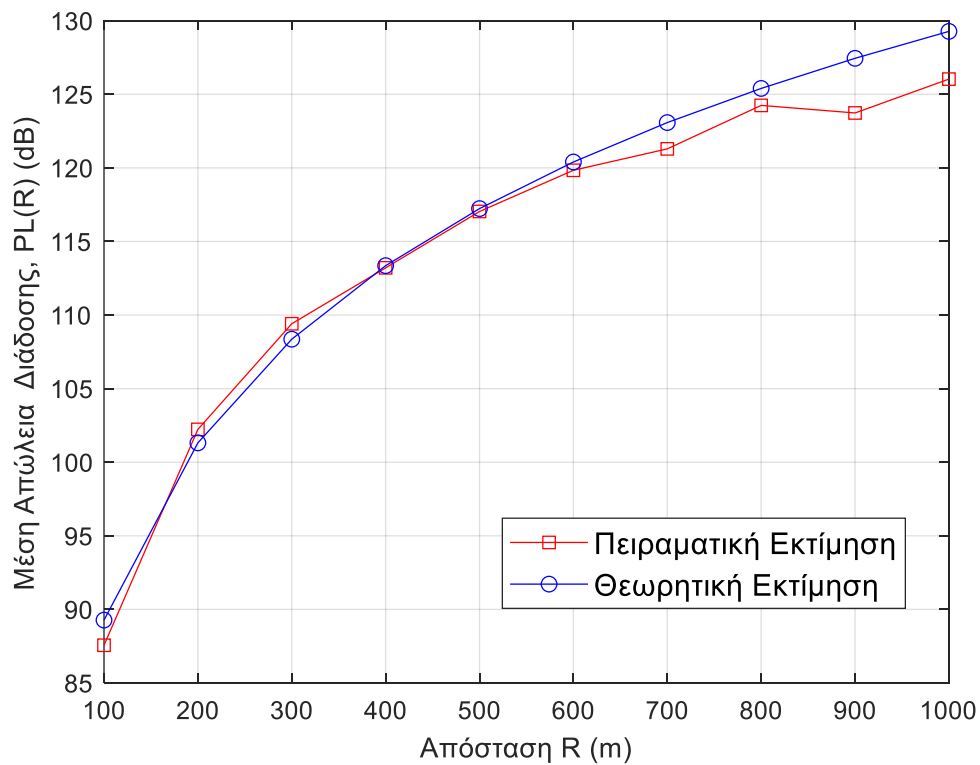
όπου  $K$  είναι ο συντελεστής αστάθειας (clutter factor),  $R$  είναι η απόσταση σε μέτρα από την κεραία (100m-1000m),  $h_m$  και  $h_b$  είναι το ύψος των κεραιών του κινητού σταθμού και του σταθμού βάσης, αντίστοιχα. Στην περίπτωση μας το  $h_m$  επιλέγεται να λάβει μία τυπική τιμή  $h_m=1.5$  m, ενώ το  $h_b=24$  m όπως υποδεικνύει η Εικόνα 4.6.

#### 4.3.3.1. Σταθμός Βάσης A: Clutter Factor - 900 MHz

Στην περίπτωση του μοντέλου “Clutter Factor” η ελεύθερη παράμετρος, η βέλτιστη τιμή της οποίας πρέπει να προσδιοριστεί, είναι το  $K$ . Με χρήση της εξίσωσης (4.7) και υπολογισμό του τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ του  $\overline{P}_{L_{est}}$  και των πειραματικών δεδομένων των Πινάκων 4.1 και 4.2 προκύπτει ελαχιστοποίηση για την τιμή  $K = 40.4$ . Η Εικόνα 4.21 αναπαριστά γραφικά τους υπολογισμούς του τετραγωνικού σφάλματος και τον εντοπισμό της τιμής  $K = 40.4$  ως της βέλτιστης τιμής που το τετραγωνικό σφάλμα ελαχιστοποιείται.



Εικόνα 4.21. Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz- Μοντέλο Clutter Factor : Τετραγωνικό σφάλμα Ε συναρτήσει του συντελεστή Κ.



Εικόνα 4.22. Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz- Μοντέλο Clutter Factor: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης για  $K = 40.4$ .

Τα γραφικά αποτελέσματα της Εικόνας 4.22 με τη χρήση της βέλτιστης τιμής  $K = 40.4$  υποδεικνύουν μία αξιοσημείωτη ταύτιση έως τα 600 m μεταξύ θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών δεδομένων. Όπως και στην περίπτωση του “Power Law” μοντέλου σε μεγαλύτερες αποστάσεις το θεωρητικό μοντέλο εμφανίζεται να υπερτιμά τις απώλειες διάδοσης. Η αδυναμία αυτή είναι πιο εμφανής στην περίπτωση του μοντέλου “Clutter Factor” έναντι του μοντέλου “Power Law”, δεδομένου ότι η απόκλιση γίνεται εμφανής σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 600 m και 800 m, αντίστοιχα.

Με αφετηρία τα πειραματικά αποτελέσματα των Πινάκων 4.1 και 4.2 και την εξίσωση (4.7) με  $K = 40.4$  προκύπτουν οι απώλειες σκίασης σε όλες τις θέσεις μέτρησης από την εξίσωση (4.2). Τα αποτελέσματα καταγράφονται στους Πίνακες 4.9 και 4.10

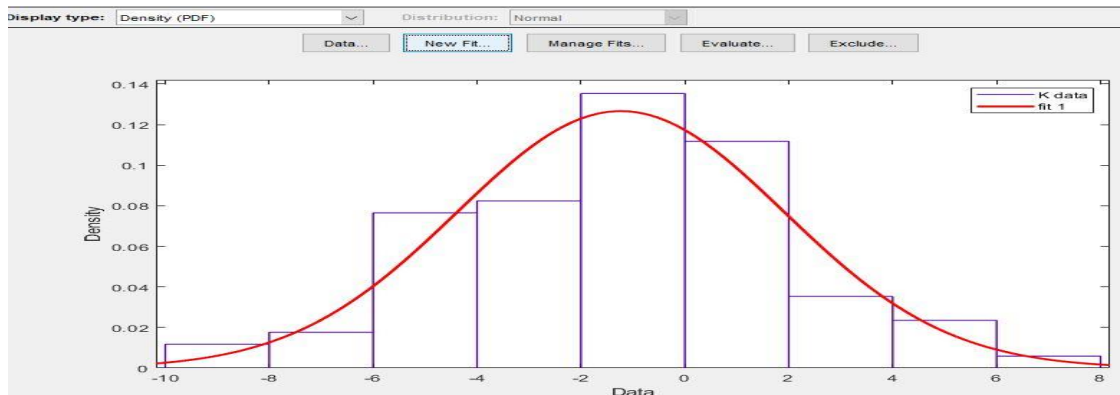
Πίνακας 4.9. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz- Μοντέλο “Clutter Factor”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-14.8999 dB	6.1979 dB	-1.3898 dB	0.4590 dB	-0.8769 dB
2	-15.0806 dB	-23.2581 dB	-1.2220 dB	-1.3710 dB	-1.4264 dB
3	-14.8812 dB	5.5567 dB	-0.6913 dB	-2.7598 dB	-1.7258 dB
4	5.6681 dB	-18.6022 dB	4.2180 dB	0.6774 dB	2.3748 dB
5	4.4761 dB	0.8244 dB	3.0399 dB	-0.4324 dB	1.1838 dB
6	-14.6739 dB	2.4506 dB	0.1352 dB	0.6790 dB	1.9150 dB
7	-14.9939 dB	-0.7368 dB	3.9991 dB	-0.5298 dB	0.0265 dB
8	-15.1139 dB	-1.3918 dB	0.4692 dB	1.8563 dB	1.1568 dB
9	-14.9639 dB	-19.4128 dB	0.3009 dB	0.9233 dB	-3.5773 dB
10	-15.1711 dB	-17.7750 dB	-18.3701 dB	-4.0502 dB	-23.7888 dB

Πίνακας 4.10. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz-  
Μοντέλο “Clutter Factor”

Απώλειες Σκίασης (Χσ)					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-1.3363 dB	-3.4837 dB	-1.7342 dB	-2.5537 dB	-4.0996 dB
2	-0.9967 dB	-2.4381 dB	1.9505 dB	-5.7822 dB	-5.0617 dB
3	-2.4609 dB	-1.5902 dB	-4.1804 dB	-9.2848 dB	-5.8845 dB
4	-2.7856 dB	-3.7064 dB	-5.3892 dB	-4.9480 dB	-6.1696 dB
5	-0.5905 dB	-4.5518 dB	-4.0223 dB	-3.5822 dB	-0.8286 dB
6	1.7130 dB	-0.4380 dB	-4.9128 dB	-3.1059 dB	-0.5944 dB
7	-3.0878 dB	0.8887 dB	1.1149 dB	-4.1826 dB	-3.1023 dB
8	2.1337 dB	-1.3643 dB	1.8834 dB	-1.4299 dB	-0.8490 dB
9	2.0023 dB	-9.0930 dB	-2.1442 dB	-1.3879 dB	-7.4108 dB
10	-10.3743 dB	0.6171 dB	-2.2465 dB	-6.1920 dB	-4.5993 dB

Εισάγοντας τα στατιστικά δεδομένα των Πινάκων 4.9 και 4.10 στο dfittool της Matlab προκύπτει, όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.23 και 4.24, ότι οι απώλειες σκίασης περιγράφονται από μία log-normal κατανομή με μέσο όρο  $\mu = -1.2$  dB και τυπική απόκλιση  $\sigma = 3.1$  dB.



Εικόνα 4.23. Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz - Μοντέλο “Clutter Factor”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης

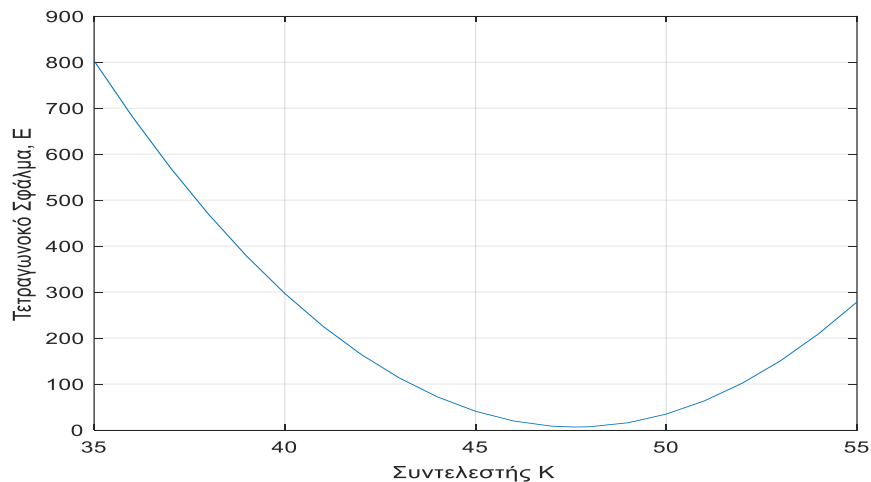


Results:		
Distribution:	Normal	
Log likelihood:	-217.634	
Domain:	-Inf < y < Inf	
Mean:	-1.23402	
Variance:	9.92133	
Parameter	Estimate	Std. Err.
mu	-1.23402	0.341645
sigma	3.14981	0.24374
Estimated covariance of parameter estimates:		
	mu	sigma
mu	0.116722	9.31164e-19
sigma	9.31164e-19	0.0594092

Εικόνα 4.24 : Σταθμός Βάσης A – 900 MHz - Μοντέλο “Clutter Factor”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης

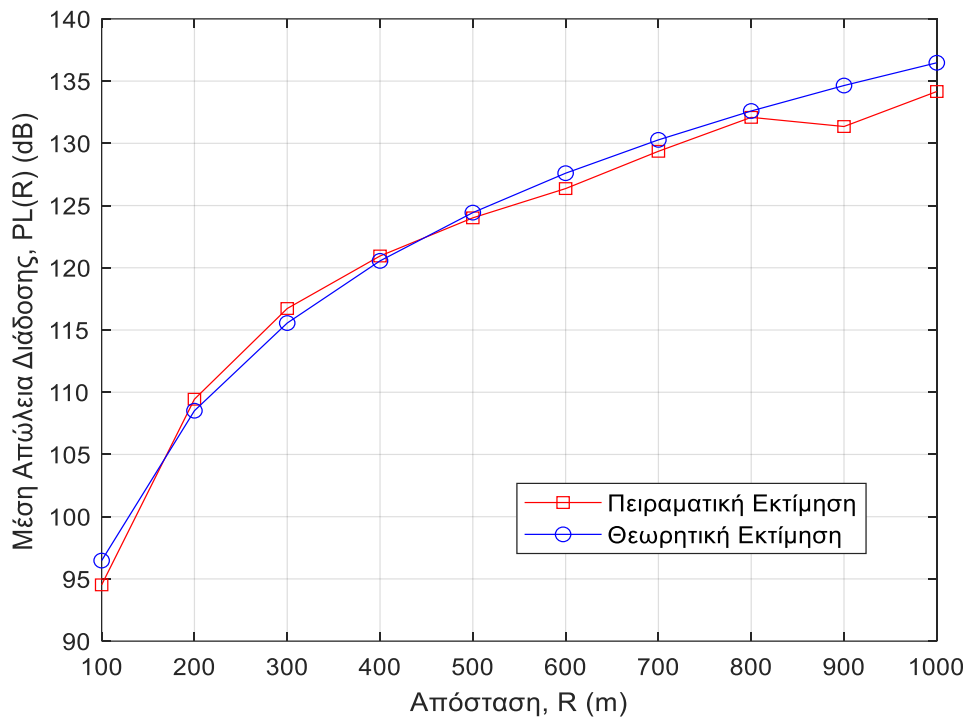
#### 4.3.3.2 Σταθμός Βάσης A: Clutter Factor 2100 MHz

Στην περίπτωση της συχνότητας 2100 MHz οι υπολογισμοί σχετικά με τη βέλτιστη τιμή του συντελεστή  $K$  είναι παρόμοιοι με αυτούς που περιγράφεται στην Ενότητα 4.3.3.1 για τα 900 MHz. Σύμφωνα με τη γραφική αναπαράσταση της Εικόνας των υπολογισμών του τετραγωνικού σφάλματος σε ένα εύρος τιμών  $K = 35 - 55$  προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή για τη σταθερά  $K$  είναι ίση με  $K = 47.6$ .



Εικόνα 4.24. Σταθμός Βάσης A – 2100 MHz- Μοντέλο Clutter Factor : Τετραγωνικό σφάλμα Ε συναρτήσει του συντελεστή  $K$ .

Η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα θεωρητικά εκτιμώμενα από το μοντέλο “Clutter Factor” απεικονίζονται στην Εικόνα 4.25. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.25 υπάρχει αξιοσημείωτη ταύτιση έως και τα 800 m, ενώ φαίνεται να υπάρχει μία απόκλιση πέραν των 800 m. Η εικονιζόμενη απόκλιση για αποστάσεις μεγαλύτερες από 800 m είναι παρόμοια με αυτήν που εντοπίστηκε και στην περίπτωση του μοντέλου “Power Law”. Αξίζει να επισημανθεί ότι η απόκλιση που επίσης παρατηρήθηκε στην περίπτωση των προβλέψεων του “Clutter Model” στα 900 MHz είναι ελαφρώς μεγαλύτερη έναντι αυτής που φαίνεται στην Εικόνα 4.25 για τη συχνότητα 2100 MHz.



Εικόνα 4.25. Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz- Μοντέλο Clutter Factor: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης για  $K = 47.6$ .

Ο υπολογισμός των απωλειών σκίασης για τη βέλτιστη τιμή  $K = 47.6$  καταγράφεται στους Πίνακες 4.11 και 4.12.

Πίνακας 4.11. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz-  
Μοντέλο “Clutter Factor”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-13.3958 dB	4.465 dB	-0.1007 dB	-0.5758 dB	-0.7007 dB
2	-13.588 dB	4.658 dB	0.0219 dB	-0.5144 dB	-0.6331 dB
3	-13.4007 dB	3.446 dB	-0.554 dB	-1.555 dB	-1.3383 dB
4	5.4361 dB	-16.688 dB	3.2685 dB	1.3495 dB	1.2192 dB
5	4.0661 dB	-0.077 dB	2.7478 dB	-0.0909 dB	0.7918 dB
6	-13.8339 dB	1.224 dB	-0.0506 dB	0.7297 dB	2.2518 dB
7	-14.1639 dB	-1.254 dB	2.4352 dB	0.9354 dB	-0.1116 dB
8	-14.0839 dB	1.163 dB	2.5225 dB	3.1096 dB	-0.4958 dB
9	-14.1639 dB	-15.808 dB	2.2153 dB	0.5827 dB	-2.6186 dB
10	-13.6929 dB	-14.869 dB	-15.529dB	-2.8364 dB	-21.2752dB

Πίνακας 4.12. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz-  
Μοντέλο “Clutter Factor”

Απώλειες Σκίασης - (Χσ) 2100MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-1.353 dB	-2.8888 dB	-1.889 dB	-3.2079 dB	-1.4228 dB
2	-1.951 dB	-1.9164 dB	3.4099 dB	-4.8941 dB	-3.6277 dB
3	-2.255 dB	-.9609 dB	-2.155 dB	-7.4714 dB	-4.8473 dB
4	-2.360 dB	-2.3943 dB	-4.432 dB	-4.6271 dB	-3.9216 dB
5	-1.602 dB	-3.5943 dB	-3.572 dB	-2.6201 dB	-1.27 dB
6	.5414 dB	1.4959 dB	-3.997 dB	-2.3514 dB	.7093 dB
7	-3.771 dB	1.6984 dB	1.2781 dB	-3.0981 dB	-3.1038 dB
8	1.3482 dB	-2.1965 dB	1.6572 dB	-1.4456 dB	-.6431 dB
9	.6829 dB	-6.6231 dB	-2.095 dB	-1.4992 dB	-5.5168 dB
10	-7.034 dB	1.4988 dB	-0.8486 dB	-5.0212 dB	-3.6566 dB

Κατόπιν επεξεργασίας των στατιστικών δειγμάτων σκίασης με το dfittoll της Matlab προκύπτει ότι οι απώλειες σκίασης περιγράφονται από μία ΣΠΠ log-normal με μέσο όρο  $\mu = -0.86$  dB και τυπική απόκλιση  $\sigma = 2.73$  dB. Στις Εικόνες 4.26 και 4.27 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων της σκίασης στο Matlab.

```

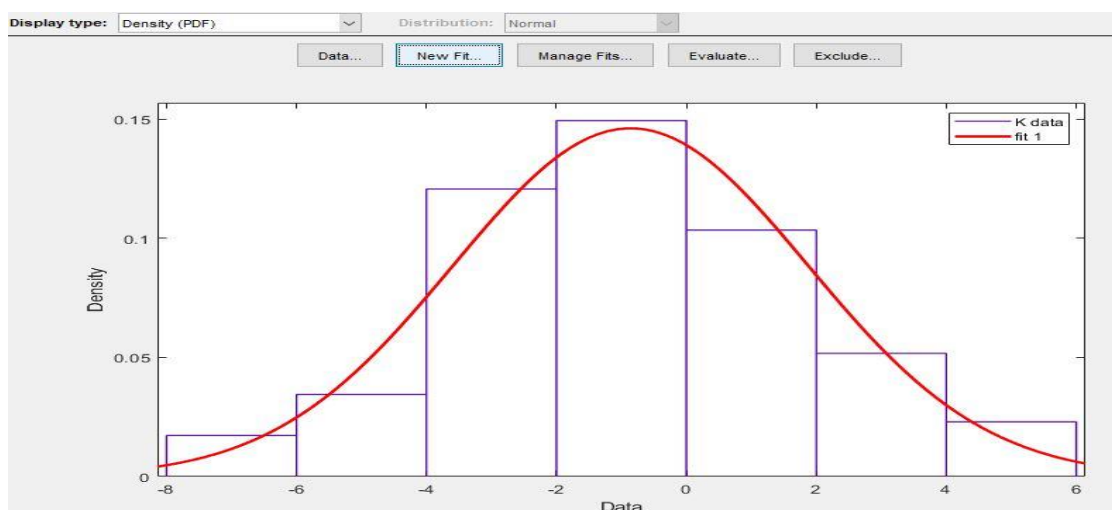
Results:
Distribution:      Normal
Log likelihood:  -210.292
Domain:          -Inf < y < Inf
Mean:            -0.858498
Variance:        7.44782

Parameter Estimate Std. Err.
mu               -0.858498  0.292587
sigma             2.72907  0.208697

Estimated covariance of parameter estimates:
           mu           sigma
mu         0.0856071  -1.33394e-18
sigma     -1.33394e-18  0.0435545

```

Εικόνα 4.26 : Σταθμός Βάσης A – 900 MHz - Μοντέλο “Clutter Factor”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης



Εικόνα 4.27 : Σταθμός Βάσης A – 2100 MHz - Μοντέλο “Clutter Factor”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης

#### 4.3.4. Σταθμός Βάσης A: Μοντέλο Okumura-Hata

Σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 2 το μοντέλο Okumura – Hata για συχνότητες λειτουργίας 900 MHz έχει την εξής μορφή σε αστικές περιοχές :

$$\overline{P}L_{est} = A + B \log(R) - E \quad (4.8)$$

όπου

$$A = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - 13.82 \log(h_b) \quad (4.9a)$$

$$B = 44.9 - 6.55 \log(h_b) \quad (4.9b)$$

$$E = 3.2(\log(11.75h_m))^2 - 4.97 \quad (4.9c)$$

Υπολογίζοντας τις θεωρητικές εκτιμήσεις για τις μέσες απώλειες διάδοσης σύμφωνα με τις εξισώσεις (4.8)-(4.9c) και στη συνέχεια υπολογίζοντας το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών προκύπτει ένα τετραγωνικό σφάλμα  $E = 19.3$ . Αξίζει να σημειωθεί ότι σε όλα τα προηγούμενα μοντέλα, κατόπιν της εύρεσης της εκάστοτε βέλτιστης τιμής, το τετραγωνικό σφάλμα ήταν μικρότερο από 10. Στο πλαίσιο αυτό, επιχειρήθηκε η βελτιστοποίηση των ειδικών βαρών που περιέχει στις εκφράσεις του το μοντέλο Okumura – Hata με έμφαση σε αυτές οι οποίες σχετίζονται με το ύψος του σταθμού βάσης  $h_b$ . Το σκεπτικό της συγκεκριμένης επιλογής σχετίζεται με τα πολεοδομικά χαρακτηριστικά που έχει η Αθήνα: πολυώροφα και πυκνά δομημένα κτήρια. Σε ένα τέτοιο χωροταξικό περιβάλλον η μείωση των απωλειών με την αύξηση του ύψους, όπως υπονοούν οι εξισώσεις (4.9a) και (4.9b) για τους συντελεστές A και B, αντίστοιχα, ενδέχεται να μην έχει την αναμενομένη μείωση των απωλειών διάδοσης. Σε ότι αφορά, την επίδραση της συχνότητας και προκειμένου να μην πολυπλοκοποιηθεί το πρόβλημα της ανεύρεσης βέλτιστων ειδικών βαρών αποφασίστηκε να υπάρχει παρέμβαση μέσω του συντελεστή E και ειδικότερα μέσω του σταθερού του όρου.

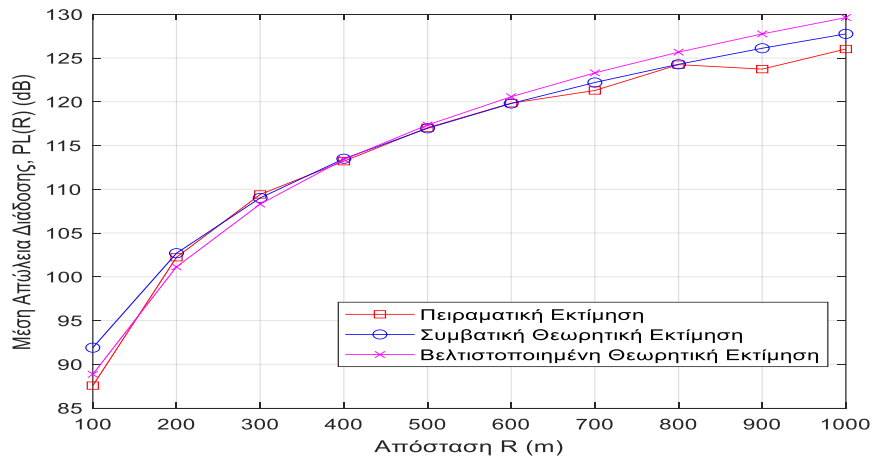
Συνεπώς, στα πλαίσια της βελτιστοποίησης των παραμέτρων του μοντέλου οι συντελεστές  $A$ ,  $B$  και  $E$  επαναδιατυπώθηκαν ως εξής:

$$A = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - A_1 \log(h_b) \quad (4.10a)$$

$$B = 44.9 - B_1 \log(h_b) \quad (4.10b)$$

$$E = 3.2(\log(11.75h_m))^2 - E_1 \quad (4.10c)$$

και διερευνήθηκε η δυνατότητα εντοπισμού μίας βέλτιστης τριπλέτας τιμών ( $A_1$ ,  $B_1$ ,  $E_1$ ), η οποία θα ελαχιστοποιεί το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων. Μετά από σάρωση τιμών σε αυτό το 3D πρόβλημα βελτιστοποίησης προέκυψε ο εντοπισμός των τιμών  $(A_1, B_1, E_1)=(13, 3, 5.7)$  το οποίο μειώνει το τετραγωνικό σφάλμα στην τιμή  $E = 4.2$  έναντι του  $E = 19.3$ , το οποίο αντιστοιχεί στις συμβατικές τιμές του μοντέλου  $(A_1, B_1, E_1)=(13.82, 6.55, 5.4)$ . Η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων καθώς και των θεωρητικών εκτιμήσεων του συμβατικού και του τροποποιημένου μοντέλου Okumura Hata παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.28.



Εικόνα 4.28. Σταθμός Βάσης A – 900 MHz- Μοντέλο Okumura-Hata: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τους διορθωτικούς συντελεστές  $(A_1, B_1, E_1)=(13, 3, 5.7)$  υπολογίζονται οι θεωρητικά εκτιμώμενες τιμές των μέσων απωλειών διάδοσης και στη συνέχεια από τα δεδομένα των Πινάκων 4.3 και 4.4 υπολογίζονται οι τιμές σκίασης, οι οποίες καταγράφονται στους Πίνακες 4.13 και 4.14

Πίνακας 4.13. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz- Μοντέλο “Okumura Hata”

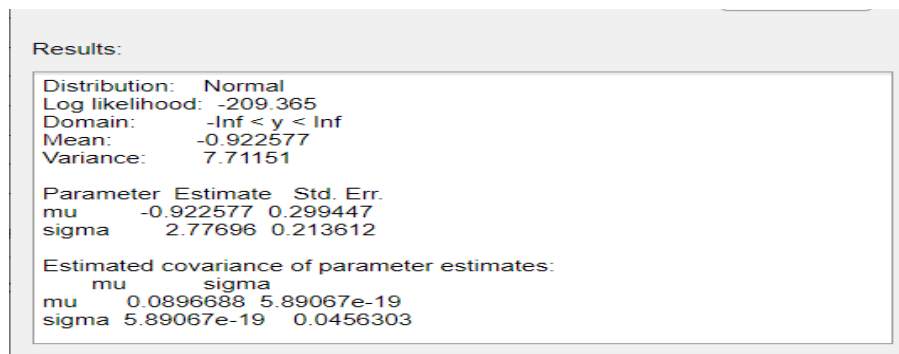
Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-14.4878 dB	6.3814 dB	-1.3400 dB	0.4140 dB	-0.9955 dB
2	-14.6685 dB	-23.0745 dB	-1.1721 dB	-1.4160 dB	-1.5450 dB
3	-14.4691 dB	5.7403 dB	-0.6415 dB	-2.8048 dB	-1.8444 dB
4	6.0802 dB	-18.4187 dB	4.2679 dB	0.6324 dB	2.2562 dB
5	4.8882 dB	1.0079 dB	3.0898 dB	-0.4774 dB	1.0652 dB
6	-14.2618 dB	2.6342 dB	0.1850 dB	0.6339 dB	1.7964 dB
7	-14.5818 dB	-0.5532 dB	4.0489 dB	-0.5748 dB	-0.0921 dB
8	-14.7018 dB	-1.2082 dB	0.5191 dB	1.8112 dB	1.0382 dB
9	-14.5518 dB	-19.2292 dB	0.3507 dB	0.8783 dB	-3.6959 dB
10	-14.7590 dB	-17.5914 dB	-18.3202 dB	-4.0952 dB	-23.9074 dB

Πίνακας 4.14. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz- Μοντέλο “Okumura Hata”

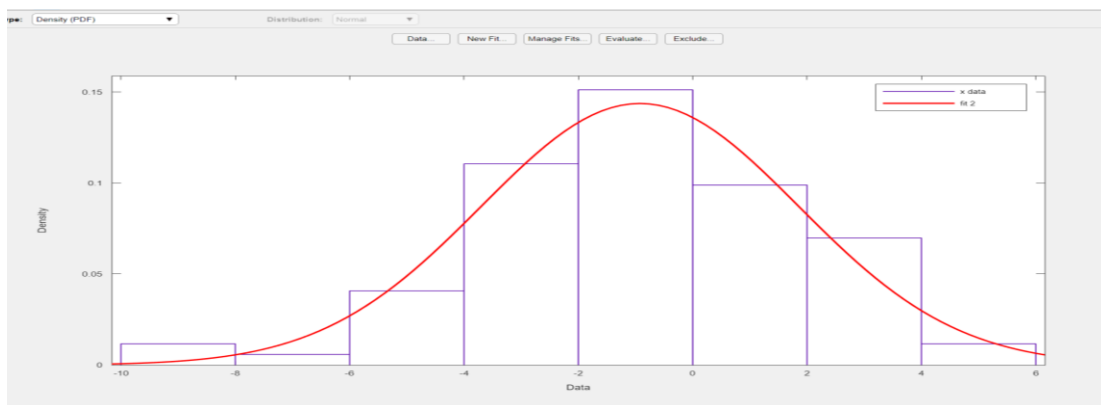
Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-1.5150 dB	-3.7132 dB	-2.0078 dB	-2.8662 dB	-4.4468 dB
2	-1.1754 dB	-2.6677 dB	1.6769 dB	-6.0947 dB	-5.4089 dB
3	-2.6396 dB	-1.8198 dB	-4.4540 dB	-9.5973 dB	-6.2317 dB
4	-2.9643 dB	-3.9360 dB	-5.6629 dB	-5.2604 dB	-6.5168 dB
5	-0.7692 dB	-4.7814 dB	-4.2960 dB	-3.8946 dB	-1.1758 dB

6	1.5343 dB	-0.6676 dB	-5.1864 dB	-3.4183 dB	-0.9416 dB
7	-3.2666 dB	0.6591 dB	0.8412 dB	-4.4950 dB	-3.4495 dB
8	1.9549 dB	-1.5939 dB	1.6098 dB	-1.7424 dB	-1.1962 dB
9	1.8236 dB	-9.3226 dB	-2.4178 dB	-1.7003 dB	-7.7580 dB
10	-10.5530 dB	0.3875 dB	-2.5201 dB	-6.5045 dB	-4.9465 dB

Με την επεξεργασία των δεδομένων των Πινάκων 4.13 και 4.14 μέσω του dfittool της Matlab προκύπτει η εκτίμηση για τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των απωλειών σκίασης. Τα αποτελέσματα  $(\mu, \sigma) = (-0.9 \text{ dB}, 2.8 \text{ dB})$  παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.29 και 4.30.



Εικόνα 4.29 : Σταθμός Βάσης A – 900 MHz - Μοντέλο “Okumura-Hata”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης



Εικόνα 4.30 : Σταθμός Βάσης A – 900 MHz - Μοντέλο “Okumura-Hata”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης



#### 4.3.5. Σταθμός Βάσης A: Μοντέλο COST231-Hata

Όπως ήδη έχει συζητηθεί εκτεταμένα στο Κεφάλαιο 2, το μοντέλο COST231-Hata επεκτείνει τις προβλέψεις του μοντέλου Okumura-Hata στη ζώνη συχνοτήτων 1500 MHz <  $f_c$  < 2000 MHz με τις ακόλουθες τροποποιήσεις:

$$\overline{P}L_{est} = F + B \log(R) - E + G \quad (4.11)$$

όπου  $F = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log h_b$ , το  $E$  ορίζεται όπως στην εξίσωση (4.10c) και τέλος το  $G$  λαμβάνει μία σταθερή τιμή ανάλογα με το περιβάλλον:

$$G = \begin{cases} 0 \text{ dB} & \text{μεσαίες πόλεις και προαστιακές περιοχές} \\ 3 \text{ dB} & \text{μητροπολιτικές περιοχές} \end{cases}$$

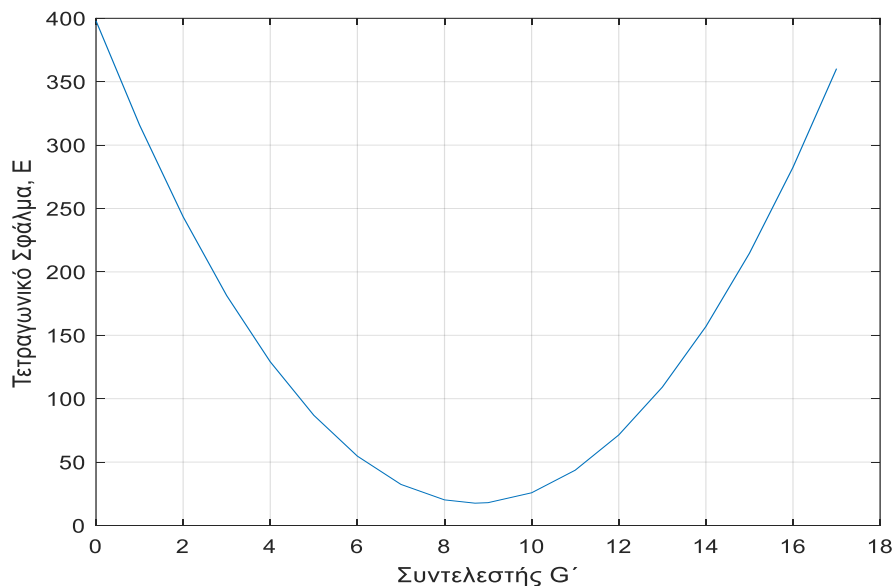
Στην περίπτωση των υπολογισμών της διπλωματικής εργασίας η συχνότητα λειτουργίας είναι  $f_c = 2100$  MHz, ενώ το ύψος του σταθμού βάσης είναι  $h_b = 24$ , όπως υποδεικνύει η Εικόνα 4.15.

Με την αντικατάσταση των δεδομένων στην εξίσωση (4.11) προκύπτουν οι θεωρητικά εκτιμώμενες μέσες απώλειες διάδοσης για αποστάσεις 100 m – 1000 m. Παράλληλα, μπορούν να εκτιμηθούν οι αντίστοιχες πειραματικές εκτιμήσεις των μέσων απωλειών διάδοσης από τις μετρήσεις, οι οποίες καταγράφονται στους Πίνακες 4.3 και 4.4. Η σύγκριση μεταξύ θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών δεδομένων καταδεικνύουν μία σημαντική απόκλιση που αποτυπώνεται σε ένα τετραγωνικό σφάλμα της τάξης του 400. Αυτό απεικονίζεται στην Εικόνα 4.31 και συγκεκριμένα στο πλέον αριστερό τμήμα της καμπύλης του τετραγωνικού σφάλματος. Η σχεδίαση της καμπύλης των θεωρητικών και των πειραματικών μέσω απωλειών διάδοσης για διαφορετικές αποστάσεις παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.32. Όπως χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 4.32, η θεωρητική εκτίμηση υπερτιμά τις απώλειες διάδοσης εμφανίζοντας μία σχετικά σταθερή απόκλιση σε dB από τα πειραματικά δεδομένα. Ως εκ τούτου, είναι δυνατό να τροποποιηθεί η συμβατική

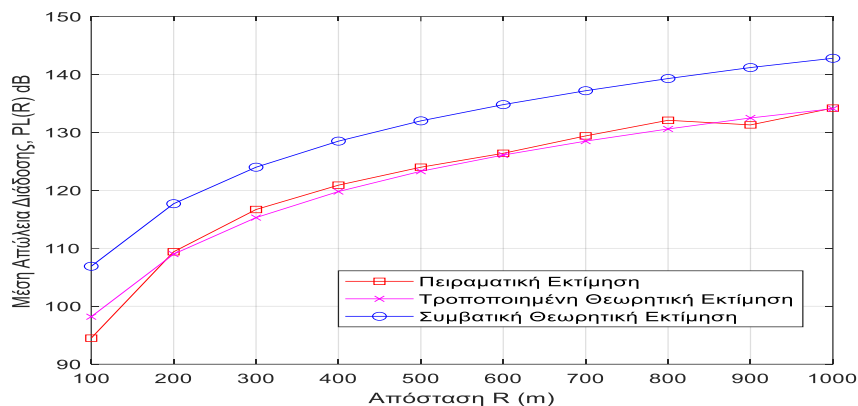
έκφραση της εξίσωσης (4.11) με την προσθήκη ενός σταθερού συντελεστή  $G'$ , ο οποίος θα αντισταθμίζει την σταθερή διαφορά μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων. Σε αυτό το πλαίσιο προτείνεται η προσθήκη ενός σταθερού συντελεστή  $G'$  στην εξίσωση (4.11), ώστε το μοντέλο να λάβει την ακόλουθη μορφή:

$$\overline{PL}_{est} = F + B \log(R) - E + G - G' \quad (4.12)$$

Υπολογίζοντας το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων για τιμές του  $G'$  σε ένα εύρος  $G' = 0 - 18$  σχεδιάζεται η καμπύλη του τετραγωνικού σφάλματος  $E(G')$  και προσδιορίζεται η βέλτιστη τιμή του  $G'$  ως αυτή που ελαχιστοποιεί το σφάλμα. Ουσιαστικά, η τιμή  $G' = 0$  αντιστοιχεί στο αρχικό μοντέλο της εξίσωσης (4.11). Σύμφωνα με τα γραφικά αποτελέσματα της Εικόνας 4.31 η βέλτιστη τιμή του προτεινόμενου διορθωτικού συντελεστή είναι  $G' = 8.7$ . Η Εικόνα 4.32 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών (χωρίς και με την προσθήκη του διορθωτικού συντελεστή) καταδεικνύοντας τη σημαντική βελτίωση που προκύπτει στην περίπτωση της τροποποιημένης θεωρητικής εκτίμησης.



Εικόνα 4.31. Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz- Μοντέλο COST231-Hata : Τετραγωνικό σφάλμα  $E$  συναρτήσει του συντελεστή  $G'$ .



Εικόνα 4.32. Σταθμός Βάσης A – 2100 MHz- Μοντέλο COST231-Hata: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης.

Υιοθετώντας την τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου COST231-Hata υπολογίζονται οι απώλειες σκίασης αφαιρώντας από τις πειραματικές μετρήσεις (Πίνακας 4.3 και 4.4) τις αντίστοιχες θεωρητικές. Τα αποτελέσματα για τις απώλειες σκίασης καταγράφονται στους Πίνακες 4.15 και 4.16.

Πίνακας 4.15. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης A – 2100 MHz- Μοντέλο “COST231 - Hata”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-15.1620 dB	3.945 dB	0.1086 dB	0.1508 dB	0.4272 dB
2	-15.3542 dB	4.138 dB	0.2313 dB	0.2122 dB	0.4948 dB
3	-15.1669 dB	2.926 dB	-0.3446 dB	-0.8284 dB	-0.2105 dB
4	3.6699 dB	-17.208 dB	3.4778 dB	2.0761 dB	2.3470 dB
5	2.2999 dB	-0.597 dB	2.9571 dB	0.6357 dB	1.9197 dB
6	-15.6001 dB	0.704 dB	0.1587 dB	1.4564 dB	3.3796 dB
7	-15.9301 dB	-1.774 dB	2.6445 dB	1.6620 dB	1.0162 dB
8	-15.8501 dB	0.643 dB	2.7319 dB	3.8362 dB	0.6321 dB
9	-15.9301 dB	-16.328 dB	2.4246 dB	1.3094 dB	-1.4908 dB
10	-15.4591 dB	-15.388 dB	-15.3198 dB	-2.1098 dB	-20.1473 dB

Πίνακας 4.16. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz-  
Μοντέλο “COST231 - Hata”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	0.1023 dB	-1.1559 dB	0.0836 dB	-1.0231 dB	0.9514 dB
2	-0.4956 dB	-0.1835 dB	5.3829 dB	-2.7094 dB	-1.2534 dB
3	-0.7993 dB	0.7720 dB	-0.1827 dB	-5.2866 dB	-2.4731 dB
4	-0.9046 dB	-0.6615 dB	-2.4599 dB	-2.4423 dB	-1.5473 dB
5	-0.1469 dB	-1.8614 dB	-1.5998 dB	-0.4353 dB	1.1042 dB
6	1.9971 dB	3.2288 dB	-2.0240 dB	-0.1666 dB	3.0835 dB
7	-2.3160 dB	3.4313 dB	3.2511 dB	-0.9133 dB	-0.7295 dB
8	2.8039 dB	-0.4636 dB	3.6302 dB	0.7391 dB	1.7311 dB
9	2.1386 dB	-4.8902 dB	-0.1227 dB	0.6856 dB	-3.1426 dB
10	-5.5785 dB	3.2317 dB	1.1244 dB	-2.8364 dB	-1.2823 dB

Με την επεξεργασία των δεδομένων σκίασης των Πινάκων 4.15 και 4.16, μέσω του dfittool της Matlab, προκύπτει η εκτίμηση για τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των απωλειών σκίασης. Τα αποτελέσματα  $(\mu, \sigma) = (0.4 \text{ dB}, 2.2 \text{ dB})$  παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.33 και 4.34.

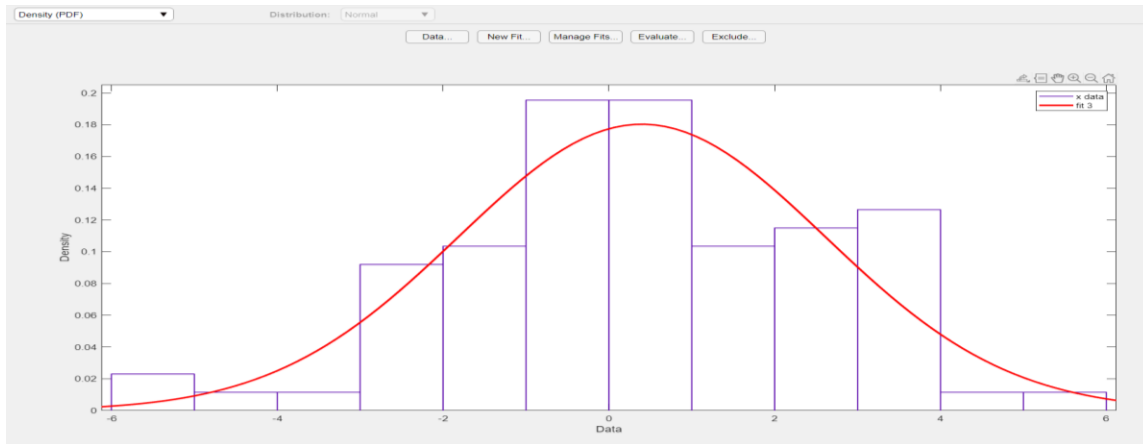
```

Results:
Distribution: Normal
Log likelihood: -192.058
Domain: -Inf < y < Inf
Mean: 0.398235
Variance: 4.8976

Parameter Estimate Std. Err.
mu 0.398235 0.237264
sigma 2.21305 0.169236

Estimated covariance of parameter estimates:
mu sigma
mu 0.0562943 1.16958e-18
sigma 1.16958e-18 0.028641
    
```

Εικόνα 4.33 : Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz - Μοντέλο “COST231-Hata”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης



Εικόνα 4.34 : Σταθμός Βάσης A – 2100 MHz - Μοντέλο “ COST231-Hata”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης

#### 4.3.6. Σταθμός Βάσης A: Μοντέλο Lee

Σύμφωνα με τις περιγραφές του Κεφαλαίου 2 το μοντέλο Lee έχει την ακόλουθη μορφή:

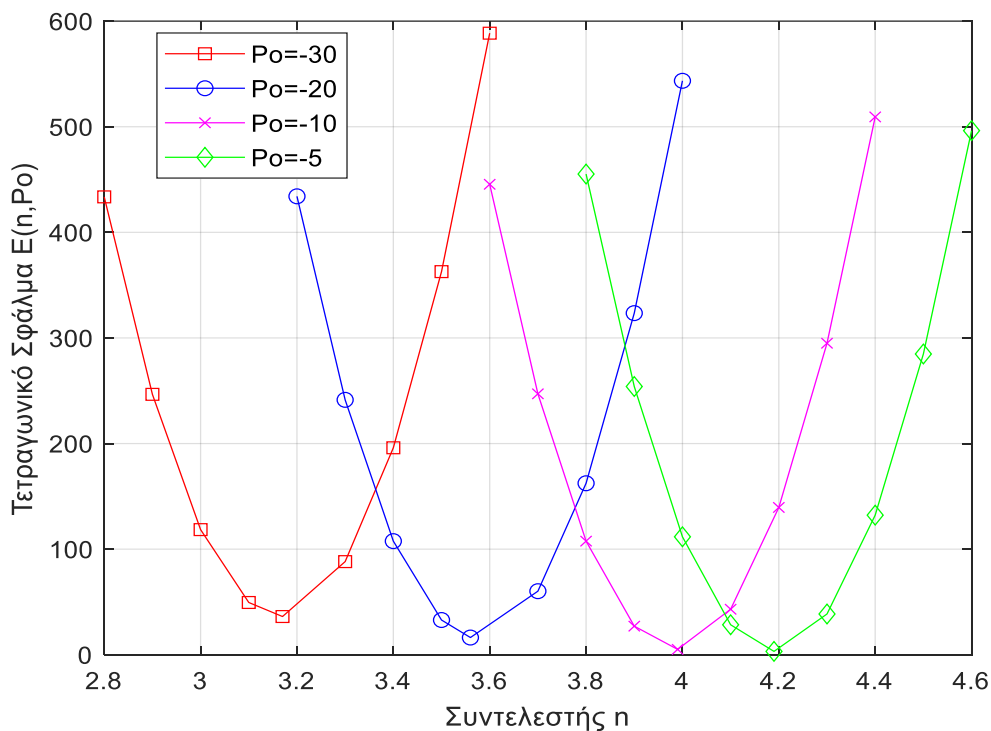
$$\overline{P}_{L_{est}} = 10n \log(R) - 20 \log(h_{b,eff}) - P_0 - 10 \log(h_m) + 29 \quad (4.13)$$

όπου  $R$  είναι η απόσταση από το σταθμό βάσης,  $h_{b,eff}$  είναι το ενεργό ύψος της κεραίας λαμβάνοντας υπόψη την κλίση της θέσης στην οποία βρίσκεται ο κινητός σταθμός,  $h_m$  το ύψος της κεραίας του κινητού σταθμού, ενώ οι σταθεροί συντελεστές  $n$  και  $P_0$  εξαρτώνται από το περιβάλλον της ασύρματης διάδοσης. Σε ότι αφορά το  $h_{b,eff}$  επιλέγεται η ταύτιση του με το συμβατικό ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης  $h_b = 24$  m, διότι η μορφολογία του εδάφους δεν παρουσιάζει σημαντικές κλίσεις. Τέλος, για το ύψος της κεραίας του κινητού σταθμού επιλέγεται η τυπική τιμή  $h_m = 1.5$  m.

Εφόσον το ζεύγος τιμών  $(n, P_0)$  εξαρτάται από το περιβάλλον διάδοσης, οι τιμές τους θα αποτελέσουν αντικείμενο βελτιστοποίησης.

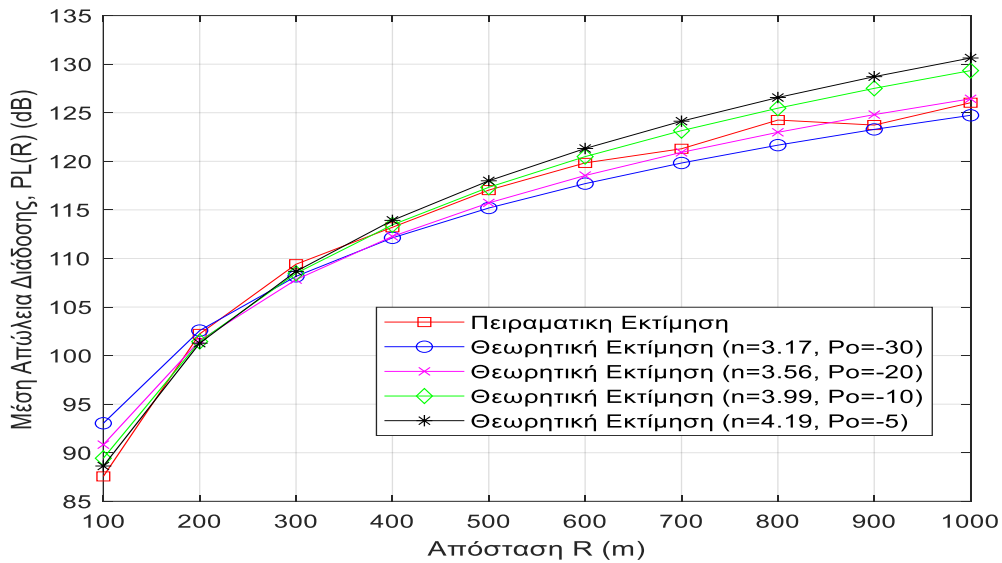
#### 4.3.6.1. Σταθμός Βάσης A: Lee – 900 MHz

Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών του ζεύγους  $(n, P_0)$  θα πραγματοποιηθούν οι συνήθεις υπολογισμοί τετραγωνικού σφάλματος για διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών. Οι καμπύλες της Εικόνας 4.35 αναπαριστούν το τετραγωνικό σφάλμα συναρτήσει του συντελεστή  $n$  για 4 διακριτές τιμές του  $P_0 = -5, -10, -20$  και  $-30$ . Όπως προκύπτει από τα γραφικά αποτελέσματα το τετραγωνικό σφάλμα ελαχιστοποιείται για τις μικρότερες τιμές του  $P_0 = -5$  και  $-10$  με αντίστοιχη αύξηση της τιμής του συντελεστή  $n = 3.99$  και  $4.19$ , αντίστοιχα. Αυτή η τάση συνεχίζει να ισχύει και για τιμές  $P_0 < -5$  με ταυτόχρονη διατήρηση της μικρής τιμής του τετραγωνικού σφάλματος. Ουσιαστικά, η διερεύνηση καταλήγει στην ανεύρεση πολλαπλών βέλτιστων λύσεων ως προς το κριτήριο της ελαχιστοποίησης του σφάλματος.



Εικόνα 4.35 : Σταθμός Βάσης A – 900 MHz- Μοντέλο “Lee” : Τετραγωνικό σφάλμα  $E$  συναρτήσει των συντελεστών  $(n, P_0)$ .

Η διαφοροποίηση ανάμεσα στις προαναφερόμενες λύσεις και η τελική επιλογή της βέλτιστης διευκολύνεται από τα γραφικά αποτελέσματα της Εικόνα 4.36. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.36 η διαφοροποίηση ανάμεσα στα ζεύγη τιμών ( $n= 3.99, P_0=-10$ ) και ( $n= 4.19, P_0= -5$ ) σχετίζεται με την καλύτερη ή χειρότερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα σε μικρές και μεγάλες αποστάσεις. Η ελαχιστοποίηση του σφάλματος για το ζεύγος ( $n= 4.19, P_0= -5$ ) προκύπτει από την εξαιρετική προσαρμογή στα πρώτα 100 m, γεγονός το οποίο επιτρέπει μία σχετικά μεγάλη απόκλιση σε πιο απομακρυσμένα σημεία. Αντίθετα, το ζεύγος ( $n= 3.99, P_0= -10$ ) επιτυγχάνει ένα μικρό τετραγωνικό σφάλμα παρουσιάζοντας ικανοποιητική σύγκλιση τόσο σε μικρές, όσο και σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Στο πλαίσιο αυτών των διαπιστώσεων εκτιμάται ότι τελικά η βέλτιστη λύση είναι το ζεύγος ( $n= 3.99, P_0= -10$ )



Εικόνα 4.36. Σταθμός Βάσης A – 900 MHz- Μοντέλο “Lee”: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης.

Με την εισαγωγή των βέλτιστων τιμών ( $n= 3.99, P_0= -10$ ) υπολογίζονται οι απώλειες σκίασης αφαιρώντας από τις πειραματικές μετρήσεις (Πίνακας 3.1 και 3.2) τις αντίστοιχες θεωρητικές. Τα αποτελέσματα για τις απώλειες σκίασης καταγράφονται στους Πίνακες 3.17 και 3.18.

Πίνακας 3.17. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz-  
Μοντέλο “Lee”

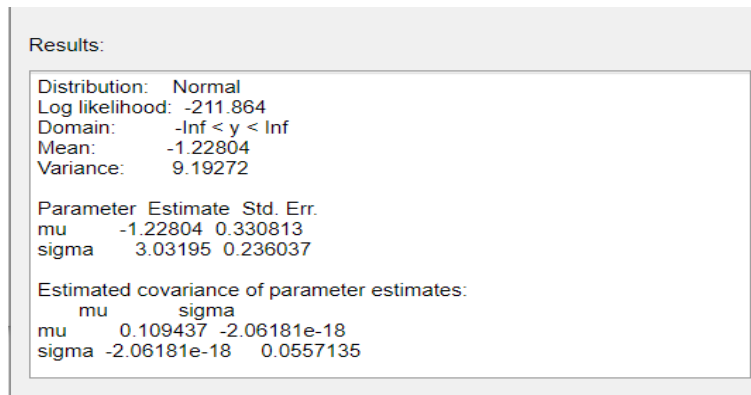
Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-15.0609 dB	6.0670 dB	-1.5030 dB	0.3583 dB	-0.9679 dB
2	-15.2416 dB	-23.3889 dB	-1.3352 dB	-1.4717 dB	-1.5174 dB
3	-15.0422 dB	5.4259 dB	-0.8045 dB	-2.8605 dB	-1.8168 dB
4	5.5071 dB	-18.7331 dB	4.1048 dB	0.5767 dB	2.2838 dB
5	4.3151 dB	0.6935 dB	2.9267 dB	-0.5331 dB	1.0928 dB
6	-14.8349 dB	2.3198 dB	0.0220 dB	0.5783 dB	1.8240 dB
7	-15.1549 dB	-0.8676 dB	3.8859 dB	-0.6305 dB	-0.0645 dB
8	-15.2749 dB	-1.5226 dB	0.3560 dB	1.7556 dB	1.0658 dB
9	-15.1249 dB	-19.5436 dB	0.1877 dB	0.8226 dB	-3.6683 dB
10	-15.3321 dB	-17.9058 dB	-18.4833 dB	-4.1509 dB	-23.8798 dB

Πίνακας 4.18. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz-  
Μοντέλο “Lee”

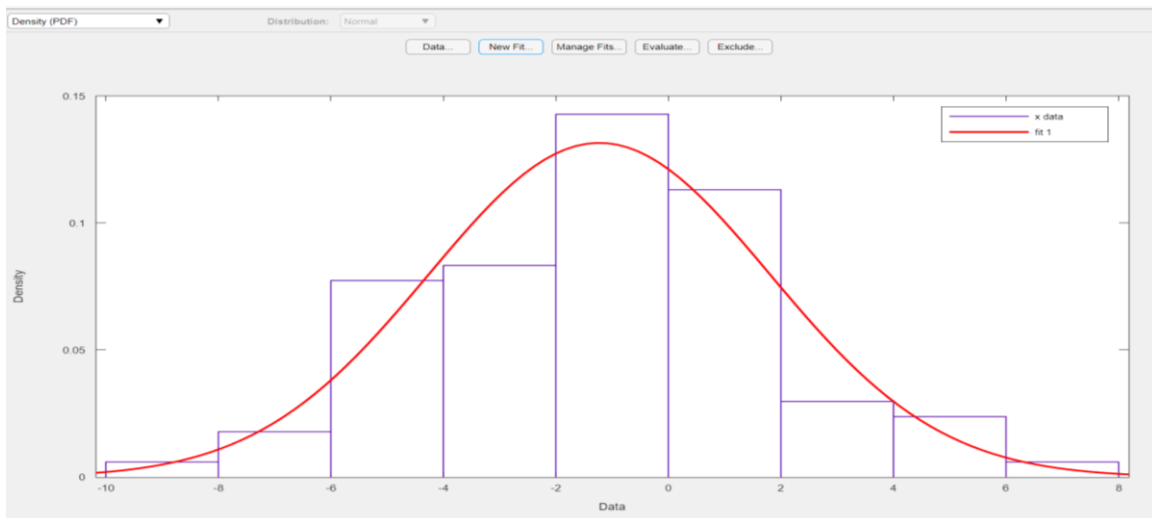
Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-1.4193 dB	-3.5601 dB	-1.8048 dB	-2.6192 dB	-4.1605 dB
2	-1.0798 dB	-2.5145 dB	1.8799 dB	-5.8477 dB	-5.1226 dB
3	-2.5440 dB	-1.6666 dB	-4.2510 dB	-9.3503 dB	-5.9454 dB
4	-2.8686 dB	-3.7828 dB	-5.4598 dB	-5.0134 dB	-6.2305 dB
5	-0.6736 dB	-4.6282 dB	-4.0929 dB	-3.6477 dB	-0.8895 dB
6	1.6299 dB	-0.5144 dB	-4.9834 dB	-3.1714 dB	-0.6553 dB
7	-3.1709 dB	0.8123 dB	1.0442 dB	-4.2481 dB	-3.1632 dB
8	2.0506 dB	-1.4407 dB	1.8128 dB	-1.4954 dB	-0.9099 dB
9	1.9192 dB	-9.1694 dB	-2.2148 dB	-1.4533 dB	-7.4717 dB
10	-10.4574 dB	0.5407 dB	-2.3171 dB	-6.2575 dB	-4.6602 dB



Μετά την επεξεργασία των δεδομένων των Πινάκων 4.17 και 4.18 με το dfittool της Matlab, προκύπτει η εκτίμηση για τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των απωλειών σκίασης. Τα αποτελέσματα  $(\mu, \sigma) = (-1.2 \text{ dB}, 3 \text{ dB})$  παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.37 και 4.38.



Εικόνα 4.37 : Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz - Μοντέλο “Lee”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης

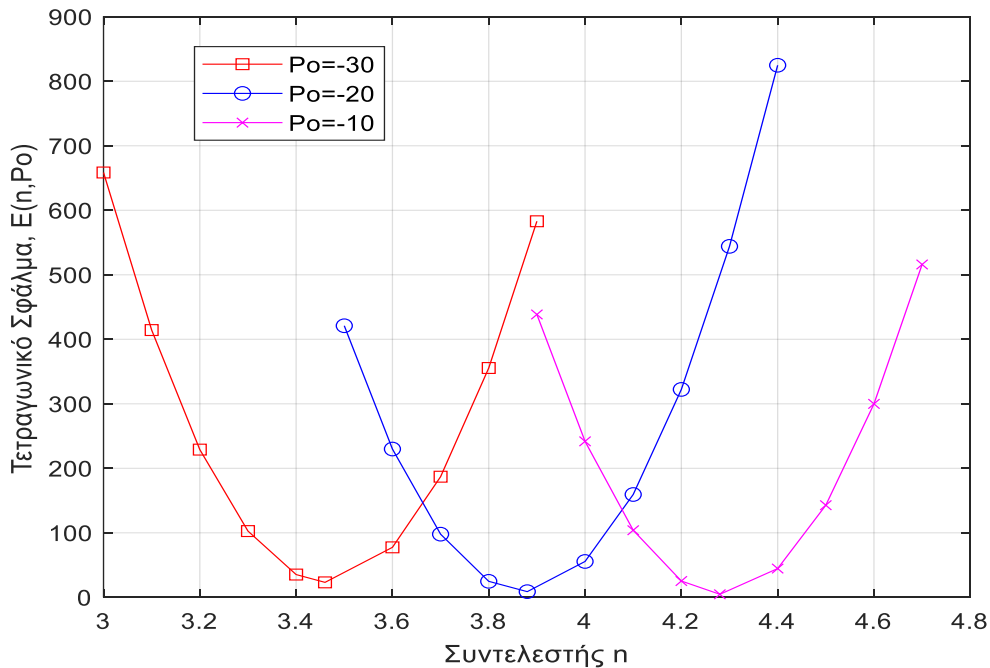


Εικόνα 4.38 : Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz - Μοντέλο Lee”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης

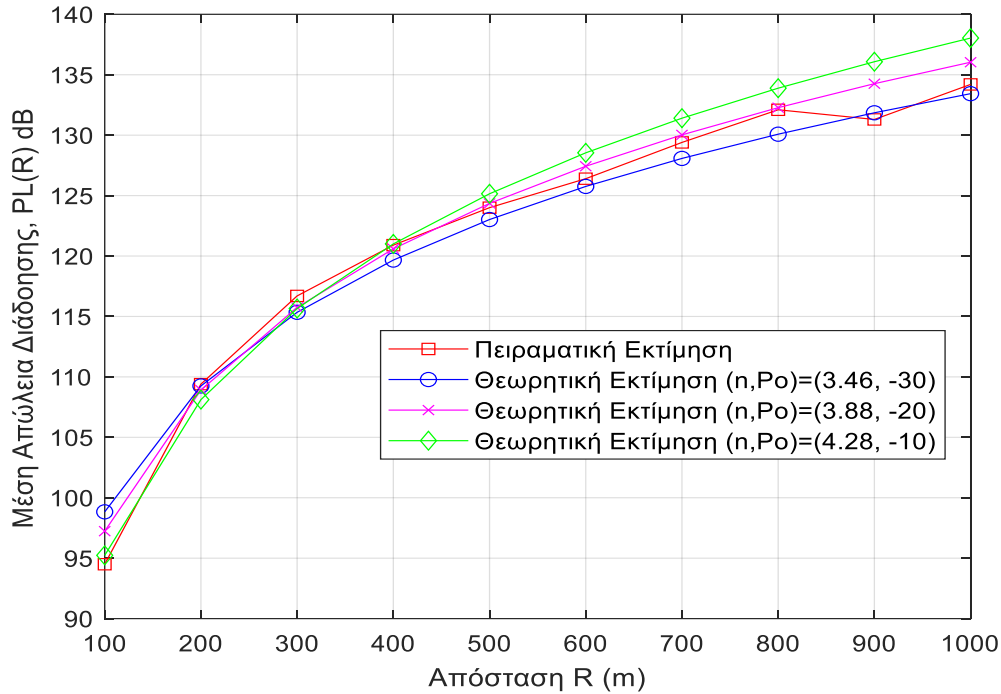
#### 4.3.6.2. Σταθμός Βάσης Α: Lee – 2100 MHz

Στην περίπτωση του μοντέλου “Lee” και τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών του ζεύγους  $(n, P_0)$  για το Σταθμό Βάσης Α και τη συχνότητα λειτουργίας 2100 MHz, η

μεθοδολογία και τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια με αυτά που προκύπτουν για τα 900 MHz. Οι καμπύλες της Εικόνας 4.39 αναπαριστούν το τετραγωνικό σφάλμα συναρτήσεως του συντελεστή  $n$  για 3 διακριτές τιμές του  $P_0 = -10, -20$  και  $-30$ . Όπως προκύπτει από τα γραφικά αποτελέσματα το τετραγωνικό σφάλμα ελαχιστοποιείται για τις μικρότερες τιμές του  $P_0 = -20$  και  $-10$  με αντίστοιχη αύξηση της τιμής του συντελεστή  $n = 3.88$  και  $4.28$ , αντίστοιχα. Εφόσον, συνυπολογιστεί και η σύγκλιση των θεωρητικών εκτιμήσεων ως προς τα πειραματικά αποτελέσματα σε ότι αφορά τις μέσες απώλειες διάδοσης, η οποία αναπαρίσταται στην Εικόνα 4.39, προκύπτει το συμπέρασμα ότι οι βέλτιστες τιμές είναι  $(n, P_0) = (3.88, -20)$ .



Εικόνα 4.39: Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz- Μοντέλο “Lee” : Τετραγωνικό σφάλμα  $E$  συναρτήσεως των συντελεστών  $(n, P_0)$ .



Εικόνα 4.40: Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz- Μοντέλο “Lee”: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης.

Με την εισαγωγή των βέλτιστων τιμών ( $n= 3.88$ ,  $P_0=-20$ ) υπολογίζονται οι απώλειες σκίασης αφαιρώντας από τις πειραματικές μετρήσεις (Πίνακας 4.1 και 4.2) τις αντίστοιχες θεωρητικές. Τα αποτελέσματα για τις απώλειες σκίασης καταγράφονται στους Πίνακες 4.19 και 4.20.

Πίνακας 4.19. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz- Μοντέλο “Lee”

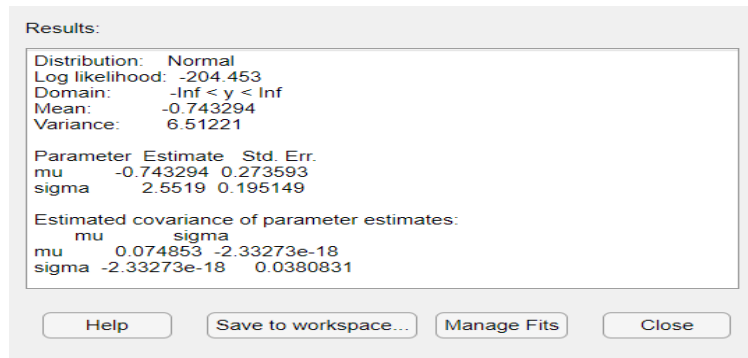
Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-14.1568 dB	4.065 dB	-0.2891 dB	-0.6143 dB	-0.6228 dB
2	-14.3490 dB	4.258 dB	-0.1664 dB	-0.5529 dB	-0.5552 dB
3	-14.1617 dB	3.047 dB	-0.7423 dB	-1.5935 dB	-1.2605 dB
4	4.6751 dB	-17.088 dB	3.0802 dB	1.3111 dB	1.2970 dB

5	3.3051 dB	-0.477 dB	2.5594 dB	-0.1294 dB	0.8697 dB
6	-14.5949 dB	0.824 dB	-0.2390 dB	0.6913 dB	2.3296 dB
7	-14.9249 dB	-1.654 dB	2.2468 dB	0.8970 dB	-0.0338 dB
8	-14.8449 dB	0.763 dB	2.3342 dB	3.0711 dB	-0.4179 dB
9	-14.9249 dB	-16.208 dB	2.0269 dB	0.5443 dB	-2.5408 dB
10	-14.4539 dB	-15.268 dB	-15.7175 dB	-2.8748 dB	-21.1973 dB

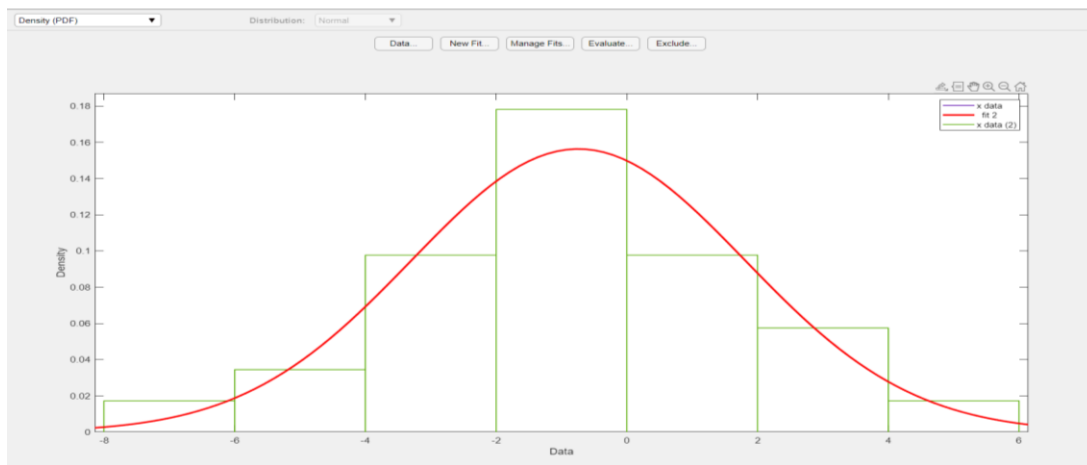
Πίνακας 4.20. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz-  
Μοντέλο “Lee”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-1.1805 dB	-2.6356 dB	-1.5666 dB	-2.8238 dB	-0.9838 dB
2	-1.7784 dB	-1.6632 dB	3.7327 dB	-4.5100 dB	-3.1886 dB
3	-2.0822 dB	-0.7077 dB	-1.8329 dB	-7.0872 dB	-4.4082 dB
4	-2.1875 dB	-2.1411 dB	-4.1101 dB	-4.2429 dB	-3.4825 dB
5	-1.4297 dB	-3.3411 dB	-3.2500 dB	-2.2359 dB	-0.8310 dB
6	0.7143 dB	1.7491 dB	-3.6742 dB	-1.9672 dB	1.1484 dB
7	-3.5988 dB	1.9516 dB	1.6009 dB	-2.7139 dB	-2.6647 dB
8	1.5211 dB	-1.9433 dB	1.9800 dB	-1.0615 dB	-0.2041 dB
9	0.8557 dB	-6.3699 dB	-1.7729 dB	-1.1150 dB	-5.0778 dB
10	-6.8613 dB	1.7520 dB	-0.5258 dB	-4.6371 dB	-3.2175 dB

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων των Πινάκων 4.19 και 4.20 με το dfittool της Matlab, προκύπτει η εκτίμηση για τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των απωλειών σκίασης. Τα αποτελέσματα  $(\mu, \sigma) = (-0.7 \text{ dB}, 2.55 \text{ dB})$  παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.41 και 4.42.



Εικόνα 4.41 : Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz - Μοντέλο “Lee”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης



Εικόνα 4.42 : Σταθμός Βάσης Α – 2100 MHz - Μοντέλο “Lee”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης

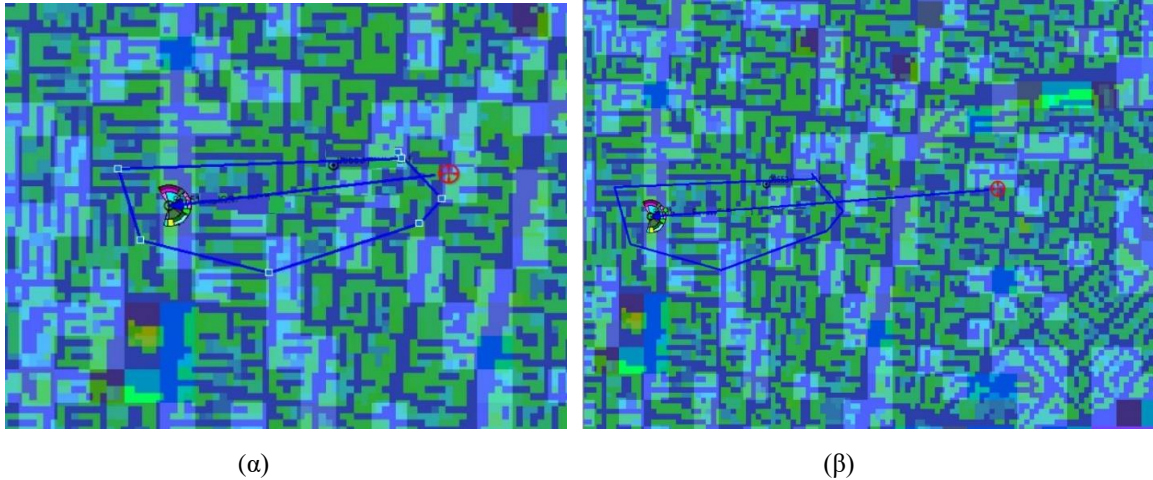
#### 4.4 Σταθμός Βάσης Β (Αστικό Περιβάλλον με Πυκνή Δόμηση)

##### 4.4.1. Μετρήσεις AtoI1 και Υπολογισμός Απωλειών Διάδοσης

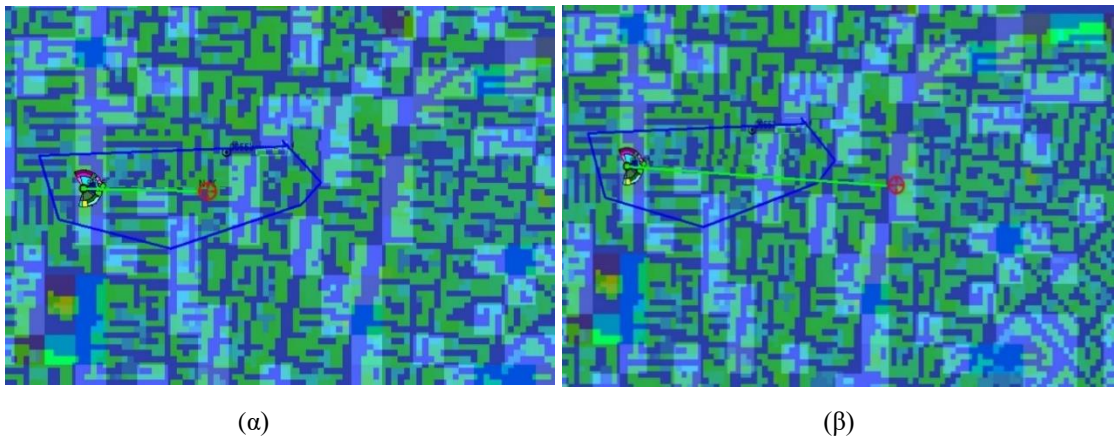
Στην περίπτωση του Σταθμού Βάσης Β, το περιβάλλον ασύρματης διάδοσης είναι επίσης αστικό, όπως στην περίπτωση του Σταθμού Βάσης Α, αλλά διαφοροποιείται λόγω της πυκνής δόμησης που το χαρακτηρίζει.

Η πυκνότητα της δόμησης αποτυπώνεται με γραφικό τρόπο στις Εικόνες 4.43 – 4.46. Οι Εικόνες 4.43 και Εικόνες 4.44 παρουσιάζουν με τη μορφή κάτοψης την υπό μελέτη περιοχή. Παράλληλα, η Εικόνα 4.43 και 4.44 αποτελούν χαρακτηριστικά στιγμιότυπα μετρήσεων AtoI1 σε διαφορετικές αποστάσεις και συχνότητες 900 MHz και 2100

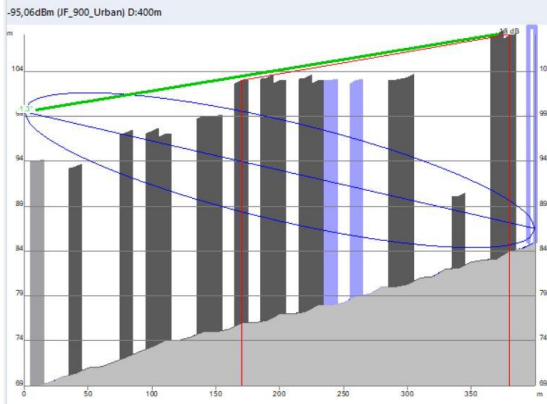
MHz, αντίστοιχα. Οι Εικόνες 4.45 και 4.46 παρουσιάζουν πληροφορίες για το ύψος των κτηρίων. Παράλληλα, οι Εικόνες 4.45 και 4.46 απεικονίζουν τη διαδρομή της ασύρματης διάδοσης για διαφορετικά σημεία μετρήσεων και συχνότητες 900 MHz και 2100 MHz, αντίστοιχα.



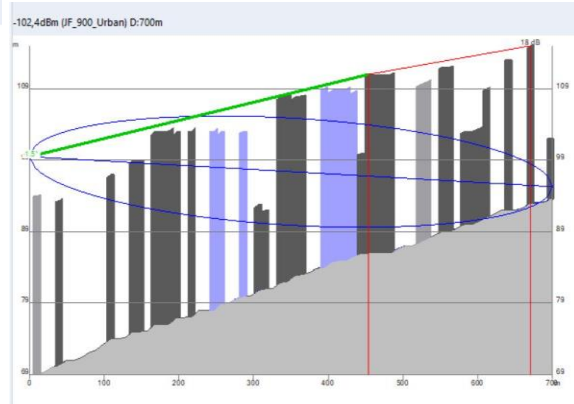
Εικόνα 4.43 : Σταθμός βάσης Β στα 900MHz: Ενδεικτικά στιγμιότυπα μετρήσεων σε αποστάσεις (α) 400m και (β) 700 m.



Εικόνα 4.44 : Σταθμός βάσης Β στα 2100MHz: Ενδεικτικά στιγμιότυπα μετρήσεων με μετρήσεις σε αποστάσεις (α) 200m και (β) 500 m.

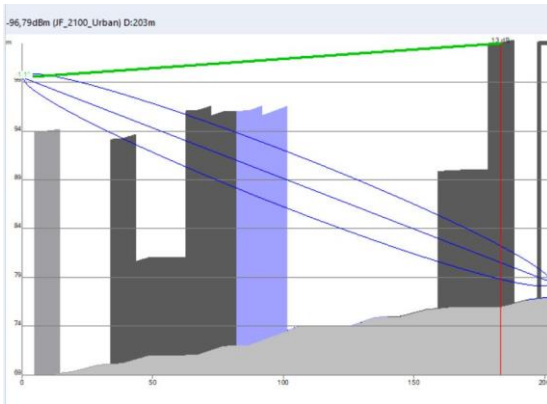


(α)

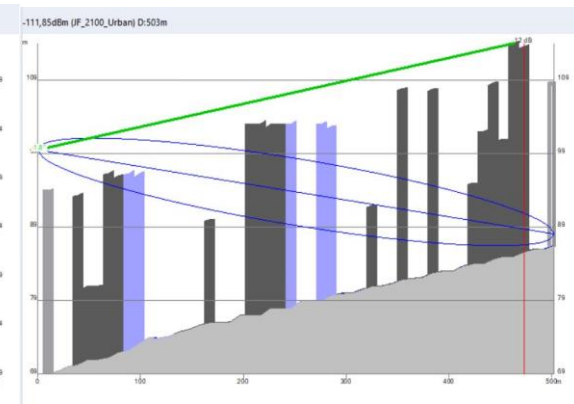


(β)

Εικόνα 4.45 : Σταθμός βάσης Β στα 900MHz: Απεικόνιση διαδρομής ασύρματης διάδοσης σε απόστασή (α) 400m και (β) 700 m.



(α)



(β)

Εικόνα 4.46 : Σταθμός βάσης Β στα 2100MHz: Απεικόνιση διαδρομής ασύρματης διάδοσης σε απόστασή (α) 200m και (β) 500 m.

Transmission/Reception					
	Transmission		Reception		Equipment...
	Real	Computed	Real	Computed	
Total losses:	1 dB	0 dB	1 dB	0 dB	Detail
Noise figure:			5 dB	0 dB	
<b>Transmission</b>					
Power:	<input checked="" type="radio"/> Power: 18 dBm	<input type="radio"/> EIRP: 31,2 dBm			
<b>Antennas</b>					
Height/ground:	30,5 m				
<b>Main Antenna</b>					
Model:	800.ASI4517R12.06				Select...
Mechanical azimuth:	80 °	Mechanical downtilt:	0 °		
Electrical azimuth:	-7,5 °	Electrical downtilt:	6,5 °		
		Additional electrical downtilt:	0 °		

Εικόνα 4.47 : Ύψος κεραίας 30,5m

Η κεραία του Σταθμού Βάσης Β εκπέμπει στις συχνότητες των 900MHz και 2100MHz και έχει ύψος 30,5m από το έδαφος όπως απεικονίζεται στην Εικόνα 4.47. Σύμφωνα με την Εικόνα 4.48, η Ισοδύναμη Ισοτροπικά Ακτινοβολούμενη Ισχύς είναι στη συχνότητα των 900MHz EIRP=31,18 dBm ενώ στη συχνότητα των 2100MHz είναι EIRP=32,16 dBm.

Receiver:	(23,731783543 ; 37,999268921)	Receiver:	(23,729575726 ; 37,998786186)
Distance:	400m	Distance:	203m
Power:	18dBm	Power:	18dBm
EIRP:	31,18dBm	EIRP:	32,16dBm
Reception gain:	0 dB	Reception gain:	0 dB
Path Loss:	126,24 dB	Path Loss:	128,95 dB
Shadowing margin:	--- dB	Shadowing margin:	--- dB
Signal Level:	-95,06dBm	Signal Level:	-96,79dBm

Εικόνα 4.48 : Ισχύς εκπομπής (α) EIRP 31,18 dBm στα 900 MHz και (β) EIRP 32,16 dBm στα 2100 MHz.

Οι μετρήσεις Atoll για την ισχύ λήψης στον Σταθμό Βάσης Β και τη συχνότητα των 900 MHz καταγράφονται στους Πίνακες Β.1 και Β.2 του Παραρτήματος Β. Με τη χρήση της εξίσωσης (4.1) υπολογίζονται οι απώλειες διάδοσης και καταγράφονται στους Πίνακες 4.21 (100 m – 500 m) και 4.22 (600 m – 1000 m).

Πίνακας 4.21. Σταθμός Βάσης Β: Πειραματικές τιμές Atoll σε αποστάσεις 100 m -500 m σε συχνότητα λειτουργίας 900 MHz.

Πειραματικές Απώλειες Διάδοσης 900MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	99.90 dB	107.41 dB	115.76 dB	116.48 dB	122.37 dB
2	73.97 dB	105.19 dB	113.54 dB	116.76 dB	118.97 dB
3	100.18 dB	104.88 dB	117.62 dB	120.66 dB	122.21 dB
4	70.07 dB	111.68 dB	117.61 dB	120.41 dB	123.21 dB
5	74.46 dB	112.53 dB	117.48 dB	119.06 dB	120.96 dB



6	74.17 dB	108.93 dB	117.71 dB	117.86 dB	120.24 dB
7	97.37 dB	109.54 dB	114.82 dB	121.02 dB	119.19 dB
8	97.37 dB	109.47 dB	114.76 dB	120.46 dB	119.56 dB
9	73.50 dB	109.26 dB	116.52 dB	118.39 dB	119.33 dB
10	98.70 dB	109.17 dB	116.16 dB	114.56 dB	122.43 dB

Πίνακας 4.22. Σταθμός Βάσης Β: Πειραματικές τιμές Atoll σε αποστάσεις 600 m -1000 m σε συχνότητα λειτουργίας 900 MHz.

Πειραματικές Απώλειες Διάδοσης 900MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	123.60 dB	126.60 dB	127.84 dB	136.02 dB	130.88 dB
2	118.85 dB	125.51 dB	128.79 dB	129.21 dB	132.13 dB
3	120.50 dB	121.28 dB	125.85 dB	129.42 dB	129.67 dB
4	121.32 dB	123.51 dB	127.50 dB	131.86 dB	129.98 dB
5	123.85 dB	128.71 dB	132.17 dB	129.91 dB	131.22 dB
6	120.11 dB	130.99 dB	125.90 dB	128.15 dB	130.40 dB
7	123.29 dB	124.87 dB	129.43 dB	126.90 dB	128.24 dB
8	124.96 dB	122.39 dB	126.83 dB	134.41 dB	131.80 dB
9	125.69 dB	125.53 dB	129.98 dB	132.84 dB	131.63 dB
10	124.46 dB	128.71 dB	121.32 dB	130.85 dB	129.94 dB

Με ανάλογο τρόπο υπολογίζονται οι πειραματικές απώλειες διάδοσης σε συχνότητα λειτουργίας 2100 MHz. Οι πρωτογενείς πειραματικές τιμές της λαμβανόμενης ισχύος καταγράφονται στους Πίνακες Β.3 και Β.4 του Παραρτήματος Β, ενώ οι υπολογιζόμενες τιμές απωλειών διάδοσης καταγράφονται στους Πίνακες 4.23 και 4.24.

Πίνακας 4.23. Σταθμός Βάσης Β: Πειραματικές τιμές Atoll σε αποστάσεις 100 m -500 m σε συχνότητα λειτουργίας 2100 MHz.

Πειραματικές Απώλειες Διάδοσης – 2100MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	104.36 dB	113.35 dB	121.15 dB	122.60 dB	127.69 dB
2	81.50 dB	111.72 dB	119.91 dB	122.63 dB	125.23 dB
3	105.31 dB	111.39 dB	122.74 dB	126.06 dB	127.95 dB
4	105.19 dB	116.61 dB	122.72 dB	125.92 dB	128.61 dB
5	82.64 dB	117.52 dB	122.60 dB	124.26 dB	126.24 dB
6	82.44 dB	114.42 dB	122.85 dB	122.50 dB	126.18 dB
7	103.11 dB	114.88 dB	120.29 dB	124.14 dB	125.73 dB
8	103.12 dB	114.82 dB	119.71 dB	125.19 dB	126.24 dB
9	81.68 dB	114.65 dB	121.66 dB	123.60 dB	126.20 dB
10	104.62 dB	114.54 dB	121.44 dB	120.11 dB	128.38 dB

Πίνακας 4.24. Σταθμός Βάσης Β: Πειραματικές τιμές Atoll σε αποστάσεις 600 m -1000 m σε συχνότητα λειτουργίας 2100 MHz.

Πειραματικές Απώλειες Διάδοσης – 2100MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	129.78 dB	133.11 dB	134.31 dB	141.39 dB	137.36 dB
2	125.77 dB	132.32 dB	134.76 dB	135.55 dB	138.24 dB
3	127.52 dB	127.14 dB	131.32 dB	135.73 dB	136.56 dB
4	127.36 dB	128.89 dB	133.19 dB	137.62 dB	136.47 dB
5	129.89 dB	134.44 dB	137.30 dB	136.29 dB	137.86 dB
6	126.39 dB	136.25 dB	131.84 dB	135.34 dB	136.63 dB
7	129.68 dB	130.61 dB	135.51 dB	133.98 dB	135.14 dB
8	130.92 dB	129.44 dB	133.60 dB	140.32 dB	138.39 dB
9	131.89 dB	132.21 dB	135.02 dB	138.61 dB	137.47 dB
10	130.12 dB	133.61 dB	128.09 dB	136.79 dB	136.41 dB

#### 4.4.2. Σταθμός Βάσης B: Μοντέλο “Power Law”

Το “Power Law” ημιεμπειρικό μοντέλο, όπως έχει αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2 και στην Ενότητα 4.3, έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\overline{PL}_{est} = PL(R_0) + 10n \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (4.13)$$

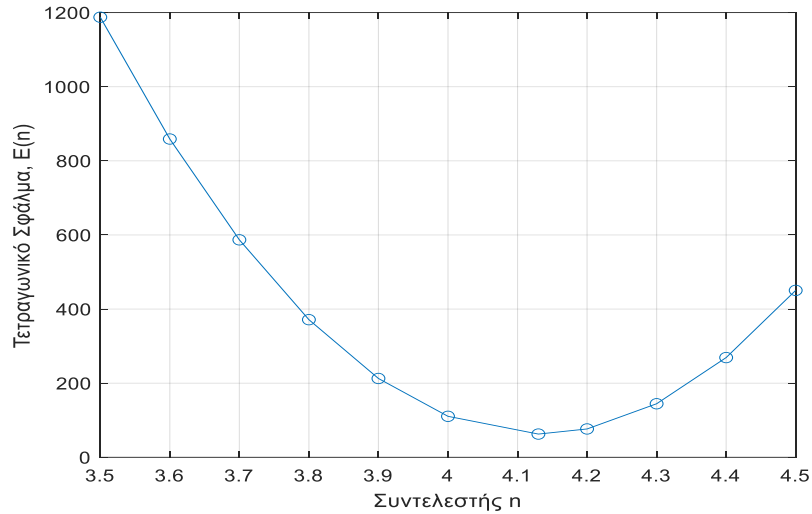
όπου  $n$  είναι ο συντελεστής απωλειών διάδοσης (path loss factor), του οποίου η βέλτιστη τιμή θα εκτιμηθεί μέσω της επεξεργασίας των πειραματικών αποτελεσμάτων, και  $PL(R_0)$  είναι οι απώλειες ελεύθερης διάδοσης σε απόσταση  $R_0 = 10$  m.

##### 4.4.2.1. Σταθμός Βάσης B: Power Law - 900 MHz

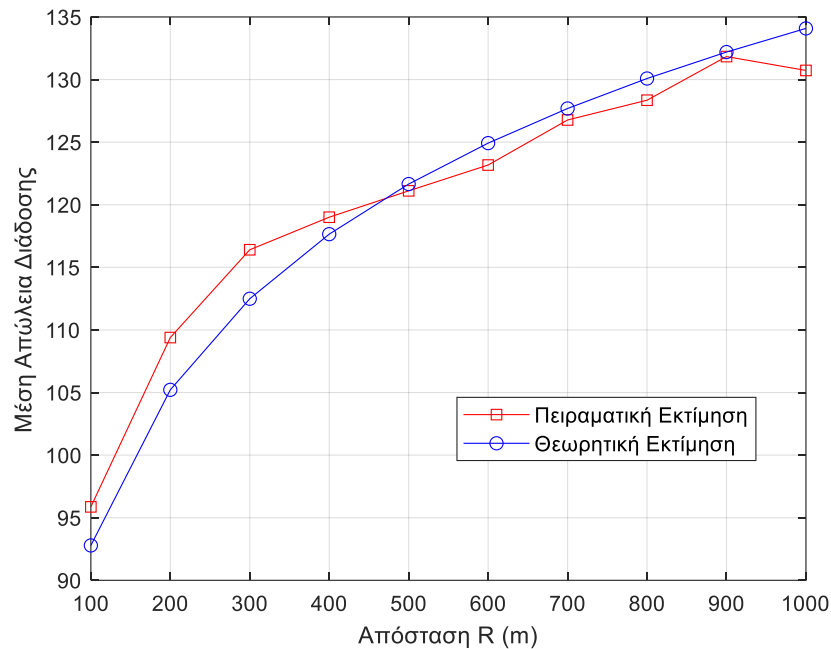
Μετά τον υπολογισμό των απωλειών ελεύθερης διάδοσης σε απόσταση 10 m, η εξίσωση (4.13) εξειδικεύεται ως εξής:

$$\overline{PL}_{est} = 51.5 + 10n \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (4.14)$$

Υπολογίζοντας τις θεωρητικά εκτιμώμενες τιμές  $\overline{PL}_{est}$  για ένα εύρος τιμών του  $n = 3.5 - 4.5$  και στη συνέχεια υπολογίζοντας το τετραγωνικό σφάλμα, μεταξύ της θεωρητικής εκτίμησης και υπολογισμού των πειραματικών μέσων απωλειών διάδοσης από τους Πίνακες 4.21 και 4.22 υπολογίστηκε η βέλτιστη τιμή  $n = 4.13$ . Η Εικόνα 4.49 απεικονίζει γραφικά τους προαναφερόμενους υπολογισμούς καταδεικνύοντας ότι η τιμή  $n = 3.85$  συνιστά τη βέλτιστη τιμή με κριτήριο την προσαρμογή των θεωρητικών εκτιμήσεων στις πειραματικές μετρήσεις.



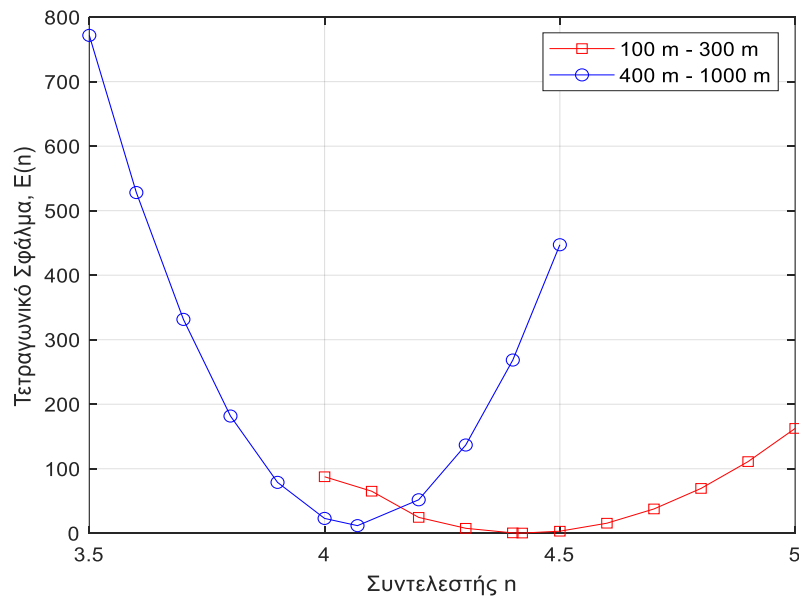
Εικόνα 4.49: Σταθμός Βάσης B – 900 MHz – Μοντέλο “Power Law” : Τετραγωνικό σφάλμα E συναρτήσει συντελεστή απωλειών διάδοσης n



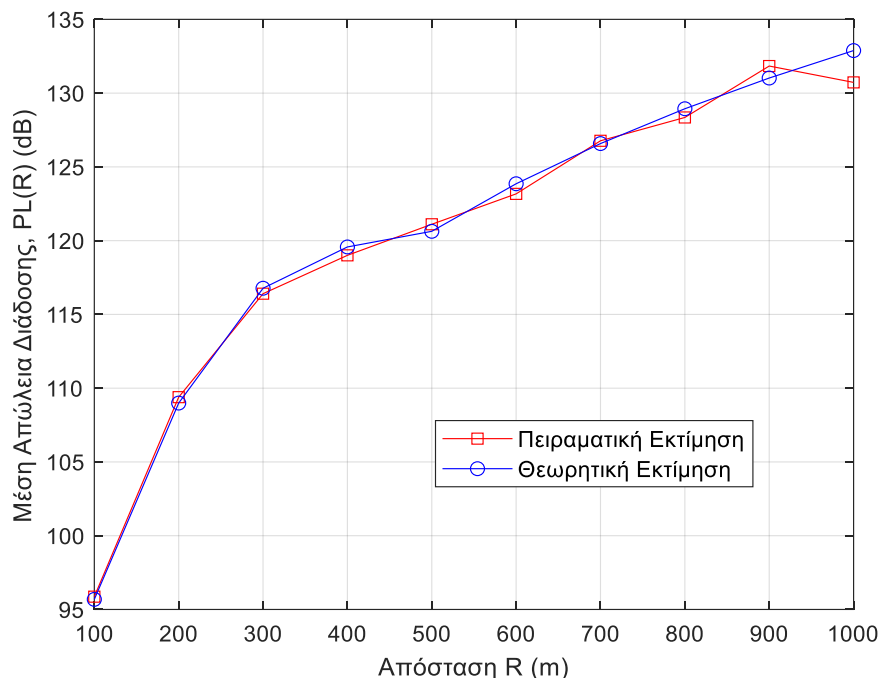
Εικόνα 4.50: Σταθμός Βάσης B – 900 MHz - Μοντέλο “Power Law”: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης

Η σύγκριση των απωλειών διάδοσης, όπως αυτές υπολογίζονται για  $n= 4.13$ , με αυτές που προκύπτουν από το Atoll απεικονίζονται γραφικά στην Εικόνα 4.50. Σύμφωνα με τα γραφικά αποτελέσματα υπάρχει μία σημαντική υποεκτίμηση των απωλειών έως τα 300 m και στη συνέχεια μία υπερτίμησή τους. Όπως

χαρακτηριστικά φαίνεται στην Εικόνα 4.50, η καμπύλη των απωλειών διάδοσης αλλάζει κλίση μετά τα 300 m. Σύμφωνα με αυτήν την διαπίστωση θα μπορούσε να γίνει επιλογή διαφορετικών τιμών  $n$  στο διάστημα 100 m - 300 m και 400 m - 1000 m. Η διερεύνηση για ανεξάρτητες βέλτιστες τιμές πριν και μετά τα 300 m οδηγεί στον εντοπισμό της τιμής  $n= 4.42$  για αποστάσεις έως και 300 m και  $n= 4.07$  για αποστάσεις μεγαλύτερες από 300 m. Οι υπολογισμοί του τετραγωνικού σφάλματος για τις δύο αυτές ζώνες αποστάσεων απεικονίζεται στην Εικόνα 4.51. Η σύγκριση των πειραματικών μέσων απωλειών διάδοσης με αυτές που προκύπτουν από την (4.13) με τη χρήση του ζεύγους βέλτιστων τιμών  $n=(4.42, 4.07)$  παρουσιάζονται στην Εικόνα 4.52.



Εικόνα 4.51: Σταθμός Βάσης B-900 MHz-Μοντέλο “Power Law”=:Τετραγωνικό σφάλμα συναρτήσει συντελεστή απωλειών διάδοσης  $n$  για αποστάσεις 100 m-300 m και 400 m-1000 m.



Εικόνα 4.52: Σταθμός Βάσης B – 900 MHz - Μοντέλο “Power Law”: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης με τη χρήση των βέλτιστων τιμών  $n=(4.42, 4.07)$ .

Με τη χρήση του ζεύγους  $n=(4.42, 4.07)$  στην εξίσωση (4.13) μπορούν να υπολογιστούν οι θεωρητικά εκτιμώμενες τιμές των απωλειών διάδοσης. Στη συνέχεια μετά την αφαίρεση των θεωρητικών τιμών από τις πειραματικά δεδομένα των Πινάκων 4.21 και 4.22 προκύπτουν οι τιμές σκίασης. Τα αποτελέσματα των υπολογισμών των απωλειών σκίασης καταγράφεται στους Πίνακες (4.25) και (4.26) για αποστάσεις 100 m -500 m και 600 m – 1000 m, αντίστοιχα.

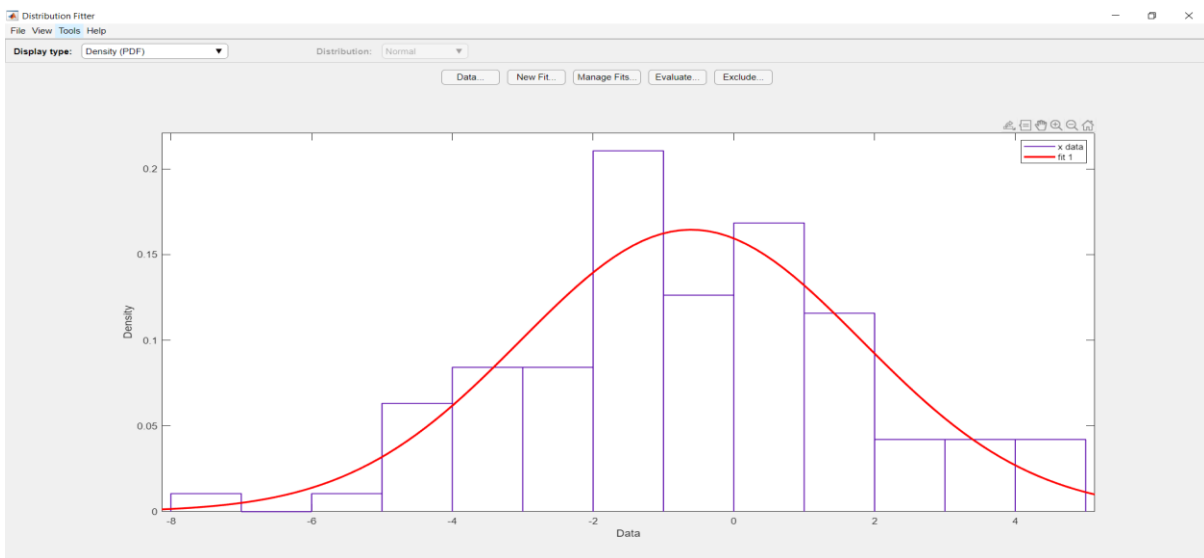
Πίνακας 4.25. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz –  
Μοντέλο “Power Law”

Απώλειες Σκίασης (Xσ)					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-15,6109 dB	5.9385 dB	-1,3850 dB	0,6512 dB	-0,5393 dB
2	-15,7916 dB	-23.5175 dB	-1,2172 dB	-1,1788 dB	-1,0888 dB
3	-15,5922 dB	5.2974 dB	-0,6865 dB	-2,5676 dB	-1,3882 dB
4	4,9571 dB	-18.8616 dB	4,2228 dB	0,8696 dB	2,7123 dB
5	3,7651 dB	0.5650 dB	3,0447 dB	-0,2402 dB	1,5214 dB
6	-15,3849 dB	2.1912 dB	0,1400 dB	0,8712 dB	2,2526 dB
7	-15,7049 dB	-0.9962 dB	4,0039 dB	-0,3376 dB	0,3640 dB
8	-15,8249 dB	-1.6511 dB	0,4740 dB	2,0485 dB	1,4944 dB
9	-15,6749 dB	-19.6721 dB	0,3057 dB	1,1155 dB	-3,2398 dB
10	-15,8821 dB	-18.0344 dB	-18,365 dB	-3,8580 dB	-23,4513 dB

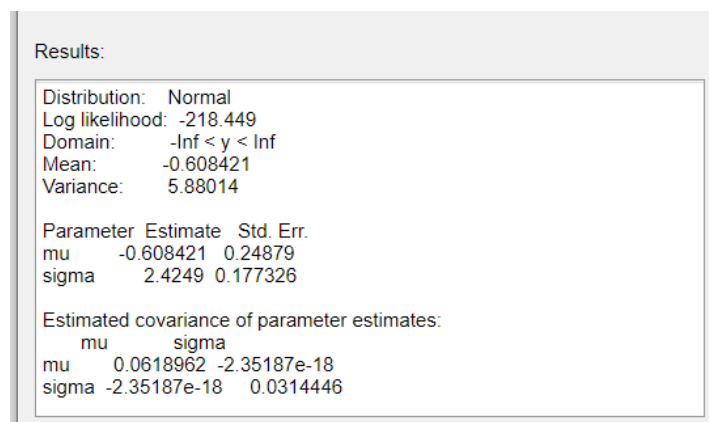
Πίνακας 4.26. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz –  
Μοντέλο “Power Law”

Απώλειες Σκίασης (Xσ)					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-0,8799 dB	-2,9269 dB	-1,0904 dB	-1,8332 dB	-3,3105 dB
2	-0,5404 dB	-1,8814 dB	2,5942 dB	-5,0618 dB	-4,2726 dB
3	-2,0046 dB	-1,0334 dB	-3,5367 dB	-8,5644 dB	-5,0954 dB
4	-2,3292 dB	-3,1497 dB	-4,7455 dB	-4,2275 dB	-5,3805 dB
5	-0,1342 dB	-3,9950 dB	-3,3786 dB	-2,8617 dB	-0,0395 dB
6	2,1693 dB	0,1187 dB	-4,2690 dB	-2,3854 dB	0,1947 dB
7	-2,6315 dB	1,4454 dB	1,7586 dB	-3,4621 dB	-2,3132 dB
8	2,5900 dB	-0,8076 dB	2,5271 dB	-0,7094 dB	-0,0599 dB
9	2,4587 dB	-8,5363 dB	-1,5005 dB	-0,6674 dB	-6,6217 dB
10	-9,9180 dB	1,1739 dB	-1,6028 dB	-5,4716 dB	-3,8102 dB

Μετά από επεξεργασία των δεδομένων σκίασης στο Matlab dfittool GUI προκύπτουν τα αποτελέσματα που απεικονίζονται στις Εικόνες 4.53 και 4.54. Τα αποτελέσματα των Εικόνων 4.53 και 4.54 υποδεικνύουν μία log-normal κατανομή με μέσο όρο -0.6 dB και τυπική απόκλιση 5.9 dB. Αξίζει να σημειωθεί ότι η σημαντική αύξηση της τυπικής απόκλισης συγκριτικά με το Σταθμό Βάσης A είναι αναμενόμενη λόγω της πυκνότερης δόμησης που χαρακτηρίζει το περιβάλλον του Σταθμού Βάσης B.



Εικόνα 4.53 : Σταθμός Βάσης B –900 MHz - Μοντέλο “Power Law”: γράφημα απωλειών Σκίασης



Εικόνα 4.54 : Σταθμός Βάσης B –900 MHz - Μοντέλο “Power Law”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση απωλειών σκίασης

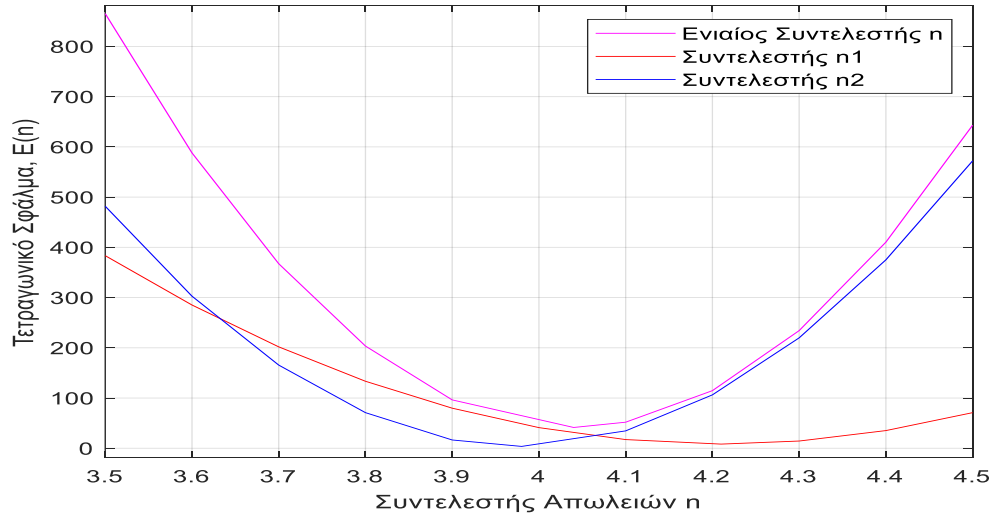


#### 4.4.2.2 Σταθμός Βάσης B: Power Law - 2100 MHz

Οι υπολογισμοί για το Σταθμό Βάσης B στη συχνότητα 2100 MHz είναι παρόμοιοι με αυτούς που ήδη έχουν αναλυθεί για τη συχνότητα 900 MHz. Υπολογίζοντας τις απώλειες ελεύθερης διάδοσης σε απόσταση  $R_0=10$  m και στη συχνότητα 2100 MHz, το μοντέλο Power Law της εξίσωσης (4.13) διαμορφώνεται ως εξής:

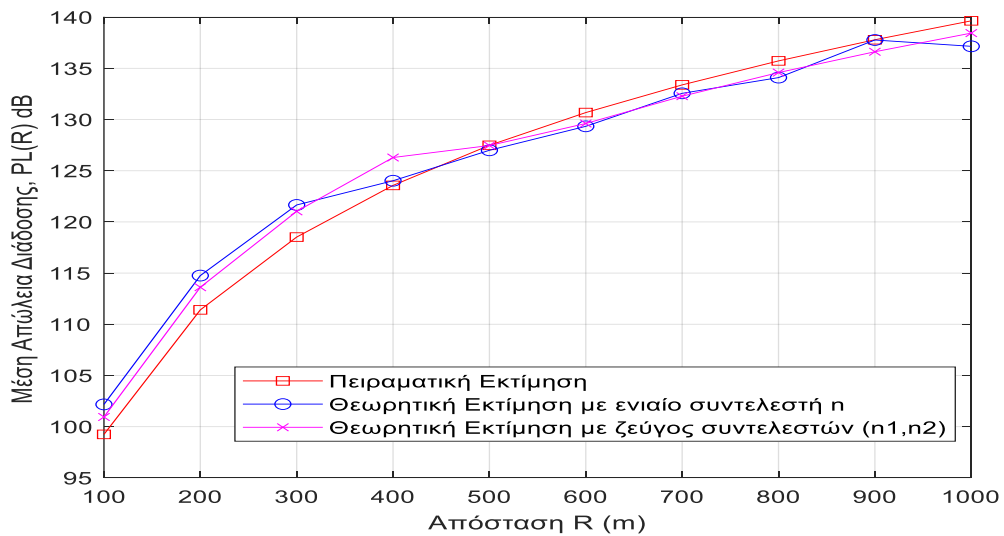
$$\overline{P}L_{est} = 58.8 + 10n \log\left(\frac{R}{R_0}\right) \quad (4.15)$$

Το σύνολο των πειραματικών αποτελεσμάτων, τα οποία προκύπτουν από το λογισμικό Atoll, καταγράφονται στους Πίνακες 4.23 και 4.24 για αποστάσεις μετρήσεων 100 m – 500 m και 600 m – 1000 m, αντίστοιχα. Από τα πειραματικά δεδομένα των Πινάκων 4.23 και 4.24 υπολογίζεται οι πειραματικές μετρήσεις των απωλειών διάδοσης. Στη συνέχεια, υπολογίζοντας για ένα εύρος τιμών  $n=3.5 - 4.5$  προκύπτει ότι η βέλτιστη τιμή είναι η  $n = 4.04$  για το ελάχιστο τετραγωνικό σφάλμα  $E(n = 4.04) = 41.4$ . Το σχετικά μεγάλο σφάλμα οφείλεται, όπως και στην περίπτωση των 900 MHz, στην αλλαγή του ρυθμού απωλειών γύρω από την απόσταση των 400 m. Υιοθετώντας τη μεθοδολογία της Ενότητας 4.4.2.1 επιχειρήθηκε η προσαρμογή των θεωρητικών στα πειραματικά δεδομένα με τη χρήση διαφορετικών συντελεστών  $n_1$  και  $n_2$  για τις αποστάσεις 0-400 m και 500 m – 1000 m, αντίστοιχα. Η Εικόνα 4.55 απεικονίζει γραφικά υπολογισμούς εντοπισμού του ελάχιστου τετραγωνικού σφάλματος με την υιοθέτηση ενιαίου συντελεστή  $n$  καθώς και ενός ζεύγους συντελεστών διάδοσης  $(n_1, n_2)$ . Οι βέλτιστες τιμές για κάθε μία περίπτωση είναι  $n=4.04$  και  $(n_1, n_2) = (4.21, 3.98)$ .



Εικόνα 4.55: Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz – Μοντέλο “Power Law”: Τετραγωνικό σφάλμα  $E$  συναρτήσει (α) ενιαίου συντελεστή απωλειών διάδοσης  $n$ , (β) ζεύγους συντελεστών απωλειών διάδοσης ( $n_1, n_2$ )

Η Εικόνα 4.56 παρουσιάζει τη γραφική σύγκριση μεταξύ θεωρητικών εκτιμήσεων του μοντέλου “Power Law” και των πειραματικών δεδομένων που εξάγονται από το Atoll τόσο για την επιλογή ενιαίου συντελεστή  $n$  όσο και για την περίπτωση του ζεύγους συντελεστών ( $n_1, n_2$ ).



Εικόνα 4.56: Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz – Μοντέλο “Power Law”: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης

Μετά την επιλογή των βέλτιστων τιμών ( $n_1, n_2$ ) υπολογίζονται μέσω της εξίσωσης (4.2) οι απώλειες σκίασης σε όλα τα σημεία μέτρησης για τη συχνότητα 2100 MHz. Τα αποτελέσματα αυτών των υπολογισμών καταγράφονται στους Πίνακες 4.27 και 4.28.

Πίνακας 4.27. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης B – 2100 MHz - Μοντέλο “Power Law”

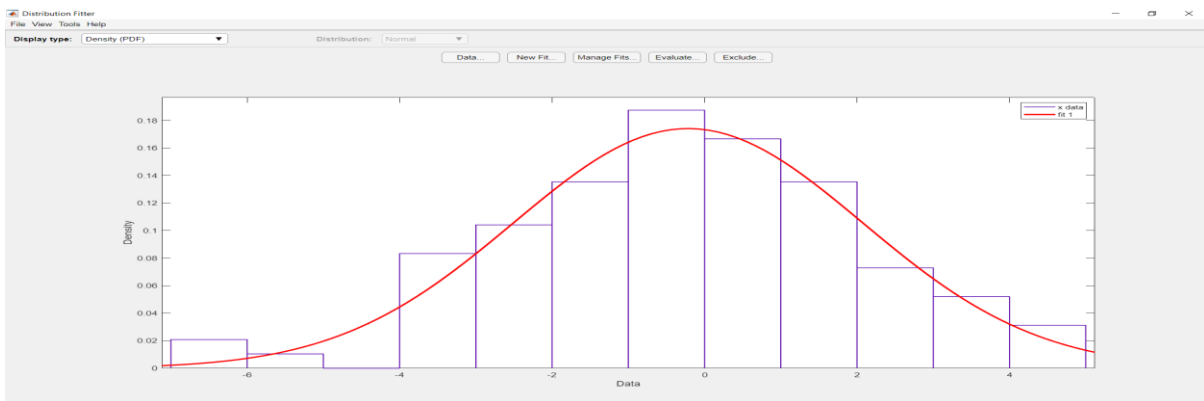
Απώλειες Σκίασης (Χσ)					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	3.4183 dB	-0.2672 dB	0.1214 dB	-3.6947 dB	1.2219 dB
2	-19.4476 dB	-1.9003 dB	-1.1221 dB	-3.6616 dB	-1.2371 dB
3	4.3686 dB	-2.2301 dB	1.7049 dB	-0.2337 dB	1.4905 dB
4	4.2449 dB	2.9892 dB	1.6896 dB	-0.3722 dB	2.1508 dB
5	-18.3051 dB	3.9071 dB	1.5720 dB	-2.0284 dB	-0.2188 dB
6	-18.5078 dB	0.8064 dB	1.8161 dB	-3.7959 dB	-0.2820 dB
7	2.1614 dB	1.2595 dB	-0.7400 dB	-2.1523 dB	-0.7381 dB
8	2.1789 dB	1.1982 dB	-1.3171 dB	-1.1024 dB	-0.2249 dB
9	-19.2669 dB	1.0317 dB	0.6242 dB	-2.6948 dB	-0.2672 dB
10	3.6759 dB	0.9263 dB	0.4082 dB	-6.1832 dB	1.9164 dB

Πίνακας 4.28. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης B – 2100 MHz- Μοντέλο “Power Law”

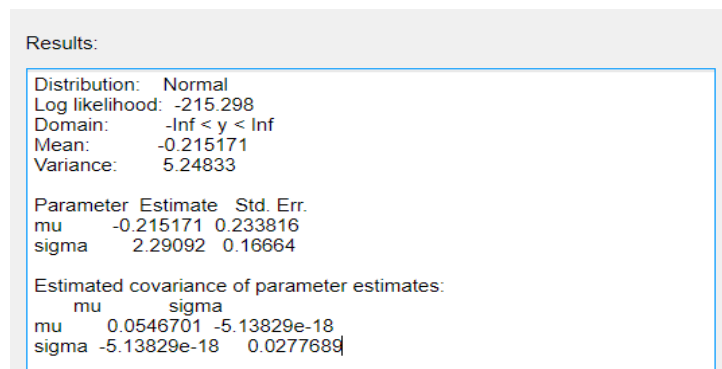
Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	0.1621 dB	0.8298 dB	-0.2741 dB	4.7716 dB	-1.0852 dB
2	-3.8419 dB	0.0441 dB	0.1676 dB	-1.0765 dB	-0.2093 dB
3	-2.0903 dB	-5.1405 dB	-3.2712 dB	-0.8972 dB	-1.8815 dB
4	-2.2588 dB	-3.3884 dB	-1.3955 dB	0.9936 dB	-1.9723 dB
5	0.2743 dB	2.1580 dB	2.7117 dB	-0.3372 dB	-0.5863 dB

6	-3.2264 dB	3.9734 dB	-2.7452 dB	-1.2821 dB	-1.8163 dB
7	0.0688 dB	-1.6701 dB	0.9213 dB	-2.6454 dB	-3.3062 dB
8	1.3067 dB	-2.8416 dB	-0.9874 dB	3.6979 dB	-0.0529 dB
9	2.2704 dB	-0.0655 dB	0.4338 dB	1.9843 dB	-0.9745 dB
10	0.5096 dB	1.3265 dB	-6.4933 dB	0.1635 dB	-2.0305 dB

Μετά την εισαγωγή των στατιστικών δειγμάτων των Πινάκων 4.27 και 4.28 στο Matlab προκύπτει η εξής εκτίμηση για τη log-normal ΣΠΠ: μέσος όρος  $\mu = -0.2$  dB και τυπική απόκλιση  $\sigma = 5.2$  dB. Το αποτέλεσμα αυτό αντιστοιχεί στο ιστόγραμμα και την καμπύλη της ΣΠΠ της Εικόνας 4.57



Εικόνα 4.57. Σταθμός Βάσης Β – Μοντέλο “Power Law”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης σε συχνότητα 2100MHz



Εικόνα 4.58 : Σταθμός Βάσης Β – Μοντέλο “Power Law”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης σε συχνότητα 2100MHz

#### 4.4.3. Σταθμός Βάσης B: Μοντέλο Clutter Factor

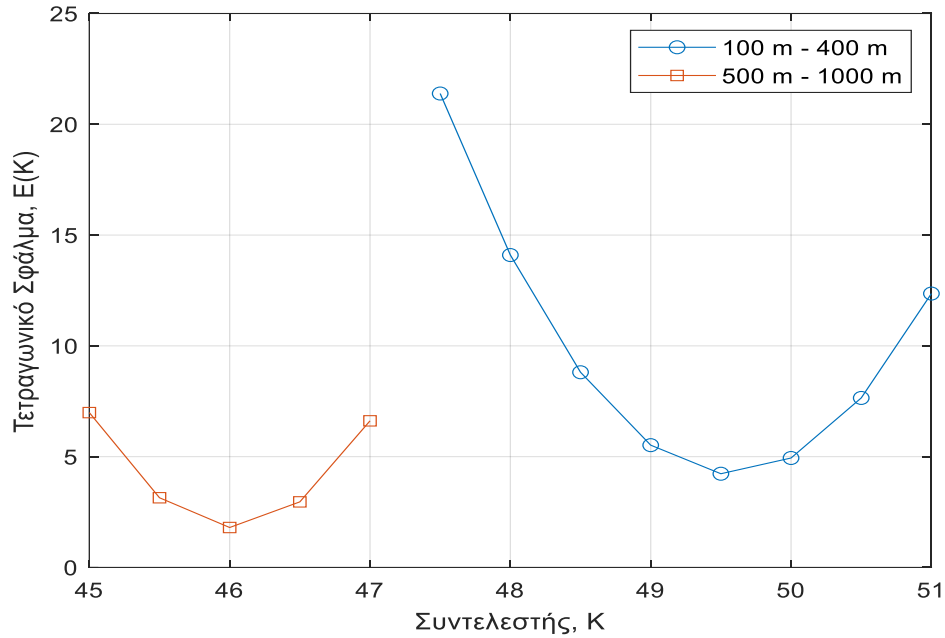
Το μοντέλο “Clutter Factor” όπως έχει ήδη αναλυθεί στο Κεφάλαιο 2 έχει την ακόλουθη μορφή:

$$\overline{P}L_{est} = 40\log(R) - 20\log(h_m) - 20\log(h_b) + K \quad (4.16)$$

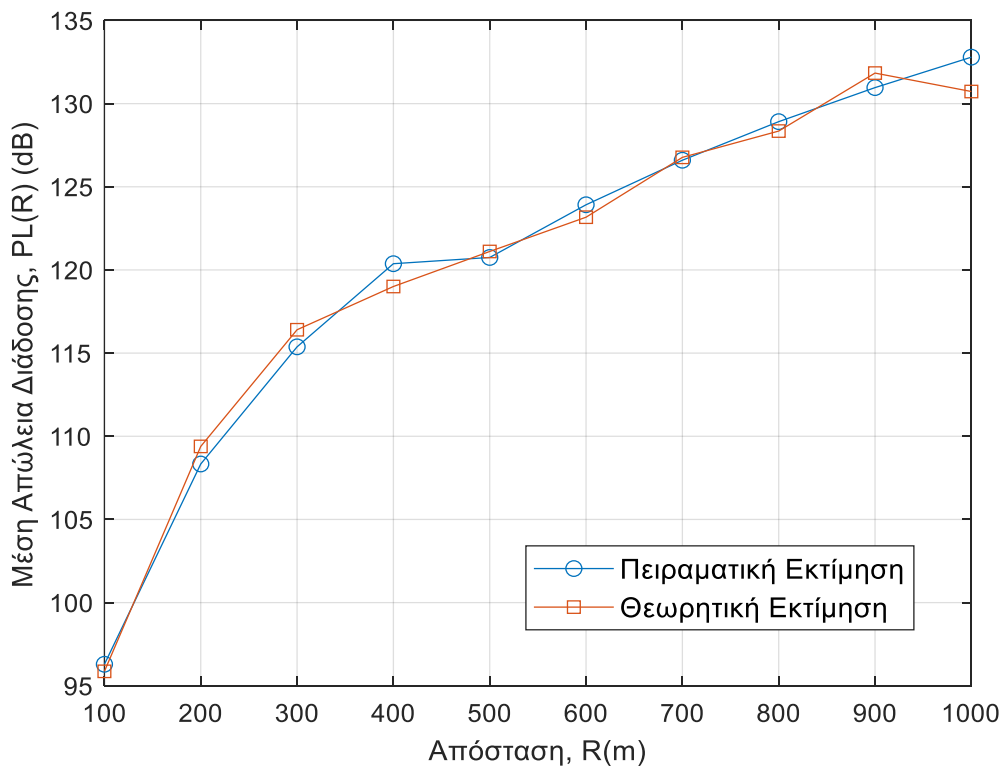
όπου  $K$  είναι ο συντελεστής αστάθειας (clutter factor),  $R$  είναι η απόσταση σε μέτρα από την κεραία (100m-1000m),  $h_m$  και  $h_b$  είναι το ύψος των κεραιών του κινητού σταθμού και του σταθμού βάσης, αντίστοιχα. Στην περίπτωση μας το  $h_m$  επιλέγεται να λάβει μία τυπική τιμή  $h_m=1.5$  m, ενώ το  $h_b=30.5$  m όπως υποδεικνύει η Εικόνα 4.47.

##### 4.4.3.1. Σταθμός Βάσης B: Clutter Factor - 900 MHz

Στην περίπτωση του μοντέλου “Clutter Factor” η προς βελτιστοποίηση ελεύθερη παράμετρος, είναι το  $K$ . Δεδομένης της αλλαγής του ρυθμού αύξησης των απωλειών γύρω από το σημείο των 400 m, η οποία σχολιάστηκε στην περίπτωση του μοντέλου “Power Law”, ο εντοπισμός της βέλτιστης τιμής  $K$  αφορά ένα ζεύγος τιμών  $K_1$  και  $K_2$  για αποστάσεις 100 m - 400 m και 500 m - 1000 m, αντίστοιχα. Με χρήση της εξίσωσης (4.16) και υπολογισμό του τετραγωνικού σφάλματος μεταξύ του  $\overline{P}L_{est}$  και των πειραματικών δεδομένων των Πινάκων 4.21 και 4.22 προκύπτει ελαχιστοποίηση για το ζεύγος τιμών  $(K_1, K_2) = (49.5, 46)$ . Η Εικόνα 4.59 αναπαριστά γραφικά τους υπολογισμούς του τετραγωνικού σφάλματος και τον εντοπισμό του ζεύγους τιμών  $(K_1, K_2) = (49.5, 46)$  ως των βέλτιστων τιμών με κριτήριο την ελαχιστοποίηση του τετραγωνικού σφάλματος.



Εικόνα 4.59: Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz- Μοντέλο Clutter Factor : Τετραγωνικό σφάλμα  $E$  συναρτήσει του συντελεστή  $K$ .



Εικόνα 4.60. Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz- Μοντέλο Clutter Factor: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης για  $(K_1, K_2) = (49.5, 46)$ .

Τα γραφικά αποτελέσματα της Εικόνας 4.60 με τη χρήση του βέλτιστου ζεύγους τιμών  $(K_1, K_2) = (49.5, 46)$  υποδεικνύουν μία αξιοσημείωτη σύγκλιση μεταξύ θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών δεδομένων.

Με αφετηρία τα πειραματικά αποτελέσματα των Πινάκων 4.21 και 4.22 και την εξίσωση (4.16) με  $(K_1, K_2) = (49.5, 46)$  προκύπτουν οι απώλειες σκίασης σε όλες τις θέσεις μετρήσεις από την εξίσωση (4.2). Τα αποτελέσματα καταγράφονται στους Πίνακες 4.29 και 4.30

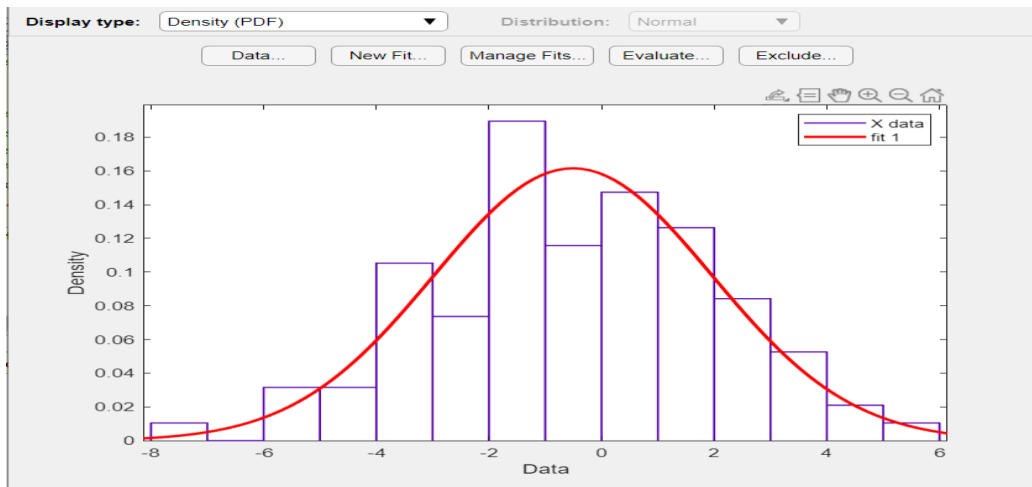
Πίνακας 4.29. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz- Μοντέλο “Clutter Factor”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	3.6051 dB	-0.9220 dB	0.3818 dB	-3.8930 dB	1.6198 dB
2	-22.3269 dB	-3.1392 dB	-1.8402 dB	-3.6124 dB	-1.7795 dB
3	3.8837 dB	-3.4573 dB	2.2403 dB	0.2827 dB	1.4628 dB
4	-26.2264 dB	3.3449 dB	2.2290 dB	0.0368 dB	2.4556 dB
5	-21.8309 dB	4.2009 dB	2.1002 dB	-1.3142 dB	0.2047 dB
6	-22.1183 dB	0.6013 dB	2.3303 dB	-2.5176 dB	-0.5074 dB
7	1.0769 dB	1.2110 dB	-0.5554 dB	0.6502 dB	-1.5612 dB
8	1.0748 dB	1.1320 dB	-0.6206 dB	0.0874 dB	-1.1908 dB
9	-22.7890 dB	0.9295 dB	1.1407 dB	-1.9857 dB	-1.4243 dB
10	2.4094 dB	0.8338 dB	0.7830 dB	-5.8183 dB	1.6740 dB

Πίνακας 4.30. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz-  
Μοντέλο “Clutter Factor”

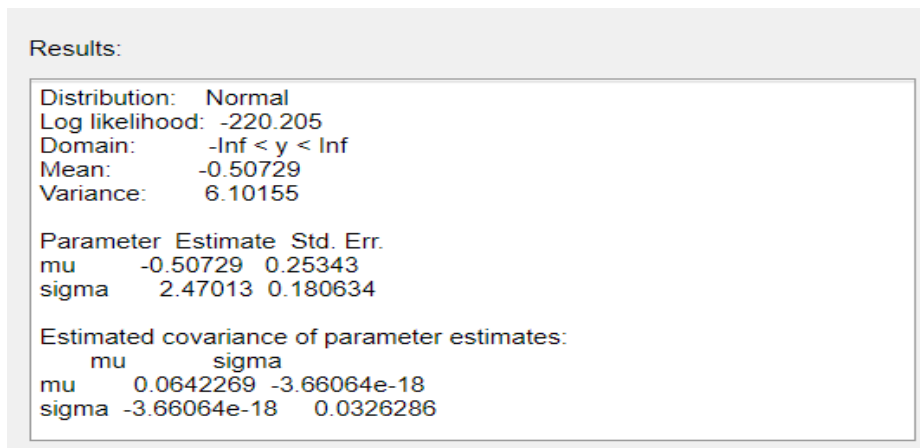
Απώλειες Σκίασης (Xσ)					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-0.3150 dB	0.0066 dB	-1.0745 dB	5.0563 dB	-1.9111 dB
2	-5.0666 dB	-1.0828 dB	-0.1300 dB	-1.7537 dB	-0.6633 dB
3	-3.4136 dB	-5.3150 dB	-3.0653 dB	-1.5436 dB	-3.1271 dB
4	-2.5992 dB	-3.0876 dB	-1.4197 dB	0.8947 dB	-2.8092 dB
5	-0.0656 dB	2.1128 dB	3.2539 dB	-1.0517 dB	-1.5750 dB
6	-3.8114 dB	4.3989 dB	-3.0126 dB	-2.8094 dB	-2.3875 dB
7	-0.6307 dB	-1.7249 dB	0.5154 dB	-4.0660 dB	-4.5497 dB
8	1.0410 dB	-4.2040 dB	-2.0834 dB	3.4478 dB	-0.9952 dB
9	1.7693 dB	-1.0649 dB	1.0644 dB	1.8737 dB	-1.1602 dB
10	0.5395 dB	2.1131 dB	-7.5936 dB	-0.1115 dB	-2.8487 dB

Με την εισαγωγή των στατιστικών δεδομένων των Πινάκων 4.29 και 4.30 στο dfitool της Matlab προκύπτει, όπως φαίνεται στις Εικόνες 4.61 και 4.62, ότι οι απώλειες σκίασης περιγράφονται από μία log-normal κατανομή με μέσο όρο  $\mu = -0.51$  dB και τυπική απόκλιση  $\sigma = 2.47$  dB.



Εικόνα 4.61: Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz - Μοντέλο “Clutter Factor”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης

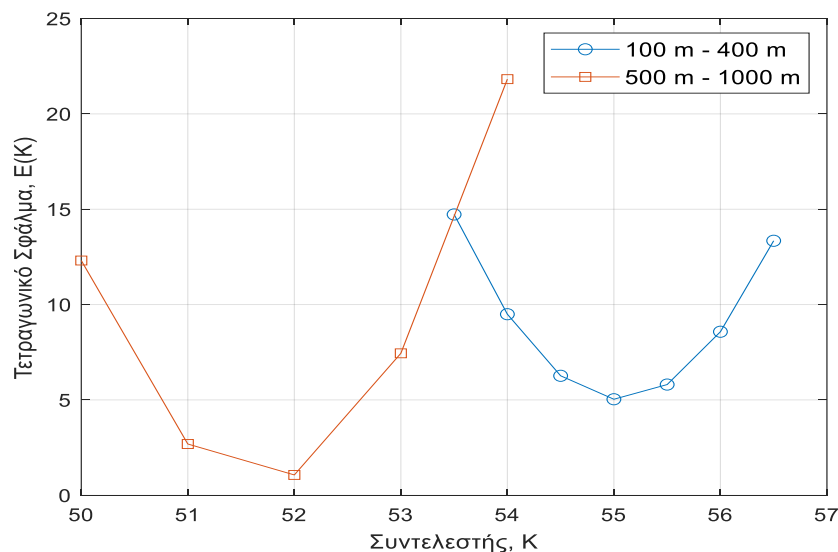




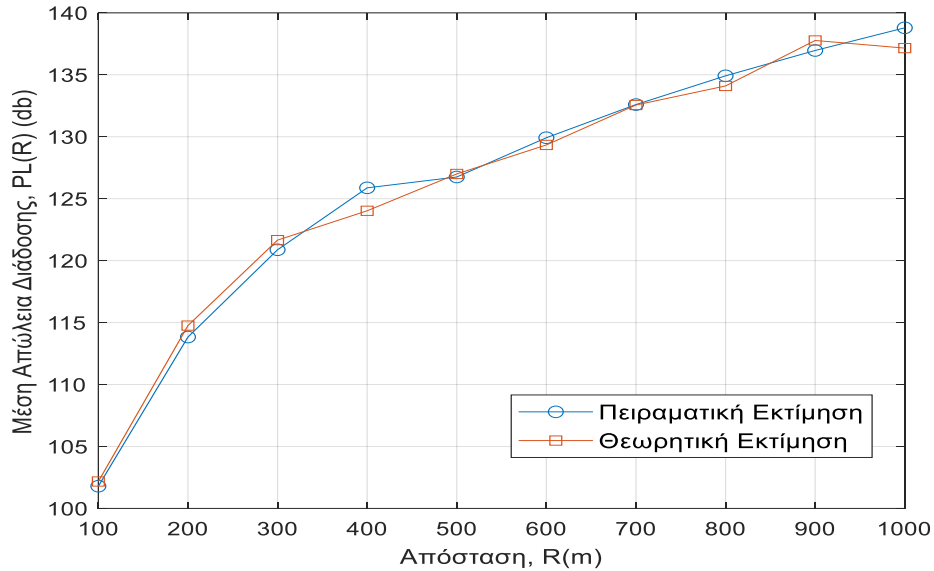
Εικόνα 4.62 : Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz - Μοντέλο “Clutter Factor”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης

#### 4.4.3.2 Σταθμός Βάσης Β: Clutter Factor 2100 MHz

Στην περίπτωση της συχνότητας 2100 MHz, η εκτίμηση της βέλτιστης τιμής του συντελεστή  $K$  είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφεται στην Ενότητα 4.4.3.1 για τα 900 MHz. Σύμφωνα με τη γραφική αναπαράσταση της Εικόνας 4.63, οι υπολογισμοί του τετραγωνικού σφάλματος καταδεικνύουν ένα ζεύγος τιμών  $(K_1, K_2) = (55, 52)$  για αποστάσεις 100 m - 400 m και 500 m - 1000 m, αντίστοιχα.



Εικόνα 4.63: Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz- Μοντέλο Clutter Factor : Τετραγωνικό σφάλμα Ε συναρτήσε του συντελεστή  $K$ .



Εικόνα 4.64: Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz- Μοντέλο Clutter Factor: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης για  $(K_1, K_2) = (55, 52)$ .

Η σύγκριση των πειραματικών δεδομένων με τα θεωρητικά εκτιμώμενα από το μοντέλο “Clutter Factor” απεικονίζονται στην Εικόνα 4.64. Η σύγκλιση μεταξύ της πειραματικής και της θεωρητικής εκτίμησης είναι ιδιαίτερα ικανοποιητική κατ’ αναλογία με τα αποτελέσματα στη συχνότητα των 900 MHz.

Ο υπολογισμός των απωλειών σκίασης για ζεύγος των βέλτιστων τιμών  $(K_1, K_2) = (55, 52)$  καταγράφεται στους Πίνακες 4.31 και 4.32.

Πίνακας 4.31. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz- Μοντέλο “Clutter Factor”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	2.5705 dB	-0.4829 dB	0.2756 dB	-3.2782 dB	0.9343 dB
2	-20.2954 dB	-2.1160 dB	-0.9679 dB	-3.2451 dB	-1.5247 dB
3	3.5209 dB	-2.4457 dB	1.8591 dB	0.1828 dB	1.2029 dB
4	3.3971 dB	2.7735 dB	1.8438 dB	0.0443 dB	1.8632 dB
5	-19.1529 dB	3.6914 dB	1.7262 dB	-1.6119 dB	-0.5064 dB

6	-19.3556 dB	0.5907 dB	1.9703 dB	-3.3794 dB	-0.5696 dB
7	1.3137 dB	1.0438 dB	-0.5858 dB	-1.7358 dB	-1.0257 dB
8	1.3311 dB	0.9825 dB	-1.1629 dB	-0.6859 dB	-0.5125 dB
9	-20.1147 dB	0.8160 dB	0.7784 dB	-2.2783 dB	-0.5548 dB
10	2.8281 dB	0.7106 dB	0.5624 dB	-5.7667 dB	1.6288 dB

Πίνακας 4.32. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης B- 2100 MHz-  
Μοντέλο “Clutter Factor”

Απώλειες Σκίασης (Χσ) 2100MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-0.1413 dB	0.5130 dB	-0.6025 dB	4.4329 dB	-1.4330 dB
2	-4.1453 dB	-0.2727 dB	-0.1608 dB	-1.4152 dB	-0.5571 dB
3	-2.3937 dB	-5.4573 dB	-3.5996 dB	-1.2359 dB	-2.2293 dB
4	-2.5622 dB	-3.7052 dB	-1.7239 dB	0.6549 dB	-2.3201 dB
5	-0.0291 dB	1.8412 dB	2.3833 dB	-0.6759 dB	-0.9341 dB
6	-3.5298 dB	3.6566 dB	-3.0736 dB	-1.6208 dB	-2.1641 dB
7	-0.2346 dB	-1.9869 dB	0.5929 dB	-2.9841 dB	-3.6540 dB
8	1.0033 dB	-3.1584 dB	-1.3158 dB	3.3592 dB	-0.4007 dB
9	1.9670 dB	-0.3823 dB	0.1054 dB	1.6456 dB	-1.3223 dB
10	0.2062 dB	1.0097 dB	-6.8217 dB	-0.1752 dB	-2.3783 dB

Κατόπιν επεξεργασίας των στατιστικών δειγμάτων σκίασης με το dfittoll της Matlab προκύπτει ότι οι απώλειες σκίασης περιγράφονται από μία ΣΠΠ log-normal με μέσο όρο  $\mu = -0.43$  dB και τυπική απόκλιση  $\sigma = 2.2$  dB. Στις Εικόνες 4.65 και 4.66 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της στατιστικής επεξεργασίας των δεδομένων της σκίασης στο Matlab.

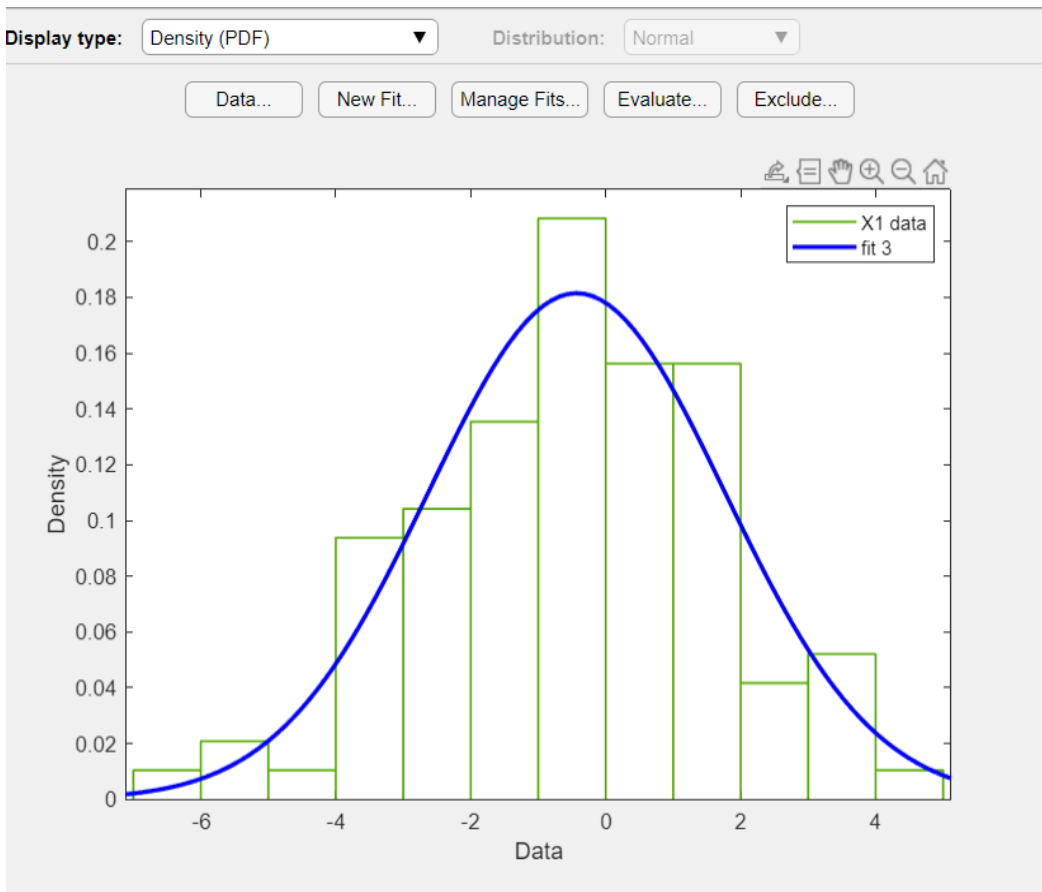
Results:

```
Distribution: Normal
Log likelihood: -211.311
Domain: -Inf < y < Inf
Mean: -0.43145
Variance: 4.82999

Parameter Estimate Std. Err.
mu -0.43145 0.224304
sigma 2.19772 0.159861

Estimated covariance of parameter estimates:
mu sigma
mu 0.0503124 -9.45744e-19
sigma -9.45744e-19 0.0255555
```

Εικόνα 4.65 : Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz - Μοντέλο “Clutter Factor”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης



Εικόνα 4.66 : Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz - Μοντέλο “Clutter Factor”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης

#### 4.4.4. Σταθμός Βάσης B: Μοντέλο Okumura-Hata

Σύμφωνα με την ανάλυση του Κεφαλαίου 2 το μοντέλο Okumura – Hata για συχνότητες λειτουργίας 900 MHz έχει την εξής μορφή σε αστικές περιοχές :

$$\overline{P}L_{est} = A + B \log(R) - E \quad (4.17)$$

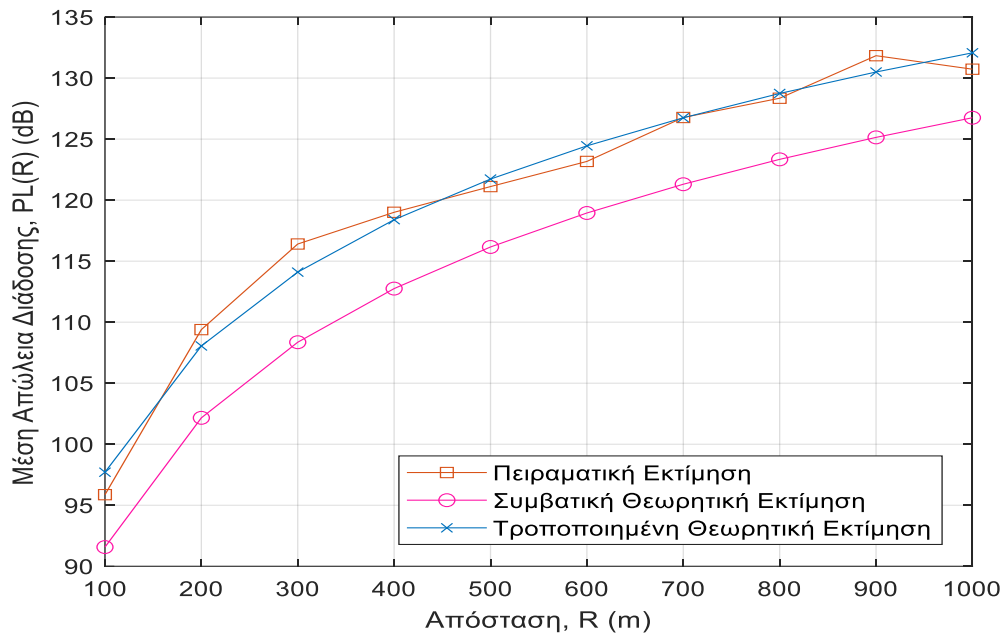
Λαμβάνοντας υπόψη το σκεπτικό που αναπτύχθηκε στην ενότητα 4.3.4 οι συντελεστές  $A$ ,  $B$  και  $E$  επαναδιατυπώνονται ως εξής:

$$A = 69.55 + 26.16 \log(f_c) - A_1 \log(h_b) \quad (4.18)$$

$$B = 44.9 - B_1 \log(h_b) \quad (4.19)$$

$$E = 3.2(\log(11.75h_m))^2 - E_1 \quad (4.20)$$

προκειμένου να διερευνηθεί η δυνατότητα εντοπισμού μίας βέλτιστης τριπλέτας τιμών ( $A_1$ ,  $B_1$ ,  $E_1$ ), η οποία θα ελαχιστοποιεί το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων. Μετά από σάρωση τιμών σε αυτό το 3D πρόβλημα βελτιστοποίησης προέκυψε ο εντοπισμός των τιμών ( $A_1$ ,  $B_1$ ,  $E_1$ )=(9.9, 7.1, 4.9) το οποίο μειώνει το τετραγωνικό σφάλμα στην τιμή  $E = 16.60$  έναντι του  $E = 332.47$ , το οποίο αντιστοιχεί στις συμβατικές τιμές του μοντέλου ( $A_1$ ,  $B_1$ ,  $E_1$ )=(13.82, 6.55, 5.4). Η σύγκριση μεταξύ των πειραματικών δεδομένων καθώς και των θεωρητικών εκτιμήσεων του συμβατικού και του τροποποιημένου μοντέλου Okumura Hata παρουσιάζεται στην Εικόνα 4.67.



Εικόνα 4.67: Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz- Μοντέλο Okumura-Hata: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης.

Λαμβάνοντας υπόψη τους διορθωτικούς συντελεστές  $(A_1, B_1, E_1)=(9.9, 7.1, 4.9)$  υπολογίζονται οι θεωρητικά εκτιμώμενες τιμές των μέσων απωλειών διάδοσης και στη συνέχεια από τα δεδομένα των Πινάκων 4.21 και 4.22 υπολογίζονται οι τιμές σκίασης, οι οποίες καταγράφονται στους Πίνακες 4.33 και 4.34

Πίνακας 4.33. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz- Μοντέλο “Okumura Hata”

Απώλειες Σκίασης $X_\sigma$					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	2.1894 dB	-0.6403 dB	1.6564 dB	-1.9139 dB	0.6453 dB
2	-23.7426 dB	-2.8575 dB	-0.5656 dB	-1.6334 dB	-2.7540 dB
3	2.4680 dB	-3.1756 dB	3.5149 dB	2.2618 dB	0.4882 dB
4	-27.6420 dB	3.6266 dB	3.5036 dB	2.0159 dB	1.4811 dB
5	-23.2466 dB	4.4826 dB	3.3747 dB	0.6649 dB	-0.7698 dB

6	-23.5340 dB	0.8830 dB	3.6049 dB	-0.5385 dB	-1.4819 dB
7	-0.3388 dB	1.4926 dB	0.7192 dB	2.6292 dB	-2.5357 dB
8	-0.3409 dB	1.4137 dB	0.6540 dB	2.0664 dB	-2.1654 dB
9	-24.2047 dB	1.2112 dB	2.4153 dB	-0.0066 dB	-2.3988 dB
10	0.9937 dB	1.1154 dB	2.0575 dB	-3.8392 dB	0.6995 dB

Πίνακας 4.34. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz-  
Μοντέλο “Okumura Hata”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-0.8431 dB	-0.1440 dB	-0.8981 dB	5.5211 dB	-1.1882 dB
2	-5.5947 dB	-1.2333 dB	0.0464 dB	-1.2889 dB	0.0596 dB
3	-3.9417 dB	-5.4656 dB	-2.8889 dB	-1.0787 dB	-2.4042 dB
4	-3.1273 dB	-3.2381 dB	-1.2433 dB	1.3595 dB	-2.0864 dB
5	-0.5936 dB	1.9622 dB	3.4304 dB	-0.5869 dB	-0.8522 dB
6	-4.3395 dB	4.2483 dB	-2.8362 dB	-2.3446 dB	-1.6646 dB
7	-1.1588 dB	-1.8754 dB	0.6918 dB	-3.6011 dB	-3.8268 dB
8	0.5130 dB	-4.3545 dB	-1.9070 dB	3.9127 dB	-0.2724 dB
9	1.2412 dB	-1.2155 dB	1.2408 dB	2.3386 dB	-0.4374 dB
10	0.0114 dB	1.9626 dB	-7.4172 dB	0.3533 dB	-2.1259 dB

Με την επεξεργασία των δεδομένων των Πινάκων 4.33 και 4.34 μέσω του dfitool της Matlab προκύπτει η εκτίμηση για τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των απωλειών σκίασης. Τα αποτελέσματα  $(\mu, \sigma) = (-0.24 \text{ dB}, 2.47 \text{ dB})$  παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.68 και 4.69.

```

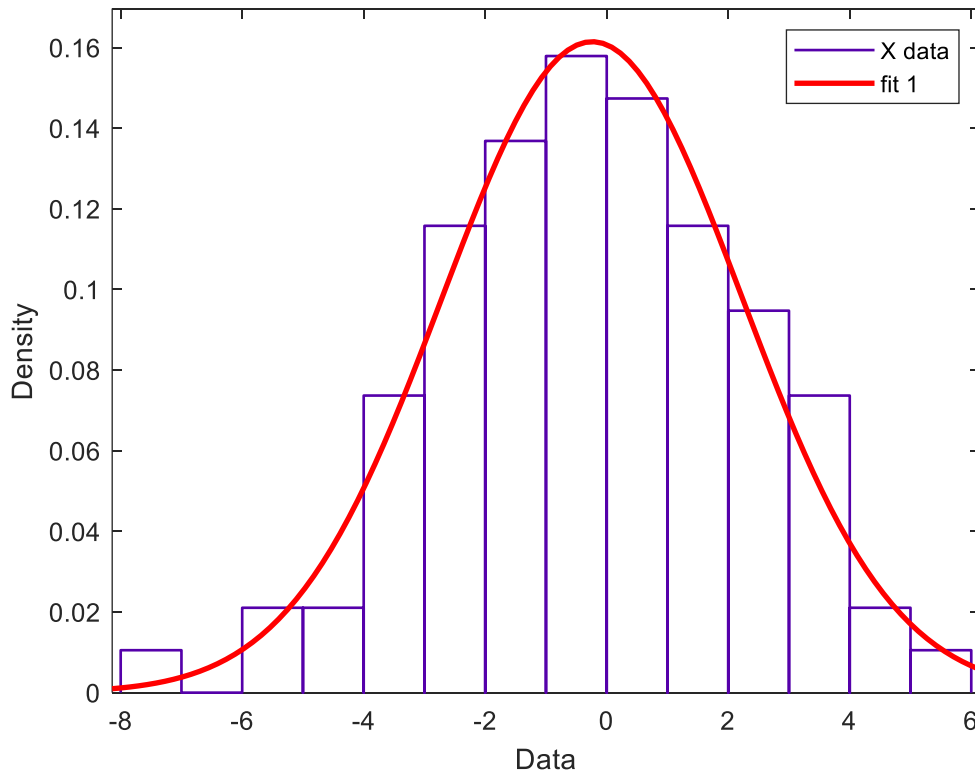
Distribution: Normal
Log likelihood: -220.232
Domain:      -Inf < y < Inf
Mean:       -0.24009
Variance:   6.10509

Parameter Estimate Std. Err.
mu      -0.24009 0.253504
sigma    2.47085 0.180686

Estimated covariance of parameter estimates:
      mu      sigma
mu    0.0642641 1.83138e-18
sigma 1.83138e-18 0.0326475

```

Εικόνα 4.68 : Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz - Μοντέλο “Okumura-Hata”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης



Εικόνα 3.69 : Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz - Μοντέλο “Okumura-Hata”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης



#### 4.4.5. Σταθμός Βάσης B: Μοντέλο COST231-Hata

Όπως ήδη έχει συζητηθεί εκτεταμένα στο Κεφάλαιο 2, το μοντέλο COST231-Hata εκφράζεται ως εξής:

$$\overline{PL}_{est} = F + B \log(R) - E + G \quad (4.21)$$

όπου  $F = 46.3 + 33.9 \log f_c - 13.82 \log h_b$ , το  $E$  ορίζεται όπως στην εξίσωση (4.6) και τέλος το  $G$  λαμβάνει μία σταθερή τιμή ίση με 3, διότι το περιβάλλον μελέτης θεωρείται ότι ανήκει στις μητροπολιτικές περιοχές.

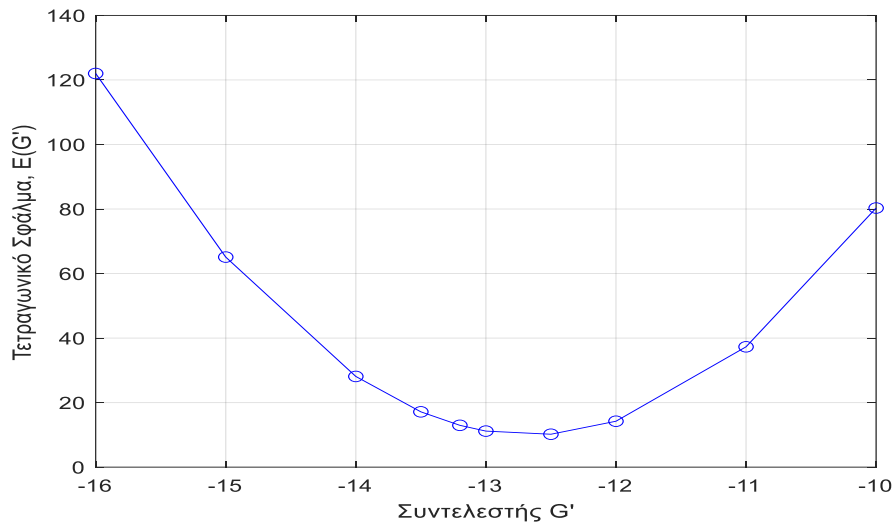
Στην περίπτωση των υπολογισμών της διπλωματικής εργασίας η συχνότητα λειτουργίας είναι  $f_c = 2100$  MHz, ενώ το ύψος του σταθμού βάσης είναι  $h_b = 30.5$ , όπως υποδεικνύει η Εικόνα 4.47.

Με την αντικατάσταση των δεδομένων στην εξίσωση (4.21) προκύπτουν οι θεωρητικά εκτιμώμενες μέσες απώλειες διάδοσης για αποστάσεις 100 m – 1000 m. Παράλληλα, μπορούν να εκτιμηθούν οι αντίστοιχες πειραματικές εκτιμήσεις των μέσων απωλειών διάδοσης από τις μετρήσεις, οι οποίες καταγράφονται στους Πίνακες 4.23 και 4.24. Η σύγκριση μεταξύ θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών δεδομένων καταδεικνύουν μία σημαντική απόκλιση που αποτυπώνεται σε ένα τετραγωνικό σφάλμα της τάξης του 1610.9. Με αφετηρία τη συγκεκριμένη διαπίστωση και λαμβάνοντας υπόψη τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον Σταθμό Βάσης A, επιλέγεται η προσθήκη ενός σταθερού συντελεστή  $G'$  στην εξίσωση (4.21), ώστε το μοντέλο να λάβει την ακόλουθη μορφή:

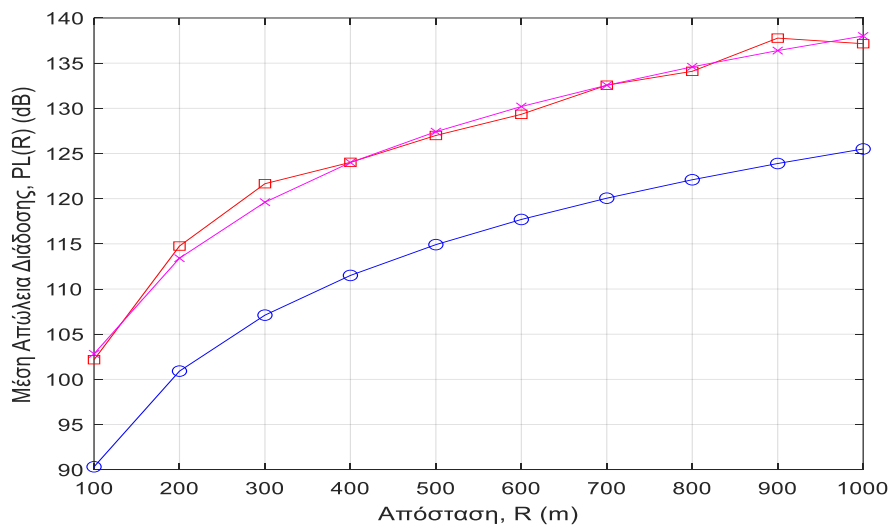
$$\overline{PL}_{est} = F + B \log(R) - E + G - G' \quad (4.22)$$

Υπολογίζοντας το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών δεδομένων για τιμές του  $G'$  σε ένα εύρος  $G' = -10 - -16$  σχεδιάζεται η καμπύλη του

τετραγωνικού σφάλματος  $E(G')$  και προσδιορίζεται η βέλτιστη τιμή του  $G'$  ως αυτή που ελαχιστοποιεί το σφάλμα. Σύμφωνα με τα γραφικά αποτελέσματα της Εικόνας 4.70 η βέλτιστη τιμή του προτεινόμενου διορθωτικού συντελεστή είναι  $G' = -12.5$ . Η Εικόνα 4.71 δείχνει τη σύγκριση μεταξύ των θεωρητικών (χωρίς και με την προσθήκη του διορθωτικού συντελεστή) καταδεικνύοντας τη σημαντική βελτίωση που προκύπτει στην περίπτωση της τροποποιημένης θεωρητικής εκτίμησης.



Εικόνα 4.70 : Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz- Μοντέλο COST231-Hata : Τετραγωνικό σφάλμα  $E$  συναρτήσει του συντελεστή  $G'$ .



Εικόνα 4.71: Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz- Μοντέλο COST231-Hata: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης.

Υιοθετώντας την τροποποιημένη εκδοχή του μοντέλου COST231-Hata υπολογίζονται οι απώλειες σκίασης αφαιρώντας από τις πειραματικές μετρήσεις (Πίνακας 4.3 και 4.4) τις αντίστοιχες θεωρητικές. Τα αποτελέσματα για τις απώλειες σκίασης καταγράφονται στους Πίνακες 4.35 και 4.36.

Πίνακας 4.35. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz-  
Μοντέλο “COST231 - Hata”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	1.5391 dB	-0.0626 dB	1.5450 dB	-1.4063 dB	0.2735 dB
2	-21.3267 dB	-1.6957 dB	0.3015 dB	-1.3732 dB	-2.1855 dB
3	2.4895 dB	-2.0255 dB	3.1285 dB	2.0547 dB	0.5421 dB
4	2.3658 dB	3.1938 dB	3.1132 dB	1.9162 dB	1.2024 dB
5	-20.1842 dB	4.1117 dB	2.9956 dB	0.2600 dB	-1.1672 dB
6	-20.3869 dB	1.0110 dB	3.2397 dB	-1.5075 dB	-1.2304 dB
7	0.2823 dB	1.4641 dB	0.6836 dB	0.1361 dB	-1.6865 dB
8	0.2998 dB	1.4028 dB	0.1065 dB	1.1860 dB	-1.1733 dB
9	-21.1460 dB	1.2363 dB	2.0478 dB	-0.4064 dB	-1.2156 dB
10	1.7968 dB	1.1309 dB	1.8318 dB	-3.8948 dB	0.9680 dB

Πίνακας 4.36. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz-  
Μοντέλο “COST231 - Hata”

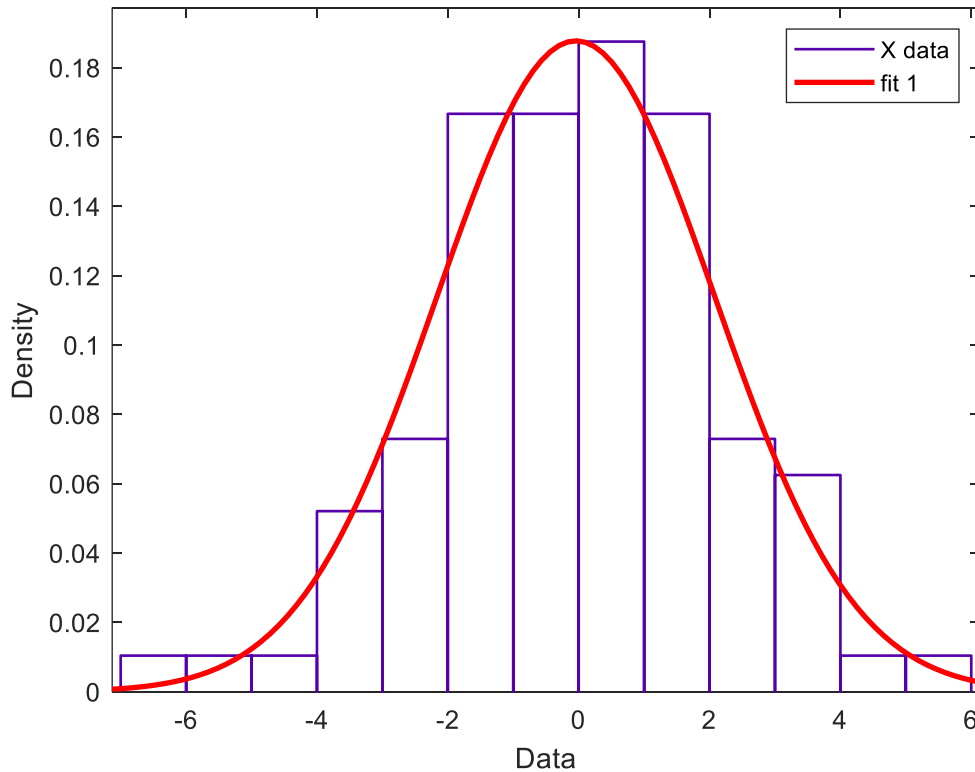
Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-0.4203 dB	0.5569 dB	-0.2790 dB	5.0031 dB	-0.6422 dB
2	-4.4243 dB	-0.2288 dB	0.1627 dB	-0.8450 dB	0.2337 dB
3	-2.6727 dB	-5.4134 dB	-3.2761 dB	-0.6657 dB	-1.4385 dB
4	-2.8412 dB	-3.6613 dB	-1.4004 dB	1.2251 dB	-1.5293 dB

5	-0.3081 dB	1.8851 dB	2.7068 dB	-0.1057 dB	-0.1433 dB
6	-3.8088 dB	3.7005 dB	-2.7501 dB	-1.0506 dB	-1.3733 dB
7	-0.5136 dB	-1.9430 dB	0.9164 dB	-2.4139 dB	-2.8632 dB
8	0.7243 dB	-3.1145 dB	-0.9923 dB	3.9294 dB	0.3901 dB
9	1.6880 dB	-0.3384 dB	0.4289 dB	2.2158 dB	-0.5315 dB
10	-0.0728 dB	1.0536 dB	-6.4982 dB	0.3950 dB	-1.5875 dB

Με την επεξεργασία των δεδομένων σκίασης των Πινάκων 4.35 και 4.36, μέσω του dfittool της Matlab, προκύπτει η εκτίμηση για τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των απωλειών σκίασης. Τα αποτελέσματα  $(\mu, \sigma) = (-0.04 \text{ dB}, 2.12 \text{ dB})$  παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.72 και 4.73.

Distribution: Normal	
Log likelihood: -208.088	
Domain: $-\text{Inf} < y < \text{Inf}$	
Mean:	-0.0427678
Variance:	4.51635
Parameter Estimate Std. Err.	
mu	-0.0427678 0.216899
sigma	2.12517 0.154583
Estimated covariance of parameter estimates:	
mu	sigma
mu	0.0470453 -2.65299e-18
sigma	-2.65299e-18 0.023896

Εικόνα 4.72 : Σταθμός Βάσης B – 2100 MHz - Μοντέλο “COST231-Hata”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης



Εικόνα 4.73 : Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz - Μοντέλο “ COST231-Hata”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης

#### 4.4.6. Σταθμός Βάσης Β: Μοντέλο Lee

Σύμφωνα με τις περιγραφές του Κεφαλαίου 2 το μοντέλο Lee έχει την ακόλουθη μορφή:

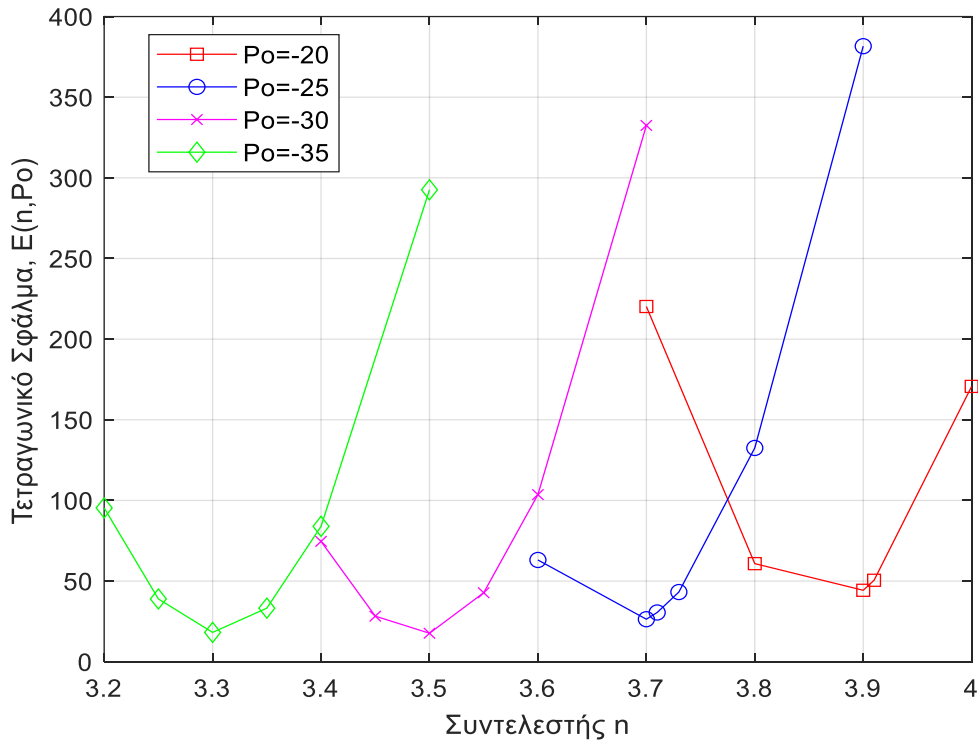
$$\overline{PL}_{est} = 10n \log(R) - 20 \log(h_{b,eff}) - P_0 - 10 \log(h_m) + 29 \quad (4.12)$$

όπου  $R$  είναι η απόσταση από το σταθμό βάσης,  $h_{b,eff}$  είναι το ενεργό ύψος της κεραίας λαμβάνοντας υπόψη την κλίση της θέσης στην οποία βρίσκεται ο κινητός σταθμός,  $h_m$  το ύψος της κεραίας του κινητού σταθμού, ενώ οι σταθεροί συντελεστές  $n$  και  $P_0$  εξαρτώνται από το περιβάλλον της ασύρματης διάδοσης. Σε ότι αφορά το  $h_{b,eff}$  επιλέγεται η ταύτιση του με το συμβατικό ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης

$h_b = 24$  m, διότι η μορφολογία του εδάφους δεν παρουσιάζει σημαντικές κλίσεις. Τέλος, για το ύψος της κεραίας του κινητού σταθμού επιλέγεται η τυπική τιμή  $h_m = 1.5$  m.

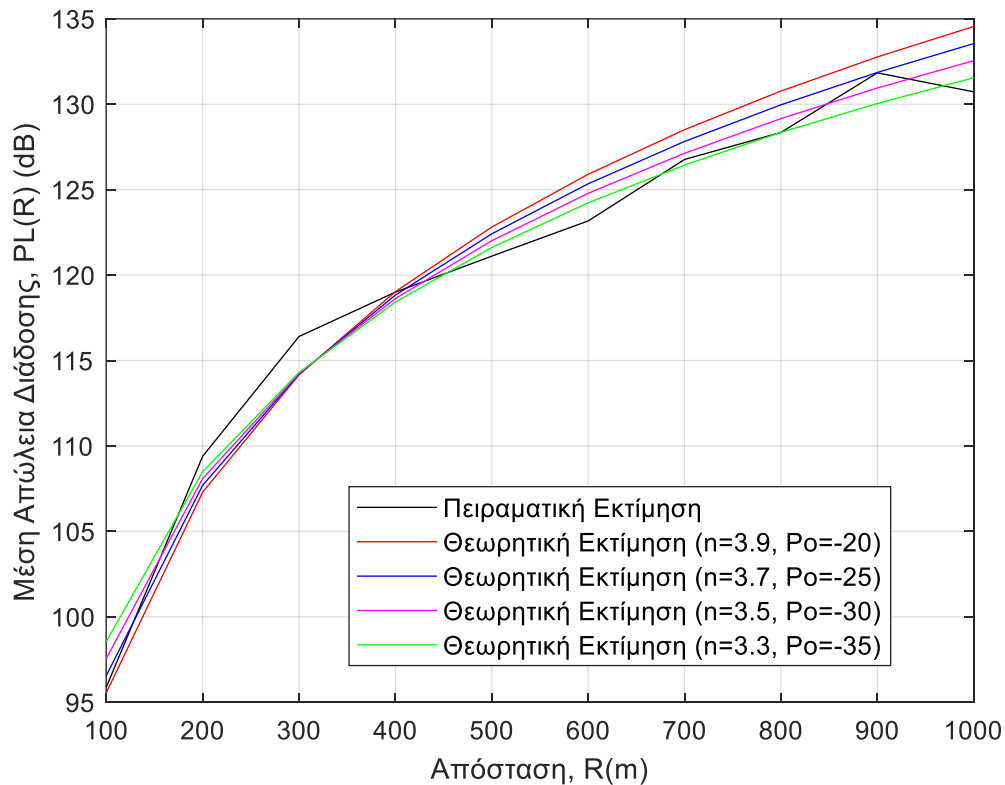
#### 4.4.6.1. Σταθμός Βάσης B: Lee – 900 MHz

Για τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών του ζεύγους  $(n, P_0)$  θα πραγματοποιηθούν οι συνήθεις υπολογισμοί τετραγωνικού σφάλματος για διαφορετικούς συνδυασμούς τιμών. Οι καμπύλες της Εικόνας 4.74 αναπαριστούν το τετραγωνικό σφάλμα συναρτήσεως του συντελεστή  $n$  για 4 διακριτές τιμές του  $P_0 = -20, -25, -30$  και  $-35$ . Όπως προκύπτει από τα γραφικά αποτελέσματα το τετραγωνικό σφάλμα ελαχιστοποιείται για  $P_0 = -30$  και  $n = 3.5$  επιτυγχάνοντας ένα τετραγωνικό σφάλμα  $E = 17.65$ . Για  $P_0 = -35$  το τετραγωνικό σφάλμα ελαχιστοποιείται για  $n = 3.3$  επιτυγχάνοντας ένα ελαφρώς μεγαλύτερο τετραγωνικό σφάλμα  $E = 18.19$ .



Εικόνα 4.74: Σταθμός Βάσης B – 900 MHz- Μοντέλο “Lee” : Τετραγωνικό σφάλμα E συναρτήσεως των συντελεστών  $(n, P_0)$ .

Η διαφοροποίηση ανάμεσα στις προαναφερόμενες λύσεις και η τελική επιλογή της βέλτιστης διευκολύνεται από τα γραφικά αποτελέσματα της Εικόνα 4.75. Όπως φαίνεται στην Εικόνα 4.36 η διαφοροποίηση ανάμεσα στα ζεύγη τιμών ( $n=3.5, P_0=-30$ ) και ( $n=3.3, P_0=-35$ ) σχετίζεται με την καλύτερη ή χειρότερη προσαρμογή στα πειραματικά δεδομένα σε μικρές, ενδιάμεσες και μεγάλες αποστάσεις. Η ελαχιστοποίηση του σφάλματος για το ζεύγος ( $n=3.3, P_0=-35$ ) προκύπτει από την εξαιρετική προσαρμογή στο ενδιάμεσο διάστημα 400 m-800 m, γεγονός το οποίο επιτρέπει μία σχετικά μεγάλη απόκλιση σε πιο κοντινά και πιο απομακρυσμένα σημεία. Αντίθετα, το ζεύγος ( $n=3.5, P_0=-30$ ) επιτυγχάνει ένα μικρό τετραγωνικό σφάλμα παρουσιάζοντας ικανοποιητική σύγκλιση τόσο σε μικρές, όσο και σε μεγαλύτερες αποστάσεις. Στο πλαίσιο αυτών των διαπιστώσεων εκτιμάται ότι τελικά η βέλτιστη λύση είναι το ζεύγος ( $n=3.5, P_0=-35$ )



+

Εικόνα 4.75: Σταθμός Βάσης B – 900 MHz- Μοντέλο “Lee”: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης.

Με την εισαγωγή των βέλτιστων τιμών ( $n= 3.5$ ,  $P_0= -35$ ) υπολογίζονται οι απώλειες σκίασης αφαιρώντας από τις πειραματικές μετρήσεις (Πίνακας 4.21 και 4.22) τις αντίστοιχες θεωρητικές. Τα αποτελέσματα για τις απώλειες σκίασης καταγράφονται στους Πίνακες 4.37 και 4.38.

Πίνακας 4.37. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Β – 900 MHz-  
Μοντέλο “Lee”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	2.3442 dB	-0.6777 dB	1.5065 dB	-2.1436 dB	0.3537 dB
2	-23.5878 dB	-2.8950 dB	-0.7155 dB	-1.8630 dB	-3.0456 dB
3	2.6228 dB	-3.2131 dB	3.3650 dB	2.0321 dB	0.1967 dB
4	-27.4873 dB	3.5892 dB	3.3537 dB	1.7862 dB	1.1895 dB
5	-23.0918 dB	4.4452 dB	3.2249 dB	0.4352 dB	-1.0614 dB
6	-23.3792 dB	0.8455 dB	3.4550 dB	-0.7682 dB	-1.7735 dB
7	-0.1840 dB	1.4552 dB	0.5693 dB	2.3996 dB	-2.8273 dB
8	-0.1861 dB	1.3762 dB	0.5041 dB	1.8367 dB	-2.4569 dB
9	-24.0499 dB	1.1737 dB	2.2654 dB	-0.2363 dB	-2.6904 dB
10	1.1484 dB	1.0780 dB	1.9077 dB	-4.0689 dB	0.4080 dB

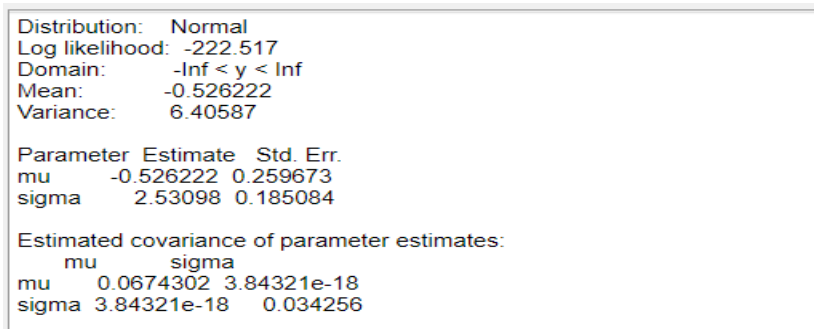
Πίνακας 4.38. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης Α – 900 MHz-  
Μοντέλο “Lee”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-1.1852 dB	-0.5288 dB	-1.3200 dB	5.0666 dB	-1.6720 dB
2	-5.9368 dB	-1.6182 dB	-0.3755 dB	-1.7434 dB	-0.4242 dB
3	-4.2838 dB	-5.8504 dB	-3.3107 dB	-1.5333 dB	-2.8880 dB
4	-3.4694 dB	-3.6230 dB	-1.6651 dB	0.9050 dB	-2.5701 dB

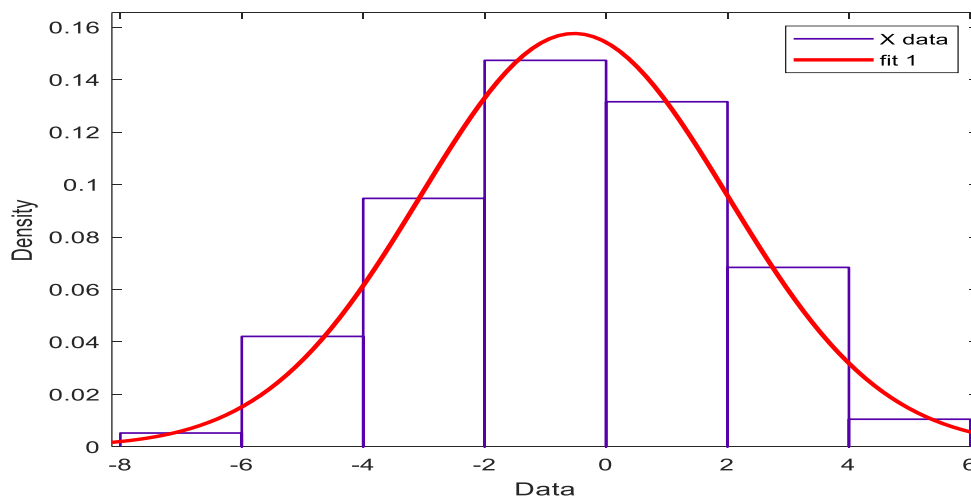


5	-0.9357 dB	1.5773 dB	3.0085 dB	-1.0414 dB	-1.3359 dB
6	-4.6816 dB	3.8634 dB	-3.2581 dB	-2.7991 dB	-2.1484 dB
7	-1.5009 dB	-2.2603 dB	0.2699 dB	-4.0557 dB	-4.3106 dB
8	0.1709 dB	-4.7394 dB	-2.3288 dB	3.4581 dB	-0.7561 dB
9	0.8991 dB	-1.6003 dB	0.8189 dB	1.8840 dB	-0.9211 dB
10	-0.3307 dB	1.5777 dB	-7.8391 dB	-0.1012 dB	-2.6097 dB

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων των Πινάκων 4.37 και 4.38 με το dfittool της Matlab, προκύπτει η εκτίμηση για τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των απωλειών σκίασης. Τα αποτελέσματα  $(\mu, \sigma) = (-0.53 \text{ dB}, 2.53 \text{ dB})$  παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.76 και 4.77.



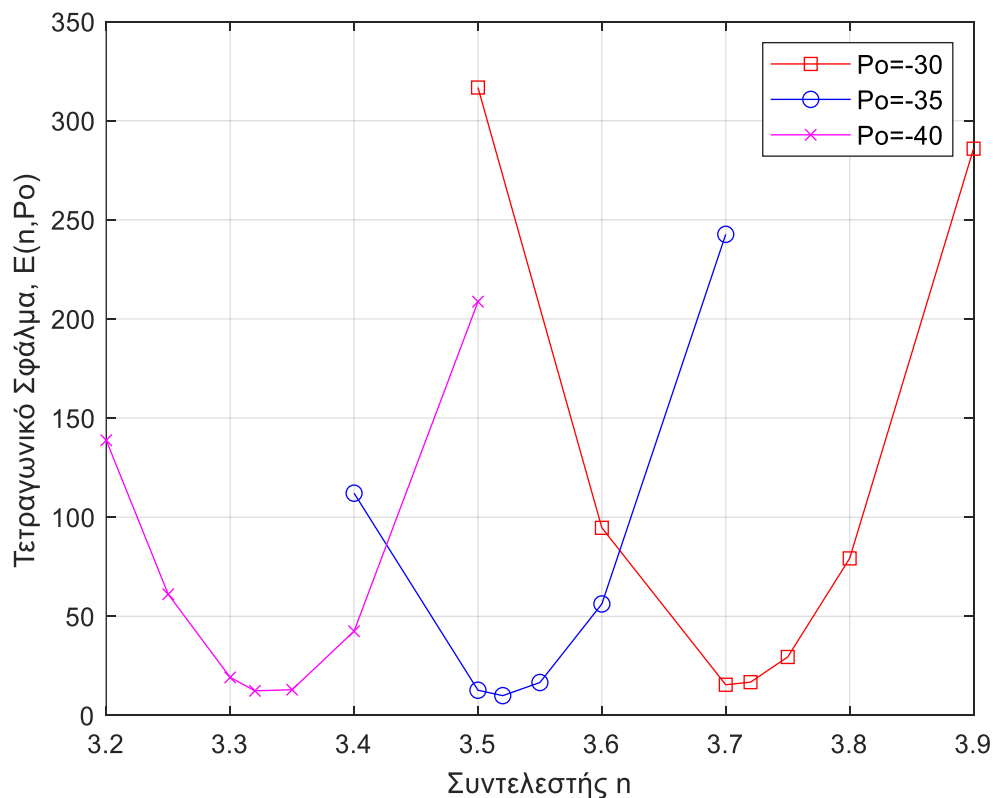
Εικόνα 4.76 : Σταθμός Βάσης B – 900 MHz - Μοντέλο “Lee”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης



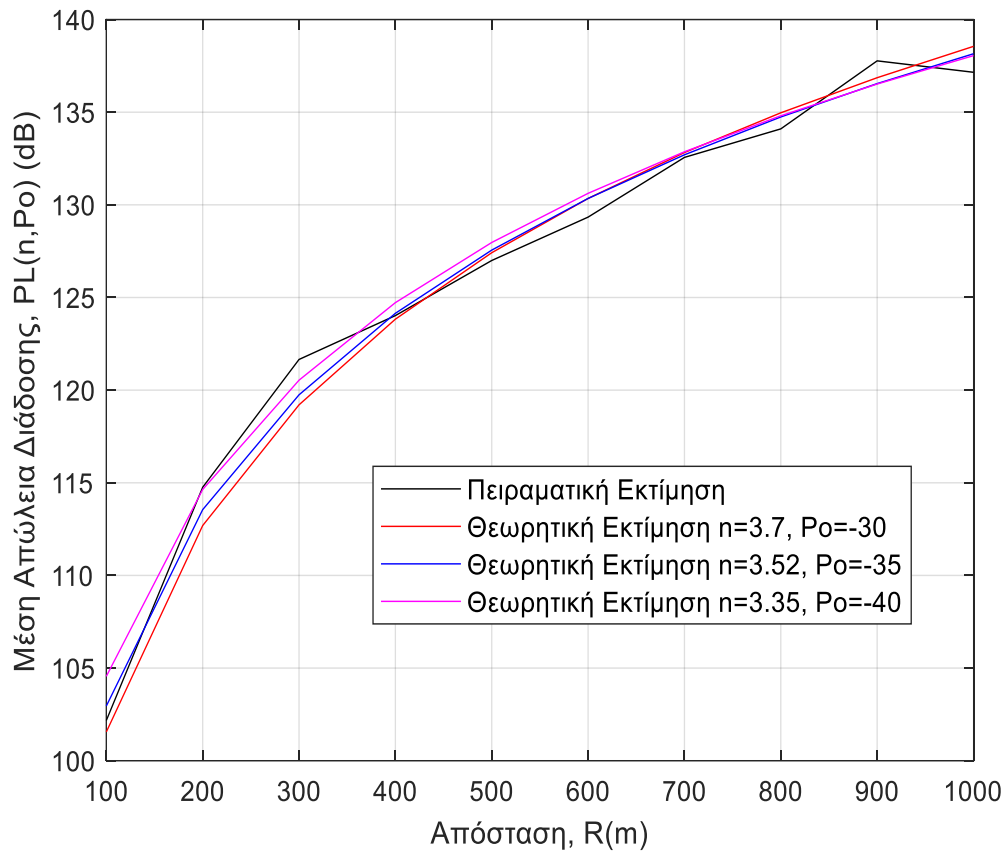
Εικόνα 3.77 : Σταθμός Βάσης B – 900 MHz - Μοντέλο Lee”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης

#### 4.4.6.2. Σταθμός Βάσης B: Lee – 2100 MHz

Στην περίπτωση του μοντέλου “Lee” και τον προσδιορισμό των βέλτιστων τιμών του ζεύγους  $(n, P_0)$  για το Σταθμό Βάσης A και τη συχνότητα λειτουργίας 2100 MHz, η μεθοδολογία και τα αποτελέσματα είναι παραπλήσια με αυτά που προκύπτουν για τα 900 MHz. Οι καμπύλες της Εικόνας 4.78 αναπαριστούν το τετραγωνικό σφάλμα συναρτήσεως του συντελεστή  $n$  για 3 διακριτές τιμές του  $P_0 = -30, -35$  και  $-40$ . Όπως προκύπτει από τα γραφικά αποτελέσματα το τετραγωνικό σφάλμα ελαχιστοποιείται  $P_0 = -35$  για την τιμή του συντελεστή  $n = 3.52$ . Η διαφοροποίηση μεταξύ των θεωρητικών και πειραματικών εκτιμήσεων για τις βέλτιστες τιμές:  $(n = 3.7, P_0 = -30)$ ,  $(n = 3.52, P_0 = -35)$  και  $(n = 3.35, P_0 = -40)$  αναπαρίσταται στην Εικόνα 4.79.



Εικόνα 4.78: Σταθμός Βάσης B – 2100 MHz- Μοντέλο “Lee” : Τετραγωνικό σφάλμα  $E$  συναρτήσεως των συντελεστών  $(n, P_0)$ .



Εικόνα 4.79: Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz- Μοντέλο “Lee”: Σύγκριση θεωρητικών εκτιμήσεων και πειραματικών μετρήσεων των απωλειών διάδοσης.

Με την εισαγωγή των βέλτιστων τιμών ( $n= 3.52$ ,  $P_0= -35$ ) υπολογίζονται οι απώλειες σκίασης αφαιρώντας από τις πειραματικές μετρήσεις (Πίνακας 4.21 και 4.22) τις αντίστοιχες θεωρητικές. Τα αποτελέσματα για τις απώλειες σκίασης καταγράφονται στους Πίνακες 4.39 και 4.40.

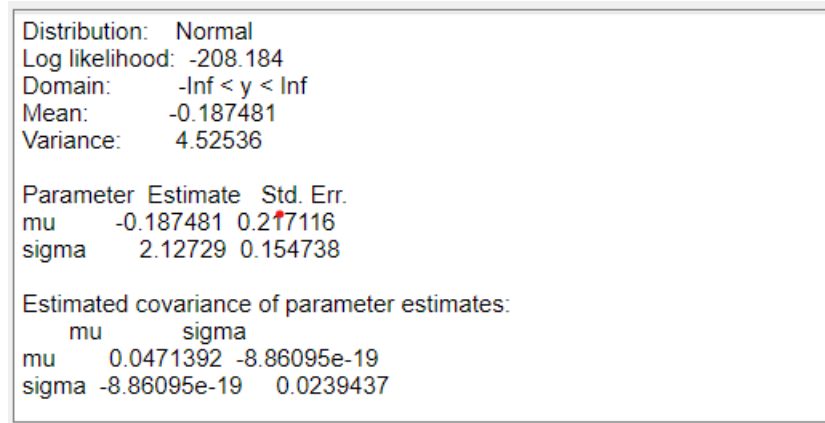
Πίνακας 4.39. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 100 m -500 m – Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz-  
Μοντέλο “Lee”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	1.4096 dB	-0.1988 dB	1.4048 dB	-1.5492 dB	0.1285 dB
2	-21.4563 dB	-1.8319 dB	0.1613 dB	-1.5161 dB	-2.3305 dB
3	2.3599 dB	-2.1617 dB	2.9883 dB	1.9118 dB	0.3971 dB
4	2.2362 dB	3.0576 dB	2.9730 dB	1.7733 dB	1.0574 dB
5	-20.3138 dB	3.9755 dB	2.8554 dB	0.1171 dB	-1.3122 dB
6	-20.5165 dB	0.8748 dB	3.0995 dB	-1.6504 dB	-1.3754 dB
7	0.1527 dB	1.3279 dB	0.5434 dB	-0.0068 dB	-1.8315 dB
8	0.1702 dB	1.2666 dB	-0.0337 dB	1.0431 dB	-1.3183 dB
9	-21.2756 dB	1.1001 dB	1.9076 dB	-0.5493 dB	-1.3606 dB
10	1.6672 dB	0.9947 dB	1.6916 dB	-4.0377 dB	0.8230 dB

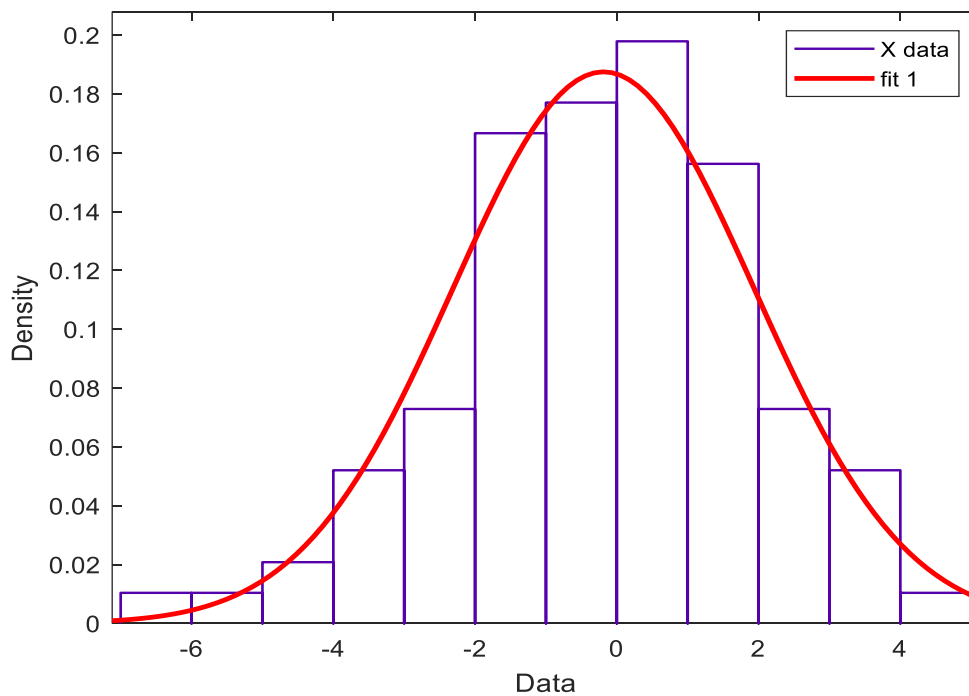
Πίνακας 4.40. Απώλειες Σκίασης σε αποστάσεις 600 m -1000 m – Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz-  
Μοντέλο “Lee”

Απώλειες Σκίασης Χσ					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-0.5671 dB	0.4086 dB	-0.4286 dB	4.8524 dB	-0.7939 dB
2	-4.5711 dB	-0.3771 dB	0.0131 dB	-0.9957 dB	0.0820 dB
3	-2.8195 dB	-5.5617 dB	-3.4257 dB	-0.8164 dB	-1.5902 dB
4	-2.9880 dB	-3.8096 dB	-1.5500 dB	1.0744 dB	-1.6810 dB
5	-0.4549 dB	1.7368 dB	2.5572 dB	-0.2564 dB	-0.2950 dB
6	-3.9556 dB	3.5522 dB	-2.8997 dB	-1.2013 dB	-1.5250 dB
7	-0.6604 dB	-2.0913 dB	0.7668 dB	-2.5646 dB	-3.0149 dB
8	0.5775 dB	-3.2628 dB	-1.1419 dB	3.7787 dB	0.2384 dB
9	1.5412 dB	-0.4867 dB	0.2793 dB	2.0651 dB	-0.6832 dB
10	-0.2196 dB	0.9053 dB	-6.6478 dB	0.2443 dB	-1.7392 dB

Μετά την επεξεργασία των δεδομένων των Πινάκων 4.39 και 4.40 με το dfittool της Matlab, προκύπτει η εκτίμηση για τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση των απωλειών σκίασης. Τα αποτελέσματα  $(\mu, \sigma) = (-0.7 \text{ dB}, 2.55 \text{ dB})$  παρουσιάζονται στις Εικόνες 4.80 και 4.81.



Εικόνα 4.80 : Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz - Μοντέλο “Lee”: Μέσος όρος και τυπική απόκλιση ΣΠΠ απωλειών σκίασης



Εικόνα 4.81: Σταθμός Βάσης Β – 2100 MHz - Μοντέλο Lee”: Γράφημα ΣΠΠ απωλειών Σκίασης

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 - Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προεκτάσεις

### 5.1. Συμπεράσματα

Στο πλαίσιο της μελέτης που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία εξετάστηκαν τα ακόλουθα εμπειρικά μοντέλα πρόβλεψης των απωλειών διάδοσης σε κανάλια δικτύων κινητών επικοινωνιών:

- Power Law
- Clutter Factor
- Okumura-Hata
- Lee

Ο σκοπός της μελέτης αφορά τον προσδιορισμό της βέλτιστης παραμετροποίησης για κάθε ένα από τα προαναφερόμενα μοντέλα με κριτήριο την προσαρμογή τους σε δεδομένα αναφοράς. Τα μετρητικά δεδομένα αναφοράς προέκυψαν από υπολογισμούς του 2D εμπορικού λογισμικού Atoll σε ένα πραγματικό περιβάλλον λειτουργίας δικτύων κινητής επικοινωνίας.

Συγκεκριμένα, συλλέχθηκαν μετρητικά δεδομένα από δύο κελιά που υποστηρίζουν δίκτυα κινητών επικοινωνιών στις ζώνες συχνοτήτων 900 MHz και 2100 MHz. Το περιβάλλον διάδοσης στο ένα κελί («Σταθμός Βάσης Α») τυποποιείται ως «Αστική Περιοχή με Μέτριας Πυκνότητας Δόμηση», ενώ το άλλο κελί («Σταθμός Βάσης Β») ως «Αστική Περιοχή με Υψηλή Πυκνότητα Δόμηση». Σε κάθε κελί ανά συχνότητα (900 MHz ή 2100 MHz) συλλέχθηκαν 1000 μετρήσεις ως εξής: 10 μετρήσεις ανά 100 μέτρα σε διαφορετικές θέσεις και για ένα εύρος αποστάσεων από 100 μέτρα έως 1000 μέτρα. Τα αποτελέσματα από την εύρεση της βέλτιστης παραμετροποίησης για κάθε ένα μοντέλο με κριτήριο τις μετρήσεις από το κελί του Σταθμού Βάσης Α καταγράφονται στον Πίνακα 5.1. Σύμφωνα με τιμές του Πίνακα 5.1 μπορούν να διατυπωθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Μοντέλο “Power Law”: Ο βέλτιστος συντελεστής απωλειών διάδοσης  $n$  λαμβάνει την τιμή 3.85. Η τιμή αυτή κινείται στο εύρος των αναμενόμενων τιμών για ένα αστικό περιβάλλον διάδοσης. Οι τιμές του  $n$  για τις δύο διαφορετικές συχνότητες δεν διαφοροποιείται, γεγονός το οποίο δεν είναι αναμενόμενο. Επί της αρχής θα ήταν αναμενόμενο να υπάρχουν μεγαλύτερες απώλειες στην υψηλότερη συχνότητα και αυτό θα έπρεπε να αντικατοπτρίζεται σε ένα μεγαλύτερο συντελεστή απωλειών  $n$ . Το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ της θεωρητικής εκτίμησης για τις μέσες απώλειες με  $n = 3.85$  και τα μετρητικά δεδομένα λαμβάνει χαμηλή τιμή αλλά όχι τη χαμηλότερη ανάμεσα στα εξεταζόμενα μοντέλα. Η κατανομή των απωλειών σκίασης βρίσκεται αρκετά κοντά στην αναμενόμενη τιμή των 0 dB, ενώ η τυπική της απόκλιση λαμβάνει μία τυπικά χαμηλή τιμή κατ’ αναλογία με τη σχετική ομοιομορφία του περιβάλλοντος διάδοσης.

Πίνακας 5.1. Σύνοψη αποτελεσμάτων για τον Σταθμό Βάσης Α

Σταθμός Βάσης Α	Εμπειρικά Μοντέλα	Παράμετροι Βελτιστοποίησης	Μέση Τιμή Σκίασης	Απόκλιση Σκίασης	Τετραγωνικό Σφάλμα
	Power Law 900 MHz	$n=3.85$	- 0.95 dB	3 dB	7.4
	Power Law 2100 MHz	$n=3.85$	-0.86 dB	2.76 dB	9.7
	Clutter factor 900MHz	$K = 40.4$	-1.2 dB	3.1 dB	4.9
	Clutter factor 2100MHz	$K = 47.6$	-0.86 dB	2.37dB	6.4
	Okumura-Hata 900MHz	$A_1 = 13.82, B_1=6.55$ $E_1 = 5.4$	-0.9	2.8dB	4.2
	COST231-Hata 2100MHz	$G' = 8.7$	0.4 dB	2.2dB	17.6
	Lee 900MHz	$n= 3.99, P_0= -10$	-1.2 dB	3db	5.1
	Lee 2100 MHz	$n= 3.88, P_0= -20$	-0.7 dB	2.55dB	8.8

- Μοντέλο “Clutter Factor”: Η βελτιστοποιημένη παράμετρος  $K$  λαμβάνει την τιμή 40.4 στα 900 MHz και 47.6 στα 2100 MHz. Οι τιμές αυτές είναι αναμενόμενες και αποτυπώνουν την επιδείνωση των συνθηκών διάδοσης με την αύξηση της συχνότητας. Το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ της θεωρητικής εκτίμησης για τις μέσες απώλειες με το βέλτιστο  $K$  είναι ένα από τα χαμηλότερα και μάλιστα στα 2100 MHz είναι το χαμηλότερο. Η κατανομή των απωλειών σκίασης βρίσκεται αρκετά κοντά στην αναμενόμενη τιμή των 0 dB, ενώ η τυπική της απόκλιση λαμβάνει παραπλήσια τιμή με αυτή των υπόλοιπων μοντέλων.
- Μοντέλο “Okumura-Hata”: Οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων  $(A_1, B_1, E_1) = (13.82, 6.55, 5.4)$  για τα 900 MHz βρίσκονται εξαιρετικά κοντά στις τυποποιημένες τιμές του μοντέλου επιβεβαιώνοντας την υφιστάμενη παραμετροποίηση. Σε ότι αφορά τα 2100 MHz η βέλτιστη τιμή  $G'=8.7$  φαίνεται να αποδυναμώνει τον σταθερό παράγοντα  $G$  του μοντέλου μειώνοντας τις εκτιμώμενες απώλειες σε σχέση με την τυποποιημένη εκδοχή του μοντέλου. Το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ της θεωρητικής εκτίμησης για τις μέσες απώλειες με τη βελτιστοποιημένη παραμετροποίηση είναι το χαμηλότερο μεταξύ όλων των μοντέλων ενώ στα 2100 MHz είναι το υψηλότερο. Η κατανομή των απωλειών σκίασης εμφανίζει παραπλήσια χαρακτηριστικά με αυτές των υπόλοιπων μοντέλων.
- Μοντέλο “Lee”: Οι βελτιστοποιημένες τιμές του μοντέλου δίνουν ένα συντελεστή απωλειών διάδοσης  $n$  κοντά στις τιμές που δίνει το μοντέλο “Power Law” αλλά διαφοροποιεί, όπως είναι αναμενόμενο την εκτίμηση στις υψηλότερες συχνότητες με τη διαφοροποίηση της τιμής της παραμέτρου  $P_0$ . Το τετραγωνικό σφάλμα είναι από τα χαμηλότερα μεταξύ των μοντέλων και για τις δύο συχνότητες που εξετάστηκαν. Τέλος, η κατανομή των απωλειών



σκίασης εμφανίζει παραπλήσια χαρακτηριστικά με αυτές των υπόλοιπων μοντέλων.

• Συνοψίζοντας, για το Σταθμό Βάσης A μεταξύ των μοντέλων που εξετάστηκαν τα μοντέλα Okumura-Hata, Clutter Factor και Lee με τη βελτιστοποιημένη παραμετροποίηση εμφανίζουν στα 900 MHz την καλύτερη προσαρμογή με τα μετρητικά δεδομένα με κριτήριο το τετραγωνικό σφάλμα. Τέλος, στα 2100 MHz τις καλύτερες επιδόσεις παρουσιάζουν τα μοντέλα Clutter Factor και Lee.

Πίνακας 5.2. Σύνοψη αποτελεσμάτων για τον Σταθμό Βάσης B

Σταθμός Βάσης A	Εμπειρικά Μοντέλα	Παράμετροι Βελτιστοποίησης	Μέση Τιμή Σκίασης	Απόκλιση Σκίασης	Τετραγωνικό Σφάλμα
	Power Law 900 MHz	$n=4.42, 0-300 \text{ m}$ $n=4.07, 400-1000 \text{ m}$	- 0.95 dB	5.9 dB	7.1
	Power Law 2100 MHz	$n=4.21, 0-400 \text{ m}$ $n=3.98, 500-1000 \text{ m}$	-0.86 dB	5.2 dB	5.9
	Clutter factor 900MHz	$K= 49.5, 0-400\text{m}$ $K=46,500-1000\text{m}$	-1.2 dB	3.1 dB	4.4
	Clutter factor 2100MHz	$K = 55, 0-400\text{m}$ $K=52, 500-1000\text{m}$	-0.86 dB	2.37dB	5.1
	Okumura-Hata 900MHz	$A_1 = 9.9, B_1= 7.1$ $E_1 = 4.9$	-0.9	2.8dB	16.6
	COST231-Hata 2100MHz	$G' = 12.5$	0.4 dB	2.2dB	10.2
	Lee 900MHz	$n= 3.5, P_0= -35$	-1.2 dB	3db	17.65
	Lee 2100 MHz	$n= 3.52, P_0= -35$	-0.7 dB	2.55dB	9.99

Στον Πίνακα 5.2 καταγράφονται τα αποτελέσματα από την εύρεση της βέλτιστης παραμετροποίησης για κάθε ένα μοντέλο με κριτήριο τις μετρήσεις από το κελί του Σταθμού Βάσης B. Σύμφωνα με τιμές του Πίνακα 5.2 μπορούν να διατυπωθούν τα εξής συμπεράσματα:

- Μοντέλο “Power Law”: Ο βέλτιστος συντελεστής απωλειών διάδοσης  $n$  λαμβάνει την τιμή 4.42 (0 - 300 m) και 4.07 (400 -1000 m). Η τιμή αυτή κινείται στο εύρος των αναμενομένων τιμών για ένα αστικό περιβάλλον διάδοσης. Όπως και στην περίπτωση του Σταθμού Βάσης A, οι τιμές του  $n$  για τις δύο διαφορετικές συχνότητες δεν διαφοροποιείται, γεγονός το οποίο δεν είναι αναμενόμενο. Η κατανομή των απωλειών σκίασης βρίσκεται αρκετά κοντά στην αναμενόμενη τιμή των 0 dB αλλά η τυπική της απόκλιση λαμβάνει μία αρκετά υψηλή τιμή σε αντίθεση με τις προβλέψεις των υπόλοιπων μοντέλων. Εκτιμάται ότι η διαφοροποίηση ως προς τον στατιστικό χαρακτηρισμό των απωλειών σκίασης οφείλεται στην μη συνεκτική τοποθέτηση του μοντέλου ως προς τον συντελεστή απωλειών διάδοσης  $n$ . Ουσιαστικά, η όποια αστοχία στην εκτίμηση του  $n$  ενσωματώνεται στις απώλειες σκίασης. Σε κάθε περίπτωση το τετραγωνικό σφάλμα είναι σχετικά μικρότερο αλλά όχι το μικρότερο σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα.
- Μοντέλο “Clutter Factor”: Η βελτιστοποιημένη παράμετρος  $K$  λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές συγκριτικά με την περίπτωση του Σταθμού Βάσης A. Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο, διότι η αύξηση της πυκνότητας δόμησης δυσχεραίνει τις συνθήκες διάδοσης και αυτό αποτυπώνεται στην αύξηση του συντελεστή  $K$ . Το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ της θεωρητικής εκτίμησης για τις μέσες απώλειες με το βέλτιστο  $K$  είναι ένα το χαμηλότερο μεταξύ των εξεταζόμενων μοντέλων. Η κατανομή των απωλειών σκίασης βρίσκεται αρκετά κοντά στην αναμενόμενη τιμή των 0 dB, ενώ η τυπική της απόκλιση λαμβάνει παραπλήσια τιμή με αυτή των υπόλοιπων μοντέλων με την εξαίρεση του μοντέλου Power Law.
- Μοντέλο “Okumura-Hata”: Οι βελτιστοποιημένες τιμές των παραμέτρων  $(A_1, B_1, E_1) = (9.9, 7.1, 4.9)$  για τα 900 MHz τροποποιούν σημαντικά τις τυποποιημένες τιμές του υφιστάμενου μοντέλου. Συγκεκριμένα, φαίνεται να

διαφοροποιείται ο τρόπος με τον οποίο επενεργεί το ύψος της κεραίας του σταθμού βάσης. Η τιμή του  $A_1 = 9.9 < 13.98$  (=τυποποιημένη τιμή) εξασθενεί την θετική επίδραση της αύξησης του ύψους της κεραίας του σταθμού βάσης όταν αυτό υπολογίζεται ως μία σταθερά δηλ. ανεξάρτητα από τη θέση. Αντίθετα, η τιμή  $B_1 = 7.1 > 6.5$  φαίνεται να ενισχύει τη θετική επίδραση από την αύξηση του ύψους της κεραίας όταν αυτό συναρτάται από τη θέση, δηλ. την απόσταση από το σταθμό βάσης. Τέλος, σε ότι αφορά τα 2100 MHz η βέλτιστη τιμή  $G' = -12.5$  φαίνεται να τροποποιεί τον σταθερό παράγοντα  $G$  του μοντέλου αυξάνοντας τις εκτιμώμενες απώλειες σε σχέση με την τυποποιημένη εκδοχή του μοντέλου. Το τετραγωνικό σφάλμα μεταξύ της θεωρητικής εκτίμησης για τις μέσες απώλειες με τη βελτιστοποιημένη παραμετροποίηση είναι το χειρότερο μεταξύ όλων των μοντέλων ενώ στα 2100 MHz είναι το υψηλότερο. Η κατανομή των απωλειών σκίασης εμφανίζει παραπλήσια χαρακτηριστικά με αυτές των υπόλοιπων μοντέλων με την εξαίρεση του μοντέλου Power Law.

- Μοντέλο “Lee”: Οι βελτιστοποιημένες τιμές του μοντέλου δίνουν ένα συντελεστή απωλειών διάδοσης  $n$  με χαμηλότερες τιμές συγκριτικά με το μοντέλο “Power Law” αλλά μέσω της παραμέτρου  $P_0$  προκύπτει μία αντιστάθμιση. Το τετραγωνικό σφάλμα είναι από είναι αρκετά υψηλό και παραπλήσιο με αυτό που εμφανίζει το μοντέλο Okumura-Hata. Τέλος, η κατανομή των απωλειών σκίασης εμφανίζει παραπλήσια χαρακτηριστικά με αυτές των υπόλοιπων μοντέλων με την εξαίρεση του μοντέλου Power Law.

Συνοψίζοντας, για το Σταθμό Βάσης Β μεταξύ των μοντέλων που εξετάστηκαν τα μοντέλα Clutter Factor με τη βελτιστοποιημένη παραμετροποίηση εμφανίζουν την καλύτερη επίδοση ως προς το τετραγωνικό σφάλμα και εν γένει την πιο συνεκτική συμπεριφορά σε σχέση με τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

## 5.2. Μελλοντικές Προεκτάσεις

Ενδεικτικά, ορισμένες προεκτάσεις της παρούσας εργασίας είναι οι ακόλουθες:

- Πραγματοποίηση μετρήσεων στο πεδίο για την προσαρμογή των μοντέλων σε πραγματικά μετρητικά δεδομένα.
- Επέκταση των μετρήσεων πεδίου σε διαφορετικά περιβάλλοντα όπως για παράδειγμα προάστια, αγροτικές περιοχές κοκ.
- Λήψη ενός μεγαλύτερου πλήθους μετρήσεων για τη βελτίωση της στατιστικής αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων.
- Επέκταση σε ζώνες συχνοτήτων όπως τα 3.5 GHz και η χιλιοστομετρική ζώνη προκειμένου να αξιολογηθούν τα υφιστάμενα ή και νέα εμπειρικά μοντέλα σε σχέση με τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών 5G.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J. (2018). 5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology, Academic Press.
- [2] Dahlman, E., Parkvall, S., Skold, J. (2011). 4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband, Academic Press.
- [3] Laiho, J., Wacker, A., Novosad, T. (2002). Radio Network Planning and Optimization for UMTS, John Wiley & Sons.
- [4] Redl, S.M., Weber, M.K., Oliphant, M.W. (1995). An Introduction to GSM, Artech House Publishers.
- [5] Rappaport, T. S. (2002), Wireless Communications: Principles and Practice, Prentice Hall.
- [6] Saunders, S. R., & Aragón-Zavala, A. (2007). Antennas and propagation for wireless communication systems. John Wiley & Sons.
- [7] Egli, J. J. (1957). Radio Propagation above 40 Mc over irregular terrain, Proc. IRE, 1383-1391.
- [8] Delisle, G. Y., Lefevre, J. P., Lecours, M., & Chouinard, J. Y. (1985). Propagation loss prediction: A comparative study with application to the mobile radio channel. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 34(2), 86-96.
- [9] Okumura, Y. (1968). Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile radio service. Rev. Electr. Commun. Lab., 16, 825-873.
- [10] Hata, M. (1980). Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services. IEEE transactions on Vehicular Technology, 29(3), 317-325.
- [11] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.529-2: Prediction methods for the terrestrial land mobile service in the VHF and UHF bands, Geneva, 1997.
- [12] Final report of the COST-207 management committee, Digital land mobile radio communications, Commission of the European Communities, L-2920, Luxembourg, 1989.
- [13] Kozono, S., & Watanabe, K. (1977). Influence of environmental buildings on UHF land mobile radio propagation. IEEE Transactions on Communications, 25(10), 1133-1143.
- [14] Final report of the COST-231 management committee, Digital mobile radio towards Future Generation Systems, Commission of the European Communities, L-2920, Luxembourg, 1999.

- [15] W. C. Y. Lee, *Mobile Communications Engineering*, McGraw-Hill, New York, 1982, ISBN 0-070-37039-7.
- [16] W. C. Y. Lee, *Mobile Design Fundamentals*, John Wiley, New York, 1993, ISBN 0-471-57446-5.
- [17] P. W. Huish and E. Gurdenli, Radio channel measurements and prediction for future mobile radio systems, *British Telecom Technology Journal*, 6 (1), 43–53, 1988.
- [18] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.1411-6: Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radiocommunication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz, Geneva, 2012.
- [19] International Telecommunication Union, ITU-R Recommendation P.1546-6: Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 4 000 MHz, Geneva, 2019.
- [20] Chrysanthou, C. H. R. Y. S. A. N. T. H. O. S., & Bertoni, H. L. (1990). Variability of sector averaged signals for UHF propagation in cities. *IEEE transactions on Vehicular Technology*, 39(4), 352-358.
- [21] Saunders, S. R., & Bonar, F. R. (1991, May). Mobile radio propagation in built-up areas: A numerical model of slow fading. In [1991 Proceedings] 41st IEEE Vehicular Technology Conference (pp. 295-300). IEEE.
- [22] Jakes, W. C., & Cox, D. C. (Eds.). (1994). *Microwave mobile communications*. Wiley-IEEE press.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Πίνακας Α.1 Σταθμός Βάσης Α: Μετρήσεις Ισχύος Λήψης σε αποστάσεις 100 m – 500 m στα 900 MHz

Ισχύ λήψης στον Σταθμό Βάσης Α– 900MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-53. dBm	-76.71 dBm	-77.05 dBm	-81.25 dBm	-85.39 dBm
2	-53.15 dBm	-46.88 dBm	-76.85 dBm	-81.23 dBm	-122.97 dBm
3	-52.81 dBm	-75.36 dBm	-76.53 dBm	-79.2 dBm	-121.88 dBm
4	-64.39 dBm	-52.2 dBm	-81.27 dBm	-82.42 dBm	-87.55 dBm
5	-65.74 dBm	-69.52 dBm	-79.8 dBm	-81.09 dBm	-86.49 dBm
6	-54.79 dBm	-71.22 dBm	-76.25 dBm	-82.26 dBm	-87.22 dBm
7	-55.49 dBm	-68.44 dBm	-79.81 dBm	-80.78 dBm	-85.19 dBm
8	-55.8 dBm	-67.74 dBm	-76.29 dBm	-82.67 dBm	-86.41 dBm
9	-55.83 dBm	-50.87 dBm	-76.03 dBm	-81.76 dBm	-81.15 dBm
10	-57.62 dBm	-52.99 dBm	-57.84 dBm	-76.8 dBm	-61.78 dBm

Πίνακας Α.2 Σταθμός Βάσης Α: Μετρήσεις Ισχύος Λήψης σε αποστάσεις 600 m – 1000 m στα 900 MHz

Ισχύ λήψης στον Σταθμό Βάσης Α – 900MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-88.7 dBm	-89.24 dBm	-92.21 dBm	-94.54 dBm	-94.16 dBm
2	-88.9 dBm	-89.71 dBm	-95.72 dBm	-90.5 dBm	-92.95 dBm
3	-87. dBm	-90.86 dBm	-89.55 dBm	-86.85 dBm	-91.7 dBm
4	-86.03 dBm	-87.81 dBm	-88.15 dBm	-91.18 dBm	-91.47 dBm
5	-87.96 dBm	-86.68 dBm	-89.56 dBm	-92.24 dBm	-96.67 dBm
6	-90.17 dBm	-90.57 dBm	-88.71 dBm	-92.53 dBm	-96.74 dBm
7	-85.34 dBm	-91.87 dBm	-94.7 dBm	-91.15 dBm	-94.07 dBm
8	-90.56 dBm	-89.64 dBm	-95.34 dBm	-93.95 dBm	-96.36 dBm
9	-90.28 dBm	-81.71 dBm	-91.1 dBm	-94.05 dBm	-89.93 dBm
10	-77.97 dBm	-91.83 dBm	-91.38 dBm	-89.6 dBm	-93.27 dBm

Πίνακας Α.3 Σταθμός Βάσης Α: Μετρήσεις Ισχύος Λήψης σε αποστάσεις 100 m – 500 m στα 2100 MHz

Ισχύ λήψης στον Σταθμό Βάσης Α 2100MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-67.5 dBm	-82.99 dBm	-86.67 dBm	-90.07 dBm	-93.49 dBm
2	-67.98 dBm	-82.44 dBm	-86.24 dBm	-89.94 dBm	-92.99 dBm
3	-67.9 dBm	-81.26 dBm	-84.61 dBm	-88.32 dBm	-92.46 dBm
4	-79.11 dBm	-66.78 dBm	-88.23 dBm	-91.05 dBm	-94.45 dBm
5	-94.14 dBm	-76.7 dBm	-87.46 dBm	-89.52 dBm	-94.38 dBm
6	-69.48 dBm	-78.09 dBm	-84. dBm	-90.66 dBm	-95.76 dBm
7	-69.74 dBm	-78.67 dBm	-86.12 dBm	-90.6 dBm	-93.49 dBm
8	-69.88 dBm	-80.77 dBm	-86.48 dBm	-92.12 dBm	-93.39 dBm
9	-69.89 dBm	-69.02 dBm	-86.55 dBm	-89.82 dBm	-90.65 dBm
10	-72.12 dBm	-70.6 dBm	-70.78 dBm	-86.81 dBm	-74.1 dBm

Πίνακας Α.4 Σταθμός Βάσης Α: Μετρήσεις Ισχύος Λήψης σε αποστάσεις 600 m – 1000 m στα 2100 MHz

Ισχύ λήψης στον Σταθμό Βάσης Α- 2100MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-96.75 dBm	-97.85 dBm	-100.6 dBm	-102.06 dBm	-105.09 dBm
2	-96.04 dBm	-98.15 dBm	-105.65 dBm	-99.43 dBm	-101.67 dBm
3	-95.22 dBm	-99.92 dBm	-100.07 dBm	-96.79 dBm	-100.9 dBm
4	-94.45 dBm	-97.2 dBm	-97.42 dBm	-100.06 dBm	-102.19 dBm
5	-95.15 dBm	-95.85 dBm	-98.47 dBm	-101.67 dBm	-104.68 dBm
6	-97.28 dBm	-100.95 dBm	-98.19 dBm	-101.94 dBm	-106.72 dBm
7	-93.27 dBm	-101.25 dBm	-103.52 dBm	-100.8 dBm	-102.61 dBm
8	-98.43 dBm	-97.47 dBm	-103.8 dBm	-102.61 dBm	-105.24 dBm
9	-97.62 dBm	-93.07 dBm	-99.7 dBm	-102.84 dBm	-100.66 dBm
10	-90.63 dBm	-101.77 dBm	-101.92 dBm	-100.12 dBm	-103.77 dBm



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

Πίνακας Β.1 Σταθμός Βάσης Β: Μετρήσεις Ισχύος Λήψης σε αποστάσεις 100 m – 500 m στα 900 MHz

Ισχύ λήψης στον Σταθμό Βάσης Β 900MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-72.21 dBm	-83.69 dBm	-91.34 dBm	-94.58 dBm	-98.66 dBm
2	-51.89 dBm	-79.18 dBm	-89.7 dBm	-94.75 dBm	-95.61 dBm
3	-71.47 dBm	-78.79 dBm	-93.94 dBm	-97.49 dBm	-98.61 dBm
4	-41.11 dBm	-86.82 dBm	-93.69 dBm	-97.28 dBm	-99.53 dBm
5	-49.96 dBm	-87.57 dBm	-93.22 dBm	-95.63 dBm	-97.16 dBm
6	-50.23 dBm	-83.46 dBm	-93.36 dBm	-94.13 dBm	-96.34 dBm
7	-67.53 dBm	-84.72 dBm	-90.29 dBm	-96.91 dBm	-94.89 dBm
8	-67.83 dBm	-84.6 dBm	-90.21 dBm	-96.19 dBm	-95.44 dBm
9	-53.58 dBm	-84.44 dBm	-91.7 dBm	-93.87 dBm	-95.32 dBm
10	-71.31 dBm	-84.53 dBm	-91.48 dBm	-90.35 dBm	-98.97 dBm

Πίνακας Β.2 Σταθμός Βάσης Β: Μετρήσεις Ισχύος Λήψης σε αποστάσεις 600 m – 1000 m στα 900 MHz

Ισχύ λήψης στον Σταθμό Βάσης Β 900MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-101.5 dBm	-104.28 dBm	-105.76 dBm	-112.67 dBm	-109.26 dBm
2	-96.73 dBm	-103.09 dBm	-107.19 dBm	-105.9 dBm	-109.72 dBm
3	-97.43 dBm	-98.1 dBm	-103.36 dBm	-106.06 dBm	-107.87 dBm
4	-98.51 dBm	-100.24 dBm	-104.91 dBm	-108.81 dBm	-107.84 dBm
5	-100.07 dBm	-105.81 dBm	-110.36 dBm	-106.5 dBm	-109.36 dBm
6	-96.96 dBm	-107.95 dBm	-104.24 dBm	-104.68 dBm	-106.81 dBm
7	-99.37 dBm	-101.06 dBm	-106.63 dBm	-103.82 dBm	-104.54 dBm
8	-101.5 dBm	-98.17 dBm	-103.75 dBm	-110.68 dBm	-108.44 dBm
9	-101.38 dBm	-102.14 dBm	-105.92 dBm	-110.18 dBm	-108.12 dBm
10	-100.62 dBm	-105.5 dBm	-97.59 dBm	-108.65 dBm	-106.1 dBm

Πίνακας Β.3 Σταθμός Βάσης Β: Μετρήσεις Ισχύος Λήψης σε αποστάσεις 100 m – 500 m στα 2100 MHz

Ισχύ λήψης στον Σταθμό Βάσης Β 2100MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	100m	200m	300m	400m	500m
1	-76.46 dBm	-95.94 dBm	-99.83 dBm	-108.93 dBm	-112.48 dBm
2	-60.46 dBm	-89.64 dBm	-101.4 dBm	-108.98 dBm	-111.2 dBm
3	-76.6 dBm	-89.14 dBm	-105.16 dBm	-109.69 dBm	-113.71 dBm
4	-76.8 dBm	-97.46 dBm	-105.02 dBm	-110.25 dBm	-114.34 dBm
5	-62.25 dBm	-98.58 dBm	-104.55 dBm	-108.52 dBm	-111.96 dBm
6	-61.93 dBm	-94.41 dBm	-105.08 dBm	-106.47 dBm	-111.73 dBm
7	-75.38 dBm	-97.59 dBm	-102.66 dBm	-108.04 dBm	-109.9 dBm
8	-76.31 dBm	-97.35 dBm	-102.59 dBm	-109.01 dBm	-110.18 dBm
9	-61.55 dBm	-96.98 dBm	-104.08 dBm	-106.84 dBm	-109.67 dBm
10	-81.81 dBm	-96.87 dBm	-104.57 dBm	-104.75 dBm	-112.77 dBm

Πίνακας Β.4 Σταθμός Βάσης Β: Μετρήσεις Ισχύος Λήψης σε αποστάσεις 600 m – 1000 m στα 2100MHz

Ισχύ λήψης στον Σταθμό Βάσης Β – 2100MHz					
ΔΕΙΓΜΑ	600m	700m	800m	900m	1000m
1	-115.88 dBm	-120.78 dBm	-120.63 dBm	-127.4 dBm	-122.98 dBm
2	-112.09 dBm	-120. dBm	-120.37 dBm	-121.87 dBm	-122.27 dBm
3	-111.9 dBm	-113.1 dBm	-114.96 dBm	-122.04 dBm	-122.8 dBm
4	-113.27 dBm	-114.74 dBm	-116.83 dBm	-125.17 dBm	-122.71 dBm
5	-113.7 dBm	-122.09 dBm	-123.51 dBm	-123.29 dBm	-125.5 dBm
6	-112.38 dBm	-123.77 dBm	-119.57 dBm	-121.66 dBm	-120.75 dBm
7	-114.1 dBm	-116.36 dBm	-121.4 dBm	-120.44 dBm	-120.06 dBm
8	-117.26 dBm	-113.96 dBm	-119.9 dBm	-124.18 dBm	-125.03 dBm
9	-116.05 dBm	-118.45 dBm	-121.33 dBm	-124.6 dBm	-124.12 dBm
10	-115.79 dBm	-119.29 dBm	-114.02 dBm	-123.06 dBm	-122.07 dBm