



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ  
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

# **Βέλτιστη διαχείριση των πόρων του σταθμού βάσης σε ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς με χρήση τεχνικών πρόβλεψης**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Γ. Οικονομάκου

**Επιβλέπων :** Μιχαήλ Θεολόγου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιανουάριος 2014





ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ

ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ

ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ  
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

# Βέλτιστη διαχείριση των πόρων του σταθμού βάσης σε ασύρματα δίκτυα επόμενης γενιάς με χρήση τεχνικών πρόβλεψης

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μαρία Γ. Οικονομάκου

Επιβλέπων : Μιχαήλ Θεολόγου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 2013.

.....  
Μ. Θεολόγου

Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Ε. Συκάς

Καθηγητής ΕΜΠ

.....  
Γ. Στασινόπουλος

Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Ιανουάριος 2014

.....  
Μαρία Γ. Οικονομάκου

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

Copyright © Μαρία Γ. Οικονομάκου, 2014.

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.



# Περίληψη

---

Η χρησιμοποίηση των ασύρματων δικτύων επόμενης γενιάς, που υπόσχονται παροχή υπηρεσιών «πάντα, παντού και με κάθε τρόπο» με οπισθόφορη συμβατότητα με τα υπάρχοντα συστήματα, αναμένεται να προκαλέσει μεγάλη αύξηση στην κίνηση του δικτύου. Για την υποστήριξη αυτής της αυξημένης κίνησης και την παροχή υπηρεσιών με τη βέλτιστη ποιότητα, μπορούν να γίνουν παρεμβάσεις στο οπισθοζευκτικό δίκτυο. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της βέλτιστης διαχείρισης των πόρων στο οπισθοζευκτικό δίκτυο για ένα σταθμό βάσης χρησιμοποιώντας ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για την πρόβλεψη του εύρους ζώνης κάτω ζεύξης που θα κληθεί ο σταθμός βάσης να προσφέρει. Το εργαλείο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε για το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο ήταν ο μαθηματικός ευρυστικός αλγόριθμος της Differential Evolution (DE).

Η διπλωματική εργασία οργανώνεται σε έξι κεφάλαια. Στο **Κεφάλαιο 1** παρουσιάζεται συνοπτικά μια εποπτική ματιά της εξέλιξης των ασύρματων δικτύων με επικέντρωση στα δίκτυα Long-Term Evolution, που υιοθετούνται σταδιακά στην Ελλάδα. Στο **Κεφάλαιο 2** παρουσιάζονται εφαρμογές σχετικές με το θέμα της διπλωματικής εργασίας που έχουν χρησιμοποιηθεί. Στο **Κεφάλαιο 3**, παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, ως εργαλείο πρόβλεψης, καθώς και της differential, ως εργαλείο βελτιστοποίησης. Ακολούθως, στο **Κεφάλαιο 4**, παρουσιάζεται η μοντελοποίηση του προβλήματος που πραγματεύεται η διπλωματική και στο **Κεφάλαιο 5** τα αριθμητικά αποτελέσματα που προέκυψαν ως εκτίμηση για την απόκλιση των προβλέψεων. Τέλος, στο **Κεφάλαιο 6** πραγματοποιείται μια λεπτομερής σύνοψη όλης της ερευνητικής προσπάθειας, καθώς και μια περιγραφή των ουσιαστικών συνεισφορών της συγκεκριμένης διπλωματικής.

**Λέξεις κλειδιά:** 4G, Διαχείριση πόρων, Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, Differential evolution, Οπισθοζευκτικό δίκτυο, Ποιότητα υπηρεσίας (QoS).

# Abstract

---

The employment of next generation wireless networks, that promise rendering of services “always, everywhere and in every possible way” along with backward compatibility to the existing infrastructure, is expected to trigger a large raise on the network traffic. In order to support this increased traffic with the best quality of service, there are options that can be followed as far as the backhaul network is concerned. The aim of the present diploma thesis is to examine the best resource management at the backhaul network for a base station by the use of an artificial neural network to forecast the downlink throughput the base station will need to offer. The optimization tool that was picked for the artificial neural network was the mathematical heuristic algorithm of Differential Evolution.

The diploma thesis is organized in six chapters. **Chapter 1** describes the evolution of wireless networks, focusing on Long-Term Evolution networks. In **Chapter 2**, applications relevant to the topic of the diploma thesis are presented. In **Chapter 3**, the basic characteristics of both artificial neural networks, as a prediction tool and differential evolution algorithm, as an optimization tool, are described. The following **Chapter 4** presents the model problem of the thesis and the arithmetic results concerning its predictions are discussed in **Chapter 5**. Finally, a brief presentation of the research work and the respective conclusions are given in **Chapter 6**.

**Key words:** 4G, Resource Management, Artificial Neural Networks, Differential Evolution, backhaul network, Quality of Service

# Ευχαριστίες

---

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Δικτύων Κινητών και Προσωπικών Επικοινωνιών του τομέα Επικοινωνιών, Ηλεκτρονικής και Συστημάτων Πληροφορικής της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Σε αυτό το σημείο θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον κ. Μιχαήλ Θεολόγου, υπεύθυνο καθηγητή της διπλωματικής μου εργασίας, για την ανάθεση αυτής και τη δυνατότητα που μου δόθηκε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και τον κ. Ιωάννη Λουμιώτη, επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας και υποψήφιο διδάκτορα, για την καταλυτική βοήθεια και καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Επιπρόσθετα, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους συμφοιτητές μου και κυρίως τη φίλη μου, Αγάπη Μεσοδιακάκη, για τη στήριξή τους σε αυτή μου την προσπάθεια .

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου που υπήρξε πάντα δίπλα μου σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και με βοήθησε να φτάσω στο τέλος τους.

Μαρία Γ. Οικονομάκου

Ιανουάριος 2014





# Πίνακας περιεχομένων

---

Περίληψη .....	6
Abstract .....	7
Ευχαριστίες .....	8
1. LTE .....	15
1.1. Εισαγωγή .....	15
1.2. Η εξέλιξη των γενιών των κυψελωτών δικτύων .....	15
1.2.1. 1G .....	15
1.2.2. 2G .....	16
1.2.3. 2.5G .....	17
1.2.4. 3G .....	18
1.2.5. Στο δρόμο για τα 4G .....	19
1.3. LTE και άλλες Ευρυζωνικές Ασύρματες Τεχνολογίες .....	20
1.3.1. WiMAX .....	20
1.3.2. LTE .....	22
1.4. Αρχιτεκτονική LTE δικτύων .....	25
1.4.1. EPC, Core Network .....	26
1.4.1.1. Mobile Management Entity (MME) .....	26
1.4.1.2. Serving Gateway (S-GW) .....	26
1.4.1.3. Packet Data Network Gateway (PDN-GW) .....	27
1.4.2. E-UTRAN .....	27
1.4.2.1. X2 Διεπαφή.....	27
1.4.2.2. S1 διεπαφή.....	28
1.4.2.3. Σταθμός βάσης eNodeB .....	28
1.4.2.4. Εξοπλισμός χρήστη (User Equipment, UE).....	29
1.5. Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων .....	29
1.5.1. Επίπεδο χρήστη .....	29
1.5.2. Επίπεδο ελέγχου.....	30
1.6. Ποιότητα υπηρεσίας στα LTE .....	32
1.6.1. Κομιστής.....	32
1.6.2. QoS Class Identifier (QCI) .....	32
1.6.3. Άλλες παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας.....	34
1.7. LTE-Advanced .....	35
2. State of the art .....	38
2.1. Εισαγωγή .....	38

2.2.	Πρόβλεψης κίνησης δικτύου με βάση ιστορικά δεδομένα .....	38
2.3.	Πρόβλεψη σε ένα δυναμικό περιβάλλον .....	39
2.4.	Μοντέλα πρόβλεψης τηλεπικοινωνιακής κίνησης.....	40
2.4.1.	Naïve Benchmark μέθοδος .....	40
2.4.2.	Holt-Winters μέθοδος.....	41
2.4.3.	Autoregressive Moving Average (ARMA) .....	41
2.4.4.	Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) .....	41
2.4.5.	Autoregressive Fractionally Integrated Moving Average (ARFIMA) .....	42
2.4.6.	Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα .....	42
2.5.	Εκτίμηση μοντέλων πρόβλεψης .....	44
3.	Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα & Differential Evolution .....	46
3.1.	Εισαγωγή .....	46
3.2.	Τεχνητά Νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks) .....	46
3.2.1.	Perceptron πολλών επιπέδων .....	47
3.3.	Πρόβλημα πρόβλεψης με τεχνητό νευρωνικό δίκτυο .....	48
3.4.	Μοντελοποίηση τεχνητού νευρωνικού δικτύου για πρόβλεψη .....	49
3.4.1.	Αρχιτεκτονικές Νευρωνικών Δικτύων .....	50
3.4.1.1.	Πλήθος κρυφών επιπέδων και κρυφών κόμβων .....	50
3.4.1.2.	Πλήθος κόμβων εισόδου.....	51
3.4.1.3.	Πλήθος κόμβων εξόδου.....	51
3.4.1.4.	Σύνδεσμοι μεταξύ των κόμβων.....	51
3.4.2.	Συνάρτηση ενεργοποίησης .....	52
3.4.3.	Αλγόριθμος εκπαίδευσης .....	52
3.4.4.	Κανονικοποίηση δεδομένων.....	53
3.4.5.	Σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης και πιστοποίησης .....	53
3.4.6.	Εκτίμηση της επίδοσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου.....	54
3.5.	Differential Evolution Αλγόριθμος.....	54
3.5.1.	Ο αρχικός αλγόριθμος της Differential Evolution.....	55
3.6.	Νεωτερική Differential Evolution .....	57
3.6.1.	Η λογική της Νεωτερικής Differential Evolution .....	57
3.6.2.	Διακρίσεις και πλεονεκτήματα της Νεωτερικής DE .....	59
3.7.	Στρατηγικές Αναζήτησης Differential Evolution.....	60
3.7.1.	Κατηγοριοποίηση στρατηγικών αναζήτησης .....	60
3.8.	Παραδείγματα στρατηγικών αναζήτησης .....	64
3.8.1.	Στρατηγικές RAND .....	65
3.8.1.1.	RAND1 στρατηγική.....	65

3.8.1.2.	RAND2 στρατηγική.....	66
3.8.1.3.	RAND3 στρατηγική.....	66
3.8.1.4.	RAND4 στρατηγική.....	66
3.8.1.5.	RAND5 στρατηγική.....	67
3.8.2.	Στρατηγικές RAND/DIR .....	67
3.8.2.1.	RAND1/DIR1 στρατηγική.....	67
3.8.2.2.	RAND2/DIR1 στρατηγική.....	68
3.8.2.3.	RAND3/DIR2 στρατηγική.....	68
3.8.2.4.	RAND3/DIR3 στρατηγική.....	69
3.8.2.5.	RAND4/DIR2 στρατηγική.....	69
3.8.2.6.	RAND4/DIR3 στρατηγική.....	70
3.8.2.7.	RAND5/DIR4 στρατηγική.....	70
3.8.3.	Στρατηγικές RAND/BEST .....	70
3.8.3.1.	RAND1/BEST στρατηγική .....	71
3.8.3.2.	RAND2/BEST στρατηγική .....	71
3.8.3.3.	RAND3/BEST στρατηγική .....	71
3.8.3.4.	RAND1/BEST στρατηγική .....	72
3.8.4.	Στρατηγικές RAND/BEST/DIR .....	72
3.8.4.1.	RAND0/BEST/DIR1 στρατηγική .....	72
3.8.4.2.	RAND1/BEST/DIR1 στρατηγική .....	73
3.8.4.3.	RAND1/BEST/DIR2 στρατηγική .....	73
3.8.4.4.	RAND2/BEST/DIR1 στρατηγική .....	73
3.8.4.5.	RAND2/BEST/DIR3 στρατηγική .....	74
3.8.4.6.	RAND3/BEST/DIR4 στρατηγική .....	74
3.8.4.7.	RAND4/BEST/DIR4 στρατηγική .....	75
3.8.4.8.	RAND4/BEST/DIR5 στρατηγική .....	75
4.	Μοντέλο του συστήματος.....	77
4.1.	Εισαγωγή .....	77
4.2.	Διατύπωση προβλήματος .....	77
4.3.	Μαθηματική μοντελοποίηση .....	78
5.	Αριθμητική επίλυση του συστήματος .....	84
5.1.	Εισαγωγή .....	84
5.2.	Μεταβολή του πλήθους των γενεών & περιορισμών.....	84
5.2.1.	GEN = 1000 .....	85
5.2.2.	GEN = 1500 .....	88
5.2.3.	GEN = 2000 .....	91

5.3.	Μεταβολή NP και F.....	96
5.3.1.	Σταθερό NP και μεταβαλλόμενη F.....	97
5.3.1.1.	F = 0.3 .....	97
5.3.1.2.	F = 0.4 .....	98
5.3.1.3.	F = 0.5 .....	99
5.3.1.4.	F = 0.6 .....	100
5.3.1.5.	F = 0.7 .....	101
5.3.1.6.	F = 0.8 .....	102
5.3.1.7.	F = 0.9 .....	103
5.3.1.8.	F = 1 .....	104
5.3.2.	Σταθερή F και μεταβαλλόμενο NP .....	105
5.3.2.1.	NP = 50 .....	105
5.3.2.2.	NP = 60 .....	106
5.3.2.3.	NP = 70 .....	107
5.3.2.4.	NP = 80 .....	108
5.3.2.5.	NP = 90 .....	109
5.3.2.6.	NP = 100.....	110
5.3.2.7.	NP = 110.....	111
5.3.2.8.	NP = 120.....	112
5.4.	Παράλληλη μεταβολή των NP και F .....	113
5.4.1.	Στρατηγική Rand1 .....	113
5.4.2.	Στρατηγική Rand3/Best.....	115
5.4.3.	Στρατηγική Rand0/Best/Dir1 .....	117
5.4.4.	Στρατηγική Rand3/Best/Dir4.....	118
6.	Συμπεράσματα.....	121
	Βιβλιογραφία .....	124



# 1. LTE

## 1.1. Εισαγωγή

---

Η ιστορία των ασύρματων επικοινωνιών μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διαδοχικές διαφορετικές γενιές δικτύων. Κάθε γενιά αποτέλεσε ένα ξεχωριστό μεγάλο βήμα, συνοδευόμενο από επαναστατικές κινήσεις στο πεδίο των κινητών επικοινωνιών. Την αναλογική 1<sup>η</sup> γενιά κινητών επικοινωνιών ακολούθησε η 2<sup>η</sup> ψηφιακή γενιά. Το όραμα της 3<sup>η</sup> γενιάς που ακολούθησε ήταν να απελευθερώσει πλήρως τη μετάδοση δεδομένων πολυμεσικών, όπως και τη φωνητική επικοινωνία. Παράλληλα με αυτές τις δραστηριότητες, συντελέστηκε και μια έντονη ερευνητική προσπάθεια, σχετική με το μέλλον της ασύρματης πρόσβασης, που αναφέρεται ως ασύρματη πρόσβαση 4<sup>ης</sup> γενιάς, 4G. Η τεχνολογία 4G εξέλιξε τις επιδόσεις και υπηρεσίες των ασύρματων συστημάτων, παρέχοντας ρυθμούς δεδομένων έως και 100 Mbps σε ευρεία περιοχή κάλυψης και έως 1 Gbps σε τοπική περιοχή κάλυψης.

Η International Telecommunication Union (ITU) προώθησε τις International Mobile Telecommunications (IMT-2000) ως εναρκτήριο λάκτισμα για την κάλυψη υψηλών ευρυζωνικών ταχυτήτων βασιζόμενη σε κινητά συστήματα που υποστηρίζουν σύνδεση δικτύου-δικτύου, διαφάνεια υπηρεσιών, παγκόσμια περιήγηση και αδιάλειπτες υπηρεσίες ανεξάρτητα από την τοποθεσία. Επιπλέον στόχος της υπήρξε οι κινητές πολυμεσικές τηλεπικοινωνίες στην παγκόσμια αγορά να είναι υψηλής ποιότητας, μεγαλύτερης ταχύτητας και αποδοτικές σε περιπτώσεις υψηλών απαιτήσεων σε δεδομένα. Τα παραπάνω συνοψίζονται στην έκφραση: «παροχή υπηρεσιών παντού και πάντα».

Δύο ενώσεις οργανισμών δημιουργήθηκαν από αυτήν την πρωτοβουλία των ITU-IMT-2000: οι Third Generation Partnership project (3GPP) και Third Generation Partnership Project 2 (3GPP2), οι οποίες και ανέπτυξαν τις δικές τους εκδόσεις κινητών συστημάτων 2G, 3G και beyond 3G. [6]

## 1.2. Η εξέλιξη των γενιών των κυψελωτών δικτύων

---

### 1.2.1. 1G

---

Η πρώτη γενιά ασύρματων κυψελωτών δικτύων, γνωστά και ως 1G, εμφανίστηκαν και χρησιμοποιήθηκαν τη δεκαετία του 1980. Ωστόσο, η συγκεκριμένη γενιά δεν αποτέλεσε την εκκίνηση των κινητών επικοινωνιών. Την εμφάνισή τους είχαν κάνει ήδη αρκετά συστήματα με διαφορετικά χαρακτηριστικά σε σχέση με τον τρόπο που αντιλαμβανόμαστε σήμερα τα δίκτυα κινητών επικοινωνιών. Η καινοτομία τους ήταν ότι πλέον η περιοχή κάλυψης διαιρούταν σε κυψέλες, κάτι που επέτρεπε την πολλαπλή επαναχρησιμοποίηση συχνοτήτων στο ίδιο δίκτυο χωρίς να δημιουργούνται

έντονα προβλήματα παρεμβολής. Αυτό συντέλεσε στην αύξηση χωρητικότητας του δικτύου. [13]

Τα δίκτυα 1G αποτελούνταν από αναλογικά συστήματα ικανά αποκλειστικά για τη μετάδοση φωνής. Η τεχνολογία τους υπήρξε πολύ κατώτερη της υπάρχουσας σημερινής. Μπορούσαν όμως να προσφέρουν μια ικανοποιητικά καλή ποιότητα στη μετάδοση φωνής. Μειονέκτημά τους ήταν η μειωμένη απόδοση φάσματος, που συντελούσε στην ευαισθησία των συσκευών 1G σε είδωλα ενώ, επιπλέον, ένα κανάλι μπορούσε να υποστηρίξει μόνο μια συσκευή τη φορά.

Γνωστά 1G συστήματα είναι τα Advanced Mobile Phone System (AMPS), που χρησιμοποιήθηκε στην Αμερική και τα Nordic Mobile Telephone System (NMT) και Total Access Communications System (TACS), τα οποία υπήρξαν περισσότερο δημοφιλή στις ευρωπαϊκές χώρες.

Με στόχο την καλύτερη εκμετάλλευση του φάσματος συχνοτήτων, τα συστήματα 1G άρχισαν να εγκαταλείπονται. Η εξέλιξη σε δίκτυα ανώτερης τεχνολογίας κρίθηκε απαραίτητη για να ξεπεραστούν τα μειονεκτήματα των δικτύων 1G. Έτσι προέκυψε η μετάβαση στα δίκτυα δεύτερης γενιάς, γνωστά και ως 2G.

### 1.2.2. 2G

---

Τα δίκτυα δεύτερης γενιάς (2G) εμφανίστηκαν τη δεκαετία του '90, σημειώνοντας μεγάλη επιτυχία. Πρωτοπορία τους αποτέλεσε το γεγονός ότι αντικατέστησαν την αναλογική επεξεργασία των δικτύων 1G με ψηφιακή. Μπορούσαν έτσι να παρέχουν υψηλών προδιαγραφών υπηρεσίες μετάδοσης, όχι μόνο φωνής, αλλά και δεδομένων, με ανθεκτικότητα και καλύτερη φασματική απόδοση. Πλέον, ένα κανάλι συχνοτήτων διαιρείται και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από διαφορετικούς χρήστες, είτε με διαίρεση χρόνου είτε με διαίρεση κώδικα. Επίσης, χρησιμοποιούνται ιεραρχικές δομές κυψελών: η περιοχή κάλυψης διαιρείται σε κυψέλες μεγάλης έκτασης (macrocells), κυψέλες μικρής έκτασης (microcells) και κυψέλες περιορισμένης έκτασης (picocells) (κυρίως σε μεγάλα αστικά κέντρα), με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση των δυνατοτήτων των δικτύων. Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι τόσο τα δίκτυα 1G όσο και τα 2G βασίστηκαν σε τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος για τη μετάδοση δεδομένων σε χαμηλές ταχύτητες. [13]

Συμβολή στην επιτυχία των δικτύων 2G είχαν τα ποικίλα νέα χαρακτηριστικά που παρείχαν, όπως το push-to talk, η υπηρεσία σύντομων μηνυμάτων (SMS), τηλεδιασκέψεις, αναγνώριση κλήσης, τηλεφωνητή και μικρές εφαρμογές δεδομένων όπως email και πλοήγηση στον ιστό. Πέρα από αυτά επέκτειναν τις υπηρεσίες φωνής των 1G δικτύων. [20]

Γνωστά 2G συστήματα είναι τα Global System for Mobile communication (GSM), το αμερικανικό Interim Standard 95 (IS-95) και το οποίο αναφέρεται και ως cdmaOne και το Personal Digital Cellular (PDC), το οποίο χρησιμοποιείται κυρίως στην



Ιαπωνία. Τα πιο πετυχημένα θεωρούνται τα GSM και IS-95. Το GSM διέφερε από τα δίκτυα 1G στο γεγονός ότι έκανε χρήση ψηφιακής κυψελωτής τεχνολογίας και μεθόδων Διαιρέσης Χρόνου Πολλαπλής Πρόσβασης (Time Division Multiple Access, TDMA) για μετάδοση φωνής. Χρησιμοποιήθηκε αρχικά στην Ευρώπη, παρέχοντας μόνο υπηρεσίες φωνής, σύντομων μηνυμάτων (SMS) και χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων, και έπειτα παγκοσμίως, καθιστώντας αυτό το δημοφιλέστερο δίκτυο 2G τεχνολογίας. Το IS-95 βασίζεται στην τεχνολογία Code Division Multiple Access (CDMA) και χρησιμοποιείται κυρίως στη Βόρεια και Νότια Αμερική, καθώς και στην Ανατολική Ασία. [6],[14]

Τόσο το GSM όσο και το IS-95 αποτέλεσαν αργότερα βάση για τα 3G partnership projects: 3GPP και 3GPP2 αντίστοιχα, προς ανάπτυξης προτύπων που θα βασίζονταν σε τεχνολογία CDMA και που θα ήταν σύμφωνα με τους κανονισμούς των IMT-2000.

### 1.2.3. 2.5G

---

Με στόχο την ανταπόκριση στις 'ανάγκες' του κόσμου για υψηλή ταχύτητα δεδομένων, δημιουργήθηκε μια νέα γενιά δικτύων με σημαντική αύξηση του εύρους ζώνης σε σχέση με τα 2G, τα 2,5G δίκτυα. Η νέα αυτή γενιά ασύρματων δικτύων βασίζεται τόσο σε τεχνολογία μεταγωγής κυκλώματος όσο και μεταγωγής πακέτου, παρέχοντας έτσι υψηλούς ρυθμούς δεδομένων με μικρή κατανάλωση ενέργειας. Συγκεκριμένα, η απόδοση ταχυτήτων που προσφέρουν κυμαίνονται από 30 ως 90 kbps, δηλαδή τρεις ή παραπάνω φορές πιο αποτελεσματική ταχύτητα σε σχέση με τα 2G δίκτυα. Η υποδομή που χρησιμοποιήθηκε για την παροχή των υπηρεσιών ήταν αυτές του GSM και CDMA.

Χαρακτηριστικά δίκτυα 2.5G είναι το General Packet Radio Service (GPRS) και το Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE).

Το GPRS αποτελεί εξέλιξη του GSM και έχει ικανοποιητική υποστήριξη κίνησης πακέτων δεδομένων σε μη-πραγματικό χρόνο. Δεδομένου ότι χρησιμοποιεί τεχνολογία μεταγωγής πακέτου, δεσμεύει τους πόρους του δικτύου μόνο όταν υπάρχει ανάγκη για αποστολή/λήψη δεδομένων, έχοντας παράλληλα τη δυνατότητα να χρησιμοποιεί πολλές σχισμές για τη μετάδοση δεδομένων. Έτσι, παρέχει καλύτερο ρυθμό για το χρήστη, φτάνοντας ως και 140 Kbps όταν ο χρήστης χρησιμοποιεί όλες τις διαθέσιμες χρονοσχισμές. Το σύστημα του GPRS εξαρχής σχεδιάστηκε ώστε να είναι κατάλληλο και αποτελεσματικό για εφαρμογές πακέτων δεδομένων, εφόσον βασίζεται στην κατανομή καναλιών σε πολλά τερματικά, τόσο στην άνω όσο και στην κάτω ζεύξη. [14]

Το Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE), ή 2.75G όπως είναι γνωστό, έχει το χαρακτηριστικό ότι εισήγαγε τη διαμόρφωση 8-PSK (8-Phase Shift Keying). Αυτή η τεχνική επηρεάζει μόνο το λογισμικό των σταθμών βάσης και προσφέρει έως και τριπλάσιο ρυθμό μετάδοσης από το βασικό ρυθμό μετάδοσης του GSM. Με τη χρήση

του ταχύτερου σχήματος κωδικοποίησης, το EDGE παρέχει το μεγαλύτερο θεωρητικό ρυθμό δεδομένων: περίπου 50Kb/s για κάθε χρονοσχισμή.

#### 1.2.4. 3G

---

Το επόμενο βήμα στην εξέλιξη των δικτύων έγινε με τη σύσταση των 3G δικτύων, που περιλαμβάνουν όλα τα προηγούμενα πρότυπα και που κατάφεραν να προσφέρουν παγκόσμια κινητικότητα και βελτιωμένη εμπειρία χρήστη. Χαρακτηριστικό τους που χρήζει αναφοράς είναι ότι βασίζονται σε τεχνολογία μεταγωγής πακέτων. Θεωρούνται εξέλιξη των συστημάτων βασιζόμενων στην GSM τεχνολογία την οποία και διαχειρίζεται η 3GPP για να ορίσει ένα 3<sup>ης</sup> γενιάς Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Τα βασικά μέρη αυτού του συστήματος είναι τα:

- UMTS Terrestrial Radio Access Network (UTRAN): βασίζεται στην ασύρματη τεχνολογία Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) εφόσον χρησιμοποιεί εύρος ζώνης 5 MHz και
- GSM/EDGE Radio Access Network (GERAN): βασίζεται σε GSM-βελτιωμένους ρυθμούς δεδομένων.

Από την άλλη μεριά, η 3GPP2 υλοποίησε το CDMA2000 με 1.25 MHz εύρος ζώνης που διπλασίασε τη χωρητικότητα του cdmaOne, αύξησε τις υπηρεσίες φωνής και δεδομένων και υποστήριξε πλειάδα νέων βελτιωμένων ευρυζωνικών εφαρμογών δεδομένων, όπως ευρυζωνική πρόσβαση στο Internet και λήψη πολυμεσικών αρχείων.

Ως εξέλιξη για το CDMA2000, η 3GPP2 εισήγαγε για πρώτη φορά τη High-Rate Packet Data (HRPD) που αναφέρεται ως CDMA2000 1xEV-DO. Το πρότυπο αυτό παρέχει τεχνικές μεταγωγής πακέτου για μεταφορά δεδομένων υψηλών ταχυτήτων, ξεπερνώντας ενίοτε τα 2 Mbps. Η 1xEV-DO επέκτεινε τον τύπο υπηρεσιών και εφαρμογών που ήταν διαθέσιμες στους τελικούς χρήστες επιτρέποντας στα φέροντα να μεταδίδουν πλουσιότερο περιεχόμενο.

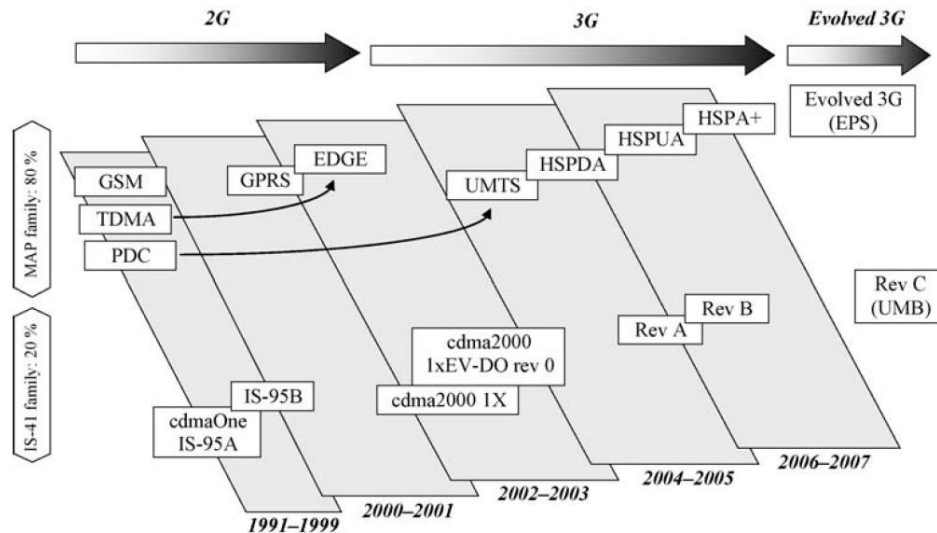
Η 3GPP, κινούμενη προς την ίδια κατεύθυνση, σύστησε το 2001 ένα βελτιωμένο WCDMA σύστημα, παρέχοντας πλέον το High-Speed Downlink Packet Access (HSDPA) που πέτυχε καλύτερη απόδοση φάσματος για υψηλότερες ταχύτητες υπηρεσιών δεδομένων. Έπειτα, το 2005, εισήχθη το High-Speed Uplink Packet Access (HSUPA) ενώ ο συνδυασμός των δύο ονομάζεται HSPA.

Η τελευταία εξέλιξη του HSPA είναι το HSPA+ το οποίο προέκυψε από την πρόσθεση των τεχνικών Multiple Input/Multiple Output (MIMO) και της 16QAM(άνω-ζεύξη)/64QAM(κάτω-ζεύξη) διαμόρφωσης. Σε συνδυασμό με βελτιώσεις στην ασύρματη πρόσβαση για αδιάλειπτη συνδεσιμότητα πακέτων, το HSPA+ οδήγησε σε ταχύτητες 11 Mbps (άνω ζεύξη) και 42 Mbps (κάτω ζεύξη).

Ως ο διάδοχος του CDMA2000 1xEV-DO, το CDMA2000 1xEV-DO Release 0 παρέχει ταχύτητες έως 2.4 Mbps με μέσο εύρος ζώνης χρήστη μεταξύ των 400 και 700 Kbps. Ο μέσος ρυθμός δεδομένων στη ζεύξη ανόδου είναι μεταξύ των 60 και 80 Kbps. Η Release 0 χρησιμοποιεί τα ήδη υπάρχοντα πρωτόκολλα Internet υποστηρίζοντας έτσι συνδεσιμότητα με βάση τις IP και εφαρμογές λογισμικού. Επιπλέον, βελτιώνει την εμπειρία χρήστη εν κινήσει επιτρέποντας ευρυζωνική πρόσβαση Internet, λήψη αρχείων μουσικής και video, παιχνίδια και εκπομπή τηλεόρασης.

Μια εξέλιξη του CDMA2000 1xEV-DO Release 0 είναι το CDMA2000 Revision A (Revision A) και στοχεύει στην αύξηση των μέγιστων ρυθμών και προώθησης συνδέσμων προς υποστήριξη ποικιλίας συμμετρικών, ευαίσθητων σε καθυστέρηση, ευρυζωνικών εφαρμογών δεδομένων πραγματικού χρόνου και ταυτόχρονα φωνής. Επιπλέον, ενσωματώνει τη τεχνολογία OFDM επιτρέποντας έτσι την πολυεκπομπή (έναν σε πολλούς) για αποστολή πολυμεσικού περιεχομένου. Ως διάδοχος της Rev-A, το CDMA2000 1xEV-DO Revision B (Rev-B) συστήνει δυναμική διανομή εύρους ζώνης για να πετύχει καλύτερη επίδοση με πρόσθεση πολλαπλών 1.25 MHz Rev-A καναλιών. [6]

Τα παραπάνω φαίνονται στην Εικόνα 1, [14]:



Εικόνα 1 : Εξέλιξη από τα 2G στα 3G δίκτυα

### 1.2.5. Στο δρόμο για τα 4G

Πριν ακόμα τα δίκτυα 3G επεκταθούν παγκοσμίως, οι προοπτικές επέκτασης της τεχνολογίας πέρα από το 3G άρχισαν να μελετούνται. Το όραμα περιελάμβανε

‘σύνδεση στο δίκτυο πάντα, παντού και με κάθε τρόπο’. Η υλοποίηση αυτού του οραματιζόμενου δικτύου περιελάμβανε ένα ενιαίο ασύρματο δίκτυο κορμού, ενσωματώνοντας ήδη υπάρχουσες υποδομές δικτύων αλλά και δημιουργώντας νέες, που θα μπορεί να διαχειρίζεται αέναα επικοινωνίες φωνής και δεδομένων υψηλού ρυθμού μετάδοσης και να φροντίζει έτσι για ποικίλες υπηρεσίες.

Οι 4G κινητές ευρυζωνικές τεχνολογίες θα επιτρέψουν στα ασύρματα φέροντα να εκμεταλλευτούν μεγαλύτερες ταχύτητες λήψης και αποστολής προς αύξηση του μεγέθους και του τύπου περιεχομένων διαθέσιμων μέσω κινητών συσκευών. Τα 4G δίκτυα είναι συνεκτικές IP λύσεις που παραδίδουν το περιεχόμενο φωνής, δεδομένων και πολυμέσων στους κινητούς χρήστες οποτεδήποτε και σχεδόν οπουδήποτε. Προσφέρουν σημαντικά βελτιωμένους ρυθμούς δεδομένων σε σχέση με τις προηγούμενες γενιές ασύρματης τεχνολογίας. Οι ταχύτερες ασύρματες ευρυζωνικές συνδέσεις δίνουν τη δυνατότητα στα ασύρματα φέροντα να υποστηρίζουν υπηρεσίες δεδομένων υψηλότερων επιπέδων, συμπεριλαμβανομένων και επαγγελματικών εφαρμογών, streamed ήχο και video, βίντεο-κλήση, κινητή τηλεόραση και παιχνίδια.

Ως ένα βήμα στην κατεύθυνση των 4G κινητών ευρυζωνικών τεχνολογιών, η 3GPP ξεκίνησε τις αρχικές έρευνες για το πρότυπο των Long-Term Evolution (LTE) ως βιώσιμη τεχνολογία το 2004 και η IEEE για το WiMAX. Η τεχνολογία LTE αναμένεται να προσθέσει σημαντικά πλεονεκτήματα έναντι άλλων ασύρματων τεχνολογιών.

### 1.3. LTE και άλλες Ευρυζωνικές Ασύρματες Τεχνολογίες

---

Τα δίκτυα LTE δεν αποτελούν την μοναδική επιλογή για την υλοποίηση των ευρυζωνικών κινητών υπηρεσιών. Αρκετές κατάλληλες λύσεις, ειδικά για σταθερές εφαρμογές, είναι ήδη διαθέσιμες στην αγορά και αναμφίβολα κάποιες από αυτές υπερτερούν των LTE, ειδικά σε κινητές εφαρμογές. Η πιο σημαντική από αυτές τις εναλλακτικές είναι το Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX).

#### 1.3.1. WiMAX

---

Το Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX) αναφέρεται στο IEEE 802.16 και είναι ένα πρότυπο που αναπτύχθηκε από την Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) για την παγκόσμια υιοθέτηση των ευρυζωνικών ασύρματων δικτύων μητροπολιτικών περιοχών.

Πρόκειται για ένα επίπεδο τύπο δικτύου που στην τρέχουσα έκδοσή του υποστηρίζει ρυθμούς μεταφοράς μέχρι 46Mbps και 4Mbps στην κάτω και άνω ζεύξη αντίστοιχα χρησιμοποιώντας εύρος ζώνης στα 10 MHz. Δεδομένου ότι χρησιμοποιεί την Time Division Duplex (TDD), μπορεί να υποστηρίζει σύστημα με βαθμωτό εύρος ζώνης στα 3.5, 5, 7, 8.75 και 10 MHz. Η μέγιστη κάλυψη που μπορεί να παρέχει είναι 50 km

για σταθερή χρήση και 5 km κινητή. Επικεντρώνεται κυρίως σε τοπική κινητικότητα και υποστηρίζει ταχύτητες μέχρι 120 km/h. [9]

Η αρχιτεκτονική του WiMAX βασίζεται στις IP. Συνεπώς, από την πρώτη κιάλας έκδοσή του, παρείχε χαρακτηριστικά όπως ασύρματη πρόσβαση και συνδεσιμότητα, στατική ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service, QoS), επιλεκτική διαχείριση ασύρματων πόρων (Radio Resource Management, RRM) και συμβατότητα σε WLAN. Αργότερα, με στόχο τη συμβατότητα με τα 3G δίκτυα προστέθηκαν επιπλέον χαρακτηριστικά, όπως τοπικές και ευρυζωνικές υπηρεσίες προς πολλούς χρήστες, ακεραιότητα στη διαπομπή δεδομένων και Ethernet.

Χαρακτηριστικά άξια αναφοράς που ξεχωρίζουν και το WiMAX ως ανταγωνιστικό σύστημα επόμενης γενιάς είναι, [9]:

- η παροχή ποιότητας υπηρεσίας: επιτυγχάνεται με διανομή του εύρους ζώνης στους χρήστες. Συγκεκριμένα, το WiMAX χρησιμοποιεί πρόσβαση με δέσμευση πόρων με παράθυρα για την υλοποίηση μιας σύνδεσης. Ακόμα, έχει την ικανότητα να κατανέμει την κίνηση μεταξύ κάτω και άνω ζεύξης, γεγονός που το κάνει ιδιαίτερα ευέλικτο.
- η υιοθέτηση της OFDMA στην κάτω και άνω ζεύξη ως σχήμα μετάδοσης: το WiMAX χαιρεί συνεπώς των σημαντικών οφελών της OFDMA όπως υψηλή απόδοση φάσματος, αποτελεσματική υλοποίηση με χρήση του Fast Fourier Transform (FFT) και ανθεκτικότητα σε λάθη συγχρονισμού. Έχει υιοθετήσει όμως και το σημαντικό μειονέκτημα αυτής που είναι ο υψηλός δείκτης peak-to-average power ratio (PARP) και άρα η μικρή απόδοση ισχύος. Το χαρακτηριστικό της OFDMA, που βρίσκει καλή εφαρμογή στο WiMAX, είναι ο διαφορισμός συχνότητας. [19]
- η χρήση των MIMO τεχνικών: εφαρμόζονται δύο σχήματα MIMO τεχνικών, οι ανοιχτού βρόγχου, όπου οι πομποί ενημερώνουν για την κατάσταση των καναλιών και οι κλειστού βρόγχου, όπου οι πομποί σχηματίζουν τους λοβούς της κεραίας με βάση πληροφορίες από το κανάλι.
- η ασφάλεια δικτύου: το WiMAX προβλέπει πιστοποίηση του χρήστη αποκλείοντας έτσι την πρόσβαση στο δίκτυό του σε μη εξουσιοδοτημένους χρήστες, ενώ και σε επίπεδο Medium Access Control (MAC), παρέχει διανομή κλειδιών ασφαλείας για τη διαφύλαξη των ευρυζωνικών και προς πολλούς χρήστες υπηρεσιών (πολυεκπομπής και ευρυεκπομπής).
- η κατηγοριοποίηση των καταστάσεων του τερματικού προς οικονομία ενέργειας.

Συνοπτικά τα χαρακτηριστικά του WiMAX φαίνονται στον Πίνακα 1, [9]:

WiMAX release 1.0	
Γενιά	3.9G
Πρώτη έκδοση	2005
Φυσικό επίπεδο	Κάτω ζεύξη: OFDMA Άνω ζεύξη: OFDMA
Αμφίδρομη φύση	Αμφίδρομη διαίρεση χρόνου (TDD)
Κινητικότητα χρήστη	από 60 έως και 120 kmph
Κάλυψη	έως και 50 km
Εύρος ζώνης καναλιού	3.5, 5, 7, 8.75, 10 MHz
Μέγιστοι ρυθμοί δεδομένων	Κάτω ζεύξη: 46 Mbps (2 x 2 κεραιές) Άνω ζεύξη: 4 Mbps (1 x 2 κεραιές) για 10 MHz, TDD 3:1 (λόγος κάτω/άνω ζεύξη)
Αποδοτικότητα φάσματος	Κάτω ζεύξη: 1.91 bps / Hz (2 x 2) Άνω ζεύξη: 0.84 bps / Hz (1 x 2)
Καθυστέρηση	Επίπεδο ζεύξης: περίπου 20 ms Μεταπομπή: περίπου 35 έως 50 ms
VoIP χωρητικότητα	> 20 χρήστες ανά τομέα / MHz (TDD)
Άλλα προσόντα	Αρχιτεκτονική βασισμένη εξ' ολοκλήρου στη μετάδοση IP πακέτων Συμβατότητα με 3G δίκτυα Υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας

**Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά του WiMAX**

### 1.3.2. LTE

Τα Long Term Evolution (LTE) δίκτυα αναπτύχθηκαν από τη 3GPP. Στόχος της ανάπτυξής τους ήταν η τεχνολογία της 3GPP να παραμείνει ανταγωνιστική και στο μέλλον έναντι άλλων δικτύων που είχαν αναπτυχθεί ήδη, όπως το προαναφερθέν WiMAX.

Αυτό που οραματίστηκε η 3GPP για τα LTE δίκτυα ήταν ένα σύστημα με βελτιωμένη χωρητικότητα και κάλυψη και άρα καλύτερη ποιότητα υπηρεσίας, βελτιωμένη εμπειρία χρήστη, υψηλότερους ρυθμούς μετάδοσης, μειωμένη καθυστέρηση και

λειτουργικά κόστη που θα μπορούσε να ενσωματώσει την ήδη υπάρχουσα υποδομή. [11]. Σημαντικό χαρακτηριστικό του νέου αυτού συστήματος είναι ότι πρόκειται για ένα βελτιωμένο σύστημα, επίπεδης αρχιτεκτονικής, που βασίζεται πλήρως σε μεταγωγή πακέτων, σε αντίθεση με παλαιότερα που βασίζονταν και σε μεταγωγή κυκλώματος.

Η πρώτη ολοκληρωμένη έκδοση περιγραφής των ασύρματων δικτύων πρόσβασης LTE είναι η Release 8, φαίνεται στον Πίνακα 2 , [9]:

LTE (3GPP Release 8)	
Γενιά	3.9G
Πρώτη έκδοση	2009
Φυσικό επίπεδο	Κάτω ζεύξη: OFDMA Άνω ζεύξη: SCFDMA
Αμφίδρομη φύση	Αμφίδρομη διαίρεση χρόνου και συχνότητας (TDD & FDD)
Κινητικότητα χρήστη	έως και 350 kmph
Κάλυψη	έως και 100 km
Εύρος ζώνης καναλιού	1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz
Μέγιστοι ρυθμοί δεδομένων	Κάτω ζεύξη: 300 Mbps (4 x 4 κεραίες) Άνω ζεύξη: 75 Mbps (2 x 4 κεραίες) για 20 MHz, FDD
Αποδοτικότητα φάσματος	Κάτω ζεύξη: 1.91 bps / Hz (2 x 2) Άνω ζεύξη: 0.72 bps / Hz (1 x 2)
Καθυστέρηση	Επίπεδο ζεύξης: < 5 ms Μεταπομπή: < 50 ms
VoIP χωρητικότητα	> 80 χρήστες ανά τομέα / MHz (FDD)
Άλλα προσόντα	Αρχιτεκτονική βασισμένη εξ' ολοκλήρου στη μετάδοση IP πακέτων Συμβατότητα με 3G δίκτυα Υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας

**Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά των LTE**

Τα LTE υποστηρίζουν μέγιστους ρυθμούς μετάδοσης 100 και 50 Mbps στην κάτω και άνω ζεύξη αντίστοιχα, με χρήση φάσματος στα 20 MHz και στις δύο περιπτώσεις. Μάλιστα, με εφαρμογή MIMO τεχνικών οι αριθμοί αυτοί αναμένονται να είναι αρκετά μεγαλύτεροι, φτάνοντας στην κάτω ζεύξη έως και 300 Mbps (χρήση 4 x 4 κεραιών με MIMO τεχνικές). Το φάσμα των LTE είναι αρκετά ευέλικτο καθώς είναι βαθμωτό και μπορεί να χρησιμοποιηθεί στα 1.25, 2.5, 5, 10, 15 MHz εκτός από τα 20 MHz που αναφέρθηκαν προτύτερα. Όσον αφορά στο χρόνο μετ' επιστροφής (RTT), τα LTE μπορούν με χρήση διάφορων τεχνικών και διαμορφώσεων να μειώσουν σημαντικά την καθυστέρηση και τελικά αυτός να μην ξεπερνά τα 10ms. [9], [14].

Αναφορικά με το θέμα της κάλυψης του δικτύου, το 3GPP, ξεκινώντας από το GSM, έχει υπάρξει ανταγωνιστικό όσον αφορά τα επίπεδα ασφαλείας και κινητικότητας και σκοπός του είναι να συνεχίσει στην ίδια πορεία. Έτσι και για τα LTE, ορίζεται μια κυψέλη να μπορεί να καλύπτει μια περιοχή των 100 km, με μικρή απόσβεση μετά τα 30 km, βέλτιστη κάλυψη σε ταχύτητα χρήστη περίπου 0-15 km/h, ενώ θα μπορεί να υποστηρίξει και ταχύτητες οχημάτων έως και 350 km/h. Το πλήθος των χρηστών μπορεί να φτάσει τους 200 ανά κυψέλη, με φάσμα 5 MHz. [9]

Επιπλέον, θα υποστηρίζουν βελτιωμένες ευρυζωνικές υπηρεσίες με απαιτήσεις 1 bit/s/Hz σε όλη την περιοχή κάλυψης, γεγονός που σημαίνει ότι με ένα σύστημα εύρους 10 MHz, οι χρήστες θα μπορούν να απολαμβάνουν ένα μέσο ρυθμό μετάδοσης των 10 Mbps.

Χαρακτηριστικά άξια αναφοράς, που ξεχωρίζουν και τα LTE ως ανταγωνιστικό σύστημα επόμενης γενιάς, είναι, [9]:

- παροχή ποιότητας υπηρεσίας: όπως και το WiMAX, τα LTE χρησιμοποιούν πρόσβαση με δέσμευση πόρων και δημιουργούν χρόνο-παράθυρα. Έτσι, πάντα είναι εξασφαλισμένη η μετάδοση των πακέτων.
- υιοθέτηση της OFDMA και SC-FDMA ως σχήμα μετάδοσης στην κάτω και άνω ζεύξη αντίστοιχα: η διαφοροποίηση του χρησιμοποιούμενου σχήματος στην άνω ζεύξη οφείλεται στον υψηλό δείκτη PARP που προκαλεί η OFDMA στην εφαρμογή της. Έτσι εξοικονομείται ενέργεια στο τερματικό και το σύστημα είναι πιο ευέλικτο. Το χαρακτηριστικό της OFDMA που βρίσκει καλή εφαρμογή στα LTE είναι ο διαφορισμός πολλαπλών χρηστών. [19]
- χρήση των MIMO τεχνικών: οι MIMO τεχνικές αυξάνουν κατά πολύ τη χωρητικότητα του καναλιού, αυξάνουν τους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων καθώς και την ακτίνα κάλυψης χωρίς να δεσμεύουν περισσότερο εύρος ζώνης ή να καταναλώνουν περισσότερη ισχύ.
- ασφάλεια δικτύου: τα LTE προσφέρουν παρόμοιους μηχανισμούς ασφαλείας με το WiMAX, όπως η χρήση κλειδιών ασφαλείας μεταξύ πομπού και δέκτη προς εξασφάλιση μιας ασφαλούς σύνδεσης και αποκρυπτογράφησης της επικοινωνίας. Επίσης, διαθέτουν ένα πρωτόκολλο παραγωγής κλειδιών για τις περιπτώσεις εντοπισμού κατεστραμμένων κλειδιών.

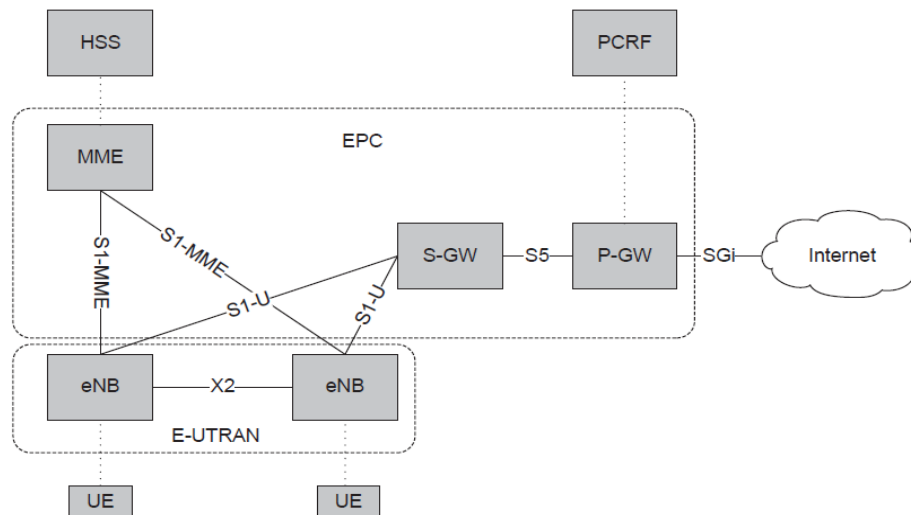


- Εφαρμογή μηχανισμών εξοικονόμησης ισχύος: ευθύνη του είναι να θέτουν τον πομπό σε κατάσταση αδράνειας κατά το χρονικό διάστημα που δεν εκτελείται μετάδοση (εκπομπή ή λήψη) δεδομένων. Οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται είναι η Ασυνεχής Λήψη (Discontinued Reception, DRX) και η Ασυνεχής Μετάδοση (Discontinued Transmission, DTX).

## 1.4. Αρχιτεκτονική LTE δικτύων

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, σε αντίθεση με τα προηγούμενα κυψελωτά συστήματα που βασίζονταν σε μεταγωγή κυκλώματος, τα δίκτυα LTE σχεδιάστηκαν για παροχή υπηρεσιών με μεταγωγή πακέτων αποκλειστικά. Στόχος του είναι να παρέχει αέναη και αδιάκοπη IP συνδεσιμότητα μεταξύ εξοπλισμού χρήστη (User Equipment, UE) και του δικτύου πακέτων δεδομένων (Packet Data Network, PDN) ενώ ο χρήστης διατηρεί την κινητικότητά του.

Τα LTE αποτελούν μέρος ενός ευρύτερου 3GPP συστήματος που ονομάζεται Evolved Packet System (EPS). Το EPS καθορίζει τη δρομολόγηση της IP κίνησης από το PDN στο UE και περιλαμβάνει το λεγόμενο Evolved Packet Core (EPC), ένα κινητό δίκτυο κορμού (Core Network, CN) που βασίζεται αποκλειστικά στις IP, στην πλευρά του δικτύου κορμού και τα Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) - LTE στην πλευρά πρόσβασης. [5]



Εικόνα 2: Αρχιτεκτονική LTE Συστήματος

Στην Εικόνα 2, [11], φαίνεται η συνολική αρχιτεκτονική του EPS, με όλα τα στοιχεία του δικτύου και τις απαραίτητες διεπαφές.

Το EPC είναι ένα κινητό δίκτυο κορμού με βασικές ευθύνες τη διαχείριση κινητικότητας, πολιτικής και ασφάλειας. Είναι προφανές ότι αποτελείται από λογικούς κόμβους και μόνο: τη Mobile Management Entity (MME) και τις Serving (S -GW) και Packet Data Network Gateway (PDN-GW) θύρες. Αντίθετα, το δίκτυο πρόσβασης E-UTRAN, αποτελείται από ένα είδος κόμβου αποκλειστικά, τον *evolved NodeB* (eNodeB), ο οποίος και συνδέεται τελικά στο UE. Οι οντότητες αυτές επικοινωνούν μεταξύ τους με προκαθορισμένες διεπαφές που επιτρέπουν την εκτέλεση πολλαπλών λειτουργιών. Δύο διεπαφές έχουν οριστεί για να παρέχουν επικοινωνία μεταξύ διαφορετικών LTE οντοτήτων: οι X2 και S1. Τέλος, τόσο το E-UTRAN όσο και το EPC είναι υπεύθυνα για την παροχή ποιότητας υπηρεσίας στα δίκτυα LTE. [4], [11].

### 1.4.1. EPC, Core Network

---

Το EPC είναι ένα κινητό δίκτυο κορμού με βασικές ευθύνες τη διαχείριση κινητικότητας, πολιτικής και ασφάλειας και αποτελείται από τη Mobile Management Entity (MME) και τις Serving (S -GW) και Packet Data Network Gateway (PDN-GW) θύρες.

#### 1.4.1.1. Mobile Management Entity (MME)

---

Η MME είναι υπεύθυνη για όλες τις λειτουργίες επίπεδου ελέγχου (control plane, CP) που σχετίζονται με τη διαχείριση συνδρομητή και τις συνεδρίες του. Από αυτήν την οπτική και σύμφωνα με το [14], η MME υποστηρίζει τα εξής:

- Διαδικασίες ασφάλειας: σχετίζεται με την πιστοποίηση του τελικού χρήστη όπως και την εκκίνηση και διαπραγμάτευση των αλγορίθμων κρυπτογράφησης και προστασίας ακεραιότητας
- Διαχείριση των συνεδριών τερματικού-δικτύου: αφορά όλες τις διαδικασίες σηματοδότησης που χρησιμοποιούνται για τη ρύθμιση του περιεχομένου των πακέτων δεδομένων και διαπραγμάτευση σχετικών παραμέτρων, όπως QoS.
- Διαχείριση τοποθεσίας τερματικού σε κατάσταση αδράνειας: αναφέρεται στη διαδικασία ενημέρωσης της τοποθεσίας που βρίσκεται το τερματικό έτσι ώστε το δίκτυο να είναι ικανό να εκτελέσει άμεση σύνδεση του τερματικού σε περίπτωση συνεδρίας.

#### 1.4.1.2. Serving Gateway (S-GW)

---

Η S-GW αποτελεί το σημείο τερματισμού της διεπαφής πακέτων δεδομένων προς το E-UTRAN. Όταν τα τερματικά κινούνται μεταξύ των eNodeBs μέσα στο E-UTRAN, η S-GW λειτουργεί ως 'άγκυρα' της τοπικής κινητικότητας, που σημαίνει ότι τα πακέτα δρομολογούνται μέσω αυτού του σημείου τόσο στην περίπτωση διαπομπής μεταξύ eNodeBs, όσο και στην περίπτωση διαπομπής σε άλλη 3GPP τεχνολογία (GSM/UMTS). [14] Επίσης, διατηρεί όλες τις πληροφορίες σχετικά με τα

φέροντα όταν ο UE βρίσκεται σε κατάσταση αδράνειας αποθηκευοντάς αυτές προσωρινά ενώ η MME θα εκκινήσει τη διαδικασία αναζήτησης του UE για την επανεγκατάσταση της σύνδεσης. Επίσης, η S-GW είναι υπεύθυνη για διοικητικές λειτουργίες, όπως η συλλογή πληροφοριών (όγκου δεδομένων κίνησης) για λόγους απόδοσης χρέωσης και νόμιμη διακοπή. [3]

#### 1.4.1.3. Packet Data Network Gateway (PDN-GW)

---

Ομοίως με τη S-GW, η θύρα PDN-GW αποτελεί σημείο τερματισμού της διεπαφής πακέτων δεδομένων προς το δίκτυο πακετοδομημένων (Packet Data Network, PDN). Είναι υπεύθυνη για τη διανομή των IP διευθύνσεων στους UEs όπως και για την ενίσχυση της ποιότητας υπηρεσίας. Ως κομβικό σημείο για όλα τις συνεδρίες προς τα εξωτερικά δίκτυα πακετοδομημένων, η PDN-GW υποστηρίζει χαρακτηριστικά εφαρμογής ενισχυμένης πολιτικής, φιλτράρισμα πακέτων και υποστήριξη κλιμακούμενων χρεώσεων. [14]

#### 1.4.2. E-UTRAN

---

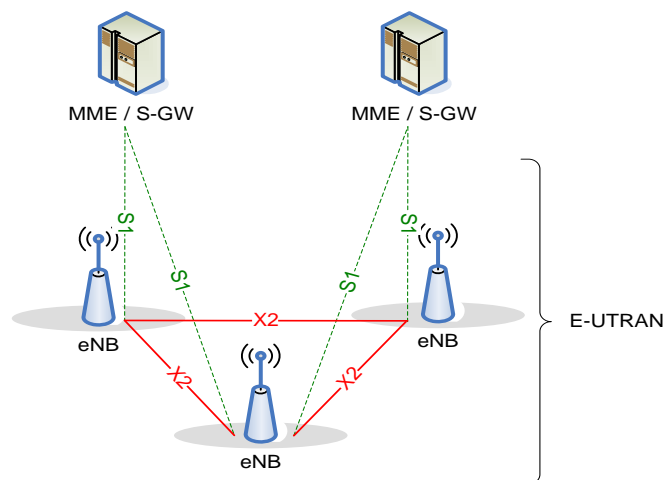
Το E-UTRAN είναι υπεύθυνο για τη διαχείριση της ασύρματης πρόσβασης. Αποτελείται αποκλειστικά από eNodeBs, που είναι βελτιωμένοι σταθμοί βάσης σύμφωνα με τα πρότυπα 3GPP standards, και παρέχει υποστήριξη επιπέδου χρήστη και επιπέδου ελέγχου καθώς και υποστήριξη στο UE. Λόγω του γεγονότος ότι δεν υπάρχει κάποιος κεντρικός 'ελεγκτής' στο δίκτυό του, το E-UTRAN χαρακτηρίζεται ως επίπεδο. Η επικοινωνία μεταξύ των eNodeBs εξασφαλίζεται μέσω της διεπαφής X2, ενώ η επικοινωνία με το EPC μέσω της διεπαφής S1. [11]

Η συνολική αρχιτεκτονική φαίνεται στην Εικόνα 3, [1].

##### 1.4.2.1. X2 Διεπαφή

---

Η X2 διεπαφή εξυπηρετεί για την επικοινωνία μεταξύ των eNodeBs. Εκτός από αυτή τη λειτουργία της, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να μεταφέρει πληροφορίες επιπέδου χρήστη και επιπέδου ελέγχου, όπως πληροφορίες διαπομπής, μετρήσεις φορτίου και προωθήσεις δεδομένων χρηστών. Βασικός στόχος είναι όλα αυτά να εκτελούνται με την ελάχιστη απώλεια πακέτων λόγω της κινητικότητας χρήστη. Καθώς το τερματικό μετακινείται μέσα στο δίκτυο πρόσβασης, μη απεσταλμένα πακέτα ή μη αναγνωρισμένα πακέτα που βρίσκονται αποθηκευμένα στον παλιό eNodeB, μπορούν να προωθηθούν στον νέο χάρη στη X2 διεπαφή. [11], [14].



Εικόνα 3 : Συνολική Αρχιτεκτονική E-UTRAN

#### 1.4.2.2. S1 διεπαφή

Η διεπαφή S1 χρησιμοποιείται για να συνδέσει τους eNodeBs με το EPC (είτε με το MME είτε με τη S-GW). Η διεπαφή μεταξύ eNodeB και S-GW ονομάζεται S1-U και χρησιμοποιείται για να μεταφέρει δεδομένα χρήστη. Η διεπαφή μεταξύ eNodeB και MME ονομάζεται S1-MME και χρησιμοποιείται για να μεταφέρει πληροφορίες επίπεδου ελέγχου, όπως υποστήριξη κινητικότητας, υπηρεσίες τοποθεσίας και διαχείριση δικτύου. [11]

#### 1.4.2.3. Σταθμός βάσης eNodeB

Ο evolved NodeB (eNodeB) είναι μοναδικός τύπος κόμβου διαθέσιμος στο E-UTRAN. Όπως αναφέρθηκε και πρωτύτερα πρόκειται για ένα βελτιωμένο σταθμό βάσης σύμφωνα με τα 3GPP πρότυπα. Είναι υπεύθυνος για πολλαπλές λειτουργίες που αφορούν την πλευρά του δικτύου και οι οποίες παλαιότερα εκτελούνταν είτε από κάποιο κεντρικό ελεγκτή είτε από το τερματικό.

Λειτουργικά, ο eNodeB ενεργεί ως συνδετική γέφυρα προς το EPC. Αυτό περιλαμβάνει τη σηματοδότηση προς τη MME και τη S-GW. Όταν ένας νέος UE ενεργοποιείται από κάποιον eNodeB και κάνει αίτηση σύνδεσης στο δίκτυο, ο eNodeB είναι υπεύθυνος για τη δρομολόγηση αυτού του αιτήματος στην MME, η οποία προηγουμένως εξυπηρετούσε το συγκεκριμένο UE. Σε περίπτωση που η δρομολόγηση προς την προηγούμενη MME δεν είναι διαθέσιμη ή λείπουν κάποιες πληροφορίες δρομολόγησης, επιλέγεται μια νέα MME. Επιπλέον, επεξεργάζεται την κρυπτογράφηση/αποκρυπτογράφηση και συμπίεση/αποσυμπίεση των IP επικεφαλίδων, πράγμα που σημαίνει την αποφυγή επανειλημμένης αποστολής των ίδιων ή διαδοχικών δεδομένων σε αυτές.

Ο eNodeB είναι επίσης υπεύθυνος για πολλές λειτουργίες του επίπεδου ελέγχου και συγκεκριμένα για το Radio Resource Management (RRM). Πρόκειται για αλγόριθμους απαραίτητους για την εξασφάλιση της αποτελεσματικής χρήσης των ασύρματων πόρων, για την πλήρη εκμετάλλευση των τεχνικών προσαρμογής και για την ορθή απόδοση στους χρήστες των απαιτούμενων χαρακτηριστικών ποιότητας υπηρεσίας. Αυτοί, σύμφωνα με το [17], διακρίνονται σε:

- **Semi-dynamic μηχανισμούς**, που εκτελούνται κυρίως στο στάδιο των ρυθμίσεων των νέων ροών δεδομένων ή κατά τη διάρκεια ασύγχρονων αναδιαρθρώσεων. Παραδείγματα τέτοιων μηχανισμών είναι η παραμετροποίηση της ποιότητας υπηρεσίας, η αποδοχή κλήσεων και ο ημι-μόνιμος χρονοπρογραμματισμός.
- **Highly dynamic μηχανισμούς**, που αφορούν νέες αποφάσεις που λαμβάνονται σε κάθε Transmission Time Interval (TTI) των 1ms (γρήγορη προσαρμογή ζεύξης), διαχείριση Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ), MIMO προσαρμογή.

#### 1.4.2.4. Εξοπλισμός χρήστη (User Equipment, UE)

---

Ο εξοπλισμός χρήστη (User Equipment, UE) είναι η συσκευή την οποία ο τελικός χρήστης χρησιμοποιεί για επικοινωνία. Ουσιαστικά δηλαδή, ο UE παρέχει τη διεπαφή για τον τελικό χρήστη, έτσι ώστε εφαρμογές, όπως το VoIP, να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πραγματοποίηση μιας φωνητικής κλήσης.

### 1.5. Αρχιτεκτονική Πρωτοκόλλων

---

Όσον αφορά στα πρωτόκολλα, αυτά χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: επίπεδο χρήστη (user plane, UP) και επίπεδο ελέγχου (control plane, CP) και σχετίζονται με μεταδόσεις δεδομένων του χρήστη και μεταδόσεις σήματος αντίστοιχα.

#### 1.5.1. Επίπεδο χρήστη

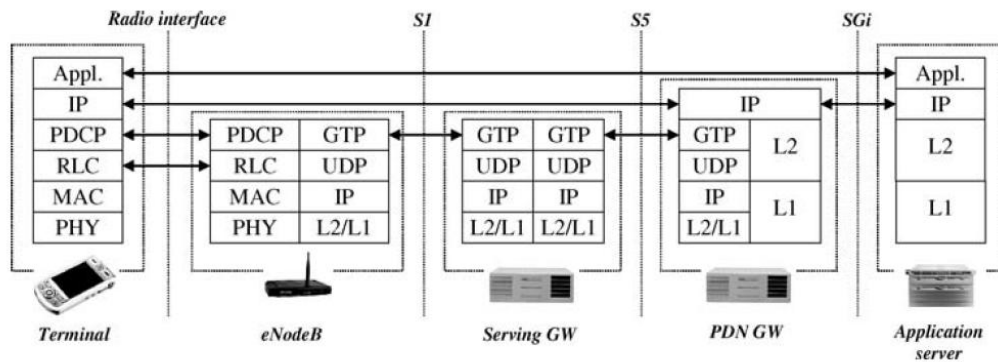
---

Από την οπτική γωνία του ασύρματου δικτύου, το *επίπεδο χρήστη* περιλαμβάνει όχι μόνο τα δεδομένα του χρήστη, όπως πακέτα φωνής ή περιεχόμενο ιστού, αλλά επίσης τη σηματοδότηση που σχετίζεται με τις υπηρεσίες εφαρμογών, όπως τις Session Initiation Protocol (SIP) και Real Time Control Protocol (RTCP). Η σηματοδότηση υψηλού επιπέδου, παρά το γεγονός ότι θεωρείται πληροφορία ελέγχου από τα επίπεδα εφαρμογών, μεταδίδεται μέσω του επιπέδου χρήστη.

Στην Εικόνα 4, [14], παρουσιάζεται η στοιβία πρωτοκόλλων επιπέδου χρήστη, από το τερματικό μέχρι τον εξυπηρετητή εφαρμογών. Το επίπεδο εφαρμογών, που είναι παρόν μόνο στο τερματικό και στον εξυπηρετητή εφαρμογών, βασίζεται σε IP μετάδοση δεδομένων και τα πακέτα δρομολογούνται μέσω των Packet Core Gateways

πριν φτάσουν στον προορισμό τους. Τα L1 και L2 αναφέρονται αντίστοιχα στις διεπαφές S1, S5 και SGi του φυσικού στρώματος και στρώματος ζεύξης δεδομένων του δικτύου.

Ο όρος *επίπεδο χρήστη* αναφέρεται σε ένα σύνολο πρωτοκόλλων που χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων μέσα στο δίκτυο. Συγκεκριμένα, αποτελείται από τα Packet Data Convergence Protocol (PDCP), Radio Link Control (RLC), Medium Access Control (MAC) τερματιζόμενα στον eNodeB από τη μεριά δικτύου. Περιλαμβάνει μηχανισμούς ARQ (RLC) και HARQ (MAC). Το PDCP διαχειρίζεται κάθε ροή δεδομένων, γνωστό και ως *κομιστής*, που προέρχεται από τη θύρα πρόσβασης. [17]

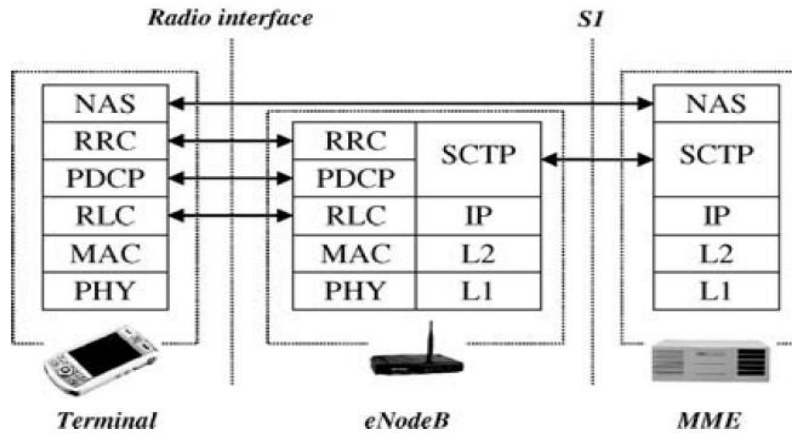


Εικόνα 4 : Στοιβά πρωτοκόλλων επιπέδου χρήστη

### 1.5.2. Επίπεδο ελέγχου

Το *επίπεδο ελέγχου* αντιστοιχεί στις ροές πληροφορίας που στην πραγματικότητα θεωρούνται ως σηματοδότηση από τα E-UTRAN και EPC. Για παράδειγμα, περιλαμβάνει όλες τις RRC (Radio Resource Control), E-UTRAN σηματοδοτήσεις (λειτουργίες υποστήριξης, όπως διαχείριση των ραδιοκομιστών, κινητικότητα και σελιδοποίηση) και τις NAS σηματοδοτήσεις, που αναφέρονται σε λειτουργίες και υπηρεσίες που είναι ανεξάρτητες από την τεχνολογία πρόσβασης. Το NAS περιλαμβάνει επίσης τα GPRS Mobility Management (GMM) και Session Management (SM) επίπεδα για λογαριασμό όλων των διαδικασιών σηματοδότησης μεταξύ του τερματικού και της MME για διαχείριση, έλεγχο ασφαλείας και ταυτοποίηση της συνόδου και του EPS φορέα.

Όπως φαίνεται και στην Εικόνα 5 : Στοιβά πρωτοκόλλων επιπέδου ελέγχου, [14], η στοιβά πρωτοκόλλων του επιπέδου ελέγχου σταματά στην MME, αφού εκεί τερματίζουν τα πρωτόκολλα ανώτατου επιπέδου. Στη ραδιο-επαφή, το επίπεδο ελέγχου χρησιμοποιεί την ίδια στοιβά πρωτοκόλλων (PDCP, RLC, MAC, PHY) για να μεταφέρει τόσο την Radio Resource Control (RRC) όσο και την Core Network NAS σηματοδότηση.



Εικόνα 5 : Στοιβα πρωτοκόλλων επιπέδου ελέγχου

Τα επίπεδα RLC, MAC, PHY υποστηρίζουν τις ίδιες λειτουργίες για τα επίπεδα χρήστη και ελέγχου. Ωστόσο, αυτό δε σημαίνει ότι οι πληροφορίες τους μεταδίδονται με τον ίδιο τρόπο. Πολλοί κομιστές μπορεί να εγκατασταθούν μεταξύ τερματικού και δικτύου, με τον καθένα από αυτούς να ανταποκρίνεται σε συγκεκριμένο σχήμα μετάδοσης, προστασία και χειρισμό προτεραιότητας. Ο στόχος αυτός επιτυγχάνεται μέσω των καναλιών.

Και τα δύο επίπεδα χρησιμοποιούν το φυσικό στρώμα, το οποίο βασίζεται στην OFDMA με την έννοια ενός κοινού καναλιού για ενιαία μετάδοση δεδομένων. Κάθε Transmission Time Interval (TTI) αποτελείται από OFDM σύμβολα, μερικά εκ των οποίων περιέχουν πληροφορίες για τη μετάδοση για το σχετικό κανάλι ελέγχου κάτω ζεύξης (PDCCH : περιέχει πληροφορίες για τη κατανομή συχνότητας στον τομέα του χρήστη, το χρησιμοποιούμενο σχήμα διαμόρφωσης και κωδικοποίησης, κλπ. και PCFICH : φέρει πληροφορίες για τη διάρκεια χρόνου του control channel space), ενώ τα υπόλοιπα χρησιμοποιούνται για τη μετάδοση δεδομένων χρήστη και για κοινά/αφιερωμένα σήματα αναφοράς- ορίζουν το μέγεθος πλοκάδας μεταφοράς. Οι πόροι του τομέα συχνότητας χωρίζονται σε ίσου μεγέθους πλοκάδες φυσικών πόρων (PRBs) των 12 φερόντων, εύρους 180MHz με υποφέροντα των 15kHz. Επιπλέον, συμπεριλαμβάνονται ένα πλήθος συμβόλων αναφοράς, γνωστά ως σήματα πιλότοι, κατανεμημένα σε ένα υποσύνολο συμβόλων υπο-φερόντων τα οποία αναλαμβάνουν να διευκολύνουν το τερματικό στην απόφασή του ως προς την επιλογή του πιο αξιόπιστου καναλιού που θα χρησιμοποιήσει. Τα LTE υποστηρίζουν επίσης σχήμα κατανεμημένης μετάδοσης όπου πολλά PRBs ανατίθενται στον ίδιο χρήστη ή ένα PRB μπορεί να χρησιμοποιείται από πολλούς χρήστες με τον καθένα να πετυχαίνει μεγαλύτερο διαφορισμό συχνότητας στο ίδιο μέγεθος πακέτου με την περίπτωση του Frequency Domain Packet Scheduling (FDPS). [17]



## 1.6. Ποιότητα υπηρεσίας στα LTE

---

Με τον όρο ποιότητα υπηρεσίας (Quality of Service, QoS) περιγράφεται η συνολική εμπειρία που ο χρήστης ή η εφαρμογή θα παραλάβει από το δίκτυο.

Η εξέλιξη των ασύρματων επικοινωνιών, που έχει οδηγήσει σε ραγδαία αύξηση του αριθμού των συνδρομητών κινητών ευρυζωνικών επικοινωνιών και του όγκου κίνησης ανά συνδρομητή, έχει καταστήσει την ποιότητα υπηρεσίας σε παράμετρο υψηλής σημασίας. Για την ικανοποίηση των νέων απαιτήσεων κίνησης και την υποστήριξη των συνεχώς εξελισσόμενων εφαρμογών του διαδικτύου, τα δίκτυα τέταρτης γενιάς (4G), όπως τα IEEE 802.16e, IEEE 802.16m αλλά και τα 3GPP LTE έχουν υιοθετήσει διάφορα σχήματα πλαίσιων παροχής ποιότητας υπηρεσίας και άλλα παρόμοια μέσα.

### 1.6.1. Κομιστής

---

Η δομική μονάδα για την QoS στα ασύρματα δίκτυα LTE ονομάζεται *κομιστής (bearer)*. Πρόκειται για τη ροή πακέτων μεταξύ της θύρας PDN (PDN-GW) και του τερματικού χρήστη (UE or MS). Η κίνηση μεταξύ συγκεκριμένης εφαρμογής χρήστη και μιας υπηρεσίας μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε διαφορετικές ροές δεδομένων, καθεμία από τις οποίες ονομάζεται *ροή δεδομένων υπηρεσιών (Service Data Flows, SDFs)*. Τα SDFs που οδηγούνται στον ίδιο κομιστή λαμβάνουν ίδια ποιότητα υπηρεσίας, όπως πολιτική χρονοπρογραμματισμού, πολιτική για τη διαχείριση ουρών, πολιτική για τη διαμόρφωση του ρυθμού και διαμόρφωση του ελέγχου της ασύρματης σύνδεσης. [2]

### 1.6.2. QoS Class Identifier (QCI)

---

Κάθε κομιστής χαρακτηρίζεται από μια ξεχωριστή βαθμωτή παράμετρο που ονομάζεται *αναγνωριστικό κλάσης ποιότητας υπηρεσίας (QoS class identifier, QCI)* και η οποία προσδιορίζει την κλάση στην οποία ανήκει ο κομιστής. Το QCI αναφέρεται σε ένα σύνολο μεθόδων προώθησης πακέτων, όπως βάρη προγραμματισμού, κατώφλια αποδοχής κλήσης, κατώφλια για τη διαχείριση ουρών.

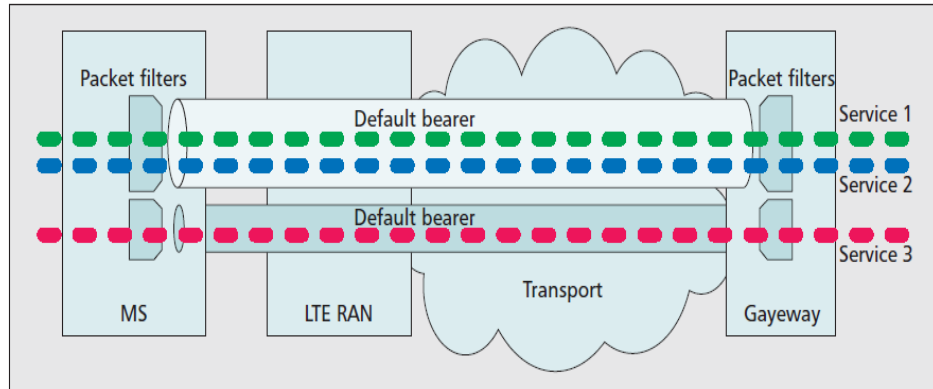
Η εφαρμογή κλάσεων βοηθά στην βαθμονόμηση του πλαισίου παροχής ποιότητας υπηρεσίας στα LTE. Στην Εικόνα 6: Προκαθορισμένοι και αφιερωμένοι κομιστές ενός τερματικού στα πλαίσια παροχής ποιότητας υπηρεσίας σε LTE, [2], φαίνονται μια κατανομή κομιστών LTE.

Τα LTE έχουν δύο ειδών κομιστών:

- **Guaranteed bit rate (GBR)**: Οι πόροι ενός αφιερωμένου δικτύου που σχετίζονται με την παράμετρο GBR του κομιστή κατανέμονται μόνιμα όταν ο κομιστής εγκαθίσταται ή διαμορφώνεται.



- **Non-guaranteed bit rate (non-GBR):** Οι κομιστές αυτού του είδους δεν εγγυώνται κάποιο ελάχιστο ρυθμό μετάδοσης, όπως οι κομιστές GBR και δεν αφιερώνονται μόνιμα πόροι για αυτά. Μια υπηρεσία που χρησιμοποιεί ένα non-GBR κομιστής είναι



**Εικόνα 6: Προκαθορισμένοι και αφιερωμένοι κομιστές ενός τερματικού στα πλαίσια παροχής ποιότητας υπηρεσίας σε LTE**

πιθανόν να αντιμετωπίσει απώλειες πακέτων σχετιζόμενες με συμφόρηση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι η χρήση υπηρεσιών ιστού.

Ένας non-GBR κομιστής αναφέρεται ως *προκαθορισμένος*, και χρησιμοποιείται επίσης για την εγκατάσταση σύνδεσης IP. Ο προκαθορισμένος κομιστής παραμένει εγκατεστημένος σε όλη τη διάρκεια της σύνδεσης με το PDN έτσι ώστε να προσφέρει αδιάκοπη συνδεσιμότητα προς αυτό.

Κάθε κομιστής άλλου είδους αναφέρεται ως *αφιερωμένος κομιστής* και μπορεί να είναι GBR ή non-GBR. Αυτά μπορούν να εγκατασταθούν σε οποιαδήποτε στιγμή κατά τη διάρκεια ή μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας σύνδεσης. Στα LTE, η αντιστοίχιση των SDFs σε έναν αφιερωμένο κομιστή κατηγοριοποιείται με βάση ένα 5-πλειαδικό IP φίλτρο πακέτων το οποίο είτε προβλέπεται στο PCRF, είτε ορίζεται από την εφαρμογή σηματοδότησης στρώματος. Ωστόσο, ο προκαθορισμένος κομιστής ουσιαστικά χρησιμοποιεί ένα φίλτρο κατάλληλο για όλες τις περιπτώσεις. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κάθε SDF που δεν ταιριάζει σε κανένα από τα ήδη υπάρχοντα φίλτρα πακέτων των αφιερωμένων κομιστών, κατευθύνεται προς τον προκαθορισμένο κομιστή. Έτσι, στην περίπτωση που ένας αφιερωμένος κομιστής εγκαταλείπεται, η κίνηση που αντιστοιχούσε σε αυτό δρομολογείται εκ νέου στον προκαθορισμένο.

Τα δίκτυα LTE ορίζουν ένα σύνολο προκαθορισμένων QCI μεταβλητών με συγκεκριμένα χαρακτηριστικά: την προτεραιότητα, το περιθώριο καθυστέρησης πακέτων και τον αποδεκτό ρυθμό απώλειας πακέτων. Η αντιστοίχιση των προκαθορισμένων QCI μεταβλητών στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά φαίνονται στον Πίνακα 3, [2].

Ανάλογα με τον τύπο QCI που χαρακτηρίζει τον κομιστή, αυτό χαιρεί διαφορετικής μεταχείρισης από τον eNodeB. Έτσι, εξασφαλίζεται ότι τα LTE δίκτυα θα διαχειρίζονται την κίνηση σε όλο το δίκτυο ανεξάρτητα από τον κατασκευαστικό τύπο του eNodeB. [2]

QCI	Τύπος πόρου	Προτεραιότητα	Καθυστέρηση	Ρυθμός απώλειας πακέτων	Παραδείγματα υπηρεσιών
1	GBR	2	100 ms	$10^{-2}$	Ήχος συνομιλίας
2		4	150 ms	$10^{-3}$	Βίντεο συνομιλίας (live streaming)
3		3	50 ms	$10^{-3}$	Παιχνίδι σε πραγματικό χρόνο
4		5	300 ms	$10^{-6}$	Βίντεο χωρίς συνομιλία (buffered streaming)
5	Non-GBR	1	100 ms	$10^{-6}$	Σηματοδότηση IMS
6		6	300 ms	$10^{-6}$	Βίντεο (buffered streaming)
					Λειτουργίες με βάση το TCP (π.χ. www, email, chat, ftp, p2p κοινόχρηστα έγγραφα, προοδευτικό βίντεο)
7		7	100 ms	$10^{-3}$	Ήχος Βίντεο (live streaming) Παιχνίδια αλληλεπίδρασης
8		8	300 ms	$10^{-6}$	Βίντεο (buffered streaming)
9	9	Λειτουργίες με βάση το TCP (π.χ. www, email, chat, ftp, p2p κοινόχρηστα έγγραφα, προοδευτικό βίντεο)			

**Πίνακας 3: Προκαθορισμένα για τα LTE χαρακτηριστικά QCI**

### 1.6.3. Άλλες παράμετροι ποιότητας υπηρεσίας

Σε γενικά πλαίσια, χαρακτηριστικά QoS που σχετίζονται με τον κομιστή LTE είναι:

- **Κατανομή και διατήρηση προτεραιότητας (Allocation and retention priority, ARP):** Πρόκειται για μια παράμετρο που χρησιμοποιείται από τον έλεγχο αποδοχής κλήσεων και από τον έλεγχο συμφόρησης για τη διαχείριση ενός κομιστή από το επίπεδο ελέγχου. Η αποδοχή κλήσης χρησιμοποιεί το ARP για να αποφασίσει σχετικά με την αποδοχή ή απόρριψη μια αίτησης εγκατάστασης ή διαμόρφωσης ενός κομιστή. Ο έλεγχος υπερβολικού φορτίου χρησιμοποιεί ARP για να αποφανθεί ποιον κομιστή θα αποδεσμεύσει σε περίπτωση συμφόρησης.

- **Maximum bit rate (MBR):** Πρόκειται για τη μέγιστη κίνηση που μπορεί να μεταφέρει ο κομιστής και την οποία δεν μπορεί να υπερβεί. Αφορά αποκλειστικά τους κομιστές GBR.
- **GBR:** Εκφράζει τον ελάχιστο ρυθμό κίνησης που μπορεί να εγγυηθεί το δίκτυο. Αφορά επίσης αποκλειστικά κομιστές GBR.
- **Aggregate MBR (AMBR):** Πρόκειται για το συνολικό ρυθμό bit μια ομάδας non-GBR κομιστών.

Σημειώνεται ότι στη 3GPP Release 8 ο MBR θα πρέπει να είναι ίσος με τον GBR. Ωστόσο, για τις μελλοντικές 3GPP εκδόσεις, ένας MBR μπορεί να είναι μεγαλύτερος από έναν GBR. [2]

## 1.7. LTE-Advanced

Με στόχο το σχηματισμό νέων προτύπων επικοινωνίας 4G, η ITU όρισε την IMT-Advanced πρωτοβουλία. Το WiMAX και τα LTE ικανοποιούν τις περισσότερες από τις απαιτήσεις της IMT-Advanced και συνεπώς θεωρούνται ως τεχνολογίες 3.9G. Ωστόσο, οι εταιρίες τηλεπικοινωνιών αρέσκονται στη χρήση του όρου 4G κατά την προώθηση των WiMAX και των LTE.

Η τεχνολογία τηλεπικοινωνιακού δικτύου που αναπτύσσεται υπό την αιγίδα της 3GPP για να ανταποκριθεί στις απαιτήσεις της IMT-Advanced είναι επίσημα γνωστό ως 3GPP Release 10, αλλά αναφέρεται και ως LTE-Advanced (LTE-A). Τα LTE-A θα πρέπει να υποστηρίζουν οπισθόφορη συμβατότητα ώστε να ενσωματώσουν πλήρως την τεχνολογία των LTE, την επίδοση των οποίων επιπλέον θα πρέπει να υπερβούν. Επιπλέον, θα πρέπει να είναι σε θέση να λειτουργούν σε μεγαλύτερο εύρος ζώνης το οποίο να μπορούν να το χρησιμοποιούν βαθμωτά και σε συχνότητες μεγαλύτερες των 20 MHz, δυνητικά μέχρι τα 100 MHz. Μια από τις μεγαλύτερες προσδοκίες για τα LTE-A είναι να προσφέρουν μεγαλύτερους ρυθμούς μετάδοσης δεδομένων, φτάνοντας μέχρι και το 1Gbps στην κάτω ζεύξη. Προς αυτήν την κατεύθυνση μελετώνται οι εξής προοπτικές:

- Εφαρμογή βελτιωμένων MIMO τεχνικών
- Εφαρμογή τεχνικής Co-Ordinated Multipoint Transmission and Reception (CoMP): η βασική ιδέα αυτής της τεχνικής είναι ο συντονισμός των εκπομπών από διαφορετικές κυψέλες επιτυγχάνοντας έτσι μεγαλύτερη χωρητικότητα συστήματος και μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων στα άκρα της κυψέλης.
- Αύξηση πυκνότητας υποδομής: η μείωση της απόστασης μεταξύ πομπού – δέκτη θα οδηγήσει σε μεγαλύτερους ρυθμούς δεδομένων που αποτελεί σημαντικό απαιτούμενο για τα LTE-A.

Τέλος, το υβριδικό σχήμα μετάδοσης OFDMA και SC-FDMA θα συνεχιστεί να χρησιμοποιείται από τα LTE-A εκμεταλλευόμενο πλήρως τα πλεονεκτήματα αυτών. [9]

Στον Πίνακα 4: Επισκόπηση απαιτήσεων LTE-Advanced, [9], εμφανίζονται τα χαρακτηριστικά των LTE-A όπως αυτά περιγράφονται στη Release 10.

LTE-Advanced (3GPP Release 10)	
Γενεά	4G
Πρώτη έκδοση	2011
Φυσικό επίπεδο	Κάτω ζεύξη: OFDMA Άνω ζεύξη: SCFDMA
Αμφίδρομη φύση	Αμφίδρομη διαίρεση χρόνου και συχνότητας (TDD & FDD)
Κινητικότητα χρήστη	έως και 350 kmph
Κάλυψη	έως και 100 km
Εύρος ζώνης καναλιού	έως και 100 MHz
Μέγιστοι ρυθμοί δεδομένων	Κάτω ζεύξη: 1Gbps Άνω ζεύξη: 300 Mbps
Αποδοτικότητα φάσματος	Κάτω ζεύξη: 30 bps/Hz Άνω ζεύξη: 15 bps/Hz
Καθυστέρηση	Επίπεδο ζεύξης: < 5 ms Μεταπομπή: < 50 ms
VoIP χωρητικότητα	> 80 χρήστες ανά τομέα / MHz (FDD)
Άλλα προσόντα	Αρχιτεκτονική βασισμένη εξ' ολοκλήρου στη μετάδοση IP πακέτων Συμβατότητα με 3G δίκτυα Υποστήριξη ποιότητας υπηρεσίας

**Πίνακας 4: Επισκόπηση απαιτήσεων LTE-Advanced**



## 2. State of the art

### 2.1. Εισαγωγή

---

Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει προσεγγίσεις που έχουν γίνει στο παρελθόν για τον τρόπο με τον οποίο μπορεί να γίνει αποτελεσματική πρόβλεψη της κίνησης και των απότομων αλλαγών της, με τη χρήση καταγεγραμμένης μέτρησης της κίνησης, ώστε τελικά να προκύψει αυτή η βέλτιστη διαχείρισή των πόρων του δικτύου.

### 2.2. Πρόβλεψης κίνησης δικτύου με βάση ιστορικά δεδομένα

---

Η πρόβλεψη της κίνησης δικτύου συντελεί στην αποτελεσματική διαχείρισή του, αφού μπορούν να αποφεύγονται συμφορήσεις στο δίκτυο, να οργανώνεται η χωρητικότητά του, να ρυθμίζονται καλύτερα οι κανόνες των συμφωνητικών επιπέδου υπηρεσίας των παρόχων των τηλεπικοινωνιακών δικτύων, κ.ά.

Αρκετές προσεγγίσεις έχουν γίνει μέχρι στιγμής σε αυτό το πεδίο έρευνας. Συνήθως, αυτές απαιτούσαν την ύπαρξη ενός πίνακα ελέγχου κίνησης που αντιστοιχίζει τη ροή της κίνησης μεταξύ της πηγής της και του προορισμού της. Ωστόσο, για να εφαρμοστεί κάτι τέτοιο σε ένα δίκτυο που βασίζεται στη μετάδοση πακέτων απαιτείται ακριβής μοντελοποίηση της εισερχόμενης κίνησης αλλά και ακριβείς προβλέψεις για τη μελλοντική συμπεριφορά του δικτύου. Κάτι τέτοιο δεν είναι εύκολα εφαρμόσιμο σε ένα IP δίκτυο κορμού, δεδομένου ότι για την ενημέρωση του πίνακα απαιτείται χρήση στατιστικών μεθόδων τέτοιας ακρίβειας, που δεν έχει επιτευχθεί ακόμα, αλλά και εκτενείς προσομοιώσεις που είναι πρακτικά αδύνατες.

Με βάση τα παραπάνω, η καλύτερη επιλογή που θα μπορούσε κάποιος να κάνει για να περιγράψει το δίκτυο είναι να βασιστεί σε ιστορικά στοιχεία που αφορούν το δίκτυο και την περιοχή κάλυψής του. Η εμπειρία πάνω στην κατάσταση του δικτύου είναι εκείνη που θα δώσει μια πιο ακριβή εκτίμηση για το ποσοστό της κίνησης, ή τουλάχιστον για την τάση της, που προβλέπεται τελικά για τα διάφορα σημεία του δικτύου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. [16]

Ιστορικά δεδομένα που αφορούν την κίνηση του δικτύου συνήθως συλλέγονται με το Simple Network Management Protocol (SNMP). Πρόκειται για ένα πρωτόκολλο που ποσοτικοποιεί την κίνηση που διέρχεται μέσα από κάθε διεπαφή του δικτύου με λογική ακρίβεια. Τα δεδομένα δεν μπορούν να χαρακτηρίζονται από απόλυτη ακρίβεια, καθώς κάποια μηνύματα είναι πιθανόν να χαθούν ή ο δρομολογητής να μην απαντήσει εγκαίρως (κάτι που είναι σπάνιο, αλλά όχι και αδύνατο). Χρησιμοποιείται ευρέως από κάθε δίκτυο κι επομένως η συλλογή των δεδομένων, όταν αυτή χρειαστεί, δεν εισάγει καμία επιπλέον κίνηση στο δίκτυο.

Η τάση στις απαιτήσεις πόρων για το δίκτυο μπορεί να μεταβάλλεται για σύντομες ή εκτενέστερες χρονικές περιόδους. Πρόκειται για ένα δυναμικό περιβάλλον το οποίο είναι ιδιαίτερα απαιτητικό για τις τεχνικές πρόβλεψης, ειδικά όταν αυτές βασίζονται σε δεδομένα εισόδου στατικής μορφής. Έτσι, με χρήση ιστορικών στοιχείων, η πρόβλεψη κίνησης, όπως φαίνεται στο [8], μπορεί να είναι:

- πραγματικού χρόνου: τα δείγματα αφορούν χρονική περίοδο από χιλιοστά του δευτερολέπτου έως λεπτά που είναι σχετικά με τη δυναμική διανομή πόρων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση των μηχανισμών ποιότητας υπηρεσίας όπως και για τον έλεγχο της συμφόρησης και των πόρων, μέσω της προσαρμογής των παραμέτρων του δικτύου στα χαρακτηριστικά της κίνησης.
- βραχυπρόθεσμη: τα δείγματα αφορούν χρονική περίοδο διάρκειας από μια έως αρκετές ώρες και είναι κρίσιμα για το βέλτιστο έλεγχο και για τον εντοπισμό ανώμαλων καταστάσεων.
- μεσοπρόθεσμη: τα δείγματα αφορούν χρονική περίοδο μιας έως αρκετών ημερών και χρησιμοποιούνται για το σχεδιασμό εκχώρησης των πόρων.
- μακροπρόθεσμη: τα δείγματα αφορούν μεγάλες χρονικές περιόδους, όπως αρκετούς μήνες ή και χρόνια. Τέτοιου είδους πληροφορία παρέχει μια λεπτομερή πρόβλεψη του φόρτου εργασίας και της συμπεριφοράς κίνησης και συνεπώς είναι χρήσιμη για τη λήψη στρατηγικών αποφάσεων, όπως είναι οι επενδύσεις.

### 2.3. Πρόβλεψη σε ένα δυναμικό περιβάλλον

Η ακρίβεια με την οποία γίνεται η πρόβλεψη σε ένα δυναμικό περιβάλλον, δεδομένου ότι η πρόβλεψη βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα του δικτύου, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Οι πιο βασικοί είναι ότι:

- Η είσοδος από μόνη της μπορεί να είναι ιδιαίτερα θορυβώδης, γεγονός που θα δυσκολέψει τη μοντελοποίηση του σήματος στη μέθοδο πρόβλεψης
- Νέες συμπεριφορές ή αλλαγές στην εμφανιζόμενη κίνηση μπορούν να εισάγουν λάθος. Ούτως ή άλλως, κάθε πρόβλεψη βασίζεται σε μοντέλα που έχουν ως βάση ανάπτυξης ιστορικά δεδομένα. Αν νέες συμπεριφορές ήταν να προκύψουν, τότε αυτές είναι πιθανό να μη γίνουν αντιληπτές από το μοντέλο και αυτό θα οδηγήσει σε εισαγωγή λάθους στην πρόβλεψη.

Αν κάποιος από τους παραπάνω παράγοντες εμφανίζεται με κάποια συχνότητα, τότε αυτοί θα αντικατοπτριστούν στο μοντέλο πρόβλεψης και δε θα πρέπει να προκαλούν σφάλματα στην πρόβλεψη. Ωστόσο, δεδομένης της μεγάλης μεταβλητότητας της κίνησης του δικτύου σε σχέση με το χώρο αλλά και το χρόνο, πολλοί από αυτούς τους παράγοντες δε θα γίνουν τελικά αντιληπτοί από το μοντέλο και θα εισάγουν σφάλματα. Έτσι, η ακρίβεια των προβλέψεων εξαρτάται άμεσα από το αν οι καταγεγραμμένες τάσεις μπορούν να παρατηρηθούν και στο μέλλον.

Για να εξασφαλιστεί ότι τα μοντέλα πρόβλεψης θα είναι ακριβή στα αποτελέσματά τους, θα πρέπει να διαθέτουν τα απαραίτητα εργαλεία ώστε να αναγνωρίζουν, όταν αυτό είναι

δυνατό, εκείνες τις προβλέψεις που συνοδεύονται από μεγάλα σφάλματα εκτίμησης. Έτσι, προκύπτει η ανάγκη για ένα *προσαρμοστικό μοντέλο πρόβλεψης*, το οποίο έχει την ιδιότητα όσο περισσότερα δεδομένα να παρατηρεί τόσο αυτό να αυτό-προσαρμόζεται στις προβλέψεις του, ενσωματώνοντας έτσι τις προκύπτουσες μεταβολές. Η σταδιακή προσαρμογή των δεδομένων της μεθόδου στις πραγματικές τιμές κίνησης που προκύπτει αφήνει μικρά περιθώρια απόκλισης των προβλέψεων από τα πραγματικά δεδομένα. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα των προσαρμοστικών μοντέλων κι επιπλέον τα καθιστά επιτυχημένα στη χρήση τους για την πρόβλεψη σε συστήματα μη γραμμικής φύσης. [16]

## 2.4. Μοντέλα πρόβλεψης τηλεπικοινωνιακής κίνησης

Μέχρι στιγμής, έχουν κατασκευαστεί μοντέλα πρόβλεψης της κίνησης, τα περισσότερα εκ των οποίων χρησιμοποιούν χρονικές σειρές δεδομένων και βασίζονται στην εκπαίδευση. Στόχος των χρονικών σειρών είναι η μοντελοποίηση ενός συστήματος ως ένα μαύρο κουτί, που προβλέπει τη συμπεριφορά του συστήματος με βάση ιστορικά δεδομένα και όχι με βάση τον τρόπο λειτουργίας του. Η εκπαίδευση επιτρέπει στο μοντέλο να αποκτά εμπειρία πάνω σε πραγματικές παρατηρήσεις του συστήματος η οποία χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη μελλοντικών τιμών. Τέτοια μοντέλα είναι τα autoregressive moving average (ARMA) και η εξέλιξη του τελευταίου, autoregressive integrated moving average (ARIMA) που ανήκουν στην κατηγορία των auto regressive (AR) μοντέλων. Τα δύο αυτά μοντέλα εφαρμόζονται εκτενώς στην πρόβλεψη κίνησης. Ανάλογο μοντέλο αποτελούν τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks) ενώ άλλοι τύποι μεθόδων είναι η Naïve Benchmark και η Holt-Winters.

### 2.4.1. Naïve Benchmark μέθοδος

Αποτελεί την απλούστερη μέθοδο πρόβλεψης, που χρησιμοποιεί προηγούμενες προβλέψεις για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων της. Ωστόσο η απόδοσή της είναι πολύ αδύναμη στην περίπτωση που πρέπει να γίνει διαχείριση εποχιακών δεδομένων. Προκειμένου να ξεπεραστεί η αδυναμία της, μια εναλλακτική είναι η πρόβλεψη να δίνεται με βάση μια καταγεγραμμένη τιμή παρατήρησης για την ίδια χρονική περίοδο, σε κάποιον προηγούμενο εποχιακό κύκλο. Σε αυτήν την περίπτωση, μπορεί να γίνει εισαγωγή μια σταθεράς που θα καθορίζει ποιος θα είναι αυτός ο εποχιακός κύκλος. Για παράδειγμα, αν  $y_1, y_2, \dots, y_p$  είναι μια χρονοσειρά,  $y_{t,p}$  είναι η προβλέψιμη τιμή για την περίοδο  $t$  και υπολογισμένη στην περίοδο  $p$  και  $h$  είναι η lead χρονική περίοδος τότε στην πρόβλεψη:

$$y_{t+h,t} = y_{t+h} - K$$

η σταθερά  $K$  είναι που ορίζει τον εποχιακό κύκλο.

Η μέθοδος αυτή, χάρη στην απλότητά της, μπορεί να υιοθετηθεί εύκολα από τους παρόχους δικτύων. [8]



### 2.4.2. Holt-Winters μέθοδος

Η μέθοδος Holt-Winters αποτελεί μέθοδο πρόβλεψης της κίνησης με τη χρήση χρονικών σειρών και ανήκει στην οικογένεια των μεθόδων εκθετικής εξομάλυνσης. Η μέθοδος αυτή σχεδιάστηκε για σειρές με παράγοντες που παρουσιάζουν κάποια τάση. Δηλαδή χαρακτηρίζονται από κάποιες ακολουθίες που ξεχωρίζουν από τον τυχαίο θόρυβο όταν υπολογίζεται ο μέσος όρος των ιστορικών στοιχείων. Πρόκειται για έναν αλγόριθμο που είναι ιδιαίτερα δημοφιλής και αυτό αποδίδεται στην απλή χρήση του, στις περιορισμένες υπολογιστικές απαιτήσεις και την ακρίβεια στις προβλέψεις του, ειδικά όταν πρόκειται για εποχιακές χρονικές σειρές. Το γενικό μοντέλο, όπως αυτό ορίζεται στο [8], χαρακτηρίζεται από τις εξισώσεις:

- Εκτίμηση επιπέδου:  $S_t = \alpha \frac{y_t}{D_{t-K_1}} + (1 - \alpha)(S_{t-1} + T_{t-1})$
- Εκτίμηση τάσης:  $T_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1}$
- Εκτίμηση εποχικότητας:  $D_t = \gamma \frac{y_t}{S_t} + (1 - \gamma)D_{t-K_1}$

$$\text{με πρόβλεψη } y_{t+h,t} = (S_t + h T_t) \times D_{t-K_1+h} W_{t-K_2+h}$$

όπου  $y_1, y_2, \dots, y_p$  είναι μια χρονοσειρά,  $y_{t,p}$  η προβλέψιμη τιμή για την περίοδο  $t$  και υπολογισμένη στην περίοδο  $p$ ,  $h$  η lead χρονική περίοδος,  $K_i$  η εποχική περίοδος και  $\alpha, \beta, \gamma$  παράμετροι της μεθόδου.

### 2.4.3. Autoregressive Moving Average (ARMA)

Η μέθοδος ARMA ανήκει στην οικογένεια των auto regressive (AR) μοντέλων, που σημαίνει ότι αναπαριστά μια τυχαία διαδικασία της οποίας η έξοδος είναι γραμμικός συνδυασμός παρελθοντικών τιμών (AR components) και/ή λαθών (MA components). Έτσι προκύπτει και το όνομα ARMA. Αποτελεί μοντέλο το οποίο βασίζεται σε χρονικές σειρές και έχει ως υπόθεση ότι τα δεδομένα είναι στατικά. Αν η χρονοσειρά παρουσιάζει διακυμάνσεις που παραβιάζουν την υπόθεση της στατικότητας, τότε υπάρχουν συγκεκριμένες προσεγγίσεις που θα μπορούσαν να καταστήσουν τις χρονοσειρές στατικές. Η συνηθέστερη προσέγγιση είναι η επονομαζόμενη ως «λειτουργία διαφοροποίησης», που όπως παρουσιάζεται στο [16], χρησιμοποιεί τη διαφορική σχέση:

$$\nabla y_p = y_p - y_{p-1} = (1 - B)y_p$$

όπου  $y_1, y_2, \dots, y_p$  είναι μια χρονοσειρά και  $B$ : ο παράγοντας οπισθόφορης μετατόπισης.

### 2.4.4. Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA)

Το μοντέλο ARIMA αποτελεί εξέλιξη του ARMA, με το χαρακτηριστικό ότι κάνει χρήση διαφορίσης για να σταθεροποιήσει τις επιδόσεις του σε σχέση με τα προϋπάρχοντα μοντέλα. Βασικό της πλεονέκτημα είναι ότι, παρά την πολυπλοκότητά

της όσον αφορά τη χρήση της και την υπολογιστική προσπάθεια, είναι αρκετά ακριβής για ένα ευρύ τομέα σειρών όταν συγκρίνεται με τη Holt-Winters, όπως για παράδειγμα φαίνεται στο [8]. Επιπλέον, οι προβλέψεις της αντικατοπτρίζουν καλύτερα τις απροσδόκητες ασυνέχειες του δικτύου. Εφαρμογές των μοντέλων ARIMA έχουν αποδείξει ότι μπορούν να αναπτύξουν ένα σχήμα πρόβλεψης που να βασίζεται στην αναμενόμενη συμπεριφορά του συστήματος. Ωστόσο, το μοντέλο αυτό είναι περισσότερο αποτελεσματικό στη βραχυπρόθεσμη κίνηση δικτύου με την ακρίβεια πρόβλεψης να έχει περιθώρια βελτίωσης.

Η εξίσωση που περιγράφει ένα μοντέλο  $ARIMA(p, d, q)$  είναι:

$$\varphi_p(L)(1-L)^d y_t = \theta_q(L)e_t$$

όπου  $y_t$  : η χρονοσειρά,  $e_t$  : το σφάλμα,  $L$  : ο παράγοντας καθυστέρησης (lag or backshift operator),  $\varphi_p = 1 - \varphi_1 L - \varphi_2 L^2 - \dots - \varphi_p L^p$  είναι το AR πολυώνυμο τάξης  $p$ ,  $d$ : είναι η τάξη διαφορίσης και  $\theta_q = 1 - \theta_1 L - \theta_2 L^2 - \dots - \theta_q L^q$  είναι το MA πολυώνυμο τάξης  $q$ .

Στην περίπτωση που οι σειρές έχουν μη μηδενικό μέσο στο χρόνο, το μοντέλο μπορεί επίσης να υιοθετήσει έναν σταθερό όρο  $\mu$  στο δεύτερο μέλος της εξίσωσης. [16]

#### 2.4.5. Autoregressive Fractionally Integrated Moving Average (ARFIMA)

Άλλη μια μέθοδος που ανήκει στην οικογένεια των auto regressive μοντέλων είναι το μοντέλο ARFIMA. Αποτελεί εξέλιξη του ARIMA και στις εφαρμογές του έχει αποδειχθεί να προσεγγίζει με μεγαλύτερη ακρίβεια την πραγματική ροή σε σχέση με τις προγενέστερες μεθόδους του.

Ένα μοντέλο  $ARFIMA(p, \eta, d, q)$ , όπως εξηγείται και στο [23], είναι μια στατική διαδικασία  $\{y_t\}$  που ικανοποιεί την εξίσωση:

$$\varphi_p(1-L)^\eta(1-L)^d y_t = \theta_q(L)e_t$$

όπου  $\eta$ : ο παράγοντας ακεραίας διαφορικής τάξης. Οι υπόλοιπες μεταβλητές ταυτίζονται στην ερμηνεία τους με τις αντίστοιχες στην υποενότητα 412.4.4.

#### 2.4.6. Τεχνητά νευρωνικά δίκτυα

Όπως και τα προηγούμενα μοντέλα, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα βασίζονται στη χρήση χρονικών σειρών για την πρόβλεψη της κίνησης. Αρκετά διακριτά χαρακτηριστικά τους, [21], τα καθιστούν πολύτιμα και ελκυστικά για μια εργασία στο πεδίο αυτό:

- Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα είναι καθοδηγούμενες από τα δεδομένα τους αυτό-προσαρμοστικές μέθοδοι στις οποίες αρκούν μόνο λίγες αρχικές υποθέσεις για τα υπό έρευνα προβλήματα. Μαθαίνουν από παραδείγματα και αντιλαμβάνονται λεπτές λειτουργικές σχέσεις μεταξύ των δεδομένων, ακόμα και αν εκείνες είναι άγνωστες ή

δύσκολες στην περιγραφή. Έτσι, καθίστανται κατάλληλα για προβλήματα των οποίων οι λύσεις απαιτούν γνώση που είναι δύσκολο να προσδιορισθεί αλλά για την οποία υπάρχουν διαθέσιμα αρκετά δεδομένα ή παρατηρήσεις. Το πρόβλημα με την καθοδηγούμενη από δεδομένα προσέγγιση μοντελοποίησης είναι ότι οι κανόνες που χαρακτηρίζουν αυτά τα δεδομένα δεν είναι πάντα προφανείς και οι παρατηρήσεις συχνά συνοδεύονται από θόρυβο. Παρόλα αυτά, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα παρέχουν έναν πρακτικό και, σε μερικές περιπτώσεις, το μόνο εφικτό τρόπο για την επίλυση ρεαλιστικών προβλημάτων.

- *Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να γενικεύσουν.* Μετά την εκμάθηση των δεδομένων που του έχουν παρουσιασθεί (ως δείγμα), τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν με επιτυχία να βγάλουν συμπέρασμα για ένα άγνωστο μέλος του πληθυσμού, ακόμα και αν τα δεδομένα περιέχουν θόρυβο. Εφόσον η παρελθοντική συμπεριφορά του υπό μελέτη συστήματος χρησιμοποιείται για την εκτέλεση προβλέψεων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, το γενικότερο πεδίο της πρόβλεψης είναι μια ιδανική περιοχή εφαρμογής για τα νευρωνικά δίκτυα.
- *Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν πιο γενικές και ευέλικτες λειτουργικές μορφές τις παραδοσιακές στατιστικές μεθόδους.* Κάθε μοντέλο πρόβλεψης με χρονικές σειρές υποθέτει ότι υπάρχει μια, γνωστή ή άγνωστη, σχέση μεταξύ των εισόδων (δηλαδή των παρελθοντικών τιμών των χρονικών σειρών) και των εξόδων (δηλαδή των μελλοντικών τιμών). Συχνά, τα παραδοσιακά στατιστικά μοντέλα πρόβλεψης έχουν περιορισμούς στην εκτίμηση αυτής της υποβόσκουσας συνάρτησης λόγω της πολυπλοκότητας του πραγματικού συστήματος. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μπορούν να αποτελέσουν μια καλή εναλλακτική μέθοδο για την αναγνώριση αυτής της συνάρτησης.
- *Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν κατάλληλα για προβλήματα που χαρακτηρίζονται από μη γραμμικότητα.* Η πρόβλεψη έχει υπάρξει κατά κόρον ο τομέας των γραμμικών στατιστικών. Τα γραμμικά μοντέλα πρόβλεψης, όπως το ARIMA που αναφέρθηκε παραπάνω, έχουν πολλά πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα, μπορούν να γίνουν κατανοητά και να αναλυθούν με μεγάλη ακρίβεια, ενώ επιπλέον είναι εύκολα στην εξήγηση και υλοποίησή τους. Στην πραγματικότητα όμως, τα συστήματα του πραγματικού κόσμου είναι συχνά μη γραμμικά, με συνέπεια οι χρονικές σειρές που θα χρησιμοποιηθούν στο μοντέλο να πρέπει να είναι μη γραμμικές και τα γραμμικά μοντέλα να είναι εντελώς ακατάλληλα. Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, που είναι μη γραμμικές και καθοδηγούμενες από τα δεδομένα τους προσεγγίσεις, είναι ικανά να εκτελέσουν μη γραμμική μοντελοποίηση χωρίς να είναι απαραίτητη η εκ των προτέρων επίγνωση των σχέσεων μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου. Έτσι, αποτελούν ένα πιο γενικό και ευέλικτο εργαλείο μοντελοποίησης για προβλέψεις.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν προταθεί για πολλές εφαρμογές ελέγχου της κίνησης στα τηλεπικοινωνιακά συστήματα, συμπεριλαμβανομένου και της πρόβλεψης της κίνησης, του ελέγχου χωρητικότητας ζεύξεων και άλλων ελέγχων, όπως η κατανομή εύρους ζώνης, η αποδοχή κλήσης, ο προγραμματισμός πακέτων και η δρομολόγηση. [15]

## 2.5. Εκτίμηση μοντέλων πρόβλεψης

Δεδομένου ότι στα περισσότερα προβλήματα σχετικά με την πρόβλεψη την κίνησης σε ένα δίκτυο ενδιαφέρει η απόκλιση των προβλέψεων από τις πραγματικές τιμές της κίνησης, η εκτίμηση της συνολικής επίδοσης του μοντέλου πρόβλεψης που χρησιμοποιείται ανά περίπτωση γίνεται με τη χρήση μαθηματικών συναρτήσεων σφάλματος. Θεωρητικά όσο μικρότερο είναι το σφάλμα, τόσο πιο ακριβής είναι η πρόβλεψη. Τα είδη σφαλμάτων που χρησιμοποιούνται συχνά, θεωρώντας:  $X_k$  ως την πραγματική είσοδο του συστήματος,  $\bar{X}_k$  ως την προβλεπόμενη έξοδο του χρησιμοποιούμενου μοντέλου και  $n$  το πλήθος των δεδομένων εισόδου, είναι τα:

- Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error, MAPE):

$$MAPE = \frac{100}{n} \sum_{k=1}^n \left| \frac{X_k - \bar{X}_k}{X_k} \right|$$

Το MAPE μετρά την αναλογία ανάμεσα στο λάθος πρόβλεψη και στην πραγματική τιμή και αποτελεί τη συνηθέστερη επιλογή ως μέσο αξιολόγησης. Ειδικά προτιμάται για ένα TCP/IP δίκτυο, καθώς μπορεί να ερμηνευτεί πιο εύκολα από τους παρόχους, ενώ επιπλέον, προβάλλει το πλεονέκτημα την ανεξαρτησίας από βαθμίδες. [8]

- Ρίζα ελάχιστου τετραγωνικού σφάλματος (Root Mean Square Error, RMSE) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X}_k)^2}{n}}$$

- Σχετική ρίζα ελάχιστου τετραγωνικού σφάλματος: (Relative Root Mean Square Error, RRMSE)

$$RRMSE = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n \left( \frac{X_k - \bar{X}_k}{X_k} \right)^2}{n}}$$

- Αθροιστικό τετραγωνικό σφάλμα (Sum Squared Error, SSE)

$$SSE = \sum_{k=1}^n (X_k - \bar{X}_k)^2$$

Η επιλογή του είδους σφάλματος που θα χρησιμοποιηθεί σε κάθε ξεχωριστή περίπτωση καθορίζεται από τη φύση του προβλήματος που μελετάται κάθε φορά και πώς αυτό θα αντικατοπτριστεί καλύτερα μέσω του σφάλματος.



# 3. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα & Differential Evolution

## 3.1. Εισαγωγή

---

Στο παρόν κεφάλαιο, θα δοθεί ένα θεωρητικό υπόβαθρο σχετικά με τα εργαλεία πρόβλεψης και βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκαν στα πλαίσια υλοποίησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας και τα οποία είναι αντίστοιχα τα *τεχνητά νευρωνικά δίκτυα* και ο αλγόριθμος *differential evolution*. Στη συνέχεια, όσον αφορά το εργαλείο βελτιστοποίησης, θα παρατεθούν οι επιμέρους στρατηγικές αναζήτησης βέλτιστης λύσης που εφαρμόστηκαν, παραθέτοντας συνοπτικά τις μεταξύ τους διαφορές.

## 3.2. Τεχνητά Νευρωνικά δίκτυα (Artificial Neural Networks)

---

Ο όρος «τεχνητά νευρωνικά δίκτυα» (Artificial Neural Networks, ANNs) αναφέρεται σε μια κατηγορία υπολογιστικών μοντέλων που έχουν δείξει ότι διαθέτουν ισχυρές δυνατότητες ταξινόμησης και αναγνώρισης μοτίβων. Χρησιμοποιούνται για ένα ευρύ φάσμα εργασιών σε πολλά διαφορετικά πεδία των επιχειρήσεων, της βιομηχανίας και της επιστήμης, όπως φαίνεται και στο [18]. Η πρόβλεψη, που μελετάται ως πεδίο στην παρούσα διπλωματική, αποτελεί ένα μια μεγάλη περιοχή εφαρμογής των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, χάρη στα πολύτιμα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν στην υποενότητα 2.4.6.

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, που αναπτύχθηκαν αρχικά για τη μίμηση του βασικού βιολογικού νευρικού συστήματος – ειδικότερα του ανθρώπινου εγκεφάλου, συνθέτονται από ένα πλήθος διασυνδεδεμένων απλών επεξεργαστικών στοιχείων που ονομάζονται *νευρώνες ή κόμβοι*. Κάθε κόμβος λαμβάνει ένα σήμα εισόδου (το οποίο είναι η συνολική «πληροφορία» από άλλους κόμβους ή κάποιο εξωτερικό ερέθισμα), επεξεργάζεται αυτό το σήμα τοπικά μέσω ενεργοποίησης ή μέσω μιας συνάρτησης μεταφοράς και παράγει ένα τροποποιημένο σήμα εξόδου προς άλλους κόμβους ή ως τελική έξοδο. Παρόλο που κάθε ανεξάρτητος νευρώνας υλοποιεί τη συνάρτησή του μάλλον ατελώς, συλλογικά το δίκτυο μπορεί να εκτελέσει ένα σύνολο εργασιών αρκετά αποτελεσματικά. Αυτό το χαρακτηριστικό σχετικά με την επεξεργασία της πληροφορίας κάνει τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα μια ισχυρή υπολογιστική μηχανή, ικανή να μαθαίνει από παραδείγματα και να γενικεύει σε παραδείγματα που δεν έχει αντιμετωπίσει στο παρελθόν.

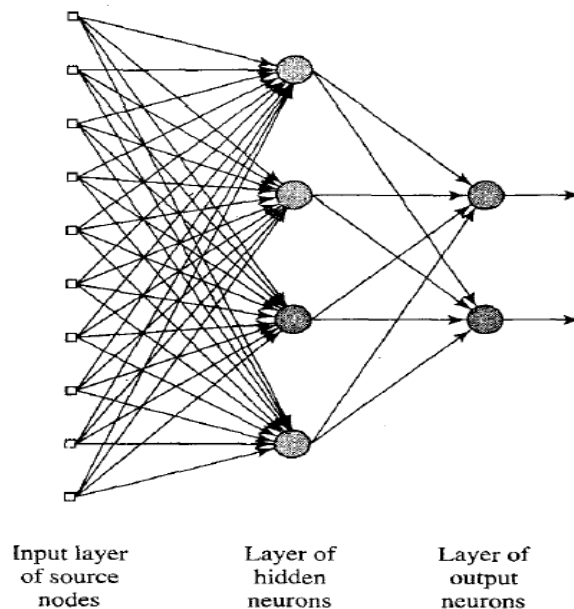
Πολλά διαφορετικά μοντέλα τεχνητών νευρωνικών δικτύων έχουν προταθεί από την πρώτη υλοποίησή τους. Ίσως το πιο δημοφιλή μοντέλα είναι τα *perceptrons* πολλών

επιπέδων (Multi-Layer Perceptron, MLP), τα δίκτυα Hopfield και τα αυτό-οργανούμενα δίκτυα του Kohonen. Η παρούσα διπλωματική επικεντρώνεται στα πρώτα.

### 3.2.1. Perceptron πολλών επιπέδων

Ένα perceptron πολλών επιπέδων τυπικά αποτελείται από πολλά επίπεδα κόμβων. Τα πρώτο, ή αλλιώς το χαμηλότερο επίπεδο είναι το επίπεδο εισόδων όπου λαμβάνεται η εξωτερική πληροφορία. Το τελευταίο, ή αλλιώς το ανώτερο επίπεδο, είναι το επίπεδο εξόδου όπου αποκτάται η λύση του προβλήματος. Το επίπεδο εισόδου και το επίπεδο εξόδου χωρίζονται μεταξύ τους από ένα ή περισσότερα ενδιάμεσα επίπεδα που ονομάζονται *κρυφά επίπεδα*. Οι κόμβοι στα προσαρμοστικά επίπεδα είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους με άκυκλες ενώσεις που στο εξής θα αποκαλούνται σύνδεσμοι και που έχουν κατεύθυνση από το χαμηλότερο στο υψηλότερο επίπεδο.

Στην Εικόνα 7, [12], φαίνεται ένα *πλήρως συνδεδεμένο* perceptron πολλών επιπέδων με ένα κρυφό επίπεδο. Ονομάζεται *πλήρως συνδεδεμένο* γιατί σε κάθε επίπεδο του δικτύου οι κόμβοι συνδέονται με όλους τους κόμβους του επόμενου επιπέδου. Εάν ωστόσο, παραλείπονται κάποιοι σύνδεσμοι μεταξύ των κόμβων, τότε το perceptron πολλών επιπέδων χαρακτηρίζεται *μερικώς συνδεδεμένο*.



**Εικόνα 7: Perceptron τριών επιπέδων (προσοτροφοδότησης): επίπεδο εισόδου, κρυφό επίπεδο και επίπεδο εξόδου**



### 3.3. Πρόβλημα πρόβλεψης με τεχνητό νευρωνικό δίκτυο

Για ένα πρόβλημα πρόβλεψης, οι εισοδοί σε ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο είναι συνήθως οι ανεξάρτητες μεταβλητές. Η λειτουργική σχέση που εκτιμάται από το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_p)$$

όπου  $x_1, x_2, \dots, x_p$  είναι  $p$  ανεξάρτητες μεταβλητές και  $y$  είναι μια εξαρτημένη μεταβλητή. Στην περίπτωση ενός προβλήματος πρόβλεψης με χρήση χρονικών σειρών, οι εισοδοί είναι τυπικά παρελθοντικές παρατηρήσεις δεδομένων και η έξοδος είναι η μελλοντική τιμή. Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο για τη χαρτογράφηση της εξόδου εκτελεί μια συνάρτηση της ακόλουθης μορφής:

$$y_{t+1} = f(y_t, y_{t-1}, \dots, y_{t-p})$$

όπου  $y_t$  είναι η παρατήρηση τη χρονική στιγμή  $t$ .

Προτού ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μπορέσει να χρησιμοποιηθεί για να εκτελέσει την επιθυμητή εργασία, θα πρέπει να έχει εκπαιδευτεί γι' αυτή. Βασικά, η εκπαίδευση είναι η διαδικασία για να αποφασίσει τα βάρη των συνδέσμων, οι οποίοι αποτελούν θεμελιώδη στοιχεία για ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Η γνώση που αποκτάται από ένα δίκτυο αποθηκεύεται στους συνδέσμους και στους κόμβους με τη μορφή βαρών και biases αντίστοιχα. Χάρη στους συνδέσμους ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο μπορεί να φέρει σε πέρας πολύπλοκες μη γραμμικές χαρτογραφήσεις από του κόμβους εισόδου μέχρι και τους κόμβους εξόδου. Η εκπαίδευση ενός perceptron πολλών επιπέδων είναι *επιβλεπόμενη* υπό την έννοια ότι η επιθυμητή απόκριση του δικτύου (τιμή στόχος) για κάθε μοτίβο εισόδου (παράδειγμα) είναι πάντοτε διαθέσιμη.

Τα δεδομένα εισόδου για την εκπαίδευση είναι συνήθως στη μορφή διανυσμάτων των μεταβλητών εισόδου. Σε κάθε στοιχείο του διανύσματος εισόδου αντιστοιχίζεται ένα κόμβος εισόδου του επιπέδου εισόδου. Έτσι, ο αριθμός των κόμβων εισόδου είναι ίσος με τη διάσταση των διανυσμάτων εισόδου. Για ένα συνηθισμένο πρόβλημα πρόβλεψης, ο αριθμός των κόμβων εισόδου είναι καλά ορισμένος και ουσιαστικά αποτελεί τον αριθμό των ανεξάρτητων μεταβλητών που σχετίζονται με το πρόβλημα. Ωστόσο, για ένα πρόβλημα πρόβλεψης με χρονικές σειρές, ο κατάλληλος αριθμός των κόμβων εισόδου δεν είναι εύκολο να καθορισθεί. Όποια κι αν είναι η διάσταση, το διάνυσμα εισόδου για ένα πρόβλημα πρόβλεψης με χρονικές σειρές σχεδόν πάντα θα συντίθεται από ένα κινούμενο παράθυρο σταθερού μήκους πάνω στις σειρές. Τα συνολικά διαθέσιμα δεδομένα συνήθως διαχωρίζονται σε μια ομάδα που αφορά την εκπαίδευση (με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα) και μια ομάδα που αφορά την πιστοποίηση (με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα ή άλλα εκτός αυτών). Η ομάδα που αφορά την εκπαίδευση χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των βαρών στους συνδέσμους ενώ η ομάδα που αφορά την πιστοποίηση χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ικανότητας γενίκευσης του δικτύου.



Η εκπαιδευτική διαδικασία εκτελείται ως ακολούθως: αρχικά τα παραδείγματα της συνόλου εκπαίδευσης εισάγονται στους κόμβους εισόδου. Οι τιμές ενεργοποίησης σε κάθε κόμβο εντοπίζονται στο πρώτο κρυφό επίπεδο. Το σύνολο τότε τροποποιείται από μια συνάρτηση ενεργοποίησης με βάση την τιμή ενεργοποίησης του κόμβου. Αυτό, με τη σειρά του γίνεται είσοδος για τους κόμβους του επόμενου επιπέδου, μέχρι που τελικά πετυχαίνονται οι τιμές ενεργοποίησης για την έξοδο. Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης χρησιμοποιείται για να βρει τα βάρη που ελαχιστοποιούν κάποιο συνολικό σφάλμα εκτίμησης, πιθανότατα κάποιο από τα αναφερθέντα στην υποενότητα 2.5. Έτσι, η εκπαίδευση του δικτύου είναι στην πραγματικότητα ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης μη γραμμικό και συνήθως χωρίς περιορισμούς.

Για ένα πρόβλημα προβλέψεων με χρονικές σειρές, το μοτίβο εκπαίδευσης αποτελείται από σταθερού πλήθους παρατηρήσεις σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Έστω ότι υπάρχουν  $N$  διαθέσιμες παρατηρήσεις,  $y_1, y_2, \dots, y_N$ , στο σύνολο εκπαίδευσης και πρέπει να βρεθεί η πρόβλεψη για «1 βήμα μπροστά». Τότε, χρησιμοποιώντας ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο με  $n$  κόμβους εισόδου, θα προκύπτουν  $N - n$  μοτίβα εκπαίδευσης. Το πρώτο μοτίβο εκπαίδευσης θα αποτελείται από  $y_1, y_2, \dots, y_n$  ως εισόδους ενώ η έξοδος στόχος θα είναι  $y_{n+1}$ . Το δεύτερο σύνολο εκπαίδευσης θα περιέχει τις  $y_2, y_3, \dots, y_{n+1}$  ως εισόδους ενώ η επιθυμητή έξοδος θα είναι η  $y_{n+2}$ . Το τελικό σύνολο εκπαίδευσης θα περιλαμβάνει ως εισόδους τις  $y_{N-n}, y_{N-n+1}, \dots, y_{N-1}$  και ως στοχευόμενη έξοδο την  $y_N$ . Τυπικά, μια αντικειμενική συνάρτηση (ή αλλιώς συνάρτηση κόστους) βασισμένη σε ένα σφάλμα, έστω το SSE, που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί κατά τη διάρκεια της εκπαιδευτικής διαδικασίας είναι:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=n+1}^N (y_i - a_i)^2$$

όπου  $a_i$  είναι η πραγματική έξοδος του δικτύου και το  $\frac{1}{2}$  συμπεριλαμβάνεται για να απλοποιήσει την έκφραση των παραγώγων που υπολογίζονται από τον αλγόριθμο εκπαίδευσης. [21]

### 3.4. Μοντελοποίηση τεχνητού νευρωνικού δικτύου για πρόβλεψη

Παρά τα πολλά ικανοποιητικά χαρακτηριστικά των τεχνητών νευρωνικών δικτύων, η κατασκευή ενός νευρωνικού δικτύου για ένα συγκεκριμένο πρόβλημα πρόβλεψης δεν είναι μια απλή εργασία. Τα ζητήματα μοντελοποίησης που επηρεάζουν την επίδοση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου θα πρέπει να ληφθούν σοβαρά υπόψη. Μια σημαντική απόφαση είναι ο καθορισμός της κατάλληλης αρχιτεκτονικής. Αυτό περιλαμβάνει τον αριθμό των επιπέδων, τον αριθμό των κόμβων σε κάθε επίπεδο και τον αριθμό των συνδέσμων μεταξύ των κόμβων. Μια ακόμα σημαντική επιλογή μπορεί να αποτελέσει η επιλογή των συναρτήσεων ενεργοποίησης για τους κόμβους των κρυφών επιπέδων αλλά και του επιπέδου εξόδου, ο αλγόριθμος εκπαίδευσης, η κανονικοποίηση των δεδομένων,

τα σύνολα εκπαίδευσης και πιστοποίησης καθώς και η μέθοδος εκτίμησης της επίδοσης του δικτύου.

### 3.4.1. Αρχιτεκτονικές Νευρωνικών Δικτύων

---

Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο τυπικά αποτελείται από επίπεδα κόμβων. Η πιο δημοφιλής μορφή του είναι αυτή των perceptrons πολλών επιπέδων, όπου όλοι οι κόμβοι εισόδου βρίσκονται σε ένα επίπεδο εισόδου, όλοι οι κόμβοι εξόδου βρίσκονται σε ένα επίπεδο εξόδου και οι κρυφοί κόμβοι κατανέμονται σε ένα ή περισσότερα παρεμβάλλοντα κρυφά επίπεδα. Επιπλέον, στη σχεδίαση ενός δικτύου perceptrons πολλών επιπέδων θα πρέπει να καθοριστούν οι ακόλουθες μεταβλητές:

- Το πλήθος των κόμβων εισόδου
- Το πλήθος των κρυφών επιπέδων και κρυφών κόμβων
- Το πλήθος των κόμβων εξόδου.

Η επιλογή αυτών των παραμέτρων εξαρτώνται από τη φύση του εκάστοτε προβλήματος που τίθεται προς επίλυση. Παρά το γεγονός ότι έχουν προταθεί κατά καιρούς μέθοδοι εύρεσης της βέλτιστης αρχιτεκτονικής για ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, όπως η τεχνική κανονικής αποσύνθεσης, αυτές είναι αρκετά πολύπλοκες και δύσκολες στην υλοποίησή τους, ενώ επιπλέον δεν εγγυώνται ότι το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο θα πετύχει τη βέλτιστη πρόβλεψη για όλα τα προβλήματα πρόβλεψης. Οι μέθοδοι που επιλέγονται είτε είναι ευρυστικές είτε βασίζονται σε προσομοιώσεις που προκύπτουν από πειραματισμούς. Έτσι, η σχεδίαση ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου είναι περισσότερο τέχνη παρά επιστήμη.

#### 3.4.1.1. Πλήθος κρυφών επιπέδων και κρυφών κόμβων

---

Τα κρυφά επίπεδα και κόμβοι διαδραματίζουν ένα πολύ σημαντικό ρόλο σε πολλές επιτυχημένες εφαρμογές νευρωνικών δικτύων. Οι κρυφοί κόμβοι ενός κρυφού επιπέδου είναι που επιτρέπουν στα νευρωνικά δίκτυα να εντοπίσουν το χαρακτηριστικό μοτίβο των δεδομένων και να εκτελέσουν τη σύνθετη μη γραμμική χαρτογράφηση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου. Συνήθως ένα κρυφό επίπεδο κόμβων επαρκεί για να προσεγγίσει το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο οποιαδήποτε μη γραμμική συνάρτηση οποιασδήποτε ακρίβειας. Ωστόσο, μπορεί να απαιτείται η χρήση πολλών κρυφών κόμβων, γεγονός που δεν είναι επιθυμητό στην περίπτωση που αυξάνει το χρόνο εκπαίδευσης του δικτύου ή που δυσχεραίνει την ικανότητα του για γενίκευση. Σε μια τέτοια περίπτωση η επιλογή δύο κρυφών επιπέδων μπορεί να παρέχει οφέλη, όπως μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα στην εκπαίδευση του δικτύου.

Ωστόσο, η ισορροπία μεταξύ της επιλογής οποιουδήποτε αριθμού κρυφών επιπέδων και κόμβων είναι λεπτή. Γενικά, προτιμώνται τα δίκτυα με λιγότερους κρυφούς κόμβους, καθώς πετυχαίνουν καλύτερη γενίκευση και έχουν λιγότερες πιθανότητες

να υπερ-προσεγγίσουν το βέλτιστο αποτέλεσμα. Η περίπτωση τους όμως μπορεί να μην κάνει αρκετά ισχυρό το μοντέλο για την πρόβλεψη ή για την εκμάθηση των δεδομένων τους. Ο πιο συνηθισμένος τρόπος επιλογής του πλήθους των κρυφών κόμβων είναι μέσω πολλών δοκιμών και εκτίμησης των σφαλμάτων.

#### 3.4.1.2. Πλήθος κόμβων εισόδου

---

Το πλήθος των κόμβων εισόδου αντιστοιχεί στον αριθμό των μεταβλητών του διανύσματος εισόδου που χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών. Για μια τυπική πρόβλεψη, ο αριθμός των εισόδων είναι συνήθως προφανής και εύκολος στην επιλογή. Σε ένα πρόβλημα πρόβλεψης με χρονικές σειρές, ο αριθμός των κόμβων εισόδου αντιστοιχεί στον αριθμό των χρονικά μετατοπισμένων παρατηρήσεων που χρησιμοποιούνται για την εύρεση του κρυφού μοτίβου σε μια χρονική σειρά και για την πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών. Ωστόσο, δεν υπάρχει κάποιος κανόνας για την επιλογή του πλήθους τους, αλλά η παράμετρος αυτή θα πρέπει να αποτελεί μέρος της κατασκευής διαδικασίας της μοντελοποίησης. Ιδανικά, επιθυμητός είναι ένας μικρός αριθμός απαραίτητων κόμβων εισόδου που να μπορούν να προβάλλουν τα μοναδικά χαρακτηριστικά των δεδομένων. Πολύ λίγοι ή υπερβολικά πολλοί κόμβοι εισόδου μπορούν να επηρεάσουν είτε την εκπαιδευτική διαδικασία είτε την ικανότητα πρόβλεψης του δικτύου.

#### 3.4.1.3. Πλήθος κόμβων εξόδου

---

Ο αριθμός του πλήθους των κόμβων εξόδου είναι σχετικά εύκολο να καθοριστεί, καθώς σχετίζεται άμεσα με το υπό μελέτη πρόβλημα. Για ένα πρόβλημα πρόβλεψης με χρονικές σειρές, το πλήθος των κόμβων εξόδου συχνά αντιστοιχεί στον «ορίζοντα της πρόβλεψης». Αυτό μπορεί να μεταφραστεί σε δύο είδη πρόβλεψης: 1-βήμα-μπροστά (που χρησιμοποιεί έναν κόμβο εξόδου) και πολλαπλά-βήματα-εξόδου. Στην περίπτωση των πολλαπλών βημάτων εξόδου, οι τιμές πρόβλεψης μπορούν να χρησιμοποιηθούν επαναληπτικά ως είσοδοι για τις επόμενες προβλέψεις. Επίσης, υπάρχει και η περίπτωση της ευθείας μεθόδου που επιτρέπει στο νευρωνικό δίκτυο να έχει πολλούς κόμβους εξόδου για να προβλέπουν κάθε βήμα προς το μέλλον.

#### 3.4.1.4. Σύνδεσμοι μεταξύ των κόμβων

---

Η αρχιτεκτονική του δικτύου χαρακτηρίζεται επίσης από τους συνδέσμους μεταξύ των κόμβων στα επίπεδα, καθώς είναι καθοριστικοί για τη συμπεριφορά του δικτύου. Για τα περισσότερα προβλήματα πρόβλεψης, τα δίκτυα είναι *πλήρως συνδεδεμένα*, γεγονός που σημαίνει ότι όλοι οι κόμβοι ενός επιπέδου συνδέονται με όλους τους κόμβους του ανώτερου επιπέδου, με εξαίρεση το επίπεδο εξόδου. Ωστόσο, υπάρχει η δυνατότητα των *μερικώς συνδεδεμένων δικτύων* όπου υπάρχει επιλεκτική σύνδεση μεταξύ των κόμβων ή απευθείας σύνδεσης από τους κόμβους εισόδου στους

κόμβους εξόδου. Η ύπαρξη απευθείας συνδέσμων μεταξύ του επιπέδου εισόδου και του επιπέδου εξόδου μπορεί να αποδειχθεί χρήσιμη για την ακρίβεια της πρόβλεψης και μπορεί να ενισχύσει την ικανότητα της αναγνωριστικής ισχύος του δικτύου.

### 3.4.2. Συνάρτηση ενεργοποίησης

---

Η συνάρτηση ενεργοποίησης, ή αλλιώς συνάρτηση μεταφοράς, καθορίζει τη σχέση μεταξύ των εισόδων και εξόδων ενός κόμβου και ενός δικτύου. Σε γενικές γραμμές, η συνάρτηση ενεργοποίησης συστήνει ένα βαθμό μη γραμμικότητας που είναι πολύτιμη για τις περισσότερες εφαρμογές των τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Οι πιο συχνά χρησιμοποιούμενες συναρτήσεις είναι:

- Η σιγμοειδής συνάρτηση:  $f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$
- Η συνάρτηση υπερβολικής εφαπτομένης:  $f(x) = (e^x - e^{-x}) / (e^x + e^{-x})$
- Η συνάρτηση ημιτόνου ή συνημίτονου:  $f(x) = \sin x$  ή  $f(x) = \cos x$
- Η γραμμική συνάρτηση:  $f(x) = x$

Υπάρχει και η περίπτωση κάθε διαφορετικός κόμβος του ίδιου ή διαφορετικού επιπέδου να έχει διαφορετική συνάρτηση ενεργοποίησης. Το σύνθετο ωστόσο για όλα τα δίκτυα είναι να χρησιμοποιούν τις ίδιες συναρτήσεις ενεργοποίησης, ειδικά για τους κόμβους που ανήκουν στο ίδιο επίπεδο.

Όσον αφορά στους κόμβους εξόδου, δεν υπάρχει κάποια γενική σύμβαση που να έχει επιλεγεί.

### 3.4.3. Αλγόριθμος εκπαίδευσης

---

Η εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου είναι ένα πρόβλημα μη γραμμικής και μη τυποποιημένης ελαχιστοποίησης στην οποία τα βάρη των συνδέσμων του δικτύου τροποποιούνται επαναληπτικά για να ελαχιστοποιήσουν το συνολικό μέσο ή συνολικό τετραγωνικό (ή όποιο άλλο έχει επιλεγεί) σφάλμα των επιθυμητών και πραγματικών τιμών για όλους τους κόμβους εξόδου και για πολλαπλά μοτίβα εισόδου. Η ύπαρξη πολλών διαφορετικών μεθόδων βελτιστοποίησης παρέχουν πολλές επιλογές για την εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου. Δεν υπάρχει κάποιος αλγόριθμος που να εγγυάται ότι θα βρεθεί η καθολική βέλτιστη λύση για ένα μη γραμμικό πρόβλημα βελτιστοποίησης γενικά και σε ένα λογικό χρονικό διάστημα. Οι περισσότεροι αλγόριθμοι υποφέρουν από τον κίνδυνο να παγιδευτούν σε ένα τοπικό ελάχιστο του προβλήματος. Πολλοί είναι όμως εκείνοι που έχουν ήδη ενσωματώσει τεχνικές που τους προστατεύουν από μια λανθασμένη σύγκλιση. Μια λύση προς αυτήν την κατεύθυνση είναι να καθοριστούν επιπλέον παράμετροι που θα μπορούν να απαλλάξουν τον αλγόριθμο από την παγίδευση σε ένα τοπικό ελάχιστο.

Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης που επιλέχθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι αυτός της Differential Evolution (DE), ο οποίος περιγράφεται σε επόμενη υποενοότητα.

#### 3.4.4. Κανονικοποίηση δεδομένων

---

Η κανονικοποίηση δεδομένων εκτελείται συχνά πριν την εκκίνηση της διαδικασίας εκπαίδευσης. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται μη γραμμικές συναρτήσεις μεταφοράς στους κόμβους εξόδου, οι τιμές των επιθυμητών εξόδων θα πρέπει να τροποποιηθούν κατάλληλα ώστε να ταιριάζουν στο εύρος των πραγματικών τιμών. Στην περίπτωση ενός προβλήματος που χρησιμοποιεί χρονικές σειρές, π.χ., η κανονικοποίηση εκτελείται συνήθως εξωτερικά, υπό την έννοια ότι όλα τα δεδομένα εκπαίδευσης κανονικοποιούνται εξ' αρχής σε ένα συγκεκριμένο εύρος.

#### 3.4.5. Σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης και πιστοποίησης

---

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το σύνολο δεδομένων για την εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και την πιστοποίηση των αποτελεσμάτων του είναι απαραίτητο για ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση προβλέψεων. Το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης χρησιμοποιείται στη μοντελοποίηση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, ενώ το σύνολο πιστοποίησης χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της ικανότητας του στην πρόβλεψη. Η επιλογή των συνόλων αυτών είναι καθοριστική για την επίδοση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Όπως αναφέρεται στο [21], θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη :

- *Το ποσοστό αναλογίας μεταξύ των δύο συνόλων.* Δεν υπάρχει κάποιος γενικός κανόνας που θα καθορίσει τη βέλτιστη αναλογία ανάμεσα στο μέγεθος των δύο συνόλων. Ωστόσο, είναι κρίσιμης σημασίας να είναι και τα δύο σύνολα αντιπροσωπευτικά του πληθυσμού που διατίθεται ή τουλάχιστον των σημαντικών του χαρακτηριστικών. Ακατάλληλη επιλογή αναλογίας μπορεί να οδηγήσει στη μοντελοποίηση ενός μη βέλτιστου τεχνητού νευρωνικού δικτύου και να επηρεάσει αρνητικά τις προβλέψεις αυτού. Οι συνήθεις επιλογές για το σύνολο εκπαίδευσης και πιστοποίησης είναι αντίστοιχα 90%-10% και 80%-20%. Η τελική επιλογή εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα.
- *Το συνολικό μέγεθος των διαθέσιμων δεδομένων.* Ούτε σε αυτήν την περίπτωση υπάρχει κάποιος κανόνας που να ορίζει το ιδανικό μέγεθος του συνόλου των δεδομένων που πρέπει να είναι διαθέσιμο στο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο. Η παράμετρος αυτή εξαρτάται από την πολυπλοκότητα του προβλήματος, τη δομή του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, κ. ά. Η γενική σχετική εκτίμηση, χωρίς όμως να αποτελεί κανόνα, είναι ότι όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος δεδομένων τόσο ευνοείται η ακρίβεια των προβλέψεων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, καθώς μπορεί να παρακαμφθεί το ζήτημα της ύπαρξης θορύβου ή της μη γραμμικότητας στα δεδομένα.

### 3.4.6. Εκτίμηση της επίδοσης του τεχνητού νευρωνικού δικτύου

---

Παρόλο που υπάρχουν πολλές επιλογές για την αξιολόγηση της επίδοσης των προβλέψεων ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου, όπως ο χρόνος μοντελοποίησης ή εκπαίδευσης, το πιο σημαντικό μετρικό είναι η εκτίμηση της ακρίβειας της πρόβλεψης που μπορεί να επιτευχθεί, πέρα από το σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης. Η ακρίβεια πρόβλεψης ορίζεται συνήθως ως *σφάλμα πρόβλεψης*, που είναι η διαφορά μεταξύ της πραγματικής (επιθυμητής) τιμής και τιμής πρόβλεψης. Υπάρχουν πολλοί τύποι σφαλμάτων που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση της ακρίβειας, το καθένα με τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματά του. Τα σημαντικότερα αναφέρθηκαν προωτέρω, στην ενότητα 2.5.

## 3.5. Differential Evolution Αλγόριθμος

---

Αναφέρθηκε παραπάνω ότι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης βοηθά στην εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Σε γενικές γραμμές, όπως αναφέρεται στο [10], ένας αλγόριθμος θεωρείται επιθυμητός όταν ικανοποιούνται οι ακόλουθες αιτήσεις:

- Έχει την ικανότητα να διαχειρίζεται μη-διαφορίσιμες, μη-γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις.
- Έχει παραλληλισμό ώστε να ανταπεξέρχεται σε συναρτήσεις κόστους που είναι απαιτητικές σε υπολογισμούς.
- Είναι εύκολος στη χρήση, π.χ. λίγες μεταβλητές ελέγχου που θα κατευθύνουν την ελαχιστοποίηση.
- Έχει καλές ιδιότητες σύγκλισης, π.χ. συνεπή σύγκλιση στο καθολικό ελάχιστο με συνεχείς ανεξάρτητες μεταξύ τους δοκιμές.

Η Differential Evolution (DE) είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης που σχεδιάστηκε για να ικανοποιεί όλες τις παραπάνω απαιτήσεις και επιτυγχάνει καλύτερη προσέγγιση του καθολικού βέλτιστου σε σχέση με άλλες τεχνικές.

Σημαντικό χαρακτηριστικό της, που τη διαχωρίζει από άλλες μεθόδους, είναι ότι **χρησιμοποιεί τεχνικές που βασίζονται στον πληθυσμό της**. Αυτό την καθιστά αποτελεσματική σε προβλήματα που αφορούν πειραματική ελαχιστοποίηση, ακόμα κι αν η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να προκύπτει από φυσικά πειράματα. Επιπλέον, ανάλογα και με τη φύση του προβλήματος, μπορεί να συμπεριλάβει περιορισμούς που είτε να αρχικοποιούνται εκ νέου σε κάθε επανάληψη της μεθόδου είτε να γίνεται μια τροποποίηση του μηχανισμού διαχείρισής τους. Ο παραπάνω συνδυασμός οδηγεί σε καλή εφαρμογή της DE σε μη-γραμμικές συναρτήσεις.

Πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί το γεγονός ότι **διαχειρίζεται μικρό αριθμό παραμέτρων ελέγχου**, απαλλάσσοντας το χρήστη από τη διαδικασία εισαγωγής πολλών δεδομένων. Συγκεκριμένα, διαθέτει τρεις παραμέτρους ελέγχου: το μέγεθος πληθυσμού, τη σταθερά διαφοροποίησης και τη σταθερά μετάβασης.



Σε κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου, δημιουργείται ένα διάνυσμα διαφοράς από δύο τυχαία επιλεγμένα διανύσματα πληθυσμού για να διαμορφώσει ένα υπάρχον. Η διαμόρφωση αυτή εκτελείται για κάθε διάνυσμα πληθυσμού. Τα νέα διανύσματα αντικαθιστούν τα προηγούμενα αν ανταποκρίνονται σε μια τιμή συνάρτησης με περιορισμένη τιμή σε σύγκριση με τα προηγούμενα.

Επιπρόσθετα, *κατάλληλη επιλογή παραμέτρων μπορεί να βελτιώσει αισθητά τη σύγκλιση της DE*. Καλές ιδιότητες σύγκλισης είναι υποχρεωτικές σε έναν καλό αλγόριθμο σύγκλισης. Προς αυτή την κατεύθυνση, μελετήθηκε η επιρροή που θα είχε η αυξομείωση των τιμών των παραπάνω παραμέτρων στη σύγκλιση του αλγορίθμου, καθώς μόνο εκτεταμένος έλεγχος υπό ποικίλες συνθήκες μπορεί να υποδείξει αν μια μέθοδος ελαχιστοποίησης μπορεί να ικανοποιήσει τις υποσχέσεις της. Τα σχετικά αποτελέσματα της DE είναι γενικά πολύ καλά.

Όλα τα παραπάνω καθιστούν τον εξελικτικό αυτό αλγόριθμο ένα γενικού σκοπού βελτιστοποιητή παραμένοντας αξιόπιστος και γρήγορος. Τόσο καθολικός είναι ο αλγόριθμος που έχει ευρύ πεδίο εφαρμογής σε προβλήματα βελτιστοποίησης. [10]

### 3.5.1. Ο αρχικός αλγόριθμος της Differential Evolution

---

Η αρχική μορφή του αλγορίθμου της DE εισήχθη αρχικά από τους Kenneth Price και Rainer Storn.

Το πρόβλημα που έθεσαν ήταν η αναζήτηση μιας βέλτιστης λύσης  $X^*$ , η οποία αναπαρίσταται από το διάνυσμα παραμέτρων  $x_i^*$ ,  $i=1, \dots, D$  και με πεδίο ορισμού  $L \leq X \leq H$ . Η βελτιστοποίηση γίνεται με βάση μια αντικειμενική βαθμωτή συνάρτηση  $f(X)$  που στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί. Έτσι, προκύπτει το ακόλουθο πρόβλημα βελτιστοποίησης:

$$\min_X f(X), \quad L \leq X \leq H, X \in R^D$$

Στα πλαίσια του προβλήματος, θα πρέπει να ορίζεται ένας γεννήτορας τυχαίων αριθμών για να παράγει σειρά αριθμών κινητής υποδιαστολή στο πεδίο  $[0, 1)$ , μια *συνάρτηση δοκιμής* και οι παράμετροι βελτιστοποίησης. Οι παράμετροι αυτές θα πρέπει να αρχικοποιούνται σε μια μέση τιμή ώστε να αποκαλύπτεται η μέση συμπεριφορά του αλγορίθμου και διακρίνονται σε:

- παραμέτρους ελέγχου, οι οποίες συγκεκριμένα είναι οι:
  - F : σταθερά διαφοροποίησης
  - Cr: σταθερά μετάβασης
  - NP: μέγεθος πληθυσμού
- και τις λοιπές παραμέτρους:
  - D: διάσταση προβλήματος που μετρά τη δυσκολία του προβλήματος βελτιστοποίησης
  - GEN: μέγιστος αριθμός γεννήσεων (ή επαναλήψεων), ο οποίος εξυπηρετεί ως συνθήκη τερματισμού

- L: ελάχιστο ακρότατο πεδίο ορισμού
- H: μέγιστο ακρότατο πεδίου ορισμού

Εκτός από τις παραπάνω παραμέτρους, θα πρέπει να ορίζονται και οι λειτουργικές μεταβλητές του αλγορίθμου:

- $X \in R^D$ : δοκιμαστική πιθανή λύση
- $Pop \in R^{D \times NP}$ : πληθυσμός που αναπαριστά το σύνολο των πιθανών λύσεων
- $Fit \in R^{NP}$ : καταλληλότητα πληθυσμού
- $f \in R$ : καταλληλότητα της δοκιμαστικής πιθανής λύσης
- $iBest \in N$ : δείκτης της τρέχουσας βέλτιστης πιθανής λύσης του πληθυσμού
- $i, j, g \in N$ : μεταβλητές βρόχων
- $Rnd \in N$ : παράμετρος μετάλλαξης
- $r \in N^3$ : δείχνει τις τυχαία επιλεγμένες μεταβλητές.

Προτού τεθεί σε εφαρμογή ο αλγόριθμος, θα πρέπει να γίνεται αρχικοποίηση και η εκτίμηση της καταλληλότητάς του, κάτι το οποίο είναι ουσιαστικά το κριτήριο βελτιστοποίησης. Με την υπόθεση πάντα ότι δεν έχουμε πληροφορίες για το βέλτιστο, ο πληθυσμός αρχικοποιείται εντός των ορίων των περιορισμών με τη βοήθεια της συνάρτησης  $Pop$  και ορίζεται και η καταλληλότητα του πληθυσμού με τη συνάρτηση  $Fit$

Όσον αφορά τη διαδικασία βελτιστοποίησης αυτή καθ' αυτή, σχετίζεται άμεσα με τη μεταβλητή GEN, αφού γίνονται τόσες επαναλήψεις του αλγορίθμου όσες και η τιμή της GEN, ενώ σε κάθε επανάληψη εκτελούνται τέσσερα βήματα:

- **Τυχαία επιλογή κατάλληλου αριθμού πιθανών λύσεων από τον πληθυσμό**, διαφορετικών μεταξύ τους αλλά και από την τρέχουσα πιθανή λύση.
- **Δημιουργία της δοκιμαστικής πιθανής λύσης X**. Αρχικά, επιλέγεται η παράμετρος μετάλλαξης  $Rnd$  τυχαία από το  $[1, \dots, D]$  εύρος για να εγγραφεί ότι τουλάχιστον μια από τις επιλεγμένες μεταβλητές θα αλλάξει και στη συνέχεια επιλέγεται η δοκιμαστική μεταβλητή με βάση τον ανάλογο κανόνα.
- **Έλεγχος των περιορισμών**: Αν κάποια από τις παραμέτρους της δοκιμαστικής πιθανής λύσης παραβιάζουν τους περιορισμούς, τότε αυτή επιστρέφεται και τροποποιείται ώστε να βρίσκεται στην επιτρεπτή περιοχή
- **Επιλογή της βέλτιστης πιθανής λύσης**. Αρχικά, γίνεται μια σύγκριση μεταξύ της δοκιμαστικής πιθανής λύσης και των τρεχόντων επιλεγμένων. Στην περίπτωση που το αποτέλεσμα της δοκιμαστικής συνάρτησης, όσον αφορά την καταλληλότητα, είναι μικρότερο ή ίσο με αυτό της τρέχουσας πιθανής λύσης, τότε η πρώτη αντικαθιστά την δεύτερη στον πληθυσμό. Εξάλλου, είναι απαραίτητο να ελεγχθεί αν το νέο μέλος του πληθυσμού είναι καλύτερο από την τρέχουσα βέλτιστη πιθανή λύση. Αν είναι έτσι, τότε το περιεχόμενο της βέλτιστης πιθανής λύσης ενημερώνεται επίσης



Όταν ο αλγόριθμος τελικά ολοκληρώνεται, η βέλτιστη λύση είναι το ζεύγος τιμών των *PopiBest* και *FitiBest*.

Σε μορφή ψευδοκώδικα, όπως αυτός αναφέρεται στο [10], τα παραπάνω μεταφράζονται τελικά ως εξής:

```
Απόκτηση: D – διάσταση προβλήματος (προαιρετικό)
NP, F, Cr – παράμετροι ελέγχου
GEN – συνθήκη τερματισμού
L, H – όρια
Αρχικοποίησε τον πληθυσμό  $Pop_{ij} \leftarrow \text{rand}_{ij}[L,H]$  και εκτίμησε την
καταλληλότητα  $Fit_j \leftarrow f(Pop_j)$ 
for g = 1 to GEN do
  for j = 1 to NP do
    Επέλεξε τυχαία  $r_{1,2,3} \in [1..NP]$ ,  $r_1 \neq r_2 \neq r_3 \neq j$ 
    Δημιούργησε δοκιμαστική πιθανή λύσης  $X \leftarrow S(r, F, Cr, Pop)$ 
    Έλεγχξε την αυθεντικότητα των ορίων if ( $x_i \notin [L, H]$ )
    Επέλεξε τη βέλτιστη λύση ( $X$  ή  $Pop_j$ ) και update του iBest αν
    χρειάζεται
  end for
end for
```

Εκείνο που καθιστά τον αλγόριθμο της DE ιδιαίτερα επιτυχημένο στην εφαρμογή προβλημάτων είναι ο τρόπος με τον οποίο επιλέγει και διαχειρίζεται τις δοκιμαστικές της πιθανές λύσεις.

### 3.6. Νεωτερική Differential Evolution

Στη διαδεδομένη της μορφή πλέον, η DE αποτελεί χαρακτηριστικό εξελικτικό αλγόριθμο που καλείται να διαχειριστεί έναν πληθυσμό πιθανών λύσεων.

#### 3.6.1. Η λογική της Νεωτερικής Differential Evolution

Το σύνολο παραμέτρων του προβλήματος λαμβάνεται υπόψη ως ένα διάνυσμα παραμέτρων και περιγράφεται από μια πιθανή λύση. Κάθε πιθανή λύση αποτελείται από D μεταβλητές, τα λεγόμενα γονίδια, ενώ πολλές πιθανές λύσεις μαζί συνθέτουν έναν πληθυσμό. Έτσι, η μέθοδος χρησιμοποιεί NP διανύσματα παραμέτρων ως

πληθυσμό για κάθε γενιά GEN. Το πλήθος NP δε μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της ελαχιστοποίησης. Το αρχικό διάνυσμα πληθυσμού, εφόσον δεν υπάρχει καμία πληροφορία για τη βέλτιστη τοπικότητα, επιλέγεται με τυχαία γένεση πιθανών λύσεων εντός των περιορισμών, συνήθως με τη χρήση της συνάρτησης *rand()* και θα πρέπει να καλύπτει ολόκληρο τον παραμετρικό χώρο. Η διαδικασία αυτή είναι αυτή της *αρχικοποίησης*.

Στη συνέχεια, σε κάθε γενιά γίνεται ενημέρωση όλων των πιθανών λύσεων του πληθυσμού. Για κάθε πιθανή λύση *ind* εξάγεται τυχαία από τον πληθυσμό ένα σύνολο  $\pi$  άλλων individuals, που είναι απαραίτητο για τη διαφοροποίηση. Το αποτέλεσμα της διαφοροποίησης θα είναι μια πιθανή λύση δοκιμής της μορφής:  $\omega = \beta + F \cdot \delta$ , όπου F: η σταθερά διαφοροποίησης,  $\delta$ : το διάνυσμα διαφοράς και  $\beta$ : το διάνυσμα βάσης. Η διαδικασία αυτή είναι γνωστή ως *μετάλλαξη (mutation)*. Έτσι, για την περίπτωση που γίνεται εξαγωγή τριών πιθανών λύσεων, θα προκύπτει το εξής:

$$\omega = \xi_3 + F \cdot (\xi_2 - \xi_1).$$

Για την παραγωγή μιας νέας πιθανής λύσης εφαρμόζονται οι λειτουργίες της διαφοροποίησης και μετάβασης. Οι παράμετροι της πιθανής λύσης δοκιμής  $\omega$  αναμειγνύονται τότε με τις παραμέτρους ενός άλλου προκαθορισμένου διανύσματος, την *πιθανή λύση στόχου (ind)*, για να καταλήξουν τελικά στην πιθανή λύση δοκιμής. Η εν λόγω αναδιάταξη των παραμέτρων αναφέρεται ως *μετάβαση (crossover)*. Η νέα πιθανή λύση δοκιμής κληρονομεί στοιχεία από την *πιθανή λύση στόχο* βάση πιθανοτήτων:

$$\omega_j = \begin{cases} \omega_j & \text{if } rand_j > Cr \\ ind_j & \text{otherwise} \end{cases},$$

όπου  $j = 1, \dots, D$ ,  $rand_j \in [0,1]$  και  $Cr \in [0,1]$  που είναι και η σταθερά μετάβασης.

Έπειτα, εκτελείται η διαδικασία της επιλογής για τη διάκριση του βέλτιστου. Η λειτουργία αυτή βασίζεται στη σύγκριση των τιμών της αντικειμενικής συνάρτησης με εκείνες των πιθανών λύσεων στόχου και δοκιμής. Αν η πιθανή λύση δοκιμής τείνει σε χαμηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με την πιθανή λύση στόχο, τότε η πρώτη αντικαθιστά τη δεύτερη στην επόμενη γενιά. Αυτή η τελευταία λειτουργία αποτελεί την «*άπληστη επιλογή*».

Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται προς επίτευξη καλύτερης σύγκλησης του αλγορίθμου. Συνοπτικά δηλαδή, η θεμελιώδης ιδέα της DE στο σύνολο είναι: ξεκινώντας από τυχαίο χώρο να γίνεται αναζήτηση προς κάποια κατεύθυνση της βέλτιστης λύσης προσαρμόζοντας το μήκος βήματος εγγενώς στην εξελικτική διαδικασία. [10]

### 3.6.2. Διακρίσεις και πλεονεκτήματα της Νεωτερικής DE

Η νεωτερική DE διατηρεί τα χαρακτηριστικά της αρχικοποίησης και εκτίμησης των εξελικτικών αλγορίθμων ανέπαφες. Ένας γενικός εξελικτικός αλγόριθμος χρησιμοποιεί ένα μηχανισμό επιλογής γονέων με βάση τη βέλτιστη πιθανότητα αναπαραγωγής. Η DE από την άλλη, εφαρμόζει αρκετές διαφοροποιήσεις (διαφοροποίηση και μετάβαση) διαδοχικά σε κάθε πιθανή λύση που καταλήγουν τελικά στο σχηματισμό της πιθανής λύσης δοκιμής. Επιπλέον, στην περίπτωση που η πιθανή λύση δοκιμής είναι καλύτερη ή ίση από με την αντίστοιχη προγενέστερη, την αντικαθιστά, βελτιώνοντας έτσι την καταλληλότητα της επιλεγμένης πιθανής λύσης.

Το πρώτο σημείο που είναι σημαντικό είναι ο διαχωρισμός της διαφοροποίησης και της μετάβασης στη νεωτερική DE. Φυσικά, η συσχέτισή τους μπορεί να γίνει οποτεδήποτε είναι επιθυμητό. Ωστόσο, ένας τέτοιος διαχωρισμός που υφίσταται εδώ παρέχει προφανή πλεονεκτήματα. Συγκεκριμένα, στη θέση ενός ελαχίστου, η ανεξάρτητη μελέτη και χρήση των λειτουργιών δίνει τη δυνατότητα να αποκλείει η μία την άλλη και να είναι έτσι δυνατή η ανάλυση της συμπεριφοράς και επιρροής τους στη διαδικασία της αναζήτησης.

Επιπλέον, η διαφορική μετάλλαξη της κλασσικής DE γενικεύεται στη διαφοροποίηση στη νεωτερική DE. Από θεωρητική άποψη, παρέχει ένα ανεξάντλητο φάσμα στρατηγικών που υπακούν στη μοναδική και ταυτόχρονα καθολική αρχή βελτιστοποίησης:  $\omega = \beta + F \cdot \delta$ . Πρακτικά, είναι εφικτή και εύκολη πλέον η διαχείριση των στρατηγικών αυτών ανάλογα με τις ανάγκες του ζητήματος βελτιστοποίησης.

Το επόμενο σημαντικό σημείο είναι η λειτουργία της μετάβασης αυτή καθ' αυτή. Το βασικό στοιχείο της μετάβασης είναι η *πιθανή λύση δοκιμής* που δημιουργείται στα πλαίσια της διαφοροποίησης, αντί για τη χρήση της τρέχουσας. Αυτή η εξέλιξη, αλλάζει τη φιλοσοφία της αναζήτησης της λύσης. Αν πριν οι λειτουργίες διαφοροποίησης θεωρηθούν ως μετάλλαξη μιας τρέχουσας πιθανής λύσης προσομοιάζοντας τις εξελικτικές στρατηγικές, τότε η κύρια προσοχή πλέον πρέπει να επικεντρωθεί στη δημιουργία μια καινούριας, πιο τέλειας πιθανής λύσης. Μια τέτοια πιθανή λύση παράγεται αρχικά στη βάση της πραγματικής κατάστασης του πληθυσμού και σίγουρα μπορεί να κληρονομήσει κάποιες ιδιότητες μια τρέχουσας πιθανής λύσης.

Επιπλέον, έχει αποσυρθεί στη νεωτερική DE η παράμετρος αμοιβαιότητας  $Rnd \in [1, \dots, D]$ . Ο λόγος είναι ότι απλά ο ρόλος της μπορεί να παρακαμφθεί όσον αφορά στη βελτιστοποίηση και να προσομοιωθεί η λειτουργία της με τιμή της σταθεράς μετάβασης  $Cr$ . Για παράδειγμα, όταν  $Cr = 0$  (απουσία δηλαδή της σταθεράς μετάβασης) τότε η νέο-δημιουργημένη πιθανή λύση κληροδοτείται εξ' ολοκλήρου. Στην περίπτωση που  $Cr = 1$ , τότε η τρέχουσα πιθανή λύση κληροδοτείται εξ' ολοκλήρου. Τέλος, σε άλλες περιπτώσεις όπου  $Cr \approx 1 - 1/D$ , τότε επιτρέπεται να κληρονομηθεί ο ελάχιστος αριθμός νέο-δημιουργηθέντων γονιδίων μιας πιθανής

λύσης. Παρόλο που δεν εγγυάται απόλυτα ότι τουλάχιστον ένα νέο γονίδιο θα περάσει στην επόμενη γενιά (όπως γίνεται στην κλασική DE), σίγουρα εγγυάται ότι υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να γίνει αυτό.

Ακολούθως, φαίνονται τα πρωταρχικά πλεονεκτήματα του νέου αλγορίθμου, όπως δίνονται στο [10]:

- Αποτελεσματικότητα: δίνεται έμφαση στην αποτελεσματική δημιουργία ενός νέου μέλους του πληθυσμού αντί για την μετάλλαξη των τρεχόντων πιθανών λύσεων.
- Ευελιξία: ο νέος αλγόριθμος είναι πιο ευέλικτος στη χρήση και προσαρμόζεται σε τροποποιήσεις. Έτσι, προτιμάται ως επιλογή για ερευνητικούς σκοπούς. Συγκεκριμένα, η απομόνωση στην κυκλική διαδικασία της διαφοροποίησης, της μετάβασης και επιλογής ανάμεσά τους επιτρέπει τη φυσική και εύκολη καθοδήγηση από την εξελικτική διαδικασία.
- Είναι θεμελιώδης: η αρχική μορφή του αλγορίθμου αποτελεί μόνο μια ειδική περίπτωση της νεωτερικής DE. Στη διόρθωση της στρατηγικής διαφοροποίησης και κατάλληλης μετάβασης, οι λειτουργίες ποικιλίας μπορούν να ενοποιηθούν σε μια εξίσωση μόνο. Επιπλέον, η διαφοροποίηση ενσωματώνει τις βασικές ιδέες της βελτιστοποίησης. Ουσιαστικά, η λειτουργία της διαφοροποίησης γενικεύει τις καθολικές έννοιες της αναζήτησης λύσης όπως στην περίπτωση της παραδοσιακής DE έναντι των νέων μεθόδων βελτιστοποίησης.

### 3.7. Στρατηγικές Αναζήτησης Differential Evolution

---

Κοινό χαρακτηριστικό των μεθόδων βελτιστοποίησης είναι το γεγονός ότι η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης του προβλήματος ξεκινά από ένα σημείο βάση και συνεχίζει καθοδηγούμενη προς κάποια συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η προσδοκία είναι πάντα ότι η σύγκλιση στη βέλτιστη λύση θα είναι ταχεία και ακριβής.

Σε αυτή τη λογική βασίζεται και η διαδικασία της διαφοροποίησης που βασίζεται στον τύπο σχέσης:

$$\omega = \beta + F \cdot \delta$$

όπου  $\beta$ : διάνυσμα βάση και  $\delta$ : διάνυσμα διαφοράς.

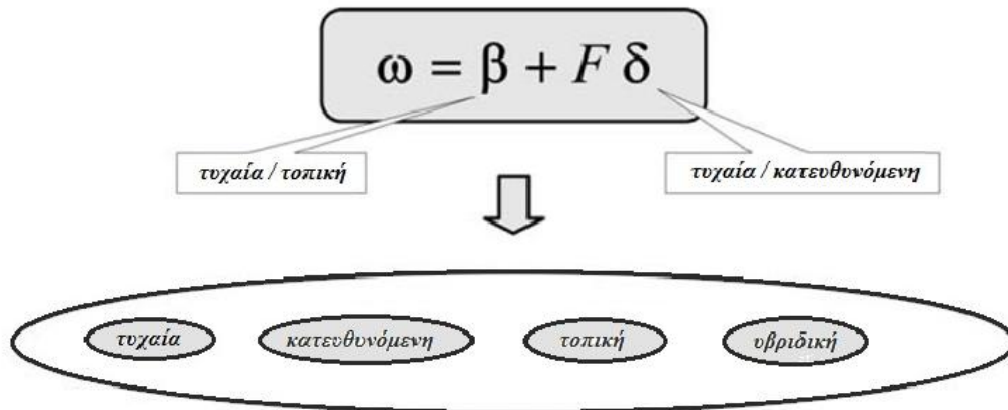
#### 3.7.1. Κατηγοριοποίηση στρατηγικών αναζήτησης

---

Η ιδιότητα της διαφοροποίησης δίνει τη δυνατότητα εφαρμογής πολλών διαφορετικών σχημάτων στρατηγικής αναζήτησης της βέλτιστης λύσης. Η δημιουργία τους σχετίζεται με την επιλογή των διανυσμάτων  $\beta$  και  $\delta$  στην παραπάνω σχέση. Όσον αφορά στο  $\beta$ , αυτή μπορεί να είναι τυχαία ή τοπική. Στην περίπτωση της τοπικής επιλογής, δίνεται προτεραιότητα στην καλύτερη πιθανή λύση που προέρχεται από τον

πληθυσμό. Στην περίπτωση του  $\delta$ , η κατασκευή του μπορεί να γίνει με επιλογή δύο βαρύκεντρων που θα είναι είτε *τυχαία* είτε *βασισμένη στις προκύπτουσες τιμές στην αντικειμενική συνάρτηση*. Έτσι, το προκύπτον διάνυσμα  $\delta$  είναι είτε προσανατολισμένο είτε κατευθυνόμενο.

Τελικά, η συγκεκριμένη σχέση οδηγεί στην κατηγοριοποίηση των διάφορων στρατηγικών σε τέσσερις ομάδες: *τυχαία*, *κατευθυνόμενη*, *τοπική* και *υβριδική*, όπως φαίνεται και στην Εικόνα 8 : Τέσσερις κατηγορίες ομάδων στρατηγικών, [10]:



Εικόνα 8 : Τέσσερις κατηγορίες ομάδων στρατηγικών: τυχαία (random), κατευθυνόμενη (directed), τοπική (local) και υβριδική (hybrid).

Σύμφωνα με το [10] και με βάση τις τιμές που προκύπτουν από την αντικειμενική συνάρτηση, οι πιθανές στρατηγικές χωρίζονται στις εξής τέσσερις ομάδες:

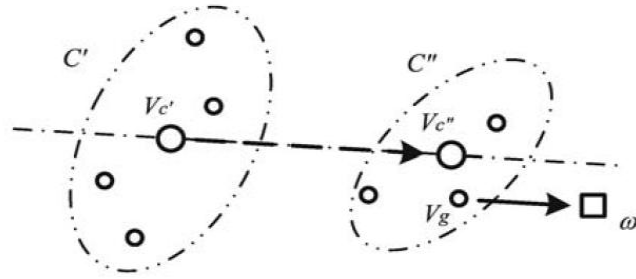
- **Ομάδα RAND:** περιέχει τις στρατηγικές όπου η πιθανή λύση δοκιμής δημιουργείται χωρίς κάποια πληροφορία για τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Στο είδος στρατηγικής RAND, Εικόνα 9, [10], τυχαία εξαγόμενες μεταβλητές  $X_i$  χωρίζονται αυθαίρετα σε δύο κατηγορίες  $C'$  και  $C''$  και περιέχουν  $n'$  και  $n''$  στοιχεία αντίστοιχα. Τότε, τα βαρύκεντρα  $V_{C'}$  και  $V_{C''}$  υπολογίζονται από την ακόλουθη σχέση:

$$V_C = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \text{ όπου } n = n', n''.$$

Υπάρχουν δύο ενδεχόμενα για την επιλογή του διανύσματος βάσης  $\beta = V_g$ :

1. Χρήση πιθανής λύσης από τις κλάσεις  $V_g \in C' \cup C''$
2. Χρήση πιθανής λύσης από τον πληθυσμό  $V_g \notin C' \cup C''$

Έτσι, η σχέση διαφοροποίησης που προκύπτει για αυτή την ομάδα στρατηγικών είναι:  $\omega = V_g + F \cdot (V_{C''} - V_{C'})$



RAND

Εικόνα 9 : Ομάδα στρατηγικών RAND

- **Ομάδα RAND/DIR:** αποτελείται από τις στρατηγικές που χρησιμοποιούν τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης για να ορίσουν μια «καλή» κατεύθυνση. Η ομάδα αυτή μιμείται τη λειτουργία της συνάρτησης κλίσης. Στις στρατηγικές RAND/DIR, Εικόνα 10 : Ομάδα στρατηγικών RAND/DIR, [10], οι τυχαία εξαγόμενες μεταβλητές  $X_i$  χωρίζονται αυθαίρετα σε δύο κατηγορίες  $C_+$  και  $C_-$  που περιέχουν  $n_+$  και  $n_-$  στοιχεία έτσι ώστε για κάθε στοιχείο της κλάσης  $C_+$  η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης να είναι μικρότερη από την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που θα προέκυπτε από κάθε στοιχείο της κλάσης  $C_-$ . Δηλαδή είναι:

$$f(X_i) \leq f(X_j) : (\forall X_i \in C_+) \wedge (\forall X_j \in C_-)$$

$$\text{όπου } i = 1, \dots, n_+ \text{ και } j = 1, \dots, n_-$$

Έπειτα πρέπει να γίνει εύρεση του μέγιστου και ελάχιστου στοιχείου της κάθε κλάσης:

$$f(X_{C_+}^{min}) \leq f(X_i) \leq f(X_{C_+}^{max}), \quad \forall X_i \in C_+$$

$$f(X_{C_-}^{min}) \leq f(X_i) \leq f(X_{C_-}^{max}), \quad \forall X_i \in C_-$$

ώστε να υπολογιστούν οι θετικές και αρνητικές μετατοπίσεις εντός των πλαισίων των κλάσεων:

$$V_s^\pm = \lambda \cdot (X_{C_\pm}^{min} - X_{C_\pm}^{max}), \quad \text{όπου } \lambda = 1/2 - \text{σταθερά επιρροής.}$$

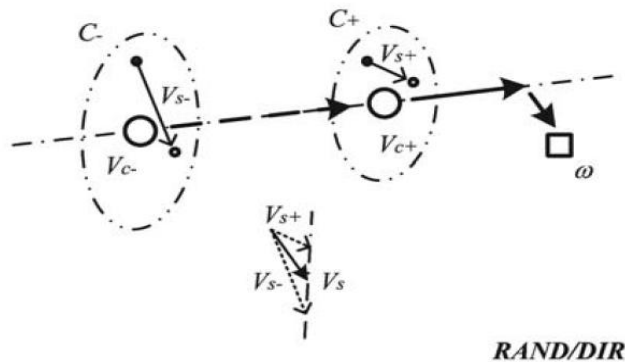
Συνεπώς, η μέση μετατόπιση υπολογίζεται ότι είναι ίση με:

$$V_s = (V_s^+ + V_s^-)/2.$$

Τελικά, η σχέση διαφοροποίησης για την ομάδα στρατηγικών RAND/DIR είναι:

$$\omega = V_{C_+} + F \cdot (V_{C_+} - V_{C_-} + V_s)$$

όπου  $V_{C_+}$  και  $V_{C_-}$  είναι τα βαρύκεντρα των  $C_+$  και  $C_-$  αντίστοιχα.

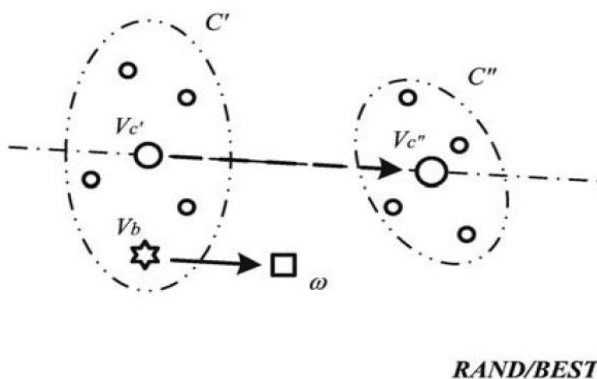


Εικόνα 10 : Ομάδα στρατηγικών RAND/DIR

- Ομάδα RAND/BEST:** χρησιμοποιεί τη βέλτιστη πιθανή λύση για να σχηματίσει εκείνη της δοκιμής. Πρόκειται για μια χαστική έρευνα γύρω από τη βέλτιστη λύση. Στις στρατηγικές RAND/BEST, Εικόνα 11 : Ομάδα στρατηγικών RAND/BEST, [10], οι τυχαία εξαγόμενες μεταβλητές  $X_i$  χωρίζονται αυθαίρετα σε δύο κατηγορίες  $C'$  και  $C''$  και περιέχουν  $n'$  και  $n''$  στοιχεία αντίστοιχα. Η διαδικασία μέχρι στιγμής είναι όμοια με εκείνη των στρατηγικών RAND. Ωστόσο, ως διάνυσμα βάσης  $\beta$  πλέον εκλαμβάνεται η τρέχουσα βέλτιστη πιθανή λύση  $V_b$ .

Τελικά, η σχέση διαφοροποίησης για την ομάδα στρατηγικών RAND/ BEST διαμορφώνεται ως εξής:

$$\omega = V_b + F \cdot (V_{C''} - V_{C'})$$

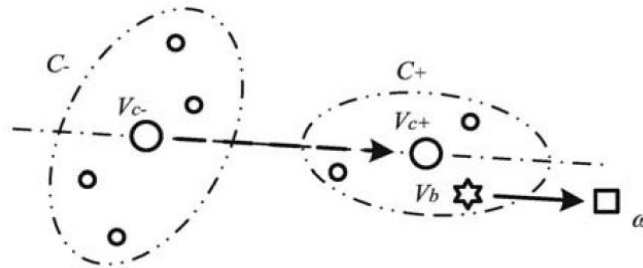


Εικόνα 11 : Ομάδα στρατηγικών RAND/BEST

- **Ομάδα RAND/BEST/DIR:** αποτελεί συνδυασμό των τελευταίων δύο κατηγοριών σε μια, περιλαμβάνοντας όλα τους τα πλεονεκτήματα. Εκτός από την πληροφορία της κατεύθυνσης, λαμβάνει υπόψη και τη βέλτιστη πιθανή λύση. Όσον αφορά στο διαχωρισμό των εξαγόμενων πιθανών λύσεων σε δύο ομάδες, την εύρεση των βαρύκεντρων και τη μέση μετατόπιση, αυτά είναι ίδια με την περίπτωση στρατηγικών RAND/DIR.

Έτσι, τελικά, η προκύπτουσα σχέση διαφοροποίησης είναι:

$$\omega = V_b + F \cdot (V_{C_+} - V_{C_-} - V_S)$$



*RAND/BEST/DIR*

**Εικόνα 12 : Ομάδα στρατηγικών RAND/BEST/DIR.**

Ας σημειωθεί ότι σε όλες τις παραπάνω σχέσεις η παράμετρος  $F$  είναι η σταθερά διαφοροποίησης και σχετίζεται με το ρυθμό σύγκλισης της μεθόδου. Το πεδίο τιμών αυτής αρχικά συνιστούταν να κυμαίνεται στο εύρος τιμών  $(0, 2+]$ . Ωστόσο, για λόγους γενίκευσης των στρατηγικών και να μπορεί να υφίσταται διαφοροποίηση τόσο για θετικές όσο και αρνητικές κατευθύνσεις, μπορεί να επιλεγεί το πεδίο τιμών:

$$F \in (-1, 0) \cup (0, 1+]$$

Η τελική επιλογή της κατηγορίας που θα χρησιμοποιηθεί είναι άμεσα εξαρτημένη με τη φύση του προβλήματος και τις ανάγκες του ζητήματος βελτιστοποίησης. Για παράδειγμα, η επιλογή της βέλτιστης πιθανής λύσης ή μιας καλής κατεύθυνσης μπορεί να περιορίζει πολύ το χώρο αναζήτησης κάνοντας τον αλγόριθμο πιο σταθερό. Από την άλλη, είναι πιθανό να αποδειχθεί μη αποτελεσματικό σε περιπτώσεις σύνθετων προβλημάτων με πολλά τοπικά ελάχιστα.

### 3.8. Παραδείγματα στρατηγικών αναζήτησης

Ο τομέας αυτός περιλαμβάνει μια περιγραφή των στρατηγικών που περιλαμβάνει η κάθε ομάδα. Σε καθεμία από αυτές παρατίθεται η αντίστοιχη σχέση διαφοροποίησης.



Αρχικά, παρατίθενται οι επεξηγήσεις για τους συμβολισμούς και παραμέτρους που περιλαμβάνονται στις εν λόγω σχέσεις:

- $ind$ : (τρέχουσα ) πιθανή λύσης στόχος
- $\{x_i\}$ : ομάδα εξαγόμενων πιθανών λύσεων
- $V^* \in \{x_i\}$ : πρόκειται για την πιθανή λύση για την οποία προκύπτει η ελάχιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης μεταξύ των εξαγόμενων πιθανών λύσεων και της πιθανής λύσης στόχου
- $V'$  και  $V''$ : πρόκειται για άλλες εξαγόμενες πιθανές λύσεις. Στην περίπτωση που υπάρχουν περισσότερες από 3 εξαγόμενες πιθανές λύσεις αυτές συμβολίζονται ως  $V_1, V_2, V_3, \dots$
- $V_b$ : η βέλτιστη πιθανή λύση
- $V_S$ : διάνυσμα μέσης μετατόπισης
- $\delta$ : διάνυσμα διαφοράς
- $\varphi$ : ειδική σταθερά διαφοροποίησης
- $\beta$ : διάνυσμα βάση, που αποτελεί και το σημείο εφαρμογής του διανύσματος διαφοράς

### 3.8.1. Στρατηγικές RAND

Η γενική σχέση διαφοροποίησης που χαρακτηρίζει τις στρατηγικές αυτές είναι:

$$\omega = V_g + F \cdot (V_{C''} - V_{C'})$$

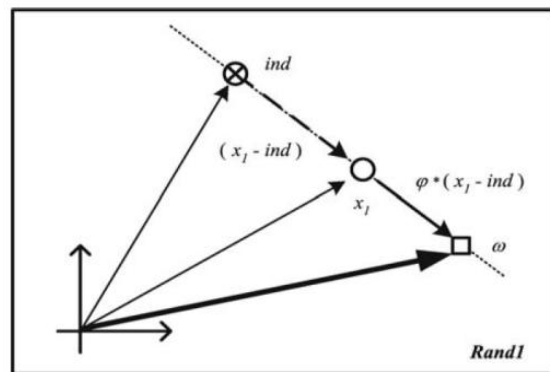
#### 3.8.1.1. RAND1 στρατηγική

Στη στρατηγική αυτή, (Εικόνα 13 : Στρατηγική Rand13), [10], μόνο μια τυχαία πιθανή λύση  $x_1$  εξάγεται από τον πληθυσμό. Ταυτόχρονα, αυτή καθορίζει και το διάνυσμα βάση  $\beta$  της στρατηγικής ενώ το διάνυσμα διαφοράς είναι:  $\delta = x_1 - ind$ . Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = x_1 + \varphi \cdot (x_1 - ind)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_g = V_{C''} = x_1$
- $V_{C'} = ind$
- $F = \varphi$



Εικόνα 13 : Στρατηγική Rand1

Σημειώνεται ότι συγκεκριμένη προσέγγιση προσφέρει  $(NP - 1)$  δυνατότητες για την τιμή της πιθανής λύσης δοκιμής.

### 3.8.1.2. RAND2 στρατηγική

---

Στη στρατηγική αυτή, εξάγονται δύο τυχαίες πιθανές λύσεις,  $x_1$  και  $x_2$  από τον πληθυσμό. Τα διανύσματα βάσης  $\beta$  και διαφοράς  $\delta$  της στρατηγικής που προκύπτουν είναι αντίστοιχα:  $\beta = x_1$  και  $\delta = x_1 - x_2$ . Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = x_1 + \varphi \cdot (x_1 - x_2)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_g = V_{C''} = x_1$
- $F = \varphi$
- $V_{C'} = x_2$

Στη στρατηγική αυτή προσφέρονται  $(NP - 1) \cdot (NP - 2)$  δυνατότητες για τις τιμές των πιθανών λύσεων δοκιμής.

### 3.8.1.3. RAND3 στρατηγική

---

Στη στρατηγική αυτή, εξάγονται τρεις τυχαίες πιθανές λύσεις,  $x_1$ ,  $x_2$  και  $x_3$  από τον πληθυσμό. Τα διανύσματα βάσης  $\beta$  και διαφοράς  $\delta$  της στρατηγικής που προκύπτουν είναι αντίστοιχα:  $\beta = x_3$  και  $\delta = x_1 - x_2$ . Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = x_3 + \varphi \cdot (x_1 - x_2)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_g = x_3$
- $V_{C'} = x_2$
- $V_{C''} = x_1$
- $F = \varphi$

Στη στρατηγική αυτή προσφέρονται  $(NP - 1) \cdot (NP - 2) \cdot (NP - 3)$  δυνατότητες για τις τιμές των πιθανών λύσεων δοκιμής.

### 3.8.1.4. RAND4 στρατηγική

---

Στη στρατηγική αυτή, εξάγονται τέσσερις τυχαίες πιθανές λύσεις,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  και  $x_4$  από τον πληθυσμό. Τα διανύσματα βάσης  $\beta$  και διαφοράς  $\delta$  της στρατηγικής που προκύπτουν είναι αντίστοιχα:  $\beta = x_2$  και  $\delta = x_2 - x_1 + x_4 - x_3$ . Το νέο χαρακτηριστικό στη RAND4 είναι το γεγονός ότι η διαφορά δημιουργείται από την υπέρθεση δύο τυχαίων κατευθύνσεων:  $x_2 - x_1$  και  $x_4 - x_3$ . Τελικά, η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = x_2 + \varphi * (x_2 - x_1 + x_4 - x_3)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_g = x_2$
- $V_{C'} = \frac{x_1 + x_3}{2}$
- $V_{C''} = \frac{x_2 + x_4}{2}$
- $F = 2\varphi$

Στη στρατηγική αυτή προσφέρονται  $(NP - 1) \cdot (NP - 2) \cdot (NP - 3) \cdot (NP - 4)$  δυνατότητες συνδυασμών τυχαίων πιθανών λύσεων.

### 3.8.1.5. RAND5 στρατηγική

Στη στρατηγική αυτή, εξάγονται πέντε τυχαίες πιθανές λύσεις,  $x_1, x_2, x_3, x_4$  και  $x_5$  από τον πληθυσμό. Η βασική διαφορά στη λειτουργία της RAND5 με τη RAND4 είναι το γεγονός ότι το διάνυσμα βάσης  $\beta$  είναι:  $\beta = V_g = x_5$ . Το διάνυσμα διαφοράς  $\delta$  της στρατηγικής παραμένει:  $\delta = x_2 - x_1 + x_4 - x_3$ . Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = x_5 + \varphi * (x_2 - x_1 + x_4 - x_3)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_g = x_5$
- $V_{C'} = \frac{x_1 + x_3}{2}$
- $V_{C''} = \frac{x_2 + x_4}{2}$
- $F = \varphi/2$

Στη στρατηγική αυτή προσφέρονται  $(NP - 1) \cdot (NP - 2) \cdot (NP - 3) \cdot (NP - 4) \cdot (NP - 5)$  δυνατότητες συνδυασμών εξαγόμενων διανυσμάτων.

## 3.8.2. Στρατηγικές RAND/DIR

Η βασική αρχή στις στρατηγικές RAND/DIR παραμένει ίδια με εκείνη των στρατηγικών RAND. Το επιπρόσθετο χαρακτηριστικό σε αυτήν την περίπτωση ωστόσο, είναι ότι η πληροφορία σχετικά με την αντικειμενική συνάρτηση συνηθίζεται να υπολογίζεται προς τη διεύθυνση διαφοροποίησης. Έτσι, η πιθανότητα της βέλτιστης επιλογής διπλασιάζεται.

Η γενική σχέση διαφοροποίησης που χαρακτηρίζει τις στρατηγικές αυτές είναι:

$$\omega = V_{C_+} + F \cdot (V_{C_+} - V_{C_-} + V_S)$$

### 3.8.2.1. RAND1/DIR1 στρατηγική

Η στρατηγική αυτή εξάγει μόνο μια τυχαία πιθανή λύση  $x_1$  από τον πληθυσμό.

Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = V^* + \varphi \cdot (V^* - V')$$

ή ισοδύναμα:

$$\omega = \begin{cases} x_1 + \varphi \cdot (x_1 - ind) & \text{αν } f(x_1) < f(ind) \\ ind + \varphi \cdot (ind - x_1) & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C+} = V^*$
- $V_{C-} = V'$
- $V_S = 0$
- $F = \varphi$

### 3.8.2.2. RAND2/DIR1 στρατηγική

Η στρατηγική αυτή εξάγει δύο τυχαίες πιθανές λύσεις,  $x_1$  και  $x_2$ , από τον πληθυσμό αντί για μία, όπως συνέβαινε στη στρατηγική RAND1/DIR1. Η νέα πιθανή λύση αντικαθιστά τη λειτουργία της *ind*, ενώ τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά παραμένουν όμοια.

Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = V^* + \varphi \cdot (V^* - V')$$

ή ισοδύναμα:

$$\omega = \begin{cases} x_1 + \varphi \cdot (x_1 - x_2) & \text{αν } f(x_1) < f(x_2) \\ x_2 + \varphi \cdot (x_2 - x_1) & \text{αλλιώς} \end{cases}$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C+} = V^*$
- $V_{C-} = V'$
- $V_S = 0$
- $F = \varphi$

### 3.8.2.3. RAND3/DIR2 στρατηγική

Η στρατηγική αυτή εξάγει από τον πληθυσμό τρεις τυχαίες πιθανές λύσεις,  $x_1$ ,  $x_2$  και  $x_3$ . Τα στοιχεία αυτά ταξινομούνται σύμφωνα με τις τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή τους στην αντικειμενική συνάρτηση έτσι ώστε:

$$f(V^*) \leq f(V') \text{ και } f(V^*) \leq f(V'') \text{ όπου } V^*, V', V'' \subseteq \{x_1, x_2, x_3\}$$

Επιπλέον, ως διάνυσμα βάσης  $\beta$  εκλαμβάνεται η πιθανή λύσης για την οποία προκύπτει η βέλτιστη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση,  $V^*$ , ενώ η κατεύθυνση ορίζεται από δύο διαφορετικά διανύσματα κατεύθυνσης:

$$\delta_1 = (V^* - V') \text{ και } \delta_2 = (V^* - V'')$$

Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = V^* + \varphi \cdot (2V^* - V' - V'')$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C_+} = V^*$
- $V_{C_-} = \frac{V' + V''}{2}$
- $V_S = 0$
- $F = 2\varphi$

### 3.8.2.4. RAND3/DIR3 στρατηγική

Η στρατηγική αυτή ακολουθεί τη λογική της αμέσως προηγούμενης. Εξάγει τρεις τυχαίες πιθανές λύσεις από τον πληθυσμό, τις  $x_1$ ,  $x_2$  και  $x_3$  οι οποίες ταξινομούνται σύμφωνα με τις τιμές που προκύπτουν από την εφαρμογή τους στην αντικειμενική συνάρτηση έτσι ώστε:  $f(V^*) \leq f(V') \leq f(V'')$ . Επιπλέον, συμμετοχή στο σχηματισμό της γενικής σχέσης έχει πλέον και το διάνυσμα μέσης μετατόπισης,  $V_S$ , το οποίο σχηματίζεται με τη σύγκριση των τιμών που προκύπτουν στην αντικειμενική συνάρτηση από τις πιθανές λύσεις  $V'$  και  $V''$ .

Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = V^* + \varphi * \left( 2V^* - \frac{1}{2}V' - \frac{3}{2}V'' \right)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C_+} = V^*$
- $V_{C_-} = \frac{V' + V''}{2}$
- $V_S = \frac{V' - V''}{4}$
- $F = 2\varphi$

### 3.8.2.5. RAND4/DIR2 στρατηγική

Στη στρατηγική αυτή, γίνεται επιλογή τεσσάρων τυχαίων πιθανών λύσεων,  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  και  $x_4$  από τον πληθυσμό. Αυτές συμβολίζονται με  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$  και  $V_4$  ώστε με βάση την εφαρμογή τους στην αντικειμενική συνάρτηση να προκύπτει η εξής κατάταξη:

$$f(V_1) \leq f(V_2) \text{ και } f(V_3) \leq f(V_4).$$

Ως διάνυσμα βάσης  $\beta$  επιλέγεται:  $\beta = V_1$ , ενώ η σχέση διαφοροποίησης είναι τελικά:

$$\omega = V_1 + \varphi * (V_1 - V_2 + V_3 - V_4)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C_+} = \frac{V_1 + V_3}{2}$
- $V_{C_-} = \frac{V_2 + V_4}{2}$
- $V_S = 0$
- $F = 2\varphi$

### 3.8.2.6. RAND4/DIR3 στρατηγική

---

Η στρατηγική αυτή αποτελεί εξέλιξη της Rand3/Dir2 στρατηγικής. Η διαφορά εδώ είναι ότι πλέον εξάγονται τέσσερις τυχαίες πιθανές λύσεις,  $x_1, x_2, x_3$  και  $x_4$  από τον πληθυσμό και με βάση αυτές σχηματίζονται τελικά τρεις κατευθύνσεις.

Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = V^* + \varphi * (3V^* - V_1 - V_2 - V_3)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C+} = V^*$
- $V_{C-} = \frac{V_1+V_2+V_3}{3}$
- $V_S = 0$
- $F = 3\varphi$

### 3.8.2.7. RAND5/DIR4 στρατηγική

---

Ακολουθώντας τη λογική των προηγούμενων στρατηγικών, η RAND5/DIR4 κάνει τυχαία επιλογή πέντε πιθανών λύσεων,  $x_1, x_2, x_3, x_4$  και  $x_5$  από τον πληθυσμό που αποτελούν τη βάση για το σχηματισμό τεσσάρων κατευθύνσεων. Ο σκοπός αύξησης του αριθμού των εξαγόμενων πιθανών λύσεων είναι να καθορίζεται με μεγαλύτερη ακρίβεια η κατεύθυνση καθόδου εκμεταλλευόμενοι έτσι καλύτερα τη διαθέσιμη πληροφορία για την αντικειμενική συνάρτηση ενώ ταυτόχρονα να γίνεται πιο ολοκληρωμένη εξερεύνηση του χώρου.

Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = V^* + \varphi * (3V^* - V_1 - V_2 - V_3 - V_4)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C+} = V^*$
- $V_{C-} = \frac{V_1+V_2+V_3+V_4}{3}$
- $V_S = 0$
- $F = 4\varphi$

### 3.8.3. Στρατηγικές RAND/BEST

---

Η ομάδα των στρατηγικών RAND/BEST χαρακτηρίζεται από τυχαία τοπική αναζήτηση γύρω από τη βέλτιστη πιθανή λύση του πληθυσμού. Η γενική αρχή παραμένει παρόμοια με εκείνη των στρατηγικών RAND, με τη διαφορά ότι εδώ το *διάνυσμα βάσης  $\beta$*  είναι πάντα η βέλτιστη πιθανή λύση  $V_b$ . Μια τέτοια προσέγγιση παρέχει κατάλληλα μια τοπική αναζήτηση, ειδικά όταν η κλίση της αντικειμενικής συνάρτησης τείνει στο μηδέν και οι σχετικές μέθοδοι κρίνονται ανεπιτυχείς. Η γενική σχέση διαφοροποίησης που χαρακτηρίζει τις στρατηγικές αυτές είναι:

$$\omega = V_b + F \cdot (V_{C''} - V_{C'})$$

### 3.8.3.1. RAND1/BEST στρατηγική

Στη στρατηγική αυτή, μόνο μια τυχαία πιθανή λύση  $x_1$  εξάγεται από τον πληθυσμό, η οποία καθορίζει και το διάνυσμα διαφοράς:  $\delta = x_1 - ind$ . Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = V_b + \varphi \cdot (x_1 - ind)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C''} = x_1$
- $V_{C'} = ind$
- $F = \varphi$

### 3.8.3.2. RAND2/BEST στρατηγική

Εξελίσσοντας τη λογική της προηγούμενης στρατηγικής, στη RAND2/BEST εξάγονται δύο τυχαίες πιθανές λύσεις,  $x_1$  και  $x_2$  από τον πληθυσμό, οι οποίες καθορίζουν και το διάνυσμα διαφοράς  $\delta: \delta = x_1 - x_2$ . Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει την εξής μορφή:

$$\omega = V_b + \varphi \cdot (x_2 - x_1)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C''} = x_2$
- $V_{C'} = x_1$
- $F = \varphi$

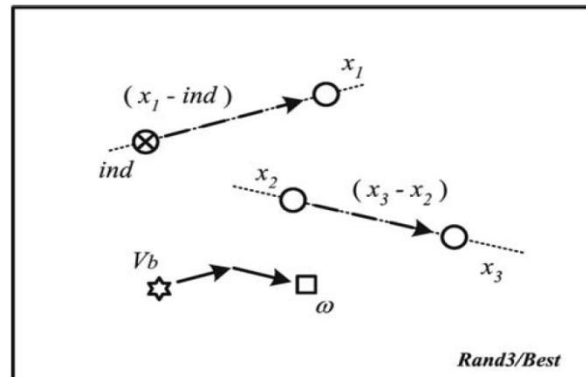
### 3.8.3.3. RAND3/BEST στρατηγική

Στη στρατηγική αυτή, (Εικόνα 14), [10], τρεις τυχαίες πιθανές λύσεις  $x_1, x_2$  και  $x_3$  εξάγονται από τον πληθυσμό. Σε συνδυασμό με την τρέχουσα individual,  $ind$ , δημιουργούν τις δύο κατευθύνσεις που θα ακολουθηθούν. Έτσι, η σχέση διαφοροποίησης που δημιουργείται είναι:

$$\omega = V_b + \varphi * (x_1 - ind + x_3 - x_2)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C''} = \frac{x_1 + x_3}{2}$
- $V_{C'} = \frac{ind + x_2}{2}$
- $F = 2\varphi$



Εικόνα 14: Στρατηγική Rand3/Best

### 3.8.3.4. RAND1/BEST στρατηγική

Τέσσερις είναι οι τυχαίες πιθανές λύσεις,  $x_1, x_2, x_3$  και  $x_4$ , που εξάγονται από τον πληθυσμό σε αυτή τη στρατηγική. Με βάση (αποκλειστικά) αυτές πλέον και χωρίς τη συμβολή της τρέχουσας πιθανής λύσης  $ind$ , δημιουργούνται δύο τυχαίες κατευθύνσεις για τη μέθοδο. Τα λοιπά χαρακτηριστικά αυτής, ταυτίζονται με τη στρατηγική RAND3/BEST. Έτσι, η σχέση διαφοροποίησης είναι τελικά:

$$\omega = V_b + \varphi * (x_1 - x_2 + x_3 - x_4)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C''} = \frac{x_1+x_3}{2}$
- $V_{C'} = \frac{x_2+x_4}{2}$
- $F = 2\varphi$

### 3.8.4. Στρατηγικές RAND/BEST/DIR

Ο συνδυασμός των δύο προηγούμενων ομάδων στρατηγικών, RAND/DIR και RAND/BEST, δημιούργησε τη συγκεκριμένη κατηγορία. Η διαφοροποίηση στην κατεύθυνση καθόδου και της ταυτόχρονης τοπικής έρευνας γύρω από τη βέλτιστη λύση ενσωματώνονται μαζί. Έτσι, το διάνυσμα βάσης  $\beta$  είναι και πάλι η βέλτιστη πιθανή λύση  $V_b$ . Η σχέση διαφοροποίησης παίρνει τη μορφή:

$$\omega = V_b + F \cdot (V_{C_+} - V_{C_-} - V_S)$$

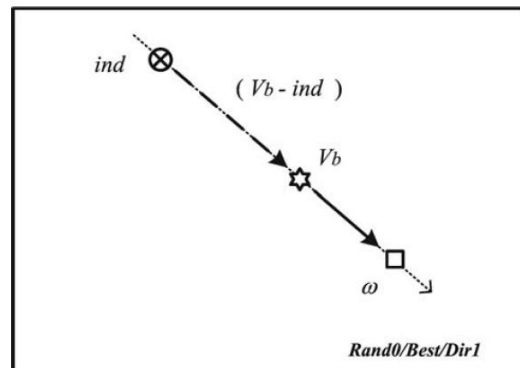
#### 3.8.4.1. RAND0/BEST/DIR1 στρατηγική

Η συγκεκριμένη στρατηγική, (Εικόνα 15), [10], αποτελεί τη μοναδική όπου καμία τυχαία πιθανή λύση δεν εξάγεται από τον πληθυσμό. Η πιθανή λύση δοκιμής δημιουργείται με τη συμβολή της πιθανής λύσης στόχου αλλά και των βέλτιστων πιθανών λύσεων. Με αυτό επιτυγχάνεται μεγάλη απλοποίηση της αναζήτησης που συνεπάγεται και μείωση του χρόνου υπολογισμών. Η σχέση διαφοροποίησης που χαρακτηρίζει τη στρατηγική είναι:

$$\omega = V_b + \varphi * (V_b - ind)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C_+} = V_b$
- $V_{C_-} = ind$
- $V_S = 0$
- $F = \varphi$



Εικόνα 15: Στρατηγική Rand0/Best/Dir1



### 3.8.4.2. RAND1/BEST/DIR1 στρατηγική

---

Στη στρατηγική αυτή, μια τυχαία πιθανή λύση  $x_1$  εξάγεται από τον πληθυσμό ενώ γίνεται και πάλι χρήση της τρέχουσας πιθανής λύσης  $ind$ . Χρησιμοποιώντας ως διάνυσμα βάσης τη βέλτιστη πιθανή λύση  $V_b$  και χάρη στα βαρύκεντρα  $V_{C_+}$  και  $V_{C_-}$  που χρησιμοποιούνται, η κατεύθυνση καθόδου από την  $ind$  προς τη  $V_b$  καθορίζεται από τη  $x_1$ . Η σχέση διαφοροποίησης διαμορφώνεται τελικά ως εξής:

$$\omega = V_b + \varphi * (V_b + x_1 - 2ind)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C_+} = \frac{V_b + x_1}{2}$
- $V_{C_-} = ind$
- $V_S = 0$
- $F = 2\varphi$

### 3.8.4.3. RAND1/BEST/DIR2 στρατηγική

---

Αποτελώντας εξέλιξη της RAND1/BEST/DIR1, η μόνη διαφοροποίηση σε αυτή τη στρατηγική εντοπίζεται στο σχηματισμό των δύο βαρύκεντρων  $V_{C_+}$   $V_{C_-}$ . Το πρώτο απαλλάσσεται από τη συμβολή της  $x_1$  στο σχηματισμό του, την οποία και επωμίζεται το αρνητικό βαρύκεντρο  $V_{C_-}$  σε συνδυασμό με την  $ind$ . Έτσι, η σχέση διαφοροποίησης που προκύπτει είναι:

$$\omega = V_b + \varphi * (2V_b - x_1 - ind)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C_+} = V_b$
- $V_{C_-} = \frac{ind + x_1}{2}$
- $V_S = 0$
- $F = 2$

### 3.8.4.4. RAND2/BEST/DIR1 στρατηγική

---

Δύο είναι οι τυχαίες μεταβλητές πιθανές λύσεις,  $x_1$  και  $x_2$  που εξάγονται από τον πληθυσμό σε αυτή τη στρατηγική. Με τις  $x_1$  και  $x_2$  να συμμετέχουν στο σχηματισμό των βαρύκεντρων, η κατεύθυνση της μεθόδου που κατασκευάζεται με βάση τα διανύσματα  $(x_1 - x_2)$  διαταράσσεται τυχαία από την  $ind$  και τη βέλτιστη  $V_b$ . Η σχέση διαφοροποίησης είναι:

$$\omega = V_b + \varphi * (V_b - ind + x_1 - x_2)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C_+} = \frac{V_b + x_1}{2}$
- $V_{C_-} = \frac{ind + x_2}{2}$
- $V_S = 0$
- $F = 2\varphi$

### 3.8.4.5. RAND2/BEST/DIR3 στρατηγική

Η συγκεκριμένη στρατηγική εξάγει, όπως και η αμέσως προηγούμενη, δύο τυχαίες πιθανές λύσεις  $x_1$  και  $x_2$  από τον πληθυσμό με τη διαφορά ότι κάνει διαφορετική διαχείριση αυτών. Το αρνητικό βαρύκεντρο  $V_{C-}$  κατασκευάζεται με βάση αυτές αλλά και με την τρέχουσα πιθανή λύση  $ind$  φτιάχνοντας τυχαία τρεις κατευθύνσεις προς τη βέλτιστη  $V_b$ . Η σχέση διαφοροποίησης είναι:

$$\omega = V_b + \varphi * (3V_b - ind - x_1 - x_2)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C+} = V_b$
- $V_{C-} = \frac{ind + x_1 + x_2}{3}$
- $V_S = 0$
- $F = 3\varphi$

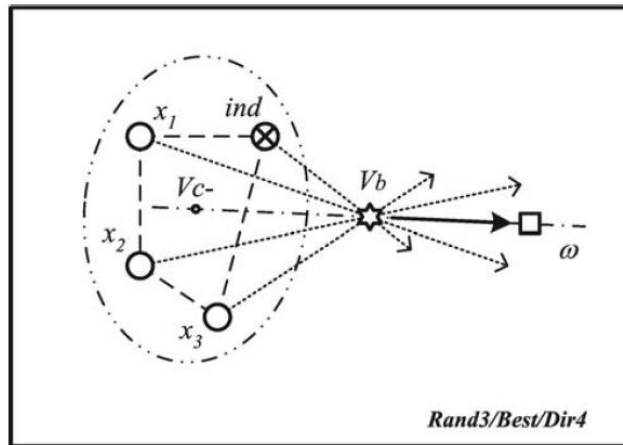
### 3.8.4.6. RAND3/BEST/DIR4 στρατηγική

Η συγκεκριμένη στρατηγική, (Εικόνα 16), [10], ακολουθεί την ίδια λογική εξάγοντας όμως τρεις τυχαίες πιθανές λύσεις  $x_1$ ,  $x_2$  και  $x_3$  από τον πληθυσμό που συμμετέχουν στην κατασκευή του αρνητικού βαρύκεντρου  $V_{C-}$ . Έτσι, προκύπτουν τέσσερις τυχαίες κατευθύνσεις να διαμορφώνουν το διάνυσμα διαφοράς  $\delta$ . Η σχέση διαφοροποίησης είναι:

$$\omega = V_b + \varphi * (4V_b - ind - x_1 - x_2 - x_3)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C+} = V_b$
- $V_{C-} = \frac{ind + x_1 + x_2 + x_3}{4}$
- $V_S = 0$
- $F = 4\varphi$



Εικόνα 16: Στρατηγική Rand3/Best/Dir4

### 3.8.4.7. RAND4/BEST/DIR4 στρατηγική

---

Η στρατηγική αυτή απαλλάσσεται πλήρως από τη συμβολή της τρέχουσας πιθανής λύσης  $ind$  και εξάγει όμως τέσσερις τυχαίες πιθανές λύσεις  $x_1, x_2, x_3$  και  $x_4$  από τον πληθυσμό. Όλες συμμετέχουν στην κατασκευή του  $V_{C_-}$ . Η σχέση διαφοροποίησης είναι:

$$\omega = V_b + \varphi * (4V_b - x_1 - x_2 - x_3 - x_4)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C_+} = V_b$
- $V_{C_-} = \frac{x_1+x_2+x_3+x_4}{4}$
- $V_S = 0$
- $F = 4\varphi$

### 3.8.4.8. RAND4/BEST/DIR5 στρατηγική

---

Με στόχο την αύξηση του χώρου αναζήτησης της, η στρατηγική RAND4/BEST/DIR5, εξάγει τέσσερις τυχαίες πιθανές λύσεις  $x_1, x_2, x_3$  και  $x_4$  από τον πληθυσμό, ενώ χρησιμοποιεί και την τρέχουσα  $ind$ . Όλες συμμετέχουν στην κατασκευή του  $V_{C_-}$  και συνεπώς πέντε διαφορετικές κατευθύνσεις συμβάλουν στο σχηματισμό του διανύσματος διαφοράς  $\delta$ . Η σχέση διαφοροποίησης είναι:

$$\omega = V_b + \varphi * (5V_b - ind - x_1 - x_2 - x_3 - x_4)$$

όπου, σε αντιστοιχία με τη γενική σχέση:

- $V_{C_+} = V_b$
- $V_{C_-} = \frac{ind+x_1+x_2+x_3+x_4}{4}$
- $V_S = 0$
- $F = 5\varphi$



# 4. Μοντέλο του συστήματος

## 4.1. Εισαγωγή

---

Στο παρόν κεφάλαιο, αρχικά, θα δοθεί μια περιγραφή του μαθηματικού μοντέλου συστήματος που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία.

## 4.2. Διατύπωση προβλήματος

---

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η άφιξη των ασύρματων δικτύων επόμενης γενιάς αναμένεται να προκαλέσει αύξηση στις απαιτήσεις των χρηστών σε σχέση με το παρελθόν. Αυτό σχετίζεται με το γεγονός ότι τα δίκτυα επόμενης γενιάς υποστηρίζουν την παροχή των, δημοφιλών στους χρήστες, κινητών ευρυζωνικών υπηρεσιών και υπηρεσιών πολυμέσων. Η υπάρχουσα μικροκυματική και κυκλωματική υποδομή, υιοθετώντας την τακτική της στατικής ανάθεσης πόρων, ήταν αποδοτική για την ικανοποίηση της κίνησης που απαιτούσε η, μέχρι πρότινος, συνήθης συμπεριφορά των χρηστών. Λόγω όμως της στατικής ανάθεσης πόρων, δεν επιτυγχάνεται η πλήρης αξιοποίησή της υποδομής αυτής, που θα βοηθήσει να ανταποκριθεί πλήρως στις απαιτήσεις χωρητικότητας που δημιουργούν οι 4G τεχνολογίες.

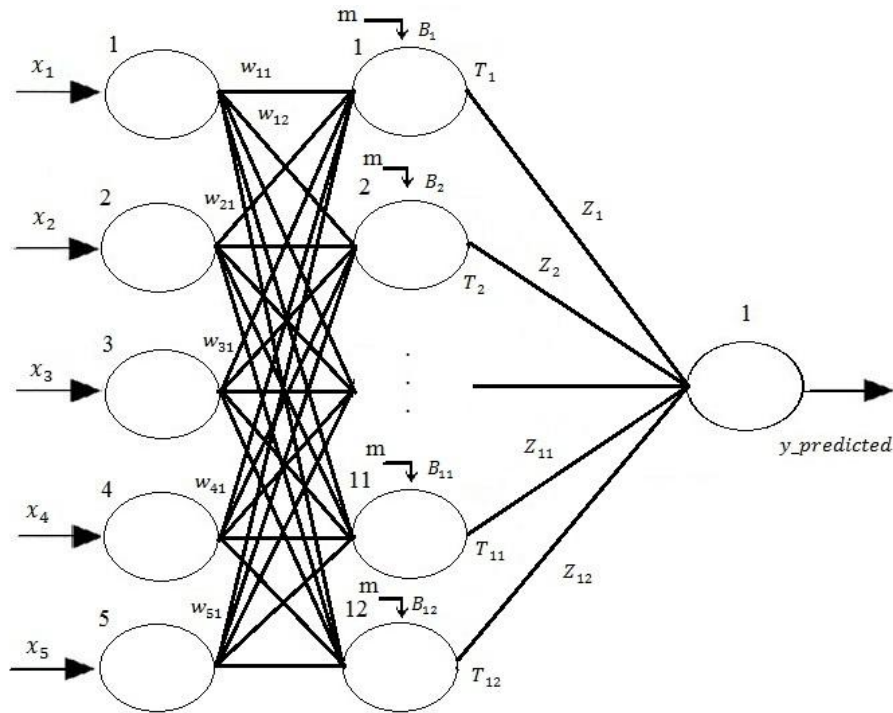
Από την πλευρά των παρόχων, έχει επιχειρηθεί ενίσχυση του δικτύου με την προσθήκη εγκαταστάσεων στην πλευρά του δικτύου πρόσβασης. Ανάλογη προσπάθεια όμως είναι ανάγκη να επιχειρηθεί και στο οπισθοζευκτικό δίκτυο, με την πρόταση των σχημάτων δυναμικής εκχώρησης πόρων να αποτελούν μια λύση. Εκτός από την κάλυψη της κίνησης, η δυναμική εκχώρηση πόρων δίνει τη δυνατότητα να ληφθούν υπόψη και κριτήρια σχετικά με τα συμφωνητικά επίπεδου υπηρεσίας μεταξύ των παρόχων, ώστε αυτά να αποδίδονται ορθά. Ταυτόχρονα θα γίνεται βέλτιστη εκμετάλλευση της χωρητικότητας των υποδομών, που θα είναι και ωφέλιμη οικονομικά για τον ιδιοκτήτη πάροχο.

Η βέλτιστη δυναμική εκχώρηση των πόρων στο οπισθοζευκτικό δίκτυο μπορεί να γίνει με βάση την εκτίμηση της ποσότητας πόρων που ένας σταθμός βάσης πρέπει να έχει διαθέσιμη κάθε χρονική στιγμή για την ικανοποίηση της ζήτησης των χρηστών που βρίσκονται εντός της περιοχής κάλυψής του (δηλαδή εντός της κυψέλης του). Με γνώμονα τη λογική αυτή, προκύπτει το πρόβλημα της βέλτιστης διαχείρισης των πόρων σε ένα σταθμό βάσης κάνοντας πρόβλεψη για την αιτούμενη ανάγκη σε πόρους που η παρούσα διπλωματική εργασία μελετά.

Για το σκοπό αυτό μελετήθηκε η εφαρμογή ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου για την εκτέλεση των προβλέψεων, το οποίο είχε στόχο το εύρος ζώνης της κάτω ζεύξης που θα αιτείται ο σταθμός βάσης στο οπισθοζευκτικό δίκτυο.

### 4.3. Μαθηματική μοντελοποίηση

Για το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι πληροφορίες σχετικά με τη χρονική στιγμή για την οποία έπρεπε να γίνει η πρόβλεψη, ενώ η πρόβλεψή του στόχευε στο εύρος ζώνης της κάτω ζεύξης. Η ακριβής αρχιτεκτονική του φαίνεται στην Εικόνα 17.



Εικόνα 17: Αρχιτεκτονική του τεχνητού νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιήθηκε

Συγκεκριμένα, αποτελούταν από τρία επίπεδα:

- το επίπεδο εισόδου, που περιελάμβανε  $N=5$  κόμβους
- το κρυφό επίπεδο, που περιελάμβανε  $M=12$  κόμβους
- το επίπεδο εξόδου, που αποτελούταν από έναν κόμβο.

Στα πλαίσια των κανόνων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου κατασκευάστηκαν δύο πίνακες βαρών. Εκ των δύο πινάκων βαρών:

- ο πρώτος συνέδεε το επίπεδο εισόδων με το κρυφό επίπεδο. Οι διαστάσεις του πίνακα των βαρών  $\mathbf{W}$  προέκυπταν  $N \times M$ .
- ο δεύτερος συνέδεε το κρυφό επίπεδο με τη μοναδική έξοδο. Οι διαστάσεις του πίνακα των βαρών  $\mathbf{Z}$  προέκυπταν  $1 \times M$ .

Επιπλέον, στο κρυφό επίπεδο του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, έγινε η εισαγωγή των bias, όπως ορίζεται να γίνει σε ένα νευρωνικό. Οι διαστάσεις του πίνακα των  $\mathbf{B}$ , του οποίου ο πολλαπλασιασμός με τη μεταβλητή  $m$  σχημάτιζε τα bias, προέκυπταν  $1 \times M$ .

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε για τη ρύθμιση των βαρών του τεχνητού νευρωνικού δικτύου ήταν αυτός της Differential Evolution (DE). Οι πιθανές λύσεις που εξάγονταν από αυτόν χρησιμοποιήθηκαν για την ενημέρωση των τιμών των βαρών  $W$ ,  $Z$  και  $B$ .

Η έξοδος του κρυφού επιπέδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, έστω  $T_j$  με  $i = 1, 2, \dots, M$ , προέκυπτε από γραμμικό συνδυασμό των εισόδων και των βαρών  $W$  και των *bias*.

Η τελική έξοδος του τεχνητού νευρωνικού δικτύου προέκυπτε και με τη συμβολή του ανάστροφου πίνακα βαρών  $Z$ .

Η εκπαίδευσή του τεχνητού νευρωνικού δικτύου βασίστηκε σε ιστορικά στοιχεία που υπήρχαν διαθέσιμα από ένα σταθμό βάσης δικτύου τύπου HSPA. Η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου τελικά, έγινε με βάση το ελάχιστο ποσοστιαίο απόλυτο σφάλμα (MAPE). Όσο μικρότερο ήταν το MAPE, τόσο πιο εύστοχη θεωρούταν η πρόβλεψη.

Όλα τα παραπάνω οδηγούν σε μια μαθηματική έκφραση του προβλήματος της βέλτιστης διαχείρισης πόρων σε ένα σταθμό βάσης που μπορεί να εκφραστεί μαθηματικά, μέσω του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, ως ένα πρόβλημα βέλτιστης ρύθμισης μεταξύ των βαρών του δικτύου. Επειδή η αξιολόγηση των επιδόσεων του δικτύου γίνεται βάση των προκύπτοντων τιμών MAPE, τελικά το πρόβλημα μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης του σφάλματος MAPE, που παρατίθεται ακολούθως:

$$\min(MAPE)$$

δεδομένου ότι:

- $MAPE = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_{real_i} - y_{predicted_i}}{y_{real_i}} \right|$
- $y_{predicted} = \sum_{j=1}^M [(\sum_{i=1}^N x_i * W_{ij} + B_j * m) * Z_j]$
- $y_{real} =$  σταθερά αντιστοιχιζόμενη στο διάνυσμα εισόδου  $x = [x_1, x_2, \dots, x_N]$ ,  $i=1, 2, \dots, N$
- $W_{ij}, Z_j, B_j$ : τα βάρη του τεχνητού νευρωνικού δικτύου
- $L \leq W_{ij} \leq H, i = 1, 2, \dots, N, j = 1, 2, \dots, M$
- $L \leq Z_j \leq H, j = 1, 2, \dots, M$
- $L \leq B_j \leq H, j = 1, 2, \dots, M$

όπου:

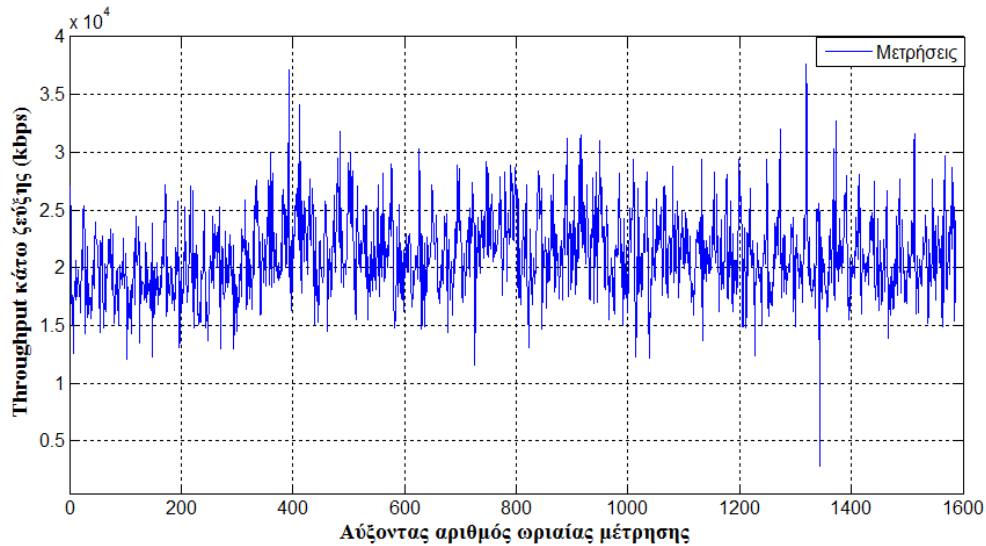
- *MAPE*: το ελάχιστο ποσοστιαίο απόλυτο σφάλμα
- *x*: το διάνυσμα εισόδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Ορίζει τη χρονική στιγμή της πρόβλεψης.
- *N*: το πλήθος των ανεξάρτητων μεταβλητών του ορίζουν το διάνυσμα εισόδου
- *M*: το πλήθος των κρυφών κόμβων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου
- *y\_real*: πραγματική τιμή εύρους ζώνης κάτω ζεύξης που αντιστοιχίζεται στο εκάστοτε διάνυσμα εισόδου *x* του τεχνητού νευρωνικού δικτύου με βάση καταγεγραμμένα ιστορικά δεδομένα για την περιοχή κάλυψης σταθμού βάσης δικτύου HSPA
- *y\_predicted*: η πρόβλεψη/έξοδος του τεχνητού νευρωνικού δικτύου για το διάνυσμα εισόδου *x*.
- *n*: το πλήθος των μετρήσεων του αρχείου προέλευσης (εκπαίδευσης ή πιστοποίησης) του τεχνητού νευρωνικού δικτύου
- *m*: η μέση τιμή των *y\_real* από το αρχείο προέλευσης (εκπαίδευσης ή πιστοποίησης)
- *W*: ο πίνακας βαρών, διαστάσεων  $[N \times M]$ , που συνδέει το επίπεδο εισόδων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου με το κρυφό επίπεδο
- *Z*: ο πίνακας βαρών, διαστάσεων  $[1 \times M]$ , που συνδέει το κρυφό επίπεδο του τεχνητού νευρωνικού δικτύου με τη μοναδική έξοδο
- *B*: ο πίνακας βαρών, διαστάσεων  $[1 \times M]$ , στους κρυφούς κόμβους του τεχνητού νευρωνικού δικτύου που συμμετέχει στο σχηματισμό του bias
- *L* και *H*: το κάτω και άνω όριο αντίστοιχα του πεδίου τιμών της πιθανής λύσης *X* που εξάγεται από τον επιλεγμένο για το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αλγόριθμο βελτιστοποίησης DE

Αξίζουν να επισημανθούν τα ακόλουθα σημεία:

- Για την εκπαίδευση και εξαγωγή των αποτελεσμάτων του, το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο βασίστηκε σε ωριαίες καταγραφές μετρήσεων ενός σταθμού βάσης δικτύου HSPA και για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα εντός του έτους 2013. Συγκεκριμένα, οι μετρήσεις ήταν το συνολικό εύρος ζώνης κάτω ζεύξης που έπρεπε να εξυπηρετήσει ο σταθμός βάσης και για τους εννέα τομείς του, εκφρασμένο σε kbps. Επιπλέον, αφορούσε ένα σύνολο υπηρεσιών, όπως βίντεο, email, VoIP, κ.ά. χωρίς να έχει γίνει κάποια επιμέρους διάκριση ανάλογα με το είδος υπηρεσίας που απαιτούσε ο εκάστοτε χρήστης.

**Στο Σφάλμα! Το αρχείο προέλευσης της αναφοράς δεν βρέθηκε.** φαίνονται οι συνολικές απαιτήσεις των χρηστών σε εύρος ζώνης για την κάτω ζεύξη σε ωριαία βαθμίδα, όπως αυτές είχαν καταγραφεί.





**Διάγραμμα 1: Ωριαίες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης κάτω ζεύξης για το σταθμό βάσης, εκφρασμένο σε kbps.**

Το αρχείο με τις μετρήσεις, σε κάθε εκτέλεση του κώδικα του νευρωνικού, χωρίζεται σε δύο αρχεία, ένα εκπαίδευσης και ένα πιστοποίησης, σε ποσοστό μεταξύ τους αναλογίας 85% και 15% αντίστοιχα.

- Ως διάνυσμα εισόδου του τεχνητού νευρωνικού δικτύου χρησιμοποιήθηκε η χρονική στιγμή της καταγραφής της μέτρησης σε αναλυτική μορφή, καθώς ενδιέφερε η χρονική κατανομή της ποσότητας του ζητούμενου εύρους ζώνης. Βάση των διαθέσιμων ιστορικών στοιχείων, το συνολικό απαιτούμενο από το σταθμό βάσης εύρος ζώνης μεταβάλλεται ακολουθώντας ένα γενικό μοτίβο σχετιζόμενο με την εποχή της μέτρησης, το μήνα, την ημέρα, αλλά και την ώρα. Αυτό είναι λογικό συμπέρασμα αν γίνει αντιληπτό ότι και οι συνήθειες των χρηστών μεταβάλλονται σε συνάρτηση με αυτές τις παραμέτρους. Για παράδειγμα, οι πρωινές ώρες είναι πιο απαιτητικές σε σχέση με τις βραδινές εφόσον οι χρήστες βρίσκονται στο χώρο εργασίας τους, ενώ οι εργάσιμες ημέρες της εβδομάδας ακολουθούν διαφορετική κατανομή ζήτησης εύρους ζώνης σε σχέση με τα σαββατοκύριακα. Συνεπώς, η χρονική στιγμή είναι καθοριστική για τη ζητούμενη κίνηση στο σταθμό βάσης και αυτό συντέλεσε στην επιλογή της ως είσοδο του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Έτσι, οι εισοδοί που χρησιμοποιήθηκαν αντιστοιχίζονταν:

- στην ημέρα (π.χ. 21 του μηνός)
- στον αύξοντα αριθμό της ημέρας εντός της εβδομάδας, θεωρώντας τη Δευτέρα ως την πρώτη ημέρα της εβδομάδας (π.χ. η Πέμπτη είναι η 4<sup>η</sup> ημέρα της εβδομάδας)
- στο μήνα (π.χ. ο Απρίλιος είναι ο 4<sup>ος</sup> μήνας)
- στην ώρα, υιοθετώντας την 24ωρη μορφή αυτής

- στο έτος, που ήταν κοινό σε όλες τις καταγραφές, το 2013.

Κάθε είσοδος αντιστοιχίστηκε σε έναν κόμβο εισόδου του νευρωνικού.

- Η εκτίμηση της ακρίβειας της πρόβλεψης που εξήγαγε κάθε φορά το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, όπως αναφέρθηκε στην υποενότητα 3.4.6, ορίστηκε ως ένα *σφάλμα πρόβλεψης*, που ήταν η διαφορά μεταξύ της τιμής της παρατήρησης και τιμής πρόβλεψης (αποτέλεσμα). Η συνάρτηση σφάλματος που κρίθηκε πιο κατάλληλη για να δώσει τα αποτελέσματα στη σωστή μορφή ήταν η συνάρτηση του *ελάχιστου απόλυτου ποσοστιαίου σφάλματος* (*Mean Absolut Percentage Error, MAPE*). Το MAPE εκφράζει το αποτέλεσμά του σε μορφή ποσοστού.
- Λόγω της προφανούς μη γραμμικής σχέσης εξάρτησης μεταξύ των απαιτήσεων σε εύρος ζώνης από τους χρήστες και της χρονικής στιγμής της καταγραφής, κρίθηκε κατάλληλη η χρήση ενός μοντέλου πρόβλεψης που να δίνει αξιόπιστα αποτελέσματα με μη γραμμική συμπεριφορά των δεδομένων. Όπως φαίνεται και στο [8], εφαρμογές των τεχνητών νευρωνικών δικτύων σε δίκτυα υπολογιστών με μη-γραμμική συμπεριφορά κίνησης αποδείχθηκε ότι είχαν καλά αποτελέσματα. Έτσι, η χρήση τους έτσι ως μοντέλο πρόβλεψης για το αντικείμενο της διπλωματικής αποτελεί μια καλή επιλογή. Επιπλέον, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, ως εργαλείο μηχανικής μάθησης, έχουν την ιδιότητα της εκπαίδευσης από την εμπειρία τους σε παραδείγματα και ιστορικά στοιχεία, γεγονός που ευνόησε επιπλέον την επιλογή τους ως εργαλείο πρόβλεψης.



# 5. Αριθμητική επίλυση του συστήματος

## 5.1. Εισαγωγή

---

Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλυθεί η τεχνική επίλυσης του προβλήματος, το οποίο παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δίνοντας με λεπτομέρεια τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε.

## 5.2. Μεταβολή του πλήθους των γενεών & περιορισμών

---

Για κάθε ξεχωριστή στρατηγική του αλγορίθμου της Differential Evolution (DE) που εφαρμόστηκε, πραγματοποιήθηκαν πειραματισμοί με τις τιμές των παραμέτρων του αλγορίθμου βελτιστοποίησης, ώστε τελικά να βρεθεί ο πιο αποδοτικός συνδυασμός τους.

Η πρώτη δοκιμή στις αλλαγές των παραμέτρων έγινε με τον έλεγχο των αποτελεσμάτων για τις διάφορες στρατηγικές για διαφορετικό αριθμό γενεών.

Συγκεκριμένα, οι στρατηγικές εξετάστηκαν για αριθμό γενεών:  $GEN = 1000$ ,  $GEN = 1500$  και  $GEN = 2000$ .

Επιπλέον, για κάθε διαφορετικό πλήθος γενεών, επιχειρήθηκαν μεταβολές των ακραίων περιορισμών,  $L$  και  $H$ , των πιθανών λύσεων σε πεδίο τιμών:  $[L, H] = [-1, 1]$  και  $[L, H] = [-2, 2]$ .

Τέλος, αμετάβλητα παρέμειναν, το μέγεθος του πληθυσμού ( $NP = 80$ ) καθώς και η σταθερά διαφοροποίησης, ( $F = 0.9$ ).

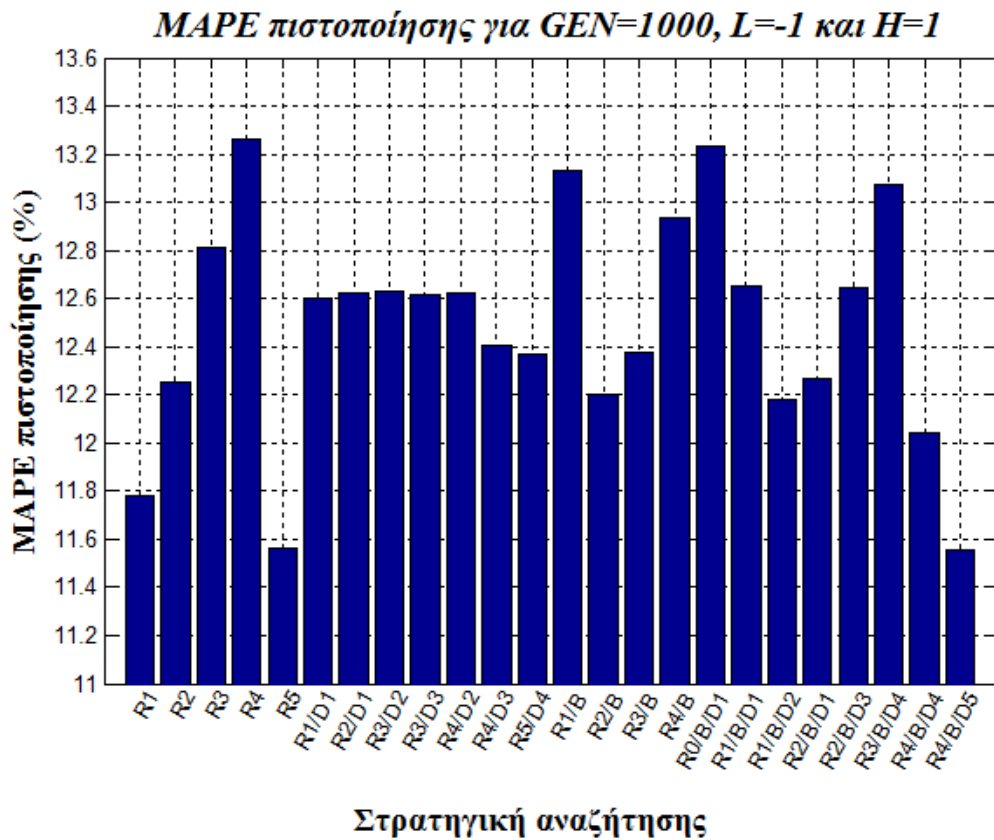
Σε κάθε εκτέλεση του κώδικα του τεχνητού νευρωνικού δικτύου για διαφορετική στρατηγική της DE, γινόταν η τυχαία μεταβολή της κατανομής των μετρήσεων πάνω στις οποίες θα βασίζονταν η εκπαίδευση του τεχνητού νευρωνικού δικτύου και η εξαγωγή των τελικών αποτελεσμάτων του για το εύρος ζώνης κάτω ζεύξης, που αναφέρθηκε και πρωτύτερα. Ακόμα, προέκυπτε εκτίμηση για το ελάχιστο ποσοστιαίο απόλυτο σφάλμα (MAPE) μεταξύ των προβλέψεων του νευρωνικού δικτύου και των αντίστοιχων πραγματικών μετρήσεων για το στάδιο της πιστοποίησης των τελικών αποτελεσμάτων του.

Κατασκευάστηκαν στο Matlab ραβδογράμματα που εμφανίζουν με ακρίβεια τα σφάλματα MAPE με τα οποία εκτιμήθηκε η ακρίβεια των προβλέψεων. Από αυτά αναδείχθηκαν πληροφορίες σχετικά με τις παραμέτρους που μεταβλήθηκαν κατά τις εκτελέσεις και πώς εκείνες επηρέασαν τα αποτελέσματα των στρατηγικών.

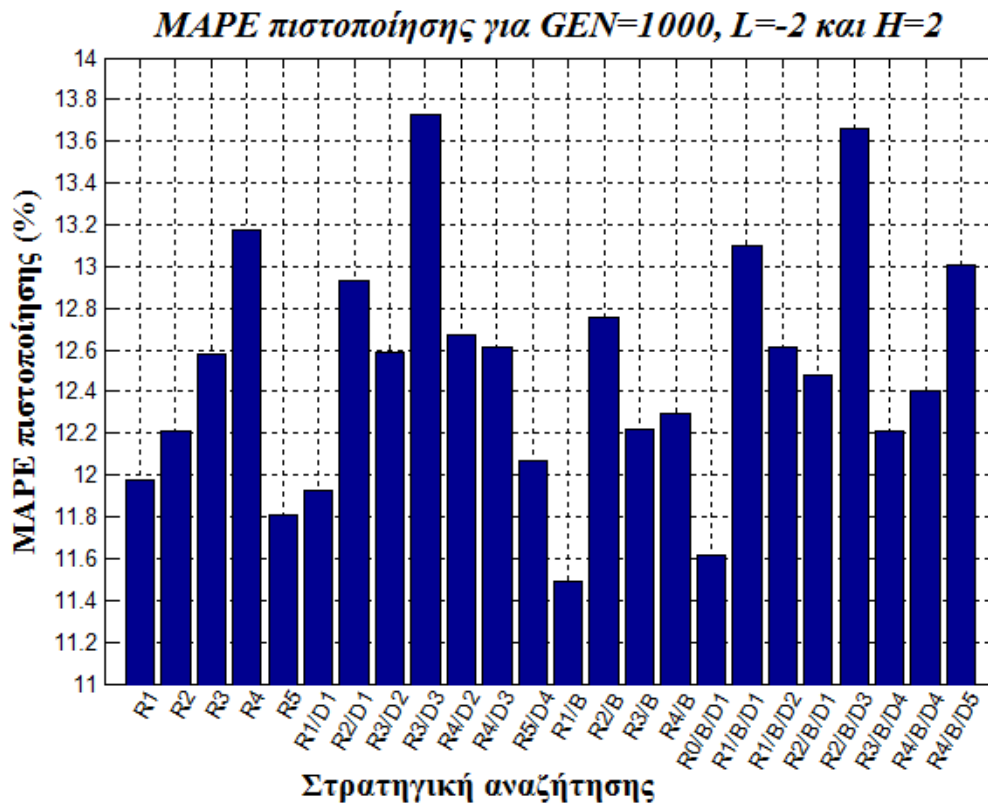
Ακολουθούν τα σχετικά αποτελέσματα.

### 5.2.1. GEN = 1000

Ο ορισμός του αριθμού των γενεών για τον αλγόριθμο της DE ίσου με 1000 οδήγησαν στα αποτελέσματα που φαίνονται στο Ραβδόγραμμα 1 και στο Ραβδόγραμμα 2:



**Ραβδόγραμμα 1:** Απεικονίζεται το εκτιμώμενο σφάλμα πιστοποίησης (MAPE πιστοποίησης) (%) για κάθε στρατηγική αναζήτησης με ρύθμιση παραμέτρων GEN=1000 και [L,H] = [-1, 1]



**Ραβδόγραμμα 2:** Απεικονίζεται το εκτιμώμενο σφάλμα πιστοποίησης (ΜΑΡΕ πιστοποίησης) (%) για κάθε στρατηγική αναζήτησης με ρύθμιση παραμέτρων GEN=1000 και [L,H] = [-2, 2]

Βάση των ραβδόγραμμάτων Ραβδόγραμμα 1 και Ραβδόγραμμα 2 μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής:

➤ **Ομάδα στρατηγικών Rand:**

- Στο Ραβδόγραμμα 1, η αύξηση του αριθμού των πιθανών λύσεων που απαιτούνται να εξαχθούν από τον πληθυσμό συνοδεύτηκε από αύξηση του MAPE πιστοποίησης για την πρόβλεψη. Το ίδιο δεν ίσχυσε για τη Rand5, η οποία ξέφυγε από τη γενική τάση των στρατηγικών.
- Ωστόσο, στο Ραβδόγραμμα 2, η αλλαγή των ακραίων περιορισμών για την επιλογή των πιθανών λύσεων σε  $[L,H] = [-2,2]$  δε μετέβαλλε σημαντικά της συμπεριφορά της κατηγορίας.

➤ **Ομάδα στρατηγικών Rad/Dir:**

- Στο Ραβδόγραμμα 1, η ακρίβεια των προβλέψεων ανάμεσα στις στρατηγικές αυτής της κατηγορίας, δε διαφοροποιήθηκε μέχρι που αυξήθηκε αρκετά το πλήθος των πιθανών λύσεων που έπρεπε να εξαχθούν από τον πληθυσμό του αλγορίθμου. Η περισσότερες επιλογές σε πιθανές λύσεις, που συμβάλλουν και στο σχηματισμό της κατεύθυνσης αναζήτησης, θεωρείται ότι ήταν αυτό που τελικά συνέβαλλε στην εμφάνιση ακριβέστερων προβλέψεων.
- Βελτιωμένες προβλέψεις εμφανίστηκαν στο Ραβδόγραμμα 2 για τις στρατηγικές Rand1/Dir1 και Rand5/Dir4 σε σχέση με τις παρατηρήσεις για  $[L,H] = [-1,1]$ . Για την τελευταία, το φαινόμενο δικαιολογείται εφόσον υπάρχει μεγαλύτερη ποικιλία στην επιλογή των λύσεων για τη συνέχεια της αναζήτησης βέλτιστης λύσης.

➤ **Ομάδα στρατηγικών Rand/Best:**

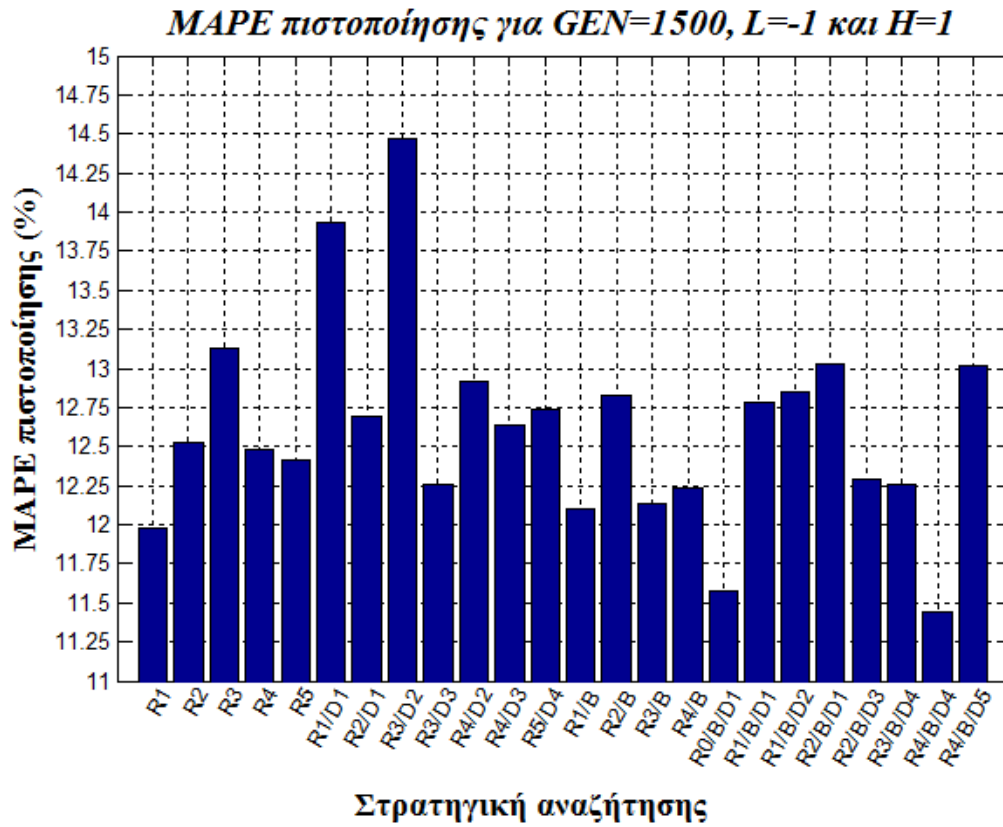
- Στο Ραβδόγραμμα 1, καλύτερα αποτελέσματα εμφάνισαν οι στρατηγικές Rand2/Best και Rand3/Best.
- Η αλλαγή των ορίων σε  $[L,H] = [-2,2]$ , (Ραβδόγραμμα 2), φάνηκε ότι ωφέλησε περισσότερο την ομάδα στρατηγικών Rand/Best. Όλες οι στρατηγικές έδωσαν αρκετά ακριβή αποτελέσματα, με τη Rand1/Best να ξεχωρίζει δίνοντας MAPE πιστοποίησης κάτω του 11,5%.

➤ **Ομάδα στρατηγικών Rand/Best/Dir:**

- Στο Ραβδόγραμμα 1, καλύτερα αποτελέσματα εμφανίστηκαν για τις στρατηγικές που απαιτούν την εξαγωγή πολλών πιθανών λύσεων από τον πληθυσμό. Πιθανότατα ο περιορισμένος αριθμός επαναλήψεων των υπολογισμών σε συνδυασμό με την ανάγκη για εκμετάλλευση πολλών πληροφοριών, όπως ορίζουν οι Rand4/Best/Dir4 και Rand4/Best/Dir5, να οδήγησαν σε προβλέψεις με καλή ακρίβεια.
- Αντίθετα, στο Ραβδόγραμμα 2, παρατηρήθηκαν μεγαλύτερα σφάλματα στις στρατηγικές, με εξαίρεση τη Rand0/Best/Dir1, της οποίας η πρόβλεψη εκτιμήθηκε με μικρότερο σφάλμα.

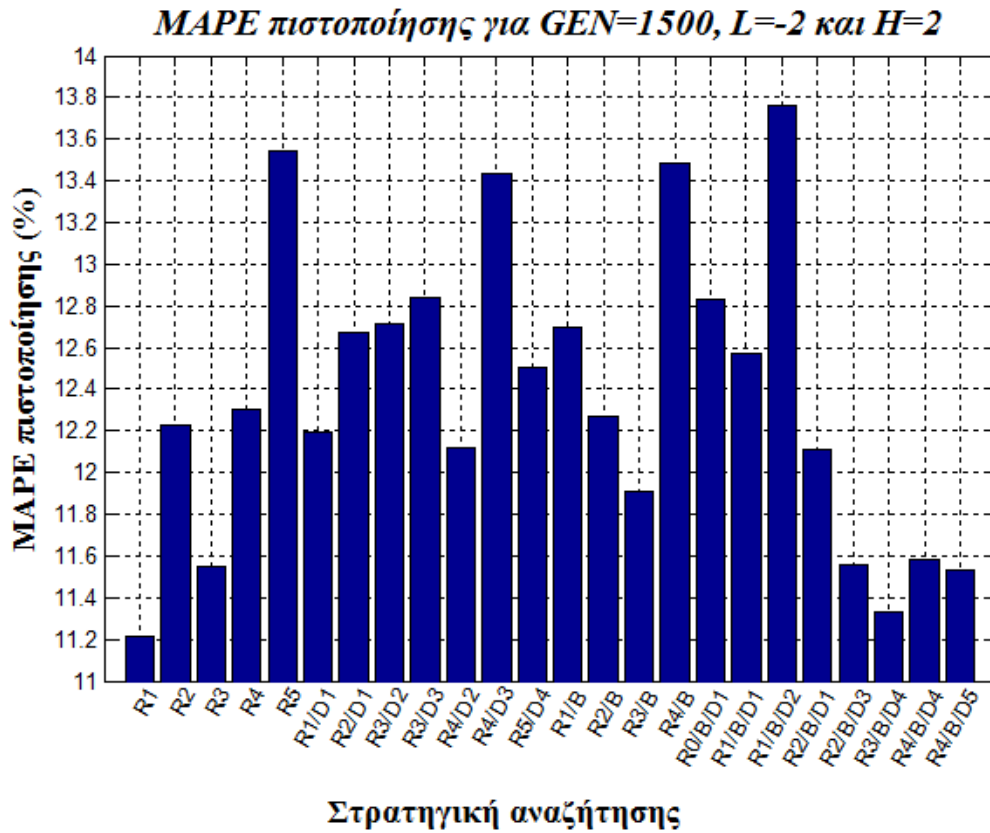
### 5.2.2. GEN = 1500

Ο ορισμός του αριθμού των γενεών για τον αλγόριθμο της DE ίσου με 1500 οδήγησαν στα αποτελέσματα που φαίνονται στο Ραβδόγραμμα 3 και στο Ραβδόγραμμα 4:



**Ραβδόγραμμα 3:** Απεικονίζεται το εκτιμώμενο σφάλμα πιστοποίησης (MAPE πιστοποίησης) (%) για κάθε στρατηγική αναζήτησης με ρύθμιση παραμέτρων GEN=1500 και [L,H] = [-1,1]





**Ραβδόγραμμα 4:** Απεικονίζεται το εκτιμώμενο σφάλμα πιστοποίησης (ΜΑΡΕ πιστοποίησης) (%) για κάθε στρατηγική αναζήτησης με ρύθμιση παραμέτρων GEN=1500 και [L,H] = [-2,2]

Βάση των ραβδογραμμάτων Ραβδόγραμμα 3 και Ραβδόγραμμα 4 μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής:

➤ **Ομάδα στρατηγικών Rand:**

- Όπως φαίνεται στο Ραβδόγραμμα 3, η αύξηση του αριθμού των γενεών φάνηκε ότι επηρέασε αρνητικά τις στρατηγικές, καθώς τα MAPE πιστοποίησης που εμφανίστηκαν ήταν ελαφρώς αυξημένα.
- Όμως, με περιορισμούς  $[L,H] = [-2,2]$ , όπως φαίνεται στο Ραβδόγραμμα 4, η ομάδα αυτή των στρατηγικών εμφάνισε πιο ακριβείς προβλέψεις. Ξεχώρισε και πάλι η Rand1 στρατηγική με MAPE πιστοποίησης κοντά στο 11%. Αντίθετα, η στρατηγική Rand5 δεν ευνοήθηκε από το μεγάλο εύρος τιμών για τις πιθανές λύσεις, καθώς εμφάνισε μεγάλο σφάλμα.

➤ **Ομάδα στρατηγικών Rad/Dir:**

- Για τη συγκεκριμένη ομάδα στρατηγικών, όπως φαίνεται στο Ραβδόγραμμα 3, παρατηρήθηκαν μικρές αλλαγές στα σφάλματα των προβλέψεων, εκ των οποίων οι περισσότερες ήταν αυξητικές.
- Για  $[L,H] = [-2,2]$ , όπως φαίνεται στο Ραβδόγραμμα 4, οι στρατηγικές της κατηγορίας αυτής σημείωσαν χαμηλότερα σφάλματα σε σχέση με τα αποτελέσματα των προηγούμενων ρυθμίσεων παραμέτρων. Παρά το γεγονός αυτό όμως, σε σχέση με την εικόνα των στρατηγικών που ανήκουν στις άλλες κατηγορίες, καμία στρατηγική Rand/Dir δεν ξεχώρισε αισθητά. Τις καλύτερες επιδόσεις παρουσίασαν οι Rand1/Dir1 και Rand4/Dir2.

➤ **Ομάδα στρατηγικών Rand/Best:**

- Σύμφωνα με το Ραβδόγραμμα 3, η εν λόγω ομάδα στρατηγικών είχε μια συνολική εικόνα με σφάλματα κοντά στο 12%. Εξαίρεση ήταν η Rand2/Best που εμφάνισε MAPE πιστοποίησης = 12,826%. Οι 1500 γενεές επομένως φάνηκαν επαρκείς για την εξαγωγή ικανοποιητικά ακριβών προβλέψεων από τις στρατηγικές Rand/Best.
- Με την αλλαγή των ορίων σε  $[L,H] = [-2,2]$ , η στρατηγική Rand2/Best, που εμφάνισε μεγάλο MAPE πιστοποίησης για  $[L,H] = [-1,1]$ , το μείωσε πλέον σε 12,2698%. Η Rand3/Best εμφάνισε ακόμα μικρότερο σφάλμα, 11,9125%. Ωστόσο, οι υπόλοιπες δύο μέθοδοι εμφάνισαν αύξηση στα αποτελέσματά τους, γεγονός που έδωσε την αίσθηση ότι άρχισαν και γίνονται ευαίσθητες στις αλλαγές των παραμέτρων. Αυτά φαίνονται στο Ραβδόγραμμα 4.

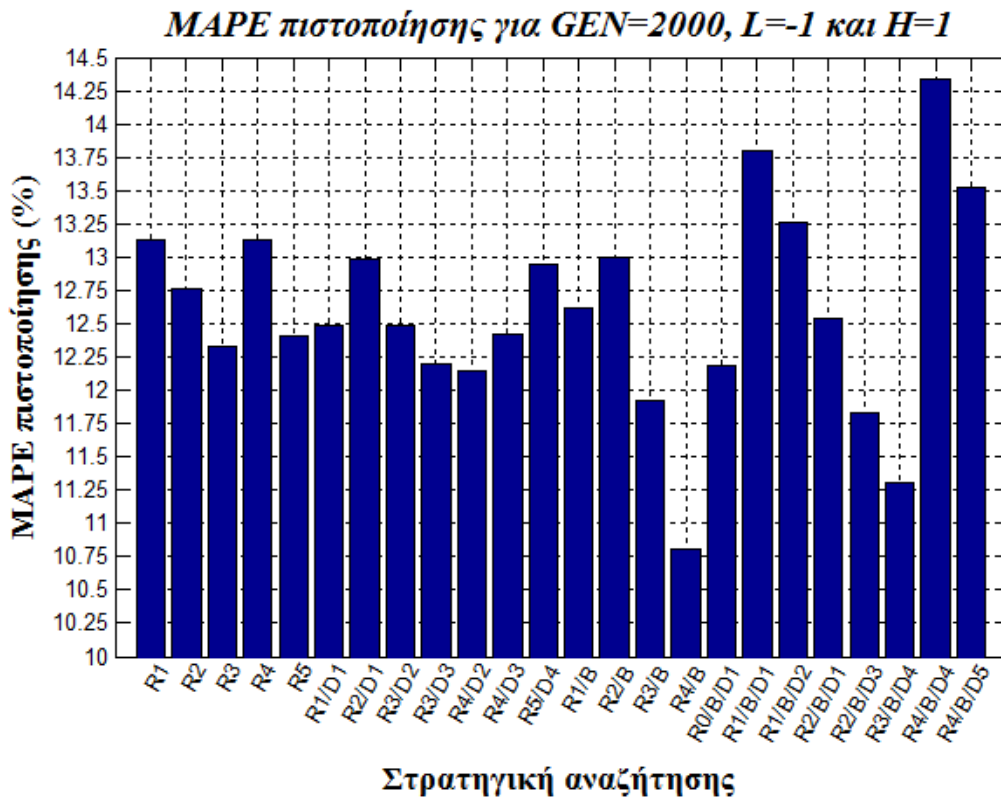
➤ **Ομάδα στρατηγικών Rand/Best/Dir:**

- Η αύξηση του αριθμού των γενεών δεν ήταν επαρκής ρύθμιση για να βελτιώσουν την απόδοσή τους οι στρατηγικές αυτές. Αξίζουν να σημειωθούν όμως τα σφάλματα κάτω του 12% που εμφανίστηκαν για τις στρατηγικές Rand0/Best/Dir1 και Rand4/Best/Dir4, 11.5804% και 11.4368% αντίστοιχα, στο Ραβδόγραμμα 3.
- Το μεγαλύτερο εύρος για τις πιθανές λύσεις ευνόησε τις στρατηγικές που εξάγουν πολλές πιθανές λύσεις από τον πληθυσμό, τις οποίες και χρησιμοποιούν και για το σχηματισμό κατεύθυνσης της αναζήτησης. Αυτό

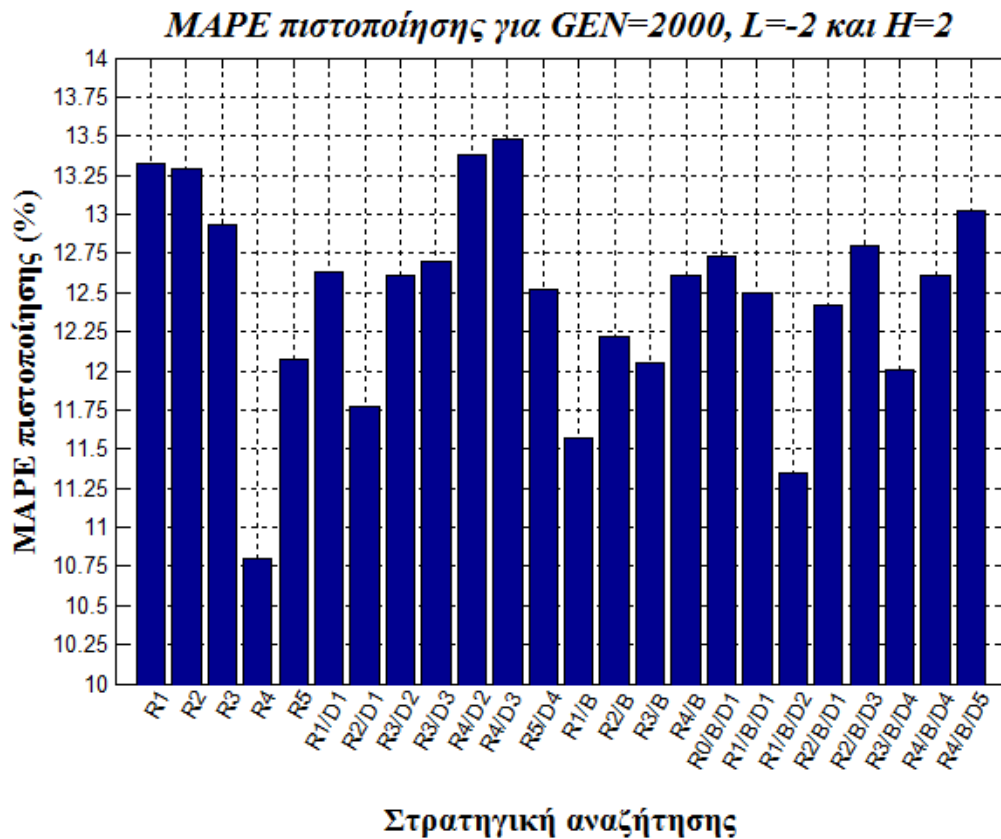
γίνεται προφανές στο Ραβδόγραμμα 4, από το γεγονός ότι οι στρατηγικές Rand2/Best/Dir3, Rand3/Best/Dir4, Rand4/Best/Dir4 και Rand4/Best/Dir5 εμφάνισαν σφάλμα κάτω του 12%.

### 5.2.3. GEN = 2000

Ο ορισμός του αριθμού των γενεών για τον αλγόριθμο της DE ίσου με 2000 οδήγησαν στα αποτελέσματα που φαίνονται στο Ραβδόγραμμα 5 και στο Ραβδόγραμμα 6:



**Ραβδόγραμμα 5:** Απεικονίζεται το εκτιμώμενο σφάλμα πιστοποίησης (MAPE πιστοποίησης) (%) για κάθε στρατηγική αναζήτησης με ρύθμιση παραμέτρων GEN=2000 και [L,H] = [-1,1]



**Ραβδόγραμμα 6:** Απεικονίζεται το εκτιμώμενο σφάλμα πιστοποίησης (ΜΑΡΕ πιστοποίησης) (%) για κάθε στρατηγική αναζήτησης με ρύθμιση παραμέτρων GEN=2000 και [L,H] = [-2,2]

Βάση των ραβδογραμμμάτων Ραβδόγραμμα 5 και Ραβδόγραμμα 6 μπορούν να παρατηρηθούν τα εξής:

➤ **Ομάδα στρατηγικών Rand:**

- Όπως φαίνεται στο Ραβδόγραμμα 5, οι εκτιμήσεις για τις προβλέψεις των στρατηγικών άρχισαν να μην είναι τόσο ακριβείς, καθώς εμφανιστήκαν μεγαλύτερα σφάλματα σε σχέση με τις προηγούμενες ρυθμίσεις.
- Ομοίως, στο Ραβδόγραμμα 6, τα σφάλματα για τις προβλέψεις συνέχισαν να είναι υψηλά, ακόμα και για τη Rand1 στρατηγική που για τις πρώτες δοκιμές τιμών των παραμέτρων GEN, L και H, έδωσε ακριβείς προβλέψεις. Αντίθετα, οι Rand4 και Rand5, εμφάνισαν πιο μικρά σφάλματα.

➤ **Ομάδα στρατηγικών Rad/Dir:**

- Οι στρατηγικές Rand/Dir, σύμφωνα με το Ραβδόγραμμα 5, γενικά διατήρησαν την εικόνα που είχαν στην αμέσως προηγούμενη ενότητα. Η Rand4/Dir2 και πάλι εμφάνισε το μικρότερο σφάλμα σε σχέση με τις υπόλοιπες στρατηγικές της κατηγορίας της.
- Με την αλλαγή των ορίων όμως από  $[L,H] = [-1,1]$  σε  $[L,H] = [-2,2]$  και σύμφωνα με το Ραβδόγραμμα 6, οι στρατηγικές Rand/Dir εμφάνισαν μεγαλύτερα σφάλματα.

➤ **Ομάδα στρατηγικών Rand/Best:**

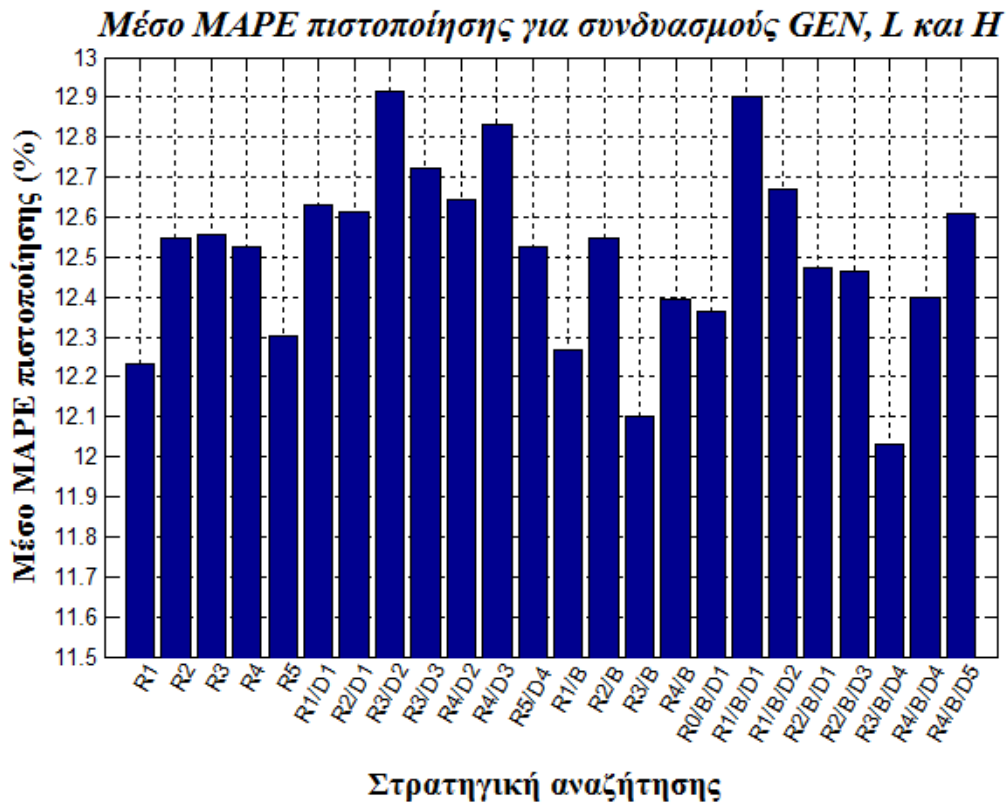
- Στις στρατηγικές Rand/Best, σύμφωνα με το Ραβδόγραμμα 5, καλή εικόνα εμφάνισαν οι Rand3/Best και Rand4/Best με MAPE πιστοποίησης κάτω του 12%.
- Πιο θετική είναι η εικόνα τους όμως με την αλλαγή των  $[L,H]$  σε  $[-2,2]$  (Ραβδόγραμμα 6) αλλά και σε σχέση με την προηγούμενη ενότητα. Τα σφάλματα των μεθόδων κινούνται κοντά στο 12% με τα καλύτερα αποτελέσματα να δίνονται από τις Rand1/Best και Rand3/Best.

➤ **Ομάδα στρατηγικών Rand/Best/Dir:**

- Οι περισσότερες γενεές δεν αποδείχθηκαν χρήσιμες για την κατηγορία αυτή. Με εξαίρεση τις Rand2/Best/Dir3 και Rand3/Best/Dir4 που εμφάνισαν σφάλμα κάτω του 12%, όπως φαίνεται στο Ραβδόγραμμα 5, πολλές είναι οι στρατηγικές που οι προβλέψεις τους συνοδεύονταν με μεγάλα σφάλματα.
- Όπως και οι στρατηγικές Rand/Best, έτσι και σε αυτή την ομάδα στρατηγικών λειτούργησε θετικά η αλλαγή των ορίων σε  $[L,H] = [-2,2]$ . Η Rand1/Best/Dir2 έδωσε το πολύ καλό MAPE πιστοποίησης 11,3485%, ενώ η Rand3/Best/Dir4 παρουσίασε ακόμα μια καλή πρόβλεψη. Αυτά φαίνονται στο Ραβδόγραμμα 6.

Εποπτικά, είναι φανερό από τα παραπάνω διαγράμματα ότι τα μέσα σφάλματα που προέκυψαν σε κάθε περίπτωση κυμαίνονται γύρω από την τιμή του 12.5% από τις πραγματικές τιμές, χωρίς να υπάρχουν μεγάλες αποκλίσεις.

Αυτό γίνεται αντιληπτό και με την εξαγωγή του μέσου όρου των σφαλμάτων ανά διαφορετική στρατηγική και για όλους τους διαφορετικούς συνδυασμούς του αριθμού γενεών και πεδίο ορισμού, όπως φαίνεται στο ακόλουθο Ραβδόγραμμα 7:



**Ραβδόγραμμα 7: Διάγραμμα μπαρών για το μέσο εκτιμώμενο MAPE πιστοποίησης (%) ανά είδος στρατηγικής αναζήτησης για διαφορετικές ρυθμίσεις των παραμέτρων GEN, L και H**

Συγκεκριμένα, σχετικά με τον αριθμό των γενεών,  $GEN$  και θεωρώντας ως «καλύτερα» τα σφάλματα πρόβλεψης για το εύρος ζώνης κάτω ζεύξης που ήταν κάτω των 12% και «χειρότερα» εκείνα που ξεπέρασαν το 13%, φάνηκε ότι οι μέθοδοι που χρησιμοποίησαν  $GEN = 1500$  είχαν την καλύτερη επίδοση. Αυτό σημαίνει ότι όχι μόνο απέδωσαν τα περισσότερα σε πλήθος «καλά» σφάλματα, αλλά και τα λιγότερα άνω του 13%. Αντίθετα, οι επιδόσεις των στρατηγικών με  $GEN = 1000$  και με  $GEN = 2000$  ήταν υποδεέστερες σε σχέση με την περίπτωση εκείνων που χρησιμοποιούν  $GEN = 1500$ , παρουσιάζοντας περισσότερα «χειρότερα» σφάλματα. Συγκεκριμένα, οι ακριβείς αριθμοί φαίνονται στον Πίνακα 5:

	1000 με (-1,1)	1000 με (-2,2)	1500 με (-1,1)	1500 με (-2,2)	2000 με (-1,1)	2000 με (-2,2)
MAPE > 12%	3	5	3	7	4	4
MAPE > 13%	4	5	4	4	6	5
Μέσος όρος σφαλμάτων	12,4930	12,5058	12,6133	12,3767	12,6056	12,4750

**Πίνακας 5:** Πλήθος μεθόδων με προβλέψεις που συνοδεύονταν από σφάλματα κάτω του 12%, άνω του 13% για τους διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων  $GEN$ ,  $L$  και  $H$ , καθώς και ο αντίστοιχος μέσος όρος σφαλμάτων MAPE πιστοποίησης

Επιπλέον, οι στρατηγικές έβγαλαν προβλέψεις με μικρότερα σφάλματα όταν το πεδίο ορισμού των παραμέτρων ορίστηκε σε  $[L, H] = [-2, 2]$  αντί για  $[L, H] = [-1, 1]$ , δείχνοντας έτσι την ανάγκη ορισμού μεγαλύτερου εύρους για την αναζήτηση των πιθανών λύσεων που θα χρησιμοποιηθούν στον αλγόριθμο.

μικρά σφάλματα συνοχή αποτελεσμάτων

Τέλος, με βάση ποιες στρατηγικές εξήγαγαν προβλέψεις με τα μικρότερα σφάλματα, αλλά και ποιες είχαν συνοχή στη συμπεριφορά τους με τις αλλαγές των παραμέτρων, οι στρατηγικές που κρίθηκε ότι είχαν την καλύτερη συνολική επίδοση ήταν οι εξής:

- Rand1
- Rand3/Best
- Rand0/Best/Dir1
- Rand3/Best/Dir4

Αξίζει να σημειωθεί πως η Rand1 στις εφαρμογές της παρουσίασε τα περισσότερα αποτελέσματα με σφάλμα MAPE μικρότερο του 12%. Ακόμα, η Rand3/Best/Dir4 είχε το μικρότερο μέσο όρο σφαλμάτων στις εφαρμογές της για τους διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων  $GEN$  και  $[L, H]$ . Τέλος, η Rand0/Best/Dir1 είχε ταχύτερη εξαγωγή των αποτελεσμάτων της (που οφείλεται στο γεγονός ότι δε προβλέπει την εξαγωγή πιθανών

λύσεων από τον πληθυσμό των λύσεων) χωρίς να αποκλίνει στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της σε σχέση με τις άλλες στρατηγικές.

Δεν επιλέχθηκε κάποια στρατηγική από την κατηγορία στρατηγικών Rand/Dir για το λόγο ότι οι επιδόσεις τους ήταν απλά ικανοποιητικές σε όλες τις περιπτώσεις και λίγες ήταν οι περιπτώσεις που έδωσαν πρόβλεψη με σφάλμα μικρότερο του 12%.

Έχοντας τα παραπάνω ως δεδομένα πλέον, έγιναν περισσότεροι πειραματισμοί, με στόχο το βέλτιστο συνδυασμό των παραμέτρων, μόνο για τις τέσσερις ονοματισμένες στρατηγικές.

### 5.3. Μεταβολή NP και F

---

Το μέγεθος του πληθυσμού,  $NP$  και η σταθερά διαφοροποίησης,  $F$ , ως παράμετροι ελέγχου της DE, συμβάλλουν στην ακρίβεια των αποτελεσμάτων της. Είναι παράμετροι που πρέπει να αρχικοποιούνται στην εκκίνηση του αλγορίθμου και συνεπώς είναι ενδεικτικοί για τη συμπεριφορά του. Έτσι, έγιναν πολλαπλές εκτελέσεις των τεσσάρων επιλεγμένων στρατηγικών της DE, που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, με διαφορετική κάθε φορά αρχικοποίηση των παραμέτρων ελέγχου  $NP$  και  $F$ . Συγκεκριμένα:

- Το μέγεθος πληθυσμού  $NP$  μεταβλήθηκε σε εύρος τιμών [50,120] με βήμα  $\beta=10$ .
- Η σταθερά διαφοροποίησης  $F$  μεταβλήθηκε σε εύρος τιμών [0.3, 1] με βήμα  $\beta=0,1$ . Οι τιμές  $F = 0.1$  και  $F = 0.2$  δεν ελέγχθηκαν, καθώς λόγω του μικρού μεγέθους τους, θεωρήθηκε αμελητέα η συμβολή τους στο αποτέλεσμα.

Οι μεταβολές των παραμέτρων  $NP$  και  $F$  πραγματοποιήθηκαν για σταθερές τιμές των υπολοίπων παραμέτρων:

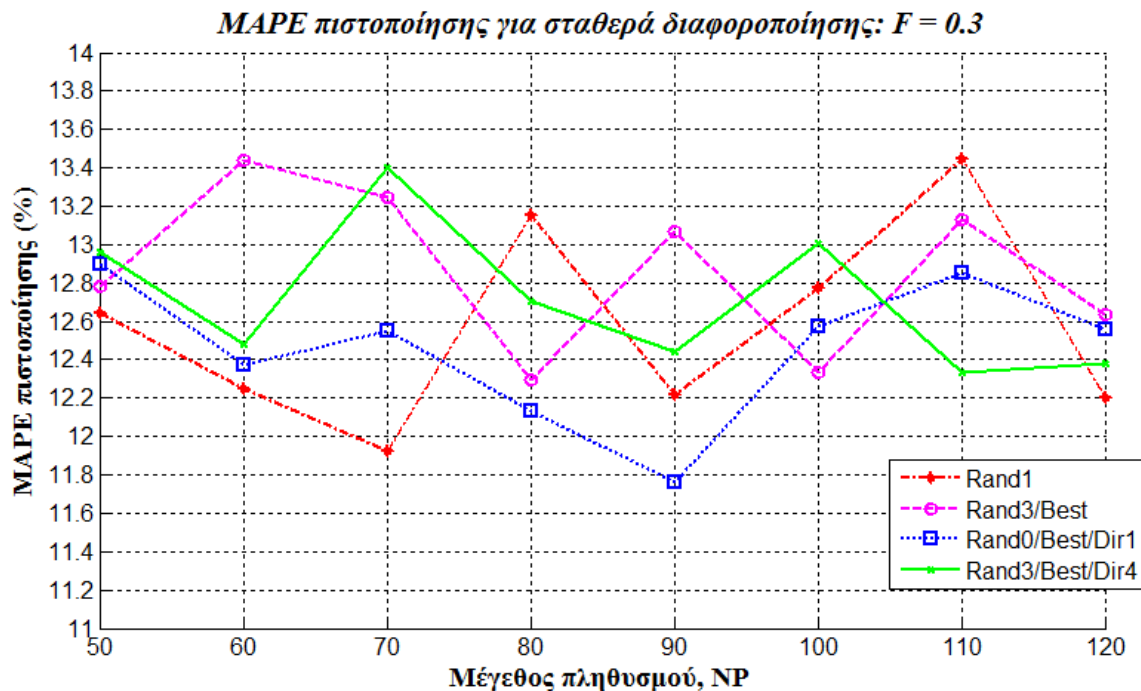
- $Cr = 0.5$
- $GEN = 1500$  (επιλέχθηκε ως βέλτιστη τιμή στην προηγούμενη ενότητα)
- $L = -2$  (επιλέχθηκε ως βέλτιστη τιμή στην προηγούμενη ενότητα)
- $H = 2$  (επιλέχθηκε ως βέλτιστη τιμή στην προηγούμενη ενότητα)



### 5.3.1. Σταθερό NP και μεταβαλλόμενη F

Τα αποτελέσματα που προέκυψαν φαίνονται στα διαγράμματα που ακολουθούν, ενώ αυτά συνοδεύονται από σχολιασμό.

#### 5.3.1.1. $F = 0.3$



**Διάγραμμα 2: MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών του μεγέθους πληθυσμού NP και σταθερά διαφοροποίησης  $F = 0.3$**

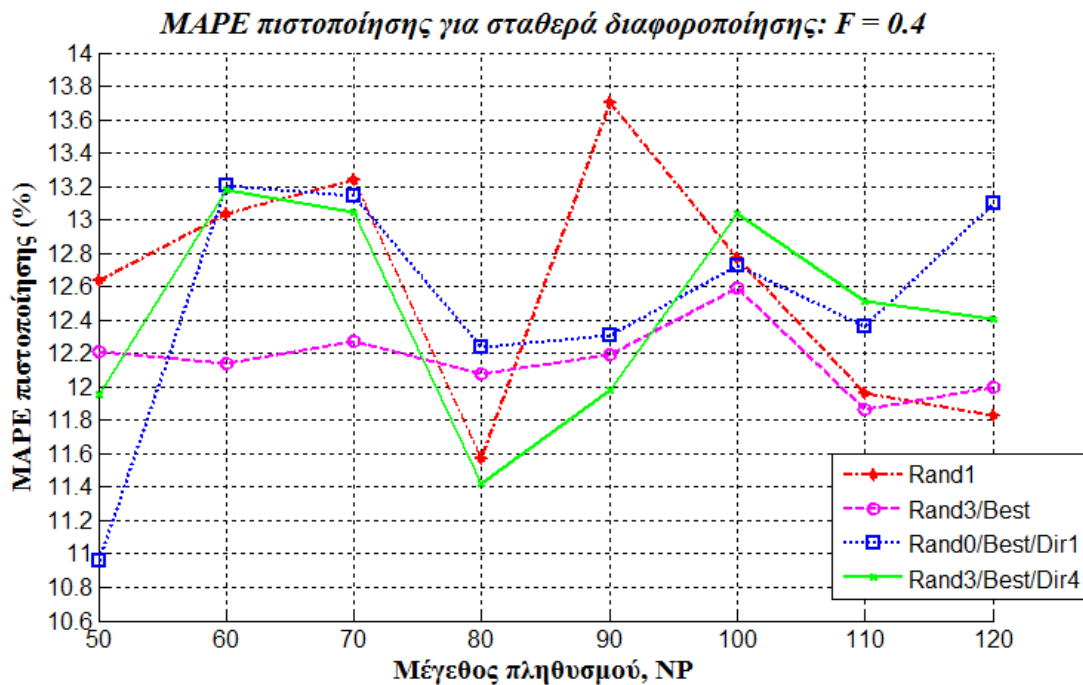
Όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2, για τη Rand1 στρατηγική, παρατηρείται ότι ξεκίνησε με MAPE πιστοποίησης για  $NP = 50$  (συγκεκριμένα 12.6414%) και παρουσίασε αρχικά πτωτική τάση στις τιμές των σφαλμάτων που απέδωσε, όσο οι τιμές του μεγέθους του πληθυσμού μεταβάλλονταν αυξητικά, φτάνοντας στο ελάχιστο της σφάλμα, 11.9242%. Ωστόσο, από εκεί κι έπειτα, τα αποτελέσματά της παρουσίασαν μεγάλη αστάθεια, μεταπηδώντας από χαμηλά σε υψηλά σφάλματα και αντίστροφα. Αυτό σημαίνει ότι δεν πέτυχε να βρεθεί σωστή ρύθμιση της μεθόδου για τις μελετώμενες τιμές NP και F.

Η Rand0/Best/Dir1 στρατηγική, όπως και η Rand1, ξεκίνησε με αρκετά μεγάλη τιμή σφάλματος για  $NP = 50$  (συγκεκριμένα 12.8975%) και παρουσίασε μεγαλύτερη ακρίβεια στις προβλέψεις της με την αύξηση του πληθυσμού, εμφανίζοντας τελικά

ελάχιστο σφάλμα ύψους 11.7587% για NP = 90. Από εκεί και πέρα, η αύξηση της παραμέτρου NP οδήγησε σε ελαφρώς μεγαλύτερη απόκλιση των προβλέψεων της στρατηγικής από τα πραγματικά δεδομένα, χωρίς ωστόσο να γίνει άστοχη.

Όσον αφορά τις στρατηγικές Rand3/Best και Rand3/Best/Dir4, εκείνες εμφάνισαν μια σχετικά παρόμοια συμπεριφορά με MAPE πιστοποίησης γύρω από τιμή 12.6%.

### 5.3.1.2. F = 0.4



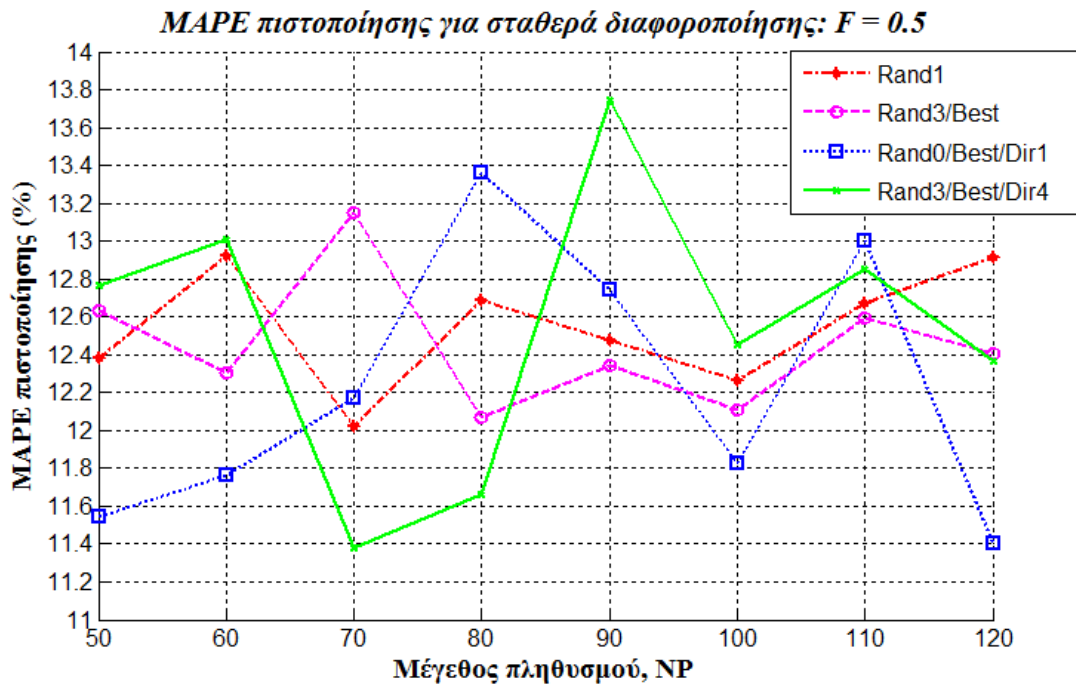
**Διάγραμμα 3 : MAPE πιστοποίησης (%)για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών του μεγέθους πληθυσμού NP και σταθερά διαφοροποίησης F = 0.4**

Η αύξηση της τιμής της σταθεράς διαφοροποίησης, σύμφωνα με το Διάγραμμα 3, φαίνεται να λειτουργεί περισσότερο θετικά για τη στρατηγική Rand3/Best, καθώς είναι η στρατηγική που παρουσίασε πολύ μεγάλη σταθεροποίηση των αποτελεσμάτων για το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, με τα εκτιμώμενα MAPE πιστοποίησής της να διατηρούνται σε χαμηλά επίπεδα, γύρω την τιμή 12.2%.

Εξομάλυνση των τιμών των σφαλμάτων παρατηρήθηκε και για την Rand0/Best/Dir1. Ωστόσο, αυτό ίσχυσε μόνο για τιμές μεγέθους πληθυσμού μεταξύ του εύρους [80,110], καθώς προέκυψε μεγάλη απόκλιση στα αποτελέσματά της για μικρές τιμές NP.

Όσον αφορά τις υπόλοιπες μεθόδους, καμία εξομάλυνση δεν παρατηρήθηκε. Αντίθετα, υπήρξε μεγάλη αστάθεια στα αποτελέσματα.

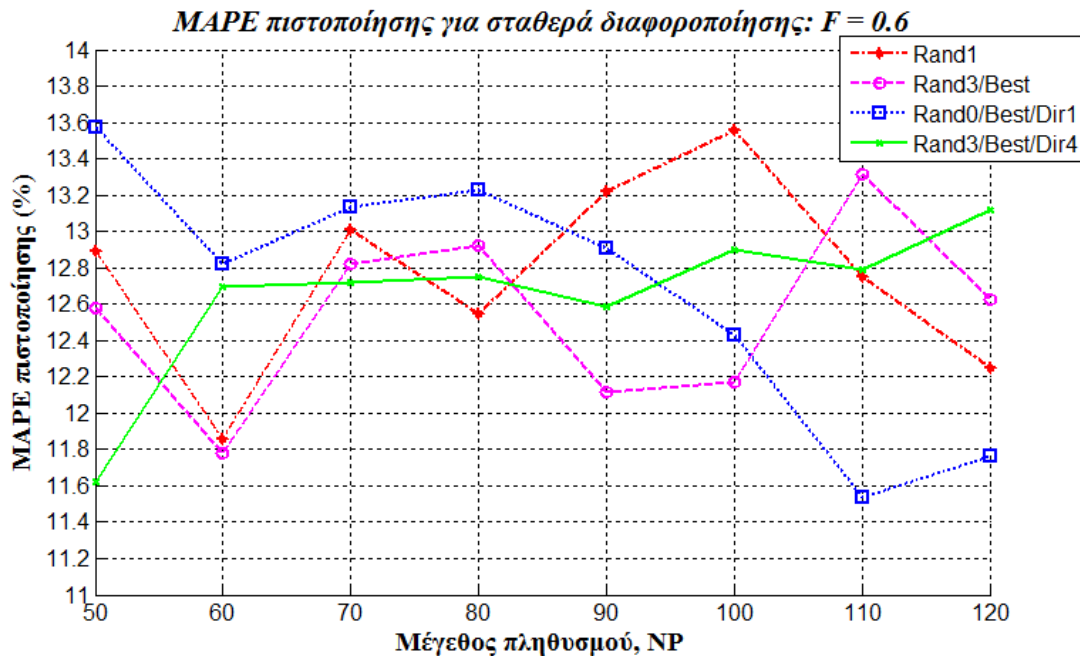
### 5.3.1.3. $F = 0.5$



**Διάγραμμα 4 :** MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές **Rand1**, **Rand3/Best**, **Rand0/Best/Dir1** και **Rand3/Best/Dir4** για τις μεταβολές τιμών του μεγέθους πληθυσμού NP και σταθερά διαφοροποίησης  $F = 0.5$

Η επιπλέον αύξηση της σταθεράς διαφοροποίησης συνέχισε να δημιουργεί μεγαλύτερη αστάθεια για τη Rand3/Best/Dir4 και να επεκτείνει την αστάθεια σε όλο το εύρος τιμών του μεγέθους πληθυσμού για τις Rand3/Best και Rand0/Best/Dir4. Αυτό είναι φανερό στο Διάγραμμα 4. Ωστόσο, ευνοϊκή αποδείχθηκε ότι ήταν για τη στρατηγική Rand1. Οι μεγάλες αποκλίσεις που εμφανίζονταν, εξομαλύνθηκαν σε μεγάλο βαθμό με τη δοκιμή της τιμής  $F = 0.5$ , διατηρώντας τα MAPE πιστοποίησης των προβλέψεων σε τιμές γύρω από το 12.5%.

### 5.3.1.4. $F = 0.6$



**Διάγραμμα 5 :** ΜΑΡΕ πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών του μεγέθους πληθυσμού NP και σταθερά διαφοροποίησης  $F = 0.6$

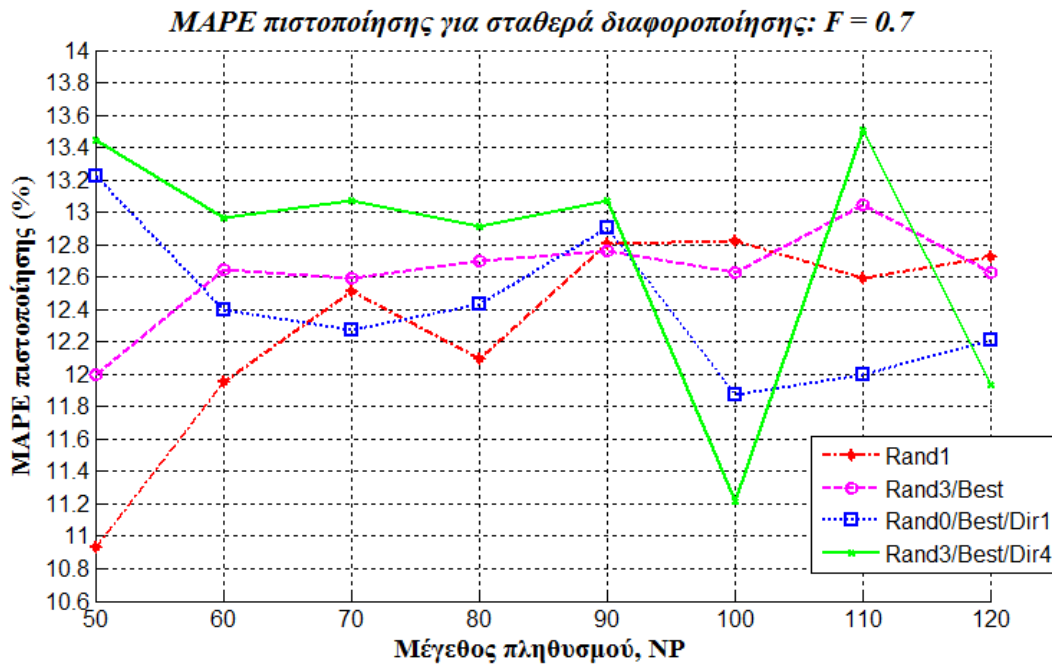
Αλλαγή της τιμής στη σταθερά διαφοροποίησης, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 5, δε διατήρησε την εξομάλυνση της Rand1 που παρατηρήθηκε για  $F = 0.5$ . Αρχικά, εμφάνισε ένα σχετικά μεγάλο σφάλμα για  $NP = 50$ , ενώ για  $NP = 60$  πέτυχε πρόβλεψη με εκτίμηση σφάλματος ίσο με 11.8577%. Η συνέχεια των αποτελεσμάτων για τη Rand1 παρουσίασαν αστάθεια.

Η ανομοιομορφία που εμφανίστηκε για τη Rand3/Best συνεχίστηκε πιο έντονη για  $F = 0.6$ .

Όσον αφορά στη Rand0/Best/Dir1, αυτή συνέχισε να είναι ασταθής, εμφανίζοντας μια σχετική ομοιομορφία στο διάστημα τιμών  $NP = [60,90]$ , αλλά και βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων του νευρωνικού όσο εφαρμόζονται μεγαλύτερες τιμές για την παράμετρο NP.

Αξιοπρόσεκτο ήταν ότι τα αποτελέσματα που προέκυψαν για τη στρατηγική Rand3/Best/Dir4 άρχισαν να ομαλοποιούνται. Με μια πρόβλεψη για  $NP = 50$  που εκτιμήθηκε με το πολύ ικανοποιητικό 11.6194%, τα υπόλοιπα σφάλματα, που συνόδευσαν τις προβλέψεις για διαφορετικές τιμές της NP, κυμάνθηκαν γύρω από ανεκτό αλλά όχι τόσο ικανοποιητικό ΜΑΡΕ πιστοποίησης της τάξης του 12.7%.

### 5.3.1.5. $F = 0.7$



**Διάγραμμα 6 : MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών του μεγέθους πληθυσμού NP και σταθερά διαφοροποίησης  $F = 0.7$**

Με τη σταθερά διαφοροποίησης ίση με 0.7 πλέον, η Rand1 στρατηγική έδωσε προβλέψεις με MAPE πιστοποίησης κάτω του 12% για μικρές τιμές μεγέθους πληθυσμού, χωρίς όμως να διατηρήσει την ίδια συμπεριφορά για μεγαλύτερες τιμές NP. Ωστόσο, οι προβλέψεις της στρατηγικής δεν είχαν μεγάλη απόκλιση μεταξύ τους για τις αυτές τις μεγαλύτερες τιμές NP, γεγονός που εκφράζεται από τα παρόμοια σφάλματα της τάξης του 12,5%.

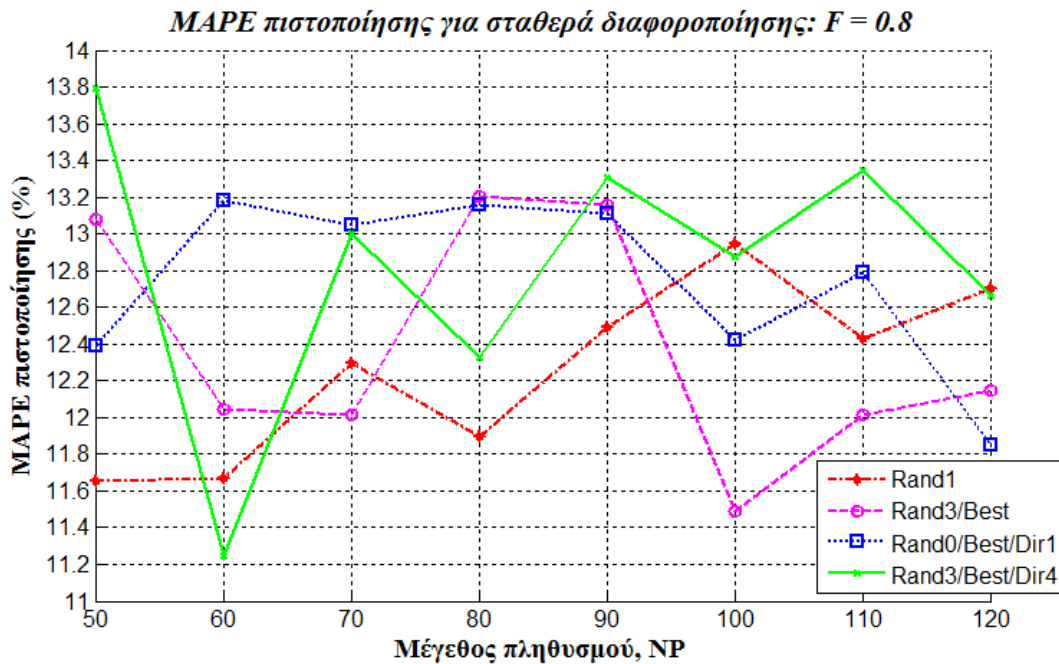
Η στρατηγική Rand3/Best ομαλοποιήθηκε και πάλι για  $F = 0.7$ , μετά από την ανάλογη συμπεριφορά που παρατηρήθηκε για  $F = 0.4$ . Οι τιμές σφάλματος όμως που απέδωσε σε αυτήν την περίπτωση κυμάνθηκαν σε ανώτερα και ανεκτά ικανοποιητικά σφάλματα γύρω από το 12,6%.

Η Rand0/Best/Dir1 διατήρησε τη συμπεριφορά που εμφάνισε για  $F = 0.6$ , με τις τιμές σφαλμάτων για τις μεγάλες τιμές NP ελαφρώς αυξημένες.

Τέλος, η Rand3/Best/Dir4 απέδωσε μεγαλύτερα σφάλματα στις προβλέψεις του τεχνητού νευρωνικού δικτύου, με τιμές γύρω από το 13%, ενώ οι μεγάλες τιμές μεγέθους πληθυσμού φάνηκαν να την αποσταθεροποιούν.

Τα παραπάνω φαίνονται στο Διάγραμμα 6.

### 5.3.1.6. $F = 0.8$



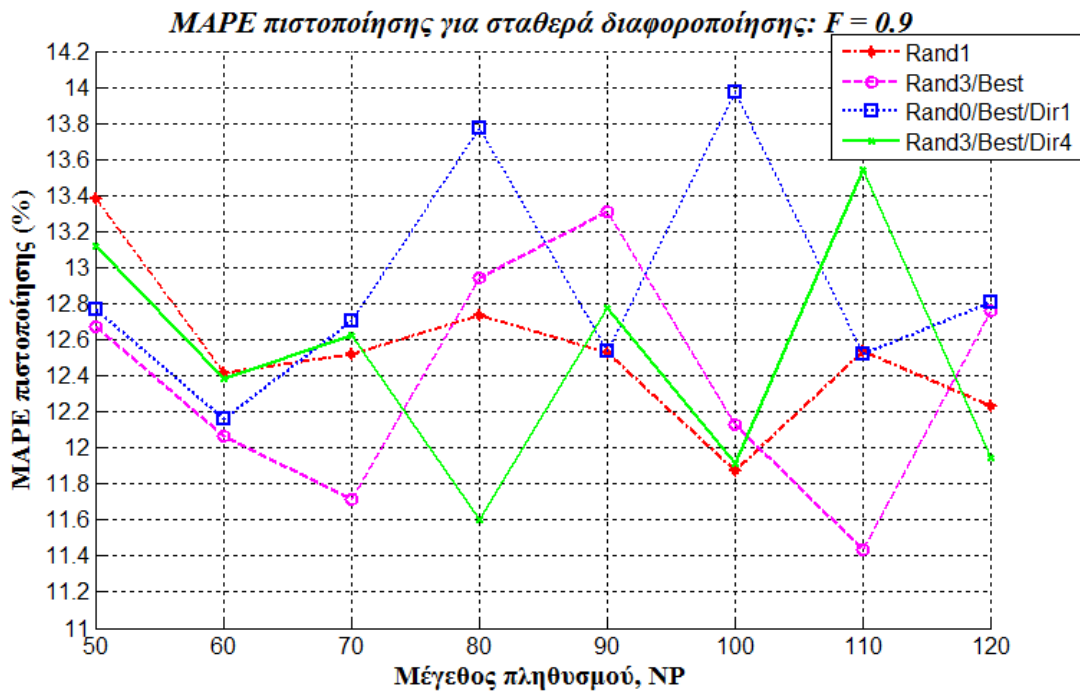
**Διάγραμμα 7 : ΜΑΡΕ πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών του μεγέθους πληθυσμού NP και σταθερά διαφοροποίησης  $F = 0.8$**

Επιπλέον αύξηση της σταθεράς διαφοροποίησης απορύθμισε εντελώς την Rand3/Best όπως και την Rand3/Best/Dir4.

Η Rand0/Best/Dir1 είχε παρόμοια συμπεριφορά στο μεγαλύτερο εύρος μεταβολών της παραμέτρου NP, όπως φαίνεται και στο Διάγραμμα 7, δίνοντας προβλέψεις με MAPE πιστοποίησης κοντά στο 13%. Τα αποτελέσματά της βελτιώθηκαν σημαντικά για τις μεγάλες τιμές της NP ( $NP = 100, 110, 120$ ).

Η στρατηγική Rand1 ήταν αρκετά αποδοτική για  $F = 0.8$  και  $NP < 100$ , με προβλέψεις που εκτιμήθηκαν από μικρά και αρκετά ικανοποιητικά σφάλματα. Για τις μεγάλες τιμές πληθυσμού ωστόσο, παρουσίασε μια άνοδο στις τιμές των σφαλμάτων.

### 5.3.1.7. $F = 0.9$

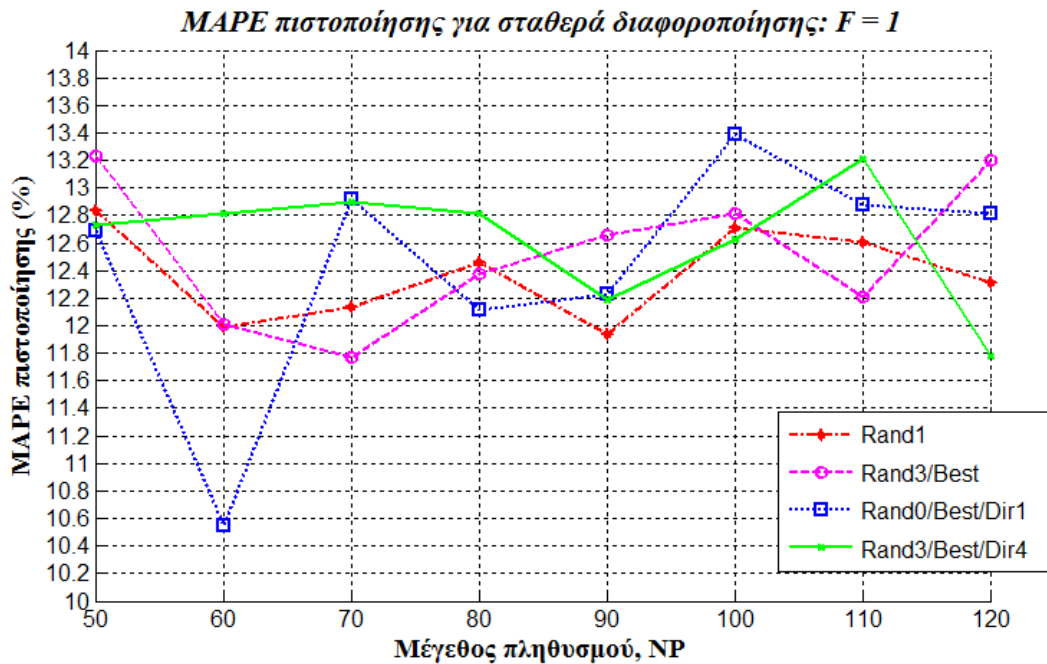


**Διάγραμμα 8 : MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών του μεγέθους πληθυσμού NP και σταθερά διαφοροποίησης  $F = 0.9$**

Για  $F = 0.9$ , όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 8, οι στρατηγικές Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 εμφάνισαν μεγάλη αστάθεια, με την τελευταία ωστόσο να βγάζει προβλέψεις με σφάλματα που διατηρήθηκαν ως επί το πλείστον σε ικανοποιητικά επίπεδα, με μέσο σφάλμα πιστοποίησης κάτω από 12,8%. Αντίθετα, η Rand0/Best/Dir1 για μεγέθη πληθυσμού άνω του  $NP = 70$  εμφάνισε υψηλές τιμές σφαλμάτων.

Όσον αφορά στη Rand1 στρατηγική, αυτή, αν και ξεκίνησε με μια πρόβλεψη που συνοδεύτηκε από μεγάλο σφάλμα όταν  $NP = 50$ , για τις υπόλοιπες τιμές μεγέθους πληθυσμού κινήθηκε σε ικανοποιητικά επίπεδα σφαλμάτων, αποδεικνύοντας έτσι ότι έχει μια καλή ρύθμιση ως στρατηγική για  $F = 0.9$ .

### 5.3.1.8. $F = 1$



**Διάγραμμα 9 :** MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών του μεγέθους πληθυσμού NP και σταθερά διαφοροποίησης  $F = 1$

Η καλή ρύθμιση της Rand1 στρατηγικής που φάνηκε για  $F = 0.9$ , συνεχίστηκε και για  $F = 1$ . Οι προβλέψεις εκτιμήθηκαν από MAPE πιστοποίησης που τοποθετήθηκαν κάτω από 12,5%.

Η Rand3/Best εμφανίστηκε πολύ πιο σταθερή σε σχέση με το προηγούμενο διάγραμμα, με μέσο MAPE πιστοποίησης ίσο με 12.53%, χωρίς όμως η εικόνα της να γίνει καλύτερη από εκείνη που είχε για  $F = 0.4$ .

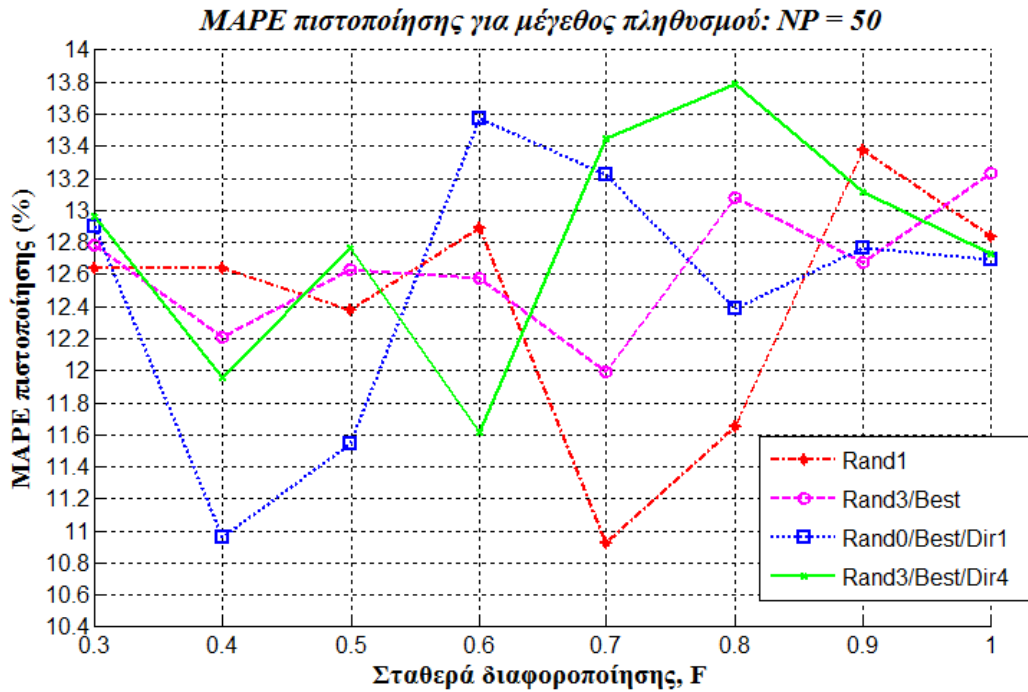
Καλύτερα ρυθμισμένες εμφανίστηκαν και οι Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4.

Τα παραπάνω επαληθεύονται στο Διάγραμμα 9.



### 5.3.2. Σταθερή F και μεταβαλλόμενο NP

#### 5.3.2.1. NP = 50

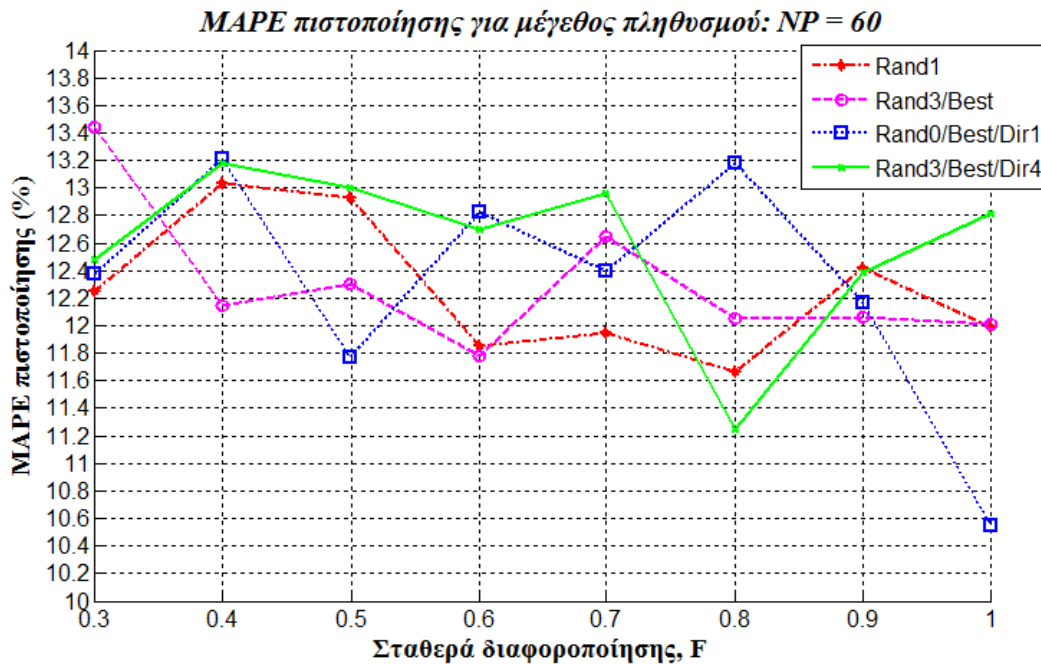


**Διάγραμμα 10 :** MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών της σταθεράς διαφοροποίησης F και μεγέθους πληθυσμού NP = 50

Η Rand1 στρατηγική και η Rand3/Best, όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 10, είχαν παρόμοια συμπεριφορά για μέγεθος πληθυσμού  $NP = 50$ . Ξεκίνησαν δίνοντας προβλέψεις που εκτιμήθηκαν από σφάλματα παρόμοιου επιπέδου, φτάνοντας στην ελάχιστη τιμή σφάλματός τους για  $F = 0.7$ .

Οι Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 δεν πέτυχαν να βρουν μια καλή ρύθμιση για  $NP = 50$ .

### 5.3.2.2. NP = 60



**Διάγραμμα 11 :** MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών της σταθεράς διαφοροποίησης F και μεγέθους πληθυσμού NP = 60

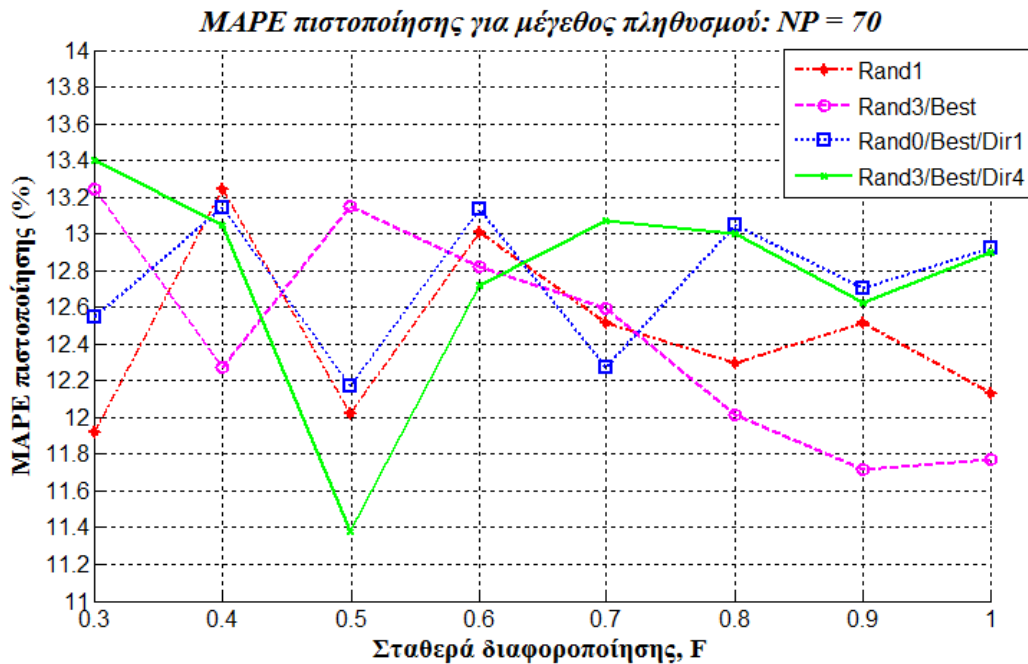
Πολύ ομαλότερη, σύμφωνα με το Διάγραμμα 11, ήταν η συμπεριφορά όλων των στρατηγικών στις περιπτώσεις που το μέγεθος του πληθυσμού ορίστηκε ίσο με 60 ( $NP = 60$ ).

Ειδικά οι Rand1 και Rand3/Best στρατηγικές, για τιμές σταθεράς διαφοροποίησης άνω του  $F = 0.6$  έδωσαν καλή ακρίβεια σε σχέση με την εικόνα σφαλμάτων που έχει παρατηρηθεί γενικά μέχρι στιγμής. Μέσος όρος MAPE πιστοποίησης για αυτές τις περιπτώσεις ήταν 11,98% και 12,33% αντίστοιχα.

Η Rand0/Best/Dir1 έδωσε καλά αποτελέσματα σφαλμάτων σε ξεχωριστές περιπτώσεις εφαρμογής  $F = 0.5$  και  $F = 1$ , έχοντας όμως καλύτερη εικόνα για τιμές της  $F = 0.7, 0.8$  και  $0.9$ .

Τέλος, η Rand3/Best/Dir4 είχε συνοχή στα αποτελέσματά της για τιμές της F μικρότερες του 0.7, αλλά για τις μεγαλύτερες από αυτές δεν μπορεί να αξιολογηθεί ως αξιόπιστη.

### 5.3.2.3. NP = 70

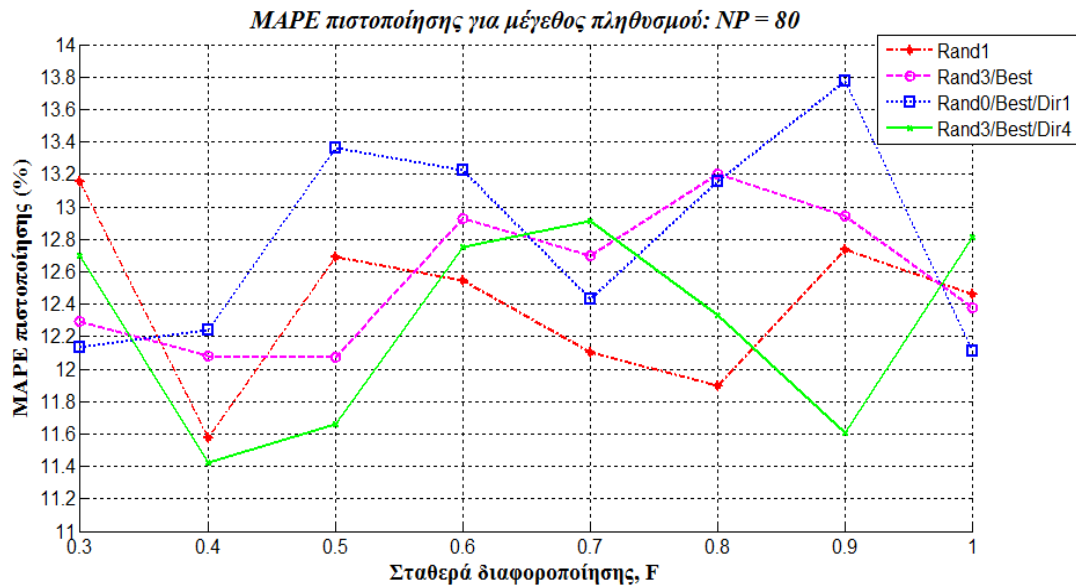


**Διάγραμμα 12: MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών της σταθεράς διαφοροποίησης F και μεγέθους πληθυσμού NP = 70**

Για  $NP = 70$ , οι Rand1 και Rand3/Best στρατηγικές συνέχισαν να δίνουν παρόμοια εικόνα, παρουσιάζοντας καλύτερη ρύθμιση στα αποτελέσματά τους για  $F > 0.7$ . Μάλιστα, όσο αυξανόταν η τιμή της σταθεράς διαφοροποίησης, τόσο ακριβέστερες φαίνονταν να είναι οι προβλέψεις.

Οι υπόλοιπες δύο στρατηγικές, σύμφωνα με το Διάγραμμα 12, εξακολούθησαν να μην εμφανίζουν συνοχή και καλά αποτελέσματα.

### 5.3.2.4. NP = 80



**Διάγραμμα 13 : MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών της σταθεράς διαφοροποίησης F και μεγέθους πληθυσμού NP = 80**

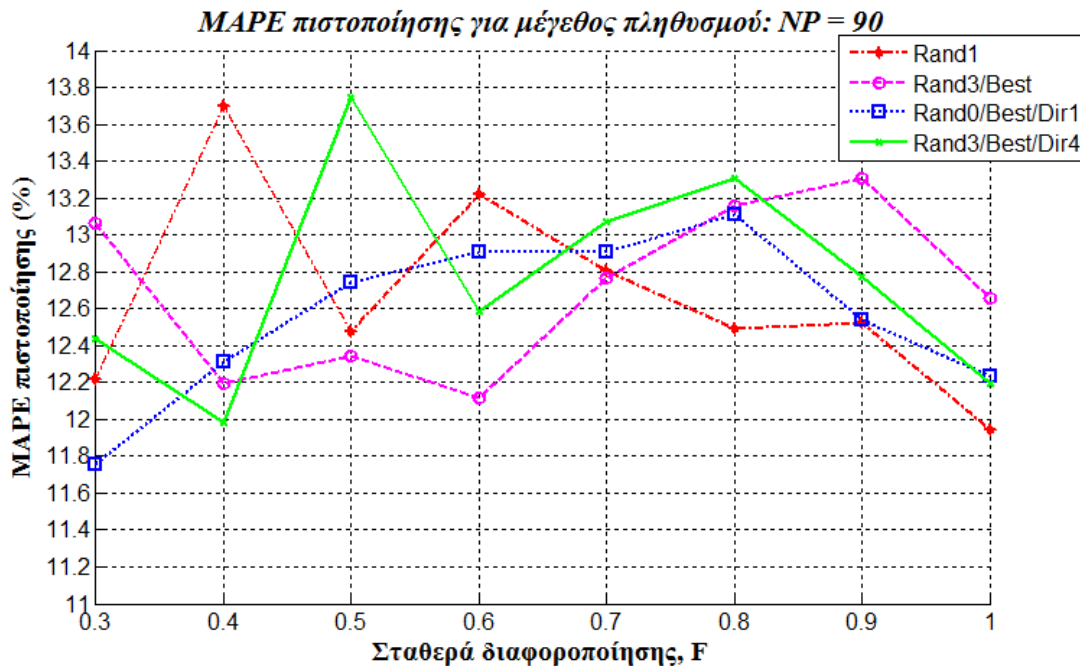
Ρύθμιση του μεγέθους του πληθυσμού για  $NP = 80$ , όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 13, προκάλεσε ελαφριά μετατόπιση των γραφικών παραστάσεων των σφαλμάτων για τις τρεις εκ των τεσσάρων επιλεγμένων στρατηγικών προς τα κάτω (εξαιρείται η Rand0/Best/Dir4).

Ιδιαίτερα καλή μπορεί να χαρακτηριστεί η επίδοση της Rand1 στρατηγικής, καθώς όλα τα αποτελέσματά της, εκτός ενός, δεν ξεπέρασαν ένα μέσο όρο σφαλμάτων πιστοποίησης του 12.8%. Αυτό ανέδειξε τη συγκεκριμένη επιλογή παραμέτρων ως κατάλληλη πιθανή επιλογή για τη χρήση εξαγωγής προβλέψεων για το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο.

Η στρατηγική Rand3/Best είχε μια αυξητική τάση στα σφάλματα εκτίμησης των προβλέψεων, δίνοντας έτσι εικόνα καλύτερης ρύθμισής της για  $F < 0.6$ .

Οι στρατηγικές Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 παρουσίασαν έντονη ανομοιομορφία στα αποτελέσματά τους, με τη διαφορά ότι η πρώτη ήταν πιο άστοχη στις προβλέψεις της, δεδομένου ότι οι εκτιμήσεις των προβλέψεων του τεχνητού νευρωνικού δικτύου κυμάνθηκαν σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές σφαλμάτων. Αντίθετα, η Rand3/Best/Dir4 εμφάνισε κάποια πιο ακριβή αποτελέσματα.

### 5.3.2.5. NP = 90



**Διάγραμμα 14 : MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών της σταθεράς διαφοροποίησης F και μεγέθους πληθυσμού NP = 90**

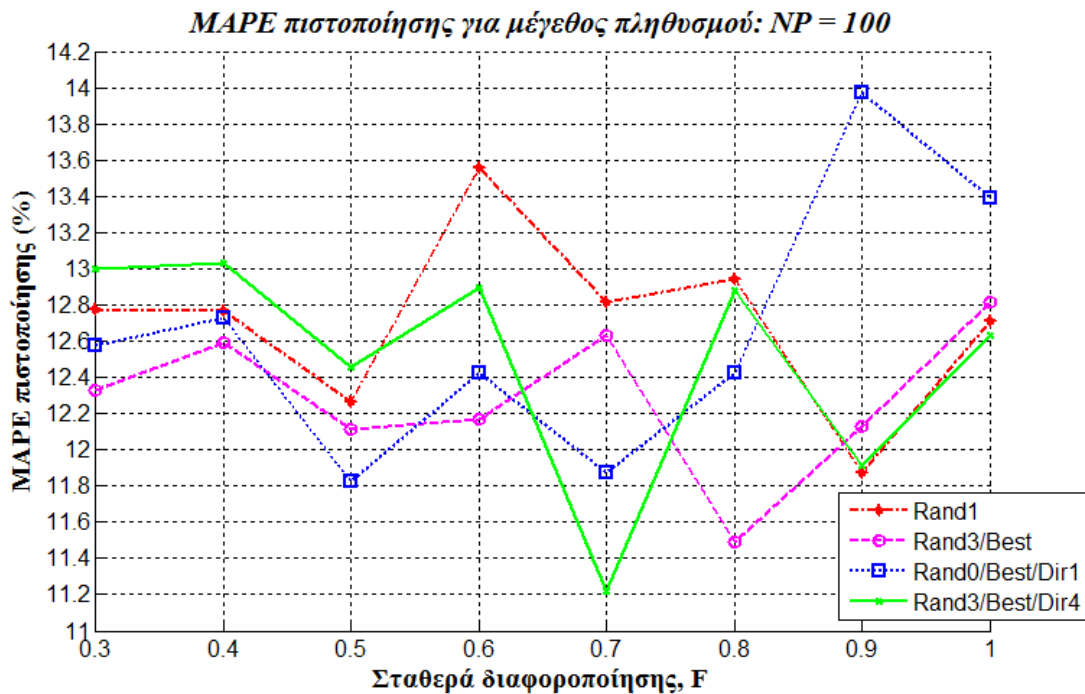
Η ρύθμιση του μεγέθους πληθυσμού σε  $NP = 90$  ευνόησε περισσότερο τη στρατηγική Rand0/Best/Dir1 καθώς, όπως φαίνεται και από το γράφημα, υπάρχει μια συνοχή στα αποτελέσματά της. Μάλιστα, έδωσε σχετικά ικανοποιητικά σφάλματα για  $F < 0.4$  και  $F > 0.8$ . Ενδεχομένως, η συγκεκριμένη είναι από τις καλύτερες ρυθμίσεις που μπορούν να επιλεγούν για τη συγκεκριμένη στρατηγική, όσον αφορά την παράμετρο του μεγέθους του πληθυσμού.

Όσον αφορά στη Rand1 στρατηγική, δεν έδωσε σε αυτήν την περίπτωση ικανοποιητικές προβλέψεις για  $F < 0.6$ . Όμως, αυτό δε συνεχίστηκε και για τις μεγαλύτερες τιμές της σταθεράς διαφοροποίησης.

Οι στρατηγικές Rand3/Best και Rand3/Best/Dir4 παρουσίασαν αυξημένα σφάλματα για  $0.6 < F < 1$ . Η διαφορά μεταξύ τους όμως, έγκειται στο γεγονός ότι η Rand3/Best/Dir4 έχει μεγαλύτερη ευαισθησία στην αλλαγή των παραμέτρων από τη Rand3/Best με αποτέλεσμα να έχουν μεγάλη διαφορά στην εκτίμηση της πρόβλεψής τους για  $F = 0.5$ .

Τα παραπάνω φαίνονται στο Διάγραμμα 14.

### 5.3.2.6. NP = 100



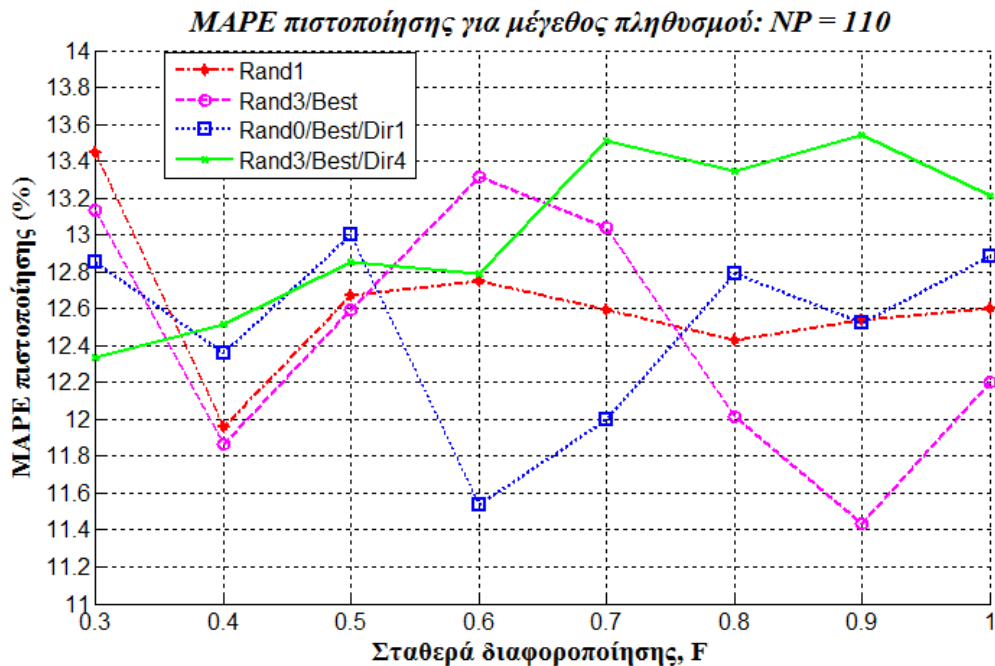
**Διάγραμμα 15 : MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών της σταθεράς διαφοροποίησης F και μεγέθους πληθυσμού NP = 100**

Στο Διάγραμμα 15, για  $NP = 100$ , φαίνεται ότι η στρατηγική Rand0/Best/Dir1 βελτίωσε περισσότερο την επίδοσή της στις προβλέψεις του τεχνητού νευρωνικού δικτύου σε σχέση με την αμέσως προηγούμενη περίπτωση, όπου είχε οριστεί  $NP = 90$ . Αυτό ισχύει για  $F < 0.9$ .

Παρόμοια είναι η συμπεριφορά και για τη Rand3/Best, η οποία είχε πολύ καλή ακρίβεια σφαλμάτων σε όλο το εύρος μεταβολής τιμών της παραμέτρου F.

Τέλος, οι στρατηγικές Rand1 και Rand3/Best/Dir4, είναι και οι δύο ευαίσθητες στις αλλαγές της NP. Πρέπει να σημειωθεί όμως ότι, με εξαίρεση τον ορισμό  $F = 0.6$  για τη Rand1, και οι δύο στρατηγικές ήταν ικανοποιητικές στις προβλέψεις τους, με τη Rand3/Best/Dir4 να πετυχαίνει μια ακριβή πρόβλεψη για  $F = 0.7$  με εκτίμηση  $MAPE$  πιστοποίησης = 11.2158%.

### 5.3.2.7. NP = 110



**Διάγραμμα 16 :** MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών της σταθεράς διαφοροποίησης F και μεγέθους πληθυσμού NP = 110

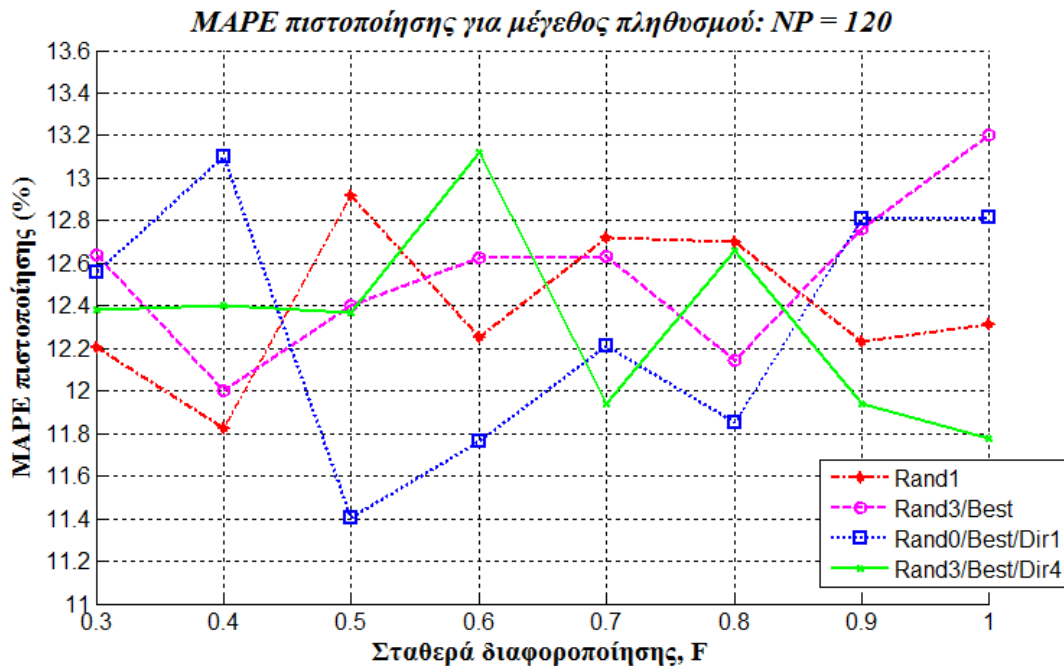
Η Rad1 στρατηγική, για  $NP = 110$ , επανήλθε σε μια πιο ομοιόμορφη απόδοση στα αποτελέσματά της, εμφανίζοντας μια ανορθόδοξη συμπεριφορά για μικρές τιμές NP (Διάγραμμα 16). Η ακρίβεια των προβλέψεων εξακολούθησε να είναι ικανοποιητική, με τις εκτιμήσεις των προβλέψεων να κινούνται στην πλειοψηφία τους γύρω από την τιμή του 12,6%.

Η Rand3/Best στρατηγική, επίσης εμφάνισε ακριβείς προβλέψεις για τιμές της F, και συγκεκριμένα για  $F = 0.4, 0.5, 0.8, 0.9$ . Στις υπόλοιπες περιπτώσεις ωστόσο, ήταν μεγάλα τα σφάλματα που βγήκαν για τις προβλέψεις.

Τα σφάλματα που εκτιμήθηκαν για τις προβλέψεις που έγιναν σύμφωνα με τη στρατηγική Rand0/Best/Dir1 πέτυχαν ακριβείς προβλέψεις μόνο για  $F = 0.6$  και  $0.7$ .

Τέλος, ο ορισμός όλο και μεγαλύτερων τιμών λειτούργησε αρνητικά για τη Rand3/Best/Dir4, όσο  $NP = 110$ , με τα σφάλματα να έχουν ανοδική πορεία.

### 5.3.2.8. NP = 120



**Διάγραμμα 17 : MAPE πιστοποίησης (%) για τις στρατηγικές Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4 για τις μεταβολές τιμών της σταθεράς διαφοροποίησης F και μεγέθους πληθυσμού NP = 120**

Για μια ακόμη φορά, στο Διάγραμμα 17, η Rand1 αποδείχθηκε αρκετά ακριβής στις προβλέψεις τις σε σχέση με τη γενική εικόνα που έχει σχηματιστεί μέχρι στιγμής για τις στρατηγικές. Δεν παρουσίασε έντονες ανωμαλίες στις προβλέψεις της, ενώ το μέσο MAPE πιστοποίησης των προβλέψεων ήταν 12,3968%.

Όμοια με τη Rand1, καλές προβλέψεις με μια απόκλιση μόνο για  $F = 1$ , έδωσε η Rand3/Best, με μέσο σφάλμα για αυτές τις περιπτώσεις ίσο με 12,46% και συνολικό μέσο σφάλμα 12,55%.

Η στρατηγική Rand0/Best/Dir1 εμφάνισε κάποιες από τις πιο ακριβείς προβλέψεις της για  $NP = 120$  σε συνδυασμό με τις μέσες τιμές της σταθεράς διαφοροποίησης F, με μέσο σφάλμα για αυτές τις περιπτώσεις ίσο με 11,81%. Πρόκειται για κάποιες από τις καλύτερες ρυθμίσεις για τη μέθοδο, σε σχέση με προηγούμενες παρατηρήσεις.

Όσον αφορά στη Rand3/Best/Dir4, με μικρές αποκλίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων της που ανέδειξαν την ευαισθησία της στις μεταβολές των παραμέτρων, όπως και οι προηγούμενες μέθοδοι, πέτυχε αρκετά ακριβείς προβλέψεις με μέσο όρο MAPE πιστοποίησης 12,3239%.



## 5.4. Παράλληλη μεταβολή των NP και F

---

Αφού παρουσιάστηκε η επίδραση που έχει η κάθε μεταβολή των παραμέτρων NP και F για τις επιλεγμένες στρατηγικές, παρατηρήθηκε μια τάση των τεσσάρων στρατηγικών να βγάζουν καλύτερα αποτελέσματα σφαλμάτων για:

- μεγέθη πληθυσμού  $NP = 60, 80$  και  $100$
- σταθερά διαφοροποίησης  $F = 0.7, 0.8$  και  $0.9$

Η παράλληλη επίδραση της μεταβολής των παραμέτρων του αλγορίθμου NP και F φαίνεται ξεκάθαρα στα τρισδιάστατα διαγράμματα που ακολουθούν. Καθένα από αυτά αντιστοιχεί σε κάθε είδος στρατηγικής που επιλέχθηκε.

### 5.4.1. Στρατηγική Rand1

---

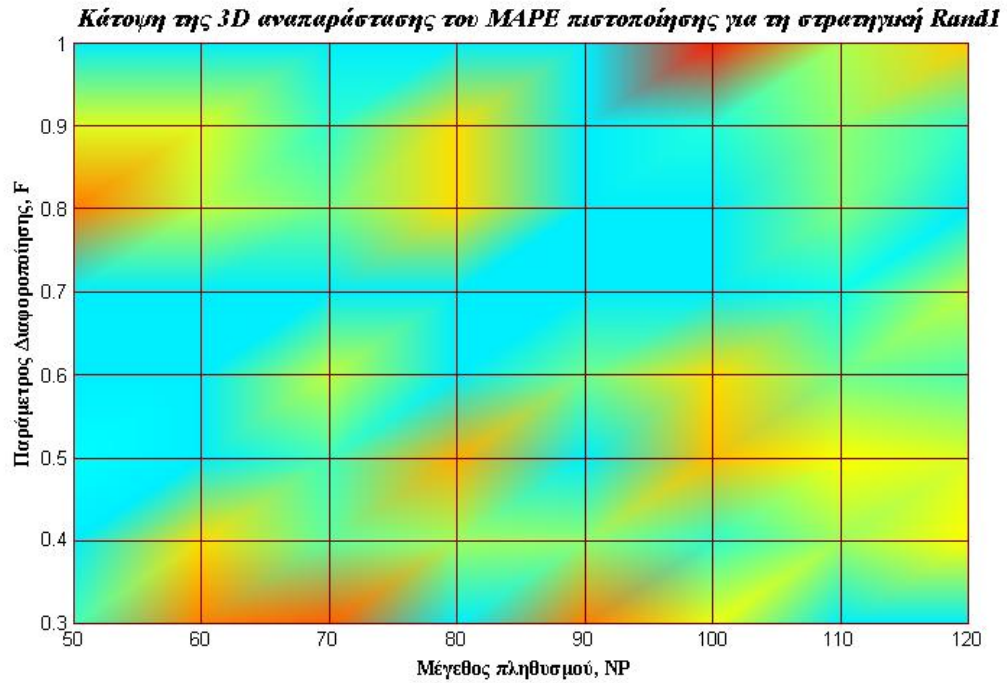
Η Rand1 αποτελεί μια από τις πιο σταθερές στις προβλέψεις της στρατηγική. Αυτό επισημάνθηκε και στις προηγούμενες ενότητες.

Οι περισσότεροι συνδυασμοί των παραμέτρων συνέκλιναν σε σφάλματα γύρω από το 12,4676%. Επιπλέον, η βέλτιστη ρύθμιση της μεθόδου, όπως αυτή φάνηκε από τα αποτελέσματα, προέκυψε ως:

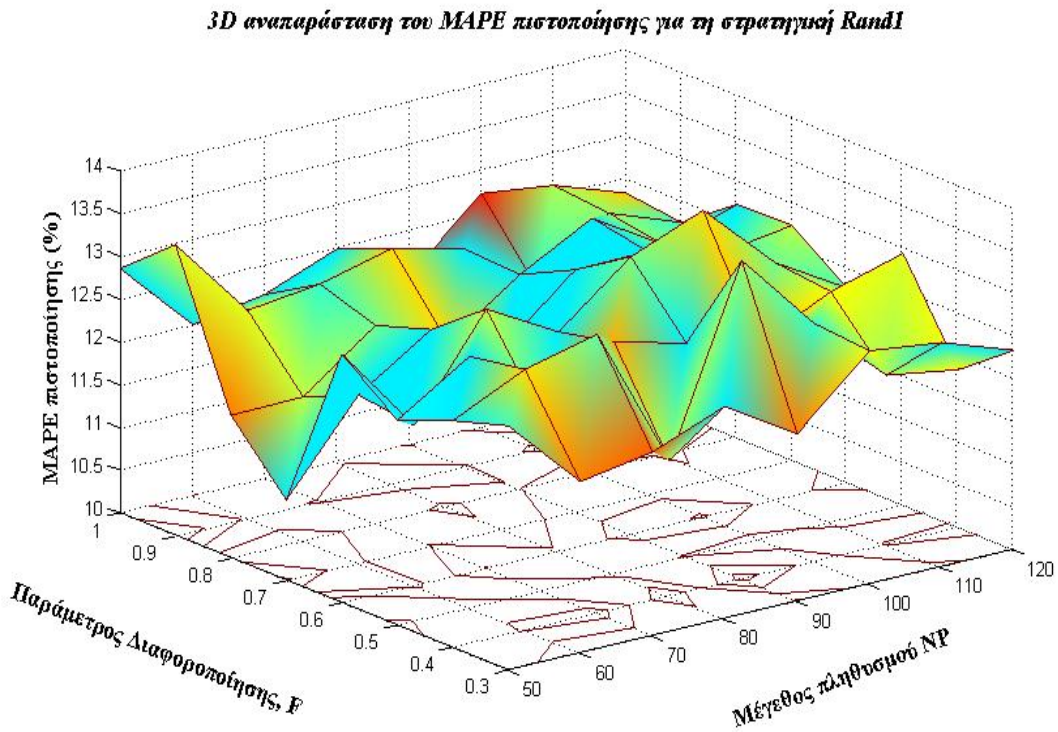
- $NP = 60$  και  $F = 0.6, 0.7, 0.8, 0.9$  &  $1$
- $NP = 80$  και  $F = 0.7$  &  $0.8$

Αξιοπρόσεκτο είναι το γεγονός ότι ένα μικρό μέγεθος πληθυσμού, για τον αλγόριθμο, όπως είναι το  $NP = 60$ , η Rand1 απέδωσε με μεγαλύτερη προσέγγιση τις προβλέψεις για το απαιτούμενο εύρος ζώνης σε σχέση με μεγαλύτερα μεγέθη πληθυσμών.

Τα παραπάνω συμφωνούν και με τα αντίστοιχα τρισδιάστατα διαγράμματα Διάγραμμα 18 και Διάγραμμα 19, τα οποία αποτυπώνουν με το γαλάζιο χρώμα την ομοιομορφία των αποτελεσμάτων της στρατηγικής και το κόκκινο τις απότομες μεταξύ τους αλλαγές.



**Διάγραμμα 18 :** Κάτοψη της τρισδιάστατης απεικόνισης του MAPE πιστοποίησης για τη στρατηγική Rand1 για τις διαφορετικές τιμές NP και F



**Διάγραμμα 19 :** Τρισδιάστατη απεικόνιση του MAPE πιστοποίησης για τη στρατηγική Rand1 για τις διαφορετικές τιμές NP και F

### 5.4.2. Στρατηγική Rand3/Best

---

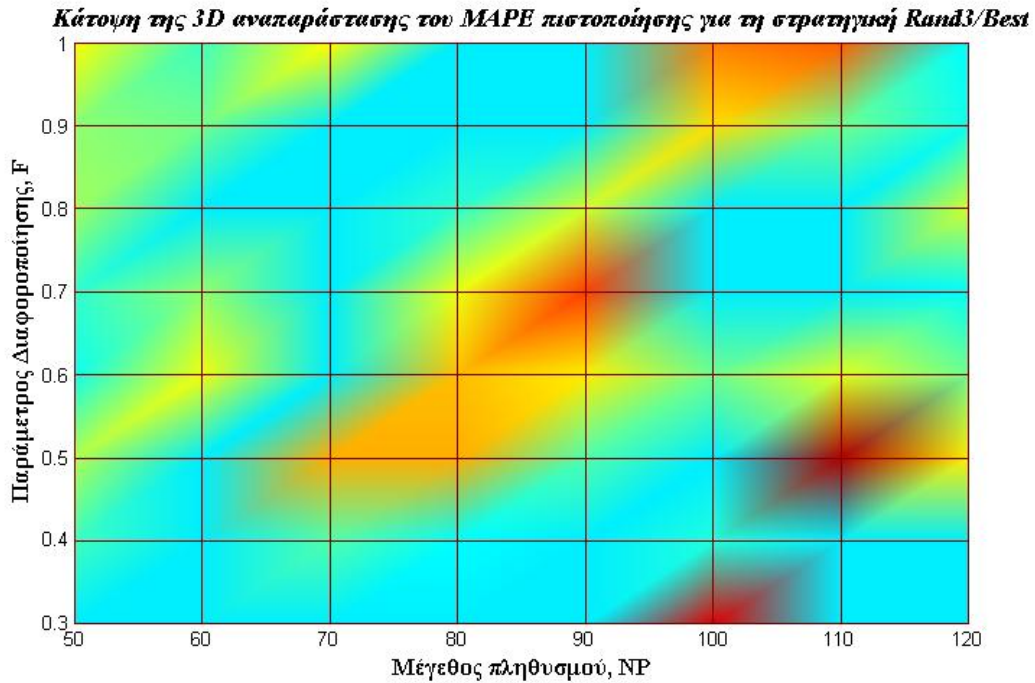
Σε αντίθεση με τη Rand1, η στρατηγική Rand3/Best παρουσίασε κάποιες μικρές απότομες αλλαγές στα αποτελέσματά της, κάτι το οποίο απεικονίζεται με την έντονη κόκκινη απόχρωση στα διαγράμματα Διάγραμμα 20 και Διάγραμμα 21. Παρατηρήθηκε ότι οι ρυθμίσεις των παραμέτρων που πέτυχαν τα βέλτιστα MAPE πιστοποίησης, δηλαδή τιμές κοντά στο 12%, ήταν:

- $NP = 60$  και  $F = 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 0.9 \text{ \& } 1$
- $NP = 70$  και  $F = 0.8, 0.9 \text{ \& } 1$
- $NP = 80$  και  $F = 0.3, 0.4 \text{ \& } 0.5$
- $NP = 90$  και  $F = 0.4, 0.5 \text{ \& } 0.6$
- $NP = 100$  και  $F = 0.5, 0.6, 0.8 \text{ \& } 0.9$
- $NP = 110$  και  $F = 0.8, 0.9 \text{ \& } 1$

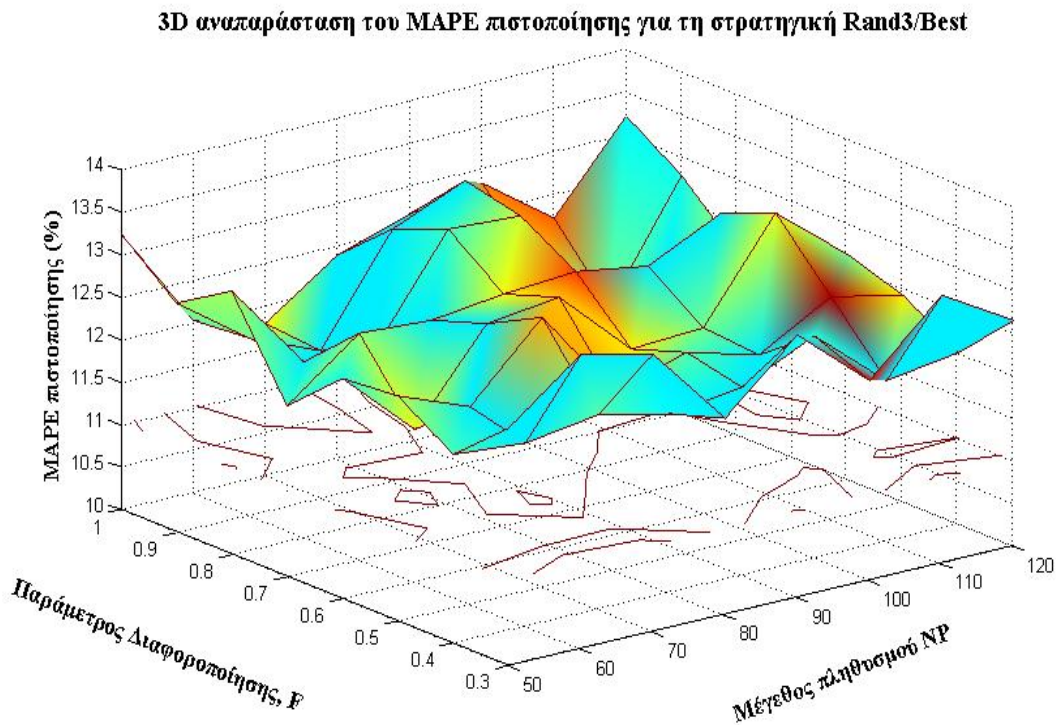
Αξιοπρόσεκτο ήταν και σε αυτήν την περίπτωση, ότι μικρά MAPE πιστοποίησης προέκυψαν με την εφαρμογή της στρατηγικής για μέγεθος πληθυσμού  $NP = 60$ , αλλά και για πλειάδα τιμών της σταθεράς διαφοροποίησης,  $F$ . Επιπλέον, οι τιμές που απέκλιναν σε αυτήν την κατηγορία από τις υπόλοιπες, είτε δεν αντιπροσώπευαν ενοχλητικά μεγάλο σφάλμα (περίπτωση  $F = 0.7$ ), είτε η τιμή του  $F$  ήταν τόσο μικρή που μπορούσε να παραληφθεί (περίπτωση  $F = 0.3$ ).

Παρόμοιο φαινόμενο παρατηρήθηκε και για μέγεθος πληθυσμού  $NP = 100$ , με τις τιμές να είναι επίσης αρκετά ομοιόμορφες, όπως και στην περίπτωση όπου  $NP = 60$ . Συγκεκριμένα, υπήρξαν μικρές αποκλίσεις από το μέσο όρο σφαλμάτων για το συγκεκριμένο μέγεθος πληθυσμού, 12,2831%. Μαζί με τη  $NP = 60$  αποτελούν τις καλύτερες επιλογές για την παράμετρο.

Έτσι, οι καλύτεροι συνδυασμοί παραμέτρων για τη Rand3/Best φαίνονται να είναι  $NP = 60$  ή  $NP = 100$  και  $F = 0.8$  ή  $F = 0.9$



**Διάγραμμα 20 :** Κάτοψη της τρισδιάστατης απεικόνισης του MAPE πιστοποίησης για τη στρατηγική Rand3/Best για τις διαφορετικές τιμές NP και F



**Διάγραμμα 21 :** Τρισδιάστατη απεικόνιση του MAPE πιστοποίησης για τη στρατηγική Rand3/Best για τις διαφορετικές τιμές NP και F

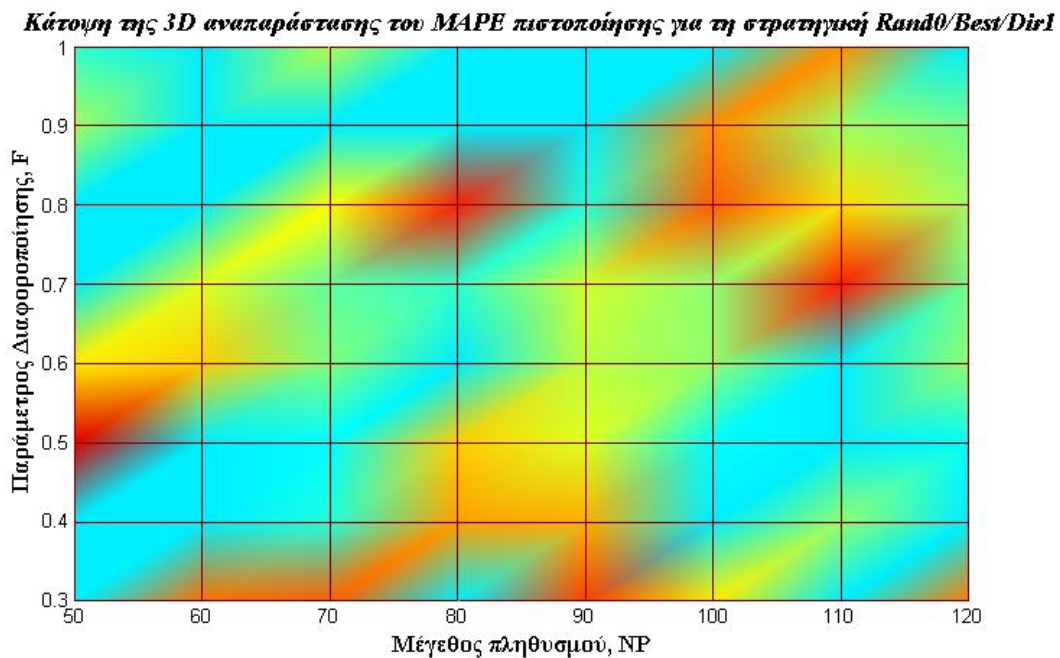
### 5.4.3. Στρατηγική Rand0/Best/Dir1

Η Rand0/Best/Dir1 είναι μια στρατηγική που δεν εξάγει πιθανές λύσεις από τον πληθυσμό. Η πιθανή λύση δοκιμής του αλγορίθμου δημιουργείται με τη συμβολή της πιθανής λύσης στόχου αλλά και των βέλτιστων πιθανών λύσεων. Η στρατηγική παρουσίασε τα βέλτιστα αποτελέσματά της για:

- NP = 100 και F = 0.5, 0.6, 0.7 & 0.8
- NP = 120 και F = 0.5, 0.6, 0.7 & 0.8

Στην πρώτη κατηγορία, ωστόσο, τα αποτελέσματά της παρουσίασαν έντονη ανομοιομορφία, όπως φαίνεται και από τα αντίστοιχα διαγράμματα Διάγραμμα 22 και Διάγραμμα 23, όπου παρατηρούνται περιοχές που είναι χρωματισμένες με έντονο κόκκινο χρώμα.

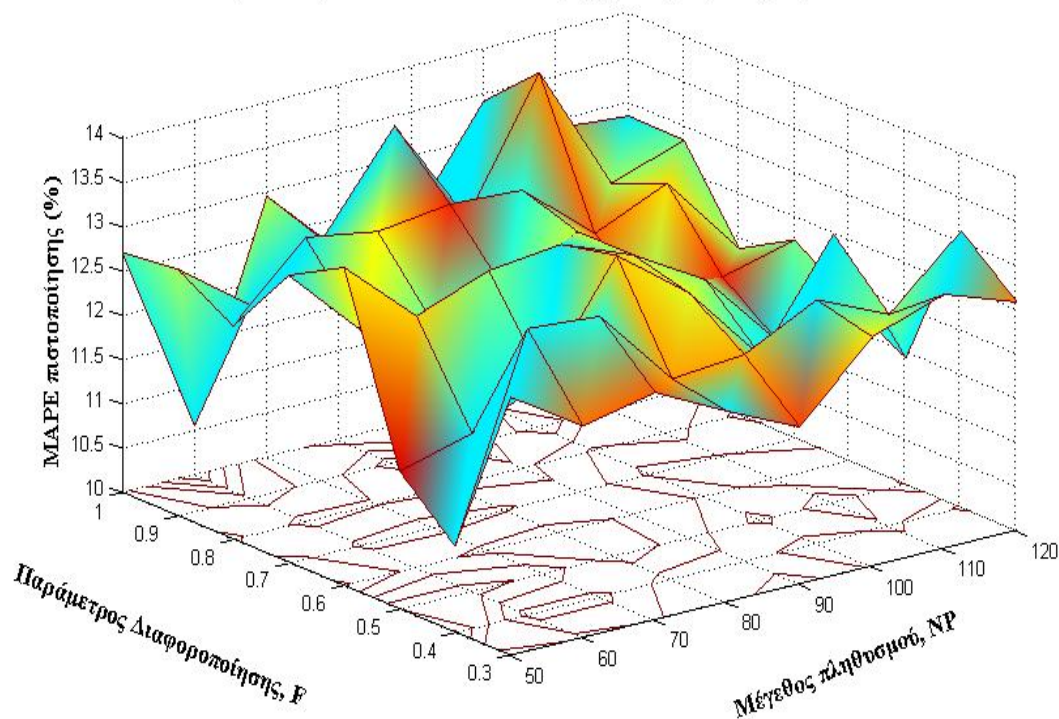
Στην περίπτωση του μεγέθους πληθυσμού  $NP = 120$ , οι εκτιμήσεις αντιπροσωπεύτηκαν από σφάλματα που δε χαρακτηρίζονται από έντονες μεταξύ τους αποκλίσεις. Παρουσιάστηκε έτσι ένα πιο συνεκτικό προφίλ της στρατηγικής για τις αντίστοιχες ρυθμισμένες τιμές των παραμέτρων NP και F.



**Διάγραμμα 22:**Κάτοψη της τρισδιάστατης απεικόνισης του MAPE πιστοποίησης για τη στρατηγική Rand0/Best/Dir1 για τις διαφορετικές τιμές NP & F



### 3D αναπαράσταση του MAPE πιστοποίησης για τη στρατηγική Rand0/Best/Dir1



Διάγραμμα 23 : Τρισδιάστατη απεικόνιση του MAPE πιστοποίησης για τη στρατηγική Rand0/Best/Dir1 για τις διαφορετικές τιμές NP και F

#### 5.4.4. Στρατηγική Rand3/Best/Dir4

Η μέθοδος Rand3/Best/Dir4 ήταν από τις στρατηγικές που ξεχώρισε για τα «καλά» σφάλματα εκτίμησης εξαρχής. Στους πειραματισμούς που ακολούθησαν αποδείχθηκε η πιο δύσκολη στρατηγική όσον αφορά στη ρύθμισή της. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αφενός παρουσίασε αποκλίσεις μεταξύ των προκυπτόντων σφαλμάτων για τις προβλέψεις και αφετέρου, τα σφάλματά αυτά κυμαίνονταν σε ανώτερα επίπεδα σε σχέση με τις μεθόδους που προαναφέρθηκαν.

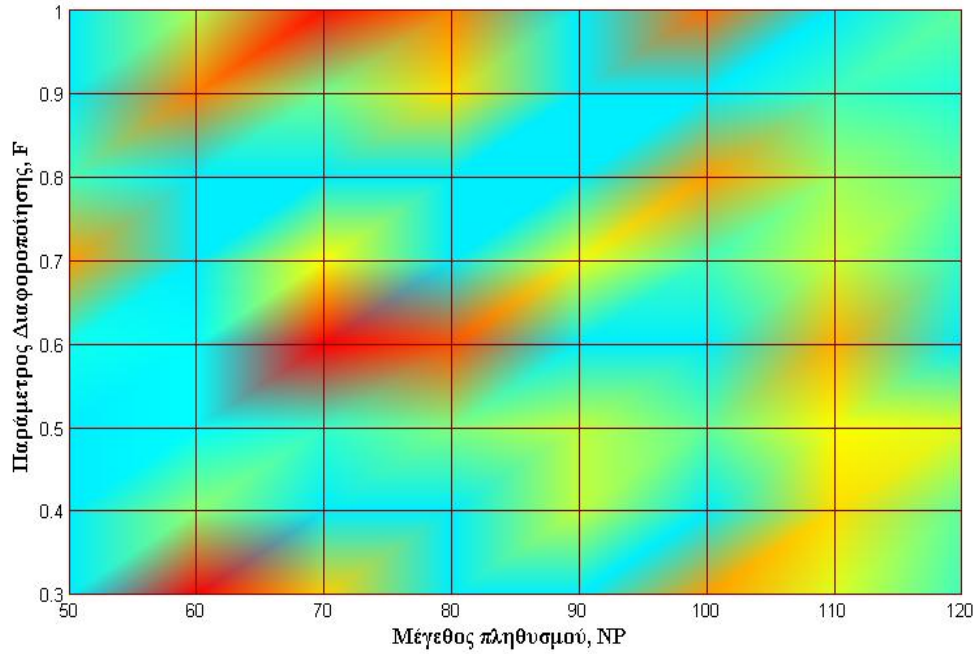
Η βέλτιστη απόδοση της στρατηγικής αυτής εντοπίστηκε για τους εξής συνδυασμούς παραμέτρων:

- $NP = 60$  και  $F = 0.8$  και  $0.9$
- $NP = 80$  και  $F = 0.4, 0.5, 0.8$  και  $0.9$
- $NP = 120$  και  $F = 0.7, 0.9$  και  $1$

Η μεγαλύτερη συνοχή των σφαλμάτων που εκτίμησε η στρατηγική για τις προβλέψεις παρουσιάζεται για τις δύο τελευταίες περιπτώσεις, με την πρώτη ( $NP = 80$  και  $F = 0.9$ ) να υπερτερεί.

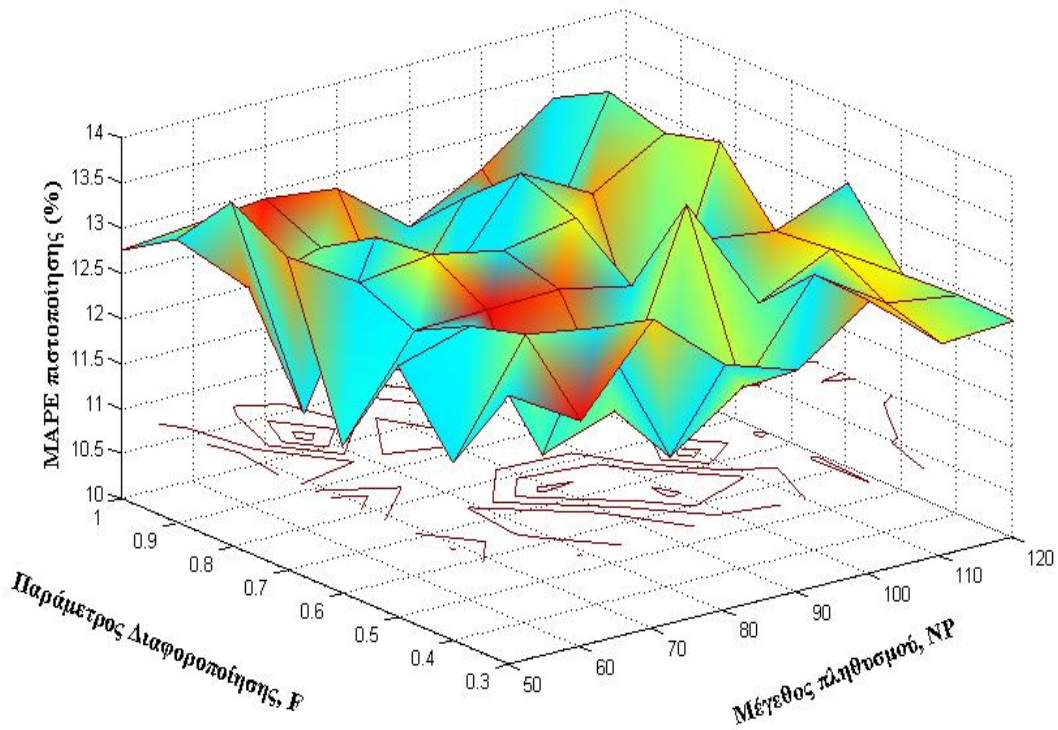
Τα παραπάνω αντιστοιχούν στα διαγράμματα Διάγραμμα 24 και Διάγραμμα 25.

**Κάτοψη της 3D αναπαράστασης του MAPE πιστοποίησης για τη στρατηγική Rand3/Best/Dir4**



**Διάγραμμα 24: Κάτοψη της τρισδιάστατης απεικόνισης του MAPE πιστοποίησης για τη στρατηγική Rand3/Best/Dir4 για τις διαφορετικές τιμές NP & F**

**3D αναπαράσταση του MAPE πιστοποίησης για τη στρατηγική Rand3/Best/Dir4**



**Διάγραμμα 25 : Τρισδιάστατη απεικόνιση του MAPE πιστοποίησης για τη στρατηγική Rand3/Best/Dir4 για τις διαφορετικές τιμές NP και F**





## 6. Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διπλωματική εργασίας, η έρευνα που έγινε αφορά τη μελέτη τη εφαρμογής των τεχνητών νευρωνικών δικτύων για την πρόβλεψη των πόρων στο σταθμό βάσης ασυρμάτου δικτύου. Ανώτερος στόχος είναι η βέλτιστη διαχείριση των πόρων στο οπισθοζευκτικό δίκτυο, εν όψει και της αύξησης της κίνησης που αναμένεται με τα 4G ασύρματα τηλεπικοινωνιακά δίκτυα.

Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκε ένα πολυστρωματικό τεχνητό νευρωνικό δίκτυο προσοτροφοδότησης για την πρόβλεψη του εύρους ζώνης που θα έπρεπε να είναι δεσμευμένο για το σταθμό βάσης στο οπισθοζευκτικό δίκτυο. Είσοδοί του ήταν πληροφορίες σχετικά με τη χρονική στιγμή για την οποία έπρεπε να γίνει η πρόβλεψη. Η εκτίμηση των αποτελεσμάτων του έγινε με βάση το ελάχιστο ποσοστιαίο απόλυτο σφάλμα (MAPE).

Για την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος της differential evolution (DE). Αρχικά, μελετήθηκαν τέσσερις διαφορετικές κατηγορίες μεθόδων αναζήτησης που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν στη συγκεκριμένη έρευνα και που αποτελούνται συνολικά από 24 είδη στρατηγικών αναζήτησης, σύμφωνα με το βιβλίο [10]. Μετά από την αξιολόγηση αυτών, βάση των προκύπτοντων MAPE, επιλέχθηκαν τέσσερις διαφορετικές στρατηγικές, που έδωσαν τα πιο αξιόπιστα αποτελέσματα, για τις οποίες έγινε η μελέτη και ρύθμιση της λειτουργίας τους με μεταβολή παραμέτρων του αλγορίθμου της DE.

Οι στρατηγικές που τελικά επιλέχθηκαν για επιπλέον έρευνα ήταν οι Rand1, Rand3/Best, Rand0/Best/Dir1 και Rand3/Best/Dir4. Η επίδοσή τους μελετήθηκε με συνεχείς παραμέτρων του αλγορίθμου, οι οποίες ήταν συγκεκριμένα οι: *GEN*, *L*, *H*, *NP* και *F*. Κάθε στρατηγική, συνεπώς και το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, ρυθμίστηκε βέλτιστα για τις ακόλουθες τιμές παραμέτρων:

❖ *Για όλες τις επιλεγμένες στρατηγικές επιλέχθηκαν για καλύτερη ρύθμιση των μεθόδων:*

➤  $GEN = 1500$

➤  $L = -2$

➤  $H = 2$

❖ *Για τις συγκεκριμένες τιμές κατόπιν επιλέχθηκαν:*

➤ Για τη Rand1 :

▪  $NP = 60$  και  $F = 0.7 \& 0.8$

▪  $NP = 80$  και  $F = 0.7 \& 0.8$

➤ Για τη Ran3/Best:

▪  $NP = 60$  και  $F = 0.8, 0.9$

- $NP = 100$  και  $F = 0.8 \& 0.9$
- Για τη Rand0/Best/Dir1:
  - $NP = 100$  και  $F = 0.7 \& 0.8$
  - $NP = 120$  και  $F = 0.7 \& 0.8$
- Για τη Rand3/Best/Dir4:
  - $NP = 80$  και  $F = 0.8 \& 0.9$
  - $NP = 120$  και  $F = 0.7 \& 0.9$

Οι παραπάνω συνδυασμοί μεταβλητών οδηγούν σε ακριβείς προβλέψεις του εύρους ζώνης κάτω ζεύξης που θα πρέπει να έχει διαθέσιμο ο σταθμός βάσης για την κάλυψη της κίνησης που δημιουργείται στην περιοχή κάλυψής του ανά πάσα χρονική στιγμή. Συγκεκριμένα, κρίνοντας από τα σφάλματα MAPE που εξήχθησαν, οι παραπάνω ρυθμίσεις παράγουν προβλέψεις με ακρίβεια που εκτιμήθηκε με σφάλμα MAPE της τάξης του 12%. Με βάση την τιμή αυτή, ο σταθμός βάσης έχει τη δυνατότητα να του παρέχεται από το οπισθοζευκτικό δίκτυο η κατάλληλη ποσότητα πόρων ώστε ο ίδιος να εξυπηρετεί τους χρήστες εντός της περιοχής κάλυψής του και ταυτόχρονα να γίνεται να γίνεται η βέλτιστη κατανομή των πόρων στο οπισθοζευκτικό δίκτυο.

Από το οπισθοζευκτικό δίκτυο μπορεί να παρέχεται σε ένα σταθμό βάσης ένας μέγιστος και ένας μέσος ρυθμός μετάδοσης, για την κάλυψη της μέγιστης και μέσης απαίτησης κίνησης από την πλευρά των χρηστών στο δίκτυο πρόσβασης, με τρόπο ευέλικτο και βαθμωτό. Σύμφωνα με τις ρυθμίσεις που συνιστώνται από το [22] και δεδομένου του γεγονότος ότι ο σταθμός βάσης μπορεί να αιτηθεί με ακρίβεια το εύρος ζώνης που χρειάζεται, με τη χρήση του MAPE, μπορούν να παρέχονται δύο τέτοιοι ρυθμοί στο σταθμό βάσης για την κάλυψη των αναγκών του, χωρίς πίστωση στην ποιότητα υπηρεσίας. Συγκεκριμένα, για το σφάλμα της τάξης του 12% που εκτιμήθηκε από την παρούσα διπλωματική εργασία, ο μέσος ρυθμός μετάδοσης μπορεί να ανταποκρίνεται στα αποτελέσματα της πρόβλεψης, αυξημένα κατά 12%, ενώ ο μέγιστος ρυθμός μετάδοσης θα αποτελείται από τα αποτελέσματα της πρόβλεψης αυξημένα κατά ένα μεγαλύτερο ποσοστό. Σημειώνεται ότι τα ποσοστά αυτά καθορίζονται από τον πάροχο των ασύρματων υπηρεσιών με βάση τις ανάγκες του σταθμού βάσης και του συμφωνητικού επιπέδου υπηρεσίας μεταξύ αυτού και του παρόχου του οπισθοζευκτικού δικτύου.



# Βιβλιογραφία

---

- [1] 3GPP TS 36.300. (2012-12). *Release 11*. 3GPP Organizational Partners (ARIB, ATIS, CCSA, ETSI, TTA, TTC).
- [2] Alasti, M., Neekzad, B., Hui, J., & Vannithamby, R. (2010, May). Quality of Service in WiMAX and LTE Networks. *IEEE Communications Magazine*, σσ. 104-111.
- [3] Alcatel - Lucent. (2009). *The LTE Network Architecture - A comprehensive tutorial*. (strategic white paper).
- [4] Alcatel - Lucent. (October 2008). *Long Term Evolution (LTE) Overview*.
- [5] Ali, M. A., Ellinas, G., Erkan, H., Hadjiantonis, A., & Dorsinville, R. (2010, August 15). On the Vision of Complete Fixed-Mobile Convergence. *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 16, σσ. 2343-2357.
- [6] Ali-Yahiya, T. (2011). *Understanding LTE and its Performance*. Springer.
- [7] Clarkson, T. (3 - 15, April 1999). Applications of Neural Networks in Telecommunications. (invited talk) in *Proc. ERUDIT Workshop on Applications of Computational Intelligence Techniques in Telecommunication*. London.
- [8] Cortez, P., Rio, M., Rocha, M., & Sousa, P. (July 16-21, 2006). Internet Traffic Forecasting using Neural Networks. *International Joint Conference on Neural Networks*, (σσ. 4942-4949). Sheraton Vancouver Wall Centre Hotel, Vancouver, BC, Canada.
- [9] Eberle, D. (n.d.). *Berline Institute of Technology*. Ανάκτηση από LTE vs WiMAX - 4th generation telecommunication networks: [http://www.snet.tu-berlin.de/fileadmin/fg220/courses/WS1011/snet-project/lte-vs-wimax\\_eberle.pdf](http://www.snet.tu-berlin.de/fileadmin/fg220/courses/WS1011/snet-project/lte-vs-wimax_eberle.pdf)
- [10] Feoktistov, V. (2006). *Differential Evolution : In Search of Solutions*. Springer.
- [11] Ghosh, A., & Ratasuk, R. (2011). *Essentials of LTE and LTE-A*. Cambridge University Press.
- [12] Haykin, S. (July 16, 1998). *Neural Networks: A Comprehensive Foundation* (2 εκδ.). Prentice Hall.
- [13] Korhonen, J. (2003). *Introduction to 3G Mobile Communications* (2nd εκδ.). Artech House.
- [14] Lescuyer, P., & Lucidarme, T. (2008). *Evolved Packet System (EPS), The LTE and SAE Evolution of 3G UMTS*. John Wiley & Sons, Ltd.
- [15] Moh, W., Chen, M.-J., Chu, N.-M., & Liao, C.-D. (1995, August 8). Traffic prediction and dynamic bandwidth allocation over ATM: a neural network approach. *Journal of Computer Communications*, vol.18, no. 8, σσ. 563-571.

- [16] Papagiannaki, K., Taft, N., Zhang, Z.-L., & Diot, C. (2005, September). Long-Term Forecasting of Internet Backbone Traffic. *Journal of IEEE Transactions on Neural Networks*, vol. 16, no. 5, σσ. 1110-1124.
- [17] Pedersen, K. I., Kolding, T. E., Frederiksen, F., Kovács, I. Z., Laselva, D., & Mogensen, P. E. (2009, July). An Overview of Downlink Radio Resource Management for UTRAN Long-Term Evolution. *IEEE Communications Magazine*, σσ. 86-93.
- [18] Peng, H., Liu, F., & Yang, X. (2013, February). A hybrid strategy of short term wind power prediction. *Renewable Energy (An International Journal)*, vol. 50, σσ. 590-595.
- [19] Srikanth, S., Murugesu Pandian, P., & Fernando, X. (2012, September). Orthogonal Frequency Division Multiple Access in WiMAX and LTE: A Comparison. *IEEE Communications Magazine*, σσ. 153-161.
- [20] Verizon Wireless. (2009). *LTE: The Future of Mobile Broadband Technology*. (white paper).
- [21] Zhang, G., Patuwo, B., & Hu, M. (1998, March 1). Forecasting with artificial neural networks: The state of the art. *International Journal of Forecasting*, vol. 14, issue 1, σσ. 35-62.
- [22] Zhang, J., Zhou, L., Duprez, M., Song, S., Tammisetti, M., Koppelaar, R., . . . Brackpool, K. (2008, August 14). A Requirement Specification by the NGMN Alliance: Next Generation Mobile Networks Optimised Backhaul Requirements. (A. Cauvin, Επιμ.) Next Generation Mobile Networks.
- [23] Zhou, D., Chen, S., & Dong, S. (2012, November). Network traffic prediction based on ARFIMA model. *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 9, issue 6, no. 3, σσ. 106-111.