



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

Στοχαστικές Πολυδιάστατες Τεχνικές Βελτιστοποίησης για την Σχεδίαση Δικτύων Ασυρμάτων Επικοινωνιών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτριος Χρ. Τσιλιμαντός

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

Αθήνα, Ιούνιος 2009



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

Στοχαστικές Πολυδιάστατες Τεχνικές Βελτιστοποίησης για την Σχεδίαση Δικτύων Ασυρμάτων Επικοινωνιών

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Δημήτριος Χρ. Τσιλιμαντός

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

Συμβουλευτική Επιτροπή: Δ.-Θ. Κακλαμάνη (Επιβλέπουσα Καθηγήτρια)
Ι. Βενιέρης
Ν. Ουζούνογλου

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 12^η Ιουνίου 2009.

.....
Δ.-Θ. Κακλαμάνη
Καθ. ΕΜΠ

.....
Ι. Βενιέρης
Καθ. ΕΜΠ

.....
Ν. Ουζούνογλου
Καθ. ΕΜΠ

.....
Γ. Τσούλος
Επ. Καθ. Παν. Πελοποννήσου

.....
Μ. Θεολόγου
Καθ. ΕΜΠ

.....
Σ. Παπαβασιλείου
Επ. Καθ. ΕΜΠ

.....
Χρ. Καψάλης
Καθ. ΕΜΠ

.....
Δημήτριος Χρ. Τσιλιμαντός

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών ΕΜΠ

Copyright © Δημήτριος Χρ. Τσιλιμαντός, 2009.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. 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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τον τελευταίο καιρό έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή στοχαστικών τεχνικών βελτιστοποίησης για την επίλυση προβλημάτων που αφορούν το σχεδιασμό δικτύων ασυρμάτων επικοινωνιών. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη δυνατότητα που έχουν να προσφέρουν λύσεις σε πολύπλοκα ζητήματα όπου απαιτείται η ικανοποίηση πολλαπλών κριτηρίων και περιορισμών. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής αρχικά εξετάζεται το πρόβλημα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης ενός δικτύου 3^{ης} γενιάς, σε συνδυασμό με εξελιγμένες τεχνικές, όπως οι έξυπνες κεραιές και τα συστήματα *MIMO*. Για αυτό το σκοπό αναπτύχθηκε μια κατάλληλη πλατφόρμα προσομοιώσεων, η οποία αποτελεί τον πυρήνα για τις διαδικασίες του σχεδιασμού και της διαχείρισης των πόρων του δικτύου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με το σχεδιασμό που προκύπτει μπορεί να αυξηθεί σημαντικά η επίδοση του δικτύου, ενώ εξασφαλίζεται και η ισορροπία ανάμεσα σε αντικρουόμενα κριτήρια. Στη συνέχεια επιλύονται δύο βασικά προβλήματα που αφορούν τα δίκτυα ευρυεκπομπής της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια των στοχαστικών αλγορίθμων, αντιμετωπίζεται το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων στις επιθυμητές περιοχές, καθώς και το πρόβλημα της μετάβασης από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση. Σε κάθε περίπτωση, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με την σωστή μοντελοποίηση του εκάστοτε προβλήματος, αποδεικνύεται ότι αποτελούν ένα πολύ ισχυρό μαθηματικό εργαλείο για την υπολογιστικά πολύπλοκη απαιτούμενη διαδικασία του σχεδιασμού.

Λέξεις Κλειδιά: σχεδιασμός και βελτιστοποίηση δικτύου, δίκτυα 3^{ης} γενιάς, διαχείριση πόρων, δίκτυα επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης, στοχαστικοί αλγόριθμοι.

Γ' ΚΟΙΝΟΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΣΤΗΡΙΞΗΣ
ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ



Η διατριβή πραγματοποιήθηκε με τη συγχρηματοδότηση από το Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο (80%) και τη Γενική Γραμματεία Έρευνας και Τεχνολογίας του Υπουργείου Ανάπτυξης (20%).

ABSTRACT

Over the last years, the application of stochastic optimization techniques in order to facilitate the solution of problems that involve network planning of wireless systems has become very popular. The main concept behind this approach is their ability to offer quickly near to optimal solutions for complex multi-objective and constrained problems. In the framework of this thesis, the process of 3G network planning and optimization is initially examined, along with the utilization of advanced techniques, such as smart antennas and MIMO systems. A realistic simulator has been developed for this reason, which comprises the main core of the planning and radio resource management process. The presented results indicate that network performance can improve significantly, while the trade-off balance between multiple and conflicting objectives is adjusted in a controllable manner. Therefore, two basic problems of terrestrial digital video broadcasting (DVB-T) network planning are analyzed and solved. Specifically, the procedure of allocating frequency channels to the defined service areas is firstly conducted with the implementation of stochastic algorithms. The transition from analogue to digital television is then investigated in detail. In any case, when the proper mathematical model is provided, the stochastic optimization algorithms prove to be a very powerful tool for the computationally complex and challenging process of network planning.

Key Words: network planning and optimization, 3G networks, radio resource management, terrestrial digital video broadcasting DVB-T, stochastic algorithms.



This thesis is co-financed by E.U.-European Social Fund (80%) and the Greek Ministry of Development - General Secretariat for Research and Technology (20%).

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου κα. Κακλαμάνη για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον ερευνητικό αντικείμενο. Επίσης, τον καθηγητή κ. Βενιέρη για τις πολύτιμες εμπειρίες ζωής που προσκόμισα από τη συνεργασία μας και τον καθηγητή κ. Ουζούνoglou για τις συμβουλές και τη στήριξη που μου προσέφερε. Ιδιαίτερα όμως ευχαριστώ τον καθηγητή κ. Τσούλο για την καθοδήγηση και το αμείωτο ενδιαφέρον του καθόλη την πορεία μου ως υποψήφιος διδάκτορας. Χωρίς τη συμβολή του η διατριβή σίγουρα δεν θα είχε τη παρούσα μορφή.

Ευχαριστώ όλους τους φίλους και συνεργάτες που μου έδωσαν κουράγιο και δύναμη να τελειώσω άλλο ένα δύσκολο εγχείρημα στη ζωή μου. Τέλος, αφιερώνω την εργασία στην οικογένειά μου για την ανιδιοτελή στήριξή της σε κάθε μου προσπάθεια...

Δημήτρης Χρ. Τσιλιμαντός

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	5
ABSTRACT	6
ΠΡΟΛΟΓΟΣ.....	7
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	11
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	14
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	15
2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ.....	18
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	18
2.2 ΒΑΣΙΚΟΙ ΟΡΟΙ ΚΑΙ ΕΝΝΟΙΕΣ	23
2.2.1 Υπολογιστικοί χώροι	23
2.2.2 Ολικά και Τοπικά Ελάχιστα/Μέγιστα	25
2.2.3 Πολλαπλοί στόχοι	27
2.2.4 Βελτιστοποίηση με περιορισμούς	29
2.3 ΑΝΑΛΥΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	30
2.3.1 Μέθοδος κατάβασης κλίσεων	31
2.3.2 Μέθοδος συζυγών κλίσεων.....	32
2.3.3 Σχολιασμός αναλυτικών μεθόδων.....	33
2.4 ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	34
2.4.1 Τυχαία αναζήτηση	38
2.4.2 Αναρρίχηση λόφου	39
2.4.3 Προσομοιωμένη ανόπτηση.....	40
2.4.4 Αναζήτηση με απαγορευμένες θέσεις	42
2.5 ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ	44
2.5.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι	45
2.5.2 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων.....	49
2.6 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΗΣ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ	53
3 ΔΙΚΤΥΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 3^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ.....	55
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΑ ΔΙΚΤΥΑ 3 ^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ.....	55
3.2 ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΗΣ	57
3.3 ΕΠΙΛΥΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ	61
3.3.1 Άνω ζεύξη	63
3.3.2 Κάτω ζεύξη.....	65
3.4 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΩΝ ΠΟΡΩΝ ΤΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ	68
3.4.1 Έλεγχος ισχύος.....	68
3.4.2 Έλεγχος διαπομπών	69
3.4.3 Έλεγχος πρόσβασης.....	71
3.4.4 Έλεγχος φορτίου	72
3.5 ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	73
3.6 ΣΥΝΑΦΗΣ ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ	76
4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ 3^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΞΥΠΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ	78
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΙΣ ΕΞΥΠΝΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ	78

4.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΕΞΥΠΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ	79
4.2.1	Μεταγωγή κύριου λοβού	79
4.2.2	Προσαρμοστικές κεραίες.....	80
4.3	ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ.....	82
4.4	ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΟΛΥΠΛΟΚΟΤΗΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΕΞΥΠΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ	84
4.5	ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΣΕ ΔΙΚΤΥΑ 3 ^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ	87
4.6	ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΜΙΜΟ	88
5	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ 3^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ.....	91
5.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	91
5.2	ΕΠΙΔΟΣΗ ΔΙΚΤΥΟΥ 3 ^{ΗΣ} ΓΕΝΙΑΣ ΜΕ ΕΞΥΠΝΕΣ ΚΕΡΑΙΕΣ	91
5.3	ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΠΟΡΩΝ	95
5.4	ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ	108
6	ΔΙΚΤΥΑ ΕΥΡΥΕΚΠΟΜΠΗΣ ΕΠΙΓΕΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗΣ (DVB-T).....	120
6.1	ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΨΗΦΙΑΚΗ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗ	120
6.2	ΒΑΣΙΚΕΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΓΕΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗΣ	122
6.2.1	Κανάλια και Ζώνες Συχνότητων.....	122
6.2.2	Επιθυμητός τύπος λήψης	123
6.2.3	Τεχνικά χαρακτηριστικά	125
6.2.4	Δομή δικτύου.....	127
6.3	ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΕΠΙΓΕΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗΣ.....	131
6.3.1	Καθορισμός περιοχών εκχώρησης πόρων.....	132
6.3.2	Έλεγχος Συμβατότητας	134
6.3.3	Πλάνο σύνδεσης.....	143
6.3.4	Στρατηγική μετάβασης	146
7	ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΓΕΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗΣ.....	150
7.1	ΑΝΑΘΕΣΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΩΝ	150
7.2	ΜΕΤΑΒΑΣΗ	160
8	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ.....	168
9	ΑΝΑΦΟΡΕΣ.....	171
	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α' – ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΕΙΣ	179
	ΔΙΕΘΝΗ ΠΕΡΙΟΔΙΚΑ ΠΛΗΡΟΥΣ ΚΕΙΜΕΝΟΥ, ΜΕ ΚΡΙΣΗ.....	179
	ΠΡΑΚΤΙΚΑ ΔΙΕΘΝΩΝ ΣΥΝΕΔΡΙΩΝ, ΜΕ ΚΡΙΣΗ	179

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Βασικά στάδια βελτιστοποίησης.....	19
Εικόνα 2: Παράδειγμα επιφάνειας καταλληλότητας για μονοδιάστατο πρόβλημα.....	24
Εικόνα 3: Παράδειγμα επιφάνειας καταλληλότητας για δισδιάστατο πρόβλημα.....	24
Εικόνα 4: Ορισμός ολικού ελάχιστου.....	25
Εικόνα 5: Ορισμός τοπικού ελάχιστου.....	26
Εικόνα 6: Παράδειγμα ολικού και τοπικού ελαχίστου για μονοδιάστατο πρόβλημα.....	26
Εικόνα 7: Ορισμός προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων.....	27
Εικόνα 8: Ορισμός <i>Pareto-βέλτιστης</i> λύσης.....	28
Εικόνα 9: Παράδειγμα <i>Pareto-βέλτιστων</i> λύσεων.....	28
Εικόνα 10: Πρόβλημα εύρεσης ακρότατων με χρήση της παραγώγου.....	31
Εικόνα 11: Παράδειγμα της μεθόδου κατάβασης κλίσεων.....	32
Εικόνα 12: Παράδειγμα της μεθόδου συζυγών κλίσεων [6].....	33
Εικόνα 13: Βασικό διάγραμμα ροής αναλυτικού αλγορίθμου.....	34
Εικόνα 14: Βασικό διάγραμμα ροής στοχαστικού αλγορίθμου.....	37
Εικόνα 15: Περιγραφή του αλγορίθμου αναρρίχησης λόφων.....	39
Εικόνα 16: Περιγραφή του αλγορίθμου προσομοιωμένης ανόπτωσης.....	41
Εικόνα 17: Υπολογισμός αρχικής θερμοκρασίας στην προσομοιωμένη ανόπτωση.....	42
Εικόνα 18: Περιγραφή του αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες θέσεις.....	43
Εικόνα 19: Βασικό διάγραμμα ροής εξελικτικού αλγορίθμου.....	44
Εικόνα 20: Παράδειγμα <i>roulette wheel selection</i>	46
Εικόνα 21: Παράδειγμα διασταύρωσης πολλαπλού σημείου.....	46
Εικόνα 22: Παράδειγμα ομοιόμορφης διασταύρωσης.....	47
Εικόνα 23: Περιγραφή του γενετικού αλγόριθμου.....	48
Εικόνα 24: Περιγραφή της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων.....	50
Εικόνα 25: Τοπολογίες γειτονιάς για βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων.....	51
Εικόνα 26: Βασικό διάγραμμα ροής παράλληλης υλοποίησης εξελικτικού αλγόριθμου.....	54
Εικόνα 27: Τεχνική πολλαπλής πρόσβασης <i>WCDMA</i>	55
Εικόνα 28: Συσχέτιση χωρητικότητας και κάλυψης.....	58
Εικόνα 29: Γραφική παράσταση χωρητικότητας και κάλυψης.....	58
Εικόνα 30: Διαδικασία σχεδιασμού δικτύων 3 ^{ης} γενιάς.....	60
Εικόνα 31: Γενικό διάγραμμα ροής της διαδικασίας επίλυσης.....	61
Εικόνα 32: Διάγραμμα ροής για επαναληπτικό βήμα άνω ζεύξης.....	65
Εικόνα 33: Διάγραμμα ροής για το επαναληπτικό βήμα της κάτω ζεύξης.....	67
Εικόνα 34: Έλεγχος ισχύος στο <i>WCDMA</i>	68
Εικόνα 35: Ήπια διαπομπή (<i>soft handover</i>).....	69
Εικόνα 36: Ηπιότερη διαπομπή (<i>softer handover</i>).....	70
Εικόνα 37: Γενική διαδικασία βελτιστοποίησης.....	75
Εικόνα 38: Βασική διάταξη λειτουργίας μιας έξυπνης κεραίας.....	78
Εικόνα 39: Παράδειγμα <i>switched beams</i> με 5 λοβούς.....	80
Εικόνα 40: Παράδειγμα προσαρμοστικών έξυπνων κεραιών.....	80
Εικόνα 41: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας για τομέα 120 ^ο	82
Εικόνα 42: Πλεονεκτήματα από την εισαγωγή έξυπνων κεραιών στα δίκτυα 3 ^{ης} γενιάς.....	87
Εικόνα 43: Σύγκριση ανάμεσα στις στρατηγικές για έξυπνες κεραίες.....	88

Εικόνα 44: Μοντέλο <i>MIMO</i> συστήματος	88
Εικόνα 45: Κέρδη <i>MIMO</i> συστήματος	90
Εικόνα 46: Χωρητικότητα ανά τομέα για τα σενάρια προσομοίωσης	94
Εικόνα 47: Πιθανότητα κάλυψης σε ένα τομέα με έξυπνες κεραιές	94
Εικόνα 48: Διαδικασία επιλογής χρηστών για μείωση ρυθμού	98
Εικόνα 49: Αλγόριθμοι διαχείρισης πόρων	99
Εικόνα 50: Υβριδικός αλγόριθμος διαχείρισης πόρων	100
Εικόνα 51: Τροποποίηση για χρήση τεχνικής <i>random beam-forming</i>	100
Εικόνα 52: Εκτίμηση της λαμβανόμενης ισχύος σύμφωνα με την <i>ray-tracing</i> μέθοδο	102
Εικόνα 53: Χωρητικότητα άνω ζεύξης ανά <i>RRM</i> αλγόριθμο	102
Εικόνα 54: <i>Fairness</i> άνω ζεύξης ανά <i>RRM</i> αλγόριθμο	103
Εικόνα 55: Κατανομή χρηστών ανά υπηρεσία για τον <i>Max Fairness</i> αλγόριθμο	104
Εικόνα 56: Κατανομή χρηστών ανά υπηρεσία για τον <i>Tx Power</i> αλγόριθμο	104
Εικόνα 57: Χωρητικότητα κάτω ζεύξης ανά <i>RRM</i> αλγόριθμο	105
Εικόνα 58: <i>Fairness</i> κάτω ζεύξης ανά <i>RRM</i> αλγόριθμο	105
Εικόνα 59: <i>Fairness</i> άνω ζεύξης με την δυναμική προσέγγιση	106
Εικόνα 60: : Χωρητικότητα άνω ζεύξης με την δυναμική προσέγγιση	106
Εικόνα 61: Χωρητικότητα άνω ζεύξης με την <i>RB</i> τεχνική	107
Εικόνα 62: : <i>Fairness</i> άνω ζεύξης με την <i>RB</i> τεχνική	107
Εικόνα 63: Περιγραφή προβλήματος μεγιστοποίησης χωρητικότητας	109
Εικόνα 64: Περιγραφή προβλήματος μεγιστοποίησης χωρητικότητας με περιορισμούς ...	110
Εικόνα 65: Διαδικασία επίλυσης προβλήματος βελτιστοποίησης	112
Εικόνα 66: Σενάριο προσομοίωσης	112
Εικόνα 67: Χωρητικότητα δικτύου ανά <i>hot spot</i>	114
Εικόνα 68: Πιθανότητα κάλυψης ανά <i>hot spot</i>	115
Εικόνα 69: <i>SINR</i> πιλοτικού καναλιού για το <i>default</i> σενάριο	115
Εικόνα 70: <i>SINR</i> πιλοτικού καναλιού για το <i>constrained</i> σενάριο	116
Εικόνα 71: <i>SINR</i> πιλοτικού καναλιού για το <i>maxCapacity</i> σενάριο	116
Εικόνα 72: Χωρητικότητα δικτύου ανά <i>hot spot</i> με έξυπνες κεραιές	117
Εικόνα 73: Χωρητικότητα δικτύου ανά <i>hot spot</i> με <i>MIMO</i>	118
Εικόνα 74: Παράδειγμα περιορισμού της μέγιστης διαφοράς σήματος πομπών-δέκτη	130
Εικόνα 75: Παράδειγμα υλοποίησης <i>SFN</i> - <i>MFN</i> δομής	130
Εικόνα 76: Περιοχές εκχώρησης πόρων στην περίπτωση της Ελλάδας	134
Εικόνα 77: Παράδειγμα δικτύου αναφοράς	140
Εικόνα 78: Εφαρμογή δικτύου αναφοράς για τον υπολογισμό παρεμβολών	141
Εικόνα 79: Έλεγχος συμβατότητας με βάση τη μορφολογία του εδάφους	143
Εικόνα 80: Παράδειγμα <i>hard</i> και <i>soft</i> περιορισμών	145
Εικόνα 81: Βασικές διαδικασίες μετάβασης στην ψηφιακή τηλεόραση	147
Εικόνα 82: Περιγραφή προβλήματος χωρίς παρεμβολές από πολλαπλές πηγές	151
Εικόνα 83: Περιγραφή προβλήματος με παρεμβολές από πολλαπλές πηγές	151
Εικόνα 84: Βασικό διάγραμμα ροής για το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων	154
Εικόνα 85: Ασυμβατότητες ανά περιοχή για τα μοντέλα διάδοσης	155
Εικόνα 86: Συχνότητες ανά περιοχή για <i>ITU</i>	157
Εικόνα 87: Συχνότητες ανά περιοχή με σκληρούς περιορισμούς	157
Εικόνα 88: Συχνότητες ανά περιοχή με σκληρούς και ήπιους περιορισμούς	158

Εικόνα 89: Συχνότητες ανά περιοχή από βέλτιστους αλγόριθμους	158
Εικόνα 90: Ταχύτητα σύγκλισης αλγορίθμων με σκληρούς περιορισμούς	159
Εικόνα 91: Περιγραφή πανεθνικής υλοποίησης μετάβασης	161
Εικόνα 92: Περιγραφή τοπικής υλοποίησης μετάβασης	161
Εικόνα 93: Βασικό διάγραμμα ροής για το πρόβλημα μετάβασης	162
Εικόνα 94: Συχνότητες ανά περιοχή για το πρόβλημα της μετάβασης	163
Εικόνα 95: Ασυμβατότητες ανά περιοχή για το πρόβλημα της μετάβασης	164
Εικόνα 96: Αναλογικοί σταθμοί προς κλείσιμο ανά περιοχή	164
Εικόνα 97: Αναλογικοί σταθμοί προς κλείσιμο ανά περιοχή - (<i>available</i>)	165
Εικόνα 98: Αριθμός <i>available</i> καναλιών ανά περιοχή	165
Εικόνα 99: Pareto-βέλτιστες λύσεις για το πρόβλημα της μετάβασης	166

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Βασικές παράμετροι <i>WCDMA</i>	57
Πίνακας 2: Παράμετροι για το πρόβλημα με έξυπνες κεραιές	92
Πίνακας 3: Αριθμός χρηστών ανά υπηρεσία	93
Πίνακας 4: Αποτελέσματα χωρητικότητας και πιθανότητας κάλυψης	93
Πίνακας 5: Σύγκριση στρατηγικών υλοποίησης έξυπνων κεραιών	95
Πίνακας 6: Παράμετροι για το πρόβλημα χωρητικότητας - αμεροληψίας	101
Πίνακας 7: Αποτελέσματα χωρητικότητας συστήματος.....	107
Πίνακας 8: Αποτελέσματα συντελεστή αμεροληψίας.....	108
Πίνακας 9: Παράμετροι για το πρόβλημα βελτιστοποίησης	113
Πίνακας 10: Αριθμός χρηστών ανά υπηρεσία για το πρόβλημα βελτιστοποίησης	113
Πίνακας 11: Παράμετροι <i>PSO</i> για το πρόβλημα βελτιστοποίησης.....	114
Πίνακας 12: Αποτελέσματα χωρητικότητας συστήματος ανά <i>hot spot</i>	119
Πίνακας 13: VHF σύστημα.....	122
Πίνακας 14: UHF σύστημα	123
Πίνακας 15: Χαρακτηριστικά δικτύου για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων	127
Πίνακας 16: Μέγιστη Διαφορά Σήματος Πομπών - Δέκτη.....	129
Πίνακας 17: Απαιτούμενη ένταση πεδίου για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων.....	137
Πίνακας 18: Αναφορικές σχεδιαστικές διατάξεις - <i>RPCs</i>	139
Πίνακας 19: Ελάχιστες αποστάσεις επαναχρησιμοποίησης.....	142
Πίνακας 20: Βασικές παράμετροι για το σενάριο προσομοίωσης	155
Πίνακας 21: Βασικά στοιχεία πίνακα ασυμβατοτήτων.....	156
Πίνακας 22: Παράμετροι αλγορίθμων για το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων	156
Πίνακας 23: Αποτελέσματα ανάθεσης συχνοτήτων	159
Πίνακας 24: Αποτελέσματα μετάβασης.....	166

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σχεδίαση των δικτύων ασυρμάτων επικοινωνιών αποτελεί δίχως αμφιβολία μια αρκετά πολύπλοκη και απαιτητική διαδικασία. Όσον αφορά την κινητή τηλεφωνία, χρειάζεται να αντιμετωπιστεί ένας σημαντικός αριθμός από νέες προκλήσεις, καθώς γίνεται η μετάβαση από τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς προς τα αντίστοιχα της 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς. Ο σχεδιασμός σε δίκτυα όπως το *GSM* ήταν πολύ απλούστερος γιατί αφενός εξελίχθηκε μέσα σε μια μεγάλη χρονική περίοδο που επέτρεπε την σταδιακή απόκτηση εμπειρίας και αφετέρου μπορούσε να διασπαστεί στα ανεξάρτητα στάδια του σχεδιασμού κάλυψης και ανάθεσης συχνοτήτων. Αντίθετα, με την σημερινή παγκόσμια οικονομική κατάσταση στον τομέα των επικοινωνιών υπάρχει πολύ μικρό περιθώριο για λάθη στον σχεδιασμό των δικτύων και απαιτείται μια σωστή και ολοκληρωμένη προσέγγιση.

Η διαδικασία της σχεδίασης για τα συστήματα 3^{ης} γενιάς είναι από τη φύση της σύνθετη. Η ευελιξία ως προς την υπηρεσία που προσφέρεται στους χρήστες οδηγεί σε σταθερούς, μεταβαλλόμενους, χαμηλούς και υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Παράλληλα, ο συσχετισμός που υπάρχει ανάμεσα στην χωρητικότητα και την κάλυψη κάθε υπηρεσίας δυσκολεύει ακόμα περισσότερο τον σχεδιασμό. Η συνύπαρξη των δικτύων 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς δημιουργεί επίσης ορισμένα προβλήματα αναφορικά με τον τρόπο χρήσης τους από έναν πάροχο, σε συνδυασμό με το αντίστοιχο επιχειρηματικό και οικονομικό του μοντέλο. Μια προσέγγιση που οδηγεί στην ενσωμάτωση εξελιγμένων τεχνικών στην διαδικασία του σχεδιασμού, όπως οι έξυπνες κεραίες και τα συστήματα *MIMO*, προσφέρει μεγάλη ευελιξία και βελτίωση της επίδοσης του δικτύου, μειώνοντας σημαντικά τα έξοδα που μπορεί να προκύψουν από μελλοντικές απαιτήσεις για επανασχεδιασμό του δικτύου. Ωστόσο, τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από αυτές τις τεχνικές προφανώς συνοδεύονται από αντίστοιχη αύξηση της πολυπλοκότητας της σχεδίασης και για αυτό το λόγο χρειάζεται να δοθεί ακόμα μεγαλύτερη προσοχή.

Από την άλλη πλευρά, η ψηφιακή τηλεόραση είναι ίσως η σημαντικότερη εξέλιξη στην τηλεοπτική τεχνολογία, μετά την εμφάνιση της έγχρωμης τηλεόρασης στη δεκαετία του '50. Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματά της είναι η καλύτερη ποιότητα εικόνας, η αποδοτικότερη χρήση του φάσματος και οι πληρέστερες υπηρεσίες ενημέρωσης. Η εισαγωγή της ψηφιακής τηλεόρασης είναι μια πραγματικότητα που επιβάλλεται, τόσο από τις ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις, όσο και από τις υποχρεώσεις απέναντι σε διεθνείς οντότητες και οργανισμούς για τερματισμό της αναλογικής μετάδοσης σε περιορισμένο

σχετικά χρονικό ορίζοντα. Ο σχεδιασμός του δικτύου της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης γίνεται με βάση τις επιθυμητές περιοχές εκχώρησης πόρων. Η κατανομή των διαθέσιμων συχνοτήτων στις περιοχές αυτές αποτελεί μια υπολογιστικά πολύπλοκη διαδικασία, καθώς σκοπός είναι να αποδοθούν όσο το δυνατόν περισσότερες συχνότητες, περιορίζοντας παράλληλα το επίπεδο παρεμβολών ανάμεσα στις περιοχές. Ένα πρόσθετο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι ο τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί τεχνικά η μετάβαση από την αναλογική στη ψηφιακή εκπομπή. Απαιτείται μια περίοδος ταυτόχρονης εκπομπής των δύο σημάτων, με αποτέλεσμα την ύπαρξη δυσκολιών σχετικά με τη διαχείριση του φάσματος.

Οι δυσκολίες της διαδικασίας σχεδιασμού μπορούν να αντιμετωπιστούν ως ένα βαθμό με τις εξελιγμένες στοχαστικές τεχνικές βελτιστοποίησης που διαδραματίζουν έναν ολοένα και αυξανόμενο ρόλο για την αντιμετώπιση των περισσότερων πολυδιάστατων προβλημάτων. Χρησιμοποιούνται για να βρουν λύσεις κοντά στις βέλτιστες σε περιπτώσεις που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με άλλες μεθόδους. Τα οφέλη από την χρήση τους γίνονται ακόμα πιο έντονα καθώς συνδυάζονται με τη συνεχώς αυξανόμενη επεξεργαστική ισχύ των σύγχρονων υπολογιστών.

Στόχος της παρούσας διατριβής είναι η χρήση στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης σε πρακτικά προβλήματα σχεδίασης δικτύων ασυρμάτων επικοινωνιών. Αναλυτικότερα, στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των μεθόδων βελτιστοποίησης και δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στην περιγραφή των στοχαστικών μεθόδων λόγω της μεγάλης ευελιξίας που παρουσιάζουν και της δυνατότητας να προσφέρουν γρήγορα πιθανές λύσεις σε σύνθετους και ιδιόμορφους χώρους έρευνας, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούν αντικρουόμενα κριτήρια και περιορισμούς.

Στο 3^ο κεφάλαιο πραγματοποιείται η ανάλυση ενός συστήματος κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς και περιγράφεται το μαθηματικό εργαλείο προσομοιώσεων που υλοποιήθηκε, καθώς και η διαδικασία βελτιστοποίησης και διαχείρισης πόρων του δικτύου. Το 4^ο κεφάλαιο αφιερώνεται στις εξελιγμένες τεχνικές που στηρίζονται στην παρουσία στοιχειοκεραίας στη μεριά του σταθμού βάσης και του κινητού χρήστη. Στο 5^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τη διαδικασία σχεδιασμού και βελτιστοποίησης ενός δικτύου 3^{ης} γενιάς, σε συνδυασμό με τις έξυπνες κεραίες και τα συστήματα *MIMO*.

Στο 6^ο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή ενός δικτύου ευρυεκπομπής επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης *DVB-T* και αναφέρονται οι βασικές αρχές σχεδιασμού. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διαδικασία ανάθεσης των συχνοτήτων σε επιλεγμένες περιοχές, καθώς και στη διαδικασία διαχείρισης των συχνοτήτων κατά τη μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση. Στη συνέχεια, στο 7^ο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από τα δύο αυτά προβλήματα που αντιμετωπίστηκαν επιτυχώς με την χρήση στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης.

Στο 8^ο κεφάλαιο συνοψίζεται η συμβολή της παρούσας διατριβής και παράλληλα σημειώνονται προτάσεις για ενδεχόμενη μελλοντική εργασία. Τέλος, στο 9^ο κεφάλαιο περιλαμβάνεται η βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε ως πηγή αναφοράς και έπειτα ακολουθεί το παράρτημα με τις δημοσιεύσεις στο πλαίσιο της διατριβής.

2 ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

2.1 Εισαγωγή στη βελτιστοποίηση

Τον τελευταίο καιρό έχει δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στην εφαρμογή αλγορίθμων βελτιστοποίησης για την επίλυση πρακτικών και θεωρητικών προβλημάτων που αφορούν τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών. Κοινό στοιχείο σε αυτές τις περιπτώσεις είναι η πολυπλοκότητα του προβλήματος που αντιμετωπίζεται, όπου συνήθως απαιτείται η ικανοποίηση πολλαπλών κριτηρίων και περιορισμών. Μερικές από τις περιπτώσεις όπου γίνεται συστηματική χρήση αλγορίθμων βελτιστοποίησης είναι οι ακόλουθες:

- *Αρχική σχεδίαση ενός δικτύου επικοινωνιών*

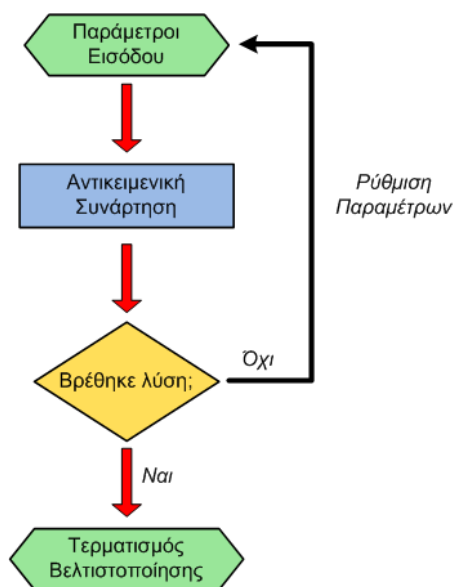
Είναι μια κατηγορία προβλημάτων όπου ζητούμενο είναι να καθοριστεί ο αριθμός και η τοποθεσία των θέσεων εκπομπής που θα χρησιμοποιηθούν στο δίκτυο, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κάλυψη και χωρητικότητα. Η αντιστοίχιση του συγκεκριμένου προβλήματος με μαθηματικά μοντέλα συνήθως περιορίζεται σε πολύ απλές περιπτώσεις και ταυτόχρονα δεν είναι σε μεγάλο βαθμό ακριβής, λόγω των παραδοχών που γίνονται ώστε να προκύψει μια λύση σε εύλογο χρονικό διάστημα. Αντίθετα, με τη χρήση κάποιου αλγορίθμου βελτιστοποίησης, συχνά προκύπτουν πολύ ικανοποιητικές λύσεις ακόμα και για μεγάλης έκτασης δίκτυα.

- *Ανάθεση πόρων του δικτύου*

Στην κατηγορία αυτή το ζητούμενο είναι να μοιραστούν οι πόροι του δικτύου με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Συνήθως, η διαδικασία της ανάθεσης καθορίζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του δικτύου και για αυτό το λόγο δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα από τους σχεδιαστές. Στην πλειοψηφία των περιπτώσεων οι πόροι του δικτύου είναι περιορισμένοι, ενώ υπάρχουν και επιμέρους συνθήκες που περιορίζουν τις δυνατές επιλογές. Ένα παράδειγμα αυτής της κατηγορίας είναι το πρόβλημα της ανάθεσης συχνοτήτων (*frequency assignment problem*), όπου ζητούμενο είναι να ανατεθούν με τον βέλτιστο τρόπο οι διαθέσιμες συχνότητες στους κόμβους του δικτύου.

Σε κάθε περίπτωση, με τον όρο βελτιστοποίηση εννοείται η διαδικασία όπου καθορίζονται οι παράμετροι ενός μαθηματικού προβλήματος, ώστε να προκύψει το ελάχιστο ή το μέγιστο αποτέλεσμα. Η συνάρτηση που θα καθορίσει το αποτέλεσμα ονομάζεται συνάρτηση κόστους, αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση καταλληλότητας (*cost, objective ή fitness function*). Ο στόχος της διαδικασίας της βελτιστοποίησης είναι προφανώς

να προσδιοριστούν οι τιμές των παραμέτρων εισόδου που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν κατάλληλα την αντικειμενική συνάρτηση, η οποία συνήθως υπόκειται σε συγκεκριμένους περιορισμούς [1],[2]. Στην πραγματικότητα, η διαφοροποίηση ανάμεσα στα προβλήματα μεγιστοποίησης και ελαχιστοποίησης δεν έχει νόημα, αφού πολύ απλά ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μπορεί να μετατραπεί σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης και το αντίστροφο. Στον σχήμα που ακολουθεί απεικονίζονται τα βασικά στοιχεία που αφορούν την διαδικασία βελτιστοποίησης:



Εικόνα 1: Βασικά στάδια βελτιστοποίησης

Γενικά, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης έχουν ως κοινό στοιχείο την αναζήτηση των κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους εισόδου. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού εξετάζεται ένα μικρό μέρος του υπολογιστικού χώρου των εφικτών λύσεων, όπου μέσα από συγκεκριμένες επαναληπτικές διαδικασίες προσεγγίζεται προσοδευτικά η καλύτερη δυνατή λύση. Ωστόσο, όπως εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί, οι αλγόριθμοι παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές μεταξύ τους και για αυτό το λόγο, ανάλογα με το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται, προτιμάται η χρήση συγκεκριμένων ειδών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα σημεία διαφοροποίησης ανάμεσα στους αλγόριθμους βελτιστοποίησης, τα οποία προκύπτουν είτε από τη φύση του προβλήματος που επιλύεται είτε από επιμέρους χαρακτηριστικά των αλγορίθμων [3]:

1. Μονοδιάστατο ή Πολυδιάστατο πρόβλημα

Αν το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται έχει μόνο μια παράμετρο εισόδου, τότε πρόκειται για μονοδιάστατη βελτιστοποίηση (*one-dimensional*). Αντίθετα, αν είναι περισσότερες από μία οι παράμετροι εισόδου, όπως συμβαίνει συνήθως, τότε

απαιτείται πολυδιάστατη βελτιστοποίηση (*multi-dimensional*). Γενικά, η δυσκολία του προβλήματος αυξάνεται σημαντικά όσο αυξάνεται ο αριθμός των διαστάσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι συχνά και εφόσον η φύση του προβλήματος το επιτρέπει, η πολυδιάστατη βελτιστοποίηση προσεγγίζεται με μια σειρά από κατάλληλες μονοδιάστατες και έτσι διευκολύνεται σε μεγάλο βαθμό η επίλυση.

2. Αντικειμενική συνάρτηση με δοκιμές ή με αναλυτικό τύπο

Στην περίπτωση που η βελτιστοποίηση βασίζεται σε δοκιμές (*trial-and-error*), η διαδικασία εύρεσης των κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους εισόδου γίνεται χωρίς να υπάρχει σαφής γνώση της διαδικασίας που παράγει το αποτέλεσμα. Με άλλα λόγια, η αντικειμενική συνάρτηση αντιμετωπίζεται σαν ένα μαύρο κουτί (*black box*), όπου η αντιστοίχιση των τιμών με τα αποτελέσματα αποτελεί την βασική πληροφορία για να προσεγγιστεί η λύση. Αντίθετα, η βελτιστοποίηση μπορεί να έχει ως πυρήνα μια αντικειμενική συνάρτηση που δίνεται από έναν αναλυτικό μαθηματικό τύπο. Εδώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές ή μαθηματικά εργαλεία, όπως για παράδειγμα η παράγωγος μιας μεταβλητής, ώστε να βρεθεί η βέλτιστη λύση. Αξίζει σε αυτό το σημείο να διευκρινιστεί, ότι στην πρώτη κατηγορία ανήκουν και προβλήματα, των οποίων η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί θεωρητικά να εκφραστεί με ένα σύνολο συγκεκριμένων μαθηματικών εξισώσεων, αλλά τελικά προκύπτει τόσο πολύπλοκη που δύσκολα μπορεί να εκτιμηθεί η συμπεριφορά της σε αρχικό στάδιο τουλάχιστον.

3. Διακριτές ή συνεχείς τιμές

Οι τιμές για τις παραμέτρους εισόδου σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να είναι διακριτοί ή συνεχείς αριθμοί. Στην περίπτωση που είναι διακριτές οι τιμές, οι πιθανές επιλογές για τις παραμέτρους εισόδου είναι πεπερασμένες, σε αντίθεση με τις συνεχείς τιμές που είναι άπειρες. Συνήθως, η επιλογή ανάμεσα στα δύο είδη βασίζεται στο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται. Για παράδειγμα, αν ζητείται να βρεθεί η ελάχιστη τιμή σε μια μαθηματική συνάρτηση $f(x)$, όπου $x \in \mathbb{R}$, είναι πιο λογικό να χρησιμοποιηθεί βελτιστοποίηση με συνεχείς τιμές. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν και διακριτές τιμές, ωστόσο, κατά πάσα πιθανότητα το αποτέλεσμα θα είναι χειρότερο. Αντίθετα, στο πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων, γίνεται συστηματική χρήση βελτιστοποίησης με διακριτές τιμές, αφού ένα σύνολο διακριτών διαθέσιμων συχνοτήτων κατανέμεται σε έναν πεπερασμένο

αριθμό κόμβων. Τέλος, η βελτιστοποίηση με διακριτές τιμές είναι γνωστή και ως συνδυαστική βελτιστοποίηση (*combinatorial*), αφού έχει ως στόχο να βρεθεί ο κατάλληλος συνδυασμός των παραμέτρων εισόδου από το σύνολο των πεπερασμένων δυνατών επιλογών.

4. Βελτιστοποίηση με ή χωρίς περιορισμούς

Οι παράμετροι εισόδου συχνά έχουν συγκεκριμένους περιορισμούς και όρια που πρέπει να ισχύουν ώστε να προκύψει μια εφικτή λύση. Η βελτιστοποίηση με περιορισμούς (*constrained*) υποθέτει την παρουσία τουλάχιστον μιας ισότητας ή ανισότητας παραμέτρων στην αντικειμενική συνάρτηση. Αντίθετα, όταν δεν υπάρχουν περιορισμοί, οι παράμετροι μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή. Μια βελτιστοποίηση με περιορισμούς συχνά μετατρέπεται σε μία αντίστοιχη χωρίς περιορισμούς (*unconstrained*), καθώς έτσι η επίλυση είναι ευκολότερη. Επιπλέον, σημειώνεται ότι τα προβλήματα βελτιστοποίησης με περιορισμούς και αντικειμενικές συναρτήσεις που αποτελούνται αποκλειστικά από γραμμικές εξισώσεις ή γραμμικές ανισότητες, ονομάζονται προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού (*Linear Programming, LP*). Αντίθετα, όταν περιέχεται έστω και μία μη γραμμική εξίσωση ή ανισότητα, τότε προκύπτουν προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού (*Non Linear Programming, NLP*), τα οποία προφανώς είναι πιο δύσκολο να επιλυθούν. Σε αυτήν την περίπτωση, εφόσον είναι εφικτό, επιχειρείται να γίνει μετασχηματισμός σε πρόβλημα *LP*.

5. Δυναμική ή στατική αντικειμενική συνάρτηση

Όπως εύκολα προκύπτει από την ονομασία, στην δυναμική βελτιστοποίηση (*dynamic*) το αποτέλεσμα είναι συνάρτηση του χρόνου, ενώ αντίθετα στην στατική (*static*) είναι ανεξάρτητο του χρόνου. Συχνά, κάποιο στοιχείο του προβλήματος δεν παραμένει σταθερό και επομένως η λύση που προκύπτει από την βελτιστοποίηση μια δεδομένη στιγμή, δεν είναι απαραίτητα καλή για ένα άλλο στιγμιότυπο. Ένα παράδειγμα δυναμικής βελτιστοποίησης αποτελεί η επίλυση ενός δικτύου κινητής τηλεφωνίας. Η θέση των κινητών χρηστών αφενός δεν παραμένει σταθερή και αφετέρου επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα. Σε αυτήν την περίπτωση, συχνά το πρόβλημα επιλύεται για πολλά ανεξάρτητα στιγμιότυπα, και η τελική επίδοση του δικτύου προκύπτει λαμβάνοντας τον μέσο όρο των επιμέρους αποτελεσμάτων.

Αναμφισβήτητα, η επιπρόσθετη διάσταση του χρόνου αυξάνει σημαντικά την πολυπλοκότητα της διαδικασίας βελτιστοποίησης.

6. Ακολουθιακοί ή στοχαστικοί αλγόριθμοι

Ορισμένοι αλγόριθμοι ξεκινούν από ένα συγκεκριμένο συνδυασμό για τις παραμέτρους εισόδου και έπειτα, με ένα πλήρως καθορισμένο σύνολο από βήματα, προσπαθούν να προσεγγίσουν την βέλτιστη λύση. Οι αλγόριθμοι αυτοί που ονομάζονται ακολουθιακοί (*sequential*), έχουν την ιδιότητα ότι πάντα οδηγούν στο ίδιο αποτέλεσμα για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων εισόδου και συνήθως απαιτούν μικρό υπολογιστικό χρόνο. Ωστόσο, τις περισσότερες φορές αποτυγχάνουν να βρουν μια ικανοποιητική λύση, καθώς εγκλωβίζονται σε τοπικά ελάχιστα από τα οποία αδυνατούν να ξεφύγουν. Αντίθετα, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι (*stochastic*), προσπαθούν να προσεγγίσουν την βέλτιστη λύση με βάση ορισμένες τυχαίες διαδικασίες. Έχουν την ιδιότητα ότι δεν οδηγούν απαραίτητα στο ίδιο αποτέλεσμα για τις ίδιες τιμές των παραμέτρων εισόδου και συνήθως είναι αρκετά πιο αργοί. Παρόλα αυτά, η χρήση τους είναι πολύ διαδεδομένη για πάρα πολλά προβλήματα, καθώς έχουν την ικανότητα να βρίσκουν καλές λύσεις σε πολύ δύσκολους υπολογιστικούς χώρους. Ιδιαίτερη υποκατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων αποτελούν οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (*evolutionary*) που διατηρούν ένα πληθυσμό αντιπροσωπευτικό των πιθανών λύσεων για ένα πρόβλημα, και δεν εξετάζουν ένα μόνο συνδυασμό των παραμέτρων εισόδου κάθε φορά.

Σύμφωνα με τις παραπάνω κατηγορίες, ήδη από τον τίτλο της διατριβής, γίνεται εμφανές ότι ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στους στοχαστικούς αλγόριθμους για την αντιμετώπιση πολυδιάστατων προβλημάτων. Άλλωστε, η επιλογή αυτή είναι συναντάται πολύ συχνά στη βιβλιογραφία για τα προβλήματα που αφορούν τα δίκτυα ασυρμάτων επικοινωνιών. Όσον αφορά τις υπόλοιπες κατηγορίες που αναφέρθηκαν, αξίζει να σημειωθεί ότι στα περισσότερα προβλήματα που θα αντιμετωπιστούν υπάρχουν περιορισμοί για τις τιμές των παραμέτρων εισόδου, η προσέγγιση για την εύρεση της βέλτιστης λύσης γίνεται με διακριτές και συνεχείς τιμές, ενώ, τέλος, ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στους εξελικτικούς αλγόριθμους, καθώς όπως αποδεικνύεται τις περισσότερες φορές οδηγούν σε καλύτερα αποτελέσματα, αν και συνήθως αυτό γίνεται με αύξηση του υπολογιστικού χρόνου.

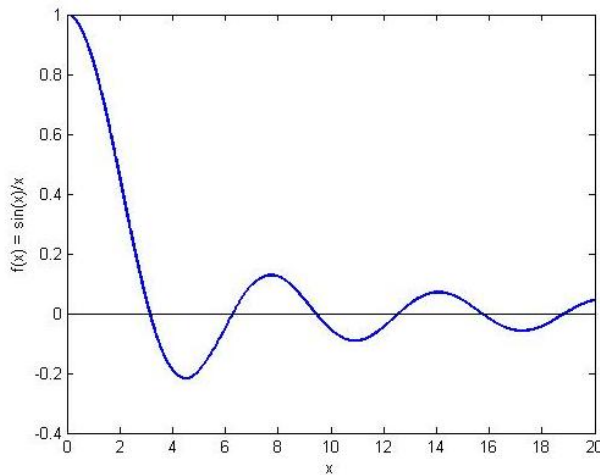
2.2 Βασικοί όροι και έννοιες

2.2.1 Υπολογιστικοί χώροι

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης, παρόμοια με τις μαθηματικές συναρτήσεις, σχετίζεται άμεσα με δύο βασικούς υπολογιστικούς χώρους ή αλλιώς υπολογιστικά πεδία. Ο πρώτος υπολογιστικός χώρος προκύπτει από τις επιτρεπτές τιμές που μπορούν να πάρουν οι παράμετροι εισόδου και ουσιαστικά αποτελεί το πεδίο ορισμού των παραμέτρων εισόδου. Σκοπός της διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι να βρεθούν οι κατάλληλες τιμές που ανήκουν προφανώς στο χώρο αυτό και παράλληλα ελαχιστοποιούν την αντικειμενική συνάρτηση. Ανάλογα με το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται, ο υπολογιστικός χώρος μπορεί να είναι μονοδιάστατος ή πολυδιάστατος και να αποτελείται από διακριτούς ή συνεχείς αριθμούς. Πολλές φορές υπάρχουν συγκεκριμένοι περιορισμοί και όρια που διαμορφώνουν ανάλογα το πεδίο ορισμού των παραμέτρων εισόδου, καθώς κάποιοι συνδυασμοί τιμών μπορεί να μην έχουν νόημα ή να μην οδηγούν σε αποδεκτή λύση.

Ο δεύτερος υπολογιστικός χώρος αφορά το πεδίο τιμών, δηλαδή τις τιμές που προκύπτουν από την αντικειμενική συνάρτηση κάθε προβλήματος. Με άλλα λόγια, είναι ο χώρος που προκύπτει για κάθε συνδυασμό τιμών των παραμέτρων εισόδου και συνήθως ονομάζεται επιφάνεια κόστους (*cost surface*) ή επιφάνεια καταλληλότητας (*fitness landscape*). Μια λύση ή αλλιώς ένα σημείο του χώρου αυτού, που προκύπτει χωρίς να παραβιάζεται κανένα όριο ή περιορισμός για τις παραμέτρους εισόδου του προβλήματος, ονομάζεται εφικτή λύση. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν τα ελάχιστα και τα μέγιστα της επιφάνειας καταλληλότητας, καθώς είναι οι τιμές που προσπαθούν να προσεγγίσουν κάθε φορά οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης.

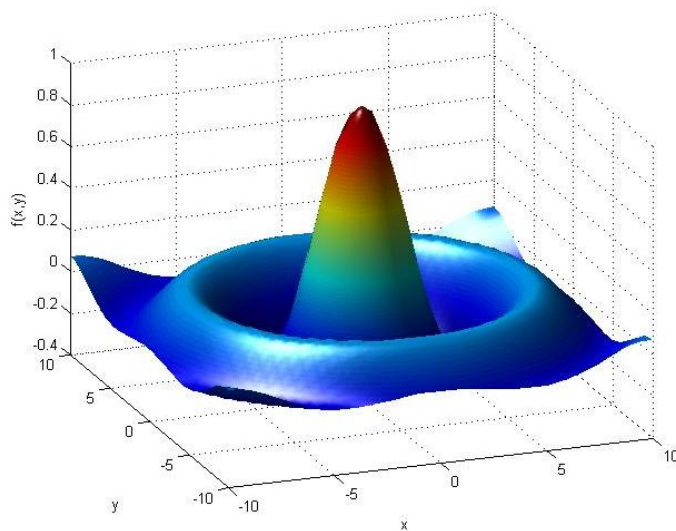
Στη συνέχεια παρουσιάζονται δύο αντιπροσωπευτικά παραδείγματα επιφάνειας καταλληλότητας, για ένα μονοδιάστατο και ένα δισδιάστατο πρόβλημα αντίστοιχα. Οι μεταβλητές x και x, y είναι οι παράμετροι εισόδου για τα δύο προβλήματα αντίστοιχα, ενώ με f συμβολίζεται η αντικειμενική συνάρτηση. Δίπλα σε κάθε σχήμα παρουσιάζεται ο μαθηματικός τύπος κάθε συνάρτησης και το πεδίο ορισμού των παραμέτρων εισόδου.



$$f(x) = \frac{\sin(x)}{x}, \text{ όπου:}$$

$$0 \leq x \leq 20$$

Εικόνα 2: Παράδειγμα επιφάνειας καταλληλότητας για μονοδιάστατο πρόβλημα



$$f(x,y) = \frac{\sin(\sqrt{x^2 + y^2})}{\sqrt{x^2 + y^2}}, \text{ όπου:}$$

$$-10 \leq x, y \leq 10$$

Εικόνα 3: Παράδειγμα επιφάνειας καταλληλότητας για δισδιάστατο πρόβλημα

Στα προβλήματα βελτιστοποίησης ο συνολικός αριθμός των εφικτών λύσεων είναι στις περισσότερες περιπτώσεις υπερβολικά μεγάλος. Επίσης, ο αριθμός αυτός αυξάνεται σημαντικά όσο αυξάνεται η διάσταση του προβλήματος. Αν μάλιστα θεωρήσουμε ότι οι παράμετροι εισόδου προσεγγίζονται με συνεχείς τιμές, τότε ο αριθμός αυτός προφανώς τείνει στο άπειρο. Ως συνέπεια, με μια πρώτη ματιά, θα ισχυριζόταν κάποιος ότι η βελτιστοποίηση τέτοιων προβλημάτων πρέπει να είναι αδύνατη. Δεν ισχύει όμως κάτι τέτοιο, αφού σχεδόν πάντα η επιφάνεια καταλληλότητας εμπεριέχει μια συστηματική σχέση με τον υπολογιστικό χώρο των παραμέτρων εισόδου. Αυτό μπορεί να διαπιστωθεί άλλωστε και από τις δύο εικόνες που προηγήθηκαν.

Όταν αντιμετωπίζεται ένα πρόβλημα με ομαλό τοπίο καταλληλότητας, εύλογα μπορεί να υποτεθεί ότι τα σημεία που είναι κοντά το ένα στο άλλο θα έχουν χωρικά συσχετισμένες

τιμές για την αντικειμενική συνάρτηση. Η μετακίνηση προς μια κατεύθυνση που βελτιώσει την τιμή της συνάρτησης στο προηγούμενο βήμα, κατά πάσα πιθανότητα θα τη βελτιώσει και στο τρέχον βήμα. Δεν ισχύει το ίδιο σε προβλήματα όπου δεν υπάρχει καμία συστηματική σχέση μεταξύ των σημείων στον υπολογιστικό χώρο των παραμέτρων εισόδου και των σημείων στην επιφάνεια καταλληλότητας. Σε αυτήν την περίπτωση, η πληροφορία για την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε μια εφικτή λύση δεν μπορεί να αξιοποιηθεί για την εύρεση μιας καλύτερης λύσης και την τελική εύρεση της βέλτιστης λύσης. Στην πραγματικότητα, αν συμβαίνει κάτι τέτοιο, δεν υπάρχει κανένας κατάλληλος δρόμος για την έρευνα μιας βέλτιστης λύσης, καθώς οποιαδήποτε υπόθεση είναι το ίδιο καλή ή κακή όσο κάθε άλλη.

2.2.2 Ολικά και Τοπικά Ελάχιστα/Μέγιστα

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε η έννοια της επιφάνειας καταλληλότητας και όπως εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί, η επιφάνεια αυτή αποτελείται από ένα σύνολο ελαχίστων και μεγίστων. Συγκεκριμένα, οι εφικτές λύσεις ενός προβλήματος με τιμή αντικειμενικής συνάρτησης η οποία είναι καλύτερη από τις τιμές οποιωνδήποτε άλλων εφικτών λύσεων ονομάζονται βέλτιστες λύσεις. Οι βέλτιστες λύσεις διακρίνονται περαιτέρω σε ολικά ελάχιστα ή ολικά μέγιστα, ανάλογα με το αν το πρόβλημα αφορά την ελαχιστοποίηση ή την μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης αντίστοιχα. Στη συνέχεια δίνεται ο ορισμός του προβλήματος εύρεσης ενός ολικού ελάχιστου (*global minimum*):

Έστω $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, όπου n η διάσταση του πεδίου ορισμού A .
Να βρεθεί $x_g \in A$, τέτοιο ώστε $f(x_g) \leq f(x)$ για $\forall x \in A$

Εικόνα 4: Ορισμός ολικού ελάχιστου

Στον παραπάνω ορισμό με x_g συμβολίζεται το σημείο στον χώρο A , για το οποίο η αντικειμενική συνάρτηση f παρουσιάζει το ολικό ελάχιστο $f(x_g)$. Αντίστοιχα ορίζεται το ολικό μέγιστο (*global maximum*) της f .

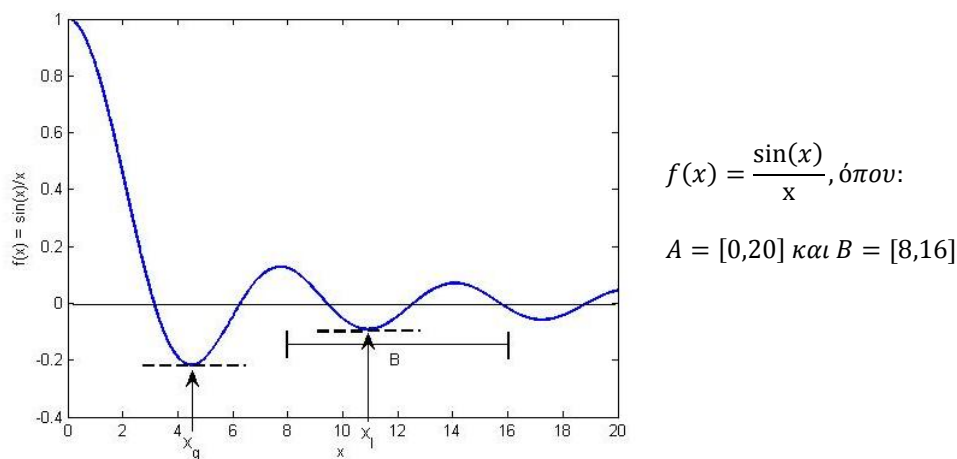
Ωστόσο, υπάρχουν περιπτώσεις όπου κάποιες λύσεις, ενώ είναι οι καλύτερες στην γειτονιά τους, δεν αποτελούν απαραίτητα ολικά ελάχιστα για ολόκληρο το χώρο A . Οι λύσεις αυτές διακρίνονται σε τοπικά ελάχιστα ή τοπικά μέγιστα, ανάλογα με το αν πρόκειται για πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης αντίστοιχα. Στη συνέχεια δίνεται ο ορισμός του προβλήματος εύρεσης ενός τοπικού ελάχιστου (*local minimum*) της περιοχής B :

Έστω $f : A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, όπου n η διάσταση του πεδίου ορισμού A .
 Να βρεθεί $x_l \in B \subseteq A$, τέτοιο ώστε $f(x_l) \leq f(x)$ για $\forall x \in B$

Εικόνα 5: Ορισμός τοπικού ελάχιστου

Στον παραπάνω ορισμό με x_l συμβολίζεται το σημείο στον χώρο A , για το οποίο η αντικειμενική συνάρτηση f παρουσιάζει το τοπικό ελάχιστο $f(x_l)$. Αντίστοιχα ορίζεται το τοπικό μέγιστο (*local maximum*) της f . Σημειώνεται ότι ένα τοπικό ελάχιστο μπορεί να είναι και ολικό ελάχιστο, αν δεν υπάρχει άλλο σημείο σε ολόκληρο το χώρο A για το οποίο η συνάρτηση f να δίνει μικρότερη τιμή.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα απλό παράδειγμα ολικού ελαχίστου x_g και τοπικού ελάχιστου x_l για το μονοδιάστατο πρόβλημα από την Εικόνα 2.



Εικόνα 6: Παράδειγμα ολικού και τοπικού ελαχίστου για μονοδιάστατο πρόβλημα

Τα προβλήματα της εύρεσης του ολικού ελαχίστου είναι γενικά πολύ δύσκολα. Όλοι οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης έχουν ως βασικό πυρήνα την αναζήτηση του ολικού ελαχίστου ξεκινώντας από κάποια καθορισμένη ή τυχαία τιμή. Στις περισσότερες περιπτώσεις η απόδοση του αλγορίθμου κρίνεται ακριβώς με βάση την ικανότητα που έχει να βρίσκει το ολικό βέλτιστο της αντικειμενικής συνάρτησης και να μην εγκλωβίζεται σε τοπικά βέλτιστα. Ένας αποτελεσματικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης πρέπει να μπορεί να βρίσκει το ολικό ελάχιστο ανεξάρτητα από το αρχικό σημείο αναζήτησης. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, λόγω της ιδιότητας που έχουν να διατηρούν ένα σύνολο πιθανών λύσεων, έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία σε μια σειρά προβλημάτων.

Αντίθετα, σχεδόν όλοι οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης μπορούν να εγγυηθούν τη σύγκλιση σε ένα τοπικό ελάχιστο της περιοχής B , αν επιλεγθεί αρχικό σημείο $x \in B$. Ωστόσο, η αδυναμία τους είναι ότι δεν μπορούν να εγγυηθούν ότι το ελάχιστο που θα βρουν είναι και

το ολικό ελάχιστο. Για αυτόν ακριβώς το λόγο, κάθε αποτελεσματικός αλγόριθμος εμπεριέχει ένα μηχανισμό που να αποφεύγει τον εγκλωβισμό σε τοπικά ελάχιστα και να επιτρέπει την περαιτέρω αναζήτηση.

2.2.3 Πολλαπλοί στόχοι

Σε πολλά προβλήματα, η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από επιμέρους στόχους, οι οποίοι είναι συχνά αντικρουόμενοι. Η βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων (*multi-objective optimization*, *MOO*), διαφέρει σημαντικά από την απλή βελτιστοποίηση ενός στόχου (*single-objective optimization*) που έχει αναλυθεί έως τώρα, καθώς στην περίπτωση της δεν μπορεί να καθοριστεί μία μοναδική βέλτιστη λύση. Αυτό συμβαίνει διότι δεν είναι εφικτή η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση των αντικρουόμενων στόχων. Αντίθετα, υπάρχει ένα σύνολο από βέλτιστες λύσεις που ονομάζονται *Pareto-βέλτιστες λύσεις* (*Pareto-optimal*) και οι οποίες είναι εντελώς ισοδύναμες, εκτός και αν υπάρχει κάποια προτίμηση που να δίνει προτεραιότητα στην ικανοποίηση ενός στόχου, εις βάρος των υπολοίπων. Στη συνέχεια δίνεται ο ορισμός του προβλήματος εύρεσης ενός ολικού ελάχιστου με βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων [4]:

Έστω $[f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T$ το διάνυσμα με τουλάχιστον 2 αντικρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις, όπου $f_i : \mathcal{X} \rightarrow \mathcal{R}$ και $x \in A \subseteq \mathcal{X}^n$.

Να βρεθεί $x \in A$, τέτοιο ώστε να ελαχιστοποιεί το $[f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T$

Εικόνα 7: Ορισμός προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων

Σημειώνεται ότι ο χώρος A προκύπτει από τους περιορισμούς που επιβάλλει η ταυτόχρονη ικανοποίηση των στόχων του προβλήματος στο διάνυσμα εισόδου x και οποίοι εννοούνται στον παραπάνω ορισμό. Κάθε πρόβλημα με περιορισμούς και αντικειμενικές συναρτήσεις που αποτελούνται αποκλειστικά από γραμμικές εξισώσεις ή γραμμικές ανισότητες, ονομάζεται πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων γραμμικού προγραμματισμού (*Multi-Objective Linear Programming*, *MOLP*). Αντίθετα, όταν περιέχεται έστω και μία μη γραμμική εξίσωση ή ανισότητα, τότε προκύπτουν προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων μη γραμμικού προγραμματισμού (*Multi-Objective Non Linear Programming*, *MONLP*), τα οποία προφανώς είναι πιο δύσκολο να επιλυθούν.

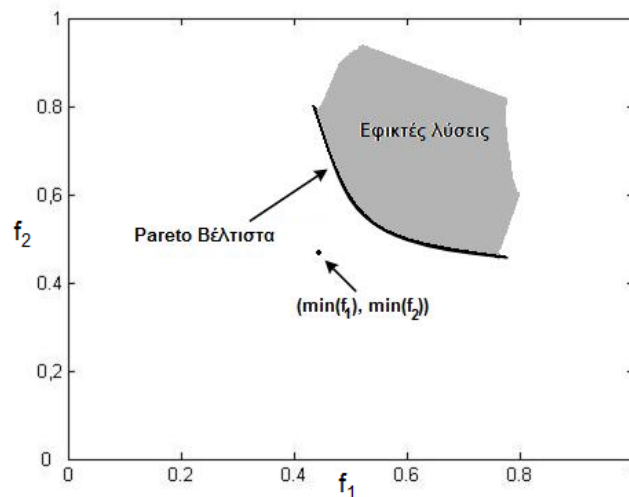
Σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν προηγουμένως ακολουθεί ο ορισμός του προβλήματος εύρεσης μιας *Pareto-βέλτιστης* λύσης. Ο ορισμός αυτός ουσιαστικά δηλώνει ότι οι βέλτιστες λύσεις προκύπτουν αν οι αντικειμενικές συναρτήσεις δεν βελτιώνονται περισσότερο χωρίς να χειροτερέψει μία τουλάχιστον από τις υπόλοιπες συναρτήσεις.

Έστω $[f_1(x), f_2(x), \dots, f_k(x)]^T$ το διάνυσμα με τουλάχιστον 2 αντικρουόμενες αντικειμενικές συναρτήσεις, όπου $f_i : \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ και $x \in A \subseteq \mathcal{R}^n$.

Να βρεθεί $x_p \in A$, τέτοιο ώστε δεν υπάρχει άλλο $x \in A$ για το οποίο να ισχύει:
 $f_i(x) \leq f_i(x_p)$ για $i = 1, \dots, k$ και $f_j(x) < f_j(x_p)$ για τουλάχιστον ένα στόχο j .

Εικόνα 8: Ορισμός *Pareto-βέλτιστης* λύσης

Συνήθως υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός από *Pareto-βέλτιστες* λύσεις (πολλές φορές τείνει στο άπειρο), οι οποίες εξ' ορισμού είναι όλες ισοδύναμες. Στόχος της βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων είναι να βρεθούν όσο το δυνατόν περισσότερες από τις λύσεις αυτές. Ακολουθεί ένα παράδειγμα προβλήματος με δύο αντικρουόμενους στόχους, όπως διακρίνεται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 9: Παράδειγμα *Pareto-βέλτιστων* λύσεων

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ο χώρος των εφικτών λύσεων οριοθετείται στο κάτω μέρος (αφού πρόκειται για πρόβλημα ελαχιστοποίησης) από τις *Pareto-βέλτιστες* λύσεις. Στο σχήμα οι λύσεις αυτές έχουν ενωθεί με μια καμπύλη γραμμή, η οποία ονομάζεται *Pareto-front*. Επίσης, διακρίνεται το σημείο όπου κάθε αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποιείται. Εφόσον οι δύο στόχοι είναι αντικρουόμενοι, προφανώς το σημείο αυτό βρίσκεται εκτός του χώρου των εφικτών λύσεων. Μεταξύ των διάφορων αλγορίθμων βελτιστοποίησης, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται συστηματικά για την εύρεση των *Pareto-βέλτιστων* λύσεων. Λόγω της ιδιότητας που έχουν να διατηρούν ένα σύνολο από υποψήφιες λύσεις, μπορούν πιο εύκολα να εξερευνήσουν το χώρο λύσεων, ώστε τελικά να σχηματιστεί το *Pareto-front*. Σημειώνεται, ότι το παραπάνω παράδειγμα αφορά την παρουσία δύο μόνο στόχων και εύκολα μπορεί να γίνει γενίκευση και σε περισσότερες

διαστάσεις. Για παράδειγμα στην περίπτωση όπου υπάρχουν τρεις στόχοι, ισχύουν ακριβώς τα ίδια με τη διαφορά ότι το *Pareto-front* από καμπύλη γραμμή γίνεται επιφάνεια.

Η παραπάνω επίλυση με τη εύρεση των *Pareto-βέλτιστων* λύσεων, αν και οδηγεί σε πολύ χρήσιμα συμπεράσματα, πολλές φορές αποφεύγεται και στη θέση της εφαρμόζεται μια απλούστερη που οδηγεί σε μία μοναδική βέλτιστη λύση. Ο πιο εύκολος τρόπος επίλυσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων είναι με την χρήση μιας μοναδικής αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία προκύπτει ως το άθροισμα των επιμέρους αντικειμενικών συναρτήσεων με προσαρμοσμένα βάρη. Δηλαδή, οι αντικρουόμενοι όροι αντισταθμίζονται μέσω κατάλληλων συντελεστών και ουσιαστικά το πρόβλημα μετατρέπεται σε βελτιστοποίηση ενός μοναδικού στόχου, όπως φαίνεται και στις επόμενες εξισώσεις:

$$f_T = \sum_{i=1}^k w_i \cdot f_i, \text{ όπου:} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^k w_i = 1 \quad (2)$$

Με f_T συμβολίζεται η αντικειμενική συνάρτηση που προκύπτει και w_i είναι οι συντελεστές βάρους που συνήθως είναι κανονικοποιημένοι, έτσι ώστε να ισχύει η σχέση (2). Είναι φανερό ότι με την προσέγγιση αυτή, το πρόβλημα επιλύεται μόνο για μια συγκεκριμένη σχέση ανάμεσα στους επιθυμητούς στόχους και για αυτό το λόγο δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των συντελεστών βάρους.

2.2.4 Βελτιστοποίηση με περιορισμούς

Ένα πολύ σημαντικό θέμα που δεν έχει παρουσιαστεί αναλυτικά έως τώρα είναι η ύπαρξη περιορισμών στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης (*constrained optimization*). Ιδιαίτερα στο σχεδιασμό δικτύων ασύρματων επικοινωνιών υπάρχουν σχεδόν πάντα περιορισμοί που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Συγκεκριμένα, ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς g_i και αντικειμενική συνάρτηση $f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, αναπαριστάται με την βοήθεια των εξισώσεων:

$$x = \operatorname{argmin} f(x), \quad x \in A \quad (3)$$

$$\text{υπό τους περιορισμούς } g_i(x) \leq 0, \text{ με } i = 1, \dots, m \quad (4)$$

Ο βέλτιστος τρόπος αντιμετώπισης του παραπάνω προβλήματος είναι να καθοριστεί το νέο σύνολο $B \subseteq A$, όπου πλέον για τα σημεία αναζήτησης ισχύει $x \in B$. Με άλλα λόγια,

αξιοποιώντας την πληροφορία που λαμβάνεται από τους περιορισμούς, διαμορφώνεται κατάλληλα ο χώρος αναζήτησης, ώστε κάθε λύση που προκύπτει να είναι εκ των προτέρων γνωστό ότι τους ικανοποιεί. Έτσι, αφενός ο χώρος έρευνας γίνεται μικρότερος και αφετέρου η ικανοποίηση των περιορισμών εξασφαλίζεται ενδογενώς.

Ωστόσο, συχνά δεν είναι εφικτός ο καθορισμός του νέου χώρου αναζήτησης. Σε αυτές τις περιπτώσεις, ένας απλός τρόπος αντιμετώπισης προβλημάτων με περιορισμούς είναι η κατάλληλη τροποποίηση της συνάρτησης καταλληλότητας. Συγκεκριμένα, κατά τον υπολογισμό της f εισάγεται ένας αρνητικός όρος (*penalty function*) που εκφράζει ποσοτικά την παραβίαση των περιορισμών που έχουν τεθεί. Ως αποτέλεσμα, η νέα τιμή f' της συνάρτησης δίνεται από την σχέση:

$$f'(x) = f(x) + H(x, k) \quad (5)$$

όπου H είναι η πρόσθετος όρος που μπορεί να αλλάζει τιμή δυναμικά σε κάθε επανάληψη k και πρακτικά δηλώνει την επίδραση που θα έχει η παραβίαση των περιορισμών στον υπολογισμό της f . Η επιλογή της *penalty function* καθορίζεται σύμφωνα με το πρόβλημα βελτιστοποίησης που επιλύεται.

Σε αυτό το σημείο είναι πλέον φανερό ότι δεδομένου της δυσκολίας, των αντικρουόμενων κριτηρίων και των περιορισμών που περιέχει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης, είναι φανερό ότι η επιλογή του αλγορίθμου που θα χρησιμοποιηθεί και ο τρόπος εφαρμογής του είναι μείζονος σημασίας. Στη συνέχεια του κεφαλαίου γίνεται μια συνοπτική περιγραφή των σημαντικότερων αλγορίθμων.

2.3 Αναλυτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

Ο κλάδος της μαθηματικής ανάλυσης προσφέρει τα εργαλεία για την εύρεση ακρότατων για διάφορες αντικειμενικές συναρτήσεις, μέσω της πληροφορίας που προκύπτει από την παράγωγο της συνάρτησης. Για την περίπτωση ενός μονοδιάστατου προβλήματος, αρκεί να βρεθεί το σημείο μηδενισμού της πρώτης παραγώγου της αντικειμενικής συνάρτησης. Έπειτα, αν στο σημείο αυτό η δεύτερη παράγωγος είναι θετική πρόκειται για τοπικό ελάχιστο, ενώ αν είναι αρνητική είναι τοπικό μέγιστο. Στη συνέχεια συγκρίνονται όλα τα τοπικά ελάχιστα και εύκολα προκύπτει το ολικό ελάχιστο. Τα ίδια ισχύουν και για τα πολυδιάστατα προβλήματα, με τη διαφορά ότι γίνεται χρήση μερικών παραγώγων. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η αναλυτική μέθοδος βελτιστοποίησης για ένα πολυδιάστατο πρόβλημα:

Έστω $f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, όπου n η διάσταση του προβλήματος

Να βρεθούν τα σημεία $x_{min} \in A$ όπου:

$$\nabla f(x_{min}) = 0 \text{ και } \nabla^2 f(x_{min}) > 0$$

Το ολικό ελάχιστο $x_g \in x_{min}$ έχει την ιδιότητα $x_g: f(x_g) = \min(f(x_{min}))$

Εικόνα 10: Πρόβλημα εύρεσης ακρότατων με χρήση της παραγώγου

Αυτή η μέθοδος είναι πολύ πιο κομψή συγκριτικά με αλγορίθμους που βασίζονται σε τυχαίες διαδικασίες. Ωστόσο, υπάρχει η απαίτηση για συνεχείς συναρτήσεις με αναλυτικές παραγώγους, ενώ στην περίπτωση όπου αντιμετωπίζονται πολυδιάστατα προβλήματα συχνά είναι πολύ δύσκολο να βρεθούν τα τοπικά ακρότατα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν αλγόριθμοι που έχουν την ικανότητα να αξιοποιήσουν με επιτυχία την χρήση της παραγώγου για την επίλυση αρκετών προβλημάτων. Ακολουθεί η συνοπτική περιγραφή των δύο πιο γνωστών περιπτώσεων.

2.3.1 Μέθοδος κατάβασης κλίσεων

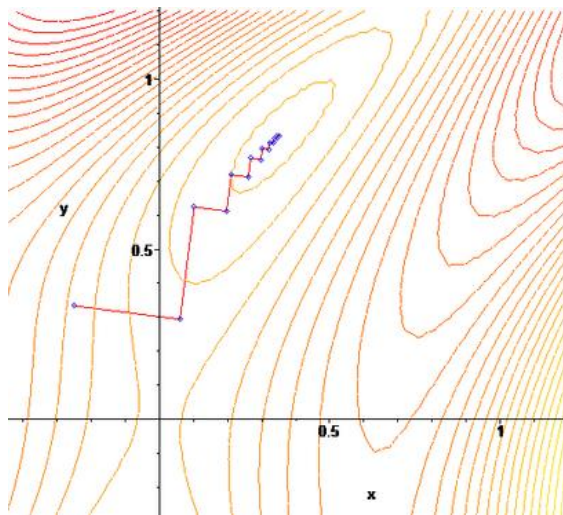
Η μέθοδος της κατάβασης κλίσεων ή αλλιώς μέθοδος απότομης κατάβασης (*gradient descent - steepest descent*) είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης όπου ένα τοπικό ακρότατο προσεγγίζεται μέσα από διαδοχικές θέσεις εκτιμήσεων [5]. Ειδικότερα, το ακρότατο της συνάρτησης αναζητείται με επαναληπτικό τρόπο, αρχίζοντας από ένα σημείο και προχωρώντας αντίθετα προς την κατεύθυνση της παραγώγου στο σημείο αυτό. Η τιμή της παραγώγου στην ουσία υποδηλώνει την κλίση της επιφάνειας της αντικειμενικής συνάρτησης. Με άλλα λόγια, η επόμενη θέση αναζητείται προς την κατεύθυνση που η αντικειμενική συνάρτηση μειώνεται με τον μεγαλύτερο ρυθμό. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να προσεγγιστεί το ακρότατο με ικανοποιητική ακρίβεια. Αν η αντικειμενική συνάρτηση είναι συνεχής και διαφορίσιμη, η μέθοδος επιτρέπει την σύγκλιση στο τοπικό ακρότατο.

Ξεκινώντας από ένα αρχικό σημείο x_0 η ακολουθία των θέσεων αναζήτησης στη μέθοδο κατάβασης κλίσεων προκύπτει ως εξής:

$$x_{i+1} = x_i - \varepsilon \nabla f(x_i) \quad (6)$$

όπου ε είναι ένας μικρός θετικός αριθμός, κατάλληλα επιλεγμένος έτσι ώστε να ισχύει $f(x_{i+1}) < f(x_i)$ για να προσεγγίζεται σταδιακά το ακρότατο. Κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου, η τιμή του ε μπορεί να μεταβάλλεται.

Συνήθως, οι θέσεις αναζήτησης ακολουθούν μια χαρακτηριστική *zig-zag* διαδρομή. Η κίνηση αυτή, όπως αποδεικνύεται στην πράξη, καθυστερεί σημαντική την επιθυμητή σύγκλιση στο τοπικό ελάχιστο. Στο σχήμα που ακολουθεί διακρίνεται η διαδικασία της μεθόδου για ένα διδιάστατο πρόβλημα. Η επιφάνεια καταλληλότητας παρουσιάζεται με την χρήση ισοδυναμικών καμπυλών, που αποτελούν μια πολύ βολική αναπαράσταση για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης με δύο παραμέτρους εισόδου.



Εικόνα 11: Παράδειγμα της μεθόδου κατάβασης κλίσεων

2.3.2 Μέθοδος συζυγών κλίσεων

Η μέθοδος των συζυγών κλίσεων (*conjugate gradient*) βασίζεται στην ανάλυση της προηγούμενης μεθόδου, με σημαντική όμως διαφορά την επιλογή της κατεύθυνσης που προκύπτει η επόμενη θέση αναζήτησης [6]. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί τις συζυγείς κατευθύνσεις για την προσέγγιση του τοπικού ελάχιστου. Οι συζυγείς κατευθύνσεις μπορούν να προσδιοριστούν εύκολα με τη διαδικασία ορθογωνοποίησης *Gram-Schmidt*. Συνήθως, η μέθοδος των συζυγών κλίσεων χρησιμοποιείται για την αριθμητική επίλυση συστημάτων γραμμικών εξισώσεων ιδιάζουσας μορφής και κυρίως εφαρμόζεται σε αραιά συστήματα που είναι πάρα πολύ μεγάλα για να αντιμετωπιστούν με τις άμεσες μεθόδους επίλυσης. Στη συνέχεια περιγράφεται η μεθοδολογία για την επίλυση ενός γραμμικού συστήματος.

Έστω ότι ζητείται να επιλυθεί το γραμμικό σύστημα $Ax = b$. Αρχικά υπολογίζεται το διάνυσμα με τις συζυγείς κατευθύνσεις $[d_1, d_2, \dots, d_n]^T$, όπου n η διάσταση του προβλήματος. Υπενθυμίζεται ότι οι συζυγείς κατευθύνσεις έχουν την ιδιότητα:

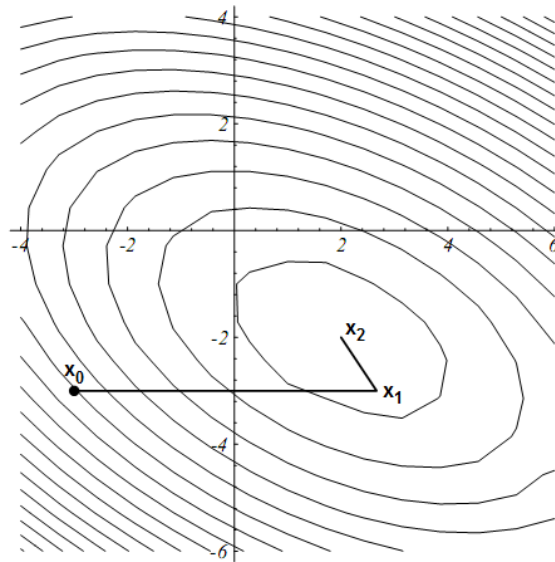
$$d_i^T A d_j = 0 \text{ για } i \neq j \quad (7)$$

Το διάνυσμα με τις συζυγείς κατευθύνσεις αποτελεί μια βάση για το χώρο $\mathbb{R}^n$ και συνεπώς η λύση x' του συστήματος μπορεί να εκφραστεί:

$$x' = \sum_{i=1}^n a_i \cdot d_i, \text{ όπου:} \quad (8)$$

$$a_i = \frac{d_i^T b}{d_i^T A d_i} \quad (9)$$

Με παρόμοια μεθοδολογία, η λύση x' μπορεί να προκύψει μέσω επαναληπτικής διαδικασίας και όχι μέσω του αθροίσματος της εξίσωσης (8). Σε αυτή τη περίπτωση, αντίθετα με την μέθοδο κατάβασης κλίσεων, ο αριθμός των απαιτούμενων βημάτων είναι προκαθορισμένος και ισούται με την διάσταση n του προβλήματος. Στο σχήμα που ακολουθεί διακρίνεται η διαδικασία της μεθόδου για ένα δισδιάστατο πρόβλημα, όπου τα βήματα για την προσέγγιση του τοπικού ελάχιστου είναι μόνο δύο.



Εικόνα 12: Παράδειγμα της μεθόδου συζυγών κλίσεων [6]

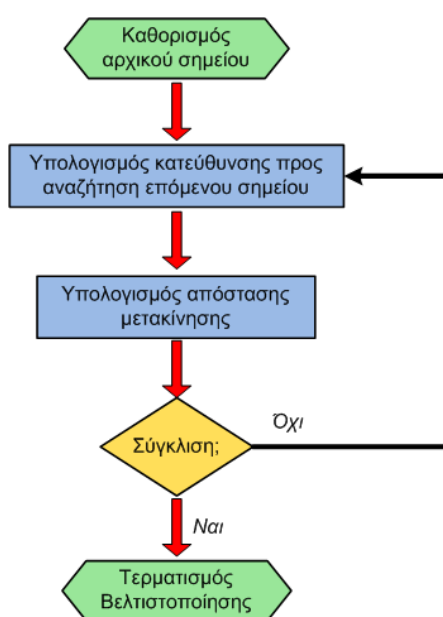
Τέλος, σημειώνεται ότι στη γενική περίπτωση που αναζητείται το ακρότατο μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών, το πλήθος των βημάτων της μεθόδου δεν είναι εκ των προτέρων γνωστό. Επιπλέον, οι εξισώσεις του αλγορίθμου μετατρέπονται έτσι ώστε να εξαρτώνται από τις τιμές της συνάρτησης και της παραγώγου της. Η μέθοδος που προκύπτει με αυτό τον τρόπο ονομάζεται μη γραμμική μέθοδος συζυγών κλίσεων (*non linear conjugate gradient*).

2.3.3 Σχολιασμός αναλυτικών μεθόδων

Οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας χρησιμοποιούνται για την γρήγορη εύρεση ενός ακρότατου μιας συνάρτησης. Από τη στιγμή που θα καθοριστεί το αρχικό σημείο

αναζήτησης, η σύγκλιση στο τοπικό ελάχιστο αυτής της γειτονιάς είναι εγγυημένη. Ωστόσο, στις περισσότερες περιπτώσεις το τοπικό ελάχιστο δεν αποτελεί το ζητούμενο ολικό ελάχιστο και ο αλγόριθμος εγκλωβίζεται. Ως αποτέλεσμα, οι αναλυτικές μέθοδοι είναι ιδανικές όταν είναι εκ των προτέρων γνωστό που βρίσκεται περίπου το ολικό ελάχιστο. Ένα δεύτερο σημαντικό χαρακτηριστικό είναι ότι οι αναλυτικοί αλγόριθμοι βασίζονται στην γνώση της αντικειμενικής συνάρτησης και της παραγώγου της, καθώς και στον υπολογισμό τους σε διάφορα σημεία. Τα στοιχεία αυτά αποτελούν τον πυρήνα της διαδικασίας εύρεσης των ελαχίστων. Όμως, η απαίτηση αυτή δεν είναι συχνά εφικτή, ακόμα και για απλά προβλήματα, γεγονός που εμποδίζει την ευρεία εφαρμογή των αλγορίθμων.

Συνοψίζοντας, οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας μπορούν να αξιοποιηθούν σε ειδικά προβλήματα και να οδηγήσουν με ακρίβεια και ταχύτητα στο επιθυμητό αποτέλεσμα. Για τις υπόλοιπες περιπτώσεις γίνεται συστηματική χρήση της επόμενης μεγάλης κατηγορίας αλγορίθμων. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το βασικό διάγραμμα ροής ενός αναλυτικού αλγορίθμου:



Εικόνα 13: Βασικό διάγραμμα ροής αναλυτικού αλγορίθμου

2.4 Στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης

Για τα περισσότερα προβλήματα η χρήση των αναλυτικών μεθόδων βελτιστοποίησης δεν μπορεί να οδηγήσει σε ικανοποιητικές λύσεις. Στην πλειοψηφία μάλιστα των περιπτώσεων, δεν υπάρχει ούτε καν η δυνατότητα να εφαρμοστούν, αφού απαιτείται η γνώση της αντικειμενικής συνάρτησης και της παραγώγου της, καθώς και ο υπολογισμός τους σε διάφορα σημεία του υπολογιστικού χώρου. Για αυτό το λόγο, τον τελευταίο καιρό έχει

δοθεί ιδιαίτερη έμφαση στη συστηματική χρήση μιας άλλης μεγάλης κατηγορίας αλγορίθμων που ονομάζονται στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης [7]. Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι δεν χρειάζονται την αναλυτική περιγραφή του προβλήματος που επιλύεται και εφαρμόζουν κατάλληλες τυχαίες διαδικασίες για να εντοπίσουν τις βέλτιστες λύσεις. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα που έχουν οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης και τα οποία τους καθιστούν τόσο χρήσιμα εργαλεία για την αντιμετώπιση διαφόρων προβλημάτων:

- *Εύρεση ολικού ακρότατου*

Οι στοχαστικοί αλγόριθμοι έχουν την δυνατότητα να εντοπίζουν με μεγάλη επιτυχία τα ολικά ελάχιστα ή μέγιστα. Λόγω του στοχαστικού παράγοντα που εισάγεται, διεξάγεται ευρεία αναζήτηση στην επιφάνεια καταλληλότητας και επιπλέον παρέχεται μια εκτίμηση για την επίδραση κάθε παραμέτρου εισόδου. Σε αντίθεση με την προηγούμενη κατηγορία αλγορίθμων, διαθέτουν μηχανισμούς για να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά ακρότατα και έχουν ως στόχο να βρουν μια λύση που να είναι καλύτερη από όλες τις άλλες, σε ολόκληρο το σύνολο των εφικτών λύσεων. Αν και συχνά καταφέρνουν να προσεγγίσουν τα ολικά ακρότατα, δεν μπορούν να εγγυηθούν ότι η λύση που θα καταλήξουν είναι το ζητούμενο ολικό ακρότατο.

- *Εύκολη και ευρεία εφαρμογή*

Η διαδικασία εύρεσης των κατάλληλων τιμών για τις παραμέτρους εισόδου γίνεται χωρίς να χρειάζεται σαφής γνώση για το πρόβλημα που αντιμετωπίζεται. Με άλλα λόγια, η αντικειμενική συνάρτηση αντιμετωπίζεται σαν ένα μαύρο κουτί και ο στοχαστικός αλγόριθμος υλοποιείται ανεξάρτητα, αξιοποιώντας την πληροφορία που προκύπτει από την αντιστοίχιση των παραμέτρων εισόδου με τα αποτελέσματα. Σε αντίθεση με τις αναλυτικές μεθόδους βελτιστοποίησης, δεν χρειάζεται να υπολογιστεί η παράγωγος της συνάρτησης και η μόνη απαραίτητη πληροφορία είναι η εκτίμηση του αποτελέσματος για συνδυασμούς των τιμών.

- *Ευελιξία*

Η αναζήτηση του ολικού ακρότατου γίνεται με βάση στοχαστικές διαδικασίες. Ως συνέπεια, λόγω της εν μέρει τυχαίας εξέλιξης των αλγορίθμων, δεν υπάρχει σημαντική εξάρτηση από το αρχικό σημείο αναζήτησης. Το γεγονός αυτό είναι καθοριστικό, καθώς δεν χρειάζεται η εκ των προτέρων γνώση της περιοχής όπου

βρίσκεται κοντά το ζητούμενο ακρότατο. Κάθε καινούριο βήμα των αλγορίθμων δεν εξαρτάται μόνο από την προηγούμενη θέση αναζήτησης. Εν ολίγοις, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι μπορούν να κινηθούν ευέλικτα στην επιφάνεια καταλληλότητας, χωρίς να έχουν καμία ιδιαίτερη απαίτηση για αρχικές συνθήκες και γενικότερα για το προς αντιμετώπιση πρόβλημα.

Ωστόσο, όπως κάθε μέθοδος, έτσι και οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης έχουν ορισμένα χαρακτηριστικά που μπορούν να δυσκολέψουν την διαδικασία εύρεσης της βέλτιστης λύσης. Στη συνέχεια σημειώνονται συνοπτικά τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της κατηγορίας:

- *Αυξημένος υπολογιστικός χρόνος*

Τα πλεονεκτήματα των στοχαστικών αλγορίθμων επιτυγχάνονται εις βάρος του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Στις αναλυτικές μεθόδους γίνεται μια συγκεκριμένη ακολουθία βημάτων, που γρήγορα καταλήγει στην εύρεση του τοπικού ακρότατου. Αντίθετα, οι αλγόριθμοι αυτής της κατηγορίας χρειάζεται να εκτιμήσουν την αντικειμενική συνάρτηση σε πολύ περισσότερα σημεία, πολλά εκ των οποίων στην πραγματικότητα δεν βοηθούν στην εξέλιξη τους. Όμως αυτό είναι το κόστος για την ευρεία αναζήτηση που πραγματοποιούν και για το λόγο αυτό ο απαιτούμενος υπολογιστικός χρόνος είναι πολλές τάξεις μεγαλύτερος από ότι στην περίπτωση των αναλυτικών και ακολουθιακών μεθόδων.

- *Μη προκαθορισμένη συνθήκη τερματισμού*

Ο τερματισμός της διαδικασίας βελτιστοποίησης με στοχαστικούς αλγορίθμους είναι ένα σημαντικό ζήτημα, καθώς δεν είναι εξασφαλισμένος ενδογενώς. Δεν υπάρχει η πληροφορία αν η λύση που έχει βρεθεί στο τρέχον στάδιο του αλγορίθμου είναι η ζητούμενη βέλτιστη, και συνεπώς συνεχίζεται η αναζήτηση για να βρεθεί μια ακόμα καλύτερη. Ως αποτέλεσμα, ενδείκνυται ο καθορισμός εξωτερικών συνθηκών τερματισμού, όπως για παράδειγμα:

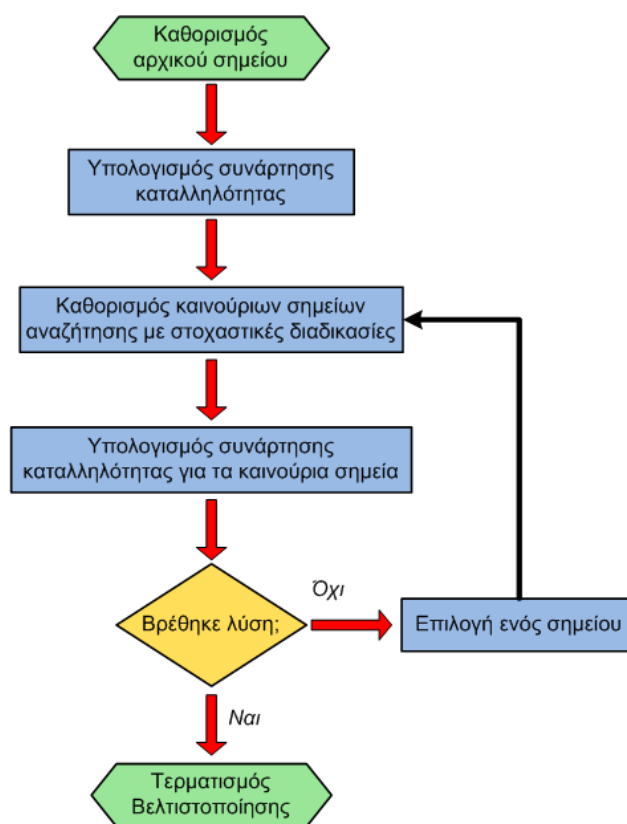
- Επίτευξη μιας προκαθορισμένης επιθυμητής τιμής
- Ολοκλήρωση ενός συγκεκριμένου αριθμού επαναλήψεων
- Υπέρβαση της καθορισμένης ανώτατης χρονικής διάρκειας
- Ολοκλήρωση ενός αριθμού επαναλήψεων χωρίς βελτίωση
- Συνδυασμός των ανωτέρω κριτηρίων

Πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή των συνθηκών τερματισμού, καθώς ουσιαστικά καθορίζουν την λύση που θα προκύψει από την εφαρμογή του αλγορίθμου.

▪ *Αδυναμία επανάληψης μιας συγκεκριμένης εκτέλεσης*

Όπως εξηγήθηκε προηγουμένως, λόγω της εν μέρει τυχαίας εξέλιξης των αλγορίθμων, αν το ίδιο πρόβλημα εκτελεσθεί δύο ή περισσότερες φορές με τις ίδιες αρχικές συνθήκες, δεν θα έχει απαραίτητα το ίδιο αποτέλεσμα. Συνεπώς δυσχεραίνεται η εποπτεία του αλγορίθμου και ειδικότερα η διαδικασία της προσέγγισης στην βέλτιστη λύση. Για αυτό το λόγο, συχνά αποθηκεύονται τα επιμέρους στοιχεία του αλγορίθμου, τα οποία μπορούν να δώσουν τις απαραίτητες πληροφορίες για την λειτουργία της μεθόδου. Το μειονέκτημα αυτό γίνεται περισσότερο αισθητό όταν γίνεται προσπάθεια να αποκτηθεί μια γενική αίσθηση για την μορφή της επιφάνειας καταλληλότητας.

Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται το βασικό διάγραμμα ροής ενός στοχαστικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης:



Εικόνα 14: Βασικό διάγραμμα ροής στοχαστικού αλγορίθμου

Οι αλγόριθμοι στοχαστικής βελτιστοποίησης σίγουρα διαδραματίζουν έναν ολοένα και αυξανόμενο ρόλο για την αντιμετώπιση των περισσότερων πολυδιάστατων προβλημάτων. Χρησιμοποιούνται για να βρουν λύσεις κοντά στις βέλτιστες σε δύσκολα προβλήματα που δεν μπορούν να αντιμετωπιστούν με άλλες μεθόδους και έτσι βοηθούν σημαντικά στην εξέλιξη της έρευνας. Η παρούσα διατριβή επικεντρώνεται σε αυτή την κατηγορία αλγορίθμων, καθώς η αντιμετώπιση των προβλημάτων που θα παρουσιαστούν γίνεται κυρίως με τους στοχαστικούς αλγόριθμους. Εξάιρεση αποτελεί η εφαρμογή ακολουθιακών αλγορίθμων, η οποία γίνεται για συγκριτικούς λόγους.

Στη συνέχεια, παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικότεροι στοχαστικοί αλγόριθμοι που έχουν χρησιμοποιηθεί στη βιβλιογραφία και δίνεται προσοχή στην κατανόηση της ξεχωριστών χαρακτηριστικών του καθενός. Ιδιαίτερη βαρύτητα έχει δοθεί στην υποκατηγορία των εξελικτικών αλγορίθμων.

2.4.1 Τυχαία αναζήτηση

Η τυχαία αναζήτηση (*random search*) αποτελεί τον πιο απλό στοχαστικό αλγόριθμο. Η στρατηγική αυτής της μεθόδου, όπως προδίδει και η ονομασία της, είναι να δοκιμάζονται τυχαία συνδυασμοί τιμών για τις παραμέτρους εισόδου. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος υπολογίζεται για κάθε συνδυασμό που προκύπτει και προφανώς τελικά επιλέγεται ο συνδυασμός που οδήγησε στην καλύτερη λύση. Η μέθοδος αυτή δεν οδηγεί σε καλά αποτελέσματα και χρησιμοποιείται κυρίως για συγκριτικούς λόγους. Εκτελείται για ένα καθορισμό αριθμό επαναλήψεων και το αποτέλεσμα ορίζεται ως το σημείο αναφοράς για τους υπόλοιπους αλγόριθμους.

Μια παραλλαγή του προβλήματος της τυχαίας αναζήτησης είναι ο τυχαίος περίπατος (*random walk*) στον υπολογιστικό χώρο του πεδίου ορισμού. Ουσιαστικά επιλέγεται ένα αρχικό σημείο αναζήτησης και έπειτα τυχαία αναζητείται ένα διπλανό σημείο. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με μικρή τυχαία μεταβολή της τιμής μιας παραμέτρου εισόδου. Το ίδιο επαναλαμβάνεται για όλες τις διαστάσεις του προβλήματος. Ως αποτέλεσμα γίνεται μια τυχαία ακολουθία αναζήτησης στην επιφάνεια καταλληλότητας, από όπου και έχει πάρει το όνομα της η συγκεκριμένη μέθοδος. Προφανώς, όπως και προηγουμένως, ο τυχαίος περίπατος δεν οδηγεί σε καλά αποτελέσματα και χρησιμοποιείται μόνο ως σημείο αναφοράς.

2.4.2 Αναρρίχηση λόφου

Ο αλγόριθμος αναρρίχησης λόφου (*hill climbing*) [8] αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα στοχαστικής μεθόδου και επίσης αποτελεί την βάση για τους πιο εξελιγμένους αλγορίθμους που θα παρουσιαστούν στις επόμενες ενότητες. Σύμφωνα με την αναρρίχηση λόφου, η αναζήτηση αρχίζει από ένα τυχαίο σημείο, έπειτα εξετάζονται τυχαία γειτονικές επιλογές και η αναζήτηση συνεχίζεται προς την κατεύθυνση που βρέθηκε η καλύτερη τιμή. Η μέθοδος έχει πάρει το όνομά της λόγω της αναφοράς σε πρόβλημα μεγιστοποίησης, όπου η αναζήτηση του μεγίστου παρομοιάζεται με την εύρεση της κορυφής ενός λόφου στην επιφάνεια καταλληλότητας. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά βήματα της μεθόδου για ένα πρόβλημα με αντικειμενική συνάρτηση f , για την οποία ισχύει $f: A \subseteq \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$. Με x_{best} συμβολίζεται η καλύτερη θέση αναζήτησης που έχει βρεθεί ως την τρέχουσα επανάληψη και με f_{best} η αντίστοιχη καλύτερη τιμή της συνάρτησης.

```

 $x_{best} = random(A)$ , (επιλογή τυχαίου  $x \in A$ )
 $f_{best} = f(x_{best})$ 
while {δεν έχουν ικανοποιηθεί τα κριτήρια τερματισμού}
     $x_{best} \rightarrow (x_1, x_2, \dots, x_K)$ , (τυχαίος καθορισμός  $K$  γειτονικών λύσεων)
     $x_{best} = x_i$ , όπου  $i = \operatorname{argmin}_{k=1, \dots, K} f(x_k)$ 
     $f_{best} = f(x_{best})$ 
end

```

Εικόνα 15: Περιγραφή του αλγορίθμου αναρρίχησης λόφων

Οι υποψήφιες γειτονικές λύσεις, όπως και στη μέθοδο του τυχαίου περίπατου, προκύπτουν με μικρή μεταβολή της τιμής μιας ή και περισσότερων παραμέτρων εισόδου. Για παράδειγμα, αν πρόκειται για πρόβλημα με διακριτές τιμές, μια πιθανή εκδοχή είναι ότι σε κάθε βήμα επιλέγεται τυχαία μία από τις παραμέτρους εισόδου και της αποδίδεται είτε η επόμενη είτε η προηγούμενη τιμή από το σύνολο των επιτρεπτών διακριτών τιμών. Σημειώνεται ότι σε μια εκδοχή του αλγορίθμου, αντί για τον καθορισμό ενός μικρού συνόλου γειτονικών λύσεων, εξετάζονται όλες οι δυνατές γειτονικές λύσεις.

Ένα προφανές μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι εξαρτάται άμεσα από την αρχική επιλογή της τυχαίας λύσης, καθώς και από τις επιτρεπτές κινήσεις για τον καθορισμό των γειτονικών σημείων. Το βασικότερο πρόβλημα είναι, όμως, ότι η μέθοδος οδηγείται προς ένα τοπικό ακρότατο της συνάρτησης καταλληλότητας, στο οποίο και εγκλωβίζεται. Είναι φανερό ότι χρειάζονται μηχανισμοί που να επιτρέπουν την ευρύτερη

αναζήτηση στην επιφάνεια καταλληλότητας, με απώτερο στόχο την εύρεση του ολικού ελαχίστου. Με αυτή τη λογική προέκυψαν οι δύο επόμενοι στοχαστικοί αλγόριθμοι.

2.4.3 Προσομοιωμένη ανόπτηση

Ο αλγόριθμος προσομοιωμένης ανόπτησης (*Simulated Annealing*, *SA*) αποτελεί μία επέκταση του αλγορίθμου αναρρίχησης λόφου [9]-[10] και έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε πολλά προβλήματα. Η μέθοδος αυτή ουσιαστικά προσομοιώνει την διαδικασία όπου ένα υλικό θερμαίνεται πάνω από τη θερμοκρασία τήξης του και έπειτα σταδιακά ψύχεται ώσπου να δημιουργηθεί η κρυσταλλική δομή που ελαχιστοποιεί την ενέργειά του. Ωστόσο, αν η ψύξη γίνει απότομα, το υλικό γίνεται μια άμορφη μάζα με μεγαλύτερο επίπεδο ενέργειας. Συνεπώς, το κλειδί για την επίτευξη της κρυσταλλικής μορφής αποτελεί ο έλεγχος του ρυθμού αλλαγής της θερμοκρασίας. Στην περίπτωση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης, το επίπεδο της ενέργειας αντιστοιχίζεται στην τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας και η κρυσταλλική δομή προφανώς αποτελεί το ολικό ελάχιστο.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης, όπως και στον αλγόριθμο αναρρίχησης λόγου, αρχίζει με ένα τυχαίο αρχικό σημείο και τον καθορισμό μιας γειτονικής θέσης αναζήτησης. Ωστόσο, το σημαντικό χαρακτηριστικό του αλγορίθμου είναι ότι σε αυτή την περίπτωση επιτρέπεται η μετάβαση σε θέσεις που οδηγούν σε χειρότερες λύσεις, με σκοπό να αποφευχθεί η σύγκλιση σε ένα τοπικό ελάχιστο. Συγκεκριμένα, αν η γειτονική θέση οδηγεί σε καλύτερη λύση γίνεται αμέσως δεκτή και η αναζήτηση συνεχίζεται από αυτήν. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και αν οδηγεί σε χειρότερη λύση, όπου με βάση μια πιθανότητα, καθορίζεται αν θα γίνει δεκτή. Η τιμή της πιθανότητας εξαρτάται από το πόσο χειρότερη είναι η λύση από την τρέχουσα βέλτιστη, καθώς και από την τιμή μιας παραμέτρου που μειώνεται σταδιακά με την εξέλιξη του αλγορίθμου και προσομοιάζει την θερμοκρασία. Όσο μικρότερη η τιμή της θερμοκρασίας, τόσο μικρότερη είναι και η πιθανότητα αποδοχής μιας χειρότερης λύσης. Έτσι, ο αλγόριθμος αρχικά έχει μεγάλο πεδίο αναζήτησης και σταδιακά, καθώς εξελίσσεται, επικεντρώνεται στην περιοχή όπου ενδεχομένως βρίσκεται η βέλτιστη λύση.

Στη συνέχεια γίνεται αναλυτική παρουσίαση του αλγορίθμου για ένα πρόβλημα με αντικειμενική συνάρτηση $f: A \subseteq \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$. Έστω ότι με T συμβολίζεται η παράμετρος της θερμοκρασίας και με x_{now} , x_{next} το τρέχον και το επόμενο γειτονικό σημείο αναζήτησης. Σημειώνεται ότι το γειτονικό σημείο συνήθως προκύπτει με την αλλαγή της τιμής σε μία ή δύο από τις παραμέτρους εισόδου. Τα x_{best} , f_{best} έχουν ακριβώς την έννοια που δόθηκε στην περίπτωση του αλγορίθμου αναρρίχησης λόφων. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα βασικά στάδια του στοχαστικού αλγορίθμου:


```

 $T = T_0$  (αρχικοποίηση θερμοκρασίας)
 $x_{now} = random(A)$ , (επιλογή τυχαίου  $x \in A$ )
 $f_{best} = f(x_{now})$ 
while {δεν έχουν ικανοποιηθεί τα κριτήρια τερματισμού}
     $x_{now} \rightarrow x_{next}$  (τυχαίος καθορισμός ενός γειτονικού σημείου)
     $\Delta f = f(x_{next}) - f(x_{now})$ 
    if  $\Delta f < 0$  or  $c < \exp\left(-\frac{\Delta f}{T}\right)$ , ( $c$  τυχαίος αριθμός στο διάστημα  $[0,1]$ )
         $x_{now} = x_{next}$ 
        if  $f(x_{now}) < f_{best}$ 
             $x_{best} = x_{now}$ 
             $f_{best} = f(x_{now})$ 
        end
    end
     $T = T_m$  (μείωση της θερμοκρασίας όπου  $m$  ο αριθμός επανάληψης)
end

```

Εικόνα 16: Περιγραφή του αλγορίθμου προσομοιωμένης ανόπτησης

Όπως εύκολα διαπιστώνεται, το βασικό τμήμα του αλγορίθμου αποτελεί ο έλεγχος αποδοχής του νέου σημείου αναζήτησης. Η πιθανότητα P να γίνει δεκτή μια χειρότερη λύση δίνεται από τη σχέση:

$$P = \exp\left(-\frac{\Delta f}{T}\right), \text{ όπου:} \quad (10)$$

$$\Delta f = f(x_{next}) - f(x_{now}) \quad (11)$$

Η διαδικασία μείωσης της θερμοκρασίας ή διαδικασία ψύξης, όπως αλλιώς ονομάζεται, είναι πολύ κρίσιμη για την αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου. Ο ρυθμός μείωσης της θερμοκρασίας ουσιαστικά καθορίζει το πόσο γρήγορα ο αλγόριθμος θα περιορίσει την αναζήτησή του σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Υπάρχουν πολλοί διαφορετικοί τρόποι υλοποίησης της διαδικασίας ψύξης. Αν η αρχική θερμοκρασία είναι T_0 και η τελική T_M , όπου M ο συνολικός αριθμός επαναλήψεων, τότε η θερμοκρασία στο βήμα m είναι:

- Γραμμική μείωση:
$$T_m = \frac{n \cdot (T_0 - T_M)}{M} \quad (12)$$

- Γεωμετρική μείωση:
$$T_m = a \cdot T_{m-1}, \quad (13)$$

- Hayek βέλτιστο:
$$T_m = \frac{\beta}{\log(1 + M)} \quad (14)$$

όπου το a είναι λίγο μικρότερο από τη μονάδα (π.χ. $a = 0.99$) και το β επιλέγεται ανάλογα με το πρόβλημα, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να μπορεί να ξεφύγει από τα τοπικά ελάχιστα. Στην περίπτωση της προσομοιωμένης ανόπτωσης, συνήθως χρησιμοποιείται ένα επιπλέον κριτήριο τερματισμού, όπου ο αλγόριθμος σταματάει όταν η θερμοκρασία φθάσει μια ελάχιστη προκαθορισμένη τιμή. Ένα άλλο θέμα που δεν έχει ακόμα διευκρινιστεί είναι η επιλογή της αρχικής θερμοκρασίας T_0 . Η επιλογή της προφανώς βασίζεται στο πρόβλημα που αντιμετωπίζεται. Ένα απλό παράδειγμα υπολογισμού φαίνεται στο επόμενο σχήμα:

```

num = 0
for m = 1:M
    Καθορισμός  $x_{next}$ ,  $\Delta f$ 
    if {ικανοποιείται το κριτήριο αποδοχής του  $x_{next}$ }
        num = num + 1
        Ανανέωση  $x_{now}$ ,  $x_{best}$ ,  $f_{best}$ 
    end
end
if num/M < thr, (σύγκριση με το κατώφλι thr)
    T = 2T, (αύξηση της T και επανάληψη της διαδικασίας)
else
    T0 = T, (εύρεση της επιθυμητής T0)
end

```

Εικόνα 17: Υπολογισμός αρχικής θερμοκρασίας στην προσομοιωμένη ανόπτωση

Η εύρεση της κατάλληλης τιμής της αρχικής θερμοκρασίας βασίζεται στις δοκιμές, όπου αρχίζοντας από μια μικρή τιμή, σταδιακά αυξάνεται (π.χ. διπλασιάζεται στην Εικόνα 17), έως ότου για τη συγκεκριμένη θερμοκρασία τα καινούρια σημεία να γίνονται δεκτά σε ποσοστό μεγαλύτερο από ένα κατώφλι thr , π.χ. 90%.

2.4.4 Αναζήτηση με απαγορευμένες θέσεις

Η μέθοδος της αναζήτησης με απαγορευμένες θέσεις (*Taboo Search*, TS) αποτελεί μία ακόμα εξέλιξη του αλγόριθμου αναρρίχησης λόφου [11]. Όπως και στην προσομοιωμένη ανόπτωση, επιτρέπεται η μετάβαση σε χειρότερες λύσεις, ώστε να μην εγκλωβίζεται ο αλγόριθμος σε τοπικά ελάχιστα. Βασικό στοιχείο της μεθόδου είναι η δημιουργία μιας λίστας με απαγορευμένες θέσεις (*taboo list*), στις οποίες δεν επιτρέπεται η μετάβαση. Αυτή η λίστα συνήθως περιέχει τα σημεία που έχουν ήδη εξεταστεί, ώστε να επιλέγονται καινούριες διαδρομές αναζήτησης. Η λίστα απαγορευμένων θέσεων έχει συγκεκριμένο μήκος και άρα η εισαγωγή νέων θέσεων στη λίστα έχει σαν αποτέλεσμα τη διαγραφή

κάποιων άλλων. Πιο βολικό είναι η λίστα να περιέχει ολόκληρες οικογένειες σημείων με συγκεκριμένες ιδιότητες. Ωστόσο, με αυτό τον τρόπο υπάρχει η περίπτωση να απαγορευτεί η μετάβαση σε πολύ καλές θέσεις, τις οποίες δεν έχει επισκεφθεί ακόμα ο αλγόριθμος. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, υπάρχει η δυνατότητα της αναζήτησης σε μια θέση που οδηγεί σε καλύτερη λύση από την τρέχουσα βέλτιστη, παρόλο που ανήκει στην λίστα με τις απαγορευμένες θέσεις (*aspiration criteria*).

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα βασικά στάδια του στοχαστικού αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες θέσεις, όπου με TL και AC συμβολίζεται η λίστα απαγορευμένων θέσεων και η λίστα με *aspiration criteria* αντίστοιχα. Για τους υπόλοιπους όρους ισχύουν τα ίδια με όσα έχουν ήδη αναφερθεί.

```

 $x_{now} = random(A)$ , (επιλογή τυχαίου  $x \in A$ )
 $f_{best} = f(x_{now})$ 
while {δεν έχουν ικανοποιηθεί τα κριτήρια τερματισμού}
     $x_{now} \rightarrow N: (x_1, x_2, \dots, x_K)$ , (σύνολο  $K$  τυχαίων γειτονικών λύσεων)
     $N \rightarrow TL \subseteq N, AC \subseteq TL$ 
     $x_{now} = x_i$ , όπου  $i = \operatorname{argmin}f(x_k)$  με  $x_k \in \{(N - TL) \cup AC\}$ 
    if  $f(x_{now}) < f_{best}$ 
         $x_{best} = x_{now}$ 
         $f_{best} = f(x_{now})$ 
    end
end

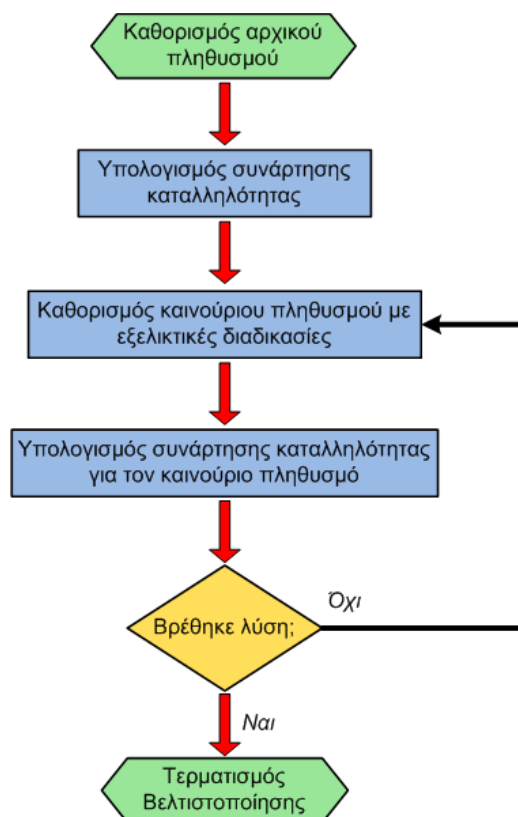
```

Εικόνα 18: Περιγραφή του αλγορίθμου αναζήτησης με απαγορευμένες θέσεις

Αντίθετα με την μέθοδο της προσομοιωμένης απόπτωσης, η οποία μπορεί να κάνει κινήσεις προς χειρότερες λύσεις οποιαδήποτε στιγμή, ο αλγόριθμος αναζήτησης με απαγορευμένες θέσεις κάνει το ίδιο μόνο όταν έχει βρεθεί σε τοπικά ελάχιστα. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι και οι δύο αλγόριθμοι είναι δυνατόν να τερματίσουν σε μια θέση, ενώ αυτή δεν αποτελεί την καλύτερη θέση που έχουν επισκεφθεί. Το γεγονός αυτό οφείλεται στα διάφορα κριτήρια τερματισμού και για αυτό το λόγο συνήθως αποθηκεύεται στη μνήμη το σημείο που βρέθηκε η καλύτερη λύση κατά τη διάρκεια εξέλιξης των αλγορίθμων. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζεται μια πολύ σημαντική υποκατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι.

2.5 Εξελικτικοί αλγόριθμοι

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (*evolutionary algorithms*) αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία των στοχαστικών αλγορίθμων [12],[13]. Διαφέρουν από τις προηγούμενες στοχαστικές μεθόδους βελτιστοποίησης, καθώς διατηρούν ένα σύνολο θέσεων αναζήτησης για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Σε όλους τους εξελικτικούς αλγόριθμους το πρώτο βήμα είναι ο τυχαίος υπολογισμός ενός αρχικού συνόλου θέσεων, όπου κάθε θέση αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση. Έπειτα, ακολουθούν συγκεκριμένες διαδικασίες που εξελίσσουν το υπάρχον σύνολο σε ένα καινούριο και αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποια συνθήκη τερματισμού. Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι μπορούν να αποφύγουν τη παγίδευση σε ένα τοπικό βέλτιστο και πολύ συχνά βρίσκουν τις ολικά βέλτιστες λύσεις. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η σύγκλιση στο ολικό ελάχιστο δεν είναι εγγυημένη. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται το βασικό διάγραμμα ροής ενός εξελικτικού αλγορίθμου βελτιστοποίησης:



Εικόνα 19: Βασικό διάγραμμα ροής εξελικτικού αλγορίθμου

Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζονται δύο από τα πιο αντιπροσωπευτικά παραδείγματα αλγορίθμων της κατηγορίας.

2.5.1 Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι (*Genetic Algorithms, GA*) στηρίζονται στις βιολογικές διαδικασίες εξέλιξης και έχουν εφαρμοσθεί σε πλήθος προβλημάτων βελτιστοποίησης [3],[14],[15]. Σύμφωνα με την ορολογία που χρησιμοποιείται, οι παράμετροι εισόδου ονομάζονται γονίδια και ο συνδυασμός τους για την δημιουργία ενός διανύσματος αναζήτησης ονομάζεται χρωμόσωμα. Ο πληθυσμός εξελίσσεται μέσα από τις επαναλήψεις του αλγορίθμου, οι οποίες καλούνται γενιές. Αρχικά δημιουργείται ένα τυχαίο σύνολο χρωμοσωμάτων που αποτελεί τον αρχικό πληθυσμό. Κατά τη διάρκεια κάθε γενιάς, λαμβάνουν μέρος οι ακόλουθες διαδικασίες:

1. Επιλογή (*selection*)

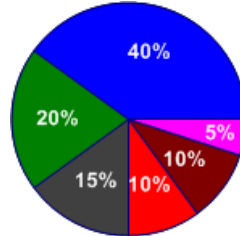
Μερικά από τα χρωμοσώματα της τρέχουσας γενιάς επιλέγονται για τη δημιουργία της νέας γενιάς και ουσιαστικά παίζουν το ρόλο των γονέων. Η επιλογή γίνεται με κριτήρια που βασίζονται σε στοχαστικές διαδικασίες, ωστόσο πάντα δίνεται προτεραιότητα στα χρωμοσώματα που οδηγούν σε καλύτερες λύσεις. Με άλλα λόγια, η διαδικασία της επιλογής ευνοεί τα καταλληλότερα άτομα για να εξασφαλισθεί ότι θα διατηρηθούν καλές λύσεις στη νέα γενιά. Υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης της διαδικασίας επιλογής, εκ των οποίων οι πιο διαδεδομένοι είναι η μέθοδος της ρουλέτας (*roulette wheel selection*) και η επιλογή τουρνουά (*tournament selection*). Η μέθοδος της ρουλέτας μπορεί να εφαρμοσθεί με δύο τρόπους. Στον πρώτο τρόπο τα χρωμοσώματα αρχικά κατατάσσονται σύμφωνα με την τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας και έπειτα η πιθανότητα επιλογής υπολογίζεται με βάση την σειρά κατάταξης. Συγκεκριμένα, αν N είναι ο συνολικός αριθμός των γονέων, η πιθανότητα επιλογής P ενός χρωμοσώματος x με σειρά κατάταξης n δίνεται από τη σχέση:

$$P(x_i) = \frac{N + 1 - n(x_i)}{\sum_{i=1}^N n(x_i)} \quad (15)$$

Αυτή η προσέγγιση είναι ανεξάρτητη από το πρόβλημα και η πιθανότητα στηρίζεται μόνο στη σειρά κατάταξης. Όσο καλύτερη σειρά κατάταξης έχει ένα χρωμόσωμα, τόσο πιο πιθανό είναι να επιλεγεί ως γονέας. Στον δεύτερο τρόπο, η πιθανότητα επιλογής γίνεται με βάση τις τιμές της συνάρτησης καταλληλότητας. Για παράδειγμα, σε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης με $f > 0$, ισχύει η σχέση:

$$P(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^N f(x_i)} \quad (16)$$

Αυτή η προσέγγιση δίνει σημαντική προτεραιότητα στο χρωμόσωμα του οποίου η τιμή της f είναι πολύ καλύτερη από ότι των υπολοίπων. Επίσης, δίνει τις ίδιες πιθανότητες σε χρωμοσώματα με παρόμοια τιμή της f . Ένα παράδειγμα με $N = 6$ φαίνεται στο επόμενο σχήμα, στο οποίο οφείλεται το όνομα της μεθόδου.

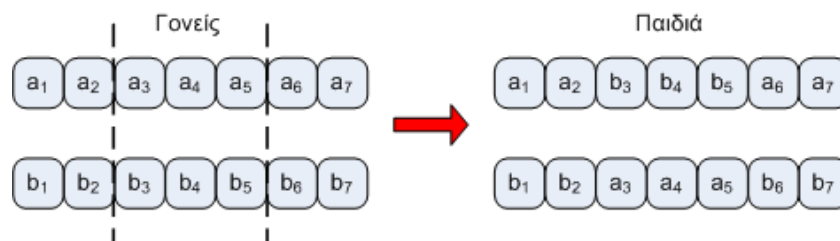


Εικόνα 20: Παράδειγμα *roulette wheel selection*

Τέλος, στην μέθοδο *tournament selection* επιλέγεται τυχαία ένα μικρό σύνολο από χρωμοσώματα και όποιο από αυτά έχει την καλύτερη τιμή για την συνάρτηση f , επιλέγεται ως γονιός. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να καθορισθούν όλοι οι γονείς. Η προσέγγιση αυτή ενδείκνυται για μεγάλους πληθυσμούς, καθώς τότε υπερτερεί ως προς τον απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο.

2. Διασταύρωση (*crossover*)

Το αποτέλεσμα του συνδυασμού των γονέων είναι τα χρωμοσώματα-παιδιά. Κάθε ζεύγος γονέων διασταυρώνεται για τη δημιουργία ενός ζεύγους παιδιών, το καθένα από τα οποία φέρει πληροφορία και από τους δύο γονείς του. Όπως και για την διαδικασία της επιλογής, έτσι και εδώ υπάρχουν διάφοροι τρόποι υλοποίησης. Οι πιο διαδεδομένες περιπτώσεις είναι η ομοιόμορφη διασταύρωση, η διαμόρφωση απλού σημείου και η διασταύρωση πολλαπλού σημείου. Στη διασταύρωση απλού σημείου επιλέγεται τυχαία μια θέση στο διάνυσμα του χρωμοσώματος και τα δύο παιδιά προκύπτουν παραθέτοντας εναλλάξ τα τμήματα των γονέων τους. Το ίδιο ακριβώς ισχύει και για την διαμόρφωση πολλαπλού σημείου, με την διαφορά ότι επιλέγονται τυχαία ν θέσεις, που χωρίζουν το διάνυσμα σε $\nu + 1$ τμήματα. Στο ακόλουθο σχήμα φαίνονται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα με $\nu = 2$, όπου τα χρωμοσώματα a, b έχουν επτά γονίδια.



Εικόνα 21: Παράδειγμα διασταύρωσης πολλαπλού σημείου

Στην ομοιόμορφη διασταύρωση δημιουργείται ένα δυαδικό διάνυσμα ίσου μήκους με τα χρωμοσώματα, όπου κάθε στοιχείο του είναι τυχαία 0 ή 1. Τα δύο παιδιά προκύπτουν με εναλλάξ παράθεση των γονιδίων όπως ορίζει το διάνυσμα μάσκα:



Εικόνα 22: Παράδειγμα ομοιόμορφης διασταύρωσης

Στην περίπτωση όπου η αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται με συνεχείς τιμές, υπάρχει μια εναλλακτική υλοποίηση για την διαδικασία της διασταύρωσης. Για παράδειγμα, αν συμβολίζονται με *parent* οι γονείς και με *offspring* τα παιδιά, τότε ισχύει η σχέση:

$$offspring_1 = c \cdot parent_1 + (1 - c) \cdot parent_2 \quad (17)$$

$$offspring_2 = c \cdot parent_2 + (1 - c) \cdot parent_1$$

όπου c τυχαίος αριθμός ομοιόμορφα κατανομημένος στο διάστημα $[0,1]$. Σε κάθε περίπτωση η πραγματοποίηση της διασταύρωσης εξαρτάται από την πιθανότητα p_c , η οποία λαμβάνει μεγάλες τιμές, συνήθως στο διάστημα $[0.6, 1]$. Η τιμή της p_c καθορίζει αν ένα χρωμόσωμα της νέας γενιάς θα προκύψει μέσω της διαδικασίας διασταύρωσης ή αν θα μεταβεί απευθείας από την προηγούμενη γενιά (ελιτισμός). Προφανώς, όταν γίνεται χρήση του ελιτισμού, διατηρούνται τα χρωμοσώματα που έχουν την καλύτερη τιμή της συνάρτησης καταλληλότητας. Μια συνήθης τακτική είναι η p_c να έχει αρχικά μεγάλη τιμή και καθώς εξελίσσονται οι γενιές να μειώνεται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο αλγόριθμος αρχικά να κάνει ευρύτερη αναζήτηση και στο τέλος να προσεγγίζει τις γειτονιές που ως τότε βρέθηκαν οι καλύτερες λύσεις.

3. Μετάλλαξη (*mutation*)

Μετά την επιλογή και την διασταύρωση, ακολουθεί η διαδικασία της μετάλλαξης. Αυτό το βήμα είναι ο μηχανισμός που δημιουργεί καινούριες περιοχές αναζήτησης και προστατεύει τον γενετικό αλγόριθμο από την γρήγορη σύγκλιση σε ένα τοπικό ελάχιστο. Ορισμένα από τα γονίδια της τρέχουσας γενιάς επιλέγονται τυχαία και τους ανατίθεται τυχαία μια καινούρια τιμή. Η υλοποίηση της μετάλλαξης μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Στην πιο διαδεδομένη εκδοχή οποιοδήποτε γονίδιο της γενιάς υπόκειται σε μετάλλαξη με πιθανότητα p_m . Ένας εναλλακτικός τρόπος είναι

να καθορισθεί τυχαία ένα σύνολο από χρωμοσώματα και η διαδικασία της μετάλλαξης να περιοριστεί σε αυτά. Σημειώνεται ότι στην περίπτωση όπου η αντιμετώπιση του προβλήματος γίνεται με συνεχείς τιμές, η μετάλλαξη μπορεί να γίνει με την απλή πρόσθεση ενός τυχαίου αριθμού. Η πιθανότητα μετάλλαξης p_m παίρνει μικρές τιμές, συνήθως $p_m < 0.1$. Συνήθως έχει αρχικά μια μικρή τιμή που αυξάνεται καθώς εξελίσσονται οι γενιές, ώστε να εξασφαλίζεται η διαφορετικότητα ανάμεσα στα μέλη της γενιάς. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή της τιμής είναι πολύ σημαντική για την αποτελεσματική λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου.

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται τα βασικά στάδια ενός γενετικού αλγόριθμου.

```

 $(x_1, x_2, \dots, x_{2N}) = \text{random}(A)$ , (τυχαία επιλογή αρχικού πληθυσμού  $2N$ )
 $f_{best} = f(x_i)$ , όπου  $i = \text{argmin}_{n=1, \dots, 2N} f(x_n)$ 
while {δεν έχουν ικανοποιηθεί τα κριτήρια τερματισμού}
    for  $\{k = 1, 3, 5, \dots, 2N\}$ , ( $N$  επαναλήψεις)
         $(x_i, x_j)$  : γονείς που προέκυψαν με διαδικασία επιλογής
        if  $c < p_c$ , ( $c$  τυχαίος αριθμός στο διάστημα  $[0,1]$ )
             $(x_i, x_j) \xrightarrow{\text{Διασταύρωση}} (x'_k, x'_{k+1})$ , (όπου  $x'$  στοιχείο νέας γενιάς)
        else
             $(x'_k, x'_{k+1}) = (x_i, x_j)$ , (ελιτισμός)
        end
    end
     $(x'_1, x'_2, \dots, x'_{2N}) \xrightarrow{\text{Μεταλλαξη με } p_m} (x'_1, x'_2, \dots, x'_{2N})$ 
     $(x_1, x_2, \dots, x_{2N}) = (x'_1, x'_2, \dots, x'_{2N})$ 
    if  $f(x_i) < f_{best}$ , όπου  $i = \text{argmin}_{n=1, \dots, 2N} f(x_n)$ 
         $x_{best} = x_i$ 
         $f_{best} = f(x_i)$ 
    end
end

```

Εικόνα 23: Περιγραφή του γενετικού αλγόριθμου

Συνοψίζοντας, ο γενετικός αλγόριθμος βασίζεται στην διατήρηση ενός πληθυσμού σημείων αναζήτησης. Μέσα από τις διαδικασίες της επιλογής, της διασταύρωσης και της μετάλλαξης εξερευνάται αποτελεσματικά η επιφάνεια καταλληλότητας. Οι ενδογενείς μηχανισμοί του αλγορίθμου εξασφαλίζουν την προσπάθεια προσέγγισης του επιθυμητού ολικού ελαχίστου και η διαδικασία βελτιστοποίησης συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν τα καθορισμένα

κριτήρια σύγκλισης. Γενικά υπάρχουν διάφορες παραλλαγές του γενετικού αλγόριθμου. Δύο από τις σημαντικότερες εμπεριέχουν αφενός την υποδιαίρεση του πληθυσμού σε υποσύνολα που δρουν ανεξάρτητα για ένα αριθμό επαναλήψεων και αφετέρου την αρχικοποίηση μερικών χρωμοσωμάτων ανά τακτά χρονικά διαστήματα προκειμένου να προστεθεί γίνει αναζήτηση σε νέες γειτονιές.

2.5.2 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (*Particle Swarm Optimization, PSO*), όπως και αρκετοί από τους προηγούμενους, βασίζεται σε διαδικασίες και συμπεριφορές που συναντάμε στο φυσικό περιβάλλον [16],[17]. Σύμφωνα με την ορολογία που έχει καθιερωθεί, κάθε δυνατό διάνυσμα των παραμέτρων εισόδου ονομάζεται σωματίδιο (*particle*). Το σύνολο όλων των σωματιδίων σε ένα επαναληπτικό βήμα του αλγορίθμου αποτελεί το σμήνος (*swarm*). Όπως σε κάθε εξελικτικό αλγόριθμο, η αρχή γίνεται με μια τυχαία κατανομή των σωματιδίων στο χώρο των λύσεων. Αντίθετα με τους γενετικούς αλγόριθμους όπου σε κάθε γενιά δημιουργούνται νέες λύσεις, εδώ τα σωματίδια παραμένουν ως υποψήφιος λύσεις, ενώ παράλληλα κινούνται στην επιφάνεια καταλληλότητας. Η βασική διαδικασία μέσω της οποίας υπολογίζεται η νέα θέση ενός σωματιδίου του σμήνους είναι η ανανέωση της ταχύτητάς του. Η ταχύτητα δείχνει αφενός την κατεύθυνση προς την οποία θα πραγματοποιηθεί η κίνηση και αφετέρου την απόσταση μετακίνησης. Όλα τα σωματίδια αξιολογούνται με βάση την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος και καθένα από αυτά γνωρίζει την καλύτερη θέση που έχει βρεθεί το ίδιο ως την τρέχουσα επανάληψη (*local best*), καθώς και την καλύτερη θέση που έχει βρεθεί από οποιοδήποτε σωματίδιο στην γειτονιά του (*global best*).

Σύμφωνα με την πιο απλοϊκή εκδοχή της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων, κάθε σωματίδιο i ανανεώνει την ταχύτητα v και την θέση του x , ανάλογα με τις τοπικές p^l και ολικές p^g καλύτερες λύσεις που έχουν βρεθεί μέχρι την τρέχουσα επανάληψη, σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$v'_i = v_i + c_1 \rho_1 (p_i^l - x_i) + c_2 \rho_2 (p_i^g - x_i) \quad (18)$$

$$x'_i = x_i + v'_i \quad (19)$$

όπου c_1 , c_2 είναι καθορισμένες σταθερές και ρ_1 , ρ_2 είναι τυχαίοι αριθμοί ομοιόμορφα κατανομημένοι στο διάστημα $[0, 1]$ που υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη. Για λόγους σύγκλισης, η ταχύτητα v συνήθως περιορίζεται στο διάστημα $[-v_{max}, v_{max}]$, όπου v_{max} μια μέγιστη προκαθορισμένη τιμή για το μέτρο της. Όπως διαπιστώνεται, η καινούρια θέση αναζήτησης ενός σωματιδίου προκύπτει ως η συνισταμένη της έλξης προς την τοπική και

ολική καλύτερη λύση. Ο συσχετισμός ανάμεσα σε αυτούς του δύο όρους μέσω των σταθερών c_1 , c_2 καθορίζει αν ο αλγόριθμος θα κάνει ευρεία αναζήτηση ή αν θα επικεντρωθεί στην προσέγγιση του τοπικού ελαχίστου. Στο επόμενο σχήμα φαίνονται τα βασικά στάδια του αλγορίθμου βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων:

```

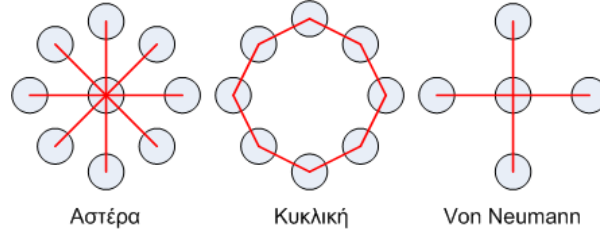
 $(x_1, x_2, \dots, x_N) = \text{random}(A)$ , (τυχαία επιλογή αρχικού πληθυσμού  $N$ )
 $(x_1, x_2, \dots, x_N) \rightarrow (N_1, N_2, \dots, N_N)$  (όπου  $N_i$  οι γειτονικές θέσεις του  $x_i$ )
Αρχικοποίηση  $p_i^l$ ,  $p_i^g$ ,  $v_i$ ,  $f_{best}$ 
while {δεν έχουν ικανοποιηθεί τα κριτήρια τερματισμού}
    for {  $i = 1, 2, \dots, N$  }
        if  $f(x_i) < f(p_i^l)$ 
             $p_i^l = x_i$  (υπολογισμός local best)
        end
        if  $f(x_i) < f(p_i^g)$ 
             $p_i^g = x_k$ , όπου  $k = \text{argmin}_{n \in N_i} f(x_n)$  (υπολογισμός global best)
        end
    end
    for {  $i = 1, 2, \dots, N$  }
         $v_i = v_i + c_1 \rho_1 (p_i^l - x_i) + c_2 \rho_2 (p_i^g - x_i)$ 
         $x_i = x_i + v_i$ 
        Έλεγχος και διόρθωση ώστε  $v_i \in [-v_{max}, v_{max}]$  και  $x_i \in A$ 
    end
    if  $f(x_i) < f_{best}$ , όπου  $i = \text{argmin}_{n=1, \dots, N} f(x_n)$ 
         $x_{best} = x_i$ 
         $f_{best} = f(x_i)$ 
    end
end

```

Εικόνα 24: Περιγραφή της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων

Η τοπολογία της γειτονιάς ενός σωματιδίου επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό την απόδοση του αλγόριθμου [18],[19]. Μια πρώτη προσέγγιση είναι η γειτονιά να αποτελείται από ολόκληρο το σμήνος. Με αυτόν τον τρόπο η διάδοση της πληροφορίας για την καλύτερη λύση γίνεται γρήγορα και είναι πιθανό το σμήνος να εγκλωβιστεί σε τοπικά ελάχιστα. Για αυτό το λόγο η γειτονιά συνήθως ορίζεται ως ένα μικρό σύνολο άλλων σωματιδίων. Με την χρησιμοποίηση των τοπολογιών επιβραδύνεται ο ρυθμός σύγκλισης επειδή η τρέχουσα καλύτερη λύση πρέπει να διαδοθεί μέσα από πολλές γειτονιές μέχρι να επηρεαστεί ολόκληρο το σμήνος. Αυτή η αργή διάδοση επιτρέπει στα σωματίδια να ερευνήσουν

περισσότερες περιοχές και έτσι μειώνεται η πιθανότητα εγκλωβισμού σε τοπικά ελάχιστα. Παραδείγματα υλοποίησης φαίνονται στο επόμενο σχήμα, όπου η πιο διαδεδομένη εκδοχή είναι η κυκλική γειτονιά.



Εικόνα 25: Τοπολογίες γειτονιάς για βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων είναι ότι απαιτεί την ρύθμιση ελάχιστων παραμέτρων. Επιπλέον, έχουν προταθεί διάφοροι τρόποι που να βελτιώνουν την συμπεριφορά σύγκλισης του αλγορίθμου. Στη συνέχεια γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση από τις κυριότερες τεχνικές βελτίωσης.

1. Συντελεστής αδράνειας (*inertia weight*)

Σε αυτή την εκδοχή, όσο προχωράνε οι επαναλήψεις τα σωματίδια γίνονται πιο αδρανή και το μέτρο μεταβολής της ταχύτητάς τους μειώνεται [20]. Αυτός ο μηχανισμός εξασφαλίζει ότι ο αλγόριθμος σταδιακά θα ερευνήσει καλύτερα τις περιοχές όπου βρέθηκαν καλές λύσεις και σε πολλές περιπτώσεις δίνει καλύτερα αποτελέσματα από την απλή εκδοχή του αλγορίθμου. Ο συντελεστής αδράνειας a συνυπολογίζεται σε κάθε επανάληψη k σύμφωνα με τις παρακάτω εξισώσεις:

$$v'_i = a(k) \cdot v_i + c_1 \rho_1 (p_i^l - x_i) + c_2 \rho_2 (p_i^g - x_i) \quad (20)$$

$$a(k) = w_1 + \frac{k}{M} (w_2 - w_1) \quad (21)$$

όπου M είναι ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός επαναλήψεων και w_1, w_2 είναι καθορισμένες σταθερές, με συνηθισμένες τιμές $[w_1, w_2] = [0.9, 0.4]$.

2. Περιορισμός της εξίσωσης ταχύτητας (*constriction coefficient*)

Εδώ, ο μηχανισμός σταδιακής σύγκλισης υλοποιείται με ένα κατάλληλο συντελεστή περιορισμού $\chi(k, \varphi)$ της εξίσωσης ανανέωσης της ταχύτητας [21], όπως φαίνεται στις σχέσεις που ακολουθούν:

$$v'_i = \chi(k, \varphi) [v_i + c_1 \rho_1 (p_i^l - x_i) + c_2 \rho_2 (p_i^g - x_i)] \quad (22)$$

$$\chi(\kappa, \varphi) = \begin{cases} \frac{2\kappa}{|2 - \varphi - \sqrt{\varphi^2 - 4\varphi}|}, & \varphi > 4 \\ \kappa, & \text{διαφορετικά} \end{cases} \quad (23)$$

όπου οι παράμετροι $\varphi = c_1 + c_2$ και $\kappa \in (0,1]$ ελέγχουν την ταχύτητα σύγκλισης του σμήνους. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που $\kappa = 1$, η επιφάνεια καταλληλότητας ερευνάται εξαντλητικά, το οποίο έχει ως αποτέλεσμα την πιο αργή σύγκλιση του αλγορίθμου.

3. Συντελεστής λόγου καταλληλότητας προς απόσταση (*fitness distance ratio*)

Μια εναλλακτική προσέγγιση περιέχει ένα επιπλέον όρο για τον υπολογισμό της ταχύτητας του σμήνους, ο οποίος υπολογίζεται με βάση τον λόγο καταλληλότητας προς απόσταση [22]. Συγκεκριμένα η εξίσωση της ταχύτητας γίνεται:

$$v'_i = v_i + c_1 \rho_1 (p_i^l - x_i) + c_2 \rho_2 (p_i^g - x_i) + c_3 \rho_3 (p_i^{fdr} - x_i) \quad (24)$$

όπου p_i^{fdr} είναι ένα τρίτο διάνυσμα που δρα ως ελκτική δύναμη για τα σωματίδια και c_3 είναι ο συντελεστής βαρύτητάς του. Οι τιμές $c_1, c_2 = 1$ και $c_3 = 2$ έχει βρεθεί ότι οδηγούν σε βέλτιστα αποτελέσματα για διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης. Κάθε στοιχείο d του διανύσματος p_i^{fdr} υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$p_i^{fdr}(d) = \max_{j, j \neq i} \frac{f(p_j^l) - f(x_i)}{|p_j^l(d) - x_i(d)|} \quad (25)$$

Με τον συντελεστή λόγου καταλληλότητας προς απόσταση, τα σωματίδια έλκονται από κοντινά σωματίδια που έχουν επισκεφθεί καλύτερες λύσεις. Σημειώνεται ότι η έννοια της απόστασης που χρησιμοποιείται εδώ δεν σχετίζεται με την έννοια της γειτονιάς που ορίστηκε προηγουμένως.

Ο αλγόριθμος της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο για την επίλυση δύσκολων προβλημάτων. Μαζί με τους γενετικούς αλγόριθμους, έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία σε περιπτώσεις όπου οι υπόλοιποι αλγόριθμοι δεν κατάφεραν να οδηγήσουν σε ικανοποιητικές λύσεις. Επίσης, η τεχνική της *PSO* μπορεί εύκολα να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση των *Pareto-βέλτιστων* λύσεων σε προβλήματα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων. Μια εκτενής ανάλυση πιθανών υλοποιήσεων μπορεί να βρεθεί στα [23],[24].

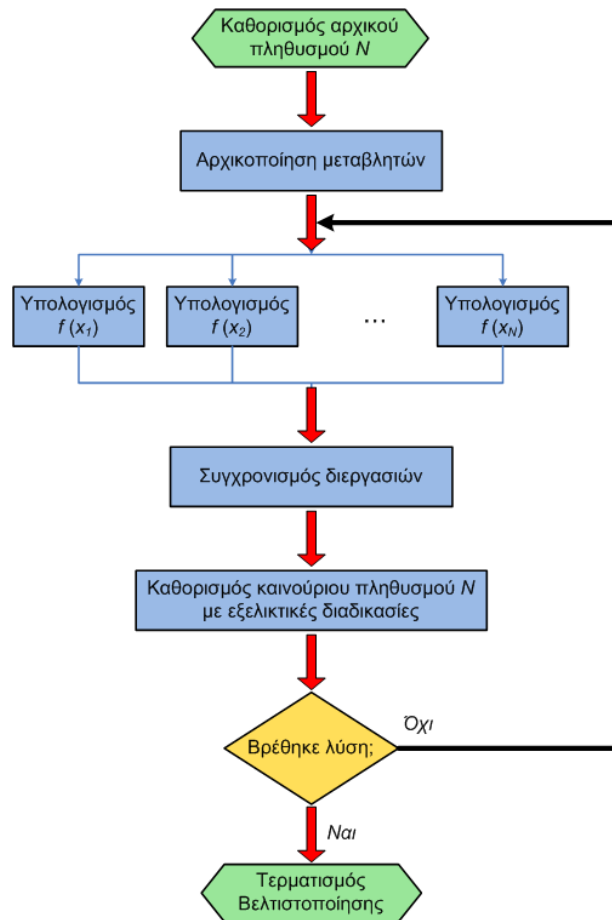
2.6 Τεχνικές κατανεμημένης επεξεργασίας

Η χρησιμοποίηση των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης έχει ως συνέπεια την αύξηση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου. Το γεγονός αυτό καθιστά ελκυστική την χρήση τεχνικών κατανεμημένης επεξεργασίας [25], όπου το βασικό πρόβλημα διασπάται σε επιμέρους προβλήματα που μπορούν να επιλυθούν σε διαφορετικούς υπολογιστές. Η τεχνική της κατανεμημένης επεξεργασίας συναντάται συχνά στο σχεδιασμό δικτύων, όπου λαμβάνουν μέρος *Monte Carlo* προσομοιώσεις. Συγκεκριμένα, εκτελείται ένας μεγάλος αριθμός ανεξάρτητων προσομοιώσεων με σκοπό τον περιορισμό της επίδρασης που μπορεί να έχει η στοχαστική φύση ορισμένων διαδικασιών. Έτσι, για την μείωση του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου εκτελούνται παράλληλα οι ανεξάρτητες εργασίες [26],[27].

Ένα πολύ καλό πεδίο εφαρμογής των τεχνικών κατανεμημένης επεξεργασίας αποτελούν οι εξελικτικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, καθώς μπορούν εύκολα να τροποποιηθούν έτσι ώστε να εφαρμοστεί η κατανεμημένη εκτέλεση [28],[29]. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει σημαντική αύξηση της υπολογιστικής ταχύτητας και ευελιξία στην χρήση επιπρόσθετων υπολογιστικών πόρων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, σε κάθε επανάληψη ενός εξελικτικού αλγορίθμου υπολογίζεται η τιμή της συνάρτησης f σε ολόκληρο τον πληθυσμό (γενιά ή σμήνος). Έπειτα, ακολουθούν οι υπόλοιπες διαδικασίες του αλγορίθμου και αυτό συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθούν τα κριτήρια τερματισμού. Συνεπώς, ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης, ο οποίος μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρος σε ορισμένα προβλήματα, γίνεται ανεξάρτητα για κάθε μέλος του πληθυσμού. Το γεγονός αυτό καθιστά τους εξελικτικούς αλγόριθμους κατάλληλους για κατανεμημένη εκτέλεση.

Ένα απαραίτητο βήμα στην κατανεμημένη επεξεργασία είναι η επικοινωνία ανάμεσα στους υπολογιστές για τον συνδυασμό των αποτελεσμάτων που παράγονται από τις επιμέρους διεργασίες και για την ενημέρωση των αντίστοιχων δεδομένων του προβλήματος. Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι το βήμα αυτό εμπεριέχει το συγχρονισμό ανάμεσα στις διάφορες διεργασίες. Οι εξελικτικές διαδικασίες που ακολουθούν στα επόμενα στάδια δεν γίνεται να πραγματοποιηθούν αν δεν έχει φθάσει η πληροφορία για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης σε ολόκληρο τον πληθυσμό. Συνεπώς χρειάζεται μεγάλη προσοχή στην υλοποίηση με τεχνικές κατανεμημένης επεξεργασίας, ώστε να εξασφαλιστεί ότι η επιβάρυνση που προκύπτει σε απαιτούμενο υπολογιστικό χρόνο δεν ξεπερνά το κέρδος που επιτυγχάνεται από την παράλληλη επεξεργασία. Στην περίπτωση που δεν ισχύει αυτό, η χρήση των συγκεκριμένων τεχνικών αντί να βοηθάει, τελικά επιβαρύνει την διαδικασία βελτιστοποίησης.

Στο σχήμα που ακολουθεί απεικονίζεται η διαδικασία της παράλληλης προσομοίωσης ενός εξελικτικού αλγορίθμου:



Εικόνα 26: Βασικό διάγραμμα ροής παράλληλης υλοποίησης εξελικτικού αλγόριθμου

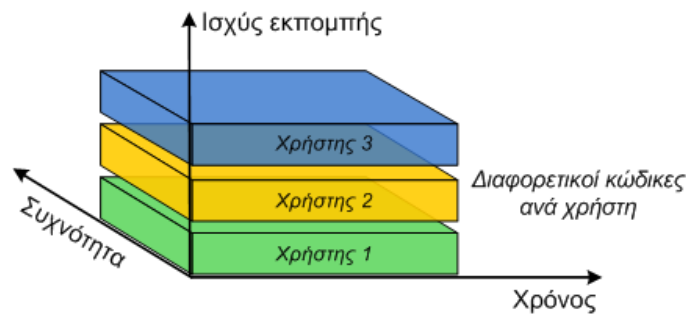
Οι τεχνικές κατανεμημένης επεξεργασίας προφανώς απαιτούν υπολογιστικούς πόρους για να εφαρμοσθούν. Συνήθως χρησιμοποιείται ένα πλήθος επεξεργαστών, όπου ένας κεντρικός αναλαμβάνει να επικοινωνεί με τους υπόλοιπους και να αναθέτει τις αναγκαίες εργασίες, δηλαδή τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης σε συγκεκριμένες θέσεις αναζήτησης. Έπειτα, ο κεντρικός επεξεργαστής συγκεντρώνει τα αποτελέσματα και η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται όσο διαρκεί η εξέλιξη της βελτιστοποίησης. Ένα κατάλληλο περιβάλλον για την εφαρμογή τεχνικών κατανεμημένης επεξεργασίας παρέχεται από την υποδομή του προγράμματος *EGEE (Enabling Grids for E-Science)* [30]. Οι υπολογιστικοί πόροι του παραπάνω προγράμματος προσφέρονται μέσω της τεχνολογίας του πλέγματος (*grid*) και αποτελούν μια υποδομή διαθέσιμη κάθε στιγμή. Η διευκόλυνση που παρέχεται είναι πολύ σημαντική, καθώς δίνεται η δυνατότητα να μειωθεί σημαντικά ο υπολογιστικός χρόνος για τις απαραίτητες προσομοιώσεις και δοκιμές, μέχρι η σχεδίαση του δικτύου να είναι ικανοποιητική.

3 ΔΙΚΤΥΑ ΑΣΥΡΜΑΤΩΝ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ 3^{ης} ΓΕΝΙΑΣ

3.1 Εισαγωγή στα δίκτυα 3^{ης} γενιάς

Τα τελευταία χρόνια, οι εξελίξεις στις ασύρματες τηλεπικοινωνίες προχωρούν με πολύ γρήγορο ρυθμό. Οι εφαρμογές ευρείας ζώνης στην ψηφιακή τεχνολογία έχουν φέρει δραστικές αλλαγές στα υπάρχοντα δίκτυα και στις προσφερόμενες υπηρεσίες. Επίσης, η ανάγκη για ένα κοινό διεθνές σύστημα κινητής τηλεφωνίας, όπως και η δυνατότητα ασύρματης πρόσβασης στο διαδίκτυο μέσω των κινητών τερματικών, αποτελούν στις μέρες μας μερικές από τις αδιαπραγμάτευτες απαιτήσεις του αγοραστικού κοινού. Όλα αυτά έχουν οδηγήσει στα συστήματα 3^{ης} γενιάς (*3rd generation, 3G*), που συνήθως αναφέρονται ως *UMTS (universal mobile telecommunication system)*.

Τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς χρησιμοποιούν ως τεχνική πολλαπλής πρόσβασης το σύστημα *WCDMA (wideband code division multiple access)*. Σε αντίθεση με τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς (*2G*), όπως το γνωστό *GSM (global system for mobile communications)*, σύμφωνα με το *WCDMA* όλοι οι χρήστες του δικτύου χρησιμοποιούν το ίδιο διαθέσιμο φάσμα και μπορούν να μεταδίδουν την ίδια χρονική στιγμή. Η τεχνική πολυπλεξίας σε αυτή την περίπτωση βασίζεται σε μια τρίτη διάσταση, όπου κάθε χρήστης χρησιμοποιεί διαφορετική κωδικοποίηση. Ένα απλό παράδειγμα με τρεις χρήστες φαίνεται στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 27: Τεχνική πολλαπλής πρόσβασης *WCDMA*

Σύμφωνα με την παραπάνω βασική αρχή για την πολλαπλή πρόσβαση, ακολουθεί η συνοπτική περιγραφή των σημαντικότερων χαρακτηριστικών ενός συστήματος *WCDMA* για τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς:

- *Εξάπλωση επιθυμητού σήματος*

Σε ένα σύστημα *WCDMA* το μεταδιδόμενο σήμα πληροφορίας στενής ζώνης κάθε χρήστη του δικτύου πολλαπλασιάζεται με ένα καθορισμένο σήμα μεγαλύτερου εύρους και ως συνέπεια εξαπλώνεται φασματικά. Το σήμα μεγαλύτερου εύρους είναι μια ψευδοτυχαία ακολουθία ψηφίων, η οποία είναι διαφορετική για κάθε

χρήστη και ονομάζεται κώδικας εξάπλωσης. Έπειτα, το επιθυμητό σήμα προκύπτει με τον εκ νέου πολλαπλασιασμό του λαμβανόμενου σήματος με τον ίδιο κώδικα εξάπλωσης, όπου πλέον όλες οι παρεμβολές (δηλαδή τα σήματα με διαφορετικό κώδικα) παραμένουν εξαπλωμένες φασματικά και προφανώς σε πολύ μικρότερο επίπεδο ισχύος. Προκειμένου να υποστηριχθούν διαφορετικού ρυθμοί μετάδοσης, χρησιμοποιούνται αντίστοιχα οι κατάλληλοι κώδικες εξάπλωσης. Ο ρυθμός της τυχαίας ακολουθίας είναι 3.84Mc/s (chips per second), το οποίο πρακτικά καθορίζει ότι το εύρος ζώνης του δικτύου είναι 5MHz.

- *Διαχωρισμός άνω και κάτω ζεύξης*

Εδώ υποστηρίζονται δύο βασικοί τρόποι λειτουργίας. Σύμφωνα με τον διαχωρισμό συχνότητας *FDD (frequency division duplex)* χρησιμοποιούνται ξεχωριστά φέροντα εύρους 5MHz για τη άνω (*uplink, UL*) και την κάτω (*downlink, DL*) ζεύξη. Στην άνω ζεύξη το φέρον ανήκει στο εύρος 1920-1980MHz, ενώ στην κάτω ζεύξη στο εύρος 2110-2170MHz. Αντίθετα, στον χρονικό διαχωρισμό *TDD (time division duplex)* οι δύο ζεύξεις έχουν στην διάθεσή τους το ίδιο φέρον που ανήκει στο εύρος (1900-1920, 2020-2025 MHz) και το οποίο όμως χρησιμοποιούν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές.

- *Υποστήριξη προηγμένων τεχνολογιών*

Το *WCDMA* επιτρέπει την χρήση προηγμένων τεχνολογιών στο σταθμό βάσης, όπως για παράδειγμα την τεχνική των έξυπνων κεραιών και την εύρεση της θέσης ενός χρήστη. Το γεγονός αυτό δίνει μεγάλη ευελιξία κατά το σχεδιασμό του δικτύου, σε αντίθεση με ότι συνέβαινε στα δίκτυα της 2^{ης} γενιάς. Επίσης υποστηρίζεται σε μεγάλο βαθμό η συνεργασία με το υπάρχον δίκτυο *GSM*, προσφέροντας την δυνατότητα διαπομπής ενός χρήστη από το ένα δίκτυο στο άλλο (*intersystem handover*), χωρίς να διακόπτεται η κλήση του.

Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι βασικές παράμετροι της τεχνικής *WCDMA* για τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς.

Τεχνική πολλαπλής πρόσβασης	<i>DS-CDMA (direct sequence CDMA)</i>
Ρυθμός ψευδοτυχαίας ακολουθίας	3.84 Mc/s
Εύρος ζώνης	5 MHz
Διαχωρισμός άνω-κάτω ζεύξης	<i>FDD</i> 1920-1980MHz UL, 2110-2170MHz DL <i>TDD</i> 1900-1920, 2020-2025MHz UL και DL
Διάρκεια <i>frame</i>	10 ms, με 15 <i>time slots</i>
Συχνότητα ελέγχου ισχύος	1.5 kHz
Προσφερόμενος ρυθμός	Μέχρι 2 Mbps
Είδη διαπομπής	Ήπια (<i>soft</i>) και ηπιότερη (<i>softer</i>) εντός 3G Σκληρή ανάμεσα σε 3G και GSM
Προηγμένες τεχνολογίες	Υποστηρίζονται διάφορες τεχνικές, όπως οι έξυπνες κεραίες και η εύρεση της θέσης του χρήστη

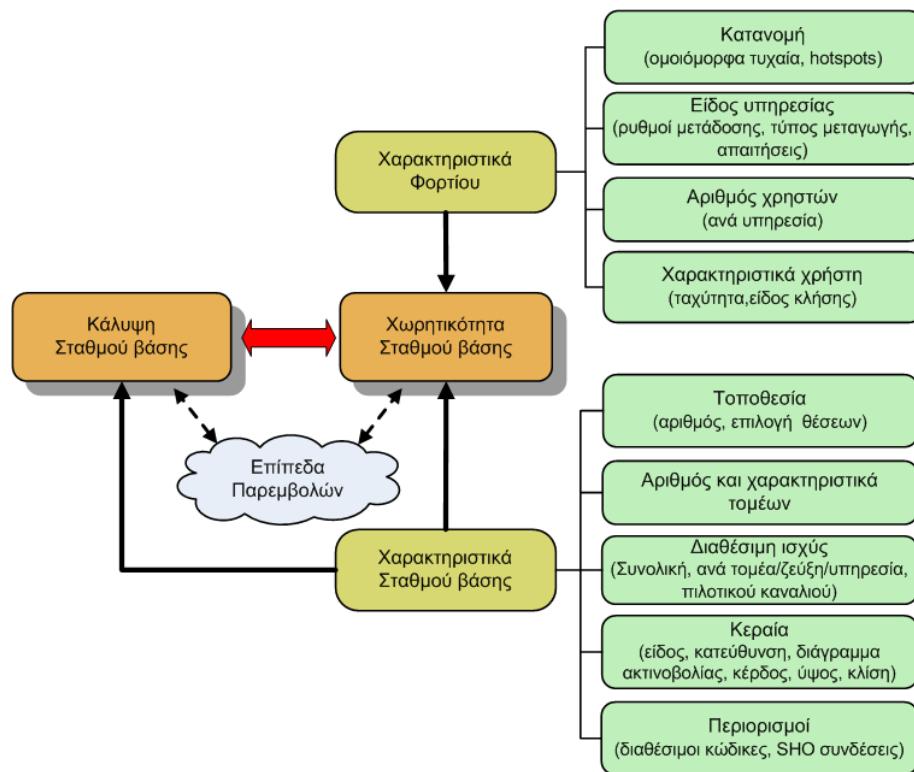
Πίνακας 1: Βασικές παράμετροι WCDMA

3.2 Πολυπλοκότητα σχεδίασης

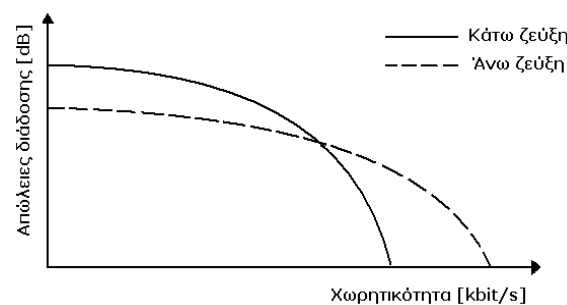
Η σχεδίαση ασύρματων δικτύων έχει να αντιμετωπίσει ένα σημαντικό αριθμό από νέες προκλήσεις, καθώς γίνεται η μετάβαση από τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς προς τα αντίστοιχα της 3^{ης} γενιάς. Με την σημερινή οικονομική κατάσταση στον τομέα των τηλεπικοινωνιών υπάρχει πολύ μικρό περιθώριο για λάθη. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικότεροι λόγοι για τους οποίους ο σχεδιασμός των δικτύων 3^{ης} γενιάς είναι σημαντικά πιο πολύπλοκος και απαιτητικός από ότι συνέβαινε στο παρελθόν [31]-[33]:

- *Συσχέτιση χωρητικότητας και κάλυψης*

Η σημαντικότερη διαφοροποίηση από τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς είναι σαφέστατα ο συσχετισμός που υπάρχει ανάμεσα στην χωρητικότητα (*capacity*) και την κάλυψη (*coverage*) κάθε υπηρεσίας. Με άλλα λόγια, εδώ το πρόβλημα του σχεδιασμού είναι σύνθετο και δεν μπορεί να διασπαστεί σε δύο ανεξάρτητες διαδικασίες για την ικανοποίηση της επιθυμητής χωρητικότητας και κάλυψης, όπως συνέβαινε για παράδειγμα στο GSM. Στο επόμενο δύο σχήματα φαίνεται χαρακτηριστικά η εξάρτηση ανάμεσα στα δύο πολύ σημαντικά κριτήρια επίδοσης του δικτύου.



Εικόνα 28: Συσχέτιση χωρητικότητας και κάλυψης



Εικόνα 29: Γραφική παράσταση χωρητικότητας και κάλυψης

Από τα παραπάνω σχήματα διαπιστώνεται ότι τα κριτήρια της χωρητικότητας και κάλυψης είναι αντικρουόμενα. Το γεγονός αυτό αποτελεί άλλωστε έναν από τους κύριους λόγους που η σχεδίαση ενός δικτύου 3^{ης} γενιάς εκφράζεται ως πρόβλημα βελτιστοποίησης με πολλαπλά και αντικρουόμενα κριτήρια.

■ Προσφερόμενες υπηρεσίες

Η πρόσβαση στα δίκτυα 3^{ης} γενιάς είναι αρκετά σύνθετη, καθώς στόχος είναι η ευελιξία ως προς την προσφερόμενη υπηρεσία, επιτρέποντας χαμηλούς, υψηλούς, σταθερούς και μεταβαλλόμενους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων. Ο σχεδιασμός του δικτύου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από αυτές τις υπηρεσίες, που προφανώς έχουν και διαφορετικές απαιτήσεις ποιότητας (*quality of service, QoS*). Ως συνέπεια

δημιουργούνται διαφορετικές απαιτήσεις για κάθε υπηρεσία, αυξάνοντας έτσι την πολυπλοκότητα του σχεδιασμού.

- *Εκτίμηση μελλοντικού φορτίου*

Μέχρι και σήμερα υπάρχει μεγάλη αβεβαιότητα όσον αφορά την επιτυχία κάθε υπηρεσίας στο αγοραστικό κοινό, όπως συμβαίνει άλλωστε με κάθε νέα τεχνολογία και υπηρεσία. Το γεγονός αυτό, σε συνδυασμό με την εξάρτηση του σχεδιασμού από τις προσφερόμενες υπηρεσίες, καθώς και τη συσχέτιση χωρητικότητας και κάλυψης, κάνει τα πράγματα ακόμα πιο δύσκολα. Το τελικό αποτέλεσμα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την εκτίμηση που θα γίνει.

- *Συνύπαρξη δικτύων 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς*

Το θέμα της συνύπαρξης των δικτύων 2^{ης} και 3^{ης} γενιάς δημιουργεί ορισμένα δύσκολα ζητήματα, αναφορικά με τον τρόπο χρήσης τους από έναν πάροχο. Όπως είναι κατανοητό, η χρήση υπαρχόντων σταθμών βάσης 2^{ης} γενιάς για την λειτουργία του δικτύου της 3^{ης} γενιάς είναι εξαιρετικά επιθυμητή, μιας και με αυτόν τον τρόπο τα έξοδα περιορίζονται σημαντικά. Παρόλα αυτά υπάρχουν σοβαρές διαφορές ανάμεσα στα δύο δίκτυα που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη. Μια εναλλακτική επιλογή είναι οι υποδομές από τα δίκτυα 2^{ης} γενιάς να χρησιμοποιούνται κυρίως για θέματα κάλυψης και για την εξυπηρέτηση χαμηλών ρυθμών μετάδοσης, ενώ οι καινούριες υπηρεσίες να προσφέρονται από τα δίκτυα της 3^{ης} γενιάς. Σε κάθε περίπτωση, το ζήτημα της εξισορρόπησης της κίνησης ανάμεσα στα δύο δίκτυα είναι αρκετά πολύπλοκο.

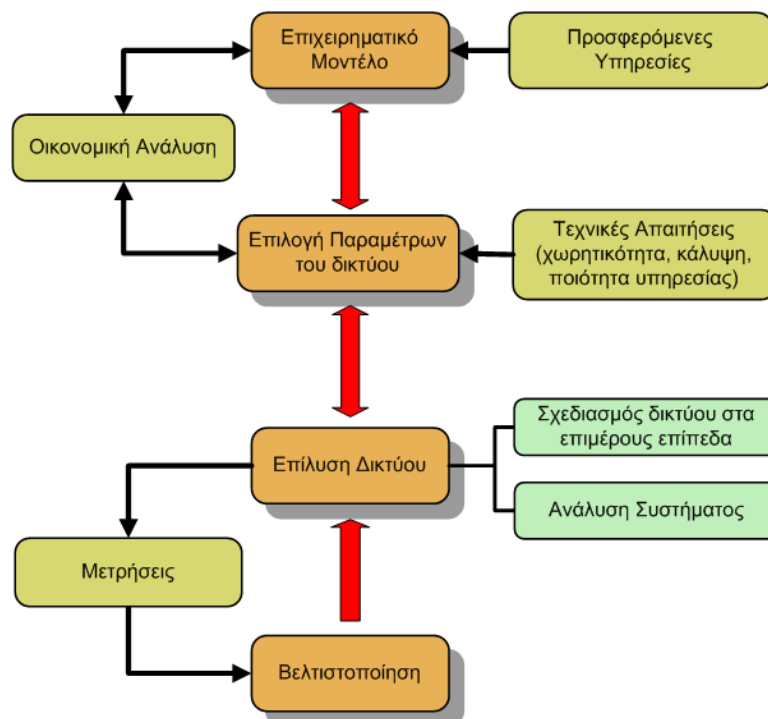
- *Υποστηριζόμενες λειτουργίες*

Σε ένα δίκτυο 3^{ης} γενιάς χρησιμοποιούνται διαφορετικά επίπεδα κάλυψης από τους σταθμούς βάσης, ανάλογα με το μέγεθος της περιοχής κάλυψης που απευθύνονται (*macro-micro-pico*), καθένα από τα οποία έχει τα δικά του ιδιαίτερα χαρακτηριστικά και απαιτήσεις. Επιπλέον, στο αρχικό τους τουλάχιστον στάδιο, τα δίκτυα πρέπει να υποστηρίζουν τις δύο πιθανές λειτουργίες σύνδεσης, την μεταγωγή κυκλώματος (*circuit switched*) και την μεταγωγή πακέτων (*packet switched*). Ως αποτέλεσμα, η ταυτόχρονη λειτουργία των παραπάνω διαδικασιών περιπλέκει υπερβολικά τον υπολογισμό των παρεμβολών, των διαπομπών ανάμεσα στους σταθμούς και κατά επέκταση το σχεδιασμό του δικτύου.

- **Επιχειρηματικά σχέδια**

Πολλοί πάροχοι υπηρεσιών σκέφτονται πολύ σοβαρά, προφανώς για οικονομικούς λόγους, το ενδεχόμενο να χρησιμοποιούν το ίδιο δίκτυο. Ως συνέπεια, ο σχεδιασμός του δικτύου πρέπει να λαμβάνει υπόψη τις διαφορετικές ανάγκες και απαιτήσεις που μπορεί να προκύψουν. Ιδιαίτερα στην περίπτωση όπου τα επιχειρηματικά σχέδια και οι αντίστοιχοι οικονομικοί περιορισμοί αποκλίνουν πολύ, είναι εύκολα κατανοητό ότι η διαδικασία του σχεδιασμού αποκτά ένα ακόμα βαθμό δυσκολίας.

Όλα τα παραπάνω δείχνουν ότι ο σχεδιασμός των δικτύων 3^{ης} γενιάς χρειάζεται μια ολοκληρωμένη προσέγγιση. Τα επιμέρους τμήματα του σχεδιασμού πρέπει να περιέχουν οπωσδήποτε το επιχειρηματικό και οικονομικό μοντέλο, την τοπολογία του δικτύου (π.χ. αριθμός και θέση σταθμών βάσης), τις απαραίτητες προσομοιώσεις σε επίπεδο ζεύξης (*link level*) και συστήματος (*system level*), την ανάλυση της κάλυψης, της χωρητικότητας και των παρεμβολών, τον σχεδιασμό των συστημάτων εκπομπής και λήψης του σήματος, τις πραγματικές μετρήσεις της επίδοσης του δικτύου και φυσικά την αναγκαία διαδικασία βελτιστοποίησης. Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται τα στοιχεία μιας αντιπροσωπευτικής διαδικασίας σχεδιασμού:

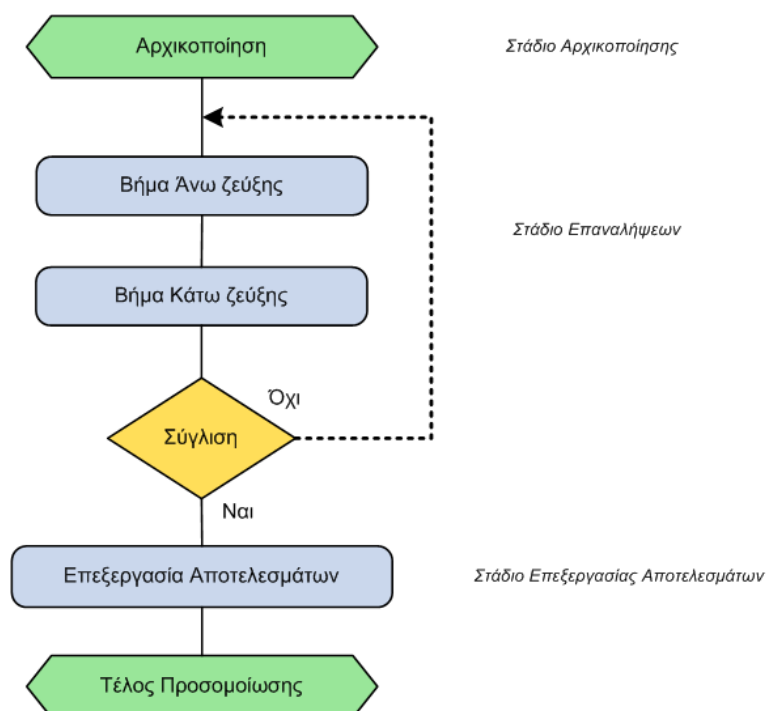


Εικόνα 30: Διαδικασία σχεδιασμού δικτύων 3^{ης} γενιάς

3.3 Επίλυση δικτύου

Για την μελέτη και την ανάλυση σχεδίασης δικτύων 3^{ης} γενιάς, είναι απαραίτητη η χρήση ενός μαθηματικού εργαλείου για την πραγματοποίηση των αντίστοιχων προσομοιώσεων, το οποίο πρέπει να προσεγγίζει με όσο το δυνατόν καλύτερη ακρίβεια το υπό εξέταση δίκτυο και να μην περιορίζεται σε μια απλοϊκή εκδοχή του. Για τον σκοπό αυτό, στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, αναπτύχθηκε ένα κατάλληλο εργαλείο για δίκτυα 3^{ης} γενιάς με βάση το [31], στο οποίο υπάρχει επιπλέον η δυνατότητα χρήσης έξυπνων κεραιών στους σταθμούς βάσης, όπως θα παρουσιαστεί σε επόμενο κεφάλαιο.

Η συγκεκριμένη πλατφόρμα βασίζεται στην τεχνική των *Monte Carlo* προσομοιώσεων, όπου τα αποτελέσματα για διαφορετικά χαρακτηριστικά φορτίου και καναλιού συνδυάζονται, ώστε τελικά να προκύψει μια στατιστικά αξιόπιστη εκτίμηση. Η επίλυση του δικτύου 3^{ης} γενιάς με κλειστό αναλυτικό τύπο μπορεί να επιτευχθεί μόνο για απλοϊκά μοντέλα και για αυτό το λόγο, το εργαλείο που αναπτύχθηκε βασίζεται σε επαναληπτικούς βρόχους για τον υπολογισμό διαφόρων μεγεθών και την τελική σύγκλιση σε μια εφικτή λύση. Η γενική δομή της διαδικασίας επίλυσης για ένα στιγμιότυπο από την *Monte Carlo* προσομοίωση παρουσιάζεται στο διάγραμμα ροής που ακολουθεί:



Εικόνα 31: Γενικό διάγραμμα ροής της διαδικασίας επίλυσης

Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της πλατφόρμας προσομοιώσεων που αξιοποιήθηκαν για την ακριβέστερη μοντελοποίηση του δικτύου.

- *Περιβάλλον και μοντέλο διάδοσης*

Για την προσομοίωση ενός αληθινού δικτύου, υπάρχει η δυνατότητα εισαγωγής ενός ψηφιακού χάρτη για τον καθορισμό της εξεταζόμενης περιοχής, καθώς και των αντίστοιχων απωλειών διάδοσης που έχουν προκύψει από ένα ντετερμινιστικό μοντέλο. Στην πιο απλή εκδοχή χρησιμοποιείται ένα στοχαστικό μοντέλο, όπως το *Cost 231*.

- *Χαρακτηριστικά σταθμού βάσης και χρήση*

Η επιλογή των χαρακτηριστικών γίνεται ξεχωριστά για καθένα από τους σταθμούς βάσης και τους χρήστες του δικτύου. Υποστηρίζονται όλες οι δυνατές υπηρεσίες και οι αντίστοιχοι ρυθμοί μετάδοσης και συνεπώς, δίνεται η δυνατότητα ανάλυσης της συμπεριφορά του δικτύου για υπηρεσίες φωνής, δεδομένων ή ακόμα και για μεικτά σενάρια που προσεγγίζουν καλύτερα την πραγματική κατάσταση. Τέλος, υπάρχουν διάφορες επιλογές ως προς τη χωρική κατανομή του φορτίου

- *Αλγόριθμοι διαχείρισης πόρων*

Υπάρχει η δυνατότητα επιλογής ανάμεσα σε διάφορους αλγόριθμους διαχείρισης πόρων (*Radio Resource Management, RRM*). Συγκεκριμένα εξετάζεται ο έλεγχος πρόσβασης (*admission control*), ο έλεγχος συμφόρησης (*congestion control*) και ο έλεγχος διαπομπών (*handover control*). Προφανώς, κάθε επιλογή οδηγεί σε διαφορετική συμπεριφορά του δικτύου.

- *Εξελιγμένες τεχνικές*

Τέλος, δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στον τρόπο υλοποίησης εξελιγμένων τεχνικών, όπως οι έξυπνες κεραίες και τα συστήματα *MIMO*. Άλλωστε οι συγκεκριμένες τεχνικές αποτελούν το μέλλον στις ασύρματες επικοινωνίες, καθώς μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την επίδοση του δικτύου.

Αφού πλέον έχουν καθορισθεί όλες οι επιθυμητές παράμετροι, ακολουθεί ο βασικός πυρήνας του εργαλείου σχεδίασης, που είναι τα επαναληπτικά βήματα της άνω και κάτω ζεύξης. Στις επόμενες παραγράφους θα γίνει μια αναλυτική περιγραφή των βασικών λειτουργιών που πραγματοποιούνται σε κάθε ζεύξη.

3.3.1 Άνω ζεύξη

Στόχος στην άνω ζεύξη είναι προφανώς ο υπολογισμός της εκπεμπόμενης ισχύος κάθε κινητού τερματικού. Η εκπεμπόμενη ισχύς εξαρτάται κυρίως από το επίπεδο παρεμβολών του σταθμού βάσης, την υπηρεσία και την ταχύτητα του χρήστη και βεβαίως από τις απώλειες διάδοσης του σήματος. Μετά τον υπολογισμό της ισχύος, τα επίπεδα παρεμβολής επαναπροσδιορίζονται και αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να επέλθει η επιθυμητή σύγκλιση των αντίστοιχων τιμών.

Η ευαισθησία ενός σταθμού βάσης P_R^{UL} , δηλαδή η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς που λαμβάνεται στον δέκτη του σταθμού για μια συγκεκριμένη υπηρεσία με ρυθμό μετάδοσης R_{UL} και απαίτηση $E_b N_o$, δίνεται από την σχέση:

$$P_R^{UL} = \frac{N}{v_{UL} \left(1 + \frac{W}{v_{UL} \cdot E_b N_o \cdot R_{UL}} \right) (1 - \eta)} \quad (26)$$

όπου N είναι η ισχύς θορύβου στον σταθμό βάσης, v_{UL} ο συντελεστής που δηλώνει το ποσοστό του χρόνου που είναι ενεργός ο χρήστης (*voice activity factor*) και W ο ρυθμός μετάδοσης της ψευδοτυχαίας ακολουθίας. Ο συντελεστής φορτίου η (*loading factor*) ενός σταθμού βάσης αποτελεί μια πολύ σημαντική παράμετρο και υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση:

$$\eta = \frac{I_{own}^{UL} + I_{other}^{UL} + I_x}{I_{own}^{UL} + I_{other}^{UL} + I_x^{UL} + N} \quad (27)$$

όπου I_{own}^{UL} είναι το σύνολο των παρεμβολών από χρήστες που είναι συνδεδεμένοι στον ίδιο σταθμό βάσης, I_{other}^{UL} το σύνολο των παρεμβολών από χρήστες που επικοινωνούν με διαφορετικούς σταθμούς βάσης και I_x^{UL} το σύνολο των πιθανών παρεμβολών από άλλα δίκτυα ή συστήματα. Η απαιτούμενη εκπεμπόμενη ισχύς P_{Tx}^{UL} ενός χρήστη προς τον σταθμό βάσης του, με αντίστοιχες απώλειες διάδοσης L^{UL} , υπολογίζεται μέσω της σχέσης:

$$P_{Tx}^{UL} = P_R^{UL} \cdot L^{UL} \quad (28)$$

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι ως καλύτερος σταθμός βάσης b (*best server*) για έναν χρήστη επιλέγεται αυτός που απαιτεί την μικρότερη εκπεμπόμενη ισχύ. Συνεπώς, για ένα χρήστη k που λαμβάνει ικανοποιητικά το πιλοτικό κανάλι από τους σταθμούς βάσης που ανήκουν στο σύνολο AS_k (*active set*) θα ισχύει:

$$b_k = \arg \min_m (P_{Tx_{km}}^{UL}), \text{ όπου } m \in AS_k \quad (29)$$

Μετά από το βήμα υπολογισμού της εκπεμπόμενης ισχύος P_{Tx}^{UL} κάθε χρήστη σύμφωνα με την εξίσωση (28), είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη επιπρόσθετες παράμετροι για τον υπολογισμό των παρεμβολών. Συγκεκριμένα, με βάση τους υπάρχοντες πίνακες της *ITU* για *link level* προσομοιώσεις, συνυπολογίζεται η επίδραση παραμέτρων όπως:

- το κέρδος διαπομπής G^{SHO} (*soft handover gain*)
- το περιθώριο ισχύος HR (*power control headroom*) για χρήστες με μικρή ταχύτητα
- ο συντελεστής PR (*average power rise*) λόγω της απότομης διακύμανσης της P_{Tx}^{UL}

Στη συνέχεια, η παρεμβολή I_{own}^{UL} υπολογίζεται σύμφωνα με την επόμενη σχέση, όπου πλέον έχουν προστεθεί οι δείκτες (k, m) για τους χρήστες και τους σταθμούς βάσης αντίστοιχα.

$$I_{own_m}^{UL} = \sum_{k: b_k=m} \frac{v_{UL_k} \cdot (P_{Tx_{km}}^{UL} / G_k^{SHO})}{L_{km}^{UL}} \quad (30)$$

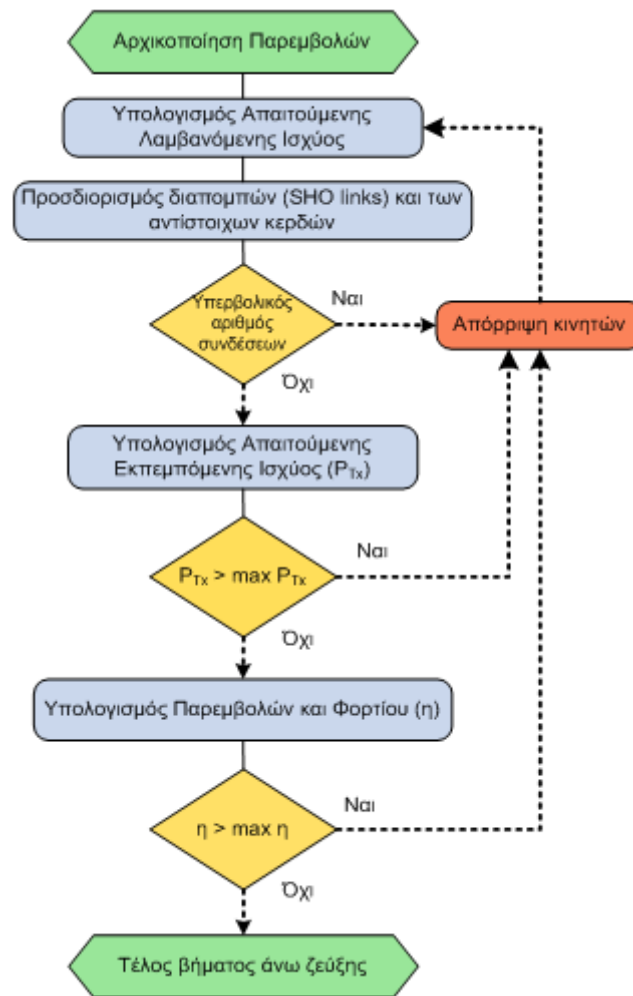
Το κέρδος διαπομπής G^{SHO} εξαρτάται από την ταχύτητα του χρήστη και την διαφορά ανάμεσα στα επίπεδα λαμβανόμενης ισχύος των *SHO* συνδέσεων του. Ακολουθώντας παρόμοια λογική, η παρεμβολή I_{other}^{UL} δίνεται από την σχέση:

$$I_{other_m}^{UL} = \sum_{k: b_k \neq m} \frac{v_{UL_k} \cdot (P_{Tx_k}^{UL} \cdot PR_k / G_k^{SHO:PR})}{L_{km}^{UL}} \quad (31)$$

όπου με τον όρο $G^{SHO:PR}$ εκφράζεται η μείωση του παράγοντα PR λόγω του κέρδους διαπομπής. Η παρεμβολή I_x^{UL} , τέλος, μπορεί να οφείλεται από χρήστες που χρησιμοποιούν διαφορετικό φέρον, λόγω της αδυναμίας αφενός του κινητού να εκπέμπει ακριβώς στο προκαθορισμένο εύρος ζώνης και αφετέρου του σταθμού βάσης να αποκόπτει ακριβώς όλες τις συχνότητες πέρα από το φάσμα που χρησιμοποιεί για τους χρήστες του. Για να καθορισθεί εάν η διαθέσιμη μέγιστη ισχύς P_{TxMax}^{UL} του χρήστη είναι αρκετή για να του επιτρέψει τη σύνδεση στο δίκτυο, εξετάζεται η ανισότητα:

$$P_{Tx_k}^{UL} \cdot (HR_k / G_k^{SHO:HR}) \leq P_{TxMax}^{UL} \quad (32)$$

όπου με τον όρο $G^{SHO:HR}$ συμβολίζεται η μείωση του περιθωρίου ισχύος HR λόγω του κέρδους διαπομπής. Στο σχήμα που ακολουθεί παριστάνεται το διάγραμμα ροής ενός επαναληπτικού βήματος για την άνω ζεύξη. Παρατηρείται ότι σε αρκετά από τα *blocks* του διαγράμματος είναι πιθανόν να απορριφθούν ορισμένοι χρήστες, λόγω υψηλού φορτίου του σταθμού βάσης, υπερβολικού αριθμού συνδέσεων (*hard blocking*) ή υψηλής εκπεμπόμενης ισχύος.



Εικόνα 32: Διάγραμμα ροής για επαναληπτικό βήμα άνω ζεύξης

3.3.2 Κάτω ζεύξη

Στόχος στην κάτω ζεύξη είναι ο προσδιορισμός της εκπεμπόμενης ισχύος του σταθμού βάσης προς κάθε κινητό τερματικό. Ο υπολογισμός αυτός απαιτεί επαναληπτικά βήματα, αφού ο $SINR$ λόγος σε κάθε χρήστη εξαρτάται από την ισχύ που εκπέμπεται προς τους υπόλοιπους. Για την προσομοίωση του φαινομένου της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών χρησιμοποιείται ο παράγοντας της ορθογωνιότητας. Μετά τον υπολογισμό της ισχύος, οι $SINR$ λόγοι επαναπροσδιορίζονται και αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου να επέλθει η επιθυμητή σύγκλιση. Σημειώνεται ότι η επιθυμητή λαμβανόμενη ισχύς προέρχεται από όλες τις SHO συνδέσεις που ικανοποιούν ένα προκαθορισμένο κριτήριο για τις διαπομπές (SHO window).

Ο απαιτούμενος $SINR^{tar}$ λόγος κάθε χρήστη για μια συγκεκριμένη υπηρεσία με ρυθμό μετάδοσης R_{DL} και απαίτηση $E_b N_o$ δίνεται από την σχέση:

$$SINR^{tar} = E_b N_o \cdot \frac{R_{DL}}{W} \quad (33)$$

Σε κάθε επαναληπτικό βήμα η τιμή του $SINR$ λόγου που επιτυγχάνεται για κάθε χρήστη k εξαρτάται άμεσα από την ισχύ εκπομπής P_{Tx}^{DL} και τις απώλειες διάδοσης L^{DL} και υπολογίζεται με τη βοήθεια της σχέσης:

$$SINR_k = \sum_{m \in AS_k} \left(\frac{P_{Tx_{km}}^{DL}}{L_{km}^{DL}} \cdot \frac{1}{I_{own_{km}}^{DL} + I_{other_{km}}^{DL} + I_{x_{km}}^{DL} + n_k} \right) \quad (34)$$

όπου I_{own}^{DL} είναι η παρεμβολή από τον σταθμό βάσης που είναι συνδεδεμένος ο χρήστης λόγω του φαινομένου των πολλαπλών διαδρομών, I_{other}^{DL} οι παρεμβολές από άλλους σταθμούς βάσης, I_x^{DL} το σύνολο των πιθανών παρεμβολών από σταθμούς βάσης που λειτουργούν σε άλλες συχνότητες και n είναι η ισχύς θορύβου στον χρήστη. Το άθροισμα της παραπάνω σχέσης γίνεται για να ληφθούν υπόψη όλες οι SHO συνδέσεις. Για τον υπολογισμό της παρεμβολής I_{own}^{DL} από ένα σταθμό με συνολική εκπεμπόμενη ισχύ $P_{TxTotal}^{DL}$ χρησιμοποιείται ο συντελεστής ορθογωνιότητας a , όπως φαίνεται στην ακόλουθη σχέση:

$$I_{own_{km}}^{DL} = (1 - a_m) \cdot \frac{P_{TxTotal\ m}^{DL}}{L_{km}^{DL}} \quad (35)$$

Με αυτόν τον τρόπο όλες οι συνδέσεις του σταθμού βάσης, και μόνο αυτές, θεωρούνται ορθογώνιες και ο συντελεστής a χρησιμοποιείται για να προσθέσει την επίδραση που έχει το φαινόμενο της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών. Οι τιμές του συντελεστή προκύπτουν από τους πίνακες της *ITU* ως συνάρτηση του ρυθμού μετάδοσης. Η παρεμβολή I_{other}^{DL} υπολογίζεται με την ακόλουθη σχέση, όπου πλέον δεν υφίσταται ο συντελεστής a :

$$I_{other_{km}}^{DL} = \sum_{m \notin AS_k} \frac{P_{TxTotal\ m}^{DL}}{L_{km}^{DL}} \quad (36)$$

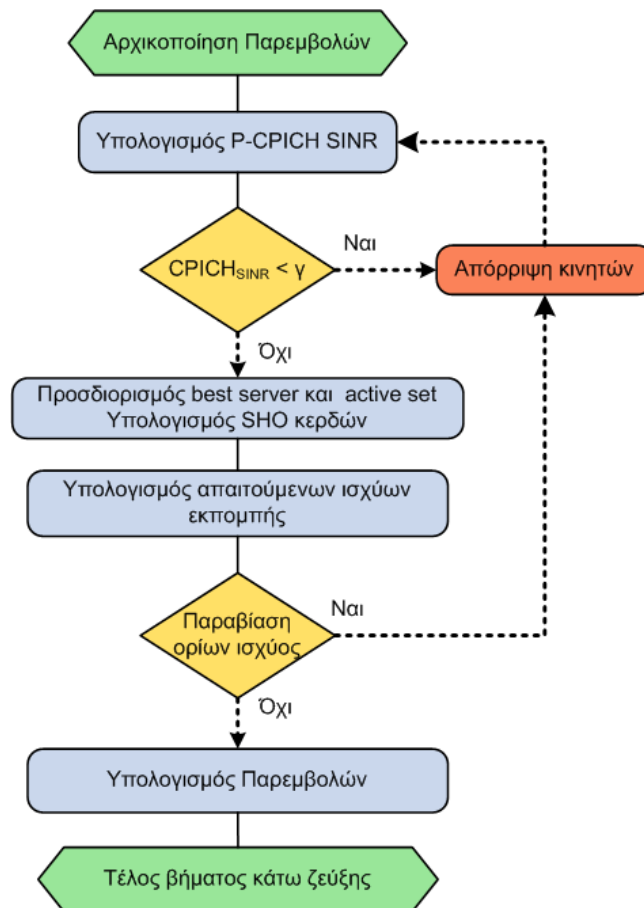
Η παρεμβολή I_x^{DL} , τέλος, μπορεί να λαμβάνεται από σταθμούς βάσης που χρησιμοποιούν διαφορετικό φέρον, λόγω της αδυναμίας αφενός του σταθμού να εκπέμπει ακριβώς στο προκαθορισμένο εύρος ζώνης και αφετέρου του χρήστη να αποκόπτει ακριβώς όλες τις συχνότητες πέρα από το φάσμα που χρησιμοποιεί. Από την στιγμή που έχει εκτιμηθεί ο $SINR$ λόγος κάθε χρήστη, μπορεί να υπολογισθεί η απαιτούμενη ισχύς P_{Tx}^{DL} κάθε ζεύξης. Η τιμή της εξαρτάται από την απόκλιση ανάμεσα στις παραμέτρους των εξισώσεων (33),(34), καθώς και από το κέρδος διαπομπής G^{SHO} της κάτω ζεύξης. Η ανανεωμένη τιμή $(P_{Tx}^{DL})'$ μετά από κάθε επαναληπτικό βήμα ισούται με:

$$(P_{Tx_{km}}^{DL})' = \frac{P_{Tx_{km}}^{DL}}{G_k^{SHO}} \cdot \frac{SINR^{tar}}{SINR_k} \quad (37)$$

Στην κάτω ζεύξη, εκτός από το κανάλι για τη μετάδοση των δεδομένων, κάθε σταθμός βάσης έχει το πιλοτικό κανάλι *P-CPICH* (*Primary Common Pilot Channel*). Για να καθοριστεί αν ένας χρήστης μπορεί να συνδεθεί σε ένα σταθμό που έχει ισχύ πιλοτικού καναλιού P^{CPICH} , γίνεται η σύγκριση με την ελάχιστη απαιτούμενη τιμή γ για τον αντίστοιχο *SINR*:

$$\frac{P_m^{CPICH}}{L_{km}^{DL}} \cdot \frac{1}{I_{own_{km}}^{DL} + I_{oth_{km}}^{DL} + I_{x_{km}}^{DL} + n_k} \geq \gamma \quad (38)$$

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής ενός επαναληπτικού βήματος για την κάτω ζεύξη. Παρατηρείται ότι ένας χρήστης μπορεί να απορριφθεί από το δίκτυο λόγω της υπέρβασης της μέγιστης συνολικής εκπεμπόμενης ισχύος ενός σταθμού ή της μέγιστης εκπεμπόμενης ισχύος μιας ζεύξης ή λόγω της μη επίτευξης του απαιτούμενου *SINR* για το *P-CPICH* κανάλι.



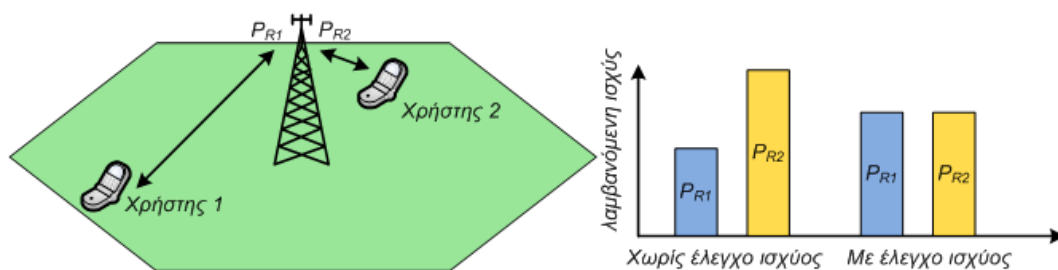
Εικόνα 33: Διάγραμμα ροής για το επαναληπτικό βήμα της κάτω ζεύξης

3.4 Διαχείριση των Πόρων του Συστήματος

Σε αυτή την ενότητα περιγράφονται οι βασικές λειτουργίες για τη διαχείριση των πόρων του συστήματος (*Radio Resource Management, RRM*). Οι συγκεκριμένες λειτουργίες είναι πολύ σημαντικές για τον σχεδιασμό του δικτύου, καθώς από αυτές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η επίτευξη της επιθυμητής κάλυψης, χωρητικότητας και ποιότητας υπηρεσίας και η αποδοτική χρήση του φάσματος. Ακολουθεί η συνοπτική περιγραφή των σημαντικότερων διαδικασιών, όπως είναι ο έλεγχος ισχύος (*power control*), διαπομπών (*handover control*), πρόσβασης (*admission control*) και συμφόρησης (*congestion control*) [31],[34].

3.4.1 Έλεγχος ισχύος

Για τη σωστή λειτουργία ενός δικτύου 3^{ης} γενιάς είναι απαραίτητος ο έλεγχος ισχύος στους χρήστες. Χωρίς τον έλεγχο ισχύος, αν ένα κινητό τερματικό εκπέμπει περισσότερη ισχύ από την απαιτούμενη, μπορεί να δημιουργηθεί πρόβλημα σε ολόκληρη την περιοχή κάλυψης του σταθμού βάσης, αφού θα ανέβει το επίπεδο παρεμβολών. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα με δύο χρήστες, όπου ο ένας βρίσκεται κοντά στο σταθμό και ο άλλος μακρύτερα. Αρχικά η παρεμβολή από τον κοντινό χρήστη δυσχεραίνει πολύ την κατάσταση για τον άλλον (*near-far effect*), ωστόσο με τον έλεγχο ισχύος εξασφαλίζεται ότι η λαμβανόμενη ισχύς είναι η ίδια και για τους δύο.



Εικόνα 34: Έλεγχος ισχύος στο WCDMA

Με αυτόν τον τρόπο διασφαλίζεται ότι κάθε χρήστης μεταδίδει και λαμβάνει την πληροφορία που χρειάζεται, ενώ παράλληλα δημιουργεί την ελάχιστη δυνατή παρεμβολή στους υπόλοιπους χρήστες, γεγονός που είναι πολύ σημαντικό για την χωρητικότητα του δικτύου. Ο έλεγχος ισχύος πραγματοποιείται με την ανταλλαγή μηνυμάτων ανάμεσα στο σταθμό βάσης και το κινητό. Συγκεκριμένα, ο σταθμός πραγματοποιεί μετρήσεις του *SINR* με συχνότητα 1.5kHz για κάθε κινητό και στη συνέχεια συγκρίνει αυτές τις τιμές με ένα κατώφλι. Ανάλογα με το αποτέλεσμα της σύγκρισης, δίνει εντολές στο κινητό να αυξήσει ή να μειώσει την εκπεμπόμενη ισχύ του κατά 1dB συνήθως. Η μέθοδος αυτή αποτελεί τον δυναμικό έλεγχο ισχύος κλειστού βρόχου (*fast closed loop power control*) και έχει την δυνατότητα να αντιμετωπίζει το φαινόμενο των ταχέων διαλείψεων. Η επιλογή της

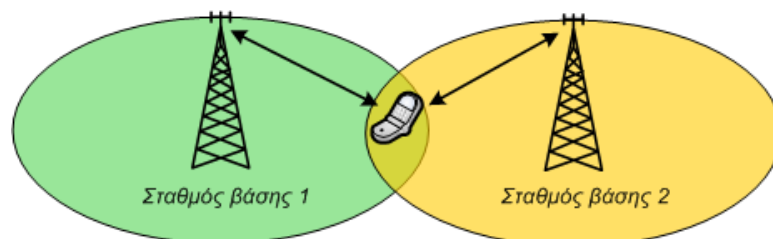
απαιτούμενης τιμής του $SINR$ για να διατηρείται ο ρυθμός των λαθών γίνεται με τον εξωτερικό έλεγχο ισχύος (*outer loop power control*). Τέλος, για τη ρύθμιση της αρχικής ισχύος κατά την εγκατάσταση μιας κλήσης και πριν ακόμα εφαρμοστεί ο έλεγχος κλειστού βρόχου, χρησιμοποιείται ο έλεγχος ισχύος ανοιχτού βρόχου (*open loop power control*), ο οποίος στηρίζεται στον $SINR$ του $P-CPICH$ καναλιού.

3.4.2 Έλεγχος διαπομπών

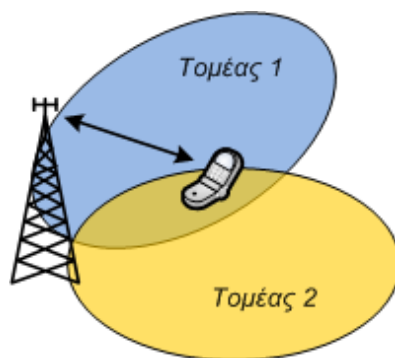
Η διαδικασία της διαπομπής είναι γενικά απαραίτητη σε ένα δίκτυο ασυρμάτων επικοινωνιών. Χάρης σε αυτήν αποφεύγεται η διακοπή της κλήσης καθώς ένας χρήστης διασχίζει το όριο της περιοχής κάλυψης δύο διαφορετικών σταθμών βάσης. Με άλλα λόγια, η διαπομπή υποδηλώνει τη διαδικασία αλλαγής διαύλου ώστε να διατηρηθεί σταθερή η ποιότητα υπηρεσίας. Όσον αφορά τα δίκτυα 3^{ης} γενιάς, έχουν σχεδιασθεί έτσι ώστε να υποστηρίζουν διάφορα είδη διαπομπών. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δύο βασικότερα επίπεδα διαχωρισμού τους:

- *Σκληρή, ήπια ή ηπιότερη*

Η διαπομπή κατά την οποία απελευθερώνεται ο δίαυλος πριν γίνει η καινούρια σύνδεση ονομάζεται σκληρή (*hard handover*). Αν αφορά υπηρεσίες φωνητικής κλήσης αυτό συνεπάγεται μια διακοπή μικρής χρονικής διάρκειας ή οποία συνήθως δεν γίνεται αντιληπτή. Αντίθετα, αν πρόκειται για υπηρεσίες μετάδοσης δεδομένων προβλέπονται οι απαραίτητες διαδικασίες ώστε να μην χάνονται τα δεδομένα. Συχνότερα συναντάται η κατάσταση όπου ο χρήστης δεν διακόπτει την αρχική του σύνδεση πριν ολοκληρωθεί η διαδικασία αλλαγής διαύλου. Άλλωστε, το γεγονός ότι οι χρήστες μοιράζονται την ίδια συχνότητα ευνοεί την επίτευξη αυτού του είδους. Έτσι, στην περίπτωση της ήπιας διαπομπής (*soft handover*) ο χρήστης επικοινωνεί ταυτόχρονα με δύο ή και περισσότερους σταθμούς βάσης, ενώ στην ηπιότερη (*softer handover*) συνδέεται με δύο ή περισσότερους τομείς του ίδιου σταθμού βάσης. Στα δύο ακόλουθα σχήματα φαίνεται ένα απλό παράδειγμα για τις δύο τελευταίες περιπτώσεις.



Εικόνα 35: Ήπια διαπομπή (*soft handover*)

Εικόνα 36: Ηπιότερη διαπομπή (*softer handover*)

- *Ίδιο ή διαφορετικό σύστημα*

Οι περισσότερες διαπομπές συμβαίνουν μέσα στο ίδιο σύστημα (*intra-system*), δηλαδή ο χρήστης εξακολουθεί να ανήκει στο δίκτυο που βρισκόταν και πριν την έναρξη της διαδικασίας αλλαγής διαύλου. Συχνά η κατηγορία αυτή διαχωρίζεται σε δύο επιμέρους υποκατηγορίες, ανάλογα με το αν οι διαπομπές γίνονται στην ίδια συχνότητα (*intra-frequency*) ή σε διαφορετική (*inter-frequency*). Από την άλλη πλευρά, πραγματοποιούνται διαπομπές που εμπλέκουν διαφορετικά συστήματα (*inter-system*). Σε αυτές ο χρήστης αλλάζει δίκτυο χωρίς να διακόπτεται η σύνδεσή του. Αυτό αποτελεί ένα από τα πλεονεκτήματα των δικτύων 3^{ης} γενιάς, καθώς προσφέρεται μεγάλη ευελιξία σε περιβάλλοντα όπου υπάρχει κάλυψη από διάφορα συστήματα. Ένα παράδειγμα που έχει ήδη αναφερθεί είναι ο συνδυασμός του δικτύου 3^{ης} γενιάς με το υπάρχον δίκτυο του GSM. Η κατηγορία αυτή στηρίζεται κατά κύριο λόγο στις σκληρές διαπομπές.

Οι ήπιες και ηπιότερες διαπομπές αποτελούν ένα σημαντικό και αναπόσπαστο μέρος της λειτουργίας των δικτύων 3^{ης} γενιάς. Για αυτό το λόγο δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα κατά τη διαδικασία σχεδιασμού, καθώς χρειάζεται να ρυθμιστούν κατάλληλα διάφορες παράμετροι ώστε να εξασφαλίζεται η σταθερή ποιότητα των κλήσεων. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι τρεις βασικότερες:

- *Περιθώριο προσθήκης*

Κάθε κινητό τερματικό λαμβάνει την ισχύ του *P-CPICH* καναλιού από διάφορους σταθμούς βάσης. Για να εισαχθεί ένας σταθμός στο σύνολο των υποψήφιων για διαπομπή (*active set*) ενός χρήστη, συγκρίνεται το επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος από το πιλοτικό του κανάλι με το αντίστοιχο του σταθμού που ήδη επικοινωνεί. Η μέγιστη επιτρεπόμενη διαφορά ονομάζεται περιθώριο προσθήκης

(*addition window*). Αν η επιλογή για την τιμή του περιθωρίου δεν είναι σωστή, η χωρητικότητα του δικτύου θα προκύψει μειωμένη.

- *Περιθώριο αφαίρεσης*

Κατά αντιστοιχία με την προηγούμενη παράμετρο, το περιθώριο αφαίρεσης (*drop window*) καθορίζει πότε ένα σταθμός βάσης αφαιρείται από το σύνολο των υποψήφιων για διαπομπή. Συνήθως είναι ελαφρώς μεγαλύτερο από το περιθώριο προσθήκης, έτσι ώστε να υπάρχει μια μικρή υστέρηση για να αποφεύγονται συνεχείς προσθαφαιρέσεις που καταναλώνουν άσκοπα τους πόρους του δικτύου. Αν το περιθώριο αφαίρεσης είναι πολύ μεγάλο, τότε θα παραμένουν στο *active set* οι λάθος σταθμοί. Αν αντιθέτως είναι πολύ μικρό, θα υπάρχει επιβάρυνση από τις συνεχείς προσθαφαιρέσεις και την αντίστοιχη χρονική καθυστέρηση.

- *Μέγεθος active set*

Αυτή η παράμετρος καθορίζει το μέγιστο επιτρεπτό πλήθος σταθμών βάσης που μπορεί να ανήκουν στο *active set* ενός χρήστη. Η κατάλληλη επιλογή σε συνδυασμό με σωστές τιμές για τα παραπάνω δύο περιθώρια, ωφελεί σημαντικά την επίδοση του δικτύου.

3.4.3 Έλεγχος πρόσβασης

Πριν μια νέα σύνδεση γίνει δεκτή, ο έλεγχος αποδοχής (*admission control*) χρειάζεται να επιβεβαιώσει ότι η πράξη αυτή δεν θα θυσιάσει την περιοχή κάλυψης ή την ποιότητα της υπηρεσίας των ήδη υπαρχόντων χρηστών. Ο αντίστοιχος *RRM* αλγόριθμος εκτιμά την αύξηση του φορτίου που η εγκατάσταση της κλήσης θα προκαλέσει στο δίκτυο ξεχωριστά για την άνω και την κάτω ζεύξη. Η νέα κλήση θα γίνει δεκτή, μόνο εάν η εκτίμηση το επιτρέπει, αλλιώς απορρίπτεται εξαιτίας της υπερβολικής παρεμβολής που θα δημιουργήσει στο δίκτυο. Τα όρια για τον έλεγχο πρόσβασης καθορίζονται κατά τον σχεδιασμό του δικτύου. Σύμφωνα με τον πιο διαδεδομένο αλγόριθμο, όσον αφορά την άνω ζεύξη, μια καινούρια κλήση θα γίνει δεκτή στο σταθμό βάσης εφόσον το επίπεδο της συνολικής λαμβανόμενης ισχύος P_R^{UL} δεν υπερβαίνει ένα καθορισμένο κατώφλι $P_{R_{tar}}^{UL}$:

$$P_R^{UL} + \Delta P_R^{UL} \leq P_{R_{tar}}^{UL} \quad (39)$$

όπου ΔP_R^{UL} είναι η εκτίμηση για την αύξηση στη συνολική λαμβανόμενη ισχύ που θα δημιουργηθεί από την προσθήκη του νέου χρήστη. Σύμφωνα με την εξίσωση (26), ο παραπάνω έλεγχος μπορεί να εκφραστεί ισοδύναμα με το συντελεστή φορτίου η του

σταθμού. Κατά αντιστοιχία, για την κάτω ζεύξη μια καινούρια κλήση θα γίνει δεκτή στο σταθμό βάσης εφόσον η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς του $P_{TxTotal}^{DL}$ δεν ξεπερνά μια καθορισμένη τιμή $P_{TxTotal\ tar}^{DL}$:

$$P_{TxTotal}^{DL} + \Delta P_{TxTotal}^{DL} \leq P_{TxTotal\ tar}^{DL} \quad (40)$$

όπου $\Delta P_{TxTotal}^{DL}$ είναι η εκτίμηση για την αύξηση στην συνολική εκπεμπόμενη ισχύ που θα δημιουργηθεί με την προσθήκη του νέου χρήστη.

3.4.4 Έλεγχος φορτίου

Ο έλεγχος φορτίου ή συμφόρησης (*load-congestion control*) λειτουργεί σε συνδυασμό με τον έλεγχο πρόσβασης και διασφαλίζει ότι το σύστημα δεν υπερφορτώνεται και παραμένει σε σταθερή κατάσταση. Εάν το σύστημα είναι σωστά σχεδιασμένο και ο έλεγχος πρόσβασης λειτουργεί ικανοποιητικά, οι καταστάσεις υπερφόρτωσης είναι πολύ σπάνιες. Ωστόσο, η υλοποίηση του ελέγχου πρόσβασης δεν ακολουθεί κάποιο συγκεκριμένο υποχρεωτικό πρότυπο και συνεπώς, αν σημειωθεί υπερφόρτωση, ο έλεγχος φορτίου πρέπει να επιστρέψει το σύστημα γρήγορα και ελεγχόμενα σε επιτρεπτή κατάσταση. Μερικές από τις πιθανές ενέργειες για τον σκοπό αυτό είναι οι εξής:

- Μείωση του ρυθμού μετάδοσης χρηστών
- Μη αποδοχή των εντολών αύξησης ισχύος
- Μείωση της τιμής του επιθυμητού *SINR* στόχου
- *Inter-frequency* ή *inter-system* διαπομπή (αν είναι διαθέσιμες)
- Διακοπή κλήσεων με ελεγχόμενο τρόπο και με τήρηση προτεραιότητας

Ο τρόπος με τον οποίο θα γίνουν οι παραπάνω διαδικασίες επαφίεται αποκλειστικά στην κρίση του διαχειριστή του δικτύου. Γίνεται λοιπόν κατανοητό ότι ο έλεγχος συμφόρησης, σε συνδυασμό με τον έλεγχο πρόσβασης έχουν πολύ μεγάλη σημασία για το δίκτυο και πρέπει να σχεδιάζονται με ιδιαίτερη προσοχή. Στην παρούσα διατριβή, στο κεφάλαιο με τα αποτελέσματα από προσομοιώσεις για δίκτυα 3^{ης} γενιάς, αναλύεται σε βάθος το θέμα της επιλογής του κατάλληλου *RRM* αλγορίθμου για τον καθορισμό του ρυθμού μετάδοσης κάθε χρήστη του δικτύου. Συγκεκριμένα εξετάζονται τέσσερις πιθανές εκδοχές και προτείνεται μια υβριδική προσέγγιση. Όπως παρατηρείται, οι διαφορετικοί αλγόριθμοι οδηγούν σε πολύ διαφορετικά αποτελέσματα. Αποδεικνύεται στη συνέχεια ότι η μεγιστοποίηση της χωρητικότητας δεν πρέπει να αποτελεί το μοναδικό κριτήριο για την επιλογή του αλγορίθμου. Το σύστημα οφείλει να είναι δίκαιο απέναντι στους χρήστες και να μην ευνοούνται συνεχώς οι χρήστες που έχουν καλύτερο κανάλι.

3.5 Βελτιστοποίηση

Αφού πλέον έχουν καθοριστεί οι παράμετροι και οι αλγόριθμοι διαχείρισης των πόρων του δικτύου, το μαθηματικό εργαλείο αναλαμβάνει την επίλυση για το καθορισμένο σενάριο προσομοίωσης. Αυτό προσφέρει τη δυνατότητα να απομονωθούν προβληματικές περιοχές και να πραγματοποιηθούν κατάλληλες διορθωτικές κινήσεις με σκοπό την βελτιστοποίηση της απόδοσης του δικτύου. Για να επιτευχθεί αυτό, πρέπει να εξετάζεται προσεχτικά ένα σύνολο από βασικές παραμέτρους επίδοσης του δικτύου (*key performance indicators, KPI*) και να συγκρίνεται η τιμή τους με τα επιθυμητά όρια. Εδώ αξίζει να αναφέρουμε συνοπτικά τις σημαντικότερες παραμέτρους ένδειξης που πρέπει να παρακολουθούνται διαρκώς και στις οποίες στηρίζεται η διαδικασία βελτιστοποίησης:

- *Χωρητικότητα*

Η προσφερόμενη χωρητικότητα είναι καθοριστικός παράγοντας της απόδοσης κάθε δικτύου ασυρμάτων επικοινωνιών. Έτσι και εδώ, εξετάζονται βασικοί δείκτες για κάθε σταθμό βάσης, όπως ο συντελεστής φορτίου η , η συνολική εκπεμπόμενη ισχύς $P_{TxTotal}^{DL}$, ο μέσος ρυθμός μετάδοσης των χρηστών και η χωρητικότητα που επιτυγχάνεται για την άνω και την κάτω ζεύξη ξεχωριστά. Οι περιοχές, όπου συχνά χρήστες δεν γίνονται δεκτοί στο δίκτυο λόγω των παραπάνω περιορισμών ή δεν αποκτούν τον επιθυμητό ρυθμό μετάδοσης, θεωρούνται προβληματικές και πρέπει να ληφθούν μέτρα. Ενδεικτικές παράμετροι για την διαδικασία βελτιστοποίησης είναι ο συντελεστής η και η μέγιστη επιτρεπτή ισχύς εκπομπής ενός σταθμού βάσης συνολικά και ανά ζεύξη.

- *Κάλυψη*

Το δεύτερο βασικό ζητούμενο στο δίκτυο είναι η εξασφάλιση του ποσοστού της επιθυμητής κάλυψης σε όλη την εξεταζόμενη περιοχή. Συνδέεται άμεσα με την χωρητικότητα και συνήθως η βελτίωση του ενός από τα δύο κριτήρια χειροτερεύει την κατάσταση του άλλου. Βασικοί δείκτες είναι η πιθανότητα κάλυψης και η στάθμη λαμβανόμενης ισχύος του *P-CPICH* καναλιού. Προβληματικές περιοχές θεωρούνται αυτές όπου συχνά χρήστες δεν γίνονται δεκτοί ή η ποιότητα της κλήσης τους πέφτει σημαντικά λόγω αδυναμίας κάλυψης. Ενδεικτική παράμετρος για την διαδικασία βελτιστοποίησης είναι η ισχύς εκπομπής του *P-CPICH* καναλιού.

- **Διαπομπές**

Αναλύθηκε σε προηγούμενη ενότητα η βαρύτητα που έχει η καλή λειτουργία της διαδικασίας των διαπομπών. Οι περιοχές όπου κάθε σταθμός βάσης είναι ο καλύτερος εξυπηρετητής (*dominant*), καθώς και οι ενδιάμεσες περιοχές των διαπομπών πρέπει να είναι ξεκάθαρες. Έτσι εξασφαλίζεται η ιδανική λειτουργία χωρίς να γίνονται άσκοπες αλλαγές διαύλου και άσκοπη δέσμευση πολύτιμων πόρων του δικτύου. Βασικός δείκτης εδώ είναι ο συντελεστής διαπομπών *SHOO* (*soft handover overhead*), ο οποίος υπολογίζεται ξεχωριστά για κάθε σταθμό βάσης σύμφωνα με τη σχέση:

$$SHOO = \frac{Links}{Users} - 1 \quad (41)$$

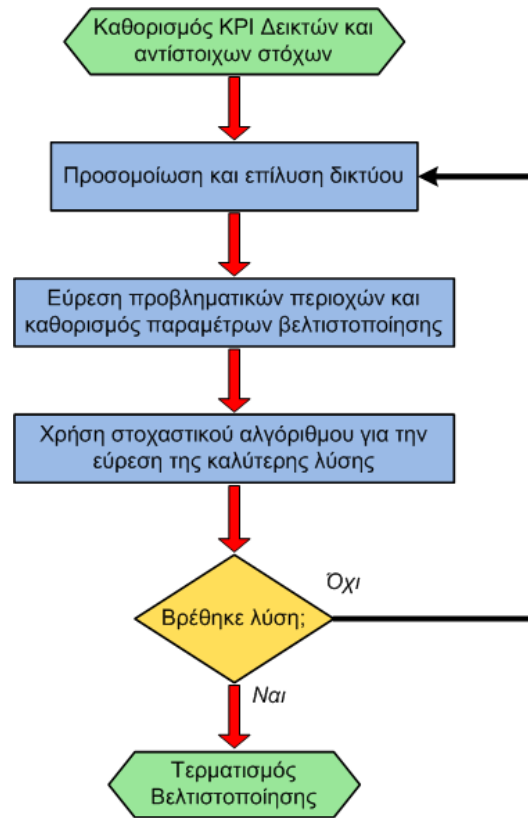
όπου με *Links* συμβολίζεται ο συνολικός αριθμός των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι με τον σταθμό και *Users* είναι ο αντίστοιχος αριθμός με χρήστες που έχουν *best server* τον συγκεκριμένο σταθμό. Η τιμή του *SHOO* πρέπει να διατηρείται σε λογικά πλαίσια. Οι περιοχές κάλυψης σταθμών βάσης με μεγάλες τιμές *SHOO* θεωρούνται προβληματικές για το δίκτυο, καθώς δείχνουν την ανάγκη για πρόσθετους πόρους και φανερώνουν πιθανά προβλήματα κατά τη διαδικασία διαπομπής. Ενδεικτικές παράμετροι προς βελτιστοποίησης είναι τα περιθώρια προσθήκης, αφαίρεσης και το μέγεθος του *active set*.

- **Κόστος**

Τέλος, σε ένα δίκτυο δεν μπορεί να μη ληφθεί υπόψη το οικονομικό κόστος εξοπλισμού, λειτουργίας και συντήρησης. Μπορεί να μην σχετίζεται άμεσα με την επίδοση του δικτύου, ωστόσο αποτελεί βασικό κίνητρο επιλογής παραμέτρων για τον πάροχο και επομένως τον σχεδιαστή. Ενδεικτικοί παράγοντες που επηρεάζουν το κόστος είναι ο αριθμός και η τοποθεσία των σταθμών βάσης, τα είδη κεραίας, ο αριθμός των ταυτόχρονων συνδέσεων που μπορεί να έχει ένας σταθμός και φυσικά το είδος της τεχνολογίας που χρησιμοποιείται (π.χ. έξυπνες κεραίες, *MIMO*).

Οι ενδεικτικές αυτές πληροφορίες είναι πολύ χρήσιμες, καθώς με αυτόν τον τρόπο ο σχεδιαστής διαθέτει μια μέθοδο για να αξιολογεί τις πιθανές λύσεις και ειδικότερα, μπορεί να βρίσκει τις προβληματικές περιοχές και να προχωράει σε διορθωτικές κινήσεις. Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι όλες αυτές οι παράμετροι είναι κατά βάση αλληλοσχετιζόμενες και για αυτό το λόγο ενδείκνυται η χρήση των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης για τον τελικό σχεδιασμό. Επίσης, προφανώς υπάρχουν και άλλες σημαντικές παράμετροι που

δεν ανήκουν αποκλειστικά σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες και πρέπει να λαμβάνονται υπόψη, όπως για παράδειγμα η κατεύθυνση των κεραιών ή κλίση τους (*tilt*). Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται χαρακτηριστικά η διαδικασία που ακολουθείται για την βελτιστοποίηση ενός δικτύου 3^{ης} γενιάς.



Εικόνα 37: Γενική διαδικασία βελτιστοποίησης

Όπως φαίνεται και στο σχήμα, ένα από τα σημαντικότερα μέρη της διαδικασίας είναι ο καθορισμός του διανύσματος x των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση. Έπειτα, πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη αντικειμενική συνάρτηση $f(x)$, η οποία προφανώς βασίζεται στους δείκτες επίδοσης του δικτύου που αναλύθηκαν προηγουμένως. Μια ενδεικτική έκφραση της συνάρτησης δίνεται στην επόμενη σχέση:

$$f(x) = w_1 f_{cap}(KPI_{cap}; x) + w_2 f_{cov}(KPI_{cov}; x) + w_3 f_{SHO}(KPI_{SHO}; x) \quad (42)$$

όπου f_{cap} είναι η συνάρτηση κόστους αναφορικά με την χωρητικότητα και η οποία βασίζεται στους αντίστοιχους δείκτες KPI_{cap} , με f_{cov} συμβολίζεται η συνάρτηση για την κάλυψη με δείκτες KPI_{cov} και τέλος η f_{SHO} αφορά τις διαπομπές και βασίζεται στους δείκτες KPI_{SHO} . Με w_1 , w_2 και w_3 συμβολίζονται οι αντίστοιχοι συντελεστές βάρους για τα αντικρουόμενα κριτήρια. Η τελική επιλογή της μορφής της παραπάνω εξίσωσης κρίνει ουσιαστικά το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης. Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με

την υλοποίηση της διαδικασίας βελτιστοποίησης που πραγματοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής δίνονται στο κεφάλαιο με τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

3.6 Συναφής ερευνητική δραστηριότητα

Στην βιβλιογραφία, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση δικτύων 3^{ης} γενιάς συνήθως αποτελείται από προβλήματα με πολλαπλούς και συχνά αντικρουόμενους στόχους. Τα προβλήματα αυτά λαμβάνουν υπόψη τους κυρίως τα θέματα που αναλύθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, όπως το κόστος του δικτύου, η χωρητικότητα, η κάλυψη και η ποιότητα υπηρεσίας. Για παράδειγμα, η προσθήκη ενός νέου σταθμού βάσης μπορεί να βελτιώσει την χωρητικότητα του δικτύου, αλλά από την άλλη πλευρά θα αυξήσει και το συνολικό κόστος. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποιούνται ευρέως τεχνικές βελτιστοποίησης που έχουν ως στόχο την εύρεση μιας επιθυμητής λύσης, ικανοποιώντας πάντα τους εκάστοτε περιορισμούς και τα αντίστοιχα κριτήρια. Η βασική λογική πίσω από όλες τις σχετικές δημοσιεύσεις είναι η εφαρμογή αλγορίθμων που προσφέρουν γρήγορα λύσεις κοντά στις βέλτιστες, καθώς ο χρόνος και ο υπολογιστικός φόρτος για μια εξαντλητική αναζήτηση είναι στις περισσότερες περιπτώσεις απαγορευτικός.

Σε μια μεγάλη κατηγορία δημοσιεύσεων [35]-[44], το πρόβλημα που μελετάται είναι ο αριθμός και η τοποθεσία των σταθμών βάσης που θα χρησιμοποιηθούν στο δίκτυο έτσι ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κάλυψη και χωρητικότητα. Επίσης εξετάζονται βασικές παράμετροι του σταθμού βάσης, όπως η διεύθυνση της κεραίας του, το ύψος τοποθέτησής της και η κλίση της (*tilt*), καθώς και η ισχύς του πιλοτικού καναλιού. Ακόμα και σε περιπτώσεις όπου ορισμένα από αυτά τα μεγέθη εξετάζονται, οι υπολογιστικές απαιτήσεις είναι πολύ υψηλές και για αυτό το λόγο γίνονται συχνά σημαντικές παραδοχές που διευκολύνουν την επίλυση. Για παράδειγμα, πολλές φορές η αναζήτηση περιορίζεται σε ένα διακριτό σύνολο πιθανών επιλογών μικρού μεγέθους.

Σημαντική έρευνα έχει γίνει επίσης για θέματα που αφορούν την βέλτιστο τρόπο για την καθορισμό της ισχύος κάθε κινητού και τον αντίστοιχο ρυθμό μετάδοσης που μπορεί να έχει [45]-[54]. Με άλλα λόγια, εξετάζεται πως μπορούν να κατανεμηθούν οι πόροι του συστήματος έτσι ώστε να ικανοποιηθούν απαιτήσεις, όπως η επίτευξη της μέγιστης χωρητικότητας, η εξασφάλιση ενός ελάχιστου μέσου ρυθμού μετάδοσης για τα κινητά ή η ελαχιστοποίηση της καθυστέρησης για τη μεταφορά δεδομένων. Σε αυτά τα προβλήματα δίνεται συνήθως ιδιαίτερη προσοχή στο πόσο δίκαιο είναι το σύστημα απέναντι στους χρήστες και στις διάφορες κατηγορίες τους.

Επίσης, αναφέρονται οι δημοσιεύσεις που αφορούν την βελτιστοποίηση των παραμέτρων που έχουν να κάνουν με το σύστημα, όπως για παράδειγμα τα όρια φορτίου, οι παράμετροι της διαπομπής, τα όρια μέγιστης επιτρεπόμενης εκπεμπόμενης ισχύος ή η ισχύς του πιλοτικού καναλιού [55]-[61]. Εδώ, δηλαδή, η τοποθεσία των σταθμών βάσης και οι παράμετροι των κεραιών είναι δεδομένες, και γίνεται προσπάθεια να ρυθμιστούν με τέτοιο τρόπο οι υπόλοιπες παράμετροι, έτσι ώστε το δίκτυο τελικά να έχει συγκριτικά αυξημένη επίδοση. Στις περισσότερες περιπτώσεις, για να διευκολυνθεί η διαδικασία, οι σταθμοί βάσης χωρίζονται σε ομάδες ανάλογα με τα χαρακτηριστικά τους και η ρύθμιση των παραμέτρων γίνεται ανά ομάδα.

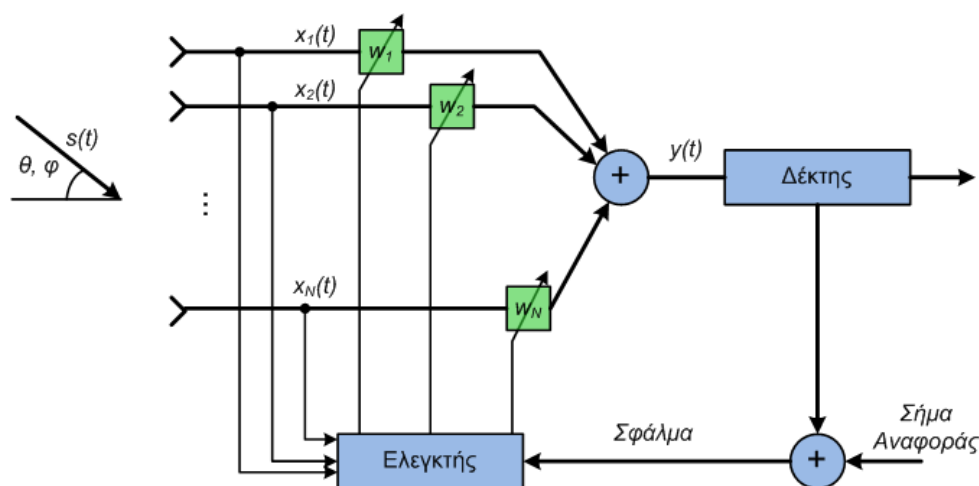
Τέλος, έχει μελετηθεί ο σχεδιασμός των δικτύων 3^{ης} γενιάς με την βοήθεια έξυπνων κεραιών [62]-[65]. Συγκεκριμένα, η βασική ιδέα πίσω από αυτές τις δημοσιεύσεις είναι να γίνεται δυναμική μορφοποίηση του μεγέθους και του σχήματος της περιοχής κάλυψης ενός σταθμού βάσης σύμφωνα με την τρέχουσα κατανομή των χρηστών. Για να επιτευχθεί αυτός ο δυναμικός σχηματισμός χρησιμοποιούνται έξυπνες κεραίες στο σταθμό. Ως αποτέλεσμα, η απόδοση του δικτύου βελτιώνεται αφού στην ουσία πραγματοποιείται εξισορρόπηση του φορτίου (*load balancing*) ανάμεσα στους σταθμούς. Συγκεκριμένα, ορισμένοι σταθμοί επικεντρώνονται στην εξυπηρέτηση κάποιου *hot spot*, ενώ οι γειτονικοί επεκτείνονται για να καλύψουν το κενό που δημιουργείται στην κάλυψη.

4 ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΔΙΚΤΥΩΝ 3ΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΕΞΥΠΝΩΝ ΚΕΡΑΙΩΝ

4.1 Εισαγωγή στις έξυπνες κεραίες

Η τεχνολογία των έξυπνων κεραιών αποτελεί μία από τις σημαντικότερες εξελίξεις στα δίκτυα ασυρμάτων επικοινωνιών. Λόγω του διαγράμματος ακτινοβολίας μιας συμβατικής κεραίας σε ένα σταθμό βάσης, μόνο ένα μέρος της εκπεμπόμενης ισχύος λαμβάνεται από τον επιθυμητό χρήστη. Παράλληλα, οι υπόλοιποι χρήστες δέχονται αυξημένες παρεμβολές και ως αποτέλεσμα μειώνεται σημαντικά η επίδοση του δικτύου, όσον αφορά την συνολική χωρητικότητα. Αυτό ακριβώς το πρόβλημα έρχονται να αντιμετωπίσουν οι έξυπνες κεραίες. Βασίζονται στις δυνατότητες που μπορεί να προσφέρει η χρήση μιας διάταξης που είναι γνωστή ως στοιχειοκεραία (*antenna array*) και η οποία αποτελείται από πολλές όμοιες κεραίες που εκπέμπουν ή λαμβάνουν ταυτόχρονα. Με την κατάλληλη επιλογή του αριθμού των επιμέρους κεραιών, καθώς και της ρευματικής διέγερσής τους, είναι πλέον δυνατή η επίτευξη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών του διαγράμματος ακτινοβολίας. Για παράδειγμα μπορεί να επιτευχθεί αυξημένο κέρδος ακτινοβολίας, να ρυθμιστεί το εύρος των λοβών και να στραφεί το διάγραμμα προς επιθυμητές κατευθύνσεις. Ως συνέπεια, η τεχνολογία των έξυπνων κεραιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μια συμπληρωματική μέθοδος για την σημαντική βελτίωση της απόδοσης των ασύρματων δικτύων.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται η βασική διάταξη μια έξυπνης κεραίας με N στοιχεία, η οποία λειτουργεί ως δέκτης. Με $x_i(t)$ συμβολίζεται το σήμα που λαμβάνεται σε κάθε κεραία i , $s(t)$ είναι το επιθυμητό εκπεμπόμενο σήμα και $y(t)$ είναι η τελική έξοδος της διάταξης. Η ανάλυση που ακολουθεί επεκτείνεται παρόμοια για την περίπτωση λειτουργίας της έξυπνης κεραίας ως πομπού.



Εικόνα 38: Βασική διάταξη λειτουργίας μιας έξυπνης κεραίας

Σημειώνεται ότι λόγω του διαφορετικού χρόνου διάδοσης, το σήμα $x_i(t)$ που λαμβάνει κάθε κεραία δεν είναι το ίδιο. Τα λαμβανόμενα σήματα πολλαπλασιάζονται με ειδικά διαμορφωμένα βάρη w_i και στη συνέχεια αθροίζονται για να προκύψει η επιθυμητή έξοδος $y(t)$. Στην περίπτωση όπου οι τιμές των βαρών w_i δεν είναι σταθερές και διαμορφώνονται δυναμικά με την πάροδο του χρόνου, η έξοδος $y(t)$ συγκρίνεται με ένα σήμα αναφοράς και με βάση την διαφορά τους γίνεται η κατάλληλη ρύθμιση. Η δυναμική προσέγγιση προφανώς δίνει μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό των έξυπνων κεραιών, οι οποίες σε αυτή την περίπτωση ονομάζονται προσαρμοστικές (*adaptive*). Όταν δεν γίνεται δυναμική ρύθμιση των βαρών, προκύπτει μια πολύ απλή διάταξη χωρίς ανάδραση και με σταθερές τιμές w_i .

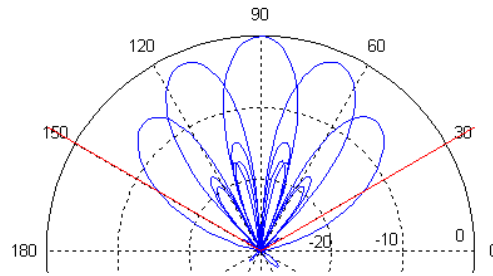
Η επιλογή της κατάλληλης τιμής των βαρών, προφανώς, είναι ο βασικός στόχος κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού, αφού από αυτήν θα εξαρτηθούν τα βασικά χαρακτηριστικά του διαγράμματος ακτινοβολίας της έξυπνης κεραίας [66]. Υπάρχουν διαφορετικές στρατηγικές για την επιλογή αυτή, όπου καθεμία έχει έναν συγκεκριμένο στόχο, όπως για παράδειγμα την βελτιστοποίηση του λόγου *SINR* για τους χρήστες. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι δύο βασικότερες κατηγορίες για τα δίκτυα ασύρματων επικοινωνιών με τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους.

4.2 Βασικές κατηγορίες έξυπνων κεραιών

4.2.1 Μεταγωγή κύριου λοβού

Οι έξυπνες κεραίες μεταγωγής κύριου λοβού (*switched beams*) αποτελούν την πιο απλή τεχνική για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος, καθώς έχουν σταθερά βάρη. Σε αυτήν την μέθοδο δημιουργείται έναν πλέγμα από L σταθερούς λοβούς ακτινοβολίας με διαφορετικές διευθύνσεις (*grid of beams*). Συνήθως, για κάθε χρήστη επιλέγεται ο λοβός που μεγιστοποιεί το λόγο *SINR* σήματος προς θόρυβο και παρεμβολές. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται εύκολα σε κάθε τομέα ενός σταθμού βάσης και δεν απαιτεί πολύπλοκες διατάξεις επεξεργασίας σήματος. Έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία πολλαπλών διαγραμμάτων ακτινοβολίας με αντίστοιχους κύριους λοβούς που καλύπτουν όλη την περιοχή εξυπηρέτησης.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα διαγράμματος ακτινοβολίας με $L = 5$ κύριους λοβούς για ένα τομέα 120° . Σημειώνεται ότι οι τιμές είναι σε λογαριθμική κλίμακα.

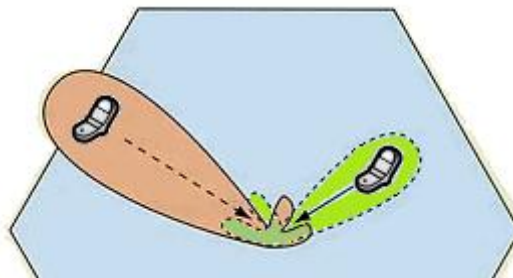


Εικόνα 39: Παράδειγμα *switched beams* με 5 λοβούς

Η τεχνική της μεταγωγής κύριου λοβού παρουσιάζει καλή απόδοση όταν το σήμα από ένα χρήστη υφίσταται γωνιακή διασπορά μικρότερη από το εύρος κάθε κύριου λοβού. Σε κάθε περίπτωση, εφαρμόζεται πολύ εύκολα με σημαντική αύξηση της επίδοσης του δικτύου, χωρίς ωστόσο να εκμεταλλεύεται σε μεγάλο βαθμό τις δυνατότητες των έξυπνων κεραιών.

4.2.2 Προσαρμοστικές κεραίες

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι τεχνικές που εκμεταλλεύονται τη δυνατότητα δυναμικού ελέγχου των βαρών για να μειώνουν τις παρεμβολές και παράλληλα να μεγιστοποιούν το επιθυμητό σήμα. Ένα παράδειγμα φαίνεται στην επόμενη εικόνα, όπου κάθε διάγραμμα ακτινοβολίας στρέφει ένα κύριο λοβό προς τον επιθυμητό χρήστη και μηδενισμό προς τον άλλο.



Εικόνα 40: Παράδειγμα προσαρμοστικών έξυπνων κεραιών

Στη συνέχεια περιγράφονται συνοπτικά οι δύο βασικές τεχνικές προσαρμοστικών κεραιών: η τεχνική εύρεσης κατεύθυνσης και η τεχνική βέλτιστου συνδυασμού.

1. Εύρεση κατεύθυνσης

Οι έξυπνες κεραίες εύρεσης κατεύθυνσης (*direction finding*) ανήκουν στην κατηγορία των προσαρμοστικών κεραιών. Ο δυναμικός υπολογισμός των βαρών σε αυτή την περίπτωση γίνεται ξεχωριστά για κάθε χρήστη και στοχεύει στην εύρεση της βέλτιστης διεύθυνσης του λοβού που θα τον εξυπηρετήσει, σύμφωνα με την γωνία άφιξης του σήματος (*direction of arrival*). Με άλλα λόγια, η έξυπνη κεραία παρακολουθεί συνεχώς τη γωνία άφιξης του σήματος από ένα συγκεκριμένο

χρήστη και ανάλογα στρέφει ένα κύριο λοβό. Προφανώς σε αυτή την περίπτωση μεγάλο ρόλο παίζει το περιβάλλον διάδοσης, καθώς και η κινητικότητα του χρήστη. Έτσι, με την χρήση προηγμένων αλγορίθμων ψηφιακής επεξεργασίας σήματος μπορεί να μειωθεί σημαντικά το επίπεδο παρεμβολών στο δίκτυο και παράλληλα να βελτιωθεί η ποιότητα του λαμβανόμενου σήματος. Για τον υπολογισμό της γωνίας άφιξης είναι διαδεδομένοι αρκετοί αλγόριθμοι όπως ο *MUSIC (multiple signal classification)* [67] και ο *ESPRIT (estimation of signal parameters via rotational invariance technique)* [68]. Ο τρόπος λειτουργίας αυτής της κατηγορίας έξυπνων κεραιών, αν και οδηγεί στην σημαντική βελτίωση της απόδοσης του δικτύου, συνεπάγεται σημαντικές αλλαγές στο σχεδιασμό. Για παράδειγμα οι περιοχές κάλυψης και οι διαπομπές ενός σταθμού βάσης αποκτούν πλέον δυναμικό χαρακτήρα.

2. Βέλτιστος συνδυασμός

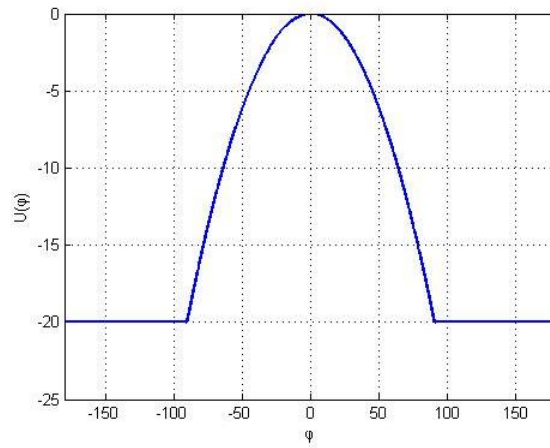
Με την μέθοδο του βέλτιστου συνδυασμού (*optimum combining*) ο δυναμικός υπολογισμός των βαρών γίνεται έτσι ώστε να βελτιστοποιηθεί ο λόγος *SINR* σήματος προς παρεμβολή και θόρυβο. Για την επίλυση αυτού του προβλήματος, όπως και προηγουμένως, υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι, οι οποίοι βασίζονται κυρίως στην χρήση του διανύσματος αναφοράς. Η επιλογή του κατάλληλου αλγορίθμου για το υπό μελέτη δίκτυο είναι πολύ σημαντική. Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή τους βασίζεται σε γνωστά κριτήρια, όπως το ελάχιστο μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*minimum mean square error*), ο μέγιστος *SINR* λόγος (*maximum SINR*) και η ελάχιστη διακύμανση θορύβου (*minimum noise variance*). Κάθε αλγόριθμος επιφέρει διαφορετική πολυπλοκότητα στο σύστημα και συγκλίνει με διαφορετική ταχύτητα, η οποία εξαρτάται κυρίως από την ταχύτητα του χρήστη και από το περιβάλλον διάδοσης. Μερικοί από τους πιο διαδομένους αλγόριθμους για τις έξυπνες κεραιές βέλτιστου συνδυασμού είναι ο *SMI (Sample Matrix Inversion)*, η μέθοδος ελαχίστων μέσων τετραγώνων *LMS (Least Mean Squares)*, η αναδρομική μέθοδος ελαχίστων τετραγώνων *RLS (Recursive Least Squares)* και η τεχνική συζυγών κλίσεων (*Conjugate Gradient Method*) [66].

4.3 Μαθηματικό υπόβαθρο

Στην περίπτωση όπου γίνεται χρήση τριών τομέων ανά σταθμό βάσης, συχνά εφαρμόζεται η πρόταση της 3GPP [69] σύμφωνα με την οποία η ένταση ακτινοβολίας U στην αζιμουθιακή γωνία φ δίνεται από τη σχέση:

$$U(\varphi) = -\min\left(12\left(\frac{\varphi}{\varphi_{3dB}}\right)^2, U_m\right), -180 \leq \varphi \leq 180 \quad (43)$$

όπου φ_{3dB} είναι το εύρος ημίσειας ισχύος που στην περίπτωση των τριών τομέων ισούται με 70° και U_m είναι η μέγιστη απόσβεση που παρέχει η εν λόγω κεραία και η αντίστοιχη τιμή της είναι τα 20 dB. Στο σχήμα που ακολουθεί διακρίνεται η γραφική παράσταση για το διάγραμμα $U(\varphi)$.



Εικόνα 41: Διάγραμμα ακτινοβολίας κεραίας για τομέα 120°

Οι έξυπνες κεραίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε κάθε τομέα ενός σταθμού βάσης και αποτελούνται από ένα σύνολο από M όμοιες κεραίες, οι οποίες συνήθως έχουν το ίδιο διάγραμμα ακτινοβολίας με την κεραία που θα εξυπηρετούσε τον αντίστοιχο τομέα. Για παράδειγμα, όταν η έξυπνη κεραία εφαρμόζεται σε ένα τομέα 120° , κάθε στοιχείο της έχει το διάγραμμα που παρουσιάστηκε στην Εικόνα 41. Για τη δημιουργία L λοβών ανά τομέα, πρέπει να δημιουργηθούν L διαγράμματα που το καθένα να παρουσιάζει μέγιστο σε μία συγκεκριμένη γωνία. Το διάνυσμα στροφής s_i ενός λοβού i σε μία κατεύθυνση φ_i και για συχνότητα λειτουργίας f_0 δίνεται από την σχέση:

$$s_i = [\exp(2\pi j \cdot f_0 \tau_1(\varphi_i)), \dots, \exp(2\pi j \cdot f_0 \tau_M(\varphi_i))]^T \quad (44)$$

όπου $\tau_k(\varphi_i)$ είναι η χρονική καθυστέρηση που απαιτείται για να φθάσει το σήμα στο k στοιχείο της κεραίας και η οποία για γραμμική στοιχειοκεραία δίνεται από την σχέση:

$$\tau_k(\varphi_i) = \frac{d}{c}(k-1)\cos(\varphi_i) \quad (45)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός και d είναι η απόσταση ανάμεσα στα στοιχεία της κεραίας και η οποία συνήθως επιλέγεται ίση με το μισό του αντίστοιχου μήκους κύματος, δηλαδή $d = \lambda/2$. Ακολουθώντας την ίδια διαδικασία για όλους τους L επιθυμητούς λοβούς ορίζεται ο πίνακας A , $M \times L$ διαστάσεων, όπου κάθε στήλη i του πίνακα περιέχει το αντίστοιχο διάνυσμα στροφής για την κατεύθυνση φ_i . Η εύρεση του διανύσματος των βαρών w_i για τον i λοβό γίνεται με την επίλυση του απλού γραμμικού συστήματος:

$$w_i^H A = c_i^T \quad (46)$$

όπου c_i είναι $L \times 1$ διάνυσμα που έχει όλα του τα στοιχεία ίσα με το μηδέν, εκτός από το i που είναι ίσο με την μονάδα. Με αυτόν τον τρόπο τα βάρη που υπολογίζονται προκαλούν μεγιστοποίηση του διαγράμματος ακτινοβολίας στην επιθυμητή κατεύθυνση φ_i και μηδενισμούς προς τις κατευθύνσεις που έχουν μέγιστο όλοι οι υπόλοιποι λοβοί, ώστε να μειώνονται οι παρεμβολές προς αυτούς. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται για όλους τους L λοβούς. Στην περίπτωση όπου ο πίνακας A είναι τετραγωνικός, τα επιθυμητά βάρη βρίσκονται εύκολα με αντιστροφή του A , σύμφωνα με τη σχέση:

$$w_i^H = c_i^T A^{-1} \quad (47)$$

Αν ο πίνακας A δεν είναι αντιστρέψιμος ή όταν $L < M$, ο υπολογισμός του διανύσματος βαρών μπορεί να γίνει λαμβάνοντας υπόψη τον ψευδοαντίστροφο του A :

$$w^H = c_i^T A^H (A A^H)^{-1} \quad (48)$$

Αφού πλέον έχουν υπολογιστεί τα επιθυμητά βάρη, μπορεί να καθοριστεί ο πίνακας W με διαστάσεις $M \times L$ που περιέχει τα βάρη για κάθε λοβό. Η τελική μορφή της έντασης ακτινοβολίας U_{beams} για τους L λοβούς και σε κάθε γωνία φ προκύπτει από την σχέση:

$$U_{beams}(\varphi) = |W \cdot AF(\varphi)|^2 \cdot U(\varphi) \quad (49)$$

όπου U είναι το διάνυσμα με τις τιμές της έντασης ακτινοβολίας κάθε στοιχείου, το οποίο δίνεται από την εξίσωση (43). Τέλος, με AF συμβολίζεται ο παράγοντας διάταξης και ο οποίος για μια γραμμική στοιχειοκεραία δίνεται από την εξίσωση:

$$AF(\varphi) = \left[1, \exp\left(-j \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \cos \varphi\right), \dots, \exp\left(-j \frac{2\pi d}{\lambda} \cdot \cos \varphi\right) \right]^T \quad (50)$$

Ο παράγοντας διάταξης της στοιχειοκεραίας εξαρτάται από τη γεωμετρική διάταξη, τη συχνότητα λειτουργίας, το πλήθος των στοιχείων και είναι ανεξάρτητος από το είδος τους.

4.4 Πλεονεκτήματα και πολυπλοκότητα χρήσης έξυπνων κεραιών

Όπως έχει ήδη αναλυθεί, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση ενός ασύρματου δικτύου 3^{ης} γενιάς είναι μια δύσκολη και απαιτητική διαδικασία. Αν σε όλα αυτά προστεθεί και η πολυπλοκότητα της τεχνολογίας των έξυπνων κεραιών, τότε τα πράγματα γίνονται ακόμα πιο δύσκολα. Οι έξυπνες κεραιές έχουν προφανώς μεγαλύτερο επίπεδο πολυπλοκότητας από τις απλές κεραιές λόγω αφενός της απαιτούμενης ψηφιακής επεξεργασία του σήματος και αφετέρου της ανάγκης για τον απαραίτητο εξοπλισμό. Μια εκτενής περιγραφή σε θέματα των έξυπνων κεραιών μπορεί να αναζητηθεί στα [70]-[72]. Για να πραγματοποιηθεί με σωστό τρόπο η ανάλυση ενός δικτύου στο οποίο γίνεται χρήση της τεχνολογίας των έξυπνων κεραιών, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη πολλές παράμετροι. Στη συνέχεια αναφέρονται συνοπτικά οι σημαντικότερες από αυτές:

- *Οι παράμετροι του σταθμού βάσης*

Από αυτές εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό η επιλογή των χαρακτηριστικών της έξυπνης κεραιάς. Απλά παραδείγματα αποτελούν η διαθέσιμη ισχύς, το ύψος της κεραιάς, ο διαθέσιμος χώρος γενικότερα, καθώς και η απαιτούμενη περιοχή κάλυψης.

- *Το περιβάλλον διάδοσης*

Όπως εξηγήθηκε σε προηγούμενη ενότητα, η χρήση της πλειοψηφίας των κεραιών εξαρτάται από παραμέτρους όπως η μέση τιμή της γωνίας άφιξης και η γωνιακή διασπορά του λαμβανόμενου σήματος. Για τον ικανοποιητικό υπολογισμό αυτών των παραμέτρων, τα οποία εξαρτώνται άμεσα από το περιβάλλον διάδοσης, τα συμβατικά μοντέλα απωλειών διάδοσης δεν κρίνονται επαρκή.

- *Τα χαρακτηριστικά της στοιχειοκεραίας*

Όπως φαίνεται και από την μαθηματική ανάλυση που προηγήθηκε, η ένταση ακτινοβολίας της έξυπνης κεραιάς εξαρτάται άμεσα από τα χαρακτηριστικά της στοιχειοκεραίας, όπως η γεωμετρική διάταξη, ο αριθμός και το είδος των επιμέρους στοιχείων.

- *Ο τρόπος υλοποίησης*

Ήδη έχει παρουσιαστεί ένα σύνολο από διαθέσιμους αλγορίθμων που μπορούν να εφαρμοσθούν ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου. Για παράδειγμα, πολύ σημαντικό ρόλο στην επιλογή της τεχνικής που θα χρησιμοποιηθεί παίζουν οι απαιτήσεις της προσφερόμενης υπηρεσίας (ρυθμός μετάδοσης, ανοχή σε λάθη και

χρόνο καθυστέρησης, απαιτούμενη ποιότητα), καθώς και το τηλεπικοινωνιακό φορτίο που αναμένεται να έχει το δίκτυο.

- *Οι αλγόριθμοι διαχείρισης πόρων*

Προφανώς, από τη στιγμή που εφαρμόζονται οι έξυπνες κεραιές πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα η πλειοψηφία των αλγορίθμων διαχείρισης πόρων, όπως η διαχείριση των διαπομπών, ο έλεγχος πρόσβασης και ο έλεγχος συμφόρησης του δικτύου.

Παρατηρούμε ότι τα παραπάνω στοιχεία αρκούν από μόνα τους για να αποτελέσουν ένα απαιτητικό πρόβλημα βελτιστοποίησης, το οποίο περιπλέκει ακόμα περισσότερο την διαδικασία σχεδιασμού των δικτύων 3^{ης} γενιάς. Για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη μια προσέγγιση που θα οδηγήσει στην ενσωμάτωση των έξυπνων κεραιών από τα αρχικά στάδια της διαδικασίας του σχεδιασμού και της βελτιστοποίησης της επίδοσης του δικτύου. Έτσι, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ευελιξία κατά το σχεδιασμό, ενώ ταυτόχρονα μειώνονται σημαντικά τα πιθανά έξοδα από μελλοντικές απαιτήσεις για επανασχεδιασμό του δικτύου. Σε αυτό το σημείο αξίζει να αναφέρουμε ορισμένα από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η εφαρμογή των έξυπνων κεραιών σε ένα ασύρματο δίκτυο επικοινωνιών:

- *Αύξηση της κάλυψης*

Με την χρήση μιας έξυπνης κεραιάς αφενός αυξάνεται το κέρδος ακτινοβολίας και αφετέρου μειώνονται οι λαμβανόμενες παρεμβολές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την επέκταση της περιοχής κάλυψης. Αν δεν είναι ο σκοπός η αύξηση της κάλυψης, η παραπάνω βελτίωση μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη μείωση του αριθμού των σταθμών βάσης που απαιτούνται για την εξυπηρέτηση της ίδιας περιοχής.

- *Μείωση της εκπεμπόμενης ισχύος*

Αυτό αφορά όχι μόνο τους σταθμούς βάσης, αλλά και τα ίδια τα κινητά τερματικά. Το όφελος είναι πολύ σημαντικό, καθώς συχνά είτε υπάρχουν τεχνικοί περιορισμοί στους σταθμούς βάσης είτε υπάρχει δικαιολογημένη ανησυχία από τους δημόσιους φορείς για την λαμβανόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και τις επιπτώσεις που έχει στην ανθρώπινη υγεία.

- *Αύξηση της χωρητικότητας*

Είναι προφανές ότι το κέρδος ακτινοβολίας, η μείωση του επιπέδου των παρεμβολών και η μείωση της απαιτούμενης εκπεμπόμενης ισχύος μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αύξηση της χωρητικότητας του δικτύου.

- *Βελτίωση προσφερόμενων υπηρεσιών*

Κατά επέκταση, οι ιδιότητες των έξυπνων κεραιών μπορούν να αξιοποιηθούν για την βελτίωση της ποιότητας του λαμβανόμενου σήματος και την επίτευξη υψηλότερων ρυθμών μετάδοσης. Κάθε υπηρεσία απαιτεί ένα δεδομένο κατώφλι ρυθμού λαθών *BER (bit error rate)*, οποίος μπορεί να μειωθεί με τη χρήση των έξυπνων κεραιών. Αυτό έχει ως συνέπεια την βελτίωση της ποιότητας και ταυτόχρονα δίνεται η δυνατότητα για υπηρεσίες με υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης.

- *Καλύτερος έλεγχος ισχύος*

Οι έξυπνες κεραίες μπορούν να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη θέση και την ταχύτητα ενός χρήστη μέσα στην περιοχή κάλυψης. Η αξιοποίηση της πληροφορίας κάνει τον έλεγχο ισχύος ευκολότερο και αποτελεσματικότερο, ενώ παράλληλα διευκολύνεται η διαδικασία της διαπομπής.

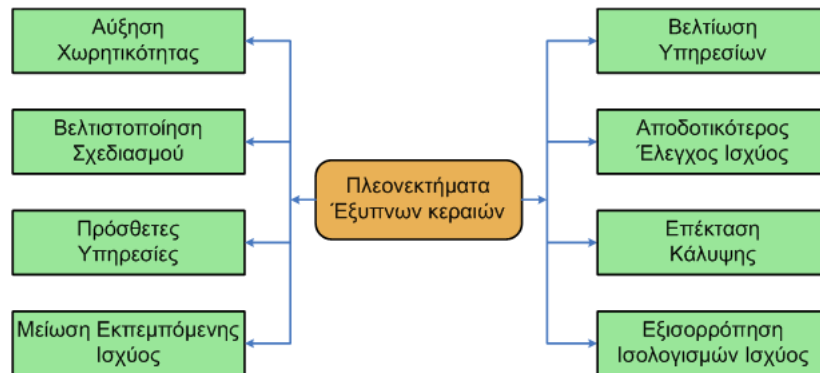
- *Εξισορρόπηση ισολογισμών ισχύος*

Ένας εναλλακτικός τρόπος αξιοποίησης των έξυπνων κεραιών είναι η εξισορρόπηση των ισολογισμών ισχύος ανάμεσα στην άνω και την κάτω ζεύξη. Η διαδικασία αυτή μπορεί να γίνεται δυναμικά, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του δικτύου της συγκεκριμένης χρονική στιγμής.

- *Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και πρόσθετες υπηρεσίες*

Η πληροφορία της θέσης του χρήστη αποτελεί ένα μεγάλο πλεονέκτημα για τη σχεδίαση του δικτύου, άλλα και για την προσθήκη νέων υπηρεσιών. Δίνει τη δυνατότητα για καινούριες υπηρεσίες, όπως ο εντοπισμός του χρήστη σε κλήσεις έκτακτης ανάγκης, ο εντοπισμός κλεμμένων κινητών ή οχημάτων και η δυνατότητα κοστολόγησης ανάλογα με την περιοχή πραγματοποίησης της κλήσης. Για παράδειγμα οι κλήσεις που γίνονται από περιοχές κοντά στην οικεία του χρήστη μπορεί να χρεώνονται λιγότερο.

Στο σχήμα που ακολουθεί, παρουσιάζονται συνοπτικά τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την χρήση των έξυπνων κεραιών σε ένα δίκτυο 3^{ης} γενιάς. Διαπιστώνεται ότι η απόδοση και η ποιότητα του δικτύου βελτιώνεται σημαντικά. Ωστόσο, όπως αναλύθηκε προηγουμένως, χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στη διαδικασία του σχεδιασμού, καθώς υπάρχουν πολλές παράμετροι που πρέπει να ληφθούν υπόψη, ώστε το αποτέλεσμα να είναι τελικά το επιθυμητό.



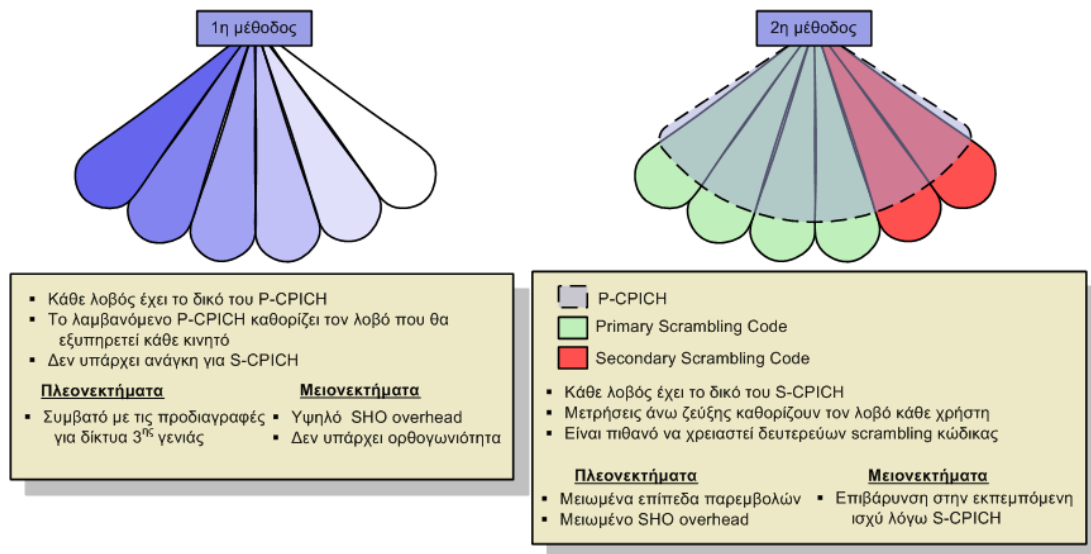
Εικόνα 42: Πλεονεκτήματα από την εισαγωγή έξυπνων κεραιών στα δίκτυα 3^{ης} γενιάς

4.5 Υλοποίηση σε δίκτυα 3^{ης} γενιάς

Η χρήση των έξυπνων κεραιών αποτελεί μια πολύ καλή και εξελιγμένη επιλογή για την αύξηση της απόδοσης του συστήματος. Για την εφαρμογή τους σε δίκτυα 3^{ης} γενιάς, υπάρχουν δύο πιθανές στρατηγικές υλοποίησης, οι οποίες αναλύονται στη συνέχεια [73]-[76], καθώς και στο σχήμα που ακολουθεί:

1. Στην πρώτη μέθοδο κάθε λοβός εκπέμπει το δικό του πρωτεύον πιλοτικό κανάλι (*primary common pilot channel, P-CPICH*) και έχει το δικό του *scrambling* κώδικα. Με διαφορετικά λόγια, κάθε λοβός συμπεριφέρεται σαν ένας τομέας. Μια τέτοια τεχνική είναι απόλυτα συνεπής με τις προδιαγραφές που ορίζονται για τα δίκτυα της 3^{ης} γενιάς. Ωστόσο έχει το βασικό μειονέκτημα ότι οι περιοχές που καλύπτονται από δύο λοβούς της ίδιας κυψέλης υποφέρουν από υψηλές παρεμβολές, αφού πλέον οι κώδικες που χρησιμοποιούνται δεν είναι ορθογώνιοι.
2. Στην δεύτερη μέθοδο, όλοι οι λοβοί ενός τομέα έχουν τον ίδιο *scrambling* κώδικα και το *P-CPICH* κανάλι εκπέμπεται σε όλο τον τομέα, π.χ. χρησιμοποιώντας ένα στοιχείο της κεραίας. Εφόσον το πιλοτικό κανάλι και το κανάλι για την μετάδοση των δεδομένων έχουν πλέον διαφορετικά χαρακτηριστικά, εκπέμπεται σε κάθε λοβό ένα μοναδικό δευτερεύον πιλοτικό κανάλι (*secondary common pilot channel,*

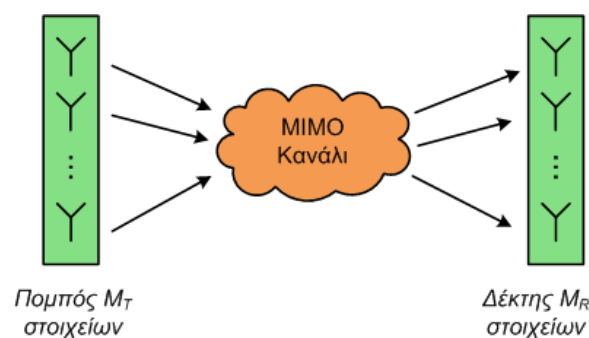
S-CPICH) για να βελτιωθεί η εκτίμηση του καναλιού. Επίσης, αν σε ένα τομέα τελειώσουν οι διαθέσιμοι κώδικες, είναι απαραίτητη η χρήση ενός επιπρόσθετου *scrambling* κώδικα. Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι οι παρεμβολές ανάμεσα σε χωρικά γειτονικούς λοβούς είναι χαμηλές. Το τίμημα εδώ είναι η επιβάρυνση σε εκπεμπόμενη ισχύ, αφού πλέον κάθε λοβός εκπέμπει ένα επιπλέον πιλοτικό κανάλι. Τέλος, για να καθορισθεί ποιος είναι ο καταλληλότερος λοβός για ένα κινητό συνήθως χρησιμοποιούνται δεδομένα που αφορούν την άνω ζεύξη.



Εικόνα 43: Σύγκριση ανάμεσα στις στρατηγικές για έξυπνες κεραίες

4.6 Συστήματα MIMO

Η χρήση των έξυπνων κεραιών αναμφισβήτητα βελτιώνει σημαντικά την επίδοση ενός δικτύου 3^{ης} γενιάς. Ωστόσο, οι εξελίξεις στον χώρο των ασύρματων επικοινωνιών έχουν προχωρήσει στο επόμενο βήμα, το οποίο αποτελείται από τα συστήματα πολλαπλών εισόδων πολλαπλών εξόδων (*multiple input multiple output, MIMO*). Σε ένα σύστημα *MIMO*, τόσο ο πομπός όσο και ο δέκτης είναι εξοπλισμένοι με στοιχειοκεραίες, όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο επόμενο σχήμα:



Εικόνα 44: Μοντέλο *MIMO* συστήματος

Με αυτό τον τρόπο, τα σήματα στις κεραίες του πομπού και του δέκτη συνδυάζονται, προσφέροντας ακόμα μεγαλύτερη ελευθερία στις τεχνικές βελτίωσης της ποιότητας της ασύρματης ζεύξης. Ο σχεδιασμός δικτύων με χρήση *MIMO* συστημάτων βρίσκεται ακόμα στα αρχικά στάδια, ωστόσο το ενδιαφέρον στην ερευνητική κοινότητα είναι πολύ μεγάλο. Τα συστήματα *MIMO* αν και βασίστηκαν αρχικά στην τεχνολογία των έξυπνων κεραιών, σήμερα αποτελούν ένα ξεχωριστό πεδίο μελέτης. Από πλευράς καθαρά φυσικού επιπέδου, υπάρχουν τρία διαφορετικά είδη κέρδους που προκύπτουν από την χρήση των *MIMO* συστημάτων και τα οποία ως ένα βαθμό είναι αντικρουόμενα [77],[78]. Στη συνέχεια ακολουθεί η συνοπτική περιγραφή τους:

1. Κέρδος στοιχειοκεραίας

Σε αυτή την περίπτωση, το κέρδος (*beam-forming gain*) από τις πολλαπλές κεραίες του πομπού ή του δέκτη προκύπτει από την άθροιση των λαμβανόμενων σημάτων και συνεπώς την αύξηση του *SINR* λόγου. Εδώ δηλαδή, η λειτουργία του *MIMO* συστήματος βασίζεται στη συσχέτιση των πολλαπλών εκδόσεων του επιθυμητού σήματος και για αυτό είναι απαραίτητη η γνώση του καναλιού στον πομπό και τον δέκτη. Τα φαινόμενα της πολλαπλής διάδοσης και της χρονικής διασποράς που υφίσταται το σήμα δεν συνεισφέρουν θετικά σε αυτή τη μέθοδο. Οι έξυπνες κεραίες που μελετήθηκαν προηγουμένως βασίζονται σε αυτό το είδος κέρδους.

2. Κέρδος διαφορισιμότητας

Αντίθετα με την προηγούμενη τεχνική, εδώ το *MIMO* σύστημα στηρίζει την λειτουργία του στην παρουσία του φαινομένου πολλαπλής διάδοσης. Με άλλα λόγια, το κέρδος (*diversity gain*) βασίζεται στην ανεξαρτησία των πολλαπλών εκδόσεων του λαμβανόμενου σήματος. Αυτή η τεχνική διαφέρει τελείως από το σκεπτικό λειτουργίας των έξυπνων κεραιών. Η επίτευξη του κέρδους σε αυτή την κατηγορία μπορεί να επιτευχθεί χωρίς γνώση του καναλιού με την κατάλληλη κωδικοποίηση του εκπεμπόμενου σήματος [79]. Η τεχνική που στοχεύει στο μέγιστο κέρδος διαφορισιμότητας χωρίς την γνώση του καναλιού ονομάζεται χωροχρονική κωδικοποίηση (*space-time coding*).

3. Κέρδος χωρικής πολυπλεξίας

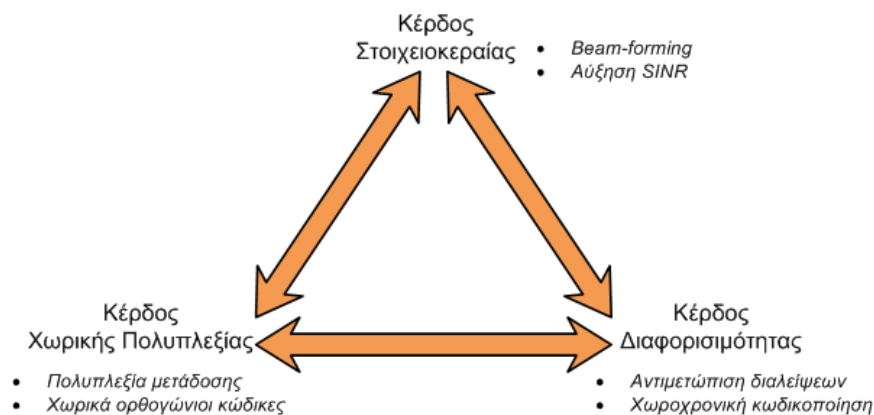
Η χωρική πολυπλεξία είναι μια τεχνική μετάδοσης όπου ανεξάρτητα δεδομένα μεταδίδονται παράλληλα από κάθε κεραία. Το κέρδος που προκύπτει από αυτή την

τεχνική ονομάζεται κέρδος χωρική πολυπλεξίας (*spatial multiplexing gain*) και έχει μέγιστη τιμή G , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$G = \min(M_T, M_R) \quad (51)$$

Το κέρδος αυτό επιτυγχάνεται χωρίς να χρειάζεται αύξηση των διαθέσιμων πόρων, όπως της ισχύος εκπομπής ή του εύρους ζώνης.

Είναι φανερό ότι σε ένα δίκτυο ασύρματων επικοινωνιών δεν είναι δυνατή η ταυτόχρονη εκμετάλλευση όλων των παραπάνω κερδών, αφού υπάρχουν αντικρουόμενες απαιτήσεις. Συνεπώς, το τελικό αποτέλεσμα θα εξαρτηθεί από την σημείο ισορροπίας ανάμεσα στις διαφορετικές προσεγγίσεις, όπως υποδεικνύεται στο τρίγωνο του επόμενου σχήματος:



Εικόνα 45: Κέρδη *MIMO* συστήματος

Για παράδειγμα, αν σκοπός είναι η μεγιστοποίηση του ρυθμού μετάδοσης, τότε πρέπει να μεταδίδονται ανεξάρτητα δεδομένα από κάθε κεραία, τα οποία έπειτα συνδυάζονται κατάλληλα στον δέκτη. Αντίθετα, αν επιθυμείται το μέγιστο κέρδος διαφορισιμότητας, όλες οι κεραίες του πομπού πρέπει να μεταδίδουν ταυτόχρονα την ίδια πληροφορία. Στην παρούσα διατριβή, η ανάλυση που έχει γίνει επικεντρώνεται στο επίπεδο συστήματος (*system level*) και συνεπώς στις προσομοιώσεις αξιοποιείται το κέρδος από τον σχηματισμό λοβών (*beam-forming gain*).

5 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ 3ης ΓΕΝΙΑΣ

5.1 Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που έχουν προκύψει με τις μεθόδους που έχουν αναφερθεί. Αρχικά μελετάται η επίδοση του δικτύου 3^{ης} γενιάς με την χρήση έξυπνων κεραιών και παρουσιάζονται αποτελέσματα για ένα σύνολο από πιθανές διατάξεις και στρατηγικές. Στη συνέχεια, με την χρήση των αλγορίθμων διαχείρισης πόρων (*RRM*) και σε συνδυασμό με την τεχνολογία των έξυπνων κεραιών, επιχειρείται ο κατάλληλος σχεδιασμός του δικτύου ώστε τελικά να εξασφαλιστεί η εξισορρόπηση ανάμεσα στην χωρητικότητα του δικτύου και στην αμεροληψία (*fairness*) απέναντι στους χρήστες. Τέλος, προτείνεται κατάλληλη μεθοδολογία για το πρόβλημα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης δικτύου 3^{ης} γενιάς. Ειδικότερα, με χρήση του εξελικτικού αλγορίθμου *PSO* και σε συνδυασμό με προηγμένες τεχνικές όπως οι έξυπνες κεραίες και τα συστήματα *MIMO* αναλύεται η επίδοση του δικτύου όσον αφορά την χωρητικότητα, την κάλυψη και τις πιθανές διαπομπές.

5.2 Επίδοση δικτύου 3ης γενιάς με έξυπνες κεραίες

Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στη συνέχεια αφορούν ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα σχεδιασμού δικτύου 3^{ης} γενιάς με χρήση των έξυπνων κεραιών [76],[80],[81]. Συγκεκριμένα, έχουν πραγματοποιηθεί προσομοιώσεις για διάφορες διατάξεις κεραιών, σε συνδυασμό με τις δύο πιθανές στρατηγικές υλοποίησης των έξυπνων κεραιών που αναλύθηκαν στην παράγραφο 4.5. Τα αποτελέσματα εδώ αφορούν την κατηγορία της μεταγωγής κύριου λοβού, η οποία αφενός εφαρμόζεται εύκολα και αφετέρου βελτιώνει σημαντικά την επίδοση του δικτύου. Αρχικά περιγράφεται το σενάριο προσομοίωσης και οι βασικές παράμετροι του δικτύου.

Η προσομοίωση του δικτύου της 3^{ης} γενιάς γίνεται με το μαθηματικό εργαλείο που αναλύθηκε στο αντίστοιχο κεφάλαιο. Το σενάριο αφορά μια αστική περιοχή, η οποία καλύπτεται από 11 σταθμούς βάσης με τρεις τομείς. Ωστόσο, επειδή δύο από τους σταθμούς βάσης βρίσκονται στα όρια της περιοχής, ο συνολικός αριθμός των τομέων του δικτύου ισούται με 31. Σε κάθε τομέα η κεραία έχει κέρδος ακτινοβολίας 17dBi, εύρος ημίσειας ισχύος 70° και ένταση ακτινοβολίας που δίνεται από τη σχέση (43). Το ύψος όπου βρίσκεται κάθε κεραία σε σύγκριση με το επίπεδο του εδάφους κυμαίνεται από 20 έως 25 μέτρα. Στη γενική περίπτωση οι χρήστες κατανέμονται τυχαία μέσα στα όρια της εξεταζόμενης περιοχής.

Η μέση τιμή των απωλειών διάδοσης υπολογίζεται με βάση το μοντέλο Cost 231 [82], ενώ το προφίλ του καναλιού για τις διαλείψεις πολλαπλών διαδρομών (*multipath*) είναι το *ITU Vehicular A* [83]. Όσον αφορά τη διάδοση, έχει προστεθεί ένας όρος για τη μοντελοποίηση του φαινομένου της σκίασης (*shadowing*), ο οποίος εκφράζεται με μια κανονική κατανομή σε λογαριθμική κλίμακα (*log-normal distribution*) με μέση τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση ίση με 7dB. Για τους χρήστες που βρίσκονται μέσα σε κτήρια (*indoor*), οι απώλειες διάδοσης έχουν αυξηθεί κατά 12dB. Το μέγιστο επιτρεπτό φορτίο κάθε σταθμού βάσης είναι 70%. Τα αποτελέσματα αφορούν τη μέση τιμή από *Monte Carlo* προσομοιώσεις με 500 ανεξάρτητες εκτελέσεις για κάθε διάταξη. Τέλος, σημειώνεται ότι οι παράμετροι προσομοίωσης έχουν επιλεγεί έτσι ώστε να οδηγούν σε δίκαια σύγκριση ανάμεσα στα διάφορα σενάρια. Για παράδειγμα, η συνολική διαθέσιμη ισχύς ενός τομέα παραμένει η ίδια αν χρησιμοποιεί έξυπνες κεραιές. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται συνοπτικά οι κυριότερες παράμετροι:

Παράμετροι Σταθμού βάσης	
Αριθμός σταθμών / τομέων	11 / 31
Μέγιστη συνολική ισχύς P^{max}	43 dBm
Μέγιστη ισχύς ανά ζεύξη p^{DLmax}	33 dBm
Κεραίες	70° / 17 dBi
Ισχύς πιλοτικού καναλιού P^{CPICH}	30 dBm
Έξυπνες κεραιές	<i>Switched beams</i> : $L = (3,5,7)$, $M = (5,7,9)$
Ισχύς <i>S-CPICH</i> καναλιού $P^{S-CPICH}$	$P^{CPICH} - 10\log_{10}M$
Μέγιστο φορτίο η^{max}	70%
Απαιτούμενος <i>SINR</i> γ^{CPICH}	-18 dB
Παράμετροι Χρηστών	
Μέγιστη ισχύς p^{ULmax}	21 dBm
Ταχύτητα	(3, 50) km/h για (Δεδομένα, Φωνή)
Κεραίες	Omni / 1.5 dBi
Παράμετροι Συστήματος	
Μοντέλο διάδοσης	Στοχαστικό Cost 231
<i>Multipath</i> κανάλι	<i>ITU Vehicular A</i>
Παράθυρο διαπομπών	5 dB
Επαναλήψεις προσομοιώσεων	500 / διάταξη

Πίνακας 2: Παράμετροι για το πρόβλημα με έξυπνες κεραιές

Αρχικά εξετάζεται η επίδραση των έξυπνων κεραιών σε βασικά θέματα, όπως η κάλυψη και η χωρητικότητα. Οι χρήστες με ρυθμούς μετάδοσης 12.2 (φωνητική κλήση) και 64 kbps (μετάδοση δεδομένων) κατανέμονται τυχαία και ομοιόμορφα σε όλη τη περιοχή. Επιπλέον, δύο τομείς του δικτύου θεωρείται ότι εξυπηρετούν πρόσθετους χρήστες (*hot spots*) με

υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης (64, 144 και 384 kbps). Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η ακριβής κατανομή των χρηστών ανά υπηρεσία.

Υπηρεσία (kbps)	12.2	64	144	384
Αριθμός χρηστών	1200	120	20	10

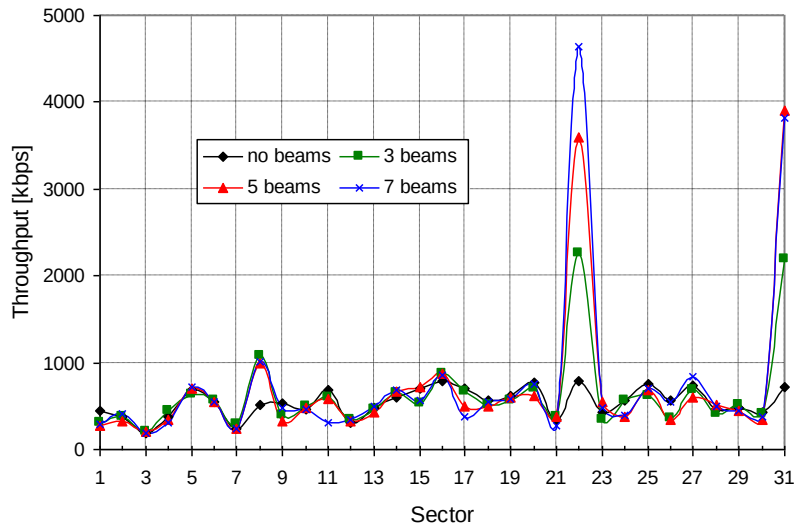
Πίνακας 3: Αριθμός χρηστών ανά υπηρεσία

Όπως είναι εμφανές, το σενάριο προσομοίωσης αφορά χρήστες με διάφορους ρυθμούς μετάδοσης, η πλειοψηφία των οποίων χρησιμοποιεί απλές φωνητικές κλήσεις, όπως άλλωστε ισχύει και στην πραγματικότητα. Όσον αφορά τις έξυπνες κεραιές, η υλοποίησή τους περιορίζεται σε τρεις τομείς του δικτύου και συγκεκριμένα στους δύο τομείς με τα *hot spots*, καθώς και σε ένα τρίτο που έχει υψηλό επίπεδο εισερχόμενων παρεμβολών και παρουσιάζει προβλήματα απόρριψης χρηστών. Το αρχικό δίκτυο με τους τρεις τομείς ανά σταθμό βάσης χρησιμοποιείται για λόγους σύγκρισης. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζεται ο αριθμός των χρηστών που τελικά εξυπηρετείται από το δίκτυο και η πιθανότητα κάλυψης (*coverage probability*) για όλες τις διατάξεις έξυπνων κεραιών. Η πιθανότητα κάλυψης αντιπροσωπεύει το ποσοστό των σημείων της υπό εξέταση περιοχής όπου ένας χρήστης γίνεται δεκτός στο δίκτυο. Προφανώς, η πιθανότητα αυτή εξαρτάται άμεσα από τον ρυθμό μετάδοσης του χρήστη.

Υπηρεσία (kbps)	Δεκτοί Χρήστες				Πιθανότητα Κάλυψης (%)			
	Αρχικό Δίκτυο	Αριθμός λοβών ανά τομέα			Αρχικό Δίκτυο	Αριθμός λοβών ανά τομέα		
		3	5	7		3	5	7
12.2	867	907	984	1008	99.27	99.38	99.43	99.47
64	70	78	88	90	96.89	97.33	97.40	97.63
144	7	10	14	17	94.58	95.36	95.52	95.78
384	2	5	6	7	90.15	91.30	91.93	92.20

Πίνακας 4: Αποτελέσματα χωρητικότητας και πιθανότητας κάλυψης

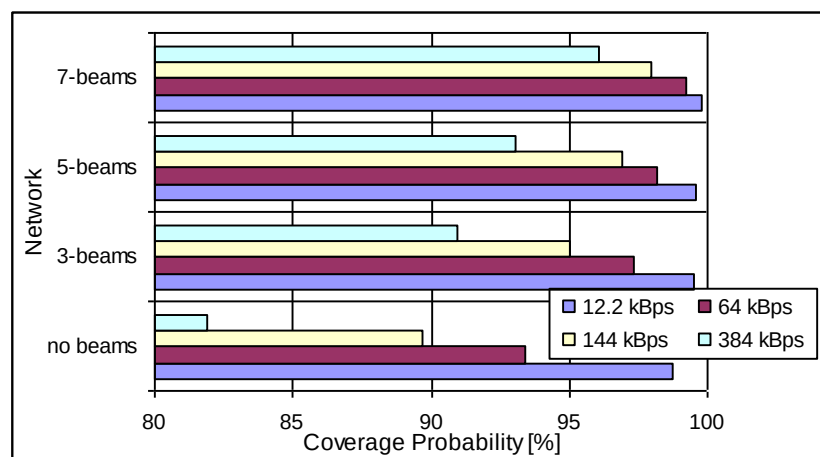
Από τα αποτελέσματα διαπιστώνεται ότι η συνολική χωρητικότητα του δικτύου βελτιώνεται σημαντικά από την χρήση έξυπνων κεραιών σε τρεις μόνο συγκεκριμένους τομείς. Για όλες τις προσφερόμενες υπηρεσίες, ο συνολικός αριθμός των χρηστών που γίνονται δεκτοί στο δίκτυο βελτιώνεται καθώς αυξάνεται ο αριθμός των λοβών της έξυπνης κεραιάς. Στο σχήμα που ακολουθεί διακρίνεται η χωρητικότητα ανά τομέα του δικτύου.



Εικόνα 46: Χωρητικότητα ανά τομέα για τα σενάρια προσομοίωσης

Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι τρεις τομείς που χρησιμοποιούν έξυπνες κεραίες είναι ο 8, 22 και 31. Όπως φαίνεται στο σχήμα, η χωρητικότητα στους δύο τομείς με τα *hot spots* (22 και 31) αυξάνεται σχεδόν αναλογικά με τον αριθμό των λοβών. Αυτό δεν συμβαίνει στον τρίτο τομέα, αφού εκεί δεν υπάρχει αντίστοιχη ζήτηση με πολλούς χρήστες υψηλών ρυθμών. Ωστόσο, ακόμα και σε αυτή την περίπτωση η κατάσταση βελτιώνεται σημαντικά, καθώς το πρόβλημα της απόρριψης χρηστών έχει σχεδόν εκμηδενιστεί.

Παρόμοια βελτίωση της επίδοσης του δικτύου παρατηρείται αναφορικά με την πιθανότητα κάλυψης. Οι αντίστοιχες τιμές που περιέχει ο Πίνακας 4 αντιπροσωπεύουν συνολικά το δίκτυο. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον έχει το επόμενο σχήμα, όπου τα διαγράμματα παρουσιάζουν την πιθανότητα κάλυψης σε ένα από τους τομείς που χρησιμοποιεί έξυπνες κεραίες. Από το σχήμα είναι φανερό ότι η κάλυψη έχει βελτιωθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό. Για παράδειγμα, αρχικά ο τομέας έχει πιθανότητα περίπου 82% να εξυπηρετήσει ένα χρήστη με 384 kbps, ενώ η αντίστοιχη τιμή με την χρήση έξυπνης κεραίας με 7 λοβούς φθάνει στο 96%.



Εικόνα 47: Πιθανότητα κάλυψης σε ένα τομέα με έξυπνες κεραίες

Τέλος, ακολουθούν τα αποτελέσματα από την σύγκριση των δύο στρατηγικών υλοποίησης. Σε αυτή τη περίπτωση το σενάριο προσομοίωσης είναι λίγο διαφορετικό, αφού γίνεται η υπόθεση ότι υπάρχουν μόνο τυχαία κατανεμημένοι χρήστες φωνής. Επίσης η προσομοίωση συνεχίζεται καθώς προστίθενται χρήστες, μέχρι όλοι οι τομείς του δικτύου να πλησιάσουν κοντά στα όρια υπερφόρτωσης για τουλάχιστον μία από τις δύο ζεύξεις. Αυτές οι αλλαγές έχουν γίνει ώστε τα αποτελέσματα να δώσουν μια καθαρή εικόνα για την επίδοση κάθε στρατηγικής. Παρόλο που δεν υπάρχουν *hot spots* με χρήστες υψηλών ρυθμών μετάδοσης, τρεις από τους κεντρικούς τομείς του δικτύου έχουν έξυπνες κεραιές. Στον επόμενο πίνακα φαίνεται η χωρητικότητα και ο καθοριστικός συντελεστής *SHOO* (*soft handover overhead*) για τις διαπομπές. Σημειώνεται ότι η αρίθμηση των μεθόδων γίνεται σύμφωνα με την παράγραφο 4.5.

Αριθμός λοβών	Δεκτοί Χρήστες		<i>SHO overhead</i> (%)	
	1 ^η μέθοδος	2 ^η μέθοδος	1 ^η μέθοδος	2 ^η μέθοδος
0	1898		60	
3	2150	2133	71	67
5	2326	2387	102	78
7	2557	2609	138	87

Πίνακας 5: Σύγκριση στρατηγικών υλοποίησης έξυπνων κεραιών

Τα αποτελέσματα φανερώνουν ότι η 2^η μέθοδος με την χρήση του δευτερεύοντος πιλοτικού καναλιού *S-CPICH* οδηγεί σε λίγο καλύτερη χωρητικότητα. Ωστόσο η μεγάλη διαφορά έγκειται στο συντελεστή *SHOO*. Η 1^η μέθοδος υστερεί σημαντικά σε αυτό το θέμα, καθώς για παράδειγμα με τους 7 λοβούς ο συντελεστής φθάνει την τιμή 138%, σε σύγκριση με το 60% του απλού δικτύου. Το ίδιο συμπέρασμα ισχύει για κάθε αριθμό λοβών που προσομοιώθηκε. Ως αποτέλεσμα, η 2^η μέθοδος υλοποίησης των έξυπνων κεραιών, παρόλο που επιβαρύνεται από την χρήση ενός πρόσθετου καναλιού (*S-CPICH*), αποτελεί μια πιο ελκυστική προσέγγιση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι το επίπεδο των παρεμβολών ανάμεσα στους λοβούς ενός τομέα είναι μειωμένο, ενώ παράλληλα εξασφαλίζεται ότι ο συντελεστής *SHOO* παραμένει σε λογικά όρια.

5.3 Πρόβλημα διαχείρισης πόρων

Σε αυτήν την ενότητα αναλύεται ένα αντιπροσωπευτικό πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου 3^{ης} γενιάς και παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, με χρήση συγκεκριμένων αλγορίθμων διαχείρισης πόρων (*RRM*) και σε συνδυασμό με την τεχνολογία των έξυπνων κεραιών, επιχειρείται ο κατάλληλος σχεδιασμός του δικτύου ώστε τελικά να εξασφαλιστεί η

εξισορρόπηση ανάμεσα στην χωρητικότητα του δικτύου και στην αμεροληψία (*fairness*) απέναντι στους χρήστες.

Τα τελευταία χρόνια, η απαίτηση για αύξηση του προσφερόμενου ρυθμού στα ασύρματα δίκτυα έχει ξεπεράσει κάθε προσδοκία. Η διαχείριση των πόρων σε αυτά τα δίκτυα, χωρίς αμφιβολία, αποτελεί μια σημαντική πρόκληση, καθώς πρέπει να ικανοποιηθούν διάφορα κριτήρια που πηγάζουν από καθορισμένους περιορισμούς και στόχους, όπως η ποιότητα υπηρεσίας, η κάλυψη και ο έλεγχος πρόσβασης. Βασικό κίνητρο είναι συνήθως η αύξηση της χωρητικότητας, χωρίς ωστόσο να εξετάζεται παράλληλα αν το δίκτυο είναι δίκαιο απέναντι στους χρήστες ή αν ευνοούνται αυτοί με τις καλύτερες συνθήκες καναλιού. Για να αντιμετωπιστεί το γεγονός αυτό, πρέπει να διαμορφωθούν κατάλληλοι αλγόριθμοι διαχείρισης πόρων που να ελέγχουν δυναμικά το ρυθμό σε κάθε χρήστη του δικτύου. Στη συνέχεια του κεφαλαίου παρουσιάζονται τέσσερις απλοί αλγόριθμοι και εισάγεται μια υβριδική προσέγγιση που επιτρέπει τον ακριβή καθορισμό του σημείου ισορροπίας ανάμεσα στα αντικρουόμενα κριτήρια της χωρητικότητας και της αμεροληψίας. Τέλος, για να αντιμετωπιστεί το διαρκές πλεονέκτημα που έχουν οι χρήστες με καλό κανάλι εις βάρος των υπολοίπων, γίνεται χρήση μιας τεχνικής έξυπνων κεραιών που βασίζεται στην διαμόρφωση τυχαίων λοβών (*random beam-forming*) [84].

Έστω ότι με R_k συμβολίζεται ο ρυθμός μετάδοσης ενός χρήστη k και R_{max} είναι ο μέγιστος διαθέσιμος ρυθμός. Τότε, η αμεροληψία f ενός δικτύου με K χρήστες εκφράζεται με βάση τις επόμενες σχέσεις:

$$f = \left(\frac{1}{K} \sum_k \left(\frac{R_k}{R_{max}} - \hat{R} \right)^2 \right)^{1/2}, \text{ όπου:} \quad (52)$$

$$\hat{R} = \frac{1}{K} \sum_k \frac{R_k}{R_{max}} \quad (53)$$

Όταν όλοι οι χρήστες έχουν τον ίδιο ρυθμό και άρα το δίκτυο βρίσκεται σε συνθήκες μέγιστης αμεροληψίας, η τιμή της f ισούται με το μηδέν. Αντίθετα, όσο το δίκτυο γίνεται λιγότερο δίκαιο, η f αυξάνεται και προσεγγίζει την τιμή 0.5. Η εξίσωση (65) προφανώς εκφράζει τη συνολική αμεροληψία για όλους τους χρήστες του δικτύου. Ανάλογος ορισμός δίνεται για τους K_m χρήστες της κυψέλης m , όπου η παράμετρος f_m αντιπροσωπεύει την τοπική αμεροληψία και είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν επιθυμείται η εφαρμογή διαφορετικής στρατηγικής ανά κυψέλη:

$$f_m = \left(\frac{1}{K_m} \sum_{k \in K_m} \left(\frac{R_k}{R_{max}} - \hat{R}_m \right)^2 \right)^{1/2}, \text{ όπου:} \quad (54)$$

$$\hat{R}_m = \frac{1}{K_m} \sum_{k \in K_m} \frac{R_k}{R_{max}} \quad (55)$$

Σύμφωνα με το σενάριο της προσομοίωσης, οι χρήστες εισέρχονται σειριακά στο δίκτυο και έχουν ως αρχική απαίτηση τον μέγιστο διαθέσιμο ρυθμό. Οι αλγόριθμοι διαχείρισης πόρων αναλαμβάνουν να επιλύσουν τις καταστάσεις όπου είτε έχει επέλθει υπερφόρτωση σε κάποιους σταθμούς βάσης είτε ορισμένες συνδέσεις έχουν πρόβλημα. Καθώς τα τεχνικά χαρακτηριστικά της άνω και κάτω ζεύξης διαφέρουν, δεν είναι απαραίτητο να αποδοθεί ο ίδιος ρυθμός και για τις δύο συνδέσεις ενός χρήστη. Σε κάθε περίπτωση, η διαδικασία που ακολουθείται αποτελείται από τα επόμενα βασικά στάδια:

- *Εύρεση χρηστών με προβλήματα*

Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι περιπτώσεις όπου η απαιτούμενη ισχύς μίας ζεύξης υπερβαίνει την μέγιστη επιτρεπτή ή δεν ικανοποιείται το $SINR$ κριτήριο για το πιλοτικό κανάλι. Έστω ότι με A_{UL} , A_{DL} συμβολίζονται τα σύνολα με τους εν λόγω χρήστες για την άνω και κάτω ζεύξη αντίστοιχα. Τότε ισχύουν οι σχέσεις :

$$A_{UL} = \{k: p_k^{UL} > p_k^{ULmax}\} \quad (56)$$

$$A_{DL} = \{k: (p_k^{DL} > p_k^{DLmax} \text{ ή } \gamma_k < \gamma_k^{CPICH})\} \quad (57)$$

όπου p_k^{ULmax} , p_k^{DLmax} είναι οι μέγιστες επιτρεπτές τιμές ισχύος εκπομπής για την άνω και κάτω ζεύξη αντίστοιχα και γ_k^{CPICH} είναι η ελάχιστη αποδεκτή τιμή για τον $SINR$ του πρωτεύοντος πιλοτικού καναλιού.

- *Εύρεση υπερφορτωμένων σταθμών βάσης*

Κατά αναλογία, εδώ συμπεριλαμβάνονται οι σταθμοί που ο παράγοντας φορτίου η_m (*loading factor*) έχει υπερβεί το καθορισμένο κατώφλι η_m^{max} ή δεν φθάνει η διαθέσιμη συνολική ισχύς τους P_m^{max} για να διατηρηθούν οι ρυθμοί των χρηστών. Τα σύνολα M_{UL} , M_{DL} με τους προβληματικούς σταθμούς βάσης για την άνω και κάτω ζεύξη αντίστοιχα δίνονται από τις σχέσεις:

$$M_{UL} = \{m: \eta_m > \eta_m^{max}\} \quad (58)$$

$$M_{DL} = \{m: P_m > P_m^{max}\} \quad (59)$$

▪ *Καθορισμός υποψήφιων χρηστών λόγω υπερφορτωμένων σταθμών*

Σε αυτό το βήμα προσδιορίζονται οι πιθανοί χρήστες, στους οποίους η μείωση του ρυθμού μετάδοσης θα προσφέρει λύση για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που εντοπίστηκαν στο προηγούμενο στάδιο. Έστω ότι B_{UL} , B_{DL} είναι τα σύνολα με τους υποψήφιους χρήστες για την άνω και κάτω ζεύξη αντίστοιχα. Αν R_{min} είναι ο μικρότερος διαθέσιμος ρυθμός, τότε έχουμε:

$$B_{UL} = \{k: (b_k \in M_{UL} \text{ και } R_k^{UL} > R_{min})\} \quad (60)$$

$$B_{DL} = \{k: (b_k \in M_{DL} \text{ και } R_k^{DL} > R_{min})\} \quad (61)$$

όπου b_k είναι ο σταθμός βάσης που εξυπηρετεί τον χρήστη k . Στις περιπτώσεις όπου η υπερφόρτωση ενός σταθμού προκαλείται σε μεγάλο βαθμό από τις αυξημένες παρεμβολές γειτονικών κυψελών που δεν ανήκουν στα σύνολα M_{UL} , M_{DL} , οι σχέσεις (60)-(61) μπορούν να διαμορφωθούν έτσι ώστε να περιλαμβάνουν και τους αντίστοιχους χρήστες.

▪ *Τελική επιλογή χρηστών*

Από το σύνολο των υποψήφιων χρηστών, τελικά επιλέγονται οι καταλληλότεροι με βάση τον αλγόριθμο διαχείρισης πόρων που εφαρμόζεται. Η επιλογή γίνεται για ένα χρήστη κάθε φορά, μέχρι να λυθούν όλα τα προβλήματα. Η μείωση του ρυθμού πραγματοποιείται σταδιακά, δηλαδή ανατίθεται στο χρήστη ο επόμενος μικρότερος διαθέσιμος ρυθμός. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η διαδικασία που εφαρμόζεται στο στάδιο αυτό, όπου για λόγους απλότητας δεν διαχωρίζονται οι δύο ζεύξεις.

```

while  $\{A \cup B \neq \emptyset\}$ 
  if  $A \neq \emptyset$ 
     $k' = \arg \max_{k \in A} (p_k)$ 
    if  $p_{k'm} < p_k^{max}$ 
       $k' = \arg \min_{k \in A} (\gamma_k)$ 
    end
  else
     $B \rightarrow k', (\text{επιλογή } k' \text{ με βάση τους RRM αλγόριθμους})$ 
  end

   $R_{k'} \leftarrow$  μείωση στον επόμενο διαθέσιμο ρυθμό
   $A, B \leftarrow$  υπολογισμός μέσω σχέσεων (56)-(61)
end

```

Εικόνα 48: Διαδικασία επιλογής χρηστών για μείωση ρυθμού

Ο βασικός πυρήνας της παραπάνω διαδικασίας είναι η επιλογή των χρηστών με βάση τους αλγόριθμους διαχείρισης πόρων. Στην συνέχεια παρουσιάζονται οι διάφορες εκδοχές που υλοποιήθηκαν και ακολουθεί το σχήμα με τη μαθηματική διατύπωσή τους.

1. *Max Fairness*

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος έχει ως σκοπό την μεγιστοποίηση της αμεροληψίας του δικτύου. Η επιλογή του k' χρήστη γίνεται με βάση τον ρυθμό μετάδοσης και συνεπώς δεν αξιοποιείται καμία πληροφορία σχετικά με την ποιότητα καναλιού των χρηστών.

2. *Max Throughput*

Εδώ ο αλγόριθμος έχει στόχο την μεγιστοποίηση της χωρητικότητας του δικτύου. Για να το επιτύχει αυτό, η επιλογή του k' βασίζεται στην ποιότητα του καναλιού, η οποία καθορίζεται από το επίπεδο της λαμβανόμενης ισχύος P_k^{CPICH} του πιλοτικού καναλιού.

3. *Tx Power*

Αυτός ο αλγόριθμος αξιοποιεί την πληροφορία που προέρχεται από το επίπεδο της απαιτούμενης ισχύος εκπομπής p_k . Η ισχύς εκπομπής εξαρτάται από παράγοντες όπως ο ρυθμός μετάδοσης, η ποιότητα καναλιού, το φορτίο του σταθμού βάσης και το κέρδος διαπομπής.

4. *Random*

Η απλούστερη εκδοχή είναι η τυχαία επιλογή του k' χρήστη από το σύνολο B . Εφαρμόζεται κυρίως για λόγους σύγκρισης με τους προηγούμενους αλγόριθμους.

<u><i>Max Fairness</i></u> $r_{max} = \max_{k \in B} (R_k)$ $C = \{k \in B: R_k = r_{max}\}$ $k' = random(C)$	<u><i>Tx Power</i></u> $k' = \arg \max_{k \in A} (p_k)$
<u><i>Max Throughput</i></u> $k' = \arg \min_{k \in B} (P_k^{CPICH})$	<u><i>Random</i></u> $k' = random(B)$

Εικόνα 49: Αλγόριθμοι διαχείρισης πόρων

Οι προηγούμενοι αλγόριθμοι έχουν μια καθορισμένη απόδοση ως προς την αμεροληψία και την χωρητικότητα του δικτύου. Από την άλλη πλευρά, ο προτεινόμενος υβριδικός αλγόριθμος προσφέρει την δυνατότητα καθορισμού του σημείου ισορροπίας ανάμεσα στα δύο κριτήρια. Συγκεκριμένα εξετάζονται δύο πιθανές μορφές υλοποίησης. Σύμφωνα με τη στοχαστική προσέγγιση, κάθε φορά που πρόκειται να γίνει μείωση ρυθμού υπολογίζεται ένας τυχαίος αριθμός c ομοιόμορφα κατανεμημένος στο διάστημα $[0, 1]$ και συγκρίνεται με ένα καθορισμένο κατώφλι $c_{thr} \in [0, 1]$. Ανάλογα με το αποτέλεσμα καθορίζεται ποιος από τους *RRM* αλγόριθμους της παραπάνω εικόνας θα χρησιμοποιηθεί. Αντίθετα, στη δυναμική προσέγγιση η επιλογή γίνεται με βάση την σύγκριση της τρέχουσας τιμής της αμεροληψίας του δικτύου με την επιθυμητή τιμή f_{tar} λαμβάνοντας υπόψη την παράμετρο υστέρησης h . Στο σχήμα που ακολουθεί περιγράφεται ο υβριδικός αλγόριθμος, όταν η επιλογή γίνεται ανάμεσα στους δύο ακραίους αλγορίθμους *Max Fairness* και *Max Throughput*:

<u>Στοχαστικός</u>	<u>Δυναμικός</u>
if $c < c_{thr}$ $k' \leftarrow \{ \text{Max Fairness} \}$ else $k' \leftarrow \{ \text{Max Throughput} \}$ end	if $f < f_{tar}$ $k' \leftarrow \{ \text{Max Throughput} \}$ else if $f > f_{tar} + h$ $k' \leftarrow \{ \text{Max Fairness} \}$ end

Εικόνα 50: Υβριδικός αλγόριθμος διαχείρισης πόρων

Τέλος, εφαρμόζεται η τεχνική της τυχαίας διαμόρφωσης λοβών για την επίτευξη καλύτερης αμεροληψίας, χωρίς να μειώνεται σημαντικά η χωρητικότητα του δικτύου. Οι τυχαίοι λοβοί σχηματίζονται με βάση την εξίσωση (49), όπου τα στοιχεία του πίνακα W είναι τυχαίοι μιγαδικοί αριθμοί ομοιόμορφα κατανεμημένοι με φάση στο διάστημα $[0, 2\pi]$ και πλάτος στο $[0, 1]$. Σύμφωνα με την συγκεκριμένη μέθοδο, κάθε φορά που εισέρχεται ένας χρήστης δημιουργείται ένας τυχαίος λοβός στον σταθμό που τον εξυπηρετεί. Έπειτα, η διαδικασία επιλογής χρηστών για μείωση ρυθμού εφαρμόζεται εκ νέου, διότι αφενός έχει μεταβληθεί το κανάλι των χρηστών και αφετέρου έχουν αλλάξει τα επίπεδα παρεμβολών. Ως συνέπεια, για το νέο χρήστη k_{new} ακολουθείται η εξής μέθοδος:

$b_{new} \leftarrow$ Σχηματισμός τυχαίου λοβού στο σταθμό που εξυπηρετεί το νέο χρήστη
 $C = \{k \in B: b_k = b_{new}\}$
 $R_k = R_{max}$ για $\forall k \in C$
 $k' \leftarrow$ Διαδικασία επιλογής (δες Εικόνα 48)

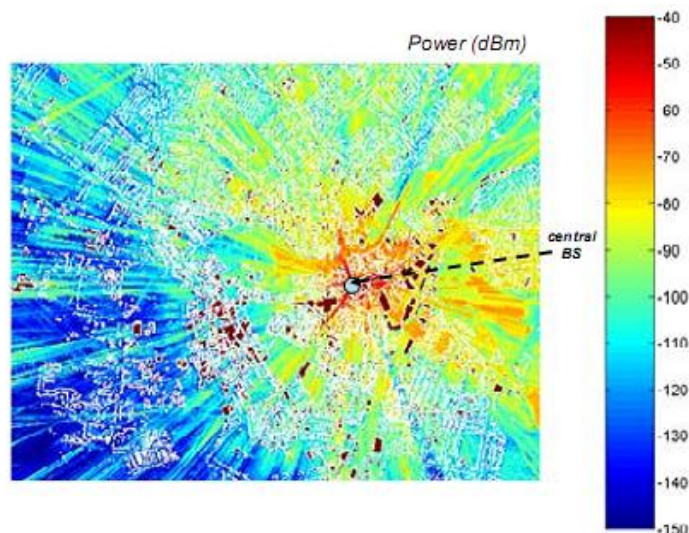
Εικόνα 51: Τροποποίηση για χρήση τεχνικής *random beam-forming*

Εδώ σημειώνεται, ότι λόγω της αύξησης ρυθμών στον σταθμό b_{new} θα αυξηθεί το επίπεδο εισερχόμενων παρεμβολών στους γειτονικούς σταθμούς και πιθανώς οι χρήστες τους θα οδηγηθούν άδικα στην διαδικασία μείωσης ρυθμών. Για να αποφευχθεί αυτή η περίπτωση, κατά την επιλογή του χρήστη k' δίνεται προτεραιότητα στους χρήστες που ανήκουν στο σύνολο C . Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι βασικές παράμετροι προσομοίωσης.

Παράμετροι Σταθμού βάσης	
Αριθμός σταθμών / τομέων	7 / 21
Μέγιστη συνολική ισχύς P^{max}	43 dBm
Μέγιστη ισχύς ανά ζεύξη p^{DLmax}	33 dBm
Κεραίες	70° / 17 dBi
Ισχύς πιλοτικού καναλιού P^{CPICH}	30 dBm
Μέγιστο φορτίο η^{max}	70%
Απαιτούμενος $SINR$ γ^{CPICH}	-18 dB
Τυχαιοί λοβοί	$L=2, d=2\lambda$
Παράμετροι Χρηστών	
Μέγιστη ισχύς p^{ULmax}	21 dBm
Ρυθμοί μετάδοσης	[12.2 64 144 384] kbps
Κεραίες	Omni / 1.5 dBi
Παράμετροι Συστήματος	
Μοντέλο διάδοσης	Ντετερμινιστικό
Αριθμός χρηστών	1 ως 500
Παράθυρο διαπομπών	5 dB
Επαναλήψεις προσομοιώσεων	500 / διάταξη

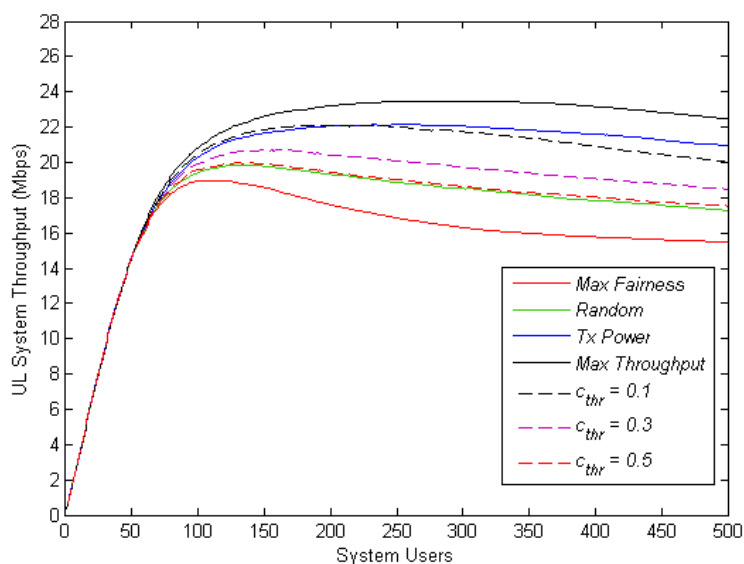
Πίνακας 6: Παράμετροι για το πρόβλημα χωρητικότητας - αμεροληψίας

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάγκη για την ακρίβεια του μοντέλου διάδοσης οδήγησε στην χρήση μιας ντετερμινιστικής *ray-tracing* μεθόδου πρόβλεψης του πεδίου, η οποία περιγράφεται αναλυτικά στα [85],[86]. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος *ray-tracing* λαμβάνει υπόψη τις ανακλάσεις από το έδαφος, τους τοίχους των κτιρίων, καθώς και την εξασθένιση του πεδίου όταν εισέρχεται από τα φυλλώματα των δέντρων. Η προσομοίωση αφορά ένα τυπικό αστικό περιβάλλον έκτασης 18km² περίπου. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η εκτίμηση της λαμβανόμενης ισχύος από ένα κεντρικό σταθμό βάσης σε όλη την υπό εξέταση περιοχή. Επίσης, διακρίνεται η τοποθεσία του συγκεκριμένου σταθμού, καθώς και τα περιγράμματα των κτιρίων.



Εικόνα 52: Εκτίμηση της λαμβανόμενης ισχύος σύμφωνα με την *ray-tracing* μέθοδο

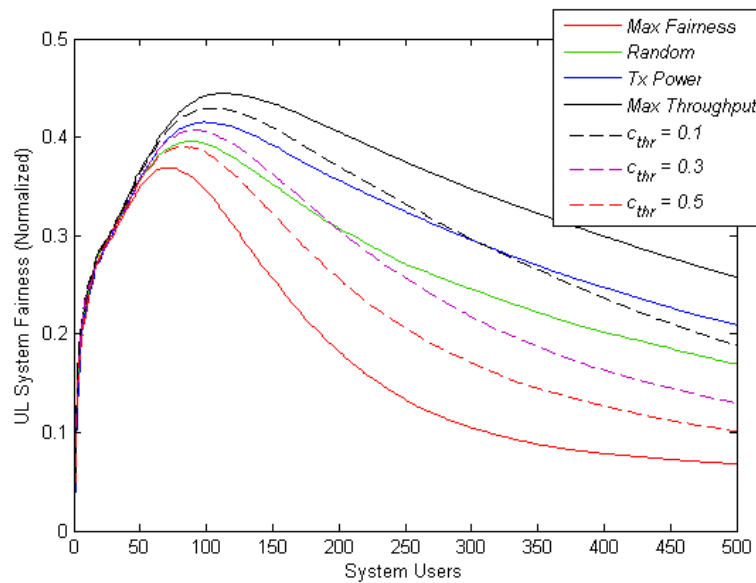
Αρχικά μελετάται η περίπτωση της άνω ζεύξης. Στην Εικόνα 53 παρουσιάζεται η επίδοση του δικτύου όσον αφορά την χωρητικότητα, για όλους τους απλούς αλγόριθμους, καθώς και για την στοχαστική προσέγγιση της υβριδικής τεχνικής για $c_{thr} = 0.1, 0.3$ και 0.5 . Όλες οι γραφικές παρουσιάζουν αρχικά παρόμοια συμπεριφορά μέχρι το σημείο όπου αρχίζει να λαμβάνει δράση η διαδικασία μείωσης ρυθμών. Επίσης, παρατηρείται ότι μετά από ένα αριθμό χρηστών, η χωρητικότητα δεν μπορεί να αυξηθεί άλλο, καθώς το σύστημα έχει ως προτεραιότητα την εξυπηρέτηση όσο το δυνατόν περισσότερων χρηστών.



Εικόνα 53: Χωρητικότητα άνω ζεύξης ανά *RRM* αλγόριθμο

Είναι προφανές ότι ο αλγόριθμος *Max Throughput* παρουσιάζει την καλύτερη απόδοση. Στο άλλο άκρο, ο *Max Fairness* έχει τα χειρότερα αποτελέσματα, όπου για παράδειγμα στους 500 χρήστες έχει περίπου 7 Mbps μειωμένη χωρητικότητα ή αλλιώς τα 2/3 της μέγιστης. Τα αποτελέσματα για τους *Random* και *Tx Power* βρίσκονται ανάμεσα στις δύο ακραίες

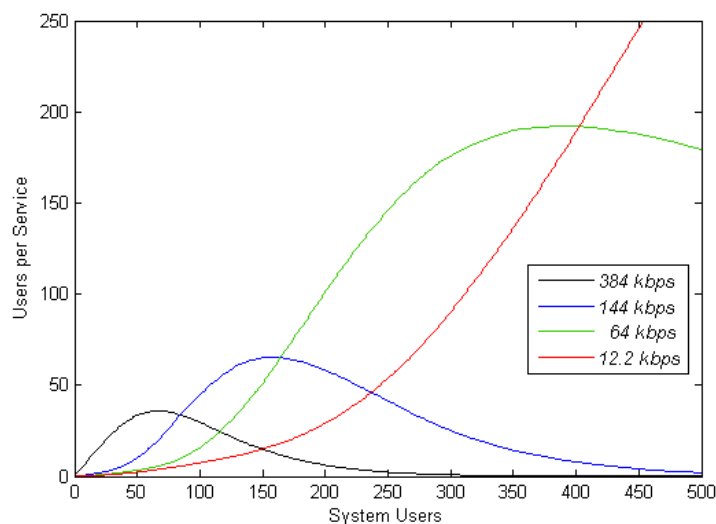
περιπτώσεις, με τον *Tx Power* να έχει σαφώς καλύτερη απόδοση. Στην επόμενη εικόνα διακρίνεται η επίδοση του δικτύου όσον αφορά την αμεροληψία:



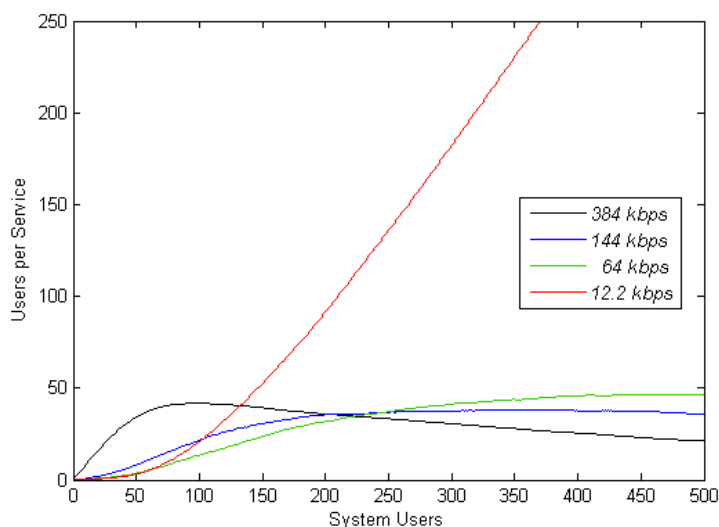
Εικόνα 54: Fairness άνω ζεύξης ανά RRM αλγόριθμο

Όπως είναι αναμενόμενο, εδώ εντοπίζεται η αντίστροφη συμπεριφορά. Ο *Max Fairness* αλγόριθμος οδηγεί στο δίκαιοτερο σύστημα με συντελεστή περίπου 0.07 για 500 χρήστες, σε αντίθεση με την τιμή 0.26 του *Max Throughput*. Σχετικά με την υβριδική τεχνική, από τα δύο προηγούμενα σχήματα παρατηρείται ότι για $c_{thr} = 0.1$ η επίδοση του δικτύου είναι παρόμοια με τον *Tx Power* αλγόριθμο, ενώ για $c_{thr} = 0.3$ ή 0.5 τα αποτελέσματα είναι καλύτερα από τον *Random* και για τα δύο αντικρουόμενα κριτήρια.

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των αλγορίθμων ως προς την αμεροληψία, στις επόμενες δύο εικόνες διακρίνεται η κατανομή των χρηστών ανά ρυθμό μετάδοσης για δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις. Από την Εικόνα 55 φαίνεται ότι η *Max Fairness* τεχνική προσπαθεί να επιλύσει τα προβλήματα που προκύπτουν μειώνοντας σταδιακά τους υψηλούς ρυθμούς. Αυτό δεν ισχύει στην Εικόνα 56 για τον *Tx Power* αλγόριθμο, όπου το δίκτυο διατηρεί τους υψηλούς ρυθμούς στους χρήστες με καλή ποιότητα καναλιού. Γενικά, είναι εμφανές ότι η χωρητικότητα και η αμεροληψία είναι αντικρουόμενα κριτήρια.

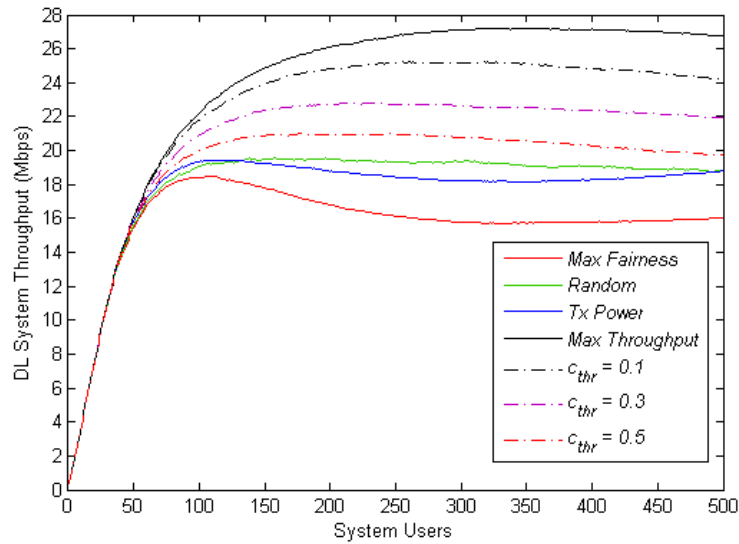


Εικόνα 55: Κατανομή χρηστών ανά υπηρεσία για τον *Max Fairness* αλγόριθμο

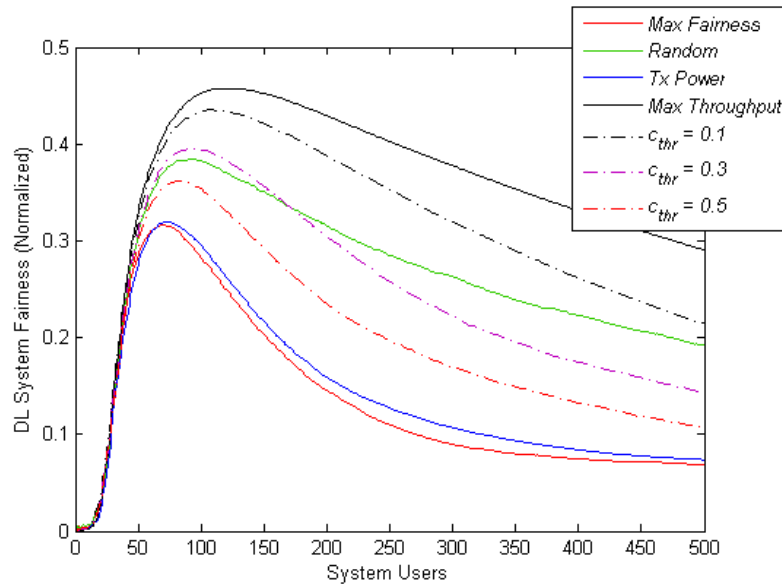


Εικόνα 56: Κατανομή χρηστών ανά υπηρεσία για τον *Tx Power* αλγόριθμο

Τα ίδια συμπεράσματα ισχύουν και για την κάτω ζεύξη, όπως παρουσιάζεται στα δύο επόμενα σχήματα. Η χωρητικότητα που επιτυγχάνεται για 500 χρήστες με τον *Max Fairness* αλγόριθμο είναι 10.5 Mbps μικρότερη από αυτή του *Max Throughput*, το οποίο ισοδυναμεί με μείωση 40%, ενώ αντίστροφα η αμεροληψία είναι σαφέστατα καλύτερη με συντελεστή 0.07 έναντι του 0.29. Όσον αφορά την υβριδική τεχνική είναι φανερό ότι αποτελεί μια πολύ απλή μέθοδο για να ρυθμιστεί η επίδοση του δικτύου.

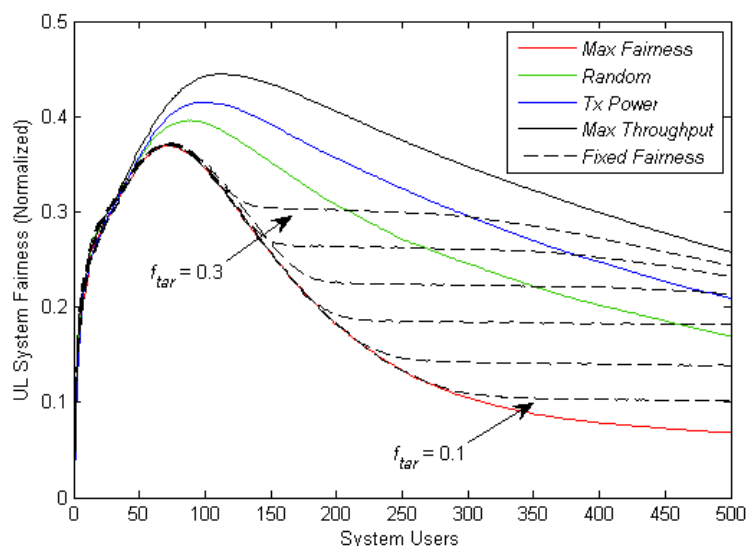
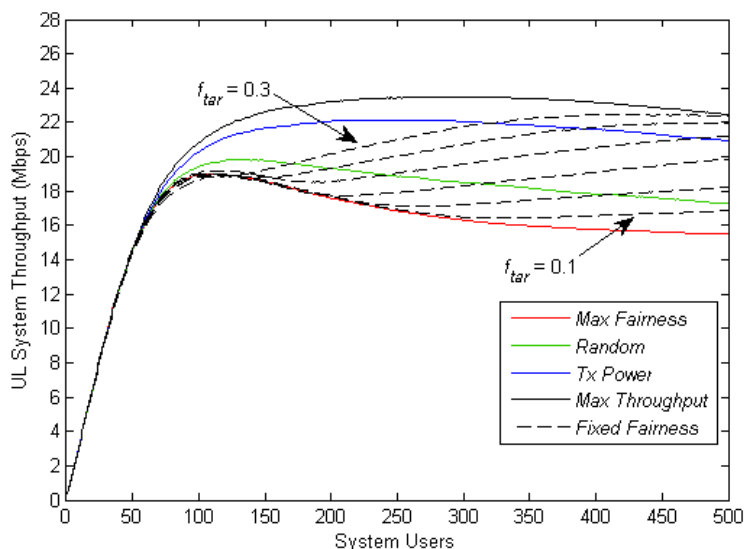


Εικόνα 57: Χωρητικότητα κάτω ζεύξης ανά *RRM* αλγόριθμο



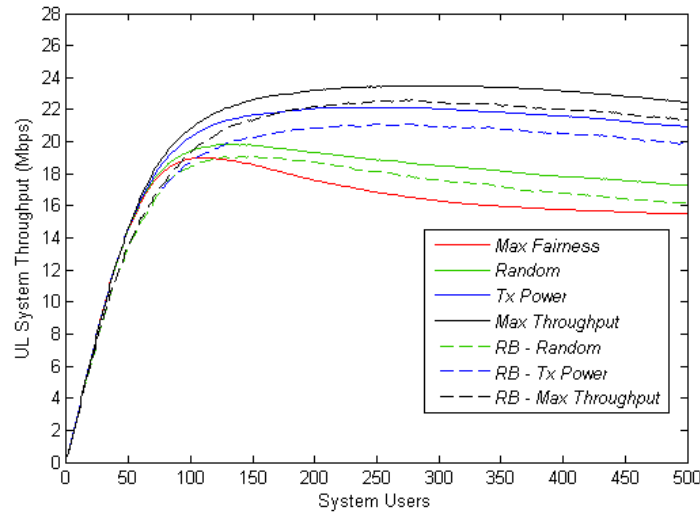
Εικόνα 58: *Fairness* κάτω ζεύξης ανά *RRM* αλγόριθμο

Η υβριδική τεχνική μπορεί να υλοποιηθεί με πιο προσαρμοστικό τρόπο προσφέροντας μεγαλύτερη ευελιξία στο σχεδιασμό του δικτύου. Συγκεκριμένα, στα επόμενα δύο σχήματα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την δυναμική προσέγγιση της τεχνικής για έξι τιμές της παραμέτρου f_{tar} , από 0.1 έως 0.3, και με $h = 0.01$. Διαπιστώνεται εύκολα ότι το δίκτυο έχει σταθερό συντελεστή αμεροληψίας, εφόσον η τιμή του βρίσκεται ανάμεσα στα όρια που έχουν προκύψει από τους *Max Throughput* και *Max Fairness* αλγόριθμους.

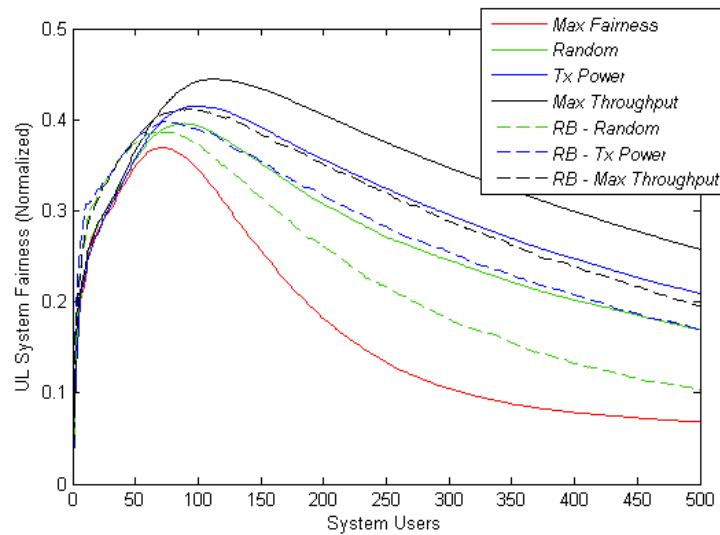
Εικόνα 59: *Fairness* άνω ζεύξης με την δυναμική προσέγγιση

Εικόνα 60: Χωρητικότητα άνω ζεύξης με την δυναμική προσέγγιση

Τέλος, στις επόμενες δύο εικόνες παρουσιάζεται η επίδοση του δικτύου με την υλοποίηση της τεχνικής της τυχαίας διαμόρφωσης λοβών (*RB*). Οι γραφικές παραστάσεις αφορούν μόνο την άνω ζεύξη, αλλά παρόμοια συμπεριφορά σημειώνεται και για την κάτω ζεύξη. Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα από όλους τους προηγούμενους αλγόριθμους. Η τεχνική *RB* εφαρμόστηκε συνδυαστικά με τους *Max Throughput*, *Tx Power* και *Random* αλγόριθμους. Όπως αναμενόταν, η χωρητικότητα του δικτύου μειώνεται σε όλες τις περιπτώσεις, αφού τα τυχαία διαγράμματα ακτινοβολίας μειώνουν το κέρδος του καναλιού στην πλειοψηφία των χρηστών. Ωστόσο, η μείωση αυτή διατηρείται σε λογικά πλαίσια, ενώ παράλληλα ο συντελεστής αμεροληψίας βελτιώνεται για όλες τις τεχνικές.



Εικόνα 61: Χωρητικότητα άνω ζεύξης με την RB τεχνική



Εικόνα 62: : Fairness άνω ζεύξης με την RB τεχνική

Χωρητικότητα Συστήματος (Mbps)						
	Άνω ζεύξη			Κάτω ζεύξη		
Αριθμός χρηστών	200	350	500	200	350	500
Max Fairness	17.59	15.97	15.50	16.81	15.72	16.00
Random	19.32	18.18	17.29	19.49	19.09	18.80
Tx Power	22.07	21.86	20.92	18.78	18.18	18.79
Max Throughput	23.21	23.39	22.46	26.12	27.19	26.74
$c_{thr} = 0.1$	22.08	21.38	20.02	24.80	25.10	24.22
$c_{thr} = 0.3$	20.43	19.40	18.47	22.69	22.53	21.91
$c_{thr} = 0.5$	19.46	18.29	17.54	20.93	20.56	19.76
RB-Random	18.72	17.20	16.14	18.51	18.07	17.78
RB-Tx Power	20.84	20.76	19.87	17.69	17.28	17.72
RB-Max Throughput	22.17	22.27	21.37	24.48	25.86	24.89

Πίνακας 7: Αποτελέσματα χωρητικότητας συστήματος

Συντελεστής αμεροληψίας (%)						
	Άνω ζεύξη			Κάτω ζεύξη		
Αριθμός χρηστών	200	350	500	200	350	500
Max Fairness	18.14	8.79	6.82	14.55	8.00	6.88
Random	30.73	22.18	16.96	31.56	23.88	19.17
Tx Power	35.60	27.00	20.90	15.87	9.36	7.39
Max Throughput	40.53	32.25	25.78	42.93	35.36	29.05
$c_{thr} = 0.1$	36.98	26.57	18.86	38.81	28.96	21.42
$c_{thr} = 0.3$	30.52	18.78	12.95	30.43	19.57	14.33
$c_{thr} = 0.5$	25.62	14.48	10.07	23.47	14.93	10.76
RB-Random	26.05	15.54	10.28	26.73	15.98	9.90
RB-Tx Power	31.72	22.94	16.85	14.45	9.21	7.19
RB-Max Throughput	35.09	26.18	19.52	40.08	30.25	21.63

Πίνακας 8: Αποτελέσματα συντελεστή αμεροληψίας

Συμπερασματικά, η συνεισφορά από την αντιμετώπιση του συγκεκριμένου προβλήματος επικεντρώνεται σε τρία βασικά σημεία. Πρώτον, πραγματοποιείται μία εκτενής ανάλυση τεσσάρων εύκολα εφαρμόσιμων αλγορίθμων διαχείρισης πόρων και παρουσιάζεται σε βάθος η επίδοσή τους. Έπειτα, προτείνεται μια υβριδική προσέγγιση που προσφέρει σημαντική ευελιξία κατά το σχεδιασμό του δικτύου, καθώς επιτρέπει τον καθορισμό του σημείου ισορροπίας ανάμεσα στα δύο αντικρουόμενα κριτήρια. Αυτό επιτυγχάνεται με την απλή αλλαγή μιας παραμέτρου είτε στοχαστικά είτε δυναμικά. Τέλος, αποδεικνύεται ότι η τεχνική διαμόρφωσης τυχαίων λοβών μπορεί να αποτελέσει μια πρακτική μέθοδο για την δημιουργία πιο δίκαιου συστήματος.

5.4 Πρόβλημα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης

Σε αυτήν την ενότητα επιλύεται ένα πρόβλημα σχεδιασμού και βελτιστοποίησης δικτύου 3^{ης} γενιάς με τη χρήση στοχαστικών αλγορίθμων και στη συνέχεια παρουσιάζονται τα σχετικά αποτελέσματα. Ειδικότερα, με χρήση του εξελικτικού αλγορίθμου *PSO* και σε συνδυασμό με την τεχνολογία των έξυπνων κεραιών (προσαρμοστικές κεραίες και συστήματα *MIMO*), επιχειρείται ο κατάλληλος σχεδιασμός του δικτύου ώστε τελικά να εξασφαλιστεί η επιθυμητή επίδοση. Έχει ήδη υπογραμμισθεί πως ο σχεδιασμός του δικτύου 3^{ης} γενιάς είναι σημαντικά πιο πολύπλοκος και απαιτητικός από ότι συνέβαινε στο παρελθόν για τα αντίστοιχα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας. Ωστόσο, η παρούσα μεθοδολογία αποτελεί μια σημαντική προσέγγιση επίλυσης και επιπλέον προσφέρει μεγάλη ευελιξία στο σχεδιαστή. Η διαδικασία αναζήτησης του βέλτιστου σχεδιασμού αποτελείται βασικά από την εύρεση των προβληματικών περιοχών του δικτύου και την λήψη μιας σειράς από κατάλληλες διορθωτικές κινήσεις. Για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του δικτύου επιλέγεται

ένα σύνολο από βασικούς δείκτες επίδοσης (*key performance indicators, KPI*), σύμφωνα με τους οποίους εκφράζεται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Αυτές οι παράμετροι, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, μπορούν να εκφράζουν την χωρητικότητα, την κάλυψη, τις διαπομπές ή και το συνολικό κόστος υλοποίησης του δικτύου. Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή της διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος.

Έστω ότι με M συμβολίζεται το σύνολο των σταθμών βάσης του δικτύου που εξετάζεται. Κάθε σταθμός $m \in M$ έχει ένα συγκεκριμένο κατώφλι η_m^{max} για το συντελεστή φορτίου η_m , έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι $\eta_m \leq \eta_m^{max}$, και μια καθορισμένη ισχύ εκπομπής p_m^{CPICH} του P -CPICH πιλοτικού καναλιού. Όσον αφορά τη διαδικασία των διαπομπών, με sho_m^{add} συμβολίζεται το περιθώριο προσθήκης στο *active set* ενός χρήστη του δικτύου. Για τις συγκεκριμένες παραμέτρους, ορίζονται τα αντίστοιχα πεδία ορισμού H^{max} , P^{CPICH} και SHO^{add} ώστε τελικά η αναζήτηση του βέλτιστου σχεδιασμού να περιορίζεται σε λύσεις που έχουν πρακτικά νόημα. Ένας αρχικός στόχος είναι να βρεθούν οι καλύτερες τιμές των παραμέτρων για να μεγιστοποιηθεί η χωρητικότητα του δικτύου. Υπενθυμίζεται ότι R_k είναι ο ρυθμός μετάδοσης κάθε χρήστη $k \in K$ που έχει γίνει δεκτός στο σύστημα. Η μαθηματική διατύπωση αυτής της εκδοχής του προβλήματος μεγιστοποίησης μπορεί να γίνει σύμφωνα με την επόμενη εικόνα:

$$\begin{array}{l} \max\{\sum_{k \in K} R_k\}, \text{ υπό τον όρο:} \\ \left. \begin{array}{l} \eta_m^{max} \in H^{max} \\ p_m^{CPICH} \in P^{CPICH} \\ sho_m^{add} \in SHO^{add} \end{array} \right\} \text{ για } \forall m \in M \end{array}$$

Εικόνα 63: Περιγραφή προβλήματος μεγιστοποίησης χωρητικότητας

Η παραπάνω διατύπωση, όμως, δεν λαμβάνει υπόψη το ενδεχόμενο αντίκτυπο που μπορεί να έχει η αύξηση της χωρητικότητας στα υπόλοιπα χαρακτηριστικά του δικτύου. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί ώστε η κάλυψη που προσφέρεται P_{cov} να μην είναι χαμηλότερη από ένα καθορισμένο όριο P_{cov}^{min} . Με άλλα λόγια πρέπει να εξασφαλιστεί μια ισορροπία ανάμεσα στα δύο αντικρουόμενα κριτήρια. Επίσης, ο συντελεστής διαπομπών SHO δεν πρέπει να υπερβαίνει ένα κατώφλι SHO^{max} , καθώς σε αντίθετη περίπτωση υπάρχει ανάγκη για πρόσθετους πόρους και υποδηλώνονται πιθανά προβλήματα κατά την εξέλιξη της διαδικασίας διαπομπής. Στην επόμενη εκδοχή του προβλήματος μεγιστοποίησης έχουν γίνει οι απαραίτητες προσθήκες ώστε να συνυπολογίζονται όλοι οι απαραίτητοι δείκτες επίδοσης του δικτύου:

$$\begin{aligned}
& \max\{\sum_{k \in K} R_k\}, \text{ υπό τους όρους:} \\
& P_{cov} \geq P_{cov}^{min} \\
& SHOO_m \leq SHOO^{max} \text{ για } \forall m \in M \\
& \left. \begin{aligned} \eta_m^{max} & \in H^{max} \\ p_m^{CPICH} & \in P^{CPICH} \\ sho_m^{add} & \in SHO^{add} \end{aligned} \right\} \text{ για } \forall m \in M
\end{aligned}$$

Εικόνα 64: Περιγραφή προβλήματος μεγιστοποίησης χωρητικότητας με περιορισμούς

Η διαφοροποίηση του δεύτερου προβλήματος που περιγράφεται στην Εικόνα 64 δεν ευνοεί τις λύσεις, όπου για παράδειγμα προς όφελος της χωρητικότητας και εις βάρος της κάλυψης αυξάνεται υπερβολικά το όριο για το συντελεστή φορτίου ή αντίστοιχα μειώνεται σημαντικά η ισχύς εκπομπής του *P-CPICH* πιλοτικού καναλιού. Επίσης, εφόσον πρακτικά δεν πραγματοποιούνται δυναμικές προσομοιώσεις για να εξετασθεί το φαινόμενο της διαπομπής, εξασφαλίζεται ότι αποφεύγονται οι σχεδιασμοί όπου ένα μεγάλο μέρος των πόρων ενός σταθμού βάσης δεσμεύεται για την εξυπηρέτηση *SHO* συνδέσεων.

Εδώ αξίζει να σημειωθεί ότι η αναζήτηση για τις βέλτιστες τιμές των παραμέτρων εισόδου δεν χρειάζεται να εφαρμόζεται κάθε φορά για όλους τους σταθμούς βάσης του δικτύου. Αντιθέτως, είναι πολύ πιο αποδοτικό και απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο η αναζήτηση να περιορίζεται στους προβληματικούς σταθμούς βάσης. Συγκεκριμένα, το σενάριο προσομοίωσης αφορά αρχικά μια περιοχή με ομοιόμορφα κατανεμημένους χρήστες, για την οποία οι παράμετροι κάθε σταθμού έχουν την ίδια τιμή και η επίδοση του δικτύου είναι ικανοποιητική. Στη συνέχεια, γίνεται η προσθήκη *hot spots* που οδηγούν συνήθως σε επιμέρους προβληματικές περιοχές, όπου πολλοί χρήστες δεν γίνονται δεκτοί ή δεν ικανοποιούνται οι περιορισμοί που έχουν τεθεί για την κάλυψη και τις διαπομπές. Σε αυτή την περίπτωση αρκεί να βρεθούν οι βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους των σταθμών βάσης που εξυπηρετούν τις συγκεκριμένες περιοχές. Ωστόσο, ενδέχεται μετά τις αλλαγές να μην έχει βρεθεί ικανοποιητική λύση ή να έχουν δημιουργηθεί νέα προβλήματα σε γειτονικές περιοχές, λόγω για παράδειγμα της αύξησης του επιπέδου παρεμβολών. Για αυτό το λόγο ακολουθείται μια επαναληπτική διαδικασία, όπου κάθε φορά αυξάνεται το σύνολο των σταθμών προς βελτιστοποίηση.

Ο βασικός πυρήνας της διαδικασίας επίλυσης σχεδιασμού του δικτύου 3^{ης} γενιάς περιλαμβάνει την εύρεση των βέλτιστων τιμών για τις παραμέτρους εισόδου με τη χρήση των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Όσον αφορά την υλοποίηση των αλγορίθμων, κάθε σημείο αναζήτησης είναι βολικό να αναπαρασταθεί ως ένα διάνυσμα

μήκους $[M_{opt}] \times 3$, όπου M_{opt} είναι το σύνολο με τους σταθμούς προς βελτιστοποίηση. Ο συντελεστής έχει προκύψει από τον αριθμό των παραμέτρων εισόδου. Κάθε στοιχείο της πιθανής λύσης x παίρνει συνεχείς τιμές από τα αντίστοιχα σύνολα που περιγράφονται στα προηγούμενα σχήματα. Η απλοϊκή αντικειμενική συνάρτηση μεγιστοποίησης για το πρώτο πρόβλημα $f : \mathbb{R}^{[M_{opt}] \times 3} \rightarrow \mathbb{R}$ εκφράζεται ως εξής:

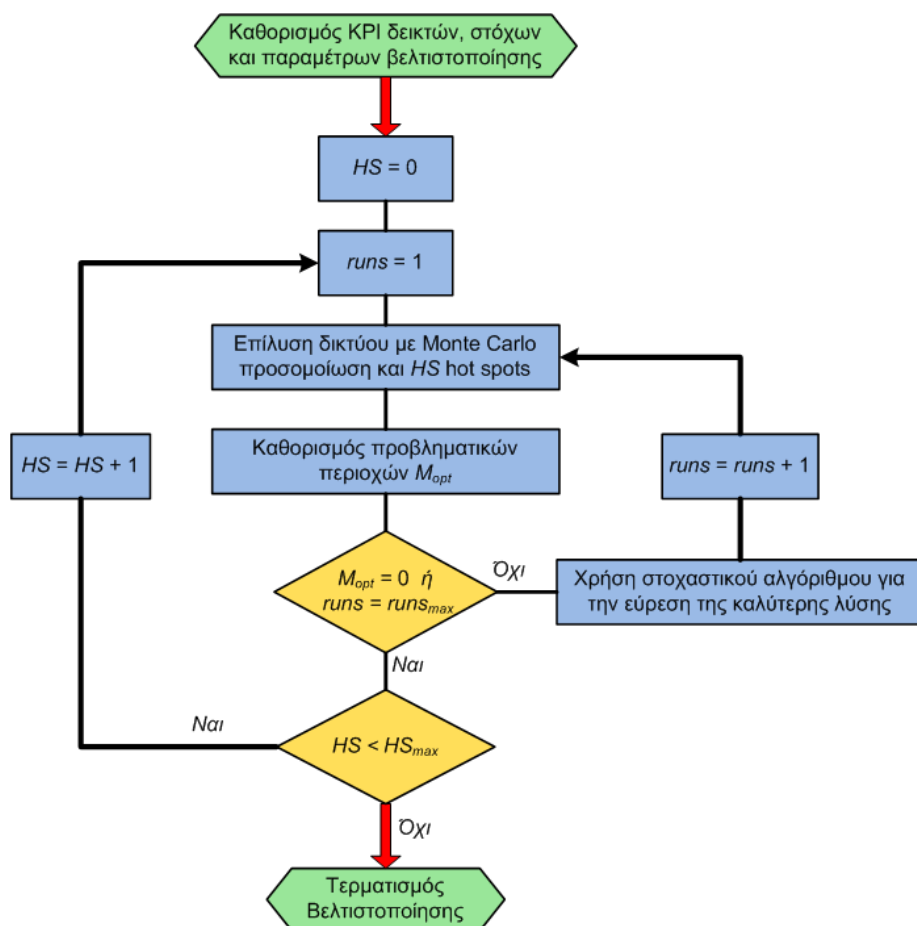
$$f(x) = \sum_{k \in K} R_k \quad (62)$$

Από την άλλη πλευρά, όταν χρησιμοποιούνται οι περιορισμοί, η αντικειμενική συνάρτηση προκύπτει ως άθροισμα περισσότερων όρων, σύμφωνα με την Εικόνα 64. Πρόκειται για μια χαρακτηριστική περίπτωση όπου μπορεί να χρησιμοποιηθεί μια *penalty function*, όπως παρουσιάστηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο και συγκεκριμένα στην εξίσωση (5). Τελικά, η αντικειμενική συνάρτηση με περιορισμούς έχει τη μορφή:

$$f(x) = w_1 \sum_{k \in K} R_k + w_2 \min[P_{cov} - P_{cov}^{min}, 0] + w_3 \sum_{m \in M} \min[SHOO^{max} - SHOO_m, 0] \quad (63)$$

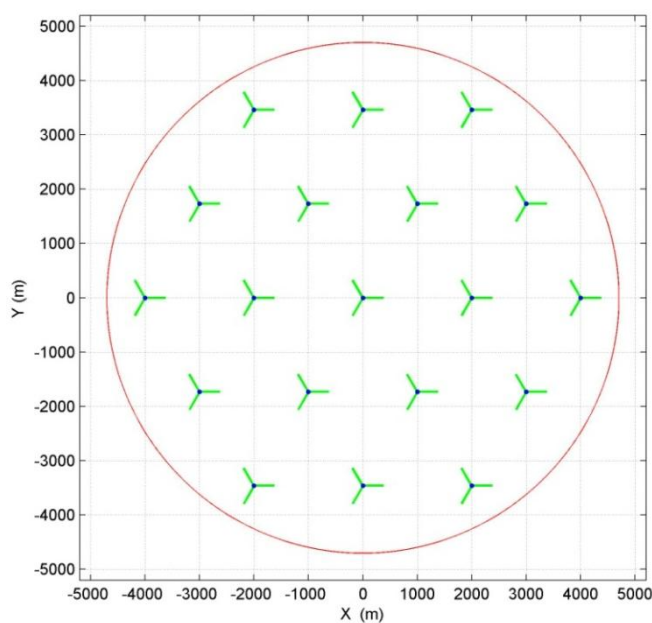
όπου w_1, w_2 και w_3 είναι θετικοί συντελεστές βάρους σε κατάλληλη κλίμακα και η συνάρτηση $\min[\alpha, \beta]$ συγκρίνει τις δύο τιμές α, β και επιστρέφει την μικρότερη. Η εξίσωση αυτή υποδηλώνει ότι η τιμή της $f(x)$ μειώνεται από τους δύο πρόσθετους όρους που πρακτικά προσμετρούν την επίδραση που θα έχει το μέτρο της παραβίασης των περιορισμών. Προφανώς, για τη βέλτιστη λύση x' η τιμή της $f(x')$ είναι η μεγαλύτερη δυνατή.

Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου για την αντιμετώπιση του προβλήματος σχεδιασμού και βελτιστοποίησης ενός δικτύου 3^{ης} γενιάς. Με HS_{max} συμβολίζεται ο μέγιστος αριθμός *hot spots* που εξετάζεται και $runs_{max}$ είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που επιτρέπεται να γίνει για κάθε αριθμό *hot spots* και κατά τη εξέλιξη των οποίων, αν δεν έχει βρεθεί ικανοποιητική λύση, αυξάνεται το σύνολο των σταθμών προς βελτιστοποίηση.



Εικόνα 65: Διαδικασία επίλυσης προβλήματος βελτιστοποίησης

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόζεται στη συνέχεια για την επίλυση του προβλήματος σε ένα αστικό περιβάλλον με δύο σειρές (*tiers*) από σταθμούς βάσης με τρεις τομείς. Στο επόμενο σχήμα φαίνεται η διάταξη του δικτύου προσομοίωσης.



Εικόνα 66: Σενάριο προσομοίωσης

Στο παραπάνω σχήμα, ο κύκλος οριοθετεί την περιοχή ενδιαφέροντος, μέσα στην οποία κατανέμονται τυχαία οι χρήστες του δικτύου και για την οποία κατά επέκταση υπολογίζεται η πιθανότητα κάλυψης. Επίσης διακρίνεται η θέση των σταθμών βάσης και η κατεύθυνση της κεραίας των τομέων. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται συνοπτικά τα κυριότερα χαρακτηριστικά του δικτύου, των παραμέτρων προς βελτιστοποίηση και της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος. Σημειώνεται ότι για τις παραμέτρους των χρηστών ισχύουν όσα περιέχει ο Πίνακας 2.

Παράμετροι Σταθμού βάσης	
Αριθμός σταθμών / τομέων	19 / 57
Μέγιστη συνολική ισχύς P^{max}	43 dBm
Μέγιστη ισχύς ανά ζεύξη p^{DLmax}	33 dBm
Κεραίες	70° / 17 dBi
Απαιτούμενος $SINR$ γ^{CPICH}	-18 dB
Παράμετροι Βελτιστοποίησης	
Ισχύς πιλοτικού καναλιού P^{CPICH}	[26, 33] dBm
Μέγιστο φορτίο H^{max}	[0.6, 0.95] %
Περιθώριο προσθήκης SHO^{add}	[1, 8] dB
Ελάχιστη απαιτούμενη κάλυψη p_{cov}^{min}	98.5 %
Μέγιστος συντελεστής SHO^{max}	0.6
Παράμετροι Συστήματος	
Μοντέλο διάδοσης	Στοχαστικό Cost 231
<i>Multipath</i> κανάλι	ITU Vehicular A
Επαναλήψεις προσομοιώσεων	500 / διάταξη

Πίνακας 9: Παράμετροι για το πρόβλημα βελτιστοποίησης

Στο δίκτυο αρχικά οι χρήστες είναι ομοιόμορφα κατανεμημένοι σε όλη την περιοχή με ρυθμούς μετάδοσης 12.2 και 64 kbps. Στη συνέχεια, σε κάθε θεωρούμενο *hot spot* τοποθετούνται τυχαία πρόσθετοι χρήστες (*hot spots*) με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνεται η ακριβής κατανομή των χρηστών ανά υπηρεσία.

Υπηρεσία (kbps)	12.2	64	144	384
Αρχικοί χρήστες	600	300	-	-
Ανά <i>hot spot</i>	30	12	6	2

Πίνακας 10: Αριθμός χρηστών ανά υπηρεσία για το πρόβλημα βελτιστοποίησης

Για την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού εφαρμόστηκε ο στοχαστικός αλγόριθμος *PSO* και τρία διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης. Αρχικά εξετάζεται η περίπτωση όπου οι παράμετροι εισόδου έχουν σταθερές τιμές που οδηγούν σε ικανοποιητική απόδοση για το

δίκτυο με ομοιόμορφη κατανομή χρηστών, δηλαδή χωρίς *hot spots*. Συγκεκριμένα, σε αυτή την περίπτωση ισχύει:

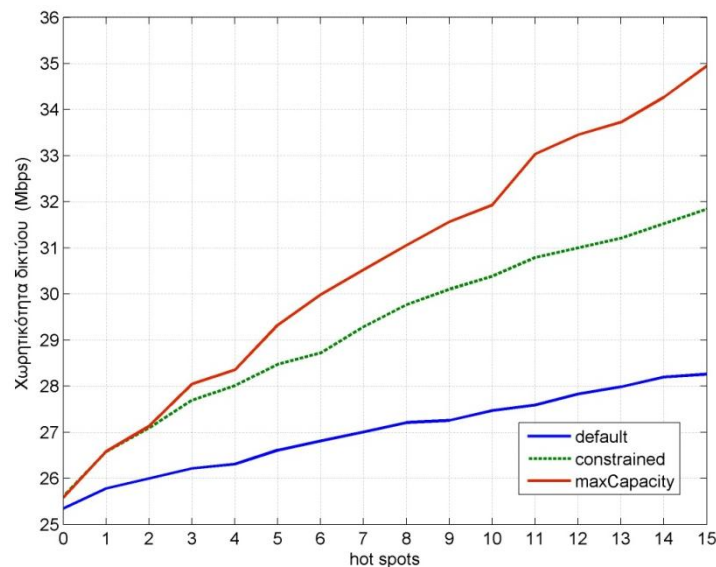
$$\left. \begin{array}{l} \eta_m^{max} = 0.6 \\ p_m^{CPICH} = 30 \text{ dBm} \\ sho_m^{add} = 3 \text{ dB} \end{array} \right\} \text{για } \forall m \in M \quad (64)$$

Έπειτα εφαρμόζονται οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις των σχέσεων (62) και (63) που αντιστοιχούν στο πρόβλημα μεγιστοποίησης χωρητικότητας χωρίς και με περιορισμούς. Αναφορικά με την υλοποίηση της τεχνικής *PSO*, ο επόμενος πίνακας παρουσιάζει τις βασικότερες παραμέτρους:

Αριθμός <i>particles</i>	100
Επαναλήψεις	500
Συντελεστές έλξης	$[c_1, c_2] = [2, 2]$
Ορισμός γειτονιάς	Κυκλική
Τεχνική	Συντελεστής αδράνειας $[0.9, 0.4]$

Πίνακας 11: Παράμετροι *PSO* για το πρόβλημα βελτιστοποίησης

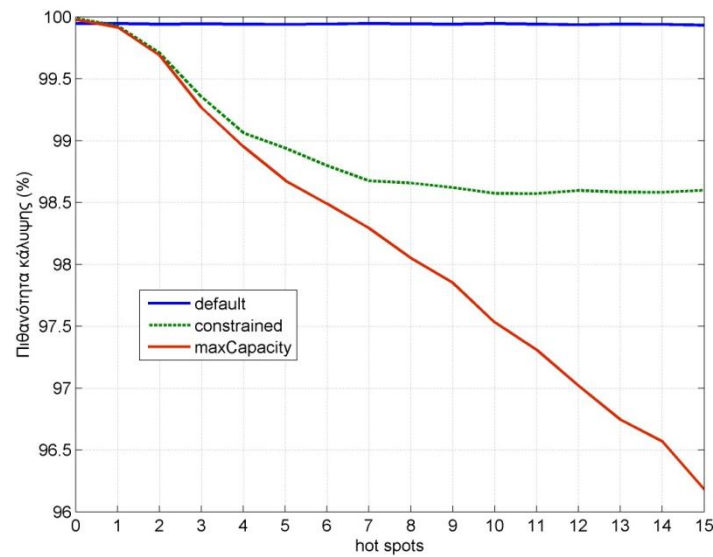
Στην επόμενη γραφική παράσταση διακρίνεται η χωρητικότητα του δικτύου ανά αριθμό *hot spots* για τα τρία διαφορετικά σενάρια προσομοίωσης που για λόγους ευκολίας ονομάζονται *default*, *maxCapacity* και *constrained* αντίστοιχα.



Εικόνα 67: Χωρητικότητα δικτύου ανά *hot spot*

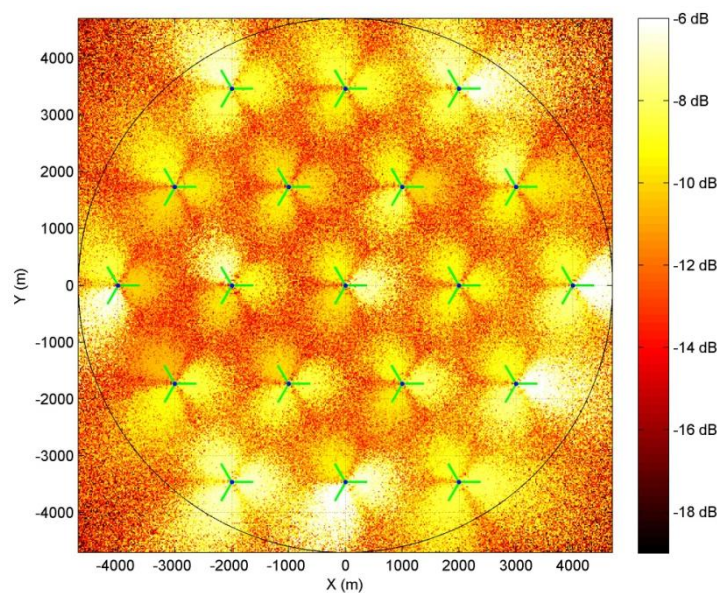
Από τη γραφική παράσταση διαπιστώνεται ότι ο συνυπολογισμός των περιορισμών επηρεάζει σημαντικά το αποτέλεσμα, το οποίο και γίνεται πιο αισθητό καθώς αυξάνεται ο αριθμός των *hot spots*. Αυτό είναι λογικό, καθώς πολλές λύσεις που οδηγούν σε υψηλή χωρητικότητα έχουν πλέον χειρότερη τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση λόγω της

παραβίασης των περιορισμών. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η πιθανότητα κάλυψης για τα αντίστοιχα τρία σενάρια προσομοίωσης:

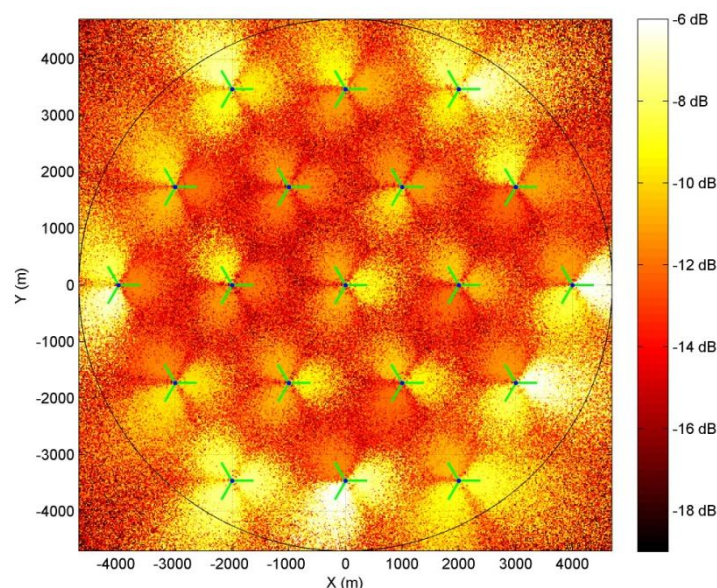


Εικόνα 68: Πιθανότητα κάλυψης ανά *hot spot*

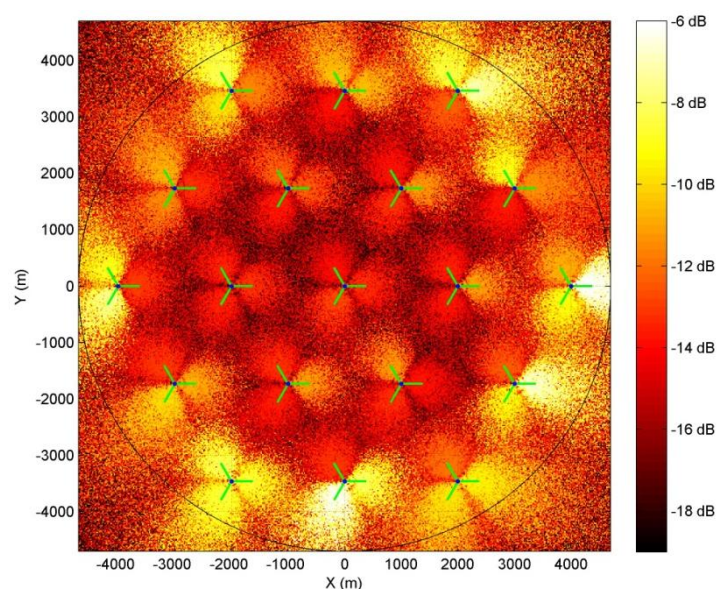
Εδώ διαπιστώνεται ότι το *default* σενάριο διατηρεί πολύ υψηλό ποσοστό κάλυψης εις βάρος όμως της περιορισμένης χωρητικότητας. Αντίθετα, στην περίπτωση όπου δεν υπάρχουν περιορισμοί το ποσοστό φθάνει μέχρι το 96% περίπου, ενώ με τον συνυπολογισμό τους εξασφαλίζεται ότι δεν πέφτει χαμηλότερα από την καθορισμένη ελάχιστη απαιτούμενη τιμή του 98.5%. Για καλύτερη ανάλυση της επίδοσης κάθε σεναρίου, ακολουθούν τρία σχήματα με τα αντίστοιχα επίπεδα *SINR* για το πιλοτικό κανάλι σε όλη την εξεταζόμενη περιοχή, ενδεικτικά για ένα στιγμιότυπο με 15 *hot spots*.



Εικόνα 69: *SINR* πιλοτικού καναλιού για το *default* σενάριο



Εικόνα 70: *SINR* πιλοτικού καναλιού για το *constrained* σενάριο

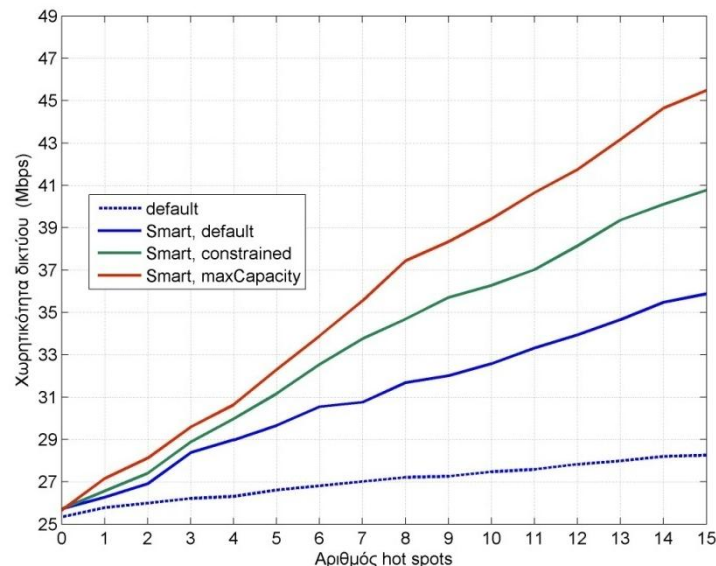


Εικόνα 71: *SINR* πιλοτικού καναλιού για το *maxCapacity* σενάριο

Από τα προηγούμενη σχήματα φαίνεται καθαρά η διαφορά ανάμεσα στα τρία σενάρια για το επίπεδο του *SINR* πιλοτικού καναλιού. Η πιθανότητα κάλυψης σταδιακά μειώνεται προς όφελος της χωρητικότητας. Όμως από την Εικόνα 71 διαπιστώνεται ότι πλέον οι περιοχές κάλυψης έχουν μειωθεί αισθητά, γεγονός που προφανώς δεν είναι επιθυμητό για τη λειτουργία του δικτύου. Αντίθετα, στο *constrained* σενάριο υλοποίησης η επιδείνωση αυτή μπορεί να διατηρηθεί μέσα στα επιτρεπτά όρια, όπως φαίνεται στην Εικόνα 70.

Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση που μπορεί να έχει στη βελτιστοποίηση του δικτύου η εφαρμογή εξελιγμένων τεχνικών όπως οι έξυπνες κεραίες και τα συστήματα *MIMO*. Αρχικά

χρησιμοποιούνται προσαρμοστικές κεραιές στους σταθμούς βάσης που εξυπηρετούν τα *hot spots*. Συγκεκριμένα στρέφονται λοβοί προς τις περιοχές όπου υπάρχουν οι χρήστες με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης και έπειτα με τον σχηματισμό νέων λοβών εξασφαλίζεται η κάλυψη σε ολόκληρη την περιοχή του τομέα. Εδώ σημειώνεται ότι τελικά η γωνιακή διαφορά ανάμεσα στις κατευθύνσεις των λοβών που προκύπτουν πρέπει να κυμαίνεται μέσα σε ένα καθορισμένο επιθυμητό εύρος. Ένας απλός αλγόριθμος που το επιτυγχάνει αυτό μπορεί να βρεθεί στο [87]. Σε κάθε περίπτωση η χρήση των έξυπνων κεραιών γίνεται με χρήση του δευτερεύοντος πιλοτικού καναλιού *S-CPICH*, καθώς οδηγεί σε καλύτερη επίδοση του δικτύου όπως έχει αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα. Στο επόμενο σχήμα διακρίνεται η βέλτιστη χωρητικότητα του δικτύου ανά αριθμό *hot spots* για την περίπτωση των έξυπνων κεραιών με $M_T = 5$ στοιχεία. Για λόγους σύγκρισης έχει διατηρηθεί η γραφική παράσταση από το *default* σενάριο χωρίς έξυπνες κεραιές.

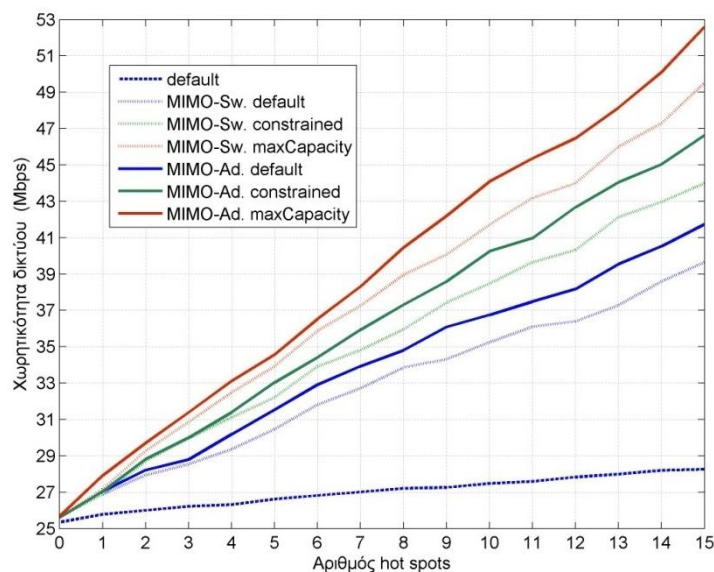


Εικόνα 72: Χωρητικότητα δικτύου ανά *hot spot* με έξυπνες κεραιές

Από το σχήμα παρατηρείται ότι με τη χρήση των έξυπνων κεραιών η χωρητικότητα του δικτύου αυξάνεται σημαντικά. Όπως και προηγουμένως, οι περιορισμοί συγκρατούν την αύξηση της επίδοσης που ωστόσο είναι σε κάθε περίπτωση υψηλή. Για παράδειγμα, συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα από την Εικόνα 67 για 15 *hot spots* διαπιστώνεται ότι η αύξηση της χωρητικότητας κυμαίνεται από 8 έως 10 Mbps περίπου.

Έπειτα, για την υλοποίηση του *MIMO* συστήματος εφαρμόζεται το σενάριο όπου εκτός από τους σταθμούς βάσης, οι χρήστες που βρίσκονται στα *hot spots* με υψηλούς ρυθμούς μετάδοσης έχουν στοιχειοκεραίες στο κινητό τους τερματικό. Εδώ εξετάζονται δύο πιθανές εκδοχές για το σχηματισμό του διαγράμματος ακτινοβολίας από την κεραία του κινητού.

Αρχικά υλοποιείται η τεχνική μεταγωγής κύριου λοβού (*MIMO-switched*) όπου σχηματίζεται ένα πλέγμα από τέσσερις λοβούς και τελικά επιλέγεται αυτός που οδηγεί στην μικρότερη εκπεμπόμενη ισχύ. Κατά τη δεύτερη εκδοχή (*MIMO-adaptive*) σχηματίζεται ένας λοβός προς την κατεύθυνση του σταθμού βάσης που εξυπηρετεί το χρήστη, δηλαδή πρόκειται για τεχνική προσαρμοστικής κεραίας. Στο επόμενο σχήμα διακρίνεται η βέλτιστη χωρητικότητα του δικτύου ανά αριθμό *hot spots* για την περίπτωση του *MIMO* συστήματος με $M_R = 2$ στοιχεία.



Εικόνα 73: Χωρητικότητα δικτύου ανά *hot spot* με *MIMO*

Από το σχήμα φαίνεται ότι με τη χρήση ενός απλού συστήματος *MIMO*, με 2 μόνο στοιχεία στο κινητό, η χωρητικότητα του δικτύου αυξάνεται ακόμα περισσότερο για όλα τα σενάρια. Η εκδοχή με την μεταγωγή λοβού όπως είναι λογικό υστερεί ως προς την εναλλακτική τεχνική με τις προσαρμοστικές κεραίες. Ωστόσο σε αυτή την περίπτωση η υλοποίηση είναι πιο εύκολη αφού δεν χρειάζονται οι αλγόριθμοι για την εύρεση της κατάλληλης κατεύθυνσης σχηματισμού λοβών. Συγκρίνοντας με τα αποτελέσματα για τις έξυπνες κεραίες από την Εικόνα 72 διαπιστώνεται ότι η βελτίωση της χωρητικότητας για το σενάριο χωρίς περιορισμούς *MIMO-adaptive* είναι 8Mbps για 15 *hot spots*, ενώ η διαφορά με *MIMO-switched* είναι περίπου 4Mbps. Για καλύτερη ανάγνωση των αποτελεσμάτων ακολουθεί σχετικός συγκεντρωτικός πίνακας, όπου τα σενάρια προσομοιώσεων *default*, *constrained* και *maxCapacity* συμβολίζονται με d , c και m αντίστοιχα.

Hot Spots	Χωρητικότητα δικτύου (Mbps)											
	Συμβατικό δίκτυο			Έξυπνες κεραιές			MIMO-switched			MIMO-adaptive		
	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>m</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>m</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>m</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	<i>m</i>
0	25346	25610	25583	25618	25630	25661	25627	25675	25678	25651	25676	25688
1	25781	26580	26587	26266	26569	27157	26873	26896	27174	27033	27114	27912
2	25997	27091	27134	26903	27412	28119	27935	28729	29272	28213	28839	29702
3	26217	27696	28045	28378	28842	29583	28544	29961	30854	28790	29945	31389
4	26311	28014	28353	28977	30007	30640	29366	31116	32482	30188	31471	33115
5	26613	28472	29328	29659	31162	32296	30465	32207	33926	31527	33027	34564
6	26812	28720	29986	30545	32571	33890	31811	33935	35878	32911	34485	36523
7	27011	29289	30525	30755	33816	35548	32723	34801	37246	33927	35884	38310
8	27213	29769	31056	31683	34731	37439	33859	35977	38954	34808	37337	40456
9	27257	30105	31567	32006	35698	38340	34308	37424	40072	36084	38621	42197
10	27473	30385	31928	32577	36306	39415	35245	38467	41711	36751	40278	44086
11	27590	30792	33033	33324	36902	40654	36100	39644	43184	37480	40963	45361
12	27832	31014	33453	33942	38157	41745	36395	40322	44007	38179	42681	46472
13	27986	31214	33725	34660	39355	43167	37285	42127	45991	39546	44152	48149
14	28199	31527	34268	35474	40101	44643	38596	42970	47292	40528	45035	50106
15	28261	31840	34949	35889	40798	45487	39655	43996	49516	41738	46678	52596

Πίνακας 12: Αποτελέσματα χωρητικότητας συστήματος ανά *hot spot*

Συμπερασματικά, η συνεισφορά από την αντιμετώπιση του προβλήματος σχεδιασμού και βελτιστοποίησης επικεντρώνεται στα επόμενα βασικά σημεία. Πρώτον, προτείνεται μια ευέλικτη μεθοδολογία που μπορεί να οδηγήσει στον επιθυμητό σχεδιασμό, ανάλογα με τα κριτήρια και τους περιορισμούς που θέτονται, με βάση τον πολύ αποδοτικό στοχαστικό αλγόριθμο *PSO*. Έπειτα, η βελτιστοποίηση που πραγματοποιείται γίνεται για ακριβές μοντέλο του δικτύου 3^{ης} γενιάς και ανά σταθμό βάσης, σε αντίθεση με τις απλοϊκές προσεγγίσεις που ρυθμίζουν τις παραμέτρους συγκεντρωτικά. Τέλος, γίνεται εκτενής ανάλυση της βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με τις προηγμένες τεχνικές των έξυπνων κεραιών και των συστημάτων *MIMO*.

6 ΔΙΚΤΥΑ ΕΥΡΥΕΚΠΟΜΠΗΣ ΕΠΙΓΕΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗΣ (DVB-T)

6.1 Εισαγωγή στην Ψηφιακή Τηλεόραση

Η ψηφιακή τηλεόραση είναι ίσως η σημαντικότερη εξέλιξη στην τηλεοπτική τεχνολογία, μετά την εμφάνιση της έγχρωμης τηλεόρασης στη δεκαετία του '50. Η εισαγωγή της ψηφιακής τηλεόρασης είναι μια πραγματικότητα που επιβάλλεται, τόσο από τις ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις (πρότυπο ψηφιακής μετάδοσης εικόνας *DVB-T*), όσο και από τις υποχρεώσεις απέναντι σε διεθνείς οντότητες και οργανισμούς, όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση και η *ITU* (International Telecommunication Union), για τερματισμό της αναλογικής μετάδοσης σε περιορισμένο σχετικά χρονικό ορίζοντα. Τα οφέλη που προκύπτουν για τον καταναλωτή σε σύγκριση με την αναλογική τηλεόραση είναι:

- Καλύτερη εντύπωση λόγω της ευκρινέστερης εικόνας υψηλής ποιότητας, καθώς και του βελτιωμένου ήχου.
- Περισσότερη ευελιξία και πληθώρα επιλογών μέσω της αύξησης των νέων τηλεοπτικών προγραμμάτων που προσφέρονται παράλληλα με τα κανονικά προγράμματα, λόγω της αποδοτικότερης χρήσης του φάσματος.
- Πληρέστερες υπηρεσίες δεδομένων πληροφόρησης/ενημέρωσης που οδηγούν στη μεγαλύτερη συμμετοχή του θεατή, μέσω της προσφερόμενης διαδραστικότητας.
- Μεγαλύτερη ευελιξία, χάρη στην καλύτερη λήψη φορητών και κινητών συσκευών.
- Καλύτερη εξυπηρέτηση των ηλικιωμένων ατόμων και των ατόμων με αναπηρία, παρέχοντας βοηθητικές υπηρεσίες όπως ο βελτιωμένος υποτιτλισμός, ο ηχητικός σχολιασμός και ο σχολιασμός με σύμβολα.
- Συγκλίνουσες υπηρεσίες που συνδυάζουν χαρακτηριστικά κινητής τηλεφωνίας και επίγειων ραδιοτηλεοπτικών εκπομπών, όπως η μετάδοση δεδομένων σε κινητά τηλέφωνα.
- Νέες υπηρεσίες ηλεκτρονικών επικοινωνιών που διαφέρουν από τις σταθερές και κινητές υπηρεσίες που προσφέρονται σήμερα, όπως τα ασύρματα τοπικά δίκτυα και τα ασύρματα μητροπολιτικά δίκτυα.

Τα ανωτέρω οφέλη προκύπτουν κυρίως από την δυνατότητα επεξεργασίας και συμπίεσης των ψηφιακών δεδομένων, καθιστώντας πολύ πιο αποδοτική τη χρήση της χωρητικότητας του δικτύου σε σύγκριση με την περίπτωση των αναλογικών σημάτων. Ένα επιπλέον σημαντικό όφελος είναι η πρόσθετη χωρητικότητα φάσματος που απελευθερώνεται από την κατάργηση της αναλογικής επίγειας τηλεόρασης, καθώς η ψηφιακή τηλεόραση είναι

σημαντικά πιο αποδοτική (3 έως 6 φορές). Στη συνέχεια, αναφέρονται οι τρεις κύριες μορφές της ψηφιακής τηλεόρασης:

1. Δορυφορική Τηλεόραση

Η ψηφιακή δορυφορική μετάδοση προσφέρει τη δυνατότητα έως και 500 πρόσθετων καναλιών (10 φορές περισσότερο από τη δυνατότητα ενός αναλογικού δορυφόρου). Έχει το τεχνικό πλεονέκτημα ότι οι υπηρεσίες είναι αμέσως διαθέσιμες οπουδήποτε στη περιοχή κάλυψης του δορυφόρου, ακόμη και σε ξένα ακροατήρια. Το κύριο μειονέκτημά της είναι ότι ο δορυφόρος δεν επιτρέπει αμφίδρομη επικοινωνία, με αποτέλεσμα η επίτευξη αλληλεπίδρασης να στηρίζεται συνήθως σε μια τηλεφωνική γραμμή και να απαιτεί την ύπαρξη ειδικής συσκευής (*modem*).

2. Καλωδιακή Τηλεόραση

Τα καλωδιακά δίκτυα έχουν το πλεονέκτημα ότι υποστηρίζουν αμφίδρομη μετάδοση. Ωστόσο, ακόμα και στην αναλογική της μορφή, η καλωδιακή τηλεόραση μπορεί να είναι ασύμφορη σε περιοχές με χαμηλή πυκνότητα πληθυσμού. Παρόλα αυτά η καλωδιακή τηλεόραση έχει αναμφισβήτητα βοηθήσει στην διείσδυση της ψηφιακής τηλεόρασης. Εκτός από την ικανότητα για 500 κανάλια ψηφιακής τηλεόρασης, (όπως και στη δορυφορική), έχει το πλεονέκτημα ότι επιτρέπει επίσης την παροχή τηλεφωνικών υπηρεσιών και πρόσβαση σε δίκτυο ευρείας ζώνης.

3. Επίγεια Τηλεόραση

Με τη χρήση μιας κανονικής τηλεοπτικής κεραίας, οι καταναλωτές μπορούν να λάβουν ψηφιακά σήματα τα οποία μεταδίδονται από επίγειους σταθμούς μετάδοσης. Η μοναδική απαίτηση είναι η ύπαρξη μιας συσκευής (*Set Top Box - STB*) που μετατρέπει τα σήματα ξανά σε αναλογική μορφή, εκτός και αν ο καταναλωτής διαθέτει έναν δέκτη ψηφιακής τηλεόρασης. Η ψηφιακή επίγεια τηλεόραση προσφέρει μεγαλύτερο αριθμό προγραμμάτων από την επίγεια αναλογική μετάδοση. Ωστόσο, αυτός ο αριθμός είναι μικρότερος από την αντίστοιχη δυνατότητα της αναλογικής καλωδιακής ή της δορυφορικής τηλεόρασης, και κατά πολύ μικρότερος από τις ψηφιακές εκδόσεις αυτών των πλατφορμών. Το μεγάλο πλεονέκτημά της είναι η φορητότητα και το μικρό κόστος, καθώς δεν υπάρχει καμία απαίτηση για ακριβό εξοπλισμό, όπως πιάτα λήψης ή καλώδια.

Η μετάδοση της ψηφιακής τηλεόρασης ξεκίνησε το 1996, και ειδικότερα στην Ευρωπαϊκή Ένωση άρχισε μέσω δορυφόρου, μετά με καλωδιακή τηλεόραση, και τέλος με επίγεια μετάδοση. Η ψηφιακή τηλεόραση έχει πρωτοπαρουσιαστεί με διαφορετικούς τρόπους σε κάθε χώρα, ανάλογα με την αναλογική τηλεοπτική κατάσταση που υπάρχει. Για παράδειγμα, χώρες όπως το Λουξεμβούργο και το Βέλγιο χρησιμοποιούν σχεδόν αποκλειστικά καλωδιακή τηλεόραση, η Γερμανία, η Αυστρία και η Σουηδία συνδυάζουν καλωδιακή και δορυφορική λήψη, ενώ η Ελλάδα, μαζί με την Ιταλία και την Γαλλία ανήκουν στις χώρες όπου ο κύριος μηχανισμός μετάδοσης παραμένει η επίγεια μετάδοση. Στο πλαίσιο της παρούσας διατριβής, θα παρουσιαστούν θέματα που αφορούν την επίγεια ψηφιακή τηλεόραση, η οποία αποτελεί άλλωστε και την βασική τεχνολογία που αφορά την Ελλάδα.

6.2 Βασικές Παράμετροι Συστήματος Επίγειας Ψηφιακής Τηλεόρασης

6.2.1 Κανάλια και Ζώνες Συχνοτήτων

Σύμφωνα με τις συστάσεις της *ITU* και τις σχετικές διεθνείς συμφωνίες, η μετάδοση τηλεοπτικού σήματος (ψηφιακού και αναλογικού) λαμβάνει χώρα στις ζώνες *VHF* και *UHF*, που βρίσκονται αντίστοιχα στις περιοχές 174 – 230 MHz και 470 – 862 MHz. Η ζώνη *VHF* ταυτίζεται με την *Band III*, ενώ η *UHF* χωρίζεται στις *Band IV* (470-582 MHz) και *Band V* (582-862 MHz). Ο διαχωρισμός του διαθέσιμου φάσματος σε τρεις διαφορετικές ζώνες είναι ιδιαίτερα σημαντικός, γιατί σε κάθε ζώνη αλλάζει σημαντικά η διάδοση του σήματος. Η *Band III* χωρίζεται σε κανάλια των 7 MHz, ενώ οι *Bands IV* και *V* σε κανάλια των 8 MHz, όπως φαίνεται και στους παρακάτω πίνακες [88].

Κανάλι	Εύρος καναλιού (MHz)		Φέρουσα Εικόνας (MHz)	Φέρουσα Ήχου (MHz)
5	174	181	175.25	180.75
6	181	188	182.25	187.75
7	188	195	189.25	194.75
8	195	202	196.25	201.75
9	202	209	203.25	208.75
10	209	216	210.25	215.75
11	216	223	217.25	222.75
12	223	230	224.25	229.75

Πίνακας 13: VHF σύστημα

Κανάλι	Εύρος καναλιού (MHz)		Φέρουσα Εικόνας (MHz)	Φέρουσα Ήχου (MHz)	Κανάλι	Εύρος καναλιού (MHz)		Φέρουσα Εικόνας (MHz)	Φέρουσα Ήχου (MHz)
21	470	478	471.25	476.75	46	670	678	671.25	676.75
22	478	486	479.25	484.75	47	678	686	679.25	684.75
23	486	494	487.25	492.75	48	686	694	687.25	692.75
24	494	502	495.25	500.75	49	694	702	695.25	700.75
25	502	510	503.25	508.75	50	702	710	703.25	708.75
26	510	518	511.25	516.75	51	710	718	711.25	716.75
27	518	526	519.25	524.75	52	718	726	719.25	724.75
28	526	534	527.25	532.75	53	726	734	727.25	732.75
29	534	542	535.25	540.75	54	734	742	735.25	740.75
30	542	550	543.25	548.75	55	742	750	743.25	748.75
31	550	558	551.25	556.75	56	750	758	751,25	756,75
32	558	566	559.25	564.75	57	758	766	759,25	764,75
33	566	574	567.25	572.75	58	766	774	767,25	772,75
34	574	582	575.25	580.75	59	774	782	775,25	780,75
35	582	590	583.25	588.75	60	782	790	783,25	788,75
36	590	598	591.25	596.75	61	790	798	791,25	796,75
37	598	606	599.25	604.75	62	798	806	799,25	804,75
38	606	614	607.25	612.75	63	806	814	807,25	812,75
39	614	622	615.25	620.75	64	814	822	815,25	820,75
40	622	630	623.25	628.75	65	822	830	823,25	828,75
41	630	638	631.25	636.75	66	830	838	831,25	836,75
42	638	646	639.25	644.75	67	838	846	839,25	844,75
43	646	654	647.25	652.75	68	846	854	847,25	852,75
44	654	662	655.25	660.75	69	854	862	855,25	860,75
45	662	670	663.25	668.75					

Πίνακας 14: UHF σύστημα

Εδώ, αξίζει να σημειωθεί ότι από χώρα σε χώρα παρατηρούνται διαφοροποιήσεις. Ωστόσο, οι συγκεκριμένοι πίνακες ισχύουν για ένα μεγάλο αριθμό χωρών συμπεριλαμβανομένης και της Ελλάδας.

6.2.2 Επιθυμητός τύπος λήψης

Μια ιδιαίτερα σημαντική παράμετρος του προβλήματος σχεδίασης ενός δικτύου μετάδοσης επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης είναι ο επιθυμητός τύπος λήψης. Διακρίνονται τρεις διαφορετικές επιλογές [88],[89]:

1. Σταθερή λήψη (*Fixed Reception*)

Η σταθερή λήψη προκύπτει όταν μια κατευθυντική κεραία εγκαθίσταται στο επίπεδο της οροφής ενός κτιρίου. Κατά την εγκατάσταση θεωρείται ότι στον χώρο γύρω από την κεραία δεν υπάρχουν εμπόδια, τα οποία μπορούν να επηρεάζουν την ακτινοβολία της στο κοντινό πεδίο. Για τον υπολογισμό του πεδίου στην περίπτωση της σταθερής λήψης, μια κεραία 10 μ πάνω από το έδαφος θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει ικανοποιητικά την υπηρεσία ευρυεκπομπής προγραμμαμάτων.

2. Φορητή λήψη (*Portable Reception*)

Η φορητή λήψη διαχωρίζεται σε:

- Κλάση Α (Εξωτερική). Εδώ ο φορητός δέκτης χρησιμοποιείται σε εξωτερικούς χώρους και διαθέτει μια προσαρτημένη ή εσωτερική κεραία σε ύψος τουλάχιστον 1.5 μ πάνω από το έδαφος της γης.
- Κλάση Β (Εσωτερική). Εδώ ο φορητός δέκτης χρησιμοποιείται σε εσωτερικούς χώρους και διαθέτει μια προσαρτημένη ή εσωτερική κεραία σε ύψος τουλάχιστον 1.5 μ πάνω από το δάπεδο δωματίων στο ισόγειο ή με παράθυρο σε εξωτερικό τοίχο.

Οι ακόλουθες παραδοχές ισχύουν και για τις δύο κλάσεις φορητής λήψης:

- Οι βέλτιστες συνθήκες λήψης μπορούν να προκύψουν με μια απλή μετακίνηση της κεραίας κατά 0.5 μ προς οποιαδήποτε κατεύθυνση.
- Τόσο ο φορητός δέκτης όσο και τα μεγάλα αντικείμενα γύρω του δεν κινούνται κατά τη διάρκεια της λήψης.
- Η λήψη σε ερμητικά κλειστά δωμάτια και άλλες παρόμοιες ακραίες περιπτώσεις δε λαμβάνονται υπόψη.

3. Κινητή λήψη

Η κινητή λήψη προκύπτει όταν ο δέκτης είναι σε κίνηση. Για παράδειγμα, μπορεί να πρόκειται για δέκτη αυτοκινήτου ή για προσωπικό εξοπλισμό χειρός. Στην κινητή λήψη η κεραία θεωρείται ότι βρίσκεται σε ύψος τουλάχιστον 1.5 μ από το έδαφος ή από το δάπεδο του ορόφου. Εδώ, το φαινόμενο των ισχυρών διαλείψεων παίζει καθοριστικό παράγοντα και για αυτό το λόγο το κανάλι διάδοσης θεωρείται *Rayleigh*. Για να αντιμετωπιστεί το φαινόμενο των διαλείψεων, προβλέπονται τα κατάλληλα περιθώρια ισχύος (*fade margins*), τα οποία εξαρτώνται τόσο από τη συχνότητα όσο και από την ταχύτητα του δέκτη.

Η επιλογή του τύπου λήψης επηρεάζει άμεσα το σχεδιασμό του δικτύου της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης. Η σταθερή λήψη έχει σαφώς τις μεγαλύτερες ομοιότητες με την υπάρχουσα κατάσταση της αναλογικής τηλεόρασης, όσον αφορά τη δομή του δικτύου που προϋποθέτει. Συγκεκριμένα, επιτυγχάνεται με περιορισμένους αριθμητικά πομπούς σχετικά υψηλής ισχύος. Ωστόσο, η δομή αυτή δεν οδηγεί στην πλήρη εκμετάλλευση των πλεονεκτημάτων που εισάγει η ψηφιακή τεχνολογία, ενώ αποτελεί και δέσμευση σε μελλοντικούς σχεδιασμούς. Οι άλλοι δυο τύποι λήψης προσφέρουν σαφώς μεγαλύτερη ευκολία στο χρήστη, αλλά προϋποθέτουν πολύ αυστηρότερα κριτήρια προστασίας από παρεμβολές και αρκετά διαφορετική δομή δικτύου σε σχέση με την ήδη υπάρχουσα. Συγκεκριμένα, η φορητή λήψη έχει υψηλές απαιτήσεις σε σηματοθορυβικό λόγο, ώστε να επιτυγχάνεται λήψη στο δέκτη. Από την άλλη πλευρά, η κινητή λήψη προϋποθέτει πυκνή δομή δικτύου, ενώ έχει και χαμηλή απόδοση σε ρυθμούς μετάδοσης ανά κανάλι.

6.2.3 Τεχνικά χαρακτηριστικά

Σημαντικότερο ρόλο στην αποδοτική χρήση του φάσματος και γενικότερα στο σχεδιασμό του δικτύου της ψηφιακής τηλεόρασης έχει η επιλογή των τεχνικών παραμέτρων υλοποίησης. Κάθε συνδυασμός των παραμέτρων συνιστά και μια παραλλαγή συστήματος και ουσιαστικά καθορίζει τα κριτήρια σχεδιασμού. Ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των βασικότερων τεχνικών χαρακτηριστικών [90].

- **Είδος Διαμόρφωσης (*modulation*)**

Το είδος διαμόρφωσης καθορίζει τον όγκο πληροφορίας που μπορεί να μεταδοθεί στο φάσμα, ενώ παράλληλα προσδιορίζει και την ανοχή του συστήματος σε παρεμβολές. Τα είδη διαμόρφωσης που χρησιμοποιούνται κυρίως είναι η QPSK (*quadrature phase shift keying*), η 16-QAM (*quadrature amplitude modulation*) και η 64-QAM. Όσον αφορά την ανοχή σε παρεμβολές, η πιο σταθερή μέθοδος διαμόρφωσης είναι η QPSK. Από την άλλη πλευρά, ως προς την απόδοση εύρους ζώνης, η 64-QAM μπορεί να μεταδώσει 4 φορές περισσότερη πληροφορία στο ίδιο εύρος φάσματος συγκριτικά με τις άλλες δύο μεθόδους.

- **Ρυθμός κωδικοποίησης**

Ο ρυθμός κωδικοποίησης υποδηλώνει τον αριθμό των επιπρόσθετων *bits* που εισάγονται στα δεδομένα που μεταδίδονται, έτσι ώστε να έχει τη δυνατότητα ο δέκτης να ανιχνεύσει και να διορθώσει λάθη που τυχόν προκύπτουν. Συγκεκριμένα εκφράζεται μέσω της σχέσης:

$$code\ rate = \frac{[data]\ bits}{[data + coding]\ bits} \quad (65)$$

όπου ο αριθμητής είναι ο αριθμός των *bits* της πληροφορίας που πρέπει να μεταδοθούν και ο παρανομαστής είναι ο αριθμός των *bits* που προκύπτουν όταν η ίδια πληροφορία κωδικοποιηθεί. Οι τιμές του ρυθμού κωδικοποίησης που κυρίως χρησιμοποιούνται είναι 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 και 7/8. Προφανώς, όσο μικρότερη είναι η τιμή του, τόσο περισσότερα είναι τα *bits* που χρησιμεύουν για την αντιμετώπιση λαθών και άρα το σύστημα γίνεται πιο σταθερό. Από την άλλη πλευρά όμως, είναι φανερό ότι αντίστοιχα μειώνεται ο ρυθμός μετάδοσης της πληροφορίας στο δίκτυο, αφού μειώνονται τα ωφέλιμα δεδομένα που μεταδίδονται.

- **Χρονικό διάστημα προστασίας (*guard interval*)**

Η χρησιμότητα του χρονικού διαστήματος προστασίας έγκειται στην αντιμετώπιση των διασυμβολικών παρεμβολών. Για να επιτευχθεί αυτό, κάθε σύμβολο προεκτείνεται κυκλικά κατά τη διάρκεια του χρονικού διαστήματος προστασίας. Συνεπώς, αν η χρονική καθυστέρηση λήψης των διαφόρων σημάτων δεν υπερβαίνει το διάστημα προστασίας, ο δέκτης έχει τη δυνατότητα να αναπαράγει το ίδιο σήμα που λαμβάνεται από τις διαφορετικές πηγές. Οι τιμές του χρονικού διαστήματος προστασίας που χρησιμοποιούνται κυρίως στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση είναι 1/32, 1/16, 1/8 και 1/4. Προφανώς, όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του, τόσο πιο σταθερό είναι το κανάλι από άποψη παρεμβολών. Από την άλλη πλευρά αντίστοιχα μειώνεται και ο ρυθμός μετάδοσης πληροφορίας στο δίκτυο, αφού μειώνονται τα ωφέλιμα δεδομένα που μεταδίδονται.

Οι παραπάνω παράμετροι επηρεάζουν άμεσα τα χαρακτηριστικά του δικτύου, όπως το διαθέσιμο ρυθμό μετάδοσης και τον απαιτούμενο σηματοθορυβικό λόγο στο δέκτη. Στον πίνακα που ακολουθεί, παρουσιάζεται ακριβώς αυτή η επίδραση για διάφορους συνδυασμούς τεχνικών χαρακτηριστικών. Σημειώνεται ότι οι τιμές του πίνακα αφορούν κανάλια στη ζώνη *UHF* και ο σηματοθορυβικός λόγος (*C/N*) υπολογίζεται για ρυθμό λαθών (*Bit Error Rate – BER*) $BER = 2 \cdot 10^{-4}$. Επίσης, η μοντελοποίηση της φορητής και κινητής λήψης γίνεται με *Rayleigh* κανάλι, λόγω του φαινομένου της διάδοσης πολλαπλών διαδρομών που παρατηρείται σε αυτούς τους τύπους λήψης. Αντίθετα, η σταθερή λήψη μοντελοποιείται με κανάλι *Rice*.

		Απαιτούμενος C/N λόγος		Ρυθμός μετάδοσης (Mbps)			
Είδος Διαμόρφωσης	Ρυθμός Κωδικοποίησης	Κανάλι Rice	Κανάλι Rayleigh	Διάστημα Προστασίας			
				1/4	1/8	1/16	1/32
QPSK	1/2	3.6	5.4	4.98	5.53	5.85	6.03
	2/3	5.7	8.4	6.64	7.37	7.81	8.04
	3/4	6.8	10.7	7.46	8.29	8.78	9.05
	5/6	8.0	13.1	8.29	9.22	9.76	10.05
	7/8	8.7	16.3	8.71	9.68	10.25	10.56
16-QAM	1/2	9.6	11.2	9.95	11.06	11.71	12.06
	2/3	11.6	14.2	13.27	14.75	15.61	16.09
	3/4	13.0	16.7	14.93	16.59	17.56	18.10
	5/6	14.4	19.3	16.59	18.43	19.52	20.11
	7/8	15.0	22.8	17.42	19.35	20.49	21.11
64-QAM	1/2	14.7	16.0	14.93	16.59	17.56	18.10
	2/3	17.1	19.3	19.91	22.12	23.42	24.13
	3/4	18.6	21.7	22.39	24.88	26.35	27.14
	5/6	20.0	25.3	24.88	27.65	29.27	30.16
	7/8	21.0	27.9	26.13	29.03	30.74	31.67

Πίνακας 15: Χαρακτηριστικά δικτύου για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων

6.2.4 Δομή δικτύου

Κατά το παρελθόν, ο σχεδιασμός δικτύων αναλογικής εκπομπής, όπως τα τηλεοπτικά δίκτυα, γινόταν αποκλειστικά με την χρήση ενός συγκεκριμένου αριθμού καταχωρήσεων (*assignments*). Κάθε καταχώρηση περιλαμβάνει τη γεωγραφική θέση εκπομπής, καθώς και τα επιμέρους χαρακτηριστικά εκπομπής, όπως για παράδειγμα το διάγραμμα ακτινοβολίας, το ύψος, την ισχύ και το κέρδος της κεραίας. Με άλλα λόγια, περιλαμβάνονται όλα τα στοιχεία που είναι απαραίτητα για την εκτίμηση της κάλυψης σε μια περιοχή γύρω από τη θέση εκπομπής, η οποία ονομάζεται περιοχή κάλυψης ή εξυπηρέτησης (*service area*). Έπειτα, γίνεται η κατανομή των διαθέσιμων καναλιών στις καταχωρήσεις και έτσι ορίζεται πλήρως το δίκτυο. Το πλάνο της Στοκχόλμης (ST-61) [91] για τα δίκτυα αναλογικής τηλεόρασης βασίζεται ακριβώς σε αυτές τις συγκεκριμένες καταχωρήσεις.

Ένα σημαντικό μειονέκτημα της παραπάνω διαδικασίας είναι ότι οι περιοχές κάλυψης δεν μπορούν να καθοριστούν πριν την ολοκλήρωση του σχεδιασμού, καθώς οι παρεμβολές από τις υπόλοιπες θέσεις εκπομπής μπορούν να υπολογιστούν μόνο αφού πραγματοποιηθεί η κατανομή των καναλιών. Με την ανάπτυξη της τεχνολογίας ψηφιακής μετάδοσης και τις νέες δυνατότητες που αυτή προσέφερε, έγινε γρήγορα αντιληπτό ότι ένα μελλοντικό

διεθνές πλάνο συχνοτήτων ψηφιακής εκπομπής, που θα αντικαθιστούσε αυτό της Στοκχόλμης θα μπορούσε να αποτελείται όχι μόνο από καταχωρήσεις, αλλά και από συγκεκριμένα όρια για τις περιοχές εκχώρησης πόρων (*allotments*) [92]. Ως περιοχή εκχώρησης πόρων ορίζεται μια γεωγραφική περιοχή, στην οποία εκχωρούνται πόροι δικτύου (συχνότητες) για την εξυπηρέτηση των αναγκών της. Με αυτήν την προσέγγιση δεν δίνεται πλέον βαρύτητα μόνο στην διάθεση καναλιών σε συγκεκριμένες θέσεις εκπομπής, αλλά και στην προστασία των περιοχών κάλυψης. Επίσης, επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ευελιξία, καθώς η ακριβής υλοποίηση ενός *allotment* σε συγκεκριμένες θέσεις εκπομπής μετατίθεται χρονικά σε επόμενο στάδιο σχεδιασμού. Τέλος, η διαδικασία αυτή είναι ιδανική για σχεδιασμό μεγάλης κλίμακας με δίκτυα ευρυεκπομπής που πιθανώς βρίσκονται σε διαφορετικό στάδιο σχεδιασμού και υλοποίησης.

6.2.4.1 Διαμόρφωση COFDM

Για να γίνει δυνατή η σχεδίαση με βάση τις περιοχές εκχώρησης πόρων είναι απαραίτητες οι νέες δυνατότητες της ψηφιακής μετάδοσης. Συγκεκριμένα, ο τρόπος μετάδοσης σε εφαρμογές ψηφιακής τηλεόρασης βασίζεται στη διαμόρφωση *COFDM* (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [90]. Ένας τυπικός δίαυλος στον οποίο μεταδίδεται το τηλεοπτικό σήμα χαρακτηρίζεται από φαινόμενα διάδοσης πολλαπλών διαδρομών, ειδικά αν η λήψη γίνεται σε αστικό περιβάλλον. Αυτό σημαίνει ότι το σήμα που φτάνει στο δέκτη αποτελείται από το άθροισμα του σήματος που λαμβάνεται απ' ευθείας από τον πομπό, αλλά και έναν αριθμό άλλων σημάτων, συνήθως ασθενέστερων, που λαμβάνονται μέσω ανακλάσεων και τα οποία εμφανίζουν κάποια χρονική καθυστέρηση σε σχέση με το απευθείας σήμα (υπενθυμίζεται ότι σε φορητή λήψη θεωρείται ότι δεν υπάρχει καθόλου απευθείας λαμβανόμενο σήμα καθώς γίνεται θεώρηση Rayleigh καναλιού). Οι καθυστερημένες αυτές συνιστώσες που λαμβάνονται προκαλούν διασυμβολική παρεμβολή και μειώνουν σημαντικά την απόδοση του διαύλου. Οι διαφορετικές αφίξεις στο πεδίο του χρόνου, συνήθως και με διαφορετική ισχύ, εμφανίζονται στο πεδίο της συχνότητας ως ενίσχυση κάποιων συχνοτήτων και εξασθένιση κάποιων άλλων.

Η επίγεια ψηφιακή τηλεόραση, όπως και οι περισσότερες σύγχρονες ψηφιακές εφαρμογές μετάδοσης, απαιτεί μεγάλο ρυθμό δεδομένων. Αυτό σημαίνει ότι η διάρκεια του κάθε μεταδιδόμενου συμβόλου είναι μικρή, οπότε τα προβλήματα που δημιουργούνται λόγω της διασυμβολικής παρεμβολής είναι ακόμα πιο έντονα. Για να αντιμετωπιστούν, το μεταδιδόμενο σήμα υψηλής ταχύτητας χωρίζεται σε πολλά σήματα χαμηλής ταχύτητας, που είναι προφανώς πιο ανθεκτικά στη διάδοση πολλαπλών διαδρομών λόγω μεγαλύτερης

διάρκειας συμβόλου. Στην περίπτωση της *COFDM* τα σύμβολα κατανέμονται στους υποδιαύλους με πολυπλεξία συχνότητας. Μάλιστα, οι υποδιαυλοί είναι μαθηματικά ορθογώνιοι μεταξύ τους στο πεδίο της συχνότητας, γεγονός που επιτρέπει την αλληλοεπικάλυψη με τους γειτονικούς τους, καθώς ο δέκτης έχει τη δυνατότητα να επιλέξει το επιθυμητό σύμβολο απορρίπτοντας τα ορθογώνιά του που το επικαλύπτουν. Πρακτικά όμως, κάθε σύμβολο τείνει να εξαπλωθεί ακόμα περισσότερο και για αυτό το λόγο, εις βάρος του ωφέλιμου φορτίου, χρησιμοποιείται η τεχνική του χρονικού διαστήματος προστασίας (*guard interval*). Ως αποτέλεσμα, το σήμα προστατεύεται από τις ανακλώμενες μορφές του που δεν καθυστερούν περισσότερο από τη διάρκεια του διαστήματος προστασίας και μάλιστα δίνεται η δυνατότητα στο δέκτη να συσχετίσει τα λαμβανόμενα σήματα με χρήση ειδικών αλγορίθμων και να ενισχύσει το λαμβανόμενο σήμα.

6.2.4.2 Δίκτυα μιας Συχνότητας (*Single Frequency Networks – SFNs*)

Η ανθεκτικότητα στις παρεμβολές από σήματα με διαφορά φάσης έως μια καθορισμένη μέγιστη τιμή που επιτυγχάνεται με τη διαμόρφωση *COFDM* καθιστά δυνατή τη λειτουργία δικτύων μιας συχνότητας (*Single Frequency Networks – SFNs*). Η λειτουργία ενός *SFN* δικτύου επιτρέπει το συγχρονισμό ανάμεσα στους πομπούς μιας συγκεκριμένης περιοχής κάλυψης, έτσι ώστε να λειτουργούν στην ίδια συχνότητα χωρίς να δημιουργούνται παρεμβολές στον δέκτη. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μέγιστες διαφορές χρονικής καθυστέρησης και κατά συνέπεια η μέγιστη διαφορά απόστασης των πομπών στο εκάστοτε σημείο λήψης, ως συνάρτηση του χρονικού διαστήματος προστασίας. Με άλλα λόγια, δυο γειτονικοί πομποί μπορούν να εκπέμπουν ταυτόχρονα το ίδιο σήμα στην ίδια συχνότητα, εφόσον στην κοινή περιοχή κάλυψής τους η χρονική διαφορά των σημάτων τους δεν υπερβαίνει τις παρακάτω τιμές. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι τιμές του πίνακα αφορούν σύστημα ψηφιακής τηλεόρασης με 8k φέρουσες. Ο αριθμός των φερουσών που θα χρησιμοποιηθεί ανά κανάλι αποτελεί σημαντική τεχνική παράμετρο του συστήματος και οι συνηθισμένες τιμές είναι 2k (1,704) ή 8k (6,817) [90]. Η μέθοδος με τις 2k φέρουσες εφαρμόζεται κυρίως σε περιπτώσεις όπου απαιτείται κινητή λήψη, ενώ η μέθοδος με τις 8k φέρουσες προτιμάται για τη λειτουργία *SFN* δικτύων.

Guard Interval	Μέγιστη Διαφορά Χρονικής Καθυστέρησης (μsec)	Μέγιστη Διαφορά Απόστασης Πομπών (km)
1/4	224	67
1/8	112	33.5
1/16	56	16.75
1/32	28	8.375

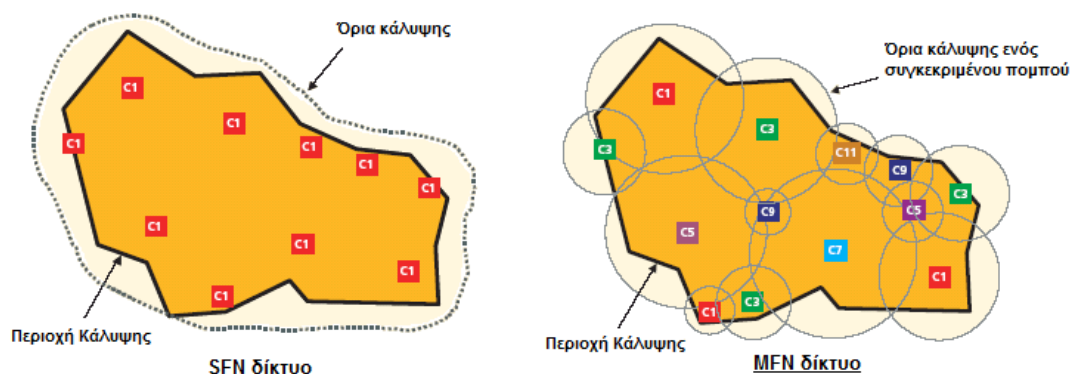
Πίνακας 16: Μέγιστη Διαφορά Σήματος Πομπών - Δέκτη

Στην επόμενη εικόνα παρουσιάζεται ένα παράδειγμα για να κατανοηθεί καλύτερα ο περιορισμός της μέγιστης διαφοράς σήματος πομπών και δέκτη. Σε αυτήν την περίπτωση, για να μην υπάρχει πρόβλημα παρεμβολών πρέπει να ισχύει $|L_1 - L_2| < L_{GI}$, όπου L_1 και L_2 είναι οι αποστάσεις των πομπών T_{x1} και T_{x2} από τον δέκτη R_x αντίστοιχα, και L_{GI} είναι η τιμή που προκύπτει από το επιλεγμένο χρονικό διάστημα φύλαξης (Πίνακας 16).



Εικόνα 74: Παράδειγμα περιορισμού της μέγιστης διαφοράς σήματος πομπών-δέκτη

Η οργάνωση ενός δικτύου ψηφιακής εκπομπής μπορεί να πραγματοποιηθεί με δίκτυα μιας συχνότητας (*SFNs*), σε αντίθεση με τη γνωστή από την αναλογική εκπομπή δομή δικτύων πολλαπλών συχνοτήτων (*Multiple Frequency Networks - MFNs*). Η λειτουργία του *SFN* επιτρέπει το συγχρονισμό ανάμεσα σε μια ομάδα πομπών μιας συγκεκριμένης περιοχής κάλυψης, έτσι ώστε να λειτουργούν στην ίδια συχνότητα χωρίς να δημιουργούνται παρεμβολές στον δέκτη. Αντίθετα, τα *MFNs* ακολουθούν κυψελωτή κατανομή συχνοτήτων στους γειτονικούς πομπούς, έτσι ώστε να μην εμφανίζονται προβλήματα ομοδιαυλικής παρεμβολής για αρκετά μεγάλες αποστάσεις. Τα περισσότερα υπάρχοντα αναλογικά δίκτυα είναι δομημένα σε αυτή την μορφή. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται ένα παράδειγμα υλοποίησης με *SFN* και *MFN* δομή αντίστοιχα:



Εικόνα 75: Παράδειγμα υλοποίησης SFN - MFN δομής

Συνοπτικά, τα *SFN* δίκτυα σε σύγκριση με τα *MFN* παρουσιάζουν τα εξής πλεονεκτήματα:

- **Εξοικονόμηση φάσματος**

Η *SFN* δομή δικτύου δίνει τη δυνατότητα σε γειτονικούς πομπούς που εκπέμπουν συγχρονισμένα να χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα. Ως αποτέλεσμα, είναι δυνατή η κάλυψη μεγάλων περιοχών με μια μόνο συχνότητα. Για παράδειγμα, για την εκπομπή ενός σταθμού της αναλογικής τηλεόρασης στην περιοχή της Αττικής απαιτούνται 4 κανάλια (για κάθε ένα από τα κύρια κέντρα εκπομπής). Αντίθετα, μια υλοποίηση ψηφιακής επίγειας εκπομπής είναι δυνατό να υλοποιήσει ένα *SFN* δίκτυο μεταξύ των συγκεκριμένων σημείων και σε ένα κανάλι να μεταδοθούν (λόγω και του αυξημένου ρυθμού μετάδοσης που προσφέρει η ψηφιακή τεχνολογία) 3-4 τηλεοπτικά προγράμματα. Έτσι εξασφαλίζεται τεράστια εξοικονόμηση συχνοτήτων, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς δίνεται η δυνατότητα για χρήση του διαθέσιμου φάσματος από άλλες υπηρεσίες πέραν της τηλεόρασης.

- **Υψηλότερο ποσοστό κάλυψης**

Με τη δομή *SFN* μπορεί να επιτευχθεί υψηλότερο ποσοστό κάλυψης στην ζητούμενη περιοχή εξυπηρέτησης χωρίς να γίνεται χρήση επιπρόσθετων πόρων φάσματος, καθώς είναι δυνατή η υλοποίηση ενός πιο πυκνού δικτύου με την τοποθέτηση επιπρόσθετων πομπών εντός της περιοχής εξυπηρέτησης. Ο μόνος περιορισμός που υπάρχει αφορά τη μέγιστη διαφορά δρόμων των σημάτων που φτάνουν στον δέκτη, η οποία εξαρτάται από το χρονικό διάστημα προστασίας. Με αυτό τον τρόπο καθίσταται δυνατή η εύκολη μετάβαση σε κινητή λήψη στην οποία απαιτείται πολύ υψηλό ποσοστό κάλυψης της τάξης του 99%. Η μετάβαση αυτή είναι βέβαιο ότι θα επιδιωχθεί, καθώς απαιτείται από τις νέες τεχνολογίες υψηλής ζήτησης, που έχουν μεγάλο οικονομικό ενδιαφέρον.

6.3 Σχεδιασμός Συστήματος Επίγειας Ψηφιακής Τηλεόρασης

Ο σχεδιασμός ενός δικτύου ευρυεκπομπής επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης περιλαμβάνει τα επόμενα τέσσερα βασικά βήματα [93]:

- **Σχεδίαση των περιοχών εκχώρησης πόρων (*allotment area definition*)**

Έχει ως στόχο να καθοριστούν πλήρως οι επιθυμητές περιοχές στις οποίες θα παρέχεται κάλυψη μέσω ενός *SFN* δικτύου.

- **Έλεγχος συμβατότητας (*compatibility analysis*)**

Βασικός στόχος σε αυτό το στάδιο είναι να μειωθούν οι παρεμβολές ανάμεσα στις σχεδιασμένες περιοχές εκχώρησης πόρων. Σε αυτό το στάδιο πρέπει να υπολογιστεί η εξερχόμενη παρεμβολή κάθε *allotment*.

- **Πλάνο σύνθεσης (*plan synthesis*)**

Εδώ γίνεται η καταχώρηση καναλιών στις περιοχές εκχώρησης πόρων. Συχνά εφαρμόζονται αλγόριθμοι βελτιστοποίησης για να επιτευχθεί η βέλτιστη κατανομή.

- **Στρατηγική μετάβασης (*transition strategy*)**

Έχει ως στόχο την ομαλή μετάβαση από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα γίνει η παρουσίαση των επιμέρους βημάτων, ενώ ιδιαίτερη βαρύτητα δίνεται στα προβλήματα που αντιμετωπίζονται στο πλαίσιο της διατριβής.

6.3.1 Καθορισμός περιοχών εκχώρησης πόρων

Ο σχεδιασμός ενός συστήματος ευρυεκπομπής επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης μπορεί να γίνει με βάση τις περιοχές εκχώρησης πόρων (*allotments*). Όπως παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα, μια περιοχή εκχώρησης πόρων είναι μια επιθυμητή περιοχή κάλυψης, για την οποία εξασφαλίζεται προστασία από τις παρεμβολές. Για τον σαφή καθορισμό μιας περιοχής εκχώρησης πόρων πρέπει να προσδιοριστεί ένα σύνολο από γεωγραφικές θέσεις (*test points*). Η περιοχή εκχώρησης πόρων οριοθετείται από το πολύγωνο που σχηματίζεται από τα αντίστοιχα *test points*. Επιπλέον, πρέπει να καθοριστεί ο επιθυμητός τύπος λήψης, από τον οποίο προσδιορίζονται οι παράμετροι του δικτύου.

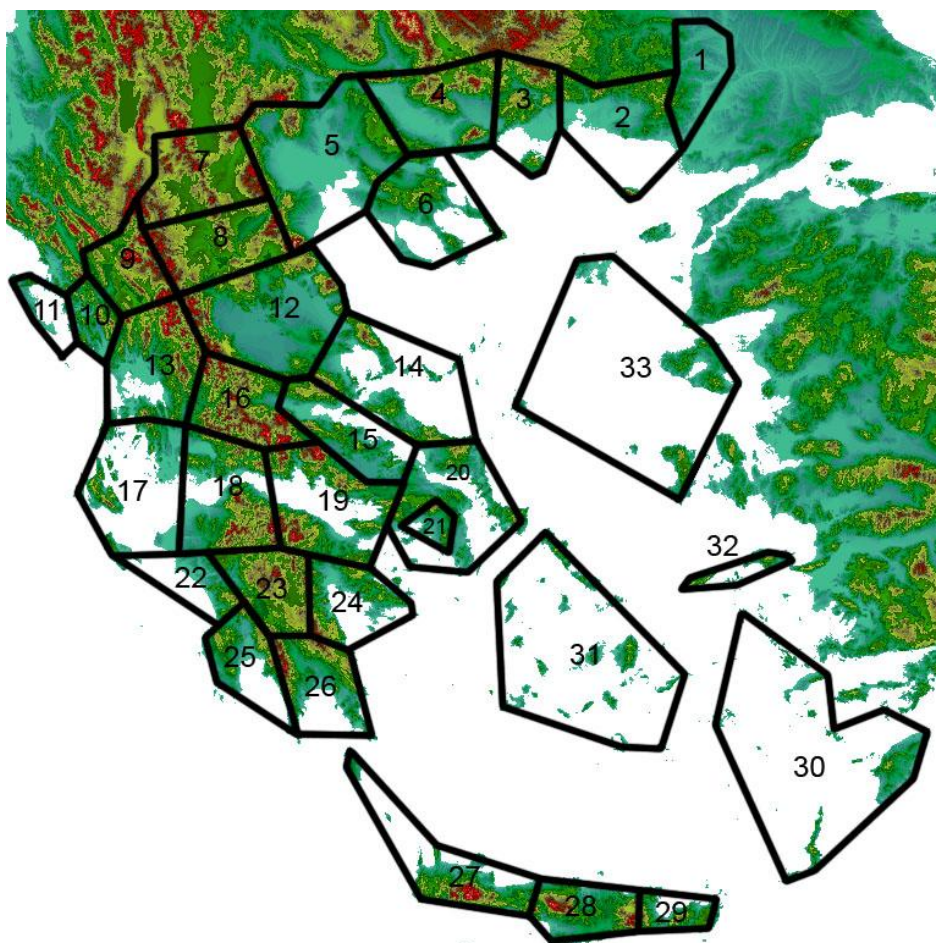
Ο βασικός στόχος για την οριοθέτηση μιας περιοχής εκχώρησης πόρων είναι η παροχή κάλυψης με χρήση μιας μόνο συχνότητας, καθώς γίνεται χρήση *SFN* δομής. Έχει ήδη αναφερθεί ότι η λειτουργία ενός *SFN* δικτύου επιτυγχάνεται με τη χρήση ενός χρονικού διαστήματος προστασίας, το οποίο στη συνέχεια καθορίζει την μέγιστη διαφορά απόστασης που μπορούν να έχουν οι θέσεις εκπομπής. Στη συνέχεια, με την εφαρμογή ενός κατάλληλου μοντέλου απωλειών διάδοσης, εξετάζεται αν υπάρχουν περιοχές που έχουν πρόβλημα παρεμβολών.

Ωστόσο, ο καθορισμός των περιοχών εκχώρησης πόρων εξαρτάται και από μη-τεχνικούς παράγοντες, όπως τα εθνικά γεωγραφικά σύνορα και τα δημογραφικά χαρακτηριστικά. Ως συνέπεια, είναι επιθυμητή η δημιουργία περιοχών που να λαμβάνουν υπόψη τα

χαρακτηριστικά του πληθυσμού και τα σύνορα κάθε κράτους. Για τον λόγο αυτό, ο σχεδιασμός των περιοχών εκχώρησης πόρων μπορεί να ωφεληθεί σημαντικά, αν βασιστεί στα υπάρχοντα αναλογικά δίκτυα που έχουν συνυπολογίσει τους παραπάνω παράγοντες. Το γεγονός ότι το ψηφιακό πλάνο βασίζεται σε συγκεκριμένες θέσεις εκπομπής δεν έρχεται σε αντίθεση με την έννοια των περιοχών εκχώρησης πόρων. Αντιθέτως, είναι πολύ σημαντικό το όφελος από την εκ των προτέρων γνώση χρήσιμων θέσεων εκπομπής. Η τελική υλοποίηση του δικτύου με επιμέρους θέσεις εκπομπής ή και πιθανές τροποποιήσεις, έχοντας ως κριτήριο την παροχή κάλυψης και την προστασία των περιοχών εκχώρησης πόρων από παρεμβολές, μπορεί να γίνει σε μεταγενέστερο στάδιο. Στη συνέχεια παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά βήματα καθορισμού των περιοχών:

1. Επιλογή ενός συνόλου θέσεων από τις υπάρχουσες θέσεις εκπομπής που χρησιμοποιούνται για το δίκτυο της αναλογικής τηλεόρασης. Τα κριτήρια της επιλογής βασίζονται στην:
 - Πληθυσμιακή κάλυψη: η επιλογή των σημείων είναι τέτοια που να εξασφαλίζει υψηλό ποσοστό πληθυσμιακής κάλυψης και προφανώς δίνεται μεγάλη σημασία στα αστικά κέντρα.
 - Εκπεμπόμενη ισχύ: εξετάζονται κατά κύριο λόγο κέντρα εκπομπής μεγάλης ισχύος, αφού αυτά καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την επιθυμητή κάλυψη.
 - Εγγύτητα στα σύνορα: όπως είναι λογικό, δίνεται ιδιαίτερη προσοχή στα σύνορα κάθε κράτους, καθώς πρέπει να υπάρχει κάλυψη χωρίς να δημιουργούνται παρεμβολές στις γειτονικές χώρες.
2. Στη συνέχεια, τα επιλεγμένα σημεία ομαδοποιούνται σε *SFNs* με βάση τον περιορισμό της μέγιστης διαφοράς απόστασης των πομπών από τον δέκτη. Για παράδειγμα, με $GI = 1/4$ προκύπτει η μέγιστη απόσταση των 67km . Σημειώνεται ότι για κάθε σημείο εκπομπής επιλέγονται τα κατάλληλα χαρακτηριστικά εκπομπής, ώστε να επιτυγχάνεται κάλυψη στις περιοχές στις οποίες απευθύνεται το συγκεκριμένο σημείο.
3. Υπερθέτοντας τις καλύψεις των σημείων εκπομπής κάθε *SFN*, προκύπτουν οι περιοχές εκχώρησης πόρων. Σε αυτό το σημείο επισημαίνεται ότι οι περιοχές ενδέχεται να υποστούν μικρές τροποποιήσεις κατά τα επόμενα βήματα του σχεδιασμού, καθώς και σε ειδικές περιπτώσεις όπως στα μεγάλα αστικά κέντρα ή σε νησιωτικές περιοχές.

Αξίζει να επισημανθεί ότι η συγκεκριμένη μεθοδολογία λαμβάνει υπόψη και την υλοποίηση του δικτύου, καθώς προσφέρει ένα πλάνο, τόσο για τα σημεία εκπομπής που θα χρησιμοποιηθούν, όσο και για τα χαρακτηριστικά τους. Ως συνέπεια, τα αποτελέσματα της μεθόδου είναι πιο εύκολα υλοποιήσιμα και παράλληλα, με τον καθορισμό των περιοχών εκχώρησης πόρων, παρέχεται σαφώς ευελιξία αναφορικά με την τελική υλοποίηση του δικτύου της ψηφιακής τηλεόρασης. Στην επόμενη εικόνα φαίνονται οι περιοχές εκχώρησης πόρων για το δίκτυο επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης στην περίπτωση της Ελλάδας:



Εικόνα 76: Περιοχές εκχώρησης πόρων στην περίπτωση της Ελλάδας

6.3.2 Έλεγχος Συμβατότητας

Στο στάδιο αυτό γίνεται ο έλεγχος συμβατότητας ανάμεσα στις περιοχές εκχώρησης πόρων της ίδιας χώρας, αλλά και ανάμεσα σε περιοχές γειτονικών κρατών. Συγκεκριμένα, πρέπει να υπολογιστεί η εξερχόμενη παρεμβολή κάθε *allotment* και να εξασφαλισθεί η επιθυμητή κάλυψη μέσα στα όρια κάθε περιοχής. Αυτό έχει πολύ μεγάλη σημασία για το σχεδιασμό ενός δικτύου επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης, καθώς η ποιότητα λήψης υποβαθμίζεται σημαντικά καθώς αυξάνονται οι παρεμβολές, σε αντίθεση με το σύστημα επίγειας αναλογικής τηλεόρασης που παρουσιάζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα.

6.3.2.1 Μοντέλο διάδοσης

Για τον υπολογισμό των παρεμβολών πρέπει να καθοριστεί το κατάλληλο μοντέλο διάδοσης, καθώς και οι επιμέρους παράμετροί του. Το μοντέλο αυτό πρέπει να επιλέγεται ώστε να αντιπροσωπεύει καλύτερα την γεωγραφική περιοχή που θα εφαρμοστεί, καθώς η ακρίβεια των αποτελεσμάτων επηρεάζει άμεσα τον σχεδιασμό του δικτύου. Στο πλαίσιο του σχεδιασμού δικτύων ευρυεκπομπής ψηφιακής τηλεόρασης, η *ITU* προτείνει το μοντέλο που περιγράφεται στην σύσταση *P.1546* [94]. Το μοντέλο διάδοσης *P.1546* είναι στατιστικό και παρέχει καμπύλες για διάδοση πάνω από διαφορετικά ήδη εδάφους (στεριά, θερμή και ψυχρή θάλασσα), για διαφορετικά ύψη κεραίας και για συχνότητες 100, 600 και 2000MHz. Ακόμα στο μοντέλο υπεισέρχονται δυο σημαντικές παράμετροι:

- Ποσοστό τοποθεσιών. Δείχνει για ποιο ποσοστό της θεωρούμενης περιοχής κάλυψης του πομπού, το πεδίο είναι μεγαλύτερο ή ίσο από αυτό που προκύπτει από την αντίστοιχη καμπύλη.
- Ποσοστό χρόνου. Δείχνει για ποιο ποσοστό χρόνου το πεδίο είναι μεγαλύτερο ή ίσο από αυτό που προκύπτει από την αντίστοιχη καμπύλη.

Για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων που αναφέρθηκαν είναι δυνατός ο προσδιορισμός της τιμής πεδίου για συγκεκριμένη απόσταση από τον πομπό που το προκαλεί. Ωστόσο, το μοντέλο *P.1546* είναι εμπειρικό και σε πολλές περιπτώσεις τα αποτελέσματά του δεν είναι κατάλληλα για εφαρμογή. Πολλά προγραμματιστικά εργαλεία σχεδιασμού περιέχουν ντετερμινιστικά μοντέλα διάδοσης, τα οποία σε συνδυασμό με αντίστοιχους ψηφιακούς χάρτες μπορούν να προσφέρουν ακριβή αποτελέσματα [95]. Μια σημαντική παράμετρος που πρέπει να καθοριστεί σε αυτά τα μοντέλα είναι η μέθοδος υπολογισμού των απωλειών περίθλασης. Συνήθως χρησιμοποιείται η μέθοδος *Deygout* [96], αλλά σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν πολλά εμπόδια με μικρή απόσταση ανάμεσά τους η μέθοδος υπερεκτιμά τις απώλειες και πιο κατάλληλη σε αυτήν την περίπτωση είναι η μέθοδος *Bullington* [97].

6.3.2.2 Υπολογισμοί απαιτούμενης έντασης πεδίου

Για να προσδιοριστεί και να προστατευτεί η περιοχή κάλυψης σε ένα *SFN* δίκτυο, πρέπει να υπολογιστεί η ελάχιστη απαιτούμενη ένταση πεδίου μέσα σε αυτήν. Αρχικά, η ελάχιστη απαιτούμενη ένταση πεδίου υπολογίζεται με βάση μόνο το επίπεδο του θορύβου και έπειτα συνυπολογίζονται οι εισερχόμενες παρεμβολές. Ειδικότερα, η ελάχιστη απαιτούμενη ένταση πεδίου εξαρτάται από τους ακόλουθους παράγοντες:

- Επιθυμητός τύπος λήψης
- Συχνότητα λειτουργίας
- Εύρος καναλιού
- Απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος στο δέκτη

Η ελάχιστη απαιτούμενη ισχύς εισερχόμενου σήματος στο δέκτη P_{min} (dBW) υπολογίζεται σύμφωνα με την εξίσωση:

$$P_{min} = 10 \log_{10}(kT_0BF) + L_F + C/N \quad (66)$$

όπου $k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ είναι η σταθερά Boltzmann, $T_0 = 290 \text{ K}$ η θερμοκρασία της κεραίας, B το εύρος ζώνης του καναλιού, F ο συντελεστής θορύβου στον δέκτη, L_F οι απώλειες κατά τη μεταφορά του σήματος από την κεραία λήψης στη συσκευή του χρήστη μέσω καλωδίου και τέλος C/N ο απαιτούμενος σηματοθορυβικός λόγος. Σε αυτό το σημείο υπενθυμίζεται ότι ο λόγος αυτός εξαρτάται από το είδος λήψης, την διαμόρφωση και τον ρυθμό κωδικοποίησης (Πίνακας 15). Στη συνέχεια, η ελάχιστη απαιτούμενη ένταση πεδίου E_{min} (dBμV/m) στο εσωτερικό της περιοχής κάλυψης υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη το κέρδος της κεραίας λήψης G (dBi), σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{min} = P_{min} + G + 10 \log_{10}(1.64\lambda^2/4\pi) + 145.8 \quad (67)$$

όπου $\lambda = c/f$ είναι το μήκος κύματος του λαμβανόμενου σήματος στη συχνότητα f . Με την ανάλυση που προηγήθηκε, είναι δυνατός ο προσδιορισμός της περιοχής κάλυψης κάθε πομπού, όπου ένας δέκτης λαμβάνει επίπεδο σήματος τουλάχιστον όσο το απαιτούμενο για την προσφερόμενη υπηρεσία. Ωστόσο, για την εφαρμογή ενός μοντέλου διάδοσης στον υπολογισμό της ελάχιστης απαιτούμενης έντασης πεδίου, πρέπει να συμπεριληφθούν διορθωτικοί παράγοντες στις παραπάνω σχέσεις. Για παράδειγμα, σύμφωνα με το προτεινόμενο από την ITU μοντέλο διάδοσης $P.1546$, το πεδίο υπολογίζεται για ποσοστό χρόνου 50%, ποσοστό τοποθεσιών 50% και σε ύψος 10μ από την επιφάνεια διάδοσης. Με αυτόν τον τρόπο με βάση την εξίσωση (67) ορίζεται η ισοδύναμη μέση ένταση πεδίου E_{med} (dBμV/m) σύμφωνα με τη σχέση:

$$E_{med} = E_{min} + N + C_l + L_h + L_b \quad (68)$$

όπου N είναι ο διορθωτικός παράγοντας θορύβου που προκαλείται από την παρουσία του ανθρώπου, C_l ο διορθωτικός παράγοντας αναγωγής σε ποσοστό τοποθεσιών διαφορετικού του 50%, L_h ο διορθωτικός παράγοντας απωλειών ύψους που εφαρμόζεται για την φορητή και την κινητή λήψη, και τέλος L_b είναι ο διορθωτικός παράγοντας απωλειών διείσδυσης σε κτίριο για λήψη σε εσωτερικούς χώρους. Πρακτικά, η ισοδύναμη μέση ένταση πεδίου

αντιπροσωπεύει την ελάχιστη απαιτούμενη ένταση πεδίου για την κάλυψη μιας υπηρεσίας με χρήση της σύστασης *P.1546* και αναγωγή στο περιβάλλον λήψης. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζεται η E_{min} και η ισοδύναμη E_{med} για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων. Σημειώνεται ότι η ένταση πεδίου E_{med} έχει υπολογιστεί για ενδεικτικά ποσοστά τοποθεσιών 70% και 95% και οι τιμές αφορούν κανάλι εύρους 8MHz, ενώ η μετατροπή σε κανάλια 7MHz προκύπτει με αφαίρεση 0.6 dB.

Συχνότητα (MHz)	C/N (dB)	Ένταση πεδίου (dBμν/m)								
		Σταθερή λήψη			Φορητή λήψη (outdoor)			Φορητή λήψη (indoor)		
		E_{min}	E_{med}		E_{min}	E_{med}		E_{min}	E_{med}	
			70%	95%		70%	95%		70%	95%
200	2	20	24	30	27	41	47	27	49	56
	8	26	30	36	33	47	53	33	55	62
	14	32	36	42	39	53	59	39	61	68
	20	38	42	48	45	59	65	45	67	74
	26	44	48	54	51	65	71	51	73	80
500	2	26	29	35	33	48	54	33	56	66
	8	32	35	41	39	54	60	39	62	72
	14	38	41	47	45	60	66	45	68	78
	20	44	47	53	51	66	72	51	74	84
	26	50	53	59	57	72	78	57	80	90
800	2	30	33	39	37	52	58	37	60	70
	8	36	39	45	43	58	64	43	66	76
	14	42	45	51	49	64	70	49	72	82
	20	48	51	57	55	70	76	55	78	88
	26	54	57	63	61	76	82	61	84	94

Πίνακας 17: Απαιτούμενη ένταση πεδίου για διάφορους συνδυασμούς παραμέτρων

Μέχρι αυτό το σημείο η ανάλυση για τον υπολογισμό της ελάχιστης απαιτούμενης έντασης πεδίου έχει γίνει με βάση μόνο το επίπεδο του θορύβου. Ωστόσο, έχει ήδη αναφερθεί ότι πολύ σημαντικό παράγοντα διαδραματίζει το επίπεδο των παρεμβολών, όπως άλλωστε συμβαίνει σε κάθε δίκτυο επικοινωνιών. Προκειμένου να ληφθεί υπόψη ο παράγοντας αυτός, εισάγεται ένα περιθώριο παρεμβολών στους υπολογισμούς ισχύος και η εξίσωση (67) παίρνει πλέον την μορφή [92]:

$$E_{min} = P_{min} + G + 10 \log_{10}(1.64\lambda^2/4\pi) + 145.8 + \Delta \quad (69)$$

όπου Δ είναι το περιθώριο παρεμβολών (*interference margin*). Με άλλα λόγια, δημιουργείται η απαίτηση η ελάχιστη ένταση πεδίου να είναι υψηλότερη κατά Δ dB, το

οποίο πρακτικά σημαίνει ότι πρέπει να αυξηθεί αντίστοιχα η ισχύς εκπομπής. Ένας εναλλακτικός τρόπος να εκφραστεί η συνθήκη για την λαμβανόμενη ένταση πεδίου E_r , ο οποίος βασίζεται στην περιθώριο παρεμβολών Δ και εισάγει την έννοια του λόγου προστασίας PR (*protection ratio*) φαίνεται στη σχέση που ακολουθεί [89]:

$$E_r \geq 10 \log_{10} \left(\sum_i E_i \right) + PR + \Delta \rightarrow E_r \geq E_l + PR + \Delta \quad (70)$$

όπου E_i είναι η λαμβανόμενη παρεμβολή σε $\mu\text{V/m}$ από τον πομπό i και E_l είναι το άθροισμα της συνολικής λαμβανόμενης παρεμβολής σε $\text{dB}\mu\text{V/m}$. Με άλλα λόγια, ως λόγος προστασίας ορίζεται η ελάχιστη τιμή του λόγου ανάμεσα στο επιθυμητό σήμα και τις εισερχόμενες παρεμβολές και εκφράζεται σε dB . Οι τιμές του εξαρτώνται άμεσα από την επιλογή των παραμέτρων του συστήματος. Από την εξίσωση (70) μπορεί εύκολα να υπολογιστεί η τιμή της μέγιστης αποδεκτής παρεμβολής $E_l^{\max}$, σύμφωνα με την σχέση:

$$E_l^{\max} = E_{\min} - PR - \Delta \quad (71)$$

Η τελευταία εξίσωση ουσιαστικά υποδηλώνει ότι η μέγιστη συνολική εισερχόμενη παρεμβολή σε μια περιοχή κάλυψης ισούται με την ελάχιστη απαιτούμενη ένταση πεδίου που λαμβάνει υπόψη μόνο το επίπεδο θορύβου μειωμένη κατά το λόγο προστασίας και το περιθώριο παρεμβολών. Στην περίπτωση όπου γίνεται χρήση του μοντέλου διάδοσης $P.1546$ προτείνεται ο υπολογισμός της μέγιστης συνολικής εισερχόμενης παρεμβολής να γίνει με βάση την ισοδύναμη ένταση πεδίου E_{med} :

$$E_l^{\max} = E_{\text{med}} - PR - \Delta - C - A \quad (72)$$

όπου C είναι ο μικτός διορθωτικός παράγοντας για το ποσοστό τοποθεσιών όσον αφορά το επιθυμητό σήμα και τις παρεμβολές και A είναι η κατευθυντικότητα της κεραίας λήψης για συστήματα με σταθερή λήψη [98].

6.3.2.3 Reference Planning Configurations (RPCs)

Κάθε διαδικασία σχεδιασμού ενός δικτύου βασίζεται σε ένα σύνολο παραμέτρων που εξαρτώνται από τις επιθυμίες και τις ανάγκες των καταναλωτών και του παρόχου. Κάποιοι από αυτούς τους συνδυασμούς παραμέτρων ωστόσο δεν έχουν πρακτική αξία, είτε από οικονομικής και τεχνικής άποψης, είτε λόγω της μη αποδοτικής διαχείρισης του φάσματος. Για αυτό το λόγο, για να διευκολυνθεί η διαδικασία σχεδιασμού του δικτύου ψηφιακής τηλεόρασης, είναι σημαντικό να περιοριστούν αυτοί οι δυνατοί συνδυασμοί. Συγκεκριμένα, οι δυνατές επιλογές που αφορούν τον επιθυμητό τύπο λήψης, την διαμόρφωση, τον ρυθμό κωδικοποίησης και το ποσοστό τοποθεσιών της απαιτούμενης πιθανότητας κάλυψης,

σύμφωνα με την *ITU* συνοψίζονται σε τρεις αναφορικές σχεδιαστικές διατάξεις (*Reference Planning Configurations, RPCs*) με βάση την ισοδύναμη μέση ένταση πεδίου που απαιτείται στην θέση του δέκτη [92]. Η σχεδιαστική διάταξη *RPC1* συνιστάται για σταθερή λήψη, ενώ η διάταξη *RPC2* τόσο για φορητή λήψη εσωτερικού και εξωτερικού χώρου, όσο και για κινητή λήψη. Η διάταξη *RPC3* προτείνεται από την *ITU* για φορητή λήψη εσωτερικού χώρου με μέγιστη δυνατή ποιότητα. Στον πίνακα που ακολουθεί παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι παράμετροι κάθε αναφορικής σχεδιαστικής διάταξης.

RPC	Παράμετροι Σχεδιασμού	C/N (dB)	E_{med} (dBμV/m)	PR (dB)	Αντιπροσωπευτικός Σχεδιασμός	E_{med} (dBμV/m)	PR (dB)	Ρυθμός μετάδοσης (Mbps)
1	64-QAM 2/3 σταθερή λήψη 95% τοποθεσιών	20.1	55.1	20	σταθερή λήψη 95% τοποθεσιών	56	21	20-27
	64-QAM 3/4 σταθερή λήψη 95% τοποθεσιών	21.6	56.6	21				
2	QPSK 2/3 κινητή λήψη 99% τοποθεσιών	13	75.8	14	φορητή εξ. λήψη 95% τοποθεσιών	78	17	8-24
	16-QAM 1/2 κινητή λήψη 95% τοποθεσιών	15.5	78.3	16				
	64-QAM 2/3 φορητή εξ. λήψη 95% τοποθεσιών	22.3	81.3	23				
	16-QAM 2/3 φορητή εξ. λήψη 95% τοποθεσιών	17.2	76.2	16				
	16-QAM 2/3 φορητή εσ. λήψη 70% τοποθεσιών	17.2	79.2	16				
3	16-QAM 2/3 φορητή εσ. λήψη 95% τοποθεσιών	17.2	87.9	16	φορητή εσ. λήψη 95% τοποθεσιών	88	16	13-16

Πίνακας 18: Αναφορικές σχεδιαστικές διατάξεις - *RPCs*

Σημειώνεται ότι οι τιμές του πίνακα που αφορούν την ένταση του πεδίου έχουν υπολογιστεί για την συχνότητα των 650MHz. Οι αντίστοιχες τιμές για άλλες συχνότητες f λαμβάνονται με λογαριθμική διόρθωση, σύμφωνα με τη σχέση [94]:

$$E_{med}(f) = E_{med}(f_0) + 20 \log_{10}(f/f_0), \text{ όπου } f_0 = 650\text{MHz} \quad (73)$$

Από τον πίνακα προκύπτει ότι η καλύτερη απόδοση φάσματος επιτυγχάνεται με το *RPC1*, το οποίο όμως οδηγεί σε σταθερή λήψη και δεν αξιοποιεί το βασικό πλεονέκτημα της ψηφιακής τεχνολογίας για μη σταθερή λήψη. Το *RPC2* αφορά όλα τα είδη μη σταθερής λήψης με αντίστοιχες απαιτήσεις για κάθε υλοποίηση. Το *RPC3* είναι η αυστηρότερη

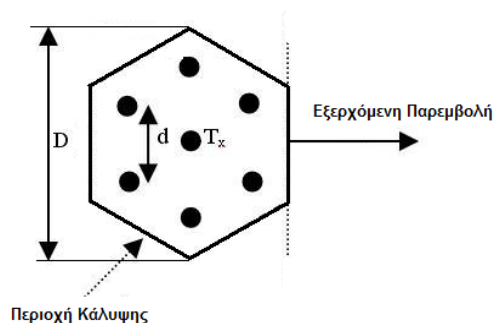
διάταξη από πλευράς κάλυψης, καθώς προϋποθέτει υψηλές τιμές για το απαιτούμενο πεδίο λήψης και κατά συνέπεια οδηγεί σε μικρότερες περιοχές κάλυψης.

6.3.2.4 Υπολογισμοί παρεμβολών

Στην περίπτωση όπου είναι καθορισμένο ένα σημαντικό σύνολο από τις θέσεις εκπομπής του δικτύου της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης, οι εξερχόμενες παρεμβολές μπορούν να υπολογιστούν με ένα κατάλληλο προγραμματιστικό εργαλείο που λαμβάνει υπόψη τη μορφολογία του εδάφους. Με αυτόν τον τρόπο, υπολογίζονται οι παρεμβολές σε κάθε *test point* μιας περιοχής εκχώρησης πόρων και με βάση τις εξισώσεις (71)-(72) γίνεται ο έλεγχος συμβατότητας. Ωστόσο, όπως έχει τονιστεί, στο σχεδιασμό με βάση τις περιοχές εκχώρησης πόρων δεν είναι απαραίτητα καθορισμένα εκ των προτέρων τα σημεία εκπομπής και τα χαρακτηριστικά τους. Στην περίπτωση αυτή, για να μοντελοποιηθεί η εξερχόμενη παρεμβολή από ένα *allotment*, η ITU έχει προτείνει τη χρήση των δικτύων αναφοράς (*Reference Networks, RNs*) [92]. Τα δίκτυα αναφοράς αποτελούν μια ιδανική προσέγγιση των πραγματικών δικτύων, παρουσιάζουν γεωμετρική συμμετρία και κοινές παραμέτρους για τις θέσεις εκπομπής τους και κύρια χαρακτηριστικά τους είναι:

- Ο αριθμός και η τοποθεσία των θέσεων εκπομπής
- Η ισχύς εκπομπής και το διάγραμμα ακτινοβολίας
- Ο επιθυμητός τύπος λήψης

Ένα παράδειγμα δικτύου αναφοράς φαίνεται στο επόμενο σχήμα. Το συγκεκριμένο δίκτυο αναφοράς εξυπηρετεί μια εξαγωνη περιοχή με επτά θέσεις εκπομπής συμμετρικά τοποθετημένες. Οι πομποί παρουσιάζουν ομοιομορφία σχετικά με τα χαρακτηριστικά τους και τη θέση τους (ενεργό ύψος). Η απόσταση μεταξύ δυο πομπών είναι σταθερή και συμβολίζεται με d , ενώ η διάμετρος της περιοχής εξυπηρέτησης συμβολίζεται με D . Ο υπολογισμός της εξερχόμενης παρεμβολής μπορεί να γίνει κατά μήκος οποιασδήποτε από τις μεσοκαθέτους των πλευρών του εξαγώνου.

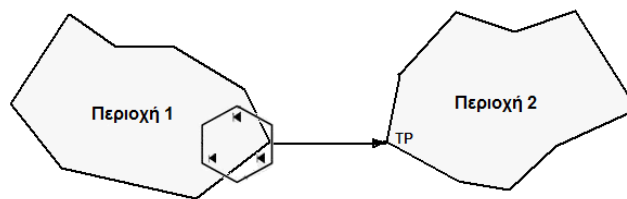


Εικόνα 77: Παράδειγμα δικτύου αναφοράς

Η ακριβής υλοποίηση κάθε δικτύου αναφοράς σχετίζεται άμεσα με τις παραμέτρους του δικτύου και ειδικότερα με την επιλογή της αναφορικής σχεδιαστικής διάταξης *RPC*. Συνολικά προτείνονται τέσσερα πιθανά δίκτυα αναφοράς για τις ακόλουθες περιπτώσεις:

- *RN1* – Για *SFN* με μεγάλες διαστάσεις
- *RN2* – Για *SFN* μικρών διαστάσεων
- *RN3* – Για *SFN* μικρών διαστάσεων σε αστικό περιβάλλον
- *RN4* – Για *SFN* μικρών διαστάσεων με μειωμένες εξερχόμενες παρεμβολές

Σε αυτό το σημείο πρέπει να τονιστεί ότι τα δίκτυα αυτά δεν περιορίζουν σε τίποτα την υλοποίηση του τελικού πραγματικού δικτύου. Συγκεκριμένα, το πραγματικό δίκτυο μπορεί να διαφέρει σε όλα τα χαρακτηριστικά από το δίκτυο αναφοράς, αλλά δεν πρέπει οι ενδεχόμενες παρεμβολές που θα προκαλέσει να ξεπερνούν αυτές του δικτύου αναφοράς. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η εφαρμογή ενός δικτύου αναφοράς για τον υπολογισμό των παρεμβολών ανάμεσα σε δύο περιοχές εκχώρησης πόρων. Το συγκεκριμένο δίκτυο αποτελείται από τρεις θέσεις εκπομπής συμμετρικά τοποθετημένες.



Εικόνα 78: Εφαρμογή δικτύου αναφοράς για τον υπολογισμό παρεμβολών

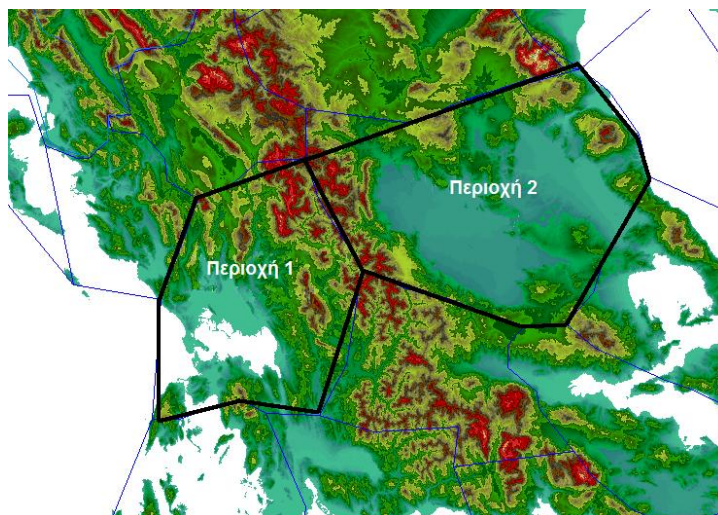
Το εξερχόμενο επίπεδο παρεμβολών υπολογίζεται από κάθε *test point* της μιας περιοχής εκχώρησης πόρων προς κάθε *test point* της άλλης. Η εισερχόμενη παρεμβολή σε ένα *test point* υπολογίζεται αθροίζοντας τις παρεμβολές από κάθε θέση εκπομπής του δικτύου αναφοράς. Η μεγαλύτερη τιμή παρεμβολής που θα προκύψει από τα όλα τα *test points* θεωρείται ίση με την παρεμβολή της μιας περιοχής προς το συγκεκριμένο *test point* της άλλης. Με την μεθοδολογία για τον υπολογισμό της εξερχόμενης παρεμβολής από μια περιοχή εκχώρησης πόρων προς μια άλλη, γίνεται πλέον εφικτή η εκτίμηση της ελάχιστης επιτρεπτής απόστασης (*reuse distance*) που μπορούν να έχουν οι δύο περιοχές για να λειτουργούν στην ίδια συχνότητα. Στον πίνακα που ακολουθεί έχει υπολογιστεί η απόσταση αυτή για όλους τους δυνατούς συνδυασμούς *RPC* και *RN* της περιοχής που παρεμβάλλει. Οι τιμές έχουν προκύψει σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης *P.1546* και καλύπτουν τις περιπτώσεις όπου η απόσταση αφορά μετάδοση πάνω από στεριά και θάλασσα, καθώς και όλες τις πιθανές επιλογές *RPC* που μπορούν να επιλεγθούν για την περιοχή που προστατεύεται [99].

Περιοχή που παρεμβάλλει		Ελάχιστη απόσταση από την περιοχή που προστατεύεται (km)					
RPC	RN	RPC1		RPC2		RPC3	
		Στεριά	Θάλασσα	Στεριά	Θάλασσα	Στεριά	Θάλασσα
1	1	129	632	73	423	42	254
	2	74	457	44	267	27	145
	3	74	457	44	267	27	145
	4	52	368	29	204	17	100
2	1	193	>800	117	609	76	445
	2	112	633	69	433	46	283
	3	150	757	92	550	62	393
	4	85	532	51	340	32	212
3	1	252	>800	163	752	103	565
	2	183	>800	114	639	74	459
	3	234	>800	152	763	98	576
	4	145	751	88	544	55	369

Πίνακας 19: Ελάχιστες αποστάσεις επαναχρησιμοποίησης

Σημειώνεται ότι δύο περιοχές εκχώρησης πόρων είναι συμβατές αν η απόστασή τους είναι τόση ώστε καμία από τις δύο να μην παρεμβάλλει την άλλη. Με βάση τις τιμές του παραπάνω πίνακα είναι δυνατό να γίνει ο έλεγχος συμβατότητας γνωρίζοντας μόνο τα *test points* των περιοχών και τις επιλογές που αφορούν τα *RPCs* και τα *RNs*. Με αυτόν τον τρόπο μειώνεται σημαντικά η πολυπλοκότητα της διαδικασίας της σχεδίασης του δικτύου. Επιπλέον, είναι προφανές ότι η κατάλληλη επιλογή συνδυασμού *RPC* και *RN* είναι πολύ σημαντική και επηρεάζει καταλυτικά το πλάνο κατανομής συχνοτήτων.

Τέλος, επισημαίνεται ότι οι παραπάνω τιμές βασίζονται στο μοντέλο διάδοσης *P.1546* που προτείνεται από την *ITU*. Προκειμένου ο έλεγχος συμβατότητας να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστικός, ενδείκνυται η πιστοποίηση των ασυμβατοτήτων με ένα προγραμματιστικό εργαλείο σχεδιασμού που να περιέχει ντετερμινιστικά μοντέλα διάδοσης. Ως συνέπεια, σε συνδυασμό με τον αντίστοιχο ψηφιακό χάρτη της περιοχής ενδιαφέροντος, μπορεί να γίνει ακριβής έλεγχος λαμβάνοντας υπόψη τη μορφολογία του εδάφους [95],[100],[101]. Για παράδειγμα, στο επόμενο σχήμα διακρίνονται δύο γειτονικές περιοχές εκχώρησης πόρων που αν και προφανώς δεν ικανοποιούν το κριτήριο της απόστασης επαναχρησιμοποίησης, δεν θεωρούνται ασύμβατες λόγω του ορεινού όγκου που παρεμβάλλεται.



Εικόνα 79: Έλεγχος συμβατότητας με βάση τη μορφολογία του εδάφους

6.3.3 Πλάνο σύνθεσης

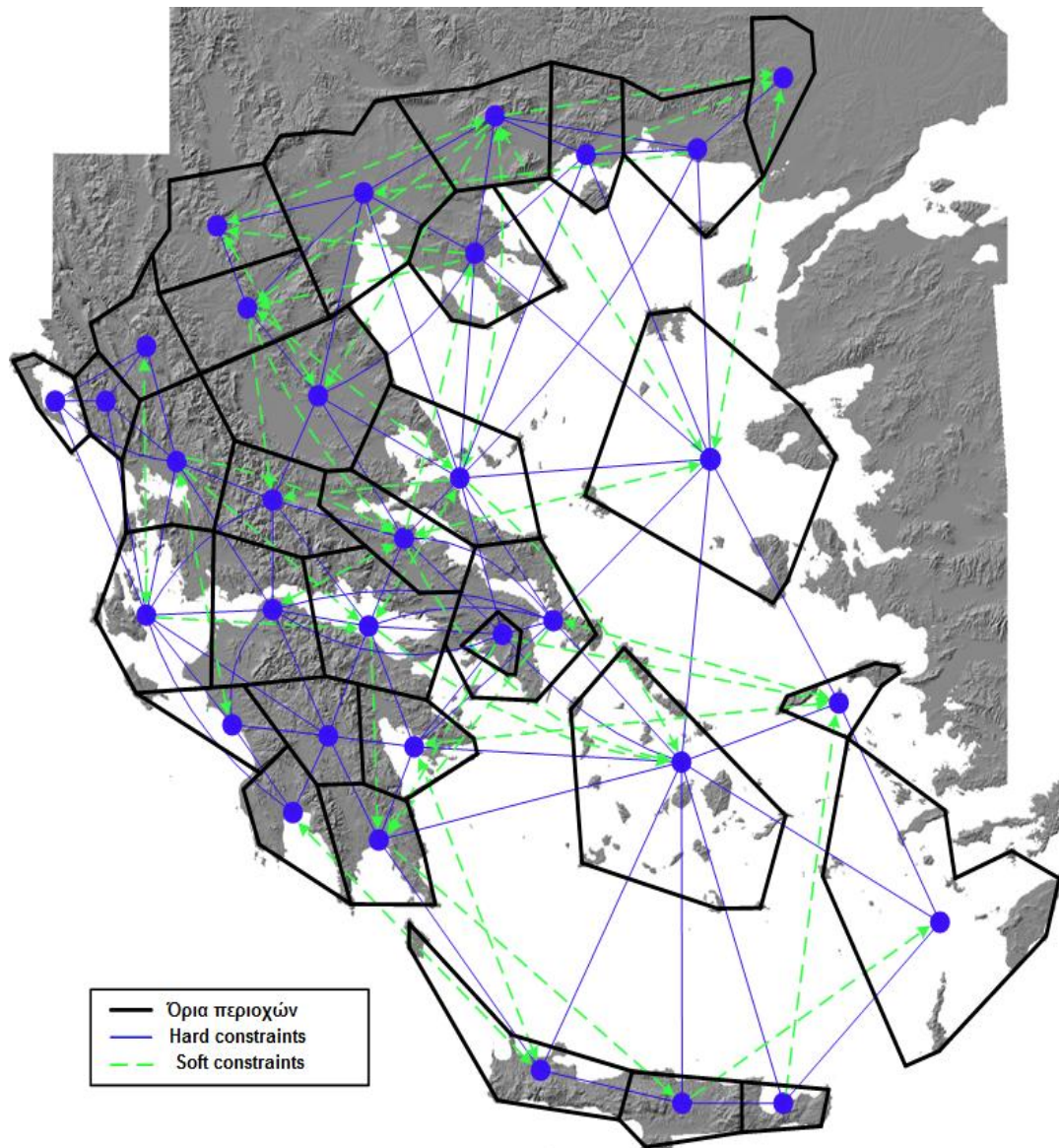
Για την ολοκλήρωση του σχεδιασμού ενός δικτύου επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης, αφού πλέον έχουν καθορισθεί οι περιοχές εκχώρησης πόρων και έχει πραγματοποιηθεί ο έλεγχος συμβατότητας ανάμεσά τους, απομένει να γίνει η ανάθεση του διαθέσιμου φάσματος. Με άλλα λόγια, σε αυτό το στάδιο του σχεδιασμού γίνεται η ανάθεση των καναλιών σε καθεμία από τις περιοχές του δικτύου. Η διαδικασία αυτή αναφέρεται ως πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων (*Frequency Assignment Problem, FAP*) [102],[103]. Η μέθοδος που ακολούθησε η *ITU* περιγράφεται στο [104] και βασίζεται σε ένα ακολουθιακό αλγόριθμο.

Διακρίνονται τρεις βασικές κατηγορίες για τα προβλήματα ανάθεσης συχνοτήτων. Στην στατική κατανομή του φάσματος (*Fixed Channel Assignment, FCA*) η ανάθεση των συχνοτήτων πραγματοποιείται στην αρχή και έπειτα είναι σταθερή για όλη τη διάρκεια λειτουργίας του δικτύου. Αντίθετα, στην δυναμική κατανομή φάσματος (*Dynamic Channel Assignment, DCA*), η ανάθεση των καναλιών είναι δυναμική κατά το πέρασμα του χρόνου και εξαρτάται από την ζήτηση που υπάρχει κάθε στιγμή. Τέλος, υπάρχει μια ενδιάμεση τεχνική, η υβριδική κατανομή φάσματος (*Hybrid Channel Assignment, HCA*), όπου ένα μέρος του φάσματος ανατίθεται εξ αρχής με βάση την *FCA* και το υπόλοιπο ρυθμίζεται δυναμικά, όπως στην *DCA*, ανάλογα με την ζήτηση. Στο δίκτυο της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης, λόγω της φύσης του προβλήματος, η κατάλληλη επιλογή είναι η στατική κατανομή φάσματος.

Η μοντελοποίηση του προβλήματος της ανάθεσης συχνοτήτων με βάση την στατική κατανομή φάσματος περιλαμβάνει, συνήθως, ένα σύνολο διαθέσιμων συχνοτήτων F και ένα σύνολο κόμβων N που αναζητούν συχνότητες. Στην περίπτωση του δικτύου της

ψηφιακής τηλεόρασης, τα δύο αυτά σύνολα αντιπροσωπεύουν τα διαθέσιμα κανάλια και τις περιοχές εκχώρησης πόρων αντίστοιχα. Έπειτα, για κάθε κόμβο $n \in N$ καθορίζεται ένα υποσύνολο $F_n \subseteq F$ διαθέσιμων συχνοτήτων, εκ των οποίων ένας συγκεκριμένος αριθμός m_n , ο οποίος δεν μεταβάλλεται με το πέρασμα του χρόνου, πρέπει να ανατεθεί στον συγκεκριμένο κόμβο. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αναζητείται μια λύση όπου σε κάθε κόμβο $n \in N$ θα ανατεθούν m_n συχνότητες από το σύνολο $F_n \subseteq F$. Το πρόβλημα αυτό μπορεί εύκολα να αναπαρασταθεί με ένα γράφο, όπου κάθε κορυφή αντιπροσωπεύει ένα κόμβο και κάθε ακμή δηλώνει την ασυμβατότητα ανάμεσα στους δύο κόμβους για την χρήση της ίδιας συχνότητας. Εναλλακτικά, το πρόβλημα μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα δυαδικό πίνακα ασυμβατοτήτων μεγέθους $N \times N$, όπου κάθε στοιχείο (i, j) του πίνακα ισούται με τη μονάδα όταν οι κόμβοι i, j είναι ασύμβατοι μεταξύ τους [103]. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι παρεμβολές ανάμεσα σε περιοχές που λειτουργούν σε διαφορετικές συχνότητες είναι ελάχιστες για το δίκτυο της ψηφιακής τηλεόρασης και συνεπώς δεν λαμβάνονται υπόψη.

Ωστόσο, η παραπάνω μεθοδολογία δεν εκτιμά την συνολική παρεμβολή που δέχεται μια περιοχή εκχώρησης πόρων, αφού κάθε κόμβος εξετάζεται μόνο ανά ζεύγος με κάθε άλλο κόμβο. Δηλαδή, δεν λαμβάνεται υπόψη η συνολική παρεμβολή που λαμβάνεται από πολλαπλές πηγές (*multiple interference*). Σε ένα δίκτυο ψηφιακής τηλεόρασης, όμως, είναι σημαντικό να ληφθεί υπόψη και αυτός ο παράγοντας, καθώς η ποιότητα του σήματος υποβαθμίζεται σημαντικά με μια μικρή μείωση του σηματοθορυβικού λόγου. Ως αποτέλεσμα, πρέπει να καθορισθούν δύο διακριτά είδη περιορισμών ανάμεσα σε δύο περιοχές εκχώρησης πόρων. Η πρώτη περίπτωση έχει να κάνει με τους σκληρούς περιορισμούς (*hard constraints*), όπου η παρεμβολή μιας περιοχής προς μια άλλη υπερβαίνει το επιτρεπόμενο όριο, το οποίο έχει υπολογιστεί σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στον έλεγχο συμβατότητας. Επιπλέον, υπάρχουν οι ήπιοι περιορισμοί (*soft constraints*), όπου η παρεμβολή από μια περιοχή προς μια άλλη δεν υπερβαίνει το όριο, αλλά παρόλα αυτά μπορεί να συμβάλει σημαντικά ώστε η συνολική παρεμβολή προς τη δεύτερη περιοχή τελικά να το ξεπεράσει. Συνήθως, οι ήπιοι περιορισμοί καθορίζονται με ένα κατάλληλο περιθώριο (*soft constraints margin*) κάτω από το επιτρεπτό όριο παρεμβολής. Στο επόμενο σχήμα, διακρίνονται οι *hard* και *soft* περιορισμοί στην περίπτωση του δικτύου της Ελλάδας [105].



Εικόνα 80: Παράδειγμα *hard* και *soft* περιορισμών

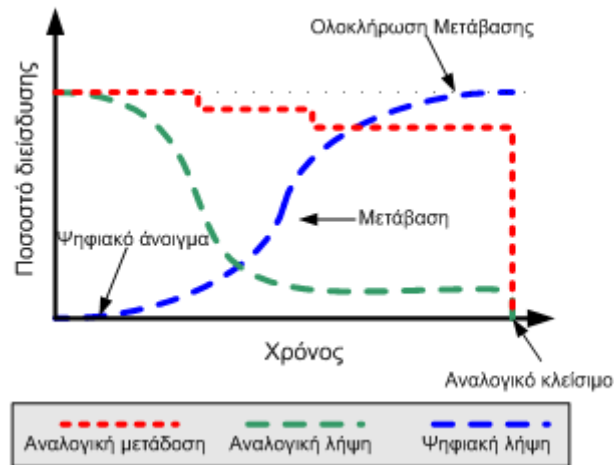
Κατά το στάδιο της σύνθεσης, συνήθως, υπάρχουν επιπρόσθετα κριτήρια και περιορισμοί που επηρεάζουν το πρόβλημα της ανάθεσης συχνοτήτων. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχει η απαίτηση η κατανομή συχνοτήτων να λαμβάνει υπόψη συγκεκριμένες συχνότητες που χρησιμοποιούνται από τους υπάρχοντες αναλογικούς σταθμούς εκπομπής. Επιπλέον, πολύ συχνά υπάρχει η επιθυμία οι συχνότητες να είναι μοιρασμένες δίκαια ανάμεσα στις περιοχές εκχώρησης πόρων, ώστε να αποφευχθούν άδικες καταστάσεις, όπου μια περιοχή που βρίσκεται σε δυσμενή θέση λαμβάνει ελάχιστες συχνότητες. Για όλους αυτούς τους λόγους, για το πρόβλημα της ανάθεσης συχνοτήτων, ενδείκνυται η χρήση στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης [106]. Σε επόμενη ενότητα του κεφαλαίου της διατριβής, θα γίνει αναλυτική περιγραφή της επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος με την χρήση των στοχαστικών αλγορίθμων.

6.3.4 Στρατηγική μετάβασης

Το τελευταίο στάδιο στο σχεδιασμό ενός δικτύου επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης δεν μπορεί παρά να αποτελείται από τη στρατηγική μετάβασης από τα υπάρχοντα αναλογικά δίκτυα μετάδοσης στα αντίστοιχα ψηφιακά. Η μετάβαση αυτή είναι αναγκαία ώστε να επιτευχθούν τα μέγιστα δυνατά οφέλη της νέας τεχνολογίας. Άλλωστε, οι υποχρεώσεις απέναντι σε διεθνείς οντότητες και οργανισμούς, όπως η Ευρωπαϊκή Ένωση και η *ITU*, οδηγούν στον τερματισμό της αναλογικής μετάδοσης σε περιορισμένο σχετικά χρονικό ορίζοντα.

Ένα ιδιαίτερα σημαντικό πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι ο τρόπος με τον οποίο θα πραγματοποιηθεί τεχνικά η μετάβαση [102]. Το φάσμα που χρησιμοποιείται για την τηλεόραση είναι περιορισμένο και εμφανίζονται ισχυρά φαινόμενα παρεμβολών ανάμεσα στα αναλογικά και τα ψηφιακά δίκτυα. Ωστόσο, η μετάβαση από την αναλογική στη ψηφιακή εκπομπή πρέπει να γίνει σταδιακά, με μια περίοδο ταυτόχρονης εκπομπής και των δύο σημάτων, με αποτέλεσμα την ύπαρξη δυσκολιών σχετικά με τη διαχείριση του φάσματος. Στη συνέχεια, επεξηγούνται οι όροι που χρησιμοποιούνται συχνά για το στάδιο της μετάβασης και ακολουθεί το σχετικό διάγραμμα:

- *Ψηφιακή μετάβαση*
Αποτελεί τη συνολική διαδικασία μετάβασης στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση. Περιλαμβάνει τη σταδιακή αντικατάσταση της υπάρχουσας αναλογικής τεχνολογίας (μετάδοση και λήψη) με την αντίστοιχη ψηφιακή.
- *Ψηφιακό άνοιγμα*
Είναι η εισαγωγή της ψηφιακής μετάδοσης και περιλαμβάνει την αναβάθμιση της υποδομής και την έναρξη της ψηφιακής μετάδοσης.
- *Αναλογικό κλείσιμο*
Αποτελεί τη λήξη της αναλογικής μετάδοσης. Προϋποθέτει την ολοκλήρωση της διαδικασίας μετάβασης, έτσι ώστε να πραγματοποιηθεί τη στιγμή που σχεδόν όλοι θα μπορούν να λάβουν ψηφιακά σήματα στους δέκτες τους.



Εικόνα 81: Βασικές διαδικασίες μετάβασης στην ψηφιακή τηλεόραση

Όσον αφορά τους τρόπους υλοποίησης της μετάβασης, διακρίνονται δύο πιθανές επιλογές. Σε μια πρώτη υλοποίηση το δίκτυο της επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης καλύπτει το σύνολο των περιοχών εκχώρησης πόρων (πανεθνικό επίπεδο), γεγονός που απαιτεί την καθολική αντικατάσταση του υπάρχοντος αναλογικού δικτύου. Στη δεύτερη περίπτωση, η μετάβαση γίνεται σε συγκεκριμένες περιοχές (τοπικό επίπεδο) τουλάχιστον στο αρχικό στάδιο της μετάβασης και στη συνέχεια, ανάλογα με το ποσοστό επιτυχίας της εφαρμογής, αποφασίζεται αν και πώς θα επεκταθεί και στις υπόλοιπες περιοχές. Αυτή η μέθοδος πλεονεκτεί έναντι της πρώτης, αφού παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης της πορείας της ψηφιακής τηλεόρασης και διεξαγωγής χρήσιμων συμπερασμάτων για την εφαρμογή της σε πανεθνικό επίπεδο. Επιπλέον, με την εκκίνηση της λειτουργίας σε περιοχές μεγάλης πληθυσμιακής πυκνότητας, το εγχείρημα εξασφαλίζεται και από οικονομική άποψη, καθώς είναι πιο πιθανή η απόσβεση των εξόδων της εγκατάστασης του δικτύου.

Όπως έχει ήδη σημειωθεί, το βασικό θέμα που αφορά το στάδιο της μετάβασης είναι οι πιθανές παρεμβολές ανάμεσα στο υπάρχον αναλογικό δίκτυο και το ψηφιακό δίκτυο που πρέπει να σχεδιασθεί. Ως συνέπεια, είναι σημαντικό να υπολογισθούν αυτές οι παρεμβολές και να καθορισθούν συγκεκριμένες ασυμβατότητες ανάμεσα στις περιοχές εκχώρησης πόρων και στους αναλογικούς σταθμούς εκπομπής. Για να επιτευχθεί αυτό πρέπει να πραγματοποιηθούν τα ακόλουθα βήματα:

- **Υπολογισμός παρεμβολής από ένα allotment σε ένα αναλογικό assignment**

Προκειμένου να διαπιστωθεί η παρεμβολή από μια περιοχή εκχώρησης πόρων προς ένα αναλογικό σταθμό εκπομπής, ακολουθείται μια διαδικασία παρόμοια με αυτή που παρουσιάστηκε στο στάδιο του έλεγχου συμβατότητας. Αρχικά πρέπει να καθορισθεί η περιοχή κάλυψης του αναλογικού σταθμού. Για να επιτευχθεί αυτό

συνυπολογίζονται οι παρεμβολές από τους υπόλοιπους αναλογικούς σταθμούς που λειτουργούν στην ίδια συχνότητα και πλέον η περιοχή κάλυψης ορίζεται ως η περιοχή (*interference limited contour*) για την οποία ισχύει η σχέση (70). Στη συνέχεια, η περιοχή κάλυψης οριοθετείται από *test points*, στα οποία υπολογίζεται η παρεμβολή από την περιοχή εκχώρησης πόρων. Η παρεμβολή αυτή, όπως και προηγουμένως, υπολογίζεται με τη χρήση των *RNs*. Οι σχέσεις (71)-(72) για την μέγιστη αποδεκτή παρεμβολή εξακολουθούν να ισχύουν και εδώ, με την διαφορά ότι η ελάχιστη απαιτούμενη ένταση πεδίου και οι λόγοι προστασίας παίρνουν διαφορετικές τιμές για την περίπτωση αυτή, σύμφωνα με τη σύσταση [107].

▪ **Υπολογισμός παρεμβολής από ένα αναλογικό assignment σε ένα allotment**

Για την εύρεση της παρεμβολής από ένα αναλογικό σταθμό εκπομπής προς μια περιοχή εκχώρησης πόρων ακολουθείται παρόμοια διαδικασία με την περίπτωση της παρεμβολής από ψηφιακό σταθμό εκπομπής. Αρχικά υπολογίζονται οι εξερχόμενες παρεμβολές σε κάθε *test point* της περιοχής εκχώρησης πόρων και με βάση τις εξισώσεις (71)-(72) γίνεται ο έλεγχος συμβατότητας. Οι τιμές για τους λόγους προστασίας δίνονται στην προδιαγραφή [107]. Υπενθυμίζεται ότι η ένταση του επιθυμητού πεδίου εξαρτάται από τη σχεδιαστική διάταξη *RPC* που έχει υιοθετηθεί στην εκάστοτε περιοχή εκχώρησης πόρων.

Σε κάθε περίπτωση, η μοντελοποίηση του προβλήματος της μετάβασης στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση βασίζεται στην αντίστοιχη που προηγήθηκε για το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων και περιλαμβάνει ένα σύνολο N περιοχών εκχώρησης πόρων και ένα σύνολο A αναλογικών σταθμών εκπομπής. Έπειτα, σε κάθε περιοχή $n \in N$ έχει καταχωρηθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός m_n συχνοτήτων από το σύνολο $F_n \subseteq F$. Αναλυτικότερα, στην περιοχή n έχει αποδοθεί οι f_n συχνότητες, όπου $f_n \subseteq F_n$. Από την άλλη πλευρά, κάθε αναλογικός σταθμός εκπομπής $a \in A$ λειτουργεί στις καθορισμένες f_a συχνότητες, όπου $f_a \subseteq F$. Σύμφωνα με τα παραπάνω, αναζητείται μια λύση όπου σε κάθε περιοχή $n \in N$ θα αρχίσει να λειτουργεί ένας συγκεκριμένος αριθμός από τις f_n συχνότητες και παράλληλα θα σταματήσουν να εκπέμπουν στις συγκεκριμένες συχνότητες οι αναλογικοί σταθμοί που είναι ασύμβατοι με την περιοχή n . Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα δυαδικό πίνακα ασυμβατότητας μεγέθους $F \times N \times A$, όπου κάθε στοιχείο (φ, i, j) του πίνακα ισούται με τη μονάδα, όταν η περιοχή i και ο αναλογικός σταθμός j έχουν πρόβλημα παρεμβολών στην συχνότητα φ .

Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί ότι το σύνολο A δεν αποτελείται απαραίτητα από αναλογικούς σταθμούς της ίδιας χώρας, αλλά μπορεί να περιλαμβάνει αναλογικούς σταθμούς γειτονικών κρατών. Σε αυτήν την περίπτωση μια πιθανή επιλογή είναι να δίνεται ιδιαίτερη βαρύτητα στην χρήση συχνοτήτων για τις οποίες δεν δημιουργούνται προβλήματα με αναλογικούς σταθμούς γειτονικών κρατών, ώστε να αποφευχθούν οι συνήθως χρονοβόρες διακρατικές διαδικασίες συντονισμού. Γίνεται πλέον κατανοητό ότι λόγω της πολυπλοκότητας του προβλήματος της μετάβασης στην ψηφιακή τηλεόραση ενδείκνυται η χρήση στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Στη επόμενη ενότητα αναλύεται η επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος με την χρήση των στοχαστικών αλγορίθμων και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για ένα συγκεκριμένο παράδειγμα δικτύου.

7 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΩΝ ΓΙΑ ΔΙΚΤΥΑ ΕΠΙΓΕΙΑΣ ΨΗΦΙΑΚΗΣ ΤΗΛΕΟΡΑΣΗΣ

Για την επίλυση του προβλήματος την ανάθεσης συχνοτήτων και της μετάβασης στην ψηφιακή τηλεόραση, εξαιτίας της πολυπλοκότητας και του μεγάλου υπολογιστικού χώρου λύσεων, γίνεται χρήση στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Συγκεκριμένα, τα δύο προβλήματα που παρουσιάζονται ανήκουν στην κατηγορία των *NP-complete* προβλημάτων, ενώ η επίλυσή τους εξετάζοντας ολόκληρο τον χώρο λύσεων, ακόμα και για ένα μικρό δίκτυο, είναι απαγορευτική. Οι αλγόριθμοι που θα εφαρμοσθούν πρέπει να βελτιστοποιούν τη χρησιμοποίηση του φάσματος, ενώ παράλληλα η υλοποίησή τους πρέπει να απαιτεί όσο το δυνατόν λιγότερο χρόνο υπολογισμού για την επίλυση του προβλήματος (*time efficient* αλγόριθμοι). Στην συνέχεια της ενότητας θα γίνει αναλυτική παρουσίαση του τρόπου αντιμετώπισης κάθε προβλήματος, καθώς και των αποτελεσμάτων που προέκυψαν.

7.1 Ανάθεση συχνοτήτων

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται χρήση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης, ώστε τελικά να πραγματοποιηθεί η ανάθεση των διαθέσιμων συχνοτήτων στις περιοχές εκχώρησης πόρων [105]. Βασικός σκοπός είναι να ανατεθούν όσο το δυνατόν περισσότερες συχνότητες, χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί που έχουν προκύψει από τον έλεγχο συμβατότητας. Επιπλέον, δίνεται προσοχή ώστε η κατανομή που τελικά προκύπτει να εξασφαλίζει μια ισορροπία και να μην ευνοούνται συγκεκριμένες περιοχές, οι οποίες δεν έχουν πολλές ασυμβατότητες, εις βάρος των υπολοίπων.

Στη συνέχεια ακολουθεί η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος, για δύο διαφορετικές εκδοχές, ανάλογα με το αν εξετάζεται η παρεμβολή από πολλαπλές πηγές. Υπενθυμίζεται ότι για κάθε κόμβο $n \in N$ ζητείται να ανατεθούν m_n συχνότητες από το υποσύνολο $F_n \subseteq F$ των διαθέσιμων συχνοτήτων. Έστω ότι $I_{nk}^{TP_n^i}$ είναι η μέγιστη παρεμβολή μιας περιοχής εκχώρησης πόρων k προς κάθε σημείο μέτρησης (*test point*) TP_n^i της περιοχής n , όταν οι δύο περιοχές χρησιμοποιούν την ίδια συχνότητα. Το σύνολο των *test points* της περιοχής n συμβολίζεται με TP_n . Εφόσον στο πρόβλημα που μελετάται λαμβάνονται υπόψη μόνο οι σκληροί περιορισμοί, είναι βολικό να οριστεί η μέγιστη παρεμβολή I_{nk} ανάμεσα στις δύο περιοχές, σύμφωνα με τη σχέση:

$$I_{nk} = \max_{i \in TP_n} (I_{nk}^{TP_n^i}) \quad (74)$$

Έστω, επίσης, ότι με I_n^{max} συμβολίζεται η μέγιστη αποδεκτή εισερχόμενη παρεμβολή για την περιοχή n . Τότε, το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων χωρίς παρεμβολές από πολλαπλές πηγές μπορεί να περιγραφεί σύμφωνα με την εικόνα:

$$\begin{aligned} & \max \left\{ \sum_{n \in N} m_n \right\}, \text{ υπό τους όρους:} \\ & I_{nk} < I_n^{max} \text{ για } \forall n, k \in N, \text{ με } n \neq k \\ & m_n \geq L \text{ για } \forall n \in N \end{aligned}$$

Εικόνα 82: Περιγραφή προβλήματος χωρίς παρεμβολές από πολλαπλές πηγές

Η παράμετρος L αποτελεί τον ελάχιστο αριθμό καναλιών που επιτρέπεται να ανατεθούν σε κάθε περιοχή και έχει ως σκοπό την διατήρηση ισορροπίας στην τελική κατανομή. Η τιμή της καθορίζεται καθώς εξελίσσεται ο αλγόριθμος, όπως θα εξηγηθεί στη συνέχεια. Στο παραπάνω πρόβλημα, ο περιορισμός με τις παρεμβολές μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα δυαδικό πίνακα ασυμβατοτήτων μεγέθους $N \times N$, όπου κάθε στοιχείο (n, k) του πίνακα ισούται με τη μονάδα όταν οι περιοχές n, k είναι ασύμβατες. Ωστόσο, με την προηγούμενη διατύπωση δεν εκτιμάται η συνολική παρεμβολή που λαμβάνεται από πολλαπλές πηγές, αφού κάθε περιοχή εξετάζεται μόνο ανά ζεύγος με κάθε άλλη περιοχή. Για να εκτιμηθεί η συνολική παρεμβολή, εκτός από τους σκληρούς περιορισμούς πρέπει να εξεταστούν και οι ήπιοι περιορισμοί, οπότε το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων παίρνει πλέον τη μορφή:

$$\begin{aligned} & \max \left\{ \sum_{n \in N} m_n \right\}, \text{ υπό τους όρους:} \\ & \sum_{k \in N, k \neq n} I_{nk}^{TP_n^i} < I_n^{max} \text{ για } \forall n \in N \text{ και } \forall i \in TP_n \\ & m_n \geq L \text{ για } \forall n \in N \end{aligned}$$

Εικόνα 83: Περιγραφή προβλήματος με παρεμβολές από πολλαπλές πηγές

Σε αντίθεση με την πρώτη εκδοχή του προβλήματος, εδώ ο περιορισμός με τις παρεμβολές δεν μπορεί να αναπαρασταθεί με ένα δυαδικό πίνακα. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται χρήση ενός πίνακα με πραγματικές τιμές και $(\sum_{n \in N} [TP_n]) \times N$ διαστάσεις, όπου με $[TP_n]$ συμβολίζεται το πλήθος των *test points* της περιοχής n . Κάθε στοιχείο του πίνακα ισούται με την τιμή της αντίστοιχης παρεμβολής $I_{nk}^{TP_n^i}$ και ο έλεγχος γίνεται απλά προσθέτοντας τα στοιχεία μιας γραμμής του πίνακα και εξετάζοντας την ανισότητα από τον περιορισμό των παρεμβολών.

Σε κάθε περίπτωση, ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης για το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων ακολουθεί μια προσέγγιση που βασίζεται στην κατανομή καναλιών ανά επίπεδο (*layer*). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή, αρχικά γίνεται η προσπάθεια να ανατεθεί μία συχνότητα σε κάθε περιοχή εκχώρησης πόρων με χρήση των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Αν η συγκεκριμένη προσπάθεια στεφθεί με επιτυχία, έχει πλέον καθοριστεί το πρώτο επίπεδο συχνοτήτων και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για το επόμενο επίπεδο. Έτσι, το πρώτο βασικό στάδιο του αλγόριθμου ανάθεσης συχνοτήτων ολοκληρώνεται όταν έχουν δοθεί L συχνότητες σε κάθε περιοχή ή με άλλα λόγια έχουν δημιουργηθεί L πλήρη επίπεδα συχνοτήτων και δεν είναι δυνατόν να επαναληφθεί το ίδιο για το επόμενο $L + 1$ επίπεδο. Στο επόμενο στάδιο του αλγόριθμου, όπως είναι φανερό, δεν είναι δυνατόν να βρεθεί ένα πλήρες επίπεδο συχνοτήτων χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί. Συγκεκριμένα, η βέλτιστη λύση για το καινούριο επίπεδο θα περιλαμβάνει τουλάχιστον μία περίπτωση όπου δύο ή περισσότερες περιοχές που τους έχει αποδοθεί η ίδια συχνότητα, είναι ασύμβατες μεταξύ τους λόγω σκληρών ή ήπιων περιορισμών. Ως αποτέλεσμα, πρέπει να καθορισθεί από ποιες περιοχές θα αφαιρεθεί η συχνότητα, έτσι ώστε τελικά να προκύψει ένα επίπεδο με $N' < N$ συχνότητες, όπου όμως ικανοποιούνται όλοι οι περιορισμοί. Αναλυτικότερα, η διαδικασία που ακολουθείται περιέχει τα επόμενα κριτήρια που εφαρμόζονται σειριακά:

1. Σύγκριση αριθμού περιοχών που θα αφαιρεθεί η συχνότητα

Όπως είναι λογικό, ανάμεσα σε δύο πιθανές λύσεις προτιμάται αυτή που οδηγεί στην αφαίρεση της συχνότητας από τις λιγότερες περιοχές. Για την εφαρμογή του συγκεκριμένου κριτηρίου, αρχικά πρέπει να εξεταστεί για ποιους συνδυασμούς περιοχών προκύπτει εφικτή λύση και έπειτα να επιλεχθεί αυτός που αφορά τις λιγότερες περιοχές. Αν για παράδειγμα σε μια συχνότητα υπάρχουν ασυμβατότητες όπου εμπλέκονται q περιοχές, οι δυνατοί συνδυασμοί p δίνονται από τη σχέση:

$$p = \sum_{i=1}^q \binom{q}{i} \quad (75)$$

Από τους p δυνατούς συνδυασμούς, μόνο οι $p' \leq p$ οδηγούν σε εφικτή λύση, εκ των οποίων τελικά επιλέγεται μόνο ένας. Στην περίπτωση όπου υπάρχουν περισσότερες από μία βέλτιστες λύσεις, η επιλογή ανάμεσά τους θα γίνει σύμφωνα με το επόμενο κριτήριο. Τέλος, σημειώνεται ότι πιθανώς η αναζήτηση όλων των εφικτών λύσεων να αποτελέσει χρονοβόρα διαδικασία. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί αν η εξέταση γίνει σταδιακά για αυξανόμενο αριθμό $i = 1, \dots, q$

εμπλεκόμενων περιοχών. Αν προκύψει μια λύση για μια συγκεκριμένη τιμή i , δεν χρειάζεται να αναζητηθούν οι υπόλοιπες λύσεις για μεγαλύτερη τιμή $i' > i$.

2. Σύγκριση αριθμού καναλιών

Από τις λύσεις που προέκυψαν μετά το πρώτο κριτήριο, επιλέγεται αυτή όπου οι εμπλεκόμενες περιοχές έχουν τις λιγότερες συχνότητες. Εδώ υπάρχουν δύο πιθανές εκδοχές υλοποίησης. Έστω ότι με Q συμβολίζεται το σύνολο με τις υπό συζήτηση q περιοχές. Σύμφωνα με την πρώτη εκδοχή, η σύγκριση αφορά το μέσο αριθμό $\sum_{n \in Q} m_n / q$ των καναλιών που έχουν αποδοθεί στις περιοχές. Στη δεύτερη περίπτωση, η σύγκριση γίνεται με βάση τον ελάχιστο αριθμό καναλιών $\min_{n \in Q} m_n$ που έχει ανατεθεί ανάμεσα στις περιοχές. Αυτό το κριτήριο αποσκοπεί στην δίκαια τελική κατανομή και εξασφαλίζει ότι κάθε περιοχή θα έχει τουλάχιστον L συχνότητες. Αν δεν προκύψει μοναδική λύση, η επιλογή ανάμεσα στις βέλτιστες λύσεις γίνεται με το επόμενο κριτήριο.

3. Τυχαία επιλογή

Από το σύνολο των πιθανών λύσεων που έχει προκύψει από τα προηγούμενα κριτήρια, επιλέγεται μία λύση τυχαία. Η διαδικασία επίλυσης ασυμβατοτήτων σπάνια καταλήγει σε αυτό το κριτήριο, ωστόσο και εδώ εξασφαλίζεται για ακόμα μια φορά η δίκαιη κατανομή των συχνοτήτων.

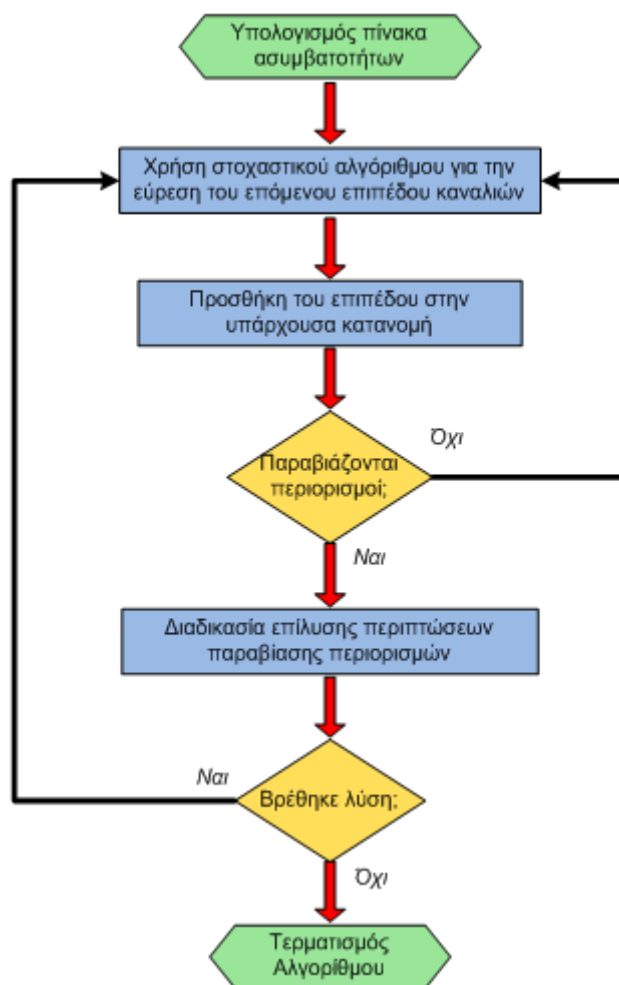
Τα παραπάνω κριτήρια εφαρμόζονται πολλές φορές καθώς αναζητούνται τα επόμενα βέλτιστα επίπεδα συχνοτήτων. Όσο εξελίσσεται η διαδικασία, τα κανάλια που προστίθενται λιγοστεύουν διαρκώς, αφού όπως είναι λογικό, σταδιακά αυξάνονται οι ασυμβατότητες που προκύπτουν. Το δεύτερο στάδιο του αλγόριθμου ανάθεσης συχνοτήτων τελικά ολοκληρώνεται όταν στο καινούριο επίπεδο δεν είναι πλέον εφικτό να προστεθεί ούτε μια συχνότητα. Σε αυτό το σημείο αξίζει να υπογραμμιστεί ότι το βασικό πλεονέκτημα της σταδιακής προσέγγισης ανά επίπεδο συχνοτήτων, η οποία εφαρμόζεται και στα δύο στάδια του αλγόριθμου, είναι ότι το αρχικό πρόβλημα διασπάται σε ευκολότερα επιμέρους προβλήματα, τα οποία απαιτούν και πολύ λιγότερο υπολογιστικό χρόνο. Επίσης, διασφαλίζεται η διατήρηση ισορροπίας με τον υπολογισμό της παραμέτρου L που αλλιώς δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων και μπορεί να βρεθεί μόνο με εξαντλητικές δοκιμές.

Ο βασικός πυρήνας της διαδικασίας ανάθεσης συχνοτήτων, όπως διαπιστώνεται εύκολα, περιλαμβάνει την εύρεση του καινούριου βέλτιστου επιπέδου συχνοτήτων με τη χρήση των

στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Όσον αφορά την υλοποίηση των αλγορίθμων, κάθε σημείο αναζήτησης είναι βολικό να αναπαρασταθεί ως ένα διάνυσμα μήκους $[N]$, δηλαδή $x \in \mathbb{Z}^{[N]}$. Κάθε στοιχείο της πιθανής λύσης x παίρνει διακριτές τιμές από το σύνολο F . Αν με C_1 συμβολίζεται ο συνολικός αριθμός των περιοχών που εμπλέκονται σε όλες τις παραβιάσεις περιορισμών και C_2 είναι ο αντίστοιχος αριθμός, χωρίς όμως να επαναλαμβάνεται δύο ή περισσότερες φορές η ίδια περιοχή, η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης $f : \mathbb{Z}^{[N]} \rightarrow \mathbb{R}$ δίνεται από την σχέση:

$$f(x) = w_1 C_1 + w_2 C_2 \quad (76)$$

όπου w_1, w_2 είναι κατάλληλοι συντελεστές βάρους, για τους οποίους έπειτα από δοκιμές επιλέχθηκε $[w_1, w_2] = [2, 1]$. Ο δεύτερος όρος της συνάρτησης χρησιμοποιείται ώστε να δίνεται προτίμηση στις λύσεις που εμπλέκουν μικρότερο αριθμό περιοχών. Προφανώς, όταν $f(x) = 0$ δεν υπάρχει καμία παραβίαση και η λύση γίνεται δεκτή. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το βασικό διάγραμμα ροής για την επίλυση του προβλήματος ανάθεσης συχνοτήτων:



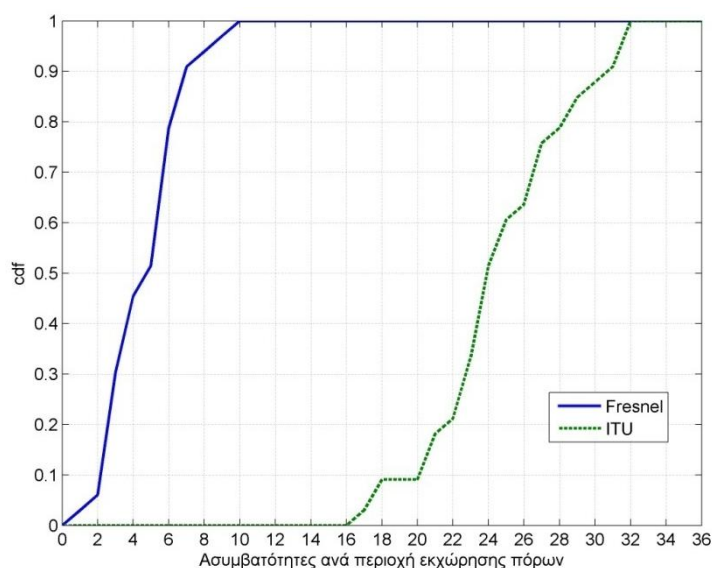
Εικόνα 84: Βασικό διάγραμμα ροής για το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόζεται στη συνέχεια για την επίλυση του προβλήματος ανάθεσης συχνοτήτων στην χώρα της Ελλάδας, όπου $[N] = 33$ και $[F] = 49$. Ο γράφος με τους σκληρούς και ήπιους περιορισμούς του συγκεκριμένου προβλήματος φαίνεται στην Εικόνα 80. Στον επόμενο πίνακα παρουσιάζονται οι επιλογές για τις βασικές παραμέτρους του δικτύου που χρησιμοποιήθηκαν στο σενάριο προσομοίωσης:

Αναφορική Διάταξη Σχεδιασμού (<i>RPC</i>)	2
Δίκτυο Αναφοράς (<i>RN</i>)	1
Λόγος Προστασίας (<i>PR</i>)	16 dB
Μοντέλο Διάδοσης	Fresnel
Απώλειες Περίθλασης	Bullington

Πίνακας 20: Βασικές παράμετροι για το σενάριο προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα που ακολουθούν αφορούν δύο συγκεκριμένα σενάρια προσομοίωσης με αντίστοιχους πίνακες ασυμβατοτήτων. Η πρώτη περίπτωση έχει να κάνει με τον πίνακα που προέκυψε σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης της *ITU* και η δεύτερη με το ακριβέστερο μοντέλο *Fresnel*. Στην επόμενη γραφική παράσταση παρουσιάζεται η αθροιστική συνάρτηση κατανομής *cdf* (*cumulative distribution function*) των ασυμβατοτήτων ανά περιοχή εκχώρησης πόρων.



Εικόνα 85: Ασυμβατότητες ανά περιοχή για τα μοντέλα διάδοσης

Όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα, η διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα διάδοσης είναι πολύ μεγάλη. Αυτό οφείλεται κυρίως στην πλούσια μορφολογία του εδάφους της Ελλάδας, με μεγάλες ορεινές και παραθαλάσσιες εκτάσεις. Στον ακόλουθο πίνακα περιέχονται συγκεντρωτικά πληροφορίες για τους δύο πίνακες ασυμβατοτήτων.

Ασυμβατότητες	ITU	Fresnel
Συνολικός αριθμός	826	166
Μέση τιμή	25	5
Μέγιστη	32	10
Ελάχιστη	17	1

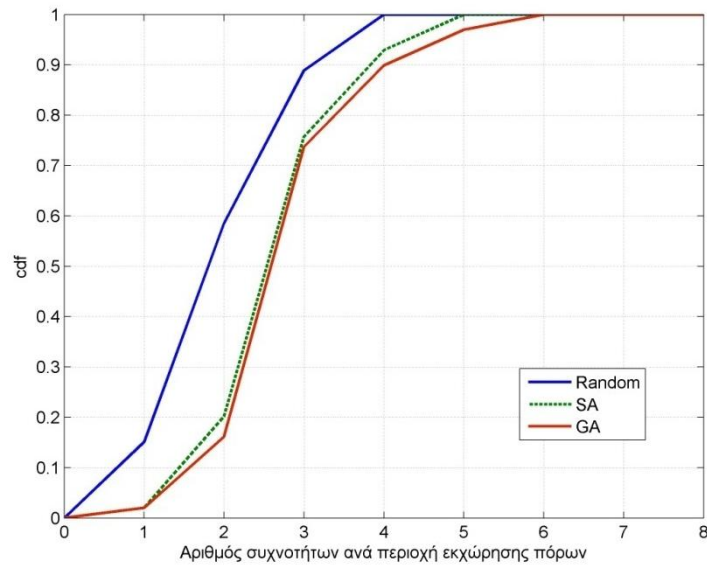
Πίνακας 21: Βασικά στοιχεία πίνακα ασυμβατοτήτων

Για τον υπολογισμό των συχνοτήτων που λαμβάνει κάθε περιοχή εφαρμόστηκαν τρεις χαρακτηριστικοί στοχαστικοί αλγόριθμοι: η προσομοιωμένη ανόπτηση (SA), οι γενετικοί (GA) ως αντιπροσωπευτικό δείγμα της κατηγορίας των εξελικτικών αλγορίθμων και τέλος, για συγκριτικούς λόγους, η τυχαία αναζήτηση (Random).

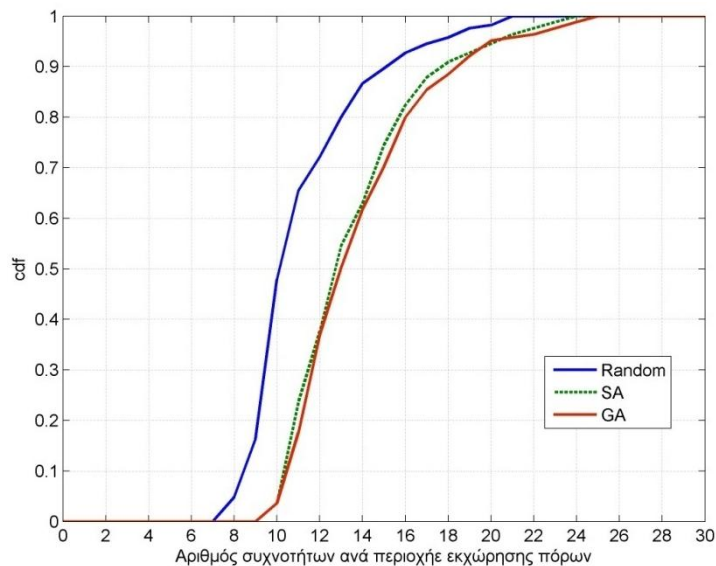
Γενετικός Αλγόριθμος	
Πλήθος γενιάς	100
Επαναλήψεις	300
Επιλογή	roulette wheel selection
Διασταύρωση	ομοιόμορφη $p_c = [0.85 \ 0.55]$
Μετάλλαξη	$p_m = [0.001 \ 0.02]$
Προσομοιωμένη ανόπτηση	
Επαναλήψεις	100
Μείωση θερμοκρασίας	γραμμική $\alpha = 0.9$
Υπολογισμός T_0	$thr = 0.9$
Ελάχιστη θερμοκρασία	$T_{min} = 10^{-30}$
Γειτονικές θέσεις	αλλαγή σε δύο θέσεις
Τυχαία αναζήτηση	
Επαναλήψεις	10^4

Πίνακας 22: Παράμετροι αλγορίθμων για το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων

Στην Εικόνα 86 φαίνεται η *cdf* των συχνοτήτων ανά περιοχή, για το μοντέλο διάδοσης της ITU. Όπως αναμενόταν, λόγω του πυκνού πίνακα ασυμβατοτήτων, ο αριθμός των συχνοτήτων που αποδίδεται στις περιοχές είναι αρκετά μειωμένος. Ο Random αλγόριθμος προφανώς έχει την χειρότερη απόδοση, ενώ όσον αφορά τους άλλους δύο αλγόριθμους, ο GA έχει λίγο καλύτερη απόδοση. Κατά τη βέλτιστη λύση, ο ελάχιστος αριθμός συχνοτήτων που αποδίδεται σε μια περιοχή είναι ίσος με 1, ενώ αντίστοιχα ο μέγιστος είναι ίσος με 6. Στη συνέχεια, στην Εικόνα 87 φαίνεται η αντίστοιχη *cdf* για το ντετερμινιστικό μοντέλο διάδοσης απωλειών και λαμβάνοντας υπόψη μόνο τους σκληρούς περιορισμούς. Εδώ ο αριθμός των συχνοτήτων που αποδίδεται στις περιοχές είναι κατά πολύ μεγαλύτερος. Η επίδοση του SA και του GA είναι σχεδόν η ίδια, με τον GA να είναι και πάλι λίγο καλύτερος. Κατά τη βέλτιστη λύση, ο ελάχιστος αριθμός συχνοτήτων που αποδίδεται σε μια περιοχή ισούται με 10, ενώ αντίστοιχα ο μέγιστος αριθμός είναι ίσος με 25.

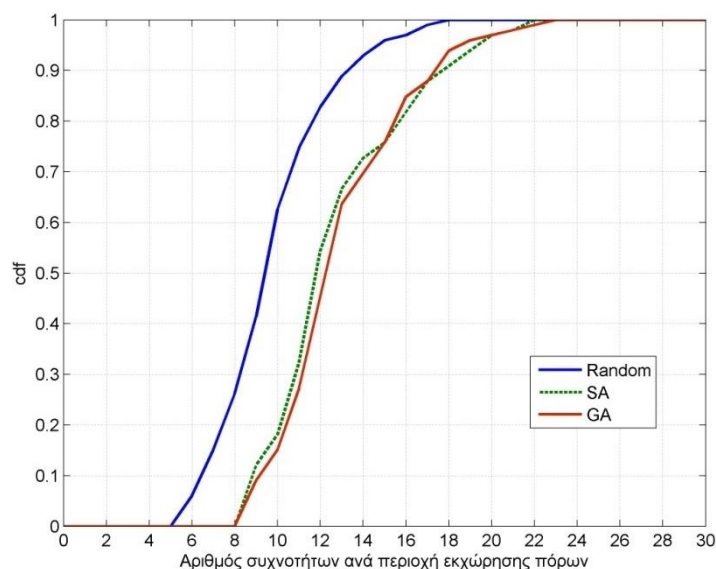


Εικόνα 86: Συχνότητες ανά περιοχή για ITU

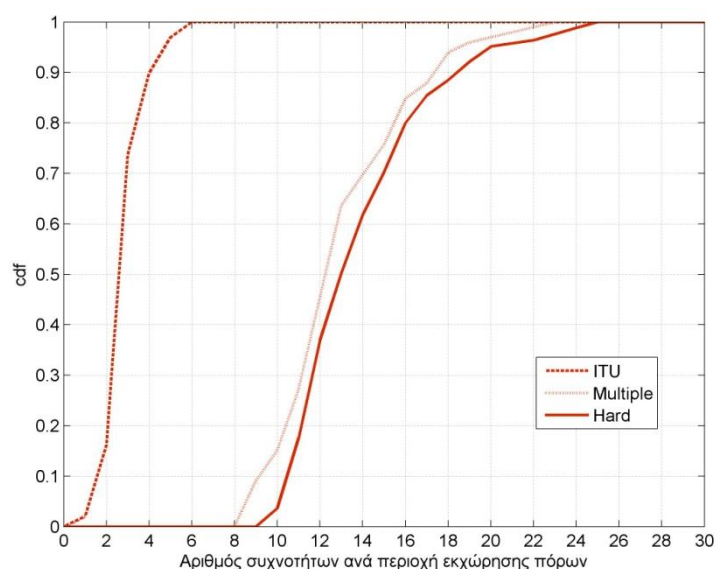


Εικόνα 87: Συχνότητες ανά περιοχή με σκληρούς περιορισμούς

Επίσης, πρέπει να εξεταστεί η περίπτωση όπου λαμβάνονται υπόψη παρεμβολές από πολλαπλές πηγές. Στην Εικόνα 88 διακρίνεται η *cdf* των συχνοτήτων ανά περιοχή για το ντετερμινιστικό μοντέλο διάδοσης απωλειών και συνυπολογίζοντας τους σκληρούς και ήπιους περιορισμούς. Λόγω της προσθήκης των ήπιων περιορισμών, φαίνεται ότι τα αποτελέσματα είναι χειρότερα σε αυτή την περίπτωση. Αξίζει να σημειωθεί ότι πλέον ο ελάχιστος αριθμός συχνοτήτων στην καλύτερη περίπτωση μειώθηκε και ισούται με 9. Για ευκολότερη σύγκριση των γραφικών παραστάσεων, στην Εικόνα 89 διακρίνονται οι βέλτιστες λύσεις για κάθε σενάριο προσομοίωσης.



Εικόνα 88: Συχνότητες ανά περιοχή με σκληρούς και ήπιους περιορισμούς



Εικόνα 89: Συχνότητες ανά περιοχή από βέλτιστους αλγόριθμους

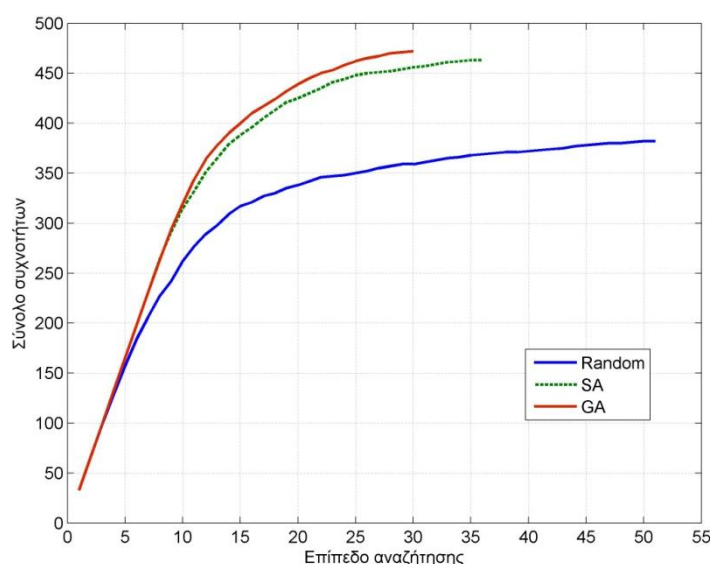
Από την τελευταία εικόνα διαπιστώνεται ότι ακόμα και για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης που περιλαμβάνει ένα μικρό αριθμό περιοχών, η προσθήκη ελέγχου της πολλαπλής παρεμβολής περιορίζει τις εφικτές λύσεις. Αντίθετα, όταν λαμβάνονται υπόψη μόνο οι σκληροί περιορισμοί δεν ανιχνεύονται αυτές οι περιπτώσεις και προκύπτουν πιο αισιόδοξα (*opportunistic*) αποτελέσματα. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα από το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων. Με *R* συμβολίζεται ο *Random* αλγόριθμος και *Reuse factor* είναι ο συντελεστής επαναχρησιμοποίησης των συχνοτήτων.

Αλγόριθμοι	ITU			Multiple			Hard		
	R	SA	GA	R	SA	GA	R	SA	GA
Σύνολο συχνοτήτων	78	102	106	336	435	441	382	463	472
Μέση τιμή »	2.4	3.1	3.2	10.2	13.2	13.4	11.6	14.0	14.3
Μέγιστο »	4	5	6	18	22	23	21	24	25
Ελάχιστο »	1	1	1	6	9	9	8	10	10
Reuse factor (%)	4.8	6.3	6.6	20.8	26.9	27.3	23.6	28.6	29.2
Χρόνος Προσομοίωσης (sec)	3046	2937	6413	17668	13641	20576	3846	3647	6412

Πίνακας 23: Αποτελέσματα ανάθεσης συχνοτήτων

Από τον πίνακα παρατηρείται ότι σε όλες τις περιπτώσεις, ο GA οδηγεί σε λίγο καλύτερες λύσεις από τον SA εις βάρος όμως του απαιτούμενου υπολογιστικού χρόνου που κυμαίνεται από 1.5 έως 2.2 φορές μεγαλύτερος. Αυτό είναι αναμενόμενο για ένα εξελικτικό αλγόριθμο, καθώς η αντικειμενική συνάρτηση εκτιμάται για ολόκληρο το σύνολο των πιθανών λύσεων. Αξίζει να σημειωθεί ότι υπολογιστικός χρόνος είναι αρκετά μεγαλύτερος για το πρόβλημα της πολλαπλής παρεμβολής, μιας και ο έλεγχος ασυμβατότητας, αλλά και η διαδικασία επίλυσης περιπτώσεων παραβίασης περιορισμών εμπεριέχουν περισσότερες υπολογιστικές πράξεις. Σημειώνεται ότι οι υπολογισμοί έγιναν σε επεξεργαστή Intel Core 2 Duo, 8300 (2.4GHz) με 4GB DDR2 Ram.

Τέλος, ένα ακόμα σημαντικό κριτήριο για την αξιολόγηση των αλγορίθμων είναι η ταχύτητα σύγκλισης. Στο ακόλουθο σχήμα διακρίνεται η βέλτιστη εξέλιξη του συνολικού αριθμού συχνοτήτων ανά επίπεδο καναλιών για το σενάριο με τους σκληρούς περιορισμούς.



Εικόνα 90: Ταχύτητα σύγκλισης αλγορίθμων με σκληρούς περιορισμούς

Από το σχήμα διαπιστώνεται ότι παρόλο που ο GA απαιτεί περισσότερο υπολογιστικό χρόνο, στην πραγματικότητα συγκλίνει πιο γρήγορα στην βέλτιστη λύση, συγκριτικά με τον

SA που χρειάζεται περίπου 8 πρόσθετα επίπεδα αναζήτησης. Όπως είναι εύλογο, ο *Random* αλγόριθμος συγκλίνει πολύ αργά, αφού στην ουσία δεν υπάρχει κάποιος μηχανισμός για την εύρεση τοπικών και ολικών ελαχίστων.

Συμπερασματικά, το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων στις περιοχές εκχώρησης πόρων αντιμετωπίστηκε με τη βοήθεια των στοχαστικών αλγορίθμων. Εξετάστηκαν τρία πιθανά σενάρια, σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης της *ITU* και με ντετερμινιστικό μοντέλο με και χωρίς πολλαπλή παρεμβολή. Διαπιστώθηκε ότι το πρώτο σενάριο δεν είναι κατάλληλο για μια χώρα με γεωγραφική μορφολογία όπως η Ελλάδα. Επίσης, αποδείχθηκε ότι οι ήπιοι περιορισμοί πρέπει να συνυπολογίζονται, καθώς έχουν αντίκτυπο στην τελική λύση, ακόμα και για μικρό αριθμό περιοχών. Αναφορικά με τους στοχαστικούς αλγόριθμους, ο *GA* οδήγησε στις καλύτερες λύσεις απαιτώντας όμως σαφώς περισσότερο υπολογιστικό χρόνο από τον *SA*.

7.2 Μετάβαση

Σε αυτή την περίπτωση γίνεται χρήση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης ώστε τελικά να πραγματοποιηθεί η μετάβαση στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση. Κάθε περιοχή $n \in N$, μέσω της διαδικασίας ανάθεσης συχνοτήτων που προηγήθηκε, έχει m_n διαθέσιμες συχνότητες. Βασικός σκοπός είναι να καθορισθεί με ποιες συχνότητες θα αρχίσει να λειτουργεί η περιοχή, ώστε να ελαχιστοποιηθεί ο αριθμός των αναλογικών σταθμών που θα χρειαστεί να διακόψουν την εκπομπή τους. Επιπλέον, εξετάζεται η δυνατότητα να δίνεται προτεραιότητα στην χρήση συχνοτήτων που δεν έχουν προβλήματα με τους αναλογικούς σταθμούς των γειτονικών κρατών. Τέλος, διακρίνονται οι δύο πιθανές υλοποιήσεις πανεθνικού και τοπικού επιπέδου αντίστοιχα.

Υπενθυμίζεται ότι με A συμβολίζεται το σύνολο των αναλογικών σταθμών εκπομπής. Κάθε σταθμός $a \in A$ λειτουργεί στις καθορισμένες f_a συχνότητες, όπου $f_a \subseteq F$, ενώ σε κάθε περιοχή έχουν ανατεθεί οι f_n συχνότητες, όπου $f_n \subseteq F$ και $[f_n] = m_n$. Έστω ότι με $f_a^{off} \subseteq f_a$ συμβολίζεται το σύνολο των συχνοτήτων στις οποίες ο αναλογικός σταθμός a πρέπει να σταματήσει τη λειτουργία του και αντίστοιχα $f_n^{on} \subseteq f_n$ είναι το σύνολο των συχνοτήτων στις οποίες θα αρχίσει να εκπέμπει η περιοχή n . Στόχος είναι να βρεθούν τα καλύτερα L επίπεδα συχνοτήτων που θα χρησιμοποιηθούν για την περίοδο της μετάβασης. Τότε, η μαθηματική διατύπωση της εκδοχής του προβλήματος μετάβασης σε πανεθνικό επίπεδο μπορεί να γίνει σύμφωνα με την επόμενη εικόνα:

$$\min\{\sum_{a \in A} [f_a^{off}]\}, \text{ υπό τον όρο:}$$

$$[f_n^{on}] = L \text{ για } \forall n \in N \text{ και } f_n^{on} \subseteq f_n$$

Εικόνα 91: Περιγραφή πανεθνικής υλοποίησης μετάβασης

Στην περίπτωση όπου επιθυμείται η μετάβαση σε τοπικό επίπεδο, πρέπει αρχικά να οριστούν τα επιμέρους σύνολα N_i , με $i = 1, \dots, g$ για τις περιοχές εκχώρησης πόρων, με $\cup_{i=1}^g N_i = N$. Τα σύνολα N_i συνήθως διαμορφώνονται με βάση τον πληθυσμό των περιοχών. Συγκεκριμένα, το N_1 περιλαμβάνει τις περιοχές με τα βασικά αστικά κέντρα και κατά αναλογία προκύπτουν τα υπόλοιπα σύνολα. Στην εκδοχή της τοπικής υλοποίησης, το πρόβλημα που παρουσιάζεται στην Εικόνα 91 επιλύεται σειριακά για κάθε N_i , δηλαδή:

$$\text{for } \{i = 1, \dots, g\}$$

$$\min\{\sum_{a \in A} [f_a^{off}]\}, \text{ υπό τους όρους:}$$

$$[f_n^{on}] = L \text{ για } \forall n \in N_i \text{ και } f_n^{on} \subseteq f_n$$

$$\text{end}$$

Εικόνα 92: Περιγραφή τοπικής υλοποίησης μετάβασης

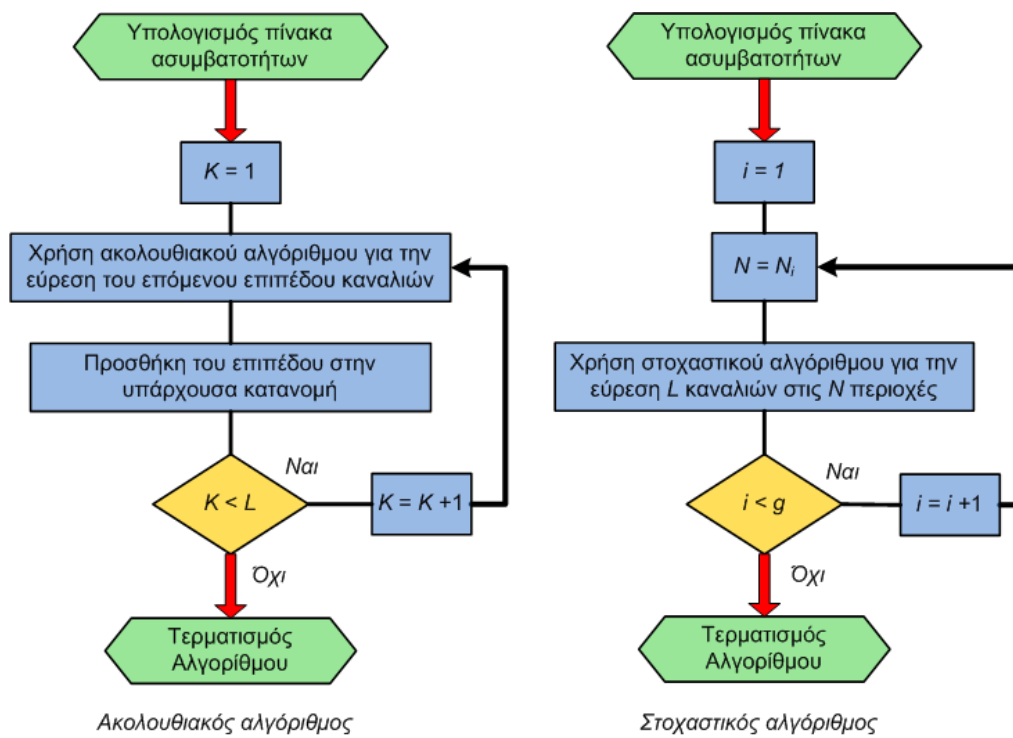
Όπως έχει αναφερθεί, υπάρχει η επιλογή να δίνεται προτεραιότητα για χρήση των $f_n^{av} \subseteq f_n$ συχνοτήτων (*available channels*) που δεν έχουν προβλήματα με αναλογικούς σταθμούς γειτονικών κρατών. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοσθεί και στις δύο εκδοχές τοπικής και πανεθνικής υλοποίησης. Το μοναδικό στοιχείο που διαφοροποιείται σε κάθε περίπτωση είναι ότι όταν αναζητείται το σύνολο των συχνοτήτων f_n^{on} για τις περιοχές n που έχουν *available channels*, η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης εξαρτάται από το αν αυτές ανήκουν στο σύνολο f_n^{av} . Εδώ σημειώνεται ότι είναι πιθανό για μια περιοχή n να ισχύει $[f_n^{av}] < L$, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι δεν υπάρχει λύση για τη συγκεκριμένη περιοχή που να περιέχει μόνο *available* κανάλια.

Παρόμοια με την περίπτωση του προβλήματος ανάθεσης συχνοτήτων, ο βασικός πυρήνας της διαδικασίας επίλυσης περιλαμβάνει την εύρεση της βέλτιστης κατανομής συχνοτήτων λειτουργίας με τη χρήση των στοχαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Όσον αφορά την υλοποίηση των αλγορίθμων, κάθε σημείο αναζήτησης είναι βολικό να αναπαρασταθεί ως ένα διάνυσμα μήκους $[N] \times L$ ή $[N_i] \times L$, ανάλογα με το σύνολο των περιοχών που εξετάζεται. Προφανώς, κάθε στοιχείο της πιθανής λύσης x παίρνει διακριτές τιμές από το σύνολο $f_n \subseteq F$. Η αντικειμενική συνάρτηση ελαχιστοποίησης $f : \mathbb{Z}^{[N] \times L} \rightarrow \mathbb{Z}$ εκφράζεται με τη βοήθεια δύο όρων, του συνολικού αριθμού των αναλογικών σταθμών που χρειάζεται να

διακόψουν την λειτουργία τους και του συνολικού αριθμού των συχνοτήτων μετάβασης που δεν είναι ελεύθερες από αναλογικούς σταθμούς γειτονικών κρατών:

$$f(x) = w_1 \sum_{a \in A} [f_a^{off}] + w_2 \sum_{n \in N} [f_n^{on} - f_n^{av}] \quad (77)$$

Προφανώς, όταν $f(x) = 0$ δεν υπάρχει καμία παραβίαση και η λύση γίνεται δεκτή. Για λόγους σύγκρισης, εκτός από τους στοχαστικούς αλγορίθμους, χρησιμοποιείται και ένας ακολουθιακός αλγόριθμος, ο οποίος βασίζεται στη μέθοδο της σταδιακής προσέγγισης ανά επίπεδο συχνοτήτων. Συγκεκριμένα, για κάθε καινούριο επίπεδο, οι περιοχές εκχώρησης πόρων εξετάζονται σειριακά και σε καθεμία αποδίδεται η συχνότητα που στην τρέχουσα κατάσταση οδηγεί στην καλύτερη τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση. Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες από μία λύσεις, επιλέγεται μία τυχαία. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται το βασικό διάγραμμα ροής των αλγορίθμων για την αντιμετώπιση του προβλήματος μετάβασης στην επίγεια ψηφιακή τηλεόραση:

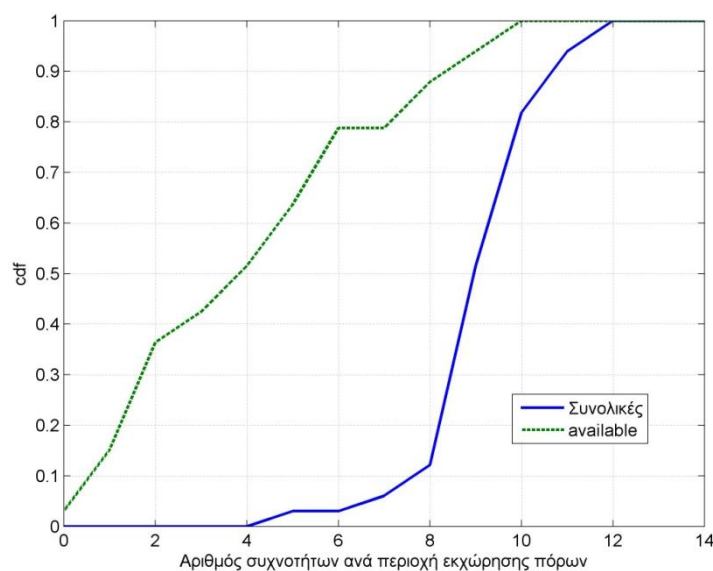


Εικόνα 93: Βασικό διάγραμμα ροής για το πρόβλημα μετάβασης

Η παραπάνω μεθοδολογία εφαρμόζεται στη συνέχεια για την επίλυση του προβλήματος μετάβασης στην χώρα της Ελλάδας, όπου συγκεκριμένα $[N] = 33$, $[F] = 49$ και $[A] = 116$. Για την εφαρμογή της τοπικής υλοποίησης της μετάβασης χρησιμοποιούνται τρία σύνολα με περιοχές, ($g = 3$), με βάση πρόσφατη πληθυσμιακή απογραφή. Οι συχνότητες f_n έχουν προκύψει σύμφωνα με τη διάσκεψη της Γενεύης RRC-06 (*Regional Radiocommunication Conference*) [93]. Επίσης, στην ανάλυση του προβλήματος συμπεριλαμβάνονται οι

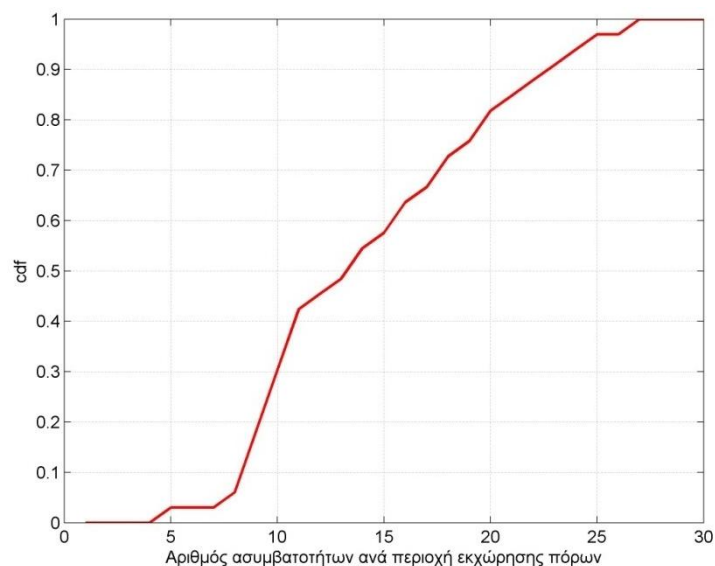
βασικότερες θέσεις εκπομπής A του αναλογικού δικτύου της χώρας, καθώς και οι αντίστοιχες συχνότητες λειτουργίας f_a . Για τον υπολογισμό των συχνοτήτων f_n^{av} λαμβάνονται υπόψη οι καταχωρήσεις των γειτονικών χωρών στην *ITU* αναφορικά με τις θέσεις εκπομπής του αναλογικού τους δικτύου. Στην επίλυση χρησιμοποιείται η αντιπροσωπευτική τιμή $L = 5$, καθώς έτσι εξασφαλίζεται ότι θα υπάρχει επαρκές διαθέσιμο φάσμα σε κάθε περιοχή εκχώρησης πόρων για την περίοδο της μετάβασης, ενώ παράλληλα δεν θα χρειαστούν σημαντικές αλλαγές στο υπάρχον αναλογικό δίκτυο.

Στην επόμενη γραφική παράσταση παρουσιάζεται η *cdf* των συχνοτήτων που έχουν αποδοθεί ανά περιοχή εκχώρησης πόρων και των συχνοτήτων που είναι ελεύθερες από αναλογικούς σταθμούς γειτονικών κρατών (*available*).



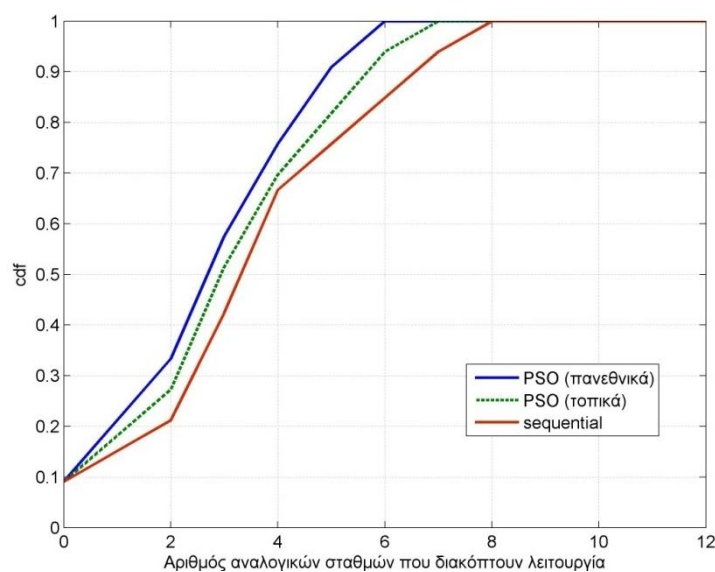
Εικόνα 94: Συχνότητες ανά περιοχή για το πρόβλημα της μετάβασης

Οι ασυμβατότητες του δικτύου υπολογίζονται όπως και στην προηγούμενη ενότητα και ο Πίνακας 20 με τις βασικές παραμέτρους του δικτύου εξακολουθεί να ισχύει και εδώ. Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζεται η *cdf* των ασυμβατοτήτων με αναλογικούς σταθμούς ανά περιοχή εκχώρησης πόρων, αθροιστικά για όλες τις διαθέσιμες συχνότητες. Με άλλα λόγια εδώ παρουσιάζεται ο αριθμός των ασυμβατοτήτων που έχει κάθε περιοχή n σε όλες τις f_n συχνότητες.

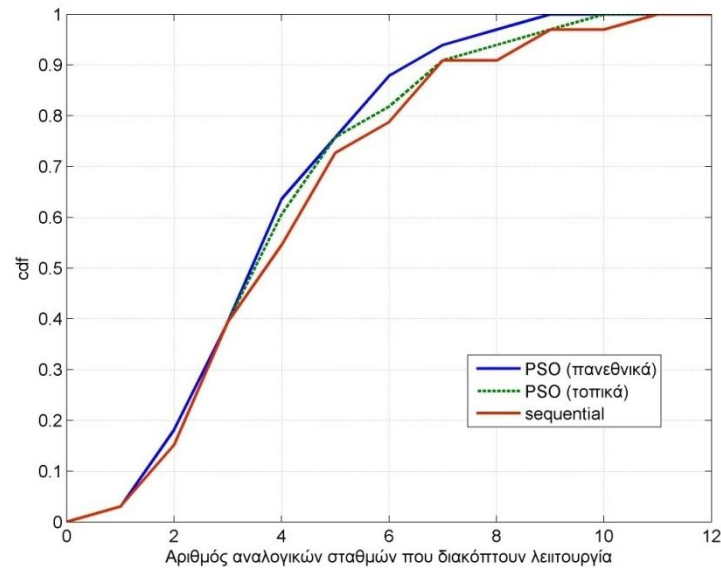


Εικόνα 95: Ασυμβατότητες ανά περιοχή για το πρόβλημα της μετάβασης

Για τον υπολογισμό των αναλογικών σταθμών που θα χρειαστεί να σταματήσουν την λειτουργία τους εφαρμόσθηκε ο στοχαστικός αλγόριθμος *PSO* με τις παραμέτρους που περιέχει ο Πίνακας 11 και ένας απλός ακολουθιακός αλγόριθμος (*sequential*) για συγκριτικούς λόγους. Υλοποιήθηκαν δύο σενάρια, ανάλογα με αντιμετώπιση των *available* καναλιών. Στο πρώτο σενάριο δεν δίνεται βάρος στην εύρεση *available* καναλιών, το οποίο πρακτικά σημαίνει ότι στην εξίσωση (77) ισχύει $w_2 = 0$. Στο δεύτερο σενάριο δίνεται προτεραιότητα στα *available* κανάλια, δηλαδή $w_2 \neq 0$ και συγκεκριμένα $[w_1, w_2] = [1, 2]$. Στα επόμενα δύο σχήματα φαίνεται η *cdf* των αναλογικών σταθμών που πρέπει να κλείσουν ανά περιοχή για την πανεθνική και την τοπική υλοποίηση, για τα δύο σενάρια.

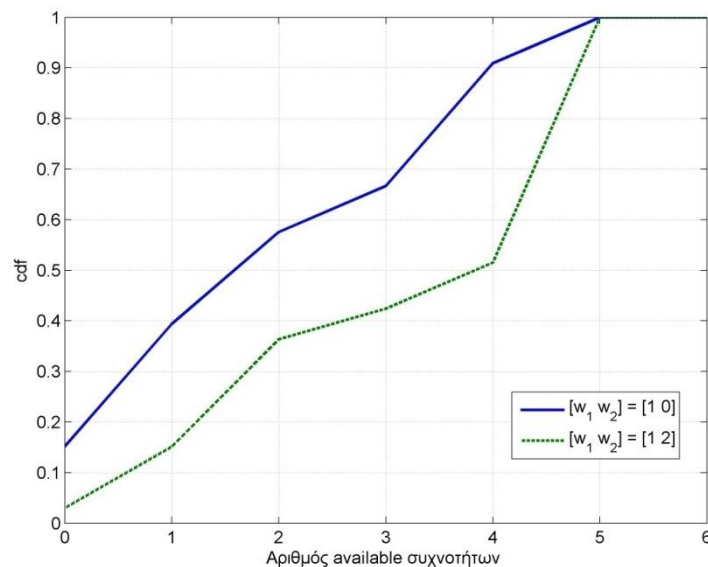


Εικόνα 96: Αναλογικοί σταθμοί προς κλείσιμο ανά περιοχή



Εικόνα 97: Αναλογικοί σταθμοί προς κλείσιμο ανά περιοχή - (*available*)

Από τις δύο τελευταίες εικόνες διαπιστώνεται ότι ακόμα και για το συγκεκριμένο σενάριο προσομοίωσης που περιλαμβάνει ένα μικρό αριθμό περιοχών και αναλογικών σταθμών, η διαφοροποίηση ανάμεσα στην πανεθνική και τοπική υλοποίηση επηρεάζει ως ένα βαθμό τα αποτελέσματα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι με την τοπική προσέγγιση ο αλγόριθμος δεν έχει το ίδιο πεδίο αναζήτησης της βέλτιστης λύσης συγκριτικά με την πανεθνική υλοποίηση και έτσι περιορίζεται σε τοπικά ελάχιστα. Επίσης, είναι εμφανές ότι η μέθοδος που δίνει προτεραιότητα στα *available* κανάλια οδηγεί σε χειρότερα αποτελέσματα ως προς τον αριθμό των αναλογικών σταθμών προς κλείσιμο. Τέλος, διαπιστώνεται ότι στο δεύτερο σενάριο προσομοίωσης δεν υπάρχει μεγάλο περιθώριο για βελτίωση, καθώς οι επιλογές περιορίζονται κυρίως στα *available* κανάλια. Στο σχήμα που ακολουθεί φαίνεται η βέλτιστη κατανομή των *available* καναλιών για τα δύο αντικρουόμενα σενάρια.



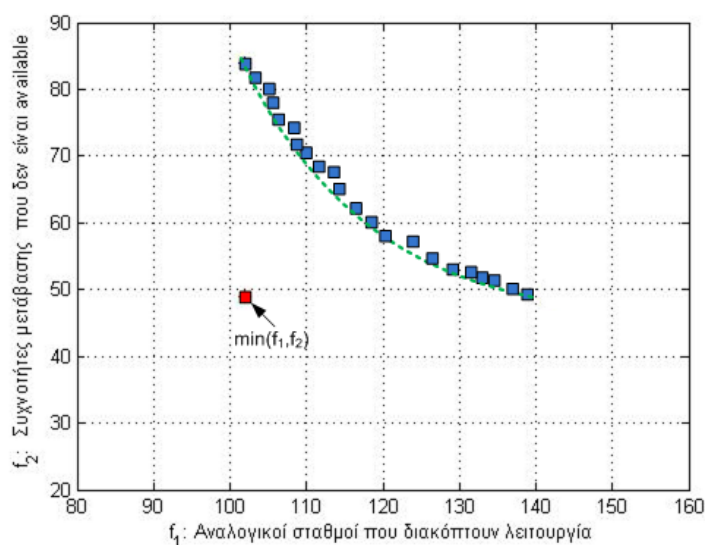
Εικόνα 98: Αριθμός *available* καναλιών ανά περιοχή

Διαπιστώνεται ότι ο αριθμός των *available* καναλιών διαφέρει σημαντικά για τα δύο σενάρια υλοποίησης. Στον επόμενο πίνακα φαίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα από το πρόβλημα μετάβασης, όπου με *Seq* συμβολίζεται ο ακολουθιακός αλγόριθμος. Για τους χρόνους προσομοίωσης σημειώνεται ότι οι υπολογισμοί έγιναν σε επεξεργαστή Intel Core 2 Duo, 8300 (2.4GHz) με 4GB DDR2 Ram.

Αλγόριθμοι	1 ^ο Σενάριο			2 ^ο Σενάριο		
	<i>Seq</i>	<i>PSO</i> (τοπικά)	<i>PSO</i> (πανευθ.)	<i>Seq</i>	<i>PSO</i> (τοπικά)	<i>PSO</i> (πανευθ.)
Σύνολο αναλογικών	129	115	103	152	146	139
Μέση τιμή »	3.9	3.5	3.1	4.6	4.4	4.2
Μέγιστο »	8	7	6	11	10	9
Ελάχιστο »	0	0	0	1	1	1
Σύνολο <i>available</i>	76	78	81	116	116	116
Μέση τιμή »	2.3	2.4	2.5	3.5	3.5	3.5
Μέγιστο »	5	5	5	5	5	5
Ελάχιστο »	0	0	0	0	0	0
Χρόνος προσομοίωσης	314	2751	2987	287	1928	2152

Πίνακας 24: Αποτελέσματα μετάβασης

Είναι σαφές ότι η αντικειμενική συνάρτηση αποτελείται από δύο αντικρουόμενους όρους ως ένα βαθμό. Σε αυτή την περίπτωση, για την καλύτερη ανάλυση του προβλήματος είναι χρήσιμο να αναζητηθεί το σύνολο των *Pareto-βέλτιστων* λύσεων. Στο επόμενο σχήμα διακρίνεται το *Pareto-front* για το πρόβλημα της μετάβασης, σύμφωνα με τους όρους της εξίσωσης (77). Ο αλγόριθμος *PSO* μπορεί πολύ εύκολα να χρησιμοποιηθεί για αυτή την αναζήτηση, απλά μεταβάλλοντας τους συντελεστές w_1, w_2 της συνάρτησης κόστους κατά την εξέλιξη των γενεών.



Εικόνα 99: Pareto-βέλτιστες λύσεις για το πρόβλημα της μετάβασης

Συμπερασματικά, το πρόβλημα μετάβασης από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση επιλύθηκε με τη βοήθεια των στοχαστικών αλγορίθμων. Εξετάστηκαν δύο στρατηγικές υλοποίησης, σε τοπικό και πανεθνικό επίπεδο και κάθε λύση εκφράστηκε μέσω των δύο βασικών αντικρουόμενων όρων: αριθμός αναλογικών σταθμών που πρέπει να διακόψουν την λειτουργία τους και αριθμός συχνοτήτων για το στάδιο της μετάβασης που είναι ελεύθερες από τα αναλογικά δίκτυα γειτονικών κρατών. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι η τοπική υλοποίηση οδηγεί σε λίγο χειρότερες λύσεις, αλλά παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης της πορείας της ψηφιακής τηλεόρασης σε συγκεκριμένα αστικά κέντρα.

8 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ / ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σκοπός της παρούσας διατριβής, όπως αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια, είναι η σχεδίαση δικτύων ασυρμάτων επικοινωνιών. Συγκεκριμένα, με την χρήση στοχαστικών τεχνικών βελτιστοποίησης, επιχειρείται η εύρεση του κατάλληλου σχεδιασμού για τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 3^{ης} γενιάς και επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης *DVB-T*. Σε κάθε περίπτωση, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης σε συνδυασμό με την σωστή μοντελοποίηση του εκάστοτε προβλήματος, αποδεικνύεται ότι αποτελούν ένα πολύ ισχυρό μαθηματικό εργαλείο για την υπολογιστικά πολύπλοκη απαιτούμενη διαδικασία.

Αρχικά γίνεται μια σύντομη ανάλυση των βασικότερων αλγορίθμων βελτιστοποίησης και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματά τους. Περισσότερη βαρύτητα δίνεται στους εξελικτικούς αλγόριθμους και ιδιαίτερα στη τεχνική της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων *PSO*, καθώς πρόσφατα χρησιμοποιείται όλο και συχνότερα για την επίλυση πρακτικών και θεωρητικών προβλημάτων που αφορούν τα ασύρματα δίκτυα επικοινωνιών.

Ακολουθεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση για τη διαδικασία σχεδιασμού των δικτύων 3^{ης} γενιάς, στο πλαίσιο της οποίας αναπτύχθηκε ένα κατάλληλο μαθηματικό εργαλείο προσομοίωσης σε επίπεδο συστήματος (*system level*) με δυνατότητα χρήσης εξελιγμένων τεχνικών, όπως οι έξυπνες κεραίες και τα συστήματα *MIMO*. Παρουσιάζεται συγκεκριμένη μεθοδολογία για την διαδικασία αναζήτησης του βέλτιστου σχεδιασμού σε ένα αντιπροσωπευτικό δίκτυο, η οποία ουσιαστικά αποτελείται από δύο στάδια: την εύρεση των προβληματικών περιοχών και την λήψη μιας σειράς από κατάλληλες διορθωτικές κινήσεις. Για τον έλεγχο της συμπεριφοράς του δικτύου επιλέγεται ένα σύνολο από βασικούς δείκτες επίδοσης (*key performance indicators, KPI*), σύμφωνα με τους οποίους εκφράζεται η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η προσέγγιση αυτή προσφέρει μεγάλη ευελιξία κατά το σχεδιασμό και μπορεί εύκολα να συμπεριλάβει τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά της επίδοσης του δικτύου, όπως η χωρητικότητα, η κάλυψη και οι διαπομπές. Επίσης πραγματοποιείται για ακριβές μοντέλο του δικτύου 3^{ης} γενιάς και ανά σταθμό βάσης, σε αντίθεση με τις απλοϊκές προσεγγίσεις που ρυθμίζουν τις παραμέτρους συγκεντρωτικά. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι με σωστό σχεδιασμό μπορεί να αυξηθεί η χωρητικότητα του δικτύου, εξασφαλίζοντας παράλληλα ότι η κάλυψη παραμένει σε υψηλά επίπεδα και δεν επιβαρύνεται η διαδικασία των διαπομπών. Επίσης αναλύεται το μεγάλο όφελος που προκύπτει από τη χρήση των έξυπνων κεραιών στους σταθμούς βάσης και στα κινητά τερματικά.

Στη συνέχεια αντιμετωπίζεται ένα πρόβλημα διαχείρισης πόρων με βασική μέριμνα την εξισορρόπηση ανάμεσα στα αντικρουόμενα κριτήρια της χωρητικότητας και της αμεροληψίας απέναντι στους χρήστες. Η συνεισφορά της διατριβής εδώ επικεντρώνεται σε τρία βασικά σημεία. Πρώτον, πραγματοποιείται μία εκτενής ανάλυση τεσσάρων εύκολα εφαρμόσιμων αλγορίθμων διαχείρισης πόρων και παρουσιάζεται σε βάθος η επίδοση τους. Έπειτα, προτείνεται μια υβριδική προσέγγιση που προσφέρει σημαντική ευελιξία κατά το σχεδιασμό του δικτύου, καθώς επιτρέπει τον καθορισμό του σημείου ισορροπίας ανάμεσα στα δύο κριτήρια. Αυτό επιτυγχάνεται με τη ρύθμιση παραμέτρων είτε στοχαστικά είτε δυναμικά. Τέλος, αποδεικνύεται ότι η τεχνική διαμόρφωσης τυχαίων λοβών (*random beam-forming*) μπορεί να αποτελέσει μια πρακτική μέθοδο για την δημιουργία πιο δίκαιου συστήματος.

Μετά επεξηγούνται τα βασικά χαρακτηριστικά ενός δικτύου ευρυεκπομπής επίγειας ψηφιακής τηλεόρασης και αντιμετωπίζονται δύο βασικά προβλήματα με εφαρμογή σε ρεαλιστικό περιβάλλον. Συγκεκριμένα, με τη βοήθεια των στοχαστικών αλγορίθμων εξετάζονται τρία πιθανά σενάρια για το πρόβλημα ανάθεσης συχνοτήτων στις περιοχές εκχώρησης πόρων, σύμφωνα με το μοντέλο διάδοσης της *ITU* και με ντετερμινιστικό μοντέλο με και χωρίς πολλαπλή παρεμβολή. Διαπιστώνεται ότι το πρώτο σενάριο δεν είναι κατάλληλο για χώρες με γεωγραφική μορφολογία όπως η Ελλάδα. Επίσης αποδεικνύεται ότι οι ήπιοι περιορισμοί πρέπει να συνυπολογίζονται, καθώς έχουν αντίκτυπο στην τελική λύση, ακόμα και για μικρό αριθμό περιοχών.

Παρόμοια, στο πρόβλημα μετάβασης από την αναλογική στην ψηφιακή τηλεόραση εξετάζονται δύο στρατηγικές υλοποίησης, σε τοπικό και πανεθνικό επίπεδο. Κάθε πιθανή λύση εκφράζεται μέσω των δύο βασικών αντικρουόμενων κριτηρίων: αριθμός αναλογικών σταθμών που πρέπει να διακόψουν την λειτουργία τους και αριθμός συχνοτήτων για το στάδιο της μετάβασης που είναι ελεύθερες από τα αναλογικά δίκτυα γειτονικών κρατών. Από τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται φαίνεται ότι η τοπική υλοποίηση οδηγεί σε λίγο χειρότερες λύσεις. Ωστόσο, αποτελεί μία καλή επιλογή καθώς παρέχει τη δυνατότητα παρακολούθησης της πορείας της ψηφιακής τηλεόρασης σε συγκεκριμένα αστικά κέντρα. Συγκριτικά με ένα ακολουθιακό αλγόριθμο, η στοχαστική τεχνική οδηγεί σε πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

Στη συνέχεια σημειώνονται τα προτεινόμενα βήματα για πιθανή μελλοντική εργασία:

- Μελέτη και υλοποίηση διαφορετικών τεχνικών για τις έξυπνες κεραίες και τα συστήματα *MIMO*. Στόχος θα είναι ο συνδυασμός με το ήδη υπάρχον μαθηματικό εργαλείο προσομοίωσης, ώστε να συγκρίνονται οι διάφορες τεχνικές ανάλογα με το εξεταζόμενο σενάριο και να αξιολογείται τελικά η επίδοση του συστήματος.
- Εφαρμογή στοχαστικών τεχνικών βελτιστοποίησης σε νεότερα συστήματα, όπως τα δίκτυα κινητής τηλεφωνίας 4^{ης} γενιάς με την τεχνική *OFDM* και το *WiMax*. Στόχος σε κάθε περίπτωση θα είναι ο βέλτιστος σχεδιασμός του δικτύου με την κατάλληλη ρύθμιση των βασικότερων παραμέτρων και με την διαχείριση των πόρων του συστήματος.

9 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] P. Pardalos, A. Migdalas, R. Burkard, “Combinatorial and Global Optimization”, World Scientific Publishing Company, 2002.
- [2] P. Gray, W. Hart, L. Painton, C. Phillips, M. Trahan and John Wagner, “A Survey of Global Optimization Methods”, 1997, <http://www.cs.sandia.gov/opt/survey>.
- [3] R. Haupt and S. E. Haupt, “Practical Genetic Algorithms”, John Wiley & Sons, 2004.
- [4] E. Zitzler, K. Deb, L. Thiele, C. Coello Coello and D. Corne, “Evolutionary Multi-Criterion Optimization”, EMO 2001, Lecture Notes in Computer Science 1993, Springer 2001.
- [5] M. Avriel, “Nonlinear Programming: Analysis and Methods”. Dover Publishing, 2003.
- [6] J. Shewchuk, “An Introduction to the Conjugate Gradient Method without the Agonizing Pain”, 1994.
- [7] J. Spall, “Introduction to Stochastic Search and Optimization”, 1st edition. Wiley, 2003.
- [8] Z. Michalewicz, D. Fogel, “How to Solve It: Modern Heuristics”, Springer-Verlag, Berlin, 2000.
- [9] P. Laarhoven, E. Aarts, “Simulated Annealing: Theory and Applications”, Kluwer Academic Publishers, 1987.
- [10] S. Kirkpatrick, C. Gelatt, M. Vecchi. “Optimization by simulated annealing”. Science Magazine, vol. 220, no. 4598, pp. 671–680, May 1983.
- [11] F. Glover, “Tabu Search – Part I”, ORSA Journal on Computing, vol.1, no.3, pp.190-206, 1989.
- [12] A. Engelbrecht, “Computational Intelligence: An Introduction”, John Wiley and Sons, 2002.
- [13] Z. Michalewicz, “Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”, 3rd edition. Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [14] M. Mitchell, “An Introduction to Genetic Algorithms”, MIT Press, 1999.
- [15] D. Goldberg, “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning”, Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [16] J. Kennedy , R. Eberhart., “Swarm Intelligence”, San Francisco, CA: Morgan Kaufmann. 2001.
- [17] ———, “Particle swarm optimization”, IEEE International Conference on Neural Networks, vol. 4, pp. 1942–1948, Nov. 1995.
- [18] J. Kennedy, “Small Worlds and Mega-Minds: Effects of Neighborhood Topology on Particle Swarm Performance”, IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 1931-1938, 1999.

- [19] J. Kennedy, R. Mendes, "Population Structures and Particle Swarm Performance", IEEE Congress on Evolutionary Computation, vol.2, pp. 1671-1676, 2002.
- [20] M. Clerc, J. Kennedy, "The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space", IEEE Trans. Evolutionary Computation, vol.6, no.1, pp. 58-73, Feb. 2002.
- [21] R. Eberhart, Y. Shi, "Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization", IEEE Congress on Evolutionary Computation, vol.1, pp 84-88, 2000.
- [22] K. Veeramachaneni, T. Peram, C. Mohan, L. Osadciw, "Optimization using particle swarms with near neighbor interactions". Lecture Notes in Computer Science (LNCS), vol. 2723, Proceedings of the Genetic and Evolutionary Computation Conference 2003 (GECCO 2003), pp. 110-121, Jan. 2003.
- [23] C. Coello Coello, G. Pullido, M. Lechuga, "Handling Multiple Objectives With Particle Swarm Optimization", IEEE trans. on evolutionary computation, vol.8, no3, pp.256-279, June 2004.
- [24] K. Parsopoulos, M. Vrahatis, "Particle Swarm Optimization Method in Multiobjective Problems", Proc. of the ACM 2002 Symposium on Applied Computing (SAC 2002), pp. 603-607.
- [25] N. Lynch, "Distributed Algorithms", Morgan Kaufmann, 1997.
- [26] Y. Li, M. Mascagni, "Analysis of Large-scale Grid-based Monte Carlo Applications", International Journal of High Performance Computing Applications (IJHPCA), vol. 17, no. 4, pp. 369-382, 2003.
- [27] L. Maigne, D. Hill, V. Breton, R. Reuillon, P. Calvat, D. Lazaro, Y. Legre, D. Donnarieix, "Parallelization of Monte Carlo Simulations and Submission to a grid environment", Parallel Processing Letters, vol 14, no. 2, pp. 177-196, 2004.
- [28] K. Parsopoulos, D. Tasoulis, M. Vrahatis, "Multiobjective optimization using parallel vector evaluated particle swarm optimization", IASTED International Conference on Artificial Intelligence and Applications, vol.2, pp. 823-828, 2004.
- [29] J. Schutte, J. Reinbolt, B. Frengly, R. Haftka, A. George, "Parallel global optimization with the particle swarm algorithm", International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 61, no. 13, pp. 2296-2315, Oct. 2004.
- [30] The Enabling Grids for E-sciEnces (EGEE) project, <http://www.eu-egee.org/>
- [31] J. Laiho, A. Wacker, T. Novosad, "Radio Network planning and Optimisation for UMTS", John Wiley & Sons, 2001.

- [32] H. Holma, A. Toskala, "WCDMA for UMTS", 3rd Edition, Wiley & Sons, 2004.
- [33] J. Lempiainen, M. Manninen, "UMTS Radio Network Planning, Optimization and QoS Management", Kluwer Academics Publishers, 2003.
- [34] J. P. Romero, O. Sallent, R. Agustí, M. A. Diaz-Guerra, "Radio Resource Management Strategies in UMTS," John Wiley & Sons, 2005.
- [35] E. Amaldi, A. Capone, F. Malucelli, "Planning UMTS base station location. Optimization models with power control and algorithms", IEEE Trans. on Wireless Communications., vol. 2, pp. 939-952, 2003.
- [36] ———, "UMTS radio planning: Optimizing base station configuration", IEEE VTC fall 2002, vol. 2 (5), pp. 768-772, 2002.
- [37] A. Eisenblätter, E. Fledderus, A. Fügenschuh, H. Geerdes, B. Heideck, D. Junglas, T. Koch, T. Kürner, A. Martin, "Mathematical methods for automatic optimisation of UMTS radio networks", Tech. Rep. IST-2000-28088-MOMENTUM-D43-PUB, 2003.
- [38] S. Harley, "Planning Effective cellular mobile radio networks", IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 51(2), pp. 243-253, 2002.
- [39] R. Akl, M. Hedge, M. Naraugi-Pour, P. Min, "Multicell CDMA Network Design", IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 50(3), pp. 711-722, 2001.
- [40] J. Yang, J. Zhang, M. Aydin, J. Wu, "A Novel Programming Model and Optimisation Algorithms for WCDMA Networks", IEEE VTC Spring 2007, pp. 1182-1187, 2007.
- [41] Y. Wu, S. Pierre, "A New Hybrid Approach for 3G Network Planning", IEEE Communications Letters, vol. 8(5), pp. 277-279, 2004.
- [42] L. Raisanen, R. Whitaker, "Comparison and Evaluation of Multiple Objective Genetic Algorithms for the Antenna Placement Problem", Mobile Networks and Applications, vol. 10, pp. 79-88, Springer, 2005.
- [43] C. Lee, H. Kang, "Cell Planning with capacity expansion in mobile communications: A tabu search approach", IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 49(5), pp. 1678-1691, 2000.
- [44] D. Tsilimantos, G. Tsoulos, D. Kaklamani, "Particle Swarm Optimization for UMTS WCDMA Network Planning", ISWPC 2008, pp. 283-287, May 2008.
- [45] S.A. Jafar, A. Goldsmith, "Adaptive multirate CDMA for uplink throughput maximization," IEEE Trans. on Wireless Communications, vol. 2, no. 2, pp. 218-228, Mar. 2003.

- [46] S.-J. Oh, K.M. Wasserman, "Dynamic spreading gain control in multiservice CDMA networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 17, no. 5, pp. 918-927, May 1999.
- [47] D.I. Kim, E. Hossain, V.K. Bhargava, "Downlink joint rate and power allocation in cellular multirate WCDMA systems," *IEEE Trans. On Wireless Communications*, vol. 2, no. 1, pp. 69-80, Jan. 2003.
- [48] J.M. Jacobsmeyer, "Congestion relief on power-controlled CDMA networks," *IEEE Journal on Selected Areas of Communications*, vol. 14, no. 9, pp. 1758-1761, Dec. 1996.
- [49] A.S. Anpalagan, E.S. Sousa, "A combined rate/power/cell control scheme for delay insensitive applications in CDMA systems," *IEEE GLOBECOM*, vol. 1, pp. 256-260, 2000.
- [50] K. Kumaran, L.Qian, "Uplink scheduling in CDMA packet-data systems," *IEEE INFOCOM*, vol.1, pp. 292-300, Apr. 2003.
- [51] C. Li, S. Papavassiliou, "On the fairness and throughput tradeoff of multi-user uplink scheduling in WCDMA systems," *IEEE VTC-2005-Fall*, vol.1, pp. 206-210, Sept. 2005.
- [52] ———, "Joint throughput maximization and fair scheduling in uplink DS-CDMA systems," *IEEE Sarnoff Symposium*, pp. 193-196, Mar.-Apr. 2004.
- [53] P. Hosein, W. Tao, "On the tradeoff between throughput and fairness on the reverse link of a 3G CDMA network," *IEEE GLOBECOM*, vol. 6, pp. 3850-3854, Nov.-Dec. 2004.
- [54] M.H. Ahmed, H. Yanikomeroglu, "A Novel Scheme for Aggregate Throughput Maximization with Fairness Constraints in Cellular Networks," *IEEE VTC-2006 Fall*, pp. 1-5, Sept. 2006.
- [55] I. Siomina, P. Varbrand, D. Yuan, "Automated optimization of service coverage and base station antenna configuration in UMTS networks", *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, no. 6, pp. 16-25, Dec. 2006.
- [56] K. Valkealathi, A. Hoglund, J. Parkinen, A. Hamalainen, "WCDMA common pilot power control for load and coverage balancing", *IEEE PIMRC'02*, vol.3, pp. 1412-1416, Sept. 2002.
- [57] A. Hoglund, K. Valkealathi, "Automated Optimization of key WCDMA parameters", *Wiley Wireless Communication and Mobile Computing*, vol. 5, no. 3, pp. 257-271, Aug. 2004.
- [58] ———, "Quality-based tuning of cell downlink load target and link power maxima in WCDMA", *IEEE VTCF'02*, vol.4, pp. 2248-2252.

- [59] A. Hoglund, J. Pollonen, K. Valkealathi, J. Laiho, "Quality-based auto-tuning of cell uplink load level targets in WCDMA", IEEE VTCS'03, vol. 4, pp. 2847-2851, Apr. 2003.
- [60] K. Valkealathi, A. Hoglund, T. Novosad, "UMTS radio network multiparameter control", IEEE PIMRC'03, vol.1, pp. 616-621, Sept. 2003.
- [61] D. Soldani, K. Valkealathi, "Genetic approach to QoS optimization for WCDMA mobile networks", IEEE VTCS'05, vol.4, pp. 2269-2273, June 2005.
- [62] L. Du, J. Bigham, L. Cuthbert, "Geographic Load Balancing for WCDMA Mobile Networks Using a Bubble Oscillation Algorithm", IEEE WCNC 2005, vol. 3, pp. 1714-1719, 2005.
- [63] ———, "A bubble oscillation algorithm for distributed geographic load balancing in mobile networks", IEEE INFOCOM 2004, vol. 1, pp. 330-338, 2004.
- [64] L. Du, J. Bigham, L. Cuthbert, P. Nahi, C. Parini, "Intelligent cellular network load blancing using a cooperative negotiation approach", IEEE WCNC'02, vol.3, pp. 1675-1679, Mar. 2003.
- [65] L. Du, J. Bigham, L. Cuthbert, C. Parini, P. Nahi, "Cell size and shape adjustment depending on call traffic distribution", IEEE WCNC'02, vol.2, pp. 886-891, Mar. 2002.
- [66] L.C. Godara, "Applications of Antenna Arrays to Mobile Communications, Part II: Beam-Forming and Direction-of-Arrival Considerations", proc. of IEEE, vol. 85, no. 8, pp. 1195-1245, Aug. 1997.
- [67] A. Swindlehurst and T. Kailath, "A Performance analysis of subspace-based methods in the presence of model errors, Pt. I: The MUSIC algorithm", IEEE Trans. Signal Process, vol.40, no.7, pp. 1758-1774, Jul. 1992.
- [68] R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT - Estimation of signal parameters via rotational invariance techniques" IEEE Tans. Acoust., Speech, Signal Process., vol.37, no.7, pp.984-995, Jul. 1989.
- [69] "Spatial channel model for Multiple Input Multiple Output (MIMO) simulations", 3GPP Std. TR 25.996 v6.1.0, Sept. 2003.
- [70] G. Tsoulos, "Smart antennas for mobile communications systems: Benefits and challenges", IEE Elec. Commun. Eng. J., vol. 11, pp. 84-94, Apr. 1999.
- [71] G. Tsoulos (Ed.), "Adaptive Antennas for Mobile Communications", Wiley-IEEE Press, 2001.
- [72] J. Liberti, T. Rappaport, "Smart Antennas for Wireless Communications", Prentice Hall PTR, 1999.

- [73] K.I. Pedersen, R.E. Mogensen, J. Ramiro-Moreno, "Application and Performance of Downlink Beamforming Techniques in UMTS", IEEE Communications Magazine, vol. 41, pp.134-143, Oct. 2003.
- [74] T. Baumgartner, R. Honek, "On the Optimum number of Beams for Fixed Beam Smart Antennas in UMTS FDD", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 5, pp. 560-567, Mar. 2006.
- [75] K. I. Pedersen, R. E. Mogensen, J. Ramiro-Moreno, "Capacity Gain of Beamforming Techniques in a WCDMA System Under Channelization Code Constraints", IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 3, pp. 1199-1208, Jul. 2004.
- [76] D. Tsilimantos, G. Tsoulos, D. Kaklamani, "UMTS WCDMA Radio Network Planning using Beamforming Techniques", EuCAP 2007, pp. 1-5, Nov. 2007.
- [77] G. Tsoulos (Ed.), "MIMO System Technology for Wireless Communications", CRC Press 2006.
- [78] D. Gesbert, M. Shafi, D. Shiu, P. Smith and A. Naguib, "From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems", IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.21, no.3, pp.281-302, Apr. 2003.
- [79] S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications", IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.16, no.8, pp.1451-1458, Oct. 1998.
- [80] D. Tsilimantos, G. Tsoulos, D. Kaklamani, "UMTS WCDMA Network Planning with Smart Antennas", ECWT 2007, pp. 90-93, Munich Germany, Oct. 2007.
- [81] D. Tsilimantos, G. Tsoulos, D. Kaklamani, "Radio Network Planning for UMTS with Smart Antennas", ICEAA 2007, pp. 415-418, Torino Italy, Sept. 2007.
- [82] COST 231 Final Report, "Digital mobile radio: COST 231 view on the evolution towards 3rd generation systems". Editors: Damosso, E. and Correia L.M., European Commission – COST Telecommunications, Brussels, Belgium, 1998.
- [83] "Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000", Recommendation ITU-R M. 1225, 1997.
- [84] P. Viswanath, D.N.C. Tse and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 48, no. 6, pp. 1277-1294, Jun. 2002.
- [85] G.E. Athanasiadou, I.J. Wassell, C.L. Hong "Deterministic Propagation Modelling and Measurements for the Broadband Fixed Wireless Access Channel," IEEE VTCF'04, vol. 1, pp. 76-80, Sept. 2004.
- [86] G.E. Athanasiadou "Incorporating the Fresnel zone theory in ray tracing propagation modelling of fixed wireless access channels," IEEE PIMRC'07, pp. 1-5, Sept 2007.

- [87] P.K. Gkonis, G.V. Tsoulos, G.E. Athanasiadou and D.I. Kaklamani, "An Adaptive Beam-Shaping Strategy for WCDMA Multicellular Networks with Non-Uniform Traffic Requirements", *Journal of Communications (JCM)*, vol.3, issue 4, pp. 16-25, Sept 2008.
- [88] CEPT, "The Chester 1997 Multilateral Coordination Agreement, Technical Criteria, Coordination Principles and Procedures for the introduction of Terrestrial Video Broadcasting", July 1997.
- [89] ITU-R, "BT.1368-6, Planning criteria for digital terrestrial television services in the VHF/UHF bands", May 2007.
- [90] ETSI, "Digital video broadcasting (DVB): Frame structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (DVB-T)," ETSI, Tech. Rep., ETS 300 744, Nov. 2004.
- [91] EBU, "The European Broadcasting Conference, Stockholm", EBU Review – Technical, Part A, No. 68, August 1961.
- [92] ECC, "Technical Criteria for Allotment Planning of Digital Video Broadcasting Terrestrial (DVB - T) and Terrestrial – Digital Audio Broadcasting (T – DAB)", ECC, Tech. Rep., Report 49, April 2004.
- [93] ITU-R, "Final Acts of the Regional Radiocommunication Conference for planning of the digital terrestrial broadcasting service in parts of Regions 1 and 3, in the frequency bands 174-230 MHz and 470-862 MHz (RRC-06)", June 2006.
- [94] ITU-R P. 1546-2, "Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3 000 MHz," August 2005.
- [95] ATDI, "ICS Telecom nG reference manual: Propagation models", 2006.
- [96] J. Deygout, "Multiple knife-edge diffraction of microwaves," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 14, pp. 480-489, July 1966.
- [97] K. Bullington, "Radio propagation at frequencies above 30 MHz," in *Proc. Institute of Radio Engineers*, 35, No 10, pp. 1122-1136.
- [98] ITU-R BT.419-3, "Directivity and polarization discrimination of antennas in the reception of television broadcasting", 1992.
- [99] ECC Working Group RRC-06, "Re-use distances for different combinations of reception", September 2005.
- [100] M. Allegretti, C. Lucianazi, R. Notarpietro and G. Perona, "Validation of Deterministic Radio Propagation Algorithms for UHF Mobile Network Planning in Mountain Environment," in *Proc. 2007 Loughborough Antennas and Propagation Conference*, UK, Apr. 2007.

- [101] Switzerland, "Application of Different Diffraction Models in Mountainous Terrain," Document 3K/17, Nov. 2003.
- [102] Mannino, C., Rossi, F. and Smriglio, S., "The network packing problem in terrestrial broadcasting", *Operations Research*, vol. 54, No. 4, July 2006.
- [103] K. Aardal, C. van Hoesel, A. Koster, C. Mannino, and A. Sassano, "Models and solution techniques for the frequency assignment problem", *ZIB Report*, Dec. 2001.
- [104] ITU-R Intercessional Planning Group, "The Methodology of the Planning Software: The Synthesis", Document IPG-1/EP/2-E, Geneva, 2005.
- [105] D. A. Kateros, D. A. Zarbouti, D. C. Tsilimantos, C. I. Katsigiannis, P. K. Gkonis, I. E. Foukarakis, D. I. Kaklamani and I. S. Venieris, "DVB-T network planning: A case study for Greece", *IEEE Antennas & Propagation Mag.*, vol. 51, no. 1, pp. 91-101, Febr. 2009.
- [106] D. A. Kateros, P. G. Georgallis, C. I. Katsigiannis, G. N. Prezerakos and I. S. Venieris, "An Algorithm for the Frequency Assignment Problem in the Case of DVB-T Allotments", *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, Springer, Vol. 4818, pp 561-568, 2008
- [107] ITU-R BT.655-7, "Radio-frequency protection ratios for AM vestigial sideband terrestrial television systems interfered with by unwanted analogue vision signals and their associated sound signals," Feb. 2004.

Παράρτημα Α' – Δημοσιεύσεις

Διεθνή περιοδικά πλήρους κειμένου, με κρίση

- [1] D. A. Kateros, D. A. Zarbouti, D. C. Tsilimantos, C. I. Katsigiannis, P. K. Gkonis, I. E. Foukarakis, D. I. Kaklamani and I. S. Venieris, "DVB-T network planning: A case study for Greece", IEEE Antennas & Propagation Magazine, vol. 51, no. 1, pp. 91-101, February 2009.
- [2] D. C. Tsilimantos, D. A. Zarbouti, G. V. Tsoulos, G. E. Athanasiadou and D. I. Kaklamani, "Fairness and Throughput Trade-off Analysis for UMTS WCDMA Network Planning", submitted to the Journal of Wireless Personal Communications, Springer.
- [3] D. A. Zarbouti, D. C. Tsilimantos, G. V. Tsoulos, G. E. Athanasiadou and D. I. Kaklamani, "Performance of OFDMA Multicell Systems with Random Beamforming", submitted to International Journal of Electronics and Communication, Elsevier.
- [4] A. Tseronis, D. Tsilimantos and N. Uzunoglu, "Analysis of Radiation Phenomena in a Wedge Ended Dielectric Slab Waveguide", International Journal of Infrared and Millimeter Waves (Springer), vol. 26, no. 2, pp. 279-295, February 2005.

Πρακτικά διεθνών συνεδρίων, με κρίση

- [1] D. Tsilimantos, G. Tsoulos and D. Kaklamani, "Radio Network Planning for UMTS with Smart Antennas", Proceedings of the International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA '07), pp. 415-418, Torino, Italy, September 2007.
- [2] D. Tsilimantos, G. Tsoulos and D. I. Kaklamani, "UMTS WCDMA Network Planning with Smart Antennas", Proceedings of the 10th European Conference on Wireless Technology (ECWT 2007), European Microwave Week 2007 (EuMW 2007), pp. 90-93, Munich, Germany, October 2007.
- [3] D. Tsilimantos, G. Tsoulos and D. I. Kaklamani, "UMTS WCDMA Radio Network Planning using Beamforming Techniques", CD-Rom Proceedings of the 2nd European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP 2007), Edinburgh, UK, 11-16 November 2007 (5 pages).
- [4] D. Tsilimantos, G. Tsoulos and D. Kaklamani, "Particle Swarm Optimization for UMTS WCDMA Network Planning", CD-Rom Proceedings of the IEEE International Symposium on Wireless Pervasive Computing (ISWPC08), pp.283-287, Santorini, Greece, 7-9 May 2008.