



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Σχεδίαση και ανάπτυξη πλατφόρμας δικτύου επικοινωνιών
με τη χρήση αποδοτικών αλγόριθμων βελτιστοποίησης και
πληροφοριακού συστήματος γεωγραφικών συντεταγμένων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Γ. Λευκαδίτης

Επιβλέπων : Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

**Σχεδίαση και ανάπτυξη πλατφόρμας δικτύου επικοινωνιών
με τη χρήση αποδοτικών αλγόριθμων βελτιστοποίησης και
πληροφοριακού συστήματος γεωγραφικών συντεταγμένων**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Νικόλαος Γ. Λευκαδίτης

Επιβλέπων : Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής ΕΜΠ

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 13^η Φεβρουαρίου 2009.

.....
Ιάκωβος Βενιέρης
Καθηγητής ΕΜΠ

.....
Δήμητρα - Θεοδώρα Κακλαμάνη
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια ΕΜΠ

.....
Νικόλαος Ουζούνογλου
Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, Φεβρουάριος 2009

.....
Νικόλαος Γ. Λευκαδίτης

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

Copyright © Νικόλαος Λευκαδίτης 2009.
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα.

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

Περίληψη

Στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη της τεχνικής Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων για την εφαρμογή της στον αποδοτικό σχεδιασμό δικτύων επικοινωνιών και η κατασκευή ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών για την οπτικοποίηση και τη διαχείριση των χωρικών δεδομένων αλλά και των αποτελεσμάτων της μεθόδου. Ο όρος *αποδοτικός σχεδιασμός* στο παρόν κείμενο συνίσταται στην εύρεση και στη χρήση τεχνικών και παραλλαγών της βασικής μεθόδου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, οι οποίες επιτρέπουν την ταχεία πρόταση τοπολογιών δικτύου με βάση ένα προκαθορισμένο σύνολο κόμβων, καθένας εκ των οποίων έχει συγκεκριμένη θέση στο χώρο και ανάγκες σε εύρος ζώνης. Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους κατασκευής της τελικά προτεινόμενης τοπολογίας δικτύου.

Στην ενότητα 1 γίνεται μια σύντομη αναφορά στη σημασία των δικτύων στη σύγχρονη κοινωνία και συνεπώς μια συνοπτική τεκμηρίωση του προβλήματος και της επιτακτικότητας για την εύρεση μιας ικανοποιητικής λύσης σε αυτό. Στην ενότητα 2 προχωράμε σε μια γενική κάλυψη των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών που θα λειτουργήσουν ως πλατφόρμα για την υλοποίηση των τεχνικών βελτιστοποίησης, ενώ περιγράφουμε τις προδιαγραφές και μοντελοποιούμε το πληροφοριακό σύστημα που πρόκειται να κατασκευαστεί στην ενότητα 3. Τέλος, στην ενότητα 4 προχωράμε στη μελέτη της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, στην πρόταση παραλλαγών της και στην παρουσίαση των αποτελεσμάτων.

Λέξεις κλειδιά

Δίκτυο επικοινωνιών, δικτυακός σχεδιασμός, Σύστημα Γεωγραφικών Πληροφοριών, βελτιστοποίηση, Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων, διανυσματική αναπαράσταση δέντρων, Prufer, NetKeys, σύγκλιση.

Abstract

The goal of this thesis is the study of the Particle Swarm Optimization algorithm in the context of efficient network planning and also the development of a Geographic Information System as an aid for the visualization and management of spatial data and results which will be part of the optimization process. The term *efficient network planning* in the present document refers to the determination and use of various techniques and modifications of the original PSO algorithm, which will allow for fast proposition of network topologies, based on a predefined set of nodes, each with a specific spatial position and broadband requirements. Our purpose is to minimize the cost of construction for the ultimately proposed network topology.

Chapter 1 is a brief introduction to the role of communication networks in modern societies, thus providing evidence of the importance of the particular problem and the significance of finding an acceptable solution to it. In Chapter 2 we proceed to introduce the concept of Geographic Information Systems, which will act as the platform whose properties the proposed optimization techniques will later exploit. Chapter 3 provides the specifications and model of the actual GIS that has been developed for our purposes, while in Chapter 4 we refer to various concepts of optimization and extensively study Particle Swarm Optimization, proposing specific modifications of the basic algorithm and presenting the results of our study.

Keywords

Communication network, network planning, Geographic Information System, optimization, Particle Swarm Optimization, tree representation vector, Prufer, NetKeys, convergence.

Ευχαριστίες

Θα ήθελα καταρχήν να ευχαριστήσω τον κύριο Βενιέρη Ιάκωβο για τη δυνατότητα που μου προσέφερε να εκπονήσω την παρούσα διπλωματική εργασία. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τη βοηθό του, Παπαγιάννη Χρύσα, η οποία όχι μόνο συνεισέφερε σημαντικά καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησής της παρέχοντας πολύτιμη καθοδήγηση, αλλά και με έφερε σε επαφή με ένα πολύ ενδιαφέρον αντικείμενο το οποίο μπόρεσα να αντιμετωπίσω, και αντιμετωπίζω, πέρα από το πλαίσιο μιας τυπικής ενασχόλησης.

Ακόμη, ευχαριστώ τους γονείς μου, τα αδέρφια μου Γιώργο και Σοφία, τους φίλους μου και ιδιαίτερα τη Βάλια Παναγιωτοπούλου.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή.....	9
1.1 Πολυμέσα και δίκτυα ευρείας ζώνης.....	9
1.2 Σχεδιασμός δικτύου.....	10
1.3 Περιγραφή του προβλήματος.....	11
1.4 Προτεινόμενη λύση.....	12
2. Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών.....	14
2.1 Ορισμός και περιγραφή ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών.....	14
2.2 Συστήματα συντεταγμένων και γεωαναφοράς.....	16
2.3 Συλλογή δεδομένων για χρήση σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.....	18
2.4 Αναπαράσταση δεδομένων στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.....	19
2.4.1 Αναπαράσταση δεδομένων σε πλεγματοειδή μορφή.....	19
2.4.2 Αναπαράσταση δεδομένων σε διανυσματική μορφή.....	20
2.4.3 Σύγκριση πλεγματοειδούς και διανυσματικής αναπαράστασης.....	21
2.4.4 Τρόποι αποθήκευσης γεωγραφικών δεδομένων.....	22
2.5 Βασικές Λειτουργίες των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών.....	23
2.6 Ανάπτυξη Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών.....	26
3. Ανάλυση και σχεδιασμός του υποσυστήματος απεικόνισης και χειρισμού δεδομένων.....	28
3.1 Περιγραφή προδιαγραφών του υποσυστήματος απεικόνισης.....	28
3.2 Δομικά συστατικά του υποσυστήματος απεικόνισης.....	32
3.2.1 Συνιστώσα εισόδου και εξόδου δεδομένων.....	32
3.2.2 Συνιστώσα διαχείρισης γραφικής διεπαφής χρήστη.....	33
3.2.3 Συνιστώσα διαχείρισης διαδικαστικών λειτουργιών.....	37
3.3 Στατικό μοντέλο του υποσυστήματος απεικόνισης.....	41
3.4 Δυναμικό μοντέλο του συστήματος απεικόνισης.....	42
4. Διερεύνηση της χρήσης της μεθόδου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO) για την εύρεση λύσης στο πρόβλημα του δικτύου ελάχιστου κόστους.....	47
4.1 Προβλήματα βελτιστοποίησης.....	47
4.2 Βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών στόχων.....	49
4.3 Μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης.....	52
4.4 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO).....	55
4.5 Ψευδοκώδικας μεθόδου gbest PSO.....	59
4.6 Περιγραφή του προβλήματος.....	60
4.7 Αναπαράσταση δέντρων σε μορφή διανύσματος.....	62
4.7.1 Ακολουθίες Prüfer.....	62
4.7.2 Τυχαία κλειδιά δικτύου (Network Random Keys – NetKeys).....	65
4.8 Το πρόβλημα πρόωρης σύγκλισης του αλγόριθμου PSO.....	70
4.9 Τροποποιημένη μέθοδος gbest PSO.....	74
4.10 Ψευδοκώδικας τροποποιημένης μεθόδου gbest PSO.....	78
4.11 Συγκριτικές δοκιμές λειτουργίας της τροποποιημένης μεθόδου gbest PSO και συμπεράσματα.....	80
4.11.1 Σύγκριση μεθόδων gbest PSO και new PSO για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού.....	82
4.11.2 Σύγκριση σχημάτων αρχικοποίησης πληθυσμού για τη μέθοδο new PSO.....	87
4.12 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.....	94
5. Βιβλιογραφία.....	97

1. Εισαγωγή.

1.1 Πολυμέσα και δίκτυα ευρείας ζώνης.

Κάθε άνθρωπος διαθέτει ένα σύνολο πέντε αισθήσεων με τις οποίες αντιλαμβάνεται το περιβάλλον του και επικοινωνεί με αυτό. Καθεμία από τις αισθήσεις αυτές παίζει σημαντικό ρόλο στην αντίληψη της πραγματικότητας και στον τρόπο με τον οποίο εντυπώνεται μία εμπειρία στο νου του ατόμου. Κατά τη διάρκεια μιας συζήτησης, το κάθε μέλος της παρατηρεί τις εκφράσεις του προσώπου του έτερου συζητητή, ακούει τη φωνή του και πιθανώς νιώθει την ανησυχία του μέσω των δονήσεων που προκαλεί στο πάτωμα μια νευρική κίνηση του ποδιού του. Αν από τα τρία αυτά ερεθίσματα κρατήσουμε μόνο το ένα, για παράδειγμα τη φωνή, τότε η εμπειρία της συζήτησης αλλάζει τελείως, αφού τα μέλη της λαμβάνουν πολύ λιγότερα “μηνύματα” το ένα από το άλλο.

Οι παραδοσιακοί τρόποι αναπαράστασης πληροφοριών, αλλά και επικοινωνίας μεταξύ ατόμων που βρίσκονται σε απομακρυσμένα μέρη, αγνοούν την ανάγκη αυτή του κάθε ανθρώπου να δέχεται ερεθίσματα σε περισσότερες της μίας αισθήσεις του, προκειμένου να αποκτήσει μια όσο το δυνατόν πιο πλήρη και διαισθητική εμπειρία για το αντικείμενο με το οποίο ασχολείται. Το βιβλίο, ο τηλεγράφος, το τηλέφωνο, είναι όλα μέσα που απευθύνονται σε μόνο μία αίσθηση και κατά συνέπεια μπορεί να υποστηριχθεί ότι είναι ελλιπή. Ο καθένας καταλαβαίνει ότι θα ήταν προτιμότερο να υπάρχουν μέσα που να απευθύνονται σε περισσότερες της μίας αισθήσεις.

Αυτήν ακριβώς την ανάγκη έρχεται να καλύψει η τεχνολογία των πολυμέσων, μία από τις ταχύτερα αναπτυσσόμενες τεχνολογίες των τελευταίων κυρίως χρόνων. Πολυμέσο μπορεί να θεωρηθεί κάθε μορφή μέσου που χρησιμοποιεί πολλαπλές μορφές πληροφορίας (οπτικής, ακουστικής κλπ) και δυνατότητες επεξεργασίας της πληροφορίας αυτής για να πληροφορήσει ή για να ψυχαγωγήσει τον αποδέκτη του. Η ύπαρξη υπολογιστών διευκολύνει τη δημιουργία τέτοιου είδους μέσων, που μπορούν να συνδυάζουν κείμενο, ήχο, εικόνα, κινούμενη εικόνα και αλληλεπιδραστική δυνατότητα για να προσφέρουν ένα σύνολο υπηρεσιών. Μία εφαρμογή πολυμέσων είναι μία εφαρμογή που απαιτεί τον ταυτόχρονο χειρισμό δύο ή περισσότερων μέσων παρουσίασης της πληροφορίας, ενώ μία υπηρεσία πολυμέσων είναι μία υπηρεσία που χειρίζεται πολλούς και διαφορετικούς τύπους μέσων και τους παρουσιάζει στο χρήστη συγχρονισμένους.

Κάθε υπηρεσία προσφέρεται μέσω ενός δικτύου. Παραδοσιακά, διαφορετικά είδη υπηρεσιών υλοποιούνταν πάνω σε ξεχωριστά δίκτυα. Τηλεφωνικά δίκτυα μετέφεραν φωνή, δίκτυα

υπολογιστών μετέφεραν δεδομένα, ενώ ξεχωριστά καλωδιακά ή ασύρματα δίκτυα μετέφεραν τηλεοπτικά σήματα. Τα δίκτυα αυτά ήταν κατασκευασμένα για πολύ συγκεκριμένες εφαρμογές και αδυνατούσαν να μεταφέρουν διαφορετικά είδη πληροφοριών πέρα από αυτά για τα οποία είχαν σχεδιαστεί. Έτσι δεν ήταν κατάλληλα για την υλοποίηση υπηρεσιών πολυμέσων, οι οποίες απαιτούν τη συγχρονισμένη μετάδοση πολλαπλών ειδών πληροφοριών.

Το νέο μοντέλο δικτύου είναι αυτό του *δικτύου ενοποιημένων υπηρεσιών*. Ένα τέτοιο δίκτυο υποστηρίζει τη μετάδοση φωνής, εικόνας και δεδομένων μέσω μιας κοινής υποδομής, επιτρέποντας τόσο την υποστήριξη παραδοσιακών υπηρεσιών, όσο και την ανάπτυξη νέων υπηρεσιών πολυμέσων. Ωστόσο, κάθε υπηρεσία που μεταδίδεται πάνω από τα δίκτυα αυτού του είδους έχει κάποιες ξεχωριστές απαιτήσεις για το ρυθμό μετάδοσης πληροφορίας και για την ποιότητα της υπηρεσίας. Τα *δίκτυα ενοποιημένων υπηρεσιών ευρείας ζώνης* λύνουν αυτά τα προβλήματα με τη χρήση της τεχνολογίας των οπτικών ινών υψηλής χωρητικότητας και με την υιοθέτηση πρωτοκόλλων που μπορούν να διασφαλίσουν σταθερούς ρυθμούς μετάδοσης και την ικανοποίηση απαιτήσεων για την ποιότητα μίας υπηρεσίας (Ασύγχρονος Τρόπος Μεταφοράς – ATM). Η κατασκευή αυτών των δικτύων δεν αποτελεί μία αυθαίρετη και άναρχη διαδικασία, αλλά απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό που λαμβάνει υπόψη πολλές παραμέτρους.

1.2 Σχεδιασμός δικτύου.

Ο σχεδιασμός ενός νέου δικτύου είναι μια διαδικασία που αποσκοπεί στη διασφάλιση της ικανοποίησης των αναγκών τόσο του συνδρομητή, όσο και της επιχείρησης στην οποία ανήκει το δίκτυο που πρόκειται να κατασκευαστεί. Μία παραδοσιακή μεθοδολογία σχεδιασμού δικτύου, περιλαμβάνει σχεδιασμό σε τέσσερα επίπεδα : *επιχειρησιακό σχεδιασμό* που εξασφαλίζει ότι το δίκτυο θα λειτουργήσει όπως πρέπει για όλη τη διάρκεια του στοχευόμενου κύκλου ζωής του, *μακροπρόθεσμο και μεσοπρόθεσμο δικτυακό σχεδιασμό*, *βραχυπρόθεσμο δικτυακό σχεδιασμό* και *εξέταση των λειτουργιών και της συντήρησης του δικτύου* που υποδεικνύει πώς θα λειτουργεί το δίκτυο σε καθημερινή βάση.

Η διαδικασία του *δικτυακού σχεδιασμού* ξεκινάει με τη συγκέντρωση εξωτερικών πληροφοριών για το δίκτυο υπό κατασκευή. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν εκτιμήσεις για το πώς θα λειτουργεί το δίκτυο ή η υπηρεσία, πληροφορίες που αφορούν στο οικονομικό κόστος κατασκευής, πιθανής επέκτασης και συντήρησής του, τεχνικές λεπτομέρειες για τις δυνατότητες του δικτύου και ακόμη την επιλογή πρωτοκόλλων επικοινωνίας και τεχνολογιών μετάδοσης, αφού η κατασκευή του νέου δικτύου περιλαμβάνει την υλοποίηση των τεσσάρων κατωτέρων επιπέδων της ιεραρχίας

πρωτοκόλλων OSI.

Αφού ληφθούν οι αρχικές αποφάσεις, η διαδικασία του δικτυακού σχεδιασμού περιλαμβάνει τρία κύρια βήματα. Το στάδιο του *τοπολογικού σχεδιασμού* ασχολείται με την εύρεση των θέσεων των στοιχείων του δικτύου και του τρόπου με τον οποίο αυτά τα στοιχεία θα συνδέονται μεταξύ τους. Η θεωρία γράφων αποτελεί ένα ισχυρό εργαλείο σε αυτή τη φάση του σχεδιασμού. Το στάδιο της *σύνθεσης δικτύου* επιχειρεί τον προσδιορισμό του μεγέθους κάθε στοιχείου του δικτύου σύμφωνα με κάποια κριτήρια απόδοσης, ενώ το στάδιο της *υλοποίησης του δικτύου* αναζητά τρόπους για να ικανοποιηθούν απαιτήσεις χωρητικότητας και για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία του νέου δικτύου. Τα τρία αυτά στάδια είναι στενά συσχετισμένα και γι αυτό εκτελούνται επαναληπτικά και παράλληλα μεταξύ τους.

1.3 Περιγραφή του προβλήματος.

Η παρούσα διπλωματική εργασία θα ασχοληθεί με ένα πρόβλημα σχεδιασμού δικτύου. Ας υποθέσουμε ότι μία ελληνική εταιρεία παροχής δικτυακών υπηρεσιών πρόκειται να κατασκευάσει ένα νέο δίκτυο το οποίο θα συνδέει ένα μεγάλο αριθμό δημοτικών διαμερισμάτων που ανήκουν σε ποικίλους νομούς της ελληνικής επικράτειας. Ο τρόπος με τον οποίο επιλέγεται ένα σύνολο δημοτικών διαμερισμάτων που πρόκειται να συνδεθούν στο δίκτυο δε θα μας απασχολήσει και το σύνολο αυτό θεωρείται δεδομένο για τις ανάγκες της εργασίας. Για κάθε δημοτικό διαμέρισμα/κόμβο του δικτύου υπό κατασκευή είναι γνωστές οι συντεταγμένες του πάνω στη γη, καθώς και στατιστικά στοιχεία για τον πληθυσμό του. Από τις συντεταγμένες των κόμβων μπορεί να προκύψει κάθε απόσταση μεταξύ δύο εξ' αυτών, ενώ από τα πληθυσμιακά στοιχεία κάθε κόμβου μπορεί να προκύψουν οι απαιτήσεις του σε εύρος ζώνης.

Συνοψίζοντας, τα δεδομένα του προβλήματος είναι ένα σύνολο N κόμβων, με γνωστά τα μήκη όλων των ακμών του πλήρη γράφου που σχηματίζουν αυτοί, και τις απαιτήσεις του κάθε κόμβου σε εύρος ζώνης. Ζητούμενο είναι να συνδεθούν αυτοί οι N κόμβοι με τέτοιο τρόπο ώστε να ικανοποιούνται οι απαιτήσεις του καθενός σε εύρος ζώνης και το δίκτυο που θα προκύψει να έχει όσο το δυνατόν μικρότερο κόστος κατασκευής. Ακόμη, θα πρέπει το αποτέλεσμα να οπτικοποιηθεί με τη βοήθεια κάποιας εφαρμογής λογισμικού, που να παρουσιάζει την τοπολογία του δικτύου, πληροφορίες για τα στοιχεία που το απαρτίζουν και να επιτρέπει την τροποποίηση της προτεινόμενης λύσης από το χρήστη.

1.4 Προτεινόμενη λύση.

Από την περιγραφή του προβλήματος γίνεται σαφές ότι η λύση θα αποτελείται από δύο ξεχωριστές συνιστώσες : την *έγρευση αλγόριθμου* βελτιστοποίησης του κόστους κατασκευής του δικτύου και την *ανάπτυξη μιας εφαρμογής* που να επιτρέπει την οπτικοποίηση των αποτελεσμάτων και την αλληλεπίδραση του χρήστη με αυτά.

Το πρώτο μέρος, συνίσταται στην επίλυση ενός προβλήματος συνδυαστικής βελτιστοποίησης. Υπάρχουν αρκετοί γνωστοί αλγόριθμοι που ενδείκνυνται για τέτοιου είδους προβλήματα, όπως οι *γενετικοί και εξελικτικοί αλγόριθμοι (genetic and evolutionary algorithms - GEA)*, οι μέθοδοι *simulated annealing, quantum annealing, tabu search, GRASP*, καθώς και *αλγόριθμοι νοημοσύνης σμήνους (swarm intelligence)* όπως οι αλγόριθμοι *βελτιστοποίησης αποικίας μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization – ACO)* και *βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO)*. Στην παρούσα εργασία θα εξετάσουμε τον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και θα προτείνουμε λύση στο πρόβλημα βασισμένη σε μία τροποποιημένη εκδοχή του.

Το δεύτερο μέρος επιβάλλει την υλοποίηση μιας εφαρμογής ικανής να οπτικοποιεί δίκτυα και να προσφέρει δυνατότητες αλληλεπίδρασης με αυτά και επεξεργασίας τους. Κρίθηκε ότι για την ανάπτυξη της συγκεκριμένης εφαρμογής, η χρήση της τεχνολογίας των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών (Geographical Information Systems – GIS) προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Υλοποιώντας ένα σύστημα GIS μπορούμε να αναπαραστήσουμε όχι μόνο δίκτυα στην ελληνική επικράτεια με στατικό τρόπο, αλλά οποιοδήποτε δίκτυο πάνω στη Γη, αρκεί να διαθέτουμε κατάλληλα *γεωαναφερμένα* δεδομένα για τους κόμβους του. Ακόμη, τα χωρικά θέματα που μπορούμε να αναπαραστήσουμε με μία ολοκληρωμένη λύση GIS δεν περιορίζονται μόνο σε δίκτυα, αλλά μπορεί να είναι οδικά δίκτυα, πολεοδομικά θέματα, ισομετρικές καμπύλες, λίμνες, βιότοποι, αρκεί και πάλι να υπάρχουν τα γεωγραφικά δεδομένα για καθεμία από αυτές τις οντότητες. Μας προσφέρεται επίσης η δυνατότητα της υπέρθεσης διαφορετικών θεμάτων, δημιουργώντας όψεις που ίσως μπορούν να μας δώσουν καλύτερη εικόνα για το δίκτυο υπό κατασκευή. Για παράδειγμα, συνδυάζοντας το θέμα του προτεινόμενου δικτύου με ένα θέμα ισομετρικών καμπυλών μπορούμε να γνωρίζουμε αν υπάρχουν ορεινοί όγκοι που καθιστούν την κατασκευή του συγκεκριμένου δικτύου ανέφικτη. Τέλος, επιλέγοντας τη λύση των γεωγραφικών συστημάτων πληροφοριών, αποκτούμε πρόσβαση σε πλήθος βιβλιοθηκών ανοικτού κώδικα, με τις οποίες μπορούμε όχι μόνο να απεικονίσουμε οποιαδήποτε οντότητα υπάρχει στο χώρο, αλλά και να την επεξεργαστούμε με ποικίλους τρόπους ή να προχωρήσουμε σε χωρική ανάλυση περιοχών, με

στόχο τη δημιουργία πιο ρεαλιστικών δικτύων.

Κάθε συνιστώσα του προβλήματος μελετήθηκε και αναπτύχθηκε ξεχωριστά από την άλλη. Στα τελικά στάδια της υλοποίησης, οι δύο λύσεις συνδυάστηκαν, προκειμένου να προκύψει μια ολοκληρωμένη πρόταση για την επίλυση του προβλήματος που περιγράφηκε στην παράγραφο 1.3.

2. Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών.

2.1 Ορισμός και περιγραφή ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών.

Κάθε πληροφοριακό σύστημα βασισμένο σε υπολογιστές, στοχεύει στη χρήση της τεχνολογίας των υπολογιστών προκειμένου να βοηθήσει τον χρήστη του να διαχειριστεί ένα σύνολο πληροφοριών ή πόρων. Ένα τέτοιο σύστημα έχει πάντα τη δυνατότητα να συλλέγει, να διαχειρίζεται και να διανέμει πληροφορίες σχετικές με το αντικείμενο για το οποίο έχει σχεδιαστεί. Τα Συστήματα Γεωγραφικών Πληροφοριών (*Geographical Information Systems – GIS*) επεκτείνουν το μοντέλο ενός γενικού πληροφοριακού συστήματος για τις ανάγκες διαχείρισης πληροφοριών που έχουν να κάνουν με οντότητες που υπάρχουν στον χώρο. Επομένως, μπορούμε να ορίσουμε ένα Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών (ΣΓΠ) ως ένα πληροφοριακό σύστημα βασισμένο σε υπολογιστές, το οποίο επιτρέπει τη *σύλληψη*, τη *μοντελοποίηση*, την *ανάκληση*, την *ανάλυση* και την *παρουσίαση* γεωγραφικά αναφερομένων δεδομένων.

Ο απλούστερος τρόπος για να κατανοήσουμε την έννοια ενός ΣΓΠ είναι να εξετάσουμε τις εφαρμογές του. Ζούμε σε έναν κόσμο ο οποίος έχει μία χρονική και τρεις χωρικές διαστάσεις, συνεπώς κάθε δραστηριότητά μας γίνεται αντιληπτή μέσα στα πλαίσια αυτών των διαστάσεων. Το περιβάλλον είναι ένα δυναμικά μεταβαλλόμενο σύστημα και οι διάφορες συνιστώσες του είναι δυνατό να παρατηρηθούν, να δειγματοληπτηθούν, να μοντελοποιηθούν ή να προσομοιωθούν με βάση πληροφορίες χωροχρονικής φύσης. Η ποιοτική συλλογή, διαχείριση, ανάλυση και παρουσίαση τέτοιου είδους πληροφοριών μπορεί να συμβάλει αποτελεσματικά στη λήψη αποφάσεων για θέματα που μας επηρεάζουν όλους, όπως για παράδειγμα στο σχεδιασμό δικτύων, πόλεων, αγροτικών υποδομών. Λόγω της πολύπλοκης φύσης των γεωγραφικά αναφερομένων πληροφοριών, προκειμένου να τις αξιοποιήσουμε όσο το δυνατόν καλύτερα πρέπει να γνωρίζουμε τους περιορισμούς τους και να διαθέτουμε εργαλεία που να μπορούν να τις οπτικοποιήσουν και γενικότερα να τις παρουσιάσουν με τέτοιο τρόπο που να είναι διαισθητικός για τον αποδέκτη τους.

Στην καρδιά κάθε ΣΓΠ βρίσκεται η βάση δεδομένων. Τα δεδομένα που αποθηκεύονται στη βάση δεδομένων έχουν διαφορετική σημασία ανάλογα με κάθε πεδίο εφαρμογής, όμως όλα έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό όταν αναφερόμαστε σε ΣΓΠ : κάθε εγγραφή στη βάση αναπαριστά πληροφορίες για μία οντότητα με συγκεκριμένη θέση στον χώρο. Ωστόσο, τα δεδομένα από μόνα τους δεν είναι κάτι άλλο από μία συλλογή πληροφοριών χωρίς μεταξύ τους σύνδεση. Για να αποκτήσουν ουσιαστική χρησιμότητα, θα πρέπει να υπάρχει μία δομή που θα συσχετίζει τα

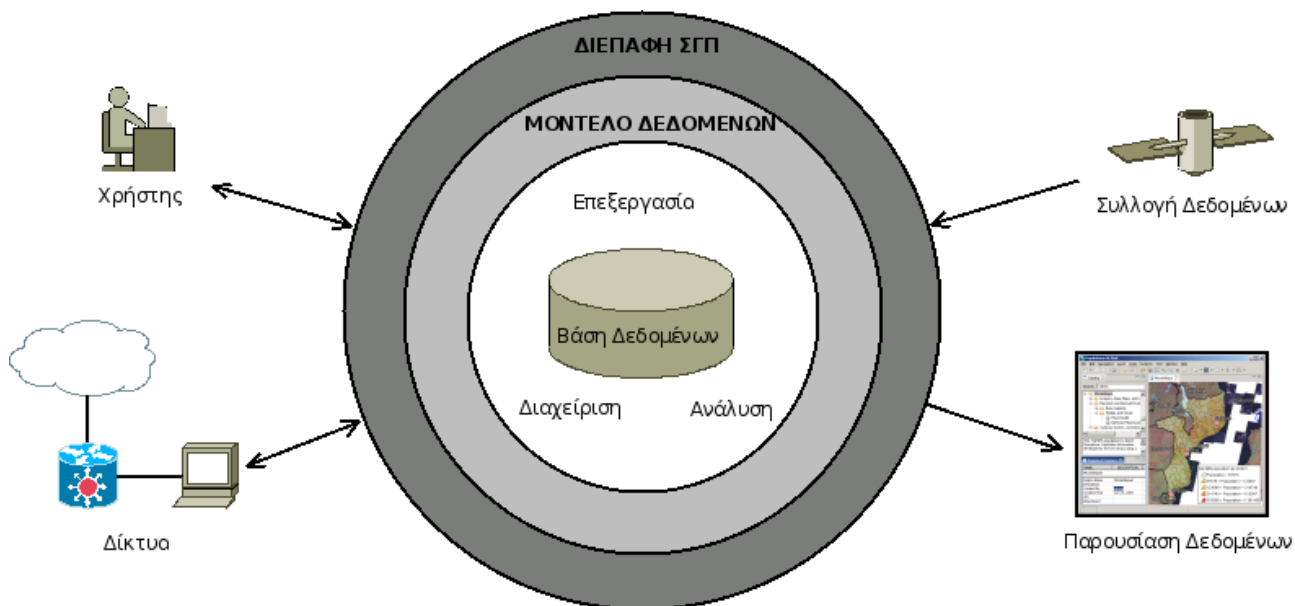
δεδομένα μεταξύ τους και αυτή η δομή περιγράφεται από το μοντέλο δεδομένων.

Μία δεύτερη σημαντική συνιστώσα των ΣΓΠ είναι τα *εργαλεία χειρισμού* των υπάρχοντων δεδομένων. Είναι σημαντικό για ένα ΣΓΠ να παρέχει τέτοια λειτουργικότητα που να επιτρέπει την ανάλυση των δεδομένων σε υψηλό επίπεδο και να προσφέρει επαρκή υποστήριξη για τη λήψη αποφάσεων σχετικών με το αντικείμενο για το οποίο έχει σχεδιαστεί. Για παράδειγμα, ένα σύστημα που έχει αναπτυχθεί για την υποστήριξη δικτύων, θα πρέπει να περιλαμβάνει λειτουργίες που να επιτρέπουν την εύρεση διαδρομών ελάχιστου κόστους μεταξύ δύο κόμβων ή τον δυναμικό υπολογισμό των βέλτιστων διαδρομών δρομολόγησης σε ένα δίκτυο ανά πάσα στιγμή.

Η αποδοτική ανάκληση δεδομένων δεν εξαρτάται μόνο από την καταλληλότητα του εκάστοτε επιλεγμένου μοντέλου δεδομένων, αλλά και από τον τρόπο της αλληλεπίδρασης του ανθρώπου με τον υπολογιστή (Human Computer Interaction – HCI). Αυτό περιλαμβάνει τόσο την ύπαρξη καλά σχεδιασμένων *διεπαφών χρήστη*, όσο και την χρήση κατάλληλων *γλωσσών ερωτημάτων*.

Πέρα από τα χαρακτηριστικά που περιγράφηκαν, σε γενικές γραμμές, ένα σύστημα GIS περιλαμβάνει :

- Τεχνικές για εισαγωγή γεωγραφικής πληροφορίας σε ηλεκτρονική μορφή, δηλαδή μετατροπή της σε ψηφιακή μορφή,
- Τεχνικές για αποθήκευση αυτής της πληροφορίας σε συμπιεσμένη μορφή σε ψηφιακά αποθηκευτικά μέσα,
- Μεθόδους αυτοματοποιημένης ανάλυσης των γεωγραφικών δεδομένων, αναζήτηση προτύπων, συνδυασμό διαφορετικών ειδών δεδομένων, δυνατότητα μετρήσεων, εύρεση των συντομότερων διαδρομών και πολλά άλλα,
- Μεθόδους πρόβλεψης των αποτελεσμάτων πιθανών σεναρίων, όπως για παράδειγμα της επίδρασης της αλλαγής του κλίματος στη βλάστηση,
- Τεχνικές αναπαράστασης των δεδομένων σε μορφή χαρτών, εικόνων κλπ.
- Δυνατότητες για έξοδο των αποτελεσμάτων σε μορφή αριθμών και πινάκων.



Σχήμα 2.1.1 – Οι συνιστώσες ενός Συστήματος Γεωγραφικών Πληροφοριών.

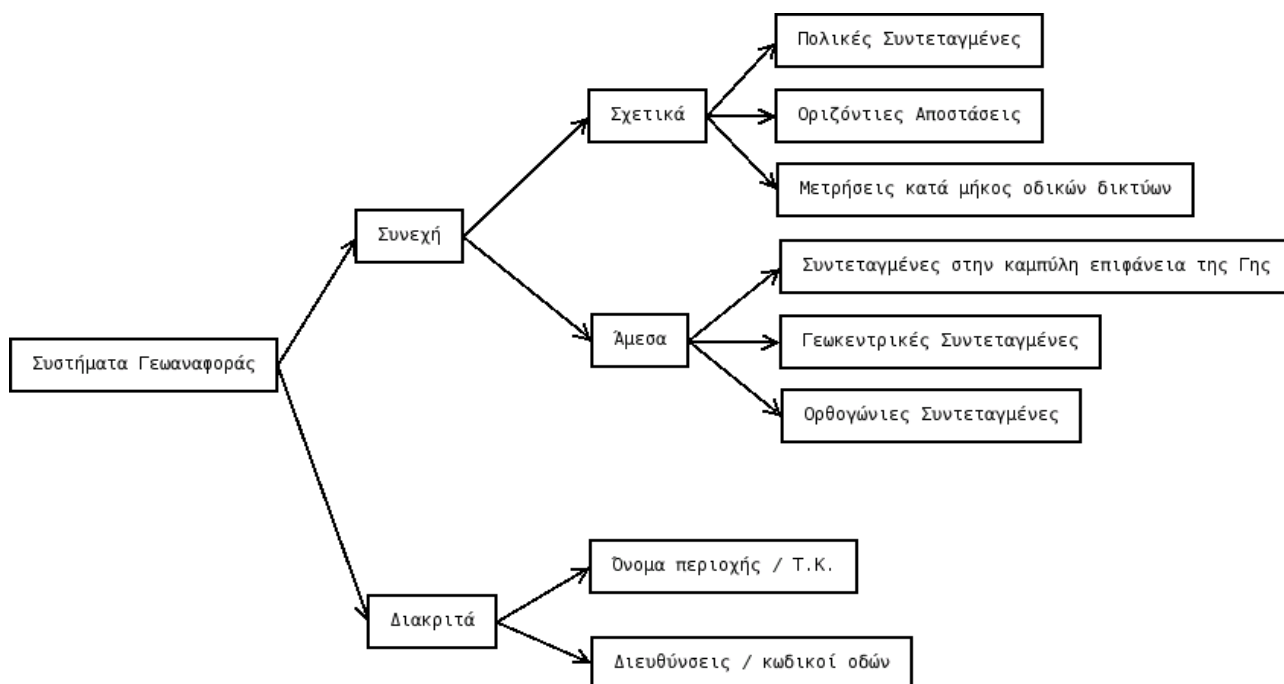
2.2 Συστήματα συντεταγμένων και γεωαναφοράς.

Προτού ανόμοια γεωγραφικά δεδομένα χρησιμοποιηθούν σε ένα ΣΓΠ, θα πρέπει να αναφερθούν σε ένα κοινό σύστημα συντεταγμένων. Υπάρχουν πολλά συστήματα γεωαναφορών που περιγράφουν τον πραγματικό κόσμο με διαφορετικούς τρόπους και με διαφορετική ακρίβεια. Ως *γεωαναφορά* (*georeferencing*) ορίζεται η τοποθέτηση των αντικειμένων στον δισδιάστατο ή τρισδιάστατο χώρο, δηλαδή ο προσδιορισμός της θέσης και των γεωμετρικών τους χαρακτηριστικών μέσα σε κάποιο σύστημα συντεταγμένων. Υπάρχουν δύο μέθοδοι γεωαναφοράς : τα *συνεχή συστήματα γεωαναφοράς* και τα *διακριτά συστήματα γεωαναφοράς*.

Στα συνεχή συστήματα γεωαναφοράς γίνεται συνεχής μέτρηση της θέσης των φαινομένων σε σχέση με ένα σημείο αναφοράς χωρίς απότομες αλλαγές ή διακοπές. Τα δεδομένα χαρακτηρίζονται από την *ανάλυσή* (*resolution*) τους και την *ακρίβειά* (*precision*) τους. Τα συνεχή συστήματα γεωαναφοράς χωρίζονται με τη σειρά τους σε *άμεσα* και *σχετικά*, εκ των οποίων τα άμεσα περιλαμβάνουν (α) τα συστήματα συντεταγμένων στην καμπύλη επιφάνεια της γης, (β) τις γεωκεντρικές συντεταγμένες και (γ) τις ορθογώνιες συντεταγμένες, ενώ τα σχετικά περιλαμβάνουν (α) πολικές συντεταγμένες, (β) οριζόντιες αποστάσεις και (γ) μετρήσεις κατά μήκος οδικών δικτύων.

Βασικές έννοιες των άμεσων συστημάτων γεωαναφοράς είναι :

- Το *χωροσταθμικό σημείο (datum)*. Όπως γνωρίζουμε, η γη δεν είναι σφαιρική αλλά περισσότερο ελλειψοειδής. Διάφορα ελλειψοειδή έχουν προταθεί εξαρτώμενα από το με πόσο μεγάλη ακρίβεια περιγράφουν το μέγεθος της γης. Ένα χωροσταθμικό σημείο είναι ένα μοντέλο (ελλειψοειδές) της γης που χρησιμοποιείται για γεωδαιτικούς υπολογισμούς. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο χωροσταθμικό σημείο σήμερα είναι το WGS84 (World Geodetic System 1984).
- Η *προβολή χάρτη (projection)*. Τα διάφορα γεωαναφορικά δεδομένα μπορούν να αποτυπωθούν πάνω σε έναν δισδιάστατο χάρτη μόνο όταν αναφερθούν στο επίπεδο και όχι στην καμπύλη επιφάνεια της γης. Διάφορες προβολές της σφαιρικής επιφάνειας της γης στο επίπεδο έχουν προταθεί και χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες: κυλινδρικές (π.χ Mercator, UTM κ.ά.), κωνικές και αζιμουθιακές προβολές. Κάθε προβολικό σύστημα εισάγει λάθη στις αποστάσεις, το σχήμα των περιοχών κλπ.
- Το *σύστημα συντεταγμένων*. Οι γεωγραφικές συντεταγμένες της επιφάνειας της γης είναι το γεωγραφικό μήκος και το γεωγραφικό πλάτος. Σ' αυτό το σύστημα συντεταγμένων οι αποστάσεις θα πρέπει να υπολογιστούν χρησιμοποιώντας σφαιρική γεωμετρία και την ακτίνα της γης. Πολλές χώρες έχουν εθνικά συστήματα συντεταγμένων που τους επιτρέπουν να περιγράφουν τις περιοχές με μονάδες μήκους σχετικά με ένα σημείο αναφοράς. Τα συνηθέστερα χρησιμοποιούν ορθογώνιες συντεταγμένες με μειονέκτημα την αναπόφευκτη εισαγωγή λάθους. Για να περιοριστεί το λάθος τα συστήματα αυτά περιορίζονται σε μικρές περιοχές. Για μεγαλύτερες περιοχές πολλά τέτοια συστήματα θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν μετατοπισμένα το ένα σε σχέση με τα άλλα. Πολλά συστήματα GIS προσφέρουν δυνατότητες μετατροπής από ένα σύστημα συντεταγμένων σε άλλο, βασισμένα σε κοινά σημεία στα δυο συστήματα. Το πιο γνωστό σύστημα συντεταγμένων είναι το UTM (Universal Transverse Mercator Grid).
- Τέλος, το *γεωειδές*, η επιφάνεια που περνά από τα σημεία της γης με μηδενικό υψόμετρο (το μέσο επίπεδο θαλάσσης). Το γεωειδές επηρεάζεται από τη μάζα της γης και επομένως ακολουθεί τις υψομετρικές καμπύλες.



Σχήμα 2.2.1 – Κατηγοριοποίηση Συστημάτων Γεωαναφοράς.

2.3 Συλλογή δεδομένων για χρήση σε Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.

Η διαδικασία συλλογής γεωγραφικών δεδομένων και εισαγωγής τους σε ένα ΓΣΠ απαιτεί συνήθως πολύ χρόνο και υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για να επιτελεστεί. Υπάρχοντα δεδομένα σε μορφή χαρτών ή φωτογραφιών πρέπει αρχικά να ψηφιοποιηθούν ή να σαρωθούν προκειμένου να μπορέσουν να επεξεργαστούν από υπολογιστές. Ένας ψηφιοποιητής παράγει δεδομένα σε διανυσματική μορφή, αναγνωρίζοντας βασικά σχήματα (σημεία, γραμμές και πολύγωνα) πάνω σε έναν χάρτη, ενώ σαρώνοντας τον χάρτη λαμβάνουμε δεδομένα σε πλεγματική μορφή, τα οποία μπορούν να υποστούν περαιτέρω επεξεργασία για να μετατραπούν σε διανυσματική μορφή. Οι δύο αυτοί διαφορετικοί τρόποι αναπαράστασης γεωγραφικών δεδομένων σε ψηφιακή μορφή περιγράφονται στην παράγραφο που ακολουθεί.

Η πλειοψηφία των ψηφιακών γεωγραφικών δεδομένων προέρχεται από αεροφωτογραφίες. Σταθμοί εργασίας χρησιμοποιούνται προκειμένου να ψηφιοποιήσουν γεωγραφικά χαρακτηριστικά κατευθείαν από στερεοσκοπικές φωτογραφίες, από τις οποίες μπορούν να προκύψουν οι διαστάσεις αντικειμένων χρησιμοποιώντας φωτογραμμομετρικές τεχνικές.

Μία άλλη σημαντική πηγή γεωγραφικών δεδομένων είναι τα συστήματα απομακρυσμένης αίσθησης (*remote sensing*). Τα συστήματα αυτά είναι συνήθως δορυφορικά και χρησιμοποιούν ένα σύνολο διαφορετικών αισθητήρων και μεθόδων για να εντοπίσουν και να αποθηκεύσουν σε πλεγματική

μορφή διάφορα γεωγραφικά χαρακτηριστικά. Ένα γνωστό τέτοιο σύστημα είναι το Global Positioning System (GPS). Το GPS είναι ένα στρατιωτικό δορυφορικό σύστημα πλοήγησης που αναπτύχθηκε από το υπουργείο άμυνας των Η.Π.Α και ελέγχει 24 δορυφόρους μεγάλης ακριβείας που εκπέμπουν ραδιοσήματα με μεγάλη ακρίβεια. Η θέση στην επιφάνεια της γης προσδιορίζεται από τη λήψη και σύγκριση των σημάτων τριών τέτοιων δορυφόρων η οποία μεταφράζεται στην μοναδική τομή τριών κώνων των οποίων οι κορυφές είναι οι τρεις δορυφόροι. Η τυπική ακρίβεια μέτρησης του GPS είναι $\pm 100\text{m}$ και μπορεί να φθάσει τα $\pm 10\text{m}$ με τη βοήθεια διαφορικού GPS. Το GPS επιτρέπει τον προσδιορισμό της θέσης σημείων σ' όλο τον κόσμο 24 ώρες το εικοσιτετράωρο κάτω από οποιοσδήποτε καιρικές συνθήκες και αποτελεί ένα ισχυρό βοηθητικό εργαλείο για τα ΣΓΠ.

Αφού συλλεχθούν χωρικά δεδομένα και εισαχθούν στο σύστημα, θα πρέπει να εισαχθεί και περιγραφική πληροφορία για κάθε γεωγραφικό αντικείμενο που αναπαραστάθηκε σε ψηφιακή μορφή, αλλά και να ελεγχθούν όλα τα νέα δεδομένα για τυχόν λάθη, ατέλειες ή παρεκκλίσεις από την τοπολογική σημασία την οποία θα πρέπει να έχουν. Παραδείγματος χάρη, σε ένα οδικό δίκτυο, οι δρόμοι θα πρέπει να ενώνονται με τους κόμβους σε ένα σταυροδρόμι.

2.4 Αναπαράσταση δεδομένων στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.

Τα δεδομένα των ΣΓΠ αντιπροσωπεύουν πραγματικά αντικείμενα, που μπορεί να είναι είτε διακριτά (ένα σπίτι) ή να παίρνουν συνεχείς τιμές (επίπεδο βροχοπτώσεων, υψόμετρο). Υπάρχουν δύο κυρίαρχες μέθοδοι αναπαράστασης των δεδομένων αυτών : σε *πλεγματική μορφή (raster)* ή σε *διανυσματική μορφή*.

2.4.1 Αναπαράσταση δεδομένων σε πλεγματική μορφή.

Το μοντέλο που χρησιμοποιείται κατά την αναπαράσταση γεωγραφικών πληροφοριών σε πλεγματική μορφή είναι σχεδόν το ίδιο με αυτό που χρησιμοποιείται και για τα γραφικά σε μορφή πλέγματος (raster graphics). Μία εικόνα αυτού του είδους αποτελείται από σειρές και στήλες κελιών, σε καθένα από τα οποία είναι αποθηκευμένη κάποια τιμή που περιέχει πληροφορία για το χρώμα του κελιού. Στην περίπτωση της αναπαράστασης γεωγραφικών πληροφοριών, πέρα από την ένδειξη του χρώματος, σε κάθε κελί μπορούν να αποθηκεύονται επιπλέον τιμές που να συμβολίζουν διαφορετικά μεγέθη, όπως για παράδειγμα το επίπεδο βροχόπτωσης για το συγκεκριμένο σημείο του χάρτη στο οποίο βρίσκεται τοποθετημένο ένα κελί. Συνήθως τα κελιά

αναπαριστούν περιοχές τετραγωνικού σχήματος με κάποιες ορισμένες διαστάσεις και όσο μικρότερες είναι αυτές οι διαστάσεις τόσο μεγαλύτερη είναι η *ανάλυση* του συνόλου δεδομένων πλεγματικής μορφής.

Τα πλεγματικά δεδομένα μπορούν να αποθηκευτούν τόσο σαν αρχεία εικόνας (JPEG, TIFF, κλπ) αλλά και σε σχεσιακές βάσεις δεδομένων με τη μορφή δυαδικών αντικειμένων μεγάλου μεγέθους (binary long objects – BLOB). Η αποθήκευση σε βάση δεδομένων διευκολύνει τη γρηγορότερη ανάκληση πληροφοριών, αλλά μπορεί να απαιτεί την αποθήκευση εκατομμυρίων εγγραφών μεγάλου μεγέθους.

2.4.2 Αναπαράσταση δεδομένων σε διανυσματική μορφή.

Μία διακριτή φυσική οντότητα για την οποία αποθηκεύονται πληροφορίες στη βάση δεδομένων ενός ΣΓΠ, ονομάζεται *χαρακτηριστικό* (*feature*). Ένα χαρακτηριστικό αποτελείται από το συνδυασμό δύο διαφορετικών ειδών πληροφορίας που αφορούν την οντότητα στην οποία αυτό αναφέρεται. Η *χωρική πληροφορία* περιγράφει την τοποθεσία της οντότητας πάνω στη Γη, αλλά και το γεωμετρικό της σχήμα, ενώ η *περιγραφική πληροφορία* αναφέρεται σε διάφορα άλλα χαρακτηριστικά της οντότητας που δεν έχουν χωρικό χαρακτήρα.

Όταν αναπαριστούμε γεωγραφικά δεδομένα σε διανυσματική μορφή, η χωρική πληροφορία αποθηκεύεται με τη μορφή ενός εκ των τριών βασικών σχημάτων : του σημείου, της γραμμής και του πολυγώνου. Μία πόλη μπορεί να περιγραφεί σαν ένα σημείο πάνω στη Γη, ένας δρόμος ως ένα σύνολο γραμμών και μία χώρα ως ένα πολύγωνο. Οντότητες που ανήκουν στην ίδια κλάση αντικειμένων μπορούν να ομαδοποιηθούν και να δημιουργήσουν *συλλογές χαρακτηριστικών* (*feature collections*) με την προϋπόθεση ότι η μορφή της χωρικής πληροφορίας όλων είναι η ίδια. Για παράδειγμα, μία πόλη μπορεί να αναπαρασταθεί μεν ως σημείο, όμως ανάλογα με τις ανάγκες του προβλήματος μπορεί να αναπαρασταθεί και από ένα πολύγωνο. Δύο χαρακτηριστικά που αντιπροσωπεύουν πόλεις μπορούν να ανήκουν στην ίδια συλλογή μόνο αν η χωρική πληροφορία και των δύο είναι σημειακή ή αν η χωρική πληροφορία και των δύο είναι πολυγωνική. Το μοντέλο δεδομένων της βάσης που υλοποιείται για κάθε ΣΓΠ θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη αυτόν τον κανόνα και να μην αναμιγνύει οντότητες με διαφορετικές γεωμετρικές μεταξύ τους.

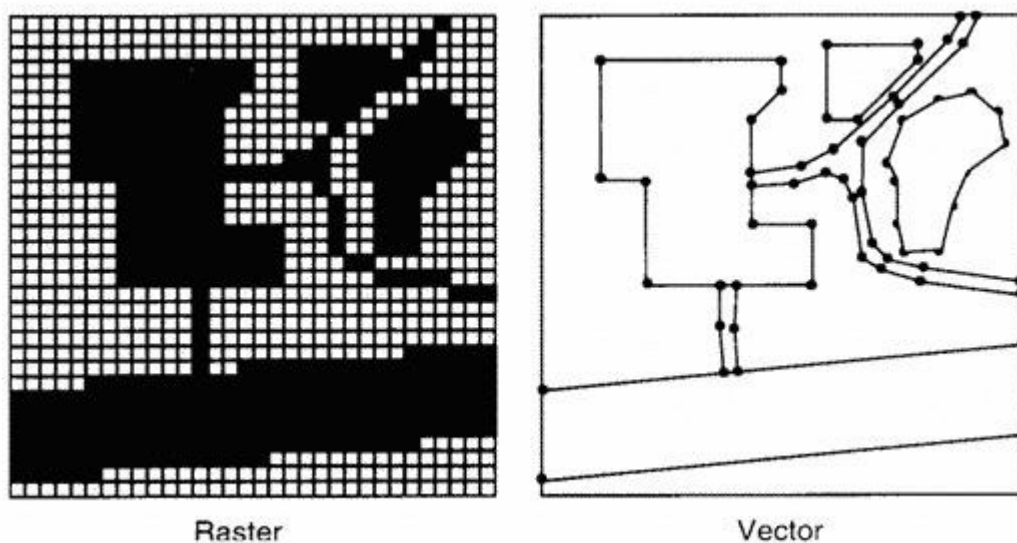
Η περιγραφική πληροφορία, αναπαριστά ιδιότητες της οντότητας που δεν έχουν χωρική υπόσταση. Αυτές οι ιδιότητες εξαρτώνται από το είδος της οντότητας, από τις απαιτήσεις του προβλήματος και από πολλές ακόμα παραμέτρους. Περιγραφικές πληροφορίες μιας πόλης μπορεί να είναι το όνομά

της, ο πληθυσμός της, ο νομός στον οποίο αυτή ανήκει και γενικά οτιδήποτε χαρακτηρίζει την πόλη χωρίς να υπάρχει κάπου στον χώρο.

Συνοψίζοντας, ένα χαρακτηριστικό χάρτη σε διανυσματική μορφή απεικόνισης αποτελείται από μία γεωμετρία και από ιδιότητες. Ένα ΣΓΠ ομαδοποιεί τα χαρακτηριστικά με κοινή γεωμετρία και ιδιότητες σε συλλογές, τις οποίες αποθηκεύει ως πίνακες της βάσης δεδομένων, έτσι ώστε κάθε γραμμή του πίνακα να αποτελεί ένα χαρακτηριστικό του χάρτη, και κάθε στήλη μια ιδιότητα αυτού του χαρακτηριστικού. Τα χαρακτηριστικά αυτά έχουν τις ίδιες ιδιότητες και επομένως ο πίνακας αποτελεί ένα στρώμα (*layer*) καθώς είναι ένα σύνολο από χαρακτηριστικά της ίδιας φύσης.

2.4.3 Σύγκριση πλεγματοτικής και διανυσματικής αναπαράστασης.

Οι δύο μορφές αναπαράστασης γεωγραφικών δεδομένων που περιγράφηκαν προηγουμένως είναι ριζικά διαφορετικές και καθεμία παρουσιάζει πλεονεκτήματα, αλλά και μειονεκτήματα έναντι της άλλης. Η πλεγματοτική αναπαράσταση απαιτεί την αποθήκευση τιμών για κάθε κελί του χάρτη, ακόμη κι αν σε κάποια στοιχεία δεν υπάρχει κάτι προς αναπαράσταση. Το γεγονός αυτό οδηγεί σε μεγαλύτερες απαιτήσεις των πλεγματοτικών δεδομένων σε αποθηκευτικό χώρο, σε σύγκριση με τη διανυσματική αναπαράσταση που συγκρατεί πληροφορίες μόνο για αντικείμενα στο χώρο που μας ενδιαφέρουν. Ακόμη, τα δεδομένα σε διανυσματική μορφή είναι ευκολότερο να αλλάξουν μέγεθος ή να απεικονιστούν σε διαφορετικά προβολικά συστήματα και είναι περισσότερο συμβατά με το μοντέλο των σχεσιακών βάσεων δεδομένων. Από την άλλη, τα δεδομένα σε πλεγματοτική μορφή διευκολύνουν την υλοποίηση μεθόδων υπέρθεσης δύο ή περισσότερων γεωγραφικών θεμάτων, κάτι που δεν είναι εξίσου απλό με τη διανυσματική αναπαράσταση.



Σχήμα 2.4.3.1 – Σύγκριση εικόνας σε πλεγματοτική μορφή με την ίδια εικόνα σε διανυσματική μορφή.

2.4.4 Τρόποι αποθήκευσης γεωγραφικών δεδομένων.

Όπως αναφέρθηκε ήδη, τα πλεγματικά δεδομένα μπορούν να αποθηκευτούν στον υπολογιστή ως κάποια απλή ή συμπιεσμένη μορφή αρχείων εικόνα, για παράδειγμα TIFF ή JPEG. Ακόμη, μπορούν να αποθηκευτούν σε σχεσιακές βάσεις δεδομένων, σε περίπτωση που αναπαρασταθούν σε μορφή δυαδικών αντικειμένων μεγάλου μήκους (BLOB). Από την άλλη, τα διανυσματικά δεδομένα από τη φύση τους είναι συμβατά με το σχεσιακό μοντέλο βάσεων δεδομένων. Κάθε χαρακτηριστικό μπορεί να περιγραφεί σαν μία εγγραφή κάποιου πίνακα μιας βάσης δεδομένων, ενώ κάθε πίνακας έχει την έννοια μιας συλλογής χαρακτηριστικών με την ίδια σημασία (συλλογή πόλεων, συλλογή χωρών κλπ).

Τα απλά συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων δεν υποστηρίζουν τύπους δεδομένων που να είναι συμβατοί με τα γεωγραφικά χαρακτηριστικά μίας φυσικής οντότητας. Για παράδειγμα, υπάρχει ο τύπος δεδομένων του ακεραίου με τον οποίο μπορεί να περιγραφεί ο πληθυσμός μιας πόλης, όμως δεν υπάρχει ο τύπος δεδομένου “πολύγωνο”, με τον οποίο μπορεί να περιγραφεί το γεωμετρικό της σχήμα. Κατά συνέπεια, για ένα τέτοιο σύστημα βάσεων δεδομένων που φιλοδοξεί να υποστηρίξει την διαχείριση πληροφοριών γεωγραφικής φύσης, είναι απαραίτητη η ανάλογη επέκτασή του. Πράγματι, πολλές δημοφιλείς εταιρείες που ασχολούνται με τα συγκεκριμένα συστήματα έχουν δημιουργήσει επεκτάσεις των προϊόντων τους που υποστηρίζουν όχι μόνο κατάλληλους τύπους δεδομένων, αλλά και παρέχουν σύνολα προγραμματιστικών διεπαφών που διευκολύνουν τον χειρισμό χωρικών δεδομένων. Τέτοιες επεκτάσεις είναι η Spatial για συστήματα Oracle, η Spatial Extender για συστήματα IBM DB2, η PostGIS για την Postgre και το ArcSDE της ESRI.

Πέρα από τη χρήση συστημάτων διαχείρισης βάσεων δεδομένων για την αποθήκευση γεωγραφικής πληροφορίας, υπάρχουν και ποικίλες μορφές αυτόνομων αρχείων που μπορούν να αποθηκεύσουν ένα σύνολο χαρακτηριστικών. Η πιο ευρέως διαδεδομένη τέτοια μορφή αρχείου είναι το shapefile, που έχει αναπτυχθεί από την εταιρεία ESRI και βασίζεται κυρίως σε ανοιχτές προδιαγραφές. Ένα shapefile αποτελεί ένα σύνολο τριών τουλάχιστον αρχείων : ένα αρχείο τύπου shp το οποίο αποθηκεύει τη χωρική συνιστώσα κάθε χαρακτηριστικού, ένα αρχείο τύπου shx, στο οποίο περιλαμβάνονται δείκτες σε κάθε χαρακτηριστικό ανάλογα με την χωρική του συνιστώσα (για γρήγορη αναζήτηση) και ένα αρχείο τύπου dbf στο οποίο περιλαμβάνεται η περιγραφική πληροφορία κάθε χαρακτηριστικού.

Το πλεονέκτημα ενός shapefile έναντι μιας βάσης δεδομένων είναι η φορητότητά του, όμως έχει

ένα πολύ σημαντικό μειονέκτημα. Μπορεί να αποθηκεύσει την γεωγραφία των χαρακτηριστικών που περιέχει, αλλά δεν μπορεί να αποθηκεύσει πληροφορία για την τοπολογία τους. Αντιθέτως, μία βάση μπορεί να μην διαθέτει φορητότητα, όμως μπορεί να αποθηκεύσει πληροφορίες για την τοπολογία χαρακτηριστικών με τη χρήση περιορισμών και άλλων κλασσικών εργαλείων των βάσεων δεδομένων. Για παράδειγμα, όταν αναπαριστούμε ένα σύνολο πόλεων με τη μορφή ενός πολυγώνου για κάθε πόλη, τότε η προσθήκη στη συλλογή πολυγώνων των οποίων η τομή δεν είναι κενή, δεν έχει νόημα. Δύο πόλεις δεν μπορούν να είναι η μία μέσα στην άλλη. Με τη χρήση shapefile δεν έχουμε τρόπο να ελέγξουμε ότι τα χαρακτηριστικά που αποθηκεύουμε τηρούν αυτόν τον κανόνα, με τη χρήση ενός συστήματος βάσης δεδομένων όμως μπορούμε να το κάνουμε δημιουργώντας ένα κατάλληλο trigger. Ένα επιπλέον πλεονέκτημα που προσφέρει μια βάση δεδομένων είναι το γεγονός ότι μπορεί να είναι προσπελάσιμη μέσω ενός δικτύου. Αποθηκεύοντας μία φορά κάποια γεωγραφικά δεδομένα, τότε μεγάλο πλήθος ατόμων και οργανισμών μπορεί να έχει πρόσβαση σε αυτά μέσω του διαδικτύου.

2.5 Βασικές Λειτουργίες των Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών.

Η συγκέντρωση και η αναπαράσταση γεωγραφικών δεδομένων σε ψηφιακή μορφή που περιγράφηκαν μέχρι στιγμής αποτελούν από μόνες τους σημαντικά βήματα για να κατανοήσουμε τον κόσμο στον οποίο ζούμε καλύτερα, αφού προσφέρουν ένα υπόβαθρο για γρήγορη και αποτελεσματική αναζήτηση πληροφοριών γύρω από αντικείμενα και οντότητες που υπάρχουν στο περιβάλλον. Τα περισσότερα πεδία επιστημών και έρευνας, όμως, απαιτούν συνήθως λύσεις σε πολύπλοκα προβλήματα από αυτό της απλής αναζήτησης πληροφοριών και έτσι τα ΣΓΠ κατασκευάζονται με το σκεπτικό να μπορούν να επιτελέσουν ένα ευρύ σύνολο λειτουργιών, βασιζόμενα πάντα σε δεδομένα που έχουν εισαχθεί σε αυτά με κάποιον από τους τρόπους που ήδη περιγράφηκαν.

Η πιο αυτονόητη απαίτηση που μπορεί να έχει κάποιος από ένα ΣΓΠ είναι η δυνατότητα οπτικοποίησης των υπάρχοντων πληροφοριών. Το να διατηρούμε μία βάση δεδομένων με εκατομμύρια εγγραφές για εξίσου μεγάλο αριθμό φυσικών οντοτήτων δεν μας προσφέρει μία άμεση, διαισθητική και εποπτική εικόνα των στοιχείων που έχουμε για το περιβάλλον και κατ' επέκταση δε διευκολύνει ριζικά την εξαγωγή συμπερασμάτων γι αυτό, και τη λήψη κατάλληλων αποφάσεων. Η οπτικοποίηση στην οποία αναφερόμαστε μπορεί να γίνεται με πολλούς τρόπους, όπως για παράδειγμα με δισδιάστατα ή τρισδιάστατα μοντέλα περιοχών και με στατιστικούς πίνακες. Η παρατήρηση της κατανομής κάποιου μεγέθους σε μία γεωγραφική περιοχή με αυτούς τους τρόπους μπορεί να γίνει πολύ εύκολα και να επιταχύνει σημαντικά την περάτωση πολλών

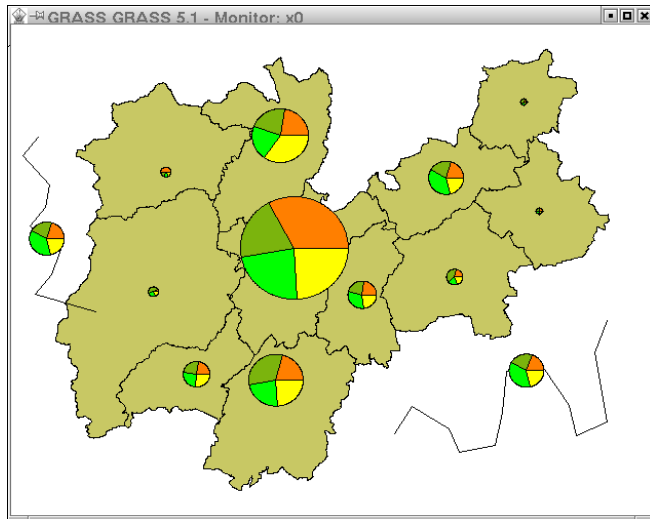
έργων που χωρίς τα συγκεκριμένα εργαλεία θα ήταν δύσκολο να επιτευχθούν τόσο σύντομα.

Παρά τα εμφανή προτερήματα ενός συστήματος που μπορεί να οπτικοποιήσει την πληροφορία, η οπτικοποίηση παραμένει απλώς ένα μέσο για την λήψη αποφάσεων. Συνήθως δεν μας ενδιαφέρει απλώς να απεικονίσουμε τον πραγματικό κόσμο από την αρχή με τη χρήση μιας εφαρμογής (άλλωστε γι αυτό το λόγο υπάρχουν και οι φωτογραφίες), αλλά να ομαδοποιήσουμε και να αναλύσουμε πληροφορίες που αφορούν σε ένα σύστημα (χώρα, βιότοπο, δίκτυο, κλπ), προκειμένου να το καταλάβουμε καλύτερα, να λάβουμε συγκεκριμένες αποφάσεις, να προβούμε σε συγκεκριμένες ενέργειες και πιθανώς να προσπαθήσουμε με τον ίδιο τρόπο να οπτικοποιήσουμε και να ερμηνεύσουμε τα αποτελέσματα αυτών των ενεργειών. Μία εταιρεία παροχής υπηρεσιών δικτύου δεν την ενδιαφέρει η απεικόνιση των οργανισμών τοπικής αυτοδιοίκησης καθεαυτή. Όμως την ενδιαφέρει μέσω αυτή της απεικόνισης να μπορέσει να μελετήσει εύκολα και σύντομα την πληθυσμιακή κατανομή κάθε τετραγωνικού χιλιομέτρου μέσα στην επικράτεια της χώρας και έτσι να λάβει αποφάσεις σχετικά με το ποιές περιοχές ενδείκνυνται για μελλοντική επέκταση του δικτύου της.

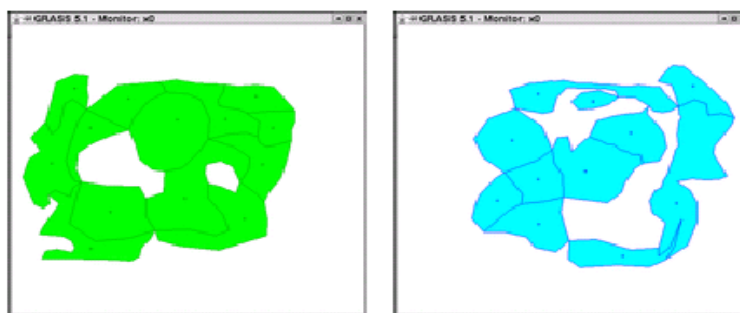
Για να κατανοήσουμε καλύτερα τα δεδομένα που διαθέτουμε, χρησιμοποιούμε το εργαλείο της *χωρικής ανάλυσης*. Με τον όρο “χωρική ανάλυση” αναφερόμαστε στη διαδικασία εξαγωγής ή δημιουργίας νέας πληροφορίας σχετικής με ένα σύνολο γεωγραφικών χαρακτηριστικών, με τη χρήση ήδη υπάρχουσας πληροφορίας και βασιζόμενοι σε κάποια προκαθορισμένα κριτήρια. Η νέα πληροφορία που προκύπτει είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την εξέταση, την αξιολόγηση ή την ανάλυση συμπερασμάτων σχετικών με κάποια γεωγραφική περιοχή. Μία θεμελιώδης έννοια στον τομέα της χωρικής ανάλυσης είναι αυτή της *χωρικής εξάρτησης* (*spatial dependency*). Η ιδέα αυτή συχνά αποκαλείται ως “ο πρώτος νόμος της γεωγραφίας του Tobler” και συνοψίζεται στη φράση “καθετί σχετίζεται με κάτι άλλο, αλλά πράγματα που βρίσκονται κοντά σχετίζονται περισσότερο από πράγματα που βρίσκονται μακριά”. Γενικεύοντας, μπορούμε να υποστηρίξουμε ότι τα περισσότερα γεγονότα, φυσικά ή κοινωνικά, παρουσιάζουν μεταξύ τους μία σχέση που εξερτάται από την απόσταση.

Καταλαβαίνουμε ότι η χωρική ανάλυση μπορεί να συνδυαστεί άψογα με την ιδέα των ΓΣΠ για να προσφέρει σημαντικές δυνατότητες στην ανάλυση πολλών πεδίων εφαρμογής. Το πεδίο της *τοπολογικής μοντελοποίησης* ασχολείται με τις τοπολογικές σχέσεις μεταξύ γεωμετρικών αντικειμένων. Τέτοιες σχέσεις είναι η γειτνίαση (με τί συνορεύει μια οντότητα), η εγγύτητα (πόσο μακριά είναι μία οντότητα από μία άλλη) και η συμπερίληψη (ποιές οντότητες περιλαμβάνει μια συγκεκριμένη οντότητα). Άλλα πεδία εφαρμογής που επωφελούνται από τη χωρική ανάλυση είναι

αυτά της *ανάλυσης δικτύων* (προβλήματα ροής, βελτιστοποίησης κόστους, κλπ), της *γεοστατιστικής*, της *υπέρθεσης χαρτών* (*map overlay*) και της *κατασκευής διαγραμμάτων*. Στα σχήματα που ακολουθούν φαίνονται ορισμένες από τις εφαρμογές της χωρικής ανάλυσης.



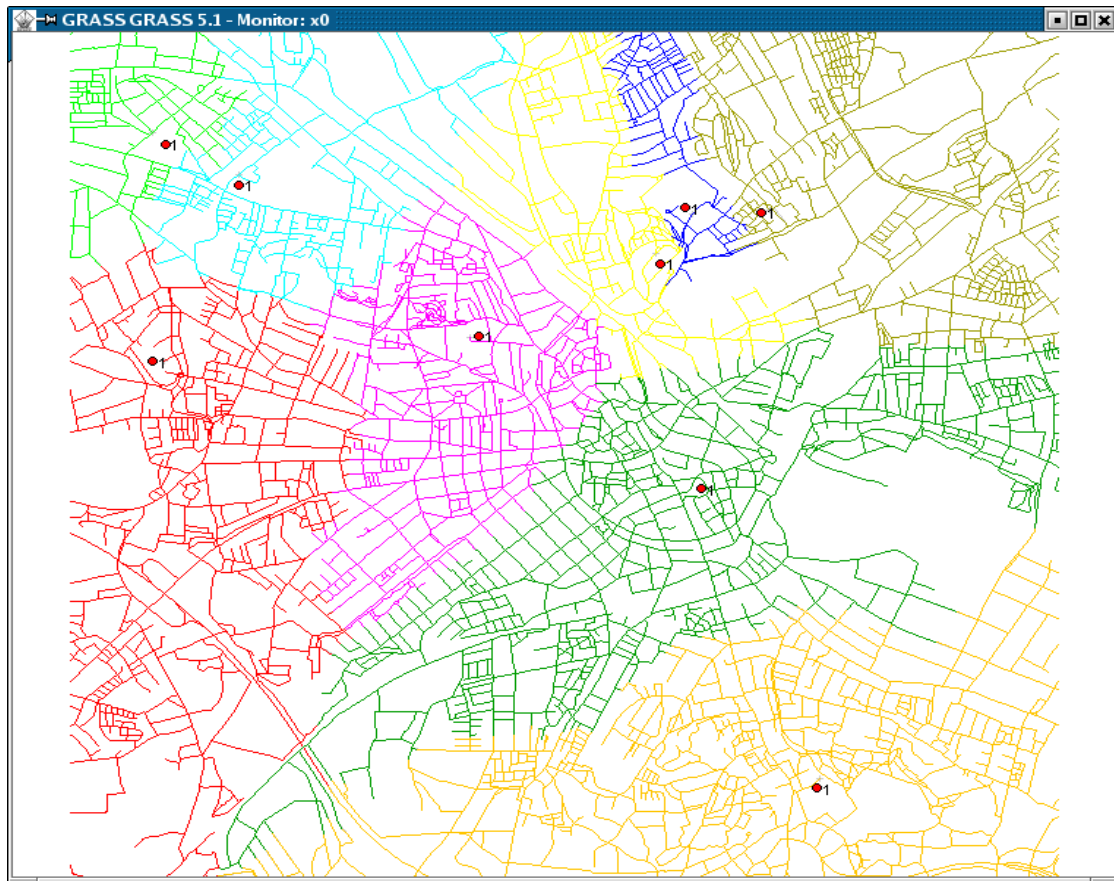
Σχήμα 2.5.1 – Κατασκευή στατιστικών διαγραμμάτων.



Είσοδοι Α και Β



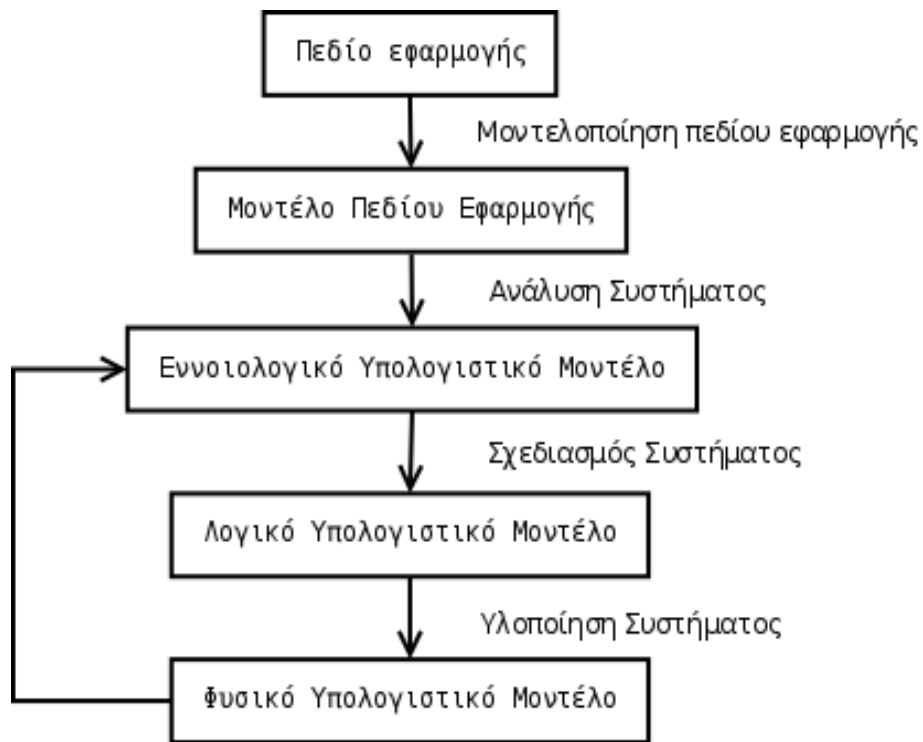
Σχήμα 2.5.2 – Υπέρθεση χαρτών : τομή και ένωση χαρακτηριστικών.



Σχήμα 2.5.3 – Ανάλυση δικτύων : χωρισμός δικτύου σε υποδίκτυα.

2.6 Ανάπτυξη Συστημάτων Γεωγραφικών Πληροφοριών.

Ένα ΣΓΠ, όπως και κάθε άλλο πληροφοριακό σύστημα, είναι ένα σύστημα που αποτελείται από υλικό, λογισμικό, δεδομένα και περνάει από διάφορες φάσεις κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Ο κύκλος ζωής ξεκινάει με την *ανάλυση* του συστήματος, κατά την οποία προσδιορίζονται οι λειτουργικές του απαιτήσεις, συνεχίζεται με το *σχεδιασμό* που ασχολείται με την μοντελοποίηση μιας λύσης σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα και καταλήγει στην *υλοποίηση* αυτής της λύσης. Στη συνέχεια, το σύστημα περνάει πολλά, διαδοχικά στάδια *χρήσης* και *συντήρησης*. Η σειρά με την οποία θα πρέπει να γίνονται όλες αυτές οι λειτουργίες κατά τη διαδικασία της ανάπτυξης ενός ΣΓΠ δεν είναι ανάγκη να είναι χρονικά αυστηρή και μάλιστα στην πραγματικότητα αποτελεί συνήθως μόνο μία λογική αφαίρεση της παραπάνω διαδικασίας. Για παράδειγμα, σε μία εξελικτική προσέγγιση της ανάπτυξης συστημάτων, οι λειτουργίες αυτές συμβαίνουν με επαναληπτικό τρόπο, αφού νέα στάδια ανάλυσης και σχεδιασμού μπορούν να ακολουθήσουν την υλοποίηση ενός αρχικού, πιλοτικού μοντέλου μιας εφαρμογής.



Σχήμα 2.6.1 – Ενδεικτικό μοντέλο ανάπτυξης ΣΓΠ.

3. Ανάλυση και σχεδιασμός του υποσυστήματος απεικόνισης και χειρισμού δεδομένων.

Σε αυτό το μέρος θα ασχοληθούμε με την περιγραφή και τη μοντελοποίηση του υποσυστήματος της εφαρμογής μας, το οποίο θα αναλάβει την απεικόνιση και τον χειρισμό των χωρικών δεδομένων. Το εν λόγω υποσύστημα θα καταστήσει δυνατή την οπτικοποίηση της λύσης στο πρόβλημα ελαχιστοποίησης του κόστους κατασκευής ενός δικτύου, που θα περιγραφεί στο επόμενο μέρος. Ωστόσο, πριν προχωρήσουμε στην μοντελοποίηση οντοτήτων κατάλληλων για την υλοποίηση αυτής της λειτουργικότητας, θα πρέπει πρώτα να καταγράψουμε τις απαιτήσεις που μπορεί να έχει ένας χρήστης από το συγκεκριμένο υποσύστημα.

3.1 Περιγραφή προδιαγραφών του υποσυστήματος απεικόνισης.

Σημασία έχει αρχικά να καταγράψουμε τις απαιτήσεις που μπορεί να έχει ο χρήστης από το σύστημα. Η βασικότερη λειτουργία που θα πρέπει να επιτελείται είναι η απεικόνιση γεωγραφικών δεδομένων με τη μορφή χαρτών, όμως προκειμένου η εφαρμογή να είναι περισσότερο εύχρηστη θα πρέπει να υπάρχουν κάποιες βοηθητικές λειτουργίες. Για να καταλήξουμε στο σύνολο αυτών, η καλύτερη διαδικασία θα ήταν μια σειρά συνεντεύξεων με πιθανούς χρήστες, όμως η παρούσα εφαρμογή υλοποιείται στα πλαίσια μιας θεωρητικής εργασίας και γι αυτό θα θεωρήσουμε ένα σύνολο απαιτήσεων που θα μπορούσε να έχει ένας υποθετικός χρήστης. Οι απαιτήσεις αυτές απαριθμούνται στη συνέχεια.

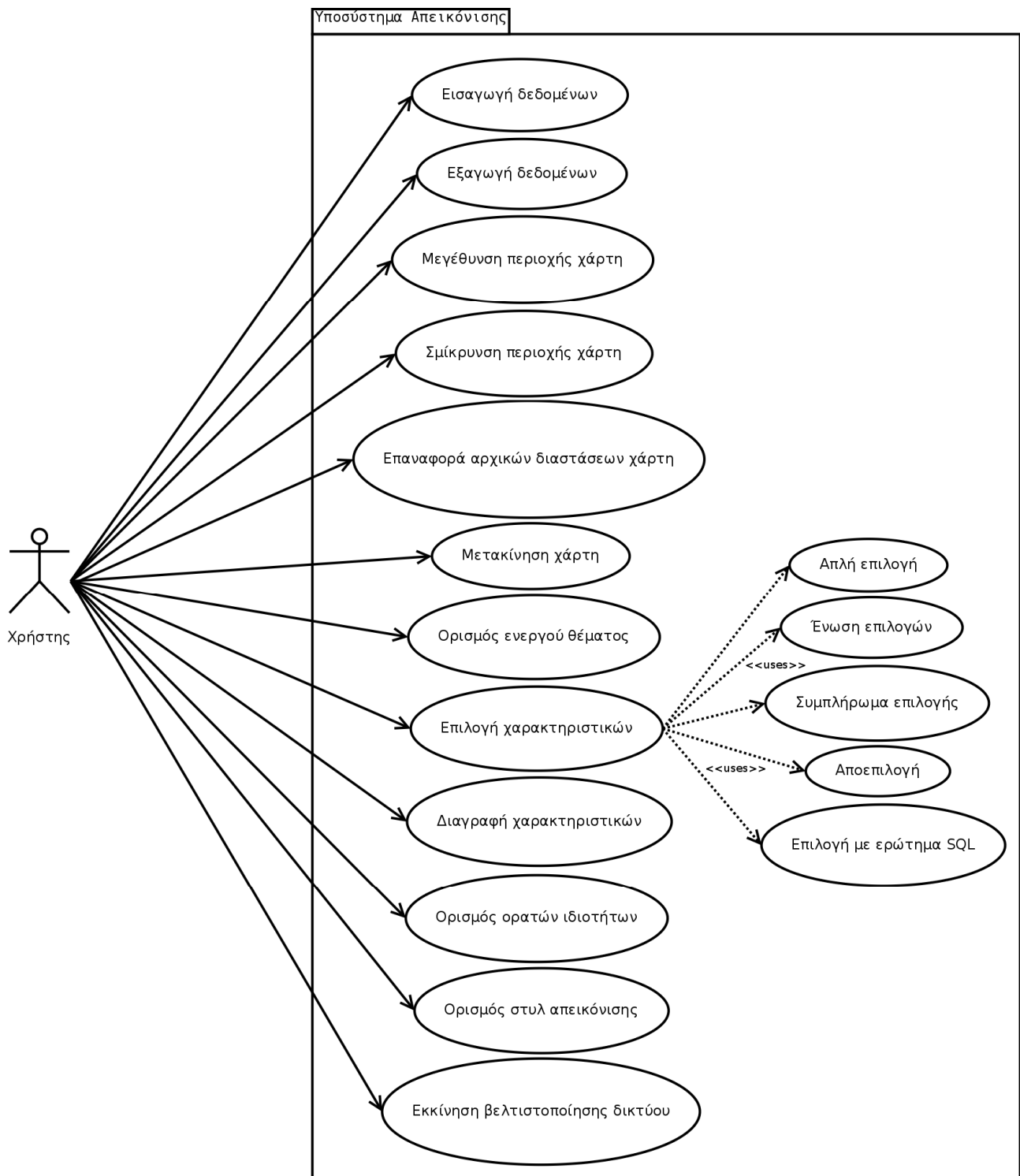
- *Οπτικοποίηση γεωγραφικών δεδομένων* : Υποτίθεται ότι ένας χρήστης διαθέτει πρόσβαση σε μία βάση δεδομένων που περιέχει πληροφορίες για κάποιες γεωγραφικές οντότητες. Ο χρήστης επιθυμεί να μπορεί να παρατηρήσει σε ένα δισδιάστατο χάρτη τις οντότητες αυτές και σε έναν ξεχωριστό πίνακα τις ιδιότητές τους.
- *Υπέρθωση γεωγραφικών θεμάτων* : Αν υπάρχει πρόσβαση σε πληροφορίες για δύο η περισσότερες διαφορετικές κλάσεις οντοτήτων, τότε θα πρέπει η εφαρμογή να είναι σε θέση να απεικονίσει ταυτόχρονα περισσότερα του ενός γεωγραφικά θέματα, δημιουργώντας διαφορετικές μορφές χαρτών για την ίδια περιοχή. Για παράδειγμα, αν υπάρχουν πληροφορίες για το οδικό δίκτυο και για το πολεοδομικό σχέδιο μίας πόλης, τότε τα δύο θέματα θα πρέπει να μπορούν να συνδυαστούν για να σχηματίσουν μια πιο σύνθετη απεικόνιση της πόλης.
- *Παρακολούθηση των εισηγμένων γεωγραφικών θεμάτων* : Ο χρήστης θα πρέπει να μπορεί να

γνωρίζει τα γεωγραφικά θέματα που έχουν μέχρι στιγμής εισαχθεί στην εφαρμογή.

- *Εισαγωγή νέων δεδομένων* : Είναι αναγκαίο ο χρήστης να μπορεί να εισάγει δεδομένα από κάποια πηγή. Στην εφαρμογή μας, η πηγή είναι κάποιος πίνακας μιας βάσης δεδομένων Postgre με την κατάλληλη επέκταση για υποστήριξη συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών PostGIS.
 - *Εξαγωγή και αποθήκευση γεωγραφικών θεμάτων* : Θα πρέπει να δίνεται η δυνατότητα τα αποτελέσματα των ενεργειών του χρήστη πάνω σε κάποιο χάρτη να μπορούν να αποθηκευτούν για πιθανή μελλοντική χρήση. Στην παρούσα εφαρμογή τα γεωγραφικά θέματα που συνιστούν ένα χάρτη, μπορούν να αποθηκευτούν με τη μορφή πινάκων μιας σχεσιακής βάσης δεδομένων Postgre.
 - *Λειτουργίες πλοήγησης μέσα στον χάρτη* : Η όψη του χάρτη που παρέχεται στον χρήστη ανά πάσα στιγμή μπορεί να μην τον εξυπηρετεί απόλυτα. Είναι ανάγκη να υπάρχουν λειτουργίες που θα του επιτρέπουν :
 - *Μεγέθυνση (zoom in) περιοχής του χάρτη.*
 - *Σμίκρυνση (zoom out) περιοχής του χάρτη.*
 - *Επαναφορά (reset) του χάρτη στις αρχικές του διαστάσεις.*
 - *Μετακίνηση (pan) του χάρτη.*
7. *Επιλογή ενεργού γεωγραφικού θέματος* : Τα χαρακτηριστικά που εμφανίζονται σε ένα χάρτη μπορεί να είναι διαφορετικής φύσης και να ανήκουν σε διαφορετικά γεωγραφικά θέματα που έχουν υπερτεθεί. Προκειμένου να γίνεται σαφές σε ποιο γεωγραφικό θέμα επιθυμεί να ενεργήσει ο χρήστης, πρέπει να υπάρχει δυνατότητα επιλογής του τρέχοντος ενεργού θέματος.
8. *Επιλογή στοιχείων του χάρτη* : Θα πρέπει ο χρήστης να μπορεί να επιλέξει γεωγραφικά χαρακτηριστικά που απεικονίζονται στον χάρτη, προκειμένου να γίνει κάποια απαραίτητη ενέργεια μόνο σε αυτά. Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται αυτή η επιλογή μπορεί να είναι απλός ή πιο σύνθετος :
 - *Απλή επιλογή* : Κάθε νέα επιλογή είναι ανεξάρτητη των προηγούμενων.
 - *Ένωση επιλογών* : Επιλέγεται η ένωση των συνόλων χαρακτηριστικών που επιλέχθηκαν τώρα και αυτών που ήταν ήδη επιλεγμένα.
 - *Αποεπιλογή χαρακτηριστικών* : Τα χαρακτηριστικά που επιλέγονται αφαιρούνται από την ήδη υπάρχουσα επιλογή.
 - *Συμπλήρωμα επιλογής* : Επιλέγονται μόνο όσα χαρακτηριστικά του ενεργού θέματος δεν ήταν επιλεγμένα προηγουμένως.
 - *Επιλογή με βάση κριτήρια ιδιοτήτων χαρακτηριστικών* : Τα χαρακτηριστικά που επιλέγονται είναι αυτά που οι ιδιότητές τους ικανοποιούν ένα σύνολο κριτηρίων

ορισμένων από το χρήστη. Τα κριτήρια αυτά μπορούν να εισαχθούν με τη μορφή κάποιου ερωτήματος, παρόμοιου με τα ερωτήματα της γλώσσας SQL.

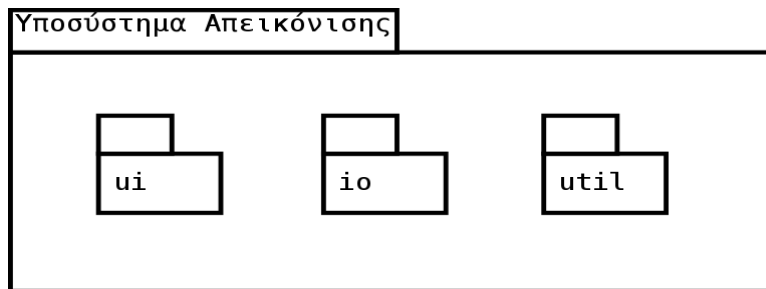
9. *Διαγραφή επιλεγμένων χαρακτηριστικών* : Προκειμένου να δημιουργήσει μια όψη του χάρτη που να αναπαριστά καλύτερα τα δεδομένα του, ο χρήστη μπορεί να θέλει να διαγράψει κάποια χαρακτηριστικά που δεν τον απασχολούν.
10. *Επιλογή συνόλου απεικονιζόμενων ιδιοτήτων του ενεργού θέματος* : Κάθε γεωγραφικό θέμα απαρτίζεται από μία συλλογή χαρακτηριστικών που το καθένα περιέχει τη γεωμετρική του πληροφορία και ορισμένες ιδιότητες που το χαρακτηρίζουν. Η γεωμετρία απεικονίζεται με τη μορφή χάρτη, ενώ οι ιδιότητες παρουσιάζονται σε έναν ξεχωριστό πίνακα. Ο χρήστης θα πρέπει να μπορεί να επιλέξει ποιές από τις διαθέσιμες πληροφορίες για κάθε χαρακτηριστικό του ενεργού θέματος επιθυμεί να μπορεί να παρακολουθεί στον πίνακα.
11. *Παραμετροποίηση απεικόνισης γεωγραφικών θεμάτων* : Ο τρόπος με τον οποίο παριστάνεται κάθε θέμα (χρώμα, μέγεθος χαρακτηριστικών) είναι ανάγκη για λόγους σαφέστερης απεικόνισης να μπορεί να παραμετροποιηθεί.
12. *Εναρξη διαδικασίας ελαχιστοποίησης κόστους δικτύου* : Αφού ο χρήστης επιλέξει ένα σύνολο χαρακτηριστικών/κόμβων, θα πρέπει να είναι σε θέση να εκκινήσει τη διαδικασία εύρεσης ενός δικτύου με αυτούς τους κόμβους, το οποίο να έχει ελάχιστο κόστος κατασκευής.



Σχήμα 3.1.1 – Διάγραμμα Περιπτώσεων Χρήσης για το υποσύστημα απεικόνισης γεωγραφικών δεδομένων.

3.2 Δομικά συστατικά του υποσυστήματος απεικόνισης.

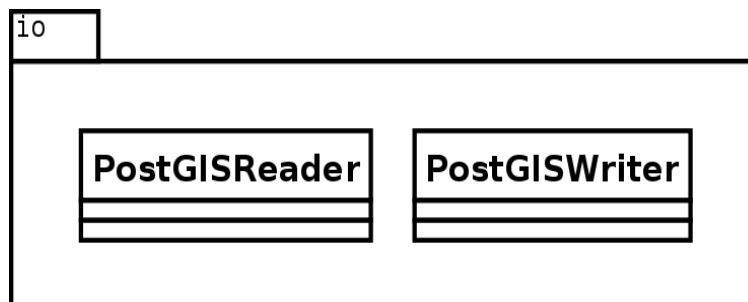
Όπως φαίνεται και στο διάγραμμα που ακολουθεί, το υποσύστημα απεικόνισης αποτελείται από τρία κύρια δομικά στοιχεία : τη συνιστώσα εισόδου/εξόδου δεδομένων (πακέτο *io*), τη συνιστώσα διαχείρισης γραφικής διεπαφής χρήστη (πακέτο *ui*) και τη συνιστώσα διαχείρισης διαδικαστικών λειτουργιών (πακέτο *util*). Στη συνέχεια αναφερόμαστε αναλυτικότερα σε καθένα από τα συστατικά αυτά και στην επιμέρους δομή τους.



Σχήμα 3.2.1 – Δομική όψη του υποσυστήματος απεικόνισης.

3.2.1 Συνιστώσα εισόδου και εξόδου δεδομένων.

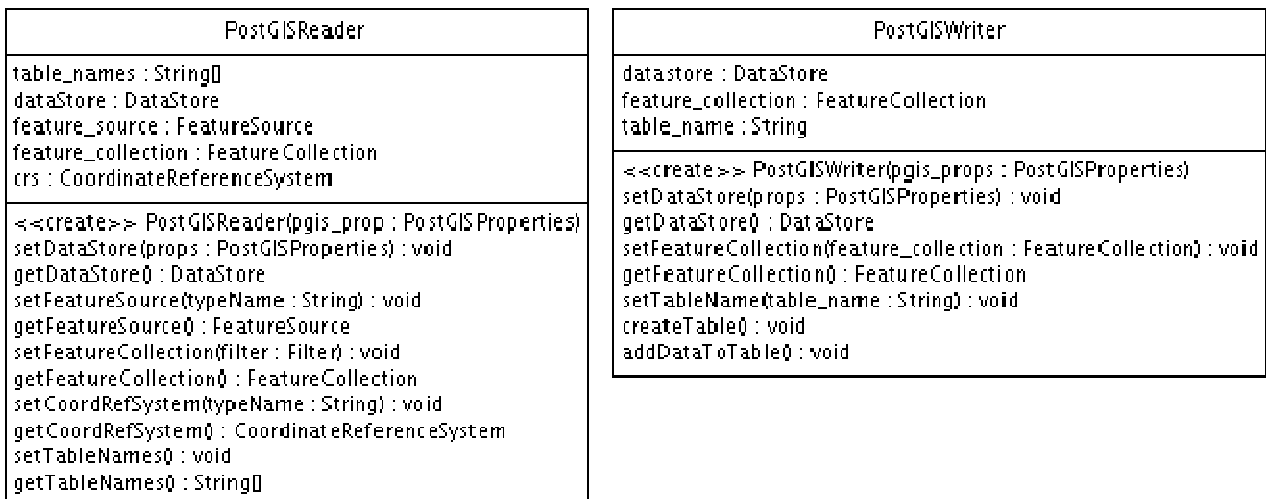
Το υποσύστημα αυτό διαχειρίζεται τη δημιουργία συνδέσεων με μία βάση δεδομένων και την ανάκληση ή αποθήκευση δεδομένων από και προς αυτή, προσφέροντας στα υπόλοιπα συστατικά του συστήματος ένα διαφανή τρόπο για να επιτύχουν τη συγκεκριμένη λειτουργικότητα χωρίς να γνωρίζουν λεπτομέρειες σχετικά με τον τρόπο υλοποίησής της. Προς το παρόν, υπάρχει δυνατότητα για τη σύνδεση μόνο με βάσεις δεδομένων Postgre που έχουν την κατάλληλη επέκταση για διαχείριση γεωγραφικών δεδομένων (PostGIS), όμως η προσθήκη υποστήριξης για άλλα συστήματα είναι απλή διαδικασία.



Σχήμα 3.2.1.1 – Δομική όψη της συνιστώσας εισόδου/εξόδου δεδομένων.

Όπως φαίνεται παραπάνω, στο πακέτο *ui* περιλαμβάνονται δύο κλάσεις, οι :

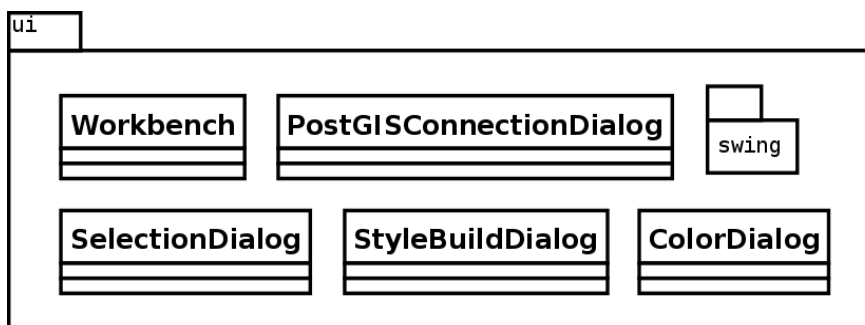
1. *PostGISReader* : Αναλαμβάνει τη διαδικασία ανάγνωσης δεδομένων από τη βάση και εισαγωγής τους στο σύστημα προκειμένου να μπορέσουν να απεικονιστούν ή να υποστούν επεξεργασία.
2. *PostGISWriter* : Αναλαμβάνει τις διαδικασίες διαγραφής και δημιουργίας νέων πινάκων στη βάση και την αποθήκευση δεδομένων που υπάρχουν στο σύστημα σε κάποιον πίνακα της βάσης.



Σχήμα 3.2.1.2 – Οι κλάσεις *PostGISReader* και *PostGISWriter*.

3.2.2 Συνιστώσα διαχείρισης γραφικής διεπαφής χρήστη.

Το συγκεκριμένο συστατικό ασχολείται με τη διαχείριση της γραφικής διεπαφής χρήστη, δηλαδή την παρουσίαση κατάλληλων παραθύρων και διαλόγων για τις διάφορες λειτουργίες τις οποίες μπορεί να εκτελέσει ο χρήστης.



Σχήμα 3.2.2.1 – Δομική όψη της συνιστώσας διαχείρισης γραφικής διεπαφής χρήστη.

Οι κλάσεις που απαρτίζουν το πακέτο ui είναι οι εξής :

1. *Workbench* : Παρέχει την κεντρική διεπαφή με τον χρήστη, από όπου αυτός μπορεί να διαχειριστεί το χάρτη και να ξεκινήσει οποιαδήποτε λειτουργία.
2. *PostGISConnectionDialog* : Παρέχει ένα παράθυρο διαλόγου, από το οποίο μπορεί ο χρήστης να εισάγει τις ιδιότητες της βάσης δεδομένων στην οποία επιθυμεί να συνδεθεί η εφαρμογή. Οι ιδιότητες που μπορούν να καθοριστούν είναι η διεύθυνση (*hostname*) της βάσης, η θύρα (*port*) στην οποία ακούει ο εξυπηρετητής, το όνομα χρήστη (*username*), ο κωδικός χρήστη (*password*) και το όνομα της βάσης δεδομένων (*database name/identifier*).
3. *SelectionDialog* : Παρέχει στον χρήστη έναν τρόπο για να μπορεί να επιλέξει ένα υποσύνολο κάποιων υπάρχοντων πιθανών επιλογών. Χρησιμοποιείται για την επιλογή των πινάκων/θεμάτων των οποίων πρέπει να γίνει εισαγωγή στον χάρτη και για την επιλογή των ιδιοτήτων εκείνων ενός γεωγραφικού θέματος, των οποίων απαιτείται η προβολή στον πίνακα ιδιοτήτων της εφαρμογής.
4. *StyleBuildDialog* : Παρέχει ένα παράθυρο διαλόγου, μέσα από το οποίο ο χρήστης μπορεί να ορίσει ποικίλα είδη στυλ για κάθε διαφορετικό θέμα το οποίο υπάρχει ανά πάσα στιγμή στον χάρτη.
5. *ColorDialog* : Μέσα από τον διάλογο αυτό, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει ένα χρώμα και μία αριθμητική τιμή η οποία συμβολίζει το μέγεθος διαφορετικών σε κάθε περίπτωση οντοτήτων. Χρησιμοποιείται σαν βοηθητικός διάλογος από το *StyleBuildDialog*.

Workbench	PostGISConnectionDialog
<pre> serialVersionUID : long panel_north : JPanel panel_south : JPanel panel_query : JPanel split_pane : JSplitPane split_pane_interior : JSplitPane menu_bar : JMenuBar menu_file : JMenu menu_file_postgis_new : JMenuItem menu_file_postgis_in : JMenuItem menu_file_postgis_out : JMenuItem menu_file_exit : JMenuItem menu_edit : JMenu menu_edit_cut : JMenuItem menu_edit_invert : JMenuItem menu_layers : JMenu menu_layers_attributes : JMenuItem menu_layers_styles : JMenuItem menu_operations : JMenu menu_operations_pse_distance : JMenuItem tab : JTabbedPane scroll_tree : JScrollPane toolbar_map : JToolBar selectable_layers : JComboBox selection_mode : JComboBox selectable_layer_attributes : JButton selectable_layer_styles : JButton attr_table : JTable scroll_attr_table : JScrollPane filter_label : JLabel filter_text : JTextField filter_ok : JButton psw_manager : ParticleSwarmManager context_tree : JXMapContextTree map_pane : JMapPane2 map_manager : MapManager </pre>	<pre> OK_SELECTED : int CANCEL_SELECTED : int jPanel1 : JPanel jTextField_Database : JTextField jLabel_Database : JLabel jPasswordField1 : JPasswordField jLabel_Password : JLabel jTextField_Username : JTextField jLabel_Username : JLabel jTextField_Port : JTextField jLabel_Port : JLabel jTextField_Hostname : JTextField jButton_Cancel : JButton jButton_OK : JButton jLabel_Hostname : JLabel pgis_properties : PostGISProperties </pre>
<pre> <<create>> Workbench() initGUI() : void updateGUI() : void actionPerformed(evt : ActionEvent) : void main(args : String[]) : void run() : void </pre>	<pre> <<create>> PostGISConnectionDialog(frame : JFrame) initGUI() : void actionPerformed(evt : ActionEvent) : void setProperty() : void getProperty() : PostGISProperties </pre>
	<pre> SelectionDialog </pre>
	<pre> serialVersionUID : long panel_move : JPanel panel_ok : JPanel left_list : JList right_list : JList left_model : DefaultListModel right_model : DefaultListModel left_scroll : JScrollPane right_scroll : JScrollPane l2r_button : JButton r2l_button : JButton ok_button : JButton cancel_button : JButton selection : String[] </pre>
	<pre> <<create>> SelectionDialog(frame : JFrame, input : String[]) initGUI(input : String[]) : void actionPerformed(evt : ActionEvent) : void setSelection(selection : String[]) : void getSelection() : String[] </pre>
<pre> StyleBuildDialog </pre>	
<pre> panel_center : JPanel panel_center_query : JPanel panel_center_query_buttons : JPanel panel_south : JPanel info : JLabel query_list : JList query_list_model : DefaultListModel query_list_pane : JScrollPane query_colorbox : JTextField query_builder : JTextField query_add : JButton query_delete : JButton ok : JButton cancel : JButton query_string : String[] query_color : Color[] query_sizes : String[] query_color_buffer : Map query_sizes_buffer : Map </pre>	
<pre> <<create>> StyleBuildDialog(frame : JFrame) initGUI() : void getQueryString() : String[] getQueryColor() : Color[] getQuerySizes() : String[] actionPerformed(evt : ActionEvent) : void valueChanged(evt : ListSelectionEvent) : void </pre>	
	<pre> ColorDialog </pre>
	<pre> size_panel : JPanel button_panel : JPanel color_chooser : JColorChooser ok : JButton cancel : JButton size_label : JLabel size : JTextField selected_color : Color selected_size : String </pre>
	<pre> <<create>> ColorDialog() initGUI() : void setSelectedColor(input : Color) : void getSelectedColor() : Color setSelectedSize(input : String) : void getSelectedSize() : String actionPerformed(evt : ActionEvent) : void </pre>

Σχήμα 3.2.2.2 – Αναλυτική μορφή των κλάσεων που περιέχονται στο πακέτο ui.

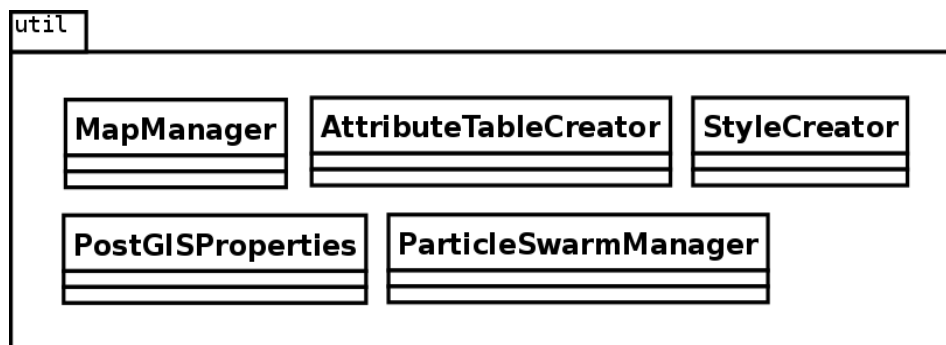
Θα πρέπει να σημειωθεί ακόμη, ότι η συνιστώσα *ui* περιλαμβάνει και το πακέτο *ui.swing* το οποίο αποτελείται από την κλάση *JmapPane2*. Η *JmapPane2* επεκτείνει τη λειτουργικότητα του γραφικού συστατικού για το περιβάλλον *Swing* της *Java* που προσφέρει η βιβλιοθήκη *Geotools*. Το συγκεκριμένο γραφικό συστατικό συνίσταται στην κλάση *org.geotools.gui.swing.JMapPane*, η οποία δυστυχώς δεν αποτελεί ακόμη μία ολοκληρωμένη και σταθερή λύση για το πρόβλημα της απεικόνισης γεωγραφικών θεμάτων και γι αυτό το λόγο δημιουργήθηκε η *JmapPane2* η οποία επιλύει κάποια προβλήματα και υλοποιεί συγκεκριμένη λειτουργικότητα που χρειάζεται στην εφαρμογή.

JMapPane2
<pre> map_layer_keys : Map select_styles : Map attr_table_columns : Map attr_table_columns_selected : Map attr_creator : AttributeTableCreator attr_scroll_pane : JScrollPane attr_table : JTable previous_selection : FeatureCollection NORMAL_SELECTION : int UNION_SELECTION : int EXCLUSION_SELECTION : int selection_mode : int </pre>
<pre> <<create >> JMapPane2() selectionChanged(e : SelectionChangedEvent) : void setSelectionFromQuery(query : String) : void setSelectionStyle() : void setSelectStyles(layer_name : String, style : Style) : void getSelectStyles(layer_name : String) : Style removeSelectStyles(layer_name : String) : void setAttrScrollPane(attr_scroll_pane : JScrollPane) : void getAttrScrollPane() : JScrollPane setMapLayerKey(layer_name : String, map_layer : MapLayer) : void removeMapLayerKey(layer_name : String) : void getMapLayerKey(layer_name : String) : MapLayer getMapLayerKeys() : Map setAttrTableColumns(table_name : String, columns : String[]) : void removeAttrTableColumns(table_name : String) : void getAttrTableColumns(table_name : String) : String[] removeAttrTableColumnsSelected(table_name : String) : void setAttrTableColumnsSelected(table_name : String, columns : String[]) : void getAttrTableColumnsSelected(table_name : String) : String[] setSelectionMode(mode : int) : void getSelectionMode() : int setPreviousSelection(previous : FeatureCollection) : void getPreviousCollection() : FeatureCollection renewSelectionLayer(new_layer : MapLayer, new_selection_style : Style) : void computeCompositeSelection() : void </pre>

Σχήμα 3.2.2.3 – Κλάση *ui.swing.JmapPane2*.

3.2.3 Συνιστώσα διαχείρισης διαδικαστικών λειτουργιών.

Αυτή η οντότητα αναλαμβάνει την επιτέλεση όλων εκείνων των λειτουργιών που περιλαμβάνουν την τροποποίηση και διαχείριση του εμφανιζόμενου χάρτη, τη δημιουργία στυλ για τα γεωγραφικά θέματα, την ανανέωση του πίνακα ιδιοτήτων των χαρακτηριστικών και τη διαχείριση της διασύνδεσης του υποσυστήματος απεικόνισης με το υποσύστημα βελτιστοποίησης κόστους δικτύων.



Σχήμα 3.2.3.1 – Δομική όψη της συνιστώσας διαχείρισης διαδικαστικών λειτουργιών.

Οι κλάσεις που περιλαμβάνονται στο πακέτο util είναι αναλυτικά οι εξής :

1. *MapManager* : Η συγκεκριμένη κλάση υλοποιεί όλες τις λειτουργίες που μπορεί ο χρήστης να εκτελέσει πάνω στον χάρτη και προσφέρει έναν τρόπο στις υπόλοιπες κλάσεις να εκτελούν αυτές τις λειτουργίες χωρίς να γνωρίζουν λεπτομέρειες για την εσωτερική δομή και λειτουργία της κλάσης JmapPane2.
2. *AttributeTableCreator* : Κάθε φορά που χαρακτηριστικά του χάρτη επιλέγονται, οι ιδιότητές τους εμφανίζονται στον πίνακα ιδιοτήτων της εφαρμογής. Η παρούσα κλάση αναλαμβάνει τη δημιουργία αυτού του πίνακα και την ανανέωσή του κάθε φορά που η επιλογή χαρακτηριστικών μεταβάλλεται.
3. *StyleCreator* : Τα αντικείμενα της κλάσης StyleCreator αναλαμβάνουν την διαδικασία δημιουργίας στυλ για κάποιο γεωγραφικό θέμα, ανάλογα με τον τύπο του (σημειακό, γραμμικό, πολυγωνικό) και ορισμένες προτιμήσεις που έχει εισάγει ο χρήστης μέσω της StyleBuildDialog.
4. *PostGISProperties* : Αποτελεί μια δομή στην οποία αποθηκεύονται προσωρινά οι ιδιότητες της σύνδεσης με τη βάση δεδομένων που εισάγει ο χρήστης στο διάλογο PostGISConnectionDialog.
5. *ParticleSwarmManager* : Η κλάση ParticleSwarmManager ασχολείται με ένα σύνολο

λειτουργιών που αφορούν τη διασύνδεση του υποσυστήματος απεικόνισης με το υποσύστημα εύρεσης δικτύων ελάχιστου κόστους. Για παράδειγμα, μετατρέπει τα δεδομένα εισόδου που προσφέρει το σύστημα απεικόνισης σε μορφή που να είναι αποδεκτή από το σύστημα βελτιστοποίησης και αντιστρόφως, ορίζει κλάσεις προβλημάτων βελτιστοποίησης και εκκινεί τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

MapManager
<pre> map_pane : JMapPane2 imported_layer_names : HashSet duplicate_layer_names : Map pgis_reader : PostGISReader table_names : String[] feature_source : FeatureSource[] feature_collection : FeatureCollection[] crs : CoordinateReferenceSystem[] previous_crs : CoordinateReferenceSystem style : Style[] selection_style : Style[] style_point : Style style_polygon : Style style_line : Style selection_style_point : Style selection_style_polygon : Style selection_style_line : Style </pre>
<pre> <<create>> MapManager(map_pane : JMapPane2) setPostGISReader(pgis_reader : PostGISReader) : void updateMap(table_names : String[]) : void validateCRS() : boolean createMap() : void updateOldMap() : void createLayer(map_context : MapContext,fc : FeatureCollection,style : Style,selection_style : Style) : void createLayer(fc : FeatureCollection) : void destroyMap() : void getCurrentSelection() : FeatureCollection setAttributeTablePane(table_pane : JScrollPane) : void getImportedLayerNames() : HashSet getMapContext() : MapContext setActiveLayer(active_layer_name : String) : void getActiveLayer() : MapLayer getAttributeTableColumns(layer_name : String) : String[] setAttributeTableColumnsSelected(string : String,selection : String[]) : void setActiveLayerStyle(queryString : String[],queryColor : Color[],querySizes : String[]) : void setMapSelectionFromQuery(query : String) : void setNormalSelectionMode() : void setUnionSelectionMode() : void setExclusionSelectionMode() : void clearSelection() : void deleteSelectedFeatures() : void invertSelectedFeatures() : void initStyles() : void </pre>

Σχήμα 3.2.3.2 – Κλάση MapManager.

AttributeTableCreator
features : FeatureCollection columns : String[] attribute_table : JTable model : DefaultTableModel record_count : int
<pre> <<create>> AttributeTableCreator(features : FeatureCollection, selection_attributes : String[]) setFeatures(fc : FeatureCollection) : void getFeatures() : FeatureCollection setColumns(columns : String[]) : void getColumns() : String[] setAttributeTable() : void getAttributeTable() : JTable getRecordCount() : int setRecordCount(record_count : int) : void incRecordCount() : void resetRecordCount() : void </pre>

Σχήμα 3.2.3.3 – Κλάση AttributeTableCreator.

StyleCreator
rules : Rule[] rule_filters : Filter[] rule_colors : Color[] rule_sizes : String[] point_mark_props : Object[] line_stroke_props : Object[] polygon_props : Object[] layer_type : String sb : StyleBuilder
<pre> <<create>> StyleCreator(layer_type : String, rule_queries : String[], rule_colors : Color[], rule_sizes : String[]) createRules() : void setPointMarkProps(mark_type : String, borderColor : Color, borderWidth : double) : void setLineStyleProps(color : Color, width_offset : double) : void setPolygonProps(opacity : double, color : Color, width_offset : double) : void getPointMarkProps() : Object[] getLineStyleProps() : Object[] getPolygonProps() : Object[] createStyle() : Style </pre>

Σχήμα 3.2.3.4 – Κλάση StyleCreator.

PostGISProperties
hostname : String port : String username : String password : String database_name : String
<pre> setHostname(value : String) : void setPort(value : String) : void setUsername(value : String) : void setPassword(value : String) : void setDatabaseName(value : String) : void getHostname() : String getPort() : String getUsername() : String getPassword() : String getDatabaseName() : String </pre>

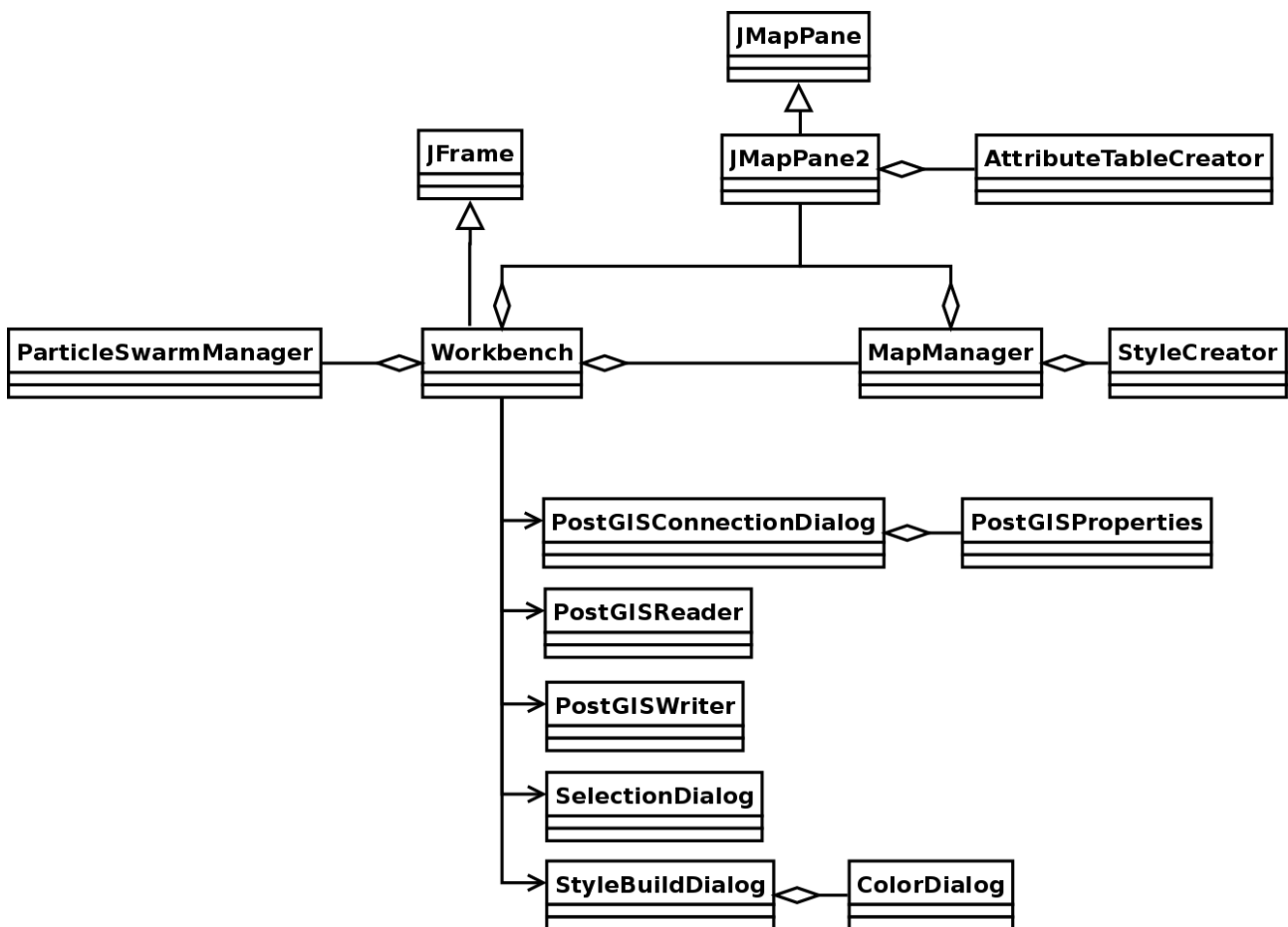
Σχήμα 3.2.3.5 – Κλάση PostGISProperties.

ParticleSwarmManager
<u>MinDistanceProblem</u> : int <u>MinCostProblem</u> : int problem_input_fc : FeatureCollection problem_input : double[] feature_map : Map <u>StateIdle</u> : int <u>StateOptimizing</u> : int state : int next_swarm : boolean params : SwarmParameters problem : Problem swarm : SwarmInterface
<<create>> ParticleSwarmManager(input : FeatureCollection) setProblemInput(featur_collection : FeatureCollection) : void getProblemSolution(select_attr : String[],layer_name : String) : FeatureCollection setPSOParameters(pop_size : int,phi1 : double,phi2 : double,swarm_type : int,hood_size : int,max_velocity : double) : void setProblem(problem_type : int) : void setSwarm() : void optimize(generations : int) : void getState() : int

Σχήμα 3.2.3.6 – Κλάση ParticleSwarmManager.

3.3 Στατικό μοντέλο του υποσυστήματος απεικόνισης.

Ενώ μέχρι τώρα περιγράφηκαν οι πιθανές περιπτώσεις χρήσεις του συστήματος και οι διάφορες συνιστώσες του, ακόμη δεν γνωρίζουμε τίποτα για τον τρόπο που συνδέονται τα συστατικά αυτών των συνιστωσών μεταξύ τους ώστε να επιτύχουν την εκτέλεση σύνθετων λειτουργιών. Το παρακάτω διάγραμμα περιγράφει παραστατικά τις σχέσεις των διαφόρων κλάσεων με στατικό όμως τρόπο, δηλαδή δεν φανερώνει τη σειρά των ενεργειών που συμβαίνουν κατά την εκτέλεση της εφαρμογής.



Σχήμα 3.3.1 – Διάγραμμα κλάσεων του υποσυστήματος απεικόνισης.

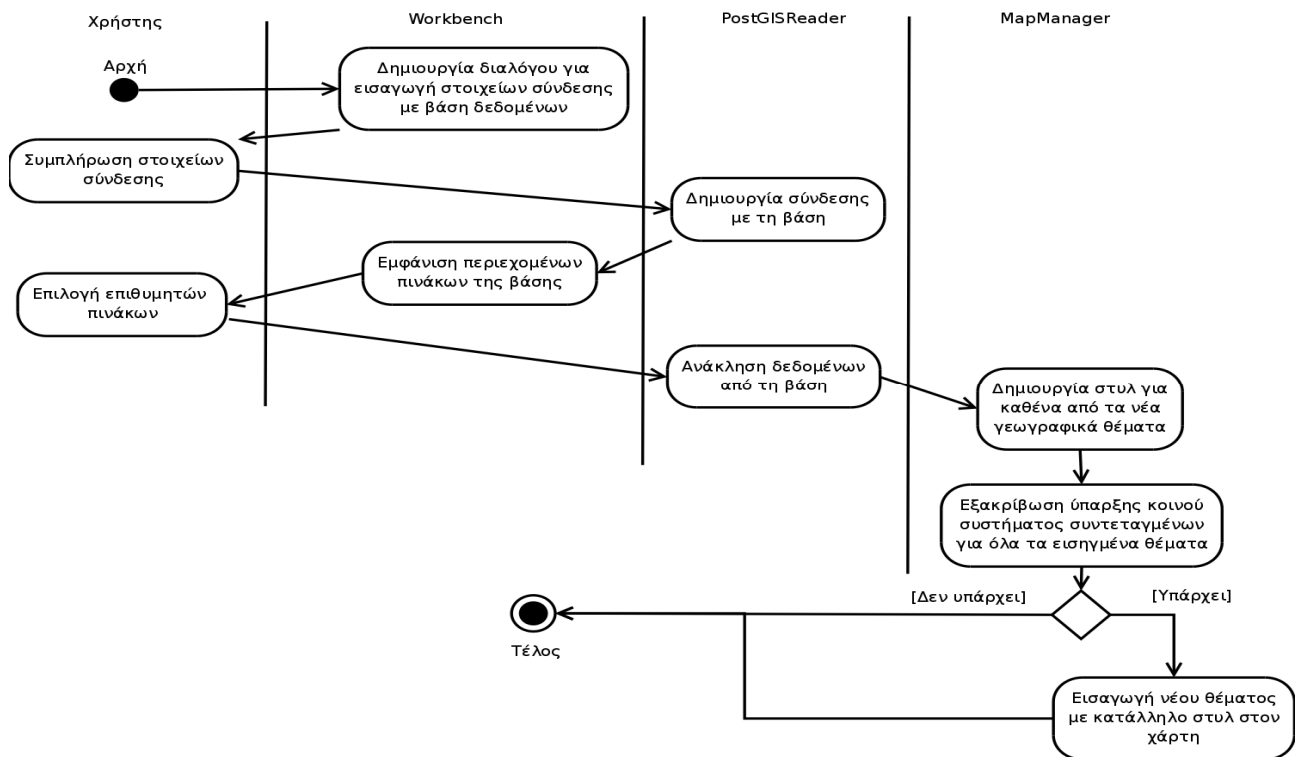
Όπως παρατηρούμε, το βασικό σημείο αναφοράς για τις περισσότερες κλάσεις που ανήκουν στο σύστημα αποτελεί η κλάση Workbench, δηλαδή η κύρια οθόνη της εφαρμογής. Αυτό είναι λογικό και αναμενόμενο, αφού η συγκεκριμένη κλάση έχει ως κύριο μέλημα την παρουσίαση μιας γραφικής διεπαφής στον χρήστη, μέσω της οποίας θα μπορεί να προχωρήσει σε οποιαδήποτε ενέργεια αυτός θελήσει. Έτσι, πέρα από την απλή παρουσίαση της διεπαφής, διαχειρίζεται και οντότητες που με τη σειρά τους της προσφέρουν διαφανείς μεθόδους χειρισμού των λειτουργιών

χαμηλού επιπέδου, όπως για παράδειγμα της δημιουργίας στυλ, της εισαγωγής στοιχείων από τη βάση δεδομένων και της διαγραφής χαρακτηριστικών που υπάρχουν στο χάρτη.

3.4 Δυναμικό μοντέλο του συστήματος απεικόνισης.

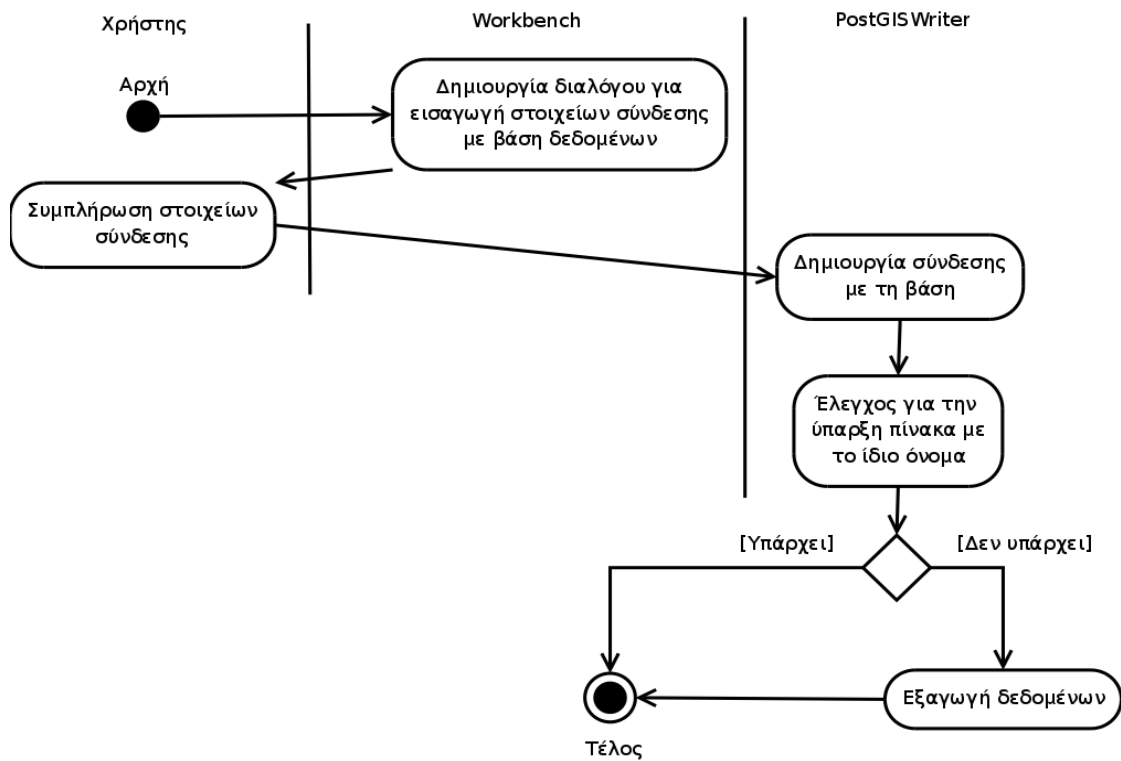
Για κάθε περίπτωση χρήσης από αυτές που περιγράφηκαν στην παράγραφο 3.1, υπάρχει μία σειρά ενεργειών που συμβαίνουν προκειμένου να επιτελεστεί η ανάλογη λειτουργία. Εδώ θα επιχειρήσουμε να μοντελοποιήσουμε τον τρόπο με τον οποίο εκτελούνται όσες εργασίες από αυτές παρουσιάζουν κάποιο ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι λειτουργίες πλοήγησης μέσα στον χάρτη έχουν ήδη υλοποιηθεί στη βιβλιοθήκη Geotools και γι αυτό το λόγο δεν θα παραθέσουμε διαγράμματα γι αυτές.

1. *Εισαγωγή δεδομένων* : Προκειμένου να εισάγει νέα δεδομένα προς απεικόνιση στην εφαρμογή, ο χρήστης πρέπει να ορίσει τις ιδιότητες σύνδεσης με κάποια υπάρχουσα βάση δεδομένων και τους πίνακες της βάσης που επιθυμεί να εισάγει. Στη συνέχεια, η εφαρμογή αναλαμβάνει να επιτελέσει τις λειτουργίες που απαιτούνται για να εισαχθούν με κατάλληλο τρόπο τα νέα δεδομένα στον χάρτη.



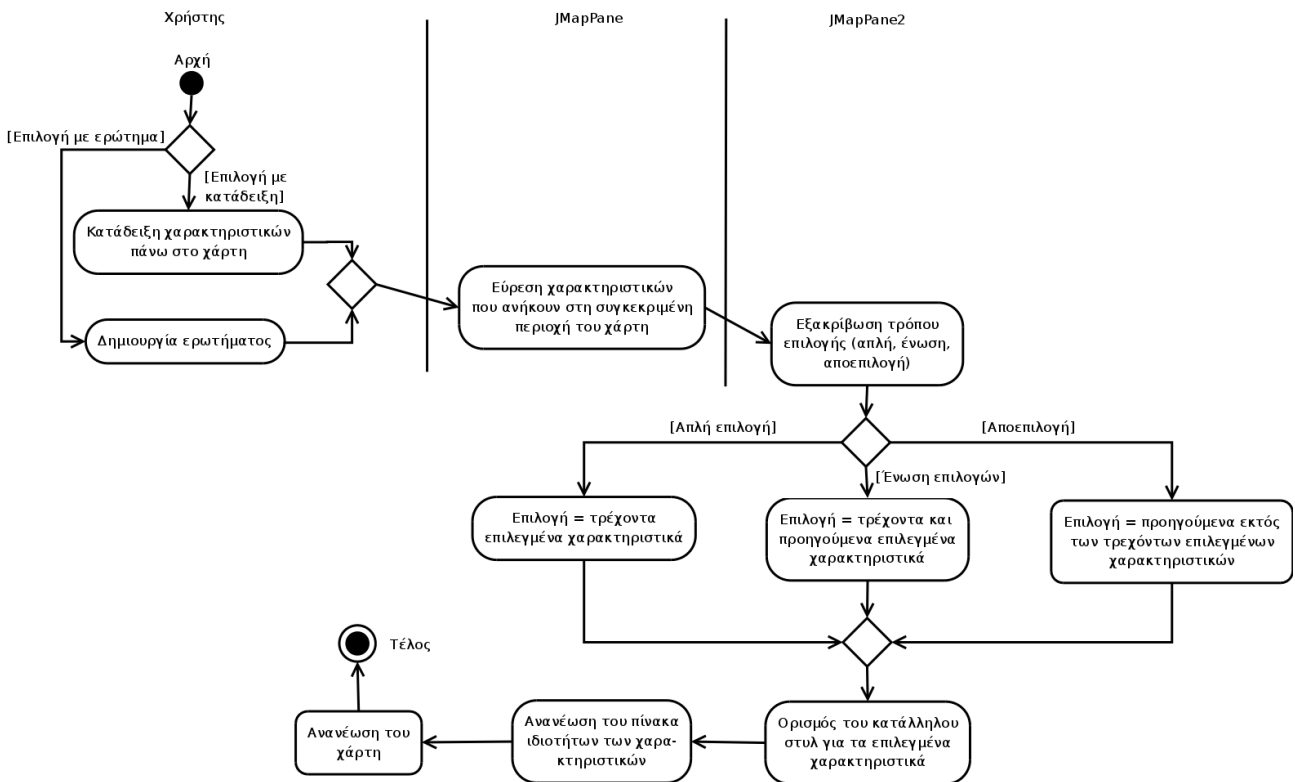
Σχήμα 3.3.1 – Διάγραμμα δραστηριοτήτων για την περίπτωση εισαγωγής νέων δεδομένων προς απεικόνιση.

2. *Εξαγωγή δεδομένων* : Προκειμένου να εξαγάγει τα δεδομένα του ενεργού θέματος σε μία βάση δεδομένων, ο χρήστης θα πρέπει να εισάγει και πάλι της ιδιότητες σύνδεσης με τη συγκεκριμένη βάση. Η εφαρμογή έχει την ευθύνη να ελέγξει αν υπάρχει ήδη κάποιος πίνακας με το ίδιο όνομα που επιθυμεί να χρησιμοποιήσει ο χρήστης και να ενεργήσει κατάλληλα.



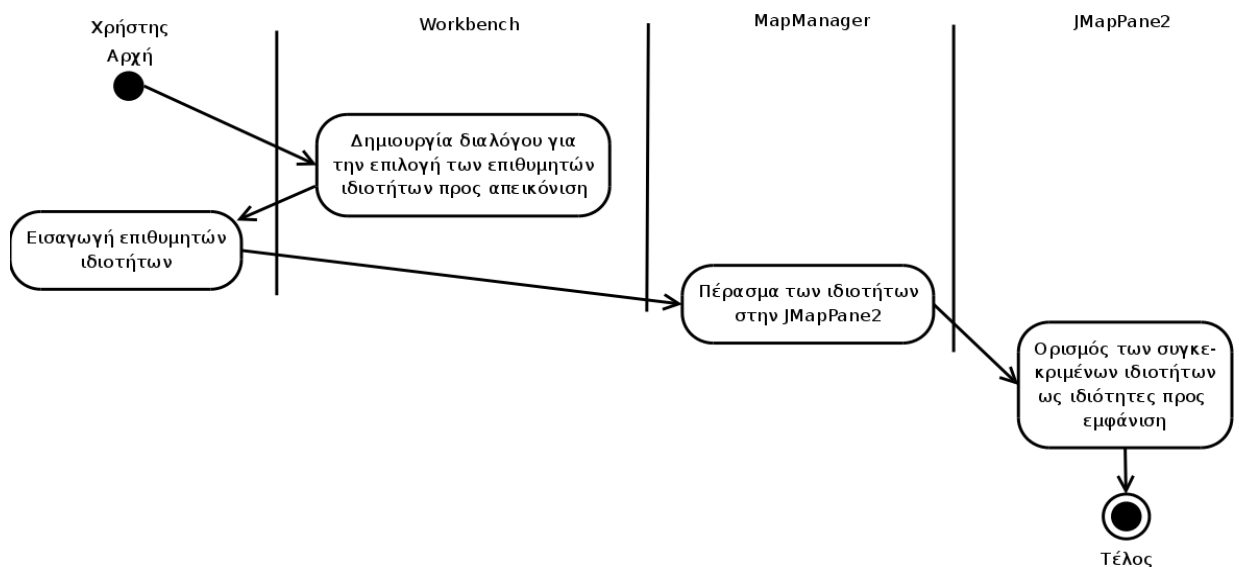
Σχήμα 3.3.2 – Διάγραμμα δραστηριοτήτων για την περίπτωση εξαγωγής δεδομένων από την εφαρμογή προς κάποια βάση δεδομένων.

3. *Επιλογή χαρακτηριστικών , σύνθετη επιλογή, αποεπιλογή και επιλογή με ερώτημα* : Η διαδικασία με την οποία συμβαίνουν αυτές οι λειτουργίες είναι παρόμοια και φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



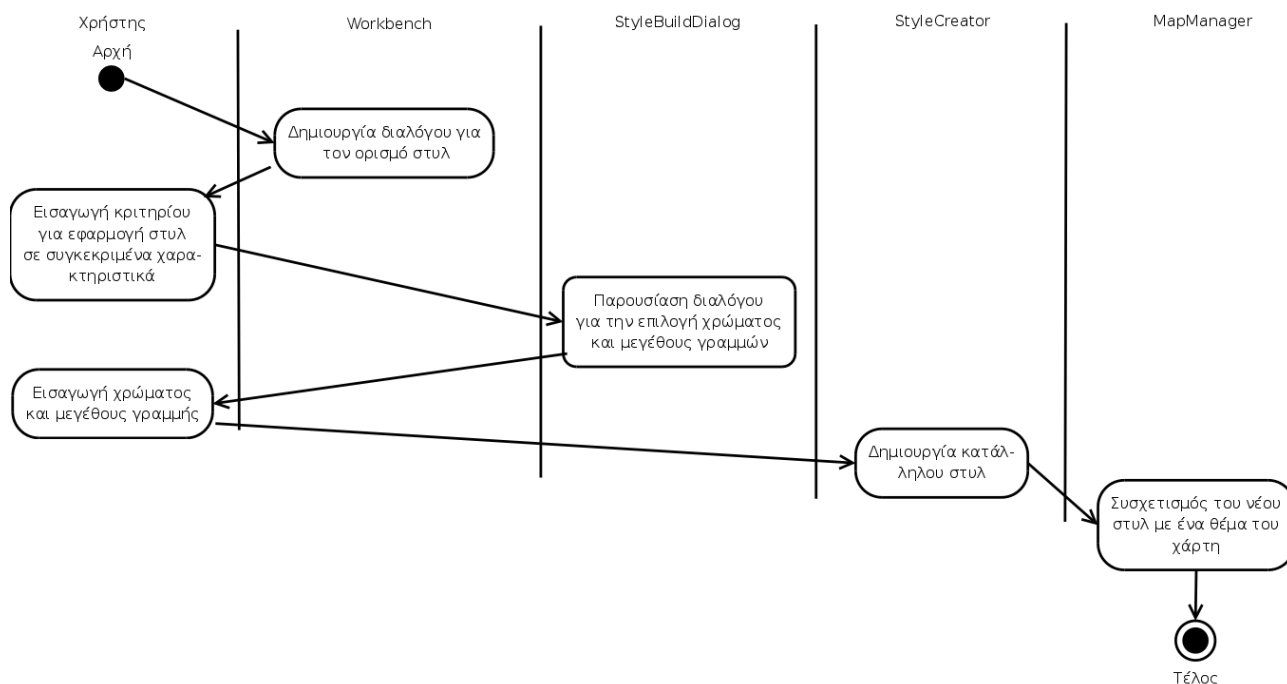
Σχήμα 3.3.3 – Διάγραμμα δραστηριοτήτων για λειτουργίες επιλογής/αποεπιλογής χαρακτηριστικών του χάρτη.

4. *Επιλογή συνόλου απεικονιζόμενων ιδιοτήτων του ενεργού θέματος* : Για να επιτευχθεί αυτή η λειτουργία, πρέπει ο χρήστης να επιλέξει ποιές ιδιότητες του ενεργού θέματος επιθυμεί να προβάλλονται στον πίνακα ιδιοτήτων και το σύστημα να αναλάβει την κατάλληλη απεικόνιση. Η διαδικασία φαίνεται παρακάτω.



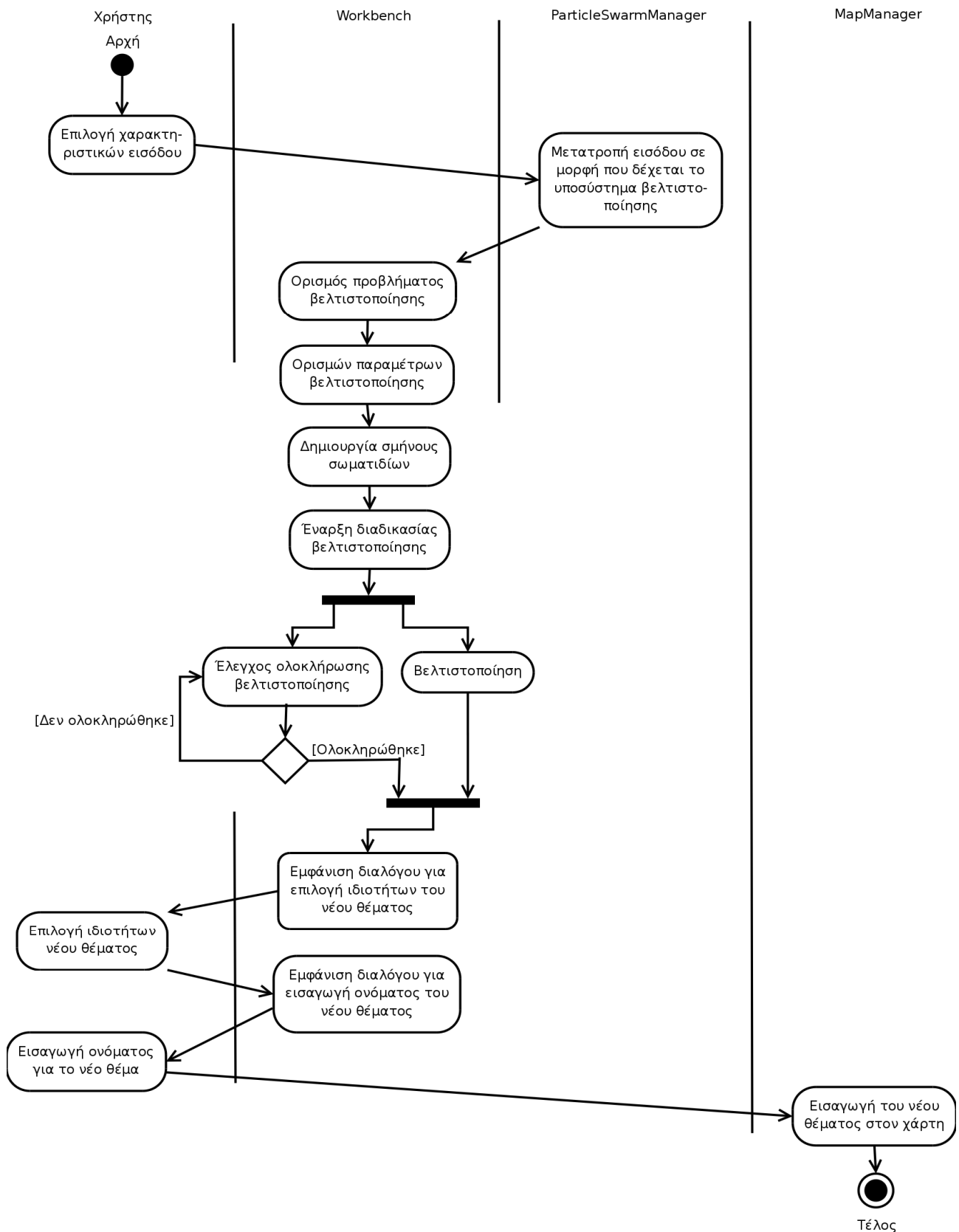
Σχήμα 3.3.4 – Διάγραμμα δραστηριοτήτων για την επιλογή απεικονιζόμενων ιδιοτήτων του ενεργού θέματος.

5. *Παραμετροποίηση απεικόνισης γεωγραφικών θεμάτων* : Πρόκειται για τη δημιουργία στυλ για κάθε θέμα, κατά την οποία ο χρήστης οφείλει να ορίσει τα χαρακτηριστικά του στυλ, όπως το χρώμα και το πάχος των γραμμών. Η εφαρμογή αναλαμβάνει την αξιοποίηση αυτών των δεδομένων για να παραμετροποιήσει τον τρόπο με τον οποίο εμφανίζονται τα διάφορα χαρακτηριστικά στον χάρτη.



Σχήμα 3.3.5 – Διάγραμμα δραστηριοτήτων για την παραμετροποίηση της απεικόνισης γεωγραφικών θεμάτων.

6. *Έλεγχος διαδικασίας ελαχιστοποίησης κόστους δικτύου* : Η λειτουργικότητα αυτή δεν αφορά άμεσα το υποσύστημα απεικόνισης, αλλά προσφέρει μια διασύνδεση με το υποσύστημα βελτιστοποίησης κόστους δικτύων και γι αυτό πρέπει να γίνει σαφής ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται.



Σχήμα 3.3.6 – Διάγραμμα δραστηριοτήτων για τον έλεγχο της διαδικασίας ελαχιστοποίησης κόστους δικτύου.

4. Διερεύνηση της χρήσης της μεθόδου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO) για την εύρεση λύσης στο πρόβλημα του δικτύου ελάχιστου κόστους.

Έχοντας περιγράψει πλέον το σύστημα με το οποίο θα οπτικοποιηθούν όσα δεδομένα έχουμε ήδη στη διάθεσή μας, αλλά και όσα δεδομένα θα προκύψουν ως αποτέλεσμα της επίλυσης του προβλήματος που σύντομα περιγράφηκε στο εισαγωγικό κεφάλαιο, μπορούμε πλέον να διερευνήσουμε τη μέθοδο με την οποία θα επιλύσουμε ακριβώς αυτό το πρόβλημα. Στις επόμενες παραγράφους, θα περιγράψουμε ,αυτή τη φορά όσο το δυνατόν πιο αναλυτικά και σαφώς, το πρόβλημα προς επίλυση, θα σχολιάσουμε σύντομα διάφορες μεθόδους επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης και θα αναφερθούμε εκτενέστερα στη μέθοδο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization), η οποία επιλέχτηκε για χρήση στην παρούσα εργασία. Θα διαπιστώσουμε ότι για να εφαρμοστεί η συγκεκριμένη μέθοδος σωστά σε προβλήματα που περιλαμβάνουν δίκτυα, ή γενικότερα γράφους, πρέπει να ληφθούν υπόψη διάφοροι παράγοντες που έχουν να κάνουν με την εύρεση κατάλληλων αναπαραστάσεων των γράφων σε διανυσματική μορφή και την πιθανή τροποποίηση τελεστών της μεθόδου. Πέρα από αυτό, θα διερευνήσουμε την περίπτωση που η μέθοδος συγκλίνει σε κάποιο τοπικό βέλτιστο και θα αναπτύξουμε μία παραλλαγή που θα μας επιτρέψει να καθυστερήσουμε τη σύγκλιση και να δώσουμε την ευκαιρία να διερευνηθούν περισσότερα τοπικά βέλτιστα πριν η μέθοδος συγκλίνει σε κάποιο από αυτά. Ακόμη θα διαπιστώσουμε ότι η κλίμακα του προβλήματος επηρεάζει σημαντικά την αξιοπιστία της μεθόδου, αλλά και τον χρόνο εκτέλεσης των υλοποιήσεών της και θα προσπαθήσουμε να βρούμε τρόπους για να μετριάσουμε αυτή την αρνητική επίδραση. Κλείνοντας, θα παρουσιάσουμε μία τροποποιημένη εκδοχή του αλγορίθμου Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων που θα συνδυάζει όλες τις προηγούμενες ιδέες για να καταλήξει σε μια καλύτερη λύση.

4.1 Προβλήματα βελτιστοποίησης.

Πριν ασχοληθούμε με τη μέθοδο Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια σύντομη αναφορά στα χαρακτηριστικά των προβλημάτων βελτιστοποίησης και στις διάφορες μεθόδους που έχουν αναπτυχθεί για την επίλυσή τους.

Ο όρος *βελτιστοποίηση* αναφέρεται στη μελέτη προβλημάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση ή τη μεγιστοποίηση μία πραγματικής συνάρτησης, επιλέγοντας συστηματικά τιμές για ένα σύνολο μεταβλητών από κάποιο επιτρεπτό πεδίο ορισμού. Κάθε τεχνική επίλυσης ενός προβλήματος

βελτιστοποίησης αποτελείται από τρία συστατικά. Μία αντικειμενική συνάρτηση f , η οποία αντιπροσωπεύει την ποσότητα που πρέπει να βελτιστοποιηθεί (μεγιστοποιηθεί ή ελαχιστοποιηθεί), ένα σύνολο μεταβλητών ελέγχου οι οποίες επηρεάζουν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης και ένα σύνολο περιορισμών για τις τιμές που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές αυτές.

Ο στόχος μιας μεθόδου βελτιστοποίησης είναι αποδίδοντας τιμές στις μεταβλητές, από το επιτρεπτό πεδίο τιμών της κάθε μεταβλητής ελέγχου, να βελτιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτηση. Για να επιτύχει το στόχο αυτό, η μέθοδος ψάχνει για μια λύση σε ένα χώρο υποψήφιων λύσεων S και η λύση που βρίσκει ανήκει στον χώρο εφικτών λύσεων F , αν πρόκειται για πρόβλημα με περιορισμούς που πρέπει να ισχύουν στις λύσεις. Οι λύσεις στις οποίες καταλήγουν οι μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να διακριθούν σε ολικά βέλτιστα, σε ισχυρά τοπικά βέλτιστα και σε ασθενή τοπικά βέλτιστα, τα οποία σε περίπτωση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης ορίζονται ως εξής :

- *Ολικό ελάχιστο* : Η λύση $x' \in F$ είναι ολικό ελάχιστο μιας αντικειμενικής συνάρτησης f αν ισχύει :

$$f(x') < f(x), \forall x \in F, \text{ όπου } F \subseteq S$$

- *Ισχυρό τοπικό ελάχιστο* : Η λύση $x' \in N \subseteq F$ είναι ισχυρό τοπικό ελάχιστο της f αν :

$$f(x') < f(x), \forall x \in N$$

όπου $N \subseteq F$ είναι ένα σύνολο εφικτών λύσεων στη γειτονιά του x' .

- *Ασθενές τοπικό ελάχιστο* : Η λύση $x' \in N \subseteq F$ είναι ασθενές τοπικό ελάχιστο της f αν :

$$f(x') \leq f(x), \forall x \in N$$

όπου $N \subseteq F$ είναι ένα σύνολο εφικτών λύσεων στη γειτονιά του x' .

Ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης ψάχνει για μία βέλτιστη λύση μετασχηματίζοντας συνεχώς μία τρέχουσα υποψήφια λύση σε μία νέα, πιθανώς καλύτερη λύση. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να διαιρεθούν σε δύο κύριες κλάσεις σύμφωνα με τον τύπο λύσης που εντοπίζουν. Οι αλγόριθμοι *τοπικής αναζήτησης* χρησιμοποιούν μόνο τοπικές πληροφορίες του χώρου αναζήτησης που περιβάλλει την τρέχουσα λύση για να ανακαλύψουν μία νέα λύση και κατ' επέκταση εντοπίζουν τοπικά βέλτιστα. Οι αλγόριθμοι *ολικής αναζήτησης* χρησιμοποιούν περισσότερες

πληροφορίες από τον χώρο αναζήτησης για να καταλήξουν στο ολικό βέλτιστο. Μία δεύτερη κατηγοριοποίηση των συγκεκριμένων αλγορίθμων είναι σε ντετερμινιστικούς και σε στοχαστικούς, ανάλογα με το αν υπάρχει τυχαιότητα στον τρόπο με τον οποίο μία τρέχουσα λύση μετασχηματίζεται σε μία άλλη, πιθανώς καλύτερη λύση. Τέλος, με βάση τα χαρακτηριστικά του προβλήματος προς επίλυση, οι μέθοδοι βελτιστοποίησης μπορούν να χωριστούν σε περισσότερες κατηγορίες, όπως για παράδειγμα σε μεθόδους χωρίς περιορισμούς, που χρησιμοποιούνται για να βελτιστοποιήσουν προβλήματα χωρίς περιορισμούς, με περιορισμούς για αντίστοιχα προβλήματα, μεθόδους βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών στόχων για προβλήματα όπου πρέπει να βελτιστοποιηθούν περισσότερα του ενός μεγέθη, μεθόδους πολλαπλών λύσεων με τη δυνατότητα να εντοπίζουν περισσότερες της μίας λύσης και δυναμικές μεθόδους με τη δυνατότητα να εντοπίζουν βέλτιστα που συνεχώς αλλάζουν.

Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι επαναληπτικοί, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την ύπαρξη κριτηρίων τερματισμού της διαδικασίας αναζήτησης. Ο απλούστερος τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι να οριστεί ένας συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων που πρέπει να εκτελεστεί πριν η εκτέλεση τερματιστεί. Ωστόσο, μπορούμε να ορίσουμε συνθήκες τερματισμού οι οποίες λαμβάνουν υπόψη την πρόοδο μιας μεθόδου σε κάθε της επανάληψη και αν αυτή η πρόοδος δεν κρίνεται ικανοποιητική τότε η αναζήτηση τερματίζεται. Οι συνθήκες αυτές διαφέρουν από μέθοδο σε μέθοδο.

4.2 Βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών στόχων.

Στην πραγματικότητα, πολλά προβλήματα απαιτούν την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση περισσότερων του ενός μεγεθών, ενώ ορισμένοι από τους αντικειμενικούς στόχους είναι δυνατό να έρχονται σε σύγκρουση μεταξύ τους. Ένα απλό παράδειγμα είναι η εύρεση ενός βέλτιστου δικτύου από την άποψη του κόστους κατασκευής, όπου μας ενδιαφέρει όχι μόνο η ελαχιστοποίηση του συνολικού μήκους των διαδρομών, αλλά και άλλοι παράγοντες όπως η ελαχιστοποίηση των συνολικών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης. Είναι σαφές ότι η ταυτόχρονη βελτιστοποίηση και των δύο αυτών παραγόντων δεν είναι δυνατή, αφού η υποδομή με το ελάχιστο μήκος διαδρομών είναι αυτή που αντιστοιχεί στο ελάχιστο συνδετικό δέντρο, ενώ η υποδομή με τις ελάχιστες συνολικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης είναι ένας αστέρας με κέντρο τον κόμβο που έχει τις υψηλότερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Υπάρχει η ανάγκη να επιτευχθεί μια ισορροπία ανάμεσα στη βελτιστοποίηση των δύο παραγόντων, προκειμένου να καταλήξουμε στο δίκτυο με το ελάχιστο συνολικό κόστος. Την ανάγκη αυτή έρχεται να καλύψει η βελτιστοποίηση πολλαπλών αντικειμενικών στόχων (*Multi-objective Optimization, MOO*) που περιγράφεται σε αυτή την παράγραφο.

Έστω $S \subseteq \mathbb{R}^{n_x}$ ο χώρος αναζήτησης με n_x διαστάσεις και $F \subseteq S$ ο χώρος εφικτών λύσεων. Αν δεν υπάρχουν περιορισμοί για τις λύσεις, τότε ο χώρος εφικτών λύσεων είναι ο ίδιος με τον χώρο αναζήτησης. Επίσης, το διάνυσμα $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in S$ αναφέρεται ως *διάνυσμα αποφάσεων* και μία αντικειμενική συνάρτηση ορίζεται ως $f_k : \mathbb{R}^{n_x} \rightarrow \mathbb{R}$. Το διάνυσμα $f(x) = (f_1(x), f_2(x), \dots, f_{n_k}(x)) \in O \subseteq \mathbb{R}^{n_k}$ ονομάζεται *αντικειμενικό διάνυσμα* και περιέχει τις αποτιμήσεις n_k αντικειμενικών συναρτήσεων, ενώ το σύνολο O αναφέρεται ως *αντικειμενικός χώρος*. Τέλος, ο χώρος αναζήτησης S ονομάζεται και *χώρος αποφάσεων*. Έχοντας υπόψη τα παραπάνω, μπορούμε να ορίσουμε ένα multi-objective πρόβλημα ως εξής :

Ελαχιστοποίησε την $f(x)$ που υπόκειται στους περιορισμούς :

$$\begin{aligned} g_m(x) &\leq 0, \quad m = 1, 2, \dots, n_g \\ h_m(x) &= 0, \quad m = n_g + 1, \dots, n_g + n_h \\ x &\in [x_{min}, x_{max}]^{n_x} \end{aligned}$$

Στην παραπάνω σχέση, τα g_m και h_m είναι αντίστοιχα οι περιορισμοί ανισότητας και ισότητας, ενώ το διάνυσμα x αναπαριστά τις οριακές συνθήκες. Οι λύσεις x^* ενός multi-objective προβλήματος βρίσκονται στον χώρο εφικτών λύσεων F .

Η σημασία του βέλτιστου πρέπει να οριστεί ξανά για τα multi-objective προβλήματα, μιας και είναι περισσότερο σύνθετη από τους ορισμούς των τοπικών και ολικών βέλτιστων που δόθηκαν προηγουμένως. Όπως έγινε ήδη φανερό, το κυρίως πρόβλημα είναι η παρουσία συγκρουόμενων παραγόντων και η απουσία καθολικού τρόπου χειρισμού των πολλαπλών αντικειμενικών συναρτήσεων προκειμένου να επιτευχθεί η επιθυμητή βελτιστοποίηση. Είναι δυνατό να μπορούμε να καταλήξουμε σε μία προτιμότερη λύση για ένα πρόβλημα μειώνοντας τις τιμές μερικών αντικειμενικών συναρτήσεων, αλλά ταυτόχρονα αυξάνοντας τις τιμές άλλων. Πρέπει να επιτευχθεί κάποια ισορροπία και αυτό γίνεται όταν κάποια λύση δεν μπορεί να βελτιώσει ένα οποιοδήποτε αντικειμενικό στόχο, χωρίς να επηρεάσει αρνητικά έναν ή περισσότερους άλλους. Μία τέτοια λύση ονομάζεται *μη-κυριαρχούμενη λύση (non-dominated solution)* και δεν είναι μοναδική. Ο στόχος της multi-objective βελτιστοποίησης δεν είναι να καταλήξει σε μία μοναδική λύση, αλλά να παράγει ένα σύνολο καλών συμβιβασμών, στο οποίο αναφερόμαστε ως *βέλτιστο σύνολο Pareto (Pareto-optimal set)*. Τα αντίστοιχα αντικειμενικά διανύσματα ονομάζονται *μέτωπο Pareto (Pareto front)*.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι ορισμοί σημαντικών εννοιών που αφορούν στη βελτιστοποίηση κατά Pareto.

- *Κυριαρχία (Domination)* : Ένα διάνυσμα αποφάσεων x_1 κυριαρχεί επί ενός διανύσματος αποφάσεων x_2 αν και μόνο αν
 - Σε όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις το x_1 δεν αποδίδει χειρότερη τιμή από αυτή που αποδίδει το x_2 . Δηλαδή : $f_k(x_1) \leq f_k(x_2)$, $\forall k = 1, \dots, n_k$
 - Το x_1 αποδίδει αυστηρά καλύτερη τιμή από αυτή που αποδίδει το x_2 σε τουλάχιστο μία αντικειμενική συνάρτηση. Δηλαδή : $\exists k = 1, \dots, n_k : f_k(x_1) < f_k(x_2)$
- *Ασθενής κυριαρχία (Weak domination)* : Ένα διάνυσμα αποφάσεων x_1 κυριαρχεί ασθενώς επί ενός διανύσματος αποφάσεων x_2 αν και μόνο αν
 - Σε όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις το x_1 δεν αποδίδει χειρότερη τιμή από αυτή που αποδίδει το x_2 . Δηλαδή : $f_k(x_1) \leq f_k(x_2)$, $\forall k = 1, \dots, n_k$
- *Βέλτιστο κατά Pareto (Pareto-optimal)* : Ένα διάνυσμα αποφάσεων $x' \in F$ είναι βέλτιστο κατά Pareto εάν δεν υπάρχει διάνυσμα αποφάσεων $x \neq x' \in F$ που να κυριαρχεί επί αυτού. Ένα αντικειμενικό διάνυσμα $f^*(x)$ είναι βέλτιστο-Pareto αν το x είναι βέλτιστο Pareto.
- *Σύνολο βέλτιστων κατά Pareto (Pareto-optimal set)* : Το σύνολο όλων των διανυσμάτων αποφάσεων που είναι βέλτιστα κατά Pareto αποτελεί το σύνολο βέλτιστων κατά Pareto, P' .
- *Μέτωπο βέλτιστων κατά Pareto (Pareto-optimal front)* : Δοσμένου του αντικειμενικού διανύσματος $f(x)$ και του συνόλου βέλτιστων κατά Pareto P' , το μέτωπο βέλτιστων κατά Pareto $PF' \subseteq O$ ορίζεται ως :

$$PF' = \{ f = (f_1(x'), f_2(x'), \dots, f_k(x')) : x' \in P' \}$$

Το μέτωπο-Pareto περιλαμβάνει όλα τα αντικειμενικά διανύσματα που αντιστοιχούν σε διανύσματα αποφάσεων επί των οποίων δεν κυριαρχούν άλλα διανύσματα αποφάσεων.

Πέρα από τη βελτιστοποίηση κατά Pareto, ένας απλούστερος τρόπος για την αποτίμηση της συνολικής αντικειμενικής συνάρτησης είναι με τη χρήση μιας *συνάρτησης βάρους*. Η συνάρτηση βάρους προκύπτει ως το άθροισμα των τιμών που αποδίδει μία λύση σε όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις των επιμέρους προβλημάτων, κατάλληλα σταθμισμένων σύμφωνα με τη βαραινουσα σημασία για τη βελτιστοποίηση καθενός από τα προβλήματα αυτά. Είναι :

$$f(x) = w_1 * f_1(x) + w_2 * f_2(x) + \dots + w_n * f_n(x)$$

$$\text{με } w_1, w_2, \dots, w_n > 0$$

$$\text{και } w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$$

Το μειονέκτημα της συγκεκριμένης μεθόδου είναι ότι πολλές φορές είναι δύσκολο να δοθούν στους συντελεστές βάρους καλές αντιπροσωπευτικές τιμές.

4.3 Μέθοδοι επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης.

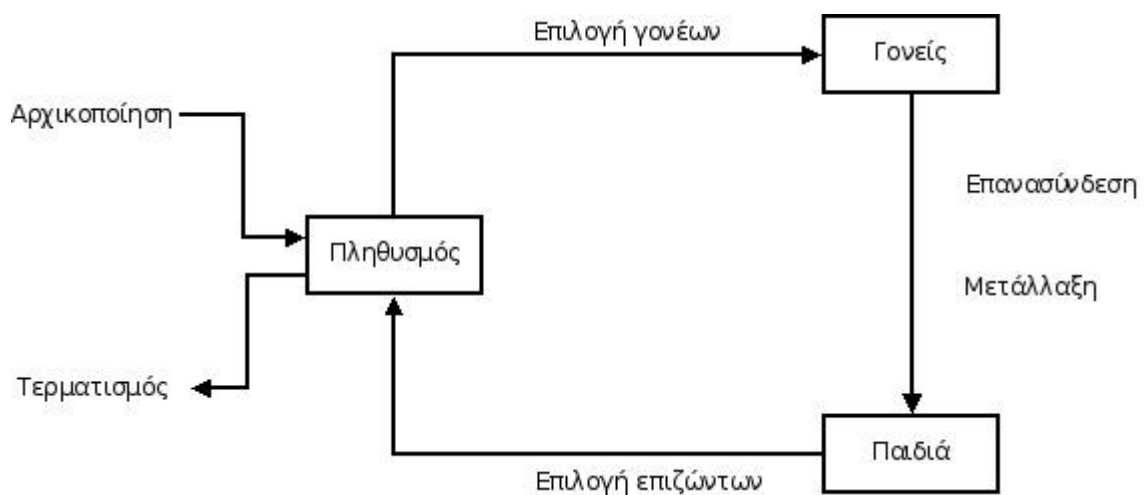
Εφόσον μία αντικειμενική συνάρτηση είναι διπλά παραγωγίσιμη, τότε είναι δυνατό να γίνει χρήση της κλίσης της (gradient) προκειμένου να βρεθούν οι τιμές των παραμέτρων που αποδίδουν σε αυτή τη βέλτιστη τιμή. Όμως, η ύπαρξη των παραγώγων δεν είναι πάντα εύκολο να διαπιστωθεί και για αυτό έχουν αναπτυχθεί ποικίλες μέθοδοι βελτιστοποίησης, οι περισσότερες εκ των οποίων βρίσκουν εφαρμογή σε συγκεκριμένα είδη προβλημάτων. Μερικές ευρέως χρησιμοποιούμενες τεχνικές είναι οι μέθοδοι Simplex, Quasi-Newton, Hill Climbing, Simulated Annealing, Tabu Search.

Συχνά, όταν αναφερόμαστε σε προβλήματα βελτιστοποίησης εννοούμε προβλήματα που ανήκουν στην κλάση NP για τα οποία δεν είναι γνωστές μέθοδοι που να μπορούν να τα επιλύσουν σε πολωνυμικό χρόνο. Το γεγονός αυτό έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη ενός μεγάλου αριθμού ευριστικών και στοχαστικών αλγορίθμων, οι οποίοι επιχειρούν να δώσουν όσο το δυνατό καλύτερες λύσεις στα προβλήματα αυτά μέσα σε λογικά χρονικά περιθώρια. Έμπνευση για τη δημιουργία αρκετών από τους αλγορίθμους αυτούς έχουν αποτελέσει “φυσικοί λύτες” προβλημάτων όπως ο ανθρώπινος εγκέφαλος, η διαδικασία της φυσικής εξέλιξης και οι κοινωνικές αλληλεπιδράσεις μεταξύ ατόμων. Στην παρούσα παράγραφο αναφερόμαστε γενικά σε κάποιες από τις πιο διαδεδομένες μεθόδους που χρησιμοποιούνται σήμερα.

Μία πρώτη σημαντική κατηγορία αλγορίθμων αυτού του είδους είναι οι *Εξελικτικοί Αλγόριθμοι*

(*Evolutionary Algorithms – EA*). Υπάρχουν αρκετές παραλλαγές των EA, οι οποίες βασίζονται όλες σε μία βασική ιδέα : Δοσμένου ενός πληθυσμού ατόμων μέσα σε ένα περιβάλλον με περιορισμένους πόρους, ο ανταγωνισμός για τους πόρους αυτούς προκαλεί μια διαδικασία φυσικής επιλογής και προσαρμογής (*επιβίωση του καταλληλότερου*). Η σημαντική έννοια της παραπάνω πρότασης περιγράφεται από τη λέξη *καταλληλότητα (fitness)*. Αν είναι γνωστή μία αντικειμενική συνάρτηση η οποία πρέπει να μεγιστοποιηθεί, τότε είναι δυνατή η δημιουργία ενός συνόλου τυχαίων υποψήφιων λύσεων και στη συνέχεια η τιμή που λαμβάνει η αντικειμενική συνάρτηση για καθεμία από τις λύσεις αυτές μπορεί να θεωρηθεί ως ένα αφηρημένο μέτρο καταλληλότητας της κάθε λύσης. Με βάση τις τιμές καταλληλότητας που προκύπτουν, ορισμένες από τις καταλληλότερες λύσεις επιλέγονται για να παράγουν την επόμενη γενιά λύσεων, μέσω *επανασυνδυασμού (recombination)* και πιθανής *μετάλλαξης (mutation)* τους.

Ο επανασυνδυασμός είναι ένας τελεστής που εφαρμόζεται σε δύο ή περισσότερες επιλεγμένες υποψήφιες λύσεις (*γονείς*) και παράγει μία ή περισσότερες νέες υποψήφιες λύσεις (*παιδιά*). Η μετάλλαξη είναι τελεστής που εφαρμόζεται μόνο σε μία λύση και παράγει μία νέα υποψήφια λύση. Αφού παραχθεί μία νέα γενιά λύσεων, τότε γίνεται αποτίμηση της αντικειμενικής συνάρτησης για καθεμία από αυτές και συναγωνίζονται εκ νέου μεταξύ τους, αλλά και με τις παλιές λύσεις για μια θέση στην αμέσως επόμενη γενιά. Η διαδικασία αυτή μπορεί να επαναληφθεί μέχρι να βρεθεί κάποια υποψήφια λύση με ικανοποιητική ποιότητα, αφού η συνδυασμένη εφαρμογή της ανανέωσης της ποικιλίας των λύσεων και της επιλογής των καταλληλότερων, γενικά οδηγεί σε καλύτερες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης σε επόμενες γενιές.



Σχήμα 4.3.1 – Διάγραμμα ροής της διαδικασίας που ακολουθεί ένα Εξελικτικός Αλγόριθμος.

Ωστόσο, για να υλοποιηθεί η συγκεκριμένη μέθοδος είναι ανάγκη πρώτα να οριστεί ένας αριθμός συστατικών, διαδικασιών και τελεστών :

- **Αναπαράσταση ατόμων** : Το πρώτο βήμα κατά τον ορισμό ενός ΕΑ είναι η σύνδεση του πραγματικού κόσμου με το πρόβλημα. Αντικείμενα στη φυσική τους μορφή (πχ ένα δίκτυο) που αποτελούν πιθανές λύσεις για το πραγματικό πρόβλημα ονομάζονται *φαινότυποι*, ενώ οι κωδικοποιημένες μορφές τους στα πλαίσια του ΕΑ προβλήματος (πχ ένα διάνυσμα που αναπαριστά ένα συγκεκριμένο δίκτυο) ονομάζονται *γονότυποι*.
- **Αντικειμενική Συνάρτηση** : Ο ρόλος της αντικειμενικής συνάρτησης είναι να αναπαραστήσει τις συνθήκες στις οποίες θα πρέπει να προσαρμοστεί ένας πληθυσμός ατόμων και αποτελεί τη βάση για τη διαδικασία της επιλογής, καθιστώντας δυνατή τη σταδιακή βελτίωση των υποψήφιων λύσεων – ατόμων.
- **Πληθυσμός** : Σε έναν πληθυσμό περιέχονται οι κωδικοποιημένες αναπαραστάσεις των πιθανών λύσεων. Ουσιαστικά αποτελεί ένα σύνολο γονοτύπων και είναι αυτός που σταδιακά προσαρμόζεται και όχι οι λύσεις που αποτελούν στατικά αντικείμενα από μόνες τους.
- **Μηχανισμός επιλογής γονέων** : Ο ρόλος του μηχανισμού επιλογής γονέων είναι η διάκριση μεταξύ των ατόμων με βάση την ποιότητα/καταλληλότητά τους και συγκεκριμένα η εύρεση εκείνων των ατόμων που θα πρέπει να ληφθούν ως γονείς για να παράγουν την επόμενη γενιά.
- **Τελεστές δημιουργίας ποικιλότητας** : Πρόκειται για τους τελεστές επανασυνδυασμού και μετάλλαξης που ορίζουν τους δύο τρόπους με τους οποίους είναι δυνατό να παραχθούν νέες λύσεις από προηγούμενες.
- **Μηχανισμός επιλογής επιζώντων** : Μέσω του μηχανισμού αυτού επιλέγονται τα άτομα που πρέπει να συμπεριληφθούν στη νέα γενιά, αφού η προηγούμενη γενιά αναπαραχθεί.

Οι *Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms – GA)* αποτελούν τον ευρύτερα γνωστό τύπο εξελικτικών αλγορίθμων. Δεν υπάρχει ένας και μοναδικός ΓΑ, αλλά δημιουργούμε τέτοιους αλγόριθμους χρησιμοποιώντας ένα σύνολο διαφορετικών τελεστών ανάλογα με το ποιοί ταιριάζουν περισσότερο σε κάθε πρόβλημα. Η αναπαράσταση των ατόμων γίνεται συνήθως με μια σειρά δυαδικών ψηφίων, όμως ανάλογα με το πρόβλημα μπορούν να υπάρξουν και αναπαραστάσεις με ακεραίους, πραγματικούς αριθμούς ή με συνδυασμούς αριθμών. Για κάθε είδος από αυτές τις τέσσερις πιθανές αναπαραστάσεις γονοτύπων υπάρχουν κατάλληλοι τελεστές μετάλλαξης και επανασυνδυασμού, ενώ υπάρχουν και δύο διαφορετικά μοντέλα πληθυσμών : το *μοντέλο γενιών (generational model)* στο οποίο η προηγούμενη γενιά αντικαθίσταται πλήρως από την επόμενη και το *μοντέλο σταθερής κατάστασης (steady-state model)*, στο οποίο η προηγούμενη γενιά αντικαθίσταται εν μέρει από την καινούργια. Η επιλογή των γονέων μπορεί να γίνει επίσης με

αρκετές διαφορετικές μεθόδους, με βάση την τιμή που δίνει κάθε άτομο-λύση στην αντικειμενική συνάρτηση. Τέλος η επιλογή των επιζώντων γίνεται είτε με βάση την ηλικία κάθε λύσης, ή με βάση την τιμή που αυτή δίνει στην αντικειμενική συνάρτηση. Η αναλυτική περιγραφή των μεθόδων που αναφέρθηκαν ξεφεύγει από τους σκοπούς της παρούσας εργασίας και αφού υπάρχει εκτενής βιβλιογραφία για αυτές θα αρκεστούμε σε αυτή την απλή αναφορά.

Πέρα από αλγόριθμους που βασίζονται στο μοντέλο της εξέλιξης, υπάρχουν και αλγόριθμοι που προσομοιώνουν την κοινωνική συμπεριφορά ζώων, όπως για παράδειγμα η Βελτιστοποίηση Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization - ACO). Αφετηρία για την ανάπτυξη αυτού του μοντέλου υπήρξε η απλή παρατήρηση ότι τα μυρμηγκία είναι ικανά να βρίσκουν το μονοπάτι που οδηγεί από τη φωλιά τους στην κοντινότερη πηγή τροφής, χωρίς να υπάρχει κάποιος κεντρικός μηχανισμός που να τα οδηγεί. Κάθε μυρμηγκι αρχικά περιπλανιέται τυχαία και όταν βρει μια πηγή τροφής επιστρέφει στη φωλιά αφήνοντας στο δρόμο ένα ίχνος φερομόνης. Αν κάποιο άλλο μυρμηγκι συναντήσει ένα τέτοιο ίχνος, το πιθανότερο είναι να τερματίσει την τυχαία πορεία του και να ακολουθήσει το συγκεκριμένο μονοπάτι καταλήγοντας κι αυτό στην πηγή τροφής. Ωστόσο, με την πάροδο του χρόνου η φερομόνη εξατμίζεται και το μονοπάτι χάνεται. Καταλαβαίνουμε ότι όσο πιο μακριά βρίσκεται μία πηγή τροφής από τη φωλιά, τόσο πιθανότερο είναι το μονοπάτι να χαθεί και να περιοριστεί ο χώρος αναζήτησης των μυρμηγκιών για τροφή στα ήδη υπάρχοντα και μικρότερα μονοπάτια, των οποίων το ίχνος φερομόνης ανανεώνεται συχνότερα. Τελικά, θα παραμείνει μόνο το μονοπάτι εκείνο που έχει την κοντινότερη απόσταση από τη φωλιά. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ένας παρόμοιος αλγόριθμος, υπό την έννοια ότι προσομοιώνει κι αυτός τη συμπεριφορά μιας ομάδας ζώων. Είναι η μέθοδος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων και περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

4.4 Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization – PSO).

Ο αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (θα αναφερόμαστε σε αυτόν με τον όρο ΒΣΣ στο εξής) προσομοιώνει τη συμπεριφορά ενός σμήνους πτηνών. Ας υποθέσουμε το παρακάτω σενάριο : ένα σμήνος πτηνών ψάχνει σε μια περιοχή με στόχο την εύρεση τροφής. Στην περιοχή υπάρχει μόνο μία πηγή τροφής και κανένα μέλος του σμήνους δεν γνωρίζει εξαρχής που αυτή βρίσκεται, όμως ανά πάσα στιγμή γνωρίζει την απόστασή του από αυτή. Ποιά θα ήταν η καλύτερη στρατηγική για να εντοπίσει το σμήνος την πηγή τροφής ; Μία διαισθητικά αποτελεσματική τακτική θα ήταν να ακολουθήσει όλο το σμήνος το πτηνό εκείνο που βρίσκεται στην κοντινότερη απόσταση από την πηγή. Αυτή ακριβώς την προσέγγιση ακολουθεί η μέθοδος ΒΣΣ, στην οποία ένα

“σωματίδιο” είναι αντίστοιχο του πτηνού-λύσης και κάθε τέτοιο σωματίδιο δίνει στην αντικειμενική συνάρτηση, της οποίας επιθυμούμε τη βελτιστοποίηση, μία συγκεκριμένη τιμή που εξαρτάται από την τρέχουσα θέση του.

Ένας αλγόριθμος PSO διατηρεί ένα σμήνος σωματιδίων, όπου κάθε σωματίδιο αναπαριστά μία δυνατή λύση. Κατά αναλογία με τα μοντέλα των γενετικών και εξελικτικών αλγορίθμων ένα “σμήνος” είναι το αντίστοιχο του “πληθυσμού” και ένα “σωματίδιο” είναι το αντίστοιχο του “ατόμου”. Τα σωματίδια κινούνται σε έναν πολυδιάστατο χώρο αναζήτησης, όπου η “θέση” κάθε σωματιδίου προσαρμόζεται ανάλογα με τις δικές του εμπειρίες και με τις εμπειρίες των γειτονικών του σωματιδίων. Αν υποθέσουμε ότι $x_i(t)$ είναι η θέση του σωματιδίου i τη χρονική στιγμή t και ότι το t συμβολίζει διακριτά βήματα στον χρόνο, τότε η τρέχουσα θέση του σωματιδίου αλλάζει προσθέτοντας σε αυτή μία ταχύτητα $v_i(t)$:

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1), x_i(0) \in (x_{min}, x_{max}) \quad (4.4.1)$$

Είναι το διάνυσμα αυτό της ταχύτητας που κατευθύνει τη διαδικασία της βελτιστοποίησης και στο οποίο αντικατοπτρίζεται τόσο η εμπειρική γνώση του σωματιδίου, όσο και η συλλογική γνώση των σωματιδίων που ανήκουν στη γειτονιά του. Η εμπειρική γνώση του σωματιδίου αναφέρεται συνήθως σαν *ατομική συνιστώσα (cognitive component)* και είναι ανάλογη της τρέχουσας απόστασής του από την προσωπική του βέλτιστη θέση, ενώ η συλλογική γνώση της γειτονιάς αναφέρεται ως *κοινωνική συνιστώσα (social cognitive)* και είναι ανάλογη της απόστασης της τρέχουσας θέσης του σωματιδίου από την βέλτιστη θέση του βέλτιστου μέχρι στιγμής σωματιδίου που ανήκει στη γειτονιά.

Αρχικά αναπτύχθηκαν δύο αλγόριθμοι PSO οι οποίοι διέφεραν στο μέγεθος της γειτονιάς. Ο αλγόριθμος *PSO ολικού βέλτιστου (gbest PSO)* θεωρεί ότι γειτονιά του κάθε σωματιδίου είναι ολόκληρο το σμήνος, ενώ ο αλγόριθμος *PSO τοπικού βέλτιστου (lbest PSO)* θεωρεί σαν γειτονιά ενός σωματιδίου ένα υποσύνολο του σμήνους. Μεγάλος αριθμός παραλλαγών τις μεθόδου PSO έχει αναπτυχθεί για διαφορετικά είδη προβλημάτων, ωστόσο εδώ θα εξετάσουμε τη μέθοδο gbest PSO και ορισμένες τροποποιήσεις που μπορούμε να εφαρμόσουμε σε αυτή, για λόγους που θα φανούν στη συνέχεια.

Στον αλγόριθμο gbest PSO, σαν γειτονιά του κάθε σωματιδίου θεωρείται ολόκληρο το σμήνος, με αποτέλεσμα, η κοινωνική συνιστώσα του διανύσματος της ταχύτητας να αντικατοπτρίζει τις πληροφορίες που συλλέγονται από όλα τα σωματίδια που ανήκουν στο σμήνος. Σε αυτή την

περίπτωση, η συλλογική γνώση οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σαν σημείο αναφοράς για κάθε σωματίδιο θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η μέχρι στιγμής καλύτερη θέση που έχει βρεθεί από οποιοδήποτε σωματίδιο του σμήνους, την οποία θα συμβολίσουμε ως $gbest(t)$ (global best).

Όσον αφορά στην ατομική συνιστώσα, αυτή ήδη αναφέραμε ότι δεν εξαρτάται από τη γειτονιά, αλλά είναι ανάλογη της απόστασης της τρέχουσας θέσης του σωματιδίου από την καλύτερη θέση που το ίδιο σωματίδιο έχει ανακαλύψει μέχρι στιγμής. Θα παραστήσουμε αυτή την ατομική βέλτιστη θέση ως $pbest_i(t)$ (personal best), ενώ θα παραστήσουμε την τρέχουσα θέση του συγκεκριμένου σωματιδίου με το συμβολισμό $x_i(t)$ και την τρέχουσα ταχύτητά του ως $v_i(t)$. Έχοντας υπόψη τα παραπάνω μπορούμε να περιγράψουμε τον τρόπο με τον οποίο υπολογίζεται η ταχύτητα ενός σωματιδίου i ανά πάσα στιγμή με την παρακάτω σχέση :

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 * r_{1j}(t) * [pbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 * r_{2j}(t) * [gbest_j(t) - x_{ij}(t)] \quad (4.4.2)$$

όπου :

1. $v_{ij}(t)$ η ταχύτητα του σωματιδίου i στη διάσταση $j = 1, \dots, n_x$ στο βήμα t .
2. $x_{ij}(t)$ η θέση του σωματιδίου i στη διάσταση j στο βήμα t .
3. c_1, c_2 θετικές σταθερές επιτάχυνσης που χρησιμοποιούνται για τον επηρεασμό της συνεισφοράς της ατομικής και της κοινωνικής αντίστοιχα συνιστώσας στον υπολογισμό της νέας ταχύτητας.
4. $r_{1j}(t), r_{2j}(t)$ τυχαίες τιμές που ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$ και επιλέγονται με βάση μια ομοιόμορφη κατανομή. Οι δύο αυτές τυχαίες τιμές προσδίδουν στον αλγόριθμο το στοχαστικό χαρακτήρα του.

Αφού βρεθεί μία νέα τιμή για την ταχύτητα ενός σωματιδίου, το επόμενο βήμα είναι να προσθέσουμε την ταχύτητα αυτή στην τρέχουσα θέση του ίδιου σωματιδίου, προκειμένου να παράγουμε τη νέα και πιθανώς καλύτερη σύμφωνα με τη λογική που ήδη περιγράφηκε, θέση του σωματιδίου. Αυτό θα γίνει σύμφωνα με τη σχέση (4.4.1) και για τη νέα θέση που θα προκύψει θα υπολογιστεί η αντίστοιχη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Αν η τιμή αυτή είναι καλύτερη από την προηγούμενη βέλτιστη τιμή που είχε λάβει η αντικειμενική συνάρτηση από οποιοδήποτε σωματίδιο του σμήνους, τότε μόλις καταλήξαμε στο καινούργιο ολικό βέλτιστο ($gbest$). Αν η τιμή είναι καλύτερη μόνο από την προηγούμενη βέλτιστη τιμή που είχε λάβει η αντικειμενική συνάρτηση από το συγκεκριμένο σωματίδιο του σμήνους, τότε έχουμε καταλήξει σε ένα νέο ατομικό βέλτιστο του σωματιδίου i ($pbest_i$). Υποθέτοντας ότι ασχολούμαστε με ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης, οι δύο παραπάνω υπολογισμοί και ο τρόπος με τον οποίο γίνονται μπορεί να

περιγραφεί με τις σχέσεις που ακολουθούν :

Στο βήμα $t + 1$ η προσωπική βέλτιστη θέση υπολογίζεται ως εξής :

$$pbest_i(t+1) = \left\{ \begin{array}{l} pbest_i(t), \text{ αν } f(x_i(t+1)) \geq f(pbest_i(t)) \\ x_i(t+1), \text{ αν } f(x_i(t+1)) < f(pbest_i(t)) \end{array} \right\} \quad (4.4.3)$$

με $f : \mathcal{R}^n \rightarrow \mathcal{R}$ την αντικειμενική συνάρτηση,

ενώ στο βήμα t , η ολική βέλτιστη θέση ορίζεται ως εξής :

$$\begin{aligned} gbest(t) &\in \{pbest_0(t), \dots, pbest_n(t)\} : \\ f(gbest(t)) &= \min\{f(pbest_0(t)), \dots, f(pbest_n(t))\} \end{aligned} \quad (4.4.4)$$

όπου n το πλήθος σωματιδίων του σμήνους.

Τέλος, θα ήταν ίσως καλό να αναφερθούμε σε κάποιες βασικές παραλλαγές της μεθόδου που έχουν δημιουργηθεί προκειμένου να αποφευχθούν συγκεκριμένα προβλήματα. Σε αρχικές εφαρμογές της μεθόδου παρατηρήθηκε ότι ο υπολογισμός του διανύσματος της ταχύτητας με βάση την εξίσωση 4.4.2, οδηγεί σε απότομη αύξηση των τιμών του, με αποτέλεσμα οι επόμενες θέσεις των σωματιδίων να διαφέρουν δραστικά από τις προηγούμενες και σταδιακά το σμήνος να αποκλίνει, αγνοώντας ουσιαστικά τον αρχικό χώρο αναζήτησης και τις καλές περιοχές. Προκειμένου να αποφευχθεί αυτό το φαινόμενο είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί η τεχνική του *περιορισμού της ταχύτητας* σε ένα συγκεκριμένο πεδίο τιμών. Ένας απλός τρόπος για να επιτευχθεί αυτό είναι να τεθεί μία μέγιστη ταχύτητα, την τιμή της οποίας λαμβάνουν οι ταχύτητες των σωματιδίων που πιθανώς είναι μεγαλύτερες από αυτή σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Η συγκεκριμένη τεχνική έχει το πλεονέκτημα ότι εφόσον χρησιμοποιηθεί μία κατάλληλη τιμή για τη μέγιστη ταχύτητα, τότε είναι δυνατό να εξισορροπηθούν οι δύο τάσεις του σμήνους για εξερεύνηση ολόκληρου του χώρου αναζήτησης, αλλά και μόνο των τρεχόντων καλών περιοχών. Ωστόσο, πρέπει να ληφθεί υπόψη και το γεγονός ότι με τον τρόπο αυτό πιθανώς δεν αλλάζει μόνο το μέγεθος των βημάτων των σωματιδίων από επανάληψη σε επανάληψη, αλλά και η κατεύθυνσή τους. Ένα δεύτερο πρόβλημα προκύπτει στην περίπτωση που όλες οι ταχύτητες ισούνται με τη μέγιστη ταχύτητα. Τότε, τα σωματίδια αναζητούν λύσεις στα όρια ενός υπερκύβου $[x_i(t) - V_{\max}, x_i(t) + V_{\max}]$ και η αποτελεσματικότητα της μεθόδου περιορίζεται σημαντικά.

Μία δεύτερη τεχνική που χρησιμοποιείται συχνά προκειμένου να ξεπεραστεί το παραπάνω πρόβλημα, είναι αυτή της χρήσης *βάρους αδράνειας*. Το βάρος αδράνειας (w) ελέγχει την ορμή του σωματιδίου, περιορίζοντας ουσιαστικά την επίδραση της κεκτημένης ταχύτητας στην τρέχουσα υπολογιζόμενη τιμή της. Η εξίσωση 4.4.2 γράφεται σε αυτή την περίπτωση ως εξής :

$$v_{ij}(t+1) = w * v_{ij}(t) + c_1 * r_{1j}(t) * [pbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 * r_{2j}(t) * [gbest_j(t) - x_{ij}(t)]$$

Η τιμή του βάρους αδράνειας είναι πολύ σημαντική ώστε να εξασφαλιστεί η συγκλίνουσα συμπεριφορά της μεθόδου και η ισορροπία ανάμεσα στη γενική εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και στην εκμετάλλευση των τρεχόντων ανακαλυφθέντων βέλτιστων. Για τιμές του w μεγαλύτερες ή ίσες του 1, οι ταχύτητες αυξάνονται με το χρόνο, προς τη μέγιστη ταχύτητα αν υποθέσουμε ότι έχει ήδη οριστεί κάποια μέγιστη τιμή, και το σμήνος αποκλίνει, ενώ τα σωματίδια αποτυγχάνουν να αλλάξουν κατεύθυνση προκειμένου να κινηθούν ξανά προς καλές περιοχές. Για w μικρότερο του 1, τα σωματίδια σταδιακά επιβραδύνουν μέχρι η ταχύτητά τους να γίνει μηδέν, κάτι που φυσικά εξαρτάται και από τις τιμές των σταθερών επιτάχυνσης της ατομικής και κοινωνικής συνιστώσας του διανύσματος της ταχύτητας. Ενώ οι μεγάλες τιμές του βάρους αδράνειας προσδίδουν δυνατότητα εξερεύνησης ευρύτερων περιοχών στο πεδίο αναζήτησης, οι μικρές τιμές διευκολύνουν την τοπική αναζήτηση. Όπως και με τον καθορισμό μιας μέγιστης ταχύτητας, έτσι και ο καθορισμός καλών τιμών για το βάρος αδράνειας εξαρτάται σημαντικά από το εκάστοτε πρόβλημα και μπορεί η τιμή του να οριστεί είτε στατικά ή δυναμικά, προκειμένου να προσαρμόζεται κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του αλγορίθμου.

4.5 Ψευδοκώδικας μεθόδου gbest PSO.

3. Δημιούργησε ένα σμήνος N σωματιδίων διάστασης n_x .
4. Αρχικοποίησε το διάνυσμα θέσης κάθε σωματιδίου με τυχαίες τιμές οι οποίες υπακούουν σε συγκεκριμένους περιορισμούς που προκύπτουν από το πρόβλημα.
5. Επανάλαβε μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού :
 1. Για κάθε σωματίδιο που ανήκει στο σμήνος ανανέωσε την προσωπική του βέλτιστη θέση σύμφωνα με τη σχέση (4.4.3).
 2. Βρες το σωματίδιο με την ολική βέλτιστη θέση, σύμφωνα με τον ορισμό (4.4.4).
 3. Για κάθε σωματίδιο που ανήκει στο σμήνος :
 1. Ανανέωσε την ταχύτητά του σύμφωνα με τη σχέση (4.4.2).
 2. Ανανέωσε τη θέση του σύμφωνα με τη σχέση (4.4.1).

Αν παρατηρήσουμε τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί ο αλγόριθμος, θα διαπιστώσουμε ότι ο χρόνος εκτέλεσής του για μία επανάληψη εξαρτάται από δύο μεγέθη και συγκεκριμένα το πλήθος σωματιδίων N του σμήνους που χρησιμοποιείται και το πλήθος των μεταβλητών ελέγχου του προβλήματος n_x που ουσιαστικά μεταφράζονται στο διάνυσμα θέσης κάθε σωματιδίου.

Στη φάση δημιουργίας του σμήνους και αρχικοποίησης των σωματιδίων, δημιουργούνται N σωματίδια μεγέθους n_x και σε κάθε διάστασή του καθενός αποδίδεται μία τυχαία τιμή. Η διαδικασία αυτή συμβαίνει μία μόνο φορά και απαιτεί χρόνο $O(1)$.

Η ανανέωση της προσωπικής βέλτιστης θέσης κάθε σωματιδίου εξαρτάται από τον ορισμό του προβλήματος και της αντικειμενικής συνάρτησης. Πρέπει σε αυτή τη διαδικασία αναγκαστικά να υπολογιστεί η αντικειμενική συνάρτηση προκειμένου να συγκριθεί η νέα της τιμή με την προηγούμενη βέλτιστη και επομένως ο χρόνος εκτέλεσης αυτής της φάσης ισούται με τον χρόνο που απαιτεί ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης.

Για την εύρεση της ολικής βέλτιστης θέσης απαιτείται η προσπέλαση όλων των σωματιδίων του σμήνους ακριβώς μία φορά και η ταυτόχρονη σύγκριση των τιμών που οι τρέχουσες θέσεις τους δίνουν στην αντικειμενική συνάρτηση. Η διαδικασία αυτή χρειάζεται χρόνο $O(N)$.

Τέλος, για την ανανέωση της ταχύτητας και της θέσης κάθε σωματιδίου πρέπει και για τα N σωματίδια που ανήκουν στο σμήνος να προσπελαστούν όλες οι διαστάσεις των διανυσμάτων θέσης τους, n_x τον αριθμό. Συνεπώς, ο χρόνος που απαιτεί αυτή η διαδικασία είναι $O(Nn_x)$.

Συμπερασματικά καταλήγουμε πως αν ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης απαιτεί χρόνο $t = O(Nn_x)$, τότε ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της μεθόδου είναι της τάξης $O(Nn_x)$. Αν, όμως, ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης απαιτεί χρόνο $\Omega(Nn_x)$, τότε ο συνολικός χρόνος που απαιτείται για τον τερματισμό της μεθόδου είναι συγκρίσιμη με το χρόνο που απαιτεί ο υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης.

4.6 Περιγραφή του προβλήματος.

Πριν προχωρήσουμε θα ήταν σωστό να δοθεί μια σαφής περιγραφή του προβλήματος στο οποίο θα επιχειρήσουμε να δώσουμε λύση στην παρούσα εργασία. Έστω ένα δίκτυο N κόμβων/πόλεων, η καθεμία από τις οποίες έχει έναν συγκεκριμένο πληθυσμό με αποτέλεσμα να παρουσιάζει συγκεκριμένες ανάγκες σε εύρος ζώνης για τη συνολική ή τμηματική κάλυψη των αναγκών της σε

ευρυζωνικές υπηρεσίες. Μία εταιρεία θέλει να κατασκευάσει ένα δίκτυο το οποίο θα συνδέει όλες αυτές τις πόλεις, με τέτοιο τρόπο ώστε η κατασκευή του δικτύου να γίνει με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Αν δεχτούμε ότι το δίκτυο θα έχει τη μορφή συνδετικού δέντρου, τότε ζητάμε το συνδετικό δέντρο εκείνο από όλα τα πιθανά που μπορούν να κατασκευαστούν σε ένα γράφο N κόμβων, το οποίο ελαχιστοποιεί το οικονομικό κόστος της κατασκευής του.

Σε αυτή την περιγραφή υπάρχουν κάποια σημεία τα οποία θα πρέπει να διευκρινιστούν. Καταρχήν, μιλώντας για τις ανάγκες κάθε πόλης σε εύρος ζώνης δεν αναφερθήκαμε στον τρόπο με τον οποίο αυτές προκύπτουν. Στην απλούστερη περίπτωση, θα μπορούσαν να προκύψουν ως ανάλογες του συνολικού πληθυσμού της πόλης, όμως σε πραγματικές συνθήκες θα ήταν περισσότερο συνετό να ληφθεί υπόψη όχι τόσο ο συνολικός πληθυσμός, όσο ο αριθμός των νοικοκυριών, ή κάποια τιμή που θα προέκυπτε από την ηλικιακή κατανομή των κατοίκων της πόλης.

Ένα δεύτερο σημείο που χρειάζεται διευκρίνηση είναι η παραδοχή που κάνουμε ότι το δίκτυο θα έχει τη μορφή ενός συνδετικού δέντρου. Είναι κατανοητό ότι σε ένα πραγματικό δίκτυο σημαντικά θέματα αποτελούν η διασφάλιση της αξιοπιστίας του, ο καταμερισμός του φόρτου σε διαφορετικά μονοπάτια, θέματα πολιτικής κλπ, με αποτέλεσμα η διάταξη ενός πραγματικού δικτύου να μην αποτελεί σχεδόν ποτέ ένα συνδετικό δέντρο. Όμως, ένα συνδετικό δέντρο μπορεί να αποτελέσει τη βάση σχεδίασης του τηλεπικοινωνιακού δικτύου, με την προσθήκη πολλαπλών συνδέσεων για τη μεγιστοποίηση της αξιοπιστίας.

Τέλος, θα ήταν ίσως σωστό να εξετάσουμε γιατί θα χρειαστεί να χρησιμοποιήσουμε έναν στοχαστικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης προκειμένου να βρούμε μία καλή λύση στο πρόβλημά μας, αντί απλά να υπολογίσουμε το κόστος για κάθε συνδετικό δέντρο που μπορεί να κατασκευαστεί από έναν πλήρη γράφο N κόμβων, βρίσκοντας έτσι την βέλτιστη λύση. Πολύ απλά, ο τύπος του Cayley μας πληροφορεί ότι το πλήθος των δέντρων που μπορούν να κατασκευαστούν με N κόμβους είναι :

$$N^{N-2}$$

Γίνεται εύκολα κατανοητό, ότι ο αριθμός των πιθανών συνδετικών δέντρων γίνεται πολύ γρήγορα απαγορευτικός για την εκτίμηση του κόστους όλων. Πρόκειται για ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλαπλών αντικειμενικών στόχων, το οποίο είναι NP-hard και δεν υπάρχει γνωστός αλγόριθμος που να το επιλύει σε πολυωνυμικό χρόνο. Η χρήση της μεθόδου PSO μπορεί να δώσει καλές (αν όχι τη βέλτιστη) λύσεις μέσα σε αποδεκτά χρονικά περιθώρια.

4.7 Αναπαράσταση δέντρων σε μορφή διανύσματος.

Η μέθοδος PSO ορίζει ότι κάθε σωματίδιο έχει μια διανυσματική θέση, ενώ το πρόβλημά μας απαιτεί ουσιαστικά την εύρεση ενός δέντρου, γι αυτό θα πρέπει να καταλήξουμε σε μία μέθοδο κωδικοποίησης/αποκωδικοποίησης δέντρων σε διανύσματα και αντιστρόφως. Υπάρχουν κάποιες γενικές κατευθύνσεις που μία τέτοια μέθοδος κωδικοποίησης θα πρέπει να ακολουθεί, καθώς και ορισμένες μέθοδοι κωδικοποίησης που έχουν χρησιμοποιηθεί συχνά για το σκοπό αυτό. Για λόγους σαφήνειας θα υιοθετήσουμε δύο όρους από την ορολογία της γενετικής και των γενετικών αλγορίθμων. Ο όρος *γονότυπος* θα περιγράφει τον κωδικοποιημένο γράφο σε διανυσματική μορφή, ενώ ο όρος *φαινότυπος* θα περιγράφει το γράφο καθεαυτό.

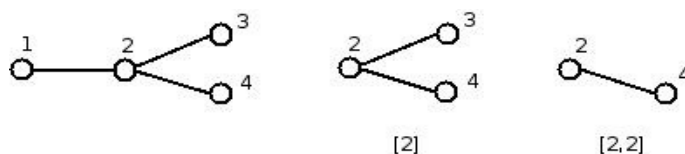
Μία μέθοδος κωδικοποίησης δέντρου σε διάνυσμα θα πρέπει να είναι ικανή να αναπαραστήσει όλους τους πιθανούς φαινότυπους και δε θα πρέπει να είναι “προκατειλημμένη” υπό την έννοια ότι όλοι οι πιθανοί φαινότυποι θα πρέπει να αναπαρίστανται από τον ίδιο αριθμό γονοτύπων σε περίπτωση που δύο ή περισσότεροι γονότυποι μπορούν να κωδικοποιήσουν τον ίδιο φαινότυπο. Ακόμη, η μέθοδος κωδικοποίησης θα πρέπει να μην κωδικοποιεί μη εφικτές λύσεις, όπως για παράδειγμα έναν γράφο με κύκλους αντί ενός δέντρου. Η αποκωδικοποίηση του φαινότυπου από τον γονότυπο θα πρέπει να γίνεται εύκολα και η κωδικοποίηση θα πρέπει να χαρακτηρίζεται από *τοπικότητα*, δηλαδή μικρές αλλαγές στον γονότυπο απαιτείται να επιφέρουν μικρές αλλαγές στον φαινότυπο.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι κωδικοποίησης δέντρων οι οποίες χρησιμοποιούνται συχνά, όπως οι *ακολουθίες Prufer*, η *κωδικοποίηση χαρακτηριστικών διανυσμάτων (characteristic vector encoding)*, η *κωδικοποίηση ακμής και κόμβου με βάρη (link and node biased encoding)* και η *μέθοδος τυχαίων κλειδιών δικτύου (Network Random Keys – NetKeys)* που συνδυάζει τα πλεονεκτήματα των δύο προηγούμενων. Εδώ, μιας και δεν είναι σκοπός μας να εξετάσουμε όλες τις μεθόδους, θα αναφερθούμε αναλυτικά μόνο στις μεθόδους Prufer και NetKeys που εξετάστηκαν κατά την υλοποίηση της εφαρμογής μας.

4.7.1 Ακολουθίες Prufer.

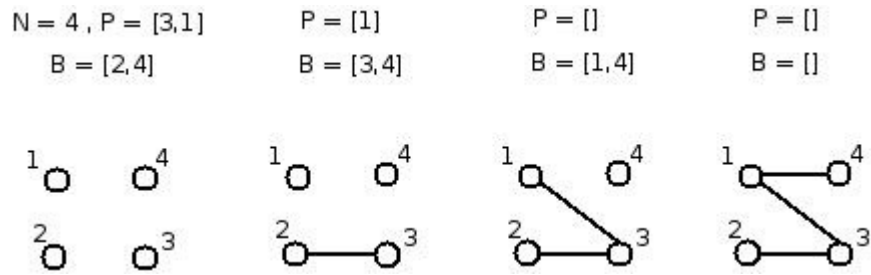
Οι αριθμοί Prufer χρησιμοποιούνται ευρέως για την αναπαράσταση δέντρων λόγω της ευκολίας και του κομψού τρόπου με τον οποίο γίνεται η αναπαράσταση. Πριν εξετάσουμε όμως τις θετικές και τις αρνητικές πτυχές της συγκεκριμένης αναπαράστασης, ας δούμε πώς ακριβώς γίνεται η κωδικοποίηση του φαινότυπου σε γονότυπο, καθώς και η αντίστροφη διαδικασία.

Αν δίνεται ένα δέντρο N κόμβων, τότε το σύνολο των ακμών που υπάρχουν στο δέντρο είναι $N-1$ και η μέθοδος Prufer κωδικοποιεί το δέντρο σε ένα διάνυσμα μεγέθους $N-2$. Για την κατασκευή του γονότυπου, αρχικά δίνουμε από μία ξεχωριστή ετικέτα σε κάθε κόμβο του δέντρου. Στη συνέχεια βρίσκουμε το φύλλο εκείνο του δέντρου με τη μικρότερη ετικέτα και προσθέτουμε στο μέχρι στιγμής κωδικοποιημένο διάνυσμα την ετικέτα του κόμβου με την οποία το συγκεκριμένο φύλλο ενώνεται. Διαγράφουμε το φύλλο και την ακμή που το συνδέει με τον γονέα του και επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για το νέο δέντρο που προκύπτει, μέχρι να απομείνει ένα δέντρο με δύο μόνο κόμβους. Όπως ήδη αναφέρθηκε, μετά το πέρας της διαδικασίας καταλήγουμε σε ένα διάνυσμα/γονότυπο μεγέθους $N-2$, που κωδικοποιεί μονοσήμαντα το αρχικό δέντρο. Μία αποτελεσματική υλοποίηση του παραπάνω αλγορίθμου χρησιμοποιεί ουρά προτεραιότητας βασισμένη σε σωρό για να συγκρατεί τα εναπομείναντα φύλλα του τρέχοντος δέντρου και τότε η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου είναι $O(N \log N)$. Η διαδικασία φαίνεται και στο σχήμα που ακολουθεί.



Σχήμα 4.7.1.1 – Κωδικοποίηση Prufer.

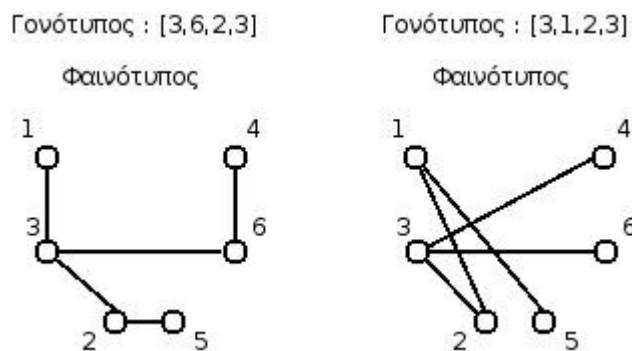
Για την αντίστροφη διαδικασία, δηλαδή την ανακατασκευή του φαινότυπου από τον γονότυπο, χρησιμοποιείται η μέθοδος που περιγράφεται στη συνέχεια. Έστω P η ακολουθία Prufer με $N-2$ στοιχεία. Όλες οι ετικέτες κόμβων που δεν εμφανίζονται στο P τοποθετούνται σε ένα νέο βοηθητικό διάνυσμα B , σε αύξουσα σειρά. Στο πρώτο βήμα αφαιρούμε τα πρώτα στοιχεία από τα διανύσματα P , B και σημειώνουμε την ακμή που δημιουργεί η ένωσή τους. Σε περίπτωση που το στοιχείο που αφαιρέθηκε από το διάνυσμα P δεν εμφανίζεται πλέον σε αυτό, τότε το προσθέτουμε στο διάνυσμα B , σύμφωνα με την αύξουσα ταξινόμηση που ήδη υπάρχει. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι να αδειάσει το διάνυσμα P . Τότε, στο διάνυσμα B θα έχουν απομείνει μόνο δύο ετικέτες, των οποίων τους αντίστοιχους κόμβους και ενώνουμε. Έχουμε το φαινότυπο που προκύπτει από τον γονότυπο από τον οποίο ξεκινήσαμε. Το παρακάτω σχήμα δείχνει παραστατικά τη μέθοδο αποκωδικοποίησης.



Σχήμα 4.7.1.2 – Αποκωδικοποίηση Prufer.

Η κωδικοποίηση δέντρων με ακολουθίες Prufer αποτελεί μία πολύ κομψή και ενδιαφέρουσα λύση εκ πρώτης όψεως, μιας και προσφέρει αρκετά πλεονεκτήματα. Κάθε δέντρο μπορεί να παρασταθεί με τη μορφή μιας τέτοιας ακολουθίας, ενώ μία ακολουθία Prufer μπορεί να αναπαριστά μόνο κάποιο δέντρο και όχι διαφορετικά είδη γράφων. Κάθε ακολουθία αναπαριστά ακριβώς ένα δέντρο και έτσι όλοι οι φαινότυποι αναπαρίστανται δίκαια με τη συγκεκριμένη μέθοδο. Ακόμη, μία πολύ σημαντική ιδιότητα για την υλοποίηση οποιασδήποτε μεθόδου βελτιστοποίησης με τη χρήση της μεθόδου Prufer αποτελεί το γεγονός ότι για την αναπαράσταση ενός δέντρου N κόμβων, ο γονότυπος θα έχει μόνο $N-2$ στοιχεία, οδηγώντας σε υλοποιήσεις που εκτελούνται γρήγορα.

Δυστυχώς η συγκεκριμένη μέθοδος έχει ένα μεγάλο μειονέκτημα. Η τοπικότητα που παρουσιάζει είναι πάρα πολύ μικρή, δηλαδή μικρές αλλαγές σε έναν γονότυπο μπορούν να οδηγήσουν σε εντελώς διαφορετικούς φαινότυπους. Στη δική μας περίπτωση, μία μικρή αλλαγή στο διάνυσμα θέσης ενός σωματιδίου θα οδηγήσει στην κατασκευή ενός πολύ διαφορετικού δικτύου και οδηγεί τη μέθοδο να ψάχνει με ακαθόριστο τρόπο αντί να ακολουθεί το σκεπτικό της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων. Η συμπεριφορά αυτή διαπιστώθηκε και κατά τη φάση της υλοποίησης της μεθόδου και δημιούργησε την ανάγκη για αναζήτηση κάποιου διαφορετικού τρόπου αναπαράστασης των δικτύων.



Σχήμα 4.7.1.3 – Μικρή τοπικότητα της κωδικοποίησης Prufer. Αλλάζοντας ένα μόνο στοιχείο του γονότυπου, μόνο δύο ακμές παραμένουν ίδιες στο αποκωδικοποιημένο δέντρο.

4.7.2 Τυχαία κλειδιά δικτύου (Network Random Keys – NetKeys).

Η μέθοδος κωδικοποίησης δέντρων NetKeys αποτελεί ένα συνδυασμό των μεθόδων χαρακτηριστικού διανύσματος (CV) και κόμβου/ακμής με βάρη (LNB) που διατηρεί τα πλεονεκτήματα και των δύο. Είναι συνώνυμα και ομοιόμορφα πλεονάζουσα, ενώ επιδεικνύει υψηλή τοπικότητα. Ανήκει στην κλάση των μεθόδων κωδικοποίησης με βάρη, δηλαδή χρησιμοποιεί βάρη στον γονότυπο, που υποδεικνύουν τη σημαντικότητα κάθε πιθανής ακμής που μπορεί να υπάρξει στο φαινότυπο.

Προκειμένου να περιγράψουμε τον τρόπο λειτουργίας της συγκεκριμένης μεθόδου θα πρέπει να αναφερθούμε σε δύο ξεχωριστά ζητήματα. Το πρώτο αφορά στη μορφή του γονότυπου, ενώ το δεύτερο στον αλγόριθμο που κατασκευάζει ένα δέντρο από έναν γονότυπο της συγκεκριμένης μορφής. Ένας πλήρης γράφος N κόμβων έχει $N(N-1)/2$ ακμές. Ο γονότυπος της μεθόδου NetKeys έχει μέγεθος ίσο με $K = N(N-1)/2$, δηλαδή περιλαμβάνει ένα στοιχείο για κάθε πιθανή ακμή που μπορεί να ενώσει δύο κόμβους αν το σύνολο των κόμβων είναι N . Κάθε στοιχείο παίρνει μία τιμή στο διάστημα $[0,1]$, η οποία υποδηλώνει την *προτεραιότητα* της ακμής που αυτό αντιπροσωπεύει. Με βάση αυτές τις προτεραιότητες, από κάθε γονότυπο μπορούμε να δημιουργήσουμε μία αλληλουχία ακμών, λαμβάνοντας κατά ελατούμενη προτεραιότητα τις αντίστοιχες ακμές.

Για να αποκωδικοποιήσουμε έναν γονότυπο της μεθόδου NetKeys αρκεί να χρησιμοποιήσουμε τον αλγόριθμο του Kruskal για την εύρεση του ελάχιστου συνδετικού δέντρου από έναν πλήρη γράφο N κόμβων με γνωστά βάρη, με τη διαφορά ότι αντί κάθε φορά να επιλέγουμε την ακμή με το ελάχιστο βάρος, θα επιλέγουμε αυτή με το μέγιστο, δηλαδή την πιο σημαντική. Ο αλγόριθμος αυτός εργάζεται ως εξής : Αρχικά δημιουργούμε ένα δάσος, στο οποίο κάθε δέντρο αποτελείται από ακριβώς έναν κόμβο. Δηλαδή αρχικά έχουμε N δέντρα. Δημιουργούμε ένα σύνολο S που περιλαμβάνει όλες τις ακμές του πλήρη γράφου N κόμβων με τα γνωστά βάρη τους (υπάρχει ένα βάρος για κάθε ακμή στον γονότυπο). Επιλέγουμε την ακμή με το μεγαλύτερο βάρος, την αφαιρούμε από το σύνολο S και αν αυτή η ακμή ενώνει δύο διακριτά δέντρα, τότε την προσθέτουμε στον γράφο, διαφορετικά την αγνοούμε. Επαναλαμβάνουμε την παραπάνω διαδικασία μέχρι να προστεθούν $N-1$ ακμές στο γράφο, δηλαδή μέχρι να δημιουργήσουμε ένα συνδετικό δέντρο. Όπως γίνεται αντιληπτό, οι ακμές που προστίθενται στο δέντρο είναι πιθανότερο να είναι αυτές με τα μεγαλύτερα βάρη στο γονότυπο.

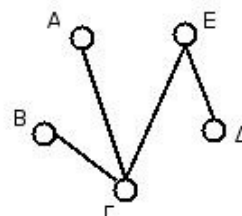
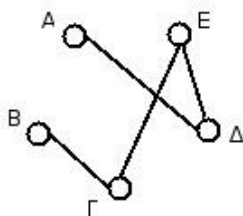
Μελετώντας τα παραπάνω, μπορούμε να καταλήξουμε σε τρεις σημαντικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν τους γονότυπους της μεθόδου NetKeys. Πρώτον, η μέθοδος από τη φύση της

δημιουργεί διανύσματα στα οποία υπάρχει διαχωρισμός των “σημαντικών” και των “ασήμαντων” ακμών. Δεύτερον, η αποκωδικοποίηση κάθε γονότυπου οδηγεί σε αποδεκτό φαινόμενο, μιας και το αποτέλεσμα είναι πάντα δέντρο και όχι κάποια μη αποδεκτή μορφή γράφου. Τέλος, η μέθοδος χαρακτηρίζεται από υψηλή τοπικότητα. Αλλαγή σε ένα μόνο στοιχείο του γονότυπου οδηγεί στην αλλαγή της προτεραιότητας μόνο της αντιπροσωπευόμενης από το συγκεκριμένο στοιχείο του γονότυπου ακμής. Στην αλληλουχία των ακμών που λαμβάνουμε από την αποκωδικοποίηση συμβαίνουν δύο πράγματα. Η απόλυτη θέση κάποιων ακμών στην αλληλουχία ολισθαίνει είτε προς τα αριστερά, ή προς τα δεξιά, αλλά η σχετική θέση όλων των ακμών εκτός αυτής της οποίας η προτεραιότητα μόλις άλλαξε παραμένει αμετάβλητη. Επειδή κατά τη διαδικασία αποκωδικοποίησης του γονότυπου σημασία έχει η σχετική θέση κάθε ακμής με όλες τις υπόλοιπες, το νέο δέντρο/φαινόμενο που προκύπτει δεν διαφέρει σημαντικά από το προηγούμενο, αν όντως έχει κάποια διαφορά. Η μέθοδος είναι πλεονάζουσα και γι αυτό το λόγο είναι πιθανόν η αλλαγή της προτεραιότητας ενός ή λίγων ακμών να οδηγήσει στην αναπαράσταση του ίδιου ακριβώς φαινότυπου. Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται δύο παραδείγματα αποκωδικοποίησης γονοτύπων της μεθόδου NetKeys, αλλά και της υψηλής τοπικότητας που αυτή επιδεικνύει.

Ετικέτες ακμών : 1 - AB, 2 - ΑΓ, 3 - ΑΔ, 4 - ΑΕ, 5 - ΒΓ, 6 - ΒΔ, 7 - ΒΕ, 8 - ΓΔ, 9 - ΓΕ, 10 - ΔΕ

Γονότυπος : [0.4, 0.3, 0.6, 0.0, 0.9, 0.5, 0.1, 0.2, 0.7, 0.8]
Αλληλουχία ακμών : 5, 10, 9, 3, 6, 1, 2, 8, 7, 4

Γονότυπος : [0.4, 0.65, 0.6, 0.0, 0.9, 0.5, 0.1, 0.2, 0.7, 0.8]
Αλληλουχία ακμών : 5, 10, 9, 2, 3, 6, 1, 8, 7, 4



Σχήμα 4.7.2.1 – Αποκωδικοποίηση NetKeys και παράδειγμα υψηλής τοπικότητας. Αλλάζοντας μία μόνο προτεραιότητα, ο νέος φαινόμενο αλλάζει κατά μία μόνο ακμή (ΑΔ <-> ΑΓ).

Η αναπαράσταση δέντρων με την μέθοδο κωδικοποίησης NetKeys φαίνεται να παρουσιάζει το σημαντικό πλεονέκτημα της τοπικότητας σε σχέση με τη μέθοδο Prufer, αλλά και επιπλέον πλεονεκτήματα σε σχέση με τις υπόλοιπες αναπαραστάσεις γράφων που αναφέρθηκαν. Ωστόσο, είναι αρκετά εμφανές και ένα μειονέκτημά της σε σχέση με τις ακολουθίες Prufer. Ένας γονότυπος δέντρου N κόμβων που προκύπτει με τη μέθοδο Prufer έχει μέγεθος N-2, ενώ ο γονότυπος του ίδιου δέντρου στον οποίο καταλήγουμε με τη χρήση NetKeys είναι μεγέθους $N(N-1)/2$, δηλαδή σημαντικά μεγαλύτερος. Η επίδραση του γεγονότος αυτού στην αποτελεσματικότητα του

αλγορίθμου PSO, γίνεται αντιληπτή λόγω του μεγαλύτερου μεγέθους κάθε σωματιδίου και συνεπώς του επιπλέον χρόνου που χρειάζεται για την ολοκλήρωση μίας επανάληψης της PSO. Μάλιστα, όσο το πλήθος των κόμβων στο πρόβλημά μας αυξάνεται, η συγκεκριμένη επίδραση γίνεται πιο αισθητή, γιατί για μεγαλύτερα πλήθη κόμβων επιβάλλεται να αυξάνεται και το μέγεθος του σμήνους, με άμεσο αποτέλεσμα την εισαγωγή πολλών περισσότερων πράξεων στις διαδικασίες υπολογισμού της αντικειμενικής συνάρτησης, της ταχύτητας και της θέσης όλων των σωματιδίων. Ο λόγος που το μέγεθος του σμήνους πρέπει να αυξάνεται έχει να κάνει με την αποφυγή πρόωρης σύγκλισης του αλγορίθμου σε τοπικά βέλτιστα και θα διερευνηθεί σε επόμενες παραγράφους.

Ένας τρόπος για να μετριαστεί το παραπάνω φαινόμενο προκύπτει αν αναλογιστούμε τη φύση του προβλήματός μας. Μας ενδιαφέρει να κατασκευάσουμε ένα δίκτυο βέλτιστου κόστους που υπάρχει στα όρια μίας φυσικής οντότητας, για παράδειγμα ενός νομού. Ακόμη κι αν το δίκτυο βέλτιστου κόστους για κάποιον λόγο περιελάμβανε γραμμές που ένωναν πολλά ζευγάρια πόλεων με μακρινές μεταξύ τους αποστάσεις, μία τέτοια διάταξη δε θα ήταν ρεαλιστική. Δύο άμεσα συνδεδεμένοι κόμβοι του δικτύου στην πραγματικότητα θα πρέπει να είναι και αρκετά κοντά μεταξύ τους. Το πόσο κοντά μπορεί να καθορίζεται από μία πληθώρα παραγόντων, διοικητικών, χωροταξικών ή άλλης φύσης. Ακόμη, οι αποδεκτοί κόμβοι που μπορούν να είναι συνδεδεμένοι με έναν συγκεκριμένο κόμβο θα μπορούσαν να βρεθούν αναλύοντας με κάποιον τρόπο χωρικά τις πραγματικές θέσεις των κόμβων που επιθυμούμε να ανήκουν στο δίκτυο. Ο χωρισμός ενός μεγάλου δικτύου σε υποδίκτυα και η απόπειρα ανεξάρτητης, και πιθανώς παράλληλης, βελτιστοποίησης κάθε επιμέρους υποδικτύου είναι δυνατό να οδηγήσει σε αρκετά μικρότερους χρόνους εκτέλεσης μιας υλοποίησης βασισμένης σε NetKeys.

Ένα δεύτερο θέμα που προκύπτει από τη χρήση NetKeys για την αναπαράσταση δέντρων με διανυσματική μορφή, κατάλληλη για να λειτουργήσει ως διάνυσμα θέσης της μεθόδου PSO, είναι αυτό του *εκφυλισμού των διανυσμάτων θέσης και ταχύτητας κάθε σωματιδίου* μετά από κάθε επανάληψη της μεθόδου, όταν ο χώρος αναζήτησης θεωρείται διακριτός, όπως στην παρούσα εργασία. Κατά την αρχικοποίηση των διανυσμάτων θέσης όλων των σωματιδίων, οι τιμές που υπάρχουν στα στοιχεία κάθε τέτοιου διανύσματος είναι τυχαίες τιμές που ανήκουν στο διάστημα $[0,1]$. Όμως, αναλογιζόμενοι την επίδραση του διανύσματος της ταχύτητας στην εύρεση της επόμενης θέσης ενός σωματιδίου διαπιστώνουμε ότι οι προτεραιότητες που υπάρχουν στο νέο διάνυσμα θέσης ενός σωματιδίου δεν είναι αναγκαίο ότι θα ανήκουν πλέον στο διάστημα $[0,1]$ και μάλιστα δεν είναι ούτε καν σίγουρο ότι οι τιμές που περιλαμβάνονται στα νέα διανύσματα θέσης όλων των σωματιδίων θα ανήκουν στο ίδιο διάστημα. Με κάθε επανάληψη της μεθόδου, η θέση κάθε σωματιδίου “εκφυλίζεται” σε σχέση με τις θέσεις όλων των υπόλοιπων σωματιδίων και αυτό

έχει σημαντική επίδραση στην αποτελεσματικότητα της μεθόδου, αφού το διάνυσμα της ταχύτητας χάνει πλέον τη σημασία του.

Το διάνυσμα της ταχύτητας (4.4.1) προκύπτει ως το άθροισμα τριών διακριτών μερών : της ατομικής συνιστώσας, της κοινωνικής συνιστώσας και της προηγούμενης ταχύτητας (αδράνεια). Η ατομική συνιστώσα παριστάνεται από την ποσότητα $[pbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)]$ για την οποία μπορούμε να κάνουμε μία εμφανή παρατήρηση : $pbest_{ij}(t) = x_{ij}(t-k)$, $t \geq k$, $t, k \in Z$. Δηλαδή, η τρέχουσα βέλτιστη θέση ενός σωματιδίου υπήρξε σε κάποια προηγούμενη στιγμή και τρέχουσα θέση του σωματιδίου. Σύμφωνα με το σκεπτικό που ήδη αναφέρθηκε όμως, η θέση της παρούσας χρονικής στιγμής έχει εκφυλιστεί και δεν συνδέεται σαφώς με την θέση μιας προηγούμενης χρονικής στιγμής. Τα στοιχεία που απαρτίζουν την ατομική συνιστώσα δεν είναι συμβατά και η μεταξύ τους αφαίρεση δεν έχει κανένα νόημα. Το ίδιο συμβαίνει και με την κοινωνική συνιστώσα της ταχύτητας, ενώ αν σκεφτούμε ότι η ίδια ακριβώς αλληλουχία γεγονότων συμβαίνει και κατά τις προηγούμενες επαναλήψεις της PSO μεθόδου, τότε καταλαβαίνουμε ότι και το διάνυσμα της προηγούμενης ταχύτητας δεν έχει επίσης νόημα.

Ο προτεινόμενος τρόπος για τη διευθέτηση του παραπάνω προβλήματος, είναι μετά από κάθε επανάληψη της μεθόδου βελτιστοποίησης, να “κανονικοποιούνται” οι προτεραιότητες που βρίσκονται στο διάνυσμα της θέσης κάθε σωματιδίου σε ένα κοινό σύνολο τιμών προτεραιοτήτων. Άσχετα με το διάστημα στο οποίο ανήκουν οι τιμές των προτεραιοτήτων, η αλληλουχία των ακμών που περιγράφεται από το διάνυσμα θέσης μπορεί να αναπαραχθεί από οποιονδήποτε άλλο συνδυασμό τιμών προτεραιοτήτων, αρκεί να διατηρείται η προτεραιότητα κάθε ακμής σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες. Έτσι, υποθέτοντας ότι N το μέγεθος του διανύσματος θέσης, το σύνολο ακεραίων $[0...N-1]$ μπορεί να λειτουργήσει σαν κοινό σύνολο τιμών προτεραιοτήτων για όλα τα σωματίδια σε όλες τις χρονικές στιγμές. Το μόνο που λείπει είναι ένας τρόπος να υλοποιηθεί ο παραπάνω μετασχηματισμός του διανύσματος θέσης. Ταξινομώντας τις μη αποδεκτές προτεραιότητες και αποδίδοντας σε καθεμία μία τιμή από το κοινό σύνολο τιμών προτεραιοτήτων, αυτό μπορεί να επιτευχθεί εύκολα, αν και με κάποιο επιπλέον υπολογιστικό κόστος.

Έχοντας βρει τρόπο να διατηρήσουμε τη συμβατότητα μεταξύ διαφορετικών σωματιδίων του σμήνους και μεταξύ σωματιδίων που υπήρξαν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, διαπιστώνουμε ότι ενώ η κοινωνική και η ατομική συνιστώσα πλέον αποκτούν κάποια λογική σημασία, το προηγούμενο διάνυσμα της ταχύτητας (αδράνεια) συσσωρεύει προηγούμενες αλλαγές με ασυνεπή τρόπο. Αν στο βήμα t η προτεραιότητα μιας ακμής υποστεί αλλαγή τότε για την προτεραιότητά της σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες ακμές μπορεί να μην ισχύει το ίδιο, αφού αλλάζει και η

προτεραιότητα των άλλων ακμών. Συνεπώς, παρότι το διάνυσμα της ταχύτητας στο βήμα t μπορεί να μην είναι μηδενικό σύμφωνα με τον ορισμό του, η επίδρασή του στη θέση του σωματιδίου είναι δυνατό να είναι μηδενική.

Αυτή η αντίφαση λύνεται όταν κατανοήσουμε τη διαφορετική σημασία που έχει η ταχύτητα κατά τον υπολογισμό της επόμενης θέσης του σωματιδίου και κατά τον υπολογισμό της νέας ταχύτητας. Στην πρώτη περίπτωση, η ταχύτητα είναι ένα διάνυσμα που προστίθεται σε ένα διάνυσμα προτεραιοτήτων για να προκύψει ένα νέο διάνυσμα προτεραιοτήτων. Οι νέες προτεραιότητες που προκύπτουν μπορεί να είναι διαφορετικές από τις προηγούμενες στη τιμή τους, αλλά η καθεμία από μόνη της δε μας λέει τίποτα για την αλλαγή της σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες και κατ' επέκταση για την μεταβολή σε σχέση με την προηγούμενη τιμή της όταν το διάνυσμα θέσης κανονικοποιηθεί. Όταν αυτό συμβεί, θα φανεί αν μία προτεραιότητα παρέμεινε ίδια ή αν άλλαξε και κατά πόσο. Η ποσότητα κατά την οποία άλλαξε αποτελεί και την πραγματική ταχύτητα την οποία ανέπτυξε το σωματίδιο κατά την τρέχουσα επανάληψη της μεθόδου βελτιστοποίησης, η οποία πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του επόμενου διανύσματος ταχύτητας. Δηλαδή, αν λάβουμε υπόψη κανονικοποιημένες τιμές για τις θέσεις ενός σωματιδίου τις στιγμές $t-1$, t , τότε η τιμή αδράνειας που πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την εύρεση του διανύσματος της ταχύτητας για τη στιγμή $t+1$ είναι :

$$v_{ij}(t) = x_{ij}(t) - x_{ij}(t-1) \quad (4.7.2.1)$$

Συμπέρασμα όσων αναφέρθηκαν είναι ότι πέρα από κάποια συνάρτηση που θα κανονικοποιεί τα διανύσματα θέσης όλων των σωματιδίων μετά από κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, είναι απαραίτητη και η ύπαρξη μίας συνάρτησης που θα αναλαμβάνει τον υπολογισμό της σωστής αδράνειας για κάθε σωματίδιο, πριν τον υπολογισμό της νέας του ταχύτητας. Οι δύο αυτές τροποποιήσεις, δυστυχώς αυξάνουν την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, είναι όμως απαραίτητες για την ορθή λειτουργία του σύμφωνα με όσα λέχθηκαν. Στην υλοποίηση της μεθόδου PSO για την εφαρμογή μας χρησιμοποιήθηκε η αναπαράσταση με NetKeys, καθώς και οι τροποποιήσεις που συζητήθηκαν.

4.8 Το πρόβλημα πρόωρης σύγκλισης του αλγόριθμου PSO.

Παρότι έχουν ήδη παρατεθεί οι σχέσεις που διέπουν τη μέθοδο PSO, δεν έχει γίνει μέχρι στιγμής προσπάθεια να διερευνηθούν όσα συμβαίνουν σε ένα βήμα της εκτέλεσης του αλγορίθμου, καθώς και η πορεία του αλγορίθμου σε βάθος χρόνου, με βάση όσα συμβαίνουν σε κάθε βήμα. Ας υποθέσουμε ότι βρισκόμαστε στο βήμα t και ότι εξετάζουμε τί συμβαίνει σε ένα σωματίδιο i στη διάρκεια αυτού του βήματος.

Το τρέχον σωματίδιο i , έχει ανά πάσα στιγμή επίγνωση της τρέχουσας θέσης του $x_i(t)$, της βέλτιστης μέχρι στιγμής θέσης του $pbest_i(t)$, της τρέχουσας ταχύτητάς του $v_i(t)$ και της βέλτιστης θέσης $gbest(t)$ στην οποία έχει καταλήξει το σμήνος μέχρι στιγμής. Υπολογίζοντας τη νέα του ταχύτητα με βάση την εξίσωση (4.4.2) μπορεί να καταλήξει σε μία νέα θέση $x_i(t+1)$ σύμφωνα με τη σχέση (4.4.1). Το αμέσως επόμενο βήμα είναι η αξιολόγηση της τιμής που λαμβάνει η αντικειμενική συνάρτηση για τη νέα θέση του σωματιδίου. Σύμφωνα με αυτή την τιμή, μπορούν να υπάρξουν τέσσερις πιθανές επόμενες καταστάσεις.

Αν η θέση $x_i(t+1)$ αποδίδει καλύτερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση από την τιμή που της αποδίδει η θέση $gbest(t)$, τότε η $x_i(t+1)$ είναι το νέο βέλτιστο $gbest(t+1)$ στο οποίο έχει καταλήξει ο αλγόριθμος μέχρι στιγμής, αλλά και η νέα βέλτιστη θέση $pbest_i(t+1)$ του τρέχοντος σωματιδίου. Κατά την επόμενη επανάληψη, η κοινωνική συνιστώσα όλων των υπόλοιπων σωματιδίων θα αλλάξει, με αποτέλεσμα όλα τα σωματίδια να αλλάξουν κατεύθυνση και να κινηθούν σε νέες περιοχές αναζήτησης.

Αν η θέση $x_i(t+1)$ δεν αποδίδει καλύτερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση από την τιμή που της αποδίδει η θέση $gbest(t)$, αλλά αποδίδει καλύτερη τιμή από αυτή που αντιστοιχεί στη θέση $pbest_i(t)$, τότε η $x_i(t+1)$ είναι η νέα βέλτιστη θέση $pbest_i(t+1)$ του τρέχοντος σωματιδίου, ενώ η βέλτιστη μέχρι στιγμής λύση παραμένει η θέση $gbest(t+1) = gbest(t)$ κάποιου άλλου σωματιδίου. Επιχειρώντας να ερμηνεύσουμε την περίπτωση αυτή, μπορούμε να πούμε ότι παρότι το σωματίδιο i δεν καταλήγει σε κάποια καλύτερη λύση για το σύνολο, προσεγγίζει τη βέλτιστη λύση μετακινούμενο λίγο πιο κοντά στο σωματίδιο με την καλύτερη θέση. Στην επόμενη επανάληψη, ο χώρος μέσα στον οποίο θα κινηθεί το σωματίδιο i θα είναι κατά πάσα πιθανότητα μικρότερος από τον χώρο μέσα στον οποίο μόλις κινήθηκε.

Αν η θέση $x_i(t+1)$ δεν αποδίδει καλύτερη τιμή στην αντικειμενική συνάρτηση από την τιμή που της αποδίδει η θέση $gbest(t)$, αλλά ούτε και από την αντίστοιχη τιμή που αποδίδει η θέση $pbest_i(t)$, τότε δεν αλλάζει ούτε η μέχρι στιγμής βέλτιστη λύση, αλλά ούτε και η μέχρι στιγμής βέλτιστη θέση του

τρέχοντος σωματιδίου. Κατά την επόμενη επανάληψη, το σωματίδιο i θα συνεχίσει να κινείται στοχαστικά κάπου μέσα στην ίδια περιοχή στην οποία κινούνταν και προηγουμένως.

Τέλος, σε περίπτωση που η θέση $x_i(t+1)$ αποδίδει στην αντικειμενική συνάρτηση την ίδια τιμή με αυτή που της αποδίδει η θέση $gbest(t)$, τότε οι δύο θέσεις κατά πάσα πιθανότητα συμπίπτουν. Η βέλτιστη θέση του σωματιδίου είναι $pbest_i(t+1) = gbest(t+1)$ και η κοινωνική συνιστώσα του στο εξής θα ταυτίζεται με την ατομική συνιστώσα, μέχρι να βρεθεί από τη μέθοδο μία καινούργια βέλτιστη λύση. Κατά τις επόμενες επαναλήψεις της μεθόδου, ο χώρος αναζήτησης του σωματιδίου i πλέον περιορίζεται πολύ και συγκεκριμένα είναι ο χώρος που βρίσκεται πολύ κοντά στη βέλτιστη λύση. Ωστόσο, ο συνδυασμός του μικρού χώρου αναζήτησης με τον τρόπο που τα διανύσματα θέσης αναπαρίστανται με τη μέθοδο NetKeys, συνήθως οδηγεί σε αδυναμία αλλαγής του διανύσματος θέσης, με αποτέλεσμα ένα σωματίδιο που έχει ταυτιστεί με το βέλτιστο σωματίδιο να παραμένει φαινομενικά αδρανές και ουσιαστικά άχρηστο.

Συνοψίζοντας, μετά από κάθε επανάληψη του αλγορίθμου PSO, ένα σωματίδιο με βάση τη νέα του θέση μπορεί : (α) να επηρεάσει τους χώρους αναζήτησης όλων των υπόλοιπων σωματιδίων, (β) να περιορίσει μόνο το δικό του χώρο αναζήτησης σε βαθμό που να παραμένει λειτουργικό σε επόμενες επαναλήψεις της μεθόδου, (γ) να μην έχει απολύτως καμία επίδραση στο δικό του χώρο αναζήτησης ή σε αυτούς των υπόλοιπων σωματιδίων και (δ) να περιορίσει τον δικό του χώρο αναζήτησης σε βαθμό που αυτό να παρουσιάζεται ως αδρανές και να απολέσει, έστω και προσωρινά, τη λειτουργικότητά του.

Όσα περιγράφηκαν μέχρι στιγμής αποτελούν τις διεργασίες που συμβαίνουν για κάθε σωματίδιο κατά τη διάρκεια μίας μόνο επανάληψης του αλγορίθμου $gbest$ PSO και τις πιθανές επιδράσεις που επιφέρει η μεταβολή της θέσης κάθε σωματιδίου στο δικό του χώρο αναζήτησης, ή σε αυτόν των υπόλοιπων σωματιδίων κατά το επόμενο βήμα. Προκειμένου να εξετάσουμε όμως τη συμπεριφορά της μεθόδου στο σύνολό της, θα πρέπει να διερευνήσουμε τις συσσωρευόμενες αυτές επιδράσεις στον χώρο αναζήτησης κάθε σωματιδίου μετά από κάθε επανάληψη της μεθόδου, μέσα σε ένα αρκετά μεγάλο χρονικό διάστημα. Μάλιστα, σε συνάρτηση με όσα ήδη αναφέρθηκαν, θα πρέπει να ληφθούν υπόψη και δύο ακόμη παράμετροι : το μέγεθος του προβλήματος και το μέγεθος του σμήνους που χρησιμοποιείται για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος.

Πριν το πρώτο βήμα του αλγορίθμου $gbest$ PSO, δημιουργείται το σμήνος μεγέθους S και το διάνυσμα θέσης κάθε σωματιδίου που ανήκει στο σμήνος αρχικοποιείται με τυχαίες και διακριτές τιμές/προτεραιότητες που ανήκουν στο αποδεκτό σύνολο προτεραιοτήτων. Εφόσον το μέγεθος του

προβλήματος είναι N , υπάρχουν $\Sigma = N^{N-2}$ ανεξάρτητες τιμές που μπορεί ένα διάλυμα θέσης να λάβει κατά την αρχικοποίησή του, αλλά και ανά πάσα στιγμή. Από αυτό συνεπάγεται ότι υπάρχουν Σ διαφορετικές τιμές που μπορεί να λάβει η αντικειμενική συνάρτηση και μία από αυτές είναι η βέλτιστη. Αν αυτές οι τιμές που λαμβάνει η αντικειμενική συνάρτηση για κάθε πιθανή λύση ταξινομηθούν (έστω πρόβλημα ελαχιστοποίησης) κατά αύξουσα σειρά, γίνεται προφανές ένα σημαντικό γεγονός. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή που δίνει η βέλτιστη μέχρι στιγμής λύση στην αντικειμενική συνάρτηση, τόσο μεγαλύτερη είναι και η πιθανότητα κάθε σωματιδίου i του σμήνους να καταλήξει κατά τη διάρκεια της επόμενης επανάληψης σε μία καλύτερη συλλογική βέλτιστη θέση (gbest). Αναδιατυπώνοντας την τελευταία πρόταση, μπορούμε να πούμε ότι *όσο πιο κοντά πλησιάζουμε στη βέλτιστη λύση, τόσο γίνεται λιγότερο πιθανό για καθένα σωματίδιο ξεχωριστά να προσεγγίσει μία καλύτερη συλλογική λύση*. Βέβαια, η επίδραση του συγκεκριμένου φαινομένου μετριάζεται από τον τρόπο λειτουργίας της μεθόδου PSO, δηλαδή από το γεγονός ότι η αναζήτηση κάθε σωματιδίου δεν είναι εντελώς τυχαία, αλλά γίνεται σε κάποια κοντινή περιοχή του, όπου υπάρχει αυξημένη πιθανότητα εύρεσης μιας καλύτερης λύσης. Ωστόσο, η προηγούμενη διαπίστωση δεν παύει να ισχύει σε αυτές τις κοντινές περιοχές, αφού ακριβώς το ίδιο σκεπτικό μπορεί να μεταφερθεί για ένα υποσύνολο των λύσεων που υπάρχει σε μία συγκεκριμένη περιοχή του ολικού χώρου αναζήτησης.

Με βάση τα προηγούμενα και αναλογιζόμενοι την εξέλιξη της διαδικασίας PSO σε βάθος χρόνου, μπορούμε να καταλήξουμε σε κάποια συμπεράσματα. Όσο η τρέχουσα συλλογική λύση απέχει πολύ από τη βέλτιστη, τα σωματίδια που ανήκουν στο σμήνος δε δυσκολεύονται να βρουν καλύτερες λύσεις και κατά συνέπεια περιορίζουν τους χώρους αναζήτησης τους αρκετά συχνά, αλλά και αλλάζουν συχνά κατευθύνσεις, μιας και η τρέχουσα συλλογική λύση (gbest) έχει μεγάλη πιθανότητα να αλλάξει ανάμεσα σε κοντινές επαναλήψεις. Ο περιορισμός του χώρου αναζήτησης κάθε σωματιδίου οδηγεί στην εύρεση καλύτερων λύσεων, ενώ η συχνή αλλαγή της κατεύθυνσής του, μέσω τροποποίησης της κοινωνικής του συνιστώσας, ελαττώνει την πιθανότητα ένα σωματίδιο να ταυτιστεί με το τρέχον βέλτιστο σωματίδιο και να καταστεί ουσιαστικά αδρανές.

Ωστόσο, τί συμβαίνει όταν η μέθοδος πλέον έχει προσεγγίσει μια αρκετά καλή θέση, αλλά όχι τη βέλτιστη; Τότε η πιθανότητα κάθε σωματιδίου να βρει μια καλύτερη συλλογική λύση μέσα σε μία επανάληψη μειώνεται δραστικά, όμως η πιθανότητά του να βρει μια καλύτερη ατομική λύση δε μειώνεται εξίσου, γιατί μόνο μία ατομική βέλτιστη λύση ταυτίζεται με την ολική βέλτιστη. Είναι πιθανό για αρκετές επαναλήψεις η τρέχουσα συλλογική βέλτιστη λύση να παραμείνει σταθερή, τη στιγμή που πολλά σωματίδια συνεχώς την προσεγγίζουν, με κίνδυνο να ταυτιστούν με αυτή και να καταστούν αδρανή. Όσο πιο κοντά φτάνουμε στη βέλτιστη λύση, τόσο πιο πολλά σωματίδια

καταλήγουν σταδιακά στην αδράνεια, με αποτέλεσμα λιγότερα σωματίδια σε κάθε επανάληψη να επιτελούν το σκοπό τους, κάτι που συνεπάγεται και μείωση της αποτελεσματικότητας της μεθόδου gbest PSO για κάθε βήμα κατά το οποίο η τρέχουσα ευρεθείσα βέλτιστη λύση παραμένει σταθερή. Όταν η διαδικασία παίρνει την τροπή αυτή, τότε υπάρχει ο κίνδυνος της *πρόωρης σύγκλισης του αλγορίθμου σε τοπικό βέλτιστο*. Γίνεται διαισθητικά κατανοητό ότι ο κίνδυνος αυξάνει για μικρά μεγέθη σμήνους, ενώ η χρονική απόδοση της μεθόδου μειώνεται για μεγαλύτερα μεγέθη σμήνους. Πρέπει να υπάρξει κάποια πρόταση για την επιλογή του συγκεκριμένου μεγέθους, ώστε να συμβιβάζει τα δύο ζητήματα. Εδώ θα πούμε απλώς ότι το θέμα προσφέρεται για περαιτέρω διερεύνηση.

Είναι δυνατό να γίνει κάποια απόπειρα διόρθωσης του προβλήματος πρόωρης σύγκλισης, αλλά είναι επίσης δυνατό να το εκμεταλλευτούμε σαν συνθήκη τερματισμού του αλγορίθμου. Για παράδειγμα, θα μπορούσαμε να ελέγχουμε το πλήθος των αδρανών σωματιδίων σε κάθε επανάληψη και να τερματίζαμε την εκτέλεση όταν αυτό το πλήθος ξεπερνούσε ένα συγκεκριμένο αριθμό. Για να γίνει αυτό όμως, θα έπρεπε εκ των προτέρων να έχουμε ορίσει ένα αποδεκτό σφάλμα της μεθόδου και να έχουμε δείξει ότι δεν πρόκειται η μέθοδος να ξεπεράσει αυτό το σφάλμα.

Στην περίπτωση που θέλουμε να διορθώσουμε το πρόβλημα αυτό, μία ιδέα είναι να εκμεταλλευτούμε το κριτήριο τερματισμού που μόλις αναφέρθηκε για να ξεκινήσουμε μια διαδικασία “μετάλλαξης” της τοπικά βέλτιστης λύσης που βρέθηκε σε κοντινές λύσεις, οι οποίες είναι πιθανό να δίνουν καλύτερες τιμές στην αντικειμενική συνάρτηση. Ακόμη, υπάρχει η λύση να επαναρχικοποιούμε κάθε σωματίδιο που καθίσταται αδρανές είτε με τυχαίο, ή με μερικώς τυχαίο τρόπο βασισμένο στην προηγούμενη θέση του. Τέτοιου είδους παραλλαγές της PSO ονομάζονται *αλγόριθμοι PSO πολλαπλών εκκινήσεων (multi-start PSO)*. Πρέπει να προσέξουμε ότι σε αυτές τις περιπτώσεις ο αλγόριθμος δεν τερματίζει ποτέ και αφήνεται σε εμάς η επιλογή κάποιου κριτηρίου τερματισμού.

Στην παρούσα εργασία, δημιουργήσαμε μια παραλλαγή της μεθόδου gbest PSO, η οποία μετριάζει σημαντικά την πιθανότητα πρόωρης σύγκλισης, αλλά και τροποποιεί τη διαδικασία με την οποία κάθε σωματίδιο ψάχνει στο χώρο των εφικτών λύσεων, έτσι ώστε η αναζήτηση να κατευθύνεται σε περισσότερες κατευθύνσεις ανά πάσα στιγμή από τη μία και μοναδική κατεύθυνση που επιβάλλει η gbest PSO, δηλαδή προς την τρέχουσα συλλογική βέλτιστη θέση. Η συγκεκριμένη τροποποίηση οδηγεί σε αποδοτικότερη προσπέλαση του χώρου εφικτών λύσεων και τα αποτελέσματα που λήφθηκαν ήταν αρκετά ικανοποιητικά, σε σχέση πάντα με το μέγεθος του εκάστοτε προβλήματος.

4.9 Τροποποιημένη μέθοδος gbest PSO.

Κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης της απλής μεθόδου gbest PSO, σε ένα βήμα συμβαίνει το εξής : η κοινωνική συνιστώσα όλων των σωματιδίων που ανήκουν στο σμήνος επηρεάζεται μόνο από τη θέση του σωματιδίου με τη βέλτιστη μέχρι στιγμής λύση. Ως αποτέλεσμα, οι ταχύτητες όλων των σωματιδίων που προκύπτουν, οδηγούν τα σωματίδια προς το τρέχον βέλτιστο, χωρίς να λαμβάνουν υπόψη ότι υπάρχουν και άλλα σωματίδια που θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως “καλοί αρχηγοί”. Με αυτόν τον τρόπο αγνοούνται συνεχώς κατευθύνσεις στις οποίες θα μπορούσαν να κινηθούν τα σωματίδια με πιθανότητα να βρουν βέλτιστες λύσεις και αυξάνεται η πιθανότητα της μεθόδου να καταλήξει σε κάποιο τοπικό βέλτιστο.

Είναι σαφές ότι το πρόβλημα έγκειται στον υπολογισμό της κοινωνικής συνιστώσας της σχέσης (4.4.2) :

$$[\text{gbest}_j(t) - x_{ij}(t)]$$

Η χρήση του συλλογικού βέλτιστου για τον υπολογισμό της κοινωνικής συνιστώσας κάθε σωματιδίου που ανήκει στο σμήνος είναι μία απλούστευση η οποία περιορίζει τη μέθοδο. Ακόμη και μία ματιά στις κοινωνιολογικές ερμηνείες της PSO δείχνει αυτό. Σε έναν πληθυσμό, είναι πιθανό το καταλληλότερο άτομο να είναι “ηγέτης”, αλλά ακόμη πιθανότερο είναι διαφορετικά άτομα να ακολουθούν διαφορετικούς ηγέτες των οποίων η “διαφορά καταλληλότητας” να είναι τόσο μικρή που να καθίσταται ασαφής.

Η πρόταση που γίνεται σε αυτή την εργασία, περιλαμβάνει την αντικατάσταση του διανύσματος θέσης του τρέχοντος βέλτιστου σωματιδίου για τον υπολογισμό της κοινωνικής συνιστώσας, με το διάνυσμα θέσης ενός τυχαία επιλεγμένου σωματιδίου. Ωστόσο, η πιθανότητα επιλογής κάθε σωματιδίου θα εξαρτάται από τον λόγο της τιμής που αποδίδει στην αντικειμενική συνάρτηση η βέλτιστη μέχρι στιγμής θέση του συγκεκριμένου σωματιδίου $f(pbest_i(t))$ προς την τιμή που αποδίδει στην αντικειμενική συνάρτηση η συλλογική βέλτιστη μέχρι στιγμής θέση του σμήνους $f(gbest(t))$. Η κοινωνική συνιστώσα περιγράφεται πλέον ως εξής :

$$[\text{choice}_j(t) - x_{ij}(t)] , \text{choice}(t) \in [pbest_0(t), \dots, pbest_n(t)]$$

με n το μέγεθος του σμήνους.

Το διάνυσμα της ταχύτητας κάθε σωματιδίου είναι πλέον :

$$v_{ij}(t+1) = v_{ij}(t) + c_1 * r_{1j}(t) * [pbest_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 * r_{2j}(t) * [choice_j(t) - x_{ij}(t)] \quad (4.9.1)$$

Αυτό που μένει είναι να ορίσουμε μία επιθυμητή κατανομή, σύμφωνα με την οποία σε κάθε $pbest_i(t)$ θα αντιστοιχίζεται μία συγκεκριμένη πιθανότητα να επιλεγεί ως το στοιχείο $choice(t)$. Αν και δεν μελετήθηκε εκτενώς η διαδικασία με την οποία μπορεί να δημιουργηθεί η κατανομή αυτή, παρακάτω παρατίθεται ο τρόπος με τον οποίο εργαστήκαμε κατά τη δική μας ενδεικτική υλοποίηση του τροποποιημένου αλγορίθμου.

Αρχικά υπολογίστηκε ένα βάρος για κάθε σωματίδιο σύμφωνα με τη λογική που ήδη περιγράφηκε :

$$weight_i(t) = g\left(\frac{f(pbest_i(t))}{f(gbest(t))}\right) \quad (4.9.2)$$

όπου :

- f : η αντικειμενική συνάρτηση.
- g : μία συνάρτηση που μορφοποιεί κατάλληλα το βάρος κάθε σωματιδίου. Εμείς χρησιμοποιήσαμε την $g(x) = x^A$ με $A > 1$, κατάλληλα επιλεγμένο σε κάθε επανάληψη ώστε τα σωματίδια που δεν είναι αρκετά κοντά στη βέλτιστη λύση να έχουν μηδενικό βάρος.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το συνολικό βάρος όλων των σωματιδίων προκειμένου να έχουμε ένα αντικειμενικό μέτρο σύγκρισης όλων των βαρών :

$$totalweight(t) = \sum_{i=1}^S weight_i(t) \quad (4.9.3)$$

όπου S το πλήθος των σωματιδίων που ανήκουν στο σμήνος.

Τέλος, υπολογίστηκε η πιθανότητα που έχει κάθε σωματίδιο να επιλεγεί για χρήση στον υπολογισμό της κοινωνικής συνιστώσας :

$$p(pbest_i(t)) = \frac{weight_i(t)}{totalweight(t)} \quad (4.9.4)$$

Ουσιαστικά, προκειμένου να επιλέξουμε το σωματίδιο που θα δράσει ως κοινωνική συνιστώσα του τρέχοντος σωματιδίου χρησιμοποιούμε επιλογή ρουλέτας (roulette wheel selection), ενώ η διαδικασία υπολογισμού της πιθανότητας επιλογής κάθε σωματιδίου, πρέπει να συμβαίνει στην αρχή του κάθε βήματος της τροποποιημένης μεθόδου που προτείνεται, επειδή οι βέλτιστες ατομικές θέσεις των σωματιδίων που υπάρχουν στο σμήνους πιθανόν αλλάζουν μετά από κάθε επανάληψη. Το γεγονός αυτό, αυξάνει την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, όμως έχει τα πλεονεκτήματα που ήδη αναφέρθηκαν. Το σύνολο των πιθανότερων σωματιδίων προς επιλογή για χρήση στην κοινωνική συνιστώσα ενός συγκεκριμένου σωματιδίου μεταβάλλεται ανάμεσα σε διαφορετικές επαναλήψεις κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης και έτσι ο χώρος αναζήτησης κάθε σωματιδίου μεταβάλλεται επίσης δυναμικά, εξερευνώντας ολόκληρο τον χώρο εφικτών λύσεων πιο αποτελεσματικά.

Η τροποποίηση που προτείνεται παραπάνω δεν επιλύει το πρόβλημα της πρόωρης σύγκλισης, όμως το περιορίζει κατά πολύ. Ο χώρος αναζήτησης κάθε σωματιδίου δεν επικεντρώνεται γύρω από μία βέλτιστη λύση που μπορεί να αλλάζει σπάνια, αλλά γύρω από ένα σύνολο “καλών” λύσεων. Έτσι, περιορίζεται ο κίνδυνος να καταστεί ένα σωματίδιο αδρανές, αλλά δεν εξαλείφεται τελείως σε ακραίες καταστάσεις.

Μία δεύτερη ιδέα που έχει εφαρμοστεί στην εκδοχή της μεθόδου PSO που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία αφορά στον τρόπο αρχικοποίησης των διανυσμάτων θέσης των σωματιδίων. Η απλούστερη λύση θα ήταν τα διανύσματα θέσης να αρχικοποιηθούν τελείως τυχαία, όμως στη συγκεκριμένη υλοποίηση ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η αρχικοποίηση λαμβάνει υπόψη τη φύση του προβλήματος για να δώσει τυχαίες μεν σε κάποιο βαθμό, αλλά ευνοϊκότερες αρχικές τιμές στις αρχικές θέσεις των σωματιδίων. Το πρόβλημα που προσπαθούμε να επιλύσουμε είναι ένα multi-objective πρόβλημα, και πιο συγκεκριμένα ζητούμενη είναι η παράλληλη ελαχιστοποίηση του συνολικού μήκους και των συνολικών απαιτήσεων σε εύρος ζώνης του δικτύου. Πρόκειται για τον συνδυασμό ενός προβλήματος εύρεσης του ελάχιστου συνδετικού δέντρου με βάρη τις αποστάσεις μεταξύ δύο κόμβων και ενός προβλήματος εύρεσης του δικτύου με τις ελάχιστες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης, καθένα από τα οποία είναι δυνατό να λυθεί σε πολυωνυμικό χρόνο. Για την εύρεση του ελάχιστου συνδετικού δέντρου μπορεί να χρησιμοποιηθεί κάποιος από τους αλγόριθμους των Kruskal, Prim ή Boruvka, ενώ το δικτύου ελάχιστου συνολικού εύρους ζώνης είναι ένας αστέρας με κεντρικό κόμβο αυτόν που έχει τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.

Υπολογίζοντας τα δέντρα-λύσεις για καθένα από αυτά τα δύο προβλήματα, μας δίνεται η δυνατότητα να αρχικοποιήσουμε τα διανύσματα θέσεις των σωματιδίων με μεταλλάξεις των παραπάνω σε κυμαινόμενα ποσοστά. Η τεχνική αυτή διατηρεί την τυχαιότητα των αρχικών θέσεων των σωματιδίων, όμως αποφεύγει να λάβει υπόψη αρχικά διανύσματα που πιθανώς θα ήταν πολύ μακριά από τη βέλτιστη λύση. Αποτέλεσμα είναι να παρακάμπτεται ένας μεγάλος αριθμός επαναλήψεων και να βελτιώνεται η αποδοτικότητα της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ειδικά για δίκτυα με μεγάλο αριθμό κόμβων. Είναι σημαντικό να πούμε ότι ενώ για μικρά δίκτυα το ποσοστό μετάλλαξης των λύσεων των επιμέρους προβλημάτων είναι καλό να είναι μεγάλο προκειμένου να αποφευχθεί η “χειραγώγηση” της μεθόδου προς μη βέλτιστες λύσεις, για μεγάλα δίκτυα δεν ισχύει το ίδιο. Μάλιστα, όσο μεγαλύτερο είναι ένα δίκτυο τόσο μικρότερο μπορεί, αλλά και πρέπει αν μας ενδιαφέρει ο χρόνος εκτέλεσης, να είναι το ποσοστό μετάλλαξης των λύσεων των επιμέρους προβλημάτων, μιας και ο αριθμός των κοντινών στη βέλτιστη λύσεων αυξάνει εκθετικά, καθιστώντας τη χειραγώγηση της μεθόδου προς μη βέλτιστες λύσεις αμελητέα.

Τέλος, προκειμένου να έχουμε περιγράψει πλήρως τη διαδικασία με την οποία διενεργείται η βελτιστοποίηση, θα πρέπει να αναφερθούμε και στον τρόπο υπολογισμού της αντικειμενικής συνάρτησης, ο οποίος δεν αφορά ίσως άμεσα την τεχνική PSO αλλά είναι στενά συνυφασμένος με τη λειτουργία της. Στην παρούσα εργασία, το μέγεθος που αντιπροσωπεύει η αντικειμενική συνάρτηση είναι το χρηματικό κόστος κατασκευής της τοπολογίας δικτύου που προκύπτει κάθε φορά ως πρόταση από την επαναληπτική διαδικασία της PSO.

Η PSO επιστρέφει στην αντικειμενική συνάρτηση ένα κωδικοποιημένο προτεινόμενο συνδεδετικό δέντρο, οπότε η δεύτερη πρέπει πρώτα να αποκωδικοποιήσει το NetKey και στη συνέχεια να εισέλθει σε μια αναδρομική διαδικασία υπολογισμού του κόστους κάθε ακμής-σύνδεσης του δικτύου, με βάση τα κόστη των ακμών που συνδέονται στους κόμβους-παιδιά του τρέχοντος κόμβου. Εφόσον κάθε κόμβος αντιπροσωπεύει μία διοικητική υποδιαίρεση πληθυσμού (πόλη, χωριό, κλπ), τότε είναι δυνατό να χρησιμοποιηθούν διαφορετικά σχήματα καθορισμού των ευρυζωνικών αναγκών κάθε κόμβου σύμφωνα με δημογραφικά στοιχεία και άλλους παράγοντες. Ακόμη, επειδή υπάρχουν καθορισμένες τιμές για συνδέσεις συγκεκριμένης χωρητικότητας, ο υπολογισμός του συνολικού κόστους κατασκευής αποτελεί μια απλή αναδρομική, αθροιστική διαδικασία.

Έστω ότι το δίκτυο παριστάνεται από ένα συνδεδεμένο γράφο $G = (V, L)$, όπου V το σύνολο των κόμβων και L το σύνολο των ακμών. Οι επικοινωνιακές ανάγκες ανάμεσα σε $|V|$ κόμβους

καθορίζονται από έναν διδιάστατο πίνακα απαιτήσεων $R = (r_{ij})$ διαστάσεων $|V| \times |V|$, όπου r_{ij} είναι ο όγκος της κίνησης δεδομένων μεταξύ των κόμβων i, j για κάθε $i, j \in V$. Ένας δεύτερος πίνακας $D = (d_{ij})$ διαστάσεων $|V| \times |V|$ αναπαριστά την απόσταση ανάμεσα στους κόμβους i, j για κάθε $i, j \in V$. Η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να περιγραφεί από στη σχέση που ακολουθεί :

$$\min \sum_{l \in L} f(d_l, C_l), \text{ όπου } F_l < C_l$$

Η παράμετρος d_l αναπαριστά τα βάρη αποστάσεων για κάθε σύνδεση $l \in L$ που χρησιμοποιείται στην τοπολογία, ενώ το $C_l = \sum_{k \in I_l} m_{lk} Q_{lk} y_{lk}$ είναι η χωρητικότητα της σύνδεσης. Η μεταβλητή y_{lk} παριστάνει αν ο τύπος σύνδεσης $k \in I_l$ χρησιμοποιείται στη σύνδεση $l \in L$. Η μεταβλητή Q_{lk} είναι το κόστος των συνδέσεων τάξης χωρητικότητας $k \in I_l$, ενώ το m_{lk} αντιπροσωπεύει την πολλαπλότητα χρήσης μιας σύνδεσης τάξης $k \in I_l$ για την κατασκευή της συνολικής σύνδεσης $l \in L$. Τέλος, η ποσότητα F_l αντιπροσωπεύει την κίνηση δεδομένων που ρέει άμεσα και έμμεσα πάνω στη σύνδεση $l \in L$.

4.10 Ψευδοκώδικας τροποποιημένης μεθόδου gbest PSO.

Ο κώδικας που παρατίθεται στη συνέχεια, περιλαμβάνει όσες τροποποιήσεις περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους.

- Δημιούργησε ένα σμήνος N σωματιδίων διάστασης n_x .
- Αρχικοποίησε το διάνυσμα θέσης κάθε σωματιδίου με μερικούς τυχαίες τιμές, οι οποίες προκύπτουν από την τυχαία μετάλλαξη των βέλτιστων λύσεων για καθένα από τα προβλήματα εύρεσης του ελάχιστου συνδετικού δέντρου και της εύρεσης του δικτύου με τις ελάχιστες συνολικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης.
- Επανάλαβε μέχρι να ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού :
 - Για κάθε σωματίδιο που ανήκει στο σμήνος ανανέωσε την προσωπική του βέλτιστη θέση σύμφωνα με τη σχέση (4.4.3).
 - Ανανέωσε την πιθανότητα κάθε σωματιδίου να επιλεγεί για χρήση στον υπολογισμό της κοινωνικής συνιστώσας ενός άλλου τυχαίου σωματιδίου.
 - Για κάθε σωματίδιο που ανήκει στο σμήνος :
 - Επέλεξε τυχαία, με βάση την τρέχουσα κατανομή ένα σωματίδιο που θα χρησιμοποιηθεί στον υπολογισμό της κοινωνικής συνιστώσας του τρέχοντος σωματιδίου.

- Ανανέωσε την ταχύτητά του σύμφωνα με τη σχέση (4.9.1).
- Ανανέωσε τη θέση του σύμφωνα με τη σχέση (4.4.1).
- Κανονικοποίησε το διάνυσμα θέσης, ώστε οι τιμές που περιλαμβάνει να ανήκουν σε ένα κοινό σύνολο τιμών προτεραιοτήτων.
- Κανονικοποίησε το διάνυσμα της ταχύτητας, ώστε να υποδεικνύει την πραγματική ταχύτητα που ανέπτυξε το σωματίδιο κατά τη διάρκεια της τρέχουσας επανάληψης.

4.11 Συγκριτικές δοκιμές λειτουργίας της τροποποιημένης μεθόδου gbest PSO και συμπεράσματα.

Πριν προχωρήσουμε στην παράθεση των συγκριτικών στατιστικών αποτελεσμάτων που λάβαμε από την εκτέλεση των διαφορετικών μεθόδων PSO, θα ήταν σωστό να αναφερθούμε πρώτα στις μεθόδους αυτές, στις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη εκτέλεσή τους, αλλά και στον σκοπό των συγκρίσεων που έγιναν, προκειμένου να είναι σαφές σε τί αφορούν αυτές οι συγκρίσεις και τί είναι πέρα από το πεδίο των ενδιαφερόντων μας.

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, η τροποποιημένη μέθοδος στην οποία καταλήξαμε και στην οποία θα αναφερόμαστε με τον όρο *new PSO*, είναι βασισμένη στη μέθοδο gbest PSO και η σύγκριση μεταξύ των δύο μπορεί να δώσει ασφαλή συμπεράσματα για το αν κάποια υπερισχύει της άλλης. Ωστόσο, δε θα έπρεπε να κάνουμε το λάθος να προβούμε σε σύγκριση της *new PSO* με τη μέθοδο lbest PSO που χρησιμοποιεί γειτονίες προκειμένου να αποφύγει την πρόωρη σύγκλιση σε τοπικά βέλτιστα. Τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης σύγκρισης θα ευνοούσαν πιθανώς κάποια από τις δύο μεθόδους, όμως θα είχαμε αγνοήσει το γεγονός ότι με τον ίδιο τρόπο που η *new PSO* ενσωματώθηκε στην gbest PSO, μπορεί να ενσωματωθεί και στην lbest PSO, αφού οι ίδιες ιδέες που εφαρμόστηκαν σε ολόκληρο τον πληθυσμό μπορούν να εφαρμοστούν και σε οποιαδήποτε γειτονιά μικρότερη από αυτόν. Ουσιαστικά, η *new PSO* αποτελεί ένα σύνολο πιθανών βελτιώσεων για οποιαδήποτε άλλη μέθοδο.

Στην παρούσα εργασία, έγιναν συγκρίσεις μεταξύ δύο παραλλαγών καθεμίας από τις μεθόδους gbest και *new PSO*. Οι παραλλαγές για την κάθε μέθοδο αφορούν τον τρόπο με τον οποίο αρχικοποιήθηκε ο πληθυσμός της σύμφωνα με τις προτάσεις που έγιναν στην παράγραφο 4.9. Δηλαδή για καθεμία από τις δύο τεχνικές έγινε διερεύνηση τόσο της τυχαίας αρχικοποίησης πληθυσμού, όσο και της μερικώς τυχαίας αρχικοποίησης πληθυσμού με βάση μεταλλάξεις του ελάχιστου συνδετικού δέντρου και του δέντρου με τις μικρότερες απαιτήσεις σε συνολικό εύρος ζώνης. Θα χρησιμοποιήσουμε τους όρους *random* και *biased* για να περιγράψουμε τους δύο τρόπους αρχικοποίησης πληθυσμού αντίστοιχα.

Συγκεντρωτικά, οι τέσσερις μέθοδοι μεταξύ των οποίων έγιναν συγκρίσεις είναι οι εξής :

1. *Random gbest PSO* : Πρόκειται για την αυθεντική μέθοδο PSO ολικού βέλτιστου.
2. *Biased gbest PSO* : Μέθοδος PSO ολικού βέλτιστου με μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού.

3. *Random new PSO* : Τροποποιημένη μέθοδος gbest PSO με τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού.
4. *Biased new PSO* : Τροποποιημένη μέθοδος gbest PSO με μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού.

Τέλος, θα αναφερθούμε στις παραμέτρους που χρησιμοποιήθηκαν κατά την εκτέλεση των μεθόδων και ήταν κοινές για όλες τις εκτελέσεις. Καταρχήν θα πρέπει να πούμε ότι ενώ δε χρησιμοποιήθηκε κάποια μέγιστη τιμή για την ταχύτητα, η κανονικοποίησή της σε συνάρτηση με την κανονικοποίηση του διανύσματος θέσης μετά από κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 4.7.2, λειτουργεί ουσιαστικά με τον ίδιο τρόπο. Επίσης, ως βάρος αδράνειας έχει χρησιμοποιηθεί ένα σχήμα πολλαπλασιασμού της προηγούμενης ταχύτητας του κάθε σωματιδίου με έναν τυχαίο αριθμό που ανήκει στο διάστημα $[0, 1]$. Το γεγονός αυτό επιτρέπει στην ατομική και στην κοινωνική συνιστώσα να επηρεάζουν την κατεύθυνση των σωματιδίων κατά κύριο λόγο.

Όσον αφορά στις βέλτιστες τιμές για τις παραμέτρους επιτάχυνσης των ατομικών και κοινωνικών συνιστωσών, διαπιστώθηκε ότι αυτές εξαρτώνται από την εκάστοτε χρησιμοποιούμενη τεχνική, ωστόσο βρίσκονται σχεδόν πάντα στο διάστημα $[1.0, 1.3]$. Επιλέχτηκε να χρησιμοποιηθεί ένα δυναμικό σχήμα ανανέωσής των συγκεκριμένων τιμών, το οποίο θα κυμαίνεται ανάμεσα στα δύο προαναφερθέντα όρια ανάλογα με το ποσοστό των σωματιδίων που έχουν συγκλίνει σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου. Σε περίπτωση που κανένα σωματίδιο δεν έχει ταυτιστεί με κάποιο άλλο, η τιμή της παραμέτρου θα είναι 1.0 ώστε οι χώροι αναζήτησης καθενός σωματιδίου να παραμένουν μικροί, ευνοώντας την πιο εξαντλητική αναζήτηση καλών περιοχών. Όταν όλα τα σωματίδια έχουν ταυτιστεί μεταξύ τους, η τιμή των παραμέτρων επιτάχυνσης γίνεται ίση με 1.3, μεγαλώνοντας την περιοχή αναζήτησης κάθε σωματιδίου για πιθανή εύρεση νέων βέλτιστων έξω από την περιοχή του τρέχοντος βέλτιστου.

Οι παράμετροι που αφορούν στο μέγεθος του πληθυσμού και στον αριθμό των γενεών τροποποιήθηκαν ανάλογα με την κάθε δοκιμή προκειμένου να εξυπηρετήσουν τους σκοπούς μας και να αναδείξουν τα σημεία στα οποία θέλουμε να σταθούμε. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι γενικά δεν αυξήθηκε ο πληθυσμός με την αύξηση του μεγέθους του προβλήματος κάθε δοκιμής για δύο λόγους. Ο πρώτος είναι ότι η αναπαράσταση των διανυσμάτων θέσης με τη μέθοδο NetKeys καθιστά εκτέλεση της μεθόδου υπερβολικά χρονοβόρα μετά από κάποιο συγκεκριμένο μέγεθος προβλήματος και πολύ περισσότερο όταν ταυτόχρονα αυξηθεί και ο χρησιμοποιούμενος πληθυσμός. Ο δεύτερος λόγος είναι ότι ουσιαστικά δε μας ενδιαφέρει η εξαντλητική μελέτη του

κάθε αλγορίθμου αλλά η μεταξύ τους σύγκριση, που μπορεί να γίνει αρκεί ο πληθυσμός που χρησιμοποιείται με διαφορετικές μεθόδους να παραμένει ίδιος.

4.11.1 Σύγκριση μεθόδων gbest PSO και new PSO για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού.

Αρχικά συγκρίθηκε η απόδοση των αλγορίθμων gbest και new PSO για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού, προκειμένου να διαπιστωθεί αν κάποιος από τους δύο παρουσιάζει σαφές πλεονέκτημα έναντι του άλλου. Η σύγκριση έγινε για την αποτελεσματικότητα της κάθε μεθόδου σε ένα πρόβλημα με μία σχετικά μικρή είσοδο 20 κόμβων, αλλά και σε ένα πρόβλημα με είσοδο 80 κόμβων, ώστε να παρατηρηθεί το πιθανό πλεονέκτημα κάποιας από τις δύο μεθόδους σε προβλήματα αυξημένης κλίμακας. Ακόμη, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η εκτέλεση κάθε αλγορίθμου έγινε για πληθυσμό 100 ατόμων και για 100 γενιές.

Τα αποτελέσματα που παρατίθενται στη συνέχεια αφορούν τις μέσες τιμές που προέκυψαν από 100 ανεξάρτητες εκτελέσεις καθενός από τους 4 αλγόριθμους που απαριθμήθηκαν στην αμέσως προηγούμενη ενότητα. Στα γραφήματα 4.11.1.1-4 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά οι μέσες τιμές του ευρεθέντος ανά γενιά της εκτέλεσης κάθε αλγορίθμου κόστους κατασκευής ενός δικτύου, με βάση την είσοδο των 20 και 80 κόμβων αντίστοιχα, αλλά και οι μέσες τιμές των σωματιδίων που δεν έχουν συγκλίνει στην κάθε επανάληψη της διαδικασίας βελτιστοποίησης, οι οποίες μπορούν να ληφθούν ως δείγμα σύγκλισης και κατ' επέκταση τερματισμού του κάθε αλγορίθμου.

Η πιο προφανής παρατήρηση στην οποία μπορούμε να προβούμε από τα διαγράμματα κόστους για 20 και 80 κόμβους, είναι ότι η χρήση μερικώς τυχαίας αρχικοποίησης πληθυσμού, αποφέρει άμεσο πλεονέκτημα έναντι της τυχαίας αρχικοποίησης πληθυσμού, όπως άλλωστε αναμενόταν. Τόσο η εκτέλεση της biased new PSO όσο και της biased gbest PSO ξεκινάει με σημαντικό προβάδισμα έναντι των δύο άλλων μεθόδων, ενώ από το διάγραμμα 4.11.1.3 καταλαβαίνουμε ότι, δοθέντος αρκετά μεγάλου μεγέθους προβλήματος, η χρήση μερικώς τυχαίας αρχικοποίησης πληθυσμού μπορεί να αποβεί καθοριστικότερη της χρήσης new PSO έναντι gbest PSO, τουλάχιστον για συγκεκριμένο πλήθος γενεών.

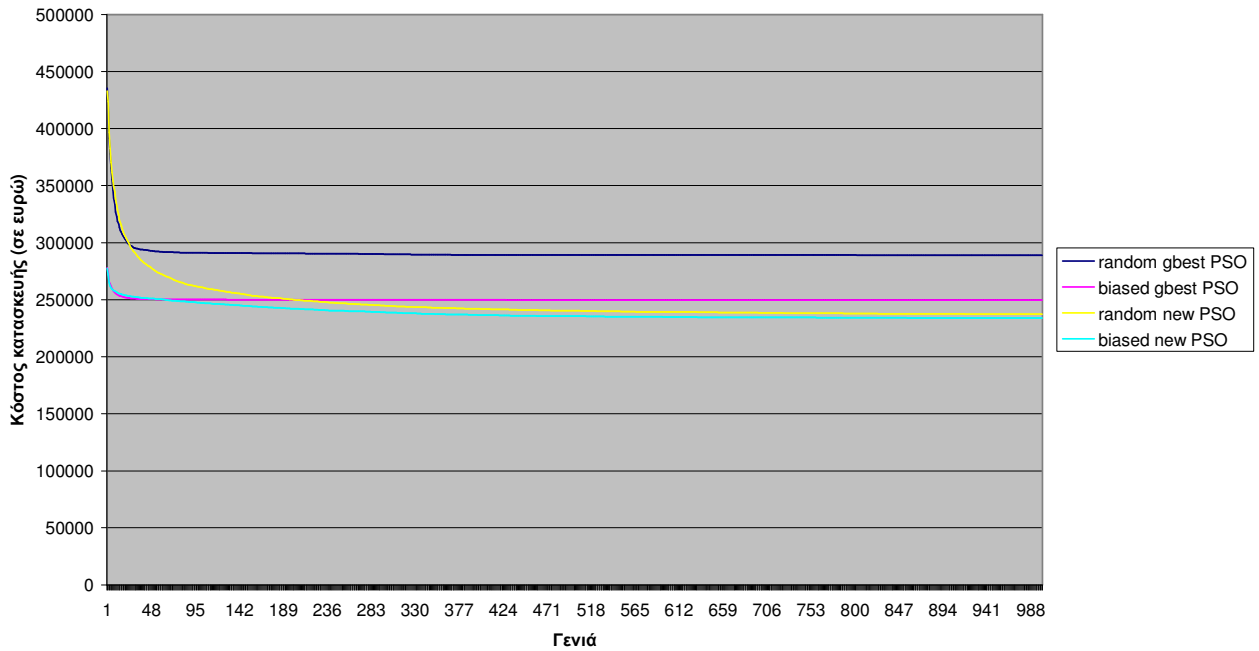
Ωστόσο, δεν θα πρέπει να καταλήξουμε σε τελικά συμπεράσματα χωρίς να ελέγξουμε και τα διαγράμματα σύγκλισης. Με μια γρήγορα ματιά, βλέπουμε ότι τόσο η random new PSO όσο και η biased new PSO αποδεικνύονται πολύ πιο ανθεκτικές στην πρόωρη σύγκλιση από τις αντίστοιχες παραλλαγές της gbest PSO. Για δείγμα 20 κόμβων οι προαναφερθείσες δύο μέθοδοι όχι μόνο

καταλήγουν σε καλύτερα κόστη κατασκευής, αλλά συγκλίνουν σημαντικά αργότερα, με αποτέλεσμα να διερευνούν το χώρο αναζήτησης πολύ διεξοδικότερα. Πρέπει ακόμα να προσέξουμε ότι παρά το σαφές αρχικό προβάδισμα της *biased gbest PSO* έναντι της *random new PSO*, η ανθεκτικότητα της δεύτερης στην πρόωρη σύγκλιση της επιτρέπει σχετικά γρήγορα να καταλήξει σε καλύτερες τιμές κόστους κατασκευής από την πρώτη. Όσον αφορά στο δείγμα 80 κόμβων βλέπουμε ακριβώς την ίδια συμπεριφορά. Οι παραλλαγές της *gbest PSO* συγκλίνουν πολύ νωρίς και για το μεγαλύτερο μέρος των επαναλήψεων παραμένουν ουσιαστικά αδρανείς, ενώ κατά την εκτέλεση της τελευταίας γενιάς, οι παραλλαγές της *new PSO* δεν έχουν συγκλίνει δραστικά και συνεχίζουν να επιτελούν το έργο τους. Έτσι, ενώ όπως αναφέραμε ήδη η *biased gbest PSO* φαίνεται να καταλήγει σε μικρότερο κόστος κατασκευής από την *random new PSO* για 80 κόμβους και 1000 γενιές, έχει επίσης συγκλίνει πολύ νωρίς τη στιγμή που η δεύτερη δεν έχει συγκλίνει σχεδόν καθόλου και συνεχίζει να εργάζεται με τάση να φτάσει ή να ξεπεράσει τα αποτελέσματα της *biased gbest PSO* κάποια στιγμή το μέλλον.

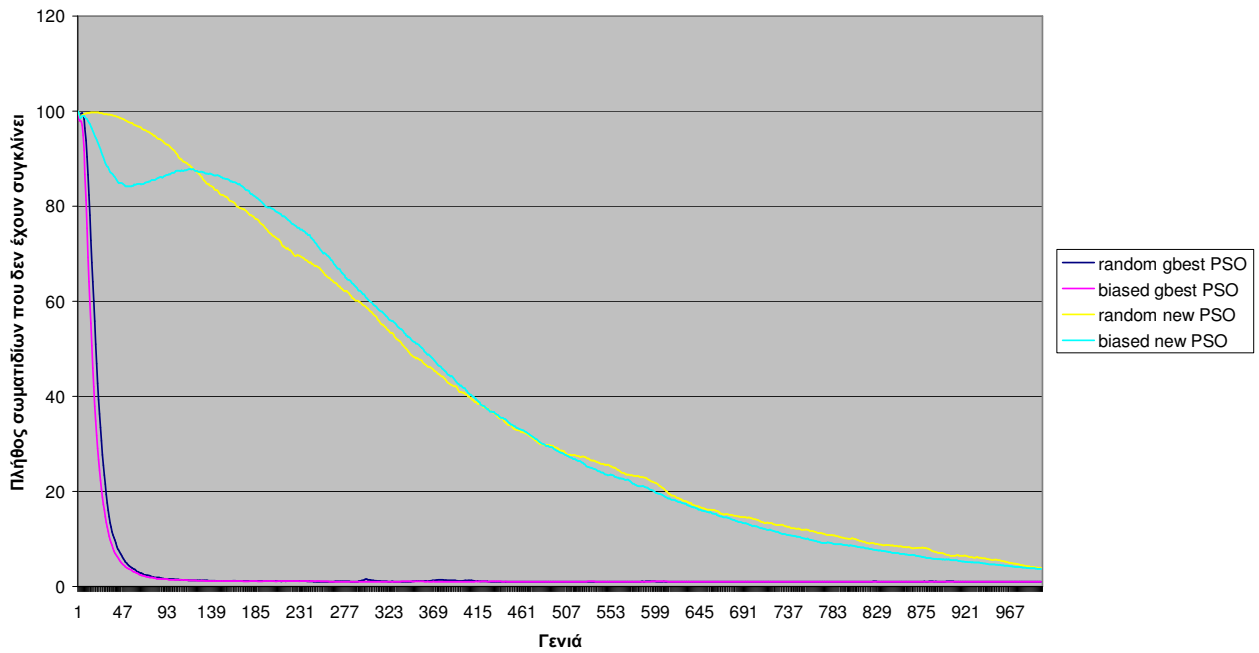
Η τελευταία παρατήρηση στάθηκε αφορμή για να διερευνήσουμε περαιτέρω την αποτελεσματικότητα της παρουσιαζόμενης ως καλύτερης από της δύο παραλλαγές της *gbest PSO*, δηλαδή της *biased gbest PSO*, σε σύγκριση με την παρουσιαζόμενη ως χειρότερη από τις δύο παραλλαγές της *new PSO*, την *random new PSO*. Αυτή τη φορά χρησιμοποιήθηκε ένα δείγμα 40 κόμβων, λήφθηκαν 100 μετρήσεις από την εκτέλεση της κάθε μεθόδου και ο αριθμός γενεών ήταν κοινός και ίσος με 1000. Για την *biased gbest PSO* ο πληθυσμός τέθηκε ίσος με 1000, ενώ για την *random new PSO* ο πληθυσμός ήταν 50 σωματίδια. Όπως καταλαβαίνουμε, η πρώτη μέθοδος είχε σαφή πλεονεκτήματα έναντι της δεύτερης : μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού που της προσέφερε ένα μεγάλο αρχικό προβάδισμα και 20πλάσιο πληθυσμό που της προσέφερε δυνατότητα για πολύ εξαντλητικότερη εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης και μειωμένη πιθανότητα πρόωρης σύγκλισης. Το μοναδικό μειονέκτημα ήταν ότι ο 20πλάσιος πληθυσμός ουσιαστικά καθιστούσε τον χρόνο εκτέλεσής της τουλάχιστον 20πλάσιο της *random new PSO*. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο ζεύγος διαγραμμάτων 4.11.1.5 και 4.11.1.6.

Από το διάγραμμα κόστους παρατηρούμε τα κόστη κατασκευής που προκύπτουν από την εκτέλεση των δύο αλγορίθμων με τις προηγουμένως περιγραφείσες παραμέτρους δείχνουν μόνο ένα σχετικά μικρό πλεονέκτημα της *biased gbest PSO* (περίπου 80000 ευρώ), παρά τα σαφή πλεονεκτήματα που της προσφέραμε, αλλά και τον πολύ περισσότερο χρόνο που επενδύσαμε στην εκτέλεσή της. Ακόμη, από το διάγραμμα σύγκλισης, καταλαβαίνουμε ότι η συγκεκριμένη μέθοδος δεν μπορεί πλέον να μας προσφέρει καλύτερες τιμές κόστους κατασκευής, τη στιγμή που η *random new PSO* παραμένει λειτουργική, έστω και σε αρκετά μικρότερο βαθμό, έως το τέλος.

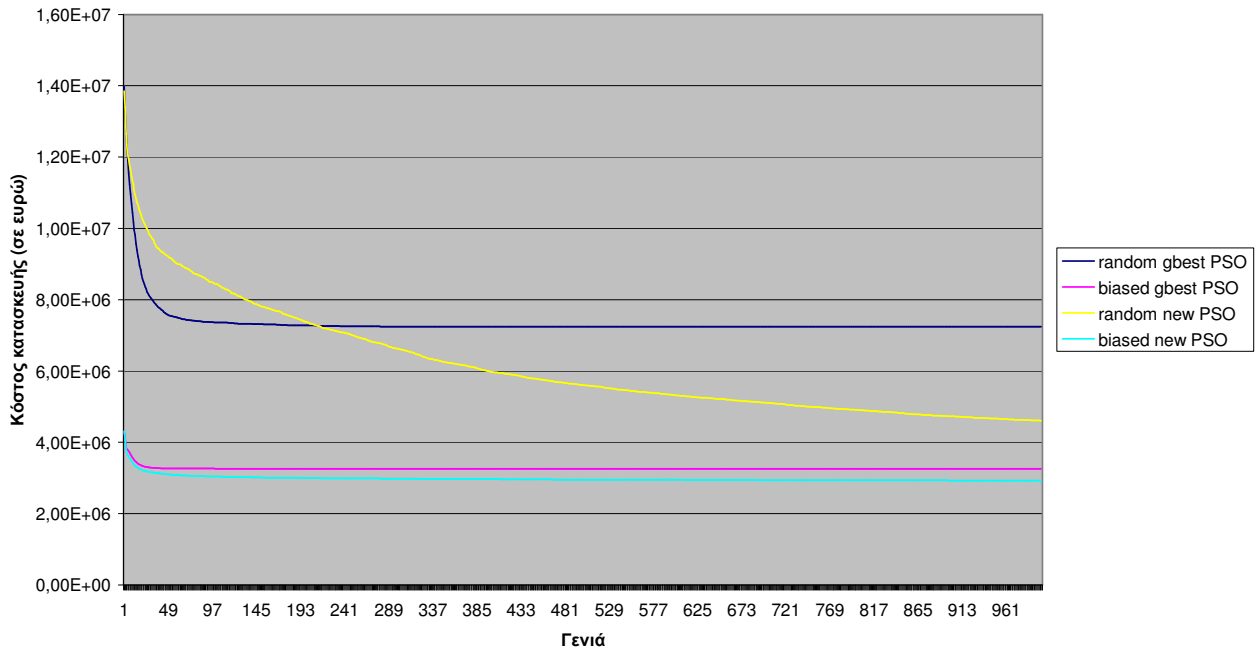
Γράφημα 4.11.1.1 - Σύγκριση κόστους κατασκευής για καθεμία από τις τέσσερις μεθόδους σε δείγμα 20 κόμβων.



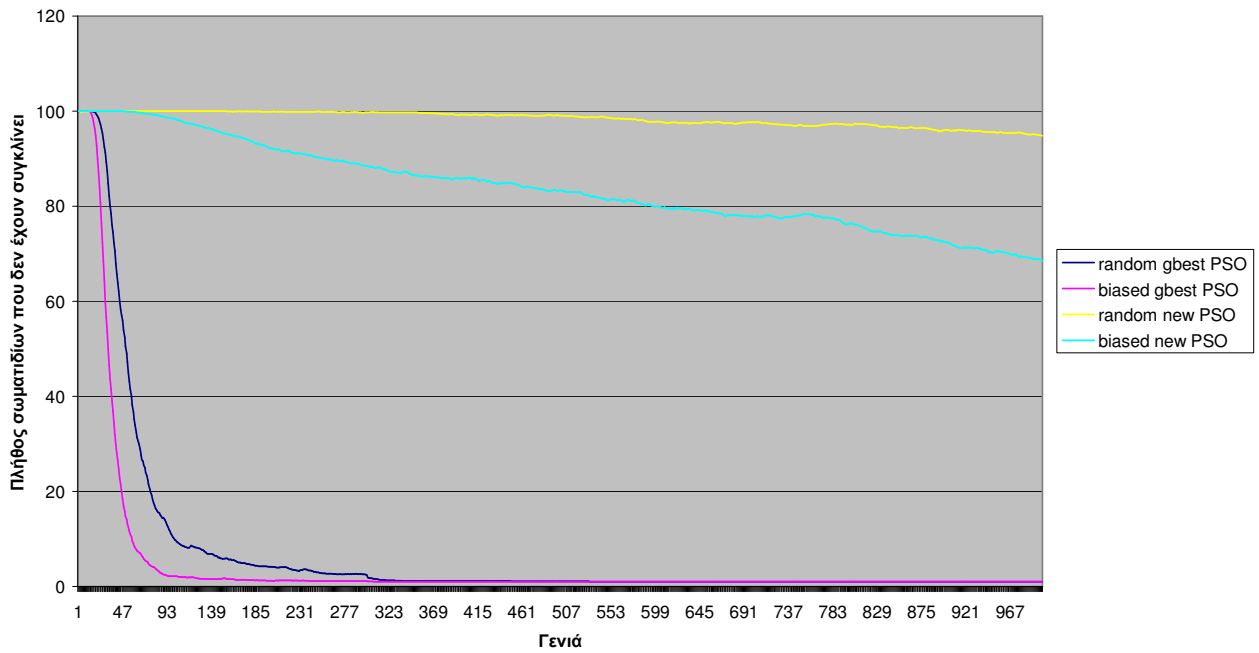
Γράφημα 4.11.1.2 - Σύγκριση πλήθους σωματιδίων που δεν έχουν συγκλίνει για καθεμία από τις τέσσερις μεθόδους σε δείγμα 20 κόμβων.



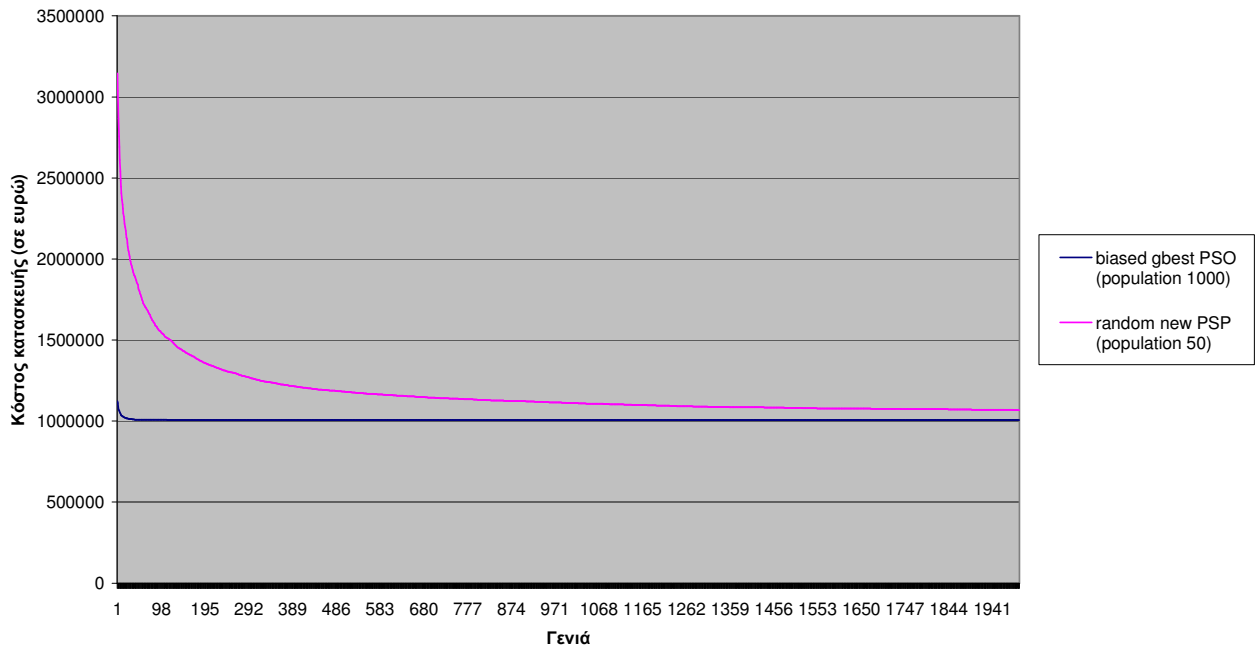
Γράφημα 4.11.1.3 - Σύγκριση κόστους κατασκευής για καθεμία από τις τέσσερις μεθόδους σε δείγμα 80 κόμβων.



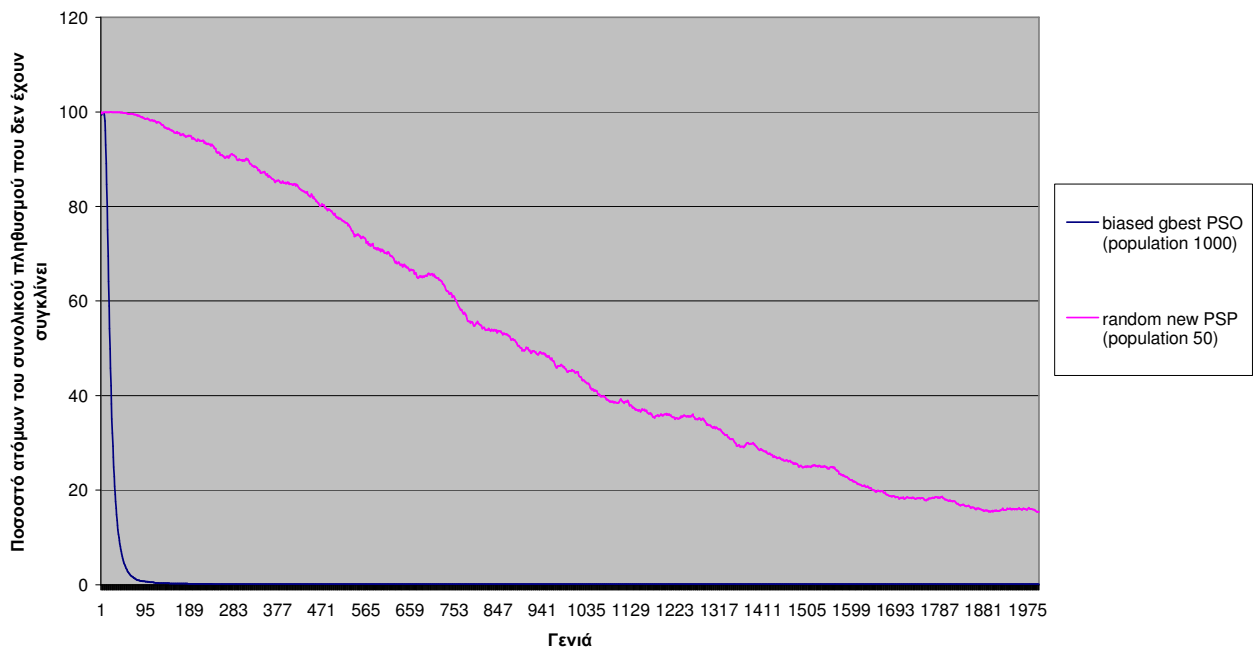
Γράφημα 4.11.1.4 - Σύγκριση πλήθους σωματιδίων που δεν έχουν συγκλίνει για καθεμία από τις τέσσερις μεθόδους σε δείγμα 80 κόμβων.



Γράφημα 4.11.1.5 - Σύγκριση κόστους κατασκευής για την εκτέλεση biased gbest PSO με πληθυσμό 1000 ατόμων και την εκτέλεση random new PSO με πληθυσμό 50 ατόμων.



Γράφημα 4.11.1.6 - Σύγκριση σύγκλισης για την εκτέλεση biased gbest PSO με πληθυσμό 1000 ατόμων και την εκτέλεση random new PSO με πληθυσμό 50 ατόμων.



4.11.2 Σύγκριση σχημάτων αρχικοποίησης πληθυσμού για τη μέθοδο new PSO.

Οι προηγούμενες μετρήσεις έδειξαν ένα πλεονέκτημα της μεθόδου new PSO έναντι της gbest PSO που αρκεί για να διαπιστώσουμε την γενικότερη υπεροχή της πρώτης, όμως δεν αρκούν προκειμένου να φανεί αν υπάρχει κάποιο σημαντικό πλεονέκτημα στη χρήση κάποιου συγκεκριμένου σχήματος αρχικοποίησης πληθυσμού σε συνάρτηση με τη new PSO, όσο αυξάνει η κλίμακα του προβλήματος. Ένα νέο σύνολο δοκιμών έγινε ώστε να διαπιστωθεί η αποτελεσματικότητα της random new PSO έναντι της biased new PSO σε αυξανόμενο δείγμα κόμβων.

Η εκτέλεση κάθε αλγορίθμου επαναλήφθηκε 100 φορές, ο αριθμός των γενεών ήταν και πάλι ίσος με 1000, ενώ άσχετα με το μέγεθος του προβλήματος χρησιμοποιήθηκε πληθυσμός 100 ατόμων. Λήφθηκαν δεδομένα για εισόδους 20, 40, 60, 80 και 100 κόμβων, τα οποία παρουσιάζονται στα διαγράμματα 4.11.2.1-10.

Όπως και με τις προηγούμενες μετρήσεις, έτσι και με τις παρούσες παρατηρούμε αμέσως το σημαντικό προβάδισμα που προσδίδει η χρήση μερικώς τυχαίας αρχικοποίησης πληθυσμού κατά την εκτέλεση της new PSO. Βλέπουμε ότι η biased new PSO καταλήγει σε καλύτερα αποτελέσματα για κάθε μέγεθος προβλήματος, ωστόσο η διαφορά ανάμεσα στο αποτέλεσμά της και στο αποτέλεσμα της random new PSO τείνει να γίνει πολύ μεγαλύτερη όσο αυξάνει το πλήθος των κόμβων που χρησιμοποιείται ως είσοδος. Για προβλήματα αρκετά μικρού μεγέθους η επιλογή μιας από τις δύο μεθόδους δεν προσδίδει κάποιο ιδιαίτερο πλεονέκτημα, αφού και ο χρόνος εκτέλεσης των δύο μεθόδων σε αυτές τις περιπτώσεις είναι αμελητέος, αλλά και καταλήγουν σε συγκρίσιμα κόστη δικτύων συγκλίνοντας σχεδόν σε ίδιο αριθμό γενεών, όπως φαίνεται από το διάγραμμα 4.11.2.2 που αφορά δείγμα 20 κόμβων. Βέβαια, σε πραγματικές εφαρμογές όπου η εξοικονόμηση οσοδήποτε μικρού ποσού είναι σημαντική, η biased new PSO παρουσιάζει ένα μικρό πλεονέκτημα.

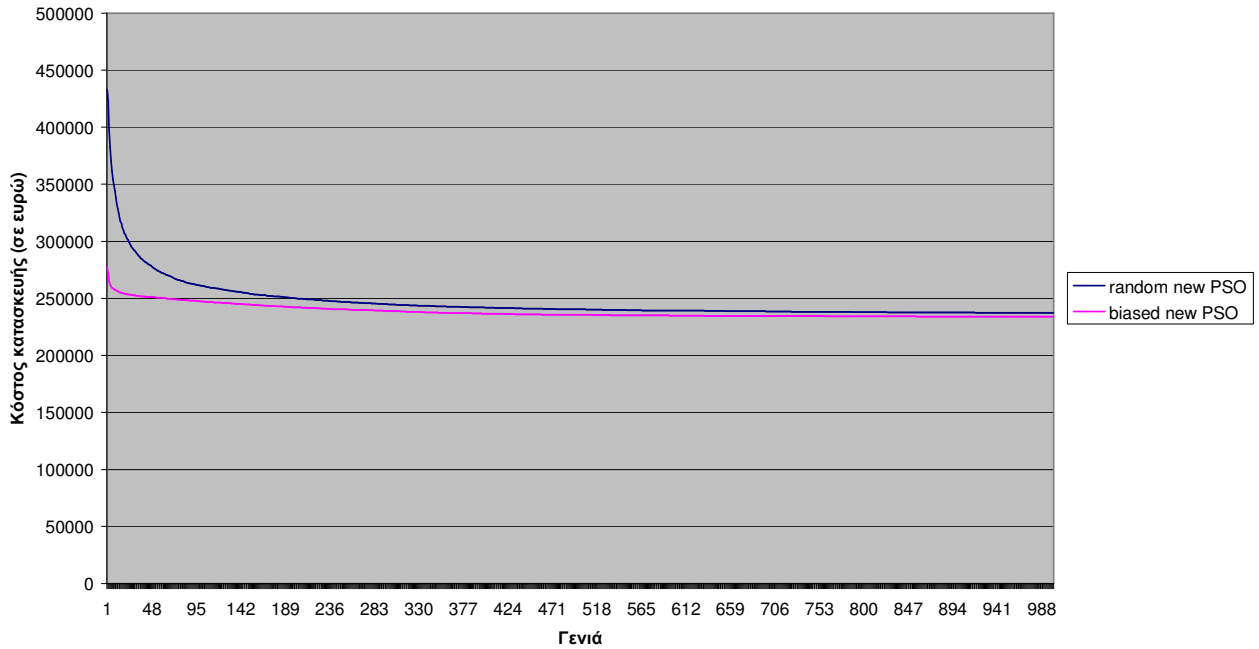
Σε προβλήματα μεγάλου μεγέθους, φαίνεται ότι για συγκεκριμένο αριθμό γενεών, τουλάχιστον μικρότερο των 1000, η biased new PSO προσφέρει αρκετά σημαντικότερο πλεονέκτημα, αφού για παράδειγμα σε δείγμα 100 κόμβων η μέση διαφορά κόστους κατασκευής που προκύπτει από την εφαρμογή της σε σύγκριση με την εφαρμογή της random new PSO είναι της τάξης των 2 εκατομμυρίων ευρώ. Όμως, πριν αποφανθούμε οριστικά για το ποιά είναι η αποτελεσματικότερη μέθοδος θα πρέπει να εξετάσουμε τί συμβαίνει με τη σύγκλιση. Εξετάζοντας το αντίστοιχο διάγραμμα σύγκλισης διαπιστώνουμε ότι κατά το τέλος της εκτέλεσης καμία από τις δύο μεθόδους δεν έχει συγκλίνει δραστικά, όμως η random new PSO έχει συγκλίνει ελάχιστα, τη στιγμή που μόνο

το 70% των σωματιδίων της biased new PSO επιτελεί ακόμη τη λειτουργία του στο ακέραιο. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί να υποθέσουμε ότι παρόλο που η random new PSO υστερεί μέχρι στιγμής στον υπολογισμό του ελάχιστου κόστους κατασκευής, είναι, όχι απαραίτητα, πιθανό να συνεχίσει να εκτελείται για μεγαλύτερη διάρκεια από τη biased new PSO, καταλήγοντας τελικά σε ένα συγκρίσιμο ή και καλύτερο αποτέλεσμα.

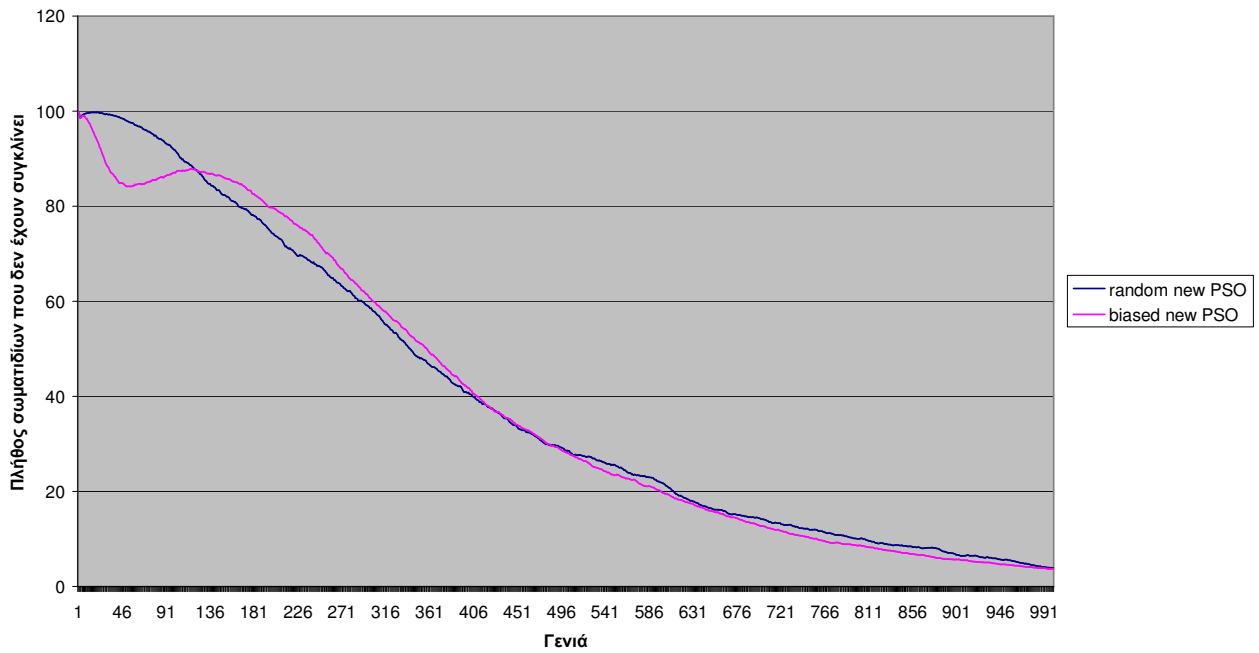
Η υπόθεση που γίνεται παραπάνω ωστόσο για την πιθανή αποτελεσματικότητα της χρήση τυχαίας αρχικοποίησης πληθυσμού πρέπει να αξιολογηθεί με βάσει ποικίλους παράγοντες. Καταρχήν, υπάρχουν ήδη δεδομένα που δείχνουν και τις δύο μεθόδους να εκτελούνται σε δείγμα 20 κόμβων, αρκετά μικρό ώστε να είναι επαρκής ο πληθυσμός των 100 ατόμων που έχει χρησιμοποιηθεί, και να καταλήγουν σε συγκρίσιμα αποτελέσματα όταν και οι δύο μέθοδοι πλέον έχουν συγκλίνει. Μάλιστα, όπως ειπώθηκε ήδη, ακόμη και σε αυτή την περίπτωση η biased new PSO παρουσιάζεται να έχει ένα μικρό πλεονέκτημα. Επιπροσθέτως, πρέπει να θυμηθούμε ότι με την αύξηση του μεγέθους του προβλήματος, η κωδικοποίηση NetKeys οδηγεί σε μεγάλη αύξηση του χρόνου εκτέλεσης του αλγορίθμου, γεγονός που καθιστά απαγορευτικό τον καθορισμό του πληθυσμού και του πλήθους γενεών σε πολύ υψηλές τιμές. Ακόμη κι αν θέταμε τον αριθμό των γενεών σε πολλαπλάσια τιμή, προκειμένου να δώσουμε την ευκαιρία στη μέθοδο random new PSO να ανακαλύψει καλύτερες τοπολογίες δικτύων από την άποψη του κόστους κατασκευής, η επιλογή αυτή θα μπορούσε να αποδειχθεί υπερβολικά χρονοβόρα, καθιστώντας τη μέθοδο μη πρακτική. Τέλος, το πλεονέκτημα που φαίνεται να παρουσιάζει η random new PSO σχετικά με την ανθεκτικότητα στην πρόωρη σύγκλιση, είναι πιθανό να οφείλεται στο γεγονός ότι απλά δεν έχει πλησιάσει αρκετά τη βέλτιστη λύση, όπως η biased new PSO, με αποτέλεσμα να μη δυσκολεύεται κάθε σωματίδιο να βρει μία καλύτερη βέλτιστη τιμή μέχρι στιγμής.

Συμπερασματικά, τα στατιστικά στοιχεία από την εκτέλεση των δύο μεθόδων που προαναφέρθηκαν, δείχνουν ότι η χρήση της μερικώς τυχαίας αρχικοποίησης πληθυσμού προσφέρει ένα άμεσο πλεονέκτημα, που είναι η αρχικοποίηση του πληθυσμού με τοπολογίες δικτύων που βρίσκονται σχετικά κοντά στη βέλτιστη. Η χρήση της biased new PSO φαίνεται να υπερτερεί σαφώς έναντι της random new PSO, τουλάχιστον για προβλήματα μεγάλης κλίμακας όπου μας ενδιαφέρει τόσο η βελτιστοποίηση καθεαυτή, όσο και η δυνατότητα να υπάρξει αποτέλεσμα σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα.

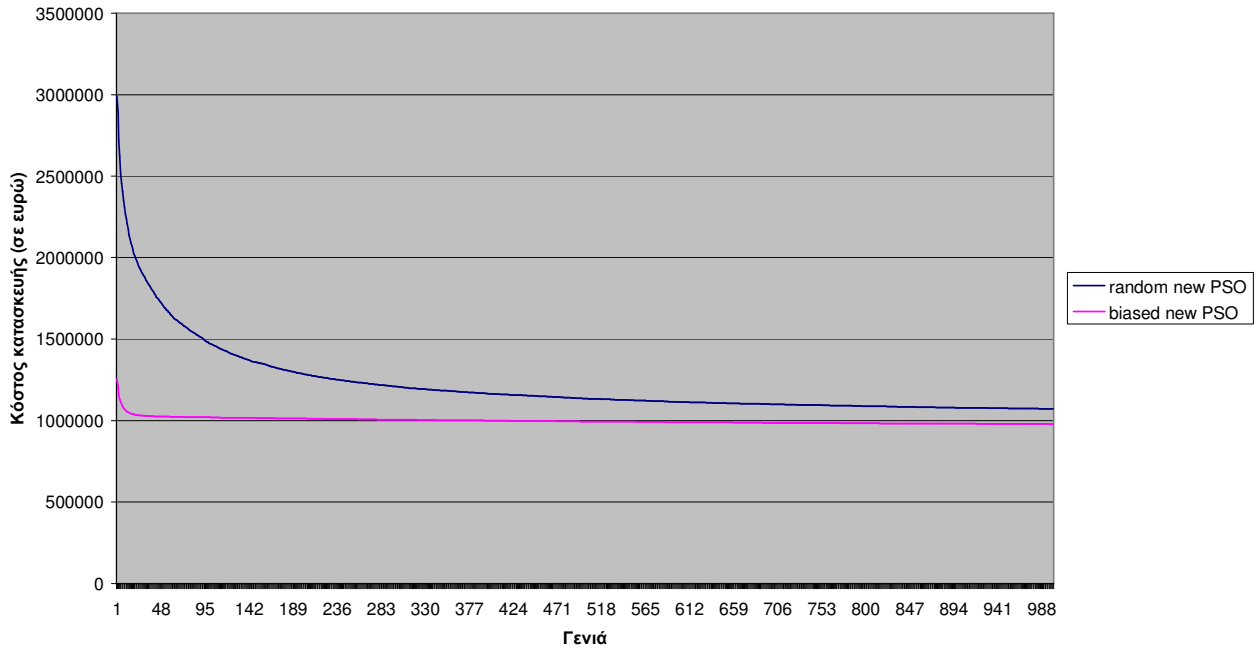
Γράφημα 4.11.2.1 - Σύγκριση κόστους κατασκευής για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού, με τη χρήση του αλγόριθμου new PSO, σε δείγμα 20 κόμβων.



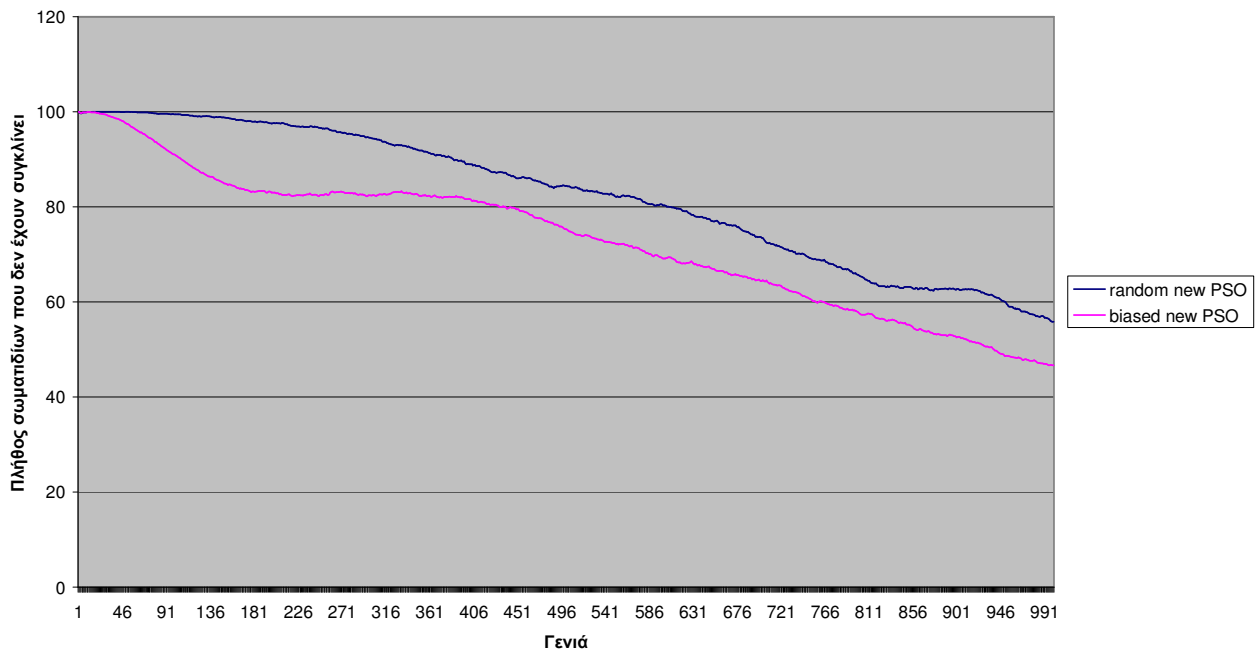
Γράφημα 4.11.2.2 - Σύγκριση σύγκλισης για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού, με τη χρήση του αλγόριθμου new PSO, σε δείγμα 20 κόμβων.



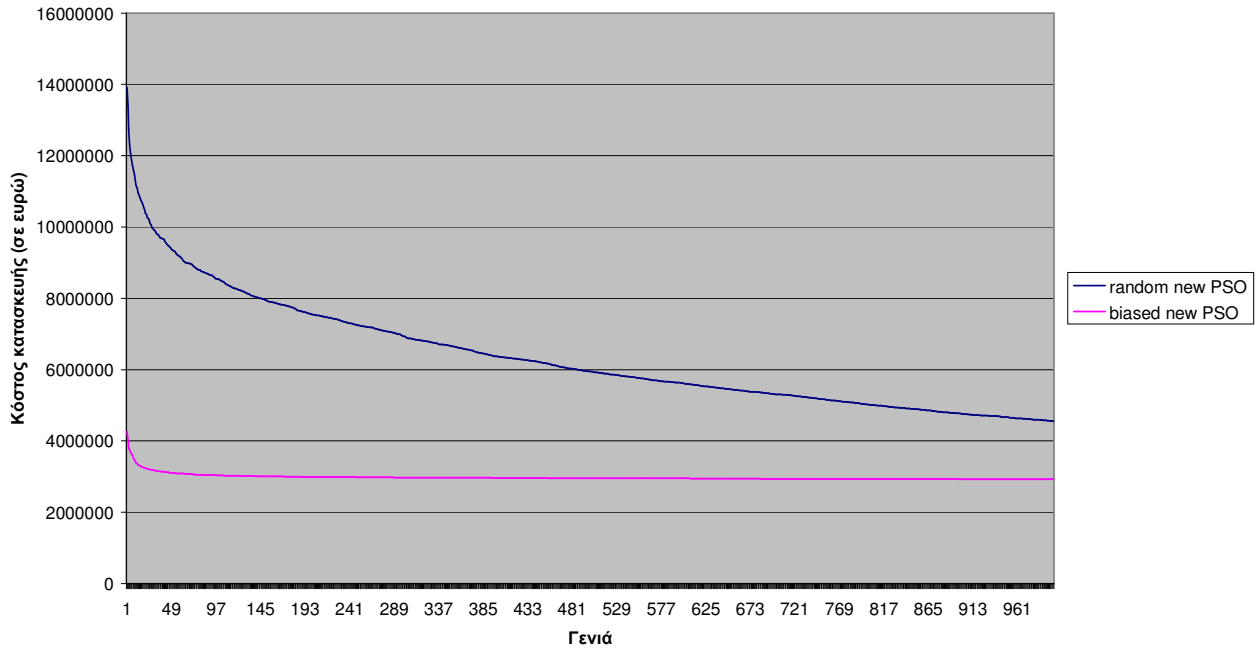
Γράφημα 4.11.2.3 - Σύγκριση κόστους κατασκευής για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού, με τη χρήση του αλγόριθμου new PSO, σε δείγμα 40 κόμβων.



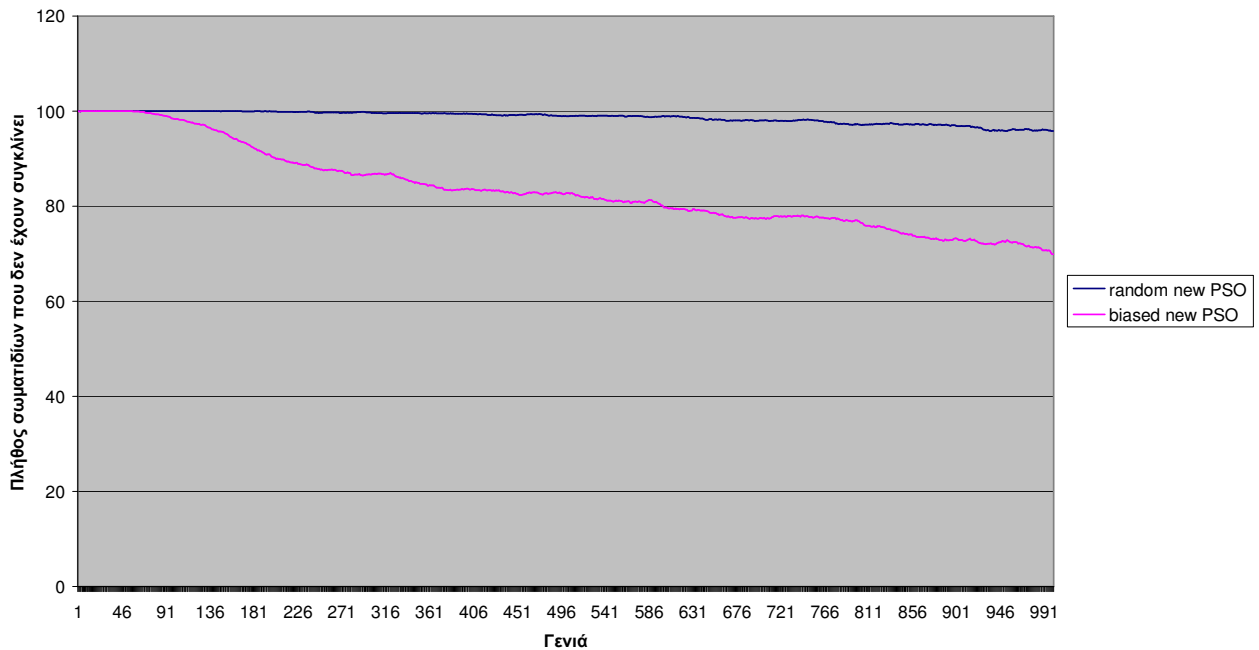
Γράφημα 4.11.2.4 - Σύγκριση σύγκλισης για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού, με τη χρήση του αλγόριθμου new PSO, σε δείγμα 40 κόμβων.



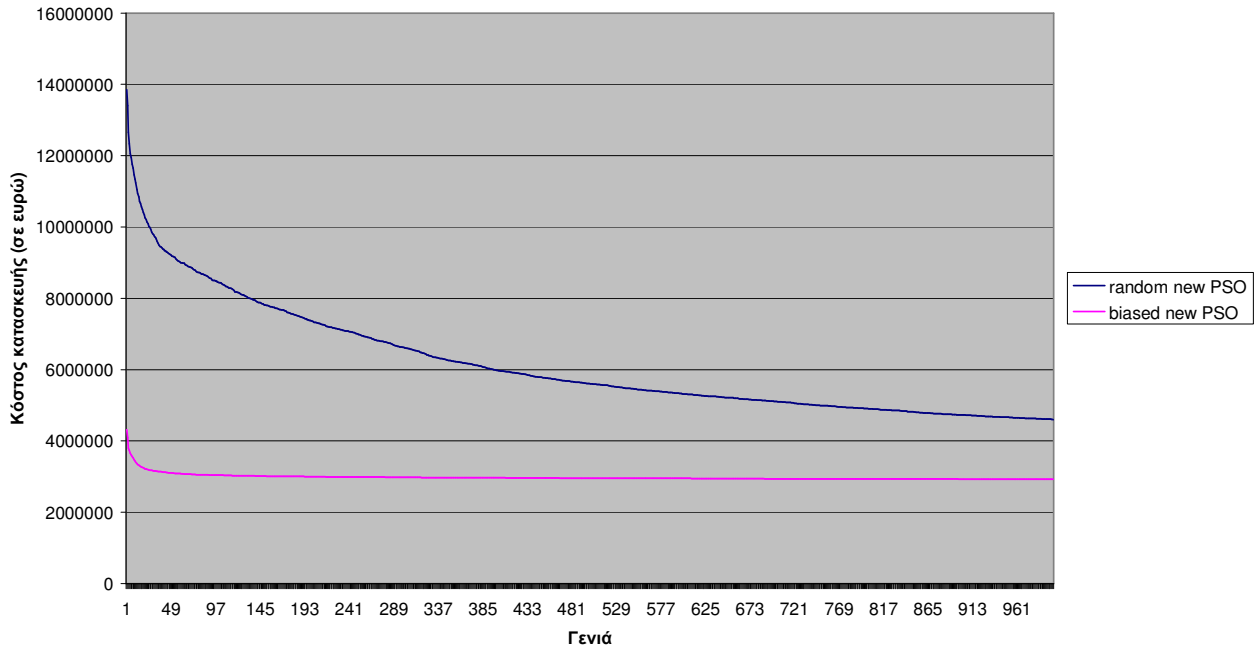
Γράφημα 4.11.2.5 - Σύγκριση κόστους κατασκευής για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού, με τη χρήση του αλγόριθμου new PSO, σε δείγμα 60 κόμβων.



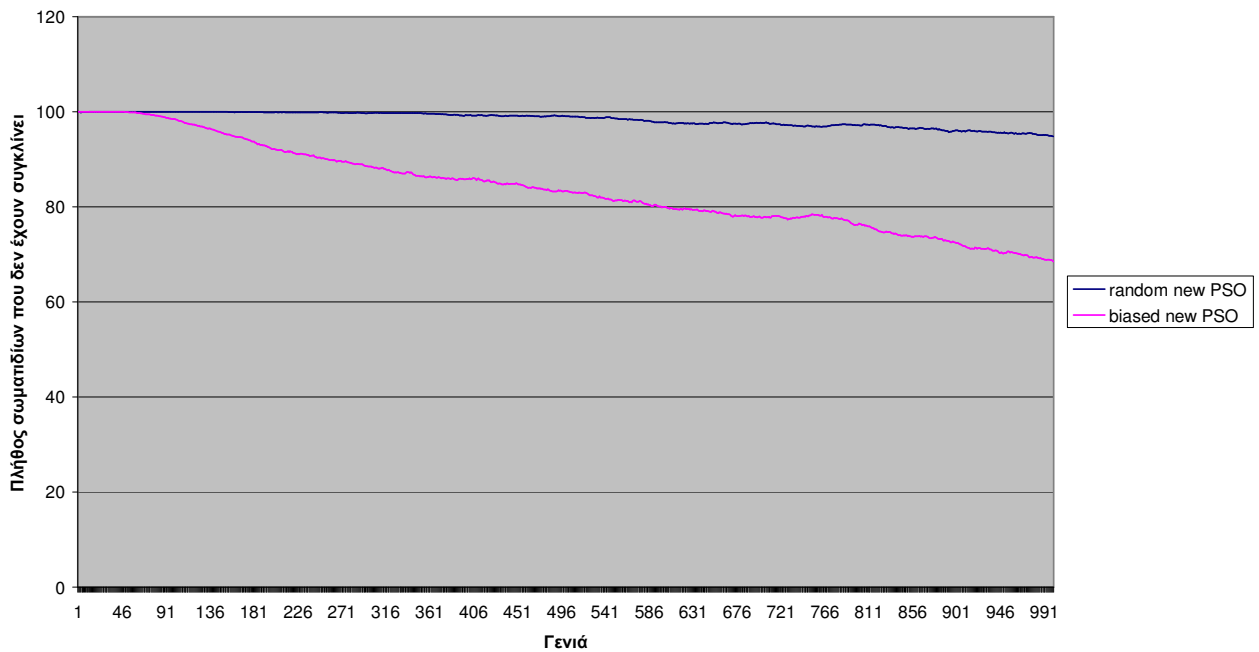
Γράφημα 4.11.2.6 - Σύγκριση σύγκλισης για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού, με τη χρήση του αλγόριθμου new PSO, σε δείγμα 60 κόμβων.



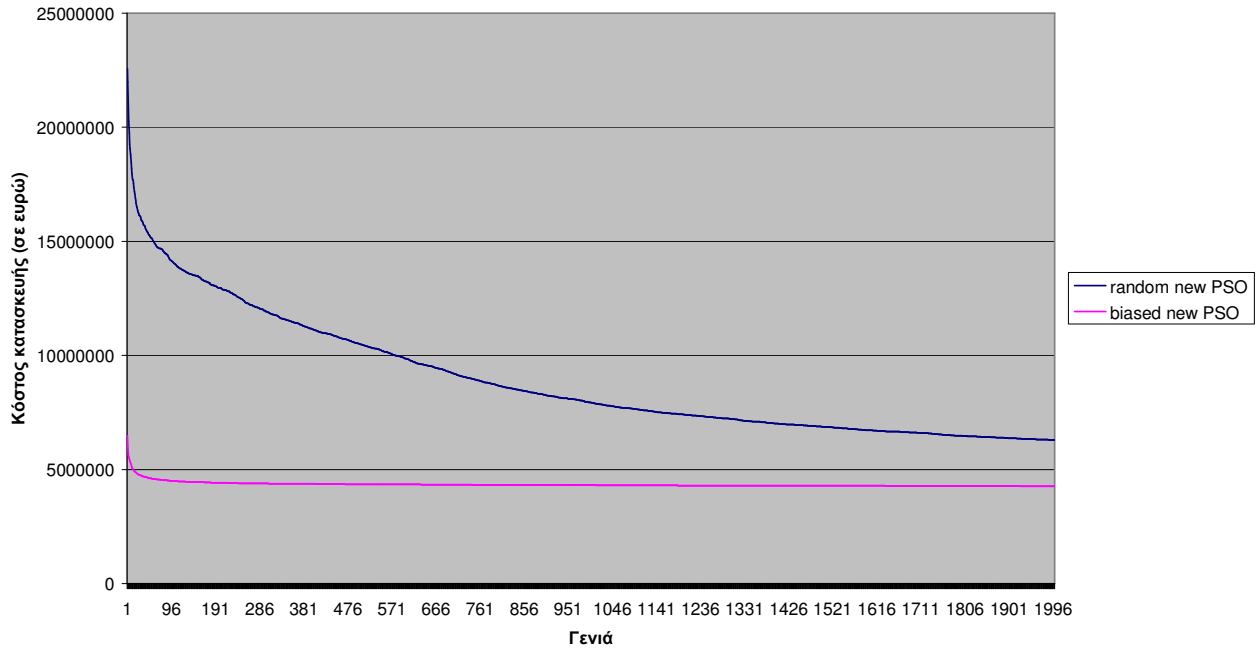
Γράφημα 4.11.2.7 - Σύγκριση κόστους κατασκευής για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού, με τη χρήση του αλγόριθμου new PSO, σε δείγμα 80 κόμβων.



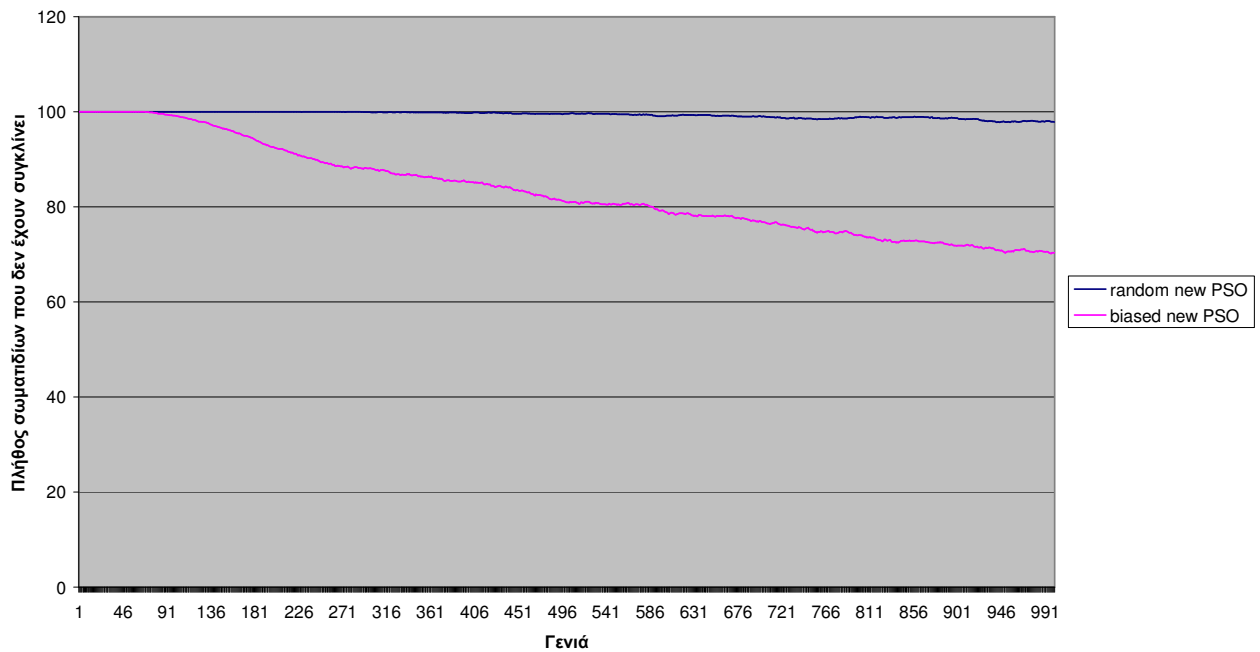
Γράφημα 4.11.2.8 - Σύγκριση σύγκλισης για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού, με τη χρήση του αλγόριθμου new PSO, σε δείγμα 80 κόμβων.



Γράφημα 4.11.2.9 - Σύγκριση κόστους κατασκευής για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού, με τη χρήση του αλγόριθμου new PSO, σε δείγμα 100 κόμβων.



Γράφημα 4.11.2.10 - Σύγκριση σύγκλισης για τυχαία και μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού, με τη χρήση του αλγόριθμου new PSO, σε δείγμα 100 κόμβων.



4.12 Προτάσεις για περαιτέρω μελέτη.

Ο σκοπός της εργασίας αυτής είναι να διερευνηθεί η μέθοδος PSO για χρήση σε προβλήματα δικτυακού σχεδιασμού, όμως η συγκεκριμένη μέθοδος είναι αρκετά παραμετροποιήσιμη και η χρησιμοποίησή της για συνδυαστικά προβλήματα οδηγεί στην ανάγκη εύρεσης τεχνικών που θα την προσαρμόσουν ώστε να μπορεί να λειτουργεί αποτελεσματικά για την επίλυσή τους. Συνεπώς, παρότι στο παρόν κείμενο γίνεται προσπάθεια να δοθεί μία ικανοποιητική λύση στο πρόβλημα, σε καμία περίπτωση δεν έχει γίνει εξαντλητική έρευνα των παραμέτρων της μεθόδου, καθώς και όλων των βελτιώσεων που μπορούν να γίνουν προκειμένου να λειτουργήσει αυτή αποτελεσματικότερα.

Είδαμε ότι η αναπαράσταση ατόμων με την κωδικοποίηση NetKeys, παρά το γεγονός ότι δίνει στην μέθοδο τη δυνατότητα να λειτουργήσει σωστά, δεν προσφέρεται για γρήγορες υλοποιήσεις και οδηγεί σε αυξημένη πολυπλοκότητα του αλγορίθμου, λόγω του μεγέθους των ατόμων, όπως και της ανάγκης για κανονικοποίηση των διανυσμάτων θέσης και ταχύτητας των σωματιδίων στο τέλος της κάθε γενιάς. Η *διερεύνηση καλύτερων μεθόδων κωδικοποίησης δέντρων σε διανύσματα*, ή η εύρεση τεχνικών που θα επιτρέψουν στη μέθοδο NetKeys να λειτουργήσει πιο γρήγορα όσο κλιμακώνεται το μέγεθος των προβλημάτων είναι απαραίτητη αν μας ενδιαφέρει ο χρόνος εκτέλεσης της μεθόδου και η πρακτικότητά της.

Ακόμη, η *κατάλληλη αρχικοποίηση πληθυσμού* σύμφωνα με όσα παρατηρήσαμε προηγουμένως μπορεί να αποβεί πολύ χρήσιμη. Η μερικώς τυχαία αρχικοποίηση πληθυσμού που τέθηκε σε εφαρμογή στην υλοποίησή μας πρόκειται για αρχικοποίηση του πληθυσμού με μεταλλάξεις σε κυμαινόμενα ποσοστά του ελάχιστου συνδετικού δέντρου και του δέντρου με τις ελάχιστες συνολικές απαιτήσεις σε εύρος ζώνης. Ωστόσο, το βέλτιστο ποσοστό καθενός από τα δύο βασικά δέντρα που θα χρησιμοποιηθεί για την αρχικοποίηση πληθυσμού δεν υπήρξε αντικείμενο της μελέτης μας και θα ήταν χρήσιμο να διερευνηθεί.

Όσον αφορά στις παραμέτρους της μεθόδου, είδαμε ότι χρησιμοποιήθηκαν κάποια δυναμικά σχήματα προσαρμογής των *συντελεστών επιτάχυνσης* και επίσης κάποια αρκετά γενική τεχνική για τον *περιορισμό της ταχύτητας*. Η εύρεση καταλληλότερων τέτοιων σχημάτων είναι πιθανό να οδηγήσει σε αποτελεσματικότερη εκτέλεση του αλγορίθμου, όπως άλλωστε το ίδιο μπορεί να συμβεί και με τη *χρήση διαφορετικών συναρτήσεων κατανομής πιθανοτήτων επιλογής κάθε σωματιδίου ως κοινωνικής συνιστώσας*, σύμφωνα με την τροποποίηση της μεθόδου PSO που δημιουργήσαμε.

Μία προφανής ιδέα είναι να ενσωματωθεί η τροποποιημένη PSO στη μέθοδο PSO τοπικού βέλτιστου (lbest PSO). Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, οι ίδιες ιδέες που ισχύουν για ολόκληρο τον πληθυσμό μπορούν να εφαρμοστούν και σε επιμέρους γειτονιές. Η μέθοδος τοπικού βέλτιστου χρησιμοποιεί γειτονιές προκειμένου να αποφύγει την πρόωρη σύγκλιση, ωστόσο σε κάθε επανάληψη, η επιλογή του σωματιδίου με τη βέλτιστη θέση από κάθε γειτονιά γίνεται κατά απόλυτο τρόπο, όπως και ισχύει και με τη gbest PSO. Η προσαρμογή της τροποποίησης που προτάθηκε μπορεί να οδηγήσει σε ακόμη αργότερη σύγκλιση και σε πολύ καλύτερη εξερεύνηση του χώρου αναζήτησης του κάθε σωματιδίου μέσα στη γειτονιά του. Θα πρέπει να ληφθεί υπόψη όμως η υπολογιστική πολυπλοκότητα που προσθέτει στη μέθοδο η new PSO και να γίνει προσπάθεια αυτή να ελαχιστοποιηθεί με την αποφυγή μη απαραίτητων ενεργειών και μία καλή υλοποίηση.

Είναι επίσης δυνατή η εναλλαγή μεταξύ της μεθόδου PSO της προτιμήσεώς μας και της τεχνικής *hillclimbing*. Μηδενίζοντας την κοινωνική συνιστώσα, μπορούμε να επιτρέψουμε στο κάθε σωματίδιο να αναζητήσει σε κοντινές περιοχές του κάποια καλύτερη τιμή. Καθυστερώντας περιοδικά τη συνέχιση της εκτέλεσης της PSO προκειμένου να γίνει αυτή η διαδικασία, επιτρέπουμε τη μετέπειτα εκτέλεσή της με καλύτερο πληθυσμό, αλλά και περιορίζουμε την πιθανότητα αυτή να συγκλίνει σε κάποιο τοπικό βέλτιστο. Ακόμη, μπορούμε να δανειστούμε ιδέες από τις multistart PSO, αρχικοποιώντας και πάλι σωματίδια που έχουν συγκλίνει, όμως τότε δεν έχουμε μια σαφή ένδειξη του πότε η μέθοδος έχει πράγματι συγκλίνει ή έχει φτάσει στα όρια των δυνατοτήτων της.

Μια άλλη ιδέα αποτελεί η εκτέλεση κάποιας παραλλαγής της PSO για σταδιακά αυξανόμενα υποσύνολα του συνολικού πληθυσμού. Ταξινομώντας τα σωματίδια κατά αύξουσα τιμή που δίνουνε στην αντικειμενική συνάρτηση, είναι δυνατό να ξεκινήσουμε τη βελτιστοποίηση αγνοώντας προσωρινά τα καλύτερα σωματίδια και επιτρέποντας στα χειρότερο σωματίδια να συμμετέχουν σε μια διαδικασία μέσα από την οποία μπορούν να βρεθούν καλύτερες θέσεις για αυτά, χωρίς η κατεύθυνση της αναζήτησης να επηρεαστεί προς λίγα σημεία όπου βρίσκονται τα τρέχοντα βέλτιστα. Όταν η μέθοδος συγκλίνει για το τρέχον υποσύνολο του πληθυσμού, τότε μόνο επιτρέπεται σε κάποια καλύτερα σωματίδια να συμμετάσχουν στη διαδικασία, επηρεάζοντας πλέον τον χώρο αναζήτησης. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι δυνατό να οδηγήσει σε υλοποιήσεις PSO που είναι σημαντικά λιγότερο προκατειλημμένες και περισσότερο ανθεκτικές στην πρόωρη σύγκλιση, όμως θα πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι ο χρόνος εκτέλεσής τους μπορεί να είναι σημαντικά μεγαλύτερος, αφού ουσιαστικά γίνονται πολλές βελτιστοποιήσεις με αυξανόμενα μεγέθη πληθυσμού, μέχρι η καθεμία να συγκλίνει.

Τέλος, θα ήταν αρκετά ενδιαφέρον πέρα από τα σχήματα αρχικοποίησης πληθυσμού που χρησιμοποιήθηκαν ήδη, να διερευνηθεί και η αρχικοποίηση πληθυσμού με αποτελέσματα προηγούμενων εκτελέσεων της μεθόδου, έτσι ώστε να συμπεριληφθούν στον αρχικό πληθυσμό τοπικά βέλτιστα από διαφορετικές περιοχές του χώρου αναζήτησης. Φυσικά, η πρόταση αυτή προϋποθέτει την εκτέλεση της μεθόδου για πλήθος ίσο με τον πληθυσμό που θα χρησιμοποιηθεί στην τελική εκτέλεση και μπορεί να μην είναι αρκετά πρακτική από την πλευρά του χρόνου εκτέλεσης. Ωστόσο, έχουμε παρατηρήσει ότι το σημαντικότερο μέρος της βελτιστοποίησης γίνεται συνήθως στις πρώτες γενιές και ακόμα ο σκοπός μας δεν είναι τόσο να χρησιμοποιήσουμε τοπικά βέλτιστα, όσο να χρησιμοποιήσουμε καλά σωματίδια που βρίσκονται σε διαφορετικές περιοχές του χώρου αναζήτησης. Συνεπώς, οι προκαταρκτικές εκτελέσεις της μεθόδου είναι δυνατό να εκτελεστούν για λίγες μόνο επαναλήψεις και για μικρό πληθυσμό, οδηγώντας σε ανεκτούς χρόνους προετοιμασίας για την τελική εκτέλεση.

Είναι σημαντικό να πούμε ότι θεωρητικά οι προηγούμενες προτάσεις για βελτίωση δεν είναι αλλήλο-αποκλειόμενες. Στην πραγματικότητα θα πρέπει να γίνει μια σωστή επιλογή από αυτές προκειμένου η πολυπλοκότητα του τελικού αλγορίθμου να βρίσκεται σε αποδεκτά επίπεδα.

5. Βιβλιογραφία.

1. Ιάκωβος Στ. Βενιέρης, Δίκτυα Ευρείας Ζώνης, Εκδόσεις Τζιόλα, 2003, ISBN 960-418-013-4
2. Michael F. Worboys, GIS: A Computing Perspective, Taylor & Francis, 2003, ISBN 0-203-78979-2
3. Michael N. DeMers, Fundamentals of Geographic Information Systems, 3rd edition, Wiley, 2002, ISBN-10 0471204919
4. Jeffrey Whitten and Lonnie Bentley, Introduction to Systems Analysis & Design, McGraw-Hill / Irwin, 2006, ISBN-10 007340294X
5. A.E. Eiben and J.E. Smith, Introduction to Evolutionary Computing, Springer, 2003, ISBN 978-3-540-40184-1
6. Andries P. Engelbrecht, Fundamentals of Computational Swarm Intelligence, Wiley, 2006, ISBN-10 0470091916
7. Franz Rothlauf, Representations for Genetic and Evolutionary Algorithms, Springer, 2006, ISBN 978-3-540-25059-3
8. Zheng, Y., Ma, L., Zhang, L., and Qian, J, "On the convergence analysis and parameter selection in particle swarm optimization", Proceedings of International Conference on Machine Learning and Cybernetics 2003, pp. 1802-1807, 2003
9. Al-kazemi B, Mohan CK, "Multiphase Discrete Particle Swarm Optimization", In Fourth International Workshop on Frontiers in Evolutionary Algorithms, Kinsale, Ireland, 2002
10. F. van den Bergh and A. P. Engelbrecht, "A New Locally Convergent Particle Swarm Optimiser", In the Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, (Hammamet, Tunisia), October 2002
11. F. van den Bergh and A.P Engelbrecht, "Effects of Swarm Size on Cooperative Particle Swarm Optimisers", In Proceedings of GECCO 2001, (San Francisco, USA), Jul 2001