



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΑΔΟΜΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ  
ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ  
ΣΚΙΑΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΑΡΙΟΣ Π. ΜΠΑΖΙΟΣ**

**Επιβλέπων : ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Δ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ**

**ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π**

**Αθήνα, Ιούνιος 2012**





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ  
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΔΟΣΗΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ  
ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

**ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑ ΚΙΝΗΤΩΝ ΑΔΟΜΗΤΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ  
ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΕΣ ΔΙΑΦΟΡΙΣΜΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ  
ΣΚΙΑΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΜΑΡΙΟΣ Π.ΜΠΑΖΙΟΣ**

**Επιβλέπων : ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ Δ. ΠΑΝΑΓΟΠΟΥΛΟΣ**

**ΛΕΚΤΟΡΑΣ Ε.Μ.Π**

.....  
Αθ. Παναγόπουλος  
Λέκτορας ΕΜΠ

.....  
Φ. Κωνσταντίνου  
Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ι. Κανελλόπουλος  
Καθηγητής ΕΜΠ

**Αθήνα, Ιούνιος 2012**

.....  
**ΜΠΑΖΙΟΣ ΜΑΡΙΟΣ**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

© 2012 – All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας 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 συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στη σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών και το θέμα της αφορά στο επιστημονικό πεδίο του Τομέα υστημάτων μετάδοσης πληροφορίας και τεχνολογίας υλικών.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον λέκτορα και επιβλέποντα της διπλωματικής μου εργασίας κ. Αθανάσιο Παναγόπουλο καθώς και τον καθηγητή κ. Φίλιππο Κωνσταντίνου για το ενδιαφέρον που επέδειξε και τις πολύτιμες γνώσεις που μου έδωσε κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον υποψήφιο Διδάκτορα Γεώργιο Πιτσιλαδή, για τη συνεχή και ουσιαστική βοήθεια του. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την συνολική στήριξη τους κατά τη διάρκεια των σπουδών μου στο Πολυτεχνείο.



## Περίληψη

Στη διπλωματική αυτή ασχολούμαστε κατά κύριο λόγο με τα κινητά αδόμητα δίκτυα (MANETs). Συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο παραθέτουμε τα γενικά χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών καθώς και κάποιες εφαρμογές τους που είναι αρκετά χρήσιμες και ενδιαφέρουσες. Έπειτα, στο δεύτερο κεφάλαιο ασχολούμαστε αναλυτικά με τη μαθηματική περιγραφή των απωλειών διαδρομής και της σκίασης.

Στη συνέχεια και με τη βοήθεια της MATLAB προσομοιώνουμε ένα κινητό ad-hoc δίκτυο, οι κόμβοι του οποίου κινούνται με το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων. Αλλάζοντας βασικές παραμέτρους του δικτύου όπως τον παράγοντα απωλειών διαδρομής, την τυπική απόκλιση της σκίασης, την ισχύ εκπομπής των κόμβων, τον αριθμό των κόμβων στο δίκτυο και την ταχύτητα των κόμβων παρατηρούμε τη συνδεσιμότητα του δικτύου και εξάγουμε κάποιες γραφικές παραστάσεις, που οδηγούν σε κάποια πολύ χρήσιμα συμπεράσματα. Ιδιαίτερη σημασία έχει ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνεται υπόψη η συσχέτιση της σκίασης καθώς στόχος είναι να εξαχθούν όσο γίνεται πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

Τέλος, στο 4<sup>ο</sup> κεφάλαιο προσομοιώνουμε και πάλι κινητό ad-hoc δίκτυο οι κόμβοι του οποίου έχουν δυνατότητες διαφορισμού. Με τη χρήση διαφορικής λήψης χώρου παρατηρούμε τη συνδεσιμότητα του δικτύου για τις τεχνικές SC, MRC, EGC που μπορούν να χρησιμοποιούν οι κόμβοι-δέκτες και εξάγουμε και πάλι γραφικές παραστάσεις που καθρεπτίζουν τη συμπεριφορά του δικτύου.

## Λέξεις Κλειδιά

<<MANET, ad-hoc δίκτυα, κινητοί κόμβοι συνδεσιμότητα, απώλειες διαδρομής, σκίαση, αυτοσυσχέτιση, ετεροσυσχέτιση, τυπική απόκλιση σκίασης, διαλείψεις μεγάλης κλίμακας, μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων, διαφορική λήψη χώρου, επιλεκτικός συνδυασμός, συνδυαστική μέγιστου λόγου, συνδυαστική σταθερού κέρδους >>

## **Abstract**

On this diploma thesis we are dealing with mobile unstructured networks. Specifically, on the 1<sup>st</sup> chapter we quote the general features of these networks and some of their usefull and important applications. Furthermore on the 2<sup>nd</sup> chapter we study the mathematical expression of correlated shadowing and path loss attenuation.

Moreover, the MATLAB programming tool helped us to simulate the mobile ad hoc network. The nodes of these network are mobile and their movement is based on the Random Waypoint Mobility Model. By changing some of the most important parameters of the network such as path loss exponent, shadowing's standard deviation, power of nodes-transmitters, number of nodes and node's speed we observe the connectivity of the network and we sketch some graphs, which lead to some very important conclusions. The way we consider the correlation of shadowing is of great significance for the reliability of the results.

Finally, on the 4<sup>th</sup> chapter we simulate a mobile ad-hoc network again, but the nodes have the additional ability to use diversity techniques. We observe the connectivity of the network for the SC,MRC and EGC technique and from the results of the simulations we sketch some important graphs.

## **Keywords**

<< <<MANET, ad-hoc networks, mobile nodes, connectivity, path loss attenuation, shadowing, autocorrelation, site to site correlation, shadowing's standard deviation, large scale fading, Random Waypoint Mobility Model, space diversity, Selection Combining, Maximal Ratio Combining, Equal Gain Combining >>





## ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

---

<b>Κεφάλαιο 1: Ασύρματα ad-hoc δίκτυα.....</b>	<b>13</b>
1.1 Ασύρματα Δίκτυα γενικά .....	13
1.2 Ασύρματα Ad Hoc δίκτυα και MANETs.....	16
1.2.1 MANETs.....	18
1.2.2 Εφαρμογή των MANETs σε οχήματα (VANETs)..	20
1.3 Δίκτυα αισθητήρων - Sensor Networks.....	22
1.4 Δίκτυα Ασύρματου Πλέγματος (Wireless Mesh Networks) .....	25
1.5 Χωρητικότητα Ad Hoc δικτύων.....	31
1.6 Στοιβα πρωτοκόλλων.....	33
<b>Κεφάλαιο 2: Κανάλια συσχετισμένων διαλείψεων σκίασης και τεχνικές διαφορικής λήψης .....</b>	<b>44</b>
2.1 Διαλείψεις στο ασύρματο κανάλι.....	44
2.2 Απώλειες Διάδοσης.....	47
2.2.1 Απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου.....	47
2.2.2 Μοντέλο Hata και μοντέλο COST 231-Hata.....	49
2.3 Σκίαση.....	51
2.3.1 Σκίαση:κάποια παραδείγματα.....	53
2.3.2 Τυπική απόκλιση σκίασης.....	54
2.4 Συσχέτιση.....	55
2.4.1 Αυτοσυσχέτιση (serial correlation).....	56
2.4.2 Ετεροσυσχέτιση (Site to site-correlation ή cross-correlation).....	58
2.5 Συνδυασμός απωλειών Διαδρομής και Σκίασης.....	63
2.6 Τεχνικές Διαφορικής Λήψης.....	68
2.6.1 Διαφορική λήψη χώρου.....	69
<b>Κεφάλαιο 3: Μελέτη συνδεσιμότητας με το μοντέλο τυχαίων στάσεων.....</b>	<b>71</b>
3.1 Εισαγωγή.....	71

3.2 Μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων (Random Waypoint Mobility model).....	72
3.3 Έκφραση του σηματοθορυβικού λόγου.....	75
3.3.1 Μοντέλο σκίασης.....	75
3.4 Ανάλυση Κώδικα Matlab.....	78
3.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων.....	83
3.5.1 N=100 και v=15-30m/s.....	83
3.5.2 N=150 και v=15-30m/s.....	88
3.5.3 N=100 v=0.2-2m/s.....	91
3.5.4 Σύγκριση με περίπτωση που η σκίαση θεωρείται ασυσχέτιστη.....	94
3.6 Συμπεράσματα.....	99
<b>Κεφάλαιο 4: Μελέτη συνδεσιμότητας με τεχνικές διαφορικής λήψης .....</b>	<b>101</b>
4.1 Εισαγωγή.....	101
4.2 Κώδικας Matlab.....	101
4.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων.....	104
4.3.1 N=100.....	104
4.3.2 N=150.....	112
4.3.3 Σύγκριση με διαφορετική ταχύτητα .....	118
4.3.4 Σύγκριση με διαφορετικό συντελεστή συσχέτισης .....	123
<b>Κεφάλαιο 5 :Επίλογος.....</b>	<b>127</b>
<b>Βιβλιογραφία.....</b>	<b>128</b>



# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## ΑΣΥΡΜΑΤΑ AD HOC ΔΙΚΤΥΑ

---

### ***1.1 Ασύρματα Δίκτυα γενικά***

Στον κόσμο της τηλεφωνίας τα τελευταία 20 χρόνια μπορούν να θεωρηθούν τα χρυσά χρόνια της κινητής τηλεφωνίας. Ο αριθμός των συνδρομητών κινητής τηλεφωνίας σε όλο τον κόσμο έχει ξεπεράσει κατά πολύ τον αριθμό των συνδρομητών σταθερής τηλεφωνίας [1].

Υπάρχουν πολλά είδη ασύρματων δικτύων. Μερικά από αυτά είναι:

- ***Κυψελωτά δίκτυα (cellular networks)***

Ο χώρος κάλυψης τέτοιων συστημάτων χωρίζεται σε κυψέλες (cells). Κάθε κυψέλη εξυπηρετείται απ το δικό της σταθμό βάσης. Σε κάθε κυψελωτό σταθμό βάσης, αποδίδεται μια ομάδα ραδιοδιαύλων που χρησιμοποιούνται σε μια μικρή γεωγραφική περιοχή, που καλείται κυψέλη (cell). Η βασική αρχή λειτουργίας ενός κυψελωτού συστήματος είναι η ιδέα της επαναχρησιμοποίησης καναλιών. Στους σταθμούς βάσης γειτονικών κυψελών αποδίδονται ομάδες διαύλων, που περιέχουν διαφορετικούς διαύλους από αυτούς των γειτονικών κυψελών. Περιορίζοντας την περιοχή κάλυψης στα όρια μιας κυψέλης είναι δυνατή η επαναχρησιμοποίηση ομάδων διαύλων σε άλλες κυψέλες που απέχουν μεταξύ τους απόσταση ικανή, ώστε το επίπεδο των ομοδιαυλικών παρεμβολών να βρίσκεται σε ανεκτά όρια [2].

Η εξαγωνική κυψέλη είναι θεμελιώδες σχήμα και είναι ένα απλοποιημένο μοντέλο της ραδιοκάλυψης κάθε σταθμού βάσης. Χρησιμοποιείται παγκοσμίως για την ευκολία που παρέχει στην ανάλυση και σχεδίαση των κυψελωτών συστημάτων. Ένα κυψελωτό σύστημα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.1

- ***Δορυφορικά δίκτυα (satellite networks)***

Τα δορυφορικά δίκτυα επικοινωνιών αποτελούν ένα σημαντικό τμήμα των σύγχρονων τηλεπικοινωνιακών συστημάτων. Οι δορυφόροι παρέχουν τη δυνατότητα κάλυψης μεγάλων γεωγραφικών περιοχών. Η δυνατότητα αυτή είναι καθοριστικής σημασίας σε εφαρμογές όπως η διασύνδεση μεγάλων τηλεπικοινωνιακών κόμβων, οι κινητές τηλεπικοινωνίες, οι τηλεοπτικές ζεύξεις κλπ. Τα δορυφορικά δίκτυα αποτελούνται από δυο βασικά τμήματα το δορυφορικό τμήμα και το επίγειο. Το δορυφορικό τμήμα του συστήματος περιλαμβάνει δορυφορικό αναμεταδότη και επίγειο σταθμό ελέγχου για διαδικασίες τηλεμετρίας και έλεγχου του δορυφόρου.

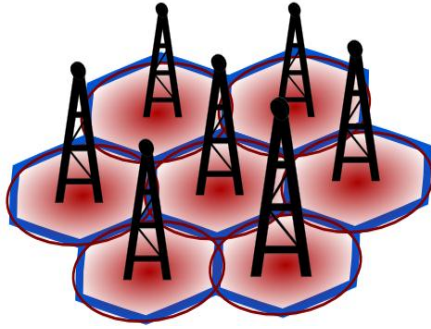
Τα δορυφορικά δίκτυα λειτουργούν (σε γενικές γραμμές) ως εξής. Το σήμα πληροφορίας εισέρχεται στην είσοδο του πομπού. Αυτός το πολυπλέκει και το διαμορφώνει στην ενδιάμεση συχνότητα του συστήματος (IF). Μετά το σήμα αλλάζει συχνότητα(RF),ενισχύεται και εκπέμπεται προς το δορυφόρο. Στο δορυφόρο φτάνει το σήμα αφού υποστεί κάποιες αποσβέσεις. Ο δορυφορικός αναμεταδότης χρησιμοποιεί ενίσχυση και μετατροπή συχνότητας στο σήμα και αυτό επανεκπέμπεται προς τον επίγειο προορισμό του [3]. Ένα παράδειγμα δορυφορικού συστήματος φαίνεται παρακάτω στο σχήμα 1.2.

- ***Ασύρματα τοπικά δίκτυα (WLANs-Wireless LANs)***

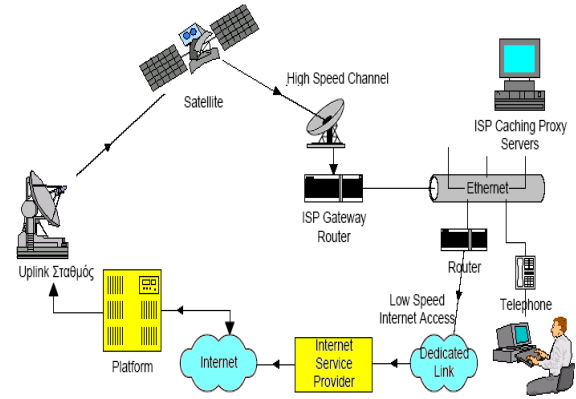
Σε αυτά τα δίκτυα οι κόμβοι συνδέονται ασύρματα χωρίς καμία μορφή καλωδίωσης. Τα ασύρματα LANs παρέχουν υπηρεσίες δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης σε μια μικρή περιοχή, με κινητικότητα χρηστών. Τα συστήματα τοπικής ασύρματης δικτύωσης λειτουργούν στις ζώνες ISM στα 2.4GHZ και στα 5.8GHZ καθώς και στη ζώνη των 5.2GHz με κάποιες παραλλαγές ανά γεωγραφική περιοχή.

Επειδή χρησιμοποιείται ευρυεκπομπή (broadcast) το ασύρματο σήμα είναι διαθέσιμο σε όποιον έχει κάποια ασύρματη κάρτα γύρω από την περιοχή εκπομπής. Πρέπει λοιπόν να χρησιμοποιηθεί ασφάλεια ώστε μόνο εγκεκριμένοι(authorized) πελάτες να λαμβάνουν το σήμα. Ένα παράδειγμα

ασύρματου τοπικού δικτύου φαίνεται στο σχήμα 1.3.



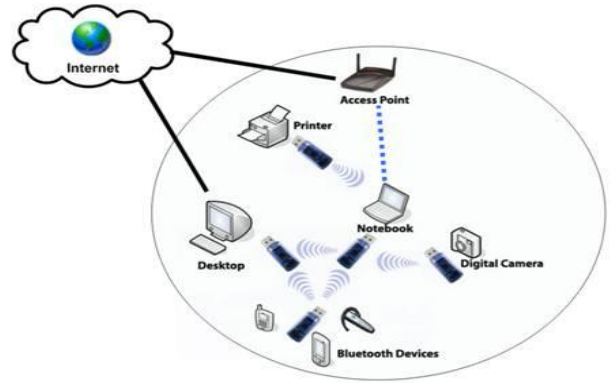
Σχήμα 1.1-Κυψελωτό Δίκτυο-cellular network



Σχήμα 1.2-Δορυφορικό Δίκτυο-satellite network



Σχήμα 1.3-Ασύρματο τοπικό δίκτυο-Wireless LAN



Σχήμα 1.4-Ασύρματο Προσωπικό Δίκτυο-WPAN

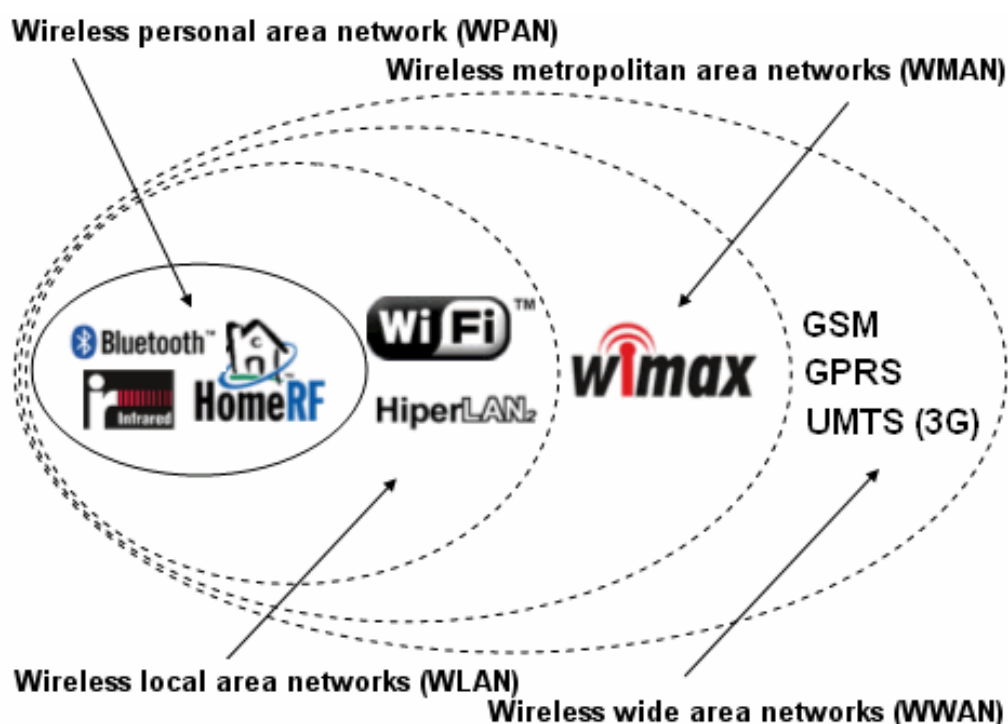
- **Ασύρματα προσωπικά δίκτυα επικοινωνιών(WPANs)**

Τα ασύρματα προσωπικά δίκτυα επικοινωνιών στοχεύουν στην ασύρματη δικτύωση φορητών υπολογιστών ,κινητών υπολογιστικών μονάδων όπως τα PDAs (Personal Digital Assistants) περιφερειακών, κυψελωτών τηλεφώνων και άλλων ηλεκτρονικών συσκευών που βρίσκονται σε μικρές αποστάσεις μεταξύ τους. Χαρακτηριστικό παράδειγμα τέτοιου δικτύου είναι το ευρέως χρησιμοποιούμενο bluetooth, μια ραδιοτεχνολογία που παρέχει ασύρματη σύνδεση μεταξύ ασύρματων συσκευών μέχρι αποστάσεις περίπου 10 μέτρων. Ένα παράδειγμα τέτοιου δικτύου φαίνεται στο σχήμα 1.4 [4].

Το παρακάτω σχήμα (σχήμα 1.5) δείχνει τις κατηγορίες των ασύρματων δικτύων με κριτήριο την ακτίνα κάλυψης. Έτσι βλέπουμε ότι για τα WPANs (Bluetooth,

Zigbee) η ακτίνα κάλυψης είναι σχετικά μικρή ενώ για τα WLANS το φάσμα κάλυψης είναι κάπως μεγαλύτερο. Για μεγαλύτερες ακτίνες κάλυψης έχουμε δίκτυα όπως τα WMAN(wireless metropolitan area networks) και για πολύ μεγάλες αποστάσεις κάλυψης χρησιμοποιούνται τα WWMAN (wireless wide area networks)/ GSM, GPRS, 3G).

Άλλη μια κατηγορία ασύρματων δικτύων που δεν εξετάστηκε είναι τα Ad Hoc δίκτυα. Αυτά εξετάζονται εκτενέστερα στις επόμενες ενότητες, καθώς αποτελούν το κύριο θέμα της συγκεκριμένης διπλωματικής.



Σχήμα 1.5 - Κατηγορίες ασύρματων δικτύων με βάση την ακτίνα κάλυψης

## 1.2 Ασύρματα Ad Hoc δίκτυα και MANETs

Ένα ασύρματο Ad Hoc δίκτυο είναι μια συλλογή από δύο ή περισσότερες συσκευές εφοδιασμένες με ικανότητες ασύρματης επικοινωνίας και δικτύωσης. Τέτοιες συσκευές μπορούν να επικοινωνούν με άλλους κόμβους που είναι μέσα στα όρια της ακτίνας κάλυψης τους ή με κόμβους που βρίσκονται έξω από αυτήν.



Το δίκτυο έχει δυνατότητες αυτοοργάνωσης (self-organizing) και προσαρμοστικότητας (adaptive). Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να δημιουργηθεί στον αέρα (on the fly) χωρίς την ανάγκη κάποιας μορφής κεντρικής διαχείρισης. Ο όρος Ad Hoc προέρχεται από τα λατινικά και σημαίνει “γι'αυτό το σκοπό”. Κόμβοι ή συσκευές Ad Hoc θα πρέπει να είναι ικανοί να εντοπίζουν την παρουσία άλλων κόμβων και να εκτελούν τις απαραίτητες διαδικασίες σύνδεσης για να επιτραπεί η επικοινωνία και ο διαμοιρασμός της πληροφορίας και των υπηρεσιών.

Κάθε κόμβος συμμετέχει στη δρομολόγηση προωθώντας δεδομένα για άλλους κόμβους, έτσι ώστε η απόφαση για το ποιός κόμβος θα προωθήσει ποιά δεδομένα να γίνεται δυναμικά και να βασίζεται στην συνδεσιμότητα. Επειδή η συσκευές που χρησιμοποιούνται σε τέτοια δίκτυα ποικίλλουν (laptop, κινητό τηλέφωνο κτλ.) οι δυνατότητες υπολογισμού, αποθήκευσης και επικοινωνίας διαφέρουν τρομακτικά. Οι συσκευές εκτός από τη δυνατότητα εντοπισμού των γειτονικών κόμβων θα πρέπει να αναγνωρίζουν και τον τύπο της συσκευής και τα χαρακτηριστικά της. Αφού το ασύρματο Ad Hoc δίκτυο δεν βασίζεται σε κάποιες οντότητες σταθερής δικτύωσης το δίκτυο είναι εκ των πραγμάτων χωρίς υποδομή. Δεν υπάρχει ανάγκη για σταθερούς σταθμούς βάσης, καλώδια ή σταθερούς δρομολογητές.

Η ποικιλία των Ad Hoc συσκευών συνεπάγεται την ποικιλία στις χρησιμοποιούμενες μπαταρίες. Αφού τα δίκτυα αυτά βασίζονται στην προώθηση πακέτων που προέρχονται από άλλους κόμβους, η κατανάλωση ισχύος των συσκευών είναι ένα κρίσιμο ζήτημα.

Η περιοχή εφαρμογής των Ad Hoc δικτύων είναι η γεωγραφική περιοχή μέσα στην οποία είναι κατανεμημένοι οι κόμβοι τους. Ένα Ad Hoc δίκτυο μπορεί να συνδεθεί μέσω πύλης (gateway) ή κόμβους που λειτουργούν ως gateways με άλλα σταθερά δίκτυα ή το ίντερνετ. Σε αυτή την περίπτωση το Ad Hoc δίκτυο επιτρέπει τη χρήση υπηρεσιών από άλλα δίκτυα. Τα δίκτυα αυτά μπορεί να είναι ενός άλματος (single hop) ή πολλαπλών αλμάτων (multi hop). Η δυνατότητα multi-hop των ασύρματων Ad Hoc δικτύων που τους επιτρέπει να επικοινωνούν με κόμβους πέρα από την ακτίνα κάλυψής τους είναι ίσως η πιο βασική διαφορά τους από τα άλλα είδη ασύρματων δικτύων. Τα Ad Hoc δίκτυα εκτός από την κλασική δρομολόγηση για την προώθηση δεδομένων μπορούν να χρησιμοποιήσουν πλυμμήρα. Μια εφαρμογή ad-hoc δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ένα δίκτυο MANET που περιγράφεται παρακάτω.

### 1.2.1 MANETs

Πρόσφατα έχει αυξηθεί το ενδιαφέρον για τα κινητά Ad Hoc δίκτυα (Mobile Ad Hoc Networks-MANETs), λόγω της δυνατότητας τους να διευκολύνουν την εύκολη ανάπτυξη του δικτύου και να επιτρέπουν σε σταθμούς με ασύρματη διεπαφή να περιφέρονται ελεύθερα και να επικοινωνούν μεταξύ τους χωρίς να εξαρτώνται από τη δικτυακή υποδομή.

Ένα δίκτυο MANET (Mobile Ad Hoc Network) είναι ένα αυτόνομο σύστημα από κινητούς κόμβους, χωρίς την παρουσία κάποιας προυπάρχουσας δομής κεντρικής διαχείρισης. Η επικοινωνία επιτυγχάνεται μέσω ασύρματων ζεύξεων από τις κεραιές των χρηστών. Το σύστημα αυτό μπορεί να είναι αποκομμένο ή να επικοινωνεί με κάποιο άλλο δίκτυο. Η τοπολογία του δικτύου μεταβάλλεται δυναμικά, καθώς οι κόμβοι μετακινούνται τυχαία ή αλλάζουν την ισχύ μετάδοσης τους.

Τα κύρια χαρακτηριστικά ενός κινητού Ad Hoc δικτύου είναι η κινητικότητα των κόμβων, η αυτονομία, η έλλειψη σταθερής υποδομής και η δρομολόγηση πολλαπλών αλμάτων. Η ανυπαρξία σταθερής υποδομής καθιστά τα κινητά αυτοοργανούμενα δίκτυα εύκολα υλοποιήσιμα και οικονομικά αποδοτικά, ενώ αυξάνεται και η ανθεκτικότητά τους σε σχέση με τα συμβατικά ασύρματα δίκτυα λόγω μη ιεραρχικού καταναμημένου ελέγχου. Έτσι πιθανό πρόβλημα σε κάποιον κόμβο δεν επιφέρει διακοπή λειτουργίας όλου του δικτύου, σε αντίθεση με τα συμβατικά ασύρματα δίκτυα όπου η λειτουργία του δικτύου εξαρτάται από το σταθμό βάσης.

Για την υποστήριξη του περιβάλλοντος των MANET είναι ουσιώδους σημασίας η ανάπτυξη των αντίστοιχων πρωτοκόλλων στα διάφορα στρώματα.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των MANETs παρουσιάζονται παρακάτω.

- *Αυτοδυναμία.*

Τα Mobile Ad-Hoc δίκτυα δε συνδέονται με άλλα τοπικά δίκτυα ή το Internet προκειμένου να σχηματίσουν το Ad-Hoc δίκτυο και να λειτουργήσουν. Οι κόμβοι σχηματίζουν το δίκτυο αυτοδύναμα και επικοινωνούν μεταξύ τους.

Βέβαια η σύνδεση οποιουδήποτε κόμβου είτε με κάποιο άλλο δίκτυο είτε με το ίντερνετ δεν είναι απαγορευμένη.

- *Έλλειψη κεντρικού συντονιστή.*

Δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός κόμβος που να συντονίζει την επικοινωνία των κόμβων όλου του δικτύου. Δύο κόμβοι επικοινωνούν μεταξύ τους είτε απευθείας (one-hop communication) αν η μεταξύ τους απόσταση το επιτρέπει, είτε μεταξύ άλλων ενδιάμεσων κόμβων (multi-hop communication) που απλά προωθούν τα μηνύματα επικοινωνίας.

- *Ισοδυναμία κόμβων.*

Όλοι οι κόμβοι του δικτύου είναι ισοδύναμοι για ότι αφορά τις αρμοδιότητες τους ως μέλη του δικτύου. Αυτό σημαίνει ότι κάθε κόμβος μπορεί να λειτουργεί ταυτόχρονα ως πηγή, δέκτης ή ενδιάμεσος κόμβος επικοινωνίας χωρίς να υπάρχουν κόμβοι που μπορεί να έχουν περισσότερα ή λιγότερα 'δικαιώματα' από κάποιους άλλους.

- *Μεταβλητή τοπολογία και αυξημένη κινητικότητα κόμβων.*

Λόγω της κίνησης των κόμβων η τοπολογία του δικτύου συνεχώς αλλάζει. Έτσι, μπορεί να υπάρχουν κόμβοι που για παράδειγμα συνδέονται για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και μετά χάνουν την επικοινωνία.

- *Περιορισμένη ισχύς.*

Οι κόμβοι ενός τέτοιου δικτύου είναι κινητοί, πράγμα που σημαίνει ότι λειτουργούν με μπαταρίες. Αυτό σε συνδυασμό με το γεγονός ότι κινούνται και δεν είναι εύκολο να βρίσκονται συνέχεια κοντά σε μια σταθερή βάση απ' όπου θα προμηθεύονται ενέργεια, οδηγεί αναπόφευκτα σε μικρή διάρκεια λειτουργίας των κόμβων.

- *Επεκτασιμότητα (scalability).*

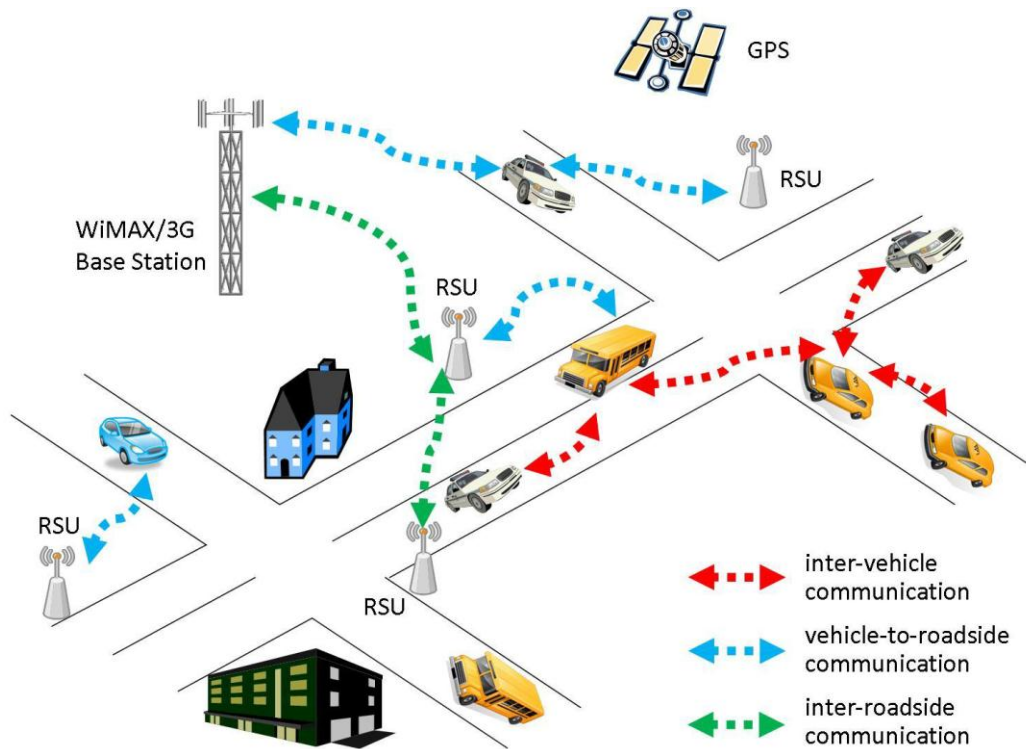
Πολλές εφαρμογές των MANET όπως για παράδειγμα τα δίκτυα αισθητήρων περιλαμβάνουν αυξημένο αριθμό κόμβων οπότε οι μηχανισμοί επεκτασιμότητας έχουν πρωταρχική σημασία.

- *Περιορισμένη ασφάλεια.*

Τα κινητά ασύρματα δίκτυα είναι γενικά πιο ευάλωτα σε σχέση με τα ενσύρματα σε επιθέσεις όπως υποκλοπές μηνυμάτων (eavesdropping), αλλοίωση ή διαγραφή της ανταλλασσόμενης πληροφορίας και επιθέσεις άρνησης υπηρεσίας (denial of service attacks). Επιπλέον η έλλειψη σταθερής υποδομής καθιστά τις κλασικές μεθόδους ασφαλείας βασισμένες στις αρχές πιστοποίησης και στους on line εξυπηρετητές μη εφαρμόσιμες.

### **1.2.2 Εφαρμογή των MANETs σε οχήματα (VANETs)**

Τα αδόμητα δίκτυα οχημάτων (Vehicular Ad-hoc NETWORKS-VANETs) είναι μια εφαρμογή των ασύρματων Ad Hoc δικτύων σε κινούμενα οχήματα. Είναι μια πολλά υποσχόμενη κατηγορία δικτύων με στόχο την βελτίωση της οδικής ασφάλειας και απόδοσης, και αρκετών ακόμη εφαρμογών στις οδικές επικοινωνίες. Τα κινούμενα οχήματα θεωρούνται ως κόμβοι ή ασύρματοι δρομολογητές (router) και επικοινωνούν με ακτίνα κάλυψης περίπου 100 με 300 μέτρα. Τα δίκτυα αυτά προσφέρουν άμεση επικοινωνία μεταξύ οχημάτων και κάποιων σταθερών μονάδων (roadside units-RSUs) αλλά και μεταξύ οχημάτων χωρίς την παρέμβαση του οδηγού. Τα VANETs μπορούν να στείλουν και να λάβουν σήματα προειδοποιήσεων κινδύνου και πληροφορίες που αφορούν την τρέχουσα κατάσταση κυκλοφορίας στους δρόμους με ελάχιστο σφάλμα. Τα RSUs, είναι δυνατόν να βρίσκονται σε διάφορα τμήματα του δρόμου όπως για παράδειγμα σε κάθε φωτεινό σηματοδότη, πινακίδες STOP ή διασταυρώσεις (σχήμα και είναι πολύ βασικά για τη λειτουργία ενός δικτύου VANET, καθώς συνδέονται με το δίκτυο κορμού (backbone network). Ένα τυπικό παράδειγμα δικτύου VANET φαίνεται παραπάνω στο σχήμα 1.6.



Σχήμα 1.6 -VANET

Οι εφαρμογές των VANETs είναι πολλές και αναφέρονται λεπτομερώς στο [6]. Αφορούν τις παρακάτω βασικές κατηγορίες:

- *Ασφάλεια οδήγησης.*

Αποτελεί ίσως την πιο σημαντική κατηγορία. Ο βασικός στόχος είναι να καταστεί η οδήγηση πιο ασφαλής μέσω της δυνατότητας επικοινωνίας. Ανάλογα με την κατάσταση το δίκτυο αναλαμβάνει να προειδοποιεί και να εκτελεί υπηρεσίες έκτακτης ανάγκης. Έτσι, για καταστάσεις όπως επικίνδυνα οδικά χαρακτηριστικά, ανώμαλες συνθήκες κυκλοφορίας και δρόμου, καταστάσεις συγκρούσεων και ατυχημάτων, τα δίκτυα αυτά είναι δυνατόν να βελτιώσουν αρκετά την ασφάλεια.

- *Δημόσιες Υπηρεσίες.*

Τα δίκτυα αυτά προορίζονται επίσης ως μονάδες βοήθειας του έργου της αστυνομίας ή των υπηρεσιών έκτακτης ανάγκης.

- *Βελτίωση οδήγησης.*

Αυτή είναι δυνατή με διάφορους τρόπους. Για παράδειγμα βοήθεια στον οδηγό για στροφές και εισόδους σε λωρίδες κατά την οδήγηση, αύξηση της αποδοτικότητας κυκλοφορίας, που μπορεί να γίνει με ευφυή έλεγχο της κυκλοφοριακής κίνησης, βοήθεια στην πλοήγηση, λήψη και ενημέρωση χαρτών, κλπ.

- *Επιχειρήσεις, Ψυχαγωγία.*

Εδώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν VANETs για καταστάσεις όπως συντήρηση οχήματος (π.χ ασύρματη λήψη διαγνωστικών στοιχείων), κινητές υπηρεσίες (π.χ υπηρεσίες διαδικτύου), λύσεις για επιχειρήσεις (π.χ ταχεία διαχείριση), πληρωμή μέσω διαδικτύου (π.χ πληρωμή διοδίων).

Βασικός στόχος κατά τη σχεδίαση δικτύων VANET είναι η αντοχή σε κακόβουλες επιθέσεις πάνω στο σύστημα [7]. Μέχρι πρόσφατα πολύ μικρή σημασία είχε δοθεί σε ζητήματα ασφάλειας και ιδιωτικότητας σε συστήματα VANET. Η ασφάλεια όμως αποτελεί ένα από τα πιο σημαντικά θέματα όσο αφορά την υιοθέτηση και επιτυχία των δικτύων αυτών. Οποιαδήποτε κακόβουλη συμπεριφορά χρηστών θα μπορούσε να αποβεί καταστροφική για τους άλλους χρήστες. Επίσης, είναι βασικό οποιαδήποτε δεδομένα σχετικά με την ταυτότητα, ταχύτητα ή θέση του χρήστη να παραμένουν κρυφά προς το δίκτυο. Ωστόσο, τα ίδια χαρακτηριστικά θα πρέπει να γίνονται γνωστά στις αρχές για παράδειγμα σε περιπτώσεις που κάποιος χρήστης μπορεί να εμπλέκεται σε κάποια σκηνή ατυχήματος ή ληστείας οπότε είναι δυνατόν να βρεθούν μάρτυρες μέσω του συστήματος. Για την επικοινωνία σε VANETs έχει πρόσφατα αναπτυχθεί το πρωτόκολλο 802.11p που αποτελεί προέκταση του απλού 802.11. Οι εθνικές κυβερνήσεις για τη λειτουργία του συστήματος δίνουν συχνότητα φέροντος τα 5.8/5.9GHz και στην Ιαπωνία τα 700MHz [8].

### ***1.3 Δίκτυα αισθητήρων - Sensor Networks***

Τα δίκτυα αισθητήρων μπορούν να θεωρηθούν ως μια ειδική κατηγορία ad-hoc δικτύων. Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από ένα μεγάλο αριθμό κόμβων-αισθητήρων που συλλέγουν πληροφορίες για την κατάσταση του δικτύου και συνεργάζονται μεταξύ τους. Το χαμηλό κόστος είναι το κύριο χαρακτηριστικό τους. Επίσης, χρησιμοποιούν χαμηλή ισχύ ενώ οι κόμβοι είναι μικροί σε μέγεθος και επικοινωνούν

μεταξύ τους σε μικρές αποστάσεις. Τα δίκτυα αυτά αυτοοργανώνονται (self-organized), ενώ οι κόμβοι συνεργάζονται χρησιμοποιώντας έναν επεξεργαστή.

Κάποια βασικοί παράγοντες πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τους μηχανικούς τηλεπικοινωνιών, καθώς χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό πρωτοκόλλων και αλγορίθμων για δίκτυα αισθητήρων.

Μερικοί από αυτούς είναι:

- *Ανοχή σε σφάλματα (fault tolerance).*

Κάποιοι κόμβοι του δικτύου είναι πιθανό να αποτύχουν ή να μπλοκαριστούν λόγω χαμηλής ισχύος ή να υποστούν φυσική ζημιά ή παρεμβολή από το περιβάλλον. Η αποτυχία μεμονωμένων κόμβων δεν πρέπει να επηρεάζει το συνολικό δίκτυο.

- *Επεκτασιμότητα (scalability).*

Εκατοντάδες ή και χιλιάδες κόμβοι μπορούν να συμμετέχουν σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Ανάλογα με την εφαρμογή ο αριθμός μπορεί να γίνει αρκετά μεγάλος.

- *Κόστος παραγωγής (production costs).*

Λόγω του αυξημένου αριθμού των αισθητήρων το κόστος παραγωγής κάθε αισθητήρα είναι πρωταρχικής σημασίας στον υπολογισμό του συνολικού κόστους παραγωγής του δικτύου. Έτσι, το κόστος του κάθε αισθητήρα πρέπει να διατηρείται χαμηλό.

- *Εξοπλισμός υλικού (hardware).*

Κάθε κόμβος αποτελείται από μια μονάδα sensing unit μια μονάδα επεξεργασίας, έναν πομποδέκτη και μια μονάδα ισχύος (μπαταρία). Μπορούν επίσης να έχουν και κάποια πρόσθετα τμήματα όπως σύστημα εντοπισμού θέσης (location finding system) και γεννήτρια ισχύος (power generator)

- *Τοπολογία δικτύου (network topology).*

Η πυκνότητα των κόμβων μπορεί να φτάσει του 20 κόμβους ανά κυβικό μέτρο. Η παράταξη ενός μεγάλου αριθμού κόμβων σε περιορισμένο χώρο απαιτεί προσεκτικό χειρισμό.

- *Περιβάλλον (environment).*

Το περιβάλλον εφαρμογής των δικτύων αυτών ποικίλει. Μπορεί να είναι το εσωτερικό μιας μεγάλης μηχανής, ο βυθός της θάλασσας, ένα βιολογικό ή χημικό μολυσμένο πεδίο ή ακόμη και πεδίο μάχης μεταξύ εχθρικών δυνάμεων.

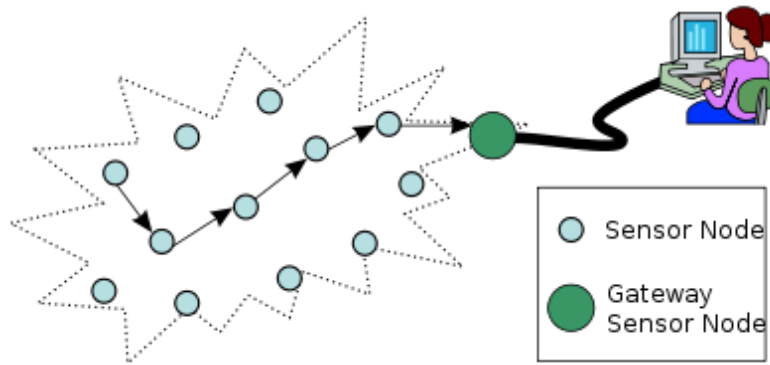
- *Κατανάλωση ενέργειας (power consumption).*

Ως μικροηλεκτρονική συσκευή ο κόμβος μπορεί να εξοπλιστεί με περιορισμένων δυνατοτήτων πηγή ισχύος. Σε κάποιες περιπτώσεις είναι δυνατή η αντικατάσταση μπαταριών. Ωστόσο, η διάρκεια ζωής ενός κόμβου ενός δικτύου αισθητήρα έχει μεγάλη εξάρτηση από τη διάρκεια ζωής της μπαταρίας του.

Οι εξαιρετικά μικρές φυσικές διαστάσεις των αισθητήρων σε συνδυασμό με το χαμηλό κόστος λόγω μαζικής παράγωγής τους καθιστούν κατάλληλους για πολλές εφαρμογές [9]. Μερικές από αυτές είναι εφαρμογές στο χώρο της υγείας, στρατιωτικές εφαρμογές, οικιακές εφαρμογές. Για στρατιωτικές εφαρμογές για παράδειγμα λόγω των χαρακτηριστικών τους για γρήγορη ανάπτυξη, της ανοχής σε σφάλματα και δυνατότητες αυτοοργάνωσης, χρησιμοποιούνται για εντολή, έλεγχο, επικοινωνία, υπολογισμούς, ευφυία, παρακολούθηση, αναγνώριση και συστήματα στόχευσης. Στο χώρο της υγείας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για παρακολούθηση ασθενών ή βοήθεια διαφόρων ασθενών.

Τυπικό παράδειγμα ενός δικτύου αισθητήρα φαίνεται στο σχήμα 1.7.





Σχήμα 1.7-Δίκτυο αισθητήρων-Sensor Network.

#### **1.4 Δίκτυα Ασύρματου Πλέγματος (Wireless Mesh Networks)**

Μια άλλη κατηγορία δικτύων που παρουσιάζει έντονο ενδιαφέρον είναι τα δίκτυα ασύρματου πλέγματος (WMN). Τα χαρακτηριστικά τους καθώς και κάποια χαρακτηριστικά που ισχύουν για όλα τα ad-hoc δίκτυα παρουσιάζονται αναλυτικά στο [10].

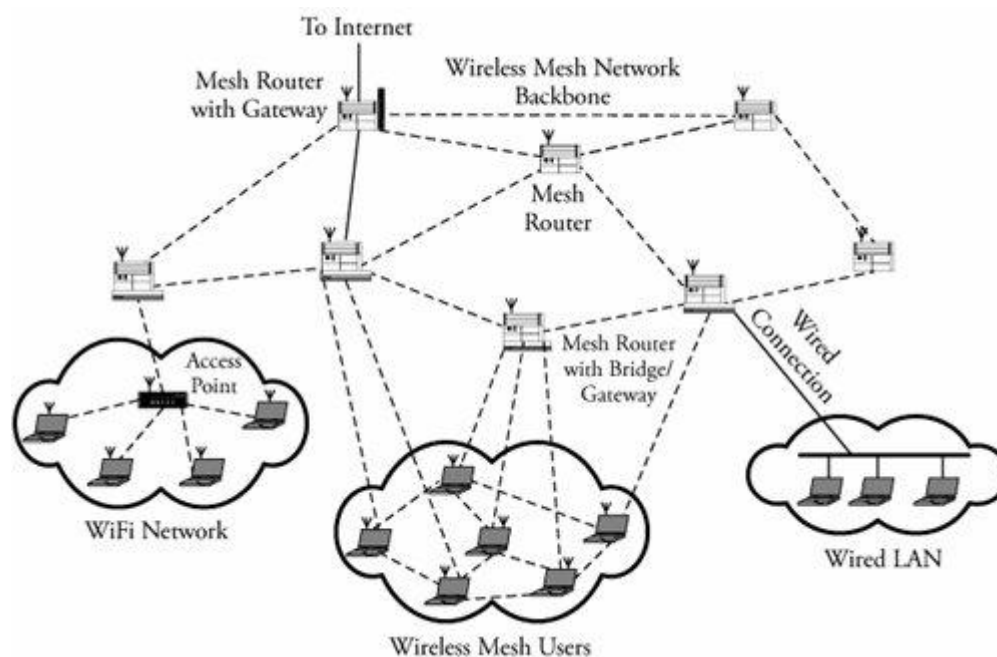
Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από κάποιους κόμβους-δρομολογητές τους δρομολογητές πλέγματος (mesh routers) και κάποιους κόμβους-πελάτες τους πελάτες πλέγματος (mesh clients), όπου οι δρομολογητές έχουν ελάχιστη κινητικότητα και αποτελούν τον κορμό του δικτύου. Βασικό χαρακτηριστικό των δικτύων αυτών είναι η δυνατότητα ενσωμάτωσης τους σε άλλα δίκτυα όπως internet, κυψελωτής τηλεφωνίας, IEEE 802.11, IEEE 802.15, IEEE 802.16, δίκτυα αισθητήρων κτλ. Μέσω των δυνατοτήτων των mesh δρομολογητών για gateway και bridging λειτουργίες.

Τα δίκτυα αυτά χρησιμοποιούνται για να λύσουν τους περιορισμούς και να βελτιώσουν αξιοσημείωτα την επίδοση των κλασικών Ad Hoc δικτύων, καθώς και άλλων δικτύων. Σε αυτά κάθε κόμβος λειτουργεί ως host αλλά και ως δρομολογητής προωθώντας πακέτα μέσω άλλων κόμβων που μπορεί να μην είναι σε απόσταση μέσα στην ακτίνα κάλυψης των αποστολέων τους. Σαν δίκτυα έχουν δυνατότητες αυτοοργάνωσης με τους κόμβους στο δίκτυο να καθορίζουν και να διατηρούν αυτόματα την συνδεσιμότητα μεταξύ τους.

Αυτό το χαρακτηριστικό δίνει στα δίκτυα αυτά πλεονεκτήματα όπως,

- χαμηλό κόστος
- εύκολη συντήρηση του δικτύου
- ευρωστέια
- αξιόπιστη κάλυψη υπηρεσίας

Συνηθισμένοι κόμβοι (desktop, laptop, PDA, κινητά) που έχουν ενσωματωμένη την ασύρματη κάρτα δικτύου (NIC) μπορούν να συνδέονται απευθείας με τον mesh δρομολογητή. Αν δεν υπάρχει αυτή η δυνατότητα μπορεί να υπάρχει σύνδεση μέσω ethernet σύνδεσης με τον δρομολογητή. Έτσι, τα WMN θα βοηθήσουν τους χρήστες να είναι πάντα και παντού online. Με τη δυνατότητα που έχουν για αυτο-οργάνωση τα δίκτυα αυτά μπορούν να αναπτυχθούν κόμβοι. Όσο αυξάνονται οι κόμβοι η αξιοπιστία και η συνδεσιμότητα των χρηστών αυξάνεται ανάλογα. Ένα παράδειγμα WMN δικτύου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1.8.



Σχήμα 1.8-Wireless Mesh Network

Τα mesh routers περιλαμβάνουν επιπλέον δυνατότητες σε σχέση με τα συμβατικά router ώστε να είναι δυνατή η υποστήριξη του mesh δικτύου. Για να βελτιωθεί η ευελιξία του mesh δικτύου ο δρομολογητής οπλίζεται με πολλές ασύρματες διεπαφές (wireless interfaces). Σε σχέση με τα συμβατικά router μπορεί να επιτευχθεί η ίδια κάλυψη με πολύ μικρότερη ισχύ μετάδοσης μέσω συνδέσεων πολλαπλών αλμάτων.

Οι mesh πελάτες έχουν επίσης τη δυνατότητα για mesh δικτύωση και άρα λειτουργούν και αυτά ως δρομολογητές. Ωστόσο, δεν έχουν δυνατότητες για bridge και gateway λειτουργίες. Επίσης, έχουν συνήθως μόνο μια ασύρματη διεπαφή. Έτσι το υλικό των κόμβων-πελατών είναι αρκετά απλούστερο.

Ορισμένα από τα χαρακτηριστικά των δικτύων αυτών φαίνονται παρακάτω:

- *ασύρματο δίκτυο πολλαπλών αλμάτων(multi-hop)*

Ένας στόχος της ανάπτυξης των WMN είναι η προέκταση της ακτίνας κάλυψης των τωρινών ασύρματων δικτύων χωρίς να θυσιαστεί η χωρητικότητα του καναλιού. Ένας άλλος στόχος είναι να υπάρχει συνδεσιμότητα ακόμη και σε περιπτώσεις χωρίς οπτική επαφή ανάμεσα στους χρήστες. Για να γίνει αυτό είναι απαραίτητη η χρήση multi-hop που οδηγεί σε μεγαλύτερο throughput ,χαμηλότερη παρεμβολή μεταξύ κόμβων και αποδοτικότερη επαναχρησιμοποίηση συχνότητας.

- *Υποστήριξη για Ad Hoc δικτύωση και ικανότητα αυτο-οργάνωσης,αυτο-ίασης.*

Τα WMN ενισχύουν την απόδοση του δικτύου εξαιτίας της ελαστικής αρχιτεκτονικής του δικτύου,εύκολης ανάπτυξης και εγκατάστασης,ανοχής σε σφάλματα και συνδεσιμότητας mesh.

- *Κινητικότητα.*

Η κινητικότητα εξαρτάται από τον τύπο των mesh κόμβων. Τα mesh routers συνήθως έχουν ελάχιστη κινητικότητα, ενώ οι mesh πελάτες μπορεί να είναι στατικοί ή κινούμενοι κόμβοι.

- *Πολλαπλοί τύποι πρόσβασης στο δίκτυο.*

Στα WMN υποστηρίζεται η πρόσβαση στο internet αλλά και η επικοινωνία peer-to-peer (P2P) μεταξύ ομοτίμων. Επιπρόσθετα μέσω των Mesh router που συνδέονται με άλλα δίκτυα είναι δυνατή η πρόσβαση σε υπηρεσίες που ανήκουν σε κάποιο άλλο δίκτυο.

- *Εξάρτηση της ενεργειακής κατανάλωσης ανάλογα με τον τύπο του κόμβου.*

Τα mesh router συνήθως δεν απαιτούν κάποιο περιορισμό όσο αφορά την ενεργειακή κατανάλωση τους. Αντίθετα για τους πελάτες μπορεί να απαιτείται κάποιο ενεργειακά αποδοτικό πρωτόκολλο.

- *Συμβατότητα και συνεργασία με υπαρκτά ασύρματα δίκτυα.*

Το χτίσιμο του WMN για παράδειγμα βασίζεται στις τεχνολογίες IEEE 802.11 και πρέπει να είναι συμβατό και με τους χρήστες WiFi. Επίσης, το WMN θα πρέπει να μπορεί να συνεργάζεται και με δίκτυα όπως το WiMAX, Zigbee αλλά και κυψελωτά δίκτυα.

Τα δίκτυα WMN είναι μια πολλά υποσχόμενη τεχνική με πολλές εφαρμογές όπως

- *Ευρυζωνική οικιακή δικτύωση (broadband home networking).*

Προς το παρόν η ευρυζωνική δικτύωση στο σπίτι πραγματοποιείται μέσω ασύρματων τοπικών δικτύων IEEE 802.11 WLAN. Ένα προφανές πρόβλημα είναι η θέση του σημείου πρόσβασης. Συνήθως σε κάθε σπίτι υπάρχουν σημεία που δεν υπάρχει κάλυψη. Αυτό μπορεί να επιλυθεί με τη χρήση mesh router, όπου τα σημεία πρόσβασης θα αντικατασταθούν από mesh router και θα υπάρχει συνδεσιμότητα μεταξύ τους. Έτσι η επικοινωνία μεταξύ αυτών των κόμβων γίνεται πιο ελαστική και εύρωστη σε σφάλματα του δικτύου και αποτυχίες ζεύξεων.

- *Δικτύωση γειτονιάς και συνοικίας (community and neighborhood networking).*

Προς το παρόν η κοινή αρχιτεκτονική για πρόσβαση στο δίκτυο είναι βασισμένη σε καλώδιο ή DSL σύνδεση στο ίντερνετ και ο τελευταίος κόμβος (last hop) είναι ασύρματος και συνδέεται με ένα ασύρματο router ή με καλώδιο με ένα DSL modem. Αυτός ο τύπος πρόσβασης έχει κάποια μειονεκτήματα. Ακόμη και αν η πληροφορία στέλνεται μεταξύ κόμβων σε μια γειτονιά ή συνοικία όλη η κίνηση πρέπει να μπει στο ίντερνετ. Αυτό οδηγεί σε σπατάλη πόρων του δικτύου. Επίσης, μεγάλο ποσοστό περιοχών ανάμεσα σε σπίτια δεν καλύπτεται. Μόνο ένα απλό μονοπάτι είναι διαθέσιμο για κάποιο σπίτι για να έχει πρόσβαση στο ίντερνετ. Τα WMN αμβλύνουν τα παραπάνω μειονεκτήματα μέσω των ελαστικών συνδέσεων μεταξύ σπιτιών. Μπορούν

επίσης να περιλαμβάνουν εφαρμογές όπως διαμοιρασμός αποθηκευμένων αρχείων, πρόσβαση σε αρχεία και video streaming.

- *Δίκτυα επιχειρήσεων (enterprise networking).*

Αυτό μπορεί να εφαρμοστεί ως μικρό δίκτυο μέσα σ' ένα γραφείο ή ένα μεσαίου μεγέθους δίκτυο για όλα τα γραφεία ή ακόμη και ένα μεγάλο δίκτυο ανάμεσα σε γραφεία από πολλαπλά κτίρια. Προς το παρόν τα IEEE 802.11 δίκτυα χρησιμοποιούνται στα γραφεία. Ωστόσο, αυτά τα δίκτυα είναι αρκετά απομονωμένα. Συνδέσεις μεταξύ τέτοιων δικτύων απαιτούν καλωδιωμένες ethernet συνδέσεις, που είναι και ο κύριος λόγος της αύξησης του κόστους των δικτύων αυτών. Αν τα σημεία πρόσβασης αντικατασταθούν από mesh router τα καλώδια ethernet θα εξαφανιστούν. Τα WMN για δικτύωση επιχειρήσεων είναι πολύ πιο πολύπλοκα από αυτά που χρησιμοποιούνται για το σπίτι λόγω του αυξημένου αριθμού των κόμβων και της πιο σύνθετης τοπολογίας του δικτύου.

- *Μητροπολιτικά δίκτυα (metropolitan area networks).*

Το WMN έχει πολλά πλεονεκτήματα σε αυτή την περίπτωση. Ο ρυθμός μετάδοσης ενός κόμβου είναι πολύ υψηλότερος συγκριτικά με ένα κυψελωτό σύστημα. Για παράδειγμα σε ένα IEEE 802.11g ο κόμβος μπορεί να μεταδίδει με ρυθμό 54Mbps. Επίσης η επικοινωνία μεταξύ των κόμβων στο WMN δεν βασίζεται σε καλωδιωμένο δίκτυο. Έτσι συγκριτικά το WMN είναι πολύ πιο οικονομικό ιδιαίτερα σε υποανάπτυκτες περιοχές.

- *Μέσα μεταφοράς (transportation systems).*

Η πρόσβαση θα είναι δυνατή μέσα σε μέσα μεταφοράς όπως λεωφορεία, τρένα ή πλοία. Έτσι παρέχονται βολικές υπηρεσίες πληροφοριών, επικοινωνία οδηγών κτλ.

- *Αυτοματισμός σε κτίρια (building automation).*

Σε ένα κτίριο υπάρχουν διάφορες ηλεκτρικές συσκευές που πρέπει να ελεγχθούν ή να παρακολουθούνται. Προς το παρόν για το σκοπό αυτό

χρησιμοποιούνται ενσύρματα υψηλού κόστους δίκτυα. Τα WMN θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν και σε αυτού του είδους δίκτυα με αρκετά χαμηλότερο κόστος και ευκολότερη υλοποίηση.

- *Συστήματα ασφαλείας για παρακολούθηση (security surveillance).*

Αυτά τα συστήματα είναι αναγκαία για κτίρια επιχειρήσεων, καταστήματα κτλ. Τα WMN δίκτυα είναι μια πιο εφικτή λύση από άλλα καλωδιωμένα συστήματα, επειδή για αυτή την εφαρμογή τα δεδομένα που μεταφέρονται αφορούν κυρίως εικόνες και βίντεο η χωρητικότητα του δικτύου θα πρέπει να είναι υψηλή.

Κατά το σχεδιασμό ενός δικτύου WMN αλλά και κάθε δικτύου Ad Hoc πρέπει να ληφθούν υπόψη κάποιοι βασικοί παράγοντες. Μερικοί από αυτούς είναι:

- *Τεχνικές ραδιομετάδοσης:* Λόγω της ραγδαίας ανάπτυξης στο χώρο των ημιαγωγών οι RF τεχνολογίες, η θεωρία επικοινωνιών και οι ασύρματοι δέκτες έχουν αναπτυχθεί σημαντικά. Για την αύξηση της χωρητικότητας και της ελαστικότητας του δικτύου έχουν χρησιμοποιηθεί κατευθυντικές και έξυπνες κεραιές, καθώς και MIMO συστήματα. Για να βελτιωθεί περαιτέρω η επίδοση του συστήματος απαιτούνται πιο προχωρήμενες τεχνολογίες δέκτη.
- *Επεκτασιμότητα:* Είναι γνωστό ότι για επικοινωνία πολλαπλών αλμάτων τα πρωτόκολλα επικοινωνιών υποφέρουν από θέματα επεκτασιμότητας, για παράδειγμα όταν το μέγεθος του δικτύου μεγαλώνει η επίδοση του δικτύου επιδεινώνεται σημαντικά. Πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορεί να μην είναι ικανά να εντοπίσουν ένα αξιόπιστο μονοπάτι, πρωτόκολλα μεταφοράς μπορεί να χάσουν συνδέσεις και mac πρωτόκολλα μπορεί να βιώσουν σημαντική μείωση του ρυθμού μετάδοσης. Ως τυπικό παράδειγμα το IEEE 802.11 MAC πρωτόκολλο δεν μπορεί να επιτύχει καλό ρυθμό μετάδοσης όταν ο αριθμός των αλμάτων φτάνει στο 4. Ο λόγος για χαμηλή επεκτασιμότητα είναι ότι η απ' άκρη-σε άκρη αξιοπιστία μειώνεται καθώς αυξάνεται το μέγεθος του δικτύου.
- *Συνδεσιμότητα mesh:* Είναι πολύ βασική προϋπόθεση κατά το σχεδιασμό των πρωτοκόλλων ειδικά για τα πρωτόκολλα δρομολόγησης και τα MAC

πρωτόκολλα. Κατάλληλα πρωτόκολλα μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την επίδοση των WMN.

- *Ευρυζωνικότητα και ποιότητα υπηρεσίας*: Ειδικά στα δίκτυα WMN που εφαρμόζονται κυρίως για ευρυζωνικές υπηρεσίες εκτός από την από άκρη σε άκρη καθυστέρηση μετάδοσης και δικαιοσύνη χρειάζονται κ άλλα μέτρα επίδοσης όπως ρυθμός μετάδοσης ανά κόμβο λόγος χαμένων πακέτων κτλ. στη σχεδίαση των πρωτοκόλλων.
- *Συμβατότητα και συνεργατικότητα*: Τα δίκτυα αυτά θα πρέπει να είναι συμβατά με παραδοσιακούς αλλά και mesh πελάτες, αλλιώς θα μειωθεί αρκετά το κίνητρο της ανάπτυξης τους. Η συνεργασία τους με άλλα δίκτυα θα γίνει μέσω των mesh router.
- *Ασφάλεια*: Χωρίς μια αξιόπιστη λύση στο θέμα της ασφάλειας τα δίκτυα αυτά είναι καταδικασμένα να αποτύχουν. Οι χρήστες απαιτούν προφανώς αξιόπιστες υπηρεσίες. Πολλά σχήματα ασφαλείας που χρησιμοποιούνται σε άλλα ασύρματα δίκτυα δεν είναι κατάλληλα για mesh δίκτυα. Πρέπει να χρησιμοποιηθούν νέα σχήματα ασφαλείας σε αλγόριθμους κρυπτογράφησης και μοιρασμένα κλειδιά ασφαλείας, ασφαλές πρωτόκολλα MAC και δρομολόγησης, εντοπισμός επιθέσεων και παρακολούθηση ασφαλείας.
- *Ευκολία χρήσης*: Τα πρωτόκολλα πρέπει να σχεδιάζονται ώστε να επιτρέπουν στο δίκτυο να είναι όσο περισσότερο αυτόνομο γίνεται, όσο αφορά θέματα αυτο-οργάνωσης, ελέγχου της δυναμικής τοπολογίας, ευρωστεία στην αποτυχία ζεύξεων και γρήγορες διαδικασίες συνδρομής και επαλήθευσης αυθεντικότητας.

### **1.5 Χωρητικότητα Ad Hoc δικτύων**

Στις ασύρματες επικοινωνίες η χωρητικότητα του δικτύου είναι άμεσα εξαρτώμενη από την αναμενόμενη τιμή του λόγου  $C/I$ . Όπου  $C/I$  είναι ο λόγος μεταξύ της μέσης τιμής της ισχύος του επιθυμητού σήματος και τις μέσης τιμής της ισχύος λόγω παρεμβολών. Για σωστή λήψη των ραδιοσημάτων ο λόγος αυτός θα πρέπει να ξεπερνά ένα συγκεκριμένο κατώφλι. Αν ξέρουμε το λόγο  $C/I$  μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το τύπο του Shannon για να βρούμε ένα άνω όριο για την

ταχύτητα μετάδοσης αξιόπιστων δεδομένων ανάμεσα σε δύο κόμβους στο ραδιοκανάλι

$$W = B \log_2 \left( 1 + \frac{C}{I} \right) \quad (1.1)$$

όπου το  $B$  είναι το εύρος ζώνης του καναλιού σε Hz και ο λόγος  $C/I$  είναι η αναμενόμενη τιμή του λόγου. Το  $W$  είναι σε bits ανά second και υποδεικνύει το άνω όριο για την ταχύτητα μετάδοσης πάνω στο ραδιοκανάλι. Με άλλα λόγια  $W$  είναι η μέγιστη χωρητικότητα του ασύρματου καναλιού. Με τη μείωση του λόγου  $C/I$  μειώνεται και η χωρητικότητα της ζεύξης μεταξύ δύο κόμβων. Στα Ad Hoc δίκτυα το MAC πρωτόκολλο προσθέτει έναν ακόμη περιορισμό στη χωρητικότητα. Κάθε φορά που πραγματοποιείται μια ζεύξη μεταξύ δύο κόμβων σε μια μερίδα άλλων κόμβων στο δίκτυο απαγορεύεται η ταυτόχρονη μετάδοση, επειδή όλοι οι κόμβοι μοιράζονται το ίδιο μέσο μετάδοσης. Κάτω από δίκαιες συνθήκες η χωρητικότητα του καναλιού διαιρείται σε ίσα μέρη με όλους τους κόμβους να διεκδικούν πρόσβαση στο μέσο. Το κλάσμα των κόμβων που έχουν πρόσβαση στο μέσο σε κάθε χρονικό διάστημα μπορεί να ληφθεί υπόψη μέσω του λόγου  $\nu/\rho$ , όπου  $\rho$  είναι η πυκνότητα των κόμβων και  $\nu$  η πυκνότητα των κόμβων που παρεμβάλλουν. Σε Ad Hoc δίκτυα πρέπει να πολλαπλασιάσουμε την χωρητικότητα Shannon με το λόγο  $\nu/\rho$  ώστε να προκύψει ο μέγιστος ρυθμός εξόδου των bit.  $R_{out, max}$  ανά κόμβο

$$R_{out, max} = \frac{\nu}{\rho} W = \frac{\nu}{\rho} B \log_2 \left( 1 + \frac{C}{I} \right) \quad (1.2)$$

Επίσης, σύμφωνα με την ανάλυση που πραγματοποιείται στον [5] ισχύει:

$$R_{in, max} = \frac{\nu}{\rho} \frac{t_d}{t_{ds}} \frac{W}{E[h]} \quad (1.3)$$

όπου  $R_{in, max}$  είναι ο μέγιστος ρυθμός εισόδου των bit,  $t_d$  είναι ο χρόνος για τη μετάδοση χρησίμων δεδομένων μέσα σε κάθε time slot,  $t_{ds}$  είναι ο χρόνος κάθε time slot και  $E[h]$  είναι η μέση τιμή του αριθμού των αλμάτων (hops). Βλέπουμε λοιπόν



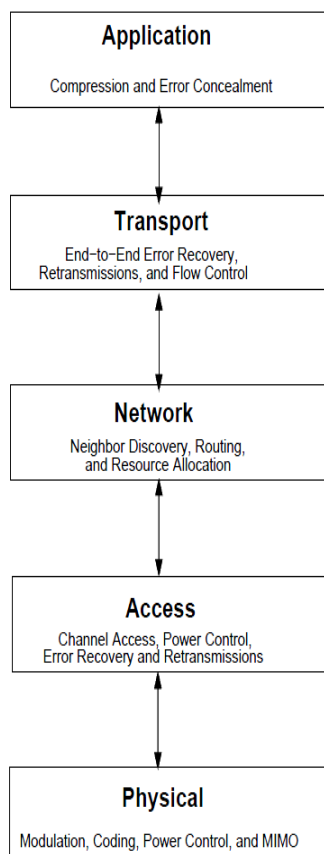
ότι η χωρητικότητα ανά χρήστη είναι αντιστρόφως ανάλογη με τον μέσο αριθμό των αλμάτων.

Από αναλυτικά αποτελέσματα έχειδειχθεί επίσης ότι η χωρητικότητα ανά κόμβο μειώνεται σημαντικά όταν η πυκνότητα των κόμβων αυξάνεται. Έτσι ένας τρόπος για να αυξηθεί η χωρητικότητα Ad Hoc δικτύων είναι κάθε κόμβος να επικοινωνεί μόνο με γειτονικούς κόμβους.

Για να αυξηθεί η χωρητικότητα έχουν εφευρεθεί διάφορες τεχνικές. Για παράδειγμα η πολλαπλή προσπέλαση συχνότητας (OFDM) έχει αυξήσει σημαντικά την ταχύτητα του IEEE 802.11 από 11Mbps σε 54 Mbps. Επίσης, μέσω UWB τεχνικών μπορεί να αναπτυχθεί ακόμα μεγαλύτερος ρυθμός μετάδοσης παρόλο που οι τεχνικές αυτές εφαρμόζονται μόνο σε μικρής ακτίνας δίκτυα (πχ WPANs).

## ***1.6 Στοιβά πρωτοκόλλων***

Σε αυτό το σημείο περιγράφουμε τη στοιβά πρωτοκόλλων όπως εφαρμόζεται σε Ad Hoc δίκτυα καθώς και λειτουργίες κάθε επιπέδου ξεχωριστά. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται συνοπτικά οι βασικές λειτουργίες κάθε επιπέδου εάν χρησιμοποιήσουμε το μοντέλο OSI (Open System Interconnection).



Σχήμα 1.9-Στοιβή Πρωτοκόλλων

### 1.6.1 Φυσικό επίπεδο (*physical layer*)

Το φυσικό επίπεδο κυρίως ασχολείται με τη μεταφορά των bit των δεδομένων πάνω από μια ζεύξη σημείο προς σημείο. Είναι υπεύθυνο για επιλογή συχνότητας, παραγωγή συχνότητας φέροντος, εντοπισμό σήματος, διαμόρφωση και κωδικοποίηση δεδομένων καθώς και έλεγχο ισχύος.

Στα περισσότερα ασύρματα Ad Hoc δίκτυα τα bit πακετάρονται για τη μεταφορά. Οι σχεδιαστικές επιλογές στο φυσικό επίπεδο μαζί με τις συνθήκες παρεμβολής και καναλιού καθορίζουν τον ρυθμό απώλειας πακέτων PER (packet error rate). Πολλά πρωτόκολλα του επιπέδου ζεύξης (access layer) ξαναστέλνουν πακέτα που λαμβάνονται με σφάλμα και έτσι το PER που βασίζεται στο σχεδιασμό του φυσικού επιπέδου επηρεάζει τις συνθήκες επαναμετάδοσης στο επίπεδο ζεύξης.

Επίσης, πολλαπλές κεραιές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να αυξήσουν το ρυθμό δεδομένων στη ζεύξη, να παρέχουν διαφορετική προστασία ώστε να μειωθεί το

μέσο BER ή να παρέχουν κατευθυντικότητα για να μειώσουν τις διαλείψεις και τις παρεμβολές που ένα σήμα προκαλεί σε άλλα σήματα. Το κέρδος της διαφορικότητας (diversity) θα μειώσει το PER που οδηγεί σε λιγότερες επαναμεταδόσεις. Η πολυπλεξία θα αυξήσει το link rate, γεγονός που μειώνει τη συμφόρηση και την καθυστέρηση στη ζεύξη και πριμοδοτεί όλους τους δρόμους πολλαπλών αλμάτων που χρησιμοποιούν τη ζεύξη αυτή. Η κατευθυντικότητα μειώνει την παρεμβολή σε άλλες ζεύξεις και έτσι βελτιώνει την απόδοσή τους.

Έτσι, η χρήση πολλαπλών κεραιών σε Ad Hoc ασύρματα δίκτυα δεν αφορά μόνο το φυσικό επίπεδο και επιδρά και στα ανώτερα επίπεδα. Η ισχύς εκπομπής ενός κόμβου στο φυσικό επίπεδο έχει επίσης σημαντική επίδραση σε πολλά επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων. Αυξάνοντας την ισχύ εκπομπής μειώνεται ο PER και έτσι επηρεάζονται οι επαναμεταδόσεις που χρειάζονται στο επίπεδο ζεύξης. Πράγματι, κάθε ζευγάρι κόμβων στο δίκτυο μπορεί να επικοινωνεί απευθείας αν υπάρχει ικανοποιητική ισχύς εκπομπής και έτσι αυξάνεται η συνδεσιμότητα του δικτύου. Ωστόσο, μια υψηλή ισχύς εκπομπής ενός κόμβου μπορεί να προκαλέσει αξιοσημείωτη παρεμβολή σε άλλους κόμβους.

Είναι προφανές ότι η ισχύς εκπομπής που επιδρά στο σηματοθορυβικό λόγο ορίζει τη γειτονιά κάθε κόμβου ως οι κόμβοι που μπορεί να συνδεθούν με ένα μόνο άλμα (single hop). Με αυτό τον τρόπο επηρεάζει το πλαίσιο στο οποίο θα κινηθούν τα πρωτόκολλα όλων των ανώτερων επιπέδων. Έτσι η ισχύς εκπομπής όλων των κόμβων θα πρέπει να καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη την επίδραση της σε όλα τα επίπεδα του OSI που αφορά.

Ειδικά για τα δίκτυα αισθητήρων τα 915 MHz προτείνονται ως η κατάλληλη μπάντα συχνοτήτων. Γενικά η ελάχιστη ισχύς που απαιτείται για να μεταδοθεί ένα σήμα σε μια απόσταση  $d$  είναι ανάλογη του,  $d^4$  όπου  $d$  ο παράγοντας αυτός είναι κοντά στο 4 για κοντινές στο έδαφος εφαρμογές των δικτύων αισθητήρων. Αν η πυκνότητα των κόμβων ενός multihop δικτύου αισθητήρων είναι αρκετά υψηλή τότε φαινόμενα όπως αυτό της σκίασης και των απωλειών διαδρομής μπορούν να ξεπεραστούν. Οι ερευνητές ψάχνουν για ενεργειακά αποδοτικές λύσεις όσο αφορά το φυσικό επίπεδο. Η επιλογή ενός σχήματος διαμόρφωσης είναι κομβικής σημασίας σε ένα δίκτυο αισθητήρων. Γενικά ενδιαφέροντα έρευνας είναι:

- Σχήματα διαμόρφωσης. Απλά και χαμηλής ισχύος σχήματα διαμόρφωσης πρέπει να σχεδιαστούν για δίκτυα αισθητήρων. Το σχήμα μπορεί να είναι είτε βασικής ζώνης όπως στο UWB (που είναι ελαστικό στις πολυδιαδρομικές) ή passband.
- Στρατηγικές για να ξεπεραστούν τα φαινόμενα του ασύρματου καναλιού (σκίαση, απώλειες διαδρομής κτλ.)
- Σχεδιασμός υλικού(hardware design). Πρέπει να σχεδιαστούν εξαιρετικά μικροί πομποδέκτες αισθητήρες και μονάδες επεξεργασίας για αυτά τα δίκτυα.

### 1.6.2 Επίπεδο ζεύξης δεδομένων (data link layer)

Το επίπεδο αυτό ελέγχει το πως μοιράζονται το ασύρματο μέσο διαφορετικοί χρήστες και βεβαιώνει για τη σωστή λήψη πακέτων που μεταφέρθηκαν σε αυτό. Η πρόσβαση στο μέσο γίνεται είτε με πολλαπλή πρόσβαση είτε με τυχαία πρόσβαση.

Η πολλαπλή πρόσβαση χωρίζει τις συνιστώσες του σήματος σε κανάλια μέσω ορθογώνιες ή μη ορθογώνιες μεθόδους. Οι πιο συνηθισμένες μέθοδοι είναι οι TDMA,FDMA,CDMA. Το επίπεδο ζεύξης πρέπει να έχει επίσης τη δυνατότητα να αναθέτει τα κανάλια σε χρήστες ή να αρνείται τα κανάλια σε χρήστες που για διάφορους λόγους δεν μπορούν να φιλοξενηθούν στο σύστημα.

Στην τυχαία πρόσβαση τα κανάλια ανατίθενται στους χρήστες δυναμικά. Η πιο κοινές μέθοδοι τυχαίας πρόσβασης είναι διάφορες μορφές των ALOHA και CSMA .Αυτές οι μέθοδοι πρόσβασης περιλαμβάνουν ανάθεση καναλιού και άρνηση καναλιού στα πρωτόκολλα τους.

Ένα πρόβλημα που αφορά τα Ad Hoc δίκτυα είναι ότι τα υπάρχοντα MAC πρωτόκολλα δεν είναι κατάλληλα για Ad Hoc δίκτυα. Αυτό οφείλεται σε διάφορους λόγους μερικοί εκ των οποίων αναφέρονται στο [10]. Αυτές οι διαφορές πρέπει να ληφθούν υπόψηκατά τη σχεδίαση ενός κλιμακωτού MAC για τα Ad Hoc δίκτυα. Ένας τρόπος για τη σχεδίαση πρωτοκόλλων MAC είναι η επέκταση των υπάρχόντων πρωτοκόλλων ή οι προτάσεις για νέα πρωτόκολλα ώστε να αυξηθεί ο από άκρη-σε-άκρη ρυθμός μετάδοσης όταν ένα μόνο κανάλι είναι διαθέσιμο στον κόμβο δικτύου. Ο άλλος τρόπος είναι να χρησιμοποιηθούν πολλαπλά κανάλια για κάθε κόμβο δικτύου.

Επίσης στην περίπτωση των mesh δικτύων πρέπει να ληφθεί υπόψη και η διαφορετικότητα των κόμβων του δικτύου καθώς συμμετέχουν ετερογενείς κόμβοι.

Μέχρι στιγμής το θέμα της επεκτασιμότητας σε Ad Hoc δίκτυα δεν έχει ακόμη επιλυθεί. Τα περισσότερα υπαρκτά MAC πρωτόκολλα που βασίζονται σε CSMA/CA λύνουν μερικά μόνο από τα προβλήματα δημιουργώντας άλλα. Για δίκτυα που βασίζονται σε διαφορετικές τεχνικές από την CSMA/CA μπορούν να χρησιμοποιηθούν TDMA και CDMA εάν μπορεί να αναπτυχθεί ένα μοιρασμένο σχήμα ώστε να εκμηδενίζει τις δυσκολίες της εφαρμογής TDMA και CDMA σε ένα Ad Hoc δίκτυο. Όταν στο φυσικό επίπεδο χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως MIMO ή cognitive radio καινοτόμα MAC πρωτόκολλα θα πρέπει να αναπτυχθούν.

Επιπλέον, αν επικεντρωθούμε στα WMN δίκτυα εντοπίζουμε κάποιες διαφορές σε σχέση με τα άλλα Ad Hoc δίκτυα που αφορούν τη σχεδίαση του πρωτοκόλλου MAC για αυτά. Στα WMNs, mesh δρομολογητές και mesh πελάτες έχουν αρκετά διαφορετικά χαρακτηριστικά όπως κινητικότητα, περιορισμένη ισχύ κτλ. Έτσι το MAC για τα WMN θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του και την επεκτασιμότητα και την ετερογένεια μεταξύ διαφορετικών κόμβων του.

Στα WMN δίκτυα κάποιοι δρομολογητές μπορεί να λειτουργούν ως γέφυρες του δικτύου με άλλες τεχνολογίες ασύρματων δικτύων. Έτσι πρέπει να αναπτυχθούν προχωρημένες διαδικασίες σύνδεσης στο MAC επίπεδο, ώστε διαφορετικές τεχνολογίες όπως IEEE 802.11, 802.16 κτλ να μπορούν να λειτουργούν μαζί.

Πολυκαναλικά πρωτόκολλα MAC για δέκτες με πολλαπλούς transceiver δεν έχουν ακόμη ανακαλυφθεί κυρίως λόγω του υψηλού κόστους αυτών των δεκτών. Ωστόσο όσο το κόστος θα μειώνεται αυτή η τεχνολογία είναι πολλά υποσχόμενη. Για να επιτευχθεί απόδοση φάσματος, ένα πολυκαναλικό MAC πρωτόκολλο θα πρέπει να περιλαμβάνει την μονοκαναλική θεμελιώδη λύση που μπορεί να επιλύσει το θέμα της επεκτασιμότητας, γεγονός που χρήζει περαιτέρω έρευνας. Οι προσπάθειες έρευνας επικεντρώνονται κυρίως στη χωρητικότητα, το ρυθμό μετάδοσης και τη δικαιοσύνη, ωστόσο πολλές εφαρμογές χρειάζεται να υποστηρίζουν ευρυζωνική επικοινωνία πολυμέσων.

### 1.6.3 Επίπεδο δικτύου (*Network layer*)

Το επίπεδο δικτύου είναι υπεύθυνο για τον καθορισμό των συνδέσεων από άκρη σε άκρη στο δίκτυο. Οι κύριες λειτουργίες του επιπέδου αυτού σε ένα Ad Hoc δίκτυο είναι ο εντοπισμός των γειτόνων, η δρομολόγηση και ο δυναμικός καταμερισμός των πόρων. Το IP έχει γίνει αποδεκτό ως το πρωτόκολλο επιπέδου δικτύου για αρκετά ασύρματα δίκτυα. Ωστόσο, τα πρωτόκολλα δρομολόγησης για τα Ad Hoc δίκτυα διαφέρουν σημαντικά σε σχέση με κλασικά πρωτόκολλα όπως Bellman-Ford, RIP κτλ. Μερικά από τα αναπτυχθέντα για Ad Hoc δίκτυα είναι τα: topology broadcast based on reverse path forwarding (TBRPF) πρωτόκολλο, dynamic source routing (DSR), Ad Hoc on demand distance vector (AODV).

Αυτό που κυρίως πρέπει να λαμβάνει υπόψη του ένα πρωτόκολλο δρομολόγησης είναι το εύρος ζώνης και να προσπαθεί να οδηγεί στη χρήση του δικτύου με όσο το δυνατόν μικρότερο φορτίο. Η κατηγοριοποίηση των πρωτοκόλλων δρομολόγησης με έναν απλό τρόπο είναι δύσκολη. Μπορούμε να τα χωρίσουμε ανάλογα με τη στρατηγική που ακολουθούν για τη δρομολόγηση των πακέτων. Κάποια πρωτόκολλα αφορούν αποκλειστικά τη δρομολόγηση διανύσματος αποστάσεων (Bellman-Ford, R.I.P). Τα πρωτόκολλα αυτά δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε Ad Hoc δίκτυα για αυτό χρειάζεται να τροποποιηθούν.

Κάποια άλλα πρωτόκολλα βασίζονται σε αλγόριθμους κατάστασης ζεύξεων όπως τα GSR,FSR,LANMAR. Η παραπάνω κατηγορία πρωτοκόλλων χαρακτηρίζεται ως προληπτική (proactive).

Μια άλλη κατηγορία πρωτοκόλλων είναι αυτά που χρησιμοποιούν τον εξής μηχανισμό: όταν η πηγή θέλει να αποστείλει ένα πακέτο στον προορισμό, πλημμυρίζει το δίκτυο με ένα πακέτο ανακάλυψης διαδρομής. Όταν ο προορισμός λάβει το πακέτο αυτό απαντάει στην πηγή μέσω μιας διαδρομής η οποία ελέγχεται με βάση κάποιο αλγόριθμο επιλογής. Τα μηνύματα ελέγχου σε αυτά τα πρωτόκολλα στέλνονται μόνο όταν είναι πραγματικά ανάγκη και έτσι έχουμε οικονομία πόρων. Πρωτόκολλα που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι το Ad Hoc On demand Distance Vector (AODV) και το Temporarily Ordered Routing Algorithm (TORA).

Κάποια άλλη ομάδα πρωτοκόλλων είναι τα πρωτόκολλα ομαδοποίησης. Σε αυτά οι κόμβοι κατηγοριοποιούνται σε ομάδες με κοινά χαρακτηριστικά με βάση κάποιον αλγόριθμο έτσι ώστε να δημιουργούνται ιεραρχικές δομές οι οποίες μπορούν να αποφέρουν με σωστή χρήση πολλαπλά κέρδη. Τέτοια είναι το Cluster Based Routing Protocol(CBRP) και το Weighted Clustering Algorithm(WCA).

#### **1.6.4 Επίπεδο Μεταφοράς (Transport layer)**

Τα πρωτόκολλα που χρησιμοποιούνται στο επίπεδο μεταφοράς για Ad Hoc δίκτυα μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες όσο αφορά την αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων. Αυτά που αποτελούν παραλλαγές του TCP και αυτά που είναι εντελώς καινούρια.

Στην πρώτη περίπτωση το κλασικό TCP δεν μπορεί να εφαρμοστεί όπως είναι λόγω διάφορων μειονεκτημάτων του. Δεν διαφοροποιεί απώλειες λόγω συμφόρησης και απώλειες που δεν οφείλονται σε συμφόρηση. Επίσης, οι αποτυχίες ζεύξεων χειροτερεύουν την επίδοση του TCP. Έχει ισχυρή εξάρτηση από τα ACK έτσι η ασυμμετρία του συστήματος (ασύμμετρα Ad Hoc δίκτυα ) μπορεί να έχει αντίκτυπο στην επίδοση του TCP.

Στην δεύτερη περίπτωση έχουν προταθεί καινούρια πρωτόκολλα όπως το Ad Hoc transport protocol (ATP). Αυτό επιτυγχάνει αρκετά καλύτερη επίδοση (πχ καθυστέρηση, ρυθμό μετάδοσης) από τις παραλλαγές του TCP, χρησιμοποιώντας νέους μηχανισμούς για αξιόπιστη μεταφορά δεδομένων.

Ωστόσο παρόλα τα πλεονεκτήματα του ένα ολοκαίνουριο πρωτόκολλο μεταφοράς δεν προτιμάται λόγω θεμάτων συμβατότητας.

#### **1.6.5 Επίπεδο εφαρμογής (application layer)**

Το επίπεδο εφαρμογής παράγει τα δεδομένα που στέλνονται πάνω στο δίκτυο και επεξεργάζεται τα δεδομένα που έρχονται από το δίκτυο. Έτσι το επίπεδο αυτό παρέχει συμπίεση των δεδομένων μαζί με διόρθωση σφαλμάτων και απόκρυψη. Η συμπίεση πρέπει να είναι χωρίς απώλειες για εφαρμογές δεδομένων αλλά μπορεί να ανέχεται απώλειες για εφαρμογές που περιλαμβάνουν βίντεο, ήχο ή εικόνες. Έτσι για

τις εφαρμογές δεδομένων αν υπάρχουν απώλειες είναι σχεδόν βέβαιη η επαναμετάδοση τους στο δίκτυο γεγονός που οδηγεί σε σημαντική καθυστέρηση.

Το επίπεδο εφαρμογής μπορεί επίσης να παρέχει μια μορφή διαφορικότητας μέσω multiple description coding (MDC) που αποτελεί μια μορφή συμπίεσης όπου παράγονται πολλαπλές περιγραφές των δεδομένων και κάνουν πιο αξιόπιστη την αποσυμπίεση στο δέκτη. Επίσης πολλές εφαρμογές απαιτούν εγγυημένο ρυθμό μετάδοσης απ'άκρη σε άκρη και χαμηλή καθυστέρηση γεγονός που αναφέρεται ως ποιότητα υπηρεσίας (QoS).

Για Ad Hoc δίκτυα με χαμηλή χωρητικότητα, επιρρεπή σε λάθη χρονικά μεταβαλλόμενες ζεύξεις, κινητούς χρήστες και δυναμική τοπολογία η εγγυημένη ποιότητα υπηρεσίας αποτελεί ένα υπερβολικά δύσκολο εγχείρημα. Έτσι, οι εφαρμογές για ασύρματη Ad Hoc δικτύωση θα πρέπει να προσαρμόζονται στην ποιότητα υπηρεσίας που προσφέρεται. Επίσης, μπορεί ύστερα από συμφωνία να παρέχεται αυξημένη ποιότητα υπηρεσίας σε χρήστες με υψηλότερη προτεραιότητα μειώνοντας την ποιότητα υπηρεσίας στους χαμηλότερης προτεραιότητας χρήστες.

Επίσης κάποια θέματα που αφορούν το επίπεδο εφαρμογών αποτελούν ενδιαφέροντα θέματα έρευνας.

- Υπαρκτές εφαρμογές στο ιντερνετ να δουλεύουν κάτω από την αρχιτεκτονική των Ad Hoc δικτύων. Λόγω της Ad Hoc και multihop αρχιτεκτονικής δεν υπάρχει τρόπος για τα πρωτόκολλα κατώτερων επιπέδων να παρέχουν τέλεια υποστήριξη του επιπέδου εφαρμογών. Πρέπει λοιπόν να αναπτυχθούν κατάλληλοι αλγόριθμοι για το επίπεδο εφαρμογών ώστε να βελτιωθεί η επίδοση real-time ιντερνετ εφαρμογών
- η ανάπτυξη πρωτοκόλλων για διαμοιρασμό δεδομένων(χωρίς ιντερνετ).
- Η ανακάλυψη μοναδικών εφαρμογών που θα αξιοποιούν τα πλεονεκτήματα των Ad Hoc δικτύων.



### **1.6.6 Cross-layer σχεδιασμός**

Συνήθως τα διαφορετικά επίπεδα της στοίβας πρωτοκόλλων είναι απαραίτητο να εκτελούν συγκεκριμένες και διαφορετικές μεταξύ τους λειτουργίες. Αυτό κάνει την ανάπτυξη και εφαρμογή των πρωτοκόλλων μια απλή και κλιμακωτή διαδικασία. Ωστόσο για τα ασύρματα δίκτυα αυτή η μεθοδολογία έχει κάποια μειονεκτήματα. Για παράδειγμα το κανάλι στις ασύρματες επικοινωνίες είναι μεταβαλλόμενο όσο αφορά μεταβλητές όπως χωρητικότητα, bit error rate κτλ. Επίσης, δεν υπάρχει τρόπος από το φυσικό επίπεδο να εγγυηθεί κάποια δεδομένη χωρητικότητα ή συνδεσιμότητα όπως απαιτείται από τα υψηλότερα επίπεδα. Έτσι, για να βελτιωθεί περαιτέρω η επίδοση των ασύρματων δικτύων τα πρωτόκολλα των διαφόρων επιπέδων θα πρέπει να δουλεύουν μαζί με το φυσικό επίπεδο. Επίσης, πρωτόκολλα MAC δρομολόγησης και μεταφοράς θα πρέπει να λειτουργούν συνεργατικά μεταξύ τους. Έτσι είναι απαραίτητος ένας cross-layer σχεδιασμός. Για παράδειγμα ένα MAC πρωτόκολλο μπορεί να περιλαμβάνει μηχανισμούς για έλεγχο της τοπολογίας του δικτύου και αυτοοργάνωση. Αυτή την πληροφορία πρέπει να τη μοιραστεί με κάποιο πρωτόκολλο δρομολόγησης. Ο cross-layer σχεδιασμός μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους.

Ο πρώτος είναι η βελτίωση της επίδοσης ενός επιπέδου αναφέροντας κάποιες παραμέτρους στα ανώτερα στρώματα. Για παράδειγμα ο ρυθμός χαμένων πακέτων στο επίπεδο MAC μπορεί να μεταβιβαστεί στο πρωτόκολλο TCP ώστε το TCP να είναι ικανό να διαφοροποιεί τη συμμόρφωση από το ρυθμό χαμένων πακέτων.

Ο δεύτερος είναι η συγχώνευση διαφορετικών πρωτοκόλλων. Για παράδειγμα σε Ad Hoc δίκτυα πρωτόκολλα MAC και πρωτόκολλα δρομολόγησης μπορεί να συνδυαστούν σε ένα κοινό πρωτόκολλο.

Το πλεονέκτημα του πρώτου τρόπου είναι ότι δεν εγκαταλείπει εντελώς την παραδοσιακή εξάρτηση μεταξύ των επιπέδων ενώ ο δεύτερος το κάνει. Όμως με το δεύτερο τρόπο είναι δυνατή η βελτίωση της επίδοσης λαμβάνοντας υπόψη κατάλληλη αλληλεπίδραση μεταξύ των επιπέδων.

Τα μειονεκτήματα του cross-layer σχεδιασμού αφορούν κυρίως την ασυμβατότητα με τα υπάρχοντα πρωτόκολλα, τη δυσκολία στη συντήρηση και

διαχείριση, τη διαφοροποίηση ως προς την κλασική διαστρωμάτωση, καθώς και την απρόβλεπτη επίδραση στο μελλοντικό σχεδιασμό των δικτύων.

### ***1.7 Πλεονεκτήματα-Μειονεκτήματα Ad Hoc Δικτύων***

Σε αυτό το σημείο θα αναφέρουμε γενικά κάποια βασικά πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα των Ad Hoc δικτύων που μπορούν να βοηθήσουν έναν μηχανικό στην σωστή απόφαση για την εγκατάσταση ή όχι ενός τέτοιου δικτύου.

Τα βασικά πλεονεκτήματα που παρέχει ένα ad-hoc δίκτυο σε σύγκριση με τα παραδοσιακά δίκτυα επικοινωνιών παρατίθενται παρακάτω [5]:

- Η χρήση των δικτύων αυτών μπορεί να αυξήσει την κινητικότητα και την ελαστικότητα, καθώς τα Ad Hoc δίκτυα μπορούν να δημιουργηθούν ή να γίνει παύση της λειτουργίας τους σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.
- Τα Ad Hoc δίκτυα μπορεί να είναι αρκετά πιο οικονομικά σε κάποιες περιπτώσεις αφού εκμηδενίζουν την απαίτηση για σταθερή υποδομή και μειώνουν την κατανάλωση ισχύος σε κινητούς κόμβους.
- Τα δίκτυα αυτά μπορεί να είναι πιο εύρωστα καθώς δεν έχουν την ανάγκη ιεραρχικά κατανεμημένου ελέγχου .
- Λόγω της μετάδοσης πολλαπλών αλμάτων (multihop) είναι δυνατή η επικοινωνία και μεταξύ κόμβων που δεν έχουν οπτική επαφή σε υψηλές συχνότητες.
- Τα multihop Ad Hoc δίκτυα μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας των ασύρματων συσκευών. Χρειάζεται περισσότερη ισχύς εκπομπής για να μεταφερθεί ένα σήμα σε μια μακριά οδό ενός άλματος (single-hop), απ'ότι αν χρησιμοποιηθούν πολλοί κόμβοι για τη μεταφορά (multi-hop)

Κάθε τεχνολογία έχει και τα μειονεκτήματά της και τα ad-hoc δίκτυα δεν αποτελούν εξαίρεση. Πολλές από τις ευκολίες που προσφέρουν έχουν σαν συνέπεια κάποιες αδυναμίες, οι κυριότερες από τις οποίες είναι:

- Ένα ασύρματο δίκτυο έχει σημαντικά χαμηλότερο εύρος ζώνης (bandwidth) από τα σημερινά δίκτυα καλωδίων. Επιπλέον η επιβάρυνση του δικτύου από τα πρωτόκολλα ασύρματης διασύνδεσης, διαχείρισης και αποφυγής

συγκρούσεων τυπικά μειώνει το χρήσιμο bandwidth στο 45-50%. Για παράδειγμα όταν η κινητικότητα των κόμβων είναι μεγάλη, όλο το εύρος ζώνης καταναλώνεται στην εξεύρεση μονοπατιών.

- Περιορισμένη ασφάλεια: Τα κινητά ασύρματα δίκτυα είναι πιο ευάλωτα σε φυσικές απειλές απ' ό,τι τα συμβατικά ενσύρματα δίκτυα. Θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή σε θέματα υποκλοπών.
- Τα ad-hoc δίκτυα, όπως και όλα τα ασύρματα δίκτυα είναι ευάλωτα σε παρεμβολές. Εάν ένας ισχυρός αναμεταδότης που λειτουργεί στην ίδια ραδιοσυχνότητα με ένα ad-hoc δίκτυο, βρίσκεται κοντά σε αυτό, τότε το δίκτυο μπορεί να καταστεί άχρηστο. Αυτό φυσικά μπορεί να γίνει και με κακόβουλη πρόθεση από κάποιον ο οποίος θέλει να εξαπολύσει μια επίθεση προς το δίκτυο.
- Στα ad-hoc δίκτυα το ποσοστό των πακέτων που χάνονται είναι αρκετά υψηλό, τόσο λόγω της αυξημένης πιθανότητας λαθών μετάδοσης, όσο και της αυξημένης πιθανότητας καταστροφής συνδέσμων (π.χ. εξαιτίας της μετακίνησης ενός κόμβου).
- Χωρίς κάποιο κεντρικό έλεγχο και συντονισμό είναι δύσκολο να επιτευχθεί συνεργασία μεταξύ γειτονικών σταθμών ώστε να αποφασίσουν πότε θα εκπέμπει ο καθένας. Επειδή όλοι οι σταθμοί μοιράζονται το ίδιο ραδιοκανάλι (τον αέρα), σε περίπτωση που εκπέμπουν ταυτόχρονα τα ραδιοπακέτα τους θα συγκρουστούν και η πληροφορία θα χαθεί .

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΚΑΝΑΛΙΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΜΕΝΩΝ ΔΙΑΛΕΙΨΕΩΝ ΣΚΙΑΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΛΗΨΗΣ

---

### *2.1 Διαλείψεις στο ασύρματο κανάλι*

Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα [11] μεταδίδονται στο περιβάλλον όπου υφίστανται ανάκλαση, σκέδαση και περίθλαση από τοίχους, έδαφος, κτίρια και άλλα αντικείμενα. Οι λεπτομέρειες από αυτή τη μετάδοση μπορούν να ανακτηθούν από τη λύση των εξισώσεων Maxwell, με οριακές συνθήκες που εκφράζουν τα φυσικά χαρακτηριστικά των εμποδίων και του περιβάλλοντος. Ωστόσο, τα εμπόδια αυτά μπορεί να είναι ιδιαίτερα πολύπλοκα, γεγονός που κάνει την επίλυση των εξισώσεων Maxwell πολύ δύσκολη. Έτσι, έχουν αναπτυχθεί διάφορα εμπειρικά και αναλυτικά προσεγγιστικά μοντέλα για την περιγραφή του ασύρματου καναλιού.

Το ασύρματο κανάλι επηρεάζεται δραματικά από ανθρώπινες κατασκευές, όπως κτίρια ή μικρά σπίτια με μήκος από μερικά μέτρα έως δεκάδες μέτρα σε προαστιακές (suburban) περιοχές. Σε αστικές περιοχές (urban), το μέγεθος των κατασκευών είναι ακόμη μεγαλύτερο. Αντίστοιχα σε αγροτικά (rural) και προαστιακά περιβάλλοντα μεμονωμένα δέντρα ή φυσικά εμπόδια μπορεί να έχουν μέγεθος ανάλογο με το μήκος κύματος του μεταδιδόμενου σήματος. Όμως, αν κάποιο εμπόδιο έχει παρόμοιο ή μεγαλύτερο μέγεθος από το μεταδιδόμενο μήκος κύματος μπορεί να μπλοκάρει και να σκεδάσει το μεταδιδόμενο σήμα και να προκαλέσει διάφορες ανακλάσεις. Τα ανεπιθύμητα αυτά σήματα μπορούν να φτάσουν στον κινητό σταθμό μέσω πολυδιαδρομικής διάδοσης (multipath propagation) μαζί με το απευθείας επιθυμητό σήμα. Σε πολλές περιπτώσεις αυτά τα σήματα κάνουν δυνατή τη μετάδοση ικανοποιητικής ισχύος στο δέκτη, ώστε να είναι δυνατό να υπάρχει γραμμή επικοινωνίας.

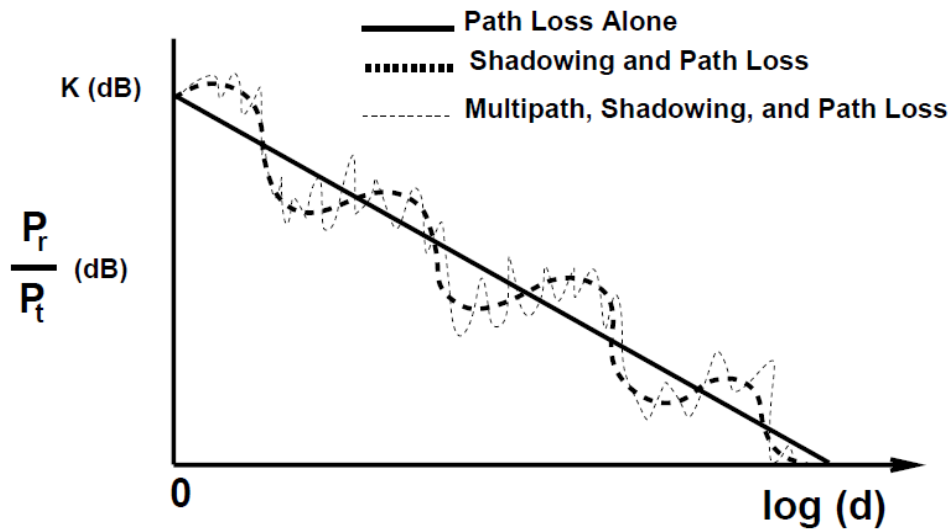
Μπορούμε να διακρίνουμε δύο είδη διαλείψεων [2]. Αρχικά τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας (large scale fading) που εμπεριέχουν τα δύο από τα τέσσερα βασικά χαρακτηριστικά της ραδιομετάδοσης: τις απώλειες διάδοσης, δηλαδή τη

μεταβολή της εξασθένησης με την απόσταση, και τη σκίαση, δηλαδή την τυχαία μεταβολή της εξασθένησης για δεδομένη απόσταση. Οι μεγάλης κλίμακας διαλείψεις εκφράζουν τη μέση εξασθένηση της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος εξαιτίας της κίνησης σε μεγάλες περιοχές. Η σκίαση οφείλεται στην εξασθένηση του σήματος λόγω μεγάλων εμποδίων όπως κτίρια ή λόφους και συνήθως εξαρτάται από τη συχνότητα.

Επιπλέον, διακρίνουμε τις διαλείψεις μικρής κλίμακας (small scale fading) που περιγράφουν τη μεταβολή των χαρακτηριστικών του σήματος (πλάτους και φάσης) για μετατοπίσεις του κινητού σταθμού της τάξης του  $\lambda/2$ . Οι διαλείψεις μικρής κλίμακας οφείλονται στη χρονική διασπορά του σήματος λόγω πολυδιαδρομικής διάδοσης και στη χρονική μεταβολή του διαύλου λόγω μετατόπισης του δέκτη, αλλά και των σκεδαστών που συμμετέχουν στη διάδοση.

Έτσι επιπρόσθετα με την εξασθένηση ισχύος λόγω απόστασης το κανάλι επηρεάζεται από δύο βασικά φαινόμενα, την σκίαση και την πολυδιαδρομική διάδοση. Στην παρούσα διπλωματική θα ασχοληθούμε μόνο με τις διαλείψεις μεγάλης κλίμακας.

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ο λόγος της ισχύος του λαμβανόμενου σήματος προς το εκπεμπόμενο σε dB συναρτήσει της απόστασης σε λογαριθμικές μονάδες. Φαίνονται επίσης οι επιδράσεις των απωλειών διάδοσης (μαύρη γραμμή), σκίασης και πολυδιαδρομικών συνιστωσών.



Σχήμα 2.1-Υπέρθωση διαλείψεων

Το σήμα που μεταδίδεται δεν είναι μόνο ευάλωτο σε θόρυβο, παρεμβολές και εμπόδια του καναλιού, αλλά αυτά τα εμπόδια μπορεί να αλλάζουν ως προς το χρόνο με απρόβλεπτους τρόπους λόγω ενδεχόμενης κίνησης του χρήστη. Τα μοντέλα απωλειών διαδρομής γενικά θεωρούν ότι οι απώλειες διαδρομής είναι σταθερές σε δεδομένη ακτίνα από τον πομπό. Η σκίαση δημιουργείται από εμπόδια μεταξύ πομπού και δέκτη που ελαττώνουν την ισχύ του σήματος μέσω διαφόρων μηχανισμών όπως απορρόφηση, ανάκλαση, σκέδαση και διάθλαση. Όταν η εξασθένηση είναι πολύ μεγάλη τότε το σήμα είναι αδύνατο να ανιχνευθεί και να αναπαραχθεί σωστά.

Στις συνηθισμένες μακροκυψέλες οι σταθμοί βάσης έχουν ύψη της τάξης των 30 μέτρων και τοποθετούνται σε θέσεις με λίγα ή καθόλου εμπόδια στον γύρω χώρο. Αντίθετα το ύψος των κεραιών σε κινητούς σταθμούς είναι συνήθως αρκετά μικρότερο με τυπικές τιμές από 1,5m έως 3m για τερματικά πάνω σε οχήματα. Για άλλα συστήματα επικοινωνιών όπως για τηλεόρασης ευρείας εκπομπής (Tn broadcasting) ή σταθερή ασύρματη πρόσβαση (fixed wireless access) στην ίδια μπάντα συχνοτήτων, το κανάλι μετάδοσης έχει μια πιο ήπια συμπεριφορά καθώς σε αυτές τις περιπτώσεις οι κεραίες λήψης είναι συνήθως κατευθυντικές και καλά τοποθετημένες στο έδαφος. Το φαινόμενο της σκίασης στο απευθείας σήμα και ο αριθμός των πολυδιαδρομικών συνιστωσών σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αρκετά περιορισμένα.

## 2.2 Απώλειες Διάδοσης

Έστω ένα σήμα που μεταδίδεται στο χώρο. Ορίζουμε ως  $P_t$  την ισχύ τού σήματος που φεύγει από τον πομπό και  $P_r$  τη λαμβανόμενη ισχύ του σήματος πού φτάνει στο δέκτη σε μια απόσταση  $d$  από τον πομπό. Ορίζουμε ως απώλειες διαδρομής σε γραμμικές μονάδες το λόγο

$$P_L = \frac{P_t}{P_r} \quad (2.1)$$

Ο ίδιος λόγος σε dB είναι

$$P_L (dB) = 10 \log_{10} \frac{P_t}{P_r} \quad (2.2)$$

Σε γενικές γραμμές οι απώλειες διαδρομής είναι ένας θετικός αριθμός.

### 2.2.1 Απώλειες διάδοσης ελευθέρου χώρου

Με τον όρο απώλειες διαδρομής ελευθέρου χώρου ορίζουμε το λόγο της εκπεμπόμενης ισχύος προς τη λαμβανόμενη ισχύ για ένα δεδομένο περιβάλλον διάδοσης και είναι συνήθως μία συνάρτηση της απόστασης κατά μήκος της διάδοσης του σήματος. Υπάρχουν διάφορα εμπειρικά και αναλυτικά μοντέλα απωλειών διαδρομής με εφαρμογή στα συστήματα κινητών επικοινωνιών. Το πρόβλημα του προσδιορισμού της μέσης λαμβανόμενης ισχύος είναι γενικά δύσκολο αφού για κάθε τύπο περιβάλλοντος, υπάρχουν διαφορετικά φυσικά και τεχνητά εμπόδια και μπορούν να υπερτερούν διαφορετικοί μηχανισμοί διάδοσης και συνεπώς η εξάρτηση από την απόσταση να είναι αρκετά διαφορετική. Για το λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί διαφορετικά μοντέλα διάδοσης που προβλέπουν την εξάρτηση της μέσης ισχύος από την απόσταση και τα οποία εξαρτώνται από πολλές παραμέτρους, όπως η συχνότητα, τα χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος και ο τύπος των κεραιών.

Έστω ένα σήμα που μεταδίδεται μέσω ελευθέρου χώρου σε έναν δέκτη που βρίσκεται σε απόσταση  $d$  από τον πομπό. Υποθέτουμε ότι δεν υπάρχουν εμπόδια ανάμεσα στον πομπό και στον δέκτη και ότι το σήμα μεταδίδεται κατά μήκος μίας ευθείας γραμμής. Το μοντέλο του καναλιού που συνδέεται με αυτή την μετάδοση

ονομάζεται κανάλι με οπτική επαφή (Line Of Sight) και το αντίστοιχο σήμα που λαμβάνεται καλείται σήμα LOS. Η απώλεια διαδρομής ελευθέρου χώρου εισάγει ένα σύνθετο συντελεστή κλίμακας με αποτέλεσμα το λαμβανόμενο σήμα να έχει την μορφή

$$r(t) = \Re\left\{\frac{\lambda e^{-j2\pi d/\lambda} \sqrt{G_t}}{4\pi d} u(t) e^{j2\pi f_c t}\right\} \quad (2.3)$$

όπου  $\sqrt{G_t}$  είναι το κέρδος της λήψης και της μετάδοσης του διαγράμματος ακτινοβολίας της κεραίας στην κατεύθυνση LOS. Η μετατόπιση φάσης  $e^{-j2\pi d/\lambda}$  οφείλεται στην απόσταση  $d$  μεταξύ πομπού και δέκτη

Η ισχύς στο μεταδιδόμενο σήμα  $s(t)$  είναι  $P_t$ , και έτσι ο λόγος της λαμβανόμενης προς την μεταδιδόμενη ισχύ είναι

$$\frac{P_r}{P_t} = \left[\frac{\lambda \sqrt{G_t}}{4\pi d}\right]^2 \quad (2.4)$$

Η σχέση αυτή είναι γνωστή και ως εξίσωση ελευθέρου χώρου ή εξίσωση του Friis. Έτσι, η ισχύς του λαμβανόμενου σήματος μειώνεται αντιστρόφως ανάλογα με το τετράγωνο της απόστασης  $d$  ανάμεσα στις κεραίες μετάδοσης και λήψης. Το λαμβανόμενο σήμα είναι επίσης ανάλογο του τετραγώνου του μήκους κύματος του σήματος, έτσι ώστε η φέρουσα συχνότητα να αυξάνεται, όταν η ισχύς που λαμβάνεται μειώνεται. Αυτή η εξάρτηση της λαμβανόμενης ισχύος με το μήκος κύματος του σήματος  $\lambda$  οφείλεται στην ενεργή περιοχή της κεραίας λήψης. Ωστόσο, οι κατευθυντικές κεραίες μπορούν να σχεδιαστούν έτσι ώστε η ισχύς λήψης να είναι μία αύξουσα συνάρτηση της συχνότητας για συνδέσεις όπου υπάρχει πλήρης κατευθυντικότητα. Η λαμβανόμενη ισχύς μπορεί να εκφραστεί σε dBm ως εξής:

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + 10\log_{10}(G_t) + 20\log_{10}(\lambda) - 20\log_{10}(4\pi) - 20\log_{10}(d) \quad (2.5)$$

Η απώλεια διαδρομής ορίζεται ως εξής:

$$P_L(\text{dB}) = 10\log_{10}\frac{P_t}{P_r} = -10\log\frac{G_t\lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (2.6)$$



Το κέρδος διαδρομής είναι:

$$P_G = -P_L = 10 \log_{10} \frac{G_l \lambda^2}{(4\pi d)^2} \quad (2.7)$$

Τα περισσότερα μοντέλα απωλειών διαδρομής που χρησιμοποιούνται στις κινητές επικοινωνίες βασίζονται σε εμπειρικές μετρήσεις. Δύο από τα πιο σημαντικά εμπειρικά μοντέλα είναι τα μοντέλα Okumura-Hata (Okumura-Hata models) και το εκθετικό μοντέλο διάδοσης.

### 2.2.2 Μοντέλο Hata και μοντέλο COST 231-Hata

Το μοντέλο Hata είναι μια μορφή του Okumura et al [12] μοντέλου που δημιουργήθηκε για να χρησιμοποιηθεί σε υπολογιστικά εργαλεία για την πρόβλεψη της κάλυψης. Υπάρχουν διάφορες μαθηματικές εκφράσεις για τον υπολογισμό των απωλειών διαδρομής  $L$ (dB), ανάλογα με το περιβάλλον.

Για επίπεδες αστικές περιοχές ισχύει:

$$L(dB) = 69.55 + 26.26 \log(f) - 13.82 \log(h_t) - a(h_m) + [44.9 - 6.55 \log(h_t)] \log(d) \quad (2.8)$$

όπου  $f$  σε MHz,  $h_t, h_m$  σε m και  $d$  σε km.  $h_t$  είναι το ενεργό μήκος της κεραίας του σταθμού βάσης και  $h_r$  το ύψος του κινητού δέκτη, ενώ  $d$  είναι το μήκος της ζεύξης και  $a$  ο διορθωτικός παράγοντας αναφορικά με το ύψος της κεραίας του κινητού σταθμού. Για ένα ύψος κινητού σταθμού 1.5m είναι  $a(h_m)=0$ .

Για μικρές ή μεσαίου μεγέθους πόλεις είναι;

$$a(h_m) = [1.1 \log(f) - 0.7] h_m - [1.56 \log(f) - 0.8] \quad (2.9)$$

ενώ για μεγάλες πόλεις είναι:

$$a(h_m) = 9.29 [\log(1.54 h_m)]^2 - 1.1, f \leq 200 \text{MHz} \quad (2.10\alpha)$$

$$a(h_m) = 3.2 [\log(11.75 h_m)]^2 - 4.97, f \geq 400 \text{MHz} \quad (2.10\beta)$$

Για προαστιακό περιβάλλον ισχύει:

$$L_s = L - 2[\log(f / 28)]^2 - 5.4 \quad (2.11)$$

όπου L το αποτέλεσμα της σχέσης (2.8).

Για αγροτικές περιοχές ισχύει:

$$L_r = L - 4.78[\log(f)]^2 + 18.33\log(f) - 40.94 \quad (2.12)$$

Το μοντέλο ισχύει για παραμέτρους:

$$150 \leq f (MHz) \leq 1500$$

$$30 \leq h_t \leq 200$$

$$1 \leq h_m \leq 10$$

$$1 \leq d (km) \leq 20$$

Πριν από μερικά χρόνια η ανάγκη για χρησιμοποίηση υψηλότερων συχνοτήτων όπως το GSM στα 1800MHz ή το PCS στα 1900MHz οδήγησε στην εξέλιξη του παραπάνω μοντέλου στο μοντέλο COST 231-Hata [13].

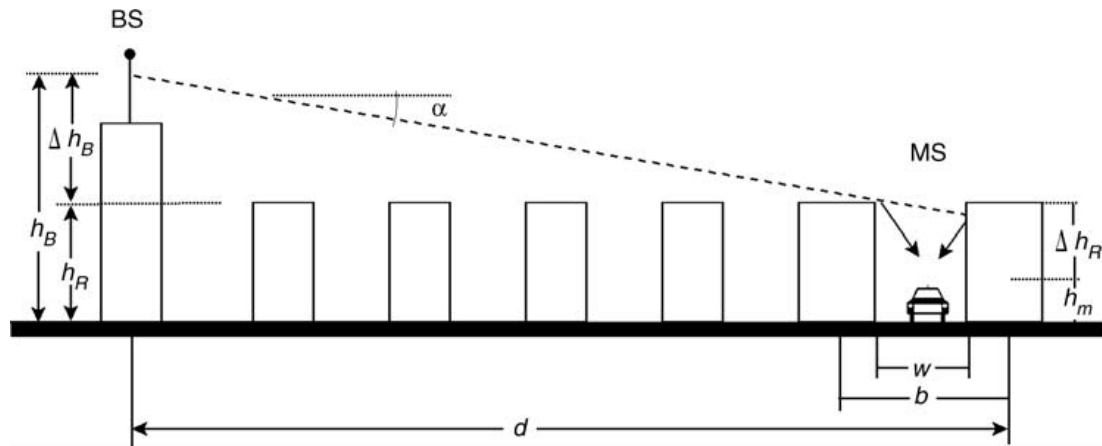
Σε αυτό χρησιμοποιείται η έκφραση:

$$L = [46.3 + 33.9\log(f) - 13.82\log(h_t) - a(h_m)] + [44.9 - 6.55\log(h_t)]\log(d) + C_m \quad (2.13)$$

όπου το  $C_m$  είναι 0dB για μεσαίου μεγέθους πόλεις και μικρή πυκνότητα δέντρων και 3dB για μητροπολιτικά κέντρα. Το εύρος των παραμέτρων που ισχύει το μοντέλο αυτό συμπίπτει με το προηγούμενο μοντέλο εκτός από το εύρος συχνοτήτων που είναι:  $1500 \leq f (MHz) \leq 2000$

Πρέπει να σημειωθεί ότι το μοντέλο αυτό όπως και το μοντέλο Okumura Hata εφαρμόζεται μόνο σε μακροκυψέλες, δηλαδή σε περιπτώσεις όπου η κεραία του σταθμού Βάσης είναι πάνω από τις στέγες των σπιτιών και δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε μικροκυψέλες.

Η ανάγκη για καλύτερα αποτελέσματα σε αστικές περιοχές για το μοντέλο COST 231-Hata δημιούργησε ένα μοντέλο με το όνομα Walfish-Ikegami. Η γεωμετρία του μοντέλου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα



Σχήμα 2.2- μοντέλο Walfish-Ikegami

Οι συνολικές απώλειες δίνονται απο τον τύπο:

$$L = L_{fs} + L_{rts} + L_{msd} \quad (2.14)$$

όπου  $L_{fs}$  είναι οι απώλειες ελευθέρου χώρου,  $L_{rts}$  είναι οι απώλειες περίθλασης και σκέδασης από την κορυφή του κτιρίου στο δρόμο (roof to street diffraction and scatter loss) και  $L_{msd}$  είναι οι απώλειες απο πολλαπλά συνεχόμενα εμπόδια (multiple screen diffraction) λόγω των ενδιάμεσων κτιρίων [14].

### 2.3 Σκίαση

Ένα σήμα κατά τη μετάδοση του σε ένα ασύρματο κανάλι υπόκεινται σε τυχαίες μεταβολές λόγω εμποδίων στο περιβάλλον. Έτσι, για μια δοσμένη απόσταση από την κεραία εκπομπής του σήματος η ισχύς δεν είναι σταθερή. Αυτή η μεταβολή της ισχύος οφείλεται επίσης σε ανακλαστικές επιφάνειες και αντικείμενα διάθλασης. Πρέπει, λοιπόν να χρησιμοποιηθεί ένα μοντέλο, και μάλιστα στατιστικό που να περιγράφει αυτές τις τυχαίες μεταβολές του σήματος, καθώς οι διηλεκτρικές ιδιότητες των εμποδίων και οι μεταβολές λόγω ανακλαστικών επιφανειών θεωρούνται γενικά άγνωστες. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο γι' αυτό το σκοπό είναι αυτό της λογαριθμοκανονικής σκίασης. Αυτό το μοντέλο έχει επιβεβαιωθεί πειραματικά τόσο για εσωτερικά όσο και εξωτερικά περιβάλλοντα διάδοσης.

Στο μοντέλο λογαριθμοκανονικής σκίασης, ο λόγος της μεταδιδόμενης προς τη λαμβανόμενη ισχύ  $\psi = \frac{P_t}{P_r}$  ακολουθεί την παρακάτω συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας pdf (probability density function)

$$p(\psi) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\psi,dB}\psi} \exp\left[-\frac{(10\log\psi - \mu_{\psi,dB})^2}{(2\sigma_{\psi,dB})^2}\right], \psi > 0 \quad (2.15)$$

όπου  $\xi = \frac{10}{\ln 10}$ ,  $\mu_{\psi,dB}$  ο μέσος της  $\psi_{dB} = 10\log_{10}\psi$  σε dB και  $\sigma_{\psi,dB}$  είναι η τυπική απόκλιση της  $\psi_{dB}$ , επίσης σε dB.

Ο μέσος μπορεί να βασιστεί τόσο σε αναλυτικά μοντέλα όσο και σε εμπειρικές μετρήσεις. Για εμπειρικές μετρήσεις, το  $\mu_{\psi,dB}$  ισούται με την εμπειρική απώλεια διαδρομής, καθώς η μέση εξασθένιση από την σκίαση είναι ήδη ενσωματωμένη στις μετρήσεις. Για αναλυτικά μοντέλα, η  $\mu_{\psi,dB}$  πρέπει να συμπεριλάβει και την απώλεια διαδρομής και την μέση εξασθένιση. Αλλιώς, η απώλεια διαδρομής μπορεί να ληφθεί υπόψη ξεχωριστά από την σκίαση.

Σημειώστε ότι αν το  $\psi$  είναι λογαριθμοκανονικό, η λαμβανόμενη ισχύς και ο δέκτης SNR είναι επίσης λογαριθμοκανονικοποιημένα μεγέθη, αφού είναι απλώς σταθερά πολλαπλάσια του. Για τον δέκτη SNR, ο μέσος και η τυπική απόκλιση αυτής της λογαριθμοκανονικής τυχαίας διακύμανσης είναι επίσης σε dB. Για την λογαριθμοκανονική ισχύ που λαμβάνεται, αφού η τυχαία μεταβολή έχει μονάδες ισχύος, ο μέσος και η τυπική της απόκλιση είναι σε dBm ή dBW αντί για dB. Ο μέσος του (το μέσο γραμμικό κέρδος διαδρομής) μπορεί να προκύψει από:

$$\mu_{\psi} = E[\psi] = \exp\left[\frac{\mu_{\psi,dB}}{\xi} + \frac{\sigma_{\psi,dB}^2}{2\xi^2}\right] \quad (2.16)$$

Η μετατροπή από τον γραμμικό μέσο (σε dB) στον λογαριθμικό μέσο (σε dB) προέρχεται από την παραπάνω εξίσωση ως εξής

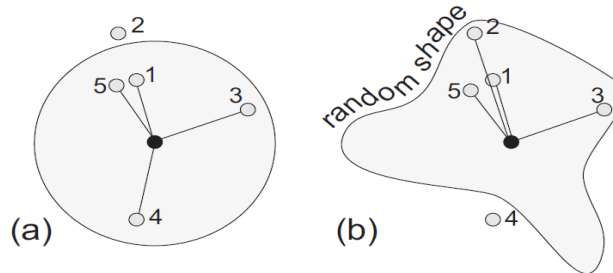
$$10\log_{10} \mu_{\psi} = \mu_{\psi} + \frac{\sigma_{\psi,dB}^2}{2\xi} \quad (2.17)$$

Η απόδοση στην λογαριθμοκανονική σκίαση είναι παραμετροποιήσιμη από το λογαριθμικό μέσο , το οποίο αναφέρεται ως η μέση απώλεια διαδρομής και είναι σε μονάδες dB. Με μία αλλαγή των μεταβλητών βλέπουμε ότι η κατανομή του σε dB είναι κατανομή Gauss με μέσο  $\mu$  και τυπική απόκλιση  $\sigma$ .

$$p(\psi_{dB}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\psi dB}} \exp\left[-\frac{(\psi_{dB} - \mu_{\psi dB})^2}{2\sigma_{\psi dB}^2}\right] \quad (2.18)$$

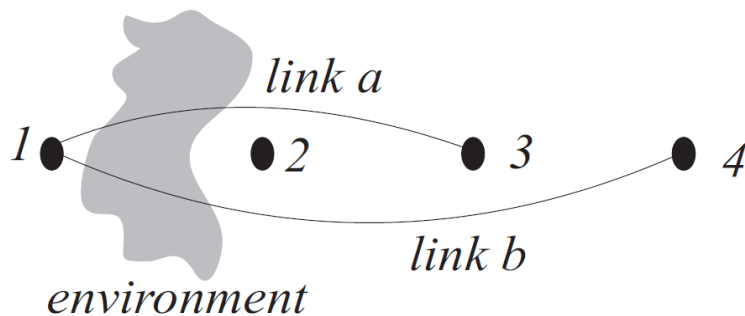
### 2.3.1 Σκίαση:κάποια παραδείγματα

Απ' ότι βλέπουμε στο παρακάτω σχήμα αν λάβουμε υπόψη τη σκίαση τότε η πιθανότητα σύνδεσης κάποιου κινητού δεν εξαρτάται σταθερά από την απόσταση άλλα έχει και έναν τυχαίο παράγοντα όπως φαίνεται απ'τό παρακάτω σχήμα [15].



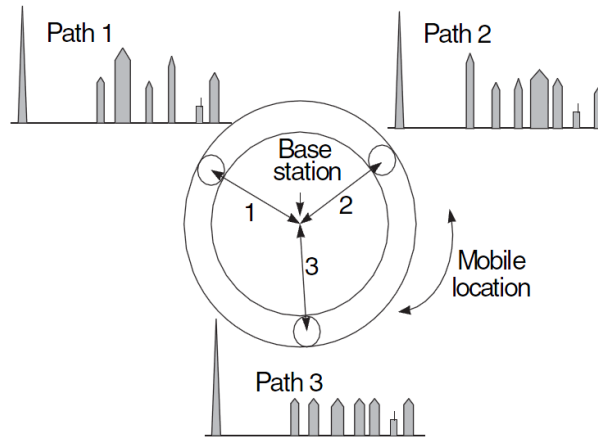
Σχήμα 2.3-κάλυψη (α)χωρίς σκίαση,(β)με σκίαση

Ένα παράδειγμα περιβάλλοντος σκίασης φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα όπου τα link a,b υφίστανται παρόμοια σκίαση, καθώς το περιβάλλον εμποδίων είναι παρόμοιο.



Σχήμα 2.4-περιβάλλον με σκίαση

Τέλος ένα ακόμη παράδειγμα που δείχνει τα διαφορετικά εμπόδια για κάθε ξεχωριστό μονοπάτι μετάδοσης του σήματος και τονίζουν τη διαφορετικότητα της εξασθένησης λόγω εμποδίων φαίνονται στο σχήμα 2.5 [16].



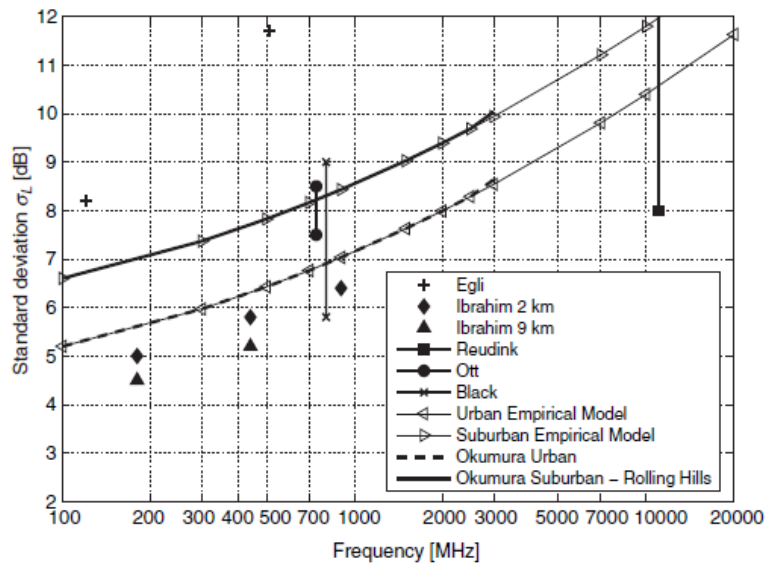
Σχήμα 2.5-διαφορά εμποδίων ανάλογα με το μονοπάτι

### 2.3.2 Τοπική απόκλιση σκίασης

Το σχήμα δείχνει τη μεταβολή της τυπικής απόκλισης της σκίασης με τη συχνότητα, όπως μετρήθηκε από διάφορες μελέτες. Είναι φανερό ότι υπάρχει η τάση να αυξάνει με τη συχνότητα και ότι εξαρτάται από το περιβάλλον. Τα προαστιακά περιβάλλοντα φαίνεται ότι έχουν τη μεγαλύτερη τυπική απόκλιση, λόγω την μεγάλης μεταβολής των χαρακτηριστικών της τοπικής περιοχής. Οι αστικές περιοχές έχουν μάλλον χαμηλή  $\sigma_L$ , ενώ οι συνολικές απώλειες διάδοσης είναι μεγαλύτερες. Οι μεταβολές στις μετρήσεις (σχήμα 2.6-Ibrahim) στα 2-9km οφείλονται στις διαφορές του τοπικού περιβάλλοντος. Το σχήμα επίσης περιλαμβάνει μια εμπειρική σχέση που συμβαδίζει με αυτές του [12] και ισχύει μέχρι τα 20GHz.

$$\sigma_L = 0.65(\log(f_c))^2 - 1.3\log(f_c) + A \quad (2.19)$$

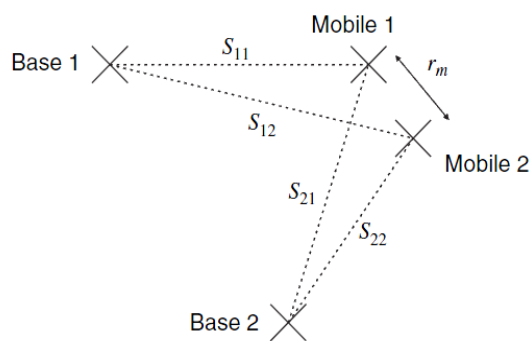
όπου  $A=5,2$  για αστικές περιοχές και  $A=6,6$  για προαστιακές. Οι παραπάνω τιμές ισχύουν για μακροκυψέλες.



Σχήμα 2.6-τυπική απόκλιση σκίασης

## 2.4 Συσχέτιση

Μέχρι τώρα θεωρούσαμε την σκίαση σε κάθε μονοπάτι ως μια ανεξάρτητη μεταβλητή. Όμως μια πιο προσεκτική μελέτη απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση. Εδώ περιγράφουμε τον τρόπο με τον οποίο συσχετίζεται η σκίαση για γειτονικά μονοπάτια και ως εκ τούτου παρόμοιο περιβάλλον και εμπόδια. Θεωρούμε το παρακάτω σχήμα [16].



Σχήμα 2.7-περιγραφή συσχέτισης

Δύο κινητά (Mobile 1,2) απέχουν μεταξύ τους κατά μια μικρή απόσταση  $r_m$  και καθένα μπορεί να λαμβάνει σήμα από τους δύο σταθμούς βάσης (Base 1,2). Εναλλακτικά οι δυο θέσεις των κινητών μπορεί να αντιπροσωπεύουν δύο θέσεις ενός κινητού σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Για κάθε μονοπάτι μεταξύ σταθμού βάσης

και κινητού υπάρχει στο σχήμα και η τιμή της σκίασης για αυτό το μονοπάτι. Καθένα από τα τέσσερα μονοπάτια μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει λογαριθμοκανονική σκίαση οπότε τα  $S_{11}$ ,  $S_{12}$ ,  $S_{21}$  και  $S_{22}$  είναι μηδενικής μέσης τιμής γκαουσιανές τυχαίες μεταβλητές σε dB. Παρόλαυτα δεν είναι ασυσχέτιστες καθώς σε κάθε μονοπάτι μπορεί να υπάρχουν παρόμοια εμπόδια. Υπάρχουν δύο τύποι συσχέτισης:

- Συσχέτιση μεταξύ δύο θέσεων ενός κινητού, που λαμβάνει σήμα από έναν συγκεκριμένο σταθμό βάσης όπως μεταξύ  $S_{11}$  και  $S_{12}$ , ή μεταξύ  $S_{21}$  και  $S_{22}$ . Αυτό το φαινόμενο είναι η αυτοσυσχέτιση της σκίασης για το κινητό καθώς κινείται.
- Συσχετίσεις μεταξύ δύο σταθμών βάσης που στέλνουν σε ένα κινητό όπως μεταξύ,  $S_{11}$  και  $S_{21}$  ή μεταξύ  $S_{12}$  και  $S_{22}$ . Αυτές είναι οι ετεροσυσχετίσεις (site-to-site correlations ή αλλιώς cross-correlations).

Αυτοί οι δύο τύποι εξετάζονται ξεχωριστά.

#### 2.4.1 Αυτοσυσχέτιση (serial correlation)

Η αυτοσυσχέτιση με βάση το σχήμα 2.7 ορίζεται από τη σχέση

$$\rho_{\sigma}(r_m) = E \frac{[S_1 S_2]}{\sigma_1 \sigma_2} \quad (2.20)$$

όπου  $\sigma_1, \sigma_2$  είναι οι τυπικές αποκλίσεις που σχετίζονται με τα δύο μονοπάτια. Είναι λογικό να υποθέσουμε ότι οι δύο αυτές μεταβλητές είναι ίσες όταν οι δύο θέσεις του κινητού είναι αρκετά κοντά ώστε το περιβάλλον να θεωρείται γενικά ίδιο, παρότι τα εμπόδια κοντά στο κινητό μπορεί να είναι αρκετά διαφορετικά. Έτσι καταλήγουμε στην παρακάτω εξίσωση

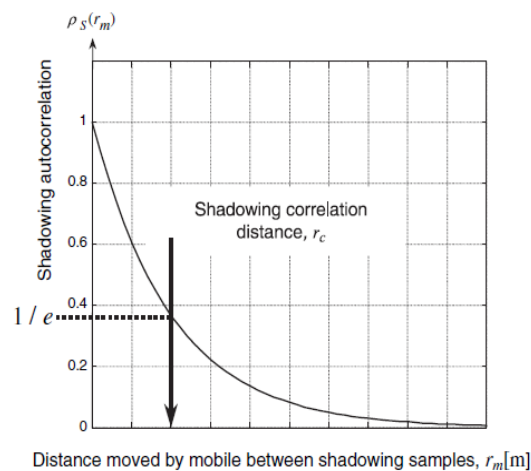
$$\rho_{\sigma}(r_m) = E \frac{[S_1 S_2]}{\sigma_L^2} \quad (2.21)$$

Η αυτοσυσχέτιση επιδρά στο βαθμό στον οποίο οι συνολικές απώλειες διαδρομής που υφίστανται ένα κινητό διαφέρουν με το χρόνο όπως αυτό κινείται στο χώρο. Αυτό έχει σημαντική επίδραση στις διαδικασίες ελέγχου ισχύος (power control), όπου



ο σταθμός βάσης τυπικά καθοδηγεί το κινητό να προσαρμόσει την ισχύ εκπομπής του έτσι ώστε η ισχύς που λαμβάνει από το σταθμό βάσης να είναι μέσα σε προκαθορισμένα πλαίσια. Αυτή η διαδικασία πρέπει να είναι ιδιαίτερα ακριβής σε CDMA (τεχνική πολλαπλής πρόσβασης με διαίρεση κώδικα) συστήματα, όπου όλα τα κινητά πρέπει να λαμβάνονται από το σταθμό βάσης απαραίτητα με την ίδια ισχύ, ώστε να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα του συστήματος. Αν η αυτοσυσχέτιση της σκίασης μειωθεί ακαριαία με το χρόνο η ισχύς που λαμβάνει ο σταθμός βάσης από το κινητό θα είναι αρκετά ανακριβής την ώρα που το κινητό θα αντιδρά στην εντολή αύξησης της ισχύος(από το σταθμό βάσης), οπότε το αποτέλεσμα θα είναι απαράδεκτο. Αντίθετα αν λαμβάνουν χώρα πολλές εντολές για έλεγχο ισχύος, θα έχουμε υπερβολική κατανάλωση πόρων για σηματοδοσία.

Μετρήσεις της αυτοσυσχέτισης της σκίασης δείχνουν ότι ένα απλό πρώτης τάξεως εκθετικό μοντέλο είναι κατάλληλο για να περιγράψει τη διαδικασία. Αυτό το μοντέλο χαρακτηρίζεται από την απόσταση συσχέτισης  $r_c$ , που είναι η απόσταση που χρειάζεται ώστε η κανονικοποιημένη αυτοσυσχέτιση να πέσει στο  $1/e$ , όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.2.8

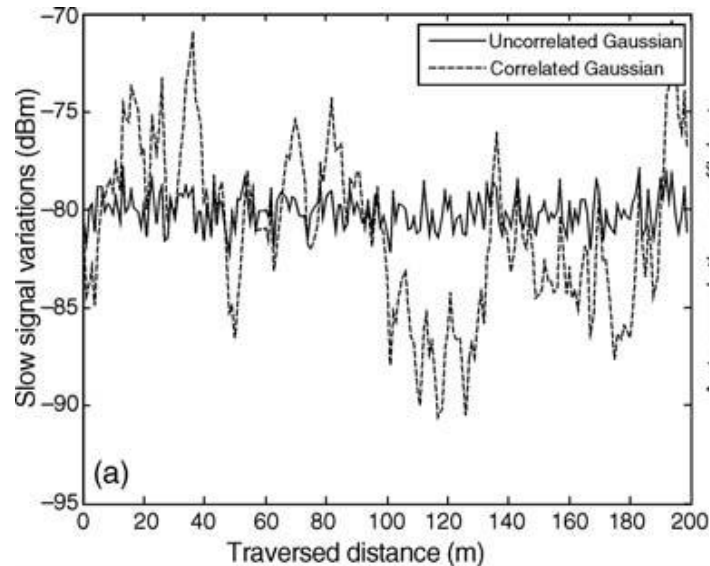


Σχήμα 2.8-αυτοσυσχέτιση σκίασης

Η απόσταση είναι τυπικά δεκάδες ή εκατοντάδες μέτρα, με ενδείξεις ότι η απόσταση συσχέτισης είναι μεγαλύτερη σε μεγάλες αποστάσεις. Αυτό αντιστοιχεί στο μέγεθος των κτιρίων και άλλων εμποδίων που βρίσκονται κοντά στο κινητό.

Ένα μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει την αυτοσυσχέτιση (serial correlation) περιγράφεται στο [14]. Σε αυτό το παράδειγμα θεωρούμε συγκεκριμένη

απόσταση από τον σταθμό βάσης (BS), ενώ χρησιμοποιείται το λογισμικό Matlab για τις προσομοιώσεις. Εδώ, παραθέτουμε μόνο το αποτέλεσμα που συνοψίζεται κυρίως στο σχήμα 2.9.



Σχήμα 2.9- αργές μεταβολές σε σχέση με απόσταση από σταθμό βάσης

Συγκεκριμένα, βλέπουμε ξεκάθαρα απ' το σχήμα ότι γειτονικά σημεία (διακεκομμένη γραμμή) έχουν παρόμοια εξασθένηση σε αντίθεση με την περίπτωση που όλα είναι ασυσχέτιστα (συνεχής γραμμή) οπότε σε κάθε σημείο η εξασθένηση είναι εντελώς τυχαία .

#### 2.4.2 Ετεροσυσχέτιση (Site to site-correlation ή cross-correlation)

Η ετεροσυσχέτιση με βάση το σχήμα 2.7 ορίζεται ως εξής.

$$\rho_{\sigma}(r_m) = E \frac{[S_{11}S_{21}]}{\sigma_1\sigma_2} \quad (2.22)$$

Σε αυτή την περίπτωση τα δύο μονοπάτια μπορεί να είναι ευρύτατα διαχωρισμένα και διαφορετικά σε μήκος. Μπορεί να συμπεριλαμβάνουν διαφορετικά περιβάλλοντα και η τυπική απόκλιση της σκίασης που σχετίζεται με τα μονοπάτια να είναι επίσης διαφορετική. Οι δύο σταθμοί βάσης που παίρνουν μέρος στη διαδικασία μπορεί να είναι στο ίδιο κανάλι, που σε αυτή την περίπτωση το κινητό θα βιώσει σε κάποιο

βαθμό παρεμβολή από το σταθμό βάσης που δεν είναι συνδεδεμένος. Το σύστημα είναι συνήθως σχεδιασμένο ώστε να το αποτρέπει αυτό παρέχοντας ικανοποιητικό διαχωρισμό μεταξύ των σταθμών βάσης έτσι ώστε ο παρεμβάλλον σταθμός βάσης να είναι αρκετά μακριά από τον επιθυμητό, με αποτέλεσμα έναν σχετικά μεγάλο λόγο ισχύος παρεμβολής (C/I). Αν η σκίαση στις δύο ζεύξεις είναι αρκετά συσχετισμένη, ο λόγος C/I θα διατηρηθεί και η ποιότητα του συστήματος και η χωρητικότητα θα είναι υψηλές. Αν αντίθετα παραχθεί χαμηλή συσχέτιση ο παρεμβολεας μπορεί συχνά να αυξήσει το επίπεδο σήματος όταν το επιθυμητό σήμα μειώνεται, μειώνοντας έτσι κατά πολύ την απόδοση του συστήματος.

Ως παράδειγμα θεωρούμε την περίπτωση που οι απώλειες διαδρομής ακολουθούν εκθετικό μοντέλο με ένα παράγοντα εξασθένησης  $n$ . Μπορεί ναδειχθεί ότι ο λόγος C/I της κάτω ζεύξης  $R$  (dB) για ένα κινητό που δέχεται μόνο από δύο σταθμούς βάσης είναι γκαουσιανή τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή  $\mu_R$  και μεταβλητότητα  $\sigma_R^2$ , που δίνονται από:

$$\mu_R = E[R] = 10n \log\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (2.23)$$

$$\sigma_R^2 = E[R^2] - (E[R])^2 = \sigma_1^2 + \sigma_2^2 - 2\rho_c \sigma_1 \sigma_2 \quad (2.24)$$

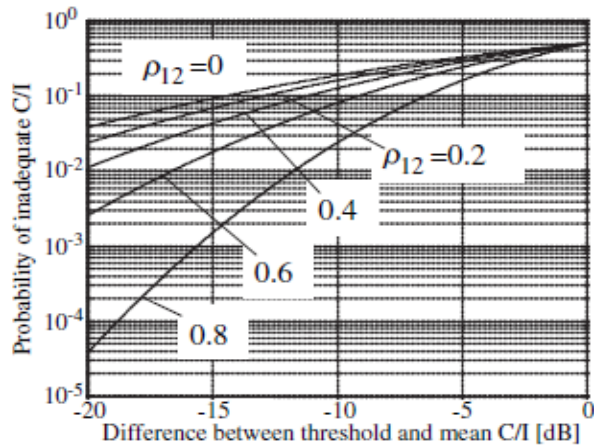
όπου  $r_1, r_2$  είναι οι αποστάσεις μεταξύ κινητού και σταθμών βάσης 1,2. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι η μέση τιμή δεν επηρεάζεται από την συσχέτιση της σκίασης αλλά η μεταβλητότητα μειώνεται (σχέση 2.24), φτάνοντας στην ελάχιστη τιμή μηδέν όταν  $\rho_c = 1$  (και  $\sigma_1 = \sigma_2$ ).

Η πιθανότητα το  $R$  να είναι μικρότερο από ένα κατώφλι  $R_T$  είναι:

$$\Pr[R < R_T] = 1 - Q\left[\frac{R_T - \mu_R}{\sigma_R}\right] \quad (2.25)$$

Στην ειδική περίπτωση που ισχύει  $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_R$ , δηλαδή η τυπική απόκλιση είναι σταθερή για κάθε μονοπάτι ισχύει:

$$\Pr[R < R_T] = 1 - Q\left[\frac{R_T - \mu_R}{\sigma_L \sqrt{2(1 - \rho_c)}}\right] \quad (2.26)$$



Σχήμα 2.10 πιθανότητα αποκοπής σε σχέση με τη διαφορά κατωφλίου-μέσου C/I για διάφορα  $\rho_c$

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται η πιθανότητα αποκοπής ενός κυψελωτού συστήματος στο οποίο κυριαρχεί ένας μόνο παρεμβολέας, για  $\sigma_i=8\text{dB}$  και διάφορες τιμές του  $\rho_c$ . Η διαφορά μεταξύ  $\rho_c=0.8$  και  $\rho_c=0$  είναι περίπου 7dB για πιθανότητα αποκοπής στα 10%. Με έναν παράγοντα εξασθένησης ίσο με 4 η απόσταση επαναχρησιμοποίησης θα έπρεπε να αυξηθεί κατά 50% για να επιτευχθεί η ίδια πιθανότητα αποκοπής. Αυτό αναπαριστά μία αξιοσημείωτη μείωση της χωρητικότητας του συστήματος σε σύγκριση με την περίπτωση που η συσχέτιση λαμβάνεται σωστά υπόψη.

Συνεπώς, είναι ξεκάθαρο ότι το φαινόμενο της cross correlation σκίασης έχει καθοριστική επίδραση στην χωρητικότητα του συστήματος και ότι η χρήση ρεαλιστικών τιμών είναι απαραίτητη για να επιτραπούν ακριβείς προσομοιώσεις του συστήματος και άρα οικονομική και αξιόπιστη σχεδίαση του κυψελωτού συστήματος.

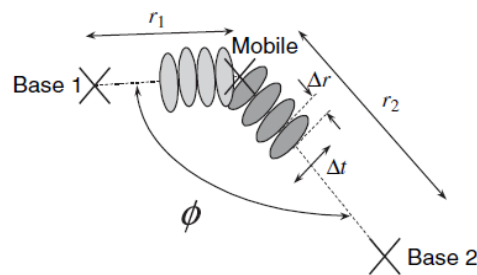
Εδώ φαίνονται κάποια άλλα θέματα σχεδίασης ενός συστήματος που μπορεί να επηρεάζονται από την ετεροσυσχέτιση σκίασης.

- Βέλτιστη επιλογή εύρους δέσμης κεραιών για τομεοποίηση κυψελών.
- Επίδοση του soft handover (τεχνική μεταπομπής) και τεχνικών διαφορικής λήψης, όταν πολλαπλοί σταθμοί βάσης επικοινωνούν με ένα μόνο κινητό. Τέτοια σενάρια έχουν μέγιστο κέρδος όταν η συσχέτιση είναι μικρή.
- Βέλτιστος σχεδιασμός στην εκχώρηση συχνοτήτων ώστε να ελαχιστοποιούνται οι παρεμβολές και άρα να μεγιστοποιείται η χωρητικότητα του συστήματος.

- Υπολογισμός επίδοσης των ευφυών κεραιών (smart antennas)
- Σχεδίαση και επίδοση αλγορίθμων μεταπομπής. Σε αυτούς τους αλγορίθμους η απόφαση για να εξυπηρετηθεί ένα κινητός σταθμός λαμβάνεται με βάση τα επίπεδα ισχύος του σήματος από διάφορους γειτονικούς σταθμούς βάσης. Ωστόσο αυτά τα επίπεδα επηρεάζονται από την αυτοσυσχέτιση και ετεροσυσχέτιση της σκίασης, ειδικότερα σε ταχέως κινούμενα οχήματα.

Δυστυχώς, δεν υπάρχει ένα ευρέως αποδεκτό μοντέλο για την πρόβλεψη της συσχέτισης. Εδώ φαίνεται ένα προσεγγιστικό μοντέλο που έχει φυσική βάση αλλά απαιτεί περαιτέρω δοκιμή για κάποιες μετρήσεις. Περιλαμβάνει δύο μεταβλητές:

- τη γωνία μεταξύ των δύο μονοπατιών, μεταξύ σταθμού βάσης και κινητού. Αν η γωνία είναι μικρή, τα δυο μονοπάτια περιλαμβάνουν αρκετά όμοια εμπόδια και αναμένεται να έχουν υψηλή συσχέτιση. Έτσι, η συσχέτιση θα πρέπει να μειώνεται μεγάλωνοντας τη διαφορά της γωνίας των μονοπατιών.
- τις σχετικές τιμές του μήκους των δυο μονοπατιών. Αν η διαφορά των γωνιών είναι μηδενική η συσχέτιση αναμένεται να είναι ένα αν τα μήκη των μονοπατιών είναι ίσα. Καθώς το ένα μήκος μονοπατιού είναι μεγαλύτερο, περιλαμβάνει εμπόδια που δεν είναι κοινά με το κοντινότερο μονοπάτι, οπότε η συσχέτιση μειώνεται.



Σχήμα 2.11-γεωμετρικό μοντέλο-ετεροσυσχέτιση

Μια αναπαράσταση των παραπάνω φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η διαφορά των γωνιών άφιξης παριστάνεται με  $\phi$  και κάθε μονοπάτι είναι φτιαγμένο από έναν αριθμό εμποδίων που συνεισφέρουν στη διαδικασία σκίασης με μεγέθη  $\Delta r$  κατά μήκος του μονοπατιού και  $\Delta t$  κάθετα σε αυτό. Αν όλα τα εμπόδια θεωρηθούν ανεξάρτητα και ίσα ως προς τη συνεισφορά τους στη διαδικασία σκίασης τότε μπορεί να προκύψει το παρακάτω απλό μοντέλο για την cross correlation.

$$\rho_c = \begin{cases} \sqrt{\frac{r_1}{r_2}}, & 0 \leq \varphi < \varphi_T \\ \frac{\varphi_T}{\varphi} \sqrt{\frac{r_1}{r_2}}, & \varphi_T \leq \varphi < \pi \end{cases} \quad (2.27)$$

Όπου  $r_1$  είναι το μικρότερο από τα δυο μονοπάτια. Η γωνία  $\varphi_T$  δίνεται απο τη σχέση

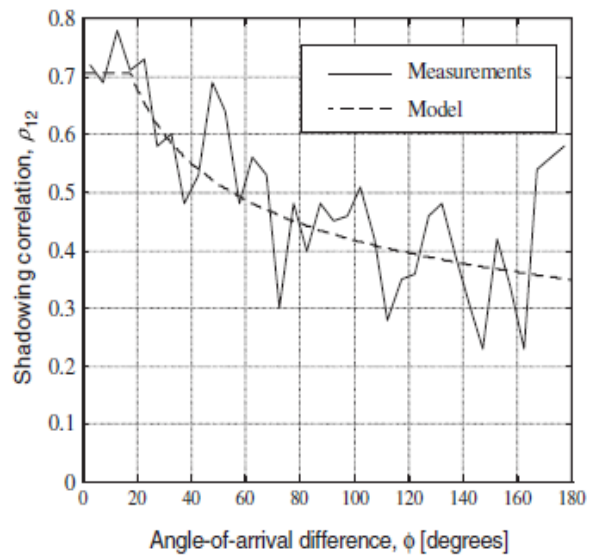
$$\varphi_T = 2 \sin^{-1} \left( \frac{r_c}{2r_1} \right) \quad (2.28)$$

και σχετίζεται με την απόσταση συσχέτισης της αυτοσυσχέτισης. Συνήθως είναι  $r_c \ll r_1$  οπότε η  $\varphi_T$  είναι συνήθως πολύ μικρή και το  $\rho_c$  προκύπτει από το δεύτερο σκέλος της παραπάνω εξίσωσης .

Στην πράξη, η υπόθεση ότι κάθε εμπόδιο που προκαλεί σκίαση είναι εντελώς ασυσχέτιστο είναι μάλλον άκυρη καθώς έδαφος και κτίρια έχουν συγκεκριμένη δομή που σχετίζεται μαζί τους, που οδηγεί σε αξιοσημείωτη συσχέτιση ακόμη και όταν η η διαφορά των γωνιών άφιξης είναι κοντά στις 180 μοίρες. Για να ληφθεί αυτό υπόψη με έναν απλό τρόπο προτείνεται η εισαγωγή στον τύπο ενός παράγοντα  $\gamma$ . Αυτή η μεταβλητή διαφέρει στην πράξη ανάλογα με το μέγεθος των κτιρίων, τα ύψη του εδάφους και των εμποδίων και ανάλογα με τα υψη των κεραιών των σταθμών βάσης που σχετίζονται μαζί τους. Το μοντέλο που προκύπτει είναι

$$\rho_c = \begin{cases} \sqrt{\frac{D_1}{D_2}}, & 0 \leq \varphi < \varphi_T \\ \frac{\varphi_T^\gamma}{\varphi} \sqrt{\frac{D_1}{D_2}}, & \varphi_T \leq \varphi < \pi \end{cases} \quad (2.29)$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται κάποιες μετρήσεις του  $\rho$  σε σχέση με τη διαφορά γωνιών άφιξης. Οι μετρήσεις αυτές παριστάνουν μέσες τιμές για αρκετά διαφορετικά μονοπάτια, ώστε να έχουμε πιο αντιπροσωπευτικές τιμές για τις μετρήσεις του μοντέλου. Συγκρίνονται επίσης οι τιμές αυτές με τις τιμές που προκύπτουν από την παραπάνω εξίσωση. Οι παράμετροι του μοντέλου για το παρακάτω σχήμα είναι  $\gamma=0.3$ ,  $D_1=1\text{km}$ ,  $D_2=2\text{km}$ ,  $r_c=300\text{m}$  [16].



Σχήμα 2.12-συντελεστής συσχέτισης μοντέλου

## 2.5 Συνδυασμός απωλειών Διαδρομής και Σκίασης

Η λαμβανόμενη ισχύς σε μονάδες dB μπορεί να εκφραστεί από την παρακάτω σχέση

$$P(d) = P_{1km} - 10n \log(d_{km}) + X(0, \sigma_L) \quad (2.30)$$

όπου  $P(d)$  είναι η λαμβανόμενη ισχύς σε  $d$  km,  $P_{1km}$  είναι η ισχύς σε 1km,  $n$  είναι ο συντελεστής εξασθένησης του μοντέλου μας και  $X$  είναι μια γκαουσιανή μεταβλητή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση  $\sigma_L$  (location variability), που εξαρτάται από την περιοχή. Πρέπει να σημειωθεί ότι το 1km χρησιμοποιείται σε μακροκυψελωτά σενάρια. Εναλλακτικά μπορεί να χρησιμοποιηθούν το 1m ή τα 100m.

Τα μοντέλα διάδοσης προσπαθούν να υπολογίζουν τη μέση τιμή της  $P(d)$  με εκφράσεις της μορφής  $\overline{P(d)} = P_{1km} - 10n \log(d_{km})$

Τα μοντέλα που περιγράφουν την απώλεια διαδρομής μπορούν να συνδυαστούν με το λογαριθμοκανονικό μοντέλο σκίασης. Σε αυτό το συνδυαστικό μοντέλο, η μέση

απώλεια διαδρομής χαρακτηρίζεται από το μοντέλο απώλειας διαδρομής και το μοντέλο σκίασης, με μέσο 0 dB και τυπική απόκλιση  $\sigma_L$ . Για αυτό το συνδυαστικό μοντέλο ο λόγος της ισχύος που λαμβάνεται προς αυτή που μεταδίδεται σε dB SNR) δίνεται από την παρακάτω σχέση όπου  $\psi$  dB είναι μια κανονικά κατανομημένη τυχαία μεταβλητή με μέση τιμή μηδέν και διακύμανση  $\sigma_\psi^2$

$$\frac{P_r}{P_t} (dB) = 10 \log_{10}(K) - 10\gamma \log_{10} \frac{d}{d_0} - \psi_{dB} \quad (2.31)$$

Ο συνδυασμός απωλειών διαδρομής και σκίασης έχουν σημαντικές επιπτώσεις στον σχεδιασμό ασύρματων δικτύων. Στα ασύρματα δίκτυα υπάρχει συνήθως ένα κατώφλι ελάχιστης ισχύος  $P_{min}$  που λαμβάνεται. Τιμές κάτω από αυτήν δεν γίνονται αποδεκτές (για παράδειγμα η ποιότητα της φωνής σε ένα κυψελωτό σύστημα είναι πολύ φτωχή για να την αντιληφθούμε). Παρ' όλα αυτά, με την σκίαση η ισχύς που λαμβάνεται σε οποιαδήποτε δεδομένη απόσταση από τον πομπό είναι λογαριθμικά κατανομημένη με κάποια πιθανότητα να πέσει κάτω από την ελάχιστη ισχύ  $P_{min}$ . Ορίζουμε την πιθανότητα αποκοπής, εξαιτίας των απωλειών διαδρομής και της σκίασης, ως την πιθανότητα η ισχύς που λαμβάνεται σε μία δεδομένη απόσταση  $d$ ,  $P_r(d)$ , να πέσει κάτω από  $P_{min}$ :

$$P_{out}(P_{min}, d) = P[\Pr(d) < P_{min}] \quad (2.32)$$

Για το συνδυασμένο μοντέλο απώλειας διαδρομής και σκίασης έχουμε

$$p(P_r(d) \leq P_{min}) = 1 - Q\left(\frac{P_{min} - (P_t + 10 \log(K) - 10\gamma \log(\frac{d}{d_0}))}{\sigma_{\psi dB}}\right) \quad (2.33)$$

όπου η συνάρτηση Q ορίζεται ως η πιθανότητα μία τυχαία γκαουσιανή μεταβλητή με μέσο μηδέν και διακύμανση 1 να είναι μεγαλύτερη από το :

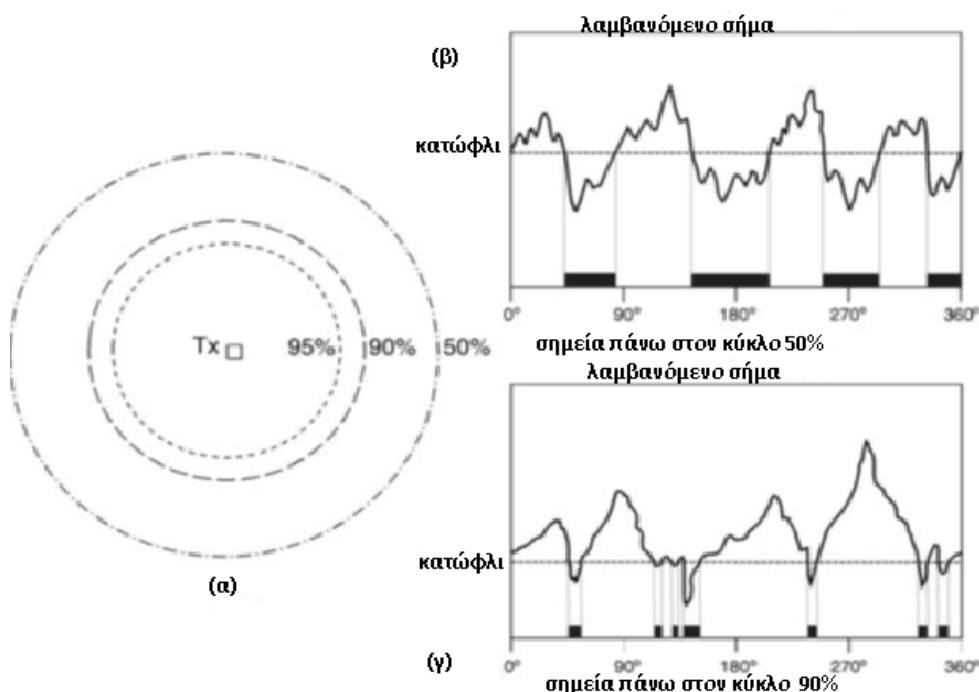
$$Q(z) = p(x > z) = \int_z^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy \quad (2.34)$$



όπου η σχέση μεταξύ της συνάρτησης  $Q$  και της συνάρτησης σφάλματος είναι.

$$Q(z) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right) \quad (2.35)$$

Η τυπική απόκλιση του σήματος λόγω σκίασης όταν εκφράζεται σε dB ακολουθεί Γκαουσιανή κατανομή. Κατά το σχεδιασμό συστημάτων η ποιότητα κάλυψης ορίζεται έτσι ώστε το σήμα να ξεπερνά κάποιο συγκεκριμένο κατώφλι για ένα μεγάλο μέρος της περιοχής κάλυψης, για παράδειγμα 90,95%. Η κάλυψη γενικά εξετάζεται στα όρια της περιοχής κάλυψης και στη συνέχεια για τη συνολική ποιότητα κάλυψης της περιοχής προστίθεται η εσωτερική περιοχή. Το παρακάτω σχήμα δείχνει τα άκρα της περιοχής για κάποιες δοσμένες πιθανότητες κάλυψης. Φαίνονται τρεις κύκλοι για πιθανότητες 50%, 90% και 95%. Αυτές οι πιθανότητες δείχνουν ότι αν ήταν δυνατόν να οδηγήσει κάποιος κατά μήκος των μονοπατιών αυτών θα υπήρχε διαθεσιμότητα 50%, 90% και 95%. Τα σχήματα (β), (γ) δείχνουν σχηματικά τέτοιες περιπτώσεις για τα 50%, 90% επίπεδα αντίστοιχα.



Σχήμα 2.13-κάλυψη περιοχής

Αν θεωρήσουμε  $R$  την ακτίνα της περιοχής κάλυψης η παράμετρος  $F_u$  ορίζεται ως η πιθανότητα κάλυψης περιοχής που αντικατοπτρίζει το σύνολο της περιοχής στην οποία το σήμα έχει ισχύ μεγαλύτερη από κάποιο συγκεκριμένο κατώφλι,  $X_0$ .

$$F_u = \frac{1}{\pi R^2} \int P(x_0) dA \text{ με } P(x_0) = \Pr ob(x \geq x_0) \quad (2.36)$$

Αν θεωρήσουμε ότι η μέση λαμβανομένη ισχύς σε απόσταση  $r$  δίνεται από την σχέση  $\bar{x} = \alpha - 10n \log(\frac{r}{R})$  όπου  $\alpha$  η μέση λαμβανόμενη ισχύς σε απόσταση  $R$ . Οι αργές μεταβολές, λόγω σκίασης ακολουθούν γκαουσιανή κατανομή (σε dB) οπότε

$$p(x) = \frac{1}{\sigma_L \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x - \bar{x}}{2\sigma_L^2}\right] \quad (2.37)$$

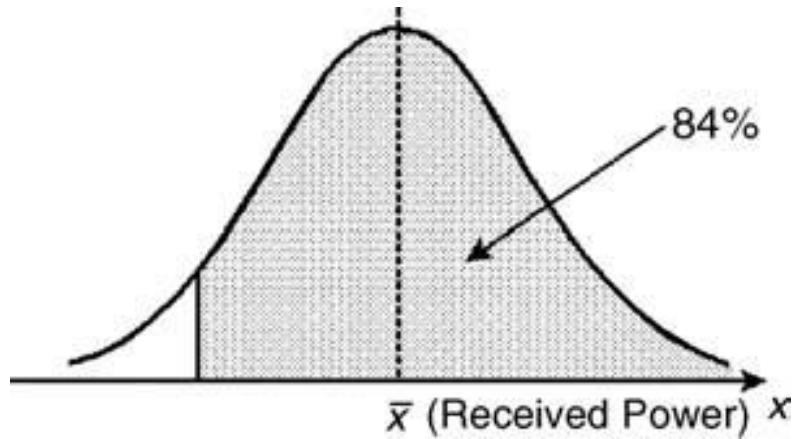
Η πιθανότητα ώστε το  $x$  να ξεπερνά ένα δοσμένο κατώφλι  $X_0$  σε μια απόσταση  $r=R$  (όριο περιοχής) από τον σταθμό βάσης είναι:

$$P(x_0, R) = \Pr ob(x \geq x_0) = \int_{x_0}^{\infty} p(x) dx = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x_0 - \bar{x}}{\sigma_L \sqrt{2}}\right) \quad (2.38)$$

Για παράδειγμα [17], αν οι τιμές των  $\sigma_L, \bar{x}$  σε απόσταση  $R$  είναι  $-100\text{dBm}$  και  $10\text{dB}$  αντίστοιχα και αν το κατώφλι ισχύος είναι  $X_0 = -110\text{dBm}$  η πιθανότητα ώστε να ξεπεραστεί το κατώφλι σε απόσταση  $R$  είναι:

$$P(x_0, R) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = 0.84$$

δηλαδή 84%. Αυτό φαίνεται και στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 2.14-πιθανότητα κάλυψης απο γκαουσιανη κατανομή

Η  $P(X_0, R)$  για κάθε απόσταση  $r$  από τον σταθμό βάσης δίνεται από τον τύπο

$$P(x_0, r) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{x_0 - a + 10n \log\left(\frac{r}{R}\right)}{\sigma_L \sqrt{2}}\right) \quad (2.39)$$

ενώ η πιθανότητα κάλυψης προκύπτει απο τον τύπο:

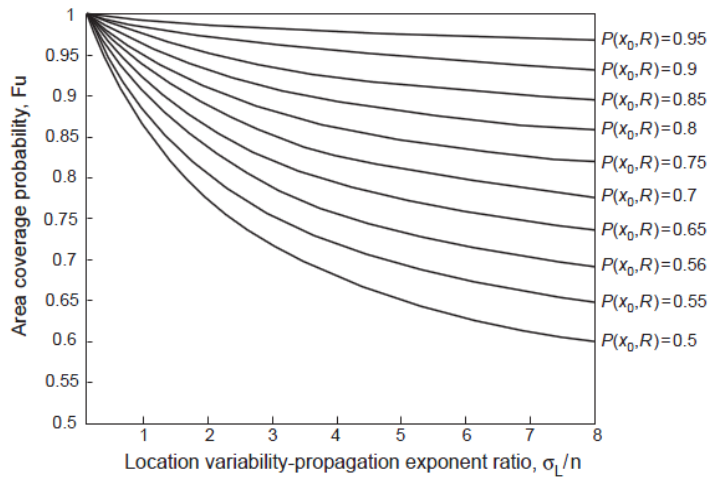
$$F_u = \frac{1}{\pi R^2} \int_{\pi R^2} P(x_0, r) dA \quad \text{με } dA = r dr d\varphi \quad (2.40)$$

Μετά απο κάποιες πράξεις η πιθανότητα κάλυψης περιοχής δίνεται από [18],[19]:

$$F_u = \frac{1}{2} \left( 1 - \operatorname{erf}(a) + \exp\left(\frac{1-2ab}{b^2}\right) \left[ 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{1-ab}{b}\right) \right] \right) \quad (2.41)$$

$$\text{Όπου } a = \frac{x_0 - \alpha}{\sigma_L \sqrt{2}}, b = \frac{10n \log(e)}{\sigma_L \sqrt{2}}$$

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται η πιθανότητα κάλυψης περιοχής για διάφορες τιμές του  $P(X_0, R)$  και για διάφορες τιμές του λόγου  $\sigma_L / n$  [14].



Σχήμα 2.15-πιθανότητα κάλυψης περιοχής ως συνάρτηση του λόγου  $\sigma_L/n$  για κάθε  $P(X_0, R)$

Για παράδειγμα για  $\sigma_L/n=4$  και  $P(X_0, R)=0.5$  βρίσκουμε  $F_u=0.7=70\%$

## 2.6 Τεχνικές Διαφορικής Λήψης

Ένας παράγοντας που υποβαθμίζει σημαντικά την ποιότητα των ζεύξεων είναι οι διαλείψεις. Οι τεχνικές διαφορικής λήψης είναι ένας σχετικά εύκολος αλλά πολύ αποδοτικός τρόπος για να αντιμετωπιστούν οι επιπτώσεις των διαλείψεων και να βελτιωθεί η ποιότητα μιας ασύρματης ζεύξης. Οι τεχνικές αυτές εκμεταλλεύονται την τυχαία μεταβολή των χαρακτηριστικών του ασύρματου διαύλου. Συγκεκριμένα, σε μια τεχνική διαφορισμού το σύστημα εκπομπής ή/και λήψης χρησιμοποιεί πολλά "κανάλια", δηλαδή πολλαπλές εκδοχές του εκπεμπόμενου ή λαμβανόμενου σήματος, που ονομάζονται κλάδοι διαφορισμού (diversity branches) και είναι μεταξύ τους ανεξάρτητα, ή ασυσχέτιστα σε μεγάλο βαθμό. Έτσι, αν ένα κανάλι παρουσιάζει έντονες διαλείψεις ή γενικά δυσμενείς συνθήκες διάδοσης η πιθανότητα να παρουσιάσουν το ίδιο δυσμενείς συνθήκες ταυτόχρονα, και τα υπόλοιπα (ασυσχέτιστα) κανάλια είναι πολύ χαμηλή. Γενικά με τις τεχνικές διαφορισμού μπορεί να επιτευχθεί βελτίωση του σηματοθορυβικού λόγου στο δέκτη, μέχρι και 20-30dB.

Τα κανάλια μπορεί να διαφοροποιούνται ανάλογα με οποιοδήποτε παράγοντα τα καθιστά μεταξύ τους ανεξάρτητα, ή ασυσχέτιστα σε μεγάλο βαθμό. Έτσι έχουμε διαφορική λήψη/εκπομπή χώρου (space diversity, antenna diversity) όπου έχουμε πολλαπλές κεραίες για εκπομπή/λήψη του σήματος, διαφορική εκπομπή/λήψη

συχνότητας (frequency diversity) όπου τα διαφορετικά κανάλια αντιστοιχούν σε διαφορετικές ραδιοσυχνότητες, διαφορεική εκπομπή/λήψη πόλωσης (polarization diversity) και άλλες τεχνικές ή συνδυασμούς αυτών.

Από τις παραπάνω τεχνικές θα εξετάσουμε μόνο τη διαφορεική λήψη χώρου που χρησιμοποιούμε αργότερα στις προσομοιώσεις

### 2.6.1 Διαφορική λήψη χώρου

Η τεχνική της διαφορικής λήψης χώρου απαιτεί τη χρήση πολλαπλών κεραιών λήψης (τουλάχιστον 2), τοποθετημένων σε τέτοια μεταξύ τους απόσταση, ώστε οι δίαυλοι μέσω των οποίων λαμβάνουν το σήμα να είναι ασυσχέτιστοι. Αν τα κανάλια είναι ασυσχέτιστα, τότε η πιθανότητα να υφίστανται ταυτόχρονη διάλειψη θα είναι μικρή. Έτσι επιτυγχάνεται σημαντική βελτίωση της μέσης τιμής του σηματοθορυβικού λόγου, χωρίς αύξηση της εκπεμπόμενης ισχύος [2].

Ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας του κόμβου-δέκτη στη συγκεκριμένη διπλωματική ασχολούμαστε με τρία είδη σχημάτων διαφορικής λήψης. Αυτά είναι:

- επιλεκτικός συνδυασμός (selection combining-SC)
- συνδυαστική μεγίστου λόγου (Maximal Ratio Combining-MRC)
- συνδυαστική σταθερού κέρδους (Equal Gain Combining-EGC)

Αν θεωρήσουμε διπλή διαφορική λήψη χώρου όπου οι κλάδοι ακολουθούν τη διδιάστατη λογαριθμοκανονική κατανομή τότε η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας θα είναι [20,21]:

$$f_{\gamma_1, \gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2) = \frac{\exp\left(-\frac{u_1^2 + u_2^2 - 2\rho u_1 u_2}{2(1-\rho^2)}\right)}{2\pi\sigma_1\sigma_2\gamma_1\gamma_2\sqrt{1-\rho^2}} \quad (2.42)$$

Όπου  $\gamma_1, \gamma_2$  είναι σε γραμμική κλίμακα με μέσο  $\mu_i$  και τυπική απόκλιση  $\sigma_i$  σε Neper ( $1\text{Np} = 10/\ln(10)\text{dB}$ ),  $\rho$  είναι ο συντελεστής συσχέτισης και

$$u_i = \frac{\ln(\gamma_i) - \mu_i}{\sigma_i}, i = 1, 2 \quad (2.43)$$

Ο σηματοθορυβικός λόγος στην έξοδο του diversity combiner για τα MRC,SC,EGC σε γραμμική κλίμακα είναι:

$$\gamma_c(\gamma_1, \gamma_2) = \begin{cases} \gamma_1 + \gamma_2, & MRC \\ \frac{(\sqrt{\gamma_1} + \sqrt{\gamma_2})^2}{2}, & EGC \\ \max(\gamma_1, \gamma_2), & SC \end{cases} \quad (2.44)$$

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΥΧΑΙΩΝ ΣΤΑΣΕΩΝ

---

### 3.1 Εισαγωγή

Στο πρώτο μέρος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας γίνονται προσομοιώσεις ad-hoc δικτύων με βάση το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων που περιγράφεται παρακάτω. Το μοντέλο που προσομοιώνουμε απεικονίζει ένα σύνολο κάποιων κόμβων (100 ή 150 ανάλογα με την περίπτωση), οι οποίοι κινούνται μέσα στα γνωστά πλαίσια μιας οριοθετημένης περιοχής ((250m)x(250m)). Σημαντικό χαρακτηριστικό κάθε κόμβου αποτελεί η ταχύτητα του σε κάθε στιγμιότυπο. Έτσι, επιλέγονται σχετικά υψηλές ταχύτητες που κυμαίνονται στο διάστημα 15-30m/s και δείχνουν ότι ο κάθε κόμβος είναι κινητός αλλά και σχετικά χαμηλές που κυμαίνονται στο διάστημα 0.2-2m/s που αφορούν κόμβους που κινούνται ελάχιστα.

Η ζεύξη μεταξύ δύο κόμβων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης φαίνεται σχηματικά με μια γραμμή που ενώνει τους δυο κόμβους. Ζεύξη πραγματοποιείται όταν ο σηματοθορυβικός λόγος μεταξύ των δύο κόμβων είναι μεγαλύτερος από μια συγκεκριμένη τιμή. Η τιμή αυτή που αποτελεί την ισχύ κατωφλίου επιλέγεται να είναι 10dB. Φαίνεται ξεκάθαρα ότι ένα τέτοιο ασύρματο δίκτυο παραπέμπει σε ad-hoc δίκτυο που μπορεί να χαρακτηριστεί με βάση την ταχύτητα των κόμβων που το απαρτίζουν. Για παράδειγμα η ταχύτητα 15-30m/s παραπέμπει σε οχήματα (54-108km/h) που επικοινωνούν και ανταλλάσσουν δεδομένα μέσα στην περιοχή προσομοίωσης. Τέτοια παραδείγματα όπως έχουμε προαναφέρει μπορεί να αφορούν κάποιο δίκτυο VANET. Αντίστοιχα οι χαμηλές ταχύτητες 0.2-2m/s αφορούν κόμβους με ελάχιστη κινητικότητα που μπορεί να είναι ένα δίκτυο αισθητήρων ή οι φορητές συσκευές (laptop κινητό τηλέφωνο ,υπολογιστές χειρός) των χρηστών ενός δικτύου συνεδρίου.

Το βασικότερο μέγεθος που μελετάται σε κάθε προσομοίωση είναι η συνδεσιμότητα (connectivity) του δικτύου. Η συνδεσιμότητα εκφράζει το ποσοστό επί τοις εκατό και δείχνει πόσοι κόμβοι συνδέονται μεταξύ τους είτε άμεσα είτε

έμμεσα. Διάφοροι παράγοντες που την επηρεάζουν είναι ο αριθμός των κόμβων στο δίκτυο, η ισχύς κατωφλίου, η ταχύτητα των κόμβων, το μέγεθος της περιοχής προσομοίωσης, η απόσταση μεταξύ των κόμβων, οι απώλειες διαδρομής και η σκίαση.

Σκοπός του συγκεκριμένου τμήματος της διπλωματικής εργασίας είναι να μελετηθεί η συνδεσιμότητα του δικτύου σε ένα περιβάλλον όπου η σκίαση θεωρείται συσχετισμένη.

Παρακάτω περιγράφεται αρχικά το μοντέλο κινητικότητας που χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε την κίνηση των κόμβων στο δίκτυο. Στη συνέχεια, δίνεται η έκφραση του σηματοθορυβικού λόγου και οι τιμές των παραμέτρων του που επιλέγουμε (σκίαση, απώλειες διαδρομής, θόρυβος...). Έπειτα, παραθέτουμε και επεξηγούμε τον κώδικα MATLAB που χρησιμοποιήθηκε και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων και τέλος παραθέτουμε κάποια βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν.

### ***3.2 Μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων (Random Waypoint Mobility Model)***

Το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων ανήκει, στην κατηγορία των τυχαίων Μοντέλων Κινητικότητας και προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Johnson και Maltz [22]. Η σχετικά απλή δομή του συγκεκριμένου μοντέλου καθώς και η απλότητά του το καθιστούν από τα πιο ευρέως διαδεδομένα. Το μοντέλο αυτό περιλαμβάνει χρόνους παύσης μεταξύ των αλλαγών στην κατεύθυνση και την ταχύτητα [23].

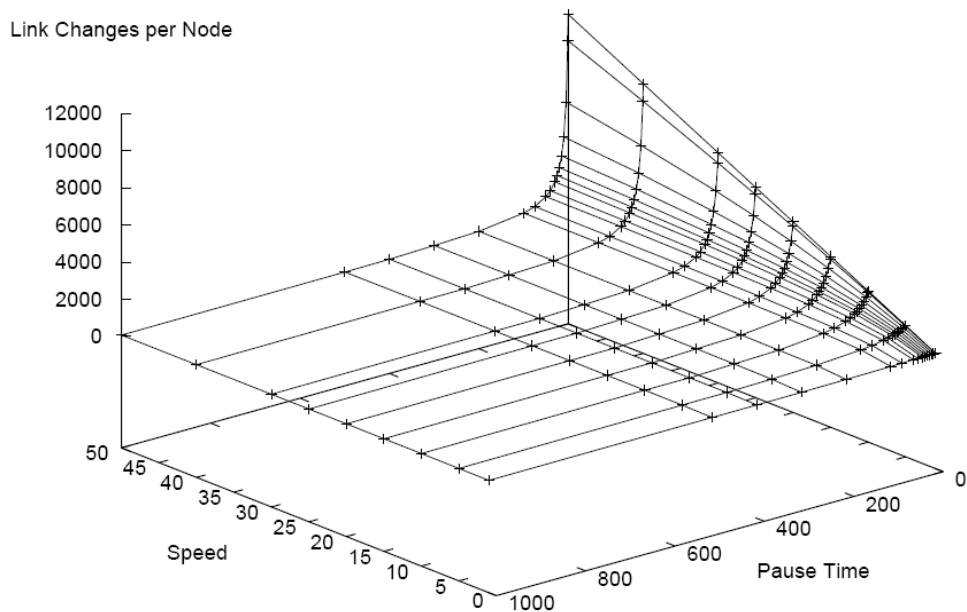
Ο κινητός κόμβος διαλέγει έναν τυχαίο προορισμό μέσα στην περιοχή προσομοίωσης καθώς και μια τιμή της ταχύτητας, η οποία συνήθως είναι ομοιόμορφα κατανομημένη εντός ενός διαστήματος τιμών. Στη συνέχεια, ο κινητός κόμβος κινείται προς τον επιλεγθέντα προορισμό με την επιλεγθείσα ταχύτητα και αφού καταφθάσει εκεί, σταματά για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο, προτού ξεκινήσει και πάλι την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε. Η χρονική περίοδος που ο κόμβος



παραμένει ακίνητος αποκαλείται χρόνος παύσης. Ο χρόνος παύσης όπως γίνεται αντιληπτό μεσολαβεί μεταξύ των αλλαγών κατεύθυνσης και ταχύτητας του κόμβου.

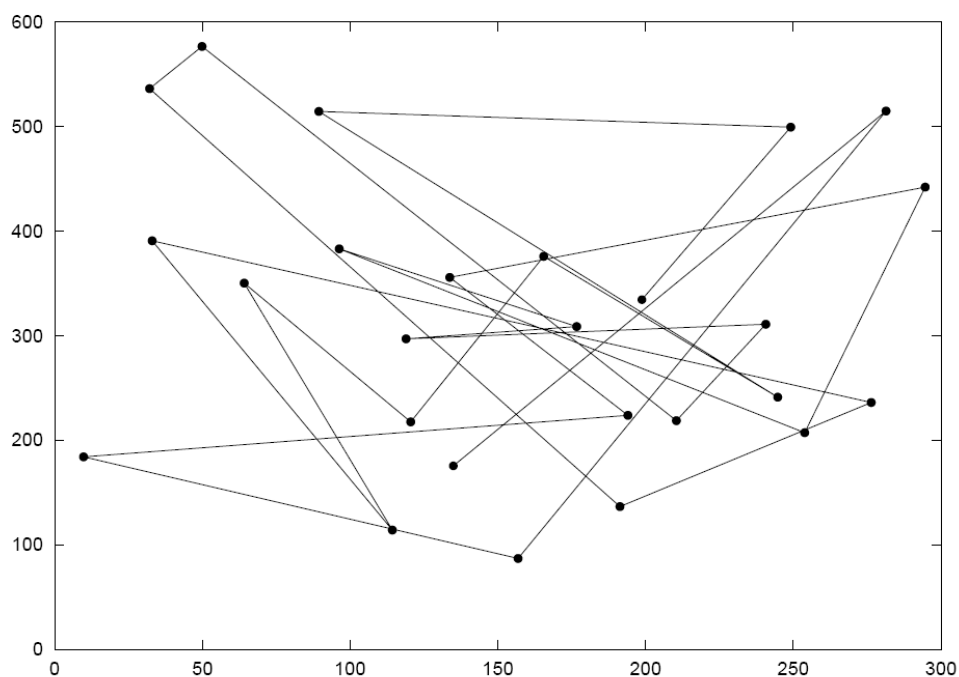
Στις περισσότερες περιπτώσεις όπου το συγκεκριμένο μοντέλο χρησιμοποιείται για προσομοίωση, τα κινητά τερματικά κατανέμονται ομοιόμορφα στο χώρο πριν την έναρξή της. Αυτή η αρχική ομοιόμορφη κατανομή, δεν είναι αντιπροσωπευτική του τρόπου με τον οποίο οι κόμβοι κατανέμονται κατά τη διάρκεια της κίνησής τους στη σταθερή κατάσταση. Έτσι λοιπόν παρατηρείται μεγάλη μεταβολή στον αριθμό των γειτόνων που έχει ο κάθε κόμβος, ειδικά όταν μιλάμε για το πρώτο χρονικό διάστημα της προσομοίωσης. Ως γείτονας ενός κινητού κόμβου, θεωρείται οποιοσδήποτε κόμβος βρίσκεται εντός του εύρους εκπομπής του κινητού κόμβου. Για παράδειγμα, αν υπάρχουν 200 κινητοί κόμβοι στο δίκτυο και ένας κόμβος έχει 40 γείτονες, τότε το τρέχον ποσοστό γειτόνων του είναι 20% . Αυτή η μεγάλη μεταβολή λοιπόν που παρατηρείται, παράγει μια επίσης υψηλή διακύμανση στα αποτελέσματα της επίδοσης του δικτύου, εκτός κι αν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης υπολογίζονται μετά από μεγάλους χρόνους προσομοίωσης.

Υπάρχει επίσης μια περίπλοκη σχέση μεταξύ της ταχύτητας του κόμβου και του χρόνου παύσης στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων. Για παράδειγμα, ένα σενάριο με γρήγορους κόμβους και μεγάλους σε διάρκεια χρόνους παύσης παράγει στην πραγματικότητα ένα πιο σταθερό δίκτυο σε σχέση με ένα σενάριο με πιο αργούς κόμβους και συντομότερους χρόνους παύσης. Το Σχήμα 3.1 παρουσιάζει το ρυθμό διακοπής της ζεύξης, χρησιμοποιώντας το Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων, ως συνάρτηση του χρόνου παύσης και της ταχύτητας. Από το σχήμα διαπιστώνουμε πως για μεγάλες τιμές του χρόνου παύσης (π.χ. μεγαλύτερες από 20 δευτερόλεπτα) έχουμε τη δημιουργία ενός σταθερού δικτύου (δηλαδή λίγες αλλαγές ζεύξης ανά κόμβο), ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες [24]. Με άλλα λόγια, το σχήμα αυτό δείχνει πως το κινητό δίκτυο είναι αρκετά σταθερό για όλες τις τιμές του χρόνου παύσης που είναι μεγαλύτερες από 20 δευτερόλεπτα.



Σχήμα 3.1 Ρυθμός διακοπής ζεύξης σε συνάρτηση με την ταχύτητα και το χρόνο παύσης στο Μοντέλο Κινητικότητας Τυχαίων Στάσεων

Τέλος παρουσιάζουμε ένα διάγραμμα(σχήμα 3.2) στο οποίο φαίνεται η κίνηση ενός κόμβου σε μια περιοχή προσομοίωσης, ξεκινώντας από ένα τυχαίο σημείο και με ταχύτητα η οποία είναι ομοιόμορφα κατανομημένη σε ένα διάστημα  $[\min V, \max V]$ [25]



Σχήμα 3.2- κίνηση ενός κόμβου σε μια περιοχή προσομοίωσης

### 3.3 Έκφραση του σηματοθορυβικού λόγου

Ο σηματοθορυβικός λόγος SNR που χρησιμοποιείται για τις προσομοιώσεις έχει τη μορφή:

$$SNR = P_t + G_t + G_r - 10\alpha \log(d) - 10\log\left(\frac{4\pi d_0}{\lambda}\right) - N + X \quad (3.1)$$

όπου  $P_t$  είναι η ισχύς εκπομπής,  $G_t$ ,  $G_r$  τα κέρδη κεραιών πομπού δέκτη αντίστοιχα,  $\alpha$  ο παράγοντας απωλειών διαδρομής,  $d$  η απόσταση μεταξύ δύο κόμβων,  $d_0$  η απόσταση αναφοράς,  $\lambda$  το μήκος κύματος,  $N$  η ισχύς του θορύβου και  $X$  ο παράγοντας που αντιστοιχεί στη σκίαση.

Όλες οι παραπάνω μεταβλητές έχουν λογαριθμικές μονάδες. Οι παραπάνω παράμετροι επιλέγονται:

$$G_t = 2.5 \text{dBi}$$

$$G_r = 2.5 \text{dBi}$$

$$d_0 = 1 \text{m}$$

$$f = 2.4 \text{GHz} \Rightarrow \lambda = \frac{c}{f} = 0.125 \text{m}$$

$$N = -50 \text{dBm}$$

Ο παράγοντας  $-10\alpha \log(d)$  αντιστοιχεί στις απώλειες διαδρομής και "επιβαρύνει" τον SNR όσο αυξάνεται το  $\alpha$  και το  $d$ .

#### 3.3.1 Μοντέλο σκίασης

Στο περιβάλλον το οποίο θέλουμε να προσομοιώσουμε η σκίαση ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή. Η τυπική απόκλιση της σκίασης στο μοντέλο παίρνει τις τιμές  $\sigma$  και  $\sigma_I$ . Η τιμή του  $\sigma$  είναι σταθερή και επιλέγεται στην αρχή της προσομοίωσης. Η τιμή του  $\sigma_I$  δίνεται από τον τύπο:

$$\sigma_I = \sigma(\sqrt{1 - \rho^2} + \rho) \quad (3.2)$$

όπου  $\rho$  ο συντελεστής συσχέτισης.

Ο τύπος αυτός προκύπτει από την υπόθεση ότι ένα διπλού άλματος (dual branch) περιβάλλον συσχετισμένης σκίασης μπορεί να θεωρηθεί ασυσχέτιστο εάν αυξηθεί η μια τιμή της τυπικής απόκλισης της σκίασης. Έτσι λοιπόν για κάθε κόμβο η τυπική απόκλιση της σκίασης για τα διαφορετικά μονοπάτια σύνδεσης του με τους γείτονες του παίρνει εναλλάξ τις τιμές  $\sigma$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma$ ,  $\sigma_1$ ,  $\sigma$  κ.ο.κ μέχρι να βρεθεί το σύνολο των γειτόνων του κόμβου αυτού.

Η σχέση (3.2) προέκυψε από τη μεθοδολογία που περιγράφεται στο [20]. Συγκεκριμένα θεωρούμε δύο σήματα που φτάνουν στο δέκτη. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του SNR που προκύπτει από τα δύο αυτά σήματα θα είναι

$$f_c(\gamma) = \int_0^{\infty} \int_0^{\infty} f_{\gamma_1\gamma_2}(\gamma_1, \gamma_2) \delta(\gamma - \gamma_c(\gamma_1, \gamma_2)) d\gamma_1 d\gamma_2 \quad (3.3)$$

,όπου  $\delta(x)$  είναι η συνάρτηση dirac. Αν εφαρμόσουμε την (3.3) στην MGF(moment

generating function)  $M_\gamma(s) = \int_0^{\infty} f_c \exp(s\gamma) d\gamma$  και χρησιμοποιώντας το μετα-

σχηματισμό  $u_i = (\ln(\gamma_i) - \mu_i) / \sigma_i$  ( $i=1,2$ ) και την αλλαγή μεταβλητών

$(y_1, y_2) = ((u_1 - \rho u_2) / \sqrt{2(1-\rho^2)}, u_2 / \sqrt{2})$ , με ολοκλήρωση Gauss-Hermitte πάνω στις

$y_1, y_2$  προκύπτει η γενική έκφραση της MGF στην έξοδο του diversity combiner.

$$M_\gamma(s) \approx \frac{1}{\pi} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N w_i w_j \exp[s\gamma_c'(i, j)] \quad (3.4)$$

$$\gamma_c'(i, j) \triangleq \gamma_c(\exp[\sigma_1 \sqrt{2}(\sqrt{1-\rho^2})x_i + \rho x_j] + \mu_1, \exp[\sigma_2 \sqrt{2}x_j + \mu_2]) \quad (3.5)$$

Όπου  $x_i, x_j$  είναι οι ρίζες και  $w_i, w_j$  τα βάρη του N-οστής τάξης ερμιτιανού πολυωνύμου.

Ο παράγοντας συσχέτισης  $\rho$  εμφανίζεται μόνο στον πρώτο παράγοντα της εκθετικής της σχέσης (3.4)

$$g(\sigma_1, \rho) = \sigma_1 \sqrt{2}(\sqrt{1-\rho^2})x_i + \rho x_j + \mu_1 \quad (3.6)$$

Μπορεί να δειχθεί ότι υπάρχει μια αυξημένη τυπική απόκλιση  $\sigma_1'$  που για τον πρώτο κλάδο που μηδενίζει τη συσχέτιση.

$$g(\sigma'_1, 0) = \sqrt{2}x_i\sigma'_1 + \mu_1 \quad (3.7)$$

Αν εξισώσουμε  $g(\sigma_1, \rho) = g(\sigma'_1, 0)$  προκύπτει

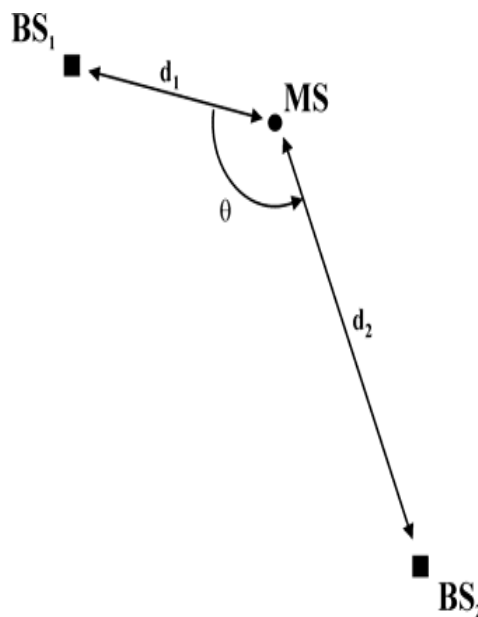
$$\sigma'_1 = \sigma_1(\sqrt{1-\rho^2} + \rho x_j / x_i) \quad (3.8)$$

Το  $\sigma'_1$  είναι πάντα μεγαλύτερο από το  $\sigma_1$  για όλες τις τιμές του παράγοντα συσχέτισης. Αν θεωρήσουμε  $i=j$  τότε προκύπτει

$$\sigma'_1 = \sigma_1(\sqrt{1-\rho^2} + \rho) \quad (3.9)$$

Έτσι λοιπόν ο τύπος (3.2) που χρησιμοποιούμε προκύπτει άμεσα από τον τύπο (3.9).

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τη συσχετισμένη σκίαση είναι αυτό που περιγράφεται στο [26]. Η γεωμετρία του μοντέλου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Σχήμα 3.3 γεωμετρικό μοντέλο που περιγράφει τη συσχέτιση της σκίασης

Η συσχέτιση υπολογίζεται με βάση τις παρακάτω εξισώσεις:

$$\rho = \begin{cases} \sqrt{\frac{d_1}{d_2}}, \text{ για } 0 \leq \theta \leq \theta_T \text{ και } d_1 \geq \frac{d_c}{2} \\ \frac{\theta_T^\gamma}{\theta} \sqrt{\frac{d_1}{d_2}} \text{ για } \theta_T \leq \theta < \pi \text{ και } d_1 \geq \frac{d_c}{2} \\ \sqrt{\frac{d_c}{2d_2}} \text{ για } d_1 < \frac{d_c}{2} \end{cases} \quad (3.3)$$

όπου  $\rho$  ο παράγοντας συσχέτισης και  $\gamma$  μια σταθερά που εξαρτάται από το ύψος του εδάφους και των εμποδίων και  $d_1$  η μικρότερη από τις δυο αποστάσεις.

$$\text{Επίσης, } \theta_T = \sin^{-1}\left(\frac{d_{corr}}{2d_1}\right) \quad (3.4)$$

Έτσι λοιπόν με βάση το συγκεκριμένο μοντέλο βρίσκουμε στο πρόγραμμα το διαφορετικό κάθε φορά  $\rho$  που αλλάζει όπως φαίνεται από τις παραπάνω εξισώσεις και υπολογίζουμε μέσω αυτού το διαφορετικό κάθε φορά  $\sigma_l$  που υπολογίζεται από τον παραπάνω τύπο.

### 3.4 Ανάλυση Κώδικα Matlab

Η βασική ιδέα που χρησιμοποιήθηκε για το πρώτο μέρος είναι η εξής. Πρώτα χρησιμοποιήθηκε ένα διπλό for loop για να βρεθούν οι αποστάσεις και οι γωνίες που σχηματίζονται μεταξύ των κόμβων αν θεωρήσουμε κάθε φορά τον  $i$  κόμβο ως κέντρο του συστήματος συντεταγμένων. Οι γωνίες υπολογίζονται με βάση τον θετικό άξονα των  $x$  παίρνουν μόνο θετικές τιμές και αυξάνονται κυκλικά αντιωρολογιακά έτσι ώστε να έχουν τιμές:

- 1ο τεταρτημόριο:  $0^\circ \leq f(i, j) \leq 90^\circ$
- 2ο τεταρτημόριο:  $90^\circ \leq f(i, j) \leq 180^\circ$
- 3ο τεταρτημόριο:  $180^\circ \leq f(i, j) \leq 270^\circ$
- 4ο τεταρτημόριο:  $270^\circ \leq f(i, j) \leq 360^\circ$

Έτσι, προκύπτει ο παρακάτω κώδικας σε MATLAB

```
for i=1:N-1
```

```

for j=i+1:N

d(i,j)=sqrt((nodes(i).curX-nodes(j).curX)^2+(nodes(i).curY-
nodes(j).curY)^2);

%-----1° τεταρτημόριο-----

if      (nodes(j).curX-nodes(i).curX)>=0      &      (nodes(j).curY-
nodes(i).curY)>=0

f(i,j)=180*atan((nodes(j).curY-nodes(i).curY)/(nodes(j).curX-
nodes(i).curX))/3.14;

%-----2° τεταρτημόριο-----

elseif  (nodes(j).curX-nodes(i).curX)<=0      &      (nodes(j).curY-
nodes(i).curY)>=0

f(i,j)=180*atan((nodes(j).curY-nodes(i).curY)/(nodes(j).curX-
nodes(i).curX))/3.14 +180;

%-----3° τεταρτημόριο-----

elseif  (nodes(j).curX-nodes(i).curX)<=0      &      (nodes(j).curY-
nodes(i).curY)<=0

f(i,j)=180*atan((nodes(j).curY-nodes(i).curY)/(nodes(j).curX-
nodes(i).curX))/3.14 +180;

%-----4° τεταρτημόριο-----

elseif  (nodes(j).curX-nodes(i).curX)>=0      &      (nodes(j).curY-
nodes(i).curY)<=0

f(i,j)=180*atan((nodes(j).curY-nodes(i).curY)/(nodes(j).curX-
nodes(i).curX))/3.14 + 360;

end end end

```

Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση sort της MATLAB για να ταξινομηθούν οι γωνίες που υπολογίστηκαν στο προηγούμενο κομμάτι κώδικα. Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει εκτός από τον ταξινομημένο πίνακα γωνιών και το index

των κόμβων(που μένει στον πίνακα P) για να ξέρουμε ακριβώς την τοποθεσία του κάθε κόμβου σε σχέση με τον κόμβο που κάνουμε αναζήτηση.

```
[y,P]= sort(f,2);
```

Έπειτα το πρόγραμμα μπαίνει πάλι σε διπλό βρόχο που “ψάχνει” χρησιμοποιώντας το σηματοθορυβικό λόγο τις συνδέσεις μεταξύ των κόμβων. Σύνδεση έχουμε όταν ο λόγος αυτός ξεπερνά το κατώφλι ισχύος των 10dB. Η αναζήτηση γίνεται με την εξής λογική:

Για κάθε κόμβο που αντιστοιχεί σε ένα loop του for βρόχου θεωρώ αυτόν ως κέντρο των συντεταγμένων. Η τυπική απόκλιση της σκίασης παίρνει τιμές  $\sigma$  και  $\sigma_1$ . Για τον πρώτο γείτονα του  $i$  κόμβου(πρώτο με τη λογική που αναφέραμε προηγουμένως) η τυπική απόκλιση της σκίασης είναι  $\sigma$  για τον δεύτερο είναι  $\sigma'$ , για τον τρίτο είναι  $\sigma$  και ούτω καθεξής μέχρι να βρεθούν όλοι οι γείτονες του  $i$  κόμβου.

Για παράδειγμα για να βρω τους γείτονες του πρώτου κόμβου ( $i=1$ ) αρχικά το πρόγραμμα υπολογίζει όλες τις γωνίες μεταξύ του κόμβου αυτού, και όλων των υπολοίπων. Βρίσκει δηλαδή τις  $f(1,2), f(1,3), \dots, f(1,N)$ . Στη συνέχεια ταξινομεί τις γωνίες αυτές σε αύξουσα σειρά και τις αποθηκεύει στον πίνακα  $y$  ενώ ο αριθμός του κάθε κόμβου (index) κρατείται στον πίνακα  $P$ . Έτσι, για να κάνουμε κυκλική αναζήτηση απλά διατρέχουμε τον πίνακα  $P$  που μας δίνει με τη σειρά τους κόμβους που υπάρχουν γύρω από τον  $i$  κόμβο αν κινηθούμε αντιωρολογιακά με αρχή τον θετικό ημιάξονα των  $x$ . Μέσω της εντολής  $k=P(i,m)$  που υπάρχει μέσα στο δεύτερο for loop στο παρακάτω κομμάτι κώδικα βρίσκουμε ποιός είναι ο  $k$  κόμβος σύμφωνα με την κυκλική αναζήτηση.

Η βοηθητική μεταβλητή `found1` χρησιμοποιείται για να γνωρίζει το πρόγραμμα εάν έχει βρεθεί ο γειτονικός κόμβος με τυπική απόκλιση σκίασης  $\sigma$ . Αν έχει βρεθεί τότε `found1=1`, αλλιώς `found1=0`. Αν `found1=1`, τότε γίνεται κυκλική αναζήτηση για γειτονικούς κόμβους με τυπική απόκλιση σκίασης  $\sigma_1$  που προκύπτει από τον τύπο που αναφέρθηκε παραπάνω.

Μια παραδοχή του παρακάτω κώδικα είναι ότι όταν για παράδειγμα ψάχνουμε τους γείτονες του δεύτερου κόμβου  $i=2$  δεν λαμβάνεται υπόψη ο κόμβος 1, αφού η σύνδεση η μη με τον κόμβο 2 έχει ήδη ελεγχθεί στο προηγούμενο βήμα. Έτσι ο



κόμβος 1 ψάχνει για γείτονες από τον κόμβο 2 μέχρι τον κόμβο N, ο κόμβος 2 ψάχνει από τον κόμβο 3 μέχρι τον κόμβο N και ο κόμβος N-1 ψάχνει μόνο αν συνδέεται με τον κόμβο N.

```

for i=1:N-1

found1=0;

for m=i+1:N

k=P(i,m);

if (found1==0 ) %an den exw brei ton kombo me tupikh apoklish σ bainw
sto loop

ShadowingAttenuation1=random('normal',0,s);

Snr=Pt+2.5+2.5-10*a*log10(d(i,k))-N-
10*log10(4πdo/wavefront)+ShadowingAttenuation1;

if Snr>Threshold

plithosGrammwn=plithosGrammwn+1;

A(plithosGrammwn)=line([nodes(i).curX nodes(k).curX],[nodes(i).curY
nodes(k).curY],'Marker','.', 'MarkerEdgeColor','r','LineStyle
','-', 'color','black');

Links_Matrix(i,k)=1;

Links_Matrix(k,i)=1;

found1=1;

komvos1=k;

end

```

Στη συνέχεια περιγράφονται οι παράμετροι του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε [26] με  $\gamma=0.3$  και  $d_{corr}=1/e$

%-----παράμετροι μοντέλου-----

```

elseif (found1==1)

d1=min(d(i,komvos1),d(i,k));

d2=max(d(i,komvos1),d(i,k));

if (f(i,k)-f(i,komvos1))<=180

thita=(f(i,k)-f(i,komvos1));

thitaT=asind(dcorr/(2*d1));

elseif (f(i,k)-f(i,komvos1))>180

thita=360-(f(i,k)-f(i,komvos1));

thitaT=asind(dcorr/(2*d1));

end;

if d1>=(dcorr/2)

if ((0<thita) & (thita<=thitaT))

rsysxetishs=d1/d2;

elseif ((thitaT<thita) & (thita<180) )

rsysxetishs=((thitaT/thita)^gamma )*sqrt(d1/d2);

end;

elseif d1<(dcorr/2)

rsysxetishs=sqrt(dcorr/(2*d1));

end

```

Σε αυτό το σημείο υπολογίζουμε το  $\sigma_I$  σύμφωνα με τον τύπο 3.2 και τον συντελεστή συσχέτισης που προέκυψε απο μοντέλο και μετά ελέγχουμε αν υπάρχει σύνδεση μέσω του SNR.

```

s1=s*(sqrt(1-rsysxetishs^2)+rsysxetishs)
ShadowingAttenuation2=random('normal',0,s1);

```

```

Snr=Pt+2.5+2.5-10*a*log10(d(i,k))-N-
10*log10(4*ndof/wavefront)+ShadowingAttenuation2;

if Snr>Threshold

plithosGrammwn=plithosGrammwn+1;

A(plithosGrammwn)=line([nodes(i).curX nodes(k).curX],[nodes(i).curY
nodes(k).curY], 'Marker', '.', 'MarkerEdgeColor', 'r', 'LineStyle
', '-', 'color', 'black');

Links_Matrix(i,k)=1;

Links_Matrix(k,i)=1;

found1=0;

end end end end

```

Τέλος το connectivity υπολογίζεται με βάση τον κώδικα του [27] και τα αποτελέσματα που προέκυψαν αναφέρονται παρακάτω.

### 3.5 Αποτελέσματα προσομοιώσεων

Οι προσομοιώσεις κατηγοριοποιούνται παρακάτω με βάση των αριθμό των κόμβων που αποτελείται το ad-hoc δίκτυο, καθώς και την ταχύτητα κίνησης των κόμβων του δικτύου.

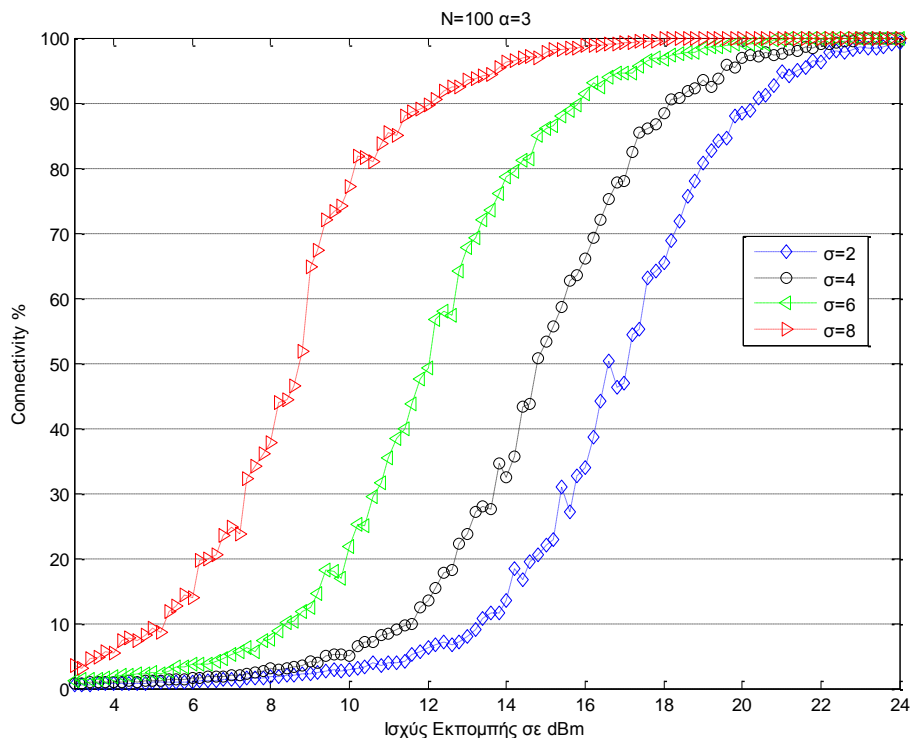
#### 3.5.1 $N=100$ και $v=15-30m/s$

Αρχικά προσομοιώθηκε δίκτυο με 100 κόμβους οι οποίοι κινούνται με το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων με ταχύτητα 15-30 m/s σε ένα χώρο διαστάσεων 250m x 250m. Το κατώφλι καθορίστηκε ίσο με 10dB ενώ η σκίαση επιλέχθηκε να ακολουθεί λογαριθμοκανονική κατανομή με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση  $\sigma=2,4,6$  ή 8 ανάλογα με την προσομοίωση. Το  $\alpha$  παίρνει τις τιμές 3,3.5 και 4 ανάλογα με την προσομοίωση.

Στο πρώτο σχήμα (σχήμα 3.4) οι κόμβοι-εκπομποί εκπέμπουν με ισχύ από 3dBm ως 24 dBm ενώ οι προσομοιώσεις έγιναν με βήμα 0.2dBm. Οι 4 διαφορετικές καμπύλες αντιστοιχούν στα αποτελέσματα για κάθε διαφορετική τιμή του  $\sigma$ , ενώ ο αριθμός των στιγμιοτύπων προσομοίωσης για κάθε τιμή ισχύος επιλέχθηκε 240.

Φαίνεται ξεκάθαρα ότι η συνδεσιμότητα αυξάνεται με την αύξηση της τυπικής απόκλισης της σκίασης όπως ήταν αναμενόμενο αφού ο παράγοντας του SNR που αντιστοιχεί στην σκίαση αυξάνεται με την αύξηση του  $\sigma$  (αφού  $\mu=0$  για κάθε περίπτωση). Βλέπουμε λοιπόν ότι ο ρυθμός αύξησης του συνδεσιμότητας είναι μεγαλύτερος για μεγάλες τιμές του  $\sigma$ .

Για παράδειγμα για μια συγκεκριμένη τιμή της ισχύος εκπομπής πχ 12dBm παρατηρούμε ότι για  $\sigma=2$  η συνδεσιμότητα παίρνει τιμές κάτω του 10%, για  $\sigma=4$  λίγο πάνω από 10%, για  $\sigma=6$  το ποσοστό αυξάνεται ραγδαία και φτάνει το 50% ενώ για  $\sigma=8$  έχουμε 90% συνδεσιμότητα.



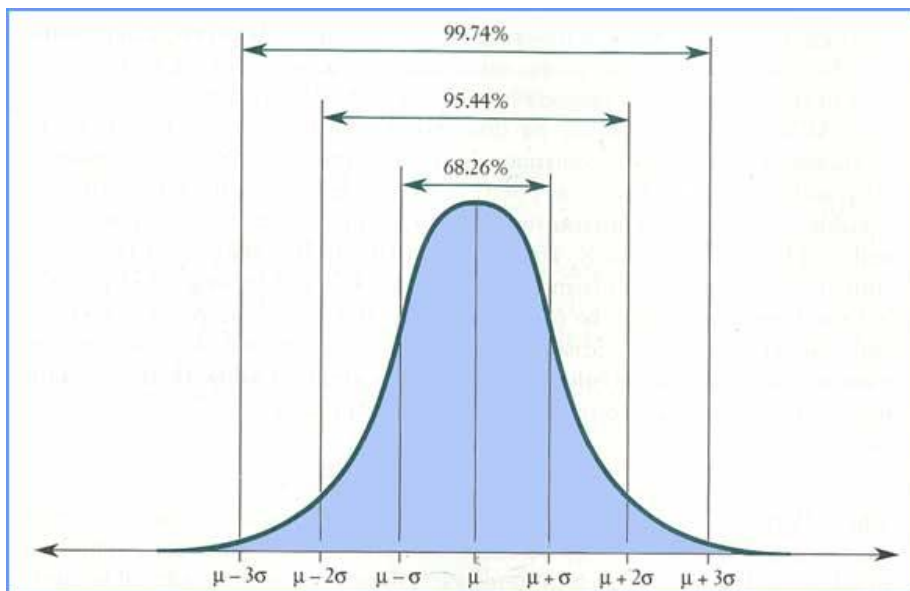
Σχήμα 3.4-συνδεσιμότητα για  $N=100$  και  $\alpha=3$  ως συνάρτηση της ισχύος εκπομπής για  $\sigma=2,4,6,8$ dB

Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι όσο αυξάνεται η τιμή του  $\sigma$  διευκολύνεται η απευθείας ζεύξη μεταξύ κόμβων που βρίσκονται σε σχετικά μεγάλη απόσταση. Αυτό

το γεγονός επαληθεύεται από τα στιγμιότυπα (σχήματα 3.6-3.7). Επιπλέον, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι λόγω της λογαριθμοκανονικής κατανομής της σκίασης είναι πιθανό κάποιοι κόμβοι που βρίσκονται σχετικά κοντά να μην συνδέονται ενώ κάποιοι άλλοι που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση να είναι συνδεδεμένοι. Αυτό είναι περισσότερο εμφανές όσο αυξάνεται η τυπική απόκλιση όπως φαίνεται και για  $\sigma=8\text{dB}$ . Το φαινόμενο αυτό προκύπτει από την φύση της κανονικής κατανομής.

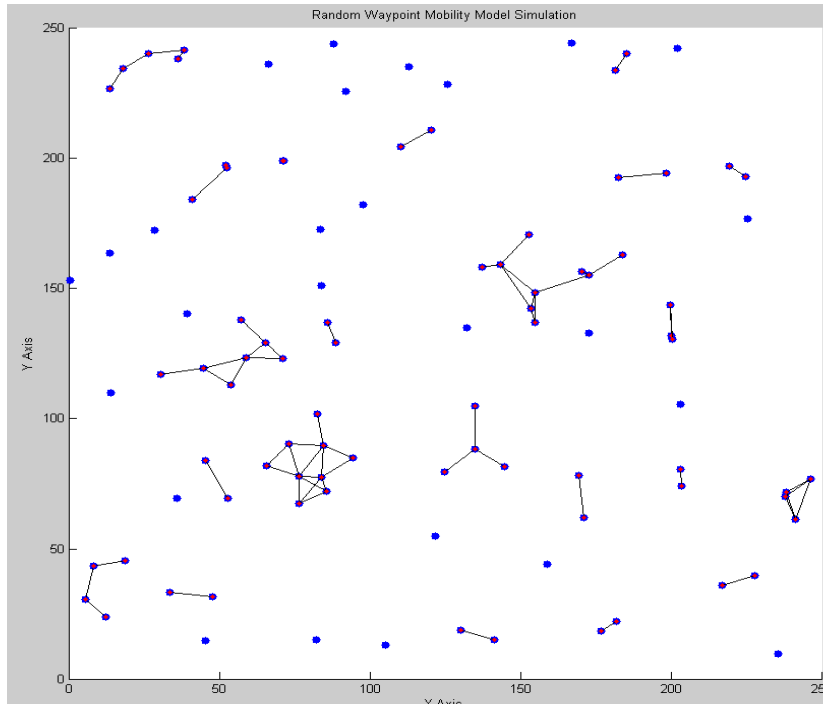
Συγκεκριμένα, για  $\sigma=2$  και με βάση το σχήμα 3.5 η σκίαση θα λαμβάνει τιμές από  $-6\text{dB}$  έως  $6\text{dB}$  στο 99.74% των περιπτώσεων ενώ για  $\sigma=8\text{dB}$  οι τιμές αυτές θα είναι  $-24\text{dB}$  έως  $24\text{dB}$  που οδηγούν τυχαία σε πολύ μεγαλύτερη αλλά και πολύ μικρότερη σκίαση. Είναι λοιπόν λογικό για μεγάλες τιμές σκίασης να ευνοείται η σύνδεση μεταξύ κόμβων που βρίσκονται σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις.

Επίσης, για  $\sigma=8$  υπάρχουν πολλοί κόμβοι που μπορεί να μην συνδέονται με κάποιους πολύ κοντινούς γείτονες τους ,γεγονός που οφείλεται και στις πολύ μικρές τιμές που μπορεί να πάρει η σκίαση. Αυτό το γεγονός συμβαίνει αρκετά πιο δύσκολα για  $\sigma=2$  αφού η μικρότερη τιμή της σκίασης είναι κοντά στα  $-6\text{dB}$  και επηρεάζει λιγότερο τον σηματοθορυβικό λόγο.



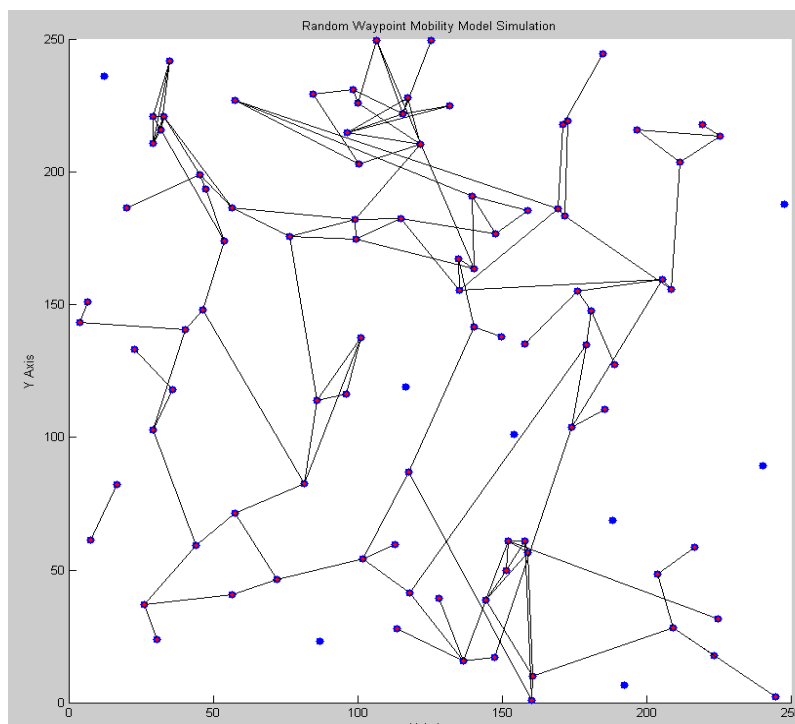
Σχήμα 3.5-κανονική κατανομή

Για  $\sigma=2$  και  $P_t=10\text{dBm}$  προκύπτει το στιγμιότυπο του σχήματος 3.6.



Σχήμα 3.6-στιγμιότυπο προσομοίωσης για  $\sigma=2\text{dB}$  και  $P_t=10\text{dBm}$

ενώ για  $\sigma=8\text{dB}$  και  $P_t=10\text{dBm}$  έχουμε(σχήμα 3.7)

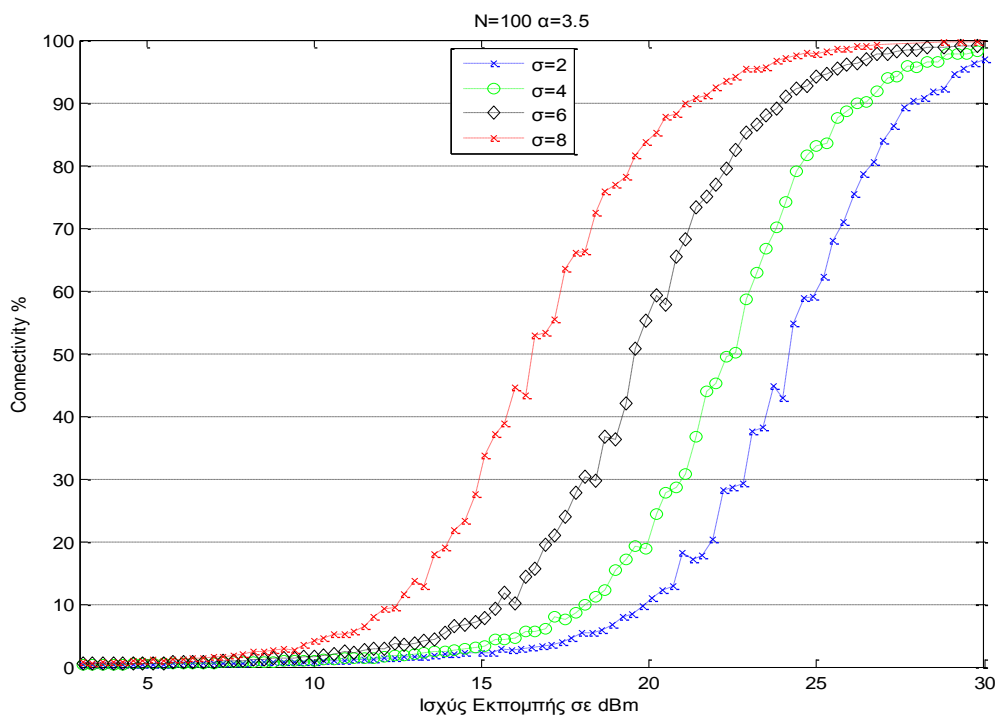


Σχήμα 3.7 -στιγμιότυπο προσομοίωσης για  $\sigma=8\text{dB}$  και  $P_t=10\text{dBm}$

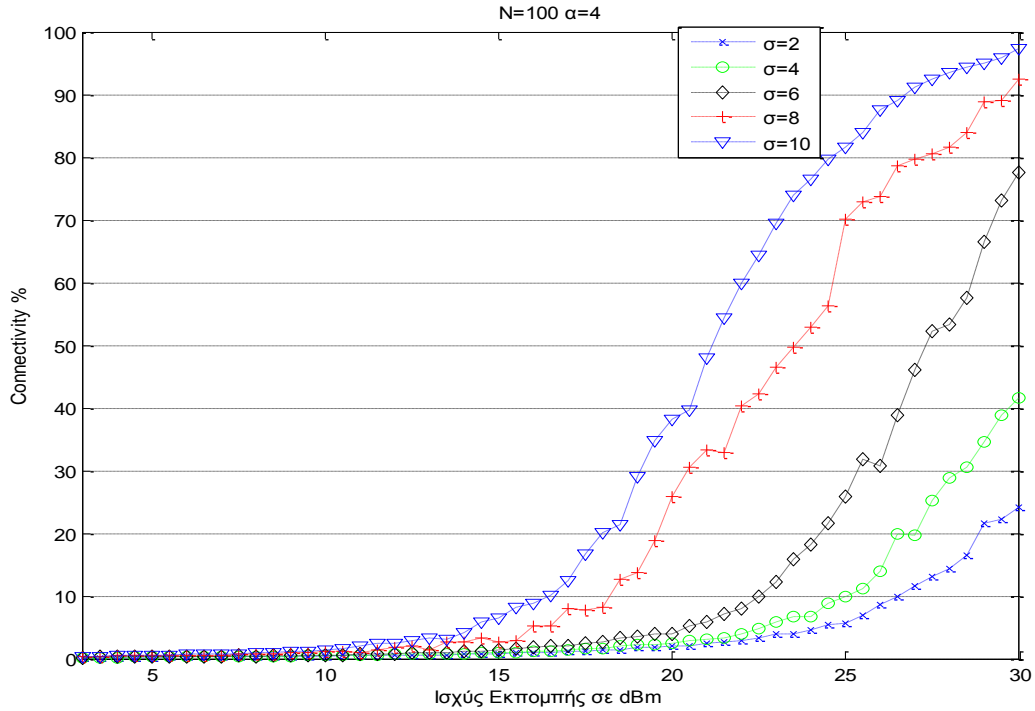
Ακολούθως βλέπουμε τα αποτελέσματα για διαφορετική τιμή του παράγοντα  $\alpha$  των απωλειών διαδρομής(σχήμα 3.8). Έτσι ,για  $\alpha=3.5$  και για τιμές ισχύος από  $3\text{dBm}$  ως  $30\text{dBm}$  παρακολουθούμε τη συνδεσιμότητα με βήμα προσομοίωσης  $0.3\text{dBm}$ . Τα

συμπεράσματα είναι παρόμοια με την προηγούμενη περίπτωση με τη διαφορά ότι φτάνουμε σε μεγάλα επίπεδα ισχύος για να αγγίξουμε συνδεσιμότητα 100% ακόμα και για  $\sigma=8$ . Αυτό οφείλεται προφανώς στην αύξηση του  $\alpha$  και στο αντίκτυπο του στον υπολογισμό του SNR. Βλέπουμε για παράδειγμα ότι για ισχύ εκπομπής στα 20dBm η συνδεσιμότητα για  $\sigma=2$  είναι στα 10%, για  $\sigma=4$  στα 20%, για  $\sigma=6$  στα 60% και για  $\sigma=8$  λίγο πάνω από 80%.

Στο σχήμα 3.9 επιλέγουμε  $\alpha=4$  και βλέπουμε τη συνδεσιμότητα για τιμές ισχύος από 3dBm ως 30dBm. Το βήμα προσομοίωσης είναι 0.5dBm. Επιπλέον, βλέπουμε τη συνδεσιμότητα και για  $\sigma=10$ dB. Παρατηρούμε ότι ακόμη και για ισχύ εκπομπής 30dBm και  $\sigma=10$ dB η συνδεσιμότητα δεν αγγίζει το 100%, ενώ όσο μειώνεται το  $\sigma$  η συνδεσιμότητα μειώνεται ραγδαία. Από το σχήμα φαίνεται επίσης ότι η συνδεσιμότητα για  $\sigma=8$  και  $\sigma=10$ dB αυξάνεται με ταχύτερο ρυθμό απ' ό,τι για τις άλλες τιμές τυπικής απόκλισης. Βλέπουμε επίσης ότι μέχρι τα 15dBm και οι 4 καμπύλες αντιστοιχούν σε connectivity μικρότερο του 10% γεγονός που μας δείχνει τη σημασία των απωλειών διάδοσης για τον υπολογισμό των συνδέσεων μεταξύ των κόμβων του ad-hoc δικτύου.



Σχήμα 3.8- συνδεσιμότητα για  $N=100$  και  $\alpha=3.5$  ως συνάρτηση της ισχύος εκπομπής για  $\sigma=2,4,6,8$ dB



Σχήμα 3.9- συνδεσιμότητα για  $N=100$  και  $\alpha=4$  ως συνάρτηση της ισχύος εκπομπής για  $\sigma=2,4,6,8dB$

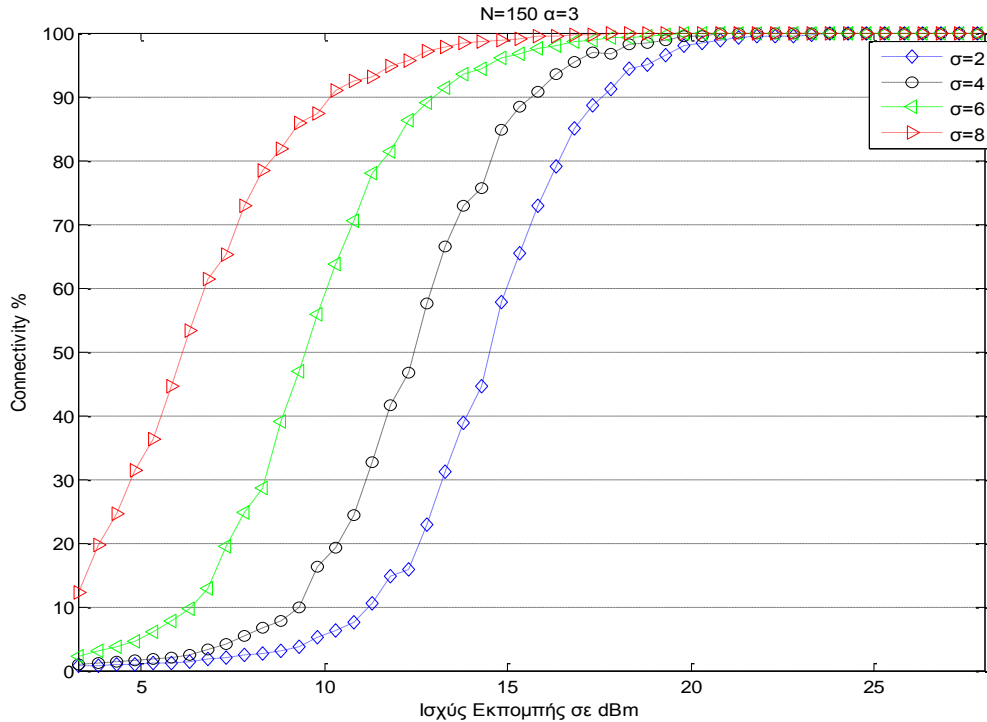
### 3.5.2 $N=150$ και $v=15-30m/s$

Σε αυτό το σημείο, παραθέτουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για ad-hoc δίκτυο 150 κόμβων. Η ισχύς εκπομπής παίρνει τιμές από 3dBm ως 27.5dBm για όλες τις τιμές των  $\alpha$ , ενώ το βήμα που χρησιμοποιήθηκε για τις προσομοιώσεις είναι 0.5dBm.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο σχήμα φαίνονται οι καμπύλες για  $\alpha=3$  και βλέπουμε για παράδειγμα ότι για ισχύ εκπομπής 10dBm για  $\sigma=2$  η συνδεσιμότητα είναι μικρότερη του 10%, για  $\sigma=4$  είναι 20%, για  $\sigma=6$  είναι στα 60% ενώ για  $\sigma=8$  φτάνει τα 90%. Είναι φανερό ότι για  $\alpha=3$  έχουμε υψηλή συνδεσιμότητα για τιμές ισχύος κοντά στα 18dBm ενώ για ισχύς μεγαλύτερες από 20 dBm η συνδεσιμότητα αγγίζει το 100% σε όλες τις περιπτώσεις.

Αίσθηση προκαλεί επίσης το γεγονός ότι ακόμη και για ισχύ εκπομπής στα 3dBm η συνδεσιμότητα για  $\sigma=8dB$  ξεπερνά το 10%. Αυτό, οφείλεται στο συνδυασμό χαμηλού συντελεστή εξασθένησης-υψηλής τυπική απόκλισης σκίασης που οδηγούν σε σχετικά υψηλό SNR.

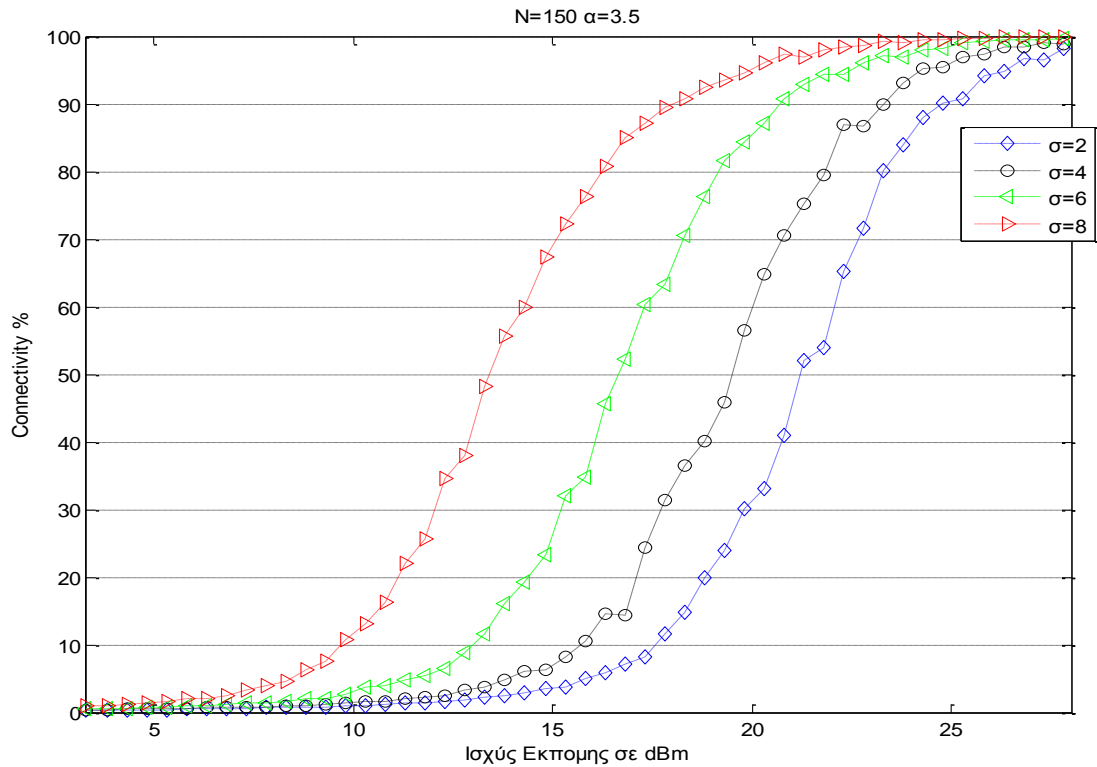




Σχήμα 3.10- συνδεσιμότητα για N=150 και  $\alpha=3$  ως συνάρτηση της ισχύος εκπομπής για  $\sigma=2,4,6,8$ dB

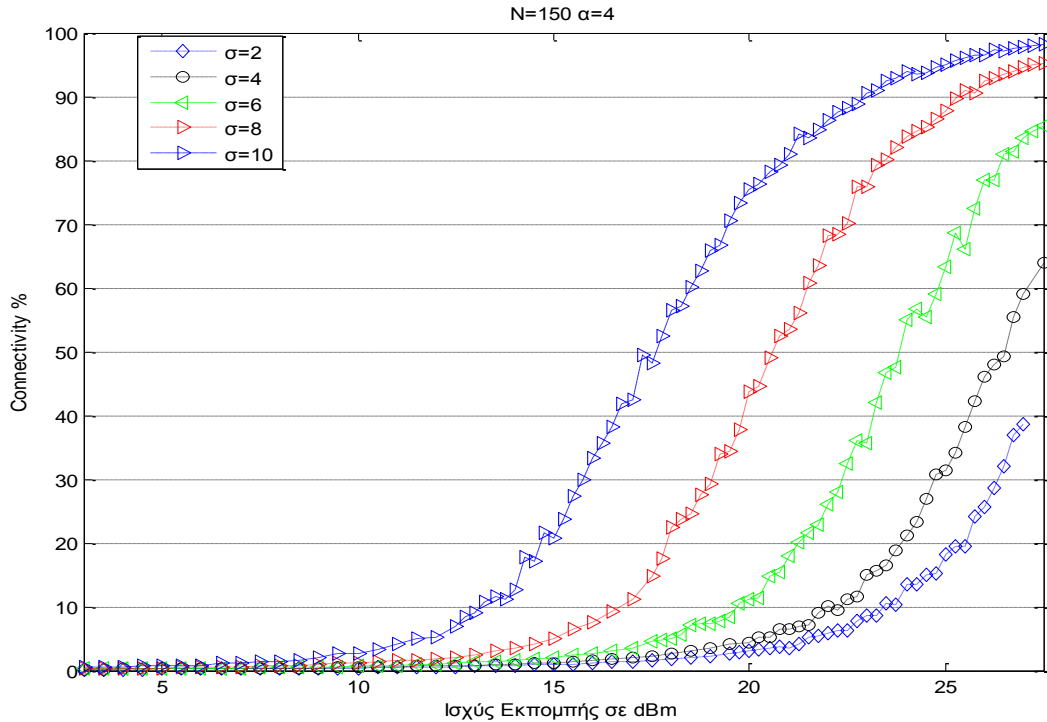
Για  $\alpha=3.5$  στο παρακάτω σχήμα βλέπουμε τις καμπύλες και τα ποσοστά συνδεσιμότητας για κάθε  $\sigma$ . Εδώ, παρατηρούμε ότι η συνδεσιμότητα ξεπερνά το 10% για  $\sigma=8$ dB για ισχύ μόλις μετά τα 10dBm, σε αντιδιαστολή με το προηγούμενο σχήμα που είχαμε συνδεσιμότητα 10% για  $\sigma=8$ dB και ισχύ εκπομπής 3dBm.

Επίσης, σχετικά ικανοποιητικό ποσοστό συνδεσιμότητας (>90%) για κάθε  $\sigma$ , επιτυγχάνεται μετά τα 25dBm. Έτσι για παράδειγμα για  $P_t=15$ dBm η συνδεσιμότητα για  $\sigma=2$ dB και  $\sigma=4$ dB δεν ξεπερνά το 10% ενώ για  $\sigma=6$ dB είναι στα 25% και για  $\sigma=8$ dB στα 70%.



Σχήμα 3.11- συνδεσιμότητα για  $N=150$  και  $\alpha=3.5$  ως συνάρτηση της ισχύος εκπομπής για  $\sigma=2,4,6,8$ dB

Για  $\alpha=4$  δηλαδή πολύ υψηλές απώλειες διαδρομής βλέπουμε το παρακάτω σχήμα 3.12. Ακόμη και για ισχύ 27.5dBm η συνδεσιμότητα για  $\sigma=2$  δεν ξεπερνά το 40%, ενώ μόνο για  $\sigma=8$  και  $\sigma=10$ dB αποκτά αποδεκτές τιμές. Οι καμπύλες σε σύγκριση με τις αντίστοιχες για  $N=100$  είναι εμφανώς βελτιωμένες καθώς είναι προφανές ότι οι περισσότεροι κόμβοι αυξάνουν την πιθανότητα σύνδεσης.

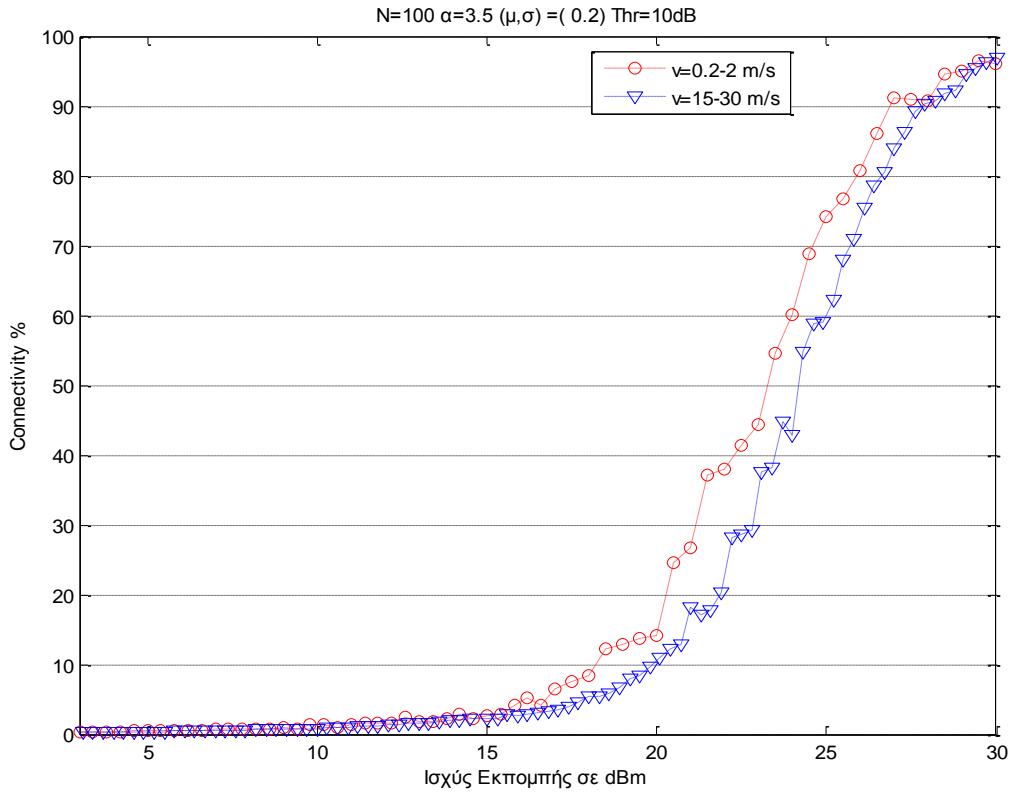


Σχήμα 3.12- συνδεσιμότητα για  $N=150$  και  $\alpha=4$  ως συνάρτηση της ισχύος εκπομπής για  $\sigma=2,4,6,8$ dB

### 3.5.3 $N=100$ $v=0.2-2m/s$

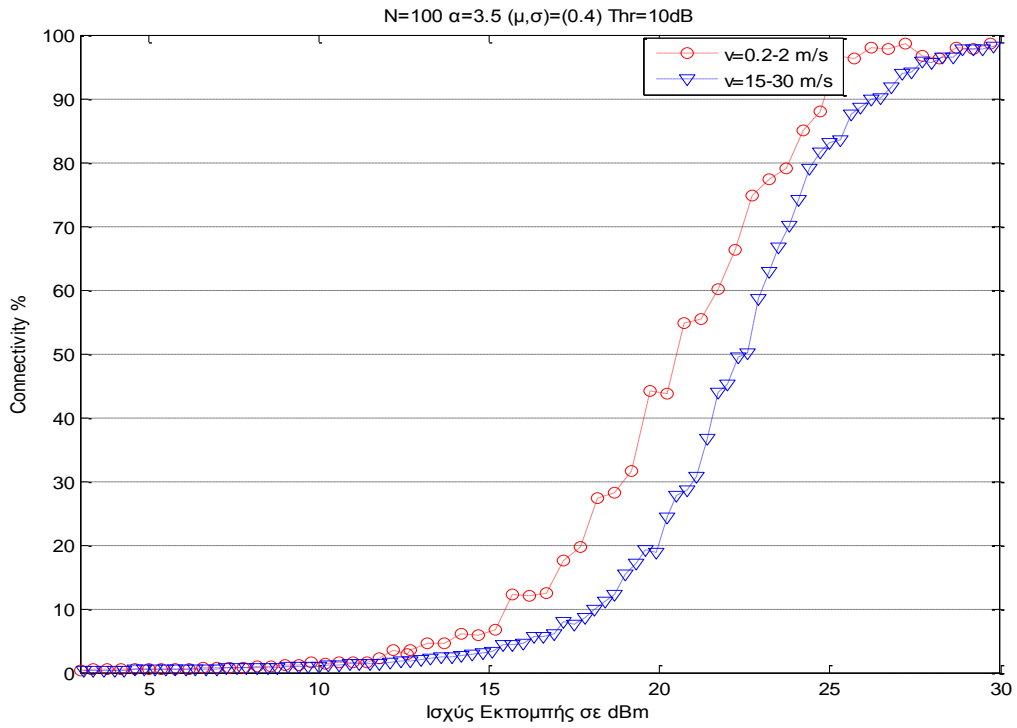
Στη συνέχεια συγκρίνουμε τα επίπεδα συνδεσιμότητας με γνώμονα την τιμή της ταχύτητας των κόμβων στο δίκτυο. Για να γίνει αυτό επιλέγουμε ταχύτητα στο διάστημα  $0.2-2m/s$  και προσομοιώνουμε το δίκτυο. Λόγω του μικρού αριθμού των κόμβων και της χαμηλής ταχύτητας τους είναι προφανές ότι το αποτέλεσμα κάθε προσομοίωσης έχει ισχυρή εξάρτηση από την τυχαία αρχική θέση των κόμβων στο δίκτυο. Για να μειωθεί κάπως η εξάρτηση αυτή επιλέγουμε ως χρόνο κάθε προσομοίωσης το 400(θυμίζουμε οι προηγούμενες προσομοιώσεις γινόταν με χρόνο 240).

Από σχήμα 3.13 προκύπτει ότι για χαμηλές ταχύτητες η συνδεσιμότητα είναι για όλες τις ισχύς εκπομπής λίγο μεγαλύτερη από την αντίστοιχη για υψηλές ταχύτητες. Αυτό ίσως οφείλεται στο ότι το δίκτυο είναι πιο σταθερό και οι συνδέσεις χάνονται δυσκολότερα αφού οι κόμβοι κινούνται ελάχιστα.

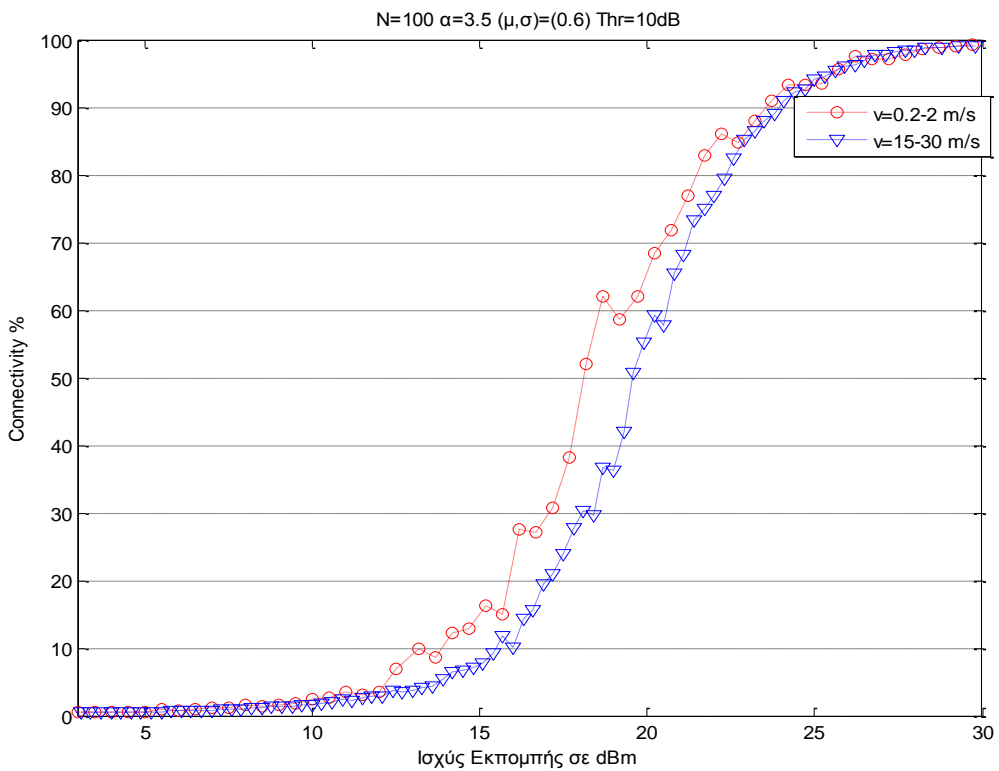


Σχήμα 3.13-συνδεσιμότητα για N=100,  $\alpha=3.5$ ,  $\sigma=2$ dB και διαφορετικές ταχύτητες κόμβων

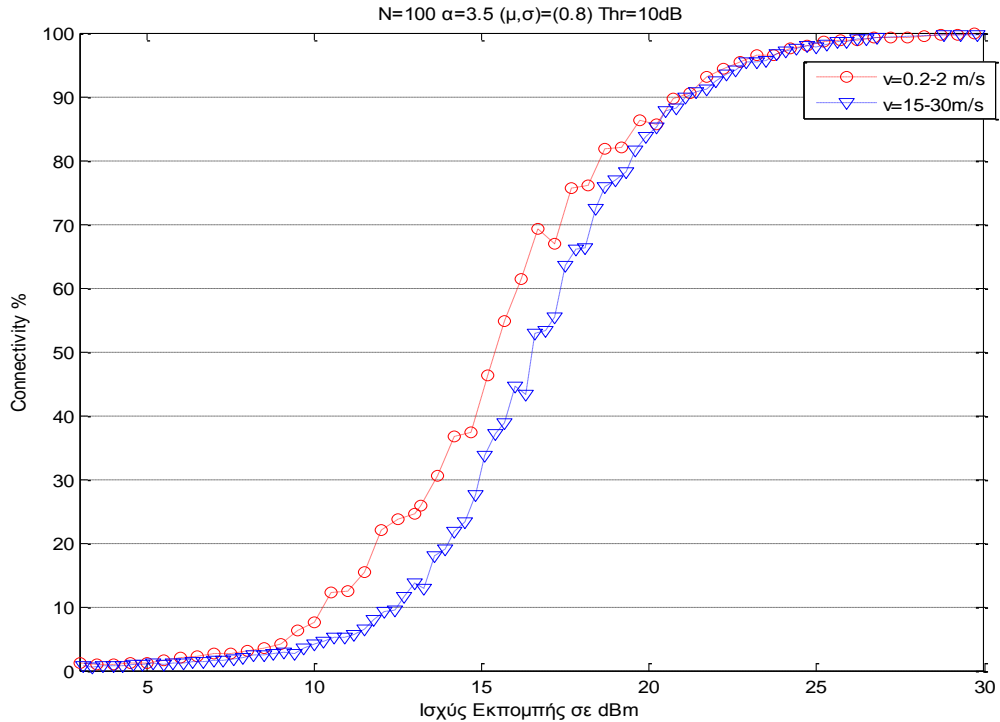
Για μεγαλύτερες τιμές του  $\sigma$  παρατηρούμε από τα τρία επόμενα σχήματα (3.14,3.15,3.16), ότι για χαμηλές ταχύτητες κόμβων η συνδεσιμότητα είναι μεγαλύτερη σε σχέση με τις υψηλές για κάθε  $\sigma$ .



Σχήμα 3.14- συνδεσιμότητα για  $N=100, \alpha=3.5, \sigma=4\text{dB}$  και διαφορετικές ταχύτητες κόμβων



Σχήμα 3.15- συνδεσιμότητα για  $N=100, \alpha=3.5, \sigma=6\text{dB}$  και διαφορετικές ταχύτητες κόμβων



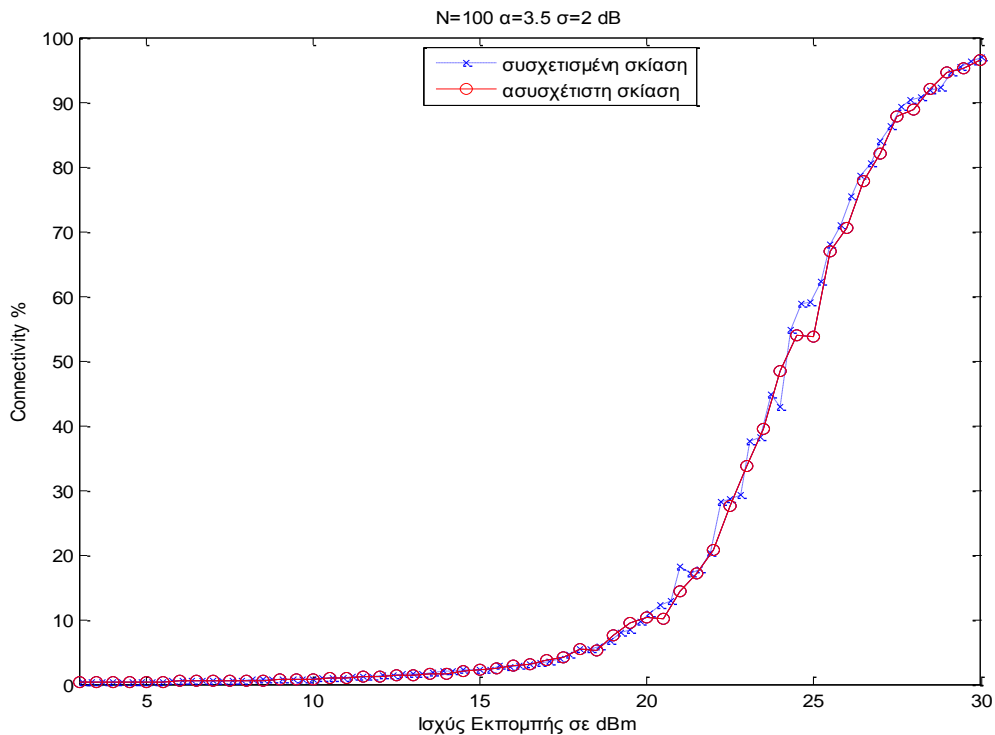
Σχήμα 3.16- συνδεσιμότητα για N=100,  $\alpha=3.5$ ,  $\sigma=8\text{dB}$  και διαφορετικές ταχύτητες κόμβων

### 3.5.4 Σύγκριση με περίπτωση που η σκίαση θεωρείται ασυσχέτιστη

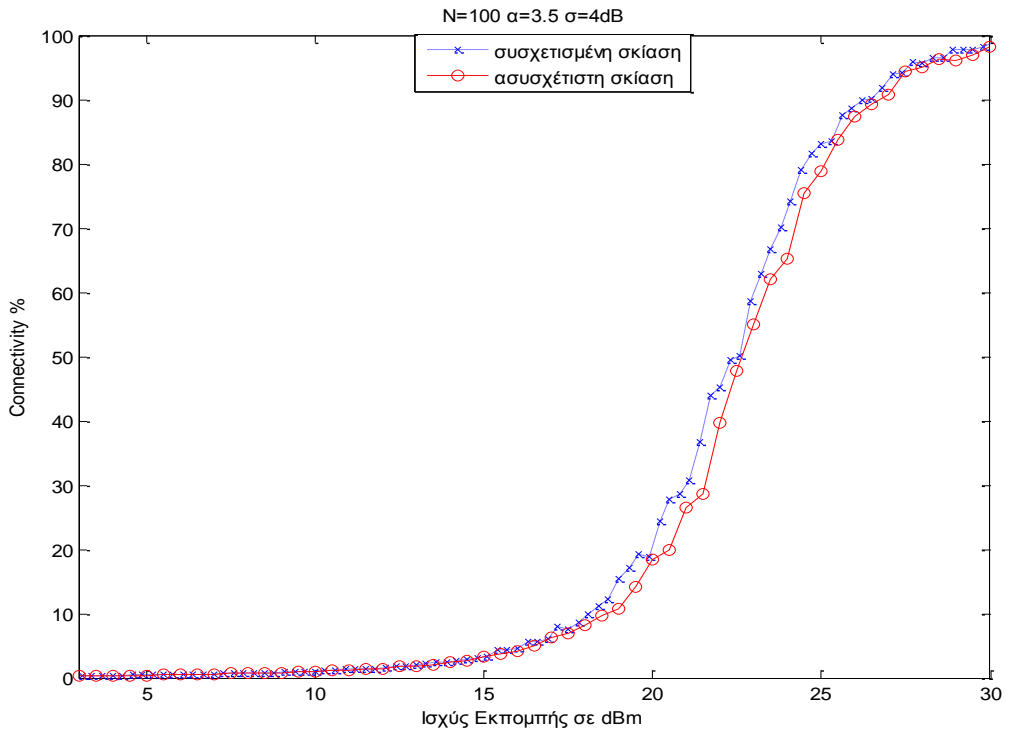
Στη συνέχεια παραθέτουμε κάποια αποτελέσματα για  $\alpha=3.5$  και  $N=100$  όπου συγκρίνουμε τη συνδεσιμότητα με την περίπτωση που η σκίαση θεωρείται ασυσχέτιστη.

Έτσι έχουμε για  $\sigma=2\text{ dB}$  το σχήμα 3.17. Από αυτό φαίνεται ότι η συνδεσιμότητα δεν φαίνεται να επηρεάζεται από τη συσχέτιση της σκίασης. Στο σχήμα 3.18 έχουμε τα αποτελέσματα για  $\sigma=4\text{dB}$ . Εκεί βλέπουμε ότι για συσχετισμένη σκίαση έχουμε ελαφρώς πιο αυξημένη συνδεσιμότητα. Έπειτα στο σχήμα 3.19 βλέπουμε ότι η για  $\sigma=6\text{ dB}$  η συσχετισμένη σκίαση οδηγεί σε μεγαλύτερη συνδεσιμότητα σε σχέση με την περίπτωση που δε λαμβάνεται υπόψη η συσχέτιση της σκίασης. Τέλος, στο σχήμα 3.20 βλέπουμε ότι για  $\sigma=8\text{dB}$  η διαφορά στις συνδεσιμότητες είναι αρκετά σημαντική αφού για παράδειγμα για  $P_t=20\text{dBm}$  υπάρχει διαφορά κοντά στο 10% (διαφορά που υπάρχει για τις περισσότερες τιμές του  $P_t$ ).

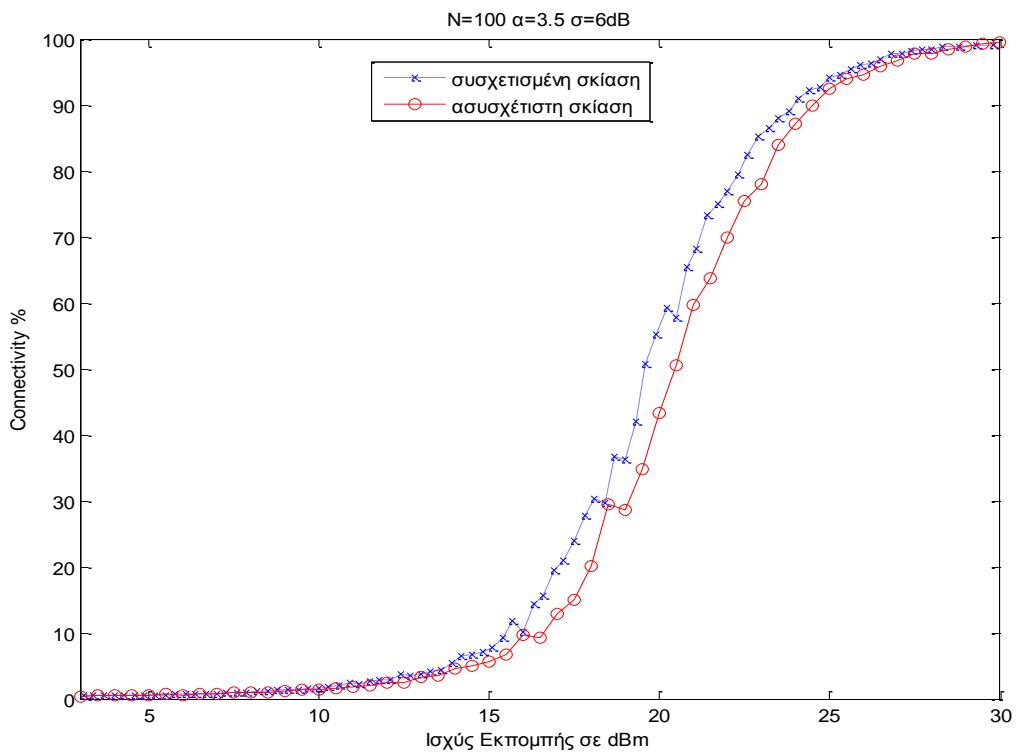
Τα αποτελέσματα αυτά μπορούν να ερμηνευθούν αν εξετάσουμε τον τύπο που χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό του  $\sigma_I$  (τύπος 3.2). Ο τύπος αυτός περιλαμβάνει έναν μεταβλητό παράγοντα που εξαρτάται από το  $\rho$  και τη γεωμετρία, και έναν παράγοντα  $\sigma$  με τον οποίο γίνεται ο πολλαπλασιασμός. Βλέπουμε λοιπόν ότι για  $\sigma=2\text{dB}$  το  $\sigma_I$  θα είναι πάλι κοντά στο 2 με μέγιστη τιμή κοντά στα 2.8dB (max τιμή του παράγοντα  $(\sqrt{1-\rho^2} + \rho)=1,4142$ , αφού  $0 \leq \rho \leq 1$ ). Αντίστοιχα για  $\sigma=4\text{dB}$  το  $\sigma_I$  παίρνει τιμές από 4 έως 5.66dB, για  $\sigma=6\text{dB}$  τιμές από 6 έως 8.49dB, ενώ για  $\sigma=8\text{dB}$  το  $\sigma_I$  είναι από 8 έως 11.31dB. Βλέπουμε λοιπόν ότι για μεγάλα  $\sigma$  έχουμε αρκετά καλύτερα επίπεδα συνδεσιμότητας για το ίδιο δίκτυο αν λάβουμε υπόψη την συσχέτιση της σκίασης.



Σχήμα 3.17-συνδεσιμότητα για  $N=100, \alpha=3.5, \sigma=2\text{dB}$  και σύγκριση συσχετισμένης σκίασης με την περίπτωση  $\rho=0$

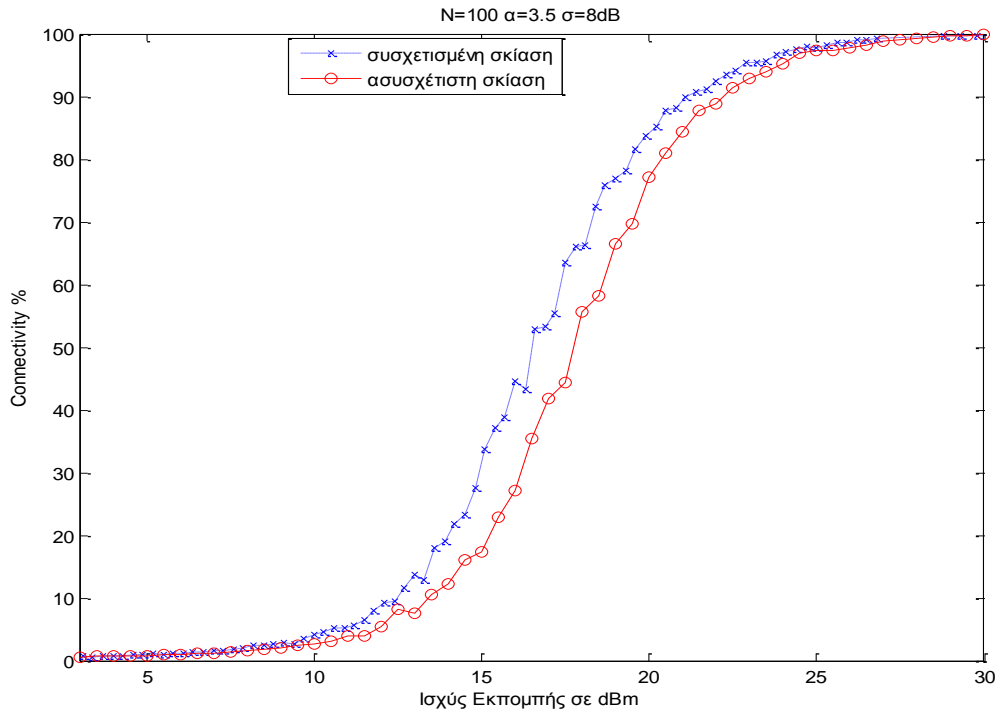


Σχήμα 3.18- συνδεσιμότητα για  $N=100, \alpha=3.5, \sigma=4\text{dB}$  και σύγκριση συσχετισμένης σκίασης με την περίπτωση  $\rho=0$



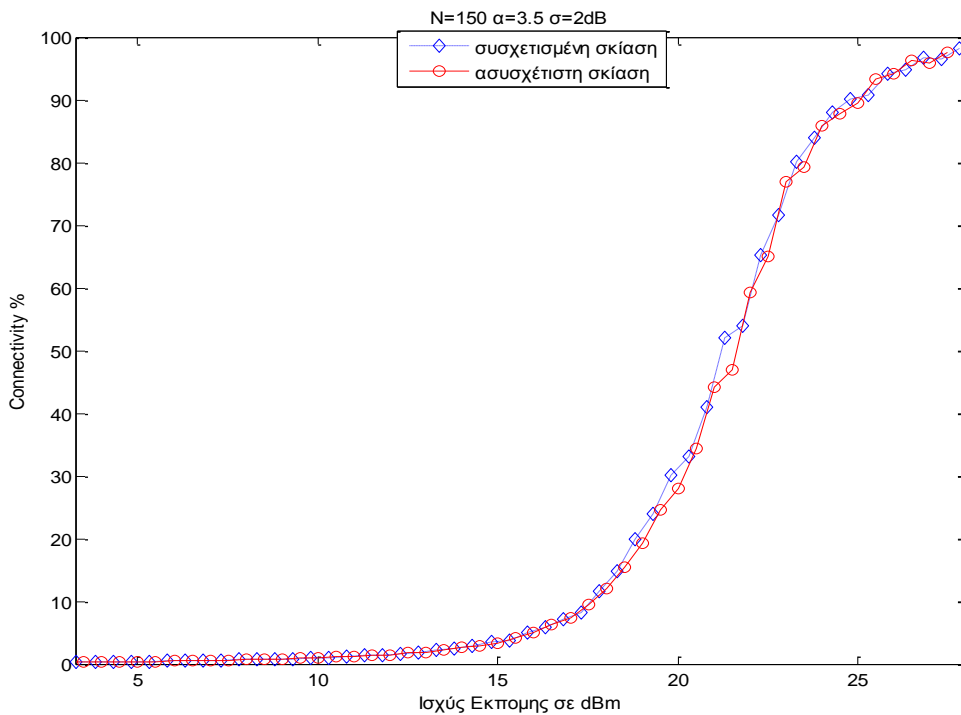
Σχήμα 3.19- συνδεσιμότητα για  $N=100, \alpha=3.5, \sigma=6\text{dB}$  και σύγκριση συσχετισμένης σκίασης με την περίπτωση  $\rho=0$



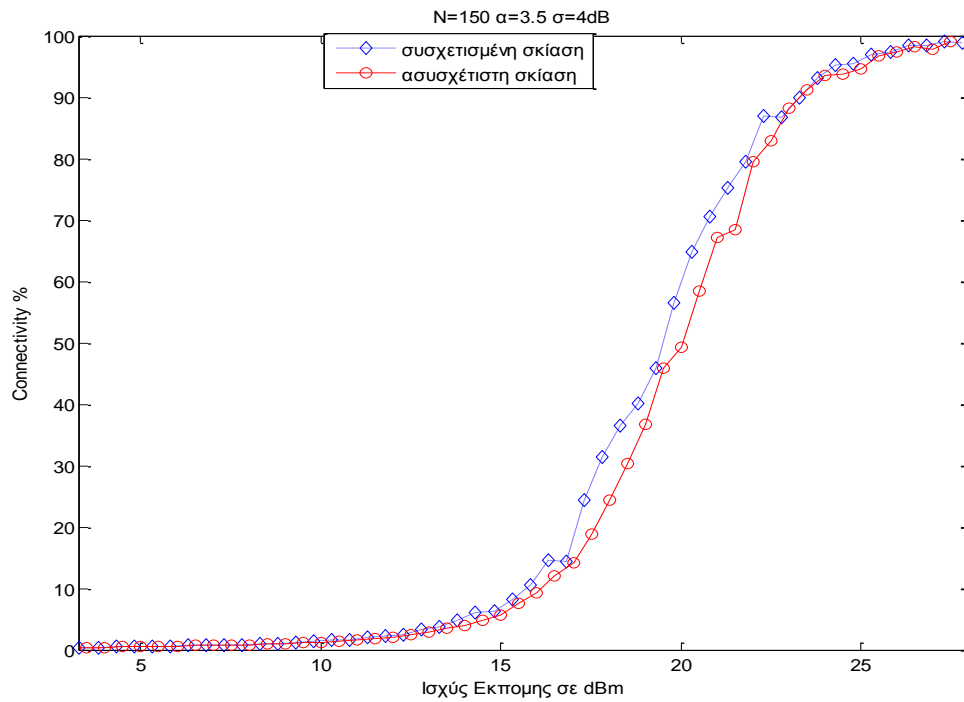


Σχήμα 3.20- συνδεσιμότητα για  $N=100, \alpha=3.5, \sigma=8\text{dB}$  και σύγκριση συσχετισμένης σκίασης με την περίπτωση  $\rho=0$

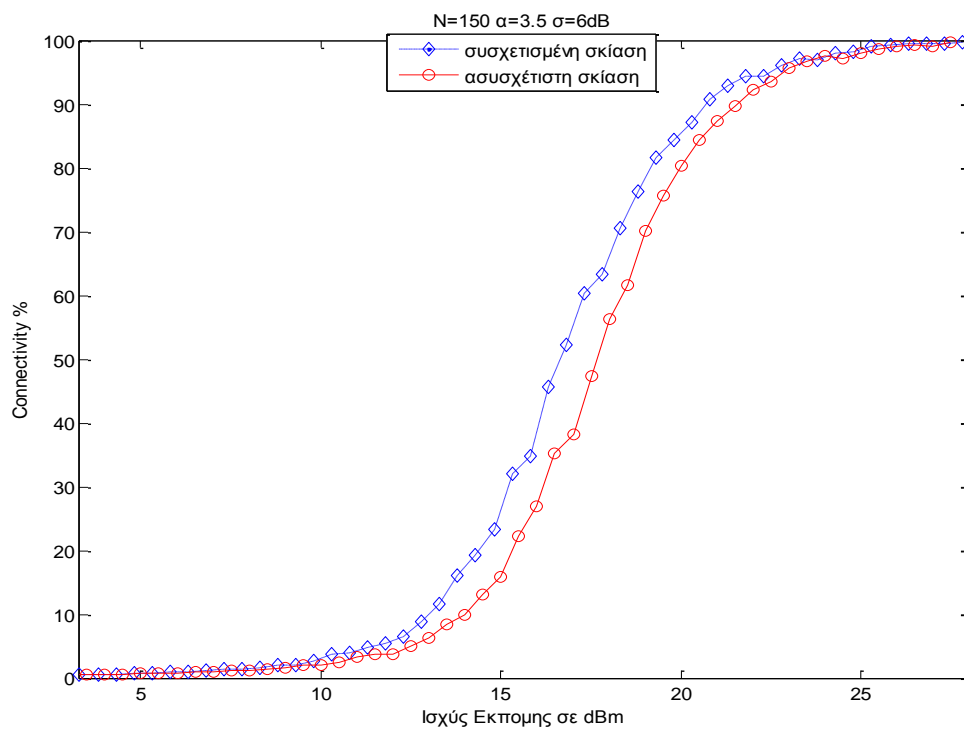
Για  $N=150$  προκύπτουν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις



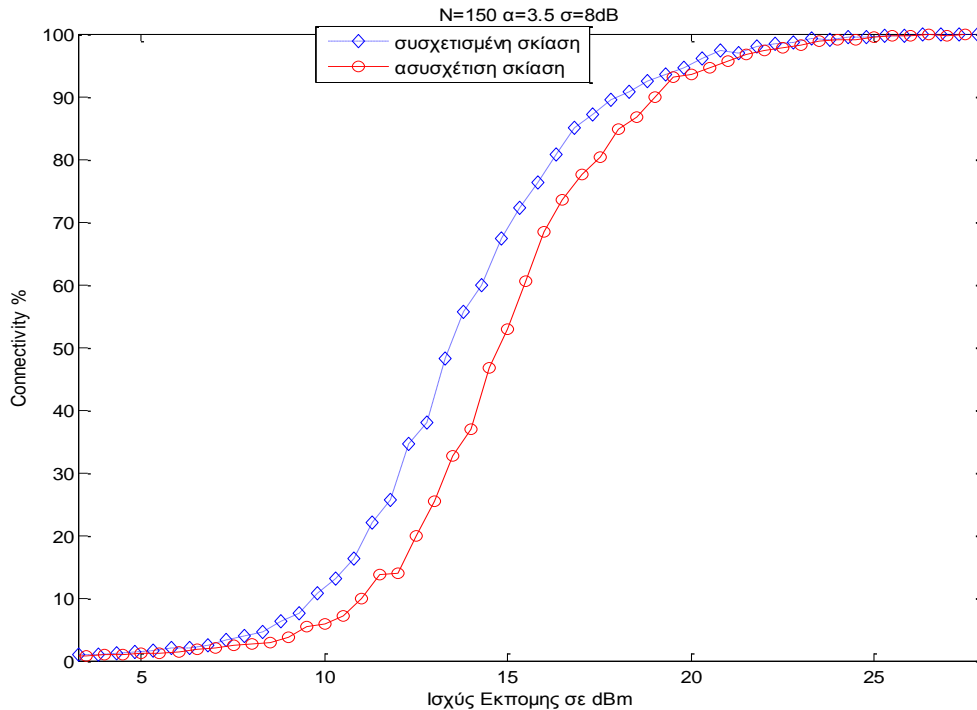
Σχήμα 3.21- συνδεσιμότητα για  $N=150, \alpha=3.5, \sigma=2\text{dB}$  και σύγκριση συσχετισμένης σκίασης με την περίπτωση  $\rho=0$



Σχήμα 3.22- συνδεσιμότητα για  $N=150, \alpha=3.5, \sigma=4\text{dB}$  και σύγκριση συσχετισμένης σκίασης με την περίπτωση  $\rho=0$



Σχήμα 3.23- συνδεσιμότητα για  $N=150, \alpha=3.5, \sigma=6\text{dB}$  και σύγκριση συσχετισμένης σκίασης με την περίπτωση  $\rho=0$



Σχήμα 3.24- συνδεσιμότητα για  $N=150, \alpha=3.5, \sigma=8\text{dB}$  και σύγκριση συσχετισμένης σκίασης με την περίπτωση  $\rho=0$

Τα συμπεράσματα είναι παρόμοια με την περίπτωση των 100 κόμβων αφού βλέπουμε ότι για  $\sigma=2\text{dB}$  η διαφορά στις συνδεσιμότητες είναι πολύ μικρή ενώ όσο αυξάνεται το  $\sigma$  τόσο καλύτερα είναι τα αποτελέσματα για συσχετισμένη σκίαση.

### 3.6 Συμπεράσματα

Πολλά είναι τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω προσομοιώσεις. Έτσι λοιπόν κάθε μηχανικός τηλεπικοινωνιών που θέλει να σχεδιάσει και να υλοποιήσει ένα ad-hoc δίκτυο θα πρέπει να λάβει υπόψη του κάποιες πολύ βασικές παραμέτρους. Αρχικά, οι απώλειες διαδρομής είναι ο κυρίαρχος παράγοντας εξασθένησης σε ένα τέτοιο δίκτυο. Η τιμή του παράγοντα απωλειών  $\alpha$  σε συνδυασμό με τις αποστάσεις μεταξύ των κόμβων επηρεάζει κομβικά την τιμή του σηματοθορυβικού λόγου για κάθε ζεύξη και κατ' επέκταση τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Η σκίαση είναι ένας ακόμη παράγοντας που επιδρά στη συνδεσιμότητα του ad-hoc δικτύου. Ο τρόπος που θα ληφθεί υπόψη έχει άμεσο αντίκτυπο στην τιμή του connectivity. Η σκίαση σε συσχετισμένα κανάλια που επιλέχθηκε σε αυτή τη

διπλωματική οδηγεί σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα σε σχέση με την περίπτωση που θεωρούμε ασυσχέτιστα κανάλια. Σημαντικός είναι επίσης και ο τρόπος με τον οποίο θα θεωρηθούν συσχετισμένα τα κανάλια, καθώς και το γεωμετρικό μοντέλο του συντελεστή συσχέτισης μεταξύ των μεταβλητών. Ο λόγος που χρησιμοποιούμε συσχετισμένες μεταβλητές σκίασης είναι για την πιο ρεαλιστική αναπαράσταση του περιβάλλοντος εμποδίων μέσα στο οποίο είναι τοποθετημένο το ad-hoc δίκτυο, καθώς και για να φανούν επιδράσεις των εμποδίων αυτών στη συνδεσιμότητα του δικτύου.

Η ομαλή λειτουργία του δικτύου προϋποθέτει μελέτη για τον αριθμό των κόμβων που θα το απαρτίζουν αλλά και τα όρια της γεωγραφικής περιοχής στην οποία είναι τοποθετημένο το δίκτυο. Ένα ελάχιστο όριο κόμβων θα είναι απαραίτητο για την ομαλή λειτουργία του δικτύου(μεγάλη συνδεσιμότητα), ενώ αυτό το όριο θα αλλάζει ανάλογα με την γεωγραφική περιοχή.

Σημαντική επίσης παράμετρος είναι η ταχύτητα των κόμβων του δικτύου. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων έδειξαν ότι αργά κινούμενοι κόμβοι έχουν αυξημένη συνδεσιμότητα σε σχέση με ταχέως κινούμενους κόμβους συγκριτικά με κάθε τιμή της σκίασης, Άρα επιθυμητό χαρακτηριστικό του δικτύου θα ήταν οι κόμβοι να κινούνται όσο γίνεται βραδύτερα,

Άλλα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν τη συνδεσιμότητα του δικτύου μας είναι οι υπόλοιποι παράγοντες από τους οποίους εξαρτάται ο SNR. Έτσι λοιπόν σημαντικοί παράγοντες είναι τα κέρδη των κεραιών των κόμβων ,η συχνότητα λειτουργίας που επιλέγεται να έχουν οι κόμβοι αυτοί, καθώς ο θόρυβος που υπάρχει στο κανάλι. Ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που αναλύθηκε παραπάνω και είναι πολύ σημαντικό να ληφθεί υπόψη είναι η ισχύς εκπομπής των κόμβων του δικτύου μας.

Άρα λοιπόν είναι εμφανές ότι τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων μας βοήθησαν στο που να εστιάσουμε την προσοχή μας κατά το σχεδιασμό και τη λειτουργία ενός ad-hoc δικτύου στο οποίο οι κόμβοι κινούνται σύμφωνα με το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΔΕΣΙΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΔΙΑΦΟΡΙΚΗΣ ΛΗΨΗΣ

---

### 4.1 Εισαγωγή

Στο δεύτερο μέρος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας γίνονται προσομοιώσεις ad-hoc δικτύων με βάση το μοντέλο κινητικότητας τυχαίων στάσεων σε περιβάλλον με σκίαση, όπου χρησιμοποιούνται τεχνικές διαφορικής λήψης.

Συγκεκριμένα, θεωρούμε ότι κάθε κόμβος-δέκτης έχει δύο ίδιες κεραιές λήψης. Με αυτό τον τρόπο λαμβάνει το σήμα από κάθε κόμβο-πομπό δύο φορές. Τη μία φορά η τυπική απόκλιση σκίασης είναι  $\sigma$ , ενώ τη δεύτερη φορά έχουμε τυπική απόκλιση σκίασης  $\sigma_I$  που δίνεται από τη σχέση (3.2). Στον κόμβο λήψης ο σηματοθορυβικός λόγος που προκύπτει από τα  $SNR$  των δύο σημάτων διαφέρει ανάλογα με την τεχνική διαφορικής λήψης που χρησιμοποιείται και για κάθε τεχνική που εξετάζεται σε αυτή τη διπλωματική δίνεται από τη σχέση (2.44). Ακολουθεί το κύριο κομμάτι του κώδικα που γράφτηκε σε MATLAB και στη συνέχεια τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων.

### 4.2 Κώδικας Matlab

Το κύριο τμήμα του κώδικα παρατίθεται παρακάτω:

```
Links_Matrix1=zeros(N,N);
```

```
Links_Matrix2=zeros(N,N);
```

```
Links_Matrix3=zeros(N,N);
```

Οι τρεις αυτοί πίνακες χρησιμοποιούνται για να δείξουν ποιοί κόμβοι συνδέονται με ποιούς για κάθε είδος διαφορικής λήψης. Έτσι, στον Links\_Matrix1 αποθηκεύεται ο πίνακας συνδεσιμότητας για την τεχνική MRC, στον Links\_Matrix2 ο πίνακας

συνδεσιμότητας για την τεχνική SC, και τέλος στον Links\_Matrix3 ο πίνακας συνδεσιμότητας για την τεχνική EGC.

Στη συνέχεια το πρόγραμμα μπαίνει σε διπλό βρόχο όπου αναζητά με βάση το  $SNR$  τις συνδέσεις μεταξύ των κόμβων. Ο τύπος που δίνει το  $SNR$  είναι ο ίδιος που χρησιμοποιήθηκε στο τρίτο κεφάλαιο και περιγράφεται από τη σχέση (3.1), ενώ οι παράμετροι για τα κέρδη κεραιών, το θόρυβο, το  $d_0$  και τη συχνότητα είναι ίδιοι με αυτούς που χρησιμοποιήθηκαν στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο.

Για την σκίαση επιλέγονται μέσω της συνάρτησης random δύο τιμές για τα  $ShadowingAttenuation1$ ,  $ShadowingAttenuation2$  που επιλέγονται τυχαία με βάση τις τυπικές αποκλίσεις  $\sigma$  και  $\sigma_1$  που βασίζεται στο συντελεστή συσχέτισης που επιλέγουμε. Στη συνέχεια το πρόγραμμα βρίσκει τις τιμές των  $SNR_1$  και  $SNR_2$  που είναι σε λογαριθμικές μονάδες. Έπειτα, οι μεταβλητές αυτές μετατρέπονται σε γραμμικές μονάδες μέσω των σχέσεων:

$$\begin{aligned} SNR_1 &= 10^{\frac{SNR_1(dB)}{10}} \\ SNR_2 &= 10^{\frac{SNR_2(dB)}{10}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Ακολούθως, μέσω των σχέσεων που ισχύουν για τα  $SNR$  (σχέση (2.44)) για κάθε τεχνική διαφορικής λήψης βρίσκονται τα  $SNR_{MRC}, SNR_{SC}, SNR_{EGC}$  σε γραμμικές μονάδες και τέλος υπολογίζονται σε λογαριθμικές μονάδες για να εξεταστεί με βάση το κατώφλι ισχύος των 10dBm αν υπάρχει σύνδεση.

```
for i=1:N-1
```

```
for m=i+1:N
```

```
d(i,m)=sqrt((nodes(i).curX-nodes(m).curX)^2+(nodes(i).curY-nodes(m).curY)^2);
```

```
ShadowingAttenuation1=random('normal',0,s);
```

```
ShadowingAttenuation2=random('normal',0,s1);
```

```
Snr1=Pt+2.5+2.5-10*a*log10(d(i,k))-N-  
10*log10(4*pi*do/wavefront)+ShadowingAttenuation1;% ta SNR twn duo shmatwn pou  
lambanei o dekhths
```

```
Snr2=Pt+2.5+2.5-10*a*log10(d(i,k))-N-  
10*log10(4*pi*do/wavefront)+ShadowingAttenuation2;
```

```
Snr1gramikes=10^(Snr1/10); %metatroph se grammikes monades
```

```
Snr2gramikes=10^(Snr2/10);
```

```
SnrMRCgramikes=Snr1gramikes+Snr2gramikes;
```

```
SnrEGCgramikes=((sqrt(Snr1gramikes)+sqrt(Snr2gramikes))^2)/2;
```

```
if Snr1gramikes>Snr2gramikes
```

```
SnrSCgramikes=Snr1gramikes ;
```

```
else
```

```
SnrSCgramikes=Snr2gramikes;
```

```
end;
```

```
SnrMRC=10*log10(SnrMRCgramikes) ;%upologismos SNR se logarithmikes  
monades
```

```
SnrEGC=10*log10(SnrEGCgramikes);
```

```
SnrSC=10*log10(SnrSCgramikes);
```

```
if SnrMRC>Threshold
```

```
Links_Matrix1(i,m)=1;
```

```
Links_Matrix1(m,i)=1;
```

```
end;
```

```

if SnrSC>Threshold

Links_Matrix2(i,m)=1;

Links_Matrix2(m,i)=1;

end;

if SnrEGC>Threshold

Links_Matrix3(i,m)=1;

Links_Matrix3(m,i)=1;

end; end end

```

Έτσι, προκύπτουν οι τρεις πίνακες που αφορούν τη συνδεσιμότητα του δικτύου για κάθε τεχνική διαφορικής λήψης.

Τέλος, για τον υπολογισμό του connectivity για κάθε είδος diversity χρησιμοποιείται 3 φορές ο κώδικα για τον υπολογισμό της συνδεσιμότητας του [27] .

### **4.3 Αποτελέσματα Προσομοιώσεων**

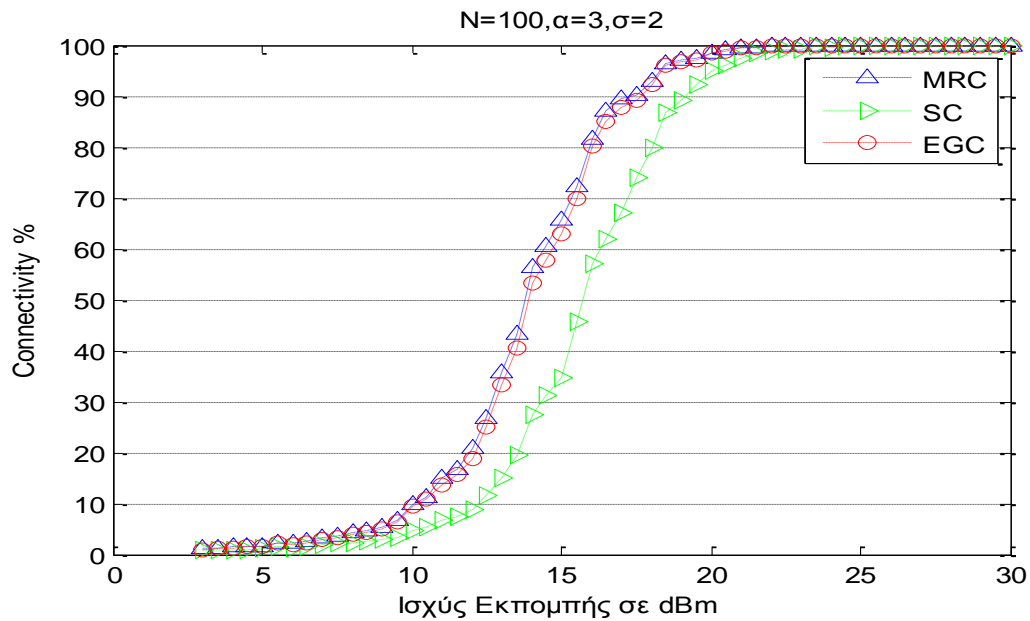
Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κατηγοριοποιούνται αρχικά ανάλογα με τον αριθμό των κόμβων του ad-hoc δικτύου και στη συνέχεια γίνονται κάποιες συγκρίσεις με κάποιες άλλες παραμέτρους.

#### **4.3.1 $N=100$**

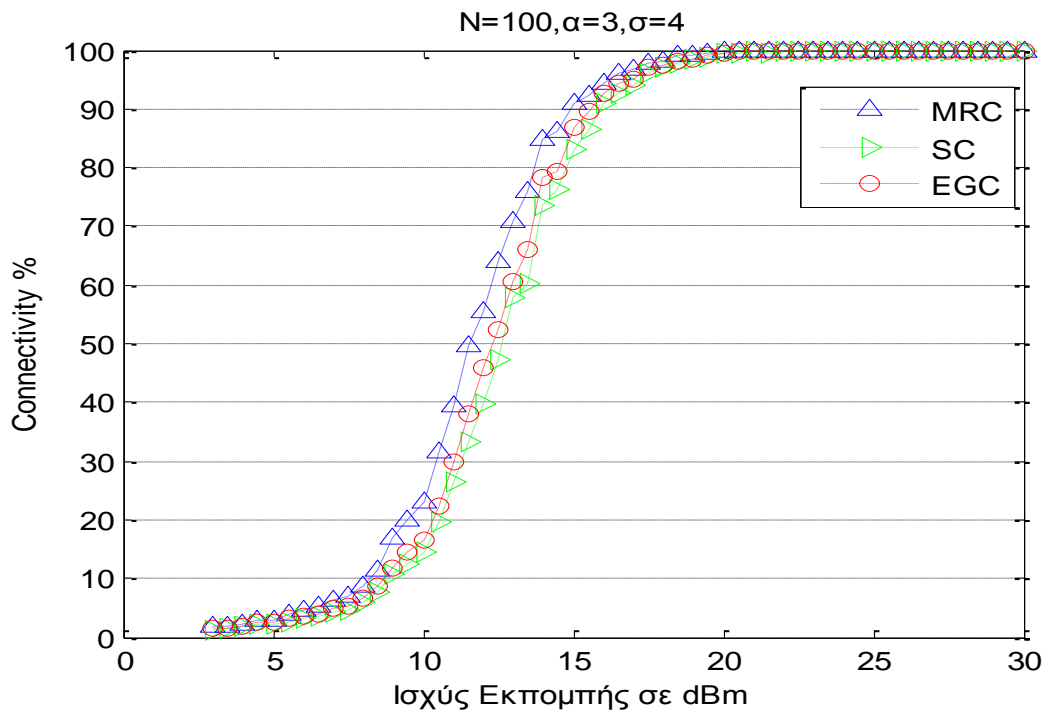
Αρχικά προσομοιώθηκε δίκτυο 100 κόμβων με  $\alpha=3$  ενώ η ισχύς ξεκινά από 3dBm και φτάνει μέχρι 30dBm με βήμα προσομοίωσης τα 0.5dBm. Ο συντελεστής συσχέτισης αρχικά επιλέχθηκε να είναι 0.9. Για κάθε επιλογή παραμέτρων  $(N, \alpha, \sigma)$ , όπου  $N$  ο αριθμός των κόμβων,  $\alpha$  ο παράγοντας απωλειών που αντιστοιχεί στις απώλειες μετάδοσης και  $\sigma$  η τυπική απόκλιση της σκίασης του ενός μονοπατιού προκύπτει μια γραφική παράσταση.



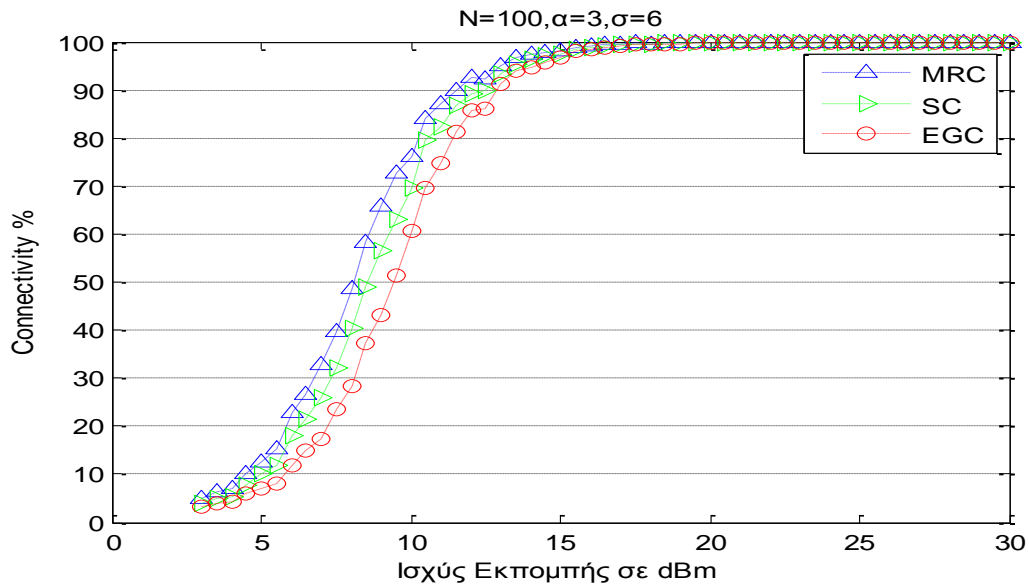
Έτσι, αρχικά για κάθε διαφορετική τιμή της τυπικής απόκλισης προκύπτουν οι 4 παρακάτω γραφικές παραστάσεις.



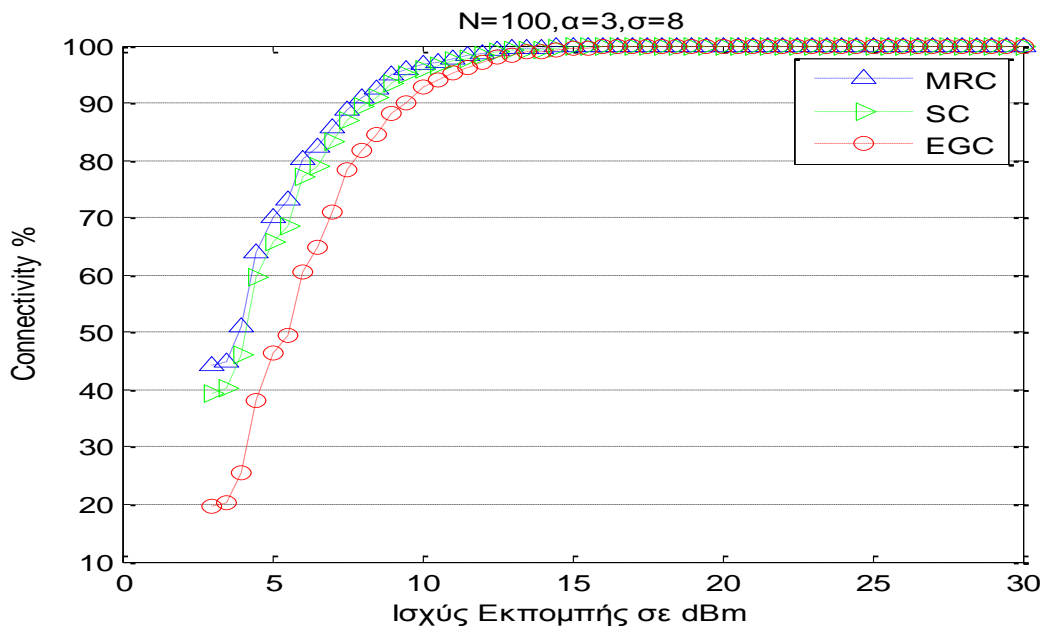
Σχήμα 4.1- συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για  $N=100, \alpha=3, \sigma=2$



Σχήμα 4.2- συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για  $N=100, \alpha=3, \sigma=4$



Σχήμα 4.3- συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για N=100,α=3,σ=6



Σχήμα 4.4 -συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για N=100,α=3,σ=8

Από τις παραπάνω γραφικές παραστάσεις το πρώτο που προκύπτει είναι ότι για  $\alpha=3$  τα επίπεδα συνδεσιμότητας είναι υψηλά για κάθε τιμή της μεταβλητής  $\sigma$ . Συγκεκριμένα, ακόμη και για  $\sigma=2$  στα 20dBm ισχύ εκπομπής το connectivity είναι αρκετά ικανοποιητικό (>90% για κάθε τεχνική διαφορικής λήψης).

Ας συγκρίνουμε τώρα τις επιδόσεις των σχημάτων διαφορικής λήψης. Αρχικά, για  $\sigma=2$  στην πρώτη γραφική παράσταση βλέπουμε ότι τις καλύτερες επιδόσεις έχει το

σχήμα MRC. Αυτό ήταν αναμενόμενο καθώς οι υπολογισμοί έγιναν με βάση τον τύπο (2.44) όπου βλέπουμε ότι για όλες τις τιμές των  $\gamma_1, \gamma_2$  το  $\gamma_{MRC}$  είναι πάντα μεγαλύτερο από τα άλλα δύο. Εξετάζοντας και τις υπόλοιπες γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε το ίδιο που είναι αναμενόμενο. Για τα άλλα δύο είδη όμως δεν ισχύει το ίδιο. Αρχικά, για  $\sigma=2$  παρατηρούμε ότι το EGC έχει πολύ καλύτερες επιδόσεις από το SC ( $\gamma_{EGC} > \gamma_{SC}$ ). Στη συνέχεια, και καθώς ανεβαίνει το  $\sigma$  οι επιδόσεις του SC βελτιώνονται σε σχέση με τις αντίστοιχες επιδόσεις του EGC ενώ για  $\sigma=6$  το  $\gamma_{SC}$  είναι μεγαλύτερο από το  $\gamma_{EGC}$ , πράγμα που συμβαίνει και για  $\sigma=8$ . Αυτό είναι λογικό αν

συγκρίνουμε τους όρους  $\max(\gamma_1, \gamma_2)$  και  $\frac{(\sqrt{\gamma_1} + \sqrt{\gamma_2})^2}{2}$  που ισχύουν για τα  $\gamma_{SC}$

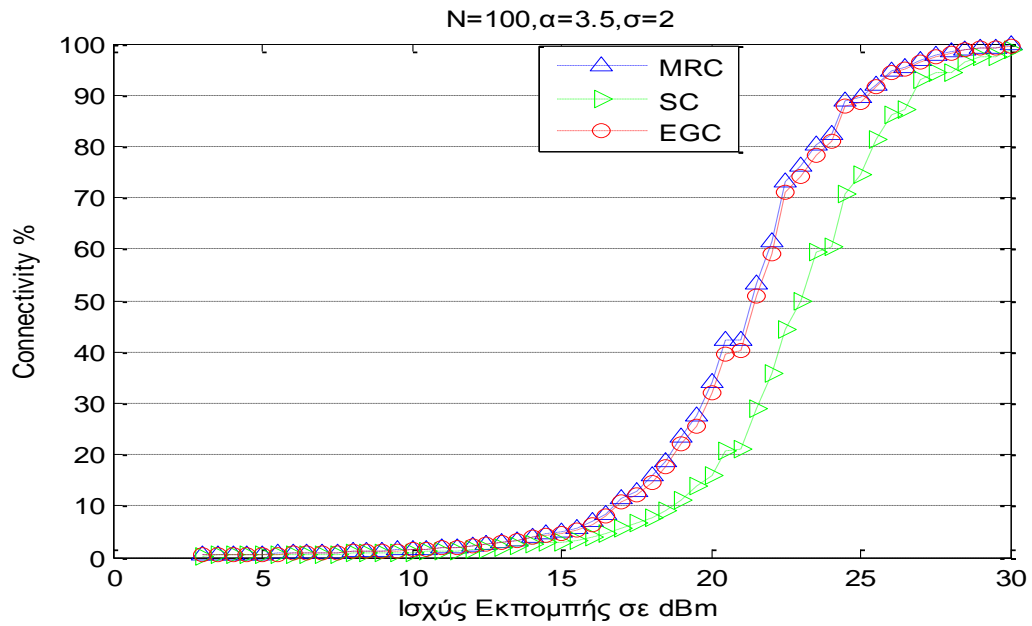
και  $\gamma_{EGC}$  αντίστοιχα. Για παράδειγμα για  $\gamma_1 = \gamma_2$  βλέπουμε ότι  $\gamma_{SC} = \gamma_1$  ενώ  $\gamma_{EGC} = 2\gamma_1$  δηλαδή το EGC έχει πολύ καλύτερα αποτελέσματα (ίδια με την περίπτωση του MRC). Αν δοκιμάσουμε να αυξήσουμε το ένα από τα δύο  $\gamma$  (δεν έχει σημασία ποιό) για παράδειγμα το  $\gamma_1$  έτσι ώστε  $\gamma_1 = 2\gamma_2$  τότε  $\gamma_{SC} = \gamma_1$  ενώ  $\gamma_{EGC} = 1,45\gamma_1$ . Βλέπουμε δηλαδή ότι όσο αυξάνει η διαφορά μεταξύ  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  η επίδοση του EGC χειροτερεύει. Για να βρούμε πότε η επίδοση του EGC θα είναι ίδια με την επίδοση

του SC αρκεί να λύσουμε την εξίσωση  $\frac{(\sqrt{x\gamma_2} + \sqrt{\gamma_2})^2}{2} = x\gamma_2$  όπου έχουμε θέσει  $\gamma_1 = x$

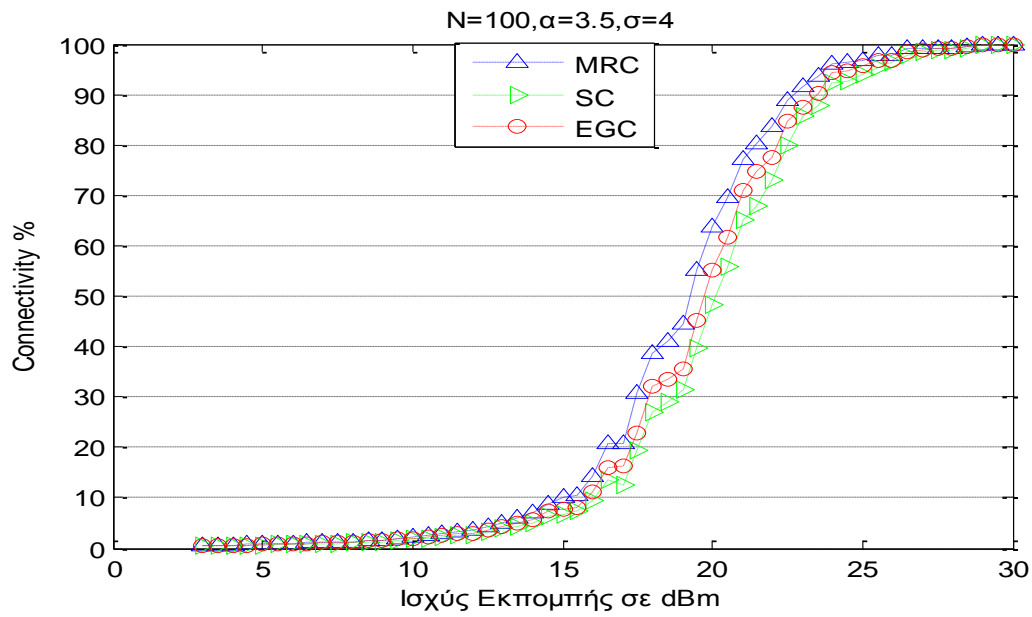
$\gamma_2$ . Η εξίσωση αυτή έχει λύση για  $x=5,8$  οπότε θα είναι  $\gamma_{SC} = \gamma_{EGC}$  όταν  $\gamma_1 = 5,8\gamma_2$  ή  $\gamma_2 = 5,8\gamma_1$ . Στη συνέχεια, όσο αυξάνεται η διαφορά είναι φανερό ότι η επίδοση του SC είναι καλύτερες.

Οι σηματοθορυβικοί λόγοι  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$  προκύπτουν από τη σχέση (3.1) και η μόνη διαφορά που έχουν μεταξύ τους αφορά τον παράγοντα που οφείλεται στη σκίαση. Έτσι λοιπόν, όσο αυξάνεται το  $\sigma$  αυξάνεται και η διαφορά μεταξύ  $\sigma$  και  $\sigma_1$  που οδηγεί με τη σειρά της σε αύξηση της διαφοράς μεταξύ  $\gamma_1$  και  $\gamma_2$ .

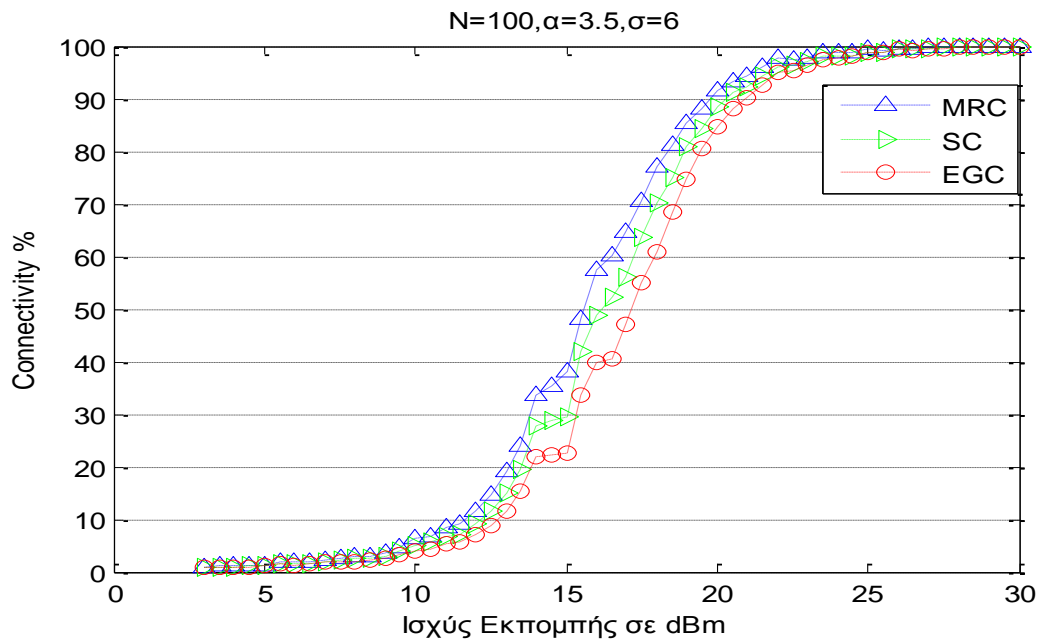
Για  $N=100$  και  $\alpha=3,5$  προκύπτουν οι παρακάτω γραφικές παραστάσεις



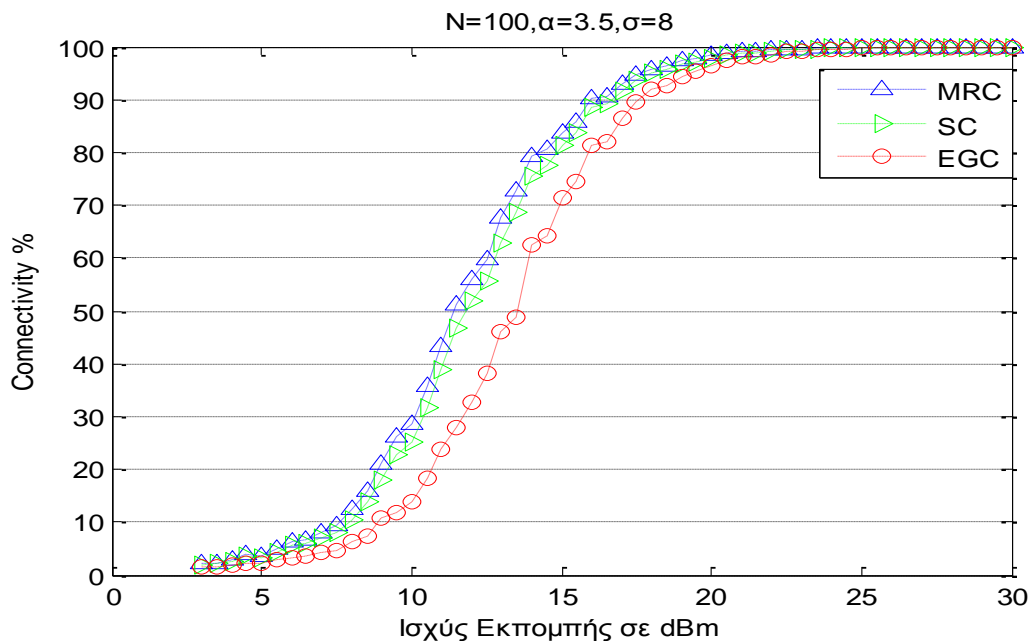
Σχήμα 4.5- συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για N=100,α=3.5,σ=2



Σχήμα 4.6- συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για N=100,α=3.5,σ=4



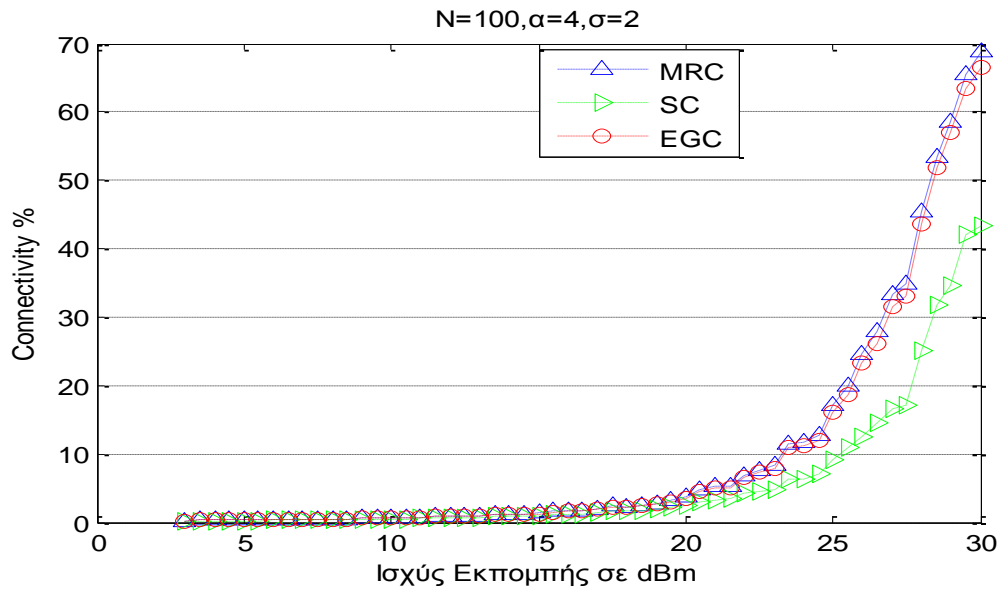
Σχήμα 4.7- συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για  $N=100, \alpha=3.5, \sigma=6$



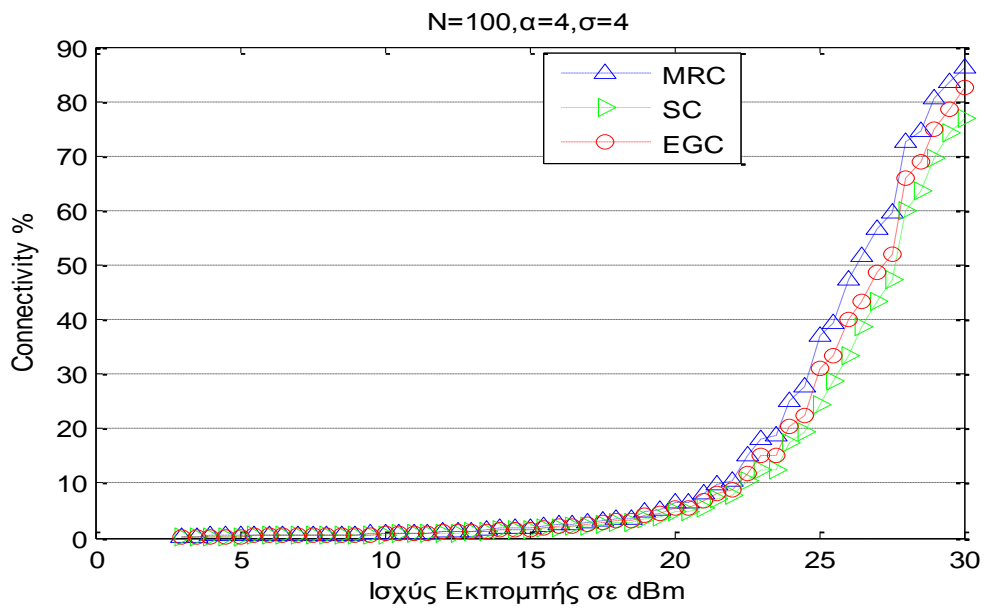
Σχήμα 4.8 -συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για  $N=100, \alpha=3.5, \sigma=8$

Από τις παραπάνω γραφικές παρατηρούμε αρχικά ότι έχουμε πολύ χαμηλότερα επίπεδα συνδεσιμότητας από τις προηγούμενες προσομοιώσεις λόγω της αύξησης του παράγοντα απωλειών  $\alpha$ . Βλέπουμε επίσης, ότι και για  $\alpha=3.5$  το MRC επιτυγχάνει πάντα μεγαλύτερη συνδεσιμότητα. Για  $\sigma=2,4$  το EGC είναι καλύτερο απ'το SC, ενώ το SC σταδιακά βελτιώνεται και για  $\sigma=8$  φτάνει τα επίπεδα συνδεσιμότητας του MRC, όπως ήταν αναμενόμενο

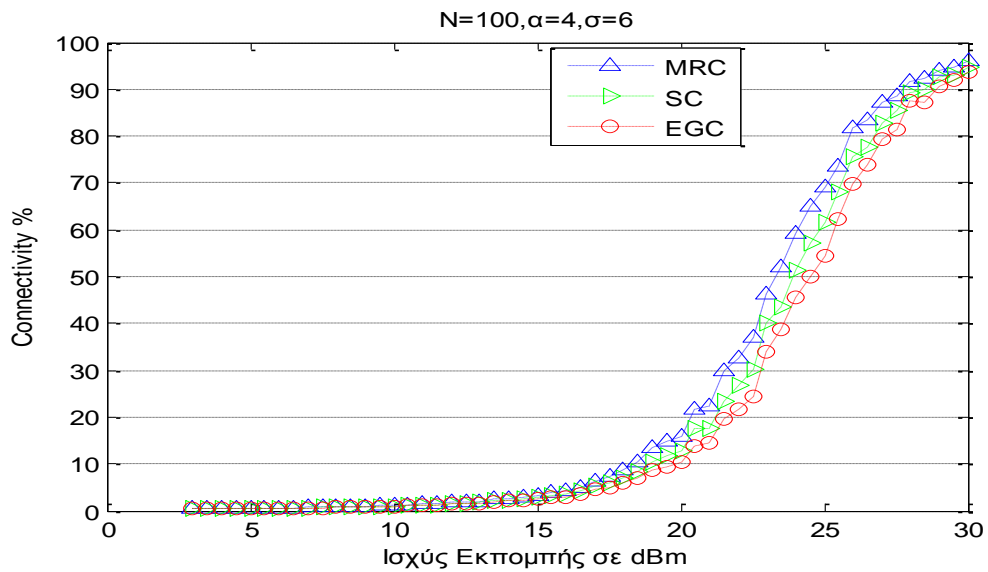
Για  $N=100$  και  $\alpha=4$  από τις προσομοιώσεις προέκυψαν τα παρακάτω αποτελέσματα.



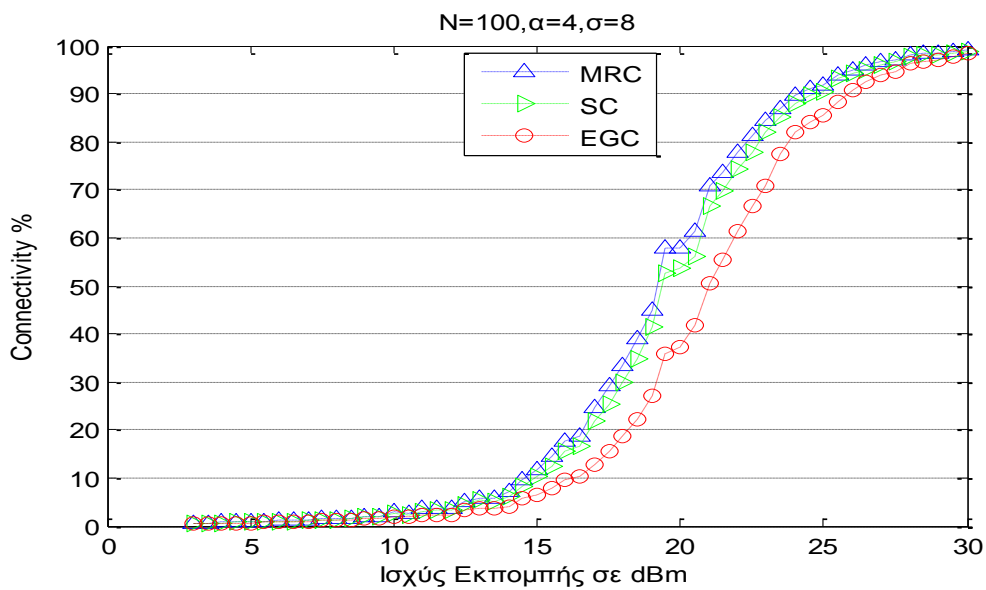
Σχήμα 4.9 -συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για  $N=100, \alpha=4, \sigma=2$



Σχήμα 4.10- συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για  $N=100, \alpha=4, \sigma=4$



Σχήμα 4.11- συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για N=100,α=4,σ=6



Σχήμα 4.12 -συνδεσιμότητα και σύγκριση MRC,SC,EGC για N=100,α=4,σ=8

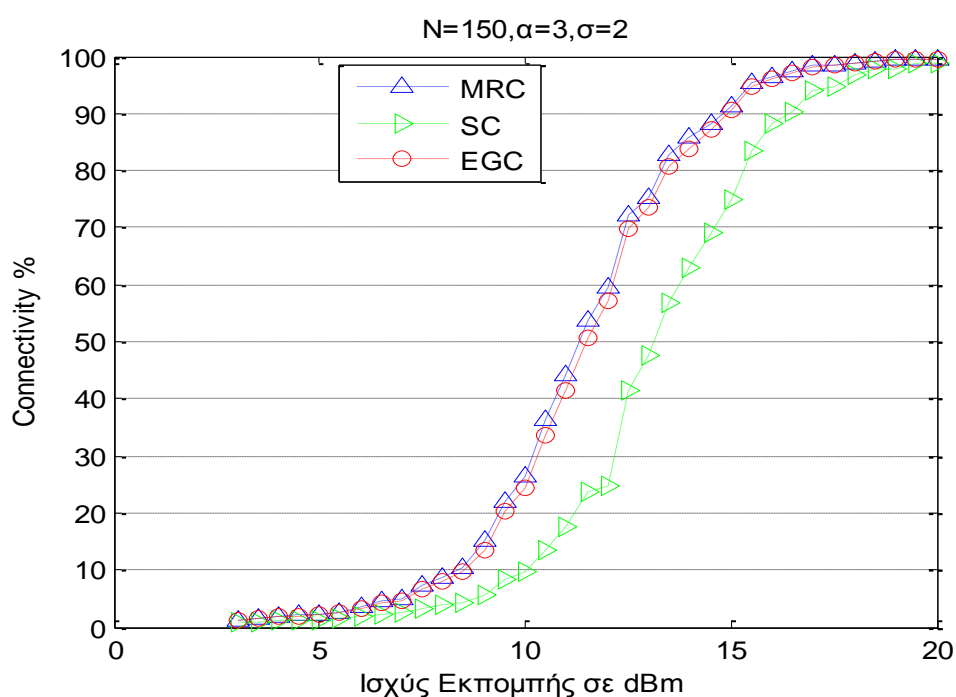
Για  $\alpha=4$  βλέπουμε όπως ήταν αναμενόμενο ότι τα επίπεδα συνδεσιμότητας είναι αρκετά χαμηλά λόγω των ιδιαίτερα υψηλών απωλειών διαδρομής. Οι παρατηρήσεις σχετικά με την επιλογή των σχημάτων διαφορικής λήψης είναι ίδιες με τα προηγούμενα.

### 4.3.2 $N=150$

Σε αυτό το σημείο ακολουθούν τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για  $N=150$ . Για  $\alpha=3$  και τιμές που δόθηκαν παραπάνω για τις παραμέτρους του SNR προκύπτουν οι ακόλουθες γραφικές παραστάσεις. Οι προσομοιώσεις έγιναν για  $\sigma=2,4,6,8$  και ισχύς από 3 έως 20dBm με βήμα 0.5dBm. Σταματήσαμε στα 20dBm καθώς η συνδεσιμότητα ακόμη και για  $\sigma=2$  ήταν ιδιαίτερα υψηλή και δεν υπήρχε νόημα να αυξηθεί κ άλλο η ισχύς εκπομπής.

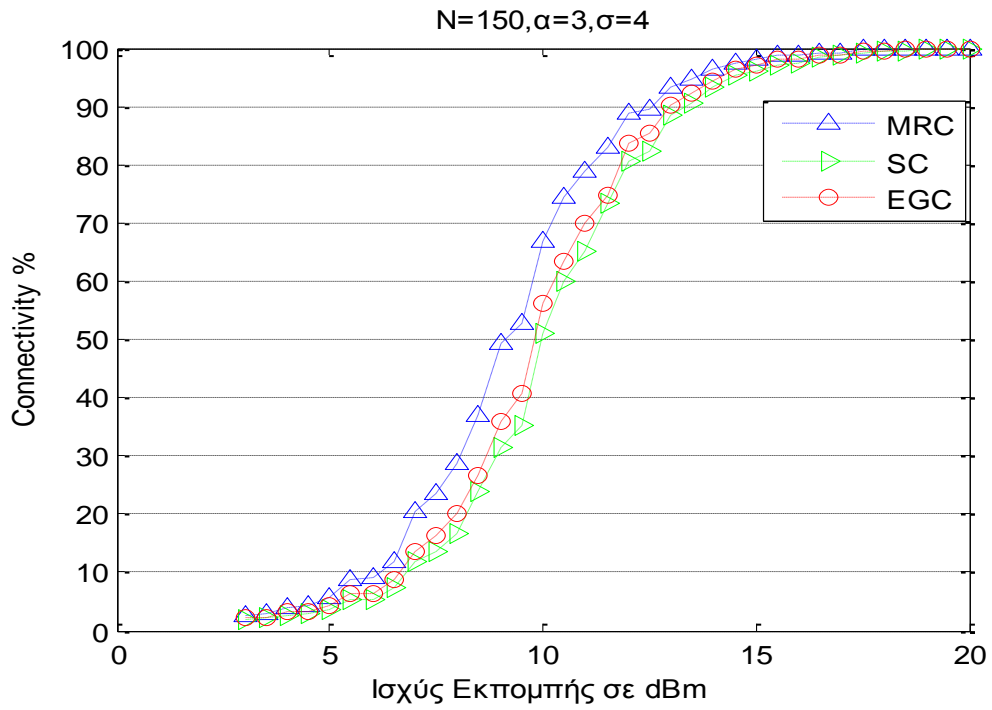
Από τις παρακάτω γραφικές παραστάσεις παρατηρούμε πολύ υψηλά ποσοστά συνδεσιμότητας καθώς οι χαμηλές απώλειες διαδρομής σε συνδιασμό με τη διαφορική λήψη οδηγούν σε ιδιαίτερα ευνοικά αποτελέσματα. Βλέπουμε ότι για  $\sigma=2$  και ισχύ εκπομπής στα 16dBm η συνδεσιμότητα είναι πάνω από 90% για όλες τις τεχνικές διαφορικής λήψης.

Έπειτα, όσο αυξάνεται το  $\sigma$  η συνδεσιμότητα αυξάνεται ραγδαία και από σχήμα 4.16 βλέπουμε ότι είναι 75% (για MRC) ακόμη και για  $P_t=3$ dBm.

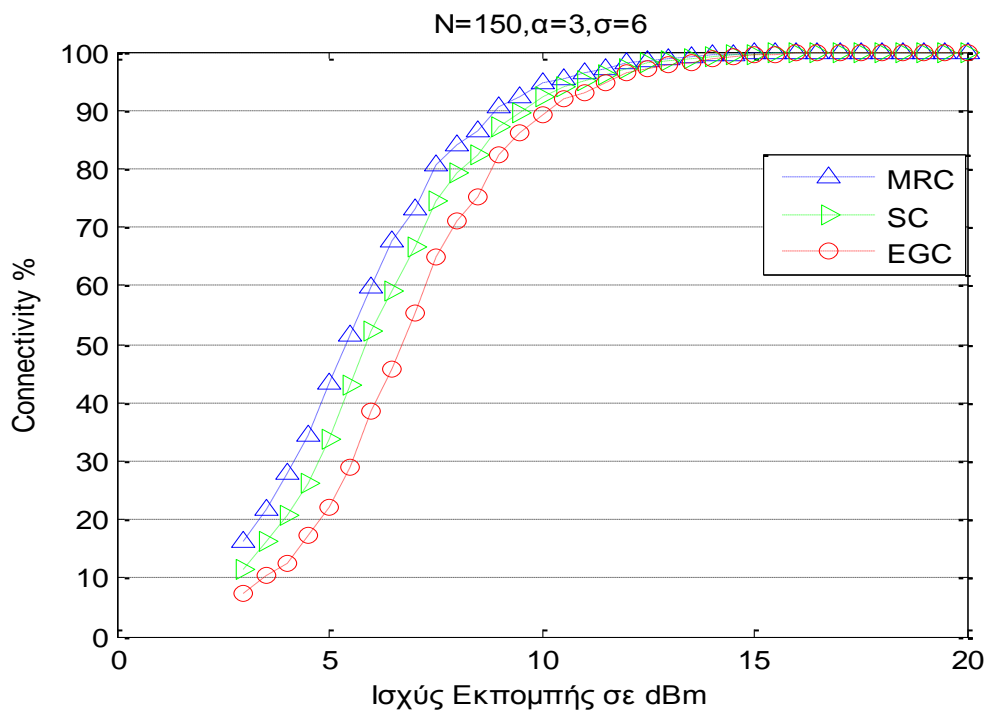


Σχήμα 4.13 -συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για  $N=150, \alpha=3, \sigma=2$

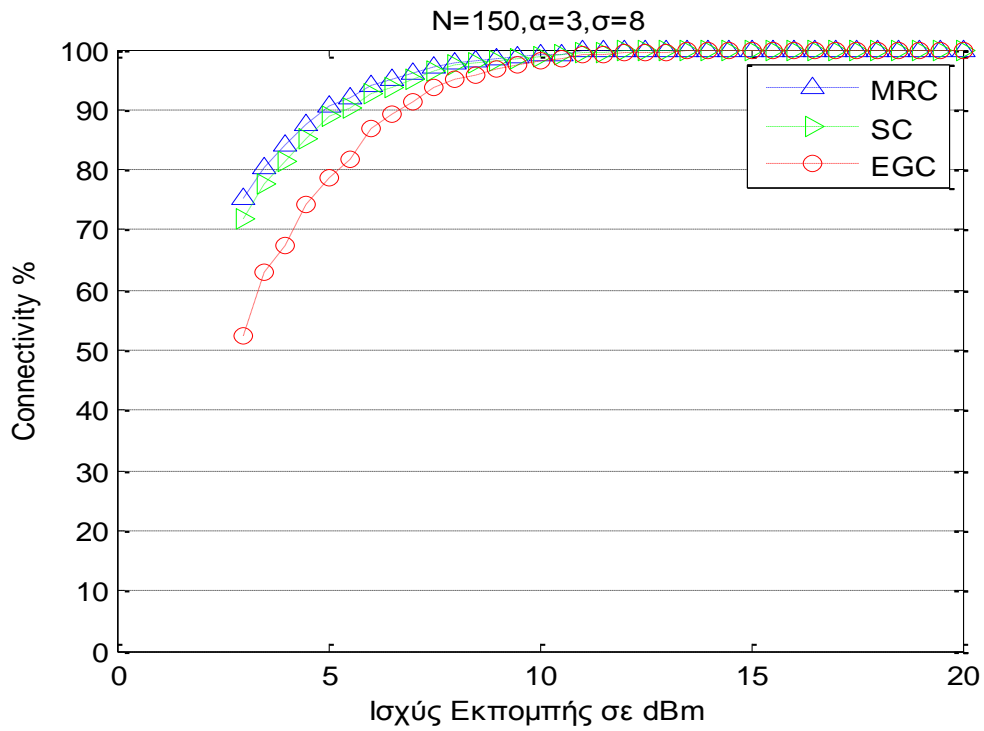




Σχήμα 4.14 -συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για N=150,α=3,σ=4

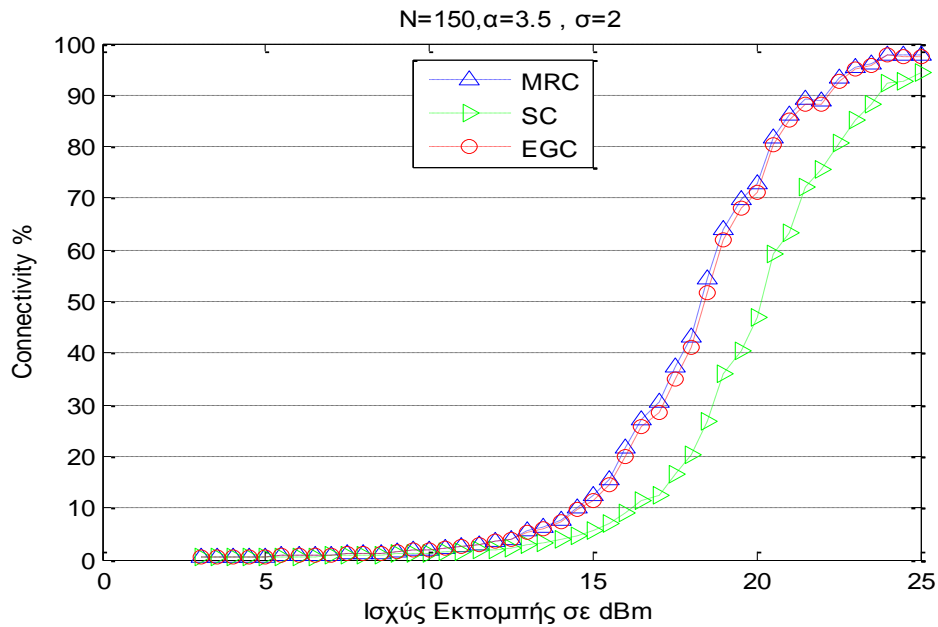


Σχήμα 4.15- συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για N=150,α=3,σ=6

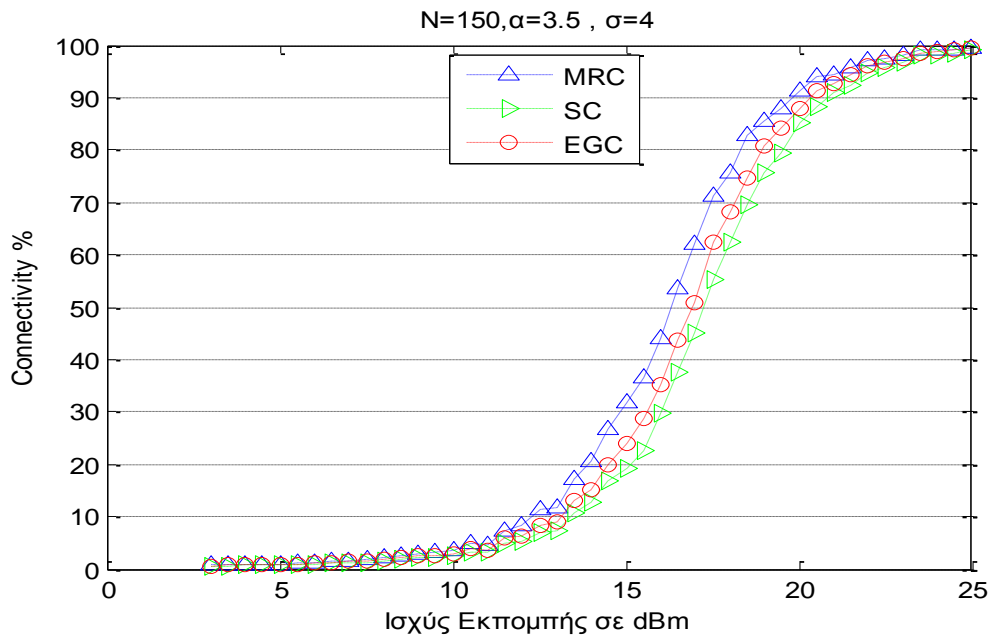


Σχήμα 4.16 -συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για  $N=150, \alpha=3, \sigma=8$

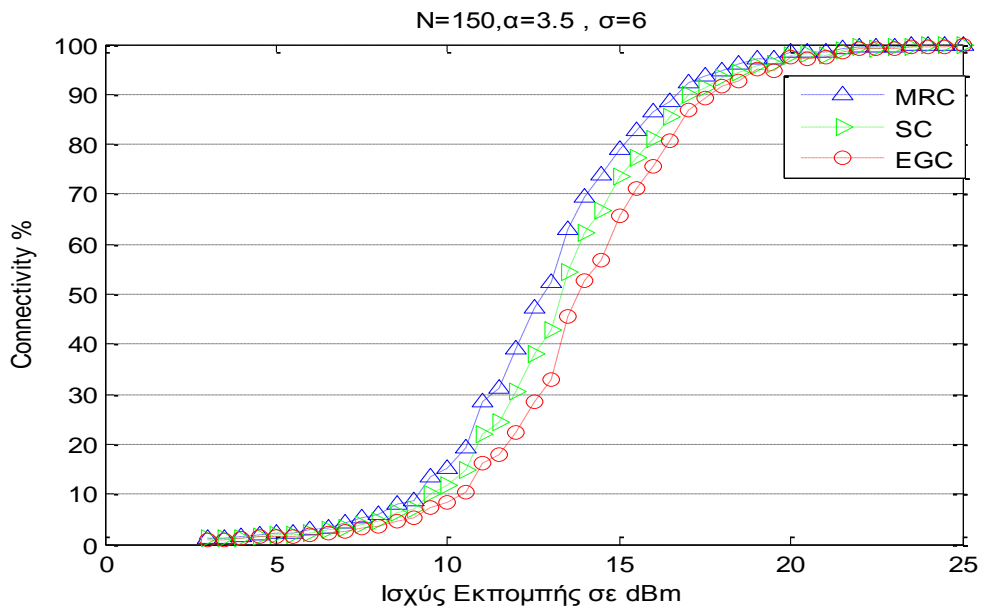
Για  $\alpha=3.5$  φτάνουμε μέχρι ισχύ εκπομπής στα 25dBm καθώς εκεί είναι η συνδεσιμότητα πάντα μεγαλύτερη από 90% για κάθε  $\sigma$  και κάθε τεχνική διαφορικής λήψης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων φαίνονται παρακάτω.



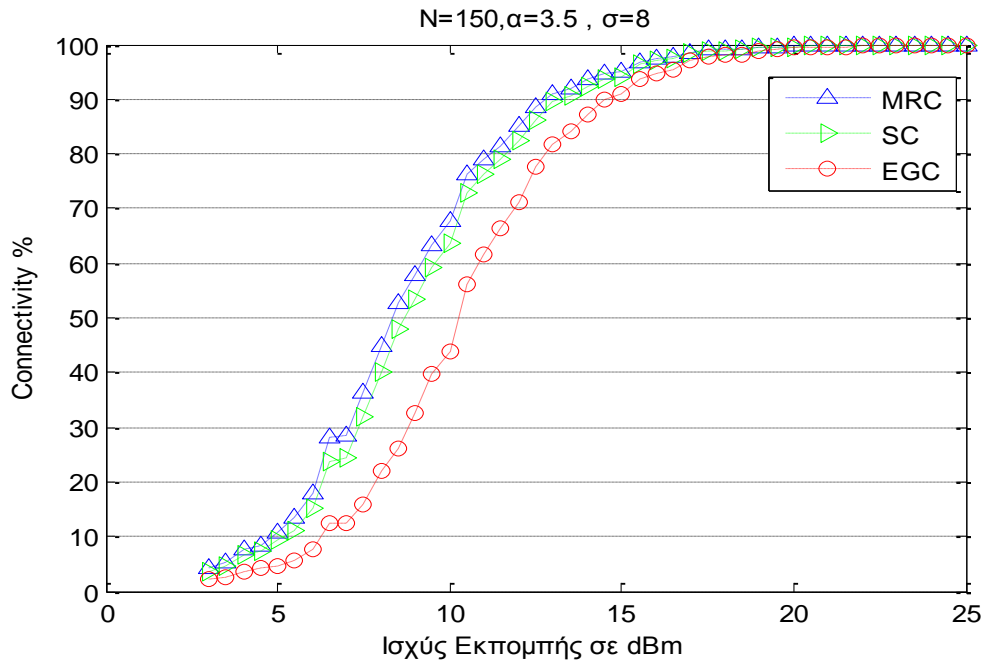
Σχήμα 4.17- συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για  $N=150, \alpha=3.5, \sigma=2$



Σχήμα 4.18 -συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για N=150,α=3.5,σ=4



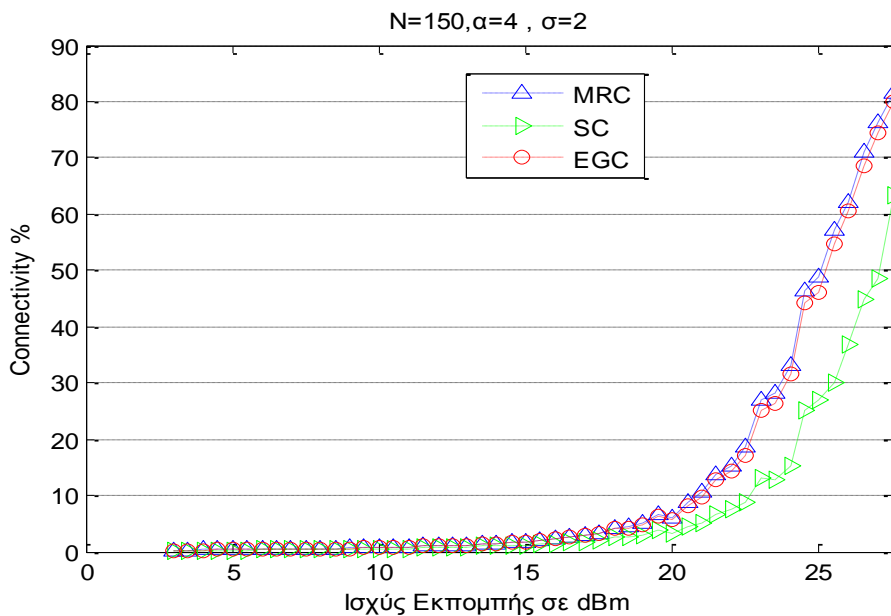
Σχήμα 4.19- συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για N=150,α=3.5,σ=6



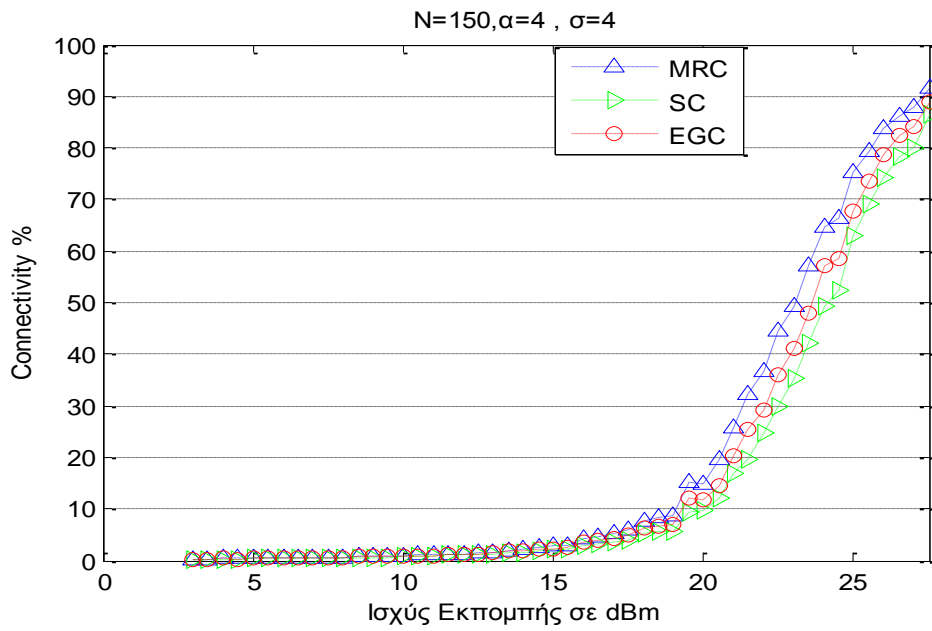
Σχήμα 4.20- συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για N=150,  $\alpha=3.5$ ,  $\sigma=8$

Βλέπουμε σε γενικές γραμμές αναμενόμενα αποτελέσματα με την συνδεσιμότητα να αυξάνει αξιοσημείωτα με κάθε αύξηση της τυπικής απόκλισης της σκίασης. Για τις διαφορετικές τεχνικές αδιαφορικής λήψης βλέπουμε ότι ισχυεύει ότι αναφέραμε για τους N=100 κόμβους

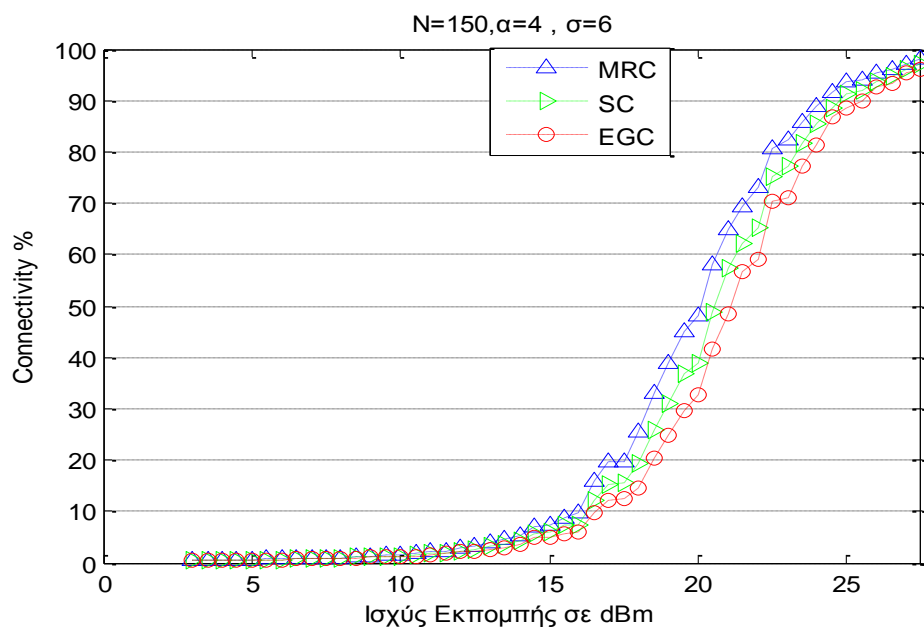
Για  $\alpha=4$  επιλέγουμε και πάλι 0.5dBm ως βήμα αύξησης της ισχύος εκπομπής και φτάνουμε μέχρι τα 27.5dBm. Από τις προσομοιώσεις προκύπτουν τα σχήματα



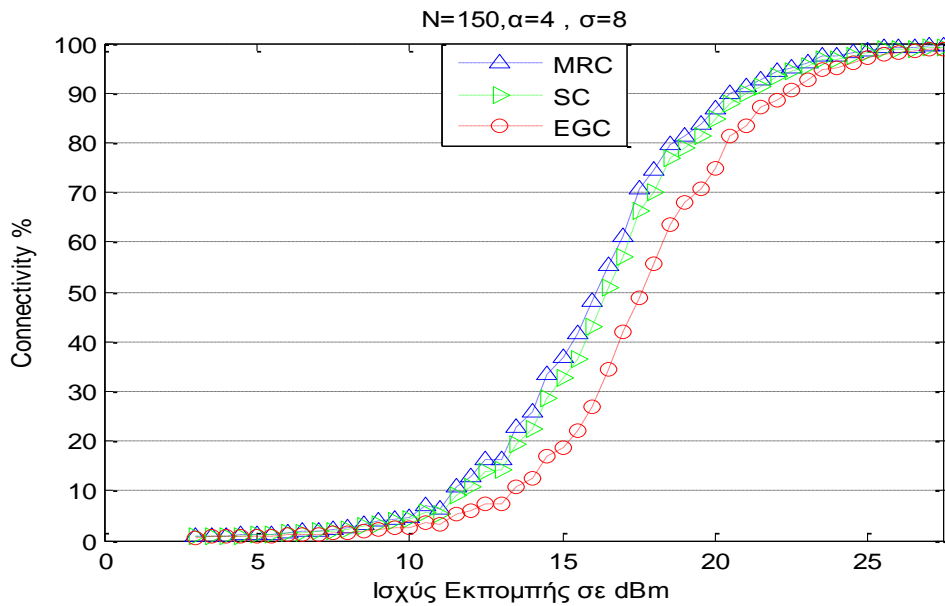
Σχήμα 4.21- συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για N=150,  $\alpha=4$ ,  $\sigma=2$



Σχήμα 4.22- συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για N=150,α=4,σ=4



Σχήμα 4.23- συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για N=150,α=4,σ=6



Σχήμα 4.24 -συνδεσιμότητα MRC,SC,EGC για  $N=150, \alpha=4, \sigma=8$

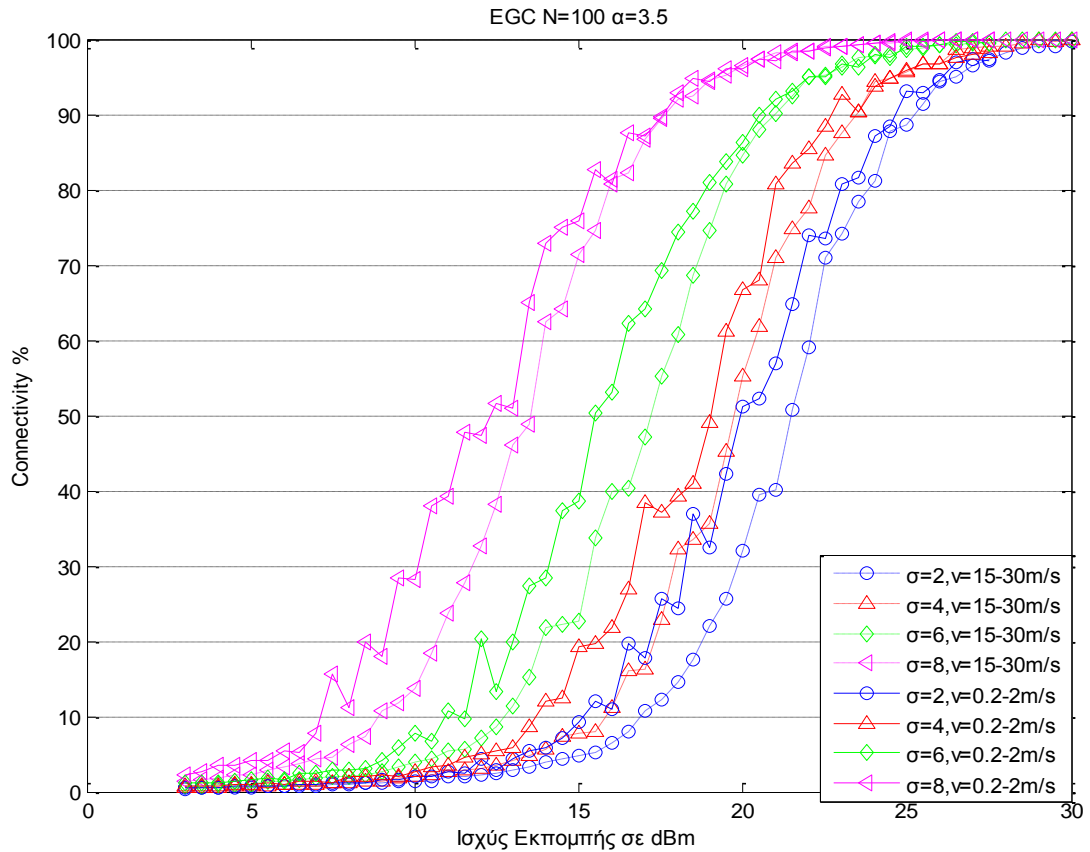
Τα συμπεράσματα για τη διαφορική λήψη είναι παρόμοια με τις προηγούμενες προσομοιώσεις, ενώ παρατηρούμε γενικά χαμηλά επίπεδα συνδεσιμότητας λόγω του υψηλού παράγοντα  $\alpha$ .

#### 4.3.3 σύγκριση με διαφορετική ταχύτητα

Σε αυτό το σημείο κάναμε κάποιες νέες προσομοιώσεις με αλλαγή στην ταχύτητα κάθε κόμβου στα 0,2-2 m/s. Συγκρίνουμε τα αποτελέσματα για κάθε διαφορετική τεχνική διαφορικής λήψης για όλα τα  $\sigma$ . Για ίδια  $\sigma$  και διαφορετική ταχύτητα χρησιμοποιούμε ίδιο χρώμα καμπύλης με μόνη διαφορά τη συνεχή (υψηλές ταχύτητες) ή διακεκομμένη (χαμηλές ταχύτητες) γραμμή.

Για  $N=100$  και  $\alpha=3.5$  από το σχήμα 4.25 βλέπουμε ότι για κάθε  $\sigma$  το connectivity είναι μεγαλύτερο για χαμηλές ταχύτητες. Αυτό το αποτέλεσμα είναι σύμφωνο με τα αποτελέσματα που παρουσιάσαμε στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο που δίνουν υψηλότερη συνδεσιμότητα για χαμηλές ταχύτητες λόγω σταθερότερου δικτύου.

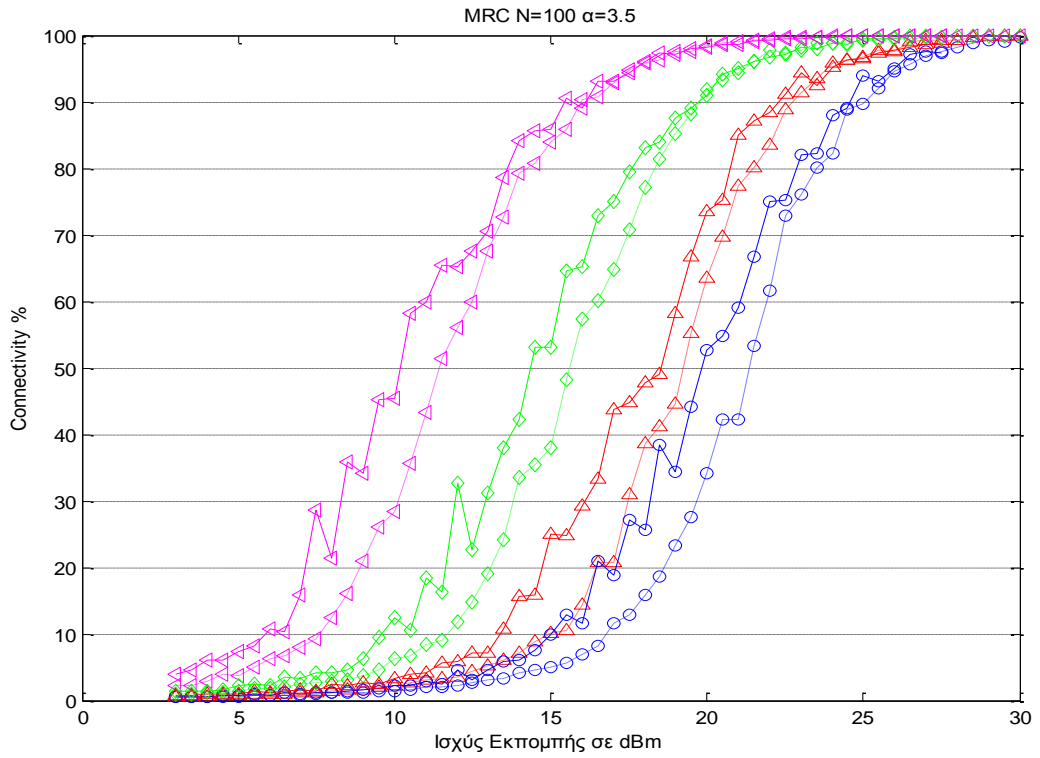
Πρέπει επίσης να αναφέρουμε ότι ο χρόνος παύσης του μοντέλου κινητικότητας είναι στο διάστημα 0-15sec και έμεινε σταθερά σε αυτό το διάστημα σε όλες τις προσομοιώσεις.



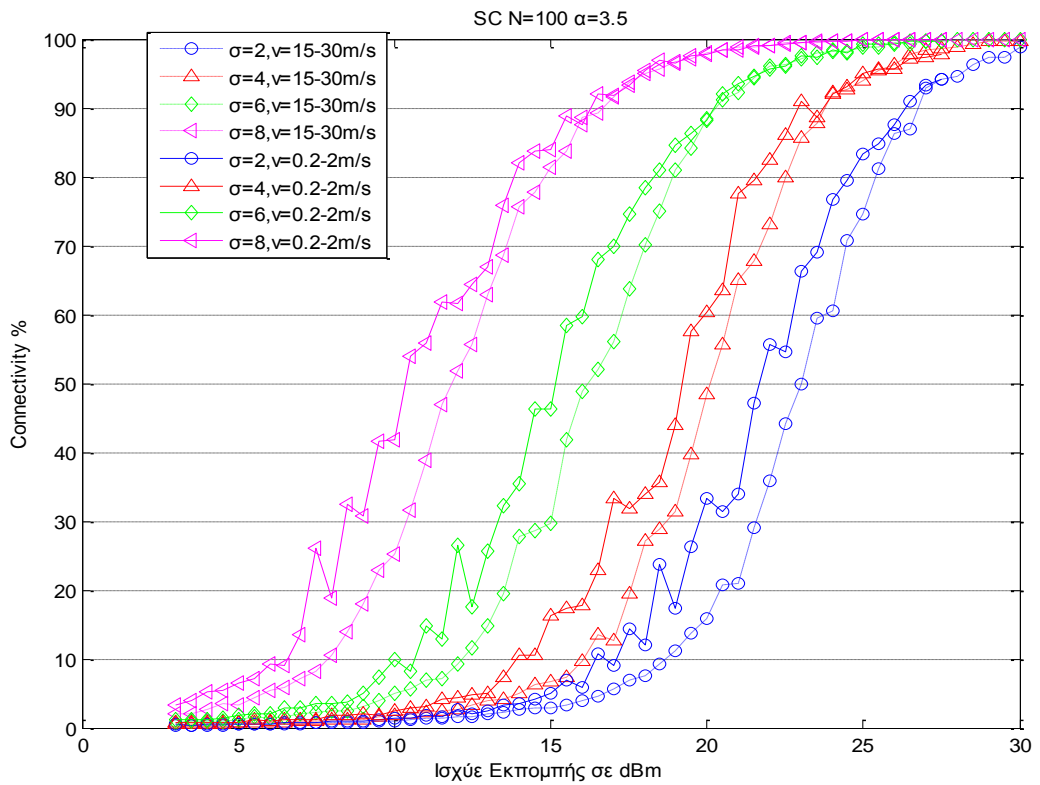
Σχήμα 4.25- συνδεσιμότητα για EGC, N=100, α=3,5 για διαφορετικές ταχύτητες κόμβων

Επιπλέον βλέπουμε ότι για μικρές ταχύτητες τα αποτελέσματα από τις προσομοιώσεις δείχνουν κάποια "ανεβοκατεβάσματα" στο διάγραμμα της συνδεσιμότητας, που οφείλονται στο μοντέλο κινητικότητας και στο θέμα της αρχικοποίησης της θέσης των κόμβων στο χώρο.

Για τις τεχνικές MRC, SC τα αποτελέσματα είναι παρόμοια όπως φαίνεται από τα σχήματα 4.26,4.27.



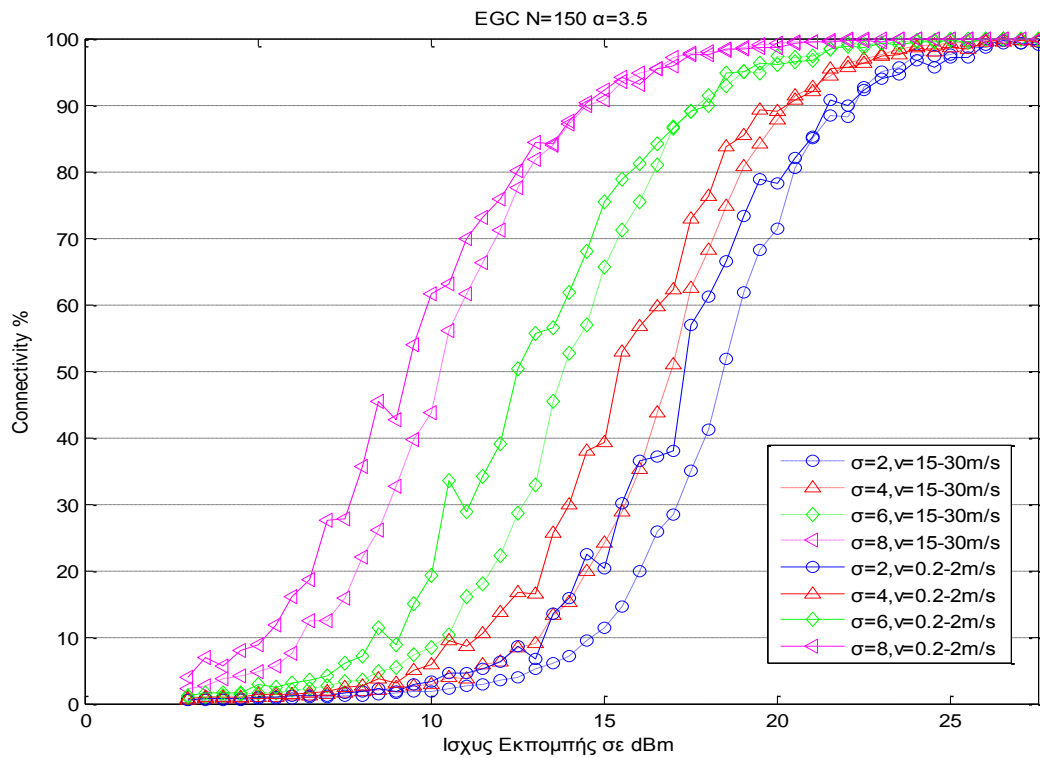
Σχήμα 4.26- συνδεσιμότητα για MRC,N=100, $\alpha=3,5$  για διαφορετικές ταχύτητες κόμβων



Σχήμα 4.27- συνδεσιμότητα για SC,N=100, $\alpha=3,5$  για διαφορετικές ταχύτητες κόμβων

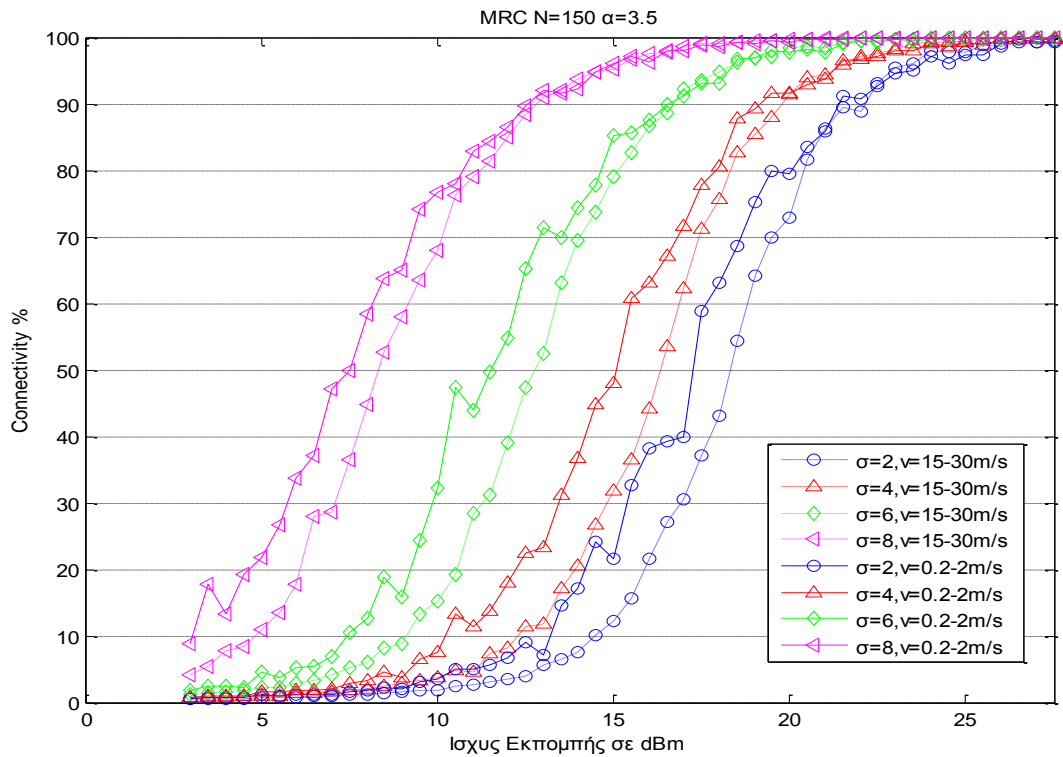


Στη συνέχεια παραθέτουμε τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων για  $N=150$  και για κάθε τεχνική διαφορικής λήψης ξεχωριστά.

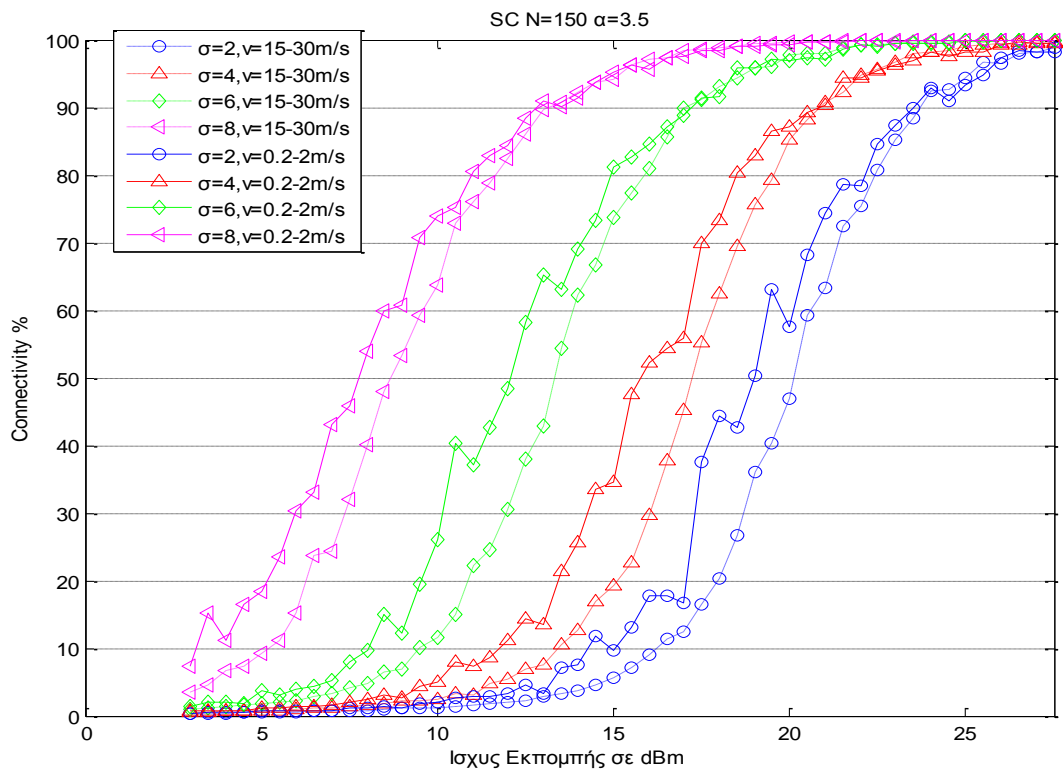


Σχήμα 4.28- συνδεσιμότητα για EGC,  $N=150, \alpha=3,5$  για διαφορετικές ταχύτητες κόμβων

Από το σχήμα 4.28 βλέπουμε ότι οι μικρότερες ταχύτητες οδηγούν σε υψηλότερη συνδεσιμότητα όπως και προηγουμένως. Από τα δυο επόμενα σχήματα για τις τεχνικές MRC και SC παρατηρούμε και πάλι για όλα τα  $\sigma$  αύξηση της συνδεσιμότητας με τη μείωση της ταχύτητας για ίδιους χρόνους παύσης του μοντέλου κινητικότητας τυχαίων στάσεων.



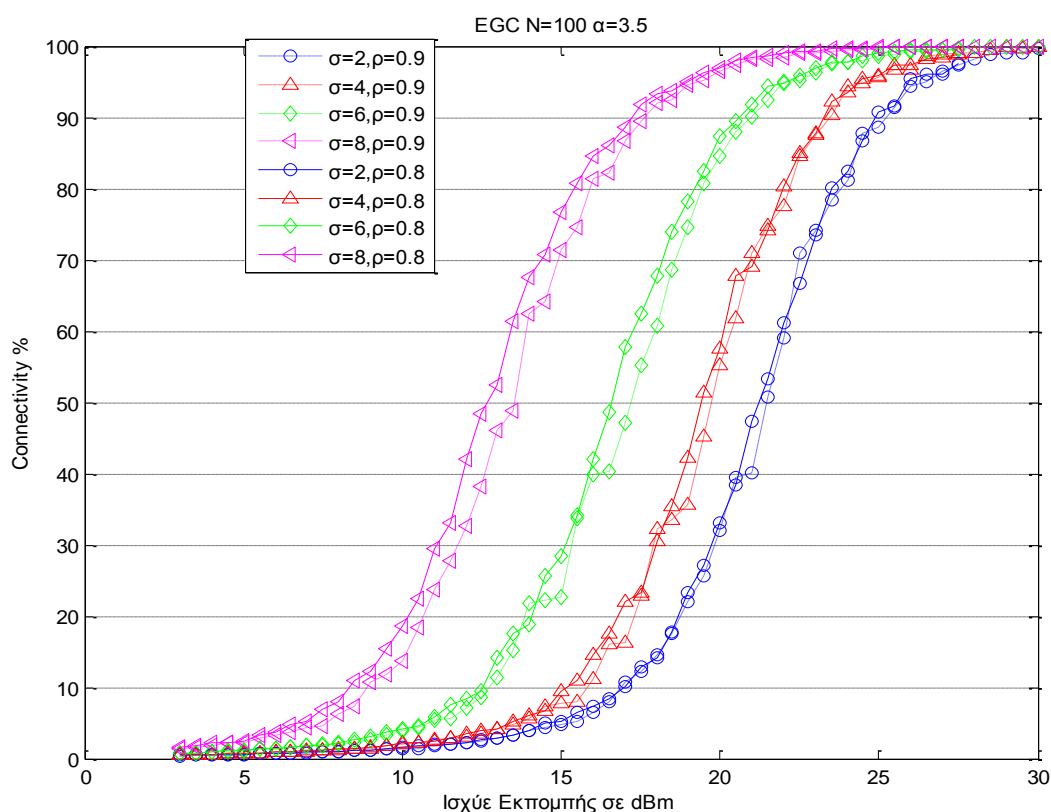
Σχήμα 4.29-συνδεσιμότητα για MRC, N=150  $\alpha=3,5$  για διαφορετικές ταχύτητες κόμβων



Σχήμα 4.30-συνδεσιμότητα για SC, N=150,  $\alpha=3,5$  για διαφορετικές ταχύτητες κόμβων

### 4.3.4 σύγκριση με διαφορετικό συντελεστή συσχέτισης

Στις τελευταίες προσομοιώσεις της συγκεκριμένης διπλωματικής εξετάζουμε αν και πώς επηρεάζει τη συνδεσιμότητα η αλλαγή του συντελεστή συσχέτισης  $\rho$ . Σε όλες τις προσομοιώσεις αρχικά είχαμε επιλέξει  $\rho=0.9$ , ενώ τώρα εξετάζουμε τη συνδεσιμότητα για  $\rho=0.8$ .



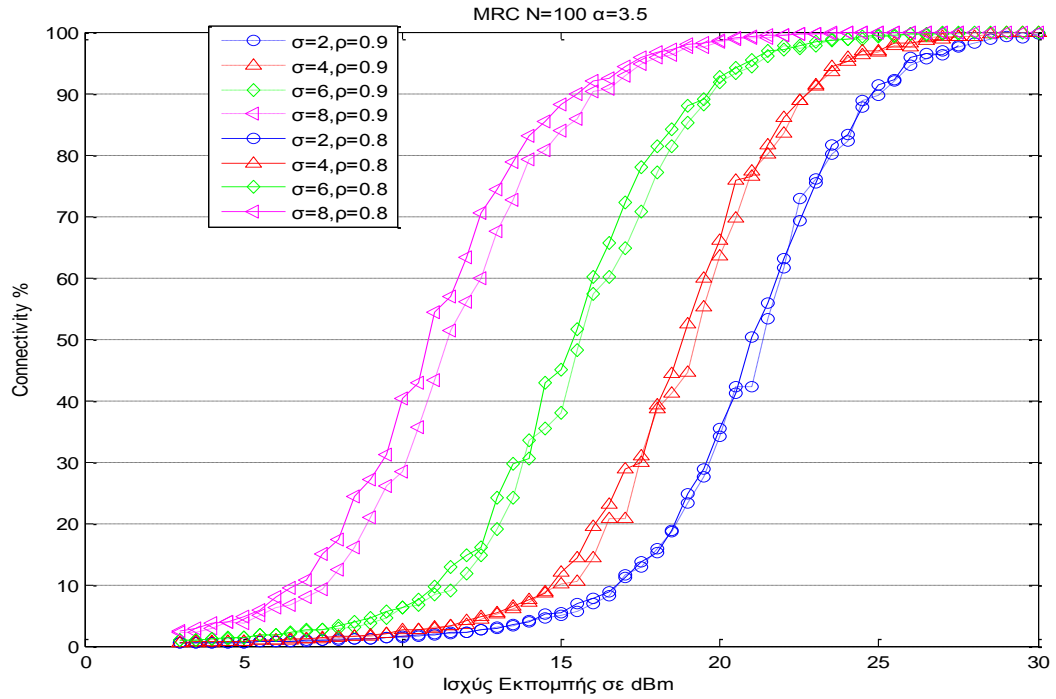
Σχήμα 4.31 συνδεσιμότητα για EGC,  $N=100, \alpha=3,5$  για διαφορετικό συντελεστή  $\rho$

Αρχικά για την τεχνική EGC και  $N=100$  από το σχήμα 4.31 βλέπουμε ότι για  $\sigma=2$  η διαφορά στις δυο καμπύλες είναι αμελητέα. Για  $\sigma=4$  οι επιδόσεις για  $\rho=0.8$  φαίνονται λίγο καλύτερες ενώ για  $\sigma=6$  και  $\sigma=8$  dB για  $\rho=0.8$  έχουμε φανερά μεγαλύτερη συνδεσιμότητα.

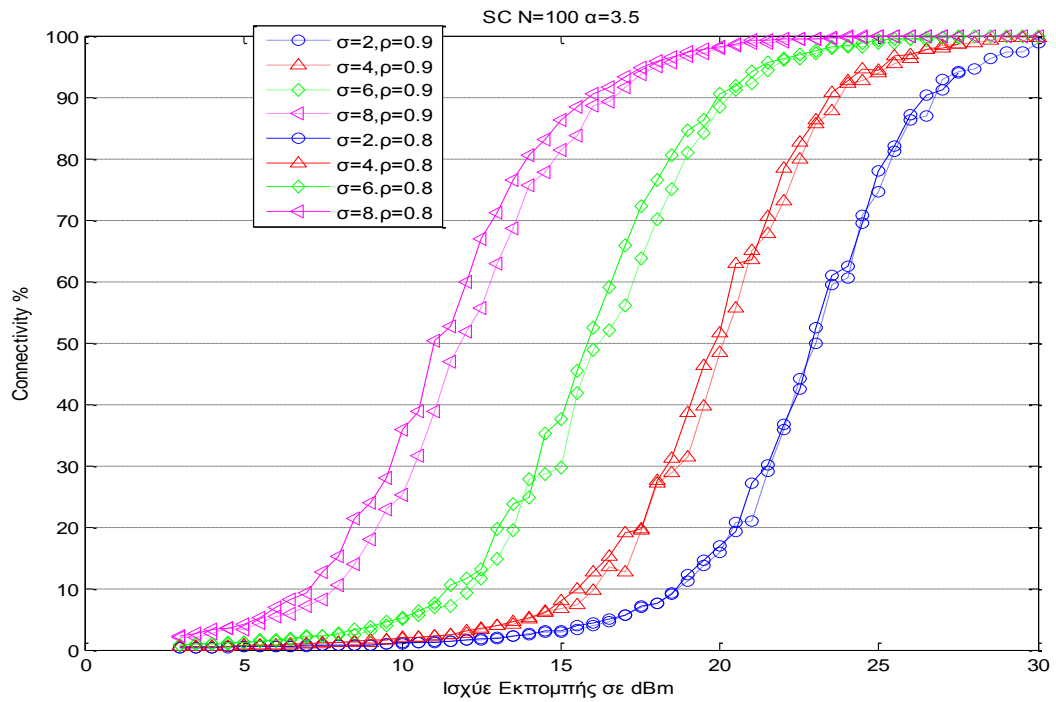
Τα αποτελέσματα αυτά είναι λογικά αν ανατρέξουμε στη σχέση 3.2. Για  $\rho=0.9$  έχουμε  $(\sqrt{1-\rho^2} + \rho)=1.33$ , ενώ για  $\rho=0.8$  είναι  $(\sqrt{1-\rho^2} + \rho)=1.4$ . Λόγω του

μεγαλύτερου αυτού παράγοντα το  $\sigma_1$  για  $\rho=0.8$  θα είναι πάντα μεγαλύτερο από το  $\sigma_1$  για  $\rho=0.9$  για ίδιο  $\sigma$ .

Ακολουθούν τα αποτελέσματα για τις άλλες δυο τεχνικές διαφορικής λήψης.



Σχήμα 4.32 συνδεσιμότητα για MRC,  $N=100, \alpha=3,5$  για διαφορετικό συντελεστή  $\rho$



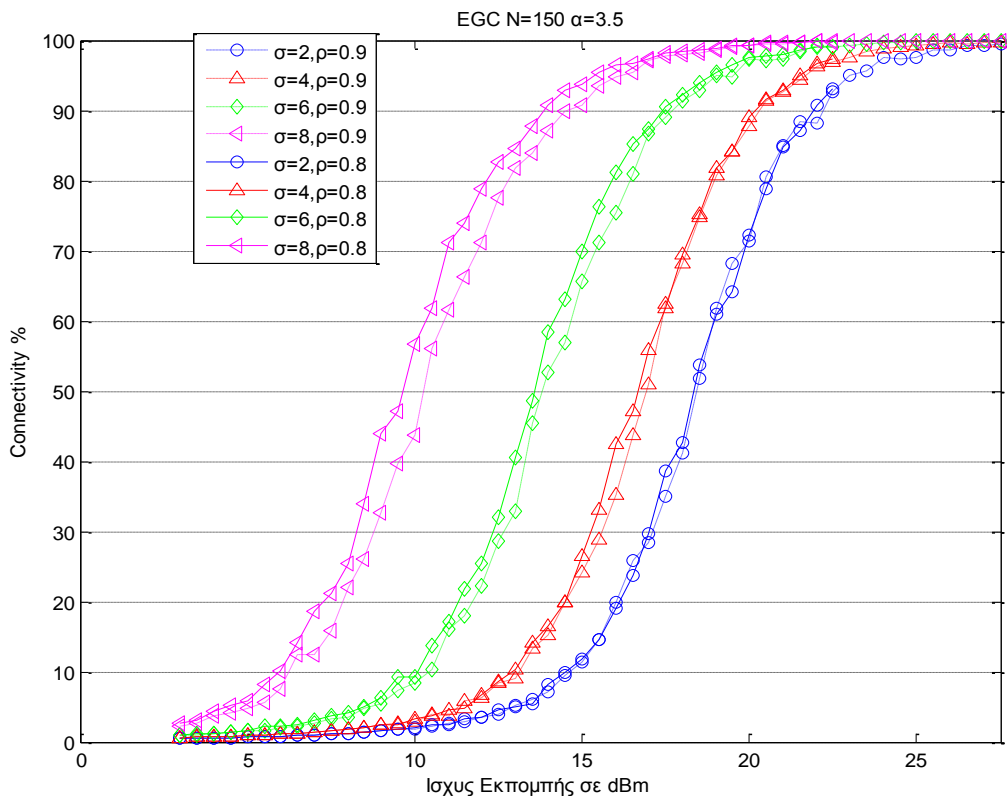
Σχήμα 4.33 συνδεσιμότητα για SC,  $N=100, \alpha=3,5$  για διαφορετικό συντελεστή  $\rho$

Από τα σχήματα 4.32 και 4.33 βλέπουμε και πάλι ότι ο συντελεστής συσχέτισης  $\rho=0.8$  δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τον  $\rho=0.9$  κυρίως για μεγάλες τιμές του  $\sigma$ .

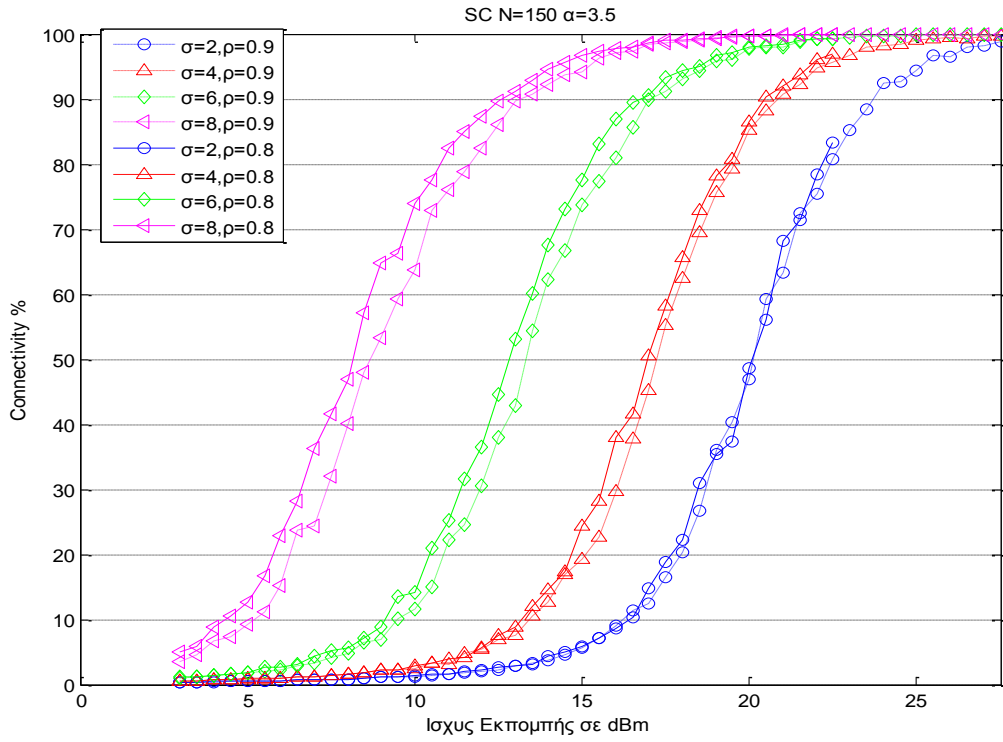
Για  $N=150$  προσομοιώνουμε και πάλι το δίκτυο για να δούμε την επίδραση του διαφορετικού συντελεστή εξασθένησης. Ξεκινάμε από ισχύ εκπομπής 3dBm και φτάνουμε μέχρι τα 27.5dBm με βήμα 0.5dBm.

Αρχικά, για την τεχνική EGC παρατηρούμε ότι η συνδεσιμότητα αυξάνεται με μεγαλύτερο ρυθμό για  $\rho=0.8$  με την αύξηση του  $\sigma$ , ενώ τα αποτελέσματα που προκύπτουν για τις άλλες δύο τεχνικές (σχήματα 4.35-4.36) είναι παρόμοια.

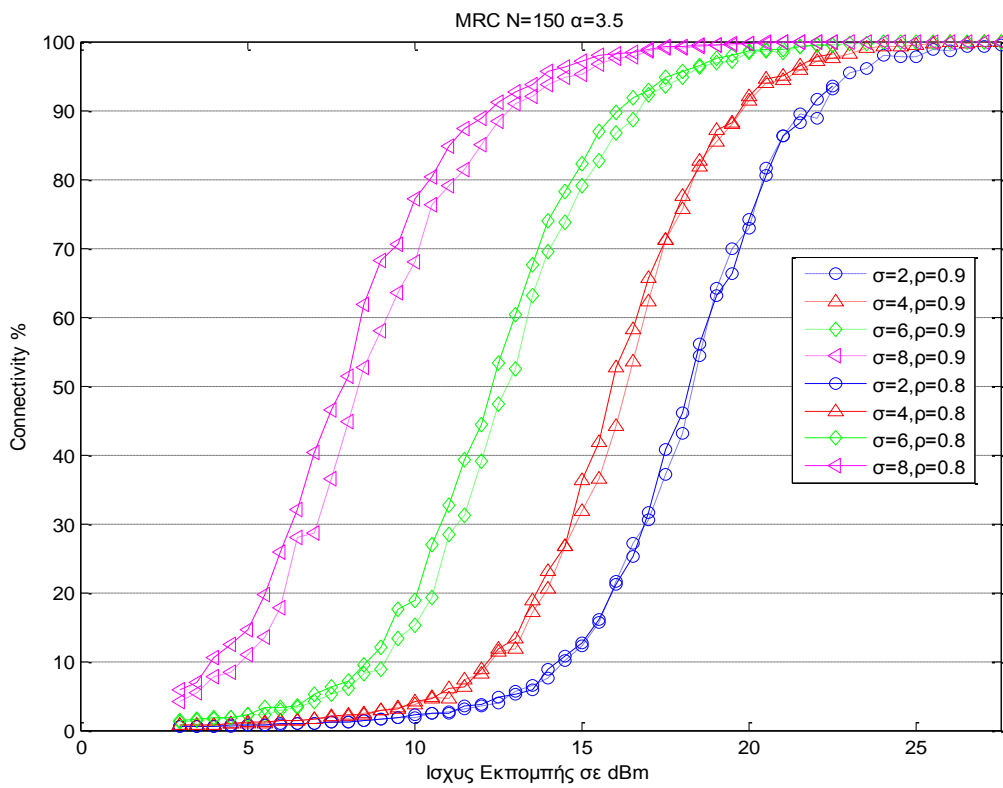
Λόγω του τύπου 3.2 μπορούμε να καταλήξουμε στο γενικό συμπέρασμα ότι όσο μειώνεται το  $\rho$  τόσο θα αυξάνεται η συνδεσιμότητα σε σχέση με  $\rho=0.9$  μέχρι ο παράγοντας  $(\sqrt{1-\rho^2} + \rho)$  να φτάσει στη μεγαλύτερη τιμή του (1,41 για  $\rho=0.72$ ). Στη συνέχεια με τη μείωση του  $\rho$  η συνδεσιμότητα θα ακολουθήσει αντίστροφη πορεία και θα αρχίσει να ξαναμειώνεται.



Σχήμα 4.34 συνδεσιμότητα για EGC,  $N=150, \alpha=3,5$  για διαφορετικό συντελεστή  $\rho$



Σχήμα 4.35 συνδεσιμότητα για SC, N=150, α=3,5 για διαφορετικό συντελεστή ρ



Σχήμα 4.36 συνδεσιμότητα για MRC, N=150, α=3,5 για διαφορετικό συντελεστή ρ

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΙΛΟΓΟΣ

---

Η ευκολία και η ταχύτητα με την οποία τα ad-hoc δίκτυα υλοποιούνται, καθώς και η μειωμένη τους εξάρτηση από σταθερή υποδομή τα καθιστούν ως ένα από τα εύχρηστα και ευέλικτα είδη δικτύων.

Στο πρώτο κομμάτι της διπλωματικής εξετάσαμε τη συνδεσιμότητα ενός ad hoc δικτύου σε περιβάλλον συσχετισμένης σκίασης. Τα συμπεράσματα που προέκυψαν ήταν πολλά και χρήσιμα. και αποτελούν δεδομένα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό των ad hoc δικτύων. Παράγοντες όπως η σκίαση, οι απώλειες διαδρομής οι ταχύτητες των κόμβων, η ισχύς εκπομπής πρέπει ληφθούν υπ' όψη και να συνδυαστούν με άλλους παράγοντες όπως το μοντέλο κινητικότητας των κόμβων, οι επιτρεπτές περιοχές κίνησής τους, καθώς και τα εμπόδια που βρίσκονται στην περιοχή προσομοίωσης ούτως ώστε να έχουμε τα επιθυμητά αποτελέσματα. Η σκίαση που μελετήθηκε εκτενώς στη συγκεκριμένη διπλωματική και ο τρόπος με τον οποίο τα κανάλια θεωρούνται συσχετισμένα έχει κομβική σημασία.. Συγκεκριμένα, ο τρόπος με τον οποίο λαμβάνουμε υπόψη τη συσχέτιση της σκίασης είναι πολύ σημαντικός, καθώς μπορεί να οδηγήσει σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα προσομοιώσεων(σε σύγκριση με την περίπτωση που δεν υπάρχει συσχέτιση), που δίνουν ακριβέστερη εικόνα της συνδεσιμότητας στο σχεδιαστή του ad-hoc δικτύου.

Στο δεύτερο κομμάτι της διπλωματική ασχοληθήκαμε με την εφαρμογή τεχνικών διαφορικής λήψης χώρου, ως μέτρο για την βελτίωση της συνδεσιμότητας. Συγκεκριμένα χρησιμοποιήσαμε τις τεχνικές MRC,SC και EGC και μέσω των προσομοιώσεων εξετάσαμε τις επιδόσεις τους για ότι αφορά τη συνδεσιμότητα του δικτύου. Με αυτό τον τρόπο ο μηχανικός τηλεπικοινωνιών γίνεται γνώστης της συμπεριφοράς κάθε σχήματος διαφορικής λήψης σε σχέση με διάφορες παραμέτρους στο δίκτυο. Η συμπεριφορά αυτή θα οδηγήσει στη σοφότερη επιλογή του σχήματος διαφορικής λήψης στους δέκτες κατά το σχεδιασμό ενός ad hoc δικτύου.

Είναι πολύ πιθανό στο μέλλον τα ad-hoc δίκτυα να αναπτυχθούν ακόμα περισσότερο γεγονός που μαρτυρούν οι πολλές έρευνες γύρω από αυτά, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια. Τα πλεονεκτήματα που παρουσιάζουν, μπορούν να καλύψουν τις

διάφορες αδυναμίες τους και να παρέχουν στο χρήστη ένα αξιοπρεπές ασύρματο μέσο μετάδοσης πληροφορίας.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ITU Web Page ( <http://www.itu.int/ITU-D/ict/statistics/> ).
- [2] Α.Κανατάς, Φ.Κωνσταντίνου και Γ.Πάντος, *Συστήματα Κινητών Επικοινωνιών*, Αθήνα 2008.
- [3] Π.Κωττής, Χ.Ν.Καψάλης, *Δορυφορικές Επικοινωνίες*, 2η Έκδοση, 2006.
- [4] [<http://monet.postech.ac.kr/research.html>].
- [5] R.Hekmat, *Ad Hoc networks: fundamental properties and network topologies*, Delft, 2006.
- [6] E.Schoch, F.Kargl and M.Weber, *Commuication Patterns in VANETs*, IEEE Communications Magazine, November 2008, pp 119-125.
- [7] X.Lin, R.Lu, C.Zhang, H.Zhu, P.Ho and X.Shen, *Security in Vehicular Ad Hoc Networks*, IEEE Communications Magazine, April 2008, pp 88-95.
- [8] H.Hartenstein, K.P.Laberteaux, *a tutorial survey on Vehicular Ad Hoc Networks*.IEEE Communications Magazine, June 2008, pp 164-171.
- [9] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, *a survey on sensor networks*, IEEE Communications Magazine, August 2002, pp 102-114.
- [10] I. F. Akyildiz, X. Wang, and W. Wang, *Wireless Mesh Networks: A Survey*, Comp. Networks, vol. 47, no. 47, pp.445-487, 2005.
- [11] Andrea Goldsmith, *Wireless Communications*, Stanford University, 2005.



- [12] Y. Okumura et al. *Field strength variability in VHF and UHF land mobile service*. Rev. Elec. Comm. Lab, Sep–Oct, 1968
- [13] *Radiowave Propagation Effects on Next-Generation Fixed-Service Terrestrial Telecommunications Systems*. Commission of European Communities. COST 235 Final Report, 1996
- [14] F.P.Fontan and P.M. Espineira, *Modeling the Wireless Propagation Channel*, Wiley, 2008
- [15] P.Agraval and N.Patwari, *Correlated Link Shadow Fading in Multi-hop Wireless Networks*, University of Utah, November 2007
- [16] S.R.Saunders and A.A.Zavala, *Antennas and Propagation for Wireless Communication*, John Wiley and Sons Ltd, 2<sup>nd</sup> edition, 2007
- [17] J.M. Hernando & F. Pe´rez-Fonta´n. *An Introduction to Mobile Communications Engineering*. Artech House, 1999.
- [18] W.C. Jackes. *Microwave Mobile Communications*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1974
- [19] T.S. Rappaport. *Wireless Communications. Principles and Practice*. Prentice Hall, 1996
- [20] Skraparlis, M.Sandell, V.K.Sakarellos, A.D.Panagopoulos, J.D.Kanellopoulos, *On the Effect of Correlation on the Performance of Dual Diversity Receivers in Lognormal Fading*, IEEE Communications Letters, Vol. 14, No. 11, November 2010
- [21] G.T.Pitsiladis, A.D.Panagopoulos and P.Constantinou, *Improving Connectivity in Indoor Millimeter Wave Wireless networks using Diversity Reception*, EUCAP, 2012.
- [22] J. Broch, D. A. Maltz, D. B. Johnson, Y.-C. Hu, and J. Jetcheva. *A performance comparison of multi-hop wireless ad hoc network routing protocols*. In Proceedings of the Fourth Annual ACM/IEEE International Conference on Mobile Computing and Networking (Mobicom98), ACM, October 1998.

- [23] D. Johnson and D. Maltz. *Dynamic source routing in ad hoc wireless networks*. In T. Imelinsky and H. Korth, editors, *Mobile Computing*, pp 153–181. Kluwer Academic Publishers, 1996
- [24] J. Boleng. *Normalizing mobility characteristics and enabling adaptive protocols for ad hoc networks*. In *Proceedings of the Local and Metropolitan Area Networks Workshop (LANMAN)*, pp 9–12, March 2001.
- [25] Κ. Σ. Παλαιχώρος, Γ. Π. Χειμωνίδης, διπλωματική εργασία *“Προσομοίωση Μοντέλων Κινητικότητας σε κυψελωτά και αδόμητα ασύρματα σίκτυα”*, Αθήνα, Ιούλιος 2008
- [26] IEEE 802.16j-06/013r3, “Multi-Hop Relay System Evaluation Methodology,” February 2007.
- [27] Α.Ι.Κρόκος, διπλωματική εργασία, *Μελέτη συνδεσιμότητας MANETs σε περιβάλλοντα με φαινόμενα σκίασης*”, Αθήνα, Ιούνιος 2010