



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΕΩΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ &
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ**

Συστήματα Διαχείρισης Πόρων και Λήψης
Αποφάσεων Γεωσχετισμένης Πληροφορίας
για Περιβάλλον Διοικητικής Μέριμνας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Β. ΚΑΡΑΔΗΜΑΣ

Αθήνα, Ιούλιος 2007



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

Συστήματα Διαχείρισης Πόρων και Λήψης Αποφάσεων Γεωσχετισμένης Πληροφορίας για Περιβάλλον Διοικητικής Μέριμνας

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ Β. ΚΑΡΑΔΗΜΑΣ

Συμβουλευτική Επιτροπή:

Βασίλειος Λούμος

Ελευθέριος Καγιάφας

Ηλίας Κουκούτσης

Εγκρίθηκε από την επταμελή εξεταστική επιτροπή την 16^η Ιουλίου 2007.

.....

Β. Λούμος

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ε. Καγιάφας

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Η. Κουκούτσης

Επ. Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Ι. Αβαριτσιώτης

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Μ. Θεολόγου

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....

Δ. Βέργαδος

Λέκτορας Παν. Αιγαίου

.....

Χ. Αναγνωστόπουλος

Λέκτορας Παν. Αιγαίου

Αθήνα, Ιούλιος 2007

.....
Νικόλαος, Β. Καραδήμας

Δρ Μηχανικός Ε.Μ.Π., MSc, BEng (Hons)

Copyright © ΝΙΚΟΛΑΟΣ Β. ΚΑΡΑΔΗΜΑΣ, 2007.

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.

Στους γονείς μου, **Βασίλη** και **Ειρήνη**
και στην θεία μου **Παναγιώτα**

Είναι γεγονός ότι στις μέρες μας, παρατηρείται μεγάλη κατασπατάληση υλικών πόρων καθώς και ανθρώπινου δυναμικού σε δραστηριότητες μη αποδοτικές ιδιαίτερα όταν οι εφαρμογές αφορούν προβλήματα μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας. Τέτοια είναι τα Μέσα Μαζικής Επικοινωνίας και Μεταφοράς, η Παραγωγή, Διανομή και Διαχείριση Συστημάτων Ενέργειας, η Διαχείριση Αστικών Στερεών Αποβλήτων, κ.α. Επιπλέον, παρατηρείται ότι σε πολλές από τις περιπτώσεις υπάρχει έλλειψη και αλλού υπερβολή των υλικών πόρων ή/και του ανθρώπινου δυναμικού. Το μόνο σίγουρο είναι ότι δεν είναι εύκολος ο εντοπισμός των Χώρο-Χρονικών αυτών αναγκών, όπως επίσης και η διάθεση των αναγκαίων πόρων (υλικών και έμψυχων) στο χώρο και στο χρόνο, που χρειάζονται. Συστήματα λήψης απόφασης κατάλληλα για να διαχειριστούν προβλήματα μεγάλης έκτασης και πολυπλοκότητας ανακύπτουν καθημερινά σε περιβάλλον διοικητικής μέριμνας.

Το πρόβλημα της διαχείρισης των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) αποτελεί αναμφισβήτητα ένα πρόβλημα μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας και ανάγεται σε ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά και οικονομικά προβλήματα της εποχής μας. Η διαχείριση των ΑΣΑ ξεκινά με τη συλλογή τους από τους χώρους παραγωγής και καταλήγει στην τελική απόθεσή τους. Ο τρόπος συλλογής και μεταφοράς, που χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα, είναι η τοποθέτηση των ΑΣΑ σε κάδους, η συλλογή και η μεταφορά τους από απορριμματοφόρα οχήματα μέχρι ένα σταθμό μεταφόρτωσης ή μέχρι τον Χώρο Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ).

Στα πλαίσια της συγκεκριμένης διατριβής αναπτύχθηκε ένα μοντέλο, το οποίο είναι μέρος ενός εκτεταμένου συστήματος διαχείρισης στερεών αποβλήτων και χρησιμοποιεί μία χωρική βάση δεδομένων, που ενσωματώνεται σε ένα περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ). Λαμβάνει υπόψη διάφορες παραμέτρους της παραγωγής στερεών αποβλήτων, όπως πυκνότητα πληθυσμών, εμπορικές δραστηριότητες, χαρακτηριστικά οδών και την επιρροή τους στη θέση και στην κατανομή των κάδων απορριμμάτων. Εφαρμόστηκαν επίσης επιτόπου αναλύσεις για την εκτίμηση των συσχετίσεων μεταξύ των προαναφερθέντων παραγόντων και των παραλλαγών που εμφανίζονται στην παραγωγή απορριμμάτων μεταξύ κατοικημένων και εμπορικών περιοχών. Επομένως, το προτεινόμενο μοντέλο ακολουθεί μια ενοποιημένη προσέγγιση κατηγοριοποίησης για τις κατοικημένες και τις εμπορικές δραστηριότητες και εστιάζει στους κυρίαρχους παράγοντες που καθορίζουν την παραγωγή στερεών αποβλήτων στην εξεταζόμενη περιοχή.

Ένα από τα σημαντικότερα αποτελέσματα της παρούσας διατριβής είναι η ακριβής εκτίμηση του βέλτιστου αριθμού κάδων απορριμμάτων καθώς και της κατανομής τους σε μία εξεταζόμενη περιοχή. Μια νέα μεθοδολογία και ένας κατάλληλος αλγόριθμος έχουν αναπτυχθεί για αυτόν το λόγο προκειμένου να διευκολύνουν τη δρομολόγηση και την αποκομιδή των στερεών αποβλήτων. Με τη χρησιμοποίηση αυτών των αποτελεσμάτων, οι δήμοι ενήμεροι για τις κοινωνικές, οικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχει η διαχείριση των στερεών αποβλήτων, μπορούν να επιτύχουν τη βέλτιστη χρήση των πόρων τους (υλικών και έμψυχων) και να προσφέρουν τις καλύτερες δυνατές υπηρεσίες στους πολίτες τους.

Στη συνέχεια, για τον προσδιορισμό των βέλτιστων διαδρομών για τη αποκομιδή των ΑΣΑ χρησιμοποιούνται τέσσερις αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, οι οποίοι έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα προβλήματα εύρεσης βέλτιστης λύσης. Αυτοί είναι: οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), η Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing), η Αναζήτηση Ταμπού (Tabu Search) και το Σύστημα Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony System). Το ΓΣΠ λαμβάνει υπόψη όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για την αποκομιδή των στερεών αποβλήτων. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν στατικά και δυναμικά στοιχεία, όπως οι θέσεις των κάδων απορριμμάτων, του οδικού δικτύου και της σχετιζόμενης μ' αυτό κυκλοφορίας στην εξεταζόμενη περιοχή. Επιπλέον, λαμβάνονται υπόψη τα προγράμματα αποκομιδής των στερεών αποβλήτων καθώς και οι ικανότητες φορτηγών και τα χαρακτηριστικά τους. Επιπλέον, χρησιμοποιούνται χώρο-χρονικές στατιστικές αναλύσεις για την εκτίμηση των συσχετίσεων μεταξύ των δυναμικών παραγόντων, όπως οι κυκλοφοριακές αλλαγές στις κατοικημένες και εμπορικές περιοχές. Ο χρήστης, στο προτεινόμενο σύστημα, είναι σε θέση να καθορίσει ή να τροποποιήσει όλους τους απαραίτητους δυναμικούς παράγοντες για τη δημιουργία εναλλακτικών σεναρίων. Ο στόχος του συστήματος είναι να προσδιοριστεί το πιο οικονομικά αποδοτικό σενάριο για την αποκομιδή των στερεών αποβλήτων, να υπολογιστεί το τρέχον κόστος του και να προσομοιωθεί η εφαρμογή του. Τέλος, τα αποτελέσματα των τεσσάρων αλγορίθμων συγκρίνονται μεταξύ τους, αλλά και με την εμπειρική μέθοδο που χρησιμοποιείται στην παρούσα περίοδο από το δήμο Αθηναίων.

Λέξεις Κλειδιά:

Συστήματα Μεγάλης Έκτασης και Πολυπλοκότητας, Διοικητική Μέριμνα, Μοντελοποίηση, Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης, Σύστημα Αποικίας Μυρμηγκιών, Αναζήτηση Ταμπού, Προσομοιωμένη Ανόπτηση, Γενετικοί Αλγόριθμοι, Παραγωγή και Συλλογή Αστικών Στερεών Αποβλήτων, Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών.

ABSTRACT

It is a fact that nowadays, a serious waste of material resources and human potential is observed, particularly when it comes to applications which deal with problems of large scale and complexity. Such problems are: the Means of Mass Communication and Transport, Production, Distribution and Energy Management Systems, Urban Solid Waste Management Systems, etc. An additional problem is that material resources and/or human potential are - in most of the cases- scarce, while in other cases they are provided in exaggeration. Certainly, it is not easy to detect these Spatial-Temporal needs, or to incorporate the necessary resources (material and personnel) in space and in time, so as to serve the needs of Decision Support Systems in order to sufficiently manage large scale and high complexity problems that arise daily in a logistics environment.

The Municipal Solid Waste (MSW) Management problem constitutes, undoubtedly, such a large scale and high complexity problem and it is one of the most important environmental and economical issues in our days. The MSW management begins with the solid waste collection and transport from the waste generation points to the final disposal sites (landfills). The most common way of waste collection and transport used nowadays, is the storage of MSW in kerbside waste bins, their collection and transport by garbage trucks to a transfer station or to the final disposal site (landfill).

Consequently, in the present work, an innovative model, part of an Integrated Solid Waste Management System, is developed. The model uses a spatial geodatabase, integrated in a Geographic Information System (GIS) and takes into consideration several parameters of waste generation, such as population density, commercial activities, road characteristics and their influence on the number and the allocation of waste bins. Ground-based analysis was applied for the estimation of the interrelations between the aforementioned factors and the variations in waste generation between residential and commercial areas. Therefore, the proposed model follows a unified categorisation approach for residential and commercial activities and focuses on the dominant factors that determine waste generation in the area under study.

One of the most important results of this thesis is an accurate estimation of the optimal number of waste bins and their allocation. A new methodology and an appropriate algorithm have been developed for this purpose in order to facilitate the waste collection and routing. By using these results, any

municipality that is aware of social, economical and environmental factors related to waste management, can achieve optimal usage of the existing resources and offer citizens the best possible services.

Moreover, four optimisation algorithms are proposed, which have been applied on various problems in order to find the optimum solution, for the identification of the best routes in the case of MSW collection. These algorithms are: the Genetic Algorithms (GA), the Simulated Annealing (SA), the Tabu Search (TS) and the Ant Colony System (ACS). The GIS takes into account all the required parameters for solid waste collection. These parameters include static and dynamic data, such as the location of waste bins, the road network and the related traffic in the area under study. In addition, waste collection schedules, truck capacities and their characteristics are also taken under consideration. Spatio-temporal statistical analysis is used to estimate interrelations between dynamic factors, like network traffic changes in residential and commercial areas.

The user of the proposed system is able to define or modify all of the required dynamic factors for the creation of alternative initial scenarios. The objective of the system is to identify the most cost-effective scenario for waste collection, to estimate its running cost and to simulate its application. Finally, the results of the ACS algorithm are compared with the empirical method currently used by the Municipality of Athens.

Keywords:

Large Scale Complex Systems, Logistics, Modeling, Optimization Algorithms, Ant Colony System, Tabu Search, Simulated Annealing, Genetic Algorithms, Municipal Solid Waste Generation and Collection, Geographical Information Systems.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα Καθηγητή μου Βασίλειο Λούμο, ειδικότερα για την καθοδήγηση, υποστήριξη και κατανόησή του, κατά την διάρκεια της διατριβής μου, καθώς επίσης και για τις ατελείωτες ώρες εποικοδομητικής συζήτησης και ανάλυσης θεμάτων που αντιμετωπίσαμε όλα αυτά τα χρόνια.

Επίσης είμαι ευγνώμων στους συν-επιβλέποντες καθηγητές μου, Καθ. Ελευθέριο Καγιάφα και Επ. Καθ. Ηλία Κουκούτση για τις συμβουλές και τις παρατηρήσεις κατά τη διάρκεια της υλοποίησης και συγγραφής αυτής της διατριβής αλλά και για την φιλική και εποικοδομητική συνεργασία που είχαμε όλο αυτό τον καιρό.

Δεν θα πρέπει να παραλείψω και την συμβολή των κ.κ. Χρήστου Αναγνωστόπουλου και Δημήτρη Βέργαδου, Λεκτόρων στο Πανεπιστήμιο Αιγαίου που συμμετείχαν ως μέλη της πενταμελούς επιτροπής.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες στον Καθ. Μ. Θεολόγου και τον Καθ. Ι. Αβαριτσιώτη για την τιμή που μου έκαναν να συμμετάσχουν στην επταμελή επιτροπή κρίσης της διατριβής μου.

Δεν θα πρέπει να παραλείψω να ευχαριστήσω και όλους τους συναδέλφους μου στο εργαστήριο της Τεχνολογίας Πολυμέσων για τις όμορφες στιγμές που μοιραστήκαμε όλα αυτά τα χρόνια κατά την διάρκεια εργασιών, ερευνητικών προγραμμάτων, δημοσιεύσεων, κτλ.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω και την κ. Ε. Λαζαρίδου για την επιμέλεια του κειμένου της παρούσας διατριβής.

Τέλος, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ στους γονείς μου, Βασίλη και Ειρήνη, στη θεία μου Παναγιώτα και στον αδερφό μου Λευτέρη, οι οποίοι ήταν πάντα εκεί σε ότι χρειαζόμουν.

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

(ΕΛΛΗΝΙΚΑ)

ΑΑΚΔ	Αυτόματη Αναγνώριση και Κτήση Δεδομένων
ΑΑΤ	Αντιδραστική Αναζήτηση Ταμπού
ΑΠΠΠ	Ασύμμετρο Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή
ΑΣΑ	Αστικά Στερεά Απόβλητα
ΑΣΔΒΔ	Αντικειμενοστραφή ΣΔΒΔ
ΑΣΣΔΒΔ	Αντικειμενοστραφή Σχεσιακά ΣΔΒΔ
ΑΤ	Αναζήτηση Ταμπού
ΒΔηΣΑ	Βιοδιασπώμενα Δημοτικά Στερεά Απόβλητα
ΓΑ	Γενετικοί Αλγόριθμοι
ΓΣΠ	Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών
ΔΕΑ	Διαχείριση Εφοδιαστικής Αλυσίδας
ΔηΣΑ	Δημοτικά Στερεά Απόβλητα
ΔΜ	Διοικητική Μέριμνα
ΔΜΜ	Διαχείριση Μέσων Μεταφοράς
ΔΠΔ	Διαδοχικό Πρόβλημα Διάταξης
ΕΑΤ	Επαναληπτική Αναζήτηση Ταμπού
ΕΟΠ	Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος
ΕΠΔΟ	Εξουσιοδοτημένο Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων
ΟΟΣΑ	Οργανισμός Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης
ΟΤ	Οικοδομικό Τετράγωνο
ΟΤΑ	Οργανισμός Τοπικής Αυτοδιοίκησης
ΠΑ	Προσομοιωμένη Ανόπτηση
ΠΠΠ	Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή
ΠΣΕΘ	Παγκόσμιο (Δορυφορικό) Σύστημα Εντοπισμού Θέσης
ΠΣΚΕ	Παγκόσμιο Σύστημα για Κινητή Επικοινωνία
ΣΑΜ	Σύστημα Αποικίας Μυρμηγκιών
ΣΔΑ	Συστήματα Διαχείρισης Αποθηκών
ΣΔΒΔ	Συστήματα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων
ΣΔΠ	Σύστημα Διαχείρισης Πληροφοριών

ΣΔΣ	Σύστημα Διαχείρισης Στόλου
ΣΕΣ	Συστήματα Ενδοεπιχειρησιακού Σχεδιασμού
ΣΣΔΒΔ	Σχεσιακά ΣΔΒΔ
ΥΓΡΠ	Υπηρεσία Γενικών Ράδιο Πακέτων
ΥΠ	Υπολογιστής Παλάμης
ΥΣΓΜ	Υπηρεσία Σύντομων Γραπτών Μηνυμάτων
ΧΔΑ	Χώροι Διάθεσης Απορριμμάτων
ΧΥΤΑ	Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων

ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ

(ΑΓΓΛΙΚΑ)

ACO	Ant Colony Optimization
ACR	Ant Colony Routing
ACS	Ant Colony System
AIDC	Automatic Identification and Data Capture
AS	Ant System
ATSP	Asymmetric Travelling Salesman Problem
CVRP	Capacitated Vehicle Routing Problem
DBMS	Database Management System
DTSP	Dynamic Travelling Salesman Problem
EEA	European Environment Agency
ERP	Enterprise Resource Planning
FM	Fleet Management
GA	Genetic Algorithm
GIS	Geographic Information Systems
GPRS	General Packet Radio Service
GPS	Global Positioning System
GSM	Global System for Mobile Communication
ILS	Iterated Local Search
ITS	Iterated Tabu Search
JSP	Job - Shop scheduling Problem
LS	Local Search
MIS	Management Information System
MSW	Municipal Solid Waste
NP	Non-deterministic Polynomial time
ODBMS	Object DataBase Management Systems
OECD	Organization for Economic Co-operation and Development
ORDBMS	Object Relational DataBase Management Systems
P	Polynomial time
PDA	Personal Digital Assistant

QAP	Quadratic Assignment Problem
RDBMS	Relational DataBase Management Systems
RFID	Radio Frequency Identification
SA	Simulated Annealing
SCM	Supply Chain Management
SGA	Simple Genetic Algorithm
SMS	Short Message Service
SOP	Sequential Ordering Problem
TM	Transportation Management
TS	Tabu Search
TSP	Travelling Salesman Problem
VRP	Vehicle Routing Problem
WMS	Warehouse Management System
NPC	Non-deterministic Polynomial time Complete

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT	9
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	11
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ (ΕΛΛΗΝΙΚΑ)	13
ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΕΣ (ΑΓΓΛΙΚΑ)	15
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	17
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	21
ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ	25
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	29
1.1. Επιστημονικά φαινόμενα στα συστήματα μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας	29
1.2. Τρεις αρχές αρχιτεκτονικής	30
1.3. Συστήματα μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας	31
1.4. Το πρόβλημα διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων	33
1.5. Δομή και περιεχόμενο της διατριβής	35
2 ΔΙΟΙΚΗΤΙΚΗ ΜΕΡΙΜΝΑ	39
2.1. Τι είναι?	39
2.2. Σχετικό υπόβαθρο	40
2.2.1. Επιχειρησιακή διοικητική μέριμνα	41
2.2.2. Στρατιωτική διοικητική μέριμνα	41
2.2.3. Διοικητικές μέριμνες παραγωγής	42
2.3. Τεχνολογίες διοικητικής μέριμνας	42
2.4. Οφέλη της διοικητικής μέριμνας	44
2.5. Σύστημα διαχείρισης στόλου	45
2.5.1. Παρεχόμενες πληροφορίες ενός ΣΔΣ	46
2.5.2. Απλή μορφή ενός ΣΔΣ	47
2.5.3. Υλοποίηση μιας λύσης με σύγχρονες τεχνολογίες	47
2.5.4. Πλεονεκτήματα του ΣΔΣ	49
2.5.5. Διασύνδεση του ΣΔΣ και αξιοποίηση	49
2.6. Απόδοση της επένδυσης	51
2.7. Συμπέρασμα	52
3 ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΑΣΑ)	55
3.1. Τι είναι τα Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ)?	56

3.2. Οι ανησυχίες σχετικά με τα ΑΣΑ.....	59
3.2.1. Η παλιά ανησυχία: Διατήρηση των πόρων.....	60
3.2.2. Η νέα ανησυχία: Ρύπανση και η επιδείνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας	61
3.3. Υγειονομική ταφή και τα αποτελέσματά της.....	61
3.4. Βιώσιμη διαχείριση ΑΣΑ.....	62
3.5. Ρύπανση.....	63
3.6. Πολιτική της ΕΕ για τα ΑΣΑ	65
3.6.1. Παραγωγή ΑΣΑ στην ΕΕ.....	65
3.6.2. Η ιεραρχία της διαχείρισης των ΑΣΑ.....	66
3.6.3. Κανονισμοί και οδηγίες.....	68
3.7. Διαχείριση των ΔηΣΑ στην Ελλάδα	70
3.7.1. Η εσωτερική παραγωγή αποβλήτων	70
3.7.2. Πληθυσμός	71
3.7.3. Η παρούσα διαχείριση των ΔηΣΑ.....	72
3.8. Γιατί η Ελλάδα χρειάζεται άμεση δράση?	72
4 ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (ΓΣΠ)	75
4.1. Εισαγωγή.....	75
4.2. Τα μέρη ενός ΓΣΠ	76
4.2.1. Μηχανήματα	76
4.2.2. Αλγόριθμοι.....	76
4.2.3. Διαθέσιμα.....	77
4.3. Βασικές έννοιες των ΓΣΠ	77
4.3.1. Επίπεδα πληροφορίας (layers)	79
4.3.2. Χαρακτηριστικά (features) – επιφάνειες (surfaces).....	80
4.3.3. Συντεταγμένες χαρακτηριστικών.....	81
4.3.4. Κλίμακα χαρακτηριστικών	82
4.3.5. Σύνδεση χαρακτηριστικών με πληροφορίες.....	82
4.3.6. Χωρικές συνδέσεις χαρακτηριστικών.....	85
4.3.7. Δημιουργία νέων χαρακτηριστικών από επικαλυπτόμενες περιοχές.....	85
4.4. Γεωγραφικές βάσεις δεδομένων.....	86
4.4.1. Συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων	87
4.4.2. Αποθήκευση δεδομένων σε πίνακες ΣΔΒΔ.....	88
4.4.3. Γλώσσα SQL (Structured Query Language).....	88
4.5. Γεωβάση	89
4.5.1. Αποθήκευση γεωβάσης σε σχεσιακά DBMS	90
4.6. Γεώ-κωδικοποίηση και ΓΣΠ	91
4.6.1. Βασικές αρχές κωδικοποίησης	91
4.6.2. Η διαδικασία της γεώ-κωδικοποίησης.....	92
5 ΜΕΡΟΣ Ι: ΠΑΡΑΓΩΓΗ & ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ -----	
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	97
5.1. Γιατί μοντελοποίηση?	97
5.2. Το πρόβλημα.....	102
5.2.1. Εκτιμήσεις από στοιχεία του δήμου Αθηναίων	103
5.2.2. Καταγραφή στοιχείων ανά πρόγραμμα αποκομιδής.....	105
5.2.3. Πρόβλημα κάδων	106

5.2.4. Ο υφιστάμενος σχεδιασμός	107
5.2.5. Αναδιοργάνωση του υφιστάμενου συστήματος.....	108
5.3. Ανάλυση της υπόθεσης	108
5.4. Καθαρισμός και εμπλουτισμός της ΒΔ	111
5.5. Μεθοδολογία	114
5.5.1. Ανάλυση της περιοχής	115
5.5.2. Σχεδίαση της χωρικής γεω-βάσης.....	116
5.5.3. Μοντελοποίηση και ανάλυση δεδομένων.....	117
5.5.3.1. Αρχικός υπολογισμός σημείων φόρτωσης	117
5.5.3.2. Τελικός υπολογισμός σημείων φόρτωσης	120
5.5.3.3. Μέθοδος πολλαπλής παλινδρόμησης για τη διαχείριση απορριμμάτων	121
5.6. Αποτελέσματα.....	123
5.7. Συμπεράσματα	129
6 ΜΕΡΟΣ II: ΑΠΟΚΟΜΙΔΗ -----	
ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	133
6.1. Εισαγωγή	133
6.2. Μετα-ευριστικοί αλγόριθμοι – Τι είναι?.....	135
6.3. Αλγόριθμος Αναζήτησης Ταμπού (AT)	136
6.3.1. Εισαγωγή	137
6.3.2. Γενικές αρχές	138
6.3.3. Χρήση της μνήμης	139
6.3.4. Ενδυνάμωση και διαφοροποίηση	141
6.3.5. Στρατηγικές.....	143
6.3.5.1. Στρατηγική απαγόρευσης	143
6.3.5.2. Στρατηγική απελευθέρωσης	144
6.3.5.3. Βραχυπρόθεσμη στρατηγική.....	144
6.3.5.4. Ενδιάμεσες και Μακροπρόθεσμες στρατηγικές εκμάθησης.....	145
6.3.6. Κριτήρια φιλοδοξίας και περιορισμοί ταμπού	146
6.3.7. Βασικός αλγόριθμος αναζήτησης ταμπού	147
6.3.8. Παραλλαγές του αλγορίθμου AT.....	150
6.3.8.1. Αντιδραστική Αναζήτηση Ταμπού (AAT).....	151
6.3.8.2. Επαναληπτική Αναζήτηση Ταμπού (EAT)	152
6.4. Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm)	155
6.4.1. Αναπαράσταση του πληθυσμού	157
6.4.2. Δημιουργία του αρχικού πληθυσμού	159
6.4.3. Γενετικοί τελεστές	159
6.4.3.1. Επιλογή (Selection)	161
6.4.3.2. Διασταύρωση (crossover) ή επανασύνδεση (recombination)	163
6.4.3.3. Μετάλλαξη (mutation).....	165
6.4.3.4. Αντιστροφή	166
6.4.4. Παράμετροι ελέγχου	167
6.4.5. Η συνάρτηση καταλληλότητας (fitness).....	167
6.4.5.1. Εκτίμηση συνάρτησης καταλληλότητας (fitness)	167
6.4.5.2. Η αντικειμενική συνάρτηση και η συνάρτηση καταλληλότητας	168
6.4.6. Βασική δομή και ψευδοκώδικας ενός ΓΑ.....	170
6.4.7. Ο ΓΑ εναντίον των παραδοσιακών μεθόδων βελτιστοποίησης.....	172

6.5. Προσομοιωμένη Ανόπτηση (ΠΑ)	173
6.5.1. Βασικά Στοιχεία του αλγορίθμου ΠΑ	174
6.5.2. Προγράμματα ανόπτησης (annealing schedules)	178
6.5.3. Περιγραφή του βασικού αλγορίθμου ΠΑ για το ΠΠΠ.....	180
6.5.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αλγορίθμου ΠΑ	182
6.5.5. Σύγκριση με άλλες μεθόδους	183
6.6. Αλγόριθμος Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimisation) .	185
6.6.1. Εισαγωγή	185
6.6.2. Πώς τα μυρμηγκία βρίσκουν την πιο σύντομη διαδρομή	186
6.6.3. Το σύστημα μυρμηγκιών (The Ant System)	188
6.6.4. Η εφαρμογή του συστήματος μυρμηγκιών στο ΠΠΠ.....	191
6.6.5. Οι παραλλαγές του συστήματος μυρμηγκιών (Ant System)	194
6.6.6. Μελέτη πειραμάτων	195
7 ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ.....	201
7.1. Ο αλγόριθμος αναζήτησης ταμπού.....	201
7.2. Ο γενετικός αλγόριθμος.....	205
7.3. Προσομοιωμένη ανόπτηση.....	208
7.3.1. Ο αλγόριθμος	208
7.3.2. Ο ψευδοκώδικας της βασικής διαδικασίας.....	208
7.3.3. Πλεονεκτήματα του αλγορίθμου	209
7.3.4. Λειτουργία του προγράμματος.....	210
7.4. Σύστημα αποικίας μυρμηγκιών	211
7.4.1. Σύστημα αποικιών μυρμηγκιών (Ant Colony System)	212
7.4.2. Δομές δεδομένων και αντικείμενα.....	213
8 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ	215
8.1. Αλγόριθμος αναζήτησης ταμπού.....	216
8.1.1. Αξιολόγηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου.....	216
8.1.2. Εκτέλεση του αλγορίθμου ΑΤ στο πρόβλημά μας	216
8.1.3. Παρατηρήσεις	217
8.2. Γενετικός αλγόριθμος	218
8.2.1. Αξιολόγηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου.....	218
8.2.2. Εκτέλεση του ΓΑ στο πρόβλημά μας.....	219
8.3. Ο αλγόριθμος προσομοιωμένης ανόπτησης	225
8.3.1. Αξιολόγηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου.....	225
8.3.2. Εκτέλεση του αλγορίθμου ΠΑ στο πρόβλημά μας	226
8.4. Το σύστημα αποικίας μυρμηγκιών.....	230
8.4.1. Αξιολόγηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου.....	230
8.4.2. Εκτέλεση του αλγορίθμου ΣΑΜ στο πρόβλημά μας	233
8.4.3. Διαγράμματα σύγκλισης του αλγορίθμου ΣΑΜ	236
8.4.4. Κόστος δρομολόγησης.....	238
8.5. Συμπεράσματα.....	239
8.5.1. Σύγκριση των αλγορίθμων	239
8.5.2. Σύγκριση με την εμπειρική μέθοδο	240
8.5.3. Συνδυασμός των αποτελεσμάτων της παραγωγής και της αποκομιδής.....	242
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	243

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 3-1 Σχέση μεταξύ προϊόντων και αποβλήτων.....	57
Σχήμα 3-2 Οι τρεις στυλοβάτες της βιώσιμης ανάπτυξης. Η ίση εκτίμηση, καθενός από αυτούς είναι απαραίτητη, ειδικά, ολόκληρο το σύστημα θα είναι ασύμμετρο.....	59
Σχήμα 3-3 Μέση παραγωγή ΔηΣΑ κάθε χώρας ανά κάτοικο και ανά έτος και σύγκριση με τη μέση παραγωγή ΔηΣΑ των χωρών του ΟΟΣΑ.	65
Σχήμα 3-4 Η ιεραρχία της διαχείρισης των ΑΣΑ.	67
Σχήμα 4-1: Χάρτης από Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών.	78
Σχήμα 4-2: Διαφορετικά επίπεδα του αρχικού ψηφιακού χάρτη σε ένα ΓΣΠ....	79
Σχήμα 4-3: Ένα από 122 Προγράμματα συλλογής απορριμμάτων του Δήμου Αθηναίων.	83
Σχήμα 4-4: Κάδοι απορριμμάτων που συλλέχτηκαν από το απορριμματοφόρο Νο.822 του Δήμου Αθηναίων στις 03.01.2004.	84
Σχήμα 4-5: Προγράμματα συλλογής απορριμμάτων που καταλαμβάνουν εμβαδόν άνω των 0,5 Km ²	84
Σχήμα 5-1: Ο Χάρτης της εξεταζόμενης περιοχής.	102
Σχήμα 5-2: Μία φόρμα της χωρικής γεω-βάσης για την καταχώριση της χρήσης γης.....	115
Σχήμα 5-3: Ολοκληρωμένο Σύστημα Διαχείρισης Παραγωγής Αστικών Στερεών.	117
Σχήμα 5-4: Διάγραμμα που απεικονίζει τη διαφορά των κάδων μεταξύ του προτεινόμενου μοντέλου και του εμπειρικού μοντέλου του δήμου της Αθήνας. Η εξεταζόμενη περιοχή έχει διαιρεθεί σε Οκτώ (8) τομείς σε αυτήν την πειραματική ενότητα.....	124
Σχήμα 5-5: Διάγραμμα που απεικονίζει τη διαφορά των κάδων μεταξύ του προτεινόμενου μοντέλου και του εμπειρικού μοντέλου του δήμου της Αθήνας. Η εξεταζόμενη περιοχή έχει διαιρεθεί σε Δεκάξι (16) τομείς σε αυτήν την πειραματική ενότητα.	124
Σχήμα 5-6: Διάγραμμα που απεικονίζει τη διαφορά των κάδων μεταξύ του προτεινόμενου μοντέλου και του εμπειρικού μοντέλου του	

δήμου της Αθήνας. Η εξεταζόμενη περιοχή έχει διαιρεθεί σε Είκοσι Οκτώ (28) τομείς σε αυτήν την πειραματική ενότητα.	125
Σχήμα 5-7: Ο χάρτης της περιοχής διαιρούμενος σε 8 τομείς (Μεγάλοι Τομείς). Βασισμένος στο προτεινόμενο μοντέλο, μόνο τα 112 αριθμημένα σημεία αντιπροσωπεύουν τους απαραίτητους κάδους απορριμμάτων. Επιπρόσθετα στους 112 κάδους, ο δήμος Αθηναίων χρησιμοποιεί επιπλέον 50 κάδους που παρουσιάζονται με γκρι σημεία στον χάρτη (κλίμακα 1:5.000).	126
Σχήμα 5-8: Οι μεταβολές των συντελεστών παλινδρόμησης για τις τέσσερις κατηγορίες παραγωγής αστικών αποβλήτων (Α, Β, Γ, Δ) στα τρία διαφορετικά πειράματα (Μεγάλοι, Μεσαίοι & Μικροί Τομείς)....	128
Σχήμα 6-1: Οι τέσσερις (4) διαστάσεις του αλγορίθμου ΑΤ.....	140
Σχήμα 6-2: Διαφοροποίηση και Ενδυνάμωση	142
Σχήμα 6-3: Διάγραμμα ροής ενός αλγόριθμου ΑΤ.....	145
Σχήμα 6-4: Ψευδοκώδικας του κανονικού αλγορίθμου ΑΤ.	150
Σχήμα 6-5: Ψευδοκώδικας του Αλγορίθμου ITS.....	155
Σχήμα 6-6: Διάγραμμα ροής ενός απλού γενετικού αλγόριθμου.	160
Σχήμα 6-7: Τροχός ρουλέτας και στοχαστική καθολική δειγματοληψία.	162
Σχήμα 6-8: Διασταύρωση ενός σημείου	165
Σχήμα 6-9: Διασταύρωση δύο σημείων	165
Σχήμα 6-10: Κυκλική Διασταύρωση	165
Σχήμα 6-11: Ομοιόμορφη Διασταύρωση.....	165
Σχήμα 6-12: Μετάλλαξη	166
Σχήμα 6-13: Αντιστροφή ενός τμήματος δυαδικής ακολουθίας.....	166
Σχήμα 6-14: Ψευδοκώδικας ενός Απλού Γενετικού Αλγόριθμου	172
Σχήμα 6-15: Απλή διάταξη ατόμων.	174
Σχήμα 6-16: Ο αλγόριθμος Προσομοίωση Ανόπτησης.....	176
Σχήμα 6-17: Διάγραμμα ροής ενός κανονικού αλγορίθμου ΠΑ.....	177
Σχήμα 6-18: Η κατανομή Boltzmann καταρρέει στη χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση στο όριο χαμηλών θερμοκρασιών.....	181
Σχήμα 6-19: Γενικό σχήμα για έναν αλγόριθμο ΠΑ	181
Σχήμα 6-20: Το πείραμα της διπλής γέφυρας.....	187
Σχήμα 6-21: Ένα παράδειγμα με πραγματικά μυρμήγκια	190
Σχήμα 6-22: Ένα παράδειγμα με «τεχνητά» μυρμήγκια.....	191
Σχήμα 6-23: Εξέλιξη της κατανομής ίχνους για ένα πρόβλημα 10 πόλεων.....	197

Σχήμα 6-24: Η συμπεριφορά του ant-cycle για διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων α, β .	198
Σχήμα 7-1: Μια επανάληψη στον αλγόριθμό μας.....	205
Σχήμα 7-2: Στιγμιότυπο (screenshot) της εκτέλεσης του Γενετικού Αλγόριθμου.	207
Σχήμα 7-3: Στιγμιότυπο (screenshot) της εκτέλεσης του αλγόριθμου ΠΑ.	211
Σχήμα 8-1: Κατανομή του εύρους των λύσεων που παράγει ο ΓΑ.....	223
Σχήμα 8-2: Γραφική αναπαράσταση του βέλτιστου μήκους της διαδρομής (8.902) συναρτήσει του αριθμού επαναλήψεων του ΓΑ.	224
Σχήμα 8-3: Κατανομή των λύσεων του αλγορίθμου ΠΑ για διαφορετικά σετ παραμέτρων.	226
Σχήμα 8-4: Γραφική αναπαράσταση των τεσσάρων καλύτερων λύσεων συναρτήσει του αριθμού επαναλήψεων του ΠΑ.	229
Σχήμα 8-5: Διάγραμμα σύγκλισης της βέλτιστης διαδρομής (9662m) σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων του ΠΑ.....	230
Σχήμα 8-6: Κατανομή των αποτελεσμάτων για το σύνολο των παραμέτρων: $NC=2.000, \alpha=1, \beta=2, \rho=0,1, q_0=0,5$.	235
Σχήμα 8-7: Διάγραμμα σύγκλισης για τα καλύτερα αποτελέσματα που παρήχθησαν από τον αλγόριθμο ΣΑΜ.....	237
Σχήμα 8-8: Κατανομή του χρόνου φόρτωσης των κάδων απορριμμάτων στο απορριμματοφόρο από ένα σύνολο 27 πειραμάτων του χρόνου αποκομιδής.....	238
Σχήμα 8-9: Ιστόγραμμα με τα βέλτιστα κόστη των τεσσάρων αλγορίθμων και σύγκρισή τους με το αντίστοιχο εμπειρικό.	241

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3-1: Εθνική παραγωγή ΔηΣΑ (σε χιλιάδες τόνους). Source: (JMD 50910/2727/2003)	70
Πίνακας 3-2: Ακαθάριστο εγχώριο προϊόν (σε εκατομμύρια EURO, στις τρέχουσες τιμές) Source: Eurostat 2004	71
Πίνακας 3-3: Παραγωγή ΔηΣΑ στην Ελλάδα (Παναγιωτακόπουλος 2002)	71
Πίνακας 4-1: Περιγραφικά χαρακτηριστικά ενός επιπέδου.....	83
Πίνακας 5-1: Ποσότητα Απορριμμάτων Δήμου Αθηναίων (1993 και 1996)	104
Πίνακας 5-2: Ποσότητα Παραγομένων Απορριμμάτων Δήμου Αθηναίων	104
Πίνακας 5-3: Στοιχεία των προγραμμάτων αποκομιδής καταγεγραμμένα σε βάση δεδομένων.	106
Πίνακας 5-4: Σενάριο διπλών εγγραφών.	113
Πίνακας 5-5: Χωρικοί τύποι γεω-δεδομένων και η γεωμετρική αντιπροσώπευσή τους.	116
Πίνακας 5-6: Κατηγορίες εμπορικών δραστηριοτήτων σχετικά με την εμπορική τους κίνηση.	118
Πίνακας 5-7: Οι οκτώ (8) τομείς, στους οποίους έχει διαιρεθεί η εξεταζόμενη περιοχή, ο πληθυσμός του κάθε τομέα, το συνολικό εμβαδόν (m^2) των τεσσάρων κατηγοριών (Α, Β, Γ, Δ) και η ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων (Kg).....	125
Πίνακας 5-8: Το εύρος των συντελεστών για την εμπορική δραστηριότητα και των σχετικών εμπορικών τύπων (καταστήματα) για τις τέσσερις κατηγορίες δεδομένων όπως έχουν προέλθει από τα τρία πειράματα (Μεγάλοι, Μεσαίοι και Μικροί) και η ποσοστιαία διακύμανση μεταξύ των αποτελεσμάτων των τριών πειραμάτων.	128
Πίνακας 5-9: Οι πολλαπλοί συντελεστές συσχετισμού (R^2) για τα τρία πειράματα.....	129
Πίνακας 6-1: Σύγκριση των όρων που χρησιμοποιούνται στην πληροφορική και στη βιολογία.	156
Πίνακας 6-2: Σύγκριση των όρων που χρησιμοποιούνται στα στερεά με τους αντίστοιχους που χρησιμοποιούνται στα προβλήματα βελτιστοποίησης	175

Πίνακας 6-3: Σύγκριση των αλγορίθμων ant-quantity, ant-density και ant-cycle	196
Πίνακας 7-1: Αναλογίες του ΠΠΠ με το πρόβλημα βελτιστοποίησης της μεταφοράς απορριμμάτων	203
Πίνακας 8-1: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΑΤ στο πρόβλημά μας για διάφορες τιμές της διάρκειας της λίστας ταμπού.	217
Πίνακας 8-2: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΓΑ για διάφορες τιμές του κατώτατου ορίου ποικιλομορφίας.	220
Πίνακας 8-3: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΓΑ για διάφορες τιμές της παραμέτρου «Παιδιά ανά Γενιά».....	220
Πίνακας 8-4: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΓΑ για διάφορες τιμές της παραμέτρου «Πιθανότητας Μετάλλαξης».....	221
Πίνακας 8-5: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΓΑ για διάφορες τιμές της παραμέτρου «Μέγεθος Δεξαμενής των Γονιδίων (Gene Pool)»	221
Πίνακας 8-6: Ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων του ΓΑ.....	222
Πίνακας 8-7: Σύγκριση της καλύτερης λύσης του ΓΑ και της εμπειρικής λύσης.	225
Πίνακας 8-8: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου ΠΑ στο «ft70.atsp.gz» για διάφορες τιμές των παραμέτρων του.....	225
Πίνακας 8-9: Ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων του ΠΑ.....	226
Πίνακας 8-10: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου ΠΑ στο πρόβλημά μας για διάφορες τιμές των παραμέτρων του.....	227
Πίνακας 8-11: Σύγκριση της καλύτερης λύσης ΠΑ και της εμπειρικής λύσης.	228
Πίνακας 8-12: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΣΑΜ στο «ft70.atsp.gz» για $q_0=0,25$	232
Πίνακας 8-13: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΣΑΜ στο «ft70.atsp.gz» για $q_0=0,5$	232
Πίνακας 8-14: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΣΑΜ στο «ft70.atsp.gz» για $q_0=0,75$	232
Πίνακας 8-15: Υλοποίηση του αλγόριθμου ΣΑΜ για διάφορους συνδυασμούς των (α , β , ρ , q_0).	233
Πίνακας 8-16: Ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.....	234
Πίνακας 8-17: Σύγκριση μεταξύ του αλγορίθμου ΣΑΜ και της εμπειρικής μεθόδου.	235

Πίνακας 8-18: Σύγκριση επιδόσεων μεταξύ εμπειρικού και προτεινόμενου μοντέλου.	242
--	-----

Είναι γεγονός ότι είμαστε περικυκλωμένοι από συστήματα που εμπλέκουν ανθρώπους, τεχνολογίες και διαδικασίες και τα οποία είναι ευρέως γνωστά ως "επιχειρησιακά συστήματα". Λειτουργούν καλά παρόλες τις ανεπάρκειες, τις ατέλειες και την έλλειψη συντονισμού, εξασφαλίζοντας κέρδη και προωθώντας την παγκόσμια οικονομία. Εντούτοις, φαίνεται ότι η πρακτική των επιχειρησιακών συστημάτων ξεπερνά την επιστήμη των επιχειρησιακών συστημάτων.

Θεωρώντας την παγκόσμια οικονομία ως ένα επιχειρησιακό οικοσύστημα, συνεπάγεται ότι θα διεκπεραιώνονται συναλλαγές με μεγάλης κλίμακας συστήματα, τα οποία περιέχουν πολυπλοκότητα, υψηλή αβεβαιότητα και γρήγορη δυναμική. Υπό αυτήν τη μορφή, τα μεγάλης κλίμακας επιχειρησιακά συστήματα ενώ πρέπει να αντιπροσωπεύουν ένα άριστο πεδίο για τους πολλαπλούς και πολύπλευρους επιστημονικούς κλάδους καθώς και για τους επιστήμονες, εντούτοις, για διάφορους λόγους και αιτίες, είτε αψηφούνται είτε, μερικές φορές, δε λαμβάνονται υπόψη.

1.1. Επιστημονικά φαινόμενα στα συστήματα μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας

Ο άνθρωπος όντως περιτριγυρισμένος από τη φύση, κοιτάει και ψάχνει (για πολλούς αιώνες τώρα) μέσα σ' αυτήν για χρήσιμα και εμπνευσμένα μαθήματα, αναλογίες και παρόμοιες συμπεριφορές. Ο επιστήμονας εξετάζει τη φύση για να αναλύσει και να καταλάβει ενώ οι μηχανικοί εξετάζουν τη φύση για να συνθέσουν και να δημιουργήσουν. Παρά αυτήν την προφανή αντίφαση (επιστήμης έναντι εφαρμοσμένης μηχανικής), οι πρόοδοι που έχουν σημειωθεί στον έναν τομέα έχουν ασκήσει θετική επίδραση άμεσα ή έμμεσα και στον άλλον. Παρακάτω, τα επιστημονικά φαινόμενα τα οποία είναι παρόντα σε όλα τα μεγάλης κλίμακας συστήματα είναι τα εξής:

- Η *αύξηση* και η *συρρίκνωση* αναλύονται προκειμένου να διευκρινιστούν οι νόμοι της αύξησης των συστημάτων μεγάλης κλίμακας, οι οποίοι όχι μόνο θα εξηγήσουν την εσωτερική δομή και δυναμική, αλλά και θα εξασφαλίσουν τη βάση για τις μελλοντικές προβλέψεις και τις προγνώσεις.
- Η *εξέλιξη* και η *ανανέωση* μελετώνται σε ένα παρατεταμένο χρονικό πλαίσιο, το οποίο προσπαθεί να συλλάβει τους διάφορους παράγοντες επιρροής καθώς και τα βασικά χαρακτηριστικά τους. Οι ανθεκτικές (μακρόβιες) επιχειρήσεις εκθέτουν μερικές εξελικτικές συμπεριφορές.
- Η *αιτιότητα* και ο *συσχετισμός* είναι σημαντικό να κατανοηθούν ως αιτίες και συνέπειες στο πλαίσιο της ανάλυσης, σύνθεσης και λήψης αποφάσεων, διότι οι έννοιες αυτές δεν είναι πάντα σαφείς ή πλήρως κατανοητές και ειδικά όσον αφορά στα μεγάλης κλίμακας συστήματα.
- Η *προσαρμογή* συσχετίζεται με όλους τους προηγούμενους παράγοντες και θα μπορούσε να συνοψιστεί ως η αναζήτηση για την επιβίωση, διότι ενσωματώνει όλα τα φυσικά φαινόμενα, όπως του ανταγωνισμού, της συγκατοίκησης, της συνεργασίας και της αντιμετώπισης των προβλημάτων.

1.2. Τρεις αρχές αρχιτεκτονικής

Από την πλευρά της εφαρμοσμένης μηχανικής, μπορούν να παρατηρηθούν οι ακόλουθες δραστηριότητες οι οποίες σχετίζονται πολύ με τα προαναφερθέντα φυσικά φαινόμενα:

- Ο σχεδιασμός των μεγάλης κλίμακας συστημάτων απαιτεί τη δημιουργία ενός φανταστικού σχεδιαγράμματος, το οποίο θα πρέπει να λάβει υπόψη του τις αλλαγές σε μια μακροχρόνια κλίμακα χρόνου, να θέσει νέες απαιτήσεις και να μεταβάλλει τις υπάρχουσες περιστάσεις.
- Η εφαρμοσμένη μηχανική πρέπει να παρέχει τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της αξιοπιστίας, της χρησιμότητας και της αξιοπιστίας μέσω των εξελισσόμενων κύκλων αναβάθμισης της τεχνολογίας όπως αυτά προσαρμόζονται σε ένα αρχιτεκτονικό σχεδιάγραμμα.
- Η ανάπτυξη πρέπει να γίνει έτσι ώστε να παρέχει τις προαναφερθείσες ιδιότητες της εφαρμοσμένης μηχανικής, εξισορροπώντας τις με τους διάφορους περιορισμούς του κόστους, του χρόνου, και της προσπάθειας.

Το τελικό αποτέλεσμα αυτών των δραστηριοτήτων θα ήταν δυνατό να παρουσιαστεί με τρεις μόνο λέξεις «Εξελικτικό, Αποδοτικό και Κομψό» (Αρχιτεκτονική / Σχέδιο / Ανάπτυξη) οι οποίες θα μπορούσαν να θεωρηθούν ως οι τρεις θεμελιώδεις κατευθυντήριες αρχές.

Το κέντρο στη σύγχρονη επιχείρηση είναι ο ρόλος της υποδομής του τμήματος IT (Information Technology Department). Η δομή ενός τμήματος IT είναι το Ανθρώπινο Δυναμικό, οι Διαδικασίες και τα Εργαλεία δεδομένου ότι παρέχει τις εγκαταστάσεις επικοινωνίας, συνεργασίας και συντονισμού. Επιχειρησιακές μικροδουλειές που εκτελούνται μέσω της δομής του τμήματος IT είναι δυναμικά φαινόμενα μεγάλης κλίμακας, καθώς οι επιχειρήσεις βυθίζονται μέσα σε αγορές και εκτίθενται σε ρυθμιστικές δυνάμεις, οικονομικούς στόχους και ανταγωνιστικές πιέσεις.

Η κατανόηση ολόκληρου του πλαισίου υποθέτει τις δυναμικές συμπεριφοράς κάτω από μια ατελείωτη ροή γεγονότων, πίεσης και ροής δεδομένων θέτοντας διάφορες μεγάλες προκλήσεις. Αναμένονται ακόμα σημαντικότερες επαναστατικές ανακαλύψεις στην επιστήμη των επιχειρησιακών συστημάτων, επιτρέποντας έτσι, ακόμα περισσότερο την πρόοδο της εφαρμοσμένης μηχανικής.

Παρά την απουσία της επιστημονικής κατανόησης, αυτά τα μεγάλης κλίμακας δυναμικά συστήματα συναντιούνται καθημερινά, καθώς απασχολούν εκατοντάδες εκατομμύρια ανθρώπων και δημιουργούν, παγκοσμίως, δισεκατομμύρια σε αξία και πλούτο. Αυτό, επίσης, καταδεικνύει την κοινωνική σχετικότητα της έρευνας για τα μεγάλης κλίμακας συστήματα.

Τελικά, φαίνεται απαραίτητο να στοχεύει κανείς στα σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά στην επιστήμη των επιχειρησιακών συστημάτων. Η διευκρίνιση των μεγάλης κλίμακας συστημάτων όχι μόνο θα βελτιώσει την κατανόηση του παρελθόντος, του παρόντος και του μέλλοντος, αλλά και θα επιτρέψει την ανάλυση των διάφορων μυστηρίων, τα οποία κείτονται μεταξύ των περιοχών του φυσικού και τεχνητού συστήματος, το οποίο μπορεί να αποκαλεστεί ως εκ τούτου "επιστήμη των υβριδικών συστημάτων".

1.3. Συστήματα μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας

Τα μεγάλης κλίμακας συστήματα έχουν χαρακτηριστεί παραδοσιακά από ένα μεγάλο αριθμό μεταβλητών μη γραμμικότητας και αβεβαιοτήτων. Η διαίρεση τους σε μικρότερα, πιο εύχρηστα υποσυστήματα, που οργανώνονται ενδεχομένως

σε μια ιεραρχική μορφή, έχει συνδεθεί με την έντονη και χρονικά-κρίσιμη ανταλλαγή πληροφοριών και με την ανάγκη για αποδοτικούς μηχανισμούς συντονισμού.

Κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας του προηγούμενου αιώνα και της αρχής του 21ου αιώνα έχουν παρουσιαστεί νέα χαρακτηριστικά γνωρίσματα τόσο των βιομηχανικών όσο και των μη-βιομηχανικών συστημάτων μεγάλης κλίμακας. Οι σημερινές επιχειρήσεις πρόκειται να λειτουργήσουν σε ένα ιδιαίτερα δικτυωμένο περιβάλλον και υπάρχει μια ολοένα αυξανόμενη ανησυχία για την ενσωμάτωση των διάφορων τεχνολογιών αλλά και των οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών πτυχών στο εργασιακό αυτό περιβάλλον. Συνεπώς, ο σχεδιασμός των συστημάτων ελέγχου πρέπει να λάβει υπόψη του περισσότερες πτυχές και παράλληλα απαιτούνται πρόσθετες δεξιότητες και εργαλεία για να επιτευχθεί αυτό. Συγχρόνως, οι πρόσφατες πρόοδοι στο χώρο των υπολογιστών και οι τεχνολογίες επικοινωνιών μπορούν να παρέχουν αποτελεσματικά εργαλεία και επαρκείς τεχνικές υποδομές για να υποστηρίξουν το σχεδιασμό και την υλοποίηση των συστημάτων ελέγχου για τις εφαρμογές μεγάλης κλίμακας.

Εκτιμάται ότι διάφορες υποπεριοχές, όπως είναι ο ιεραρχικός και ο αποκεντρωμένος έλεγχος καθώς και τα μοντέλα ελαχιστοποίησης και βελτιστοποίησης, οι οποίες είναι παραδοσιακές για τα συστήματα μεγάλης κλίμακας, κεντρίζουν ακόμα το επιστημονικό ενδιαφέρον. Οι παραδοσιακές εφαρμογές των μεθόδων στα συστήματα μεγάλης κλίμακας, όπως η ηλεκτρική ενέργεια, το αέριο, τα μέσα μεταφοράς, οι κατασκευές και τα συστήματα υδρεύσεως βρίσκονται ακόμα κάτω από το πρίσμα του γενικού ενδιαφέροντος. Άλλες παραδοσιακές περιοχές εφαρμογών, όπως η γεωργία, οι βιομηχανικές διαδικασίες και η ρομποτική μόλις και μετά βίας έχουν αντιπροσωπευθεί από τα συστήματα μεγάλης κλίμακας. Νέα ζητήματα, όπως η διαχείριση ρίσκου και η ανθρώπινη απόφαση σε συστήματα μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας, έχουν γίνει σχεδόν πλήρως αποδεκτά από τους σημερινούς ερευνητές. Μεταξύ των κύριων ιδεών και των τάσεων που υπάρχουν στην επιστημονική κοινότητα, μία από αυτές θα μπορούσε να περιέχει ότι: α) τα μεγάλα συστήματα γίνονται ακόμα μεγαλύτερα (πιο περίπλοκα και μεταξύ τους δικτυωμένα) και β) υπάρχει, ακόμα, ανάγκη για πρακτικές λύσεις, ενδεχομένως λόγω των νέων τεχνολογιών με σκοπό την επίτευξη μιας σωστής ισορροπίας μεταξύ των τεχνικών ελέγχου, των υπολογιστών και των εργαλείων επικοινωνίας.

Ακόμα κι αν η μεγάλη πλειοψηφία των ερευνών έχει πραγματοποιηθεί σε ακαδημαϊκό επίπεδο, εντούτοις, γίνεται αισθητό ότι προσπάθειες πρέπει να καταβληθούν περαιτέρω για να εφαρμοστούν οι νέες αναπτυγμένες μέθοδοι και οι τεχνικές στα βιομηχανικά προϊόντα. Επίσης, οι τρέχουσες πληροφορίες και οι τεχνολογίες επικοινωνιών πρόκειται να εφαρμοστούν σε μεγαλύτερη έκταση για να λύσουν τα νέα προβλήματα των δικτυωμένων συστημάτων της σημερινής εποχής.

1.4. Το πρόβλημα διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων

Το πρόβλημα της διαχείρισης των απορριμμάτων ανάγεται σε ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά και οικονομικά προβλήματα της εποχής μας. Η διαχείριση των αστικών απορριμμάτων ξεκινά με τη συλλογή τους από τους χώρους παραγωγής και καταλήγει στην τελική διάθεσή τους.

Ο τρόπος συλλογής - μεταφοράς των απορριμμάτων που χρησιμοποιείται σε μεγάλη κλίμακα, είναι η τοποθέτηση τους σε κάδους, η συλλογή τους από ειδικά απορριμματοφόρα αυτοκίνητα και η μεταφορά τους μέχρι ένα σταθμό μεταφόρτωσης ή μέχρι το ΧΥΤΑ (Χώρος Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων). Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ΧΥΤΑ δεν πρέπει να συγχέονται με τις υπάρχουσες χωματερές όπου δεν υπάρχει κατάλληλη υποδομή και η απόρριψη των αποβλήτων είναι συχνά ανεξέλεγκτη. Οι σύγχρονοι ΧΥΤΑ πρέπει να έχουν επικάλυψη στον πυθμένα τους με φυσικά ή τεχνητά υλικά για στεγανοποίηση, κατάλληλα συστήματα συλλογής και επεξεργασίας των στραγγισμάτων καθώς και συστήματα συλλογής του βιοαερίου.

Η Κοινοτική οδηγία σχετικά με τα αστικά στερεά απόβλητα (Οδηγία 75/442/ΕΚ) απαιτεί από τις χώρες – μέλη να διαμορφώσουν ένα ολοκληρωμένο και επαρκές δίκτυο εγκαταστάσεων απόθεσης. Η εναρμόνιση με την Κοινοτική Οδηγία προβλέπει: Εναλλακτική διαχείριση συσκευασιών, εναλλακτική διαχείριση μετά τη χρήση των προϊόντων, κομποστοποίηση στο σπίτι, εναλλακτική διαχείριση επικίνδυνων οικιακών απορριμμάτων και διαμόρφωση πολιτικής των Οργανισμών Τοπικής Αυτοδιοίκησης (ΟΤΑ) για τα απορρίμματα.

Στην Ελλάδα, τις τελευταίες δεκαετίες, είχαμε σημαντική αύξηση της ποσότητας των παραγόμενων στερεών αποβλήτων λόγω της οικονομικής ανάπτυξης, της επέκτασης των αστικών κέντρων της χώρας, της αύξησης του μαζικού τουρισμού, της ανόδου του βιοτικού επιπέδου και της αλλαγής των

καταναλωτικών προτύπων. Τα τελευταία χρόνια, έχει πραγματοποιηθεί μία σειρά έργων διαχείρισης των στερεών αποβλήτων: είκοσι τρία (23) ΧΥΤΑ, δύο (2) Κέντρα Ανακύκλωσης, ένα (1) Εργοστάσιο Κομποστοποίησης και εννιά (9) Σταθμοί Μεταφόρτωσης Στερεών Αποβλήτων, ενώ πολλοί ανεξέλεγκτοι ΧΔΑ (Χώροι Διάθεσης Απορριμμάτων) έχουν σταματήσει να λειτουργούν.

Όσον αφορά την ανακύκλωση, η οποία θεωρείται απαραίτητο μέρος κάθε ορθολογικού συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων, στη χώρα μας ανακυκλώνεται περίπου μόνο το 8,7% των παραγόμενων αστικών αποβλήτων (κυρίως γυαλί, χαρτί και αλουμίνιο).

Στη διαμόρφωση διαχειριστικών σχεδίων, από το σύστημα συλλογής των απορριμμάτων, λαμβάνεται μέχρι σήμερα υπόψη μόνο το κόστος που αντιστοιχεί στο χρόνο χρήσης των απορριμματοφόρων για τη μεταφορά των απορριμμάτων στις εγκαταστάσεις υποδοχής. Η παρούσα μελέτη αποσκοπεί στην ανάλυση, σχεδίαση και υλοποίηση ενός μοντέλου αναπαράστασης μέσω υπολογιστή των διαδικασιών συλλογής, μεταφοράς, και απόθεσης των αστικών απορριμμάτων. Στη συνέχεια, το μοντέλο αυτό θα χρησιμοποιηθεί για τον εντοπισμό των πλέον αποδεκτών και οικονομικών λύσεων του προβλήματος. Η υλοποίηση θα γίνει σε περιβάλλον Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ), τα οποία αντιπροσωπεύουν ένα ισχυρό σύνολο εργαλείων για τη συλλογή, αποθήκευση, διαχείριση και ανάλυση των χωρικών στοιχείων.

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στα οικοδομικά τετράγωνα της περιοχής του Αγίου Σώστη του Δήμου Αθηναίων για την οποία υπάρχουν στοιχεία από ένα πιλοτικό πρόγραμμα συστήματος παρακολούθησης και διαχείρισης στόλου οχημάτων.

Η μοντελοποίηση του συστήματος για τη βελτιστοποίηση του τρόπου αποκομιδής των απορριμμάτων από τη συγκεκριμένη περιοχή, προϋποθέτει την εύρεση της κατάλληλης δρομολόγησης των οχημάτων με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους και την αποδοτικότερη εκμετάλλευση των πόρων του συστήματος.

Για την εύρεση της βέλτιστης διαδρομής δοκιμάστηκαν αλγόριθμοι βελτιστοποίησης, οι οποίοι έχουν εφαρμοστεί σε διάφορα προβλήματα εύρεσης βέλτιστης λύσης. Μία ομάδα προβλημάτων που έχουν απασχολήσει την επιστημονική κοινότητα αλλά και άλλους οργανισμούς, φορείς και εταιρείες, τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε ερευνητικό επίπεδο, είναι τα προβλήματα δρομολόγησης. Οι αλγόριθμοι που αναπτύσσονται στην παρούσα διατριβή που έχουν ως στόχο την επίλυση του προβλήματος δρομολόγησης είναι οι εξής: Οι

Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), η Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing), η Αναζήτηση Ταμπού (Tabu Search) και η βελτιστοποίηση με τη χρήση του Συστήματος Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony System).

Τέλος, οι αλγόριθμοι καθώς και οι λύσεις που δίνουν στο πρόβλημα της εύρεσης βέλτιστης διαδρομής, συγκρίνονται με τον εμπειρικό τρόπο, δηλαδή, με τη διαδρομή που ακολουθείται σήμερα από το Δήμο Αθηναίων για την αποκομιδή των αστικών στερεών αποβλήτων.

Όσον αφορά τα δεδομένα για τη μελέτη μας, ο Δήμος Αθηναίων παραχώρησε χάρτες της περιοχής (με τα οικοδομικά τετράγωνα, το οδικό δίκτυο, τις θέσεις των κάδων, κτλ), καθώς και διάφορα αριθμητικά στοιχεία (π.χ. ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων, υφιστάμενες διαδρομές των απορριμματοφόρων, κτλ), τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν χρήσιμες πληροφορίες κατά τη μελέτη, αλλά και για να συγκριθούν με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που παρήχθησαν από την υλοποίηση και την εφαρμογή των τεσσάρων προαναφερθέντων αλγορίθμων.

Εν κατακλείδι, η παρούσα εργασία εστιάζει κυρίως στην εύρεση της βέλτιστης διαδρομής που πρέπει να εκτελέσουν τα απορριμματοφόρα του Δήμου Αθηναίων για την αποκομιδή και τη μεταφορά των αστικών στερεών αποβλήτων σε προκαθορισμένες περιοχές. Οι περιοχές αυτές έχουν καθοριστεί από τη Διεύθυνση Καθαριότητας του Δήμου, η οποία έχει διαιρέσει τη συνολική περιοχή που καλύπτει ο Δήμος σε εκατόν είκοσι δύο (122) προγράμματα αποκομιδής απορριμμάτων (Δήμος Αθηναίων 2003).

1.5. Δομή και περιεχόμενο της διατριβής

Η διατριβή παρουσιάζει και αναφέρεται στα συστήματα εκείνα, τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διαχείριση και τη λήψη αποφάσεων για προβλήματα μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας. Τα προβλήματα αυτά περιέχουν πληροφορίες, οι οποίες εξάγονται από γεωσυσχετισμένα δεδομένα και θα μπορούσαν να λάβουν μέρος σε ένα περιβάλλον διοικητικής μέριμνας. Συνολικά, η διατριβή περιλαμβάνει οκτώ (8) κεφάλαια. Στο πρώτο (1^ο) κεφάλαιο επιχειρήθηκε μια σύντομη αναφορά στα μεγάλης κλίμακας συστήματα, τα οποία έχουν χαρακτηριστεί, παραδοσιακά, από ένα μεγάλο αριθμό μη γραμμικών μεταβλητών και αβεβαιότητας για το εύρος των τιμών τους. Παρατηρείται μεγάλη κατασπατάληση πόρων καθώς και ανθρώπινου δυναμικού σε δραστηριότητες μη

αποδοτικές ιδιαίτερα όταν τα προβλήματα αφορούν εφαρμογές μεγάλης κλίμακας. Επιπλέον, σε πολλές περιπτώσεις σημειώνεται έλλειψη και σε άλλες περιπτώσεις, αφθονία των πόρων αυτών (έμψυχων ή/και άψυχων). Το σίγουρο είναι ότι δεν είναι εύκολος ο εντοπισμός των χώρο-χρονικών αναγκών και η διάθεση των αναγκαίων πόρων στο χώρο και στο χρόνο όπου αυτοί χρειάζονται. Η παρούσα διατριβή κινείται στο συγκεκριμένο αυτό χώρο και αφορά τόσο την αποτύπωση μέσω μοντελοποίησης της εξέλιξης συγκεκριμένων χώρο-χρονικών φαινομένων όσο και την αντιμετώπιση τους με στόχο τη βέλτιστη διαχείριση των πόρων μέσω της χρήσης κατάλληλων αλγορίθμων.

Στο δεύτερο (2^ο) κεφάλαιο αναλύεται η έννοια της διοικητικής μέριμνας, η οποία με τον ορισμό ότι "Ο χρόνος συνδεδεμένος με τον προσδιορισμό θέσης των πόρων" θεωρείται συνήθως ως κλάδος της εφαρμοσμένης μηχανικής και αποτελεί πολυσήμαντη και πολυσύνθετη έννοια, καλύπτοντας μια τεράστια γκάμα διαδικασιών σχεδιασμού, υλοποίησης και ελέγχου σε επιχειρηματικό πεδίο. Αναλύονται τα βασικά στοιχεία της διοικητικής μέριμνας τα οποία είναι η διοίκηση και ο στρατηγικός σχεδιασμός μιας επιχείρησης, η βέλτιστη αξιοποίηση των έμψυχων (ανθρώπινων) και των άψυχων (υλικών) πόρων της, η δημιουργία, ο έλεγχος και η διανομή των υπηρεσιών, από το πρώτο στάδιο μέχρι το τελευταίο και από την δημιουργία στην διανομή οποιοδήποτε υπηρεσιών, εξασφαλίζοντας έτσι τη συνεχή διαθεσιμότητα των υπηρεσιών και των λοιπών πόρων της, και επιτρέποντας παράλληλα την ομαλή ροή επιτέλεσης των προαναφερθέντων διαδικασιών.

Το τρίτο (3^ο) κεφάλαιο επικεντρώνεται στο πρόβλημα της διαχείρισης των Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ), το οποίο αποτελεί αναμφισβήτητα ένα πρόβλημα μεγάλης κλίμακας και πολυπλοκότητας και αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά και οικονομικά προβλήματα της εποχής μας. Αρχικά, διευκρινίζεται τι ονομάζουμε «απορρίμματα», τι είναι ένα «σύστημα διαχείρισης αστικών απορριμμάτων» και ποια είναι η ιεραρχία ενός τέτοιου συστήματος. Επίσης, γίνεται αναφορά στην υφιστάμενη κατάσταση (Δήμος Αθηναίων), στις οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης σχετικά με τα ΑΣΑ καθώς και στην εναρμόνιση της Ελλάδας με τις κοινοτικές οδηγίες.

Στο τέταρτο (4^ο) κεφάλαιο γίνεται μία αναφορά στα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ), τα οποία διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην παρούσα διατριβή. Το ΓΣΠ λαμβάνει υπόψη του όλες τις απαραίτητες παραμέτρους για την αποκομιδή των δημοτικών στερεών αποβλήτων. Αυτές οι παράμετροι περιλαμβάνουν τα στατικά και δυναμικά στοιχεία, όπως οι θέσεις των κάδων

απορριμμάτων, το οδικό δίκτυο και της σχετιζόμενης μ' αυτό κυκλοφορίας στην κάθε εξεταζόμενη περιοχή. Επιπλέον, με τη βοήθεια του ΓΣΠ έχουν καταγραφεί όλα τα προγράμματα αποκομιδής απορριμμάτων, στα οποία ο Δήμος Αθηναίων έχει διαιρέσει την περιοχή ευθύνης του. Έτσι, όλα τα παραπάνω δεδομένα μπορούν να εμφανιστούν πάνω στο χάρτη δίνοντας τη δυνατότητα στο χρήστη να βλέπει σε πραγματικό χρόνο τα αποτελέσματα του εκάστοτε έργου.

Το πέμπτο (5^ο) κεφάλαιο επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και στην εφαρμογή ενός καινοτόμου μοντέλου για την εκτίμηση της παραγωγής και αποκομιδής των ΑΣΑ χρησιμοποιώντας ένα περιβάλλον ΓΣΠ. Προκειμένου να υπερνικηθεί η ασάφεια του εμπειρικού μοντέλου που χρησιμοποιείται από το Δήμο Αθηναίων, πραγματοποιείται ένας διαχωρισμός μεταξύ της παραγωγής των οικιακών στερεών αποβλήτων και αυτών που προέρχονται από τις εμπορικές δραστηριότητες σε μία προκαθορισμένη περιοχή. Αναπτύσσεται μια ενοποιημένη προσέγγιση για την αντιπροσώπευση της παραγωγής των στερεών αποβλήτων για την κάθε εμπορική δραστηριότητα ξεχωριστά. Ως εκ τούτου, εκτελείται μια ακριβής εκτίμηση της παραγωγής των απορριμμάτων βασισμένη στην κατανομή του πληθυσμού, αλλά και στις εμπορικές δραστηριότητες αντίστοιχα. Με την προσθήκη των ανωτέρω στοιχείων προκύπτει η συνολική παραγωγή των στερεών αποβλήτων. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη και τους περιορισμούς του παρόντος οδικού δικτύου υπολογίζεται ο βέλτιστος αριθμός καθώς και η κατανομή των κάδων απορριμμάτων στην εξεταζόμενη περιοχή.

Στο έκτο (6^ο) κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε τέσσερις (4) από τις γνωστότερες ευριστικές μεθόδους, που είναι εμπνευσμένες από τη φύση και οι οποίες θα αναπτυχθούν και θα εφαρμοστούν στην παρούσα διατριβή αποσκοπώντας στον προσδιορισμό των βέλτιστων διαδρομών για τη αποκομιδή των δημοτικών απορριμμάτων. Οι τέσσερις (4) αλγόριθμοι είναι οι ακόλουθοι: Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), η Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing), η Αναζήτηση Ταμπού (Tabu Search) και η βελτιστοποίηση με τη χρήση του Συστήματος Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony System).

Στο έβδομο (7^ο) κεφάλαιο υλοποιούνται οι τέσσερις αλγόριθμοι που έχουν περιγραφεί αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Περιγράφονται τα μέρη του προγράμματος των αλγορίθμων που εφαρμόστηκαν για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της αποκομιδής των απορριμμάτων, το οποίο ανάγεται σε ένα Ασύμμετρο Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή (ΑΠΠΠ). Επιπλέον, σε κάθε ένα από τους αλγόριθμους, έχουν περιγραφεί και αναλυθεί οι παράμετροι οι οποίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στην εκτέλεση ενός αλγορίθμου για την εύρεση των

βέλτιστων λύσεων. Η υλοποίηση των προγραμμάτων των αλγορίθμων έχει πραγματοποιηθεί σε γλώσσα προγραμματισμού Java.

Στο όγδοο (8^ο) κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής των τεσσάρων αλγορίθμων στο πρόβλημά μας και στη συνέχεια οι αλγόριθμοι αξιολογούνται ως προς την αποδοτικότητα και την επίδοσή τους. Αρχικά υπολογίζεται το σφάλμα των αλγορίθμων αφού εφαρμόστηκαν στο ΑΠΠΠ 'ft70.atsp.gz' το οποίο βρίσκεται στη βιβλιοθήκη TSPLIB. Η TSPLIB είναι μία βιβλιοθήκη που περιλαμβάνει πολλά γνωστά προβλήματα πλανόδιου πωλητή (καθώς και άλλα σχετικά προβλήματα), διαφόρων τύπων και από διάφορες πηγές. Επίσης η TSPLIB περιλαμβάνει και τις βέλτιστες λύσεις των προβλημάτων αυτών. Τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται προέρχονται από τις εκτελέσεις των αλγορίθμων χρησιμοποιώντας διάφορους συνδυασμούς τιμών στις παραμέτρους τους. Επιπλέον, οι τέσσερις προαναφερθέντες αλγόριθμοι συγκρίνονται μεταξύ τους, αλλά και με την εμπειρική μέθοδο που χρησιμοποιείται στην τρέχουσα περίοδο από το δήμο Αθηναίων.

2.1. Τι είναι?

Η Διοικητική Μέριμνα (ΔΜ) αποτελεί μία πολυσήμαντη και πολυσύνθετη έννοια, καλύπτοντας μια τεράστια γκάμα διαδικασιών σχεδιασμού, υλοποίησης και ελέγχου στο επιχειρηματικό πεδίο. Τα βασικά στοιχεία που συνυφαίνουν τη ΔΜ είναι η διοίκηση και ο στρατηγικός σχεδιασμός της επιχείρησης, η βέλτιστη αξιοποίηση των έμψυχων (ανθρώπινων) και των άψυχων (υλικών) πόρων της, η παραγωγή, ο έλεγχος, η αποθήκευση και η μεταφορά των υλικών από το πρώτο στάδιο μέχρι το τελευταίο και από τη δημιουργία στην διανομή οποιωνδήποτε υπηρεσιών. Έτσι εξασφαλίζεται η συνεχής διαθεσιμότητα των υπηρεσιών και των λοιπών πόρων της, και παράλληλα επιτρέπεται η ομαλή ροή επιτέλεσης των προαναφερθέντων διαδικασιών.

Η ΔΜ αποσκοπεί στη δημιουργία υπηρεσιών ή προϊόντων με όσο το δυνατόν χαμηλότερο κόστος, στη διατήρηση και τον έλεγχο των υπηρεσιών/προϊόντων με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, στην πλήρη αξιοποίηση των υλικών μέσων και του ανθρώπινου δυναμικού της επιχείρησης, στη μεταφορά των προϊόντων με το χαμηλότερο δυνατό κόστος και τις μικρότερες δυνατές καθυστερήσεις και τέλος, στην επίτευξη κερδοφορίας και οικονομίας για την επιχείρηση.

Ένας ορισμός της διοικητικής μέριμνας είναι ο εξής: *"Ο χρόνος συνδεδεμένος με τον προσδιορισμό θέσης των πόρων"*. Υπό αυτήν τη μορφή, η διοικητική μέριμνα θεωρείται, ως επί το πλείστον, κλάδος της εφαρμοσμένης μηχανικής που δημιουργεί *"συστήματα ανθρώπων"* παρά *"συστήματα μηχανών"*.

Οι Haag κ.α. (2006) δίνουν ένα άλλο ορισμό για τη διοικητική μέριμνα, η οποία εστιάζεται περισσότερο στον τομέα της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας: *"Κρατώντας το κόστος των μεταφερόμενων υλικών όσο το δυνατόν χαμηλότερο σύμφωνα με την ασφαλή και αξιόπιστη μεταφορά τους"*. Εδώ η ΔΜ επιτρέπει σε μια επιχείρηση να έχει σταθερή επαφή με την ομάδα διανομής της, η οποία θα μπορούσε να αποτελείται από φορτηγά, τράινα, ή οποιοδήποτε άλλο

μέσο μεταφοράς. Το σύστημα επιτρέπει στην επιχείρηση να παρακολουθήσει που βρίσκονται κάθε στιγμή τα απαραίτητα υλικά. Επίσης, μπορεί να αποδίδει οικονομικά το να μοιραστούν οι δαπάνες μεταφορών σε συνεργασία με μια επιχείρηση εάν οι αποστολές των υλικών δεν είναι αρκετά μεγάλες ώστε να γεμίσουν ένα ολόκληρο φορτηγό. Κάτι τέτοιο, επιτρέπει στην επιχείρηση να λάβει αυτήν την απόφαση.

Τα τελευταία χρόνια, νέες και καινοτόμες ψηφιακές τεχνολογίες έχουν εισέλθει στο χώρο της ΔΜ και έχουν επιφέρει θεαματικές αλλαγές. Για παράδειγμα, εκεί που ο υπολογισμός της εύρεσης των βέλτιστων διαδρομών για τη μεταφορά των αστικών στερεών αποβλήτων απαιτούσε μολύβι, χαρτί και αρκετό χρόνο, τώρα πραγματοποιείται αυτόματα με τη χρήση Γεωγραφικών Συστημάτων Πληροφοριών (ΓΣΠ), αλγορίθμων βελτιστοποίησης και άλλων τεχνολογιών, καθώς και με τη βοήθεια των ηλεκτρονικών υπολογιστών. Η κακή οργάνωση της διαδρομής, η αποκομιδή χωρίς πρόγραμμα και σύστημα και τόσα άλλα αρνητικά, έχουν δώσει τη θέση τους σε ολοκληρωμένα συστήματα υψηλής ευφυΐας και αποτελεσματικότητας.

2.2. Σχετικό υπόβαθρο

Η ΔΜ μπορεί να οριστεί ως *βέλτιστη έχοντας τη σωστή ποσότητα στο σωστό χρόνο στη σωστή τιμή*. Είναι η στρατηγική της διαδικασίας που ενσωματώνει όλους τους τομείς της βιομηχανίας. Ο στόχος της εργασίας στη ΔΜ είναι να ρυθμιστεί η πραγματοποίηση των κύκλων ζωής ενός έργου, οι αλυσίδες ανεφοδιασμού και οι επακόλουθες αποδοτικότητες.

Η ΔΜ ως έννοια προέκυψε από την ανάγκη των στρατιωτικών να εφοδιάζουν τους εαυτούς τους καθώς μετακινούνται από τη βάση τους προς μια μπροστινή θέση. Στις αρχαίες ελληνικές, ρωμαϊκές και βυζαντινές αυτοκρατορίες, υπήρξαν ανώτεροι στρατιωτικοί με τον τίτλο «*Logistikas*», οι οποίοι ήταν αρμόδιοι για οικονομικά θέματα καθώς και για την κατανομή του ανεφοδιασμού. Το αγγλικό λεξικό της Οξφόρδης καθορίζει τη ΔΜ ως: *"Ο κλάδος της στρατιωτικής επιστήμης που ασχολείται με την προμήθεια, τη διατήρηση και τη μεταφορά του εξοπλισμού, του προσωπικού και των εγκαταστάσεων"*.

Η ΔΜ ως έννοια στην επιχείρηση εξελίχθηκε μόνο στη δεκαετία του 1950. Αυτό οφειλόταν κυρίως στην αυξανόμενη πολυπλοκότητα του εφοδιασμού μιας επιχείρησης με υλικά και στη μεταφορά των προϊόντων σε μια όλο και

περισσότερο διεθνοποιημένη αλυσίδα ανεφοδιασμού, που απαιτούσε την απασχόληση εμπειρογνομόνων στο συγκεκριμένο τομέα.

2.2.1. Επιχειρησιακή διοικητική μέριμνα

Στην επιχείρηση, η ΔΜ μπορεί είτε να εστιάσει εσωτερικά, είτε να εστιάσει εξωτερικά καλύπτοντας όλη τη ροή από τον προμηθευτή, ο οποίος έχει δημιουργήσει ένα προϊόν έως και τον τελικό χρήστη. Το ίδιο συμβαίνει και στη Διαχείριση Εφοδιαστικής Αλυσίδας (ΔΕΑ, στα αγγλικά Supply Chain Management - SCM).

Η ΔΕΑ είναι η διαδικασία του σχεδιασμού, της υλοποίησης και του ελέγχου των διαδικασιών μιας αλυσίδας ανεφοδιασμού με σκοπό να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις των πελατών όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερα. Η διαχείριση της αλυσίδας ανεφοδιασμού εκτείνεται σε όλες τις μετακινήσεις και αποθηκεύσεις των πρώτων υλών, στον κατάλογο με εργασίες-σε-εξέλιξη, και στα ετοιμοπαράδοτα αγαθά από το σημείο-προέλευσης έως στο σημείο-κατανάλωσης. Ο όρος Διαχείριση Αλυσίδων Ανεφοδιασμού επινοήθηκε το 1982, από τη στρατηγική συμβουλευτική εταιρεία Booz Allen Hamilton.

Στην συνέχεια, όσο αφορά τους κύριους ρόλους ενός διευθυντή της διοικητικής μέριμνας, αυτοί περιλαμβάνουν τη Διαχείριση Καταλόγων, την Αγορά, τη Μεταφορά, την Αποθήκευση, καθώς και την οργάνωση και τον προγραμματισμό όλων αυτών των δραστηριοτήτων. Οι διευθυντές των διοικητικών μεριμνών κατέχουν μια γενική γνώση για κάθε μία από αυτές τις λειτουργίες έτσι ώστε να υπάρχει ένας συντονισμός των πόρων σε έναν οργανισμό. Θα μπορούσε να πει κανείς ότι υπάρχουν δύο πλήρως διαφορετικές μορφές διοικητικής μέριμνας:

- Η μία βελτιστοποιεί μια σταθερή ροή υλικών μέσω ενός δικτύου από τους συνδέσμους μεταφοράς και τους κόμβους αποθήκευσης.
- Η άλλη συντονίζει μία ακολουθία πόρων για να εκτελέσει κάποιο πρόγραμμα.

2.2.2. Στρατιωτική διοικητική μέριμνα

Στις Στρατιωτικές ΔΜ, εμπειρογνώμονες διαχειρίζονται πώς και πότε θα μεταφέρουν πόρους προς τις θέσεις που απαιτούνται. Στη στρατιωτική επιστήμη, διατηρώντας τις γραμμές ανεφοδιασμού κάποιου, προκαλώντας αναστάτωση σε

εκείνες του εχθρού, είναι ένα κρίσιμο — σε μερικές περιπτώσεις θα έλεγε κανείς το κρίσιμότερο — στοιχείο της στρατιωτικής στρατηγικής, από την στιγμή που μια οπλισμένη δύναμη χωρίς τρόφιμα, καύσιμα και πυρομαχικά είναι ανυπεράσπιστα.

Ο πόλεμος του Ιράκ ήταν ένα δραματικό παράδειγμα σπουδαιότητας της ΔΜ. Είχε γίνει απαραίτητο για τις ΗΠΑ και τους συμμάχους της να μεταφέρουν τεράστιες ποσότητες στρατιωτών, υλικών και εξοπλισμού σε μεγάλες αποστάσεις. Οδηγημένοι από τον αντιστράτηγο William Gus Pagonis, η ΔΜ χρησιμοποιήθηκε επιτυχώς για αυτήν την αποτελεσματική μετακίνηση. Επίσης, η ήττα των Βρετανών στην αμερικανική επανάσταση, και η ήττα του Rommel στο Δεύτερο (2ο) Παγκόσμιο Πόλεμο, έχει αποδοθεί κατά ένα μεγάλο μέρος στην αποτυχία της ΔΜ. Τέλος, ο Μέγας Αλέξανδρος θεωρείται από τις μεγαλύτερες μεγαλοφυΐες στην ιστορία πάνω στον τομέα της ΔΜ.

2.2.3. Διοικητικές μέριμνες παραγωγής

Ο όρος χρησιμοποιείται για την περιγραφή των διαδικασιών της ΔΜ μέσα σε μια βιομηχανία. Ο σκοπός της παραγωγής της ΔΜ είναι να εξασφαλιστεί ότι κάθε μηχανή και κάθε σταθμός εργασίας εφοδιάζονται με το σωστό προϊόν, και τη σωστή ποσότητα και ποιότητα στο σωστό χρονικό σημείο.

Το ζήτημα δεν είναι η ίδια η μεταφορά, αλλά η βελτιστοποίηση και ο έλεγχος της ροής με εκτίμηση της αξίας, ώστε να προστίθενται οι απαραίτητες διαδικασίες και να ελαχιστοποιούνται αυτές που δεν έχουν αξία. Η ΔΜ παραγωγής μπορεί να εφαρμοστεί σε υπάρχουσες καθώς επίσης και σε νέες εγκαταστάσεις. Η βιομηχανική επεξεργασία σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις είναι μια συνεχώς μεταβαλλόμενη διαδικασία. Οι μηχανές εναλλάσσονται και προστίθενται νέες, οι οποίες δίνουν την ευκαιρία να βελτιωθεί το σύστημα της ΔΜ παραγωγής αντίστοιχα. Η ΔΜ παραγωγής παρέχει τα μέσα ώστε να επιτευχθεί η ανταπόκριση στους πελάτες και η κύρια αποδοτικότητα.

2.3. Τεχνολογίες διοικητικής μέριμνας

Οι νέες και καινοτόμες ψηφιακές τεχνολογίες, που έχουν εισέλθει στο χώρο της ΔΜ και έχουν επιφέρει θεαματικές αλλαγές τα τελευταία χρόνια, είναι οι ακόλουθες:

α) *Τα Συστήματα πληροφορικής*: Εξειδικευμένες εφαρμογές λογισμικού, που αναλαμβάνουν να εξυπηρετήσουν το σύνολο των διαδικασιών σε ένα περιβάλλον ΔΜ. Οι πιο γνωστές από αυτές είναι τα Συστήματα Ενδοεπιχειρησιακού Σχεδιασμού (ΣΕΣ, στα αγγλικά Enterprise Resource Planning - ERP), και τα πληροφοριακά συστήματα ΔΕΑ. Τα συνηθέστερα υποσυστήματα των ΔΕΑ είναι τα Συστήματα Διαχείρισης Αποθηκών (ΣΔΑ, στα αγγλικά Warehouse Management System - WMS) και η Διαχείριση Μέσων Μεταφοράς (ΔΜΜ, στα αγγλικά Transportation Management – TM).

Τα ΣΔΑ αυτοματοποιούν και βελτιστοποιούν τις διαδικασίες διαχείρισης υλικών για να μειώσουν τις δαπάνες εργασίας, να βελτιώσουν τη αξιοποίηση των υπηρεσιών, να αυξήσουν την ακρίβεια των παραγγελιών και να παρέχουν καινοτόμες υπηρεσίες στους χρήστες. Τα ΣΔΑ υποστηρίζουν τις εισερχόμενες, εξερχόμενες, και ακυρωμένες ενέργειες σε ένα περιβάλλον ΔΜ, που έχουν τελειώσει ή δεν έχουν ξεκινήσει ακόμη ή που βρίσκονται σε διαδικασία επεξεργασίας. Υποστηρίζουν επίσης περιβάλλοντα κατασκευής, διανομής και προηγμένων υπηρεσιών όπως είναι η ενιαία αναφορά για όλα τα μέρη που απαιτούνται (kitting), η παραλαβή προϊόντων και η άμεση προώθηση αυτών χωρίς την αποθήκευσή τους (cross docking).

Η ΔΜΜ παρέχει αξιόπιστες δυνατότητες σχεδιασμού και εκτέλεσης των μεταφορών στους ίδιους τους μεταφορείς αλλά και σε τρίτους που εμπλέκονται έμμεσα με τις μεταφορές σε ένα περιβάλλον ΔΜ. Ενσωματώνει και βελτιώνει το σχεδιασμό των μεταφορών, την εκτέλεση, την πληρωμή του φορτίου, και την αυτοματοποίηση της επιχειρησιακής διαδικασίας σε μια ενιαία εφαρμογή για όλους τους τρόπους μεταφοράς, από ένα πλήρες φορτίο ενός οχήματος μέχρι και σε πιο σύνθετες αποστολές μέσω αέρα, στεριάς και θάλασσας.

Επομένως, η ΔΜΜ χαμηλώνει τις δαπάνες των μεταφορών, βελτιώνει την εξυπηρέτηση των χρηστών, αξιοποιεί τους διαθέσιμους πόρους, και παρέχει εύκαμπτες και ολοκληρωτικές επιλογές εκπλήρωσης. Εφαρμόζει συγκεκριμένους επιχειρησιακούς κανόνες και λογική σύμφωνα με την παραμετροποίηση του κάθε χρήστη σε συνδυασμό με ισχυρούς αλγόριθμους και μηχανές βελτιστοποίησης για να βελτιστοποιήσει τις διανομές βασισμένες στο κόστος, στην ποιότητα υπηρεσίας και σε άλλες ειδικές για την κάθε περίπτωση παραμέτρους.

β) *Τεχνολογίες αναγνώρισης και κτήσης δεδομένων*: Είναι εξειδικευμένες τεχνολογικές υποδομές (hardware και software), που συλλέγουν την πληροφορία τη στιγμή της δημιουργίας της -σε όλα τα στάδια ενός περιβάλλοντος ΔΜ. Για παράδειγμα, κατά τη φόρτωση ενός κάδου στο απορριμματοφόρο – συλλέγονται

διάφορα στοιχεία (το βάρος των απορριμμάτων, η θέση του οχήματος, ο χρόνος συλλογής, κτλ) και μεταβιβάζονται στο αντίστοιχο πρόγραμμα (π.χ. ΣΔΑ) για περαιτέρω επεξεργασία. Τέτοιες υποδομές είναι τα φορητά τερματικά χειρός, τα τερματικά περνοφόρων οχημάτων, οι τεχνολογικές λύσεις Αυτόματης Αναγνώρισης και Κτήσης Δεδομένων (ΑΑΚΔ, στα αγγλικά Automatic Identification and Data Capture - AIDC), στις οποίες ανήκουν ο γραμμωτός κώδικας (barcode), οι "έξυπνες" κάρτες, τα συστήματα αναγνώρισης χαρακτήρων και οι εφαρμογές ασύρματης αναγνώρισης, που είναι ευρύτερα γνωστές με το ακρωνύμιο RFID (Radio Frequency IDentification).

γ) *Συστήματα Τηλεματικής*: Είναι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται στις μεταφορές και αποτελούνται από πολλά μέρη hardware (πομποδέκτες, κεραιές, μικροϋπολογιστές, τηλεπικοινωνιακά δίκτυα, δορυφόροι) και software (συστήματα ΓΣΠ, πρωτόκολλα επικοινωνίας), με βασική λειτουργία την καταγραφή της γεωγραφικής θέσης του οχήματος σε πραγματικό χρόνο και την απεικόνισή της στον ηλεκτρονικό υπολογιστή. Για παράδειγμα, η Διεύθυνση Καθαριότητας ενός Δήμου, χάρη σ' αυτά, μπορεί να βλέπει ανά πάσα στιγμή που βρίσκονται τα οχήματα της, ενώ την ίδια στιγμή, παρέχονται απεριόριστες δυνατότητες σύνδεσης και αξιοποίησης των τεχνολογιών της πρώτης και της δεύτερης κατηγορίας.

δ) *Υποδομές δικτύων*: Αφορούν τα ενσύρματα και τα ασύρματα τοπικά δίκτυα, που συνήθως βρίσκονται σε μια αποθήκη εξυπηρετώντας τη μετάδοση των δεδομένων από τις διάφορες φορητές συσκευές, τους υπολογιστές κ.λπ. Τα δίκτυα αυτά αποτελούνται από υπολογιστές, καλωδίωση ή ασύρματα σημεία πρόσβασης (Access Points).

2.4. Οφέλη της διοικητικής μέριμνας

Τα οφέλη που απορρέουν από την ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών στη ΔΜ είναι πάρα πολλά σε σχέση με τις προηγούμενες μεμονωμένες εφαρμογές που χειρίζονταν τέτοια προβλήματα. Τα κυριότερα πλεονεκτήματα είναι τα ακόλουθα:

α) *Καλύτερη εκμετάλλευση των υλικών (άψυχων) πόρων της επιχείρησης*. Υλικοί πόροι θεωρούνται τα οχήματα, οι αποθηκευτικοί χώροι, ο εξοπλισμός κ.λπ. Για παράδειγμα, η χρήση ενός συστήματος τηλεματικής στα οχήματα της επιχείρησης μέσω ενός Συστήματος Διαχείρισης Στόλου (ΣΔΣ, στα αγγλικά Fleet Management - FM) έχει ως αποτέλεσμα πιο οργανωμένες κινήσεις και λιγότερα δρομολόγια. Σχετικά με τον αποθηκευτικό χώρο, ένα σύστημα ΣΔΑ και η

εγκατάσταση κάποιου ασύρματου τοπικού δικτύου έχουν ως αποτέλεσμα αφενός την αξιοποίηση κάθε σπιθαμής της αποθήκης, αφετέρου τη γρηγορότερη επιτέλεση των διαδικασιών μέσα σ' αυτήν. Λόγου χάρη, ένας σαρωτής διαβάζει το γραμμωτό κώδικα μιας κούτας και στέλνει αυτόματα την πληροφορία (τι περιέχει η κούτα) σε έναν κεντρικό υπολογιστή που είναι εφοδιασμένος με σύστημα ΣΔΑ, μέσω του ασύρματου τοπικού δικτύου.

β) *Καλύτερη αξιοποίηση των έμψυχων πόρων της επιχείρησης.* Εδώ εντάσσονται όχι μόνο οι εργαζόμενοι αλλά και οι χρήστες, οι πελάτες, οι προμηθευτές κ.λπ. Για παράδειγμα, ένα σύστημα ΣΕΣ ή ΣΔΑ ενημερώνει την επιχείρηση ποιοι είναι οι επικερδείς πελάτες, εξασφαλίζει πολύτιμες εργατοώρες για το προσωπικό και συντελεί στην καλύτερη οργάνωση των εισερχόμενων ροών από τους προμηθευτές. Ο ενδιαφερόμενος δε χρειάζεται πλέον να ασχολείται με τον έλεγχο του στοκ, αφού αυτό το έχει αναλάβει το ίδιο το σύστημα. Η απογραφή της αποθήκης γίνεται με το πάτημα ενός κουμπιού, ενώ με την ίδια διαδικασία μπορούμε να μάθουμε τα έσοδα, τα έξοδα και τα κέρδη για μία ημέρα ή ένα μήνα. Συγχρόνως, ο ενδιαφερόμενος γνωρίζει ποια είδη διακινούνται περισσότερο και διαμορφώνει τις παραγγελίες του αναλόγως.

Σε ένα επιχειρηματικό περιβάλλον, όπως αυτό διαμορφώνεται σήμερα, ζητούμενο της διοίκησης δεν είναι ο λεπτομερής έλεγχος κάθε τμήματος της επιχείρησης -καθώς κάτι τέτοιο απαιτεί πολλή ενέργεια και χρόνο- αλλά η αυτοματοποίηση διαδικασιών με τη χρήση τεχνολογικών εργαλείων. Οι τεχνολογίες που εξετάσαμε παρέχουν πλήθος πληροφοριών στη διοίκηση και τα στελέχη της επιχείρησης, ώστε να είναι δυνατή η λήψη ορθών και άμεσων αποφάσεων, καθώς και η χάραξη μακρόπνοης αναπτυξιακής στρατηγικής.

2.5. Σύστημα διαχείρισης στόλου

Ένα πλεονέκτημα της ΔΜ όπως αναφέρθηκε και παραπάνω είναι η καλύτερη εκμετάλλευση των υλικών (άψυχων) πόρων μιας επιχείρησης. Το Σύστημα Διαχείρισης Στόλου (ΣΔΣ, στα αγγλικά Fleet Management – FM) είναι το σύνολο των τεχνολογιών και των συστημάτων, το οποίο επιτρέπει σε μία επιχείρηση να έχει πλήρη έλεγχο των οχημάτων της. Το ΣΔΣ μπορεί να ενσωματωθεί σε ένα περιβάλλον ΔΜ και συχνά αποτελεί ένα από τα κυριότερα μέρη της ΔΜ.

Στην κατηγορία των οχημάτων συγκαταλέγονται πάσης φύσεως μεταφορικά μέσα, από επιβατικά αυτοκίνητα, φορτηγά, λεωφορεία και δίκυκλα, μέχρι πλοία

και αεροπλάνα. Ο τρόπος λειτουργίας ενός τέτοιου συστήματος αποσκοπεί στη βελτιστοποίηση αρκετών επιμέρους επιχειρηματικών διαδικασιών, στο διαχειριστικό έλεγχο και, κατά συνέπεια, στη μείωση του κόστους και την καλύτερη κατανομή των πόρων της επιχείρησης.

2.5.1. Παρεχόμενες πληροφορίες ενός ΣΔΣ

Σε πρώτη φάση, ένα ΣΔΣ αναλαμβάνει να ενημερώσει την εταιρία για πλήθος θεμάτων αναφορικά με τα οχήματά της. Στις πληροφορίες που μπορεί να συλλέξει κανείς από την εφαρμογή συμπεριλαμβάνονται η ακριβής θέση και η ταχύτητα του οχήματος, η διαδρομή που έχει πραγματοποιήσει καθώς και άλλα στοιχεία, ανάλογα με τη δραστηριότητα και τις επιδιώξεις της επιχείρησης που το χρησιμοποιεί, όπως για παράδειγμα η θερμοκρασία συγκεκριμένων μερών του οχήματος, η βενζίνη που έχει καταναλώσει, κτλ.

Οι λύσεις ΣΔΣ βασίζονται σε μία σειρά διαδραστικών τεχνολογιών για την παροχή των συγκεκριμένων υπηρεσιών. Αφού μια εταιρία αποφασίσει να αξιοποιήσει αυτές τις τεχνολογίες, στα οχήματα που θα συμμετάσχουν εγκαθίσταται συνήθως ένα τερματικό Παγκόσμιου (Δορυφορικό) Συστήματος Εντοπισμού (ΠΣΕ, στα αγγλικά Global Positioning System – GPS), το οποίο επικοινωνεί σε τακτική βάση με δορυφόρους του συστήματος, ανταλλάσσοντας πληροφορίες σχετικές με την απόλυτη και τη σχετική γεωγραφική θέση του οχήματος σε κάθε χρονική στιγμή. Ανάλογα με το τι είδους πληροφορίες επιθυμεί να συγκεντρώσει και να καταγράψει μια επιχείρηση για τα οχήματά της, είναι πιθανό να τοποθετηθούν συμπληρωματικές συσκευές εντός ή στην επιφάνεια του οχήματος. Για παράδειγμα, μπορεί να προστεθούν αισθητήρες στους βραχίονες ενός απορριμματοφόρου, οι οποίοι θα καταγράφουν, για παράδειγμα, το βάρος των απορριμμάτων που φορτώνονται στο όχημα κάθε φορά που φορτώνεται ένας κάδος, κτλ. Τα δεδομένα αυτά θα μεταδίδονται μέσω της τεχνολογίας Παγκόσμιου Συστήματος για Κινητή Επικοινωνία (ΠΣΚΕ, στα αγγλικά Global System for Mobile Communication – GSM) πίσω στη βάση του κέντρου διαχείρισης στόλου του εκάστοτε δήμου που διαχειρίζεται ένα τέτοιο σύστημα.

2.5.2. Απλή μορφή ενός ΣΔΣ

Μολονότι ένα τέτοιο σύστημα φαίνεται πολύπλοκο, κυρίως λόγω της ποσότητας των δεδομένων που διαχειρίζεται, μια λύση ΣΔΣ μπορεί να υλοποιηθεί και σε απλή μορφή. Συγκεκριμένα, η πιο απλή τεχνολογία που μπορεί να αξιοποιηθεί μέσω ενός συστήματος διαχείρισης στόλου είναι η γνωστή Υπηρεσία Σύντομων Γραπτών Μηνυμάτων (ΥΣΓΜ, στα αγγλικά Short Message Service – SMS). Στην περίπτωση αυτή, το σύστημα είναι πολύ απλό και ο δέκτης ΠΣΕ (που χρησιμοποιείται για να λαμβάνει σήμα από το δορυφόρο), σε συνδυασμό με άλλα ενδιαμέσους συστήματα, αναλαμβάνει την αποστολή μηνυμάτων μέσω της τεχνολογίας ΠΣΚΕ με ειδική μορφή στο ΣΔΣ το οποίο βρίσκεται πίσω στο κέντρο διαχείρισης της υπηρεσίας. Εκτός αυτού, είναι δυνατή και η αποκλειστική χρήση πομπών και δεκτών ΠΣΕ. Ωστόσο οι παρεχόμενες υπηρεσίες σε αυτή την περίπτωση είναι ελαφρώς περιορισμένες.

2.5.3. Υλοποίηση μιας λύσης με σύγχρονες τεχνολογίες

Η πρόσβαση στις πληροφορίες μπορεί να επιτευχθεί με πολλούς και διαφορετικούς τρόπους. Για παράδειγμα, συνεχίζοντας το προηγούμενο σενάριο το οποίο θα αναλυθεί σε μεγαλύτερο βάθος στη συνέχεια της διατριβής, το απορριμματοφόρο μεταφέρει μαζί του ένα δέκτη ΠΣΕ και έναν Υπολογιστή Παλάμης (ΥΠ, στα αγγλικά Personal Digital Assistant - PDA).

Ο ΥΠ χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο για την αναπαράσταση γεωγραφικών πληροφοριών, όπως για παράδειγμα τη θέση του οχήματος κάθε στιγμή πάνω σε μία ειδική έκδοση χάρτη, η οποία είναι εγκατεστημένη στον ΥΠ, καθώς του δείχνει την πορεία που πρέπει να ακολουθήσει για να ολοκληρώσει το πρόγραμμα για την αποκομιδή των στερεών αποβλήτων της συγκεκριμένης περιοχής που έχει αναλάβει.

Πέρα από αυτό, αναλαμβάνει να πραγματοποιήσει και μία σειρά άλλων σύνθετων υπολογισμών για την εξαγωγή χρήσιμων στατιστικών συμπερασμάτων ή άλλων στοιχείων.

Η επικοινωνία μεταξύ των συσκευών που αναφέραμε παραπάνω πραγματοποιείται κυρίως με ανοιχτές και αναγνωρισμένες τεχνολογίες, όπως π.χ. τη θύρα υπερύθρων αλλά και την ασύρματη τεχνολογία Bluetooth. Όσον αφορά στη χρησιμότητα της σύνδεσης του ΥΠ με κάποιο δίκτυο κινητής τηλεφωνίας ΠΣΚΕ, η διαδικασία αυτή εξυπηρετεί κατά κύριο λόγο την αποστολή δεδομένων

σε κάποια τοποθεσία (ένα σύστημα server με ειδική λειτουργικότητα) στην οποία συγκεντρώνονται όλες οι επιμέρους πληροφορίες και τα δεδομένα. Ανάλογα με το είδος της λύσης, ο server αυτός (ο οποίος πρακτικά λειτουργεί ως "δεξαμενή δεδομένων" - data repository) μπορεί να βρίσκεται είτε στην επιχείρηση που αξιοποιεί τη συγκεκριμένη υπηρεσία είτε στις εγκαταστάσεις του παρόχου της.

Επομένως, επειδή ο ΥΠ διαθέτει δυνατότητα σύνδεσης σε δίκτυο ΠΣΚΕ, διαμέσου μηνυμάτων ΥΣΓΜ, τα διάφορα στοιχεία μπορούν να σταλούν από το απορριμματοφόρο πίσω στο κέντρο διαχείρισης. Ακόμα και στην περίπτωση που υπάρχει πρόβλημα με το δίκτυο, τα δεδομένα αυτά μπορούν να αποθηκευτούν στη μνήμη του συστήματος που διαθέτει το κάθε όχημα και όταν αυτό επιστρέψει στη βάση, να μεταφέρει τα δεδομένα στο κέντρο διαχείρισης.

Όλα τα παραπάνω δείχνουν ότι σκοπός ενός ΣΔΣ δεν είναι ο επανασχεδιασμός των εργασιών μιας επιχείρησης αλλά η βελτιστοποίηση του τρόπου λειτουργίας της. Η εγκατάσταση, λοιπόν, ενός τέτοιου συστήματος συνοδεύεται από ορισμένες αλλαγές που αφορούν σε τμήματα διαδικασιών της επιχείρησης, όπως η συγκέντρωση πληροφοριών για τα οχήματα και τους εργαζόμενους, τους καταναλισκόμενους πόρους και τις χαμένες ανθρωποώρες. Παρέχει, με άλλα λόγια, αποδοτικότερους τρόπους υπολογισμού κρίσιμων μεγεθών για την ίδια την επιχείρηση, αξιοποιώντας σύγχρονα, περισσότερο αποτελεσματικά και ακριβή εργαλεία.

Ωστόσο, όπως αρχικά αναφέρθηκε, ένα ΣΔΣ μπορεί, λόγω της φύσης του, να εγκατασταθεί σχεδόν σε κάθε όχημα και κατά συνέπεια σε κάθε εταιρία που διαθέτει μεταφορικά μέσα. Έτσι, βρίσκει πλήθος εφαρμογών σε αρκετές μικρομεσαίες αλλά και μεγάλες επιχειρήσεις και κοινωφελείς οργανισμούς όπως οι μεταφορικές, οι εταιρίες που διαθέτουν τουριστικά λεωφορεία, οι αστικές συγκοινωνίες, τα επιβατηγά πλοία, η αστυνομία, η πυροσβεστική, ο στρατός, τα ασθενοφόρα, τα ταξί, οι εταιρίες ενοικίασης αυτοκινήτων, οι εταιρίες ασφαλείας (security), οι εταιρίες ταχυμεταφορών (courier) και πολλές άλλες.

Μία εφαρμογή είναι και η περίπτωση του Δήμου Αθηναίων, που εξετάζεται στη παρούσα διατριβή, ο οποίος διαθέτει απορριμματοφόρα για την αποκομιδή και τη μεταφορά των αστικών στερεών αποβλήτων από τους κάδους απορριμμάτων (σημεία συγκέντρωσης) στους χώρους απόθεσης.

Εντούτοις, δεν πρέπει να προκαλεί έκπληξη το γεγονός ότι αρκετές εταιρίες με μεγάλο αριθμό οχημάτων έχουν αποφασίσει να μη χρησιμοποιήσουν λύσεις ΣΔΣ εξαιτίας μειωμένων κερδών και ανυπαρξίας οικονομικών πόρων, ενώ υπάρχουν μικρομεσαίες επιχειρήσεις οι οποίες αξιοποιούν τέτοιες εφαρμογές,

είτε λόγω σημαντικών κερδών είτε γιατί η ποσότητα και η ποιότητα των πληροφοριών που συγκεντρώνουν μέσω αυτών των συστημάτων είναι ιδιαίτερα κρίσιμες γι' αυτές.

2.5.4. Πλεονεκτήματα του ΣΔΣ

Τα πλεονεκτήματα είναι πολλά και σημαντικά. Αρχικά, σημαντική ποσότητα πληροφοριών που μία επιχείρηση αδυνατούσε μέχρι σήμερα να συγκεντρώσει, τώρα βρίσκεται στα χέρια της. Το γεγονός ότι ένα ΣΔΣ επιτελεί, μεταξύ άλλων, το ρόλο ενός Συστήματος Διαχείρισης Πληροφοριών (ΣΔΠ, στα αγγλικά Management Information System - MIS) και καταδεικνύει σε μεγάλο βαθμό τις αρετές του. Η συγκέντρωση σημαντικών πληροφοριών έχει με τη σειρά της ως αποτέλεσμα να είναι εφικτή η παραγωγή αναφορών σχετικά με την πορεία της επιχείρησης, την αξιολόγηση του τρόπου λειτουργίας της, και προσδιορίζει και τρόπους βελτίωσης και αποτελεσματικότερης αξιοποίησης της υπάρχουσας υποδομής. Οι πληροφορίες αυτές γίνονται περισσότερο σημαντικές σήμερα, αν αναλογιστεί κανείς το επίπεδο του ανταγωνισμού στις σύγχρονες επιχειρήσεις. Σημαντικά είναι και τα οφέλη από την εξοικονόμηση πόρων που αφορούν σε τηλεπικοινωνιακά κόστη. Η αξιοποίηση υπηρεσιών, όπως το ΥΣΓΜ αλλά και όσες πηγάζουν από το ΠΣΚΕ και την Υπηρεσία Γενικών Ράδιο Πακέτων (ΥΓΡΠ, στα αγγλικά General Packet Radio Service – GPRS), απαλλάσσει την επιχείρηση από υψηλούς τηλεπικοινωνιακούς λογαριασμούς, οι οποίοι συνήθως προέρχονται από μεγάλο αριθμό κλήσεων προς κινητά και σταθερά τηλέφωνα των "εν κινήσει" εργαζομένων της.

2.5.5. Διασύνδεση του ΣΔΣ και αξιοποίηση

Στις περισσότερες περιπτώσεις το ΣΔΣ μπορεί να συνδεθεί με τις διάφορες επιχειρηματικές εφαρμογές που υπάρχουν σε κάθε επιχείρηση ή οργανισμό. Βέβαια, αυτό εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό και από την αρχιτεκτονική στην οποία έχει στηριχθεί η εκάστοτε λύση αλλά και από το κατά πόσο είναι εφικτή η ενσωμάτωση με άλλα σημαντικά τμήματα του πληροφορικού συστήματος της επιχείρησης. Ακόμα και στις "δύσκολες" περιπτώσεις, η συνεργασία μεταξύ των αρμόδιων τεχνικών υπευθύνων αργά ή γρήγορα επιφέρει τη σχετική λύση.

Εφόσον η αρχιτεκτονική στην οποία έχει βασιστεί η δημιουργία του συστήματος είναι ανοικτή, επιτρέποντας με τον τρόπο αυτό την παραμετροποίησή

του, τα δεδομένα που παράγονται έχουν σημαντική αξία. Όπως αναφέραμε παραπάνω, τα δεδομένα, τα στατιστικά στοιχεία και οι οικονομικές αναφορές που μπορούν να παραχθούν από ένα ΣΔΣ, μπορούν με τη σειρά τους να οδηγήσουν την επιχείρηση στη λήψη αποφάσεων που αφορούν στον τρόπο διάθεσης των πόρων, την πρόσληψη ή την απόλυση προσωπικού (στις περιπτώσεις που γίνεται αντιληπτό ότι ο υπάλληλος δεν εκτελεί στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα την εργασία που πρέπει), την επιλογή διαφορετικών μεθόδων στην εκτέλεση ορισμένων διαδρομών (π.χ. εύρεση της βέλτιστης διαδρομής για την μεταφορά των απορριμμάτων με κριτήρια το κόστος και την απόσταση) κ.ά. Το σύστημα μπορεί να χρησιμοποιηθεί με μακροπρόθεσμο ορίζοντα για την καταγραφή στοιχείων, η πραγματική αξία των οποίων γίνεται αισθητή μόνο όταν αυτά είναι ομαδοποιημένα και αφορούν σε συγκεκριμένο βάθος χρόνου.

Ωστόσο, ένας από τους κύριους παράγοντες που παίζουν καθοριστικό ρόλο σε ένα ΣΔΣ είναι και το οικονομικό ύψος της επένδυσης που απαιτείται. Τα βασικά κριτήρια που καθορίζουν το κεφάλαιο που πρέπει να επενδύσει μια επιχείρηση στην αγορά και την παραμετροποίηση ενός ΣΔΣ (ώστε να καλύπτει απόλυτα τις ανάγκες της) είναι το μέγεθός της, η ποσότητα των οχημάτων που χρησιμοποιεί για την ολοκλήρωση των εργασιών της καθώς και το πεδίο δραστηριοποίησής της. Όσον αφορά στο τελευταίο, ορισμένες κατηγορίες εταιριών πιθανόν να έχουν ιδιαιτερότητες και συγκεκριμένες απαιτήσεις από μια λύση διαχείρισης στόλου, με αποτέλεσμα να μην καλύπτονται ουσιαστικά από το βασικό κορμό της. Στην περίπτωση αυτή, το κόστος αυξάνεται από τις πρόσθετες υλοποιήσεις που θα διεκπεραιωθούν από τον παροχέα της υπηρεσίας.

Εντούτοις, το ΣΔΣ ανήκει στην κατηγορία εκείνη των τεχνολογικών λύσεων στην οποία δεν είναι εύκολο να αποτιμηθεί η απόσβεση της επένδυσης. Βέβαια, ο κάθε επιχειρηματίας μπορεί να χρησιμοποιήσει ένα απλό μαθηματικό μοντέλο και να προχωρήσει σε μια οικονομική προσέγγιση. Ωστόσο, το οικονομικό αποτελεί μέρος της απόδοσης επί της επένδυσης. Η οργάνωση του στόλου των οχημάτων, η δυνατότητα δυναμικής πληροφόρησης για καθένα από αυτά, η συλλογή και η αξιοποίηση αρκετών -μέχρι τότε ανεκμετάλλευστων- πληροφοριών αλλά και τα μειωμένα τηλεπικοινωνιακά κόστη, προσδίδουν σημαντικά οφέλη στη συνολική απόδοση επί της επένδυσης.

2.6. Απόδοση της επένδυσης

Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες, οι τρεις πιο ουσιαστικοί λόγοι για την αγορά συστημάτων ΔΜ είναι η βελτίωση της παραγωγικότητας, το ανταγωνιστικό πλεονέκτημα και η ικανοποίηση των χρηστών. Βέβαια, οι προσδοκίες μιας επιχείρησης μετά την υιοθέτηση ενός τέτοιου συστήματος είναι σίγουρα πολύ πιο σύνθετες και εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τις ιδιαίτερες συνθήκες του περιβάλλοντος στο οποίο αυτή δραστηριοποιείται.

Είναι βέβαιο ότι τέτοιου είδους συστήματα απαιτούν δέσμευση σημαντικών πόρων της επιχείρησης για την αγορά, την εγκατάσταση, την παραμετροποίηση, την εκπαίδευση, τη συντήρηση και τη βελτίωση ενός τέτοιου συστήματος. Οι πόροι αυτοί, εκτός από χρηματικά ποσά, περιλαμβάνουν και δέσμευση του ανθρώπινου δυναμικού σε όλες τις βαθμίδες.

Η τελική συνισταμένη όλων αυτών θα μπορούσε θεωρητικά να απεικονιστεί σε ένα περίπλοκο μοντέλο που θα περιέγραφε τις υφιστάμενες διαδικασίες και τα τελικά οφέλη από τη χρήση ενός συστήματος ΔΜ. Εφόσον όλες οι μοντελοποιημένες διαδικασίες αναλυθούν και μετρηθούν ικανοποιητικά, το τελικό αποτέλεσμα θα μπορούσε να περιγραφεί με την απόδοση της επένδυσης (Return on Investment), που ουσιαστικά αντιπροσωπεύει το κέρδος που προσδοκά η επιχείρηση από την επένδυσή της σε ένα τέτοιο σύστημα. Η εκτίμηση της απόδοσης αποτελεί, από μόνη της, ιδιαίτερα επίπονη και δύσκολη εργασία. Υπάρχουν, όμως, κάποιες γενικές κατευθύνσεις που δίνουν μια αντιπροσωπευτική εικόνα της απόδοσης ενός συστήματος ΔΜ, όπως:

- *Πληροφορία σε πραγματικό χρόνο:* Δημιουργεί συνθήκες εύκολης διάχυσης της πληροφορίας και αποφυγής ανεπιθύμητων καταστάσεων. Η έλλειψη άμεσης και έγκυρης πληροφορίας στο γρήγορα μεταβαλλόμενο επιχειρηματικό περιβάλλον ίσως μεταφράζεται και σε δυσκολία επιβίωσης.
- *Μείωση χρόνου καταχωρήσεων των δεδομένων:* Η πληροφορία εισέρχεται μία φορά και χρησιμοποιείται από ολόκληρη την επιχείρηση ή τον οργανισμό (π.χ. στατιστικές αναλύσεις του δήμου).
- *Βελτίωση στις διαδικασίες ενοποίησης:* Αναφέρεται στις διάφορες τεχνικές υπηρεσίες του δήμου. Η ενοποίηση των πληροφοριών θα πρέπει να είναι (σε μεγάλο βαθμό) αυτόματη, με τις κατάλληλες μετατροπές στα δεδομένα, τα λογιστικά πρότυπα και τις όποιες άλλες ιδιαιτερότητες.

- *Ευκολότερη συμμόρφωση σε υποχρεωτικά ή προαιρετικά πρότυπα:* Είναι συνηθισμένο φαινόμενο η αδυναμία υιοθέτησης από την επιχείρηση ποικίλων προτύπων, όπως των προτύπων διασφάλισης ποιότητας ISO 9002, IAS κ.λπ. Τα Διεθνή Λογιστικά Πρότυπα (IAS) μέσα στα επόμενα δύο χρόνια θα είναι υποχρεωτικά για την Ελλάδα καθώς και για όλη την Ευρώπη. Ένα καλό σύστημα ΔΜ, μέσα από τις δυνατότητες μοντελοποίησης, κάνει τη μετάβαση εύκολη και σίγουρη.
- *Αύξηση της ικανοποίησης των χρηστών του προγράμματος:* Αποτελεί ένα πρόβλημα του οποίου η λύση είναι επιτακτική όσο και δαπανηρή. Συχνά απαιτεί αλλαγή σε πλήθος άυλων παραγόντων, όπως στη συμπεριφορά των εργαζομένων. Ένα σύστημα ΔΜ βελτιώνει την ικανοποίηση των κατοίκων με τη βελτίωση άλλων παραμέτρων, όπως την ταχύτερη εκτέλεση των προγραμμάτων αποκομιδής, κ.λπ.
- *Μείωση λαθών:* Ένας παράγοντας που θεωρείται σχετικά εύκολα μετρήσιμος, έχει άμεση ανταπόκριση σε πλήθος άλλων, όπως στην ικανοποίηση των πολιτών και των εργαζομένων, στη μείωση των λειτουργικών εξόδων, στη μείωση των διαφυγόντων κερδών, κ.λπ.

Τα παραπάνω είναι τα σημαντικότερα οφέλη που μπορεί να έχει μία επιχείρηση ή ένας οργανισμός από ένα σύστημα ΔΜ. Χρειάζεται όμως ιδιαίτερη προσοχή στην επιλογή του. Μια λανθασμένη επιλογή όχι μόνο θα κάνει την απόδοση της επένδυσης ένα όνειρο αλλά μπορεί να αποβεί και καταστροφική για την επιχείρηση.

2.7. Συμπέρασμα

Συνοπτικά, η επιτυχία της υλοποίησης εγκατάστασης ενός συστήματος από τα προαναφερθέντα σε ένα περιβάλλον ΔΜ εξαρτάται κατά κύριο λόγο από:

- την εξασφάλιση της διαθεσιμότητας των βασικών εμπλεκόμενων στελεχών,
- την πληρότητα της εκπαίδευσης των τελικών χρηστών,
- την αξιοπιστία των διαθέσιμων δεδομένων,
- την εξασφάλιση χρηματοδοτικών πόρων,
- το λειτουργικό οργανόγραμμα του έργου,
- το ρεαλιστικό χρονοδιάγραμμα υλοποίησης, και
- την αποτελεσματική διοίκηση του έργου.

Η ελληνική και διεθνής εμπειρία υποδεικνύει ότι η εγκατάσταση ενός τέτοιου συστήματος δεν αποτελεί τον καταληκτικό στόχο μίας επιχείρησης, αλλά την αφετηρία της πορείας της προς τη συνεχή βελτίωση. Επομένως, το έργο που θα επιφέρει την επιπρόσθετη αξία στην επιχείρηση αρχίζει μετά το αρχικό έναυσμα λειτουργίας. Έχει, δηλαδή, δημιουργηθεί η πλατφόρμα πάνω στην οποία θα αναγερθούν ο βραχυπρόθεσμος προγραμματισμός πόρων, το σύστημα λήψεως αποφάσεων, κτλ.

Οι σύγχρονες μέθοδοι και τακτικές διοίκησης επιβάλλουν στις επιχειρήσεις κάθε μεγέθους να αναζητήσουν τις βέλτιστες πρακτικές, προκειμένου να είναι σε θέση να αντεπεξέλθουν τόσο στον εξαιρετικά απαιτητικό ανταγωνισμό όσο και στις συνεχώς αυξανόμενες απαιτήσεις των χρηστών.

Με τη χρήση τέτοιων συστημάτων, ακόμα και οι μικρές επιχειρήσεις επιτυγχάνουν την ολοκληρωμένη και απόλυτα προγραμματιζόμενη αξιοποίηση των πόρων τους, έχοντας πλήρη εικόνα για τους συναλλασσόμενους με την επιχείρηση, το ανθρώπινο δυναμικό τους, τα αποθέματα των ειδών, των μηχανών, των αποθηκευτικών χώρων κλπ.

Όλα αυτά έχουν ως αποτέλεσμα μία επιχείρηση να λειτουργεί οικονομικά και με απόλυτη αξιοπιστία σε θέματα παροχής υπηρεσιών. Και αυτό, αποτελεί ένα βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων της ΔΜ. Η επιχείρηση θα μπορεί να έχει πρόσβαση σε όλο τον όγκο των πρωτογενών εγγραφών προκειμένου να αντλήσει οποιαδήποτε πληροφορόρηση επιθυμεί και να την επεξεργαστεί σε συνδυασμό και με άλλες πηγές δεδομένων. Τέτοιου είδους τεχνικές χρησιμοποιούνται από μεγάλες επιχειρήσεις για τη λήψη και τη στήριξη επιχειρηματικών αποφάσεων.

ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΑΣΤΙΚΩΝ ΣΤΕΡΕΩΝ ΑΠΟΒΛΗΤΩΝ (ΑΣΑ)

Η ελληνική οικονομία είναι μια από τις γρηγορότερα αυξανόμενες οικονομίες εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης (ΕΕ) αλλά και σε ολόκληρο τον κόσμο κατά τη διάρκεια των τελευταίων τριάντα ετών. Η οικονομία της χώρας παράγει μεγάλα ποσά αγαθών, προϊόντων και υπηρεσιών για τους πολίτες. Η παραγωγή και η κατανάλωση έχουν πάντα μια σχέση ανατροφοδότησης. Η παραγωγή των αποβλήτων είναι η αναπόφευκτη συνέπεια της κοινωνικοοικονομικής ανάπτυξης. Η κοινωνικοοικονομική αυτή ανάπτυξη έχει ως αποτέλεσμα την καθημερινή παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων απορριμμάτων στη χώρα μας.

Η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων αποβλήτων σχετίζεται άμεσα με την τρέχουσα τάση για συνεχή αύξηση παραγωγής και κατανάλωσης. Αυτές οι μη αποδεκτές δραστηριότητες έχουν φθάσει στα όρια την ικανότητα του οικοσυστήματος, το οποίο δεν μπορεί να απορροφήσει τα απόβλητα που δημιουργούνται από την κοινωνία. Μερικοί συγγραφείς έχουν ταξινομήσει τα απόβλητα στην ίδια κατηγορία με την ρύπανση του αέρα και των υδάτων, και τα έχουν ονομάσει η "τρίτη ρύπανση" (Small 1971). Υπό αυτές τις περιστάσεις, η σημασία της διαχείρισης των αποβλήτων γίνεται σαφής και ζωτικής σημασίας για την κοινωνία, καθώς η ανθρώπινη κοινωνία δεν έχει κλείσει τους βρόχους της παραγωγής και της απόθεσης των στερεών αποβλήτων, και επιπλέον είναι αδύνατο να επιτευχθεί μηδενικό επίπεδο παραγωγής αποβλήτων (σύμφωνα με την τρέχουσα τεχνολογία). Για αυτό το λόγο, η επεξεργασία και η απόθεση των στερεών αποβλήτων είναι μια ανάγκη.

Τα απόβλητα είναι ένα ζήτημα για το οποίο όλες οι χώρες ανησυχούν. Η ΕΕ έχει αναπτύξει ένα νομοθετικό πλαίσιο για τη διαχείριση των αποβλήτων. Οι κορυφαίες προτεραιότητες της είναι η πρόληψη, η επαναχρησιμοποίηση και η ανακύκλωση. Ακόμη, η ΕΕ εξετάζει τις διαδικασίες επεξεργασίας αποβλήτων καθώς και τις διάφορες τάσεις σύμφωνα με σχετικές οδηγίες. Τα κράτη μέλη είναι ελεύθερα να αποφασίσουν με ποιον τρόπο θα ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της

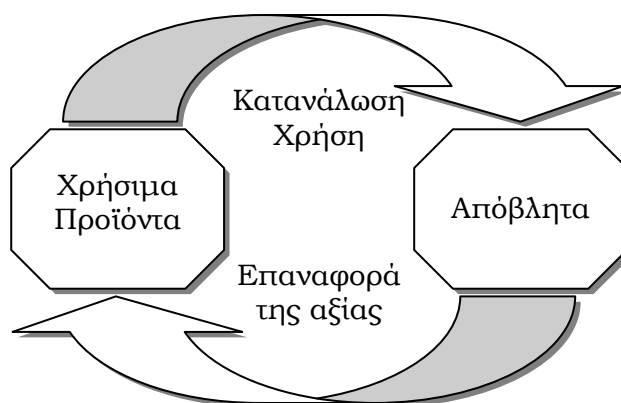
ΕΕ. Οι οδηγίες της ΕΕ σχετικά με την πολιτική των στερεών αποβλήτων έχουν ως στόχο την επίτευξη ενός νέου πλαισίου το οποίο θα βασίζεται στην ολοκληρωμένη διαχείριση των στερεών αποβλήτων με τη βεβαιότητα ότι ένα τέτοιο πλαίσιο θα μπορεί να υποστηριχθεί τεχνικά και οικονομικά.

Η διαχείριση των αστικών και βιομηχανικών στερεών αποβλήτων ανάγεται σε ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά και οικονομικά προβλήματα της εποχής μας. Η διαχείριση των αστικών απορριμμάτων ξεκινά με τη συλλογή τους από τους χώρους παραγωγής και καταλήγει στην τελική διάθεσή τους. Οι κυριότεροι από τους περιβαλλοντικά αποδεκτούς τρόπους διάθεσης είναι η υγειονομική ταφή, η καύση και η λιπασματοποίηση. Απαραίτητο όμως μέρος κάθε ορθολογικού συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων είναι η ανακύκλωση υλικών.

3.1. Τι είναι τα Αστικά Στερεά Απόβλητα (ΑΣΑ)?

Είναι σκόπιμο στο σημείο αυτό να διευκρινιστεί τι εννοούμε με τους όρους «Αστικά Στερεά Απόβλητα» (ΑΣΑ) και «Σύστημα Διαχείρισης ΑΣΑ». Ως ΑΣΑ ορίζουμε όλα τα στερεά ή σχεδόν στερεά αντικείμενα προς απόρριψη. Ως σύστημα διαχείρισης ΑΣΑ εννοούμε ένα σύνολο από εργαζόμενους, μηχανήματα και υποδομή, που έχουν ως σκοπό τη συλλογή, τη μεταφορά και την απόθεση των ΑΣΑ.

Οι ορισμοί των «αποβλήτων» αναφέρονται στην έλλειψη χρήσης ή αξίας, ή στα "άχρηστα υπολείμματα" (λεξικό της Οξφόρδης). Τα απόβλητα είναι ένα υποπροϊόν της ανθρώπινης δραστηριότητας. Φυσικά, περιέχουν τα ίδια υλικά με αυτά που βρίσκονται σε χρήσιμα προϊόντα, αλλά διαφέρουν ως προς τη δυνατότητα χρήσης και ως προς την έλλειψη αξίας. Η έλλειψη αξίας μπορεί σε πολλές περιπτώσεις να αφορά τη μικτή και, συχνά, την άγνωστη σύνθεση των αποβλήτων. Ο χωρισμός των υλικών στα απόβλητα θα αυξήσει γενικά την αξία τους, εάν υπάρχουν κατάλληλες χρήσεις για τα ανακτημένα αυτά υλικά. Αυτή η αντίστροφη σχέση μεταξύ του βαθμού μίξης και της αξίας είναι μια σημαντική ιδιότητα των αποβλήτων (**Σχήμα 3-1**).



Σχήμα 3-1 Σχέση μεταξύ προϊόντων και αποβλήτων.

Τα απόβλητα μπορούν να ταξινομηθούν σύμφωνα με ένα μεγάλο πλήθος μορφών: ανάλογα με τη φυσική τους κατάσταση (στερεή, υγρή, αερώδης), και ειδικά τα στερεά απόβλητα ανάλογα με:

- την αρχική τους συμπεριφορά (απόβλητα συσκευασίας, απόβλητα τροφίμων, κ.λπ.),
- το υλικό που αποτελούνται (γυαλί, χαρτί, κ.λπ.),
- τις φυσικές τους ιδιότητες (για καύση, για λίπασμα, ανακυκλώσιμα),
- την προέλευση τους (οικιακά, εμπορικά, γεωργικά, βιομηχανικά, κ.λπ.) ή ακόμα και
- το επίπεδο ασφάλειας (επικίνδυνα, μη-επικίνδυνα).

Τα στερεά απόβλητα από τις οικιακές και τις εμπορικές δραστηριότητες, συχνά ονομάζονται Δημοτικά Στερεά Απόβλητα (ΔηΣΑ, στα αγγλικά Municipal Solid Waste - MSW), και αποτελούν μόνο ένα σχετικά μικρό μέρος (<10%) σύμφωνα με τον Οργανισμό Οικονομικής Συνεργασίας και Ανάπτυξης (ΟΟΣΑ, στα αγγλικά Organization for Economic Co-operation and Development - OECD), των συνολικών στερεών αποβλήτων (OECD 1997).

Η διαχείριση των ΔηΣΑ είναι ένας συνδυασμός από φυσικές, χημικές ή/και βιολογικές διαδικασίες μετασχηματισμού των χαρακτηριστικών τους. Η παραγωγή αποβλήτων είναι ένα φορτίο για την κοινωνία, ένα δύσκολο πρόβλημα με πολλές παραμέτρους και καμία τελική λύση. Η ολική εξάλειψη των παραγομένων στερεών αποβλήτων δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί από την τρέχουσα τεχνολογία και είναι οικονομικά ασύμφορη. Επιπλέον, το πρόβλημα των αποβλήτων είναι ένα περιβαλλοντικό πρόβλημα που προκύπτει από την ανθρώπινη κοινωνία. Οι αιτίες του προβλήματος είναι:

- Πληθυσμός (περισσότεροι άνθρωποι, περισσότερα απόβλητα: μια γραμμική σχέση)
- Κατανάλωση (περισσότερη κατανάλωση, περισσότερα απόβλητα)
- Τεχνολογία παραγωγής για αγαθά και υπηρεσίες (μη βιώσιμες λύσεις και η μηδενική περιβαλλοντική συνείδηση πολλαπλασιάζει την παραγωγή αποβλήτων).

Οι παράγοντες που επηρεάζουν ποσοτικά και ποιοτικά τα χαρακτηριστικά των ΔηΣΑ μπορούν να ταξινομηθούν σε τέσσερα επίπεδα:

- Επίπεδο 1^ο – *Νοικοκυριό*: βιοτικό επίπεδο, επίπεδο κατανάλωσης, τρόπος ζωής, μέγεθος του νοικοκυριού, κ.λπ.
- Επίπεδο 2^ο – *Γεωγραφική περιοχή*: μέγεθος, τουρισμός, κεντρική θέρμανση, σχέδια συλλογής που ακολουθούνται από το εξουσιοδοτημένο δημοτικό σώμα, κ.λπ.
- Επίπεδο 3^ο – *Μακροοικονομίες*: ΑΕΠ, κατά κεφαλήν εισόδημα, κ.λπ.
- Επίπεδο 4^ο – *Προϊόντα*: πρώτες ύλες, συσκευασία, αναμενόμενος κύκλος ζωής, κ.λπ. (Παναγιωτακόπουλος 2002)

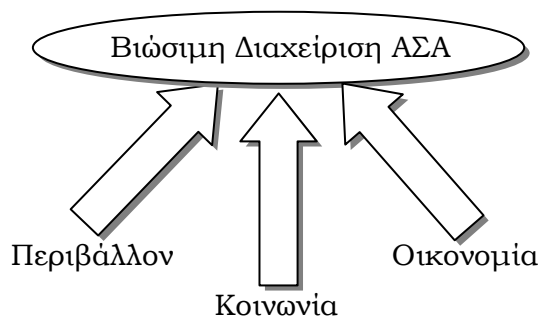
Υπάρχουν καλοί λόγοι για να ασχοληθεί κανείς με τα ΔηΣΑ. Η διαχείριση των ΔηΣΑ, δηλαδή, των στερεών αποβλήτων, με τα οποία το ευρύ κοινό (και επομένως οι ψηφοφόροι) έρχεται καθημερινά σε επαφή, έχει ένα υψηλό πολιτικό προφίλ, εκτός του περιβαλλοντικού, κοινωνικού και οικονομικού αντίκτυπου, που έχει στη σημερινή κοινωνία. Επιπλέον, τα οικιακά απόβλητα είναι, από τη φύση, μια από τις σκληρότερες πηγές αποβλήτων, και θα πρέπει να διαχειρίζονται αποτελεσματικά. Αποτελούνται από μια διαφορετική σειρά υλικών (γυαλί, μέταλλο, χαρτί, πλαστικό, οργανικές ουσίες) συνολικά αναμειγμένες μεταξύ τους. Εξάλλου, η σύνθεση των ΔηΣΑ είναι επίσης μεταβλητή εποχιακά, γεωγραφικά και από χώρα σε χώρα, και από αστικές σε αγροτικές περιοχές.

Αντίθετα, τα εμπορικά, βιομηχανικά και άλλα στερεά απόβλητα τείνουν να είναι πιο ομοιογενή, με μεγαλύτερες ποσότητες από το κάθε υλικό. Κατά συνέπεια, εάν μπορεί να επινοηθεί ένα σύστημα για να ασχοληθεί αποτελεσματικά με τα υλικά των οικιακών αποβλήτων, πρέπει να είναι δυνατό να εφαρμοστούν αυτά τα συμπεράσματα στη διαχείριση και άλλων πηγών στερεών αποβλήτων.

3.2. Οι ανησυχίες σχετικά με τα ΑΣΑ

Ιστορικά, η υγεία και η ασφάλεια είναι οι σημαντικότερες ανησυχίες στη διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Αυτές οι ανησυχίες ισχύουν ακόμα και σήμερα - τα απόβλητα πρέπει να διαχειρίζονται με έναν τρόπο, ο οποίος να ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο που ελλοχεύει για την ανθρώπινη υγεία. Ειδικά στις μέρες μας, η κοινωνία απαιτεί ακόμα περισσότερα - η διαχείριση των στερεών αποβλήτων πρέπει, εκτός από ασφαλή, να είναι και βιώσιμη. Ο πιο κοινός ορισμός της βιωσιμότητας είναι αυτός που παρέχεται από την έκθεση Brundtland (WCED 1987), η οποία περιγράφει τη βιωσιμότητα ως "την ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να δεσμεύει (περιορίζει) τη δυνατότητα των μελλοντικών γενεών να ικανοποιήσουν επίσης τις ανάγκες τους". Αυτό προσδιορίζει τη σύμπραξη μεταξύ της οικονομικής ανάπτυξης, της κοινωνικής δικαιοσύνης και του περιβάλλοντος (**Σχήμα 3-2**). Επομένως, η βιώσιμη διαχείριση των στερεών αποβλήτων πρέπει να είναι:

- οικονομικά προσιτή,
- κοινωνικά αποδεκτή, και
- περιβαλλοντικά αποτελεσματική.



Σχήμα 3-2 Οι τρεις στυλοβάτες της βιώσιμης ανάπτυξης. Η ίση εκτίμηση, καθενός από αυτούς είναι απαραίτητη, ειδάλλως, ολόκληρο το σύστημα θα είναι ασύμμετρο.

Στο παρελθόν, το οικονομικό κόστος ενός συστήματος διαχείρισης των στερεών αποβλήτων ήταν ο σημαντικότερος παράγοντας ελέγχου στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Εντούτοις, πιο πρόσφατα οι περιβαλλοντικές εκτιμήσεις έχουν διαδραματίσει ένα σημαντικότερο ρόλο σε αυτήν την διαδικασία. Ο συνυπολογισμός των κοινωνικών πτυχών της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων στη διαδικασία λήψης αποφάσεων, αν και δεν είναι μια νέα έννοια, έχει

περιοριστεί αρχικά στην έρευνα των μεθόδων μέτρησης των κοινωνικών προβλημάτων (Nilsson-Djerf 1999).

Οι περιβαλλοντικές ανησυχίες σχετικά με τη διαχείριση και τη διάθεση των στερεών αποβλήτων μπορούν να διαιρεθούν σε δύο σημαντικές κατηγορίες: της διατήρησης των πόρων και της ρύπανσης του περιβάλλοντος.

3.2.1. Η παλιά ανησυχία: Διατήρηση των πόρων

Οι Meadows κ.α. (1972) δημοσίευσαν ένα βιβλίο με τίτλο «Τα όρια στην αύξηση» που είχε μεγάλη απήχηση. Υποστήριξε ότι τα ποσοστά εκμετάλλευσης (το 1972) των μη-ανανεώσιμων πόρων της γης, δηλαδή των πρώτων υλών και των καυσίμων δεν μπορούν να διατηρηθούν επ' αόριστον. Στη συνέχεια στο βιβλίο, «Πέρα από τα όρια» (Meadows et al. 1992), αναφέρεται η ίδια ιστορία, αλλά με αυξανόμενη επιτακτικότητα, διότι οι πρώτες ύλες συνεχίζουν να καταναλώνονται με γρήγορο ρυθμό χωρίς να αντικαθίστανται αποτελεσματικά από εναλλακτικές λύσεις. Το αποτέλεσμα τέτοιων εκθέσεων ήταν η ανάπτυξη της έννοιας της βιώσιμης ανάπτυξης (WCED 1987). Η βιωσιμότητα απαιτεί την αποτελεσματική ρύθμιση των φυσικών πόρων και όπου είναι δυνατόν τη διατήρησή τους, αλλά όχι εις βάρος της ποιότητας της ζωής του κάθε ατόμου.

Οι αρχικές ανησυχίες των Meadows κ.α. (1992) για την επικείμενη μείωση των φυσικών πόρων έχουν αποδειχθεί ανακριβείς (Beckerman 1995, UNDP 1998, UNDESA 1999). Για κάθε πρώτη ύλη τα αποδεδειγμένα αποθεματικά το 1989 ήταν μεγαλύτερα από τα αποδεδειγμένα αποθεματικά του 1970. Αυτό συνέβη επειδή τα «αποδεδειγμένα αποθεματικά» ορίζονται ως τα αποθεματικά, τα οποία θα μπορούσαν να εξαχθούν με τις σημερινές δομές της τεχνολογίας και του αντίστοιχου κόστους. Η τεχνολογία και η καινοτομία έχουν οδηγήσει τους περισσότερους πόρους να διατίθενται πιο εύκολα, και με χαμηλότερο κόστος εξαγωγής συγκρινόμενο με αυτό που ίσχυε πριν από είκοσι χρόνια (Meyers and Simon 1994, Simon 1996).

Κατά γενική ομολογία, η κατανάλωση τείνει υπέρ των προϊόντων και των υπηρεσιών με τις λιγότερο οικολογικές επιπτώσεις. Η βελτιωμένη απόδοση της ενέργειας καθώς και η πρόοδος της τεχνολογίας και η ανακύκλωση πολλών πρώτων υλών έχουν αυξήσει την απόδοση της χρησιμότητας των υλικών (UNDP 1998). Η κατά κεφαλήν χρήση των βασικών υλικών όπως ο χάλυβας, η ξυλεία και ο χαλκός έχει σταθεροποιηθεί στις περισσότερες χώρες του ΟΟΣΑ (OECD 1997) - και μάλιστα, σε κάποιες χώρες, έχει μειωθεί για μερικά προϊόντα. Αυτό

βέβαια δε σημαίνει ότι οι πόροι είναι ανεξάντλητοι, αλλά αντιθέτως μπορούν να μειωθούν σε επικίνδυνα επίπεδα αν και στις περισσότερες των περιπτώσεων, το χρονικό διάστημα που απαιτείται για να συμβεί κάτι τέτοιο είναι εξαιρετικά μακριά, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα για την εφαρμογή τεχνολογικών εξελίξεων.

3.2.2. Η νέα ανησυχία: Ρύπανση και η επιδείνωση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας

Η μείωση των μη-ανανεώσιμων πηγών ενέργειας δεν είναι τώρα το επείγον πρόβλημα (UNDP 1998). Δύο άλλες ανησυχίες έχουν γίνει κρίσιμες όσον αφορά τις "ανάγκες των μελλοντικών γενεών". Αυτές είναι:

- η παραγωγή της ρύπανσης και των αποβλήτων, τα οποία υπερβαίνουν τη δυνατότητα των φυσικών λεκανών του πλανήτη να τα απορροφήσουν και να τα μετατρέψουν σε αβλαβείς ενώσεις, και
- η αυξανόμενη επιδείνωση των ανανεώσιμων ενεργειών όπως το νερό, το χώμα, τα δάση, τα αποθέματα ψαριών και γενικότερα η χλωρίδα και πανίδα.

Οι ανησυχίες αυτές είναι σχετικές ανάλογα με τη γεωγραφική περιοχή, αλλά και την αστική και βιομηχανική μόλυνση καθώς τα απόβλητα φθάνουν σε πιθανά κρίσιμα επίπεδα σε όλες τις γεωγραφικές περιοχές εκτός από την Αφρική και το Βόρειο και Νότιο πόλο (UNEP 1997).

3.3. Υγειονομική ταφή και τα αποτελέσματά της

"Η υγειονομική ταφή είναι η λειτουργία της απόθεσης των αποβλήτων σε μια περιοχή, που διαμορφώνεται ανάλογα και που προετοιμάζεται για την αποθήκευση των αποβλήτων και συμπεριλαμβάνει συστήματα για την αποκομιδή των εκπεμπόμενων αερίων και υγρών. Η υγειονομική ταφή είναι μια ορθή απόθεση των αποβλήτων στο έδαφος". (European Environmental Agency 2004). Ο ορισμός δηλώνει σαφώς ότι η υγειονομική ταφή δε συσχετίζεται με την αλόγιστη ρήψη αποβλήτων που είναι μια τυχαία, μη προγραμματισμένη πράξη και δεν καλύπτει τις απαιτήσεις για ένα καθαρό περιβάλλον. Η λειτουργία ενός Χώρου Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) είναι συμφέρουσα ως η μόνη μέθοδος απόθεσης αποβλήτων καθώς η τεχνολογία είναι μάλλον απλή και οι

δαπάνες είναι σημαντικά χαμηλές (σε σύγκριση με άλλες τεχνικές) στις περιπτώσεις χαμηλού κόστους γης.

Ο ΧΥΤΑ είναι ένα πολύπλοκο σύστημα που περιλαμβάνει διαφορετικά στοιχεία για τη λειτουργία του. Η λειτουργία του δημιουργεί ισχυρές αλληλεπιδράσεις μεταξύ του περιβάλλοντος, της κοινωνίας και της οικονομίας. Σε ένα ΧΥΤΑ κατά κύριο λόγο αποτίθενται ΔηΣΑ. Η υγειονομική ταφή είναι πάντα η τελική επιλογή από όλες τις εναλλακτικές μεθόδους επεξεργασίας των αποβλήτων. Η υγειονομική ταφή είναι το αναπόφευκτο υποσύστημα κάθε συστήματος διαχείρισης ΔηΣΑ επειδή στο τέλος, κάθε μέθοδος επεξεργασίας αφήνει υπολείμματα που αποτίθενται σε κάποιο ΧΥΤΑ.

Τα πλεονεκτήματα της χρήσης των ΧΥΤΑ σε σύγκριση με τις άλλες μεθόδους είναι: Η απλή τεχνολογία, το χαμηλότερο κόστος για την υποδομή και η συντήρηση, η επαναχρησιμοποίηση του εδάφους μετά από την περάτωση των ΧΥΤΑ, η πιθανή αποκατάσταση και η χρησιμοποίηση του βιοαερίου. Η εκθετική παραγωγή αποβλήτων δημιουργεί σοβαρά προβλήματα και απαιτεί άμεση δράση για την επεξεργασία των αποβλήτων. Οι τρέχουσες μέθοδοι επεξεργασίας αποβλήτων έχουν προκαλέσει πολλά άμεσα και έμμεσα προβλήματα στο περιβάλλον, στην οικονομία και στην κοινωνία. Η απόθεση των αποβλήτων σε ΧΥΤΑ έχει πολυάριθμες συνέπειες στο περιβάλλον. Οι σημαντικότερες πιθανές περιβαλλοντικές επιπτώσεις είναι:

- Ο κίνδυνος για τον υδροφόρο ορίζοντα αλλά και το νερό στην επιφάνεια
- Η απελευθέρωση αερίων που συμβάλλουν στην παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου
- Ο κίνδυνος έκρηξης

3.4. Βιώσιμη διαχείριση ΑΣΑ

Αντιθέτως με αυτά που περιγράφονται παραπάνω, η παραγωγή και η διάθεση των μεγάλων ποσών αποβλήτων, θεωρείται ακόμα από πολλούς μια σαν μία σπατάλη γήινων πόρων. Η τοποθέτηση των αποβλήτων σε διάφορες τρύπες στο έδαφος εμφανίζεται να είναι μία ανεπαρκής διαχείριση υλικών.

Εντούτοις, θα πρέπει να αναφερθεί, ότι αν και η γη είναι ένα ανοικτό σύστημα όσον αφορά την ενέργεια, ουσιαστικά, είναι ένα κλειστό σύστημα για τα υλικά. Ενώ τα υλικά μπορούν να κινηθούν τριγύρω, να χρησιμοποιηθούν, να διασκορπιστούν ή να συγκεντρωθούν, το συνολικό ποσό των γήινων στοιχείων μένει σταθερό (με εξαίρεση τα ασταθή ραδιενεργά στοιχεία). Κατά συνέπεια αν

και οι πόροι των "πρώτων υλών" μπορούν να μειωθούν, το συνολικό ποσό κάθε στοιχείου, το οποίο είναι παρόν στη γη, παραμένει σταθερό. Στην πραγματικότητα, η συγκέντρωση μερικών χρήσιμων υλικών είναι υψηλότερη σε χώρους απόθεσης αποβλήτων απ' ό,τι στα αρχικά μεταλλεύματα πρώτης ύλης τους. Τέτοια υλικά θα μπορούσαν να ξεθαφτούν σε μια μεταγενέστερη ημερομηνία.

Επομένως, η τοποθέτηση των στερεών αποβλήτων σε τρύπες στο έδαφος (υγειονομική ταφή), θα μπορούσε να θεωρηθεί ως μία μακροπρόθεσμη αποθήκευση των υλικών αυτών. Εντούτοις, είναι αυτός ο αποδοτικότερος τρόπος για να ρυθμιστούν τέτοια υλικά?

Οι ανησυχίες σχετικά με τη διατήρηση των πόρων έχουν οδηγήσει σε καλέσματα/προσκλησεις/απαιτήσεις για, αρχικά, γενικές μειώσεις του ποσού των αποβλήτων που παράγονται, δηλαδή, αφενός ελαχιστοποίηση αποβλήτων ή μείωση αποβλήτων, αφετέρου, για τρόπους με τους οποίους να ανακτηθούν τα υλικά ή/και η ενέργεια από τα απόβλητα, έτσι ώστε μπορούν να χρησιμοποιηθούν και πάλι. Η ανάκτηση των πόρων από τα απόβλητα πρέπει να επιβραδύνει τη μείωση των μη ανανεώσιμων πόρων, και να βοηθήσει να μειωθεί η χρήση των ανανεώσιμων πόρων στο ποσοστό αναπλήρωσης.

3.5. Ρύπανση

Η πιθανή ή η πραγματική ρύπανση είναι η βάση για την πιο τρέχουσα περιβαλλοντική ανησυχία σχετικά με τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων. Ιστορικά, το περιβάλλον έχει θεωρηθεί ως μία λεκάνη για όλα τα απόβλητα που παράγονται από τις ανθρώπινες δραστηριότητες. Τα υλικά έχουν απελευθερωθεί στην ατμόσφαιρα ή στις κοίτες των ποταμών, ή έχουν πεταχτεί σε χώρους απόθεσης για "να διαλυθούν και να διασκορπίσουν". Σε χαμηλά επίπεδα εκπομπών, οι φυσικές βιολογικές και γεωχημικές διαδικασίες είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν τέτοιες ροές χωρίς να προκύπτουν αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες. Εντούτοις, δεδομένου ότι τα επίπεδα εκπομπών έχουν αυξηθεί με την αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού και την ανθρώπινη δραστηριότητα, οι φυσικές διαδικασίες δεν έχουν τον ικανοποιητικό κύκλο εργασιών, για να αποτρέψουν τις αλλαγές στις περιβαλλοντικές συνθήκες (όπως το επίπεδο ατμοσφαιρικού διοξειδίου του άνθρακα). Σε ακραίες περιπτώσεις υπερφόρτωσης (όπως η άμεση ρύπανση των ποταμών με λύματα), οι φυσικές διαδικασίες

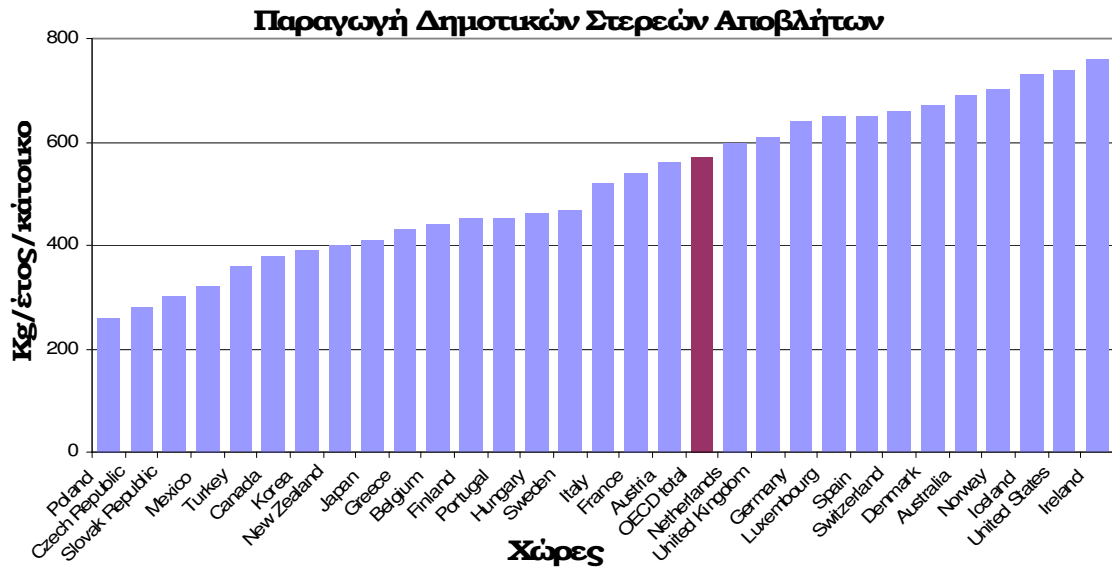
καθαρισμού μπορούν να καταρρεύσουν εντελώς, οδηγώντας σε δραστικές αλλαγές στην ποιότητα του περιβάλλοντος.

Ακριβώς όπως οι πρώτες ύλες δεν είναι απεριόριστες, έτσι και το περιβάλλον δεν είναι μία άπειρη λεκάνη για την απόρριψη λυμάτων. Η περιβαλλοντική ρύπανση που δημιουργείται από την ανθρώπινη δραστηριότητα θα επιστρέψει για να στοιχειώσει την κοινωνία, δημιουργώντας επιδείνωση στην περιβαλλοντική ποιότητα. Συνεπώς, υπάρχει μία αυξανόμενη συνειδητοποίηση ότι το περιβάλλον δεν πρέπει να θεωρηθεί ως μία εξωτερική λεκάνη για τα απόβλητα που προκύπτουν από την κοινωνία, αλλά ως ένα τμήμα του παγκόσμιου συστήματος, το οποίο χρειάζεται μία προσεκτική και αποδοτική διαχείριση.

Αντίστοιχα με τις ευρείες ανησυχίες για περιβαλλοντική ρύπανση, προκύπτουν και συγκεκριμένες ανησυχίες σε τοπικό επίπεδο όπου και προτείνονται ειδικές εγκαταστάσεις για την επεξεργασία αποβλήτων. Προγραμματισμένοι αποτεφρωτήρες προκαλούν γενικά ανησυχίες σχετικά με τα πιθανά επίπεδα εκπομπής, και ειδικότερα, όσον αφορά τα επίπεδα διοξινών. Ομοίως, οι περιοχές απόθεσης αποβλήτων είναι γνωστές για την παραγωγή αερίων από τα απόβλητα, τα οποία αποτίθενται εκεί. Σε διεθνές επίπεδο, αυτό προκαλεί αύξηση της θερμότητας, αλλά σε τοπικό επίπεδο μπορεί να διαρρεύσει στις ιδιοκτησίες με εκρηκτικές συνέπειες. Υπάρχει επίσης αυξανόμενη ανησυχία για τον κίνδυνο μόλυνσης του υδροφόρου ορίζοντα από τα προϊόντα διήθησης, τα οποία παράγονται στις περιοχές απόθεσης των αποβλήτων.

Τέτοιες τοπικές περιβαλλοντικές ανησυχίες (καθώς και οι ανησυχίες σχετικά με τις επιδράσεις στις τιμές των ακινήτων) έχουν οδηγήσει στην δημιουργία επιτροπών που εκφράζουν τις ανησυχίες τους για τη διαχείριση των στερεών αποβλήτων και απαιτούν μια βιώσιμη απάντηση και μια σαφή μακροπρόθεσμη στρατηγική.

Ενώ τα παραπάνω είναι κατανοητά, αγνοούν την κοινή ευθύνη μας για τη διαχείριση των αποβλήτων. Όλες οι ανθρώπινες δραστηριότητες παράγουν απόβλητα. Κάθε άτομο στην Ευρωπαϊκή Ένωση, παραδείγματος χάριν, παράγει έναν μέσο όρο 570kg ΔηΣΑ κάθε έτος (OECD 2007) (**Σχήμα 3-3**). Αυτά τα απόβλητα πρέπει με κάποιο τρόπο να τα διαχειριστούν. Αν και όλες οι μέθοδοι για την αντιμετώπιση και διάθεση των αποβλήτων είναι γνωστές για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, παρόλα αυτά το πρόβλημα των αποβλήτων είναι υπαρκτό και πρέπει να διευθετηθεί. Αυτό που απαιτείται είναι μια γενική στρατηγική, η οποία να διαχειριστεί τα απόβλητα που μειώνουν τα περιβαλλοντικά φορτία, με ένα προσιτό βέβαια κόστος.



Σχήμα 3-3 Μέση παραγωγή ΔηΣΑ κάθε χώρας ανά κάτοικο και ανά έτος και σύγκριση με τη μέση παραγωγή ΔηΣΑ των χωρών του ΟΟΣΑ.

3.6. Πολιτική της ΕΕ για τα ΑΣΑ

3.6.1. Παραγωγή ΑΣΑ στην ΕΕ

Η παραγωγή των ΑΣΑ έχει αναγνωριστεί ως ένα από τα σοβαρότερα προβλήματα εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης. Η παραγωγή των στερεών αποβλήτων απειλεί την ανθρώπινη υγεία και την περιβαλλοντική ισορροπία και, επιπλέον, αποτελεί μια τεράστια απώλεια πολύτιμων πόρων και υλικών. Η συνολική παραγωγή αποβλήτων συνεχίζεται να αυξάνεται στα μέλη της ΕΕ: περίπου 1,3 δις. τόνοι παράγονται ετησίως (εκτός από τα γεωργικά απόβλητα), περίπου 3,5 τόνοι κατά κεφαλήν ετησίως (European Commission 2003).

Ο Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος (ΕΟΠ, στα αγγλικά European Environment Agency - EEA) διακρίνει τέσσερις σημαντικές κατηγορίες αποβλήτων που συμβάλλουν στη συνολική παραγωγή αποβλήτων στην ΕΕ:

- Απόβλητα Κατασκευαστικά (26%),
- Απόβλητα Μεταλλείων και λατομείων (29%),
- Απόβλητα Κατασκευής και κατεδάφισης (22%), και
- Δημοτικά στερεά απόβλητα (14%) (αποκλείονται τα γεωργικά και δασικά απόβλητα).

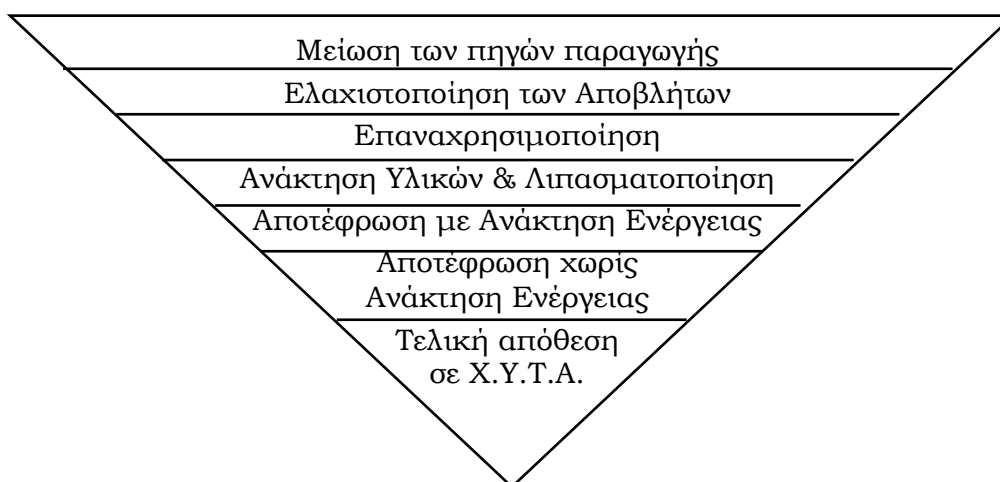
Περίπου 2% των αποβλήτων είναι επικίνδυνα απόβλητα, δηλαδή, περίπου 27 εκ. τόνοι (European Commission 2003). Οι συνολικές ποσότητες των αποβλήτων θα συνεχίσουν να αυξάνονται στις περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες κατά τη διάρκεια των επόμενων ετών. Ο ΟΟΣΑ υπολογίζει ότι η παραγωγή ΔηΣΑ στην περιοχή του ΟΟΣΑ θα αυξηθεί κατά 43% από το 1995 ως το 2020, φτάνοντας τα 640 Kg ανά κάτοικο και ανά έτος στο τέλος αυτής της περιόδου (OECD 2002).

Ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης ΔηΣΑ έχει αναγνωριστεί ως ένας από τους κρίσιμους παράγοντες για τη μελλοντική δράση διεθνώς. Όπως συμφωνήθηκε στην παγκόσμια Σύνοδο Κορυφής για τη βιώσιμη ανάπτυξη και προτείνεται από την Ατζέντα 21, ο στόχος είναι "να αποτραπούν και να ελαχιστοποιηθούν τα απόβλητα και να μεγιστοποιηθεί η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση και η χρήση των φιλικών προς το περιβάλλον εναλλακτικών υλικών, με τη συμμετοχή των κυβερνητικών αρχών και όλων των συμμετεχόντων, προκειμένου να ελαχιστοποιηθούν τα δυσμενή αποτελέσματα στο περιβάλλον και να βελτιωθεί η αποδοτικότητα των πόρων" (United Nations 2002).

3.6.2. Η ιεραρχία της διαχείρισης των ΑΣΑ

Η ΕΕ αναγνωρίζοντας τη σημασία της βιώσιμης χρήσης και διαχείρισης των πόρων, έχει υιοθετήσει μια ιεραρχία προτιμημένων επιλογών για τη διαχείριση των αποβλήτων που βασίζονται στις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και της Ατζέντα 21 (United Nations 2002). Ο πιο κοινός ορισμός της βιωσιμότητας είναι αυτός που παρέχεται από την έκθεση Brundtland (WCED 1987), η οποία περιγράφει τη βιωσιμότητα ως "την ανάπτυξη που ικανοποιεί τις ανάγκες του παρόντος χωρίς να δεσμεύει τις δυνατότητες των μελλοντικών γενεών ώστε να ικανοποιηθούν και αυτές τις δικές τους ανάγκες".

Η ιεραρχία για τη διαχείριση των αποβλήτων καλύπτει τους ακόλουθους στόχους:



Σχήμα 3-4 Η ιεραρχία της διαχείρισης των ΑΣΑ.

Η ιεραρχία των επιλογών της διαχείρισης των στερεών αποβλήτων (**Σχήμα 3-4**) έχει ως επικεφαλή τη μείωση των πηγών παραγωγής αποβλήτων, ή την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων. Αυτή είναι η πιο ουσιαστική προϋπόθεση για οποιαδήποτε στρατηγική διαχείρισης των αποβλήτων, δηλαδή, η ενασχόληση με λιγότερα απόβλητα. Έπειτα, στην ιεραρχία υπάρχει μια σειρά επιλογών: η επαναχρησιμοποίηση, η ανακύκλωση, η λιπασματοποίηση, τα απόβλητα στην ενέργεια, η αποτέφρωση χωρίς ανάκτηση ενέργειας και η τελική απόθεση τους στους χώρους υγειονομικής ταφής αποβλήτων, κατά κάποια σειρά προτίμησης.

Οι πρώτοι τρεις στόχοι εστιάζουν στην αποφυγή της παραγωγής αποβλήτων ενώ οι επόμενοι δύο εστιάζουν στη χρησιμοποίηση της παραγωγής των αποβλήτων. Η αποτέφρωση χωρίς ανάκτηση ενέργειας καθώς και η τελική απόθεση σε ΧΥΤΑ είναι το αναπόφευκτο αποτέλεσμα της παραγωγής και της κατανάλωσης. Πρέπει να αναφερθεί ότι μηδενική απόθεση αποβλήτων είναι αδύνατη με τη χρήση της τρέχουσας τεχνολογίας.

Βέβαια, έχει αναγνωριστεί στον τομέα της διαχείρισης των αποβλήτων ότι η προαναφερθείσα ιεραρχία έχει ορισμένους περιορισμούς:

- Η ιεραρχία έχει λίγη επιστημονική ή τεχνική βάση. Δεν υπάρχει κανένας επιστημονικός λόγος, που να εξηγεί γιατί η ανακύκλωση υλικών πρέπει πάντα να προτιμάται από την ενεργειακή ανάκτηση.
- Η ιεραρχία έχει μικρή χρησιμότητα όταν χρησιμοποιείται ένας συνδυασμός επιλογών, όπως σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης στερεών αποβλήτων. Σε ένα τέτοιο σύστημα, η ιεραρχία δεν μπορεί να προβλέψει εάν η βιολογική επεξεργασία που συνδυάζεται με τη θερμική επεξεργασία των υπολειμμάτων θα ήταν προτιμητέα σε υλικά, τα οποία

θα ανακυκλωθούν και στη συνέχεια, θα μεταφερθούν σε χώρο υγειονομικής ταφής των απορριμμάτων. Αυτό που απαιτείται είναι μια γενική αξιολόγηση ολόκληρου του συστήματος, το οποίο η ιεραρχία δεν μπορεί να παρέχει.

- Η ιεραρχία δεν εξετάζει τις δαπάνες, και επομένως, δεν μπορεί να βοηθήσει στην αξιολόγηση της οικονομικής ανεκτικότητας των συστημάτων αποβλήτων.
- Η ιεραρχία δεν μπορεί να εκτιμήσει την ευρεία ποικιλία των συγκεκριμένων τοπικών καταστάσεων, όπου τα συστήματα διαχείρισης των αποβλήτων πρέπει να λειτουργήσουν αποτελεσματικά, όπως για παράδειγμα, σε μικρά νησιά, σε αραιοκατοικημένες περιοχές, ή σε δημοφιλής τουριστικούς προορισμούς, όπου οι μεγάλες αυξήσεις στον πληθυσμό πραγματοποιούνται σε εποχιακή βάση.

Παρόλο που η ιεραρχία είναι χρήσιμη ως σύνολο οδηγιών προεπιλογής και η χρήση της στον καθορισμό της επιλογής είναι προτιμότερη, δεν είναι ικανή να οδηγήσει απαραίτητως σε χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ούτε σε ένα οικονομικότερο βιώσιμο σύστημα. Τα διάφορα υλικά στα στερεά απόβλητα αντιμετωπίζονται καλύτερα με τη χρήση διάφορων διαδικασιών. Οπότε για να αντιμετωπιστεί αποτελεσματικά ολόκληρη η ροή των στερεών αποβλήτων, είναι επιθυμητή μια σειρά επιλογών της διαχείρισης των αποβλήτων. Κατά συνέπεια, δεν υπάρχει καμία γενική "καλύτερη" ή "χειρότερη" επιλογή, αλλά διαφορετικές επιλογές είναι κατάλληλες για τα διαφορετικά μέρη των ΑΣΑ.

3.6.3. Κανονισμοί και οδηγίες

Η ΕΕ έχει καθιερώσει ένα σύνολο αρχών, κανονισμών και οδηγιών προκειμένου να προστατευθεί πρώτιστα η ανθρώπινη υγεία καθώς επίσης και το περιβάλλον. Η επεξεργασία αποβλήτων είναι μόνο ένας από τους τρόπους με τους οποίους προκαλούνται περιβαλλοντικά προβλήματα. Η νομοθεσία αποβλήτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης μπορεί να διαιρεθεί σε τρεις κύριες κατηγορίες:

- *Οριζόντια Νομοθεσία:* Η οριζόντια νομοθεσία θεσπίζει το γενικό πλαίσιο για τη διαχείριση των αποβλήτων. Ο στόχος είναι να τεθούν οι γενικές απαιτήσεις που καλύπτουν όλες τις διαδικασίες διαχείρισης των αποβλήτων. Εντούτοις, λόγω της ευρείας φύσης της, η οριζόντια νομοθεσία δεν μπορεί να λάβει υπόψη της τις ιδιομορφίες όλων των διαδικασιών διαχείρισης των αποβλήτων.

- *Νομοθεσία για συγκεκριμένες τάσεις αποβλήτων:* Η νομοθεσία για τις συγκεκριμένες τάσεις αποβλήτων έθεσε ποσοτικούς στόχους που εστιάζουν στην ανάκτηση και την ανακύκλωση των υλικών (Συσκευασία και Απόβλητα Συσκευασίας Οδηγία 94/62/ΕΚ), την αποφυγή και την πρόληψη των επιδράσεων των επικίνδυνων αποβλήτων, των αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού, Οδηγία 2002/96/ΕΚ, Οδηγία 91/157/ΕΚ για τις μπαταρίες και τους συσσωρευτές, που τροποποιήθηκε από την 98/101/ΕΚ
- *Νομοθεσία για τις διαδικασίες επεξεργασίας αποβλήτων:* Η τρίτη κατηγορία του νομικού πλαισίου για τα απόβλητα αφορά τις διαδικασίες επεξεργασίας αποβλήτων, συμπεριλαμβανομένης και της υγειονομικής ταφής.

Η εφαρμογή της οδηγίας των ΧΥΤΑ αναμένεται να είναι σημαντικός οδηγός για την ανάπτυξη της πολιτικής για τη διαχείριση των αποβλήτων σε εθνικό επίπεδο κατά τη διάρκεια της τρέχουσας δεκαετίας. Η οδηγία τοποθετεί στόχους στα κράτη μέλη ώστε να μειωθούν οι ποσότητες των δημοτικών στερεών αποβλήτων που αποτίθενται στα ΧΥΤΑ. Οι στόχοι από την οδηγία για τα ΧΥΤΑ τίθενται στο άρθρο 5 και ορίζονται τα εξής:

- «Το αργότερο έως τις 16 Ιουλίου 2006, τα Βιοδιασπώμενα Δημοτικά Στερεά Απόβλητα (ΒΔηΣΑ) που πηγαίνουν στους ΧΥΤΑ πρέπει να μειωθούν σε 75% του συνολικού ποσού από το βάρος των ΒΔηΣΑ που παράγονται το 1995 ή το τελευταίο έτος πριν από το 1995 για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από την Eurostat».
- «Το αργότερο έως τις 16 Ιουλίου 2009, τα ΒΔηΣΑ που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ πρέπει να μειωθούν σε 50% του συνολικού ποσού από το βάρος των ΒΔηΣΑ που παράγονται το 1995 ή το τελευταίο έτος πριν από το 1995 για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από την Eurostat».
- «Το αργότερο έως τις 16 Ιουλίου 2016, τα ΒΔηΣΑ που καταλήγουν στους ΧΥΤΑ πρέπει να μειωθούν κατά 35% του συνολικού ποσού από το βάρος των ΒΔηΣΑ που παράγονται το 1995 ή το τελευταίο έτος πριν από το 1995 για το οποίο υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα από την Eurostat».

«Τα κράτη μέλη που το 1995 απόθεσαν περισσότερο από 80% των ΔηΣΑ που συλλέγουν από τους ΧΥΤΑ, μπορούν να παρατείνουν την επίτευξη των στόχων για τέσσερα επιπλέον έτη. Ο πρώτος στόχος μπορεί επομένως να

επεκταθεί έως το 2010, ο δεύτερος έως το 2013 και ο τρίτος έως το 2020». Οι χώρες με βαριά παράδοση ως προς την απόθεση των ΔηΣΑ στους ΧΥΤΑ είναι η Ελλάδα, το Ηνωμένο Βασίλειο, η Ισπανία, η Πορτογαλία και η Ιρλανδία.

3.7. Διαχείριση των ΔηΣΑ στην Ελλάδα

Η διαχείριση των ΔηΣΑ στην Ελλάδα έχει αναβαθμιστεί εντυπωσιακά κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας. Τελευταία, ενώ ακόμα θεωρείται ένα σημαντικό πρόβλημα, γίνεται όλο και περισσότερο μια καλά δομημένη, οργανωμένη και περιβαλλοντικά υπεύθυνη δραστηριότητα με συγκεκριμένους στόχους, ιδιαίτερα στις αστικές περιοχές. Μια σημαντική βελτίωση μπορεί να φανεί στην ανάπτυξη των εγκαταστάσεων επεξεργασίας, συλλογής και ανακύκλωσης. Συγχρόνως, είναι προφανές ότι η διαχείριση ΔηΣΑ στην Ελλάδα χρειάζεται μια συνεχή βελτίωση και μια ιδιαίτερη αναδιοργάνωση της διαχείρισης προκειμένου να επιτευχθούν οι στόχοι της ΕΕ.

3.7.1. Η εσωτερική παραγωγή αποβλήτων

Η συνολική ποσότητα των ΔηΣΑ στην Ελλάδα αυξήθηκε γρήγορα κατά τη διάρκεια των τελευταίων 20 ετών, από 3 εκ. τόνους το 1990 σε 3,6 εκ. τόνους το 1996 και σε 4,64 εκ. τόνους το 2002 (περίπου 46%). Παρατηρώντας την παραγωγή ΔηΣΑ κατά τη διάρκεια των τελευταίων 25 ετών παρουσιάζεται σαφώς αυξανόμενη παραγωγή από το 1980 έως το 2002.

1980	1990	1997	1998	1999	2001	2002
2,499	3,000	3,900	4,082	4,264	4,559	4,640

Πίνακας 3-1: Εθνική παραγωγή ΔηΣΑ (σε χιλιάδες τόνους).

Source: (JMD 50910/2727/2003)

Η αυξανόμενη παραγωγή είναι πρωτίστως βασισμένη στη βελτίωση του βιοτικού επιπέδου και την αλλαγή των σχεδίων κατανάλωσης που απεικονίζουν σαφώς τη γρήγορη ανάπτυξη της ελληνικής οικονομίας, που είναι προφανές από τους αριθμούς αύξησης του ΑΕΠ. Η παραγωγή αποβλήτων αυξάνεται μαζί με την αύξηση του εισοδήματος. Η ποσότητα των ΔηΣΑ έφθασε σχεδόν στα 4,7 εκ. τόνους το 2002, αυξημένη κατά 54% έναντι των επιπέδων του 1990 ενώ συγχρόνως το ΑΕΠ αυξήθηκε κατά 125%.

1980	1990	1997	1998	1999	2001	2002
35.018,2	66.167,8	107.103	108.977,3	117.849,5	131.341,2	141.502,4

Πίνακας 3-2: Ακαθάριστο εγκώριο προϊόν (σε εκατομμύρια EURO, στις τρέχουσες τιμές)

Source: Eurostat 2004

3.7.2. Πληθυσμός

Ο πληθυσμός στην Ελλάδα, σύμφωνα με την απογραφή του 2001, είναι περίπου 11.275.312 και κάθε κάτοικος παράγει 411,5 kg των ΔηΣΑ ετησίως ή 1,12kg ανά ημέρα. (JMD 50910/2727/2003). Αν και το ποσοστό γέννησης είναι χαμηλό (για 0,5%), η αστικοποίηση και η μετανάστευση έχει συμβάλει στην αύξηση της πυκνότητας πληθυσμού, κυρίως στα αστικά κέντρα της Αθήνας και της Θεσσαλονίκης. Σχεδόν ο μισός από τον πληθυσμό της χώρας ζει σε αυτές τις δύο πόλεις (οι μεγαλύτερες της Ελλάδας). Ο πληθυσμός είναι ο παράγοντας που συνεισφέρει στην παραγωγή αποβλήτων και ασκεί μεγάλη επίδραση στην παραγωγή ΔηΣΑ. Η εμπορική δραστηριότητα και τα απόβλητα των ιδρυμάτων/οργανισμών συμβάλουν στο συνολικό ποσό των αποβλήτων. Επιπλέον, για να καταλάβει κανείς την ελληνική πραγματικότητα, πρέπει να ξέρει ότι ένα μεγάλο μέρος της χώρας αποτελείται από μικρά κατοικημένα νησιά (περισσότερο από 100) και ορεινές περιοχές με χιλιάδες κοινότητες των 200-300 κατοίκων. Ο Παναγιωτακόπουλος (2002) παρουσιάζει μία συσχέτιση μεταξύ του πληθυσμού και της παραγωγής ΔηΣΑ στην Ελλάδα.

Πληθυσμός	Οικιακά Απόβλητα (σε kg)	Εμπορικά και Απόβλητα Ιδρυμάτων (σε kg)	Σύνολο (σε kg)
<2.000	0,5	0,2	0,7
2.000-10.000	0,7	0,2	0,9
10.000-100.000	0,7	0,3	1,0
>100.000	0,8	0,5	1,3

Πίνακας 3-3: Παραγωγή ΔηΣΑ στην Ελλάδα (Παναγιωτακόπουλος 2002)

Ακόμα κι αν η παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων στερεών αποβλήτων έχει αυξηθεί γρήγορα, υπάρχει ακόμα μια διαφοροποίηση μεταξύ του μέσου όρου της ΕΕ και της Ελλάδας. Προς το τέλος της δεκαετίας του '90, η ελληνική μέση παραγωγή αποβλήτων ήταν 27% χαμηλότερη από το ευρωπαϊκό μέσο όρο. Αλλά η πιο μικρή κατανάλωση δεν εξαιλεί ή δεν περιορίζει το πρόβλημα. Αντίθετα, κατά τη διάρκεια της τελευταίας δεκαετίας, το πρόβλημα έχει επιδεινωθεί περισσότερο στην Ελλάδα απ' ό τι στα άλλα μέλη κράτη της ΕΕ. Το εσωτερικό πρόβλημα πιθανότατα οφείλεται στις ανεπαρκείς πρακτικές διαχείρισης των

στερεών αποβλήτων που έχουν εφαρμοστεί μέχρι τώρα. Η αδυναμία διαχείρισης συνδέεται με τις οργανωτικές ανεπάρκειες υποδομής, καθώς επίσης και με τα συνεχώς μεταβαλλόμενα πρότυπα τρόπου ζωής που επιβάλλονται από τη γρήγορη οικονομική ανάπτυξη. Εκτός από την παρατυπία της διαχείρισης των ΔηΣΑ, το ποσοστό του πληθυσμού που εξυπηρετείται από ένα κανονικό σύστημα αποκομιδής έχει αυξηθεί από 70% στη μέση δεκαετία του '90 σε 90% το 2003, ενώ στα πολυάριθμα μικρά νησιά και τα απόμακρα χωριά η αποκομιδή αποβλήτων ήταν κακώς οργανωμένη.

3.7.3. Η παρούσα διαχείριση των ΔηΣΑ

Στην Ελλάδα 91,2% (2002) των ΔηΣΑ συλλέγονται και αποτίθενται σε ΧΥΤΑ (56%), και σε άλλους 1.260 ανοικτούς χώρους απόθεσης αποβλήτων (44%), ενώ το 8,8% ανακυκλώνεται. Ανοικτοί χώροι απόθεσης αποβλήτων χρησιμοποιούνται στα μικρά νησιά και στις απόμακρες ορεινές και νησιωτικές περιοχές με τα ανεπαρκή συστήματα αποκομιδής και διαχείρισης ΔηΣΑ.

Το 98,5% από το οργανικό μέρος των αποβλήτων καταλήγει σε ΧΥΤΑ, ενώ το 1,5% γίνεται λίπασμα (το 2002, 32.000 τόνοι έγιναν λίπασμα) (JMD 50910/2727/2003, Eurostat 2004). Μέχρι το 1994 η διαχείριση των ΔηΣΑ πραγματοποιούνταν σε χιλιάδες χωματερές (περίπου 4.850 καταγράφηκαν επίσημα), 70% των οποίων ήταν ανεξέλεγκτες (αντιστοιχούσαν σε 35% των συνολικών ποσοτήτων αποβλήτων που παράγονταν στους μικρούς δήμους και στα μικρά νησιά). Σήμερα, 23 ΧΥΤΑ λειτουργούν στην Ελλάδα, από τους οποίους οι περισσότεροι μπορούν να ταξινομηθούν ως κανονικοί ΧΥΤΑ που πληρούν όλες τις προδιαγραφές και εξυπηρετούν περίπου 55% του πληθυσμού. Στο μεταξύ, περίπου 10 νέοι ΧΥΤΑ κατασκευάζονται (OECD/Eurostat 2002).

3.8. Γιατί η Ελλάδα χρειάζεται άμεση δράση?

Η Ελλάδα έχει αντιμετωπίσει ήδη την πρόκληση για την αναδημιουργία των υπαρχόντων συστημάτων Διαχείρισης ΔηΣΑ σύμφωνα με τις νέες οδηγίες της ΕΚ. Η υιοθετημένη ιεραρχία οδηγεί σε μια νέα πολιτική έως το 2020. Σύμφωνα με την οδηγία για τους ΧΥΤΑ, οι στόχοι που πρέπει να επιτευχθούν είναι:

- Υψηλά ποσοστά κατάληξης των ΒΔηΣΑ μακριά από τους ΧΥΤΑ.
- Υψηλά ποσοστά ανάκτησης, ειδικότερα ανάκτηση υλικών των ΒΔηΣΑ που δε θα καταλήγουν στους ΧΥΤΑ.

Αναμφισβήτητα, η ύπαρξη επεξεργασίας της λιπασματοποίησης ικανοποιεί όλα τα κριτήρια για μια αποτελεσματική βιολογική επεξεργασία αποβλήτων. Αλλά δεν μπορεί επαρκώς να ανταποκριθεί στην πίεση που ασκείται από την αυξανόμενη παραγωγή αποβλήτων. Αν και η Ελλάδα έχει καθορίσει αυστηρά την ποσότητα βαρέων μετάλλων και τοξικών ουσιών που περιλαμβάνονται στο λίπασμα, η μέθοδος επεξεργασίας λιπασματοποίησης αντιμετωπίζει ακόμα μερικά προβλήματα. Η τρέχουσα κατάσταση στην Ελλάδα μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

- Δεν υπάρχει κανένα σχέδιο διαχωρισμού για το οργανικό μέρος των ΔηΣΑ (με εξαίρεση τα πράσινα απόβλητα). Έτσι, η ποιότητα παραγωγής είναι μάλλον χαμηλή.
- Όλες οι εγκαταστάσεις παράγουν λίπασμα από μικτά ΔηΣΑ, δεδομένου ότι τα ποσοστά χωρισμού στην πηγή είναι χαμηλά.
- Πρότυπα στην ποιότητα λιπάσματος αναφέρονται απλώς στη μικτή λιπασματοποίηση των ΔηΣΑ. (ΥΠεΧωΔΕ 2001).

Επομένως, μια ολοκληρωμένη προσέγγιση στη διαχείριση των ΔηΣΑ μπορεί να ικανοποιήσει τόσο την περιβαλλοντική όσο και την οικονομική βιωσιμότητα. Είναι σαφές ότι καμία ενιαία μέθοδος διάθεσης των αποβλήτων δεν μπορεί να αντιμετωπίσει όλα τα υλικά στα απόβλητα με έναν περιβαλλοντικά βιώσιμο τρόπο. Απαιτείται μια σειρά από διαχειριστικές επιλογές ακόμη και σε ιδανικές συνθήκες. Επίσης, η χρήση των διαφορετικών επιλογών, όπως η λιπασματοποίηση ή η ανάκτηση των υλικών, θα εξαρτηθεί από τη συλλογή και από το σύστημα ταξινόμησης που θα χρησιμοποιηθεί μετέπειτα.

Ως εκ τούτου οποιοδήποτε σύστημα διαχείρισης αποβλήτων περιλαμβάνει πολλές στενά συνδεδεμένες διαδικασίες, οι οποίες λειτουργούν σαν ένα ενιαίο σύνολο. Επομένως, αντί να εστιάζει κανείς και να συγκρίνει μεμονωμένες επιλογές, (π.χ. την «αποτέφρωση» έναντι της «υγειονομικής ταφής» των ΔηΣΑ), μια ολοκληρωμένη προσπάθεια θα ήταν να συνθέσει ένα σύστημα διαχείρισης ΔηΣΑ, το οποίο θα μπορέσει να αντιμετωπίσει ολόκληρη τη ροή των αποβλήτων, και στη συνέχεια, να συγκρίνει την ολική του απόδοση στους περιβαλλοντικούς και οικονομικούς όρους.

Συνοψίζοντας, τα απόβλητα είναι ένα αναπόφευκτο προϊόν της κοινωνίας. Οι διαχειριστικές πρακτικές των ΔηΣΑ αρχικά αναπτύχθηκαν για να αποφευχθούν τα δυσμενή αποτελέσματα στη δημόσια υγεία που προκαλούνταν

από τα αυξανόμενα ποσά της ρήψης των ΔηΣΑ χωρίς την κατάλληλη αποκομιδή ή διάθεση. Η αποτελεσματικότερη διαχείριση των αποβλήτων αυτών είναι τώρα μια ανάγκη, την οποία η κοινωνία πρέπει να καλύψει. Όσον αφορά στα απόβλητα, υπάρχουν δύο θεμελιώδεις απαιτήσεις: λιγότερα απόβλητα και ένα αποτελεσματικό σύστημα για τη διαχείριση τους.

Υπό τις προαναφερθείσες προϋποθέσεις, η συγκεκριμένη διατριβή αποσκοπεί στην επίλυση ενός μέρους του προβλήματος της διαχείρισης των ΔηΣΑ όπως είναι η παραγωγή τους σε μία εξεταζόμενη περιοχή καθώς και η αποκομιδή και μεταφορά των ΔηΣΑ, από τα σημεία παραγωγής τους μέσα στην εξεταζόμενη περιοχή, προς τους διαθέσιμους χώρους μεταφόρτωσης, επεξεργασίας ή απόθεσης.

4

ΧΡΗΣΗ ΓΕΩΓΡΑΦΙΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΩΝ (ΓΣΠ)

4.1. Εισαγωγή

Στη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών, σε πολλές χώρες, διαπιστώθηκε ότι οι ανάγκες για αξιόπιστες και ενημερωμένες πληροφορίες γύρω από τη γη, την κοινωνία και το περιβάλλον δεν μπορούσαν να ικανοποιηθούν με τους παραδοσιακούς τρόπους συλλογής, καταγραφής, ενημέρωσης και επεξεργασίας πληροφοριών. Έτσι, ειδικά από τις αρχές της δεκαετίας του '80, γνώρισαν εξαιρετικά μεγάλη ανάπτυξη τα Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών (ΓΣΠ, στα αγγλικά Geographic Information Systems - GIS).

Υπάρχουν πάρα πολλοί ορισμοί, για το τι είναι ένα ΓΣΠ. Κατά τον Burrough (1983), τα ΓΣΠ αντιπροσωπεύουν ένα ισχυρό σύνολο εργαλείων για τη συλλογή, αποθήκευση, ανάλυση ανά πάσα στιγμή, μετασχηματισμό και απεικόνιση χωρικών στοιχείων του πραγματικού κόσμου.

Ως εκ τούτου, ο παραπάνω ορισμός μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι ένα ΓΣΠ έχει τη δυνατότητα να φέρει σε πέρας τις εξής τρεις ιδιότητες (Κουτσόπουλος 2002):

- Μπορεί να αποθηκεύσει, να διαχειριστεί και να ενσωματώσει ένα μεγάλο όγκο χωρικών στοιχείων
- Αποτελεί το πιο κατάλληλο εργαλείο χωρικής ανάλυσης, εστιαζόμενο ειδικά στη χωρική διάσταση των στοιχείων
- Αποτελεί ένα πολύ αποτελεσματικό μηχανισμό για την επίλυση χωρικών προβλημάτων μέσα από την οργάνωση, διαχείριση και μετασχηματισμό μεγάλου όγκου στοιχείων με τέτοιο τρόπο ώστε η πληροφορία να είναι προσιτή σε όλους.

Βέβαια, στον ορισμό που δίνεται για τα ΓΣΠ δεν μπορεί να αγνοηθεί ο καθοριστικός παράγοντας του ανθρώπινου δυναμικού, που μαζί με τα κατάλληλα υπολογιστικά συστήματα, λογισμικά συστήματα και χωρικά δεδομένα εγγυάται την αποτελεσματικότητα και την αποδοτικότητα του συστήματος.

Με βάση την παραπάνω θεώρηση, με την πάροδο των ετών διατυπώθηκαν, μεταξύ άλλων, και οι παρακάτω ορισμοί για τα ΓΣΠ:

«Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών είναι μια οργανωμένη συλλογή μηχανικών υπολογιστικών μηχανημάτων (hardware), λογισμικών συστημάτων (software), χωρικών δεδομένων και ανθρώπινου δυναμικού με σκοπό τη συλλογή, καταχώρηση, ενημέρωση, διαχείριση, ανάλυση και απόδοση κάθε μορφής πληροφορίας που αφορά στο γεωγραφικό περιβάλλον» (Κουτσόπουλος, 2002).

4.2. Τα μέρη ενός ΓΣΠ

Τα ΓΣΠ έχουν τρία βασικά συστατικά τα οποία βρίσκονται σε συνεχή ισορροπία και αλληλεξάρτηση. Τα τρία αυτά μέρη είναι τα μηχανήματα (hardware), οι αλγόριθμοι (software) και τα διαθέσιμα (resources). Πρέπει να σημειωθεί ότι η καταγεγραμμένη πρόοδος που παρατηρείται κυρίως στα δύο πρώτα συστατικά των ΓΣΠ καθιστά κάθε συζήτηση για συγκεκριμένα υπολογιστικά συστήματα ή λογισμικά χωρίς νόημα.

4.2.1. Μηχανήματα

Τα μηχανικά μέρη ενός ΓΣΠ είναι οι υπολογιστές, τα δίκτυα και οι διάφορες περιφερειακές συσκευές όπως σχεδιαστές, εκτυπωτές, σαρωτές, ψηφιοποιητές κλπ.

4.2.2. Αλγόριθμοι

Αλγόριθμοι υπάρχουν πολλοί και ποικίλοι σε ένα ΓΣΠ, που μπορούν να κατηγοριοποιηθούν, όμως, σε πέντε βασικές ομάδες (Burrough and McDonnell, 1998):

- *Λογισμικό Εισαγωγής και Επαλήθευσης Στοιχείων*: καλύπτει τις ανάγκες μετασχηματισμού των στοιχείων από την αρχική τους μορφή (χάρτες, τηλεσκοπικά προϊόντα κλπ.) σε αναγνωρίσιμη ψηφιακή μορφή.

- *Λογισμικό Αποθήκευσης και Διαχείρισης Στοιχείων*: αναφέρεται στον τρόπο με τον οποίο δομούνται και οργανώνονται τα χωρικά και μη-χωρικά στοιχεία.
- *Λογισμικό Μετασχηματισμού Στοιχείων*: στοχεύει αφενός στο συντονισμό των στοιχείων (απομάκρυνση λαθών, επικαιροποίηση, συμβατικοποίηση, κλπ.) κυρίως όμως, στην ανάλυση τους.
- *Λογισμικό Παρουσίασης*: εστιάζεται στην παρουσίαση στοιχείων και αποτελεσμάτων των αναλυτικών διαδικασιών.
- *Λογισμικό Αναζητήσεων*: βοηθάει το χρήστη να επικοινωνεί με τον Η/Υ αναζητώντας λύσεις μέσα από μία σειρά ερωτήσεων (queries).

Στις πέντε παραπάνω ομάδες λογισμικού (Burrough and McDonnell, 1998) πρέπει να προστεθεί και μια έκτη ομάδα, αναγκαία για την κάλυψη των αναγκών εμπειρικών εφαρμογών οι οποίες ουσιαστικά αναφέρονται σαν *Λογισμικό Ανάλυσης Χώρου*. Συγκεκριμένα, μια ολοκληρωμένη χωρική προσέγγιση, της οποίας αναπόσπαστο τμήμα είναι ένα ΓΣΠ, οφείλει να παρέχει τη δυνατότητα για διαδικασίες ανάλυσης χώρου, που ευτυχώς αργά, αλλά σταθερά, ενσωματώνεται στα καινούρια συστήματα.

4.2.3. Διαθέσιμα

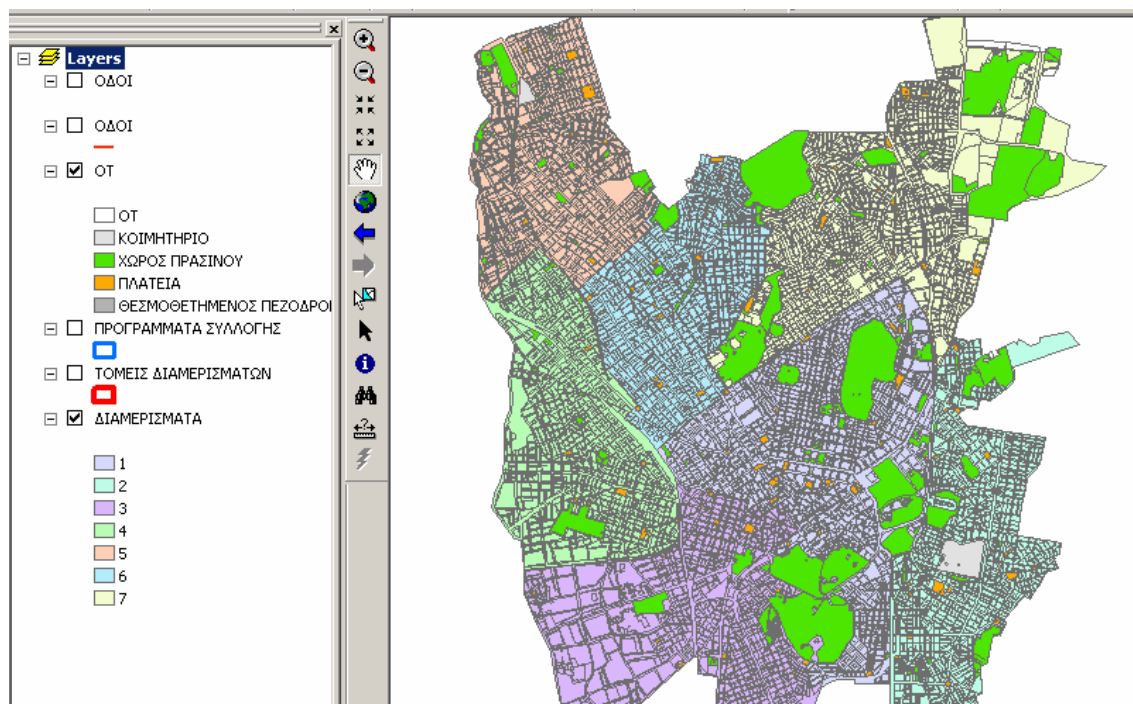
Το σύνολο των λογισμικών ενός ΓΣΠ καθορίζει πώς τα γεωγραφικά στοιχεία μετατρέπονται σε πληροφορία, αλλά σαφώς δεν μπορεί να εγγυηθεί ότι η όλη διαδικασία είναι η πιο κατάλληλη ή η πλέον αποδοτική. Για την επίτευξη των παραπάνω, καθοριστικό ρόλο παίζουν τα διαθέσιμα με τη μορφή των στοιχείων, των ανθρώπων και της οργανωτικής υποδομής. Η αγορά ενός υπολογιστικού συστήματος με το αναγκαίο λογισμικό δεν εξασφαλίζει καμιά επιτυχία σε οποιαδήποτε προσπάθεια αν δεν υπάρχουν τα κατάλληλα στοιχεία, οι εξειδικευμένοι χειριστές και αναλυτές χώρου και βέβαια, ένας οργανισμός που να υποστηρίζει το σύνολο των διαδικασιών που απαιτεί η χρήση ενός ΓΣΠ.

4.3. Βασικές έννοιες των ΓΣΠ

Τα τελευταία 25 χρόνια, τα προβλήματα που σχετίζονται με τη διαχείριση της Γεωγραφικής Πληροφορίας αντιμετωπίζονται σε παγκόσμιο αλλά και σε εθνικό επίπεδο με τη βοήθεια των ΓΣΠ. Παλαιότερα, ο άνθρωπος μελετούσε τον

κόσμο χρησιμοποιώντας μοντέλα όπως οι χάρτες και η υδρόγειος σφαίρα. Με τη ραγδαία, όμως, ανάπτυξη των υπολογιστικών συστημάτων και της βιομηχανίας λογισμικού κατέστη δυνατόν τα μοντέλα αυτά να εξελιχθούν και να εισαχθούν στους υπολογιστές. Τα υπολογιστικά αυτά μοντέλα, σε συνδυασμό με τα εργαλεία ανάλυσής τους, αποτελούν ένα ΓΣΠ.

Σε ένα ΓΣΠ δε μελετάει κανείς μόνο ένα συγκεκριμένο χάρτη, αλλά κάθε πιθανό χάρτη. Με τα κατάλληλα δεδομένα, μπορεί να δει πολύ εύκολα και γρήγορα μπροστά στην οθόνη του υπολογιστή του ότι επιθυμεί και μάλιστα, από οποιοδήποτε μέρος του κόσμου. Από τα πολιτικά όρια, τις πόλεις και την πυκνότητα πληθυσμού της γης, μέχρι τις χρήσεις γης, ενεργειακής κατανάλωσης και εμφανίσεων κοιτασμάτων ενός Μικρού Ελληνικού νησιού. Ο παρακάτω χάρτης απεικονίζει τα όρια του Δήμου Αθηναίων, τα επτά (7) διαμερίσματα στα οποία είναι χωρισμένος, τα οικοδομικά τετράγωνα καθώς και ορισμένες χρήσεις αυτών.

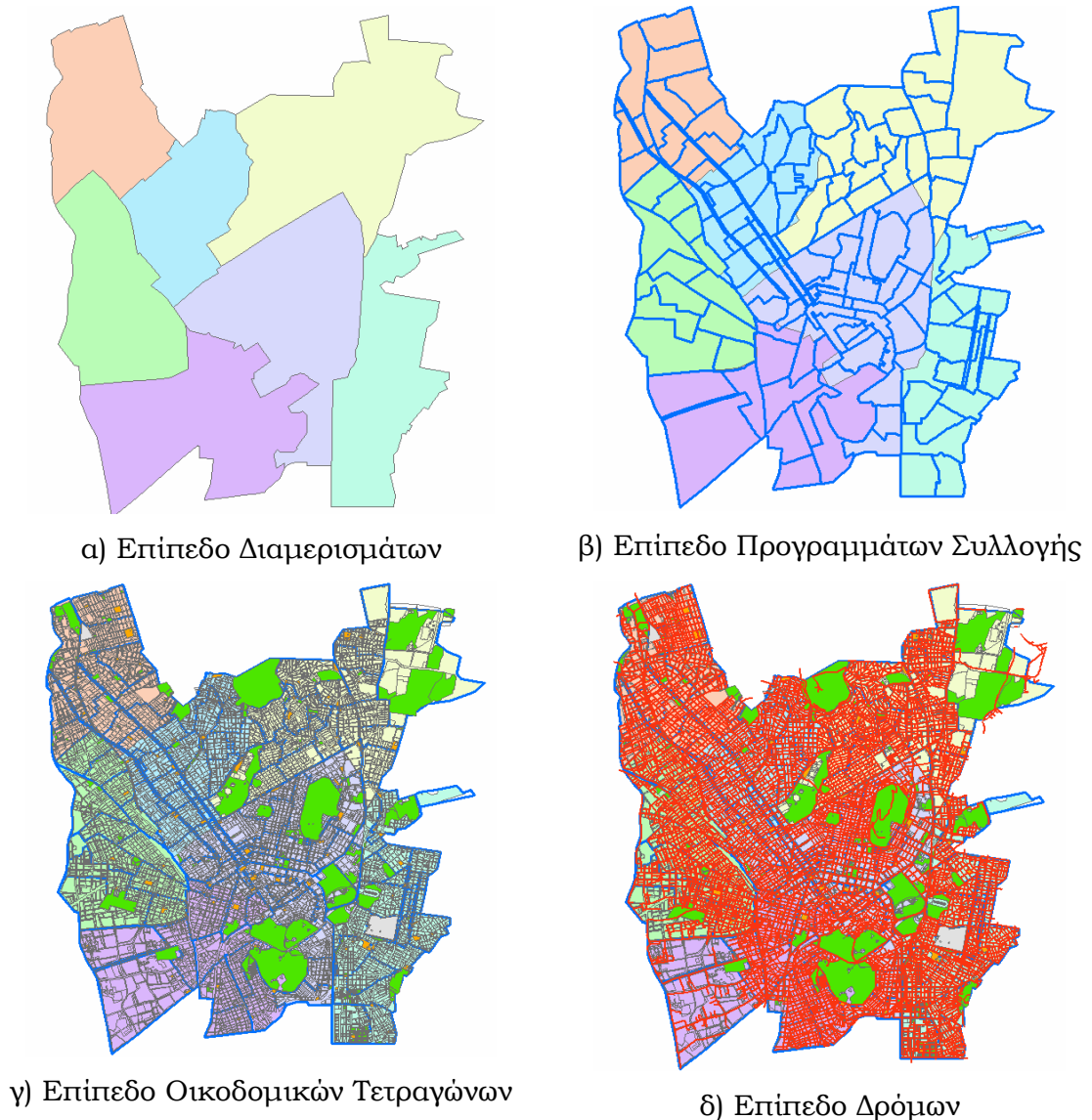


Σχήμα 4-1: Χάρτης από Γεωγραφικό Σύστημα Πληροφοριών.

Παρατηρούμε ότι ο παραπάνω χάρτης έχει ένα πίνακα περιεχομένων στο αριστερό του τμήμα και ένα μεγαλύτερο τμήμα όπου εμφανίζεται ο χάρτης. Παρακάτω, περιγράφονται ορισμένες βασικές έννοιες που θα βοηθήσουν τον αναγνώστη να πάρει μία ιδέα για το τι είναι ένα ΓΣΠ καθώς και για το τι μπορεί να κάνει. Κάθε έννοια συνοδεύεται από ένα ικανό αριθμό χαρτών και σχημάτων για πληρέστερη κατανόηση.

4.3.1. Επίπεδα πληροφορίας (layers)

Σε ένα αναλογικό χάρτη αντίστοιχο του προηγούμενου ψηφιακού χάρτη του Δήμου Αθηναίων δεν υπάρχει καμία απολύτως δυνατότητα να αφαιρεθεί ή να προστεθεί κάποιο επίπεδο πληροφορίας.



Σχήμα 4-2: Διαφορετικά επίπεδα του αρχικού ψηφιακού χάρτη σε ένα ΓΣΠ.

Για παράδειγμα, η αφαίρεση των ονομάτων των οδών από το συγκεκριμένο χάρτη. Για να γίνει αυτό θα πρέπει να δημιουργηθεί από την αρχή ένας καινούργιος χάρτης με όλες αυτές τις χρονοβόρες διαδικασίες. Αντιθέτως, σε ένα ψηφιακό χάρτη οι διαδικασίες αυτές είναι πιο απλές, γιατί αποτελείται από επίπεδα πληροφορίας, ή πιο απλά από μία συλλογή γεωγραφικών χαρακτηριστικών ιδιών μεταξύ τους. Έτσι, προσθέτοντας ή αφαιρώντας ένα ή περισσότερα επίπεδα πληροφορίας μπορεί κανείς να δημιουργήσει πολύ γρήγορα

διάφορες εκδόσεις του ίδιου χάρτη (Κουτσόπουλος, 2002). Στο **Σχήμα 4-2** παρουσιάζονται τέσσερα (4) διαφορετικά επίπεδα ενός ψηφιακού χάρτη. Έτσι, στο **Σχήμα 4-2α**, παρατηρούμε το επίπεδο των επτά (7) διαμερισμάτων, στο οποίο έχει χωρίσει ο Δήμος Αθηναίων την περιοχή του, ενώ στο **Σχήμα 4-2β** απεικονίζονται τα 122 Προγράμματα Συλλογής Απορριμμάτων που διαθέτει ο Δήμος. Επιπλέον, στο **Σχήμα 4-2γ** εμφανίζεται το Επίπεδο των Οικοδομικών Τετραγώνων του Δήμου Αθηναίων, ενώ στο **Σχήμα 4-2δ** απεικονίζεται το Επίπεδο των Δρόμων.

4.3.2. Χαρακτηριστικά (features) – επιφάνειες (surfaces)

Στον παραπάνω χάρτη, το επίπεδο των δρόμων αποτελείται από πολλούς διαφορετικούς δρόμους. Το ίδιο ισχύει και για τα άλλα επίπεδα των οικοδομικών τετραγώνων, προγραμμάτων συλλογής απορριμμάτων, καθώς και των επτά διαμερισμάτων. Κάθε ένα γεωγραφικό αντικείμενο ή οντότητα (δρόμος, οικοδομικό τετράγωνο, κλπ) αποκαλείται χαρακτηριστικό (feature). Ένα επίπεδο, όμως, μπορεί και να μην περιέχει χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, το επίπεδο της θάλασσας (σε κάποιο χάρτη που μπορεί να περιέχει και θαλάσσιες περιοχές) δεν αποτελείται από μία συλλογή γεωγραφικών οντοτήτων (χαρακτηριστικών), αλλά είναι μία μοναδική, συνεχής έκταση, η οποία μπορεί να αλλάζει από τη μία περιοχή στην άλλη ανάλογα με το βάθος του νερού. Η γεωγραφική αυτή έκταση καλείται επιφάνεια. Παρόμοιες επιφάνειες μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τη θερμοκρασία του εδάφους, το υψόμετρο και γενικά για φαινόμενα που μεταβάλλονται συνεχώς στο χώρο (continuous fields). Τα γεωγραφικά αντικείμενα μπορούν να αναπαρασταθούν με έναν ατελείωτο αριθμό σχημάτων, αλλά στην πραγματικότητα αναπαρίστανται με μία από τις παρακάτω τρεις γεωμετρικές μορφές:

- Πολύγωνο
- Γραμμή
- Σημείο

Σαν πολύγωνα αναπαρίστανται όλες οι οντότητες που έχουν όρια, όπως τα επτά (7) διαμερίσματα του δήμου, τα προγράμματα συλλογής απορριμμάτων, τα οικοδομικά τετράγωνα, κλπ. Σαν γραμμές αναπαρίστανται οντότητες πιο λεπτές από πολύγωνα όπως δρόμοι, κοινωφελή δίκτυα, ρήγματα κλπ. Σα σημεία αναπαρίστανται οντότητες, οι οποίες είναι πολύ μικρές να αναπαρασταθούν σαν πολύγωνα όπως πόλεις, υψομετρικά σημεία, θέσεις δειγματοληψίας, θέσεις

πυροσβεστικών κρουνών, κάδοι απορριμμάτων, κλπ. Αν λάβουμε υπόψη το μέγεθος των παραπάνω χαρακτηριστικών, τότε ανάλογα με την κλίμακα μπορεί να έχουμε διαφοροποιήσεις στην αναπαράσταση μίας οντότητας. Δηλαδή, το ίδιο αντικείμενο να αναπαρίσταται σαν πολύγωνο σε ένα επίπεδο και σε μία γραμμή ή σημείο σε ένα άλλο διαφορετικό επίπεδο ανάλογα με την κλίμακα του χάρτη. Για παράδειγμα, μία βιομηχανία που ρυπαίνει το περιβάλλον, αναπαρίσταται σε μία κλίμακα 1:50.000 σα σημείο, και σαν πολύγωνο σε μία κλίμακα 1:5.000. Το ίδιο μπορεί να συμβεί και με τις κοίτες ενός ποταμού κλπ. Γενικά όλα τα χαρακτηριστικά που αναπαρίστανται σαν γραμμές, σημεία ή πολύγωνα καλούνται διανυσματικά δεδομένα (vector data).

Σε αντίθεση με τα χαρακτηριστικά, οι επιφάνειες έχουν μία αριθμητική τιμή αντί για σχήμα. Φαινόμενα που μεταβάλλονται συνεχώς στον χώρο όπως η θερμοκρασία, η βροχόπτωση, οι κλίσεις, τα υψόμετρα δεν έχουν κάποιο σχήμα όπως οι δρόμοι και τα ποτάμια. Εκείνο που έχουν είναι τιμές μετρήσιμες για κάθε τοποθεσία στην επιφάνεια της γης. Τέτοια γεωγραφικά φαινόμενα είναι πιο εύκολο να αναπαρασταθούν σαν επιφάνειες παρά σαν χαρακτηριστικά (features).

Η επιφάνεια είναι ένας πίνακας (raster) από τετραγωνικά κελιά ίσου μεγέθους, με κάθε κελί να αναπαριστά μία μονάδα επιφανείας, για παράδειγμα 1 τετραγωνικό μέτρο. Περιέχει δε μία αριθμητική τιμή του φαινομένου που αναπαριστά για παράδειγμα μία θερμοκρασία 20 βαθμών Κελσίου, ή ένα βάθος 200 μέτρων. Βέβαια, είναι δυνατόν να αναπαραστήσουμε ένα φυσικό φαινόμενο και σα διανυσματική μορφή και σαν ψηφιδωτή. Για παράδειγμα, η παραγωγή των αστικών απορριμμάτων σε μία περιοχή μπορεί να αναπαρασταθεί είτε σαν πολύγωνο είτε σαν ψηφιδωτή μορφή(raster). Η χρησιμοποίηση, όμως, των πολυγώνων μπορεί μεν να αναπαραστήσει το φαινόμενο, αλλά στα όρια των διαφορετικών κλάσεων η αλλαγή από τη μία κλάση στην άλλη γίνεται πιο απότομα από την πραγματικότητα.

4.3.3. Συντεταγμένες χαρακτηριστικών

Η απεικόνιση μίας σημειακής οντότητας σε ένα χάρτη γίνεται με τη χρήση ενός ζεύγους **x, y** συντεταγμένων σε σχέση βέβαια με κάποιο σύστημα αναφοράς. Μία ευθεία γραμμή χρειάζεται προφανώς δύο ζεύγη συντεταγμένων, ένα στην αρχή και ένα στο τέλος της γραμμής. Σε περίπτωση που η γραμμή αλλάζει κατεύθυνση τότε χρειαζόμαστε ένα ζευγάρι συντεταγμένων σε κάθε αλλαγή. Τέλος

ένα πολύγωνο μπορούμε να το θεωρήσουμε σα μία γραμμή με την ίδια αρχή και τέλος.

4.3.4. Κλίμακα χαρακτηριστικών

Η κλίμακα ενός χάρτη εκφράζεται σαν ένα λόγος και είναι η σχέση μεταξύ του μεγέθους των χαρακτηριστικών του χάρτη και του μεγέθους που έχουν τα χαρακτηριστικά στον πραγματικό κόσμο. Μία κλίμακα 1:1.000.000 σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά του χάρτη που απεικονίζονται στην οθόνη είναι 1.000.000 φορές μικρότερα από ότι στην πραγματικότητα.

Σε ένα ψηφιακό χάρτη μπορεί να μεγεθυνθεί ή να σμικρυνθεί κάποιο χαρακτηριστικό. Σε κάθε τέτοια ενέργεια η κλίμακα του χάρτη αλλάζει. Όταν γίνεται εστίαση σε μία περιοχή, τότε τα χαρακτηριστικά της εμφανίζονται από μία κοντινή απόσταση σε μία μικρότερη περιοχή. Η λεπτομέρεια στα χαρακτηριστικά δεν αλλάζει. Η ακτογραμμή, για παράδειγμα, έχει τις ίδιες καμπύλες περιοχές, παρόλο που κάθε φορά όταν γίνεται μεγαλύτερη εστίαση εμφανίζεται πιο ευδιάκριτα στην οθόνη.

4.3.5. Σύνδεση χαρακτηριστικών με πληροφορίες.

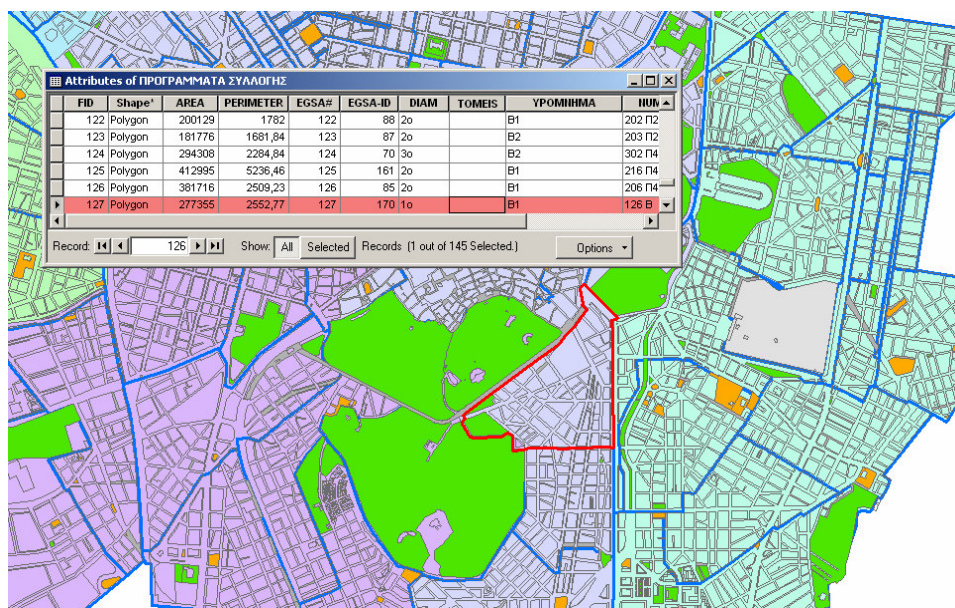
Ένα χαρακτηριστικό (feature) μπορεί να μην έχει μόνο το σχήμα και τη γεωγραφική του τοποθεσία, αλλά και ένα πλήθος άλλων χαρακτηριστικών (attributes), τα οποία δεν έχουν σχέση με τη γεωμετρία του συγκεκριμένου χαρακτηριστικού. Για παράδειγμα, τα περιγραφικά χαρακτηριστικά ενός επιπέδου που περιέχει τα πολύγωνα των προγραμμάτων συλλογής, μπορεί να είναι ο κωδικός του αντίστοιχου προγράμματος, το διαμέρισμα στο οποίο ανήκει το πρόγραμμα αυτό, το εμβαδόν του προγράμματος, κλπ. Όλα τα περιγραφικά χαρακτηριστικά ενός επιπέδου αποθηκεύονται σε ένα πίνακα. Ο πίνακας αυτός έχει μία εγγραφή (γραμμή) για κάθε χαρακτηριστικό και κάθε εγγραφή αποτελείται από πεδία (στήλες) όπου αποθηκεύονται οι πληροφορίες των περιγραφικών χαρακτηριστικών (Κουτσόπουλος, 2002).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα το οποίο κάνει ένα ΓΣΠ να διαφέρει από ένα σύστημα CAD, είναι η σύνδεση των γεωμετρικών χαρακτηριστικών με τα περιγραφικά χαρακτηριστικά.

Attributes of ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΑ ΣΥΛΛΟΓΗΣ									
FID	Shape	AREA	PERIMETER	EGSA#	EGSA-ID	DIAM	TOMEIS	ΥΠΟΜΗΗΜΑ	NUMBERS
2	Polygon	550233	3754,27	2	39 5o			Γ	503 Π4
3	Polygon	450082	2808,37	3	40 5o			Β2	504 Π4
4	Polygon	455884	3020,03	4	41 5o			Γ	505 Π4
5	Polygon	88238,5	5887,85	5	176 6o			Β1	6500 Π2
6	Polygon	22166	667,076	6	0 5o			Γ	502 Π4
7	Polygon	277962	2540,38	7	42 5o			Β2	507 Π4
8	Polygon	212461	2180,52	8	45 5o			Γ	502 Π4
9	Polygon	81597,4	5396,41	9	175 6o			Β1	6500 Π2
10	Polygon	212291	2352,69	10	44 5o			Γ	508 Π4
11	Polygon	406424	2709,96	11	43 5o			Γ	506 Π4
12	Polygon	94212,3	1445,55	12	174 5o			Γ	502 Π4
13	Polygon	242197	2185,91	13	46 5o			Β2	501 Π4
14	Polygon	202293	2095,42	14	47 5o			Γ	509 Π4
15	Polygon	25891	1071	15	0 5o			Β2	501 Π4
16	Polygon	386022	2956,93	16	48 5o			Γ	512 Π4
17	Polygon	350976	2528,02	17	51 4o			Β2	412 Π4
18	Polygon	533123	4486,87	18	56 4o			Β2	410 Π4
19	Polygon	184066	1892,14	19	50 5o			Γ	510 Π4
20	Polygon	194861	2177,43	20	49 5o			Γ	511 Π4

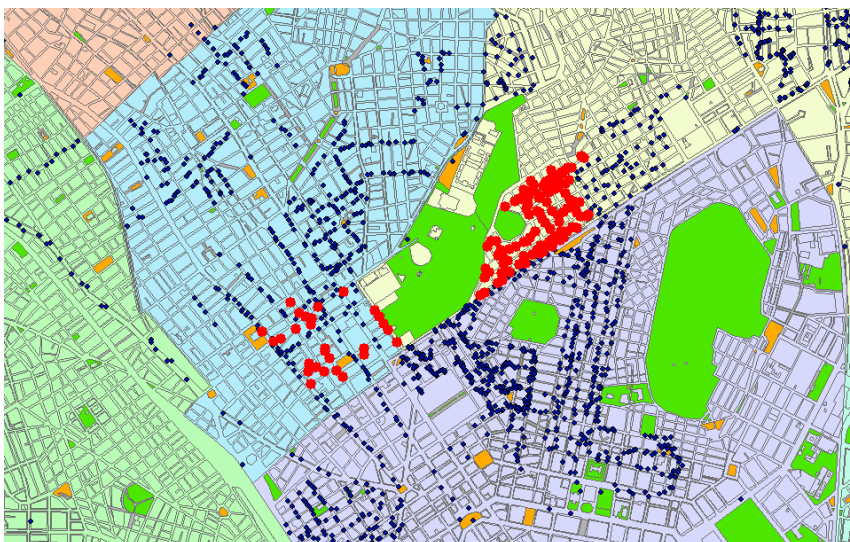
Πίνακας 4-1: Περιγραφικά χαρακτηριστικά ενός επιπέδου.

Επομένως, εάν επιλεγεί ένα πρόγραμμα συλλογής από το χάρτη που απεικονίζεται στο **Σχήμα 4-3**, τότε εμφανίζεται μπροστά στο χρήστη όλη η πληροφορία, η οποία αποθηκεύεται στον πίνακα των περιγραφικών χαρακτηριστικών. Ομοίως, εάν ο χρήστης διαλέξει μία εγγραφή από τον πίνακα τότε εμφανίζεται επιλεγμένο το αντίστοιχο χαρακτηριστικό στον αντίστοιχο χάρτη.

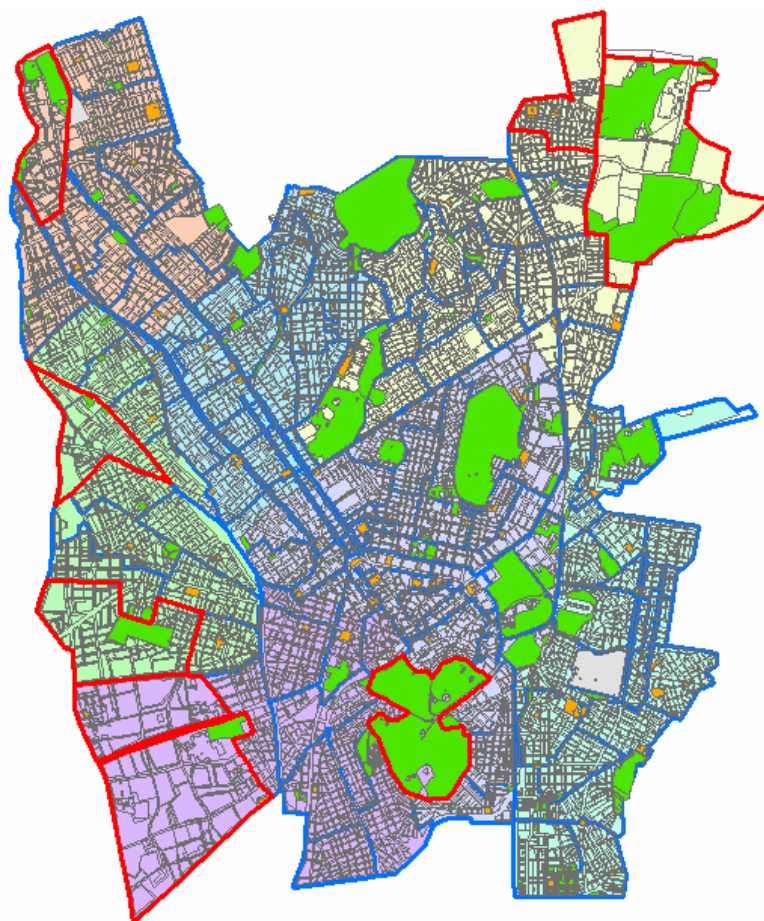


Σχήμα 4-3: Ένα από 122 Προγράμματα συλλογής απορριμμάτων του Δήμου Αθηναίων.

Αυτή η ζωντανή σύνδεση των γεωμετρικών και των περιγραφικών δεδομένων δίνει τη δυνατότητα στο χρήστη να κάνει ερωτήσεις στα περιγραφικά δεδομένα και να εμφανίσει τις απαντήσεις στην οθόνη. Έτσι, παρακάτω βλέπουμε κάποιες ερωτήσεις με τα αντίστοιχα αποτελέσματα στην οθόνη του υπολογιστή.



Σχήμα 4-4: Κάδοι απορριμμάτων που συλλέχτηκαν από το απορριμματοφόρο Νο.822 του Δήμου Αθηναίων στις 03.01.2004.



Σχήμα 4-5: Προγράμματα συλλογής απορριμμάτων που καταλαμβάνουν εμβαδόν άνω των 0,5 Km².

Αρχικά, στο **Σχήμα 4-4** εμφανίζονται με κόκκινο χρώμα οι κάδοι, οι οποίοι έχουν συλλεχθεί στις 3 Ιανουαρίου 2004 από το απορριμματοφόρο Νο.822 του δήμου Αθηναίων. Επίσης, στο **Σχήμα 4-5** εμφανίζονται, με κόκκινο χρώμα, μόνο εκείνα τα προγράμματα συλλογής απορριμμάτων του δήμου Αθηναίων τα οποία καταλαμβάνουν εμβαδόν άνω των 0,5 Km².

Τέλος, από τα περιγραφικά χαρακτηριστικά μπορεί κανείς να δημιουργήσει θεματικούς χάρτες με διαφορετικά χρώματα και σύμβολα ανάλογα με την τιμή ενός περιγραφικού χαρακτηριστικού.

4.3.6. Χωρικές συνδέσεις χαρακτηριστικών

Εκτός από τις ερωτήσεις που μπορεί να εκτελέσει κανείς στον πίνακα των περιγραφικών χαρακτηριστικών μπορεί, επίσης, να κάνει ερωτήσεις για τις χωρικές σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών. Δηλαδή, ποιο χαρακτηριστικό είναι κοντύτερα σε ένα άλλο, πιο χαρακτηριστικό τέμνει ένα άλλο, ή ποιο χαρακτηριστικό περιέχει άλλα χαρακτηριστικά. Μερικά παραδείγματα μπορεί να είναι:

- Ποια προγράμματα συλλογής περιέχει το 1^ο διαμέρισμα του δήμου Αθηναίων.
- Ποιους τομείς διαμερισμάτων τέμνει η οδός Αχαρνών.
- Ποια σημεία συγκέντρωσης απορριμμάτων έχουν περισσότερους από δύο κάδους.

4.3.7. Δημιουργία νέων χαρακτηριστικών από επικαλυπτόμενες περιοχές

Οι ερωτήσεις σχετικά με τα περιγραφικά χαρακτηριστικά ή τις χωρικές σχέσεις των χαρακτηριστικών προσδιορίζουν κάποια υπάρχοντα από εκείνα τα οποία πληρούν ορισμένα κριτήρια. Υπάρχουν, όμως, εφαρμογές, οι οποίες απαιτούν τη δημιουργία νέων χαρακτηριστικών που προέκυψαν από το συνδυασμό επιπέδων ήδη υπάρχοντων χαρακτηριστικών. Έτσι, στους παραπάνω χάρτες, που απεικονίζεται η περιοχή του δήμου Αθηναίων, μπορεί κανείς να θέσει ένα ερώτημα για την εύρεση κατάλληλων σημείων για την πιθανή εγκατάσταση ενός χώρου μεταφόρτωσης των απορριμμάτων σε μεγάλα φορτηγά και για την μεταφορά αυτών στους αντίστοιχους Χώρους Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ). Το ερώτημα αυτό μπορεί να υλοποιηθεί μετά από μία

σειρά κριτηρίων που έχουν καθοριστεί. Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται διάφορα ενδιάμεσα επίπεδα πληροφορίας (ζώνες αποκλεισμού – «φίλτρα»), τα οποία αν συνδυαστούν μεταξύ τους με επικάλυψη (overlay) προκύπτει ένα επιπλέον επίπεδο, αυτό των προτεινόμενων χώρων για τη δημιουργία πιθανών χώρων μεταφόρτωσης των απορριμμάτων από τα απορριμματοφόρα που επιχειρούν σε μια καθορισμένη ακτίνα γύρω από την συγκεκριμένη περιοχή.

4.4. Γεωγραφικές βάσεις δεδομένων

Όλα τα μεγάλα λειτουργικά περιβάλλοντα ΓΣΠ έχουν κτισθεί πάνω στα θεμέλια μίας Γεωγραφικής Βάσης Δεδομένων. Η βάση δεδομένων είναι αναμφισβήτητα ένα από τα πλέον σημαντικά μέρη ενός ΓΣΠ, αφενός μεν λόγω του μεγάλου κόστους δημιουργίας και συντήρησής της, αφετέρου δε γιατί αποτελεί τη βάση για όλες τις αναλύσεις που γίνονται με σκοπό τη λήψη κάποιας απόφασης. Σήμερα, όλα τα υπό ανάπτυξη ΓΣΠ, αποθηκεύουν τα δεδομένα σε ένα Σύστημα Διαχείρισης Βάσεων Δεδομένων (ΣΔΒΔ, στα αγγλικά Database Management System - DBMS), το οποίο είναι ένα λογισμικό κατάλληλο για την υποστήριξη πολλών ταυτόχρονων χρηστών, σε ένα ολοκληρωμένο σύνολο Γεωγραφικών Δεδομένων. Οι γεωγραφικές βάσεις δεδομένων πρέπει να σχεδιάζονται με πολύ μεγάλη προσοχή, έτσι ώστε να δίνουν τη δυνατότητα γρήγορων και σωστών αναζητήσεων, αλλά και συναλλαγών.

Μία Βάση Δεδομένων, θεωρείται ένα ολοκληρωμένο σύνολο δεδομένων σχετικών με ένα ειδικό θέμα. Μία γεωγραφική βάση δεδομένων, η οποία σε πολλές περιπτώσεις καλείται και χωρική, είναι απλά μια Βάση Δεδομένων που περιέχει γεωγραφικά δεδομένα για μία ειδική περιοχή και θέμα. Ένα τέτοιο παράδειγμα χωρικής βάσης δεδομένων αποτελεί, αναμφισβήτητα, ο έντυπος αναλογικός χάρτης. Πάνω στο χάρτη υπάρχουν γεωγραφικά δεδομένα όπως δρόμοι, ποτάμια, διοικητικά όρια κλπ, τα οποία αφενός μεν έχουν συντεταγμένες σε κάποιο σύστημα αναφοράς, αφετέρου δε διαθέτουν κάποια γνωρίσματα όπως περιγραφικά ονόματα, είδος, κ.α. Τα γεωγραφικά αυτά δεδομένα, συνδέονται μεταξύ τους είτε βάσει της γεωμετρικής τους θέσης (γραμμή να τέμνει πολύγωνο, σημεία εντός πολυγώνου κλπ), το οποίο καλείται και χωρική σύνδεση (spatial join), είτε βάσει κάποιου κοινού πεδίου των χαρακτηριστικών γνωρισμάτων (κωδικός δρόμου, οικοπέδου, ΟΤΑ κλπ), που καλείται απλώς σύνδεση (join).

4.4.1. Συστήματα διαχείρισης βάσεων δεδομένων

Εφαρμογές που απαιτούν μικρές και απλές βάσεις δεδομένων, με δυνατότητα πρόσβασης λίγων χρηστών σε αυτές, μπορεί να αποθηκευτούν σε ένα υπολογιστή, με τη μορφή απλών δομών βάσεων δεδομένων ή αρχείων, όπως Microsoft Access, Dbase αρχείων κλπ.

Όταν, όμως, απαιτείται η ταυτόχρονη χρήση της βάσης δεδομένων από δεκάδες ή εκατοντάδες χρήστες, τότε, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί για την ανάπτυξη τέτοιων συστημάτων ένα ειδικό ΣΔΒΔ το οποίο θα εξασφαλίζει τη συνεκτικότητα και την ακεραιότητα των δεδομένων.

Ένα, λοιπόν, ΣΔΒΔ είναι μία εφαρμογή λογισμικού, κατάλληλα σχεδιασμένη στο να οργανώνει, να δημιουργεί και να χειρίζεται δεδομένα με παραγωγικό και αποτελεσματικό τρόπο. Τα ΣΔΒΔ μπορεί να κατηγοριοποιηθούν βάσει του τρόπου με τον οποίο αποθηκεύουν και διαχειρίζονται τα δεδομένα. Τρία είναι τα κύρια ΣΔΒΔ που χρησιμοποιούνται σε ένα ΓΣΠ. Τα Σχεσιακά ΣΔΒΔ (ΣΣΔΒΔ, στα αγγλικά Relational DataBase Management Systems – RDBMS), τα αμιγώς Αντικειμενοστραφή ΣΔΒΔ (ΑΣΔΒΔ, στα αγγλικά Object DataBase Management Systems – ODBMS) και τα Σχεσιακά με Αντικειμενοστραφή υποστήριξη ΣΔΒΔ (ΑΣΣΔΒΔ, στα αγγλικά Object Relational DataBase Management Systems - ORDBMS).

Το ΣΣΔΒΔ είναι το σύστημα που χρησιμοποιήθηκε στο πρόβλημά μας, καθόσον τα αρχεία που μας διέθεσε ο Δήμος ήταν σε μορφή Access. Αποτελείται δε από ένα σύνολο πινάκων με δεδομένα, συνδεδεμένων μεταξύ τους με κάποιο κοινό πεδίο (στήλη). Το 90% περίπου των αποθηκευμένων δεδομένων στα ΣΔΒΔ χρησιμοποιούν το σχεσιακό μοντέλο. Παραδείγματα τέτοιων λογισμικών είναι Microsoft Access και Microsoft SQL Server, Oracle, Informix και IBM DB2.

Τα ΑΣΔΒΔ έχουν σχεδιασθεί για να αντιμετωπίσουν τις αδυναμίες των Σχεσιακών Συστημάτων. Έτσι, μπορούν να αποθηκεύσουν αντικείμενα απευθείας στη Βάση Δεδομένων. Μπορούμε, δηλαδή, να έχουμε πολύ καλύτερη αναπαράσταση του πραγματικού κόσμου στα Υπολογιστικά Συστήματα, κάτι που είναι η βασική αδυναμία των σχεσιακών ΣΔΒΔ, αφού έχουν σχεδιασθεί για την υποστήριξη εμπορικών εφαρμογών, όπως τραπεζικά συστήματα, διαχείρισης προσωπικού, οικονομικών εφαρμογών κλπ.

Τα ΑΣΣΔΒΔ είναι σχεσιακά με την υποστήριξη των αντικειμένων (object), σαν ένας νέος τύπος δεδομένων. Έτσι, καλύπτονται επιτυχώς και μη παραδοσιακές εφαρμογές, όπως οι εφαρμογές των ΓΣΠ και πολυμέσων. Το

βασικό χαρακτηριστικό των συστημάτων αυτών είναι ότι εισάγουν την έννοια του αντικειμένου και προσφέρουν στον χρήστη τη δυνατότητα δημιουργίας νέου αντικειμένου (object).

4.4.2. Αποθήκευση δεδομένων σε πίνακες ΣΔΒΔ

Το χαμηλότερο επίπεδο της αλληλεπίδρασης του χρήστη με μία γεωγραφική βάση είναι μία συλλογή από ομοειδή αντικείμενα (κλάση αντικειμένων), το οποίο συνήθως καλείται και επίπεδο πληροφορίας (layer). Για παράδειγμα, τα γεωτεμάχια ή οι γεωλογικοί σχηματισμοί μίας περιοχής. Η κλάση των αντικειμένων αυτών (layer) αποθηκεύεται σε ένα πίνακα δύο διαστάσεων μέσα στη Βάση Δεδομένων. Ο πίνακας αυτός αποτελείται από γραμμές και στήλες. Κάθε γραμμή περιέχει ένα αντικείμενο (ένα σχηματισμό ή ένα οικόπεδο) και κάθε στήλη περιέχει μία ιδιότητα του αντικειμένου, ή όπως καλείται πιο συχνά, ένα περιγραφικό χαρακτηριστικό (attribute). Τα δεδομένα που αποθηκεύονται σε μία τομή της στήλης, με μία γραμμή, καλούνται και τιμές (values). Οι πίνακες γεωγραφικών δεδομένων διαφέρουν από τους μη γεωγραφικούς πίνακες, λόγω της παρουσίας μίας επιπλέον στήλης στην οποία αποθηκεύεται η γεωμετρία του αντικειμένου και καλείται συχνά, στήλη σχήματος (shape column). Για να εξοικονομηθεί χώρος και να βελτιωθεί η απόδοση, οι πραγματικές τιμές των συντεταγμένων αποθηκεύονται σε μία συμπιεσμένη δυαδική μορφή, μη αναγνωρίσιμων από το ανθρώπινο μάτι.

Οι πίνακες μπορούν να συνδεθούν μεταξύ τους με τη χρησιμοποίηση ενός κοινού πεδίου (τιμή γραμμής/στήλης). Επομένως, σε αυτήν την περίπτωση μπορεί να συνδεθούν δύο πίνακες μέσω του κοινού χαρακτηριστικού και να δημιουργηθεί ένας ενιαίος πίνακας ο οποίος θα περιέχει στοιχεία και από τους δύο πίνακες.

4.4.3. Γλώσσα SQL (Structured Query Language)

Η Γλώσσα αυτή είναι η δημοφιλέστερη γλώσσα των Συστημάτων Σχεσιακών Βάσεων Δεδομένων. Βασίζεται στη σχεσιακή άλγεβρα και είναι μία δηλωτική γλώσσα, δηλαδή ο χρήστης περιγράφει απλά το τι θέλει, χωρίς να τον ενδιαφέρει ο τρόπος με τον οποίο θα ανακτηθεί από την Βάση Δεδομένων. Το πώς θα ανακτηθεί η αναζήτηση που έθεσε ο χρήστης είναι δουλειά του Συστήματος και μάλιστα του βελτιστοποιητή ερωτημάτων.

Στην SQL, οι εντολές ορισμού δεδομένων (Data Definition Language - DDL) χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία, τροποποίηση και διαγραφή των σχεσιακών δομών της βάσης, καθώς και των ευρετηρίων πάνω στα γνωρίσματα των σχέσεων.

Οι εντολές αυτές είναι:

CREATE TABLE Δημιουργεί ένα πίνακα (σχέση)

CREATE INDEX Δημιουργεί ένα ευρετήριο

CREATE VIEW Δημιουργεί μία όψη ενός πίνακα με συνθήκες

DROP TABLE Διαγράφει ένα πίνακα (σχέση)

DROP INDEX Διαγράφει ένα ευρετήριο

DROP VIEW Διαγράφει μία όψη ενός πίνακα

MODIFY Τροποποιεί τη δομή των αντικειμένων της βάσης

(Πίνακα, ευρετήριο, όψη)

Τα ΣΔΒΔ είναι πλέον ένα αναπόσπαστο κομμάτι όλων των μοντέρνων λογισμικών ΓΣΠ. Τα λογισμικά ΓΣΠ παρέχουν όλα τα απαραίτητα εργαλεία για τη δημιουργία, φόρτωμα, διόρθωση, αναζήτηση, ανάλυση και εμφάνιση γεωγραφικών δεδομένων.

Λόγω της πολυπλοκότητας της γεωγραφικής βάσης δεδομένων, είναι απαραίτητη η ύπαρξη ενός διαχειριστή βάσεων δεδομένων (Database Administrator) για τον έλεγχο της δομής και της ασφάλειας της βάσης, αλλά και για τη ρύθμιση της, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή απόδοση.

4.5. Γεωβάση

Η τεχνολογία που χρησιμοποιεί η γεωβάση είναι η τεχνολογία των σχεσιακών βάσεων με την υποστήριξη αντικειμενοστραφών αντικειμένων. Η γεωβάση συνεργάζεται με μία γκάμα διαφόρων Συστημάτων Διαχείρισης Δεδομένων, σε διάφορα μεγέθη και διαφορετικούς αριθμούς χρηστών. Έχει αρχιτεκτονική δύο μορφών.

- Η προσωπική βάση (personal geodatabase), η οποία είναι κατάλληλη και προσαρμοσμένη σε επίπεδο έργου. Έχει ενσωματωμένη την υποστήριξη της δομής της Microsoft Access και δίδεται δωρεάν μαζί με το λογισμικό.
- Η πολλαπλών χρηστών η οποία απαιτεί την ύπαρξη της επέκτασης ArcSDE, και συνεργάζεται με όλα σχεδόν τα λογισμικά DBMS, δηλαδή, Oracle, IBM DB2, Informix, MS SQL Server.

Προφανώς, υπάρχουν ορισμένοι περιορισμοί στην προσωπική γεωβάση και το μέγεθος της δεν μπορεί να ξεπερνάει τα 2GB. Η MS Access χρησιμοποιείται για τη διαχείριση των πινάκων και μπορούν να έχουν ταυτόχρονη πρόσβαση σε αυτή πολλοί χρήστες, μόνο για αναζήτηση και αναλυτική διαδικασία. Η ταυτόχρονη διόρθωση της βάσης από πολλούς χρήστες απαγορεύεται. Μόνο ένας μπορεί να διορθώνει. Επίσης, δεν υποστηρίζεται η διαδικασία των εκδόσεων.

4.5.1. Αποθήκευση γεωβάσης σε σχεσιακά DBMS

Η αποθήκευση στη γεωβάση περιλαμβάνει αφενός μεν το σχήμα και τους κανόνες κάθε σει δεδομένων, αφετέρου δε την απλή πινακοποιημένη αποθήκευση χωρικών και μη χωρικών δεδομένων.

Το σχήμα της γεωβάσης περιλαμβάνει τους ορισμούς, κανόνες συνεκτικότητας και τη συμπεριφορά κάθε γεωγραφικού σει δεδομένων. Δηλαδή, ιδιότητες για τις κλάσεις αντικειμένων, τοπολογία, δίκτυα, καταλόγους ψηφιδωτών αρχείων, σχέσεις, πίνακες ορισμού τιμών κλπ. Το σχήμα παραμένει σταθερό σε μία συλλογή μεταπινάκων στο λογισμικό ΣΔΒΔ, και ορίζει τη συμπεριφορά και τη συνεκτικότητα της γεωγραφικής πληροφορίας.

Οι χωρικές αναπαραστάσεις, αποθηκεύονται είτε σαν διανυσματικά αντικείμενα, είτε σαν σει ψηφιδωτών δεδομένων μαζί με τα παραδοσιακά περιγραφικά χαρακτηριστικά (μη χωρικά δεδομένα). Για παράδειγμα, σε ένα πίνακα αποθηκεύεται μία συλλογή αντικειμένων (κλάση) και κάθε σειρά του πίνακα αναπαριστά ένα αντικείμενο. Υπάρχει μία στήλη του πίνακα στην οποία αποθηκεύεται η γεωμετρία ή το σχήμα του αντικειμένου. Η στήλη που κρατάει το σχήμα είναι μία από τα δύο είδη στηλών:

- Ένα BLOB τύπου στήλη (**B**inary **L**arge **O**bject)
- Μία χωρικού τύπου στήλη, εάν το ΣΔΒΔ την υποστηρίζει

Μία ομοιογενής συλλογή κοινών αντικειμένων, κάθε ένα από τα οποία έχει την ίδια χωρική αναπαράσταση (γραμμή, σημείο, πολύγωνο) και ένα κοινό σει περιγραφικών χαρακτηριστικών αναφέρεται ως κλάση αντικειμένων (feature class) και διαχειρίζεται από έναν πίνακα.

Τα ψηφιδωτά δεδομένα και οι εικόνες διαχειρίζονται και αποθηκεύονται σε σχεσιακούς πίνακες. Τα ψηφιδωτά απαιτούν πολύ μεγάλο αποθηκευτικό χώρο και ένα συμπληρωματικό πίνακα για αποθήκευση. Το ψηφιδωτό κόβεται σε

μικρότερα κομμάτια, τα οποία καλούνται blocks, και αποθηκεύονται σε ξεχωριστές γραμμές σε έναν ξεχωριστό πίνακα.

4.6. Γεώ-κωδικοποίηση και ΓΣΠ

Ο άνθρωπος, είναι ικανός να κατανοήσει τα γεωγραφικά δεδομένα και πώς συνδέονται με συγκεκριμένες θέσεις πάνω στη γήινη επιφάνεια. Δε συμβαίνει όμως το ίδιο με τον Η/Υ, στον οποίο πρέπει να δοθεί η ακριβής γεωμετρική αναπαράσταση, ώστε να είναι σε θέση να εμφανίσει τις θέσεις αυτές σε ένα χάρτη.

Η γεώ-κωδικοποίηση είναι η διαδικασία του προσδιορισμού μίας τοποθεσίας, συνήθως με την μορφή Χ, Υ συντεταγμένων, από μία ταχυδρομική διεύθυνση, συγκρίνοντας τα περιγραφικά στοιχεία που περιέχονται μέσα στην διεύθυνση με εκείνα που περιέχονται σε ένα υλικό αναφοράς. Το υλικό αναφοράς συνήθως είναι ένα γεωγραφικό επίπεδο δρόμων, κατάλληλα διαμορφωμένο, έτσι ώστε να μπορεί να γίνει αντιστοίχιση και εντοπισμός των διευθύνσεων από τα στοιχεία που αυτές αποτελούνται.

Με λίγα λόγια, μπορούμε να πούμε ότι η χαρτογράφηση ή η διαδικασία δημιουργίας χαρτογραφικών στοιχείων με βάση πληροφορίες που περιγράφουν θέσεις στο χώρο, όπως είναι οι ταχυδρομικές διευθύνσεις, αποτελούν τη διαδικασία της γεώ-κωδικοποίησης (geocoding).

Βέβαια, οι διευθύνσεις από χώρα σε χώρα διαφέρουν και μπορεί εκτός των τυπικών στοιχείων που περιέχουν, δηλαδή, του ονόματος οδού και αριθμού, να περιέχουν επιπλέον στοιχεία όπως ταχυδρομικό τομέα, στατιστικό τετράγωνο κλπ. Στην ουσία, μία διεύθυνση περιλαμβάνει κάθε τύπο πληροφορίας ο οποίος ξεχωρίζει μία τοποθεσία.

4.6.1. Βασικές αρχές κωδικοποίησης

Υπάρχει ένας αριθμός βασικών αρχών που διευκολύνουν την εμπειρία της γεώ-κωδικοποίησης.

Τι είναι διεύθυνση: Μία διεύθυνση είναι απλά ένας τρόπος για να περιγραφεί μία τοποθεσία. Αντίθετα από μία τιμή συντεταγμένης, μία διεύθυνση περιγράφει πώς να αναφερόμαστε σε μία τοποθεσία που βασίζεται σε υπάρχοντα χαρακτηριστικά της γεωγραφικής βάσης δεδομένων. Στις περισσότερες περιπτώσεις, αυτή η περιγραφή είναι σχετικά εύκολο για να το αντιληφθεί κάποιος. Για παράδειγμα, εάν χρειασθεί να εντοπιστεί η διεύθυνση «Μεσογείων

70, 11527 Αθήνα» στα σωστά δεδομένα των δρόμων, δε θα πάρει μεγάλο χρονικό διάστημα για να βρεθεί η ακριβής τοποθεσία. Θα βρεθεί πρώτα η Αθήνα, εν συνεχεία ο ταχυδρομικός τομέας και μετά θα εντοπιστεί η οδός. Κατόπιν, θα βρεθεί αναλογικά που πέφτει το νούμερο 70. Όπως ακριβώς με διαδοχικούς περιορισμούς στα δεδομένα μας καταλήγουμε σε ένα σημείο, το ίδιο θα κάνει και ο υπολογιστής.

Στοιχεία διευθύνσεων: Οι διευθύνσεις έχουν ορισμένα ειδικά χαρακτηριστικά. Μία διεύθυνση περιέχει ορισμένα στοιχεία και απαντάται σε διάφορες μορφές. Όταν γίνεται γεώ-κωδικοποίηση, η μορφή της διεύθυνσης μεταφράζεται, προσδιορίζονται τα στοιχεία από τα οποία αποτελείται και αυτά τα στοιχεία αντιστοιχίζονται με τα στοιχεία των δεδομένων αναφοράς. Ένα στοιχείο διεύθυνσης είναι ξεχωριστό στοιχείο στη διεύθυνση, όπως το όνομα της οδού, ο αριθμός της οικίας και ο ταχυδρομικός τομέας. Τα στοιχεία της διεύθυνσης βοηθούν στο ψάξιμο της γεώ-κωδικοποίησης, σημειώνοντας ακριβώς μία διεύθυνση σε μία ειδική τοποθεσία.

Μορφή διευθύνσεων: Οι διευθύνσεις αναπαρίστανται με μία μεγάλη ποικιλία μορφών, κυρίως στις ΗΠΑ. Μία κοινή μορφή συνίσταται από την παρακάτω σειρά στοιχείων αριθμός οικίας, όνομα οδού, τύπος οδού και πληροφορίες ζώνης όπως πόλη, πολιτεία και κωδικός ZIP 305 W 100 S, Salt Lake City, UT 84119.

Αντίθετα, στην Ευρώπη και ειδικότερα στην Ελλάδα, μία τυπική διεύθυνση είναι της μορφής: «Μεσογείων 70, 11527 Αθήνα».

Για να υπάρχει ταύτιση με κάποιες μορφές διευθύνσεων στις ΗΠΑ, θα πρέπει να γίνει κάποια μικρή αλλαγή στην σειρά των στοιχείων μίας διεύθυνσης, δηλαδή, θα πρέπει η παραπάνω διεύθυνση να είναι της μορφής «70 Μεσογείων, 11527 Αθήνα»

Ενώ όλες αυτές οι μορφές διευθύνσεων διαφέρουν σε κάποιον βαθμό, ορισμένα στοιχεία παραμένουν σταθερά. Κάθε διεύθυνση αποτελείται από διάφορα στοιχεία, τα οποία παρουσιάζονται με διαφορετική σειρά σε κάθε μορφή διεύθυνσης.

4.6.2. Η διαδικασία της γεώ-κωδικοποίησης

Αφού δημιουργηθεί ο δείκτης διευθύνσεων ο οποίος είναι ο συνδυασμός τοποθεσιών – συγκεκριμένων δεδομένων αναφοράς και ορισμένου τύπου οδηγών που βασίζονται σε ένα επιλεγμένο στυλ δείκτη διευθύνσεων, μπορεί να αρχίσει η

γεώ-κωδικοποίηση των διευθύνσεων. Η διαδικασία σε συντομία είναι η παρακάτω:

Ανάλυση Διευθύνσεων (address parsed): Όταν ένας δείκτης διευθύνσεων τυποποιεί μία διεύθυνση, τη διαλύει σε στοιχεία διευθύνσεων ανάλογα με το στυλ του δείκτη διευθύνσεων.

Τυποποίηση συντμήσεων (abbreviations standardized): Πολλά στοιχεία μίας διεύθυνσης όπως η κατεύθυνση ή ο τύπος του δρόμου γράφονται με συντμήσεις. Οι συντμήσεις αυτές μπορεί να είναι της μορφής «Οδός» ή «Οδ».

Εκχώρηση στοιχείων διευθύνσεων σε κλειδιά ταιριάσματος: Κάθε στοιχείο της διεύθυνσης που αναζητείται, εκχωρείται σε μία ειδική κατηγορία που αναφέρεται ως κλειδί ταιριάσματος. Αυτά τα κλειδιά ταιριάσματος χρησιμοποιούνται για να συγκρίνουν τα δεδομένα των διευθύνσεων με τα αντίστοιχα στοιχεία των δεδομένων αναφοράς.

Υπολογισμός τιμών ευρετηρίων: Όταν ψάχνουμε μία διεύθυνση, μερικά στοιχεία της Διεύθυνσης καταχωρούνται σε ευρετήρια έτσι ώστε να ταιριάζουν με αυτά που έχουν δημιουργηθεί στο ευρετήριο γεώ-κωδικοποίησης. Για παράδειγμα, το όνομα της διεύθυνσης εκχωρείται σε μία τιμή η οποία βασίζεται στην ίδια αλφαριθμητική τιμή ευρετηρίου, που έχει δημιουργηθεί για το ευρετήριο δεδομένων των δεδομένων αναφοράς, γνωστό ως soundex. Οι τιμές των ευρετηρίων αυτών βασίζονται σε συγκεκριμένα γράμματα που υπάρχουν στο όνομα της διεύθυνσης. Οι ταχυδρομικοί κώδικες και τα πεδία ζωνών εκχωρούνται επίσης σε ευρετήρια. Αυτές οι τιμές ευρετηρίων μειώνουν κατά πολύ το χρόνο αναζήτησης αυξάνοντας ταυτόχρονα την ταχύτητα της διαδικασίας ανεύρεσης.

Ψάξιμο των δεδομένων αναφοράς: Όταν οι διευθύνσεις έχουν μοντελοποιηθεί, ο δείκτης διευθύνσεων ψάχνει τα δεδομένα αναφοράς για να βρει χαρακτηριστικά με στοιχεία διευθύνσεων που είναι όμοια με τα στοιχεία των μοντελοποιημένων διευθύνσεων.

Δημιουργία βαθμολογίας ταιριάσματος: Όταν ο δείκτης διευθύνσεων έχει δημιουργήσει μία ομάδα από δυνητικές υποψήφιας διευθύνσεις, βαθμολογεί κάθε υποψήφια με σκοπό να προσδιορίσει για καθεμία τους, πόσο ταιριάζει με τη διεύθυνση που γεωκωδικοποιείται. Η βαθμολογία αυτή βασίζεται στις ρυθμίσεις που έχουν γίνει κατά την δημιουργία του δείκτη διευθύνσεων. Οι ρυθμίσεις αυτές περιλαμβάνουν τη μικρότερη βαθμολογία ταιριάσματος και την ευαισθησία ορθογραφίας.

Φιλτραρισμένη λίστα υποψηφίων: Αφού κάθε υποψήφια διεύθυνση έχει βαθμολογηθεί, ο δείκτης διευθύνσεων δημιουργεί μία ομάδα υποψηφίων

διευθύνσεων, που δυνητικά ταιριάζει με τη διεύθυνση. Αυτός ο προσδιορισμός βασίζεται στην παράμετρο για τη μικρότερη βαθμολογία υποψηφίου του δείκτη διευθύνσεων.

Ταίριασμα καλύτερης υποψήφιας διεύθυνσης: Ο δείκτης διευθύνσεων βρίσκει τις υποψήφιες με τη μεγαλύτερη βαθμολογία και παράγει την μορφή εξόδου που προσδιορίζεται μέσω παραθυρικών διαλόγων όταν ξεκινά η διαδικασία της γεώ-κωδικοποίησης.

Επισημάνση ταιριασμένης οντότητας: Τελικό βήμα της γεώ-κωδικοποίησης είναι ότι η οντότητα που ταιριάζει περισσότερο με την καλύτερη υποψήφια διεύθυνση μαρκάρεται στην κλάση των οντοτήτων και επομένως, επιτρέπει να συνεχισθεί η διαδικασία της γεώ-κωδικοποίησης σε άλλη διεύθυνση ή να γίνει κάποια χαρτογραφική διεργασία.

Παραμετροποίηση του δείκτη διευθύνσεων: Υπάρχουν τέσσερις βασικές τεχνικές για την παραμετροποίηση του δείκτη διευθύνσεων. Οι τεχνικές αυτές σε συνδυασμό με τη βελτίωση των δεδομένων αναφοράς αυξάνουν την ακρίβεια γεώ-κωδικοποίησης των διευθύνσεων. Οι τεχνικές αυτές παρουσιάζονται αμέσως παρακάτω.

- *Αλλαγή των παραμέτρων του δείκτη διευθύνσεων:* Η αλλαγή των παραμέτρων στο παράθυρο διαλόγου του δείκτη διευθύνσεων επηρεάζει σε ένα μεγάλο βαθμό τα αποτελέσματα εξόδου.
- *Δημιουργία ή αλλαγή του αρχείου δείκτη διευθύνσεων:* Μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα επιπρόσθετο αρχείο δείκτη διευθύνσεων, ή αφού το αρχείο αυτό έχει δημιουργηθεί μπορούμε να το τροποποιήσουμε ώστε να εξυπηρετήσει όποιες αλλαγές χρειάζονται.
- *Δημιουργία ή αλλαγή της φόρμας του αρχείου δείκτη διευθύνσεων:* Εάν χρειάζεται να χρησιμοποιηθεί ένα παραμετροποιημένο στυλ δείκτη «Διευ».
- *Δημιουργία ή μετατροπή της βάσης κανόνων:* Ορισμένες φορές χρειάζεται να γίνουν προχωρημένες αλλαγές στη βάση των κανόνων που συνοδεύει τον δείκτη διευθύνσεων. Εξειδικευμένα εργαλεία πρέπει να υπάρχουν ώστε να βοηθήσουν στη διαδικασία αυτή.

Αλλαγή των παραμέτρων του δείκτη διευθύνσεων: Υπάρχουν ένα σωρό ρυθμίσεις που μπορεί να διευθετηθούν στο παράθυρο διαλόγου του δείκτη διευθύνσεων. Αυτές ποικίλουν από τη δυνατότητα για την χρησιμοποίηση εναλλακτικών ονομάτων των διευθύνσεων και ονόματα τοποθεσιών μέχρι και

αλλαγή της βαθμολογίας ταιριάσματος και της ευαισθησίας της ορθογραφίας. Η διευθέτηση των παραμέτρων αυτών είναι σύνηθες στην ροή της εργασίας της γεώ-κωδικοποίησης. Αυτές οι αλλαγές αξίζουν για μικρότερες ασυμφωνίες στα δεδομένα αναφοράς και τα δεδομένα των διευθύνσεων.

Δημιουργία ή αλλαγή του αρχείου δείκτη Διευθύνσεων: Ενώ το παράθυρο διαλόγου των ιδιοτήτων του δείκτη διευθύνσεων παρέχει τη μέθοδο της αλλαγής πολλών ρυθμίσεων, μπορεί να χρειασθεί, σε κάποια περίπτωση, ορισμένες ιδιότητες του δείκτη διευθύνσεων να αλλάξουν, και να μπορούν να πραγματοποιηθούν από το παράθυρο διαλόγου. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει προσθήκη νέων στυλ γεώ-κωδικοποίησης ή αλλαγή της διαδικασίας δημιουργίας ευρετηρίων.

Δημιουργία ή αλλαγή της φόρμας του αρχείου δείκτη διευθύνσεων: Εάν βρεθεί ότι οι αλλαγές που έχουμε κάνει στο αρχείο του δείκτη διευθύνσεων μας ικανοποιούν και μπορούν να εφαρμοστούν και σε άλλες περιπτώσεις, τότε μπορούμε να δημιουργήσουμε ένα πρότυπο (template) από το διορθωμένο αρχείο.

Δημιουργία ή μετατροπή της βάσης κανόνων: Η μετατροπή της βάσης των κανόνων είναι μία προχωρημένη τεχνική στη διαδικασία της γεώ-κωδικοποίησης. Η τεχνική αυτή εφαρμόζεται κυρίως όταν θέλουμε να γεώ-κωδικοποιήσουμε διεθνείς διευθύνσεις, όπου η μορφή της διεύθυνσης είναι διαφορετική από αυτή των ΗΠΑ.

5

ΜΕΡΟΣ Ι: ΠΑΡΑΓΩΓΗ & ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΣΗ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

5.1. Γιατί μοντελοποίηση?

Η αστικοποίηση είναι μια από τις εμφανέστερες πλανητικές αλλαγές παγκοσμίως. Η ταχεία και σταθερή ανάπτυξη του αστικού πληθυσμού έχει οδηγήσει σε μια δραματική αύξηση της παραγωγής αστικών στερεών αποβλήτων, με κρίσιμες κοινωνικοοικονομικές και περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Σήμερα, υπάρχει μια γενική συμφωνία για τις καλύτερες πρακτικές όσον αφορά τη βιώσιμη διαχείριση των αστικών στερεών αποβλήτων, αλλά μόνο περιορισμένες προσπάθειες έχουν πραγματοποιηθεί μέχρι σήμερα σε αυτήν την περιοχή, οι οποίες έχουν προσαρμοστεί σε συγκεκριμένους κανονισμούς και ανάγκες κάθε εθνικής ή περιφερειακής αρχής (Leao et al 2001). Η βελτιστοποίηση ενός συστήματος διαχείρισης απορριμμάτων με σκοπό την μείωση των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων ή/και των οικονομικών δαπανών του, προϋποθέτει την σωστή πρόβλεψη των συγκεκριμένων επιβαρύνσεων και δαπανών. Ως εκ τούτου, υφίσταται η ανάγκη να μοντελοποιηθούν τέτοια συστήματα διαχείρισης αστικών στερεών αποβλήτων.

Η μοντελοποίηση μπορεί ωστόσο, με την πρώτη ματιά, να εμφανίζεται ως μία καθαρή ακαδημαϊκή άσκηση, αλλά η περαιτέρω έρευνα αποκαλύπτει ότι έχει πολλές και διάφορες πρακτικές χρήσεις:

1. Η διαδικασία της κατασκευής ενός μοντέλου εστιάζει την προσοχή του στην απώλεια των δεδομένων. Συχνά δηλαδή, τα πραγματικά κόστη, είτε σε περιβαλλοντικούς είτε σε οικονομικούς όρους, για τμήματα της αλυσίδας των αστικών απορριμμάτων δεν είναι ευρέως γνωστά. Μόλις αυτά προσδιοριστούν, τα ελλείποντα στοιχεία μπορούν είτε να αναζητηθούν, είτε εάν αυτά δεν υπάρχουν, η ανάλυσή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί ώστε να συγκεντρωθούν τα σχετικά στοιχεία.
2. Μόλις ολοκληρωθεί, το μοντέλο θα καθορίσει το καθεστώς της διαχείρισης των απορριμμάτων, μαζί με την περιγραφή του συστήματος, και με τον υπολογισμό των γενικών οικονομικών δαπανών και των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων.
3. Η μοντελοποίηση επιτρέπει σενάρια του τύπου "Τι θα συμβεί εάν...?", τα οποία πραγματοποιούνται και τα οποία μπορούν έπειτα να χρησιμοποιηθούν για να καθορίσουν τα σημεία της μέγιστης ευαισθησίας του συστήματος. Αυτό θα παρουσιάσει ποιες αλλαγές θα έχουν τα μεγαλύτερα αποτελέσματα στη μείωση των δαπανών ή των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων.
4. Το μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί στο μέλλον για να προβλέψει τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις και πιθανώς τα οικονομικά κόστη. Τέτοιες προβλέψεις δεν θα είναι 100% ακριβές, αλλά θα δώσουν χοντρικές εκτιμήσεις, οι οποίες είναι πολύτιμες για τον προγραμματισμό μελλοντικής στρατηγικής. Αυτές είναι χρήσιμες ειδικά σε τέτοιες μακροπρόθεσμες διαδικασίες όπως η ανάπτυξη αγορών για δευτερεύοντα υλικά. Η ανάπτυξη αγοράς είναι ζωτικής σημασίας, για να εξασφαλίσει ότι τα πιο υψηλά επίπεδα ανακύκλωσης μπορούν να υποστηριχτούν. Η μοντελοποίηση ενός συστήματος απορριμμάτων θα επιτρέψει την πρόβλεψη των πιθανών ποσοτήτων διαθέσιμου ανακυκλώσιμου υλικού, το οποίο, στη συνέχεια, θα επιτρέψει την επένδυση στον απαραίτητο εξοπλισμό, για να συνεχίσει με εμπιστοσύνη.

Η μοντελοποίηση της διαχείρισης των αστικών απορριμμάτων δεν είναι μια νέα ιδέα. Ο Clark (1978) αναθεώρησε τη χρήση των τεχνικών μοντελοποίησης και κατόπιν τις έκανε διαθέσιμες για να βελτιστοποιήσει τις μεθόδους αποκομιδής. Πρόβλεψε τις πιο αποδοτικές διαδρομές αποκομιδής και καθόρισε τις βέλτιστες θέσεις για τα κτίρια διαχείρισης απορριμμάτων. Τέτοια μοντέλα επικεντρώθηκαν στους λεπτομερείς μηχανισμούς των μεμονωμένων διαδικασιών μέσα στο σύστημα απορριμμάτων. Άλλα μοντέλα έχουν προσπαθήσει να υποστηρίξουν μια

ευρύτερη άποψη και έχουν συγκρίνει εναλλακτικές στρατηγικές απόθεσης απορριμμάτων από μία οικονομική οπτική γωνία (Greenberg et al 1976).

Πιο πρόσφατα, λεπτομερή μοντέλα έχουν αναπτυχθεί για να διαμορφώσουν τα οικονομικά της αποκατάστασης υλικών για ανακύκλωση, και μερικά από τις περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις (Boustead 1992), καθώς επίσης και ευρύτερα μοντέλα συμπεριλαμβανομένου του κόστους, της δημόσιας αποδοχής, των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων και της ευκολίας της λειτουργίας και της συντήρησης των εναλλακτικών λύσεων της διαχείρισης των απορριμμάτων (Sushil 1990).

Παράλληλα, μία αρκετά σε βάθος εξέταση της βιβλιογραφίας αποκαλύπτει ότι η πιο κοινή μεθοδολογία που χρησιμοποιείται για την αυτοματοποίηση της διαδικασίας και της διαχείρισης του προγραμματισμού απορριμμάτων είναι ο σχεδιασμός και η κατασκευή ενός ολοκληρωμένου συστήματος βασισμένου σε ένα περιβάλλον ΓΣΠ. Στο πλαίσιο αυτό, το σύστημα εφαρμόζεται για την εξυπηρέτηση των διάφορων σκοπών, όπως η επιλογή των κατάλληλων περιοχών Χώρων Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων (ΧΥΤΑ) (Leao et al 2001, Al-Jarrah and Abu-Qdais 2006, Ramasamy et al 2002, Maniezzo et al 1998, Hastrup et al 1998, Charnpratheep et al 1997, Siddiqui et al 1996, Kao and Lin 1996, Ramuu and Kennedy 1994), η ακριβής εκτίμηση της παραγωγής στερεών αποβλήτων χρησιμοποιώντας την πυκνότητα των τοπικών πληθυσμών και την κατανομή των εισοδημάτων (Vijay et al 2005), η θέση των σταθμών ανακύκλωσης (Chang and Wei 2000) καθώς επίσης, και η πρόβλεψη της παραγωγής των αστικών απορριμμάτων (Dyson and Chang 2005, Katsamaki et al 1998, Chang et al 1993).

Ο Emery κ.α. (2003) εξετάζουν τη σχέση μεταξύ του κοινωνικοοικονομικού επιπέδου μιας περιοχής και των ποσοτήτων των αποβλήτων που παράγονται. Παράλληλα, ο Grossman κ.α. (1974) παρουσιάζουν μια εφαρμογή οικονομετρικών μοντέλων για την εξαγωγή αναλυτικών προβλέψεων για τα αστικά φορτία αποβλήτων. Οι Ahluwalia και Nema (2006) είχαν ως στόχο να αντιμετωπίσουν τα ζητήματα που περιλαμβάνονται στον προγραμματισμό και το σχέδιο ενός συστήματος διαχείρισης των αποβλήτων με έναν ολοκληρωμένο τρόπο. Ο Klang κ.α. (2006) ερεύνησαν πώς η ανάλυση συστημάτων, που εφαρμόστηκε σε ένα σουηδικό νομό, θεωρήθηκε από τους δημοτικούς υπαλλήλους και τους πολιτικούς ως υποστήριξη στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Επιπλέον, ο Higgs (2006) παρουσιάζει τις συμμετοχικές προσεγγίσεις που χρησιμοποιούν μεθόδους H/Y, βασισμένες στο συνδυασμό ΓΣΠ

και τεχνικών αξιολόγησης πολλαπλών κριτηρίων, που θα μπορούσαν να περιλαμβάνουν το κοινό στη διαδικασία λήψης αποφάσεων στα διαφορετικά στάδια της διαδικασίας διαχείρισης των στερεών αποβλήτων.

Δυστυχώς, ένας ορισμένος βαθμός αβεβαιότητας υπάρχει ή παρουσιάζεται πάντα στα προβλήματα σχετικά με τη διαχείριση των στερεών απορριμμάτων. Ειδικότερα, ο τυχαίος χαρακτήρας της παραγωγής στερεών απορριμμάτων εξαρτάται από το προφίλ των κατοίκων της αστικής περιοχής στην οποία πραγματοποιείται η μελέτη, τα λάθη εκτίμησης στις τιμές των παραμέτρων, και την ασάφεια στον προγραμματισμό των στόχων και των περιορισμών, οι οποίοι αποτελούν πιθανές πηγές αβεβαιότητας (Chang et al 2000). Ασαφείς μαθηματικές προσεγγίσεις προγραμματισμού, που εξετάζουν τις συστηματικές αβεβαιότητες, έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως τα τελευταία χρόνια. Παραδείγματος χάριν, ο Huang κ.α. (1995) ανέπτυξαν την γκριζα ασαφή προσέγγιση προγραμματισμού ακέραιων αριθμών (Grey Fuzzy Integer Programming), που εξετάζει ένα υποθετικό πρόβλημα διαχείρισης στερεών απορριμμάτων στον Καναδά. Ο Fabbicino (2001) πρότεινε ένα μαθηματικό μοντέλο για την επίλυση ενός οικονομικού προβλήματος βελτιστοποίησης στην περίπτωση της διαχείρισης των αστικών στερεών αποβλήτων. Το υιοθετημένο μοντέλο θεωρεί αυτά τα στοιχεία ως κόμβους ενός δικτύου, κατά μήκος του οποίου τα απορρίμματα απεικονίζονται σύμφωνα με διαφορετικές μεθόδους αποκομιδής και μεταφοράς. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν τα μη γραμμικά προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως η επιλογή της πιο αποδοτικής δρομολόγησης για τη μεταφορά απορριμμάτων, προτείνονται στη βιβλιογραφία μέθοδοι βασισμένες στους γενετικούς αλγορίθμους (Chang and Wei 2000) και στα Συστήματα Αποικίας Μυρμηγκιών (Karadimas et al 2007).

Περαιτέρω έρευνα έχει πραγματοποιηθεί σε αυτήν την κατεύθυνση κατά τη διάρκεια του σχεδιασμού και της εφαρμογής ενός ολοκληρωμένου Συστήματος Διαχείρισης Αστικών Απορριμμάτων (ΣΔΑΑ) (Karadimas et al 2004). Ειδικότερα, αυτό το σύστημα εξετάζει ή θέτει υπό εξέταση τις λειτουργικές παραμέτρους όπως είναι η αύξηση της πυκνότητας του πληθυσμού στην αστική περιοχή που πραγματοποιείται η μελέτη. Αυτές οι παράμετροι ασκούν κρίσιμη επίδραση στη παραγωγή των απορριμμάτων. Επιπλέον, το ολοκληρωμένο αυτό σύστημα επιτρέπει δυναμικό χειρισμό, χειρισμό αλληλοεπίδρασης χρήση-συστήματος καθώς και το χειρισμό αυτών των παραμέτρων.

Από την άλλη μεριά, πολλοί είναι αυτοί που υποστηρίζουν ότι η μοντελοποίηση μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μεγάλες κατηγορίες – η δομή του

μοντέλου (η οποία θα καθορίσει πώς θα λειτουργήσει το μοντέλο) και η απόκτηση των δεδομένων (για την εισαγωγή τους στο μοντέλο). Πρόσφατες εξελίξεις σε καθεμία από τις δύο αυτές βασικές περιοχές έχουν καταστήσει αυτήν την εργασία και πιθανή και έγκαιρη.

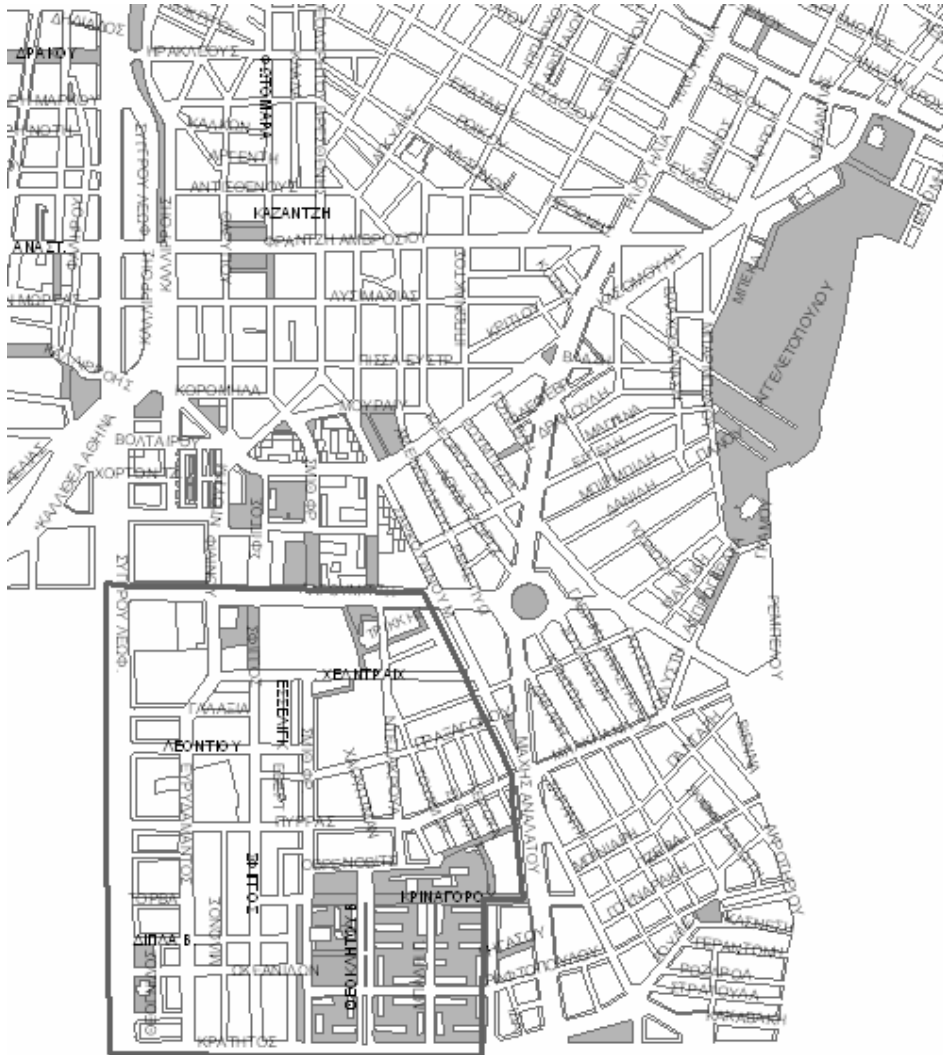
Μοντέλα: Διάφορα μοντέλα για την πρόβλεψη των περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων έχουν παραχθεί μέσα από τη διαδικασία του καθορισμού του Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment). Αυτός είναι ένας σχετικά νέος κλάδος της εφαρμοσμένης επιστήμης, η οποία έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη νέων περιβαλλοντικών διαχειριστικών εργαλείων. Ο McDougall κ.α. (2001) χρησιμοποιούν μία τεχνική μοντελοποίησης, η οποία είναι ένας κατάλογος απογραφής του κύκλου ζωής των δημοτικών στερεών αποβλήτων.

Δεδομένα: Ακόμη και τα καλύτερα μοντέλα είναι άχρηστα χωρίς ακριβή, σχετικά και προσιτά δεδομένα για να μπορούν να εισαχθούν σε αυτά. Ενώ τα δεδομένα είναι διαθέσιμα για πολλές από τις τεχνικές διαδικασίες στη διαχείριση των αποβλήτων, όπως οι εκπομπές των αποτεφρωτήρων, είναι δίκαιο να ειπωθεί ότι οι πληροφορίες για τις δαπάνες και τα φορτία των συστημάτων αποκομιδής και ταξινόμησης δεν είναι εύκολα διαθέσιμες. Σε πολλές χώρες, ειδικά εκείνες με οικονομική ανάπτυξη, συστήματα που διαχωρίζουν στην πηγή για τη συλλογή και ταξινόμηση υπάρχουν μόνο στο στάδιο της υλοποίησης ή ακόμα και στη φάση του σχεδιασμού, και επομένως, δεν μπορούν να εξαχθούν λειτουργικά στοιχεία. Ευτυχώς, μέσω των προσπάθειών μιας σειράς οργανισμών, πολλά διαφορετικά πειραματικά σχέδια, σε μικρές, αλλά και σε μεγάλες κλίμακες, έχουν οργανωθεί, και δεδομένα έχουν αρχίσει να είναι διαθέσιμα. Για πρώτη φορά είναι τώρα δυνατό να μοντελοποιηθούν ολοκληρωμένα σχήματα διαχείρισης αστικών απορριμμάτων βασισμένα στα πραγματικά δεδομένα.

Το προτεινόμενο μοντέλο που αναπτύσσεται στη διατριβή αυτή προσπαθεί να συνδυάσει τις πρόσφατες εξελίξεις στη μεθοδολογία αξιολόγησης ενός κύκλου ζωής με τη συνεχή ροή δεδομένων, τα οποία αρχίζουν να εμφανίζονται στο προσκήνιο. Αυτό θα επιτρέψει την πρόβλεψη των γενικών περιβαλλοντικών επιβαρύνσεων και οικονομικών δαπανών των διαφορετικών εκτελέσεων της ολοκληρωμένης διαχείρισης των αστικών αποβλήτων με τη χρήση πολυάριθμων σεναρίων «τι θα συμβεί εάν...?».

Έτσι, το μοντέλο το οποίο θα αναπτυχθεί και θα αναλυθεί παρακάτω προσπαθεί να προβλέψει συνολικά τις επιβαρύνσεις και τις επιπτώσεις που θα έχει στο περιβάλλον και το οικονομικό κόστος για τον εκάστοτε Δήμο, όπου μπορεί να εφαρμοστεί, δεδομένου ότι και οι δύο αυτές παράμετροι είναι από τις

πιο κρίσιμες παραμετρους για ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης αστικών απορριμμάτων. Εξαιτίας αυτού, η παρούσα ενότητα επικεντρώνεται στην ανάλυση, στον σχεδιασμό και στην υλοποίηση ενός καινοτόμου μοντέλου, που θα αποτελεί ένα Σύστημα Λήψης Αποφάσεων και θα μπορεί να οδηγήσει στον υπολογισμό του βέλτιστου αριθμού και της κατάλληλης τοποθέτησης των δοχείων απορριμμάτων σε μια εκ των προτέρων επιλεγμένη περιοχή μελέτης (**Σχήμα 5-1**).



Σχήμα 5-1: Ο Χάρτης της εξεταζόμενης περιοχής.

5.2. Το πρόβλημα

Η ακριβής γνώση της ποσότητας και της ποιότητας των στερεών αποβλήτων (σύσταση) που παράγονται σε μια περιοχή, αποτελεί τη βάση για τον οποιοδήποτε ορθό σχεδιασμό ενός ολοκληρωμένου συστήματος διαχείρισης στερεών αποβλήτων.

Δυστυχώς, στη χώρα μας η εξεύρεση και χρήση επίκαιρων και ορθών στοιχείων αποτελεί μια δύσκολη άσκηση για κάθε μελετητή και ακόμη περισσότερο για ένα Δήμο, ο οποίος θέλει να ξεκινήσει μια επιστημονικά ορθή προσέγγιση της διαχείρισης στερεών αποβλήτων. Σε προηγούμενες μελέτες του Δήμου Αθηναίων χρησιμοποιήθηκαν, ελλείπει στοιχεία από την Υπηρεσία του Δήμου, αναφορές από παλιότερες καταγραφές και στοιχεία του ΕΣΔΚΝΑ σχετικά με τις συνολικά παραγόμενες και απορριπτόμενες ποσότητες αποβλήτων στην Αθήνα. Στην παρούσα μελέτη, δόθηκε η δυνατότητα να αντληθούν πρωτογενή στοιχεία ζυγολογίων των προγραμμάτων του Δήμου, τα οποία καταγράφηκαν κατά την περίοδο 1998–2000 και θεωρήθηκαν από τους Υπεύθυνους του Δήμου αξιόπιστα.

5.2.1. Εκτιμήσεις από στοιχεία του δήμου Αθηναίων

Για την εκτίμηση των παραγόμενων ποσοτήτων Αστικών Στερεών Αποβλήτων (ΑΣΑ) μίας περιοχής, χρησιμοποιείται κατά βάση ο πραγματικός πληθυσμός της περιοχής σε σχέση και με το συντελεστή παραγωγής απορριμμάτων ανά κάτοικο και ημέρα, πρέπει όμως πάντα να συνεκτιμώνται και όλα τα υπόλοιπα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της περιοχής μελέτης. Με βάση την τελευταία απογραφή (ΕΣΥΕ, Απογραφή 2001), ο πραγματικός πληθυσμός του Δήμου Αθηναίων ανέρχεται περίπου σε 745.000 κατοίκους. Με βάση επίσης τα αναλυτικά ζυγολόγια των εγκαταστάσεων στο ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων, και τα στοιχεία που έχουν ενσωματωθεί στη μελέτη του πλαισίου Σχεδιασμού Διαχείρισης Στερεών Αποβλήτων Νομού Αττικής, η ειδική παραγωγή Αστικών Στερεών Αποβλήτων ανά κάτοικο και ημέρα για το Λεκανοπέδιο Αττικής, ανέρχεται περίπου σε 1,2 kg/κατ. ημέρα.

Άρα με μία πρώτη πρόχειρη προσέγγιση, θα ανέμενε κανείς ότι η παραγωγή απορριμμάτων για το Δήμο Αθηναίων θα ανέρχονταν περίπου σε:

$$745.000 \times 1,2 \text{ kg/κατ. ημ.} = 894 \text{ t/ημ.}$$

Από τα στοιχεία της Υπηρεσίας Καθαριότητας του Δήμου Αθηναίων η μέση ημερήσια ποσότητα παραγόμενων ΑΣΑ, που μεταφέρονται με κλειστά συστήματα μεταφοράς (κλειστά απορριμματοφόρα και αυτοσυμπιεστές), ανέρχεται σε περίπου 1.200 t/ημ., με συνήθη μέγιστη ποσότητα περίπου 1.400t/ημ. Σημειώνεται ότι ως συνήθης μέγιστη ποσότητα, θεωρείται αυτή που συχνά παρατηρείται μέσα στα πλαίσια των φυσιολογικών διακυμάνσεων των ποσοτήτων των παραγόμενων ΑΣΑ., εντός της εβδομάδας, και όχι η παραγωγή αιχμής, που

μπορεί να παρατηρηθεί σε ειδικές περιστάσεις ή ειδικές περιόδους (π.χ. αιχμή τουριστικής περιόδου, απεργίες κ.λ.π.).

Σε προσπάθεια διασταύρωσης των στοιχείων αυτών, από τα δεδομένα που υπάρχουν απ' τα αναλυτικά ζυγολόγια του ΧΥΤΑ Άνω Λιοσίων, τα οποία καταγράφηκαν κατά το Α' Στάδιο του Περιφερειακού Σχεδιασμού της Διαχείρισης των Στερεών Αποβλήτων της Αττικής, προκύπτουν τα εξής:

		Ελάχιστη Ποσότητα (t/ημ)		Μέγιστη Ποσότητα (t/ημ)		Μέση Ποσότητα (t/ημ)	
A/A		1993	1996	1993	1996	1993	1996
1	Κλειστά Απορ/φόρα και αυτοσυμπιεστές	615	729	991	1147	874	943
2	Ανοικτά Απορ/φόρα και σκάφες (ογκώδη-μπάζα – πράσινα)	–	73	–	164	47	121
Σ Υ Ν Ο Λ Ο		662	802	1038	1311	921	1064

Πίνακας 5-1: Ποσότητα Απορριμμάτων Δήμου Αθηναίων (1993 και 1996)

Από τα ανωτέρω στοιχεία, και δεδομένου ότι:

- Μεταξύ των ετών 1996 και 2007 έχει συνεχιστεί η αυξητική τάση παραγωγής ΑΣΑ, τόσο λόγω αύξησης της ειδικής παραγωγής, όσο και λόγω ενίσχυσης των παράπλευρων αιτιών παραγωγής ΑΣΑ,
- Δεν έχουν αναπτυχθεί και υλοποιηθεί ακόμη δράσεις ούτε σε επίπεδο Δήμου Αθηναίων ούτε σε επίπεδο χώρας για την ανάκτηση σημαντικού ποσοστού των ΑΣΑ μέσω προγραμμάτων διαλογής στην Πηγή.

Οι ρεαλιστικές εκτιμήσεις για την παραγωγή ΑΣΑ στο Δήμο Αθηναίων σε σχέση και με τα δεδομένα της Υπηρεσίας Καθαριότητας, είναι οι ακόλουθες:

A/A		Μέση Ποσότητα (t/ημ)	Μέγιστη Ποσότητα (t/ημ)
1	Σύμμεικτα Αστικά Στερεά Απόβλητα	1200	1400
2	Ογκώδη – μπάζα – Απόβλητα πρασίνου	150	200
Σ Υ Ν Ο Λ Ο		1350	1600

Πίνακας 5-2: Ποσότητα Παραγομένων Απορριμμάτων Δήμου Αθηναίων

5.2.2. Καταγραφή στοιχείων ανά πρόγραμμα αποκομιδής

Για την καλύτερη παρακολούθηση των εργασιών της Δ/νσης Καθαριότητας & Μηχανολογικού και πιο συγκεκριμένα, για την καλύτερη αποτύπωση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών κάθε προγράμματος αποκομιδής των απορριμμάτων είχε ξεκινήσει μια προσπάθεια καταγραφής λεπτομερειών για τα προγράμματα αποκομιδής ανά Διαμέρισμα. Με βάση τα αποτελέσματα της καταγραφής αυτής, η Αναπτυξιακή Εταιρεία του Δήμου Αθηναίων δημιούργησε μια βάση δεδομένων σε MS Access, ούτως ώστε να είναι δυνατή η πρόσβαση, η περιοδική ενημέρωση και η επεξεργασία των παραπάνω στοιχείων. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν πέρα από τα υπάρχοντα στοιχεία του ΓΣΠ και απαντήσεις σε ερωτηματολόγια, τα οποία είχαν μοιραστεί σε επόπτες και επιστάτες. Για κάθε ένα από τα ξεχωριστά προγράμματα αποκομιδής (συλλέχθηκαν 122 διαφορετικά) καταχωρήθηκαν τα στοιχεία που εμφανίζει ο **Πίνακας 5-3**.

Τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τη βάση δεδομένων παρουσιάζουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον ενώ παράλληλα αντλούνται σημαντικά συμπεράσματα όσον αφορά στη συνολική εικόνα των προγραμμάτων αποκομιδής στο Δήμο και στα σημεία με ιδιαίτερα προβλήματα, τα οποία αξιολογούνται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρξει άμεση βελτίωση της εικόνας της περιοχής.

Στοιχεία	Καταχώρηση σε MS Access	Παρατηρήσεις
Αριθμός προγράμματος	✓	
Τύπος οχήματος	✓	
Χωρητικότητα οχήματος	✓	
Ποσοστό πλήρωσης οχήματος		
Κάδοι που συλλέγονται	✓	
Εκτίμηση χρόνου αποκομιδής ανά κάδο	✓	
Εκτίμηση διανυόμενης απόστασης	✓	
Εκτίμηση χρόνου διάρκειας προγράμματος	✓	
Εκτίμηση χρόνου &	✓	

απόστασης από – προς ΧΥΤΑ		
Κατανάλωση καυσίμων	✓	
Σημεία με προβλήματα	✓	✓
Κάδοι ανά οδό	✓	✓
Ζυγολόγιο	✓	

Πίνακας 5-3: Στοιχεία των προγραμμάτων αποκομιδής καταγεγραμμένα σε βάση δεδομένων.

5.2.3. Πρόβλημα κάδων

Η προσωρινή αποθήκευση των ΑΣΑ είναι το κατεξοχήν σύστημα με το οποίο έρχεται σε καθημερινή επαφή ο πολίτης και κατ' επέκταση ο επισκέπτης και το οποίο επηρεάζει άμεσα και αισθητά το επίπεδο και την ποιότητα καθαριότητας της πόλης. Η μελέτη και ο σχεδιασμός ενός συστήματος οφείλει να καλύψει τις ανάγκες προσωρινής τοποθέτησης των απορριμμάτων που παράγουν καθημερινά τα νοικοκυριά, τα καταστήματα, οργανισμοί κλπ. μέχρι αυτά να συλλέγουν και να μεταφερθούν από το δήμο στους χώρους επεξεργασίας και τελικής διάθεσης κατά κοινωνικά αποδεκτό τρόπο. Πιο συγκεκριμένα, το σύστημα προσωρινής αποθήκευσης των απορριμμάτων πρέπει να είναι σχεδιασμένο κατά τέτοιο τρόπο ώστε:

- Να μη δημιουργεί αισθητικές ενοχλήσεις στους πολίτες από τη θέα των απορριμμάτων μέσα στην πόλη (βουνά σκουπιδιών έξω από τους κάδους ή υπερπλήρεις κάδοι).
- Να προστατεύει τη δημόσια υγεία από εστίες μόλυνσης (αποφυγή οσμών, προσέλκυσης εντόμων και ζώων και ρύπανσης του χώρου) προερχόμενες από την ανεξέλεγκτη έκθεση των απορριμμάτων σε κοινόχρηστους χώρους (πεζοδρόμια, δρόμους, πλατείες κλπ.),
- Να ελαχιστοποιεί την πιθανότητα μη επάρκειας (υπερχείλισης) των κάδων και κατά συνέπεια δημιουργία οχλήσεων,
- Να εξυπηρετεί και να διευκολύνει τους πολίτες (δηλαδή οι χώροι προσωρινής αποθήκευσης – κάδοι να βρίσκονται σε μικρή απόσταση από το χώρο παραγωγής των απορριμμάτων και να παρέχουν ευκολία στη χρήση),
- Να μη δημιουργούνται οχλήσεις από τις διαδικασίες εκκένωσης και συλλογής (θόρυβος, διασκόρπιση σκουπιδιών, δυσοσμίες), και

- Να διευκολύνει την υπηρεσία καθαριότητας ώστε να έχει εύκολη και άνετη πρόσβαση στο σημείο κατά τη διάρκεια της συλλογής.

Πρέπει να επισημανθεί πως τα παραπάνω γενικά κριτήρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη για το βέλτιστο σχεδιασμό ενός συστήματος προσωρινής αποθήκευσης λειτουργούν τις περισσότερες φορές και ως περιορισμοί.

Ο αρμόδιος φορέας, στην συγκεκριμένη περίπτωση ο Δήμος Αθηναίων καλείται να καθορίσει κατά τον καλύτερο δυνατό τρόπο έναν αριθμό παραγόντων (παραμέτρων) που επηρεάζουν άμεσα την επίδοση του συστήματος της προσωρινής αποθήκευσης ώστε να επιτύχει κατά τον βέλτιστο τρόπο τους παραπάνω στόχους.

Το θέμα της χωροθέτησης των κάδων έχει απασχολήσει πολλές φορές την Δ/νση καθαριότητας και ιδιαίτερα το 2004, ενόψει των Ολυμπιακών Αγώνων. Για το λόγο αυτό είχε προχωρήσει την περίοδο εκείνη σε αναδιοργάνωση του υφιστάμενου συστήματος.

5.2.4. Ο υφιστάμενος σχεδιασμός

Ο σχεδιασμός του σημερινού συστήματος προσωρινής αποθήκευσης και πιο συγκεκριμένα, ο αριθμός, η χωρητικότητα και η χωροθέτηση των κάδων στο Δήμο σε συνδυασμό πάντα με τον υπάρχοντα σχεδιασμό των προγραμμάτων συλλογής των απορριμμάτων, βασίζεται:

- Αρχικά, σε εκτιμήσεις που έγιναν αναφορικά με την ημερήσια ανά πρόγραμμα παραγόμενη και απορριπτόμενη ποσότητα ΑΣΑ,
- Στη συνέχεια και με σκοπό τη βελτίωση των αρχικών εκτιμήσεων, ο αριθμός και η χωροθέτηση των κάδων βασίστηκε σε υπολογισμούς και υποθέσεις που πραγματοποιήθηκαν με βάση τον αριθμό των διαμερισμάτων κάθε κτιρίου υποθέτοντας ότι σε κάθε διαμέρισμα διαμένουν 3 άτομα για την εκτίμηση της απαιτούμενης συνολικής χωρητικότητας κάδων,
- Επίσης, τοποθετήθηκε ένας κάδος μπροστά από κάθε κτίριο με 10 ή περισσότερα διαμερίσματα, ενώ για κτίρια με λιγότερα από 10 διαμερίσματα, ο κάδος τοποθετήθηκε στη μεσοτοιχία ώστε α εξυπηρετεί και το γειτονικό κτίριο).

5.2.5. Αναδιοργάνωση του υφιστάμενου συστήματος

Αξιολογώντας την υφιστάμενη κατάσταση και παρατηρώντας οχλήσεις τόσο από τη θέα συστοιχίας κάδων όσο και από τη θέα υπερπλήρων (υπερχειλισμένων) κάδων ή απορριμμάτων εκτός κάδων, μπορεί εύκολα να οδηγηθεί κανείς στο συμπέρασμα ότι είτε ο υφιστάμενος εξοπλισμός δεν είναι επαρκής είτε ο σχεδιασμός του συστήματος της προσωρινής αποθήκευσης δεν είναι ικανοποιητικός είτε ο συνδυασμός και των δυο δεν επιτρέπει στο σύστημα να έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Στο πλαίσιο της βελτίωσης της εικόνας της καθαριότητας της πόλης καθώς και της καλύτερης εξυπηρέτησης των πολιτών, ο Δήμος και πιο συγκεκριμένα η Διεύθυνση Καθαριότητας πρέπει να οδηγηθεί στην αναδιοργάνωση του συστήματος της προσωρινής αποθήκευσης και συλλογής των απορριμμάτων.

Η αναδιοργάνωση του υφιστάμενου συστήματος όπως αυτή σχεδιάστηκε και παρουσιάζεται στην παρούσα μελέτη βασίζεται σε εκτιμήσεις και υπολογισμούς που πραγματοποιήθηκαν σε μικρές γεωγραφικές κλίμακες ενώ συνδυάστηκαν παράλληλα με την αναδιοργάνωση των προγραμμάτων συλλογής.

Πιο συγκεκριμένα, εκτιμήθηκε η απαιτούμενη συνολική χωρητικότητα των κάδων ανά οικοδομικό τετράγωνο (ΟΤ) με βάση τον πραγματικό πληθυσμό όπως αυτός διαφαίνεται από την τελευταία απογραφή (2001) της ΕΣΥΕ, ενώ παράλληλα τα στοιχεία αυτά συγκρίθηκαν και αξιολογήθηκαν με τα ήδη υπάρχοντα στοιχεία (αριθμό διαμερισμάτων ανά ΟΤ) που είχαν ληφθεί υπόψη σε προηγούμενους σχεδιασμούς.

Δεδομένου του υφιστάμενου εξοπλισμού (τύπος και μέγεθος κάδων ανά περιοχή) επαναπροσδιορίστηκε:

- ο αριθμός των αναγκαίων κάδων συνολικά αλλά και ανά μικρής κλίμακα γεωγραφικό τομέα (οικοδομικό τετράγωνο ή περιορισμένο αριθμό ΟΤ όπου αυτό είναι εφικτό), και
- η θέση του κάθε κάδου, ώστε να εξυπηρετεί πλήρως την περιοχή «ευθύνης» του ικανοποιώντας όλους τους προαναφερθέντες περιορισμούς.

5.3. Ανάλυση της υπόθεσης

Ο δήμος Αθηναίων συνολικά καλύπτει μια περιοχή περίπου 100 km² και όπως αναφέρθηκε παραπάνω, έχει έναν πληθυσμό 745.000 πολιτών (απογραφή 2001). Η αρμόδια τεχνική υπηρεσία του δήμου της Αθήνας, η Διεύθυνση

Καθαριότητας, έχει διαιρέσει αυτήν την περιοχή σε 122 μη-επικαλυπτόμενες υπό-περιοχές. Ένα ειδικό πρόγραμμα αποκομιδής απορριμμάτων αντιστοιχεί σε καθεμία από αυτές τις υπό-περιοχές. Στην παρούσα μελέτη εξετάζονται λεπτομερώς τα χαρακτηριστικά της αποκομιδής των απορριμμάτων σε μια από αυτές τις υπό-περιοχές, η οποία κατέχει μία επιφάνεια περίπου 0,45km², με πληθυσμό παραπάνω από 8.500 πολίτες και μια παραγωγή 3.800 τόνων δημοτικών στερεών αποβλήτων ετησίως.

Τα δεδομένα σχετικά με την περιοχή, που πραγματοποιείται η μελέτη, έχουν ληφθεί από τη Διεύθυνση Καθαριότητας του δήμου της Αθήνας. Αυτές οι πληροφορίες περιλαμβάνουν τους χάρτες της εξεταζόμενης περιοχής (**Σχήμα 5-1**), με τον αντίστοιχο σχολιασμό (διευθύνσεις και αριθμήσεις των οδών), τις διάφορες κτηριακές μονάδες και τις θέσεις των ήδη υπαρχόντων κάδων απορριμμάτων.

Ένα πειραματικό πρόγραμμα του δήμου της Αθήνας (1998-2000) για τη διαχείριση του στόλου των απορριμματοφόρων βοήθησε στον προσδιορισμό της αρχικής θέσης των κάδων απορριμμάτων. Το σύστημα που αναπτύχθηκε βασίστηκε στις τεχνολογίες του Συστήματος Παγκόσμιου Εντοπισμού Θέσης (ΠΣΕΘ, στα αγγλικά Global Positioning System - GPS) και του Παγκόσμιου Συστήματος για Κινητή Επικοινωνία (ΠΣΚΕ, στα αγγλικά Global System for Mobile Communication - GSM) και τα στοιχεία συλλέχθηκαν και καταγράφηκαν σε μια χώρο-χρονική βάση δεδομένων. Η επικύρωση του προτεινόμενου μοντέλου επιτεύχθηκε με τη σύγκριση των επιτευχθέντων αποτελεσμάτων με τα στοιχεία του δήμου Αθηναίων.

Επίσης, για να υπολογιστεί η κατανομή του πληθυσμού και της παραγωγής απορριμμάτων, στοιχεία όπως ο αριθμός κατοίκων ανά οικοδομική μονάδα και η ημερήσια παραγωγή στερεών απορριμμάτων ανά κάτοικο (kg/κάτ./ημέρα) έχουν δοθεί από τη Διεύθυνση Καθαριότητας του δήμου (Municipality of Athens 2003). Ο μέσος ημερήσιος ρυθμός παραγωγής απορριμμάτων, που έχει προταθεί από το δήμο είναι 1,2 kg/κάτοικο και έχει θεωρηθεί ως μη ρεαλιστικός λόγω της μεθόδου υπολογισμού που έχει εφαρμοστεί από το δήμο. Η μέθοδος υπολογισμού που έχει χρησιμοποιηθεί είναι η ακόλουθη: Όταν ένα απορριμματοφόρο φτάνει στο ΧΥΤΑ ζυγίζεται και στο τέλος της ημέρας, το συνολικό φορτίο όλων των απορριμματοφόρων που ενέργησαν στη συγκεκριμένη περιοχή, παρέχει τη γενική ημερήσια παραγωγή στερεών απορριμμάτων για το σύνολο των κατοίκων της περιοχής αυτής. Η ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων ανά πολίτη υπολογίζεται διαιρώντας το συνολικό φορτίο των στερεών

απορριμμάτων με τον αριθμό πολιτών της εξεταζόμενης περιοχής (Δήμος Αθηναίων 2003).

Εντούτοις, οι εμπορικές μονάδες (όπως τα Σούπερ Μάρκετ και τα καταστήματα) παράγουν μια σημαντική ποσότητα στερεών απορριμμάτων σχετικά με τον τύπο του καταστήματός τους. Κατά συνέπεια, παρατηρείται μια παραλλαγή, από 1,0 kg/κατ/ημέρα για τις αυστηρά κατοικημένες περιοχές σε 6 kg/κατ/ημέρα για τις ιδιαίτερα εμπορικές περιοχές. Είναι γεγονός ότι το εμπειρικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην παρούσα φάση από το δήμο, δε διευκρινίζει την ποσότητα των απορριμμάτων λόγω αυτών των εμπορικών παραμέτρων. Αυτή η παράμετρος διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο λόγω του αντίκτυπου που έχει στους υπόλοιπους παράγοντες όσον αφορά τον υπολογισμό του συνολικού κόστους αποκομιδής.

Προκειμένου να υπερνικηθεί η προαναφερθείσα ασάφεια του συμβατικού μοντέλου στις περιοχές που υπάρχουν κατοικίες, καθώς και η εμπορική δραστηριότητα, εισάγεται ένα νέο μοντέλο για την εκτίμηση της παραγωγής των στερεών αποβλήτων. Με βάση τα συμπεράσματα του δήμου Αθηναίων και τις ανάγκες αυτού του νέου μοντέλου, γίνεται μια διάκριση μεταξύ της αστικής και της εμπορικής παραγωγής στερεών αποβλήτων και αναπτύσσεται μια ενοποιημένη προσέγγιση για την αντιπροσώπευση της παραγωγής των στερεών αποβλήτων για την κάθε εμπορική δραστηριότητα. Αυτή η προσέγγιση περιγράφεται αναλυτικότερα σε επόμενη ενότητα.

Επομένως, στο μοντέλο που προτείνεται σε αυτήν την μελέτη, η τιμή της ημερήσιας παραγωγής στερεών απορριμμάτων ανά κάτοικο έχει υπολογιστεί ίση με 1,0 kg βασισμένη σε στατιστικές αναλύσεις (Δήμος Αθηναίων 2003) που εκτελέσθηκαν από το δήμο της Αθήνας, και η τιμή αυτή αφορά αυστηρά μόνο τις κατοικημένες περιοχές (χωρίς οποιαδήποτε εμπορική ή βιομηχανική δραστηριότητα).

Τέτοιοι περιορισμοί πρέπει να ληφθούν υπόψη προκειμένου να σχεδιαστεί μια επιτυχημένη διαδικασία αποκομιδής στερεών απορριμμάτων. Για να επιτευχθεί το βέλτιστο όφελος από τις υπηρεσίες αποκομιδής απορριμμάτων, απαιτείται ένας κατάλληλος προσδιορισμός της θέσης των κάδων απορριμμάτων στο χάρτη. Οι κάδοι απορριμμάτων που χρησιμοποιούνται από το δήμο της Αθήνας έχουν μια συνολική χωρητικότητα 1,10m³ με 90% πληρότητα. Σύμφωνα με αυτή την παράμετρο, και το γεγονός ότι η πυκνότητα των αστικών στερεών απορριμμάτων είναι περίπου 130 kg/m³, η ποσότητα των απορριμμάτων σε κάθε κάδο πρέπει να είναι περίπου 120-130kg (≈125kg). Αυτοί οι κάδοι πρέπει επίσης

να τοποθετηθούν με έναν τέτοιο τρόπο ώστε οι πολίτες να μην είναι υποχρεωμένοι να καλύπτουν μια μεγάλη απόσταση από τα σπίτια τους για να αποθέσουν τα απορρίμματά τους. Ταυτόχρονα, ο αριθμός των κάδων πρέπει να είναι ανάλογος προς τα παραγόμενα απορρίμματα, έτσι ώστε κανένας κάδος να μην παραμένει κενός καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας, δεδομένου ότι αυτό αυξάνει το κόστος συλλογής. Επιπλέον, στην περίπτωση μας τα απορρίμματα από τους κάδους συλλέγονται κάθε ημέρα (7 ημέρες την εβδομάδα).

Για όλους τους παραπάνω λόγους, για κάθε ομάδα περιοχών υπολογίζεται το ημερήσιο φορτίο των στερεών αποβλήτων. Οι απαραίτητοι παράγοντες είναι η κάθε μία περιοχή (σε m^2), ο αριθμός των καταστημάτων και ο αριθμός των πολιτών που ζουν σε κάθε μία από τις περιοχές αυτές. Αυτός ο αριθμός υπολογίζεται όπως εξηγείται διεξοδικά στην επόμενη ενότητα.

5.4. Καθαρισμός και εμπλουτισμός της ΒΔ

Προτού προχωρήσει η περιγραφή της έρευνας και της μεθοδολογίας που ακολουθήθηκε, ένα από τα πρώτα βήματα που πρέπει να γίνουν είναι ο καθαρισμός και ο εμπλουτισμός των δεδομένων της βάσης δεδομένων που καταγράφηκαν κατά τη διάρκεια του πιλοτικού προγράμματος που εκτελέστηκε από τον Δήμο Αθηναίων και βρίσκονται αποθηκευμένα στο τμήμα μηχανοργάνωσης της Διεύθυνσης Καθαριότητας του Δήμου.

Στο πλαίσιο του πιλοτικού αυτού προγράμματος τοποθετήθηκε σε κάθε απορριμματοφόρο όχημα, ένα ΠΣΕΘ, το οποίο σε συνδυασμό με το ΓΣΠ, δείχνει κάθε στιγμή τη θέση που βρίσκεται το συγκεκριμένο απορριμματοφόρο. Το δορυφορικό σύστημα εντοπισμού αποτελεί παγκοσμίως ένα δοκιμασμένο σύστημα εντοπισμού διάφορων αντικειμένων και σημείων στη γεωγραφική διάσταση. Παράλληλα, η χρησιμοποίηση του ΓΣΠ επιτρέπει τη σύνδεση του συστήματος, με τη γεωγραφική διάσταση (εντοπισμός οχημάτων επί χάρτου).

Επίσης, το απορριμματοφόρο ήταν εφοδιασμένο και με ΠΣΚΕ, το οποίο έδινε την δυνατότητα να στέλνει διάφορες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο (real-time), πίσω στη βάση του κέντρου διαχείρισης της Διεύθυνσης Καθαριότητας του Δήμου. Η ενσωμάτωση των γεωγραφικών δεδομένων του Δήμου Αθηναίων και η εισαγωγή των στοιχείων των δρομολογίων των οχημάτων πραγματοποιήθηκαν από τα γεωγραφικά δεδομένα εντός των ορίων του δήμου Αθηναίων, τα οποία παραχωρήθηκαν από τον δήμο Αθηναίων.

Επομένως, για δύο περίπου χρόνια (1998-2000) συγκεντρώθηκε ένας εξαιρετικά μεγάλος όγκος δεδομένων, ο οποίος αποθηκεύτηκε σε κάποιες βάσεις του Δήμου. Τα στοιχεία αυτά σχετίζονται άμεσα προφανώς με τη διαδρομή που το κάθε απορριμματοφόρο ακολούθησε και αφορούν στο χρόνο που χρειάστηκε για να γίνει η συνολική διαδρομή, την ταχύτητα του (μέγιστη και μέση), πόσες στάσεις έκανε σε κάθε πρόγραμμα αποκομιδής, πόσο χρόνο δαπάνησε για κάθε στάση (άδειασμα κάδου απορριμμάτων) ώστε να καθαρίσει τελείως τη περιοχή ευθύνης του. Τα δεδομένα αυτά, για λόγους που είναι πέρα από την παρούσα εργασία, δεν έχουν υποστεί κάποια ανάλυση τα τελευταία χρόνια, παρά τα σημαντικά οικονομικά οφέλη που υπόσχεται μια τέτοια διαδικασία. Η παρούσα εργασία και στο πλαίσιο μιας συνεργασίας που αναπτύχθηκε με το Δήμο Αθηναίων τα τελευταία χρόνια, στοχεύει εκτός των άλλων τα οποία θα αναπτυχθούν και θα αναλυθούν παρακάτω, και στην ανάλυση των δεδομένων αυτών έτσι ώστε οι χρήσιμες πληροφορίες που θα εξαχθούν να μπορέσουν να αξιοποιηθούν από το Δήμο με συγκεκριμένο οικονομικό όφελος, αλλά και να συγκριθούν με το προτεινόμενο μοντέλο.

Επομένως, ένα μέρος της έρευνας, στα πλαίσια της μοντελοποίησης, πραγματοποίησε τα ακόλουθα δύο στάδια για τα ήδη υπάρχοντα δεδομένα του δήμου Αθηναίων:

- *Καθαρισμός Δεδομένων* (Data Cleansing) της βάσης έτσι ώστε τα τελικά συμπεράσματα να είναι απολύτως ακριβή και τα αποτελέσματα από την εφαρμογή τους προσοδοφόρα, και
- *Εμπλουτισμός Δεδομένων* (Data Enhancement) συσχετίζοντας τα με άλλες πληροφορίες είτε δημογραφικές είτε στοιχεία ερευνών ώστε να οδηγηθούμε σε πιο πλούσια συμπεράσματα.

Στο σημείο αυτό, αν και είναι πέρα από την παρούσα εργασία, δεν αναπτύχθηκε κάποια τεχνολογία για τον καθαρισμό και εμπλουτισμό των δεδομένων, αλλά χρησιμοποιήθηκαν μόνο οι ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες. Εντούτοις, θα μπορούσε κανείς να αναφερθεί εν συντομία στα δύο αυτά στάδια που έλαβαν χώρα στα δεδομένα των βάσεων δεδομένων του δήμου Αθηναίων.

Στάδιο 1: Καθαρισμός Δεδομένων

Έχει γενικά παρατηρηθεί ότι τα δεδομένα μιας βάσης είναι πολύ πιθανό να μην είναι ομοιόμορφα. Επομένως, προτού προχωρήσει κανείς σε οποιαδήποτε ανάλυση είναι αναγκαίο να διαμορφώσει κατάλληλα τη βάση(εις) του. Η ανάγκη εύρεσης κατάλληλων τεχνικών για τον καθαρισμό των δεδομένων μιας βάσης

πρωτοπαρουσιάστηκε σε εταιρείες λόγω των αλλαγών στην κατάσταση των πελατών. Για παράδειγμα, κάποιοι πελάτες μπορεί να μετακομίσουν, να παντρευτούν ή να χωρίσουν και κατά συνέπεια τα δεδομένα των εταιρειών δεν ήταν πλέον ακριβή. Επιπλέον, οι καταχωρήσεις καινούριων δεδομένων σε μία βάση πραγματοποιούνται από ανθρώπους και κατά συνέπεια τα λάθη είναι αναπόφευκτα. Αυτά τα σενάρια μπορεί να οδηγήσουν σε διπλές εγγραφές. Μάλιστα πολλές από αυτές τις διπλές εγγραφές δεν μπορούν εύκολα να αναγνωριστούν αυτόματα. Ο **Πίνακας 5-4** παρουσιάζει μια τέτοια περίπτωση, η οποία λαμβάνει χώρα σε μία μεσιτική εταιρεία ακινήτων.

ΜΕΣΙΤΗΣ ΑΚΙΝΗΤΩΝ

ΚΩΔ	ΟΝΟΜΑ	ΕΤΑΙΡΕΙΑ	ΔΙΕΥΘΥΝΣΗ
M1	Παναγιώτα Β. Κάκαρη	Νέα Ακίνητα Α.Ε.	Μπακνανά 22, Αθήνα
M2	Κάκαρη, Π.	Νέα Ακίνητα	22 Μπακνανά, Αθήνα

Πίνακας 5-4: Σενάριο διπλών εγγραφών.

Το λεγόμενο δέσιμο (linking) αυτών των εγγραφών είναι ο πυρήνας της διαδικασίας καθαρισμού των δεδομένων μιας βάσης. Μια γνωστή κλασσική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της ανομοιομορφίας των δεδομένων ήταν η χρησιμοποίηση ενός «wrapper», ο οποίος θα δώσει στα δεδομένα της βάσης μας μια ενιαία μορφή. Ο «wrapper» είναι ένα σχέδιο ενός μοτίβου, όπου ένα κομμάτι κώδικα επιτρέπει να λειτουργούν μαζί εφαρμογές που δε θα μπορούσαν κανονικά λόγω των ασυμβίβαστων διεπαφών τους. Στο πλαίσιο της διατριβής χρησιμοποιήθηκαν κατάλληλες μέθοδοι καθαρισμού δεδομένων των βάσεων του δήμου Αθηναίων. Τέτοια προβλήματα μπορούν να παρουσιαστούν και στις περιπτώσεις που τα δεδομένα μας εξάγονται από μη δομημένα ή ημί-δομημένα αρχεία. (Bilenko and Mooney 2002).

Στάδιο 2: Εμπλουτισμός Δεδομένων

Ο κύριος στόχος του Εμπλουτισμού Δεδομένων, ιδιαίτερα σε έναν κόσμο που πρέπει να δίνει έμφαση στην εξυπηρέτηση του πολίτη (citizen relationship) είναι να φτιάξει το προφίλ των πολιτών κατά τέτοιο τρόπο ώστε αφενός να βοηθούν στην αύξηση και στην ποιότητα των υπηρεσιών, αφετέρου να συμβάλουν κατά το μέγιστο δυνατό τρόπο στην καλύτερη εξυπηρέτηση του πολίτη (citizen service). Στις επόμενες παραγράφους δίνονται κάποια παραδείγματα στοιχείων

που θα ενταχθούν στα δεδομένα της βάσης προκειμένου να εξαχθούν στο τέλος πιο χρήσιμα και πλούσια συμπεράσματα.

Δημογραφικά στοιχεία: Οι διαδρομές που κάνει το κάθε απορριμματοφόρο και ο όγκος των απορριμμάτων σε κάθε στάση είναι κάποια από τα στοιχεία τα οποία καταγράφονται μέσω του πιλοτικού προγράμματος του Δήμου Αθηναίων. Οπότε, τα στοιχεία αυτά καθώς και η χρήση των ΠΣΕΘ σε κάποια οχήματα του δήμου δημιουργούν συσχετίσεις με τα δημογραφικά στοιχεία όπως ο πληθυσμός του συγκεκριμένου οικοδομικού τετραγώνου, ο αριθμός των οικογενειών, κλπ.

Στοιχεία ερευνών: Μπορούν, επίσης, να προστεθούν και πληροφορίες γνωστές μέσω διαφόρων ερευνών όπως γένος, ηλικία, μορφωτικό επίπεδο, αλλά και καταναλωτική συμπεριφορά των κατοίκων των περιοχών αυτών μέσα από έρευνες, που έχουν γίνει από αντίστοιχα τμήματα «Marketing» διαφόρων εταιρειών προκειμένου να προωθήσουν καλύτερα τα προϊόντα τους. Τέτοιες έρευνες πραγματοποιούνται συνεχώς από εταιρείες ερευνών για λογαριασμό εταιρειών λιανικού εμπορίου προκειμένου να προσεγγίσουν καλύτερα τις «Ομάδες Στόχου» (target group) των ατόμων που τους ενδιαφέρει.

Ένας αποτελεσματικός τρόπος για ενδυνάμωση των δεδομένων είναι η σύνδεση σχετικής πληροφορίας που βρίσκεται σε έναν ή παραπάνω υπολογιστές με μία ενοποιημένη βάση. Τέτοιου είδους πράξεις γίνονται εύκολα με τη μορφή των «συνδέσεων των βάσεων δεδομένων» (database Joins). Η ουσία, όμως, της έρευνας σε αυτόν τον κλάδο δεν έγκειται τόσο στις τεχνικές δυνατότητες (π.χ. της SQL) όσο στην ποιοτική ανάλυση του ποια δεδομένα χρειάζονται συσχέτιση και ποιες μέθοδοι είναι πιο αποτελεσματικές σε κάθε περίπτωση.

Συνολικά, τα δεδομένα των βάσεων μετά τον καθαρισμό και τον εμπλουτισμό τους θα χρησιμοποιηθούν για τη σύγκριση του προτεινόμενου μοντέλου με το εμπειρικό, στο οποίο στην παρούσα φάση βασίζεται η αποκομιδή των δημοτικών στερεών αποβλήτων στο δήμο της Αθήνας.

5.5. Μεθοδολογία

Στην τρέχουσα μελέτη, η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι ταξινομημένη στις ακόλουθες φάσεις εφαρμογής:

- Ανάλυση της Περιοχής
- Σχεδιασμός της χωρικής γεω-βάσης σε περιβάλλον του ΓΣΠ
- Μοντελοποίηση και ανάλυση δεδομένων

5.5.1. Ανάλυση της περιοχής

Για την εκτίμηση του αριθμού πολιτών ανά πλευρά οδού, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η σχετική μελέτη με την περιοχή πραγματοποιήθηκε για μία περίοδο 12 μηνών σε συστηματική βάση. Για το σκοπό αυτό υλοποιήθηκαν φόρμες εισαγωγής στοιχείων, οι οποίες συμπληρώθηκαν χρησιμοποιώντας χάρτες της εξεταζόμενης περιοχής. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ήταν τα ακόλουθα:

- Κατοικίες (με έναν ή περισσότερους ορόφους) με τα διάφορα χαρακτηριστικά γνωρίσματά τους: τύπος κατοικίας, διεύθυνση οδού, αριθμός κουδουνιών, αριθμός ορόφων, χώρος στάθμευσης, χώρος αποθήκευσης, και επαγγελματικοί χώροι.
- Εμπορικές δραστηριότητες. Στην περίπτωση των εμπορικών καταστημάτων περιγράφεται ο τύπος δραστηριότητας τους και μια εκτίμηση του εμβαδού που καλύπτουν.
- Άλλοι τύποι χρήσης (μη εμπορικής δραστηριότητας), όπως σχολικά κτίρια, παιδικές χαρές, αθλητικές εγκαταστάσεις.
- Κενά οικόπεδα και χώροι χωρίς καμιά δραστηριότητα.
- Ακριβή θέση των κάδων απορριμμάτων. Έγινε καταγραφή της παρουσίας, αλλά και της απουσίας των κάδων απορριμμάτων στα πεζοδρόμια του κάθε οικοδομήματος.

Σχήμα 5-2: Μία φόρμα της χωρικής γεω-βάσης για την καταχώριση της χρήσης γης.

Επιπλέον, ταξινομήθηκαν οι εμπορικές δραστηριότητες και υπολογίστηκε η επιφάνεια που καλύπτεται από την καθεμία. Αφού συλλέχθηκαν οι συγκεκριμένες πληροφορίες, εξετάστηκε λεπτομερώς η ακεραιότητά τους. Μετά τον καθαρισμό και τον εμπλουτισμό, τα στοιχεία εισήχθησαν σε μία χωρική γεω-βάση **Σχήμα 5-2** σε ένα περιβάλλον Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (ΓΣΠ).

5.5.2. Σχεδίαση της χωρικής γεω-βάσης

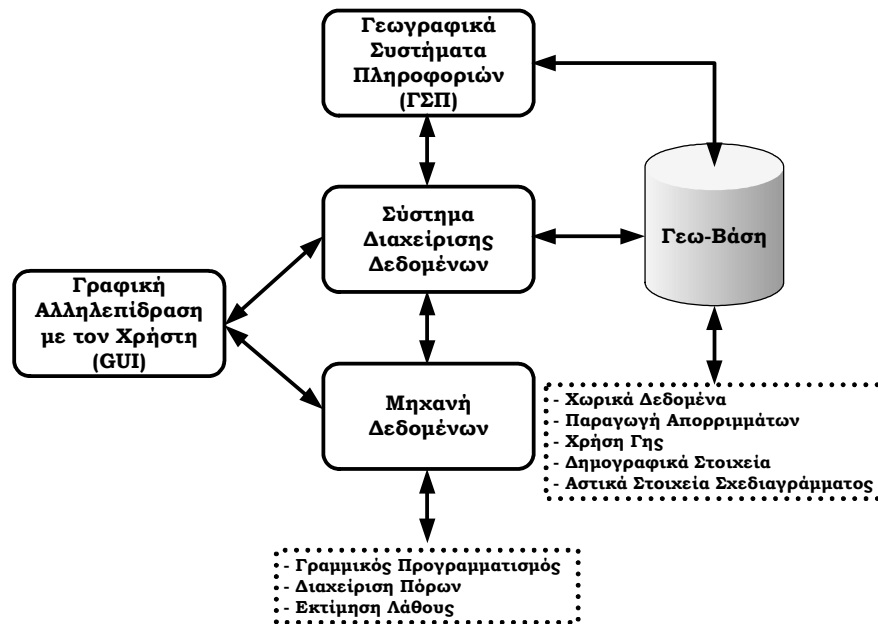
Η χωρική γεω-βάση σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε σε περιβάλλον ΓΣΠ ArcGIS (ESRI) και περιέχει τους ακόλουθους τύπους γεω-χωρικών δεδομένων **Πίνακας 5-5**. Ακολουθώντας, οι τύποι γεω-διορθώθηκαν στο εγκάρσιο σύστημα μερκατορικής προβολής και στο ελληνικό γεωδαιτικό σύστημα αναφοράς (HGRS'87).

Γεω-Δεδομένα	Τύπος	Γεωμετρική Αναπαράσταση
Οδικό Δίκτυο	Διάνυσμα	Γραμμή / Τόξο
Διευθύνσεις Δρόμων	Πίνακας	---
Κάδοι Απορριμμάτων	Διάνυσμα	Σημείο
Πυκνότητα Πληθυσμού / Οικοδομικό τετράγωνο	Πίνακας	---
Κάλυψη Γης / Χρήση Γης	Διάνυσμα	Πολύγωνο
Χάρτης Περιοχής	Raster	---

Πίνακας 5-5: Χωρικοί τύποι γεω-δεδομένων και η γεωμετρική αντιπροσώπευσή τους.

Η γεω-βάση ελέγχεται και προσεγγίζεται από ένα σύστημα διαχείρισης δεδομένων. Στο **Σχήμα 5-3** παρουσιάζεται ένα ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης παραγωγής απορριμμάτων. Το σύστημα αυτό περιέχει το σύστημα διαχείρισης δεδομένων και τη μηχανή μοντελοποίησης δεδομένων, η λειτουργία των οποίων περιγράφεται, επίσης, λεπτομερώς στην τρέχουσα εργασία.

Στην παρούσα βάση δεδομένων, η αναζήτηση δεδομένων (data querying) πραγματοποιήθηκε προκειμένου να ληφθούν πληροφορίες σχετικά με την εμπορική κυκλοφορία της περιοχής, η οποία συσχετίζεται με την παραγωγικότητα των απορριμμάτων (παράμετροι TotArea, TotWaste), με τον αριθμό των κατοίκων ανά περιοχή (NumberOfCitizens) καθώς και με επιπρόσθετες παραμέτρους, που έχουν επιπτώσεις στη διαδικασία παραγωγής και αποκομιδής των απορριμμάτων. Η αναζήτηση των δεδομένων εκτελέστηκε άμεσα στη βάση δεδομένων χρησιμοποιώντας τη γλώσσα προγραμματισμού SQL.



Σχήμα 5-3: Ολοκληρωμένο Σύστημα Διαχείρισης Παραγωγής Αστικών Στερεών.

5.5.3. Μοντελοποίηση και ανάλυση δεδομένων

Η μοντελοποίηση των δεδομένων επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας τη μηχανή δεδομένων. Αυτό το υποσύστημα επιτρέπει τον υπολογισμό των κατάλληλων συντελεστών χρησιμοποιώντας τη μέθοδο ελαχίστων τετραγώνων (Least Square) καθώς επίσης και το χειρισμό των πόρων. Ως πόροι καθορίζονται τα αρχικά και τα τελικά σημεία φόρτωσης.

Οι εφαρμογές για τον υπολογισμό των αρχικών και τελικών σημείων φόρτωσης ρυθμίζονται από το σύστημα διαχείρισης δεδομένων (Σχήμα 3), το οποίο επιστρέφει έναν τελικό χάρτη με τον κατάλληλο αριθμό και τη θέση των κάδων απορριμμάτων.

5.5.3.1. Αρχικός υπολογισμός σημείων φόρτωσης

Η εφαρμογή για τον υπολογισμό των αρχικών σημείων φόρτωσης βασίστηκε στην κατ' εκτίμηση καθημερινή παραγωγή των αστικών απορριμμάτων ανά κάτοικο για το εξεταζόμενο οδικό τμήμα και τον αριθμό των κατοίκων για κάθε πλευρά του ίδιου δρόμου.

Κατηγορία	Τύπος Εμπορικής Δραστηριότητας
A	Υπεραγορά, Αρτοποιείο, Εστιατόριο, Παντοπωλείο, Μανάβικο, Ψαραγορά, Fast Foods, Μπαρ, Νυχτερινό Μαγαζί, Καφετέρια, κ.λπ.
B	Κρεοπωλείο, Ζαχαροπλαστείο, Κομμωτήριο, Κάβα Κρασιών, Ανθοπωλείο, Πιτσαρία, κ.λπ.
Γ	Θέατρο, Εκκλησία, Σχολείο, Βιβλιοπωλείο, Καφενείο, Φαρμακείο, Ταχυδρομείο, κ.λπ.
Δ	Ασφαλιστική Εταιρεία, Επαγγελματική Στέγη, Παρεκκλήσι, Κατάστημα τυχερών παιγνιδιών, Φροντιστήριο, Κατάστημα Παπουτσιών, Κατάστημα Ρούχων, Κοσμηματοπωλείο, Λέσχη, κ.λπ.

Πίνακας 5-6: Κατηγορίες εμπορικών δραστηριοτήτων σχετικά με την εμπορική τους κίνηση.

Για τον υπολογισμό των παραχθέντων απορριμμάτων των καταστημάτων και των εμπορικών μονάδων, το πρόγραμμα είναι δομημένο ως εξής:

- Κατηγοριοποίηση των εμπορικών μονάδων σύμφωνα με την παραγωγή των απορριμμάτων τους. Αφότου πραγματοποιήθηκε η έρευνα στην εξεταζόμενη περιοχή, η κατηγοριοποίηση σε τέσσερις (4) σημαντικές κατηγορίες ήταν η βέλτιστη λύση για τον υπολογισμό ενός συντελεστή βαρύτητας για τις εμπορικές μονάδες. Παραδείγματος χάριν, τα Σούπερ Μάρκετ θεωρούνται ότι παράγουν τα υψηλότερα ποσά απορριμμάτων, ενώ τα κοσμηματοπωλεία παράγουν μια πολύ μικρή ποσότητα απορριμμάτων. Οι επιλεγμένες κατηγορίες σημειώθηκαν ως Α, Β, Γ και Δ (από τον υψηλότερο στο χαμηλότερο συντελεστή παραγωγής απορριμμάτων ανά επιφάνεια) και θεωρήθηκαν ως άγνωστες τιμές που θα υπολογιστούν από το μοντέλο (**Πίνακας 5-6**). Οι μονάδες μέτρησης των συντελεστών είναι kg/m². Στον παραπάνω πίνακα περιλαμβάνονται και Εκκλησίες, Σχολεία, Παρεκκλήσια, κτλ, τα οποία βέβαια δεν ανήκουν στις «εμπορικές» δραστηριότητες, αλλά για τη διευκόλυνση της μελέτης χρησιμοποιείται ο γενικός αυτός τίτλος, για να κατηγοριοποιηθούν όλες οι υπόλοιπες μη-οικιακές δραστηριότητες.
- b) Υπολογισμός των συντελεστών Α, Β, Γ, Δ, ο οποίος εκτελέσθηκε με τον ακόλουθο τύπο:

$$\text{"NumberOfCitizens"} * 1\text{kg} + A * \text{"TotAreaA"} + B * \text{"TotAreaB"} + C * \text{"TotAreaC"} + D * \text{"TotAreaD"} = \text{TotWaste}$$

5-1

όπου το *NumberOfCitizens* αντιπροσωπεύει τον αριθμό των κατοίκων που διαμένουν μόνιμα σε μια προκαθορισμένη περιοχή και το *TotAreaA* (*B*, *Γ*, *Δ*) είναι η συνολική επιφάνεια των εμπορικών δραστηριοτήτων της κατηγορίας **A** (**B**, **Γ**, **Δ**) σε m². Επιπλέον, η παράμετρος *TotWaste* (σε kg) αντιπροσωπεύει το συνολικό ποσό των δημοτικών στερεών αποβλήτων που παράγονται σε ένα μέρος της εξεταζόμενης περιοχής (αυτό το μέρος μπορεί να καλύψει οποιοδήποτε αριθμό επιλεγμένων εκ των προτέρων οικοπέδων).

Το *TotWaste* από κάθε μία ξεχωριστή περιοχή της εξετασμένης περιοχής είναι βασισμένο στις ετήσιες καταγραφές της παραγωγής στερεών αποβλήτων αυτής της συγκεκριμένης περιοχής. Στην πραγματικότητα, διάφορες έρευνες πραγματοποιήθηκαν για να υπολογίσουν την ποσότητα των απορριμμάτων που παράγονται από κάθε μέρος της εξεταζόμενης περιοχής και αυτά τα στοιχεία εισάγονται στην ανωτέρω εξίσωση. Ο Δήμος Αθηναίων είχε εγκαταστήσει αισθητήρες στα απορριμματοφόρα που εξυπηρετούσαν την συγκεκριμένη περιοχή και το συγκεκριμένο σύστημα κατέγραφε το βάρος των απορριμμάτων των κάδων που συλλεγόταν από την περιοχή αυτή. Επιπλέον, το μέσο ποσό των αποβλήτων που παράγεται από κάθε πολίτη στο δήμο Αθηναίων (απορρίμματα κατοικιών) τίθεται ίσο με 1 kg/κατ/μέρα, σύμφωνα με τα στατιστικά στοιχεία του δήμου Αθηναίων (Δήμος Αθηναίων 2003).

Η συνολική εξεταζόμενη περιοχή χωρίζεται κατά την πειραματική διαδικασία με τρεις τρόπους. Η πρώτη διαίρεση της περιοχής εφαρμόστηκε στη γραφική αλληλεπίδραση του Γεωγραφικού Συστήματος Πληροφοριών (ΓΣΠ) με έναν τυχαίο τρόπο και κατέληξε σε οκτώ (8) μη-επικαλυπτόμενα μέρη (περιοχές), οι οποίες καλύπτουν τη συνολική εξεταζόμενη περιοχή. Η ίδια μέθοδος ακολουθήθηκε για τη δημιουργία των άλλων δύο συνόλων περιοχών, κατά τα οποία η συγκεκριμένη περιοχή διαιρέθηκε σε δεκαέξι (16) και εικοσιοκτώ (28) περιοχές, αντίστοιχα.

Η παραπάνω εξίσωση 5-1 υπολογίστηκε για κάθε προκαθορισμένη υπό-περιοχή. Οι συντελεστές **A**, **B**, **Γ**, **Δ** υπολογίστηκαν στη μηχανή δεδομένων από το συνδυασμό των ανωτέρω εξισώσεων χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των Ελαχίστων Τετραγώνων όπως περιγράφεται στην ενότητα της μεθόδου πολλαπλής παλινδρόμησης για τη διαχείριση των απορριμμάτων. Επιπλέον, το συνολικό ποσό των παραγόμενων εμπορικών απορριμμάτων παρήχθη με τον πολλαπλασιασμό της επιφάνειας της κάθε εμπορικής μονάδας με τον αντίστοιχο συντελεστή της κατηγορίας του.

Επομένως, σε κάθε προκαθορισμένη περιοχή, το συνολικό ποσό των αστικών απορριμμάτων ισούται με το άθροισμα των παραγόμενων απορριμμάτων από τις κατοικίες και της παραγόμενης ποσότητας απορριμμάτων που προκύπτει από την εμπορική χρήση της κάθε περιοχής.

Ο αρχικός υπολογισμός των σημείων φόρτωσης εξετάζει τον υπολογισμό των συνολικών αστικών απορριμμάτων χωρίς οποιονδήποτε περιορισμό. Αντίθετα, ο τελικός υπολογισμός σημείων φόρτωσης (που εξηγείται στην επόμενη ενότητα) εξετάζει τον υπολογισμό των συνολικών δημοτικών απορριμμάτων σύμφωνα με τους περιορισμούς, οι οποίοι οδηγούν σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα.

5.5.3.2. Τελικός υπολογισμός σημείων φόρτωσης

Για τις τελικές θέσεις σημείων φόρτωσης διάφοροι περιορισμοί λαμβάνονται υπόψη, οι οποίοι οδηγούν σε πιο ρεαλιστικά αποτελέσματα. Για τον υπολογισμό της θέσης ενός τελικού σημείου φόρτωσης λαμβάνονται υπόψη οποιοιδήποτε περιορισμοί του παρόντος οδικού δικτύου (αδιέξοδα, στενοί οδοί, μονόδρομοι, κ.λπ.). Κατόπιν, τα αρχικά σημεία φόρτωσης και τα αντίστοιχα βάρη αναπρογραμματίζονται πριν καθοριστούν τα τελικά σημεία στην πειραματική περιοχή.

Αυτή η αναδιοργάνωση των σημείων φόρτωσης είναι απαραίτητη λόγω των ιδιαιτεροτήτων του οδικού δικτύου. Ένα απορριμματοφόρο πρέπει να σεβαστεί τις μονοδρομήσεις και δεν μπορεί να έχει πρόσβαση σε πολύ στενές οδούς, σε αδιέξοδα ή σε πεζόδρομους. Όλα τα σημεία φόρτωσης στερεών αποβλήτων στις προηγούμενες περιοχές πρέπει να μεταφερθούν στις πιο κοντινές προσιτές διασταυρώσεις, ακολουθώντας τους προκαθορισμένους αλγορίθμους που εφαρμόζονται υπό μορφή φίλτρων. Ως εκ τούτου, ο στόχος αυτών των φίλτρων είναι να προσδιοριστεί το κάθε σημείο, στο παράθυρο διαλόγου του ΓΣΠ, το οποίο είναι εγκατεστημένο σε περιοχές που δεν είναι προσιτές από τα απορριμματοφόρα και να μετακινηθεί το φορτίο τους στις πιο κοντινές διασταυρώσεις. Εντούτοις, οι αμελητέες ποσότητες στερεών αποβλήτων δεν υπολογίζονται για την κατανομή των κάδων απορριμμάτων.

Από την άλλη μεριά, λαμβάνοντας υπόψη την κοινωνική και περιβαλλοντική επίδραση σε μια συγκεκριμένη περιοχή, πρέπει να αναφερθεί ότι ο κανόνας, ο οποίος καθορίζει την ελάχιστη ποσότητα απορριμμάτων ανά κάδο μπορεί, σε ορισμένες περιπτώσεις, να παραβιαστεί (π.χ. πρέπει να υπάρχει μια λογική απόσταση που θα πρέπει να διανύει κάποιος κάτοικος προς ένα κάδο απορριμμάτων για την απόθεση των οικιακών του απορριμμάτων, κ.λπ.).

Σύμφωνα με όλα τα παραπάνω, τα τελικά σημεία φόρτωσης ανακατανέμονται και ο αριθμός των κάδων απορριμμάτων προέρχεται από τη διαίρεση της ποσότητας των απορριμμάτων στο τμήμα των σημείων φόρτωσης μιας περιοχής (ένα σύνολο δρόμων) με τη χωρητικότητα των κάδων που χρησιμοποιεί ο δήμος.

5.5.3.3. Μέθοδος πολλαπλής παλινδρόμησης για τη διαχείριση απορριμμάτων

Είναι προφανές ότι το ποσοστό παραγωγής απορριμμάτων μιας περιοχής αυξάνεται όσο αυξάνεται ο πληθυσμός της περιοχής και η εμπορική της κίνηση. Στο υπόλοιπο μέρος της εργασίας, εξετάζεται ένα ισοδύναμο ποσοστό παραγωγής απορριμμάτων ίσο με τον πληθυσμό μιας αμιγούς κατοικημένης περιοχής (μια περιοχή χωρίς εμπορικές ή βιομηχανικές δραστηριότητες). Εντούτοις, το ποσοστό παραγωγής απορριμμάτων στις μικτές περιοχές (κατοικημένες – εμπορικές – βιομηχανικές) συσχετίζεται ιδιαίτερα με τον αριθμό, το μέγεθος, και το συγκεκριμένο τύπο των σχετικών δραστηριοτήτων.

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η επίδραση αυτών των δραστηριοτήτων στην παραγωγή των αστικών απορριμμάτων, οι διάφορες δραστηριότητες ταξινομήθηκαν σε ευδιάκριτες κατηγορίες παραγωγής απορριμμάτων. Επιπλέον, βεβαιώθηκε ότι το ποσοστό παραγωγής απορριμμάτων κάθε μεμονωμένης δραστηριότητας είναι ανάλογο προς την περιοχή του. Επομένως, υπολογίστηκε η συνολική περιοχή (σε m^2) κάθε κατηγορίας παραγωγής απορριμμάτων στις πολυάριθμες συγκεκριμένες περιοχές του δήμου Αθηναίων με επιτόπου μετρήσεις. Η μέθοδος της πολλαπλής παλινδρόμησης χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να υπολογιστούν οι συντελεστές παλινδρόμησης της κάθε κατηγορίας παραγωγής απορριμμάτων. Η παραχθείσα εξίσωση παλινδρόμησης εκτιμά το ποσοστό παραγωγής απορριμμάτων σε μια δεδομένη περιοχή, βασισμένη στον πληθυσμό της περιοχής καθώς επίσης, τον αριθμό και το μεγέθος των βιομηχανικών και εμπορικών σχετικών δραστηριοτήτων.

Οι πολλαπλές παλινδρομήσεις χρησιμοποιήθηκαν για να προβλέψουν τη διαφορά του ποσοστού παραγωγής απορριμμάτων σε μια περιοχή, βασισμένη στους γραμμικούς συνδυασμούς του πληθυσμού, και στην περιοχή της κάθε κατηγορίας παραγωγής, οι οποίοι θεωρούνται ανεξάρτητες μεταβλητές. Η πολλαπλή παλινδρόμηση μπορεί να καθορίσει ότι το σύνολο αυτό των ανεξάρτητων μεταβλητών εξηγεί ένα ποσοστό της διαφοράς στην εξαρτώμενη μεταβλητή (ποσοστό παραγωγής απορριμμάτων) σε σημαντικό επίπεδο (δοκιμή σημασίας του R^2), και μπορεί επίσης να καθιερώσει την ανάλογη σημασία της

πρόβλεψης των ανεξάρτητων μεταβλητών (συγκρίνοντας τα «beta» βάρη). Οι εκτιμήσεις (συντελεστές β) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να κατασκευάσουν την εξίσωση πρόβλεψης παραγωγής των απορριμμάτων και να παράγουν αποτελέσματα πρόβλεψης σε μια μεταβλητή για περαιτέρω ανάλυση. Κατά συνέπεια, η εξίσωση παραγωγής απορριμμάτων που προκύπτει μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να υπολογίσει τα ποσοστά παραγωγής απορριμμάτων σε άλλες περιοχές, προκειμένου να βελτιωθεί η διαχείριση και ο προγραμματισμός των απορριμμάτων.

Για το συγκεκριμένο πρόβλημα μοντελοποίησης της παραγωγής απορριμμάτων, η εξίσωση πολλαπλής παλινδρόμησης λαμβάνει τη μορφή:

$$y = f(\vec{x}) = a + \sum_{j=1}^4 b_j x_j \quad 5-2$$

Το a είναι ο πληθυσμός της περιοχής, το b_j είναι ο συντελεστής παλινδρόμησης σχετικός με την κατηγορία παραγωγής απορριμμάτων j , και x_j είναι η συνολική περιοχή (σε m^2) κάθε δραστηριότητας στην κατηγορία παραγωγής απορριμμάτων j . Επίσης, δεδομένου ότι εξετάζεται η ισοδύναμη παραγωγή απορριμμάτων, ο συντελεστής παλινδρόμησης σχετικά με το συνολικό πληθυσμό της εξετασμένης περιοχής είναι ίσος με 1.

Στη συνέχεια, υπολογίστηκαν οι βέλτιστες τιμές των συντελεστών παλινδρόμησης b_j που παράγουν το λιγότερο λάθος. Όπου a_i είναι ο πληθυσμός, το $x_{i,j}$ είναι η περιοχή (σε m^2) των δραστηριοτήτων κατηγορίας j , και y_i η αναλογία παραγωγής στην περιοχή i .

Εάν n είναι οι περιοχές που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία της πολλαπλάσιας παλινδρόμησης, και οι εμπορικές και βιομηχανικές δραστηριότητες ομαδοποιούνται σε τέσσερις (4) κατηγορίες παραγωγής απορριμμάτων (κατηγορίες **A**, **B**, **Γ** και **Δ**), κατόπιν το λάθος που εισάγεται από το μοντέλο παραγωγής απορριμμάτων δίνεται από την εξίσωση 5-3.

$$\Pi = \sum_{i=1}^n [y_i - f(\vec{x}_i)]^2 = \sum_{i=1}^n \left[y_i - \left(a_i + \sum_{j=1}^4 b_j x_{i,j} \right) \right]^2 \quad 5-3$$

(Average Square Error)

Ο πολλαπλός συντελεστής συσχετισμού παλινδρόμησης (multiple regression correlation coefficient) θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για να επικυρώσει την ακρίβεια της πρόβλεψης του γραμμικού μοντέλου της παραγωγής αστικών απορριμμάτων. Το MRCC, αποκαλούμενος επίσης και R^2 είναι το ποσοστό (%) της διαφοράς του ποσοστού παραγωγής απορριμμάτων που εξηγείται

συλλογικά από τον πληθυσμό και του συνολικού εμβαδού της κάθε κατηγορίας παραγωγής αστικών απορριμμάτων. Το R^2 μπορεί να υπολογιστεί για την παραγωγή των απορριμμάτων μετά την λήψη των βέλτιστων συντελεστών παλινδρόμησης από την εξίσωση 5-4.

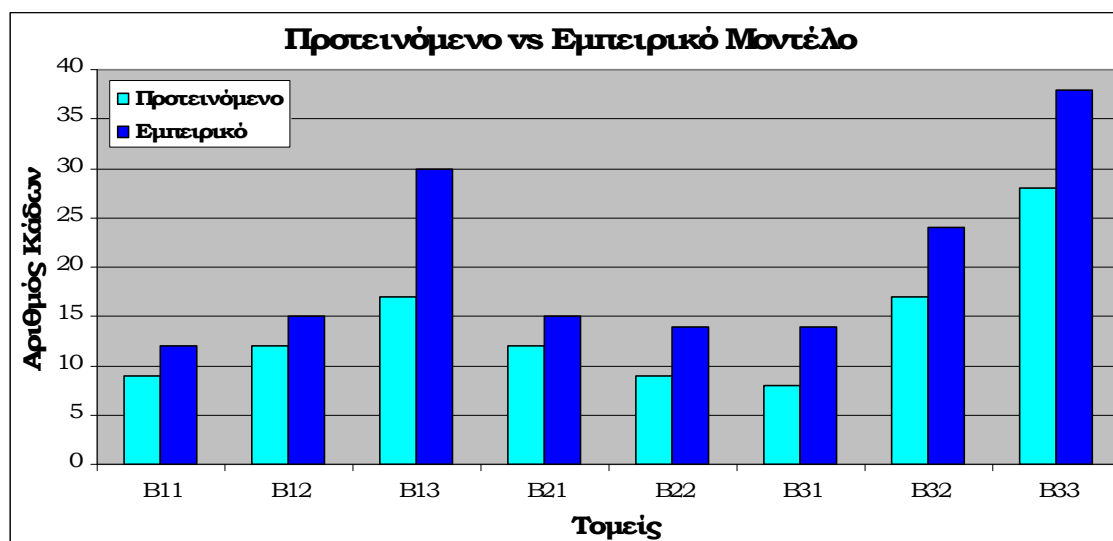
$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - f(\bar{x}_i))^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} = 1 - \frac{\sum \left(y_i - \left(a_i + \sum_{j=1}^4 b_j x_{i,j} \right) \right)^2}{\sum (y_i - \bar{y})^2} \quad 5-4$$

Η ακρίβεια του μοντέλου παραγωγής αστικών απορριμμάτων θα μπορούσε να επηρεαστεί από τον τρόπο με τον οποίο οι διάφορες εμπορικές και βιομηχανικές δραστηριότητες διαιρούνται σε κατηγορίες παραγωγής απορριμμάτων. Ακόμα κι αν είναι δυνατό να ταξινομηθούν οι διάφορες δραστηριότητες με βάση τα ποσοστά της παραγωγής απορριμμάτων, ο προσδιορισμός της θέσης των ορίων μεταξύ των παρακείμενων κατηγοριών παραγωγής δεν είναι εύκολο να υπολογιστεί. Προκειμένου να ληφθεί η βέλτιστη ταξινόμηση, ένας αλγόριθμος ελαχίστων τετραγώνων εφαρμόστηκε σε διαφορετικές περιπτώσεις ταξινόμησης. Η βέλτιστη κατηγοριοποίηση ήταν αυτή που παρήγαγε το μεγαλύτερο R^2 έχοντας λάβει υπόψη προηγούμενες χρήσεις του μοντέλου και σε ορισμένες περιπτώσεις χρειάστηκε να γίνει και μετασχηματισμός των δεδομένων για να προκύψει το βέλτιστο αποτέλεσμα.

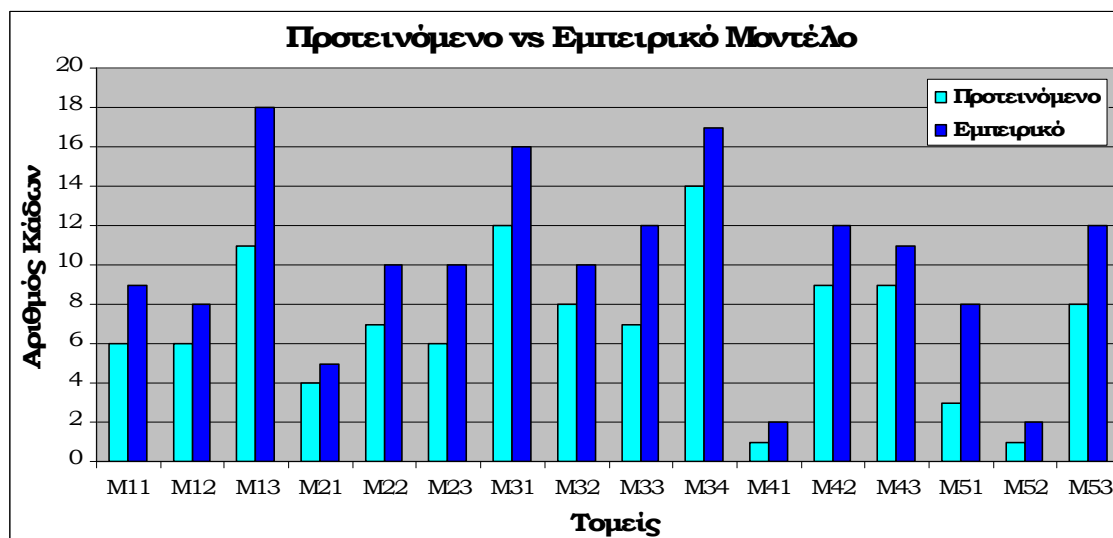
5.6. Αποτελέσματα

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προέρχονται από την υλοποίηση του προτεινόμενου μοντέλου. Τα σχήματα: **Σχήμα 5-4**, **Σχήμα 5-5** και **Σχήμα 5-6** παρουσιάζουν το σύνολο των κάδων απορριμμάτων σε σχέση με τους τομείς που έχει διαιρεθεί η εξεταζόμενη περιοχή (8, 16 και 28 τομείς, αντίστοιχα). Αναλυτικά, στα διαγράμματα, ο άξονας των X αντιπροσωπεύει τις προκαθορισμένες περιοχές/τομείς, ενώ ο άξονας των Y αντιπροσωπεύει τους υπολογιζόμενους συνολικούς κάδους απορριμμάτων. Αυτά τα διαγράμματα απεικονίζουν τη σύγκριση των αποτελεσμάτων που παρέχονται από το δήμο της Αθήνας (εμπειρικό μοντέλο) και εκείνων των αποτελεσμάτων που παράγονται από το προτεινόμενο μοντέλο. Το εμπειρικό μοντέλο παρουσιάζει τους κάδους, που ο δήμος έχει τοποθετήσει και χρησιμοποιεί σε αυτούς τους τομείς, ενώ το προτεινόμενο μοντέλο παρουσιάζει τους θεωρητικούς κάδους, οι οποίοι έχουν υπολογιστεί από το μοντέλο αυτό και πρέπει να χρησιμοποιηθούν προκειμένου

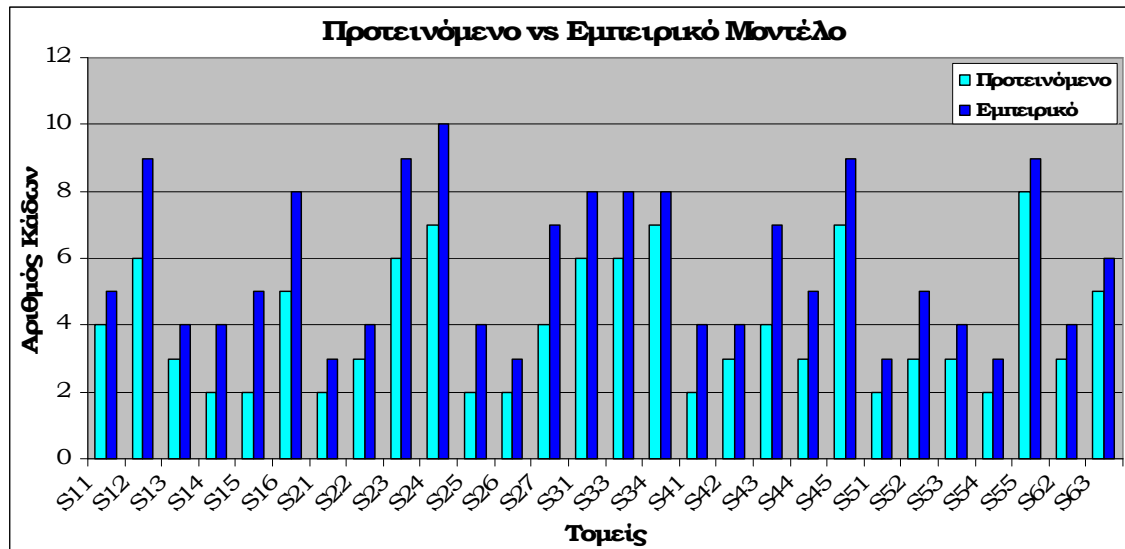
να καλυφθούν οι ανάγκες του συγκεκριμένου τομέα. Το εμπειρικό μοντέλο έχει δημιουργηθεί από τους υπάρχοντες κάδους σύμφωνα με τις επιτόπου μετρήσεις που είχαν πραγματοποιηθεί στον κάθε τομέα.



Σχήμα 5-4: Διάγραμμα που απεικονίζει τη διαφορά των κάδων μεταξύ του προτεινόμενου μοντέλου και του εμπειρικού μοντέλου του δήμου της Αθήνας. Η εξεταζόμενη περιοχή έχει διαιρεθεί σε Οκτώ (8) τομείς σε αυτήν την πειραματική ενότητα.



Σχήμα 5-5: Διάγραμμα που απεικονίζει τη διαφορά των κάδων μεταξύ του προτεινόμενου μοντέλου και του εμπειρικού μοντέλου του δήμου της Αθήνας. Η εξεταζόμενη περιοχή έχει διαιρεθεί σε Δεκάξι (16) τομείς σε αυτήν την πειραματική ενότητα.



Σχήμα 5-6: Διάγραμμα που απεικονίζει τη διαφορά των κάδων μεταξύ του προτεινόμενου μοντέλου και του εμπειρικού μοντέλου του δήμου της Αθήνας. Η εξεταζόμενη περιοχή έχει διαιρεθεί σε Είκοσι Οκτώ (28) τομείς σε αυτήν την πειραματική ενότητα.

Τρία διαφορετικά σετ πειραμάτων έχουν υλοποιηθεί για τους προκαθορισμένους τομείς, προκειμένου να δημιουργηθούν τα τρία αντίστοιχα διαγράμματα. Παραδειγματος χάριν, στο πρώτο σύνολο, η εξεταζόμενη περιοχή έχει διαιρεθεί σε 8 τομείς (Μεγάλοι Τομείς) (**Σχήμα 5-7**).

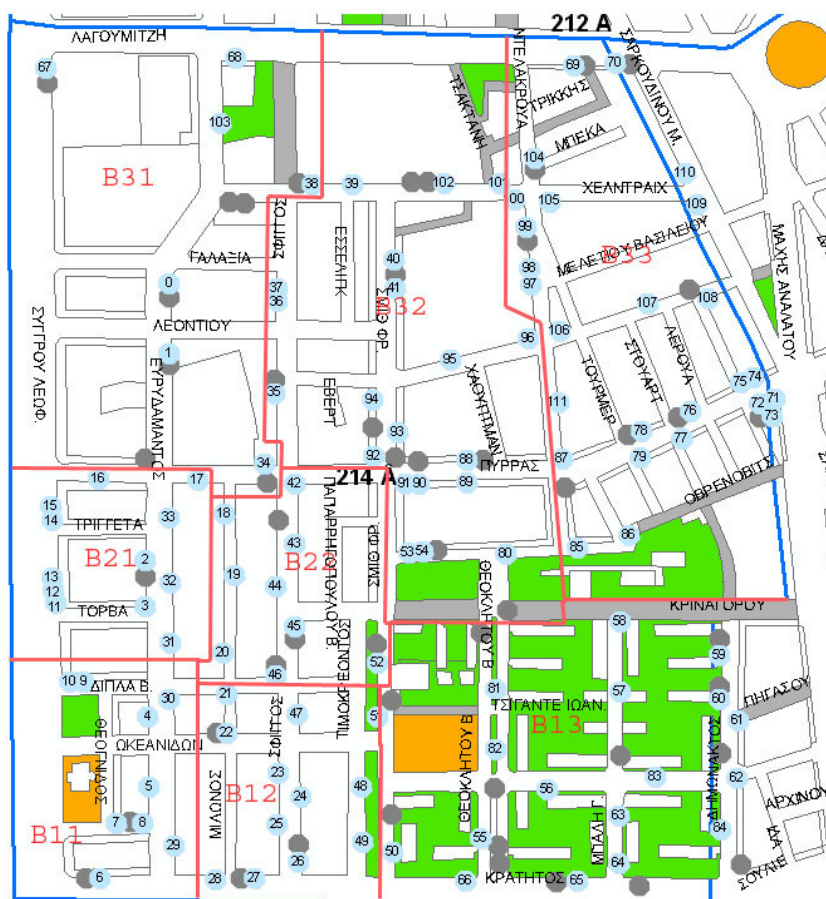
Τομέας	Πληθυσμός	Κατ. Α (m ²)	Κατ. Β (m ²)	Κατ. Γ (m ²)	Κατ. Δ (m ²)	Απορρίμματα (kg)
B11	510	830	390	1.240	3.020	1.100
B12	807	460	810	770	3.240	1.400
B13	1.459	570	200	2.510	710	2.100
B21	577	1.640	80	200	4.260	1.400
B22	969	70	440	140	1.370	1.100
B31	480	560	230	1.160	3.110	900
B32	1.618	660	230	300	2.140	2.100
B33	2.221	2.070	1.010	1.605	6.365	3.500

Πίνακας 5-7: Οι οκτώ (8) τομείς, στους οποίους έχει διαιρεθεί η εξεταζόμενη περιοχή, ο πληθυσμός του κάθε τομέα, το συνολικό εμβαδόν (m²) των τεσσάρων κατηγοριών (Α, Β, Γ, Δ) και η ημερήσια παραγωγή απορριμμάτων (Kg).

Από τη βάση δεδομένων, έχει υπολογιστεί ο αριθμός κατοίκων καθώς επίσης, και το συνολικό εμβαδόν (σε m²) των εμπορικών καταστημάτων των κατηγοριών Α, Β, Γ και Δ για τον καθένα από τους οκτώ (8) τομείς (**Πίνακας 5-7**).

Οι συντελεστές παλινδρόμησης για τις κατηγορίες Α, Β, Γ, Δ και οι προτεινόμενοι κάδοι για κάθε συγκεκριμένη περιοχή υπολογίζονται γνωρίζοντας το *totwaste*, δεδομένου ότι έχει περιγραφεί στην προηγούμενη ενότητα.

Τέλος, τα αποτελέσματα του προτεινόμενου μοντέλου συγκρίνονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που χρησιμοποιούνται προς το παρόν από το δήμο. Η ίδια διαδικασία έχει ακολουθηθεί και για τα άλλα δύο σύνολα πειραμάτων, στα οποία η περιοχή μελέτης διαιρέθηκε σε 16 και 28 τομείς αντίστοιχα.



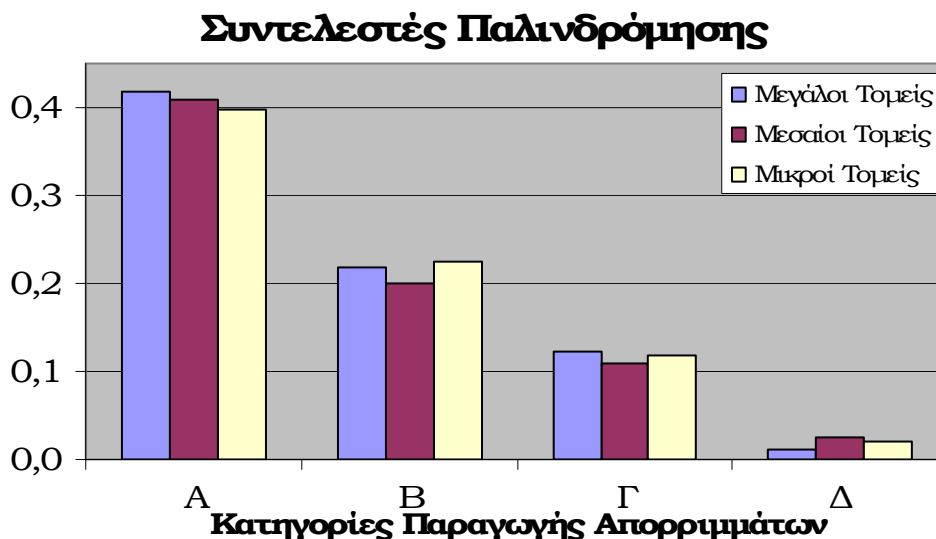
Σχήμα 5-7: Ο χάρτης της περιοχής διαιρούμενος σε 8 τομείς (Μεγάλοι Τομείς).

Βασισμένος στο προτεινόμενο μοντέλο, μόνο τα 112 αριθμημένα σημεία αντιπροσωπεύουν τους απαραίτητους κάδους απορριμμάτων. Επιπρόσθετα στους 112 κάδους, ο δήμος Αθηναίων χρησιμοποιεί επιπλέον 50 κάδους που παρουσιάζονται με γκρι σημεία στον χάρτη (κλίμακα 1:5.000).

Ένα γενικό συμπέρασμα για όλα τα πειράματα είναι ότι το προτεινόμενο μοντέλο συστήνει ένα μικρότερο αριθμό κάδων απορριμμάτων σε σύγκριση με τους κάδους που χρησιμοποιούνται προς το παρόν από το δήμο για τον κάθε συγκεκριμένο τομέα. Επομένως, ενώ ο Δήμος Αθηναίων χρησιμοποιεί, στην παρούσα φάση, 162 κάδους απορριμμάτων για να καλύψει όλη την εξεταζόμενη περιοχή, το μοντέλο προτείνει μόνο 112 κάδους, οι οποίοι καλύπτουν αποτελεσματικά τα παραγόμενα αστικά απορρίμματα (**Σχήμα 5-7**). Συνεπώς, αυτή η διαφορά των 50 περίπου κάδων, μεταξύ του εμπειρικού και του προτεινόμενου μοντέλου θα μπορούσε να είναι πολύ κερδοφόρα για το δήμο επειδή μειώνει εμφανώς τον απαιτούμενο χρόνο αποκομιδής και μεταφοράς αστικών απορριμμάτων και τελικά το συνολικό κόστος.

Επιπλέον, υπάρχουν μερικές δυναμικές παράμετροι που διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό των διαγραμμάτων. Αυτές οι παράμετροι είναι:

- *Ο αριθμός των προκαθορισμένων τομέων.* Η διαίρεση της εξεταζόμενης περιοχής σε 8, 16 και 28 τομείς επιλέχθηκε και υλοποιήθηκε τυχαία. Ο συνολικός αριθμός κάδων στη περιοχή είναι 162, επομένως το συνολικό άθροισμα των κάδων όλων των επιμέρους τομέων είναι 162. Επιπλέον, κάθε περιοχή δεν έχει τον ίδιο αριθμό κάδων με κάποια άλλη, διότι πιθανώς να έχει διαφορετικό εμβαδόν (σε m^2) καταστημάτων των κατηγοριών $A, B, Γ, Δ$ ή και διαφορετικό αριθμό κατοίκων.
- *Ο αριθμός κάδων που βρίσκονται σε κάθε προκαθορισμένο τομέα.* Οι πιθανές αλλαγές στις αρχικές θέσεις των κάδων θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε ένα διαφορετικό αποτέλεσμα κατά τη σύγκριση μεταξύ των υπαρχόντων και προτεινόμενων κάδων για ένα συγκεκριμένο τομέα. Επομένως, όταν διαιρείται μια περιοχή που θα πρέπει να μελετηθεί σε διάφορες υπό-περιοχές, οι οποίες θα πρέπει να περιλαμβάνουν και τους αντίστοιχους, για αυτή την συγκεκριμένη περιοχή, κάδους απορριμμάτων.



Σχήμα 5-8: Οι μεταβολές των συντελεστών παλινδρόμησης για τις τέσσερις κατηγορίες παραγωγής αστικών αποβλήτων (Α, Β, Γ, Δ) στα τρία διαφορετικά πειράματα (Μεγάλοι, Μεσαίοι & Μικροί Τομείς).

Το **Σχήμα 5-8**, παρουσιάζει τους συντελεστές παλινδρόμησης των τεσσάρων εμπορικών κατηγοριών (Α, Β, Γ, Δ) για τα τρία διαφορετικά πειράματα (Μεγάλοι, Μεσαίοι και Μικροί Τομείς). Αυτοί οι συντελεστές για κάθε κατηγορία κυμαίνονται αντίστοιχα στα ίδια επίπεδα με ένα μικρό ποσοστό παραλλαγής, το οποίο κυμαίνεται από 1,36% μέχρι 2,51% ανάλογα με την κατηγορία όπως παρουσιάζεται στον **Πίνακα 5-8**.

	Κατ. Α	Κατ. Β	Κατ. Γ	Κατ. Δ
Εύρος των τριών (3) Τομέων (Μεγάλοι, Μεσαίοι και Μικροί)	0,398-0,419 (kg/m ²)	0,200-0,225 (kg/m ²)	0,109-0,124 (kg/m ²)	0,011-0,024 (kg/m ²)
Διακύμανση (σε %)	2,13%	2,51%	1,52%	1,36%

Πίνακας 5-8: Το εύρος των συντελεστών για την εμπορική δραστηριότητα και των σχετικών εμπορικών τύπων (καταστήματα) για τις τέσσερις κατηγορίες δεδομένων όπως έχουν προέλθει από τα τρία πειράματα (Μεγάλοι, Μεσαίοι και Μικροί) και η ποσοστιαία διακύμανση μεταξύ των αποτελεσμάτων των τριών πειραμάτων.

Επιπλέον, ο πολλαπλός συντελεστής συσχετισμού, που χρησιμοποιείται για να επικυρώσει την ακρίβεια πρόβλεψης του γραμμικού μοντέλου παραγωγής αστικών απορριμμάτων, κυμαίνεται σε πολύ υψηλά επίπεδα μεταξύ 98,76% –

99,43% για τα τρία πειράματα, όπως φαίνεται στον Πίνακας 5-9, επιβεβαιώνοντας τα αξιόπιστα αποτελέσματα που έχουν επιτευχθεί χρησιμοποιώντας το προτεινόμενο μοντέλο όσον αφορά την περίπτωση που διαπραγματεύεται το παρόν έγγραφο.

	Διαίρεση Τομέων		
	Μεγάλοι (8 Τομείς)	Μεσαίοι (16 τομείς)	Μικροί (28 τομείς)
Πολλαπλοί Συντελεστές Συσχετισμού (R^2)	0,993981	0,994282	0,98758

Πίνακας 5-9: Οι πολλαπλοί συντελεστές συσχετισμού (R^2) για τα τρία πειράματα.

Πρέπει να αναφερθεί ότι κατά τη διάρκεια του υπολογισμού των κάδων για τις προκαθορισμένες περιοχές οι προσεγγίσεις, στις περισσότερες από τις περιπτώσεις, γίνονται στον αμέσως επόμενο ακέραιο αριθμό. Παραδειγματος χάριν, όταν το προτεινόμενο μοντέλο υπολογίζει ένα αριθμό 4,42 κάδους για ένα τομέα π.χ. τον S63 (*Μικροί Τομείς*, Περιοχή 63), τότε το μοντέλο προτείνει πέντε (5) κάδους για εκείνο τον τομέα.

5.7. Συμπεράσματα

Αυτή η εργασία εστιάζεται στο σχεδιασμό και στην εφαρμογή ενός καινοτόμου μοντέλου, για την εκτίμηση της παραγωγής και αποκομιδής των αστικών στερεών αποβλήτων χρησιμοποιώντας ένα περιβάλλον ΓΣΠ.

Προκειμένου να υπερνικηθεί η ασάφεια του εμπειρικού προτύπου που χρησιμοποιείται από τον δήμο Αθηναίων, πραγματοποιείται ένας διαχωρισμός μεταξύ της παραγωγής των οικιακών στερεών αποβλήτων και αυτών που προέρχονται από τις εμπορικές δραστηριότητες σε μία προκαθορισμένη περιοχή και αναπτύσσεται μια ενοποιημένη προσέγγιση για την αντιπροσώπευση της παραγωγής των στερεών αποβλήτων για την κάθε εμπορική δραστηριότητα. Ως εκ τούτου, εκτελείται μια ακριβής εκτίμηση της παραγωγής των απορριμμάτων βασισμένη στην κατανομή του πληθυσμού, αλλά και στις εμπορικές δραστηριότητες αντίστοιχα. Με την προσθήκη των ανωτέρω στοιχείων προκύπτει η συνολική παραγωγή των στερεών αποβλήτων. Τέλος, λαμβάνοντας υπόψη και τους περιορισμούς του παρόντος οδικού δικτύου υπολογίζεται ο βέλτιστος

αριθμός καθώς και η κατανομή των κάδων απορριμμάτων στην εξεταζόμενη περιοχή.

Με την υιοθέτηση του προτεινόμενου μοντέλου, ένας δήμος θα χρειαστεί σημαντικά λιγότερους κάδους απορριμμάτων σε αντίθεση με τον αριθμό που υπολογίζεται από ένα εμπειρικό μοντέλο όπως αυτό χρησιμοποιείται από το δήμο Αθηναίων. Στην συγκεκριμένη μελέτη, ο παρών αριθμός κάδων (162) μειώθηκε περισσότερο από 30% (112). Επιπλέον, το προτεινόμενο μοντέλο πέτυχε μια καλύτερη κατανομή των κάδων απορριμμάτων και ένα χαμηλότερο κόστος για την αποκομιδή και τη μεταφορά των στερεών αποβλήτων.

Από την άλλη μεριά, η αρχική εκτίμηση της συνολικής επιφάνειας (σε m²) για τις διάφορες εμπορικές δραστηριότητες σε κάθε περιοχή και για κάθε κατηγορία είναι ένας κρίσιμος δυναμικός παράγοντας, ο οποίος διαδραματίζει έναν σημαντικό ρόλο στον υπολογισμό της συνολικής δημοτικής παραγωγής στερεών αποβλήτων και τελικά στο συνολικό αριθμό κάδων απορριμμάτων.

Στο μέλλον, με τη χρησιμοποίηση των μεθόδων ασαφούς λογικής, προβλέπεται μια βελτιωμένη εκτίμηση για τους συντελεστές Α, Β, Γ και Δ που αντιπροσωπεύουν τα «ειδικά βάρη» των προκαθορισμένων κατηγοριών των αντίστοιχων εμπορικών δραστηριοτήτων. Η ασαφής λογική θεωρείται πιο κατάλληλη για την αντιπροσώπευση της αβεβαιότητας, η οποία εισάγεται κατά τον υπολογισμό των ανωτέρω συντελεστών. Αυτή η αβεβαιότητα αφορά το «ειδικό βάρος» των περισσότερων εμπορικών δραστηριοτήτων και είναι σαφώς προτιμότερο να αντιπροσωπεύεται από ένα εύρος τιμών παρά από μια σταθερή τιμή.

Αν και η παρούσα μελέτη καλύπτει μια περιοχή περίπου 0,45 km², 8.500 κατοίκων και περισσότερα από 80 οικοδομικά τετράγωνα, το προτεινόμενο μοντέλο πρέπει να εξεταστεί και σε μεγαλύτερη περιοχή ώστε να ενισχυθεί η αξιοπιστία των παραγόμενων αποτελεσμάτων του.

Επιπλέον, ως τμήμα αυτής της διατριβής, αναπτύχθηκαν διάφορα εργαλεία για να διευκολύνουν τη συλλογή και την καταγραφή δεδομένων. Αυτά τα εργαλεία επέτρεψαν στους χρήστες να επαναλάβουν τις προγραμματισμένες επιτόπου συλλογές και αναλύσεις δεδομένων και να καθορίσουν τα χρονικά διαστήματα μεταξύ των ερευνών με ένα βέλτιστο τρόπο. Εάν αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται καθ' όλη τη διάρκεια του ενός έτους, τότε, τυχόν μεταβολές στην παραγωγή των στερεών αποβλήτων μπορούν να ελεγχθούν και η αποκομιδή των απορριμμάτων μπορεί να προσαρμοστεί επαρκώς οδηγώντας σε σημαντικά οικονομικά οφέλη. Ως μελλοντική εργασία στην παρούσα διατριβή, η

κατανάλωση ενέργειας ανά οικόπεδο θα μπορούσε να συσχετιστεί με την παραγωγή στερεών αποβλήτων προκειμένου να δημιουργηθεί ένας πλήρως αυτοματοποιημένος μηχανισμός ενημέρωσης για τη δυναμική εκτίμηση της παραγωγής στερεών αποβλήτων.

Τέλος, η τρέχουσα πλατφόρμα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αρχική εκτίμηση του αριθμού και της θέσης των κάδων απορριμμάτων σε περιπτώσεις δήμων χωρίς κάποια προηγούμενη εμπειρία. Επιπρόσθετα εάν η συγκεκριμένη πλατφόρμα εμπλουτιστεί και με αλγόριθμους δρομολόγησης, τότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τη διαχείριση στόλου οχημάτων της υπηρεσίας καθαριότητας του εκάστοτε δήμου.

6

ΜΕΡΟΣ II: ΑΠΟΚΟΜΙΔΗ

ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ

6.1. Εισαγωγή

Τις τρεις τελευταίες δεκαετίες υπάρχει μία έντονη δραστηριοποίηση στο χώρο των υπολογιστικών αλγορίθμων, που βασίζονται στη μοντελοποίηση διαφόρων φυσικών, βιολογικών ή κοινωνικών φαινομένων, με σκοπό τη δημιουργία μη αιτιοκρατικών ευριστικών αλγορίθμων τόσο για την επίλυση δύσκολων συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης, όσο και για την εύρεση του ελάχιστου ή του μέγιστου συνεχών συναρτήσεων ή προβλημάτων.

Τα προβλήματα που εμφανίζονται στη φύση παρουσιάζουν δυσκολίες μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης με χρήση συνεχών συναρτήσεων κάνοντας κατά αυτόν τον τρόπο δύσκολη, αν όχι αδύνατη, την επίλυσή τους με κλασσικές μεθόδους. Για το λόγο αυτό, η έρευνα κατευθύνθηκε προς τους στοχαστικούς ευριστικούς αλγορίθμους και ειδικότερα, σε αυτούς που εμπνέονται από φυσικά, κοινωνικά ή βιολογικά φαινόμενα. Οι αλγόριθμοι αυτοί έχουν την ιδιότητα να μην εγκλωβίζονται σε τοπικά βέλτιστες λύσεις και μάλιστα, μπορούν να εντοπίσουν την περιοχή της ολικά βέλτιστης λύσης συνήθως μετά από ένα μεγάλο αριθμό εκτιμήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης.

Η διαδικασία εύρεσης λύσεων στους στοχαστικούς ευριστικούς αλγόριθμους πραγματοποιείται πάντοτε μέσω μιας επαναληπτικής διαδικασίας. Σε κάθε επανάληψη δημιουργούνται μία (π.χ. Προσομοίωση Ανόπτησης) ή περισσότερες (π.χ. Γενετικοί Αλγόριθμοι και Σύστημα Αποικίας Μυρμηγκιών) λύσεις, από τις

επιμέρους (individuals) λύσεις, που ανήκουν στο χώρο των πιθανών λύσεων. Η καταλληλότητα των λύσεων αυτών εκτιμάται μέσω της συναρτήσεως κόστους. Πολλές φορές οι αλγόριθμοι αυτοί, κατά τη διαδικασία εύρεσης λύσεων, προσαρμόζονται συνεχώς στο χώρο των λύσεων μεταβάλλοντας τις παραμέτρους τους. Η παραπάνω γενική διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ολοκληρωθεί ένας συγκεκριμένος αριθμός επαναλήψεων ή να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο σύγκλισης.

Τα βασικότερα χαρακτηριστικά των αλγορίθμων, οι οποίοι εμπνέονται από τη φύση είναι:

- Μοντελοποιούν σε κάποιο βαθμό ένα φυσικό (π.χ. η ανόπτηση στα μέταλλα), κοινωνικό (π.χ. η αλληλεπίδραση μεταξύ των ανθρώπων και του πολιτισμού τους, ή γενικότερα μεταξύ των ζώντων όντων και του περιβάλλοντός τους) ή βιολογικό φαινόμενο (π.χ. εξέλιξη των ειδών).
- Έχουν στοιχεία στοχαστικότητας (μη αιτιοκρατικοί) με κατευθυνόμενη στοχαστικότητα.
- Πολλές φορές παρουσιάζουν παράλληλη δομή, δηλαδή, πράκτορες (agents) ή άτομα (individuals) που δραστηριοποιούνται ταυτόχρονα και δημιουργούν πολλαπλές λύσεις του προβλήματος. Το γεγονός αυτό επιτρέπει την παράλληλη εκτέλεσή τους σε παράλληλους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Όταν χρησιμοποιείται ένας πληθυσμός ατόμων, τότε τα άτομα μπορούν να επικοινωνούν είτε άμεσα (π.χ. Γενετικοί Αλγόριθμοι) είτε έμμεσα (π.χ. Σύστημα Αποικίας Μυρμηγκιών) μεταξύ τους.
- Είναι προσαρμόσιμοι σε διαφορετικά «περιβάλλοντα» παρουσιάζοντας «ευρωστία». Συνεπώς, μπορούν να λειτουργήσουν αγνοώντας το θόρυβο αλλά και να αξιοποιηθούν σε διάφορα είδη προβλημάτων με ελάχιστες αλλαγές στον κώδικα.

Η σχέση μεταξύ μέγιστου αριθμού επαναλήψεων και ποιότητας της βέλτιστης λύσης είναι άμεση και πρέπει να την λάβουμε υπόψη μας στο πρόβλημα που θέλουμε να επιλύσουμε. Προφανώς, θα πρέπει να γνωρίζουμε εκ των προτέρων αν απλά επιθυμούμε μία καλή λύση ή αν είναι απαραίτητος ο εντοπισμός της βέλτιστης λύσης.

Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των στοχαστικών ευριστικών αλγορίθμων που πρέπει να ληφθεί υπόψη από το χρήστη είναι η επαναληψιμότητα της απόδοσης του αλγορίθμου. Λόγω της στοχαστικής φύσης των αλγορίθμων, κάθε εκτέλεσή τους με διαφορετικές αρχικές συνθήκες δίνει και διαφορετικό αποτέλεσμα. Υπολογίζοντας τη μέση τιμή της βέλτιστης λύσης και την τυπική απόκλιση αυτής για ένα μεγάλο αριθμό εκτελέσεων του αλγορίθμου θα πρέπει, σε

ένα καλό στοχαστικό ευριστικό αλγόριθμο, η τυπική απόκλιση να είναι σχετικά μικρή. Το γεγονός αυτό προσφέρει τη σιγουριά στο χρήστη ότι ο αλγόριθμος που χρησιμοποιεί θα έχει την αναμενόμενη απόδοση στις περισσότερες εκτελέσεις του. Πολλές φορές είναι επιθυμητή η μείωση της απόδοσης του αλγορίθμου με σκοπό την αύξηση της επαναληψιμότητάς της ή και το αντίστροφο, ελπίζοντας ότι μία τυχαία εκτέλεση του αλγορίθμου μπορεί να δώσει ένα πάρα πολύ καλό αποτέλεσμα.

Μερικές από τις γνωστότερες ευριστικές μεθόδους, που εμπνεύστηκαν από τη φύση και αναπτύσσονται παρακάτω είναι: Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms), η Προσομοιωμένη Ανόπτηση (Simulated Annealing), η Αναζήτηση Ταμπού (Tabu Search) και η βελτιστοποίηση με Αποικίες Μυρμηγκιών (Ant System).

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι καθώς και οι αλγόριθμοι της Προσομοιωμένης Ανόπτησης και της Αναζήτησης Ταμπού ανήκουν στους λεγόμενους μετα-ευριστικούς αλγορίθμους. Οι μετα-ευριστικοί αλγόριθμοι είναι ευριστικοί αλγόριθμοι, με την έννοια ότι δεν εξασφαλίζουν την εύρεση της βέλτιστης λύσης σε ένα πρόβλημα. Γενικά, όμως, πλεονεκτούν σε σχέση με τους παραδοσιακούς ευριστικούς αλγορίθμους, διότι επιτρέπουν να γίνονται δεκτές, υπό προϋποθέσεις, και χειρότερες λύσεις από τις προηγούμενες από τις οποίες ξεκινά μία νέα αναζήτηση λύσεων.

Ως εκ τούτου, δίνεται η δυνατότητα απεγκλωβισμού από ένα τοπικό ελάχιστο, διερεύνησης μεγαλύτερου τμήματος του χώρου των λύσεων και επομένως, αυξάνεται η πιθανότητα εύρεσης καλύτερης λύσης. Πάντως κατά κανόνα, είναι αδύνατο να διαπιστωθεί πόσο κοντά στη βέλτιστη λύση βρίσκεται η λύση που παρέχει ένας συγκεκριμένος ευριστικός αλγόριθμος, σε ένα 'δύσκολο' πρόβλημα βελτιστοποίησης.

6.2. Μετα-ευριστικοί αλγόριθμοι – Τι είναι?

Οι μετα-ευριστικοί αλγόριθμοι είναι αλγόριθμοι, οι οποίοι, όπως προαναφέρθηκε, προκειμένου να δραπετεύσουν από μια τοπική βέλτιστη λύση, οδηγούν μια εποικοδομητική ευριστική αναζήτηση από μια μηδενική λύση και με την προσθήκη στοιχείων, ευελπιστούν να χτίσουν μία καλή και πλήρη λύση. Σε διαφορετική περίπτωση οδηγούν μια τοπική ευριστική αναζήτηση από μια πλήρη λύση και με συνεχείς επαναλήψεις, τροποποιούν μερικά από τα στοιχεία της προκειμένου να επιτευχθεί μία καλύτερη λύση. Το μετα-ευριστικό μέρος

επιτρέπει στο χαμηλού επιπέδου ευριστικό να εξασφαλίσει λύσεις καλύτερες από εκείνες τις οποίες θα μπορούσε να έχει επιτύχει μόνο του, ακόμα κι αν επαναλαμβάνόταν.

Ειδικά, στην περίπτωση της Προσομοιωμένης Ανόπτωσης (Simulated Annealing) και Αναζήτησης Ταμπού (Tabu Search), οι μηχανισμοί ελέγχου επιτυγχάνονται με τον περιορισμό ή με την τυχαιότητα του συνόλου των τοπικών γειτονικών λύσεων, οι οποίες εξετάζονται στην τοπική αναζήτηση. Από την άλλη μεριά, οι μηχανισμοί ελέγχου των Γενετικών Αλγορίθμων (Genetic Algorithm) επιτυγχάνονται με το συνδυασμό των στοιχείων, οι οποίοι λαμβάνονται από διαφορετικές λύσεις. Κατόπιν πάλι, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimization) οδηγούν μια επικοδομητική χαμηλού επιπέδου λύση, συμπεριλαμβανομένης και της συγκεκριμένης σε ένα πλαίσιο πληθυσμού και δημιουργούν συνθήκες τυχαιότητας για την κατασκευή της λύσης αυτής, με πιθανότητα κατανομής, η οποία καθορίζεται ρητά από τα προηγουμένως αποκτηθέντα τμήματα της λύσης.

Οι προαναφερθέντες τέσσερις αλγόριθμοι βελτιστοποίησης περιγράφονται και συζητούνται σε κάποιο βάθος και τελικά υλοποιούνται σε περιβάλλον γλώσσας προγραμματισμού Java με στόχο την αποκομιδή των αστικών στερεών αποβλήτων.

6.3. Αλγόριθμος Αναζήτησης Ταμπού (AT)

Η ενότητα αυτή ερευνά τη μετα-ευριστική προσέγγιση που καλείται αναζήτηση ταμπού, η οποία αλλάζει εντυπωσιακά τη δυνατότητά μας να λύσουμε προβλήματα πρακτικής σημασίας. Οι τρέχουσες εφαρμογές της Αναζήτησης Tabu (*Tabu Search*) εκτείνονται σε πολλούς τομείς όπως είναι η βέλτιστη διαχείριση πόρων, οι τηλεπικοινωνίες, η σχεδίαση συστημάτων (Very-Large-Scale Integration), η οικονομική ανάλυση, ο σχεδιασμός (*scheduling*), ο σχεδιασμός χώρου (*space planning*), η κατανομή ενέργειας (*energy distribution*), η μοριακή εφαρμοσμένη μηχανική, τα λογιστικά, η ταξινόμηση σχεδίων (*pattern classification*), η εύκαμπτη κατασκευή (*flexible manufacturing*), η διαχείριση αποβλήτων, η εξερεύνηση ορυκτών (*mineral exploration*), η βιοϊατρική ανάλυση, η περιβαλλοντική συντήρηση κ.ά. Τα τελευταία χρόνια, επιστημονικά περιοδικά πολλών διαφορετικών τομέων έχουν δημοσιεύσει άρθρα και υπολογιστικές μελέτες που τεκμηριώνουν τις επιτυχίες της αναζήτησης ταμπού στην αντιμετώπιση πολλών διαφορετικών προβλημάτων παράγοντας λύσεις των οποίων

η ποιότητα συχνά ξεπερνά σημαντικά αυτή που λαμβάνεται με τις μεθόδους που έχουν εφαρμοστεί τα προηγούμενα χρόνια.

6.3.1. Εισαγωγή

Ο αλγόριθμος Αναζήτησης Ταμπού (AT) αναπτύχθηκε ανεξάρτητα από τον Glover (1986) και τον Hansen (1986) για να λύσει συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Είναι ένα είδος επαναληπτικής αναζήτησης και χαρακτηρίζεται από τη χρήση μιας ευπροσάρμοστης μνήμης. Είναι ικανός να εξαλείψει το τοπικό ελάχιστο και να αναζητήσει περιοχές πέρα από ένα τοπικό ελάχιστο. Επομένως, έχει την ικανότητα να βρει το συνολικό ελάχιστο σε έναν πολύμορφο (*multimodal*) χώρο αναζήτησης. Η διαδικασία με την οποία η αναζήτηση ταμπού υπερνικά το τοπικό πρόβλημα βελτιστοποίησης βασίζεται σε μια συνάρτηση εκτίμησης που επιλέγει την υψηλότερη εκτίμηση λύσης σε κάθε επανάληψη. Αυτό σημαίνει ότι μετακινούμαστε στην καλύτερη επιτρεπτή λύση στη γειτονιά της τρέχουσας λύσης από την άποψη της αντικειμενικής τιμής και των περιορισμών ταμπού. Η συνάρτηση εκτίμησης επιλέγει την κίνηση που παράγει την καλύτερη εκτίμηση ή την ελάχιστη χειροτέρευση στην αντικειμενική συνάρτηση. Μια λίστα ταμπού χρησιμοποιείται για την αποθήκευση των χαρακτηριστικών των αποδεκτών κινήσεων έτσι ώστε αυτά τα χαρακτηριστικά να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ταξινόμηση ορισμένων κινήσεων ως ταμπού (π.χ. για να αποφευχθούν) σε επόμενες επαναλήψεις. Με άλλα λόγια, η λίστα ταμπού καθορίζει ποιες λύσεις μπορούν να προσεγγιστούν με μια κίνηση από την τρέχουσα λύση. Αφού οι κινήσεις που δεν οδηγούν σε βελτιώσεις είναι αποδεκτές στον αλγόριθμο AT, είναι πιθανό να επιστρέψει ο αλγόριθμος σε λύσεις που έχουν ήδη προσπελαστεί. Αυτό μπορεί να προκαλέσει ένα πρόβλημα κύκλου. Η λίστα *ταμπού* χρησιμοποιείται για να αντιμετωπίσει αυτό το πρόβλημα. Μια στρατηγική που ονομάζεται Στρατηγική Απαγόρευσης (*Forbidding Strategy*) χρησιμοποιείται για τον έλεγχο και την ενημέρωση της λίστας *ταμπού*. Χρησιμοποιώντας την στρατηγική απαγόρευσης, ένα μονοπάτι που έχει προηγούμενα επισκεφθεί (προσπελαστεί) αποφεύγεται και νέες περιοχές του χώρου αναζήτησης εξερευνώνται. Οι διάφορες στρατηγικές που χρησιμοποιούνται στον αλγόριθμο AT θα αναλυθούν παρακάτω στην ενότητα 6.3.5.

6.3.2. Γενικές αρχές

Η λέξη *tabu* (ή *taboo*) προέρχεται από την Tongan, μια γλώσσα της Πολυνησίας, η οποία χρησιμοποιήθηκε από τους ιθαγενείς του νησιού Τόγκα για να δείξει τα πράγματα που δεν μπορούν να αγγιχτούν επειδή είναι ιερά. Σύμφωνα με το λεξικό *Webster*, η λέξη τώρα επίσης σημαίνει «μια απαγόρευση που επιβάλλεται από την κοινωνική συνήθεια ως προστατευτικό μέτρο» ή κάτι «που απαγορεύεται επειδή αποτελεί κίνδυνο». Αυτές οι τελευταίες έννοιες της λέξης συμφωνούν καλά με το θέμα της αναζήτησης *ταμπού*. Ο κίνδυνος που αποφεύγεται σε αυτήν την περίπτωση είναι αυτός της ακολουθίας μιας αντιπαραγωγικής πορείας (*counter-productive course*), που μπορεί να οδηγήσει στην παγίδευση χωρίς ελπίδα διαφυγής. Αφ' ετέρου, όπως με την ευρεία κοινωνική έννοια, όπου οι «προστατευτικές απαγορεύσεις» μπορούν να εκτοπιστούν όταν το απαιτεί η περίπτωση, τα «ταμπού» του αλγορίθμου *Αναζήτησης Ταμπού* ακυρώνονται όταν υπάρχουν επαρκή στοιχεία ότι μια εναλλακτική λύση είναι καλύτερη από τις προηγούμενες.

Εντούτοις, η σημαντικότερη σύνδεση με την παραδοσιακή χρήση, προέρχεται από το γεγονός ότι τα *ταμπού*, στοιχεία που συνήθως γίνονται αντιληπτά, μεταδίδονται με τη βοήθεια μιας κοινωνικής μνήμης που υπόκειται σε τροποποιήσεις κατά τη διάρκεια του χρόνου. Αυτό δημιουργεί τη θεμελιώδη σύνδεση με την έννοια του «ταμπού» στον αλγόριθμο ΑΤ. Τα απαγορευμένα στοιχεία της αναζήτησης *ταμπού* λαμβάνουν την κατάστασή τους μέσω της εξάρτησής τους με μια εξελισσόμενη μνήμη, η οποία επιτρέπει σε αυτήν την κατάσταση να αλλάξει ανάλογα με την περίπτωση και το χρόνο.

Ειδικότερα, ο αλγόριθμος ΑΤ βασίζεται στην υπόθεση ότι η επίλυση ενός προβλήματος θα πρέπει να ενσωματώνει την *Προσαρμοστική Μνήμη* (*Adaptive Memory*) και την *Απαντητική Εξερεύνηση* (*Responsive Exploration*). Το χαρακτηριστικό γνώρισμα της προσαρμοστικής μνήμης του ΑΤ επιτρέπει την εφαρμογή των διαδικασιών που μπορούν να αναζητήσουν το διάστημα λύσης με οικονομικό και αποτελεσματικό τρόπο. Δεδομένου ότι οι τοπικές επιλογές καθοδηγούνται από τις πληροφορίες που συλλέγονται κατά τη διάρκεια της αναζήτησης, ο ΑΤ έρχεται σε αντίθεση με τα σχέδια που δε διαθέτουν μνήμη (*memoryless*) και που στηρίζονται σε μεγάλο ποσοστό σε ημιτυχαίες (*semirandom*) διαδικασίες που εφαρμόζουν μια μορφή δειγματοληψίας. Παραδείγματα μεθόδων που δε διαθέτουν μνήμη περιλαμβάνουν *semigreedy heuristics*, χαρακτηριστικές «γενετικές» και προσεγγίσεις «ανόπτησης»,

εμπνευσμένες από το χώρο της βιολογίας και της φυσικής αντίστοιχα. Η προσαρμοστική μνήμη έρχεται, επίσης, σε αντίθεση με τα άκαμπτα (*rigid*) σχέδια μνήμης που είναι χαρακτηριστικά των στρατηγικών *branch and bound* (Land and Doig 1960). Μπορεί να υποστηριχτεί ότι μερικοί τύποι εξελικτικών διαδικασιών που λειτουργούν με βάση το συνδυασμό λύσεων, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, ενσωματώνουν μια μορφή υποκρυπτόμενης μνήμης.

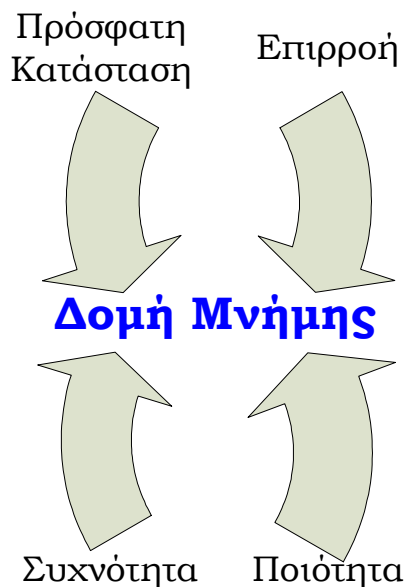
Η έμφαση στην *Απαντητική Εξερεύνηση* (*Responsive Exploration*) στην αναζήτηση *ταμπού*, είτε είναι μια αιτιοκρατική είτε μια πιθανολογική εφαρμογή, προέρχεται από την υπόθεση ότι μια κακή στρατηγική επιλογή μπορεί να παραγάγει περισσότερες πληροφορίες από μια καλή τυχαία επιλογή. Σε ένα σύστημα που χρησιμοποιεί μνήμη, μια κακή επιλογή βασισμένη σε μια στρατηγική, μπορεί να παρέχει χρήσιμες ενδείξεις σχετικά με το πώς η στρατηγική μπορεί να αλλάξει ώστε να βελτιωθούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν. Ακόμη και σε ένα χώρο με σημαντική τυχαιότητα ένα σχέδιο στρατηγικής μπορεί να βοηθήσει στην αποκάλυψη της δομής του χώρου.

Η απαντητική εξερεύνηση ενσωματώνει τις βασικές αρχές της ευφυούς αναζήτησης, δηλαδή, την εκμετάλλευση των καλών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων μιας λύσης εξερευνώντας παράλληλα νέες περιοχές με καλές προοπτικές. Ο αλγόριθμος AT ενδιαφέρεται για την εύρεση νέων και αποτελεσματικότερων τρόπων εκμετάλλευσης των μηχανισμών που συνδέονται τόσο με την προσαρμοστική μνήμη όσο και με την απαντητική εξερεύνηση. Η ανάπτυξη νέων στρατηγικών σχεδίων κάνει τον αλγόριθμο AT έναν τομέα με προοπτικές για έρευνα και εμπειρική μελέτη.

6.3.3. Χρήση της μνήμης

Οι δομές μνήμης στην αναζήτηση *ταμπού* λειτουργούν σε σχέση με τέσσερις κύριες διαστάσεις (*dimensions*) που περιλαμβάνουν την Πρόσφατη Κατάσταση (*Recency*), τη Συχνότητα (*Frequency*), την Ποιότητα (*Quality*), και την Επιρροή (*Influence*) **Σχήμα 6-1**. Οι μνήμες που βασίζονται στην πρόσφατη κατάσταση και στη συχνότητα συμπληρώνουν η μία την άλλη, και έχουν σημαντικά χαρακτηριστικά που αναφέρονται σε επόμενες παραγράφους. Η διάσταση *ποιότητας* αναφέρεται στη δυνατότητα της διαφοροποίησης της αξίας των λύσεων που προσπελάζονται κατά τη διάρκεια της αναζήτησης. Με αυτή την έννοια, η μνήμη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιορίσει τα στοιχεία που είναι κοινά στις καλές λύσεις ή τις πορείες που οδηγούν σε τέτοιες λύσεις. Λειτουργικά,

η ποιότητα γίνεται ένα θεμέλιο για μάθηση Βασισμένη σε Κίνητρα (*Incentive-Based*) όπου παροτρύνσεις παρέχονται για την ενίσχυση των ενεργειών που οδηγούν σε καλές λύσεις και τιμωρίες επιβάλλονται για την μείωση των ενεργειών που οδηγούν σε μη καλές λύσεις. Η ευελιξία αυτών των δομών μνήμης επιτρέπει την καθοδήγηση της αναζήτησης σε ένα πολλαπλό-αντικειμενικά περιβάλλον, στο οποίο ο χαρακτηρισμός μιας συγκεκριμένης κατεύθυνσης αναζήτησης (αν είναι καλή ή όχι) μπορεί να καθοριστεί από περισσότερες από μια λειτουργίες. Η έννοια της ποιότητας στον αλγόριθμο ΑΤ είναι ευρύτερη από αυτή που χρησιμοποιείται σιωπηρά στις τυποποιημένες μεθόδους βελτιστοποίησης.



Σχήμα 6-1: Οι τέσσερις (4) διαστάσεις του αλγορίθμου ΑΤ.

Η τέταρτη διάσταση, η *Επιρροή* (*Influence*), λαμβάνει υπόψη της τον αντίκτυπο των επιλογών που γίνονται κατά τη διάρκεια της αναζήτησης, όχι μόνο στην ποιότητα αλλά και στη δομή. (Από μία άποψη, η ποιότητα μπορεί να θεωρηθεί ως ειδική μορφή επιρροής). Η καταγραφή πληροφοριών για την επιρροή των επιλογών σε συγκεκριμένα στοιχεία λύσης ενσωματώνει ένα πρόσθετο επίπεδο εκμάθησης. Σε αντίθεση, στην *branch and bound* μέθοδο, παραδείγματος χάρη, οι κανόνες διαχωρισμού είναι προκαθορισμένοι και οι κατευθύνσεις διακλαδώσεων (*branching*) παραμένουν σταθερές, μόλις επιλεγούν, σε ένα δεδομένο κόμβο ενός δέντρου απόφασης. Εντούτοις, είναι σαφές ότι ορισμένες αποφάσεις έχουν περισσότερη επιρροή από κάποιες άλλες ως συνάρτηση της γειτονιάς των κινήσεων που εφαρμόζονται και του τρόπου που αυτή η γειτονιά «διαπραγματεύεται» (π.χ. επιλογές κοντά στη ρίζα ενός κλάδου και σε ένα συνδεδεμένο (*bound*) δέντρο επιδρούν αρκετά κατά τη χρησιμοποίηση

μιας στρατηγικής *depth-first*). Η αξιολόγηση και η εκμετάλλευση της επιρροής από μια μνήμη πιο εύκαμπτη από αυτή που είναι ενσωματωμένη σε τέτοιες αναζητήσεις δέντρων είναι ένα σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα του αλγόριθμου ΑΤ.

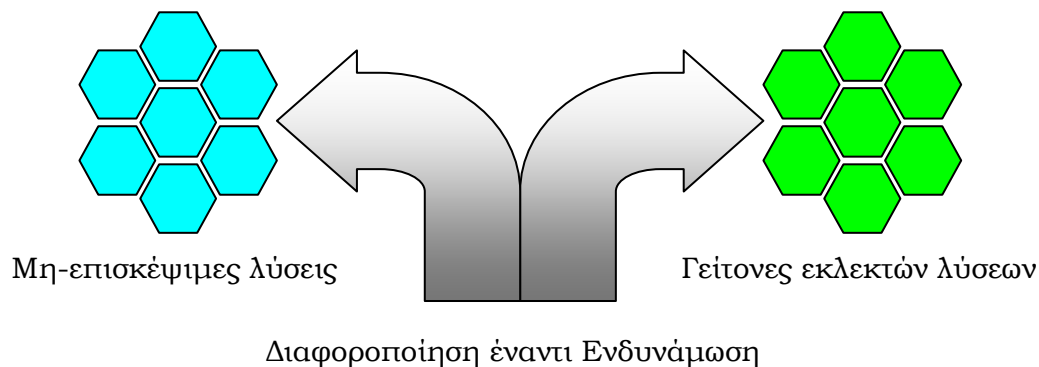
Η μνήμη που χρησιμοποιείται στην αναζήτηση *ταμπού* είναι ταυτόχρονα και *Ρητή* (*Explicit*) και *Επιθετική* (*Attributive*). Η ρητή μνήμη καταγράφει τις πλήρεις λύσεις, που χαρακτηριστικά αποτελούνται από τις εκλεκτές λύσεις που προσπελάζονται κατά τη διάρκεια της αναζήτησης. Μια επέκταση αυτής της μνήμης καταγράφει τους ιδιαίτερα ελκυστικούς αλλά ανεξερευνήτους γείτονες των εκλεκτών λύσεων. Οι εκλεκτές λύσεις που έχουν καταγραφεί (*memorized*) (ή οι ελκυστικοί γείτονές τους) χρησιμοποιούνται για να επεκτείνουν την τοπική αναζήτηση.

Εναλλακτικά, ο αλγόριθμος ΑΤ χρησιμοποιεί την *Επιθετική* μνήμη για λόγους καθοδήγησης. Αυτό το είδος μνήμης καταγράφει πληροφορίες για τις ιδιότητες των λύσεων που αλλάζουν καθώς μετακινούμαστε από μια λύση προς άλλη. Για παράδειγμα, στη ρύθμιση μιας γραφικής παράστασης ή ενός δικτύου, οι ιδιότητες μπορούν να αποτελούνται από κόμβους ή τόξα που προστίθενται, αφαιρούνται ή επανατοποθετούνται από το μηχανισμό μετακίνησης. Στον προγραμματισμό παραγωγής, ο δείκτης εργασιών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως χαρακτηριστικό που θα εμποδίζει ή θα ενθαρρύνει τη μέθοδο να ακολουθήσει ορισμένες κατευθύνσεις αναζήτησης.

6.3.4. Ενδυνάμωση και διαφοροποίηση

Δύο ιδιαίτερα σημαντικά συστατικά του ΑΤ είναι οι στρατηγικές (*Diversification*). Οι στρατηγικές ενδυνάμωσης βασίζονται στην τροποποίηση των κανόνων επιλογής για να ενθαρρυνθούν οι συνδυασμοί κίνησης και τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα των λύσεων που έχουν θεωρηθεί καλά. Μπορούν επίσης, να επιστρέψουν σε περιοχές με καλές προοπτικές για να τις ψάξουν λεπτομερέστερα. Αφού οι εκλεκτές λύσεις πρέπει να καταγραφούν για να εξεταστούν οι άμεσες γειτονιές τους, η ρητή μνήμη συσχετίζεται πολύ με την υλοποίηση των στρατηγικών ενδυνάμωσης. Όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6-2**, η κύρια διαφορά μεταξύ της ενδυνάμωσης και της διαφοροποίησης είναι ότι κατά τη διάρκεια ενός σταδίου ενδυνάμωσης η αναζήτηση εστιάζεται στην εξέταση των γειτόνων εκλεκτών λύσεων.

Εδώ, ο όρος «γείτονες» έχει μια ευρύτερη έννοια απ' ό τι συνήθως εννοείται με τη φράση της «αναζήτησης γειτονιάς». Δηλαδή, εκτός από την εξέταση των λύσεων που είναι παρακείμενες ή κοντά στις εκλεκτές λύσεις με τη βοήθεια των βασικών μηχανισμών κίνησης, οι στρατηγικές ενδυνάμωσης παράγουν «γείτονες» είτε βάζοντας μαζί τα συστατικά των καλών λύσεων είτε με τη χρησιμοποίηση τροποποιημένων στρατηγικών αξιολόγησης που ευνοούν την εισαγωγή τέτοιων στοιχείων σε μια τρέχουσα (εξελισσόμενη) λύση. Το στάδιο διαφοροποίησης από την άλλη μεριά, ενθαρρύνει τη διαδικασία αναζήτησης έτσι ώστε να εξεταστούν περιοχές που δεν έχουν εξερευνηθεί και να παράγει λύσεις που διαφέρουν σε πολλά σημεία από τις προηγούμενες. Πάλι, μια τέτοια προσέγγιση μπορεί να βασιστεί στην παραγωγή υποσυνκεντρώσεων (*subassemblies*) τμημάτων λύσης οι οποίες «συμπληρώνονται» για να παράγουν πλήρεις λύσεις, ή μπορεί να στηριχθεί στις τροποποιημένες αξιολογήσεις όπως είναι ενσωματωμένες, παραδείγματος χάρη, στη χρήση των συναρτήσεων τιμωρίας (*penalty*) / κινήτρου (*incentive*).



Σχήμα 6-2: Διαφοροποίηση και Ενδυνάμωση

Οι στρατηγικές ενδυνάμωσης απαιτούν κάποιο μέσο για την αναγνώριση ενός συνόλου εκλεκτών λύσεων σε βάση για την ενσωμάτωση των καλών ιδιοτήτων στις πρόσφατα δημιουργημένες λύσεις. Η ιδιότητα μέλους κάποιας λύσης στο σύνολο των εκλεκτών λύσεων καθορίζεται συχνά με τον καθορισμό ενός κατώτατου ορίου που συνδέεται με την αντικειμενική τιμή της συνάρτησης της καλύτερης λύσης που βρίσκεται κατά τη διάρκεια της αναζήτησης. Εντούτοις, οι εκτιμήσεις της «συγκέντρωσης» (*clustering*) και της «αντι-συγκέντρωσης» (*anti-clustering*) είναι, επίσης, σχετικές για την παραγωγή ενός τέτοιου συνόλου, και ειδικότερα, όσο αφορά στην παραγωγή υποσυνόλων των λύσεων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τις συγκεκριμένες φάσεις ενδυνάμωσης και διαφοροποίησης.

6.3.5. Στρατηγικές

Ένας απλός αλγόριθμος ΑΤ αποτελείται από τρεις κύριες στρατηγικές (Glover 1989, Glover 1990):

- τη Στρατηγική Απαγόρευσης (*Forbidding Strategy*),
- τη Στρατηγική Απελευθέρωσης (*Freeing Strategy*), και
- τη Βραχυπρόθεσμη Στρατηγική (*Short-Term Strategy*).

Η στρατηγική απαγόρευσης ελέγχει τι μπαίνει στη λίστα *ταμπού*. Η στρατηγική απελευθέρωσης ελέγχει τι βγαίνει από την λίστα *ταμπού* και πότε. Η βραχυπρόθεσμη στρατηγική διαχειρίζεται την αλληλεπίδραση ανάμεσα στην στρατηγική απαγόρευσης και απελευθέρωσης για να επιλέξει δοκιμαστικές λύσεις. Εκτός από αυτές τις στρατηγικές, υπάρχει, επίσης, μια στρατηγική μάθησης (*learning strategy*), η οποία βασίζεται στη χρήση ενδιάμεσων και μακροπρόθεσμων συναρτήσεων μνήμης. Αυτή η στρατηγική συλλέγει πληροφορίες κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης μιας αναζήτησης *ταμπού* και αυτή η πληροφορία χρησιμοποιείται για να κατευθύνει την αναζήτηση σε επόμενες εκτελέσεις.

6.3.5.1. Στρατηγική απαγόρευσης

Η συγκεκριμένη στρατηγική χρησιμοποιείται για να αποφευχθούν προβλήματα κύκλου απαγορεύοντας ορισμένες κινήσεις ή με άλλα λόγια ταξινομεί τις κινήσεις ως *ταμπού*. Για να αποτρέψουμε το κυκλικό πρόβλημα (*cycling problem*), είναι επαρκές να εξετάσουμε αν η λύση που έχουμε προσπελάσει προηγουμένως ξανά-προσπελαστεί. Ιδανικά, η λίστα *ταμπού* πρέπει να αποθηκεύει όλες τις λύσεις που έχουν προσπελαστεί προηγούμενα και πριν γίνει μια νέα κίνηση η λίστα πρέπει να ελεγχθεί. Όμως, αυτό απαιτεί πολύ μνήμη και υπολογιστική προσπάθεια. Ένας απλός κανόνας για να αποφευχθεί το κυκλικό πρόβλημα θα μπορούσε να είναι να μην επισκεφτούμε τη λύση, η οποία έχει προσπελαστεί στην τελευταία επανάληψη. Ωστόσο είναι σαφές ότι αυτή η προφύλαξη δεν εγγυάται ότι το κυκλικό πρόβλημα δε θα συμβεί. Ένας εναλλακτικός τρόπος θα ήταν να μην επισκεφτούμε τις λύσεις που έχουν ήδη προσπελαστεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων T_s επαναλήψεων (αυτές οι λύσεις αποθηκεύονται σε μια λίστα *ταμπού*). Επομένως, αποτρέποντας την επιλογή κινήσεων που αναπαριστούν την αντιστροφή όλων των αποφάσεων που έχουν παρθεί κατά τη διάρκεια των τελευταίων T_s επαναλήψεων, η αναζήτηση απομακρύνεται προοδευτικά από όλες τις λύσεις των προηγούμενων T_s

επαναλήψεων. Εδώ, η Ts κανονικά ονομάζεται το μήκος ή το μέγεθος της λίστας *ταμπού*. Με τη βοήθεια μιας κατάλληλης τιμής του Ts, η πιθανότητα του κυκλικού προβλήματος εκμηδενίζεται. Εάν είναι πολύ μεγάλη τότε η αναζήτηση μπορεί να οδηγηθεί μακριά από τις περιοχές των καλών λύσεων πριν εξερευνηθούν πλήρως αυτές οι περιοχές.

Η λίστα *ταμπού* ενσωματώνει μία από τις πρωταρχικές βραχυπρόθεσμες συναρτήσεις μνήμης της αναζήτησης *ταμπού*. Όπως εξηγήθηκε παραπάνω, υλοποιείται καταγράφοντας μόνο τις Ts πιο πρόσφατες κινήσεις. Μόλις η λίστα γεμίσει κάθε νέα κίνηση γράφεται πάνω στην πιο παλιά κίνηση της λίστας. Η λίστα *ταμπού* επεξεργάζεται αποτελεσματικά σαν ένας κυκλικός πίνακας σε μία «Πρώτος-Μπαίνει-Πρώτος-Βγαίνει» (*First-In-First-Out*) διαδικασία.

6.3.5.2. Στρατηγική απελευθέρωσης

Η στρατηγική απελευθέρωσης χρησιμοποιείται για να αποφασιστεί τι βγαίνει από την λίστα *ταμπού*. Η στρατηγική διαγράφει τους περιορισμούς *ταμπού* των λύσεων έτσι ώστε να μπορούν να επανεξεταστούν σε επόμενα βήματα της αναζήτησης. Τα χαρακτηριστικά μιας λύσης *ταμπού* παραμένουν στην λίστα *ταμπού* για τη διάρκεια Ts επαναλήψεων. Μια λύση θεωρείται επιτρεπτή εάν τα χαρακτηριστικά της δεν είναι *ταμπού* ή εάν έχει περάσει το τεστ του κριτηρίου φιλοδοξίας.

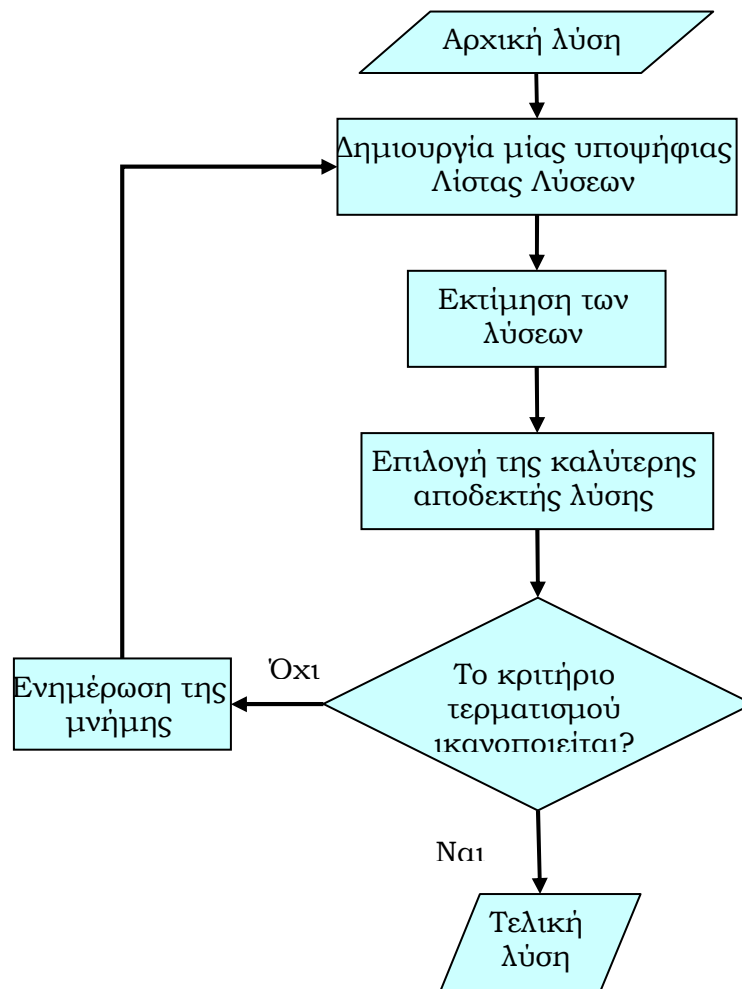
6.3.5.3. Βραχυπρόθεσμη στρατηγική

Αυτή η στρατηγική διαχειρίζεται την αλληλεπίδραση μεταξύ των ανωτέρω διαφορετικών στρατηγικών. Η γενική στρατηγική παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6-3**. Μία υποψήφια λίστα είναι μία υπό-λίστα των πιθανών κινήσεων. Οι υποψήφιες στρατηγικές λίστας είναι γενικά πρόβλημα εξαρτώμενο και μπορεί να παραχθεί με διάφορες μεθόδους όπως είναι η τυχαία δειγματοληψία.

Η στρατηγική επιλογής της «καλύτερης λύσης» διαλέγει μια αποδεκτή λύση από τις τρέχουσες λύσεις εάν δίνει τη μέγιστη βελτίωση ή τη λιγότερη επιδείνωση στην αντικειμενική συνάρτηση υπό τον όρο ότι οι περιορισμοί *ταμπού* και το κριτήριο φιλοδοξίας ικανοποιούνται. Αυτό είναι ένα «επιθετικό» (*aggressive*) κριτήριο και είναι βασισμένο στην υπόθεση ότι οι λύσεις με τις υψηλότερες αξιολογήσεις έχουν μια μεγαλύτερη πιθανότητα είτε να οδηγηθούν σε μια κοντινή βέλτιστη λύση, είτε να οδηγηθούν σε μια καλή λύση με μικρότερο αριθμό βημάτων. Εάν μια λύση ικανοποιεί το κριτήριο φιλοδοξίας γίνεται αποδεκτή είτε

είναι *ταμπού* είτε όχι. Εάν μια λύση δεν ικανοποιεί αυτά τα κριτήρια γίνεται αποδεκτή μόνο εάν δεν είναι *ταμπού*.

Ένα Κριτήριο Τερματισμού (*Stopping Criterion*) ολοκληρώνει τη διαδικασία αναζήτησης *ταμπού* αφού έχει εκτελεστεί ένας καθορισμένος αριθμός επαναλήψεων στο σύνολο ή αφού βρεθεί η καλύτερη τρέχουσα λύση.



Σχήμα 6-3: Διάγραμμα ροής ενός αλγόριθμου AT

6.3.5.4. Ενδιάμεσες και Μακροπρόθεσμες στρατηγικές εκμάθησης

Οι Ενδιάμεσες και Μακροπρόθεσμες στρατηγικές εκμάθησης (Intermediate and Long-Term learning Strategies) υλοποιούνται με τη χρησιμοποίηση ενδιάμεσων και μακροπρόθεσμων συναρτήσεων μνήμης. Η ενδιάμεση συνάρτηση παρέχει ένα στοιχείο ενδυνάμωσης (*intensification*). Λειτουργεί με την καταγραφή των καλών χαρακτηριστικών γνωρισμάτων ενός επιλεγμένου αριθμού κινήσεων που παράγονται κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μια στρατηγική εκμάθησης που ψάχνει νέες λύσεις που

παρουσιάζουν παρόμοια χαρακτηριστικά γνωρίσματα με εκείνες που έχουν καταγραφεί προηγουμένως. Αυτό επιτυγχάνεται με τον περιορισμό των κινήσεων που δεν έχουν ευνοϊκά χαρακτηριστικά γνωρίσματα.

6.3.6. Κριτήρια φιλοδοξίας και περιορισμοί ταμπού

Ένα Κριτήριο Φιλοδοξίας (Aspiration Criterion) χρησιμοποιείται για να ελευθερώσει μια λύση *ταμπού* εάν η λύση είναι επαρκούς ποιότητας και μπορεί να αποτρέψει το κυκλικό πρόβλημα. Ενώ ένα κριτήριο φιλοδοξίας έχει το ρόλο της καθοδήγησης μιας διαδικασίας αναζήτησης, οι περιορισμοί *ταμπού* έχουν το ρόλο του περιορισμού του χώρου αναζήτησης. Μια λύση γίνεται αποδεκτή αν οι περιορισμοί *ταμπού* ικανοποιούνται. Ωστόσο, μια λύση *ταμπού* θεωρείται επίσης αποδεκτή αν ισχύει ένα κριτήριο φιλοδοξίας ανεξάρτητα από την κατάσταση *ταμπού*. Τα χαρακτηριστικά της κίνησης καταγράφονται και χρησιμοποιούνται στην αναζήτηση *ταμπού* για να επιβάλλουν περιορισμούς που θα εμποδίσουν την επιλογή κινήσεων οι οποίες θα ανέστρεφαν τις αλλαγές που αναπαριστάνονται από αυτά τα χαρακτηριστικά. Επίσης, οι περιορισμοί *ταμπού* χρησιμοποιούνται, κυρίως, για την αποφυγή επαναλήψεων παρά για τις αναστροφές (*reversals*). Αυτοί έχουν το ρόλο της πρόληψης της επανάληψης ενός μονοπατιού αναζήτησης που οδηγεί μακριά από τη δεδομένη λύση. Αντιθέτως, οι περιορισμοί που εμποδίζουν τις αναστροφές έχουν το ρόλο της πρόληψης της επιστροφής σε μία προηγούμενη λύση. Ένας περιορισμός *ταμπού* τυπικά ενεργοποιείται μόνο στην περίπτωση όπου τα χαρακτηριστικά του βρίσκονται μέσα σε ένα περιορισμένο αριθμό επαναλήψεων πριν από την τρέχουσα επανάληψη (ένας περιορισμός βασισμένος στην πρόσφατη κατάσταση), ή απαντώνται με μια συγκεκριμένη συχνότητα πάνω από έναν μεγαλύτερο αριθμό επαναλήψεων (ένας περιορισμός βασισμένος στην συχνότητα). Πιο συγκεκριμένα, ένας περιορισμός *ταμπού* επιβάλλεται μόνο όταν οι ιδιότητες που κρύβονται κάτω από τον καθορισμό του ικανοποιούν ορισμένα κατώφλια πρόσφατης κατάστασης ή συχνότητας.

Στον περιορισμό βασισμένο στην πρόσφατη κατάσταση, η διάρκεια του *ταμπού* καθορίζεται και η λύση *ταμπού* διατηρείται σαν *ταμπού* σε όλη τη διάρκεια της αναζήτησης *ταμπού*. Οι κανόνες για τον καθορισμό της διάρκειας *ταμπού* ταξινομούνται ως στατικοί ή δυναμικοί. Οι στατικοί κανόνες διαλέγουν μια τιμή που παραμένει καθορισμένη για όλη τη διάρκεια της αναζήτησης. Οι δυναμικοί κανόνες επιτρέπουν την μεταβολή της τιμής της διάρκειας.

Στον περιορισμό βασισμένο στη συχνότητα, χρησιμοποιείται ένα μέτρο συχνότητας. Το μέτρο είναι ένας λόγος του οποίου ο αριθμητής αναπαριστάει το άθροισμα του αριθμού των εμφανίσεων ενός συγκεκριμένου γεγονότος και ο παρονομαστής αναπαριστά μία από τις ακόλουθες ποσότητες (Reeves 1995):

- Το άθροισμα των αριθμητών,
- Τη μέγιστη τιμή του αριθμητή, και
- Το μέσο όρο της τιμής του αριθμητή

Η κατάλληλη χρήση των κριτηρίων φιλοδοξίας μπορεί να είναι πολύ σημαντική στο να επιτρέψει στην αναζήτηση *ταμπού* να επιτύχει καλύτερη επίδοση. Ένα κριτήριο φιλοδοξίας μπορεί να είναι είτε εξαρτώμενο από το χρόνο είτε χρονικά ανεξάρτητο. Οι πρώτες εφαρμογές της αναζήτησης *ταμπού* χρησιμοποιούσαν μόνο έναν απλό τύπο του κριτηρίου φιλοδοξίας που είναι χρονικά ανεξάρτητο. Αυτό αποτελείται από την απομάκρυνση μιας δοκιμαστικής λύσης από μια ταξινόμηση *ταμπού* όταν η λύση δείχνει ακόμη καλύτερη επίδοση από την καλύτερη που είχε ληφθεί μέχρι τότε. Αυτό παραμένει ευρέως χρησιμοποιούμενο. Ένα άλλο ευρέως χρησιμοποιούμενο κριτήριο φιλοδοξίας είναι η φιλοδοξία εξ ορισμού (*aspiration by default*). Με αυτό το κριτήριο, εάν όλες οι διαθέσιμες κινήσεις ταξινομούνται ως *ταμπού*, και δε θεωρούνται επιτρεπτές από άλλα κριτήρια φιλοδοξίας, τότε επιλέγεται η λιγότερο *ταμπού* λύση. Αυτή θα μπορούσε να είναι μια λύση που χάνει την ταξινόμηση *ταμπού* από την ελάχιστη αύξηση στην τιμή του τρέχοντος αριθμού επανάληψης. Εκτός από αυτά τα κριτήρια, υπάρχουν μερικά άλλα κριτήρια που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία φιλοδοξίας όπως είναι η φιλοδοξία από στόχο (*aspiration by objective*), η φιλοδοξία μέσω της κατεύθυνσης αναζήτησης (*aspiration by search direction*) και η φιλοδοξία από την επιρροή (*aspiration by influence*) (Reeves 1995).

6.3.7. Βασικός αλγόριθμος αναζήτησης ταμπού

Σε αυτήν την παράγραφο θα περιγραφεί αναλυτικά ο βασικός αλγόριθμος AT, για να καταλήξουμε στον ψευδοκώδικα της μεθόδου. Πριν περιγραφεί η μέθοδος του αλγορίθμου AT, θα γίνει μία παρουσίαση της «Τοπικής Αναζήτησης» (*Local Search*), η οποία είναι μία ευριστική μέθοδος, γνωστή και ως «Ανάβαση Λόφου» (*Hill Climbing*). Ο αλγόριθμος Τοπικής Αναζήτησης ξεκινά από μια αρχική (ίσως, τυχαία παραγόμενη) λύση s^0 . Περαιτέρω, η διαδικασία αναζήτησης συνεχίζεται με την εκτέλεση μερικών διαδοχικών μετασχηματισμών των λύσεων,

π.χ. κάνοντας κινήσεις από λύσεις σε λύσεις. Μια κίνηση εφαρμόζεται στην τρέχουσα λύση s προκειμένου να αποκτηθεί μια νέα λύση s' από τη γειτονιά της τρέχουσας λύσης $\Theta(s)$. Οι κινήσεις ελέγχονται, π.χ. αποφάσεις σχετικά με την κίνηση σε γειτονικές λύσεις, ή όχι, λαμβάνονται ανάλογα με την ποιότητα των λύσεων (τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης f). Έτσι, εάν η απόφαση είναι «θετική», τότε η τρέχουσα λύση αντικαθίσταται από την γειτονική, η οποία θα χρησιμοποιηθεί ως «αφετηρία» για τις επόμενες δοκιμές, διαφορετικά, η αναζήτηση συνεχίζεται με την τρέχουσα λύση. Στους κλασσικούς αλγορίθμους τοπικής αναζήτησης, η απόφαση είναι «θετική» εφόσον η νέα λύση είναι σίγουρα καλύτερη από την τρέχουσα (δηλαδή η διαφορά στις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης είναι αρνητική ($\Delta f = f(s') - f(s) < 0$, όπου $s' \in \Theta(s)$)). Ολόκληρη η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου γίνει η τρέχουσα λύση s τοπικά βέλτιστη, δηλαδή, καμία καλύτερη λύση δεν υπάρχει στη γειτονιά της τρέχουσας λύσης ($\forall s' \in \Theta(s): f(s') \geq f(s)$). (Λαμβάνοντας ως δεδομένο μια γειτονιά Θ_k , η λύση που λαμβάνεται από την Τοπική Αναζήτηση μπορεί να θεωρηθεί ως βέλτιστη λύση όσον αφορά αυτήν την γειτονιά, π.χ. $k\text{-opt}(\text{imal})$ λύση. Ως εκ τούτου, τα ονόματα των αντίστοιχων διαδικασιών είναι: 2-opt, 3-opt, και ούτω καθεξής).

Υπό κάποια έννοια, ο αλγόριθμος AT (Glover 1989, Glover 1990) προέρχεται από την πολιτική που περιγράφεται ανωτέρω. Εντούτοις, ο αλγόριθμος AT υπερβαίνει αυτή την μέθοδο. Σε αντίθεση με τον κλασσικό αλγόριθμο τοπικής αναζήτησης (που περιορίζεται να βρει μια τοπικά βέλτιστη λύση μόνο), οι αλγόριθμοι που βασίζονται στον αλγόριθμο AT συνεχίζουν την αναζήτηση ακόμα κι αν βρεθεί μια τοπικά βέλτιστη λύση. Με συντομία, ο αλγόριθμος AT είναι μια διαδικασία διαδοχικών κινήσεων από το ένα τοπικό βέλτιστο στο άλλο. Το καλύτερο τοπικό βέλτιστο που θα βρεθεί κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας είναι η προκύπτουσα λύση του αλγορίθμου AT. Κατά συνέπεια, ο AT είναι μια εκτεταμένη Τοπική Αναζήτηση. Ο AT επιτρέπει τη διαφυγή από τα τοπικά βέλτιστα. Συνεπώς, ερευνά πολύ μεγαλύτερο μέρος του διαστήματος λύσης σε σύγκριση με τον αλγόριθμο Τοπικής Αναζήτησης. Ως εκ τούτου, ο AT προσφέρει περισσότερες ευκαιρίες για την ανακάλυψη υψηλής ποιότητας λύσεων σε σχέση με τον παραδοσιακό αλγόριθμο Τοπικής Αναζήτησης.

Η κεντρική ιδέα της μεθόδου AT, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους, επιτρέπει τις ανοδικές κινήσεις (*climbing*) όταν δεν υπάρχει καμία βελτιωμένη γειτονική λύση, π.χ. μια κίνηση επιτρέπεται ακόμα κι αν μια νέα λύση s' από τη γειτονιά της τρέχουσας λύσης s είναι χειρότερη από την τρέχουσα. Φυσικά, η επιστροφή στις τοπικά βέλτιστες λύσεις που έχουν επισκεφτεί

προηγούμενως απαγορεύεται προκειμένου να αποφευχθεί το κυκλικό πρόβλημα της αναζήτησης. Ο ΑΤ βασίζεται, όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη παράγραφο, σε μια μεθοδολογία απαγορεύσεων: μερικές κινήσεις είναι «παγωμένες» (γίνονται *ταμπού*) κατά διαστήματα.

Πιο αναλυτικά, ο ΑΤ ξεκινά από μια αρχική λύση s^0 στο S (σύνολο εφικτών λύσεων). Έπειτα, η διαδικασία συνεχίζεται με έναν επαναληπτικό τρόπο – μετακινούμενη από μια λύση s σε μια γειτονική s' . Σε κάθε βήμα της διαδικασίας, ένα ορισμένο υποσύνολο $\Theta'(s)$ από τις γειτονικές λύσεις της τρέχουσας λύσης εξετάζεται, και επιλέγεται η κίνηση (στη λύση $s' \in \Theta'(s) \subseteq \Theta(s)$), η οποία βελτιώνει περισσότερο την αντικειμενική τιμή της συνάρτησης f . Φυσικά, η s' δεν πρέπει απαραίτητα να είναι καλύτερη από την s : εάν δεν υπάρχουν κινήσεις βελτίωσης, ο αλγόριθμος ΑΤ επιλέγει αυτή που υποβιβάζει (*degrade*) λιγότερο (αυξάνει) την αντικειμενική συνάρτηση, π.χ. μια κίνηση εκτελείται στη γειτονική s' (ακόμα κι αν $f(s') > f(s)$). Για να εξαλείψουμε μια άμεση επιστροφή στη λύση που έχει μόλις προσπελαστεί, η αντίστροφη κίνηση πρέπει να απαγορευθεί. Αυτό γίνεται με την αποθήκευση της αντίστοιχης λύσης (κίνηση) (ή του «χαρακτηριστικού» της) σε μια μνήμη (που ονομάζεται λίστα ταμπού (T)). Η λίστα *ταμπού* κρατά πληροφορίες για τις τελευταίες $|T|$ κινήσεις που έχουν γίνει κατά τη διάρκεια της διαδικασίας αναζήτησης (κατά συνέπεια, μια κίνηση από το s στο s' θεωρείται ταμπού εάν η s' , ή «οι ιδιότητές» της, περιλαμβάνονται μέσα στην T). Αυτός ο τρόπος εμποδίζει τον αλγόριθμο να επιστρέψει σε μια λύση που έχει προσεγγιστεί στα τελευταία $|T|$ βήματα.

Εντούτοις, η απλή απαγόρευση μπορεί μερικές φορές να ελαττώσει την αποδοτικότητα της αναζήτησης. Επιπλέον, μπορεί να αξίζει τον κόπο να επιστρέψουμε μετά από λίγο σε μια λύση που έχει προσπελαστεί προηγούμενως για να ψάξουμε σε μια άλλη ελπιδοφόρο κατεύθυνση. Συνεπώς, ένα κριτήριο φιλοδοξίας εισάγεται ώστε να επιτρέψει στην κατάσταση ταμπού να βρεθεί κάτω από ορισμένες ευνοϊκές περιστάσεις. Συνήθως, μια κίνηση από το s στο s' (δεν έχει σημασία η θέση του) επιτρέπεται εάν $f(s') < f(s^*)$, όπου s^* είναι η καλύτερη λύση που έχει βρεθεί μέχρι εκείνη τη στιγμή. Ο κανόνας απόφασης που προκύπτει μπορεί έτσι να περιγραφεί ως εξής: αντικαταστήστε την τρέχουσα λύση s από τη νέα λύση s' εάν:

$$f(s') < f(s^*) \text{ or } (s' = \arg \min_{s'' \in \Theta(s)} f(s'') \text{ and } s' \text{ (or "attribute" of } s') \text{ is not tabu}) \quad 6-1$$

Η διαδικασία αναζήτησης σταματά μόλις ικανοποιείται ένα κριτήριο τερματισμού (παραδείγματος χάρη, ένας απριόρι σταθερός αριθμός επαναλήψεων

(δοκιμές) έχει εκτελεστεί). Ο ψευδοκώδικας για τον κανονικό (καθαρό) αλγόριθμο ΑΤ παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6-4**. Περισσότερες λεπτομέρειες για τις βασικές αρχές του αλγορίθμου ΑΤ, των τροποποιήσεων και των εφαρμογών του μπορούν να βρεθούν στις βιβλιογραφικές αναφορές (Glover and Laguna 1993, Hertz et al 1997).

```
function tabu_search(s);  
  
  //input: s – η αρχική λύση; output: s* – η καλύτερη λύση που έχει βρεθεί//  
  s* := s;  
  αρχικοποίησε την λίστα tabu T;  
  repeat //συνέχισε τον κύριο κύκλο του ΑΤ//  
    με δεδομένα τη συνάρτηση γειτονιάς Θ, την λίστα ταμπού T, και το  
    κριτήριο φιλοδοξίας, βρες την καλύτερη δυνατή λύση  $s' \in \Theta(s) \subseteq \Theta(s)$ ,  
    όπου το  $\Theta(s)$  αποτελείται από λύσεις (ή τα «χαρακτηριστικά» τους) που  
    δεν είναι στην λίστα ταμπού T ή ικανοποιούν το κριτήριο φιλοδοξίας;  
    s := s'; //αντικατέστησε την τρέχουσα λύση με την καινούρια//  
    εισήγαγε την λύση s (ή το «χαρακτηριστικό» του) στην λίστα tabu T;  
    if f(s) < f(s*) then s* := s; //σώσε την καλύτερη λύση μέχρι στιγμής//  
    ενημέρωσε την λίστα tabu T  
  until να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού  
  return s*  
  
end.
```

Σχήμα 6-4: Ψευδοκώδικας του κανονικού αλγορίθμου ΑΤ.

6.3.8. Παραλλαγές του αλγορίθμου ΑΤ

Ο αλγόριθμος αναζήτησης ταμπού έχει εφαρμοστεί σε πολλά προβλήματα όπως είναι το πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή (*Traveling Salesman Problem*) και της Δρομολόγησης των Οχημάτων (*Vehicle Routing Problem*), αλλά ακόμα και σε εκείνα τα προβλήματα, όπου η αναζήτηση ταμπού μπορεί να μην αποτελεί την πρώτη επιλογή, μπορεί να λειτουργήσει ως ένας μετά-ευριστικός αλγόριθμος, καθοδηγώντας άλλες τεχνικές αναζήτησης. Ακολουθεί μια παρουσίαση κάποιων παραλλαγών του ΑΤ.

6.3.8.1. Αντιδραστική Αναζήτηση Ταμπού (AAT)

Υπάρχουν διάφορες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν ένα συγκεκριμένο αλγόριθμο ΑΤ, παραδείγματος χάρη, το μήκος της λίστας *ταμπού* και το μέγεθος γειτονιάς. Η κατάλληλη ρύθμιση αυτών των παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της επίδοσης του αλγορίθμου ΑΤ. Ένας αλγόριθμος ΑΤ, ο οποίος ρυθμίζει αυτές τις παραμέτρους καθώς ψάχνει τον χώρο λύσεων ονομάζεται αλγόριθμος Αντιδραστικής Αναζήτησης Ταμπού (*Reactive Tabu Search*). Ο Battiti (1996) επισημαίνει ένα μειονέκτημα στη ρύθμιση αυτών των παραμέτρων πριν από τη διαδικασία αναζήτησης: χρειάζεται πολλή εμπειρία και γνώση για το πρόβλημα ή χρειάζεται πολύς πειραματισμός για να βρεθούν οι κατάλληλες ρυθμίσεις των παραμέτρων. Περαιτέρω, επισημαίνει ότι ένα «κρίσιμο ζήτημα» στους ευριστικούς αλγορίθμους είναι η εύρεση μιας ισορροπίας μεταξύ μιας λεπτομερούς αναζήτησης σε ένα τοπικό βέλτιστο καθώς και της διαφοροποίησης της αναζήτησης ώστε να περιληφθούν άλλα τμήματα του διαστήματος λύσης. Πράγματι, είναι πιθανό να μην υπάρχει καμία βέλτιστη ρύθμιση των παραμέτρων που να πετυχαίνει αυτή την ισορροπία. Κατά συνέπεια, ένας αλγόριθμος ΑΤ, που να έχει τη δυνατότητα του Αυτο-Συντονισμού (*Self-Tuning*) μπορεί να είναι απαραίτητος για να μπορεί ταυτόχρονα και να εξερευνεί αλλά και να ξεφεύγει από το τοπικό βέλτιστο.

Κάνοντας το χρόνο μιας λίστας *ταμπού* (δηλαδή, το χρόνο όπου μια κίνηση παραμένει *ταμπού*) αντιδραστικό (*reactive*), είναι ένας κοινός και πολύ αποτελεσματικός τρόπος για να αυξηθεί η ποιότητα του αλγορίθμου ΑΤ. Ο Battiti (1996) καθορίζει μια Hamming απόσταση ως έναν τρόπο για να μετρηθεί πόσο μακριά είναι μια λύση από μια άλλη. Με τη σύνδεση της διάρκειας της λίστας *ταμπού* σε αυτήν την απόσταση Hamming, ο Battiti (1996) ενδυναμώνει και διαφοροποιεί την αναζήτηση όπως απαιτείται. Στην ίδια εργασία, ο ίδιος προτείνει τη χρησιμοποίηση της ακόλουθης συνάρτησης, όπου $T=1$ στην αρχή (T είναι μια ιδιότητα του μήκους της λίστας *ταμπού*) και το L ορίζεται ως το μέγεθος γειτονιάς, για να αλλάξει τη διάρκεια της λίστας *ταμπού* ($T-REACT$) όταν τα τοπικά βέλτιστα επαναλαμβάνονται.

$$T-REACT(T) = \min \{ \max \{ T \times 1.1, T + 1 \}, L - 2 \} \quad 6-2$$

Το ανώτερο όριο του $L - 2$ εξασφαλίζει ότι η αναζήτηση *ταμπού* θα λαμβάνει πάντα μια απόφαση με βάση την αντικειμενική συνάρτηση και ποτέ δεν θα προεπιλέγει μια νέα λύση. Παρόμοια σχέδια για την τροποποίηση της διάρκειας της λίστας *ταμπού* έχουν αποδειχθεί επιτυχή (Toulouse et al 1998, Talbi et al

1998) όπως είναι ο αλγόριθμος AT στο λογισμικό Auto-Router του O'Rourke (1999).

6.3.8.2. *Επαναληπτική Αναζήτηση Ταμπού (EAT)*

Αν και ο αλγόριθμος AT είναι ένα ισχυρό εργαλείο βελτιστοποίησης, αντιμετωπίζει, με την κανονική μορφή του, χαρακτηριστικά λιγότερες ή περισσότερες δυσκολίες. Μερικές από αυτές είναι: ένας τεράστιος αριθμός τοπικών βέλτιστων πέρα από το διάστημα λύσης, κύκλοι (δηλαδή επαναλαμβανόμενες ακολουθίες) από τις διαμορφώσεις αναζήτησης (καταστάσεις) και το φαινόμενο που αποκαλείται «Αιτιοκρατικό Χάος» (ή Χαστικές Προσελκύνσεις) (Battiti and Tecchiolli 1994). Το τελευταίο μπορεί να χαρακτηριστεί από την κατάσταση στην οποία «η παραμονή» στα τοπικά βέλτιστα και τους κύκλους είναι απούσα, αλλά η τροχιά αναζήτησης είναι ακόμα περιορισμένη σε μια συγκεκριμένη περιοχή του διαστήματος λύσης. (Οι τροχιές είναι τυχαίες αν και το σύστημα (το σύνολο λύσεων) είναι αιτιοκρατικό (πεπερασμένο)). Έτσι, η τροχιά αναζήτησης θα επισκεφτεί μόνο ένα περιορισμένο μέρος του διαστήματος λύσης και εάν αυτό το τμήμα δεν περιέχει το συνολικό ελάχιστο (βέλτιστο), τότε αυτό δε θα βρεθεί ποτέ.

Προκειμένου να υπερνικηθούν αυτές τις δυσκολίες, έχει προταθεί μια ουσιαστική επέκταση της κανονικής AT – ο αλγόριθμος Επαναληπτικής Αναζήτησης Ταμπού (*Iterated Tabu Search*). Πρέπει να σημειωθεί ότι έχουν ήδη γίνει διάφορες προσπάθειες για να ενισχυθεί ο καθαρός AT. Μία από τις διασημότερες τροποποιήσεις, όπως αναλύθηκε στην προηγούμενη ενότητα, είναι η Αντιδραστική Αναζήτηση Ταμπού (Battiti and Tecchiolli 1994, Battiti 1996). Η Επαναληπτική Αναζήτηση Ταμπού (*Iterated Tabu Search*) θεωρείται μια επιθετικότερη προσπάθεια ακόμη και από τον αλγόριθμο AAT, ώστε να ενισχυθεί ο βασικός αλγόριθμος AT. Αυτό οφείλεται στα νέα σημαντικά χαρακτηριστικά γνωρίσματα που θα παρουσιάσουν παρακάτω.

Ο κανονικός (καθαρός) αλγόριθμος AT υπερβαίνει την Τοπική Αναζήτηση, και ο αλγόριθμος Επαναληπτικής Αναζήτησης Ταμπού προσπαθεί να υπερβεί τον κανονικό AT. Η καρδιά του EAT είναι η έννοια της ενδυνάμωσης και της διαφοροποίησης, που έχει αναλυθεί στην παράγραφο 6.3.4. Η αρχική προέλευση αυτής της ιδέας κρατά από το 1986 (Baum 1986). Από τότε, διάφορες τροποποιήσεις και βελτιώσεις της βασικής ιδέας έχουν προταθεί, μεταξύ αυτών, ο επαναληπτικός αλγόριθμος Lin-Kernighan (Johnson 1990), ο "*large step Markov chains*" (Martin et al 1991), η μεταβλητή αναζήτηση γειτονιάς (Mladenović and

Hansen 1997), και τελικά, η Τοπική Επαναληπτική Αναζήτηση (*Iterated Local Search*) (Lourenco et al 2002).

Κατά προσέγγιση, η Επαναληπτική Τοπική Αναζήτηση (ΕΤΑ) μπορεί να θεωρηθεί ως μια αρχή «καταστροφών και ανακτήσεων» βασισμένη στην πολιτική βελτιστοποίησης. Υπάρχουν δύο κύριες φάσεις (συστατικά) στην μέθοδο ΕΤΑ:

1. Η *φάση αναδημιουργίας* (μπορεί να αντιμετωπισθεί ως διαφοροποίηση της αναζήτησης), και
2. Η *τοπική φάση βελτίωσης* (μπορεί να αντιμετωπισθεί ως ενδυνάμωση της αναζήτησης).

Το επιπρόσθετο στοιχείο είναι η επιλογή ενός υποψηφίου για την αναδημιουργία. Κατά τη διάρκεια της πρώτης φάσης, μια υπάρχουσα λύση αναδημιουργείται (διαταράσσεται) με έναν κατάλληλο τρόπο. Στη δεύτερη φάση, γίνεται προσπάθεια να βελτιώσουμε τη λύση που μόλις "καταστράφηκε" όσο το δυνατόν καλύτερα, ενδεχομένως, η νέα (βελτιωμένη) λύση να είναι καλύτερη από τις λύσεις που έχουν ληφθεί στις προηγούμενες επαναλήψεις. Με την επανάληψη αυτών των φάσεων πολλές φορές επιδιώκονται υψηλής ποιότητας αποτελέσματα. Ο αλγόριθμος Επαναληπτικής Αναζήτησης Ταμπού μοιάζει πολύ με την προσέγγιση ΕΤΑ. Το κύριο ιδιαίτερο χαρακτηριστικό γνώρισμα του ΕΑΤ είναι ότι η κανονική (ή, ίσως, η τροποποιημένη) διαδικασία αναζήτησης ταμπού διαδραματίζει ένα ρόλο μιας αποτελεσματικής ενδυνάμωσης (π.χ. τοπική βελτίωση).

Έτσι, ο ΕΑΤ ξεκινά με τη βελτίωση μιας αρχικής λύσης (με τη βοήθεια του βασικού ΑΤ). Κατά συνέπεια, η πρώτη βελτιστοποιημένη λύση, έστω η s^* , επιτυγχάνεται. Περαιτέρω, μια δεδομένη λύση υποβάλλεται σε μια «καταστροφή», και μια νέα λύση, έστω s^- , λαμβάνεται. Ο στόχος μιας τέτοιας αναδημιουργίας δεν είναι να καταστραφεί η τρέχουσα λύση απολύτως – αντίθετα, είναι ιδιαίτερα επιθυμητό η προκύπτουσα λύση να κληρονομήσει κάποια χαρακτηριστικά του προηγούμενου τοπικού βέλτιστου, δεδομένου ότι τα μέρη αυτού του βέλτιστου μπορούν να είναι κοντά σε αυτά της συνολικά βέλτιστης λύσης. Είναι σημαντικό, εντούτοις, να διατηρείται ένα κατάλληλο επίπεδο διαφοροποίησης. Η αναδημιουργία δεν πρέπει να είναι πάρα πολύ ισχυρή, ούτε πάρα πολύ αδύνατη – διαφορετικά, ο αλγόριθμος που προκύπτει μπορεί να είναι αρκετά παρόμοιος με μία καθαρά τυχαία («τυφλή») *multistart*, ή μπορεί η διαδικασία να επιστρέφει περιοδικά σε λύσεις στις οποίες η αναδημιουργία έχει εφαρμοστεί. Όσον αφορά τις λύσεις που αναδημιουργούνται, δύο εναλλακτικές λύσεις υπάρχουν:

- α) η εκμετάλλευση, και

β) η εξερεύνηση.

Η εκμετάλλευση επιτυγχάνεται με την επιλογή μόνο του καλύτερου τρέχοντος τοπικού βέλτιστου (την καλύτερη μέχρι τώρα λύση) ως υποψήφια για την αναδημιουργία. Η εξερεύνηση πραγματοποιείται εάν μια από τις τοπικά βέλτιστες λύσεις (όχι απαραίτητα το καλύτερο τοπικό βέλτιστο), που έχει βρεθεί μέχρι τώρα, γίνεται αποδεκτή ως υποψήφια λύση – στην πραγματικότητα, κάθε βελτιστοποιημένη λύση μπορεί να θεωρηθεί ως πιθανή υποψήφια για την αναδημιουργία. Στην περίπτωση της εξερεύνησης, ποικίλες στρατηγικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επιλογή υποψηφίων. Στην απλούστερη περίπτωση, η αποκαλούμενη "*where you are*" (WYA) στρατηγική εφαρμόζεται, π.χ. κάθε νέο τοπικό βέλτιστο γίνεται αποδεκτό. Εντούτοις, περιπλοκότερες πολιτικές είναι διαθέσιμες, παραδείγματος χάρη, η επιλογή από μια ομάδα (μνήμη) των τοπικά βέλτιστων λύσεων, όπως γίνεται στον πληθυσμό που βασίζεται στους γενετικούς αλγορίθμους.

Η αναδημιουργημένη λύση s^- , χρησιμεύει ως μια εισαγωγή για την επόμενη διαδικασία αναζήτησης *ταμπού*, που αρχίζει αμέσως αφού τελειώσει η αναδημιουργία. Η διαδικασία AT επιστρέφει τη νέα βελτιστοποιημένη λύση s^* , η οποία (ή κάποιο άλλο τοπικό βέλτιστο) στη συνέχεια αναδημιουργείται, και ούτω καθεξής. Η νέα καλύτερη λύση (s^*) που βρίσκεται στην τρέχουσα επανάληψη σώζεται σε μια μνήμη. Αυτή η διαδικασία συνεχίζεται έως ότου ικανοποιηθεί ένας όρος τερματισμού, παραδείγματος χάρη, έως ότου εκτελεστεί ένας σταθερός αριθμός επαναλήψεων. Ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου EAT παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6-5**.

```

function iterated_tabu_search(s);
    //είσοδος:  $s$  – η αρχική λύση, έξοδος:  $s^*$  – η καλύτερη λύση που
    βρίσκεται//
     $s^* := \text{tabu\_search}(s)$ ; // βελτίωσε την αρχική λύση χρησιμοποιώντας την
    διαδικασία AT, πάρε την προκύπτουσα λύση  $s^*$  //
     $s := s^*$ ;  $s^* := s^*$ ;
    repeat // συνέχισε τον κύκλο της Επαναληπτικής Αναζήτησης Ταμπού//
         $s := \text{υποψήφια αποδοχή}(s^*, s, \dots)$ ; //διάλεξε μια λύση για την επόμενη
        αναδημιουργία//
         $s \sim := \text{αναδημιουργία}(s)$ ; //«κατέστρεψε» την λύση που επιλέχτηκε, πάρε
        μια καινούρια λύση  $s \sim$  //
         $s^* := \text{αναζήτηση ταμπού}(s \sim)$ ; //βελτίωσε την λύση  $s \sim$  μέσω του AT, πάρε
        την προκύπτουσα βέλτιστη λύση  $s^*$  //
        if  $f(s^*) < f(s)$  then  $s^* := s$  //σώσε την καλύτερη λύση μέχρι στιγμής
        (σαν ένα πιθανό αποτέλεσμα του EAT)//
    until να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού
    return  $s^*$ 
end.

```

Σχήμα 6-5: Ψευδοκώδικας του Αλγορίθμου ITS

6.4. Γενετικός Αλγόριθμος (Genetic Algorithm)

Οι συμβατικές τεχνικές αναζήτησης, όπως είναι η «Αναρρίχηση Λόφου» (*Hill-Climbing*), δεν μπορούν συχνά να βελτιστοποιήσουν μη γραμμικές πολύμορφες (*multimodal*) συναρτήσεις. Σε τέτοιες περιπτώσεις, μπορεί να χρειαστεί μια στοχαστική μέθοδος αναζήτησης. Όμως, μη κατευθυνόμενες τεχνικές αναζήτησης είναι εξαιρετικά αναποτελεσματικές για μεγάλες περιοχές. Ο Γενετικός Αλγόριθμος (ΓΑ), ο οποίος εφευρέθηκε από τον Holland (1975), είναι μια κατευθυνόμενη στοχαστική τεχνική αναζήτησης που μπορεί να βρει την συνολική βέλτιστη λύση σε πολυσύνθετους χώρους αναζήτησης με πολλές διαστάσεις. Ένας Γενετικός Αλγόριθμος μοντελοποιείται πάνω στη φυσική εξέλιξη δεδομένου ότι οι τελεστές που χρησιμοποιεί επηρεάζονται από την διαδικασία εξέλιξης. Αυτοί οι τελεστές, γνωστοί ως γενετικοί τελεστές, εφαρμόζονται σε άτομα ενός πληθυσμού μέσω μερικών γενεών για να βελτιώσουν σταδιακά την καταλληλότητά τους. Τα άτομα σε έναν πληθυσμό παρομοιάζονται με τα

χρωμοσώματα και συνήθως, αναπαριστάνονται σαν ακολουθίες από δυαδικούς αριθμούς.

Υπολογιστικοί Όροι	Βιολογικοί Όροι
Λύση σε ένα πρόβλημα	Άτομο (<i>Individual</i>)
Σύνολο λύσεων	Πληθυσμός (<i>Population</i>)
Ποιότητα μιας λύσης	Καταλληλότητα (<i>Fitness</i>)
Κωδικοποίηση μιας λύσης	Χρωμόσωμα
Μέρος της κωδικοποίησης μιας λύσης	Γονίδιο (<i>Gene</i>)
Τελεστές αναζήτησης	Διασταύρωση και Μετάλλαξη
Επαναχρησιμοποίηση των καλών λύσεων	Φυσική επιλογή

Πίνακας 6-1: Σύγκριση των όρων που χρησιμοποιούνται στην πληροφορική και στη βιολογία.

Η εξέλιξη ενός πληθυσμού ατόμων κατευθύνεται από το «θεώρημα του σχήματος» (Holland 1975). Ένα «σχήμα» αναπαριστά ένα σύνολο από άτομα, π.χ. ένα υποσύνολο του πληθυσμού, από την άποψη της ομοιότητας των bits σε ορισμένες θέσεις αυτών των ατόμων. Για παράδειγμα, το σχήμα 1*0* περιγράφει το σύνολο των ατόμων των οποίων το πρώτο και το τρίτο bit είναι 1 και 0, αντίστοιχα. Εδώ, το σύμβολο * σημαίνει ότι οποιαδήποτε τιμή θα ήταν αποδεκτή. Με άλλα λόγια, οι τιμές των bits στις θέσεις που περιέχουν * θα μπορούσαν να είναι είτε 0 ή 1 σε μια δυαδική ακολουθία. Ένα σχήμα χαρακτηρίζεται από δύο παραμέτρους που είναι το καθοριζόμενο μήκος και η τάξη. Το καθοριζόμενο μήκος είναι το μήκος μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου bit που έχουν αμετάβλητες τιμές. Η τάξη του σχήματος είναι ο αριθμός των bits με καθορισμένες τιμές. Σύμφωνα με τη θεωρία του σχήματος, η κατανομή του σχήματος μέσω του πληθυσμού από μία γενιά σε μία άλλη εξαρτάται από την τάξη του, που καθορίζει το μήκος και την καταλληλότητα.

Οι γενετικοί αλγόριθμοι δε χρησιμοποιούν πολλές γνώσεις από το πρόβλημα που βελτιστοποιείται και δε χειρίζονται άμεσα τις παραμέτρους του προβλήματος. Δουλεύουν με κώδικες που αναπαριστούν τις παραμέτρους. Επομένως, το πρώτο θέμα σε μία εφαρμογή ΓΑ είναι πως κωδικοποιούμε το υπό μελέτη πρόβλημα, π.χ. πως αναπαριστούμε τις παραμέτρους ενός προβλήματος. Οι ΓΑ δουλεύουν με ένα πληθυσμό πιθανών λύσεων, όχι μόνο μια πιθανή λύση, και επομένως, το δεύτερο θέμα είναι πως δημιουργείται ο αρχικός πληθυσμός των πιθανών λύσεων. Το τρίτο θέμα σε μία εφαρμογή ΓΑ είναι πως επιλέγεται ή

εφευρίσκεται ένα κατάλληλο σύνολο γενετικών τελεστών. Τέλος, όπως συμβαίνει και σε άλλους αλγορίθμους αναζήτησης, οι ΓΑ πρέπει να γνωρίζουν τα χαρακτηριστικά των λύσεων που έχουν ήδη βρεθεί για να τις βελτιώσουν περαιτέρω. Άρα, υπάρχει η ανάγκη για μια διασύνδεση μεταξύ του περιβάλλοντος του προβλήματος και του ίδιου του ΓΑ για να έχει τη δυνατότητα ο αλγόριθμος να έχει αυτή τη γνώση. Ο σχεδιασμός μιας τέτοιας διασύνδεσης μπορεί να θεωρηθεί ως το τέταρτο σημαντικό ζήτημα.

6.4.1. Αναπαράσταση του πληθυσμού

Οι ΓΑ λειτουργούν πάνω σε έναν αριθμό πιθανών λύσεων, όπως έχει αναφερθεί στην παραπάνω παράγραφο, που ονομάζεται πληθυσμός και αποτελείται από κάποια κωδικοποίηση του συνόλου των παραμέτρων. Χαρακτηριστικά, ένας πληθυσμός αποτελείται από περίπου 30 έως 100 άτομα, αν και, μια παραλλαγή που ονομάζεται «*micro GA*» χρησιμοποιεί πολύ μικρούς πληθυσμούς, ~10 άτομα, έχοντας περιορισμένη στρατηγική αναπαραγωγής και αντικατάστασης σε μία προσπάθεια να επιτευχθεί εκτέλεση σε πραγματικό χρόνο.

Οι παράμετροι προς βελτιστοποίηση συνήθως αναπαριστούνται με έναν τύπο ακολουθίας (*string*), αφού οι γενετικοί τελεστές είναι κατάλληλοι για αυτόν τον τύπο αναπαράστασης. Η μέθοδος της αναπαράστασης έχει σημαντική επίδραση στην επίδοση του γενετικού αλγορίθμου. Τα διαφορετικά σχήματα αναπαράστασης μπορεί να προκαλέσουν διαφορετικές επιδόσεις αναφορικά με την ακρίβεια και τον υπολογιστικό χρόνο (Karr 1991).

Υπάρχουν δύο γενικές μέθοδοι αναπαράστασης για αριθμητικά προβλήματα βελτιστοποίησης (Michalewicz, 1992, Davis, 1991). Η προτεινόμενη μέθοδος είναι η μέθοδος αναπαράστασης με μια δυαδική ακολουθία. Ο λόγος που αυτή η μέθοδος είναι δημοφιλής είναι το γεγονός ότι το δυαδικό αλφάβητο προσφέρει τον μέγιστο αριθμό σχημάτων ανά bit σε σύγκριση με άλλες τεχνικές κωδικοποίησης. Σε αυτή την μέθοδο αναπαράστασης, κάθε μεταβλητή απόφασης στο σύνολο παραμέτρων κωδικοποιείται ως μια δυαδική σειρά και στη συνέχεια αυτές οι παράμετροι συνδέονται για να σχηματίσουν ένα χρωμόσωμα. Διάφορα σχήματα δυαδικής κωδικοποίησης μπορούν να βρεθούν στη βιβλιογραφία, όπως είναι η ομοιόμορφη κωδικοποίηση και η Gray scale κωδικοποίηση. Η χρήση της κωδικοποίησης Gray έχει υποστηριχτεί σαν μια μέθοδο για να αντιμετωπιστεί η κρυμμένη εύνοια (*representational bias*) στη συμβατική δυαδική αναπαράσταση, αφού η απόσταση Hamming μεταξύ διπλανών τιμών είναι σταθερή (Holstien

1971). Εμπειρικά στοιχεία (Caruana and Schaffer 1988) δείχνουν ότι μεγάλες αποστάσεις Hamming στο χάρτη αναπαράστασης μεταξύ διπλανών τιμών, όπως συμβαίνει στην κανονική δυαδική αναπαράσταση, μπορούν να προκαλέσουν μη αξιόπιστη διαδικασία αναζήτησης ή αυτή μπορεί να θεωρηθεί ανίκανη να εντοπίσει αποτελεσματικά το σφαιρικό ελάχιστο. Μια περαιτέρω προσέγγιση του (Schmitendorgf et al 1992) είναι η χρήση λογαριθμικής κλίμακας στην μετατροπή των δυαδικά κωδικοποιημένων χρωμοσωμάτων στις πραγματικές φαινοτυπικές τιμές τους. Αν και η ακρίβεια των τιμών των παραμέτρων είναι ενδεχομένως λιγότερο σταθερή όσον αφορά το επιθυμητό εύρος, σε προβλήματα όπου το εύρος των εφικτών παραμέτρων είναι άγνωστο, ένα μεγαλύτερο διάστημα αναζήτησης μπορεί να καλυφθεί με τον ίδιο αριθμό bits σε σχέση με ένα γραμμικό σχήμα απεικόνισης επιτρέποντας την μείωση του υπολογιστικού κόστους για την αναζήτηση αγνώστων περιοχών αναζήτησης.

Η δεύτερη μέθοδος κωδικοποίησης είναι η χρησιμοποίηση ενός διανύσματος ακέραιων ή πραγματικών αριθμών, με τον κάθε ακέραιο ή πραγματικό αριθμό να αναπαριστά μια μοναδική παράμετρο. Για μερικές περιοχές ενός προβλήματος, υποστηρίζεται ότι η δυαδική αναπαράσταση είναι στην πραγματικότητα παραπλανητική γιατί κρύβει τη φύση της αναζήτησης (Bramlette 1991). Στο πρόβλημα επιλογής υποσυνόλων (Lucasius and Kateman 1992), παραδείγματος χάρη, η χρήση μιας αναπαράστασης ακέραιων αριθμών και *look-up* πινάκων παρέχει έναν κατάλληλο και φυσικό τρόπο να διαχωρίσουμε την απεικόνιση (*mapping*) από την αναπαράσταση στην περιοχή του προβλήματος.

Η χρήση των γονιδίων με πραγματικές τιμές στους ΓΑ θεωρείται από τον Wright (1991) ότι προσφέρει διάφορα πλεονεκτήματα στην αριθμητική συνάρτηση βελτιστοποίησης σε σχέση με τις δυαδικές κωδικοποιήσεις. Η αποδοτικότητα των ΓΑ αυξάνεται δεδομένου ότι δεν υπάρχει καμία ανάγκη να μετατραπούν τα χρωμοσώματα στους φαινοτύπους πριν από κάθε αξιολόγηση της συνάρτησης. Επίσης, απαιτείται λιγότερη μνήμη αφού αποδοτικές *floating-point* εσωτερικές αναπαραστάσεις στον υπολογιστή μπορούν να χρησιμοποιηθούν άμεσα, καθώς δεν υπάρχει καμία απώλεια στην ακρίβεια εξαιτίας της κωδικοποίησης σε δυαδικές ή άλλες τιμές, και υπάρχει μεγαλύτερη ελευθερία να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί γενετικοί τελεστές. Η χρήση των κωδικοποιήσεων πραγματικών τιμών (*real-valued*) περιγράφεται λεπτομερώς από τον Michalewicz (1992) και μπορεί να βρεθεί στη βιβλιογραφία στις στρατηγικές εξέλιξης (Bäck et al 1991).

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι, όταν ένα σχήμα δυαδικής αναπαράστασης χρησιμοποιείται, ένα σημαντικό ζήτημα είναι η απόφαση του αριθμού των bits που θα χρησιμοποιηθούν για την κωδικοποίηση των παραμέτρων που θα βελτιστοποιηθούν. Κάθε παράμετρος πρέπει να κωδικοποιηθεί με τον βέλτιστο αριθμό bits καλύπτοντας όλες τις πιθανές λύσεις στο χώρο λύσεων. Όταν χρησιμοποιούνται πολύ λίγα ή πάρα πολλά bits η απόδοση μπορεί να επηρεαστεί δυσμενώς.

6.4.2. Δημιουργία του αρχικού πληθυσμού

Έχοντας αποφασίσει σχετικά με την αναπαράσταση, το πρώτο βήμα σε έναν απλό γενετικό αλγόριθμο είναι η δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού, δηλαδή, μιας ομάδας αρχικών λύσεων. Υπάρχουν δύο τρόποι σχηματισμού του αρχικού πληθυσμού. Ο πρώτος προκύπτει από την τυχαία παραγωγή λύσεων που δημιουργούνται από μια γεννήτρια τυχαίων αριθμών. Αυτή η μέθοδος προτιμάται για προβλήματα για τα οποία δεν υπάρχει γνώση από πριν ή για την αξιολόγηση της επίδοσης ενός αλγορίθμου.

Η δεύτερη μέθοδος χρησιμοποιεί γνώση από πριν σχετικά με το δοθέν πρόβλημα βελτιστοποίησης. Χρησιμοποιώντας αυτή τη γνώση, ένα σύνολο προδιαγραφών λαμβάνονται υπόψη και λύσεις οι οποίες ικανοποιούν αυτές τις προδιαγραφές, συλλέγονται για να σχηματίσουν έναν αρχικό πληθυσμό. Σε αυτήν την περίπτωση, ο ΓΑ αρχίζει με ένα σύνολο κατά προσέγγιση γνωστών λύσεων και άρα συγκλίνει σε μια βέλτιστη λύση σε λιγότερο χρόνο σε σχέση με την προηγούμενη μέθοδο.

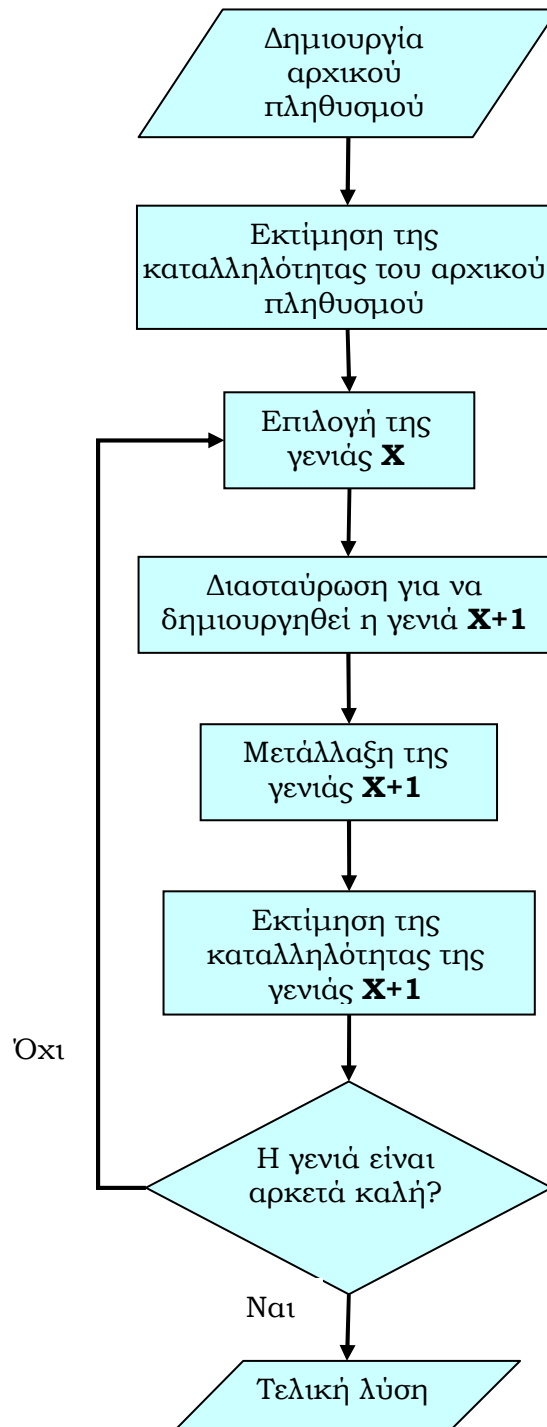
6.4.3. Γενετικοί τελεστές

Το διάγραμμα ροής ενός απλού γενετικού αλγορίθμου δίνεται στο **Σχήμα 6-6**. Υπάρχουν τρεις γενικοί γενετικοί τελεστές:

- η επιλογή (selection),
- η διασταύρωση (crossover) και
- η μετάλλαξη (mutation).

Μερικές φορές εφαρμόζεται ένας πρόσθετος τελεστής αναπαραγωγής, η αντιστροφή. Μερικοί από αυτούς τους τελεστές επηρεάστηκαν από τη φύση και, στη βιβλιογραφία, μπορούν να βρεθούν πολλές εκδόσεις αυτών των τελεστών. Δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν όλοι αυτοί οι τελεστές σε έναν ΓΑ. Η

επιλογή ή ο σχεδιασμός των τελεστών εξαρτάται από το πρόβλημα και το σχήμα αναπαράστασης που χρησιμοποιείται. Λόγου χάρη, οι τελεστές που προορίζονται για δυαδικές ακολουθίες δεν μπορούν άμεσα να κωδικοποιηθούν με ακέραιους ή πραγματικούς αριθμούς.



Σχήμα 6-6: Διάγραμμα ροής ενός απλού γενετικού αλγόριθμου.

6.4.3.1. *Επιλογή (Selection)*

Ο σκοπός της διαδικασίας επιλογής είναι η αναπαραγωγή περισσότερων αντιγράφων ατόμων των οποίων οι τιμές καταλληλότητας (*fitness*) είναι υψηλότερες από τα αντίγραφα των οποίων οι τιμές καταλληλότητας είναι χαμηλές. Η διαδικασία επιλογής έχει σημαντική επίδραση στην οδήγηση της αναζήτησης προς μια περιοχή με καλές προοπτικές και στην ανεύρεση καλών λύσεων σε σύντομο χρονικό διάστημα. Όμως, η ποικιλομορφία του πληθυσμού πρέπει να διατηρηθεί για να αποφευχθεί η πρόωρη σύγκλιση και να προσεγγιστεί η συνολική βέλτιστη λύση. Στους ΓΑ υπάρχουν δύο κυρίως διαδικασίες επιλογής: η αναλογική επιλογή και η επιλογή που βασίζεται στην κατάταξη (Whitely and Hanson 1989).

Η επιλογή ανάλογα με την καταλληλότητα χρησιμοποιείται στην αρχική παρουσίαση του Holland. Αναφέρει ότι οι φορές που ένα άτομο αναμένεται να αναπαραγάγει υπολογίζεται από το πηλίκο της καταλληλότητας του ατόμου με το μέσο όρο της καταλληλότητας του πληθυσμού. Το ίδιο σχήμα συναντάται στη φύση και οι βιολόγοι αναφέρονται σε αυτό ως επιλογή βιωσιμότητας (*Viability Selection*).

Υπάρχουν δύο δειγματοληπτικές μέθοδοι για αυτήν την επιλογή γνωστές ως δειγματοληψία τροχού ρουλέτας (*Roulette Wheel Sampling*) και στοχαστική καθολική δειγματοληψία (*Stochastic Universal Sampling*). Η πρώτη αναθέτει τα μέρη - φέτες ενός τροχού σε κάθε άτομο. Το μέγεθος κάθε φέτας είναι ανάλογο με την καταλληλότητα του ατόμου. Μετά από μια τυχαία περιστροφή του τροχού για την επιλογή ενός ατόμου για την επόμενη γενιά, τα άτομα που βρίσκονται σε τομείς με μεγάλα εύρη τα οποία συμβολίζουν υψηλές τιμές καταλληλότητας, θα έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να επιλεγούν. Με την περιστροφή του τροχού N φορές θα επιλεγούν N άτομα (με επαναλήψεις), τα οποία θα αποτελέσουν την ομάδα των πιθανών γονέων.

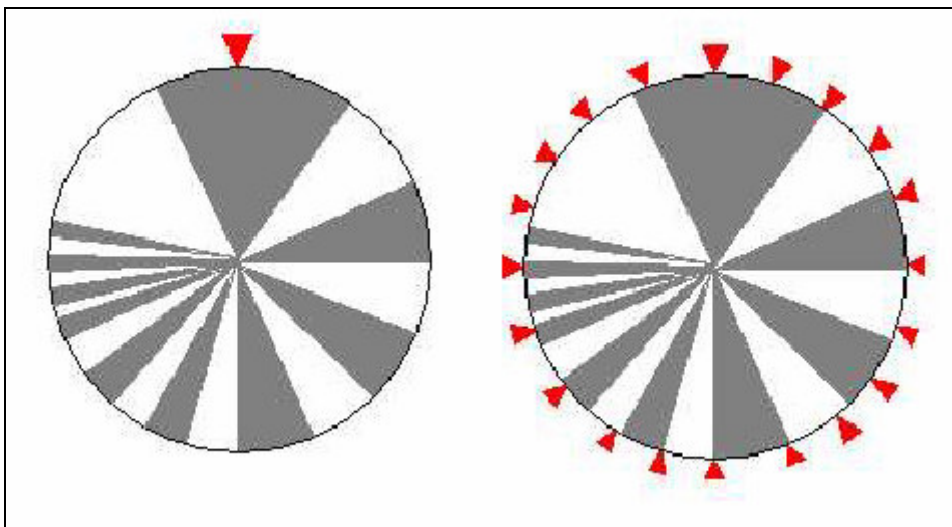
Ωστόσο, λόγω της στοχαστικής φύσης της δειγματοληψίας, είναι δυνατόν, ο τροχός να σταματήσει στην μικρή φέτα του χειρότερου ατόμου (στη χειρότερη περίπτωση, αυτό μπορεί να συμβεί N φορές). Επίσης, το μεγάλο μέρος του καταλληλότερου ατόμου είναι πιθανό να χάνεται κάθε φορά.

Τα παραπάνω πιθανά προβλήματα οδήγησαν στην πρόταση της καθολικής στοχαστικής δειγματοληπτικής μεθόδου. Εδώ, ο τροχός της ρουλέτας χωρίζεται όπως πριν, αλλά αντί της περιστροφής του τροχού N φορές με ένα δείκτη, περιστρέφεται μια φορά μόνο αλλά με N δείκτες, που καταλαμβάνουν τον ίδιο

χώρο. Αυτό εξασφαλίζει ότι τα καλά άτομα δεν μπορούν να λείψουν στην ομάδα από ένα λάθος της φύσης.

Εάν η καταλληλότητα ενός ατόμου που διαιρείται με τη μέση καταλληλότητα του πληθυσμού συμβολίζεται με x και x_i είναι το ακέραιο μέρος του x , τότε η στοχαστική καθολική δειγματοληψία εγγυάται να επιλέξει αυτό το άτομο τουλάχιστον x_i και το πολύ-πολύ $x_i + 1$ φορές.

Το **Σχήμα 6-7** παρουσιάζει την αναπαράσταση της δειγματοληψίας με τον τροχό ρουλέτας στα αριστερά και της στοχαστικής καθολικής δειγματοληψίας στα δεξιά. Μπορούν εύκολα να διακριθούν δύο πολύ κατάλληλα άτομα, έξι κατάλληλα, πέντε λιγότερο κατάλληλα και επτά ακατάλληλα. Ο αριστερός τροχός θα πρέπει να περιστραφεί 20 φορές προκειμένου να πάρουμε ως αποτέλεσμα έναν ενδιάμεσο πληθυσμό μεγέθους 20, ενώ αντιθέτως, μια περιστροφή του δεξιού τροχού αρκεί.



Σχήμα 6-7: Τροχός ρουλέτας και στοχαστική καθολική δειγματοληψία.

Παρακάτω παρουσιάζεται ένας τρόπος με τον οποίο η καθολική στοχαστική δειγματοληψία θα μπορούσε να εφαρμοστεί (θα πρέπει να σημειώσουμε ωστόσο ότι αυτό το δείγμα αλγορίθμου δεν εγγυάται ένα σταθερό μέγεθος για τον ενδιάμεσο πληθυσμό αλλά αυτό δεν έχει καμία αρνητική επίπτωση στο γενετικό αλγόριθμο):

Για κάθε ατομικό i κάνε:

$\mathbf{x}$ = καταλληλότητα (i) / μέση καταλληλότητα του πληθυσμού;

$\mathbf{x_i}$ = ακέραιο (integer) μέρος του ($\mathbf{x}$);

$\mathbf{x}_f$ = δεκαδικό (fractional) μέρος του ($\mathbf{x}$);
εισήγαγε $\mathbf{x}_i$ αντίγραφο από αυτό στον ενδιάμεσο πληθυσμό
με πιθανότητα $\mathbf{x}_f$ πρόσθεσε ένα ακόμη αντίγραφο

Ένα πρόβλημα που παρουσιάζεται στην μέθοδο της επιλογής, ανάλογα με την καταλληλότητα των ατόμων, είναι ότι συνήθως συγκλίνει πάρα πολύ γρήγορα. Μερικά πολύ κατάλληλα άτομα δημιουργούν πολλούς απογόνους και τα γονίδιά τους κυριαρχούν στον πληθυσμό μετά από μερικές γενεές. Η έλλειψη ποικιλομορφίας που εμφανίζεται ουσιαστικά σταματά την εξέλιξη.

Ένας τρόπος για να αποφευχθεί η γρήγορη σύγκλιση είναι ο περιορισμός του εύρους των δοκιμών που έχει κατανεμηθεί για κάθε ένα άτομο, έτσι ώστε κανένα άτομο να μην παράγει πάρα πολλούς απογόνους. Η βασισμένη σε ταξινόμηση (*ranking-based*) διαδικασία παραγωγής βασίζεται στην παραπάνω ιδέα. Σύμφωνα με αυτή την διαδικασία, κάθε άτομο παράγει έναν αναμενόμενο αριθμό απογόνων ο οποίος βασίζεται στην κατάταξη της τιμής καταλληλότητας του και όχι στο μέγεθος (Baker 1985). Αυτή η ταξινόμηση μπορεί να βασιστεί απλά σε μια γραμμική διάταξη των τιμών καταλληλότητας ή σε περιπλοκότερες ταξινομήσεις όπως απαιτείται από το κάθε πρόβλημα.

Η επιλογή πρωταθλήματος (*tournament selection*) είναι μια άλλη ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος επιλογής της οποίας το πλεονέκτημα είναι η αποδοτικότητα. Η επιλογή ανάλογα με την καταλληλότητα των ατόμων έπρεπε να κάνει δύο περάσματα μέσω των ατόμων, ένα για να υπολογίσει το μέσο όρο και ένα στον κύριο βρόχο. Η επιλογή με βάση την κατάταξη (*rank selection*) έπρεπε να ταξινομήσει όλα τα άτομα που είναι πάλι μια αρκετά χρονοβόρα διαδικασία από άποψη υπολογιστικού χρόνου.

Στην επιλογή πρωταθλήματος, δύο άτομα επιλέγονται τυχαία. Ένα αντίγραφο του καταλληλότερου ατόμου τοποθετείται στον ενδιάμεσο πληθυσμό και τα δύο άτομα επιστρέφονται στον αρχικό πληθυσμό έτσι ώστε να μπορούν να επιλεγούν πάλι. Μια τροποποίηση αυτού του σχεδίου είναι να επιλεγεί το λιγότερο κατάλληλο άτομο με μια μικρή πιθανότητα που μπορεί να είναι μια παράμετρος στο σύστημα.

6.4.3.2. Διασταύρωση (*crossover*) ή επανασύνδεση (*recombination*)

Αυτή η λειτουργία θεωρείται ότι κάνει τον ΓΑ διαφορετικό από άλλους αλγόριθμους. Χρησιμοποιείται για τη δημιουργία δύο νέων ατόμων (παιδιά) από δύο άτομα που υπάρχουν (γονείς) τα οποία λαμβάνονται από τον τρέχοντα

πληθυσμό με τη λειτουργία της επιλογής. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να γίνει αυτό. Μερικές γνωστές λειτουργίες διασταύρωσης είναι η διασταύρωση ενός σημείου, η διασταύρωση δύο σημείων, η κυκλική διασταύρωση και η ομοιόμορφη διασταύρωση.

Μία διασταύρωση ενός σημείου είναι η πιο απλή λειτουργία διασταύρωσης. Δύο άτομα επιλέγονται τυχαία ως γονείς από την ομάδα των ατόμων που έχει σχηματιστεί από τη διαδικασία επιλογής και κόβονται σε ένα τυχαία επιλεγόμενο σημείο. Οι ουρές, που είναι τα μέρη μετά το σημείο αποκοπής, αντιμετωπίζονται και παράγονται δύο νέα άτομα (παιδιά). Πρέπει να σημειώσουμε ότι αυτή η λειτουργία δεν αλλάζει τις τιμές των bits. Παραδείγματα παρουσιάζονται στα σχήματα **Σχήμα 6-8**, **Σχήμα 6-9**, **Σχήμα 6-10**, και **Σχήμα 6-11** για διαφορετικές λειτουργίες διασταύρωσης.

Στην ομοιόμορφη διασταύρωση (Syswerda 1989), μια μάσκα διασταύρωσης που έχει το ίδιο μήκος με τις δομές χρωμοσωμάτων δημιουργείται τυχαία, και η ισοτιμία (*parity*) των bits στην μάσκα δείχνει ποιος από τους δύο γονείς θα δώσει bits στους απόγονους. Ας μελετήσουμε το παράδειγμα που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6-11**. Στο παράδειγμα αυτό, ο πρώτος απόγονος, *Απόγονος 1*, παράγεται με τη λήψη bit από τον *Γονέα 1* εάν το αντίστοιχο bit της μάσκας είναι 1 ή με τη λήψη bit από τον *Γονέα 2* εάν το αντίστοιχο bit της μάσκας είναι 0. Ο *Απόγονος 2* δημιουργείται χρησιμοποιώντας το αντίστροφο της μάσκας ή, ισοδύναμα, ανταλλάσσοντας τον *Γονέα 1* με τον *2*.

Η ομοιόμορφη διασταύρωση, όπως και η διασταύρωση σε πολλά σημεία, έχει θεωρηθεί ότι μειώνει την εύνοια (*bias*) που συνδέεται με το μήκος της δυαδικής αναπαράστασης που χρησιμοποιείται και την συγκεκριμένη κωδικοποίηση για ένα δεδομένο σύνολο παραμέτρων. Αυτό βοηθά στην αντιμετώπιση της εύνοιας προς τα κοντά (*short*) substrings που υπάρχει στη διασταύρωση ενός σημείου χωρίς να είναι αναγκαία η ακριβής κατανόηση της σημασίας των bits των ατόμων στην αναπαράσταση χρωμοσωμάτων. Οι Spears και De Jong (1991) έδειξαν ότι η ομοιόμορφη διασταύρωση μπορεί να παραμετροποιηθεί με την εφαρμογή μιας πιθανότητας στην ανταλλαγή των bits. Αυτή η πρόσθετη παράμετρος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ελέγξει το ποσό της αποσύνθεσης (*disruption*) κατά τη διάρκεια της επανασύνδεσης χωρίς να εισάγει μια εύνοια (*bias*) προς το μήκος της αναπαράστασης που χρησιμοποιείται. Όταν χρησιμοποιείται η ομοιόμορφη διασταύρωση με αλληλόμορφα γονίδια (*alleles*) πραγματικών τιμών, αναφέρεται συνήθως ως *διακριτή επανασύνδεση*.

Γονέας 1	1 0 0 0 1 0 0 1 1 1 1
Γονέας 2	0 1 1 0 1 1 0 0 0 1 1
Απόγονος 1	1 0 0 0 1 1 0 0 0 1 1
Απόγονος 2	0 1 1 0 1 0 0 1 1 1 1

Σχήμα 6-8: Διασταύρωση ενός σημείου

Γονέας 1	1 0 1 0 0 0 1 1 0 1 0
Γονέας 2	0 1 1 0 1 1 1 1 0 1 1
Απόγονος 1	1 0 1 0 1 1 1 1 0 1 0
Απόγονος 2	0 1 1 0 0 0 1 1 0 1 1

Σχήμα 6-9: Διασταύρωση δύο σημείων

Γονέας 1	1 2 3 4 5 6 7 8
Γονέας 2	a b c d e f g h
Απόγονος 1	1 b 3 d e 6 g 8
Απόγονος 2	a 2 c 4 5 f 7 h

Σχήμα 6-10: Κυκλική Διασταύρωση

Γονέας 1	1 0 0 1 0 1 1
Γονέας 2	0 1 0 1 1 0 1
Πρότυπο	1 1 0 1 0 0 1
Απόγονος 1	1 0 0 1 1 0 1
Απόγονος 2	0 1 0 1 0 1 1

Σχήμα 6-11: Ομοιόμορφη Διασταύρωση

6.4.3.3. Μετάλλαξη (mutation)

Σε αυτή τη διαδικασία, όλα τα άτομα ελέγχονται από bit σε bit και οι τιμές των bit αντιστρέφονται τυχαία σύμφωνα με έναν καθορισμένο ρυθμό. Σε αντίθεση

με τη διασταύρωση, αυτή είναι μια μοναδιαία λειτουργία. Δηλαδή, μια ακολουθία παιδιού παράγεται από μία μόνο ακολουθία γονέα. Ο τελεστής μετάλλαξης αναγκάζει τον αλγόριθμο να ψάξει νέες περιοχές. Τελικά, βοηθάει τον ΓΑ να αποφύγει την πρόωρη σύγκλιση και να βρει την συνολική βέλτιστη λύση. Ένα παράδειγμα δίνεται στο **Σχήμα 6-12**.

Όπως και σε άλλους τελεστές, υπάρχουν πολλές παραλλαγές αυτού του τελεστή στη βιβλιογραφία. Στους ΓΑ, η μετάλλαξη εφαρμόζεται τυχαία με χαμηλή πιθανότητα, συνήθως κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0,001 και 0,01, και τροποποιεί στοιχεία στα χρωμοσώματα. Συνήθως, θεωρείται ως τελεστής υποβάθρου (*background operator*), καθώς η μετάλλαξη θεωρείται συχνά ότι παρέχει μια εγγύηση ότι η πιθανότητα αναζήτησης οποιασδήποτε δεδομένης σειράς δεν θα είναι ποτέ μηδέν και ενεργεί ως δίκτυ ασφαλείας για να ανακτήσει το καλό γενετικό υλικό που μπορεί να χαθεί κατά τις διαδικασίες της επιλογής και της διασταύρωσης (Goldberg 1989).

Γονέας 1	1 1 0 0 0 1 0 1 1 1 0
Απόγονος 1	1 1 0 0 1 1 0 1 1 1 0

Σχήμα 6-12: Μετάλλαξη

6.4.3.4. Αντιστροφή

Αυτός ο πρόσθετος τελεστής χρησιμοποιείται για έναν αριθμό προβλημάτων όπως είναι το πρόβλημα τοποθέτησης κελιού, προβλήματα διάταξης και το πρόβλημα του πλανόδιου πωλητή. Επίσης, ενεργεί σε ένα άτομο τη φορά. Δύο σημεία επιλέγονται τυχαία από ένα άτομο και το μέρος της ακολουθίας μεταξύ αυτών των δύο σημείων αντιστρέφεται (**Σχήμα 6-13**).

Γονέας 1	1 0 1 1 0 0 1 1 1 0
Απόγονος 1	1 0 0 0 1 1 1 1 1 0

Σχήμα 6-13: Αντιστροφή ενός τμήματος δυαδικής ακολουθίας

6.4.4. Παράμετροι ελέγχου

Σημαντικοί παράμετροι ελέγχου ενός απλού ΓΑ αποτελούν το μέγεθος του πληθυσμού (αριθμός ατόμων σε έναν πληθυσμό), ο ρυθμός διασταύρωσης και ο ρυθμός μετάλλαξης. Πολλοί ερευνητές μελέτησαν την επίδραση αυτών των παραμέτρων στην επίδοση ενός ΓΑ (Schaffer et al 1989, Grefenstette 1986, Fogarty 1989). Τα κύρια συμπεράσματα παρουσιάζονται παρακάτω.

Ένα μεγάλο μέγεθος πληθυσμού σημαίνει τον ταυτόχρονο χειρισμό πολλών λύσεων και αυξάνει τον υπολογιστικό χρόνο ανά επανάληψη, όμως, αφού χρησιμοποιούνται πολλά δείγματα από την περιοχή αναζήτησης, η πιθανότητα σύγκλισης σε μια συνολική βέλτιστη λύση είναι υψηλότερη από ότι όταν χρησιμοποιείται ένα μικρό μέγεθος πληθυσμού. Ο ρυθμός διασταύρωσης καθορίζει την συχνότητα της λειτουργίας της διασταύρωσης. Είναι χρήσιμο στην αρχή της διαδικασίας βελτιστοποίησης να βρεθεί μια περιοχή με καλές προοπτικές. Μια χαμηλή συχνότητα διασταύρωσης μειώνει την ταχύτητα σύγκλισης σε μια τέτοια περιοχή. Εάν η συχνότητα είναι πολύ υψηλή, οδηγεί σε κορεσμό γύρω από μια λύση. Η λειτουργία της μετάλλαξης ελέγχεται από τον ρυθμό μετάλλαξης. Η λειτουργία της μετάλλαξης εισάγει υψηλή ποικιλομορφία στον πληθυσμό και μπορεί να προκαλέσει αστάθεια. Από την άλλη μεριά, είναι συνήθως πολύ δύσκολο για ένα ΓΑ να βρει μια συνολική βέλτιστη λύση με έναν πολύ χαμηλό ρυθμό μετάλλαξης.

6.4.5. Η συνάρτηση καταλληλότητας (fitness)

6.4.5.1. Εκτίμηση συνάρτησης καταλληλότητας (fitness)

Η μονάδα εκτίμησης καταλληλότητας λειτουργεί ως μια διασύνδεση μεταξύ του ΓΑ και του προβλήματος βελτιστοποίησης. Ο ΓΑ αξιολογεί τις λύσεις ως προς την ποιότητά τους σύμφωνα με τις πληροφορίες που έχουν παραχθεί από αυτή την μονάδα και όχι χρησιμοποιώντας άμεση πληροφορία για τη δομή τους. Σε μηχανικά προβλήματα σχεδιασμού, οι λειτουργικές προδιαγραφές καθορίζονται στο σχεδιαστή ο οποίος έπειτα πρέπει να παράγει μια δομή η οποία να εκτελεί τις επιθυμητές λειτουργίες μέσα από τους προκαθορισμένους περιορισμούς. Η ποιότητα μιας προτεινόμενης λύσης συνήθως υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη πόσο καλά η λύση εκτελεί τις επιθυμητές λειτουργίες και ικανοποιεί τους περιορισμούς που έχουν δοθεί. Στην περίπτωση ενός ΓΑ, αυτός ο υπολογισμός

πρέπει να είναι αυτόματος και το πρόβλημα είναι πως να επινοηθεί μια διαδικασία που να υπολογίζει την ποιότητα των λύσεων.

Οι συναρτήσεις εκτίμησης καταλληλότητας μπορούν να είναι σύνθετες ή απλές ανάλογα με το διαθέσιμο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Σε περιπτώσεις στις οποίες μια μαθηματική εξίσωση δεν μπορεί να διατυπωθεί, μια διαδικασία βασισμένη σε κανόνες μπορεί να κατασκευαστεί για χρήση σαν μία συνάρτηση καταλληλότητας ή σε μερικές περιπτώσεις και οι δύο διαδικασίες μπορούν να συνδυαστούν. Σε περιπτώσεις όπου μερικοί περιορισμοί είναι πολύ σημαντικοί και δεν μπορούν να παραβιαστούν, οι δομές ή οι λύσεις οι οποίες παραβιάζουν αυτές τις παραμέτρους μπορούν να εξαλειφθούν εκ των προτέρων σχεδιάζοντας κατάλληλα το σχήμα αναπαράστασης. Εναλλακτικά, μπορεί να τους δοθούν χαμηλές πιθανότητες χρησιμοποιώντας ειδικές συναρτήσεις κύρωσης.

6.4.5.2. *Η αντικειμενική συνάρτηση και η συνάρτηση καταλληλότητας*

Η αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται για να παρέχει ένα μέτρο για το πώς τα άτομα έχουν αποδώσει στην περιοχή του προβλήματος. Στην περίπτωση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης, τα καταλληλότερα άτομα θα έχουν τη χαμηλότερη αριθμητική τιμή της σχετικής αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό το πρώτο μέτρο καταλληλότητας συνήθως χρησιμοποιείται μόνο ως ενδιάμεσο στάδιο στον καθορισμό της σχετικής επίδοσης των ατόμων σε έναν ΓΑ. Μια άλλη συνάρτηση, η *συνάρτηση ικανότητας ή καταλληλότητας*, χρησιμοποιείται, τις περισσότερες φορές, για να μετασχηματίσει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε ένα μέτρο της σχετικής καταλληλότητας (De Jong 1975). Κατά συνέπεια:

$$F(x) = g(f(x)) \quad 6-3$$

όπου f είναι η αντικειμενική συνάρτηση, η g μετασχηματίζει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης σε έναν μη αρνητικό αριθμό και η F είναι η προκύπτουσα σχετική καταλληλότητα (*fitness*). Αυτή η απεικόνιση είναι πάντα απαραίτητη όταν η αντικειμενική συνάρτηση πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί δεδομένου ότι οι χαμηλότερες τιμές αντικειμενικής συνάρτησης αντιστοιχούν στα καταλληλότερα άτομα. Σε πολλές περιπτώσεις, η τιμή της συνάρτησης της καταλληλότητας αντιστοιχεί στον αριθμό απογόνων που ένα άτομο μπορεί να περιμένει να παραγάγει στην επόμενη γενεά. Ένας μετασχηματισμός που συνήθως χρησιμοποιείται είναι αυτός της αναλογικής ανάθεσης καταλληλότητας (Goldberg 1989). Η καταλληλότητα ενός ατόμου, $F(xi)$, υπολογίζεται ως ένα

αρχικό μέτρο της απόδοσης του ατόμου, $f(x_i)$, σχετική με ολόκληρο τον πληθυσμό. Δηλαδή,

$$F(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^{N_{ind}} f(x_i)} \quad 6-4$$

όπου το N_{ind} είναι το μέγεθος του πληθυσμού και το x_i είναι η φαινοτυπική τιμή του ατόμου i . Ενώ αυτή η ανάθεση καταλληλότητας εξασφαλίζει ότι κάθε άτομο έχει μια πιθανότητα αναπαραγωγής σύμφωνα με τη σχετική ικανότητά του, αποτυγχάνει να λάβει υπόψη της τις αρνητικές τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης.

Ένας γραμμικός μετασχηματισμός ο οποίος αντισταθμίζει την αντικειμενική συνάρτηση (Goldberg 1989) χρησιμοποιείται συχνά πριν από την ανάθεση καταλληλότητας, έτσι ώστε,

$$F(x) = af(x) + b \quad 6-5$$

όπου a είναι ένας θετικός συντελεστής κλιμάκωσης εάν η βελτιστοποίηση μεγιστοποιεί και αρνητικός εάν ελαχιστοποιεί. Το offset b χρησιμοποιείται για να εξασφαλίσει ότι οι προκύπτουσες τιμές καταλληλότητας είναι μη αρνητικές.

Η γραμμική κλιμάκωση και η αντιστάθμιση που περιγράφονται ανωτέρω είναι, ωστόσο, ευάλωτες στη γρήγορη σύγκλιση. Ο αλγόριθμος *επιλογής* (βλ. παρακάτω) επιλέγει τα άτομα για αναπαραγωγή βάσει της σχετικής ικανότητάς τους. Χρησιμοποιώντας γραμμική κλιμάκωση, ο αναμενόμενος αριθμός απογόνων είναι περίπου ανάλογος προς την απόδοση των ατόμων. Δεδομένου ότι δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στην απόδοση ενός ατόμου σε μια δεδομένη γενιά, ιδιαίτερα κατάλληλα άτομα στις αρχικές γενεές μπορούν να κυριαρχήσουν στην αναπαραγωγή προκαλώντας ενδεχομένως γρήγορη σύγκλιση σε υποβέλτιστες λύσεις. Ομοίως, εάν υπάρχει μικρή απόκλιση στον πληθυσμό, τότε η κλιμάκωση παρέχει μόνο μια μικρή βοήθεια προς τα πιο ικανά άτομα.

Ο Baker (1985) προτείνει ότι με τον περιορισμό της αναπαραγωγικής κλίμακας, κατά τον οποίο κανένα άτομο δεν παράγει έναν υπερβολικό αριθμό απογόνων, αποτρέπεται η πρόωρη σύγκλιση. Εδώ, ορίζεται στα άτομα μια καταλληλότητα σύμφωνα με την κατάταξή τους στον πληθυσμό παρά με την αρχική απόδοσή τους. Μια μεταβλητή, η *MAX*, χρησιμοποιείται για να καθορίσει την εύνοια ή την *εκλεκτική πίεση* (*selective pressure*) προς τα καταλληλότερα άτομα και η καταλληλότητα των άλλων καθορίζεται από τους ακόλουθους κανόνες:

$$\begin{aligned}
 &\bullet MIN = 2.0 - MAX \\
 &\bullet INC = 2.0 \times (MAX - 1.0) / N_{ind} \\
 &\bullet LOW = INC / 2.0
 \end{aligned}
 \tag{6-6}$$

όπου MIN είναι το χαμηλότερο όριο, INC είναι η διαφορά μεταξύ της καταλληλότητας των γειτονικών ατόμων και LOW είναι ο αναμενόμενος αριθμός δοκιμών (αριθμός χρόνων που επιλέγονται) του λιγότερο κατάλληλου ατόμου. Το MAX επιλέγεται χαρακτηριστικά στο διάστημα $[1.1, 2.0]$. Ως εκ τούτου, για ένα μέγεθος πληθυσμού $N_{ind} = 40$ και $MAX = 1.1$, λαμβάνουμε $MIN = 0.9$, $INC = 0.05$ και $LOW = 0.025$. Η καταλληλότητα των ατόμων στον πληθυσμό μπορεί επίσης να υπολογιστεί άμεσα ως εξής,

$$F(x_i) = 2 - MAX + 2(MAX - 1) \frac{x_i - 1}{N_{ind} - 1} \tag{6-7}$$

όπου x_i είναι η θέση στο διαταγμένο πληθυσμό του ατόμου i .

6.4.6. Βασική δομή και ψευδοκώδικας ενός ΓΑ

Η βασική δομή ενός κανονικού (*standard*) γενετικού αλγορίθμου περιγράφεται από τα ακόλουθα βήματα:

Αρχή: Αρχή με έναν τυχαία παραγόμενο πληθυσμό n ατόμων που το καθένα αναπαριστάνει μια λύση (κατάλληλες λύσεις για το πρόβλημα).

Καταλληλότητα: Υπολογισμός της καταλληλότητας για κάθε άτομο x ($fitness(x)$) στον πληθυσμό.

Νέος Πληθυσμός: Επανάληψη ($n/2$) φορές, κάθε φορά παράγοντας δύο άτομα:

Επιλογή: Επιλογή ενός ζευγαριού γονέων από τον πληθυσμό σύμφωνα με την καταλληλότητα τους (η πιθανότητα της επιλογής αυξάνει ανάλογα με την καταλληλότητα του ατόμου).

Διασταύρωση: Με την πιθανότητα διασταύρωσης να είναι p_c , εφαρμόζεται διασταύρωση, για να δημιουργηθούν δύο απόγονοι. Διαφορετικά κλωνοποιούνται απλά οι γονείς (ακριβές αντίγραφο από κάθε γονέα).

Μετάλλαξη: Εφαρμόζεται μετάλλαξη και στους δύο απογόνους, σε κάθε γονίδιο τους, με πιθανότητα μετάλλαξης p_m .

Αποδοχή: Τοποθέτηση των νέων απογόνων στο νέο πληθυσμό.

Αντικατάσταση: Αντικατάσταση του τρέχοντος πληθυσμού με νέο για περαιτέρω τρέξιμο του αλγόριθμου.

Εξέταση: Εάν η συνθήκη τερματισμού ικανοποιείται τότε ο αλγόριθμος σταματά και πετυχαίνεται η καλύτερη λύση του προβλήματος.

Επανάληψη: Εάν το καλύτερο άτομο δεν είναι αρκετά κατάλληλο, ο αλγόριθμος οδηγείται στο βήμα 2.

Αυτός ο βασικός γενετικός αλγόριθμος που παρουσιάζεται παραπάνω μοντελοποιεί την εξελικτική θεωρία που συναντάται στη φύση. Μόλις δημιουργηθεί η νέα γενιά αντικαθιστά την παλαιά γενιά (βήμα 4) που παύει έπειτα να υπάρχει. Αυτό είναι επιθυμητό στη φύση, όπου ο στόχος είναι να κυριαρχήσουν οι υγιείς πληθυσμοί.

Εντούτοις, αυτό το μοντέλο δεν είναι πάντα κατάλληλο για τα προβλήματα βελτιστοποίησης. Στη βελτιστοποίηση επιδιώκεται η εύρεση ενός μοναδικού ανώτερου ατόμου που να αναπαριστά τη βέλτιστη λύση σε ένα δεδομένο πρόβλημα.

Ένα άλλο μειονέκτημα αυτού του βασικού γενετικού αλγορίθμου βρίσκεται στην αναπαράσταση των ατόμων. Οι σειρές με bits (*bitstrings*), καθώς χρησιμοποιούνται συχνότερα, μιμούνται τις δομές του DNA από τη φύση πολύ καλά. Εντούτοις, εάν οι παράμετροι, που πρόκειται να βελτιστοποιήσει ο ΓΑ δεν είναι δυαδικές, ο αλγόριθμος δεν αποδίδει καλά, δεδομένου ότι οι φυσικές αποστάσεις μεταξύ των ατόμων καταστρέφονται κατά το μετασχηματισμό τους σε *bitstrings*.

Και τα δύο προβλήματα προκύπτουν από το γεγονός ότι ακολουθείται πάρα πολύ η εξελικτική διαδικασία που βρίσκεται στη φύση. Υπάρχουν διάφορες βελτιώσεις που μπορούν να εφαρμοστούν στο βασικό αλγόριθμο όπου η αναλογία με τη φυσική εξέλιξη σπάει.

Παραδείγματος χάρη, η εξελικτική προσέγγιση από το βήμα 4 του βασικού γενετικού αλγορίθμου μπορεί να αντικατασταθεί με έναν αλγόριθμο σταθερής κατάστασης (*steady state*). Για να αποφευχθεί ο υπολογισμός μιας ολόκληρης νέας γενιάς, θα μπορούσε να δημιουργηθεί μόνο ένας απόγονος. Εάν αυτός ο νέος απόγονος είναι καλύτερος (καταλληλότερος σύμφωνα με την συνάρτηση καταλληλότητας) από το χειρότερο μέλος της γενιάς των γονέων, θα γίνει αντικατάσταση του χειρότερου μέλους. Διαφορετικά, ο νέος απόγονος απορρίπτεται.

Μια περίληψη ενός ψευδοκώδικα του απλού γενετικού αλγορίθμου, ο οποίος περιγράφεται από τον Goldberg (1989), παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6-14**.

Ο πληθυσμός στο χρόνο t αναπαρίστανται από τη χρονικά εξαρτημένη μεταβλητή P , με τον αρχικό πληθυσμό των τυχαίων εκτιμήσεων να είναι $P(0)$.

```
Διαδικασία ΓΑ
Begin
     $t = 0$ ;
    Αρχικοποίησε τον  $P(t)$ ;
    Εκτίμησε τον  $P(t)$ ;
    While not finished do
        Begin
             $t = t + 1$ ;
            Επέλεξε τον  $P(t)$  από τον  $P(t-1)$ ;
            Δημιούργησε ζευγάρια στον  $P(t)$ ;
            Εκτίμησε τον  $P(t)$ ;
        End
    End.
```

Σχήμα 6-14: Ψευδοκώδικας ενός Απλού Γενετικού Αλγόριθμου

6.4.7. Ο ΓΑ εναντίον των παραδοσιακών μεθόδων βελτιστοποίησης

Από τις προηγούμενες παραγράφους, μπορεί να διαπιστωθεί ότι οι ΓΑ διαφέρουν ουσιαστικά από τις παραδοσιακές μεθόδους αναζήτησης και βελτιστοποίησης, όπως:

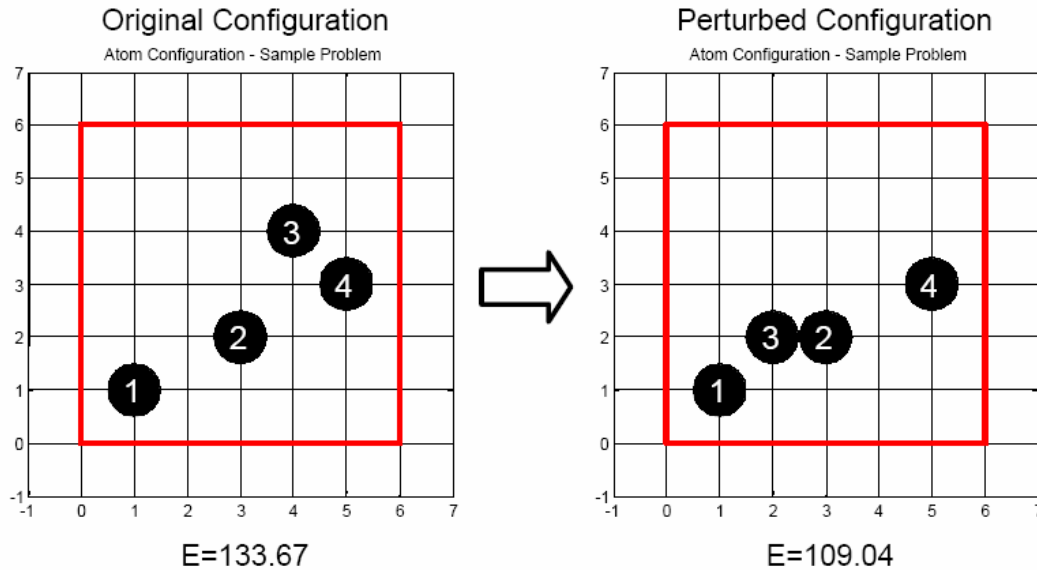
- Οι ΓΑ αναζητούν έναν πληθυσμό σημείων παράλληλα, και όχι ένα μόνο σημείο.
- Οι ΓΑ δεν χρειάζονται παράγωγες πληροφορίες ή άλλη βοηθητική γνώση. Μόνο η αντικειμενική συνάρτηση και τα αντίστοιχα επίπεδα καταλληλότητας επηρεάζουν τις κατευθύνσεις της αναζήτησης.
- Οι ΓΑ χρησιμοποιούν πιθανολογικούς κανόνες μετάβασης, και όχι αιτιοκρατικούς.
- Οι ΓΑ λειτουργούν πάνω σε μια κωδικοποίηση του συνόλου των παραμέτρων παρά στο σύνολο των ίδιων των παραμέτρων (εκτός από τις περιπτώσεις όπου χρησιμοποιούνται άτομα με πραγματικές τιμές).

Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι ο ΓΑ παρέχει διάφορες πιθανές λύσεις για ένα δεδομένο πρόβλημα και η επιλογή της τελικής λύσης αφήνεται στο χρήστη. Σε περιπτώσεις όπου ένα συγκεκριμένο πρόβλημα δεν έχει μοναδική λύση, παραδείγματος χάρη, μια οικογένεια βέλτιστων λύσεων Pareto, όπως συμβαίνει στην περίπτωση της *multiobjective* βελτιστοποίησης και των προβλημάτων χρονοπρογραμματισμού (*scheduling problems*), ο ΓΑ είναι ενδεχομένως χρήσιμος για τον ταυτόχρονο προσδιορισμό αυτών των εναλλακτικών λύσεων.

6.5. Προσομοιωμένη Ανόπτηση (ΠΑ)

Ο αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης (Simulated Annealing) προήλθε από τη στατιστική μηχανική. Ο Kirkpatrick κ.α. (1983) πρότεινε έναν αλγόριθμο ο οποίος βασίζεται στην αναλογία ανάμεσα στην ανόπτηση των στερεών και στο πρόβλημα της επίλυσης συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Η ανόπτηση είναι μια φυσική διαδικασία στην οποία θερμαίνουμε το στερεό και ύστερα το ψύχουμε αργά μέχρι να κρυσταλλοποιηθεί. Τα άτομα στο υλικό έχουν υψηλή ενέργεια σε υψηλές θερμοκρασίες και έχουν μεγαλύτερη ελευθερία να διαταχθούν. Όταν η θερμοκρασία μειώνεται, η ατομική ενέργεια μειώνεται. Ένας κρύσταλλος με κανονική δομή λαμβάνεται στην κατάσταση κατά την οποία το σύστημα έχει την ελάχιστη ενέργεια. Αν η ψύξη γίνει πολύ γρήγορα, που είναι γνωστή ως γρήγορη κατάσβεση, υπάρχουν εκτεταμένες ανωμαλίες και ατέλειες στην κρυσταλλική δομή. Σε αυτή την περίπτωση, το σύστημα δε φτάνει την ελάχιστη κατάσταση ενέργειας και καταλήγει σε μια πολυκρυσταλλική κατάσταση που έχει υψηλότερη ενέργεια. Στο παρακάτω σχήμα (Σχήμα 6-15), φαίνεται μια απλή διάταξη τεσσάρων ατόμων. Η δεξιά εικόνα προκύπτει από την αριστερή με την μετακίνηση ενός τυχαίου ατόμου σε μια τυχαία θέση (*slot*) που δεν είναι κατειλημμένη. Παρατηρούμε ότι με την μετακίνηση του ατόμου η ενέργεια του συστήματος μειώθηκε αρκετά.



Σχήμα 6-15: Απλή διάταξη ατόμων.

Σε μια δεδομένη θερμοκρασία, η πιθανότητα κατανομής των ενεργειών του συστήματος καθορίζεται από την πιθανότητα *Boltzmann*:

$$P(E) = \exp[-E/(kT)] \quad 6-8$$

όπου E είναι η ενέργεια συστήματος, k η σταθερά *Boltzmann*, T είναι η θερμοκρασία και $P(E)$ είναι η πιθανότητα να βρίσκεται το σύστημα σε μια κατάσταση με ενέργεια E .

Σε υψηλές θερμοκρασίες, η $P(E)$ συγκλίνει στο 1 για όλες τις καταστάσεις ενέργειας σύμφωνα με την εξίσωση 6-8. Μπορεί ακόμη να διαπιστωθεί ότι υπάρχει η μικρή πιθανότητα το σύστημα να έχει υψηλή ενέργεια ακόμη και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Επομένως, η στατιστική κατανομή των ενεργειών επιτρέπει τη διαφυγή του συστήματος από ένα τοπικό ελάχιστο ενέργειας.

6.5.1. Βασικά Στοιχεία του αλγορίθμου ΠΑ

Στην αναλογία μεταξύ ενός συνδυαστικού προβλήματος βελτιστοποίησης και της διαδικασίας ανόπτησης, οι καταστάσεις του στερεού αναπαριστούν εφικτές λύσεις του προβλήματος βελτιστοποίησης, οι ενέργειες των καταστάσεων αντιστοιχούν στις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης υπολογισμένες σε αυτές τις λύσεις, η ελάχιστη κατάσταση ενέργειας αντιστοιχεί στην βέλτιστη λύση του προβλήματος και η γρήγορη απόσβεση μπορεί να θεωρηθεί ως τοπική βελτιστοποίηση. Ο **Πίνακας 6-2** παρουσιάζει τους όρους οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα φυσικά συστήματα και στα προβλήματα βελτιστοποίησης. Η σημαντικότερη δυσκολία στην εφαρμογή του αλγορίθμου είναι ότι δεν υπάρχει

καμία προφανής αναλογία για τη θερμοκρασία T όσον αφορά μια ελεύθερη παράμετρο στα συνδυαστικά προβλήματα. Επιπλέον, η αποφυγή της παράσυρσης στα τοπικά ελάχιστα (*quenching*) εξαρτάται από το «πρόγραμμα ανόπτησης», την επιλογή της αρχικής θερμοκρασίας, πόσες επαναλήψεις εκτελούνται σε κάθε θερμοκρασία, και πόσο η θερμοκρασία μειώνεται σε κάθε βήμα καθώς η ψύξη προχωρά.

Φυσικό Σύστημα (Physical System)	Συνδυαστικό Πρόβλημα Βελτιστοποίησης
Κατάσταση	Υποψήφιες Λύσεις
Ενέργεια μιας κατάστασης	Συνάρτηση Κόστους
Τελική Κατάσταση	Βέλτιστες Λύσεις
Θερμοκρασία	Παράμετρος Ελέγχου
Γρήγορη Απόσβεση	Επαναληπτική Βελτίωση

Πίνακας 6-2: Σύγκριση των όρων που χρησιμοποιούνται στα στερεά με τους αντίστοιχους που χρησιμοποιούνται στα προβλήματα βελτιστοποίησης

Ο αλγόριθμος ΠΑ αποτελείται από μια ακολουθία επαναλήψεων. Κάθε επανάληψη αποτελείται από μια τυχαία μεταβολή της τρέχουσας λύσης για να δημιουργηθεί μια νέα λύση στην γειτονιά της τρέχουσας λύσης. Η γειτονιά καθορίζεται από την επιλογή ενός μηχανισμού παραγωγής. Μόλις δημιουργηθεί η νέα λύση, υπολογίζεται η αντίστοιχη αλλαγή στην συνάρτηση κόστους για να αποφασιστεί εάν η νέα παραγόμενη λύση μπορεί να γίνει αποδεκτή ως η τρέχουσα λύση του προβλήματος. Εάν η αλλαγή στην συνάρτηση κόστους είναι αρνητική η νέα λύση που παράγεται λαμβάνεται άμεσα ως η τρέχουσα λύση του προβλήματος. Διαφορετικά, είναι αποδεκτή σύμφωνα με το κριτήριο *Metropolis* που βασίζεται στην πιθανότητα *Boltzmann*.

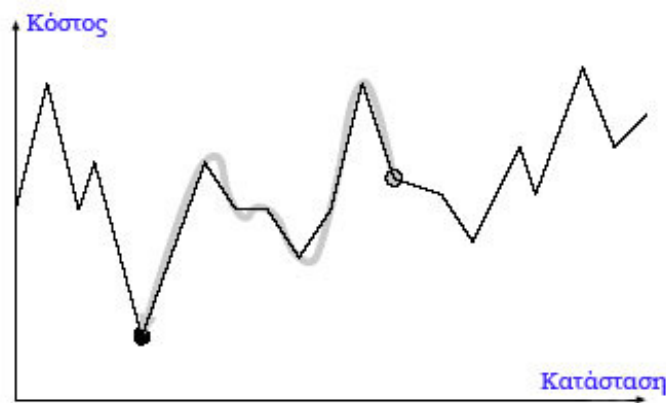
Σύμφωνα με το κριτήριο *Metropolis* (Metropolis, 1953), εάν η διαφορά μεταξύ των τιμών της συνάρτησης κόστους των τρεχουσών και των νέων παραγόμενων λύσεων είναι μικρότερη του μηδέν, τότε η νέα παραγόμενη λύση γίνεται αποδεκτή ως η τρέχουσα λύση.

Εάν η διαφορά μεταξύ των νέων παραγόμενων λύσεων είναι ίση ή μεγαλύτερη από το μηδέν, τότε η νέα παραγόμενη λύση γίνεται αποδεκτή ως τρέχουσα λύση με πιθανότητα

$$\leq e^{(-\Delta E/T)} \quad 6-9$$

Αν η κίνηση μεταξύ των δύο λύσεων δεν γίνει αποδεκτή, η τρέχουσα λύση παραμένει αμετάβλητη. Στην εξίσωση 6-9, το ΔE είναι η διαφορά μεταξύ των τιμών των συναρτήσεων κόστους των δύο λύσεων. Για παράδειγμα, εάν πάρουμε ένα τυχαίο αριθμό δ , ο οποίος ανήκει στο διάστημα $[0,1]$, και εάν $\delta \leq e^{(-\Delta E/T)}$ τότε η νέα παραγόμενη λύση γίνεται αποδεκτή ως τρέχουσα λύση. Αν $\delta > e^{(-\Delta E/T)}$, τότε η τρέχουσα λύση είναι αμετάβλητη.

Όπως μπορεί εύκολα να διαπιστωθεί από το κριτήριο *Metropolis* (Metropolis, 1953), σε αρχικές υψηλές θερμοκρασίες, ο αλγόριθμος εξερευνά ολόκληρο το χώρο καταστάσεων: δέχεται σχεδόν όλες τις καταστάσεις που προκαλούν αυξήσεις στο κόστος. Καθώς μειώνεται η θερμοκρασία, εξερευνά μεγάλες περιοχές, έπειτα όλο και μικρότερες υπο-περιοχές για να καταλήξει στο αποτέλεσμα. Αυτό επιτρέπει τη διαφυγή του αλγορίθμου από τα τοπικά ελάχιστα όπως φαίνεται και στο Σχήμα 6-16 που ακολουθεί.



Σχήμα 6-16: Ο αλγόριθμος Προσομοίωση Ανόπτησης

Το διάγραμμα ροής ενός κανονικού (*standard*) αλγορίθμου ΠΑ παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-17. Για να εφαρμοστεί ο αλγόριθμος για ένα πρόβλημα, υπάρχουν τέσσερα κύρια βήματα που πρέπει να εκτελεστούν. Αυτά είναι:

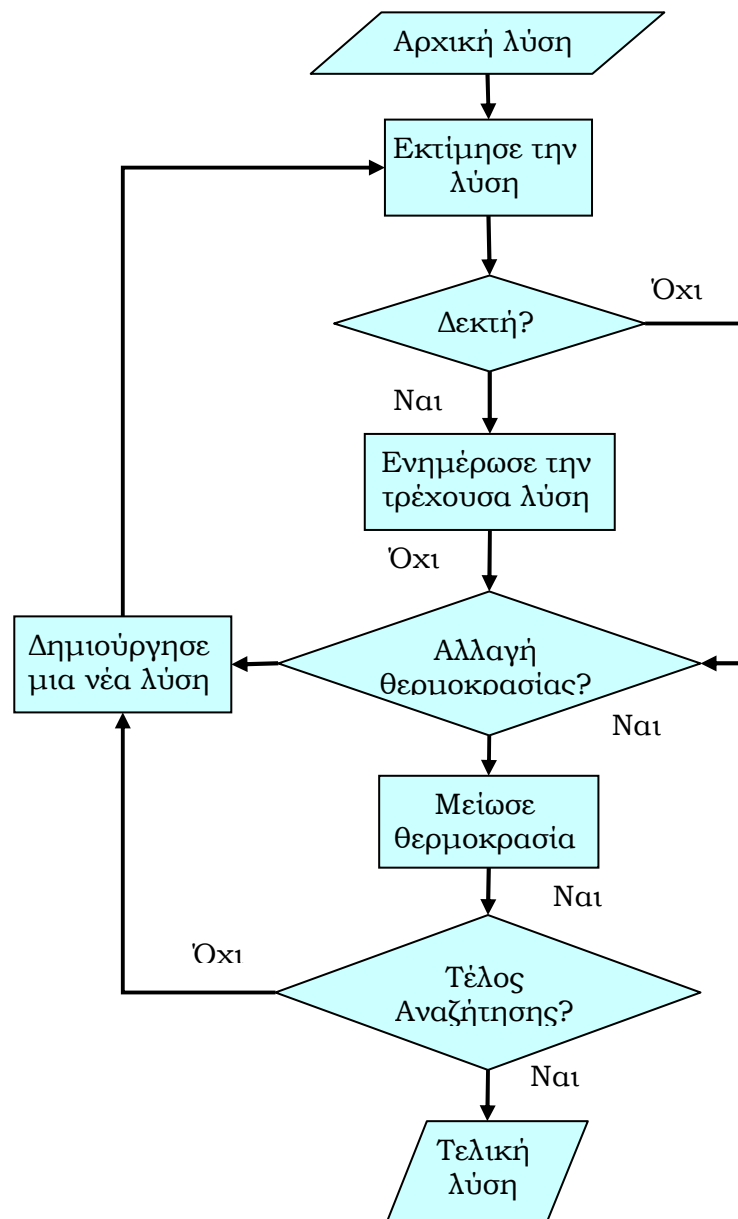
- Αναπαράσταση των λύσεων
- Καθορισμός της συνάρτησης κόστους
- Καθορισμός του μηχανισμού παραγωγής για τους γείτονες
- Σχεδιασμός ενός προγράμματος ψύξης

Οι καθορισμοί της αναπαράστασης λύσης και της συνάρτησης κόστους είναι όπως και στους ΓΑ. Διάφοροι μηχανισμοί παραγωγής, όπως η μετάλλαξη και η

αντιστροφή, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν και θα μπορούσαν πάλι να στηριχτούν στους ΓΑ.

Στο σχεδιασμό του προγράμματος ψύξης (*cooling schedule*) για έναν αλγόριθμο ΠΑ, τέσσερις παράμετροι πρέπει να καθοριστούν. Αυτές είναι:

- μια αρχική θερμοκρασία,
- ένας κανόνας ενημέρωσης θερμοκρασίας,
- ο αριθμός των επαναλήψεων που εκτελούνται σε κάθε βήμα θερμοκρασίας, και
- ένα κριτήριο τερματισμού (*stopping*) για την αναζήτηση.



Σχήμα 6-17: Διάγραμμα ροής ενός κανονικού αλγορίθμου ΠΑ.

Υπάρχουν διάφορα προγράμματα ψύξης στη βιβλιογραφία (Osman 1991). Αυτά υιοθετούν διαφορετικά σχήματα ενημέρωσης θερμοκρασίας. Από αυτά, χρησιμοποιούνται ευρέως τα σταδιακά, τα συνεχή και τα μη μονότονα σχήματα μείωσης θερμοκρασίας. Τα σταδιακά σχήματα μείωσης περιλαμβάνουν πολύ απλές στρατηγικές ψύξης. Ένα παράδειγμα είναι ο γεωμετρικός κανόνας ψύξης. Αυτός ο κανόνας ενημερώνει τη θερμοκρασία σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$T_{i+1} = cT_i, i = 0, 1 \dots \quad 6-10$$

όπου το c είναι ένας παράγοντας θερμοκρασίας που είναι μία σταθερά της οποίας η τιμή είναι μικρότερη από το 1 αλλά κοντά στο 1.

6.5.2. Προγράμματα ανόπτωσης (annealing schedules)

Τα περισσότερα χαρακτηριστικά γνώρισμα στον αλγόριθμο Προσομοίωση Ανόπτωσης:

- Χώρος κατάστασης (*space state*),
- Κλάση κίνησης (*move class*), και
- Συνάρτηση κόστους

καθορίζονται εξ ορισμού. Το μόνο χαρακτηριστικό γνώρισμα που είναι μεταβλητό κατά τη διάρκεια του υπολογισμού είναι η θερμοκρασία. Επομένως ένα από τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά στον αλγόριθμο ΠΑ είναι η επιλογή του προγράμματος ανόπτωσης, και πολλές προσπάθειες έχουν γίνει για την δημιουργία καλών προγραμμάτων.

Η διαδικασία ανόπτωσης, όπως έχει αναφερθεί περιληπτικά στην εισαγωγή, περιλαμβάνει αρχικά το «Λιώσιμο» (*Melting*) του συστήματος σε μια υψηλή θερμοκρασία. Έπειτα μειώνεται επανειλημμένα η θερμοκρασία με έναν σταθερό παράγοντα a ($0 < a < 1$), εκτελώντας αρκετά βήματα σε κάθε θερμοκρασία ώστε να διατηρηθεί το σύστημα κοντά στο σημείο ισορροπίας έως ότου προσεγγίσει το σύστημα την Τελική Κατάσταση (*Ground State*). Η παραπάνω περιγραφή οδηγεί σε ένα εκθετικό πρόγραμμα,

$$T(t) = T_0 a^t \quad 6-11$$

όπου t , 'χρόνος' είναι ο μετρητής βημάτων. Αυτό και ένα γραμμικό πρόγραμμα

$$T(t) = T_0 - nt \quad 6-12$$

έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως από τότε που προτάθηκαν (Kirkpatrick et al 1983).

Ιδιαίτερης θεωρητικής σπουδαιότητας είναι το λογαριθμικό σχέδιο ψύξης που εισήγαγαν οι Geman και Geman (1984).

$$T(t) = \frac{c}{\log(t+d)} \quad 6-13$$

όπου το d συνήθως τίθεται ίσο με 1. Ως το μόνο θεώρημα που υπάρχει (*Existence Theorem*), έχει αποδειχθεί ότι για το c που είναι μεγαλύτερο ή ίσο με το μεγαλύτερο ενεργειακό φράγμα στο πρόβλημα, αυτό το πρόγραμμα θα οδηγήσει το σύστημα στη σφαιρική ελάχιστη κατάσταση στο όριο του άπειρου χρόνου (Hajek 1988). Εντούτοις, λόγω της ασυμπτωτικά εξαιρετικά αργής μείωσης της θερμοκρασίας του, αυτό το πρόγραμμα είναι εντελώς μη πρακτικό. Ανατρέπει απλά την αποδοχή της εκθετικής συνάρτησης *Boltzmann* στον αλγόριθμο και ανέρχεται σε τυχαία αναζήτηση στο χώρο κατάστασης.

Για ένα σύστημα τριών επιπέδων οι Hoffmann και Salamon (1990) όρισαν εξισώσεις για να παραγάγουν ένα βέλτιστο σχεδιασμό που ελαχιστοποιεί τη μέση ενέργεια σε έναν συγκεκριμένο χρόνο. Αυτό το βέλτιστο πρόγραμμα δεν ακολουθεί ένα σύνολο κατανομών *Boltzmann* αλλά μάλλον μια λύση φραγμών,

$$T(t) \sim \frac{D-1}{\log t} \quad 6-14$$

Όλα τα ανωτέρω προγράμματα είναι προκαθορισμένα, δηλαδή, καθορίζονται πριν από την έναρξη του υπολογισμού και δεν επηρεάζονται από την πρόοδό του. Αντίθετα, η θερμοδυναμική βελτιστοποίηση πεπερασμένου χρόνου (Salamon and Berry 1983) προτείνει ένα ανάλογο προσαρμοστικό βέλτιστο πρόγραμμα βασισμένο στη σταθερή θερμοδυναμική ταχύτητα, v_s (Andresen 1996). Η ταχύτητα v_s ορίζεται στο θερμοδυναμικό χώρο κατάστασης με $-D^2S$ ως μετρικό (*metric*) (Andresen 1991). Το πρόγραμμα που οδηγεί στον ελάχιστο γενικό διασκεδασμό (παραγωγή εντροπίας) είναι (Nulton and Salamon 1988):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-v_s T}{\varepsilon \sqrt{C}} \quad 6-15$$

όπου C είναι η χωρητικότητα θερμότητας, και ε είναι ο χρόνος χαλάρωσης του συστήματος, τα οποία και τα δύο μπορούν να εξαρτηθούν από την T . Στην παραγωγή (Nulton and Salamon 1988) υποτίθεται ότι είτε η v_s είναι μια μικρή ποσότητα ή το $C(T)$ και το $\varepsilon(T)$ μεταβάλλονται αργά. Αυτό το προσαρμοστικό πρόγραμμα βελτιώθηκε αργότερα (Andresen and Gordon 1994) έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί για συστήματα που βρίσκονται μακριά από το σημείο ισορροπίας:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{-\nu_s T}{\varepsilon \sqrt{C} \sqrt{1 + \frac{\Theta(T) \varepsilon (dT/dt)}{T}} + \dots} \quad 6-16$$

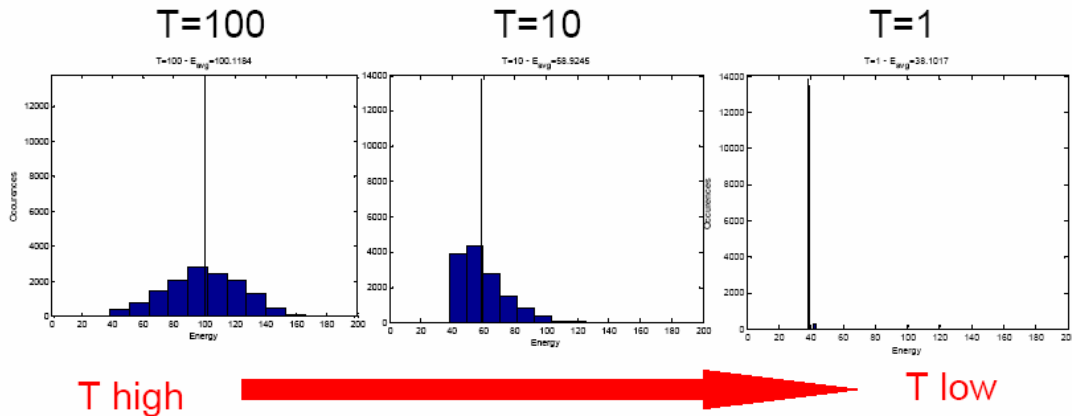
Όπου

$$\Theta(T) = 1 + \frac{T}{2C} \frac{\partial C}{\partial T} \quad 6-17$$

Η αρχική παραγωγή (Nulton and Salamon 1988), εξίσωση (6-15) περιέχει μόνο τον κυρίαρχο όρο της εξίσωσης (6-16).

6.5.3. Περιγραφή του βασικού αλγορίθμου ΠΑ για το ΠΠΠ

Το πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή (**T**raveling **S**alesman **P**roblem) ήταν ένα από τα πρώτα προβλήματα στα οποία εφαρμόστηκε η Προσομοιωμένη Ανόπτηση, χρησιμεύοντας ως ένα παράδειγμα (*paradigm*) για τους Kirkpatrick et al (1983) και τον Cerny (1985). Από τότε το TSP συνεχίζει να αποτελεί ένα πρωταρχικό αντικείμενο μελέτης για αυτό τον αλγόριθμο και τις παραλλαγές του. Οι περισσότερες παραλλαγές του αλγορίθμου ΠΑ πάνω στο TSP, αλλά και σε άλλα προβλήματα, βασίζονται στην απλή δομή που παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-19 με υλοποιήσεις που διαφέρουν, κυρίως, ως προς τις μεθόδους τους για τις αρχικές λύσεις (γύροι) και για το χειρισμό των θερμοκρασιών, όπως και στους ορισμούς των: σημείο ισορροπίας (*equilibrium*), παγωμένη κατάσταση (*frozen*), γείτονας (*neighbour*), και τυχαίο (*random*). Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η δοκιμή στο βήμα 3.1.4 σχεδιάζεται έτσι ώστε ο μεγάλος ανήφορος (*uphill*) βημάτων να είναι απίθανο να ληφθεί εκτός από τις υψηλές θερμοκρασίες t . Η πιθανότητα ότι μια ανηφορική (*uphill*) κίνηση ενός δεδομένου κόστους Δ θα γίνει αποδεκτή μειώνεται καθώς η θερμοκρασία χαμηλώνει. Στην περιοριστική περίπτωση, όταν $T=0$, ο αλγόριθμος απλοποιείται σε μια τυχαία παραλλαγή της επαναληπτικής βελτίωσης, όπου καμία ανηφορική (*uphill*) κίνηση δεν επιτρέπεται. Το γεγονός ότι η πιθανότητα *Boltzmann* σχεδόν εκμηδενίζεται σε χαμηλές θερμοκρασίες φαίνεται στο Σχήμα 6-18.



Σχήμα 6-18: Η κατανομή Boltzmann καταρρέει στη χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση στο όριο χαμηλών θερμοκρασιών

1. Παρήγαγε μια αρχική λύση S θέσε την αρχική λύση $S^* = S$.
2. Καθόρισε μια αρχική θερμοκρασία T .
3. Όσο το σύστημα δεν είναι παγωμένο (frozen) κάνε τα ακόλουθα:
 - 3.1. Όσο το σύστημα δεν βρίσκεται στο σημείο ισορροπίας γι' αυτή τη θερμοκρασία, κάνε τα εξής:
 - 3.1.1. Επέλεξε ένα τυχαίο γείτονα S' της τρέχουσας λύσης.
 - 3.1.2. Όρισε το $\Delta = \text{Μήκος}(S') - \text{Μήκος}(S)$.
 - 3.1.3. Εάν $\Delta \leq 0$ (κατηφορική Κίνηση – Downhill Move):
Θέσε $S = S'$.
Εάν $\text{Μήκος}(S) < \text{Μήκος}(S^*)$, τότε $S^* = S$.
 - 3.1.4. Αλλιώς (Ανηφορική Κίνηση – Uphill Move):
Επέλεξε έναν τυχαίο αριθμό r ομοιόμορφα από το $[0,1]$.
Εάν $r \leq e^{-\Delta/T}$, τότε $S = S'$.
 - 3.1.5. Τέλος βρόχου “Όσο δεν βρίσκεται το σύστημα στο σημείο ισορροπίας”.
 - 3.2. Μείωσε τη θερμοκρασία T .
 - 3.3. Τέλος βρόχου “Όσο το σύστημα δεν έχει παγώσει”.
4. Επέστρεψε το S^* .

Σχήμα 6-19: Γενικό σχήμα για έναν αλγόριθμο ΠΑ

Από την αρχή, έχουν παρατηρηθεί διαφορές μεταξύ του τρόπου που εφαρμόζεται η δομή, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 6-19 στην πράξη και θεωρητικά. Θεωρητικά, η ΠΑ μπορεί να αντιμετωπισθεί ως αλγόριθμος

βελτιστοποίησης. Η διαδικασία μπορεί να ερμηνευθεί αναφορικά με τις αλυσίδες Markov και έχει αποδειχθεί ότι συγκλίνει σε μια βέλτιστη λύση εάν εξασφαλιστεί ότι η θερμοκρασία δεν μειώνεται γρηγορότερα από τον όρο $C/\log n$, όπου C είναι μια σταθερά και n είναι ο αριθμός των βημάτων που έχουν εκτελεστεί. Συνήθως, εντούτοις, η σύγκλιση σε μια βέλτιστη λύση όταν εφαρμόζεται ένα τέτοιο πρόγραμμα θερμοκρασίας, θα πάρει περισσότερο χρόνο από την εύρεση μιας τέτοιας λύσης μέσω της εξαντλητικής αναζήτησης (*exhaustive search*). Κατά συνέπεια, τέτοια θεωρητικά αποτελέσματα είναι ουσιαστικά άσχετα με αυτό που μπορεί να πραγματοποιηθεί στην πράξη.

Αντ' αυτού, αρχίζοντας από τους Kirkpatrick et al (1983) και Cerny (1985), οι ερευνητές τείνουν να χρησιμοποιούν προγράμματα ψύξης που μειώνουν τις θερμοκρασίες γρηγορότερα, κατά προσέγγιση όπως η C^n , όπου $C < 1$. Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί παραδείγματος χάρη με την εκτέλεση ενός σταθερού αριθμού δοκιμών σε κάθε θερμοκρασία, μετά από τον οποίο μπορεί να θεωρηθεί αυθαίρετα ότι επέρχεται «ισορροπία» και με τη μείωση της θερμοκρασίας με έναν σταθερό παράγοντα, έστω 0,95. Κάτω από ένα τέτοιο εκθετικό σχήμα ψύξης (*exponential cooling regime*), η θερμοκρασία μετά από ένα πολυωνυμικά-οριακό (*polynomially-bounded*) χρονικό διάστημα θα προσεγγίσει τιμές αρκετά κοντά στο μηδέν ώστε ανηφορικές (*uphill*) κινήσεις δεν θα γίνονται πλέον αποδεκτές και μπορεί να θεωρηθεί ότι έχει εμφανιστεί η κατάσταση παγώματος (*freezing*). Αυτό συμβαίνει ακόμα και όταν, όπως ο Kirkpatrick et al (1983) πρότεινε αρχικά ότι αρχίζουμε σε μια θερμοκρασία T που είναι αρκετά υψηλή ώστε ουσιαστικά όλες οι ανηφορικές κινήσεις να γίνονται αποδεκτές. Με ένα τέτοιο πολυωνυμικά-οριακό πρόγραμμα ψύξης, η ΠΑ είναι μόνο ένας αλγόριθμος προσέγγισης (όπως όλες οι άλλες παραλλαγές τοπικής αναζήτησης), αλλά είναι δύσκολο να έχουμε περισσότερες προσδοκίες για ένα σκληρό NP πρόβλημα όπως το TSP. Η θεωρία μέχρι τώρα δεν αναφέρει πολλά στοιχεία για αυτή την παραλλαγή (*polynomial-time bounded*) της ΠΑ, εκτός από τα κεφάλαια που αναφέρονται σε ειδικά προβλήματα που έχουν εφευρεθεί και σε δομές γειτονιάς.

6.5.4. Πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του αλγορίθμου ΠΑ

Η ΠΑ μπορεί να αντιμετωπίσει ιδιαίτερα μη γραμμικά μοντέλα, χαστικά και θορυβώδη στοιχεία και πολλούς περιορισμούς. Είναι μια γερή (*robust*) και γενική τεχνική. Τα κύρια πλεονεκτήματά της σε σύγκριση με άλλες τοπικές μεθόδους αναζήτησης είναι η ευελιξία του και η δυνατότητά της να πλησιάζει το σφαιρικό

βέλτιστο. Ο αλγόριθμος είναι αρκετά ευπροσάρμοστος δεδομένου ότι δεν στηρίζεται σε οποιοδήποτε περιοριστικές ιδιότητες του μοντέλου. Οι μέθοδοι ΠΑ «συντονίζονται» εύκολα. Για οποιοδήποτε εύλογα δύσκολο μη γραμμικό ή πιθανολογικό σύστημα, ένας δεδομένος αλγόριθμος βελτιστοποίησης μπορεί να συντονιστεί για να ενισχυθεί η απόδοσή του. Δεδομένου ότι χρειάζεται χρόνος και προσπάθεια για να εξοικειωθεί με ένα δεδομένο κώδικα, η δυνατότητα να συντονιστεί ένας δεδομένος αλγόριθμος για τη χρήση σε περισσότερα από ένα προβλήματα πρέπει να θεωρηθεί σημαντικό χαρακτηριστικό γνώρισμα ενός αλγορίθμου.

Από την άλλη μεριά και δεδομένου ότι η ΠΑ είναι ένας μετα-ευριστικός αλγόριθμος, πολλές επιλογές απαιτούνται για να τον μετατρέψουν σε πραγματικό αλγόριθμο. Υπάρχει μια σαφής ανταλλαγή (*tradeoff*) μεταξύ της ποιότητας των λύσεων και του χρόνου που απαιτείται για να τις υπολογίσει. Η εργασία προσαρμογής που απαιτείται για να ληφθούν υπόψη διαφορετικές κατηγορίες περιορισμών και για να καθοριστούν με ακρίβεια οι παράμετροι του αλγορίθμου μπορεί να είναι εύθραυστη. Η ακρίβεια των αριθμών που χρησιμοποιούνται στην υλοποίηση της ΠΑ μπορεί να έχει σημαντική επίδραση πάνω στην ποιότητα του αποτελέσματος.

6.5.5. Σύγκριση με άλλες μεθόδους

Οποιοσδήποτε αποδοτικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης πρέπει να χρησιμοποιήσει δύο τεχνικές για να βρεθεί ένα σφαιρικό μέγιστο:

- *εξερεύνηση*: για να ερευνήσει τις νέες και άγνωστες περιοχές στο διάστημα αναζήτησης, και
- *εκμετάλλευση*: για να χρησιμοποιήσει τη γνώση που βρίσκεται στα σημεία που έχουν προσπελαστεί προηγουμένως και να βοηθηθεί ο αλγόριθμος έτσι ώστε να βρεθούν τα καλύτερα σημεία.

Αυτές οι δύο απαιτήσεις είναι αντιφατικές, και ένας καλός αλγόριθμος αναζήτησης πρέπει να βρει μια ισορροπία μεταξύ των δύο.

- Νευρωνικά δίκτυα

Η κύρια διαφορά σε σύγκριση με τα νευρωνικά δίκτυα είναι ότι τα νευρωνικά δίκτυα μαθαίνουν (πώς να προσεγγίσουν μια συνάρτηση) ενώ η ΠΑ. αναζητά ένα σφαιρικό βέλτιστο. Τα νευρωνικά δίκτυα προσεγγίζουν εύκαμπτα μια συνάρτηση ενώ η ΠΑ. είναι μια έξυπνη τυχαία μέθοδος αναζήτησης. Τα

ευπροσάρμοστα χαρακτηριστικά των νευρωνικών δικτύων είναι ένα τεράστιο πλεονέκτημα στην μοντελοποίηση μεταβαλλόμενων περιβαλλόντων. Εντούτοις, η μεγάλη απαίτηση σε ισχύ της ΠΑ. περιορίζει τη χρήση του ως εφαρμογή πραγματικού χρόνου.

- Γενετικοί αλγόριθμοι

Άμεσες συγκρίσεις έχουν γίνει μεταξύ της Προσαρμόσιμης Προσομοιωμένης Ανόπτησης (ΠΠΑ) (*Adaptive Simulated Annealing*) και δημοσιευμένων κωδικών του ΓΑ, χρησιμοποιώντας μια ακολουθία δοκιμής που προσαρμόστηκε ήδη και που υιοθετήθηκε για τον ΓΑ. Σε κάθε περίπτωση, το ΠΠΑ ξεπερνάει σε απόδοση τον ΓΑ. Ο ΓΑ είναι μια κατηγορία αλγορίθμων που δεν αναπτύχθηκε αρχικά ως αλγόριθμος βελτιστοποίησης, και ο βασικός ΓΑ δεν προσφέρει οποιαδήποτε στατιστική εγγύηση της σφαιρικής σύγκλισης σε ένα βέλτιστο σημείο. Παρόλα αυτά, πρέπει να αναμένεται ότι ο ΓΑ μπορεί να αποδίδει καλύτερα σε μερικά προβλήματα από την ΠΑ, όπως συμβαίνει και στην περίπτωσή μας, που περιγράφεται αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα (βλέπε 6.4.).

- Τυχαία αναζήτηση

Αυτή η προσέγγιση για τις δύσκολες λειτουργίες είναι μια τυχαία, ή απεριθμημένη αναζήτηση. Τα σημεία στο διάστημα αναζήτησης επιλέγονται τυχαία, ή με κάποιο συστηματικό τρόπο, και αξιολογείται η ικανότητά τους. Αυτό είναι μια «κουτή» στρατηγική, και σπανίως χρησιμοποιείται μόνη της.

- Μέθοδοι κλίσης (gradient methods)

Διάφορες μέθοδοι για τη βελτιστοποίηση συνεχών συναρτήσεων που συμπεριφέρονται «καλά» έχουν αναπτυχθεί οι οποίες στηρίζονται στη χρησιμοποίηση πληροφοριών για την κλίση (*gradient*) της συνάρτησης που θα καθοδηγήσουν την αναζήτηση. Εάν η παράγωγος της συνάρτησης δεν μπορεί να υπολογιστεί, επειδή, παραδείγματος χάρη είναι ασυνεχής αυτές οι μέθοδοι αποτυγχάνουν συχνά. Τέτοιες μέθοδοι αναφέρονται γενικά ως *hillclimbing*. Μπορούν να αποδώσουν καλά στις συναρτήσεις με ένα μόνο μέγιστο (*peak*) (*unimodal* συναρτήσεις). Αλλά στις συναρτήσεις με πολλές κορυφές (*multimodal functions*), αντιμετωπίζουν το πρόβλημα ότι η πρώτη κορυφή που θα βρεθεί θα αναρριχηθεί, και αυτή μπορεί να μην είναι η μέγιστη. Φτάνοντας στην κορυφή ενός τοπικού μεγίστου, καμία περαιτέρω πρόοδος δεν μπορεί να σημειωθεί.

- Επαναληπτική αναζήτηση

Η τυχαία αναζήτηση και η αναζήτηση κλίσης μπορούν να συνδυαστούν για να δώσουν μια *επαναληπτική hillclimbing* αναζήτηση. Μόλις βρεθεί μια κορυφή, ο *hillclimb* αρχίζει πάλι, αλλά με άλλη αφετηρία, που επιλέγεται τυχαία. Αυτή η τεχνική έχει το πλεονέκτημα της απλότητας, και μπορεί να αποδώσει καλά *εάν η λειτουργία δεν έχει πάρα πολλά τοπικά μέγιστα*. Εντούτοις, δεδομένου ότι κάθε τυχαία δοκιμή πραγματοποιείται μεμονωμένα, *καμία γενική εικόνα της 'μορφής' της περιοχής δεν λαμβάνεται*. Καθώς η τυχαία αναζήτηση προχωρεί, συνεχίζει να κατανέμει τις δοκιμές της ομοιόμορφα στο διάστημα αναζήτησης. Αυτό σημαίνει ότι θα αξιολογήσει ακριβώς τον ίδιο αριθμό σημείων στις περιοχές που βρέθηκαν να είναι χαμηλής καταλληλότητας και στις περιοχές που βρέθηκαν να είναι υψηλής καταλληλότητας.

Και η ΠΑ και ο ΓΑ αρχίζουν με έναν αρχικό τυχαίο πληθυσμό, και κατανέμουν αυξανόμενες δοκιμές στις περιοχές του διαστήματος αναζήτησης που βρέθηκαν να έχουν υψηλή καταλληλότητα. Αυτό είναι ένα μειονέκτημα εάν το μέγιστο είναι σε μια μικρή περιοχή, που περιβάλλεται από όλες τις πλευρές από περιοχές χαμηλής καταλληλότητας. Αυτό το είδος λειτουργίας είναι δύσκολο να βελτιστοποιηθεί με οποιαδήποτε μέθοδο, και εδώ η απλότητα της επαναληπτικής αναζήτησης κερδίζει συνήθως.

6.6. Αλγόριθμος Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimisation)

6.6.1. Εισαγωγή

Η έρευνα στην κοινωνική συμπεριφορά εντόμων έχει προσφέρει στους επιστήμονες που ασχολούνται με υπολογιστικά συστήματα ισχυρές μεθόδους για τη σχεδίαση αλγορίθμων κατανεμημένου ελέγχου και βελτιστοποίησης. Αυτές οι τεχνικές εφαρμόζονται επιτυχώς σε ποικίλα επιστημονικά προβλήματα καθώς και σε προβλήματα μηχανικής. Εκτός από την επίτευξη καλής απόδοσης σε ένα ευρύ φάσμα στατικών «προβλημάτων», τέτοιες τεχνικές τείνουν να παρουσιάζουν υψηλό βαθμό ευελιξίας και ευρωστίας σε ένα δυναμικό περιβάλλον.

Οι επιστήμονες που μελετούν την εξέλιξη των ζώων (ethologists) χρησιμοποιούν τη μοντελοποίηση για να καταλάβουν τη ζωική συμπεριφορά. Πρόσφατες έρευνες στην κοινωνική συμπεριφορά εντόμων δείχνουν ότι πρότυπα βασισμένα στην αυτο-οργάνωση μπορούν να βοηθήσουν στην εξήγηση του πως

προκύπτει η περίπλοκη συμπεριφορά των αποικιών από τις αλληλεπιδράσεις των μεμονωμένων εντόμων (Deneubourg and Goss 1989, Bonabeau et al 1999, Goss et al 1989). Αν και ο στόχος του επιστήμονα (modeler) είναι γενικά να καταλάβει τη διαβίωση, ένα μοντέλο μπορεί σε γενικές γραμμές να εξερευνηθεί πέρα από την βιολογικά εύλογη πλευρά του. Αν και η βιολογία δεν ωφελείται απαραίτητως από μια τέτοια εξερεύνηση, οι επιστήμονες και οι μηχανικοί υπολογιστών είναι σε θέση να μετασχηματίσουν τα πρότυπα της κοινωνικής συλλογικής συμπεριφοράς εντόμων σε χρήσιμους αλγόριθμους βελτιστοποίησης και ελέγχου. Αυτή η νέα γραμμή έρευνας αφορά το μετασχηματισμό της γνώσης σχετικά με το πώς κοινωνικά έντομα λύνουν προβλήματα συλλογικά σε τεχνητές μεθόδους επίλυσης προβλημάτων – παράγοντας μια μορφή Τεχνητής Νοημοσύνης, ή Νοημοσύνη Σμηνών (Swarm Intelligence) (Bonabeau et al 1999), στην οποία το βαθύτερο μοντέλο νοημοσύνης είναι η συλλογική νοημοσύνη μιας κοινωνικής αποικίας εντόμων. Μερικές από τις τεχνικές νοημοσύνης σμηνών ωριμάζουν τώρα. Αλγόριθμοι βελτιστοποίησης και ελέγχου που εμπνέονται από τα πρότυπα της εύρεσης τροφής στα μυρμηγκία ήταν απροσδόκητα επιτυχείς και έχουν γίνει γνωστοί τα τελευταία χρόνια ως Βελτιστοποίηση Αποικιών Μυρμηγκιών (Ant Colony Optimisation - ACO) (Dorigo et al 1996, Dorigo and Gambardella 1997) και Δρομολόγηση Αποικιών Μυρμηγκιών (Ant Colony Routing - ACR) (Schoonderwoerd et al 1997, Heusse et al 1998, Di Caro and Dorigo 1998). Το πρώτο σύστημα ACO εισήχθη από τον Dorigo (1992) στη διδακτορική του διατριβή και ονομάστηκε σύστημα μυρμηγκιών (Ant System - AS). Το AS είναι αποτέλεσμα μιας εργασίας που έγινε πάνω στα συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Το AS αναλύεται διεξοδικά στην §6.6.3 του κεφαλαίου.

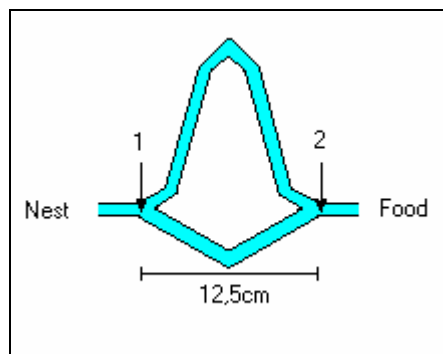
6.6.2. Πώς τα μυρμηγκία βρίσκουν την πιο σύντομη διαδρομή

Οι αποικίες μυρμηγκιών μπορούν συλλογικά να εκτελέσουν εργασίες και να λάβουν αποφάσεις που φαίνονται ότι απαιτούν έναν υψηλό βαθμό συντονισμού μεταξύ των εργατών: χτίσιμο μιας φωλιάς, ψάξιμο για τροφή, κ.α. Στο παράδειγμα που παρουσιάζεται σε αυτή την παράγραφο, τα μυρμηγκία ανακαλύπτουν συλλογικά την πιο σύντομη πορεία σε μια πηγή τροφής. Στα πειράματα με το μυρμηγκί *Linepithaema humile*, μια πηγή τροφίμων χωρίζεται από τη φωλιά με μια γέφυρα που έχει δύο κλάδους (Deneubourg and Goss

1989, Goss et al 1989). Ο μακρύτερος κλάδος είναι r φορές μεγαλύτερος από τον μικρότερο κλάδο (**Σχήμα 6-20**).

Ο μικρότερος κλάδος επιλέγεται από την αποικία στα περισσότερα πειράματα εάν το r είναι επαρκώς μεγάλο. Αυτό γίνεται επειδή τα μυρμήγκια αφήνουν και ακολουθούν ίχνη φερομόνης: τα μεμονωμένα μυρμήγκια αφήνουν μια χημική ουσία, τη φερομόνη, η οποία προσελκύει άλλα μυρμήγκια. Τα πρώτα μυρμήγκια που επιστρέφουν στη φωλιά από την πηγή τροφίμων είναι εκείνα που ακολουθούν την πιο σύντομη πορεία δύο φορές (από τη φωλιά στην πηγή και αντίστροφα). Στα σημεία επιλογής 1 και 2, τα μυρμήγκια δρομολογούνται προς τον μικρότερο κλάδο, ο οποίος είναι ο πρώτος που μαρκάρεται με τη φερομόνη. Εάν, εντούτοις, ο μικρότερος κλάδος παρουσιάζεται στην αποικία μετά τον μακρύτερο κλάδο, δεν θα επιλεγεί η πιο σύντομη πορεία επειδή ο μακρύτερος κλάδος είναι ήδη μαρκαρισμένος με φερομόνη.

Αυτό το πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί σε ένα τεχνητό σύστημα, με την εισαγωγή φερομόνης που η ποσότητά της μειώνεται: όταν η φερομόνη εξατμίζεται αρκετά γρήγορα, είναι δυσκολότερο να διατηρηθεί ένα σταθερό ίχνος φερομόνης σε μια μακρύτερη πορεία. Ο κοντύτερος κλάδος μπορεί έπειτα να επιλεγεί ακόμα κι αν παρουσιαστεί μετά από το μακρύτερο κλάδο. Αυτή η ιδιότητα είναι ιδιαίτερα επιθυμητή στη βελτιστοποίηση, όπου γενικά επιδιώκεται να αποφευχθεί η σύγκλιση προς τις μέτριες λύσεις. Στο μυρμήγκι *Linepithaema humile*, αν και οι συγκεντρώσεις φερομόνης εξασθενούν, η διάρκεια ζωής των ιχνών φερομόνης είναι πάρα πολύ μεγάλη που δεν επιτρέπει τέτοια ευελιξία.



Σχήμα 6-20: Το πείραμα της διπλής γέφυρας.

6.6.3. Το σύστημα μυρμηγκιών (The Ant System)

Με βάση την συμπεριφορά των μυρμηγκιών, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, προσδιορίζεται ένας νέος ευριστικός αλγόριθμος, ο οποίος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να επιλύσει διαφορετικά προβλήματα βελτιστοποίησης. Έχει δε τα ακόλουθα επιθυμητά χαρακτηριστικά:

- Είναι πολύπλευρος, καθώς έχει τη δυνατότητα να εφαρμοστεί σε παρόμοιες εκδοχές του ίδιου προβλήματος. Για παράδειγμα, μπορεί να επεκταθεί απλά από το Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή (Travelling Salesman Problem) στο αντίστοιχο ασύμμετρο (Asymmetric) TSP.
- Είναι εύρωστος. Μπορεί να εφαρμοστεί με ελάχιστες αλλαγές σε άλλα συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης, όπως είναι το Τετραγωνικό Πρόβλημα Ανάθεσης (Quadratic Assignment Problem) και η δρομολόγηση εργασιών (Job – Shop Scheduling Problem).
- Είναι προσέγγιση πληθυσμιακής βάσης. Αυτό είναι ενδιαφέρον, διότι επιτρέπει την εκμετάλλευση της θετικής ανάδρασης, σαν μηχανισμού αναζήτησης. επίσης, επιτρέπει στο σύστημα να υπόκειται σε παράλληλες υλοποιήσεις.

Αυτές οι ιδιότητες αντισταθμίζονται από το γεγονός ότι για μερικές εφαρμογές, το σύστημα των μυρμηγκιών (AS) μπορεί να έχει μικρότερη απόδοση από περισσότερο ειδικευμένους αλγόριθμους. Αυτό είναι ένα πρόβλημα που υπάρχει και σε άλλες προσεγγίσεις όπως ο αλγόριθμος Προσομοιωμένης Ανόπτησης, και ο αλγόριθμος Αναζήτησης Ταμπού, οι οποίοι έχουν περιγραφεί αναλυτικά παραπάνω. Παρόλα αυτά θεωρείται, όπως και στην περίπτωση των ΠΑ και ΑΤ, ότι η προσέγγιση έχει νόημα σε εφαρμογές οι οποίες, παρά το ότι έχουν ομοιότητες με γνωστά βασικά προβλήματα που έχουν μελετηθεί, παρουσιάζουν ιδιαιτερότητες που κάνουν την εφαρμογή των πιο αποδοτικών αλγορίθμων αδύνατη. Αυτή είναι η περίπτωση, για παράδειγμα του Ασύμμετρου Προβλήματος Πλανόδιου Πωλητή.

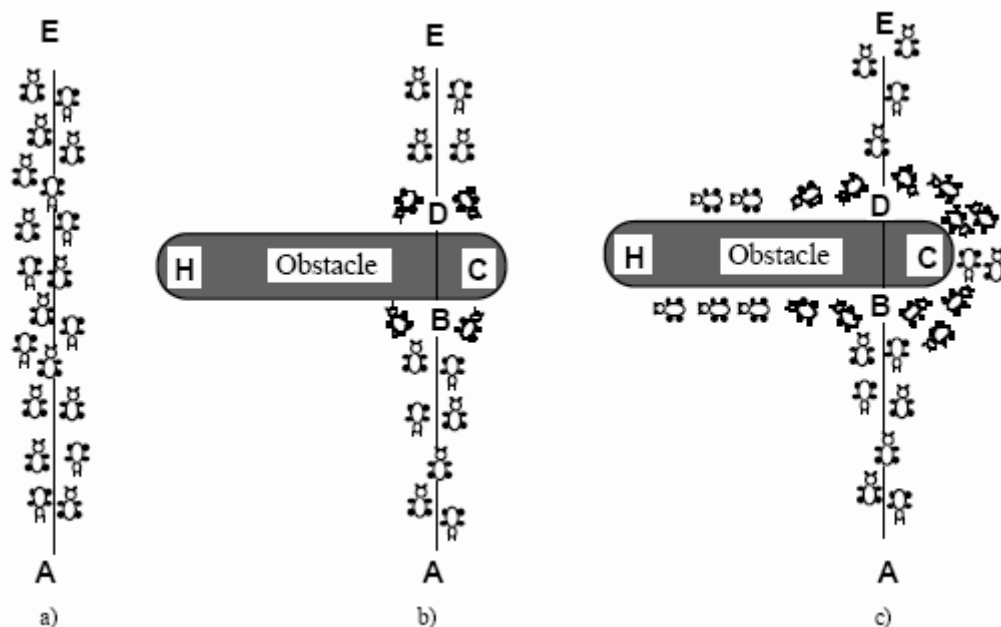
Όπως έχει προαναφερθεί και παραπάνω, η έρευνα γίνεται με «τεχνητά» μυρμηγκία, τα οποία μιμούνται τη συμπεριφορά των πραγματικών. Στην πραγματικότητα, ο αλγόριθμος έχει εμπνευστεί πολύ από την συμπεριφορά των πραγματικών μυρμηγκιών (Deneubourg et al 1983, Deneubourg and Goss 1989, Goss et al 1990).

Η επικοινωνία μεταξύ των μυρμηγκιών γίνεται με την εναπόθεση φερομόνης στο έδαφος. Όσο περισσότερο χρησιμοποιείται μία διαδρομή, τόσο πιο ελκυστική γίνεται για τα επόμενα μυρμηγκία, λόγω της υψηλότερης συγκέντρωσης στη συγκεκριμένη ουσία. Με αυτόν τον τρόπο η διαδικασία χαρακτηρίζεται από μία θετική ανάδραση, όπου η πιθανότητα με την οποία ένα μυρμήγκι επιλέγει ένα μονοπάτι, αυξάνεται με τον αριθμό των μυρμηγκιών που προηγούμενα επέλεξαν το μονοπάτι αυτό.

Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα το πείραμα που φαίνεται στο **Σχήμα 6-21**. Υπάρχει ένα μονοπάτι το οποίο διασχίζουν τα μυρμηγκία (για παράδειγμα από την πηγή τροφής Α στη φωλιά Ε και αντίστροφα, όπως στο **Σχήμα 6-21a**). Ξαφνικά παρουσιάζεται ένα εμπόδιο και το μονοπάτι κόβεται. Έτσι, από το σημείο Β τα μυρμηγκία περπατώντας από το Α στο Ε (ή από το σημείο D, περπατώντας αντίθετα) πρέπει να αποφασίσουν αν θα προχωρήσουν δεξιά ή αριστερά (**Σχήμα 6-21b**). Η επιλογή εξαρτάται από την συγκέντρωση της φερομόνης που άφησαν τα προηγούμενα μυρμηγκία. Το υψηλότερο επίπεδο φερομόνης στο δεξί μονοπάτι δημιουργεί στα μυρμηγκία μεγαλύτερη επιθυμία να το ακολουθήσουν, οπότε αυξάνεται η πιθανότητα να ακολουθήσουν τη διαδρομή της δεξιάς στροφής. Το πρώτο μυρμήγκι που φτάνει στο σημείο Β (ή D), έχει την ίδια πιθανότητα να προχωρήσει δεξιά ή αριστερά (καθώς δεν υπάρχει φερομόνη από προηγούμενα μυρμηγκία στις δύο εναλλακτικές διαδρομές). Επειδή το μονοπάτι BCD είναι μικρότερο από το BHD, το πρώτο μυρμήγκι που θα το ακολουθήσει, θα φθάσει στο σημείο D πριν από το πρώτο μυρμήγκι που θα ακολουθήσει το μονοπάτι BHD (**Σχήμα 6-21c**). Το αποτέλεσμα είναι ότι ένα μυρμήγκι που επιστρέφει από το Ε στο D, θα συναντήσει μεγαλύτερο ίχνος φερομόνης στο μονοπάτι DCB, που θα έχει συγκεντρωθεί από τα μισά μυρμηγκία που το ακολούθησαν τυχαία, όταν αποφάσισαν να περάσουν το εμπόδιο μέσω DCBA και από αυτά που έφθασαν ερχόμενα από το BCD: με αυτό τον τρόπο θα προτιμήσουν (με πιθανότητα) το μονοπάτι DCB από το μονοπάτι DHB. Σαν επακόλουθο, ο αριθμός των μυρμηγκιών που θα ακολουθήσουν το μονοπάτι BCD στη μονάδα του χρόνου, θα είναι μεγαλύτερος από αυτόν που θα ακολουθήσει το μονοπάτι BHD. Αυτό επιτρέπει στην ποσότητα της φερομόνης να αναπτυχθεί γρήγορα στο κοντινότερο μονοπάτι από ότι στο μεγαλύτερο, οπότε και η πιθανότητα με την οποία διαλέγει ένα μυρμήγκι το μονοπάτι, αυξάνεται υπέρ του μικρότερου. Το τελικό αποτέλεσμα είναι ότι πολύ γρήγορα όλα τα μυρμηγκία θα διαλέξουν το κοντινότερο.

Οι αλγόριθμοι που θα προσδιοριστούν παρακάτω είναι μοντέλα που έχουν παραχθεί από την μελέτη πραγματικών αποικιών από μυρμηγκία. Γι' αυτό αποκαλούμε το σύστημά μας ως αυτό των μυρμηγκιών AS (Ant System) και οι αλγόριθμοι που παρουσιάζονται ως αλγόριθμοι των μυρμηγκιών (Ant Algorithms). Καθώς δεν ενδιαφερόμαστε για την προσομοίωση των πραγματικών αποικιών των μυρμηγκιών, αλλά για τη χρήση των τεχνητών αποικιών ως εργαλείο βελτιστοποίησης, το σύστημά μας θα έχει κάποιες σημαντικές διαφορές με το αντίστοιχο πραγματικό:

- Τα «τεχνητά» μυρμηγκία θα έχουν κάποια μνήμη.
- Δεν θα είναι τελείως τυφλά.
- Θα ζουν σε ένα περιβάλλον, όπου ο χρόνος θα είναι διακριτός.

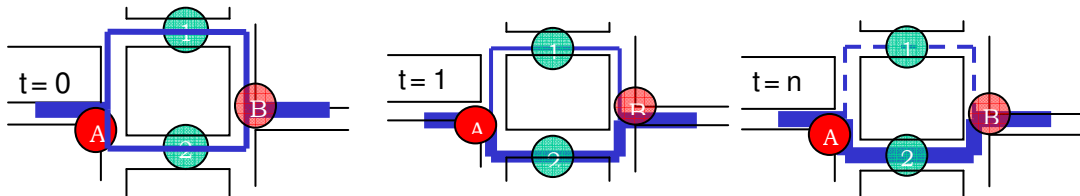


Σχήμα 6-21: Ένα παράδειγμα με πραγματικά μυρμηγκία

Θεωρούμε το γράφημα που παρουσιάζεται στο **Σχήμα 6-22**, που είναι μία πιθανή AS μεταφορά της κατάστασης που φαίνεται στο **Σχήμα 6-21b**. Ας υποθέσουμε ότι η απόσταση μεταξύ A και B, ακολουθώντας τη διαδρομή 1 είναι σχεδόν διπλάσια από την εναλλακτική διαδρομή 2. Σε αυτό το σημείο θα εξετάσουμε τι συμβαίνει σε κανονικά διακριτά διαστήματα του χρόνου: $t = 0, 1, 2, \dots, n$.

Το **Σχήμα 6-22** παρουσιάζει ένα παράδειγμα της μετακίνησης των τεχνητών μυρμηγκιών. Στο χρόνο $t=0$, διάφορα μυρμηγκία κινούνται από το σημείο φόρτωσης A προς το B όπως απεικονίζεται στο παραπάνω σχήμα. Όταν τα

μυρμήγκια φθάνουν στο σημείο A, πρέπει να επιλέξουν μεταξύ της 1ης και 2ης διαδρομής. Αρχικά το ίχνος φερομόνης είναι μηδέν (0) και για τις δύο εναλλακτικές διαδρομές. Η επιλογή τους για το ποια διαδρομή θα ακολουθήσουν, είναι εντελώς τυχαία. Γι' αυτό, κατά μέσο όρο τα μισά μυρμήγκια από τον κόμβο A θα οδηγηθούν προς τον κόμβο B ακολουθώντας την διαδρομή 1 και τα υπόλοιπα τη δεύτερη εναλλακτική διαδρομή.



Σχήμα 6-22: Ένα παράδειγμα με «τεχνητά» μυρμήγκια.

Τα μυρμήγκια που επέλεξαν τη διαδρομή 2 θα επιστρέψουν σε συντομότερο χρονικό διάστημα από τα άλλα, αφού θα διανύσουν την μισή περίπου απόσταση από τα αντίστοιχα μυρμήγκια που ακολούθησαν την διαδρομή 1.

Αυτό σημαίνει, ότι το ίχνος φερομόνης που εναποτίθεται στη 2η διαδρομή εξασθενεί λιγότερο απ' ό,τι στη 1η διαδρομή. Στο χρόνο $t=1$, τα μυρμήγκια αρχίζουν πάλι τη διαδρομή τους. Όταν φθάνουν στο σημείο A, η συγκέντρωση φερομόνης στο ίχνος 2 θα είναι ισχυρότερη απ' ό,τι στη 1η διαδρομή, και επομένως η πιθανότητα επιλογής μονοπατιού είναι άνιση, και πιο συγκεκριμένα ο αναμενόμενος αριθμός μυρμηγκιών που ακολουθούν τη διαδρομή 2 θα είναι περίπου διπλάσια αυτών που ακολουθούν τη διαδρομή 1. Μετά από διάφορους κύκλους ($t=n$) το ίχνος φερομόνης της διαδρομής 1, εξασθενεί εντελώς και όλα τα μυρμήγκια επιλέγουν τη διαδρομή 2 που είναι η συντομότερη διαδρομή.

Η ιδέα είναι ότι εάν σε ένα συγκεκριμένο σημείο, ένα μυρμήγκι έχει να επιλέξει ανάμεσα σε διαφορετικά μονοπάτια, αυτά που έχουν επιλεγεί περισσότερο από τα προηγούμενα μυρμήγκια (που είναι αυτά με το μεγαλύτερο ίχνος φερομόνης) επιλέγονται με μεγαλύτερη πιθανότητα.

6.6.4. Η εφαρμογή του συστήματος μυρμηγκιών στο ΠΠΠ.

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται αναλυτικά ο αλγόριθμος AS χρησιμοποιώντας το γνωστό Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή (ΠΠΠ) (Lawler et al 1985) σαν βάση, αφού το προς επίλυση πρόβλημά μας έχει θεωρηθεί το Ασύμμετρο ΠΠΠ (το οποίο έχει πολλές ομοιότητες με το ΠΠΠ). Παρά το γεγονός ότι ο προσδιορισμός του μοντέλου επηρεάζεται από τη δομή του προβλήματος,

έχει αποδειχτεί ότι η ίδια προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε άλλα προβλήματα βελτιστοποίησης.

Έχοντας ένα σύνολο από n πόλεις, το ΠΠΠ μπορεί να οριστεί σαν ένα πρόβλημα όπου βρίσκεται το ελάχιστο μήκος κλειστής διαδρομής που πρέπει να διανύσει ο πωλητής αφού επισκεπτει την κάθε πόλη μόνο μία φορά. Ορίζουμε με d_{ij} το μήκος του μονοπατιού ανάμεσα στα i και j . Στην περίπτωση Ευκλείδειου ΠΠΠ (6-19), d_{ij} είναι η Ευκλείδειος απόσταση ανάμεσα στα i και j .

$$d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad 6-18$$

Έστω ότι $b_i(t)$ ($i = 1, \dots, n$) είναι ο αριθμός των μυρμηγκιών στην πόλη i στο χρόνο t και έστω $m = b_i(t)$ είναι ο συνολικός αριθμός των μυρμηγκιών. Κάθε ένα μυρμήγκι είναι ένα απλός πράκτορας (agent) με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- Επιλέγει την πόλη που θα επισκεφτεί με πιθανότητα, η οποία είναι συνάρτηση της απόστασης της πόλης και της ποσότητας της φερομόνης που βρίσκεται στο άκρο της σύνδεσης.
- Για να αναγκαστούν τα μυρμήγκια να κάνουν σωστούς γύρους, οι μεταφορές σε πόλεις που έχουν ήδη προσπελαστεί δεν επιτρέπονται, μέχρι να ολοκληρωθεί ένας γύρος (αυτό ελέγχεται από μία λίστα tabu).
- Αφού ολοκληρωθεί ένας γύρος, αφήνει ένα ίχνος φερομόνης σε κάθε τμήμα (i, j) που επισκεφθηκε.

Ορίζουμε ότι η $\tau_{ij}(t)$ είναι η συγκέντρωση της φερομόνης στο τμήμα (i, j) στο χρόνο t . Κάθε μυρμήγκι στο χρόνο t επιλέγει την επόμενη πόλη που θα επισκεφτεί στο χρόνο $t+1$. Γι' αυτό, εάν γίνει μία επανάληψη του αλγορίθμου AS, όπου m κινήσεις γίνονται από m μυρμήγκια στο διάστημα $(t, t+1)$, τότε σε κάθε n επαναλήψεις του αλγορίθμου (που αποκαλείται ένας κύκλος) κάθε μυρμήγκι θα έχει ολοκληρώσει ένα γύρο (tour). Σε αυτό το σημείο, η ποσότητα της φερομόνης ενημερώνεται σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση:

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho * \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij} \quad 6-19$$

όπου ρ είναι ένας συντελεστής όπου το $(1 - \rho)$ αντιπροσωπεύει την εξάτμιση της φερομόνης (ανάμεσα στο χρόνο t και $t + n$),

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad 6-20$$

όπου Δ είναι η ποσότητα για κάθε μονάδα μήκους, της φερομόνης που εναποτέθηκε στο τμήμα (i, j) από το k στη σειρά μυρμήγκι μεταξύ του χρόνου t και $t+n$. Δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k} \text{ αν το } k \text{ μυρμηγκι χρησιμοποιει το } (i, j) \text{ στη διαδρομη του} \\ \text{(αναμεσα στο } \tau \text{ και } t+n) \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \quad 6-21$$

όπου **Q** είναι μία σταθερά και **L_k** είναι το μήκος του γύρου (tour) που κάνει το **k** στη σειρά μυρμηγκι. Ο συντελεστής **ρ** θα πρέπει να πάρει τιμή <1 για να μην υπερβεί την οριακή τιμή συσσώρευσης της φερομόνης. Στα πειράματα, ορίζεται η ποσότητα της φερομόνης στο χρόνο 0, $\tau_{ij}(0)$, με μία μικρή θετική σταθερά **c**.

Με σκοπό να ικανοποιηθεί ο περιορισμός ότι ένα μυρμηγκι επισκέπτεται όλες τις **n** διαφορετικές πόλεις, συσχετίζουμε το κάθε μυρμηγκι με μία δομή δεδομένων που ονομάζεται λίστα **tabu**, όπου αποθηκεύονται οι πόλεις που έχουν επισκεφθεί μέχρι το χρόνο **t** και δεν επιτρέπει στο μυρμηγκι να τις επισκεφθεί ξανά πριν να ολοκληρωθούν **n** επαναλήψεις (ένα tour). Όταν ολοκληρωθεί ο γύρος, η λίστα **tabu** χρησιμοποιείται για να υπολογιστεί η τρέχουσα λύση για το μυρμηγκι (π.χ. η απόσταση της διαδρομής που ακολούθησε). Η λίστα **tabu** τότε αδειάζει και το μυρμηγκι είναι ελεύθερο πάλι να επιλέξει.

Ορίζουμε με την μεταβλητή **tabu_k** το δυναμικά αυξανόμενο διάνυσμα που περιέχει τη λίστα ταμπού του μυρμηγκιού **k**, **tabu_k** είναι το σύνολο που λαμβάνεται από τα στοιχεία του **tabu_k**, και **tabu_k(s)** το στοιχείο **s** της λίστας (δηλαδή, η πόλη **s** που επισκέπτεται από το μυρμηγκι **k** στον τρέχοντα γύρο).

Καλούμε ορατότητα n_{ij} την ποσότητα $1/d_{ij}$. Αυτή η ποσότητα δεν τροποποιείται κατά τη διάρκεια του τρεξίματος του AS, σε αντιδιαστολή με το ίκνος φερομόνης που αλλάζει σύμφωνα με τον τύπο (6-19).

Ορίζουμε την πιθανότητα μετάβασης από την πόλη **i** στην πόλη **j** για το μυρμηγκι **k** ως εξής:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha * [n_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in allowed_k} [\tau_{ik}(t)]^\alpha * [n_{ik}]^\beta} \alpha \nu j \in allowed_k \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \quad 6-22$$

όπου $allowed_k = \{N - tabu_k\}$ και α και β είναι παράμετροι που ελέγχουν την σχετική σημασία της φερομόνης εναντίον της ορατότητας. Επομένως, η πιθανότητα μετάβασης είναι μια ανταλλαγή (trade-off) μεταξύ της ορατότητας (που λέει ότι οι κοντινές πόλεις πρέπει να επιλεγούν με υψηλή πιθανότητα, εφαρμόζοντας κατά συνέπεια έναν greedy κατασκευαστικό ευριστικό αλγόριθμο) και της ποσότητας της φερομόνης στο χρόνο **t** (που λέει ότι εάν στο τμήμα (i, j)

έχει υπάρξει πολλή κυκλοφορία, τότε είναι ιδιαίτερα επιθυμητό, και επομένως εφαρμόζεται η αυτοκαταλυτική διαδικασία).

6.6.5. Οι παραλλαγές του συστήματος μυρμηγκιών (Ant System)

Λαμβάνοντας υπόψη τους ορισμούς της προηγούμενης παραγράφου, ο αποκαλούμενος αλγόριθμος *ant - cycle* ορίζεται απλά ως εξής. Στο χρόνο μηδέν πραγματοποιείται μια φάση έναρξης κατά τη διάρκεια της οποίας τοποθετούνται μυρμηγκία σε διαφορετικές πόλεις και οι αρχικές τιμές φερομόνης $\tau_{ij}(0)$ τοποθετούνται στα τμήματα. Το πρώτο στοιχείο του καταλόγου ταμπού κάθε μυρμηγκιού τίθεται ως στόχος να είναι ίσο με την αρχική πόλη του. Έκτοτε, κάθε μυρμηγκί κινείται από την πόλη **i** προς την πόλη **j** επιλέγοντας την πόλη προς την οποία θα κινηθεί, με μια πιθανότητα, που είναι συνάρτηση (με τις παραμέτρους α και β , βλέπε τον τύπο 6-22) δύο επιθυμητών μέτρων. Πρώτον, η ποσότητα $\tau_{ij}(t)$, δίνει πληροφορίες για το πόσα μυρμηγκία στο παρελθόν επέλεξαν το ίδιο τμήμα (i, j). Δεύτερον, η ορατότητα n_{ij} , λέει ότι όσο πιο κοντά είναι μια πόλη τόσο πιο επιθυμητή είναι. Προφανώς, θέτοντας $\alpha = 0$, το επίπεδο φερομόνης δεν εξετάζεται πλέον, και λαμβάνεται ένας πιθανολογικός αλγόριθμος με πολλαπλές αφετηρίες.

Μετά από **n** επαναλήψεις όλα τα μυρμηγκία έχουν ολοκληρώσει ένα γύρο, και οι λίστες ταμπού τους θα είναι πλήρεις. Σε αυτό το σημείο για κάθε μυρμηγκί **k** η αξία του **L_k** υπολογίζεται και οι τιμές $\Delta\tau_{ij}^k$ ενημερώνονται σύμφωνα με τον τύπο (6-21). Επίσης, το κοντινότερο μονοπάτι που βρίσκεται από τα μυρμηγκία (δηλαδή, $\min L_k, k = 1, \dots, m$) σώζεται και όλες οι λίστες ταμπού εκκενώνονται. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται έως ότου φθάσει ο μετρητής γύρου στο μέγιστο (καθορίζεται από το χρήστη) αριθμό κύκλων NC_{MAX} , ή όταν όλα τα μυρμηγκία κάνουν τον ίδιο γύρο. Καλούμε αυτήν την τελευταία συμπεριφορά στασιμότητας επειδή δείχνει μια κατάσταση στην οποία ο αλγόριθμος σταματά να αναζητά εναλλακτικές λύσεις.

Δύο ακόμη γνωστές παραλλαγές του αλγορίθμου AS είναι οι: *ant- density* και *ant - quantity* (Colormi et al 1991, Dorigo 1992). Διαφέρουν στον τρόπο ενημέρωσης της ποσότητας της φερομόνης. Σε αυτά τα δύο μοντέλα κάθε μυρμηγκί βάζει το ίχνος του σε κάθε βήμα, χωρίς να περιμένει το τέλος του γύρου. Στο μοντέλο *ant- density* μια ποσότητα **Q** της φερομόνης αφήνεται στο τμήμα (i, j) κάθε φορά που πηγαίνει ένα μυρμηγκί από το **i** στο **j**. Στο μοντέλο *ant- quantity* ένα μυρμηγκί που πηγαίνει από το **i** στο **j** αφήνει μια ποσότητα

φερομόνης Q/d_{ij} στο τμήμα (i, j) κάθε φορά που πηγαίνει από το i στο j . Επομένως, στο μοντέλο *ant- density* έχουμε:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} Q & \text{αν το } k \text{ μυρμηγκι πηγαίνει από το } i \text{ στο } j \\ & (\text{αναμεσα στο } \text{χρονο } t \text{ και } t+1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad 6-23$$

και στο μοντέλο *ant- quantity* έχουμε:

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{d_{ij}} & \text{αν το } k \text{ μυρμηγκι πηγαίνει από το } i \text{ στο } j \\ & (\text{αναμεσα στο } \text{χρονο } t \text{ και } t+1) \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad 6-24$$

Από τους παραπάνω ορισμούς είναι ξεκάθαρο ότι η αύξηση της φερομόνης στο τμήμα (i, j) όταν ένα μυρμηγκι πηγαίνει από το i στο j , είναι ανεξάρτητη του d_{ij} στο μοντέλο *ant- density*, ενώ είναι αντιστρόφως ανάλογη στο μοντέλο *ant- quantity*.

6.6.6. Μελέτη πειραμάτων

Ο Dorigo et al (1996) εφάρμοσε τους τρεις αλγόριθμους (*ant-cycle*, *ant-density* και *ant-quantity*) του AS και διερεύνησε τις σχετικές δυνάμεις και αδυναμίες τους, από τον πειραματισμό. Παρακάτω παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι παρατηρήσεις του Dorigo πάνω στα πειράματα.

Οι παράμετροι που λαμβάνονται υπόψη στα πειράματα, είναι εκείνες που επηρεάζουν άμεσα ή έμμεσα τον υπολογισμό της πιθανότητας στη συνάρτηση (6-22).

- α : η ανάλογη σημασία της ίχνους φερομόνης, $\alpha \geq 0$,
- β : η ανάλογη σημασία της ορατότητας, $\beta \geq 0$,
- ρ : η παρουσία φερομόνης $0 \leq \rho < 1$ ($1-\rho$ ερμηνεύεται ως εξάτμιση της φερομόνης),
- Q : σταθερά που σχετίζεται με το ίχνος φερομόνης, που αφήνουν τα μυρμηγκια (βλέπε τύπους (6-21), (6-23), (6-24)).

Ο αριθμός m μυρμηγκιών έχει τεθεί πάντα ίσος με τον αριθμό n πόλεων. Εξετάστηκαν διάφορες τιμές για κάθε παράμετρο, ενώ όλες οι άλλες κρατήθηκαν σταθερές (πάνω από δέκα προσομοιώσεις για κάθε περίπτωση, προκειμένου να αποκτηθούν κάποιες στατιστικές πληροφορίες για τη μέση εξέλιξη). Η προκαθορισμένη αξία των παραμέτρων ήταν $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\rho = 0,5$ και $Q=100$. Σε

κάθε πείραμα μόνο μια από τις τιμές άλλαξαν, εκτός από τις α και β , που έχουν εξεταστεί με διαφορετικά σύνολα τιμών. Οι τιμές που δοκιμάστηκαν ήταν:

$$\begin{aligned} \alpha &\in \{0, 0.5, 1, 2, 5\} \\ \beta &\in \{0, 1, 2, 5\} \\ \rho &\in \{0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 0.999\} \\ Q &\in \{1, 100, 10000\} \end{aligned}$$

Προκαταρκτικά αποτελέσματα, που επιτυγχάνονται στα μικρής κλίμακας προβλήματα, έχουν παρουσιαστεί από τους Colorni et al (1991), (1992) και Dorigo et al (1991) και Dorigo (1992). Όλες οι δοκιμές που αναφέρονται στην ενότητα αυτή είναι βασισμένες στο πρόβλημα Oliver30, ένα πρόβλημα 30-πόλεων που περιγράφεται από τον Whitley κ.α. (1989).

Όλες οι δοκιμές πραγματοποιήθηκαν για $NC_{MAX}=5000$ κύκλους και υπολογίστηκαν κατά μέσο όρο πάνω από δέκα δοκιμές. Για να συγκριθούν τα τρία μοντέλα πειραματικά προσδιορίστηκαν οι καλύτερες τιμές των παραμέτρων για κάθε αλγόριθμο, και κατόπιν έτρεξε ο κάθε αλγόριθμος 10 φορές χρησιμοποιώντας το σύνολο των καλύτερων παραμέτρων. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Η παράμετρος Q δεν εμφανίζεται, καθ' όσον η επιρροή της θεωρήθηκε αμελητέα.

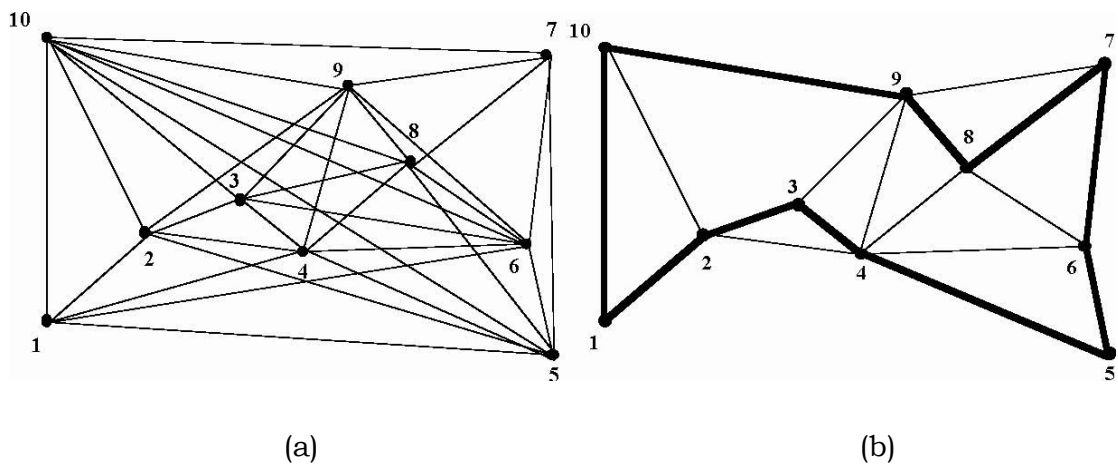
	Καλύτερο σύνολο παραμέτρων	Μέσο αποτέλεσμα	Καλύτερο αποτέλεσμα
Ant-Density	$\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0,99$	426.740	424.635
Ant-Quantity	$\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0,99$	427.315	426.255
Ant-Cycle	$\alpha = 1, \beta = 5, \rho = 0,5$	424.250	423.741

Πίνακας 6-3: Σύγκριση των αλγορίθμων ant-quantity, ant-density και ant-cycle

Τα δύο μοντέλα *ant-density* και *ant-quantity* δεν έδωσαν καλά αποτελέσματα σε σχέση με το μοντέλο *ant-cycle*. Ο λόγος αφορά το είδος της πληροφορίας που ανατροφοδοτεί το σύστημα με το οποίο οδηγείται η διαδικασία. Ο *ant-cycle* χρησιμοποιεί καθολική πληροφορία, όπου η ποσότητα της φερομόνης που αφήνεται είναι ανάλογη με το πόσο καλή ήταν η λύση που είχε παραχθεί. Από την άλλη, οι *ant-quantity* και *ant-density* χρησιμοποιούν τοπική πληροφορία. Η αναζήτηση εδώ δεν καθοδηγείται από κανένα μέτρο από το τελικό αποτέλεσμα. Η διαδικασία μπορεί να παρατηρηθεί στο παρακάτω γράφημα, όπου

το AS εφαρμόστηκε σε ένα απλό πρόβλημα 10 πόλεων και αποτυπώνει το αποτέλεσμα της αναζήτησης στην κατανομή της ποσότητας της φερομόνης.

Το μήκος των τμημάτων είναι ανάλογο με τις αποστάσεις ανάμεσα στις πόλεις. Το πάχος των γραμμών είναι ανάλογο με την ποσότητα της φερομόνης. Αρχικά, (**Σχήμα 6-23a**), η φερομόνη κατανέμεται ομοιόμορφα σε κάθε τμήμα και η αναζήτηση καθοδηγείται μόνο με βάση την ορατότητα. Αργότερα, αφού προχωρήσει η διαδικασία, (**Σχήμα 6-23b**), η φερομόνη έχει αποτεθεί στα τμήματα που συνθέτουν τους καλούς γύρους, ενώ έχει εξατμιστεί πλήρως στα υπόλοιπα τμήματα. Τα τμήματα αυτά των ακατάλληλων γύρων διαγράφονται από το γράφημα και με αυτό τον τρόπο ελαττώνεται ο χώρος αναζήτησης.

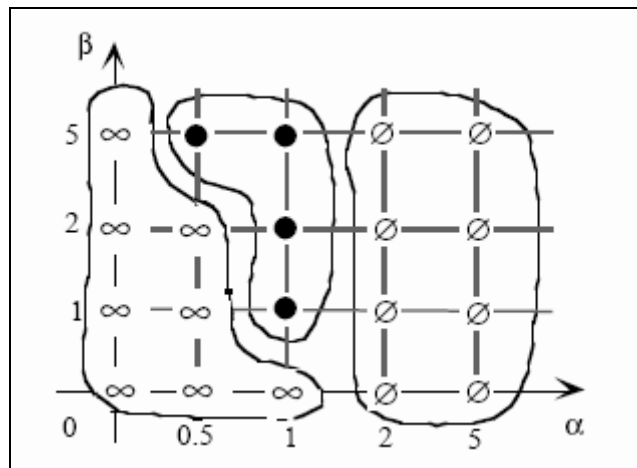


Σχήμα 6-23: Εξέλιξη της κατανομής ίχνους για ένα πρόβλημα 10 πόλεων.

Εκτός από το μήκος γύρου, ερευνήθηκε επίσης η συμπεριφορά στασιμότητας, δηλαδή η κατάσταση στην οποία όλα τα μυρμηγκία κάνουν τον ίδιο γύρο. Αυτό δείχνει ότι το σύστημα έχει σταματήσει να διερευνά νέες δυνατότητες και δε θα προκύψει κανένας καλύτερος γύρος. Με μερικές τιμές παραμέτρων παρατηρήθηκε ότι, μετά από διάφορους κύκλους, όλα τα μυρμηγκία ακολουθούν τον ίδιο γύρο παρά την πιθανολογική φύση των αλγορίθμων. Ο λόγος ήταν η υψηλότερη συγκέντρωση φερομόνης στα τμήματα που αποτελούσαν τον γύρο αυτό σε σχέση με τα υπόλοιπα.

Επίσης, ερευνήθηκε η συμπεριφορά του αλγορίθμου *ant-cycle* για διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων α και β . Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στο **Σχήμα 6-24**, το οποίο προέκυψε τρέχοντας τον αλγόριθμο 10 φορές για κάθε ζευγάρι τιμών των παραμέτρων. Κατόπιν υπολογίστηκε ένας μέσος όρος των αποτελεσμάτων και κατατάχθηκε σε μία από τις παρακάτω διαφορετικές κλάσεις.

- *Κακές λύσεις και στασιμότητα:* Για υψηλές τιμές της α , ο αλγόριθμος φθάνει στο στάδιο στασιμότητας πολύ γρήγορα χωρίς να έχει εντοπίσει πολύ καλές λύσεις. Αυτή η κατάσταση συμβολίζεται με το σύμβολο $[\emptyset]$.
- *Κακές λύσεις και μη στασιμότητα:* Εάν δε δοθεί αρκετή σημασία στο ίχνος φερομόνης (δηλαδή η τιμή του α είναι χαμηλή), τότε ο αλγόριθμος δεν βρίσκει πολύ καλές λύσεις. Αυτή η κατάσταση συμβολίζεται με το σύμβολο $[\infty]$.
- *Καλές λύσεις:* Πολύ καλές λύσεις βρέθηκαν για τιμές των α και β που βρίσκονται στη κεντρική περιοχή (όπου το σύμβολο είναι $[\bullet]$). Σε αυτήν την περίπτωση βρέθηκε ότι διαφορετικοί συνδυασμοί παραμέτρων (π.χ.: $(\alpha=1, \beta=1)$, $(\alpha=1, \beta=2)$, $(\alpha=1, \beta=5)$, $(\alpha=0.5, \beta=5)$) είχαν την ίδια απόδοση.



Σχήμα 6-24: Η συμπεριφορά του ant-cycle για διαφορετικούς συνδυασμούς των παραμέτρων α , β .

Τα αποτελέσματα αυτού του πειράματος συμφωνούν με την αντίληψή μας για το σχετικό αλγόριθμο. Μια υψηλή αξία για την α σημαίνει ότι το ίχνος είναι πολύ σημαντικό και επομένως, τα μυρμηγκία τείνουν να επιλέξουν τα τμήματα που έχουν επιλεγεί από άλλα μυρμηγκία στο παρελθόν. Αφ' ετέρου, οι χαμηλές τιμές του α καθιστούν τον αλγόριθμο παρόμοιο με έναν πολυστοχαστικό αλγόριθμο.

Τα σημαντικότερα δυνατά σημεία του αλγορίθμου *ant-cycle* μπορούν να συνοψισθούν ως εξής:

- Στο διάστημα των βέλτιστων τιμών των παραμέτρων ο αλγόριθμος βρίσκει πάντα καλές λύσεις,

- Ο αλγόριθμος βρίσκει τις καλές λύσεις γρήγορα, αλλά συνεχίζει να ερευνά για πιθανές νέες καλύτερες διαδρομές, δεν δείχνει δηλαδή συμπεριφορά στασιμότητας, και
- Το σύστημα δείχνει μικρή ευαισθησία στις αυξανόμενες διαστάσεις του προβλήματος.

7

ΥΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΛΓΟΡΙΘΜΩΝ

7.1. Ο αλγόριθμος αναζήτησης ταμπού

Σε αυτή την παράγραφο θα περιγραφούν τα μέρη του προγράμματος του αλγορίθμου Αναζήτησης Ταμπού (AT) που εφαρμόσαμε πάνω στο πρόβλημα της βελτιστοποίησης της μεταφοράς απορριμμάτων, το οποίο είναι ένα Ασύμμετρο Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή (ΑΠΠΠ) όπως έχει αναφερθεί και στην ενότητα 6.3. Αρχικά, θα πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα έχει υλοποιηθεί στη γλώσσα προγραμματισμού Java. Μετά τη δημιουργία των αντικειμένων του αλγορίθμου AT, τα οποία θα χρειαστούν στο κύριο πρόγραμμα (main), αρχίζει η αναζήτηση και έπειτα ακολουθεί η απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Ακολουθεί μια απλή παρουσίαση της γενικής δομής του προγράμματος.

```
public class Main
{
    public static void main( String[] args )
    {
        // Αρχικοποίηση των αντικειμένων μας
        // ...
        // Δημιουργία του αντικειμένου Αναζήτηση Ταμπού
        // ...
        // Έναρξη επίλυσης του προβλήματος
        // ...
        // Απεικόνιση λύσης
        // ...
    } // end main
}
```

```
} // end class Main
```

Η αρχικοποίηση των αντικειμένων του προγράμματος γίνεται με τις εξής εντολές:

```
ObjectiveFunction objFunc = new MyObjectiveFunction1(table);  
Solution initialSolution = new MyGreedyStartSolution1(table);  
MoveManager moveManager = new MyMoveManager1();  
TabuList tabuList = new SimpleTabuList( 7 );
```

Η μεταβλητή `table` που φαίνεται παραπάνω είναι ένας πίνακας 72x72 που περιέχει τα κόστη των συνδέσμων (`edges`) και αποτελεί την είσοδο στο πρόγραμμά μας. Ακολουθεί η δημιουργία του αντικειμένου «Tabu Search» σύμφωνα με τον κατασκευαστή `SingleThreadedTabuSearch`.

```
public class Main  
{  
  
    public static void main( String[] args )  
    {  
        ...  
  
        // Create Tabu Search object  
        TabuSearch tabuSearch = new SingleThreadedTabuSearch(  
            initialSolution,  
            moveManager,  
            objFunc,  
            tabuList,  
            new BestEverAspirationCriteria(), //In OpenTS package  
            false ); //maximizing = yes/no; false means minimizing  
  
        ...  
    } // end main  
  
    ...  
  
} // end class Main
```

Περνάμε όλα τα σχετικά αντικείμενα στον κατασκευαστή συμπεριλαμβανομένου ενός από τα κλασσικά aspiration criteria που χρησιμοποιούνται ευρέως και ενός false για το μέγιστο όρισμα. Θέλουμε να ελαχιστοποιούμε την απόσταση στο πρόβλημά μας, έτσι η παράμετρος false σημαίνει ότι δε μεγιστοποιείται και επομένως, πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Ο αλγόριθμος AT θα αρχίσει την αναζήτηση με τις ακόλουθες εντολές.

```
// Start tabu search
    tabuSearch.setIterationsToGo( 100 );
    tabuSearch.startSolving();
```

Η λύση παρουσιάζεται σε ένα αρχείο εξόδου, όπως φαίνεται παρακάτω:

```
// Show solution
MySolution1 best = (MySolution1)tabuSearch.getBestSolution();
out.println( "Best Solution:\n" + best );
```

Έπειτα, ακολουθεί μια σύντομη περιγραφή των αντικειμένων του αλγορίθμου Αναζήτησης Ταμπού. Στο πρόβλημα του Ασύμμετρου Πλανόδιου Πωλητή, μια λύση μπορεί να οριστεί εύκολα ως μια λίστα πελατών σύμφωνα με την οποία ο πωλητής θα την επισκεφτεί. Ο πωλητής μας θα αρχίσει από τον πελάτη μηδέν (0) και θα επιστρέψει στον ίδιο πελάτη στο τέλος.

Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή	Πρόβλημα βελτιστοποίησης της συλλογής απορριμμάτων
Πωλητής	Απορριμματοφόρο
Πελάτες σε διαφορετικές πόλεις	Θέσεις κάδων (Loading Spots)
Κόστος: αποστάσεις μεταξύ των πόλεων	Κόστος: αποστάσεις μεταξύ των θέσεων κάδων

Πίνακας 7-1: Αναλογίες του ΠΠΠ με το πρόβλημα βελτιστοποίησης της μεταφοράς απορριμμάτων

Το αντικείμενο λύσης μας (solution object) είναι απλά ένας πίνακας ακέραιων αριθμών με τις τιμές να κυμαίνονται από 0 έως το n-1, όπου n είναι ο

αριθμός των πελατών που πρέπει να επισκεφτεί ο πωλητής. Στο πρόβλημά μας, ως πελάτες θεωρούνται τα σημεία φόρτωσης των απορριμμάτων (loading spots) από τα οποία πρέπει να περάσει το απορριμματοφόρο (**Πίνακας 7-1**). Χρησιμοποιείται μια ρουτίνα κάποιου είδους greedy heuristic για να αρχικοποιηθεί η λύση. Η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιήσαμε (objective function) ορίζεται ως εξής:

```
public class MyObjectiveFunction1 implements ObjectiveFunction
{
    public int[][] matrix;

    public MyObjectiveFunction1( int[][] table )
    {
        matrix=table;
    }    // end constructor

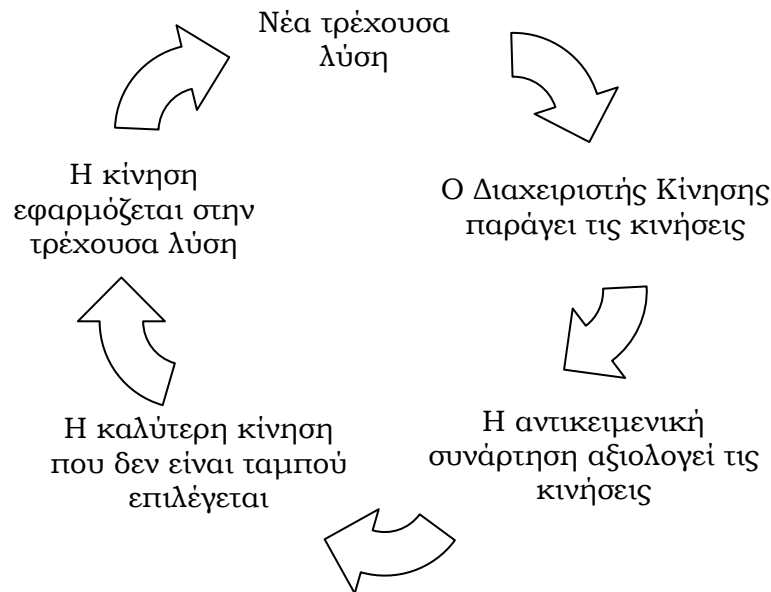
    public double[] evaluate( Solution solution, Move move)
    {
        ...
    }    // end evaluate

    ...
}    // end class MyObjectiveFunction1
```

Ο κατασκευαστής αναμένει να περαστεί η μήτρα 72x72 με τα κόστη των συνδέσμων που είναι η είσοδος στο κύριο πρόγραμμα. Θα πρέπει να επαναλάβουμε ότι η μήτρα είναι μη συμμετρική. Ο αλγόριθμος Αναζήτησης Ταμπού αναμένει ότι η αντικειμενική συνάρτηση είναι σε θέση, είτε να αξιολογήσει μια ολόκληρη λύση από την αρχή είτε να αξιολογήσει μια πιθανή λύση που θα προέκυπτε από την εφαρμογή ενός αντικειμένου κίνησης (Move Object). Καθορίζουμε τι αναμένει ο αλγόριθμος AT στο αντικείμενο evaluate(...) δοκιμάζοντας εάν ή όχι το αντικείμενο κίνησης (Move object) είναι κενό (Null Value). Θα πρέπει να επιστραφεί η πλήρης τιμή, και όχι η αυξητική της λύσης.

Τέλος, συνοψίζουμε ποια στοιχεία χρησιμοποιούνται για την αναζήτηση του χώρου λύσεων. Έχοντας ως δεδομένο μια αρχική, ή τρέχουσα λύση, ο διαχειριστής κίνησης (Move Manager) καλείται να παραγάγει μια λίστα κινήσεων

για την κάθε επανάληψη. Η αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται για να καθοριστεί η τιμή της λύσης που θα προέκυπτε από καθεμιά από αυτές τις κινήσεις. Με τη βοήθεια της λίστας ταμπού, καθορίζουμε ποια κίνηση είναι η καλύτερη, και εκείνη η κίνηση λειτουργεί ως αρχική, ή ως τρέχουσα, λύση που οδηγεί σε μια νέα τρέχουσα λύση. Το **Σχήμα 7-1** που ακολουθεί δείχνει τη διαδικασία που περιγράψαμε γραφικά.



Σχήμα 7-1: Μια επανάληψη στον αλγόριθμό μας

7.2. Ο γενετικός αλγόριθμος

Σε συνέχεια, θα περιγραφεί ο γενετικός αλγόριθμος, ο οποίος υλοποιήθηκε για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης αποκομιδής απορριμμάτων. Δίνεται έμφαση, κυρίως, στην περιγραφή της γενετικής προσέγγισης του αλγορίθμου.

Ο κώδικας του προγράμματος έχει γραφεί και αυτός σε γλώσσα προγραμματισμού Java και χρησιμοποιήθηκε το Swing για την ανάπτυξη της διεπαφής με τον χρήστη (user interface).

Ένας γενετικός αλγόριθμος εμπνέεται από το βιολογικό πρότυπο, όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω. Προκειμένου να ερευνηθεί ένα μεγάλο διάστημα αναζήτησης (search space), ο αλγόριθμος αρχίζει με μια «ομάδα γονιδίων» (gene pool) μέσα στο χώρο αναζήτησης, τα οποία συνδέει επιλεκτικά ελπίζοντας να βρει

μια καλύτερη τιμή. Ακολουθώντας τις αρχές του Δαρβίνου, ο αλγόριθμος ευνοεί ελαφρώς τα «καλύτερα» σημεία στην ομάδα γονιδίων.

Προκειμένου να είναι επιτυχείς, οι γενετικοί αλγόριθμοι πρέπει να βρουν μια μέση λύση μεταξύ της εξερεύνησης του διαστήματος αναζήτησης και της αξιοποίησης της γνώσης του προβλήματος. Η εξερεύνηση οδηγεί στην κάλυψη περισσότερης περιοχής στο διάστημα αναζήτησης. Η εκμετάλλευση καθοδηγεί την αναζήτηση προς καλύτερες λύσεις και μειώνει το χρονικό διάστημα που απαιτείται για την εύρεση μιας αποδεκτής λύσης. Πάρα πολλή εξερεύνηση ενός προβλήματος τείνει να είναι αργή και αναποτελεσματική, ενώ πάρα πολλή εκμετάλλευση τείνει να παράγει αποτελέσματα χαμηλότερης ποιότητας. Οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν τρία σημαντικά συστατικά:

- Επιλογή

Γενικά, η επιλογή είναι η διαδικασία αναζήτησης γονέων από την ομάδα γονιδίων για την επανασύνδεση. Στο πρόγραμμα του Ασύμμετρου Προβλήματος Πλανόδιου Πωλητή που υλοποιήθηκε, χρησιμοποιήθηκε μια αρκετά απλή τεχνική σύμφωνα με την οποία επιλέχθηκε ένας γονέας από το πάνω μισό της ομάδας γονιδίων και ο άλλος γονέας επιλέχθηκε από οπουδήποτε μέσα στην ομάδα γονιδίων. Αυτό τείνει να ευνοεί τα «καλύτερα» σημεία αλλά μόνο λίγο.

- Επανασύνδεση

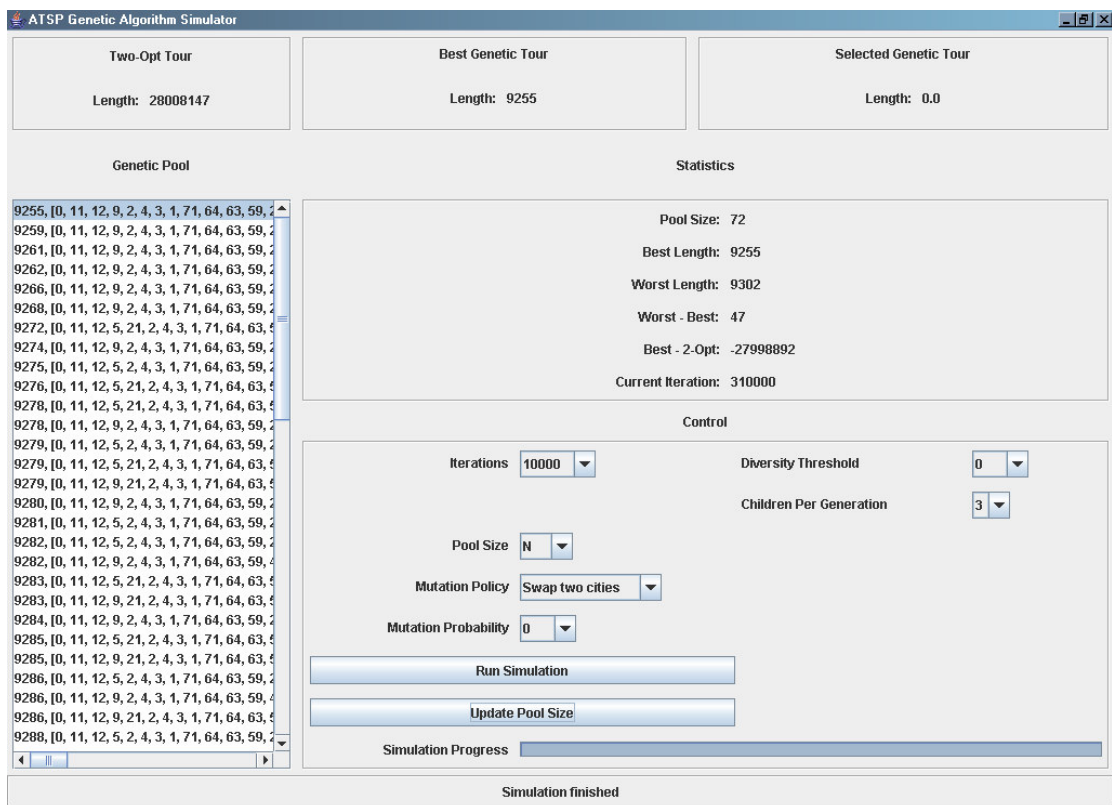
Για την επανασύνδεση, χρησιμοποιήθηκε μια τεχνική που ονομάζεται μέθοδος διάταξης. Αυτή η μέθοδος επιλέγει δύο σημεία από ένα γύρο, τα οποία αναπαριστάνονται σαν μια λίστα που δείχνει τη σειρά με την οποία επισκέπτονται τα σημεία φόρτωσης. Έπειτα, ο υπο-γύρος (sub-tour) ενός από τους γονείς, μεταξύ αυτών των δύο σημείων, αντιγράφεται άμεσα στο παιδί. Τέλος, τα υπόλοιπα σημεία φόρτωσης στο γύρο είναι θέσεις γύρω από τον υπο-γύρο (sub-tour) του παιδιού στην ίδια διάταξη που εμφανίζονται στον άλλο γονέα.

- Μετάλλαξη

Για τη μετάλλαξη χρησιμοποιήθηκαν δύο διαφορετικές συναρτήσεις μετάλλαξης. Η πρώτη απλά αντιστρέφει έναν τυχαίο υπο-γύρο σε ένα δεδομένο γύρο. Η δεύτερη επιλέγει δύο σημεία φόρτωσης τυχαία και αντιστρέφει τις θέσεις τους. Από αυτές τις δύο λειτουργίες μετάλλαξης, η δεύτερη μέθοδος φαίνεται ότι παράγει πιο καλά αποτελέσματα. Η πρώτη μέθοδος φαίνεται ότι είναι πιο επιβλαβής στην ομάδα γονιδίων μετά από μόνο μερικές επαναλήψεις και δε δημιουργεί κανένα χρήσιμο γύρο. Επίσης, σε κάποιες εκτελέσεις του προγράμματος παρατηρήθηκε ότι η χρήση και των δύο μηχανισμών μετάλλαξης εναλλάξ παρήγαγε αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα.

Στη συνέχεια, αναφέρεται σε ποια σημεία του προγράμματος μπορούν να συμβούν μεταλλάξεις. Το πρώτο σημείο είναι αμέσως μετά την παραγωγή ενός παιδιού. Ένα ορισμένο ποσοστό όλων των νέων παιδιών, το οποίο μπορεί να διαμορφώνεται από τον χρήστη, μεταλλάσσεται πριν πάει στην ομάδα γονιδίων. Το δεύτερο σημείο είναι όταν ένα παιδί προστίθεται στην ομάδα. Εάν η ομάδα περιέχει ήδη ένα ακριβές αντίγραφο του παιδιού, κατόπιν το παιδί μεταλλάσσεται αυτόματα και προστίθεται ξανά στην ομάδα. Εάν αυτό είναι επίσης στην ομάδα, τότε το παιδί απορρίπτεται. Ο τελικός αλγόριθμος της μετάλλαξης διαμορφώνεται, επίσης, από το χρήστη. Αυτή η μετάλλαξη εξετάζει τις διαφορές στο μήκος του γύρου, δηλαδή, μεταξύ του πρώτου και του τελευταίου γύρου στην ομάδα γονιδίων. Η ομάδα ταξινομείται με βάση το μήκος του γύρου. Εάν το μήκος μειωθεί κάτω από ένα συγκεκριμένο κατώτατο όριο το πρόγραμμα επαναλαμβάνει έναν ολόκληρο γύρο και μεταλλάσσει το δεύτερο από ένα οποιοδήποτε ζευγάρι γύρων των οποίων τα μήκη είναι παρόμοια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη διαφοροποίηση ολόκληρης της ομάδας σε λιγότερο από μία γενιά.

Στο παρακάτω **Σχήμα 7-2** παρουσιάζεται ένα από τα στιγμιότυπα (screen shot) της εκτέλεσης των Γενετικών Αλγορίθμων σύμφωνα με τα δεδομένα του προβλήματός μας.



Σχήμα 7-2: Στιγμιότυπο (screenshot) της εκτέλεσης του Γενετικού Αλγόριθμου.

7.3. Προσομοιωμένη ανόπτηση

7.3.1. Ο αλγόριθμος

Στον αλγόριθμο Προσομοιωμένης Ανόπτησης καθορίζεται μια αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί. Στην περίπτωση μας, η αντικειμενική συνάρτηση είναι το συνολικό μήκος διαδρομής μέσω ενός συνόλου σημείων (Σημεία Φόρτωσης). Η απόσταση μεταξύ κάθε ζευγαριού σημείων είναι ισοδύναμη με την «ενέργεια» ενός μορίου. Τότε, η «θερμοκρασία» είναι ο μέσος όρος αυτών των μηκών. Αρχίζοντας από ένα αρχικό σημείο, ο αλγόριθμος ανταλλάσσει ένα ζευγάρι σημείων και η συνολική «ενέργεια» της διαδρομής υπολογίζεται. Οποιοδήποτε βήμα προς τα κάτω (downhill) γίνεται αποδεκτό και η διαδικασία επαναλαμβάνεται. Ένα ανηφορικό (uphill) βήμα μπορεί, επίσης, να γίνει αποδεκτό. Κατά συνέπεια, ο αλγόριθμος μπορεί να ξεφύγει από τα τοπικά ελάχιστα. Η απόφαση για τα αναφορικά βήματα λαμβάνεται από το κριτήριο *Metropolis*. Καθώς η διαδικασία βελτιστοποίησης προχωρά, ο αλγόριθμος καταλήγει σε ένα γενικό ελάχιστο (Global Minimum). Δεδομένου ότι ο αλγόριθμος κάνει πολύ λίγες υποθέσεις σχετικά με την αντικειμενική συνάρτηση, είναι αρκετά εύρωστος (robust). Ο βαθμός ευρωστίας μπορεί να προσαρμοστεί από το χρήστη με τη βοήθεια μερικών σημαντικών παραμέτρων που παρουσιάζονται παρακάτω:

- **Factor** → Ο παράγοντας μείωσης της θερμοκρασίας της ανόπτησης
- **N-temps** → Ο αριθμός βημάτων θερμοκρασίας που θα εκτελεστούν
- **N-limit** → Ο αριθμός δοκιμών σε κάθε θερμοκρασία
- **G-limit** → Ο αριθμός επιτυχημένων δοκιμών (ή ανταλλαγές - swaps)

7.3.2. Ο ψευδοκώδικας της βασικής διαδικασίας

Ο ψευδοκώδικας του αλγορίθμου της Προσομοιωμένης Ανόπτησης, ο οποίος χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση του προβλήματος της βελτιστοποίησης της μεταφοράς των δημοτικών στερεών αποβλήτων, παρουσιάζεται παρακάτω.

αρχικοποίηση της θερμοκρασίας

```
for i := 1...ntemps do  
    temperature := factor * temperature  
    for j := 1...nlimit do
```

```

        προσπάθησε να ανταλλάξεις ένα τυχαίο ζευγάρι σημείων
delta := current_cost - trial_cost
if delta > 0 then
    κάνε την ανταλλαγή (swap) σταθερή
    αύξησε την μεταβλητή good_swaps
else
    p := τυχαίος αριθμός στο εύρος [0...1]
    m := exp( delta / temperature )
    if p < m then      // κριτήριο Metropolis
        κάνε την ανταλλαγή σταθερή
        αύξησε την μεταβλητή good_swaps
    end if
end if
    exit when good_swaps > glimit
end for
end for

```

Στόχος του κριτηρίου Metropolis είναι να επιτρέπει μικρές ανηφορικές κινήσεις απορρίπτοντας τις μεγάλες ανηφορικές κινήσεις. Αυτό γίνεται για να αποτρέψει τον αλγόριθμο από το να «κολλήσει» σε ένα τοπικό ελάχιστο. Όταν ο πρώτος κλάδος `else` επιλέγεται παραπάνω, ένας ομοιόμορφα κατανεμημένος τυχαίος αριθμός `p` στο εύρος `[0...1]` παράγεται και συγκρίνεται με τον αριθμό Metropolis:

$$m = e^{\text{delta}/\text{temperature}}$$

Αφού το πηλίκο `delta/temperature` είναι αρνητικό στον `else` κλάδο, υπολογίζουμε την τιμή του `e` υψωμένη σε μια αρνητική δύναμη έτσι ώστε το `m` να είναι επίσης στο εύρος `[0...1]`. Όσο πιο αρνητική είναι η δύναμη, τόσο πιο κοντά στο 0 θα είναι η τιμή του `m`. Μεγάλες αρνητικές τιμές της `delta` και οι χαμηλές τιμές για τη θερμοκρασία καθιστούν την αποδοχή μιας ανηφορικής κίνησης λιγότερο πιθανή.

7.3.3. Πλεονεκτήματα του αλγορίθμου

Μπορεί να φανεί από τον παραπάνω ψευδοκώδικα ότι ο αλγόριθμος είναι της τάξης `nlimit * ntemps` ενώ η αναζήτηση όλων των πιθανών συνδυασμών για την καλύτερη διαδρομή είναι της τάξης του `n!`. Δύο περιπτώσεις δοκιμής

υπάρχουν για να καταδείξουν τα οφέλη αυτού του αλγορίθμου. Το κύριο όφελος είναι ότι μια καλή προσέγγιση στην κοντινότερη πορεία μπορεί να βρεθεί σε ένα «λογικό» χρονικό διάστημα. Αξίζει να σημειωθεί ότι η ηλικία του κόσμου είναι:

$$1.5 \times 10^{10} [\text{yr}] \cdot 365 [\text{d/yr}] \cdot 24 [\text{hr/d}] \cdot 3600 [\text{sec/hr}] = 4.73 \times 10^{17} [\text{sec}]$$

Μια εξαντλητική αναζήτηση όλων των πιθανών διαδρομών που προκύπτουν αν έχουμε μόνο 36 σημεία θα απαιτούσε περίπου $36! = 3.72 \times 10^{41}$ συγκρίσεις για να βρεθεί η πιο σύντομη διαδρομή. Αυτό θα έπαιρνε περισσότερο χρόνο και από την ηλικία του κόσμου.

7.3.4. Λειτουργία του προγράμματος

Το πρόγραμμα βρίσκει ένα κατά προσέγγιση ελάχιστο μήκος διαδρομής του απορριματοφόρου μέσω όλων των σημείων φόρτωσης (loading spots). Ενώ το πρόγραμμα εκτελείται, εμφανίζεται ένα παράθυρο διασύνδεσης (interface) με το χρήστη. Μενού ελέγχου και πλήκτρα συντόμευσης παρέχονται από το πρόγραμμα. Αυτά περιλαμβάνουν τρέξιμο του αλγορίθμου μέχρι την ολοκλήρωσή του, μονά βήματα εκτέλεσης του αλγορίθμου έτσι ώστε ο χρήστης να μπορεί να πάρει αποτελέσματα σε κάθε «θερμοκρασία» ανόπτησης, καθώς και επαναφορά (reset) του αλγορίθμου στην αρχική ακολουθία. Επίσης, ένα παράθυρο διαλόγου επιτρέπει στο χρήστη να ρυθμίσει σημαντικές παραμέτρους του προγράμματος.

Το μενού ελέγχου περιέχει τρεις ομάδες επιλογών:

File → Ομάδα πρόσβασης αρχείων

New (Ctrl + N) → Διαγράφει τα τρέχοντα δεδομένα και αρχικοποιεί μια κενή δομή δεδομένων.

Open (Ctrl + O) → Εμφανίζει ένα πλαίσιο διαλόγου που επιτρέπει το άνοιγμα και διάβασμα ενός αρχείου δεδομένων.

Exit → Κλείνει την εφαρμογή.

Compute → Ομάδα ελέγχου αλγορίθμου.

Run (Ctrl + V) → Τρέχει τον αλγόριθμο για τη συγκεκριμένη είσοδό μας, που είναι ένας πίνακας 72×72 με τα κόστη των συνδέσμων – κάδων, με τον αριθμό των βημάτων να καθορίζεται από το χρήστη μέσω του παραθύρου διαλόγου Settings.

Step (Ctrl + X) → Τρέχει τον αλγόριθμο για το επόμενο βήμα θερμοκρασίας.

Reset (Ctrl + Z) → Επαναφέρει τη διαδρομή στην προηγούμενη κατάσταση. Για την εντολή Run, η αρχική διαδρομή επαναφέρεται. Για την εντολή «Step», η προηγούμενη διαδρομή επαναφέρεται.

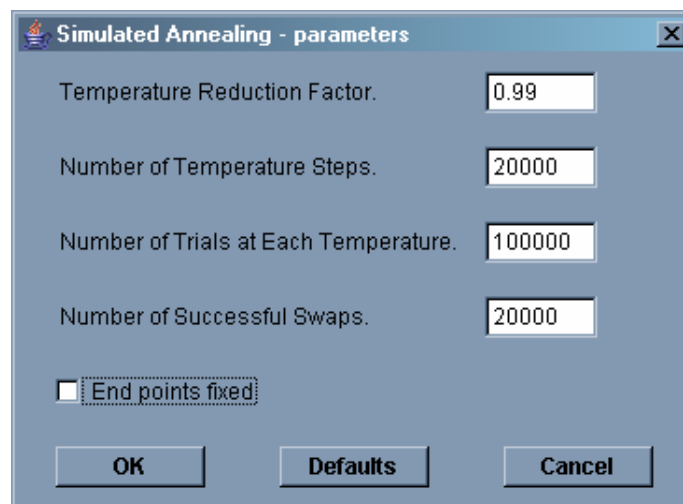
Settings → Εμφανίζει ένα πλαίσιο διαλόγου που επιτρέπει στο χρήστη να αλλάξει ορισμένες παραμέτρους του αλγορίθμου Προσομοιωμένης Ανόπτησης.

Help → Ομάδα πληροφοριών.

About → Εμφανίζει ένα πλαίσιο διαλόγου που περιέχει κάποιες πληροφορίες που περιγράφουν την εφαρμογή.

Στο παρακάτω **Σχήμα 7-3** παρουσιάζεται ένα από τα στιγμιότυπα (screen shot) της εκτέλεσης του αλγορίθμου της Προσομοιωμένης Ανόπτησης σύμφωνα με τα δεδομένα του προβλήματός μας. Από το παράθυρο διαλόγου με το χρήστη φαίνονται καθαρά οι τέσσερις (4) επιλογές, που έχει ο χρήστης και οι οποίες του επιτρέπουν την παραμετροποίηση του συγκεκριμένου αλγορίθμου.

Έτσι μπορεί να παραμετροποιήσει α) τον παράγοντα μείωσης της θερμοκρασίας της ανόπτησης, β) τον αριθμό βημάτων θερμοκρασίας, που θα εκτελεστούν, γ) τον αριθμό δοκιμών σε κάθε θερμοκρασία, και τέλος δ) τον αριθμό των επιτυχημένων δοκιμών (ή ανταλλαγών - swaps).



Σχήμα 7-3: Στιγμιότυπο (screenshot) της εκτέλεσης του αλγόριθμου ΠΑ.

7.4. Σύστημα αποικίας μυρμηγκιών

Δεδομένου ότι ο Κύκλος Μυρμηγκιών (*Ant-Cycle*) αποδίδει καλύτερα, όπως έχει ήδη αναλυθεί σε προηγούμενη ενότητα, είναι συνήθως αυτός που αντιπροσωπεύει το Σύστημα Μυρμηγκιών (Ant System). Κατά συνέπεια, αυτή η

παραλλαγή είναι, επίσης, η βάση για την υλοποίηση της εφαρμογής που αναλύεται στην διατριβή.

7.4.1. Σύστημα αποικιών μυρμηγκιών (Ant Colony System)

Ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε είναι το Σύστημα Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony System), ο οποίος αποτελεί μια βελτίωση του Συστήματος Μυρμηγκιών (Ant System). Υπάρχουν τρία κύρια σημεία που αυτός ο αλγόριθμος διαφέρει από το Σύστημα Μυρμηγκιών.

1. Ο πρώτος είναι ότι το μυρμήγκι έχει τώρα μια πιθανότητα q_0 έτσι ώστε να επιλέγει την πόλη της οποίας το $\tau \cdot \eta$ (σχέση (6-22): τυχαίος αναλογικός κανόνας) είναι μέγιστο. Δηλαδή, η άκρη (edge) με το καλύτερο δυνατό επίπεδο φερομόνης και ορατότητας. Με πιθανότητα $(1-q_0)$, το μυρμήγκι θα βασίσει την επιλογή του στον αρχικό τυχαίο κανόνα αναλογίας που χρησιμοποιείται στο AS.

$$s = \begin{cases} \arg \max_{u \in J_k(\tau)} \{ [\tau(r, u)] \cdot [\eta(r, u)]^\beta \} & \text{εάν } q \leq q_0 \\ S & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad 7-1$$

Αυτός είναι ο Κανόνας Μετάβασης Κατάστασης (State Transition Rule) που υιοθετείται από το ACS. Εάν η τυχαία μεταβλητή q_0 είναι μικρότερη ή ίση προς ένα κατώτατο όριο, επιλέξτε τον σύνδεσμο (edge) που έχει τη μέγιστη τιμή της έντασης ιχνών πολλαπλασιαζόμενη με το αντίστροφο του όρου $1/\text{απόσταση}$. Αλλιώς, επιλέξτε την πόλη σύμφωνα με τον Τυχαίο Αναλογικό Κανόνα S (Random Proportional Rule).

2. Ο συνολικός κανόνας ενημέρωσης είναι διαφορετικός έτσι ώστε μόνο το καλύτερο μυρμήγκι με τον πιο σύντομο γύρο επιτρέπεται να αλλάξει την ένταση της φερομόνης στους συνδέσμους (edges) που περπάτησε. Αυτό επιτρέπει στον αλγόριθμο και να τρέξει γρηγορότερα αλλά και να καταστήσει την αναζήτηση αμεσότερη. Μόνο οι σύνδεσμοι που ανήκουν στο συνολικά καλύτερο γύρο θα ενισχυθούν.

$$\tau(r, s) \leftarrow (1 - a) * \tau(r, s) + a * \Delta \tau(r, s) \quad 7-2$$

$$\text{όπου } \Delta \tau(r, s) = \begin{cases} (L_{gb})^{-1} & \text{εάν } (r, s) \in \text{στο συνολικά καλύτερο γύρο} \\ 0 & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad 7-3$$

Τύπος του συνολικού κανόνα ενημέρωσης: Μόνο οι σύνδεσμοι που ανήκουν στον καλύτερο γύρο ενημερώνουν το επίπεδο φερομόνης. Το L αναπαριστά το μήκος γύρου.

3. Ένας τοπικός κανόνας ενημέρωσης εφαρμόζεται καθώς κάθε μυρμήγκι κινείται σε έναν σύνδεσμο. Καθώς δημιουργείται μια λύση για το πρόβλημά μας, τα μυρμήγκια επισκέπτονται τους συνδέσμους και αλλάζουν την ένταση φερομόνης με βάση αυτόν τον κανόνα.

$$\tau(r,s) \leftarrow (1-\rho) * \tau(r,s) + \rho * \Delta\tau(r,s) \quad 7-4$$

Τοπικός τύπος ενημέρωσης: Το 1-ρ αναπαριστάνει την εξάτμιση της φερομόνης. Το Δτ μπορεί να είναι ένας μικρός σταθερός αριθμός.

7.4.2. Δομές δεδομένων και αντικείμενα

Καταρχήν θα πρέπει να αναφερθεί ότι το πρόγραμμα είναι γραμμένο σε γλώσσα προγραμματισμού Java. Προτού να μπορέσει να λειτουργήσει ο αλγόριθμος, χρειάζονται δομές δεδομένων και αντικείμενα (Data Structures and Objects) για την αναπαράσταση των δεδομένων του συγκεκριμένου προβλήματος που αναλύεται στην διατριβή και το οποίο έχει αναχθεί σε ένα Ασύμμετρο Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή (ΑΠΠΠ), όπως έχει ήδη αναλυθεί σε παραπάνω ενότητα. Οι δύο κλάσεις «City» και «Edge» που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή του αντικειμένου ΑΠΠΠ περιγράφονται ως εξής:

1. Ένα αντικείμενο «Edge» περιέχει μεταβλητές όπως η απόσταση μεταξύ των σημείων στα οποία υπάρχουν κάδοι, η ένταση ίχνους (επίπεδο φερομόνης) στον σύνδεσμο, και η Διαφορά Ίχνους (Delta Trail) που αναπαριστά την αλλαγή στην ένταση ιχνών. Κατά τη διάρκεια της έναρξης, ένας δυσδιάστατος πίνακας Edge (i, j) της κλάσης «Edge» δημιουργείται για να αναπαραστήσει τα στοιχεία που συνδέονται με κάθε σύνδεσμο του «χάρτη» ΑΠΠΠ (είναι ο χάρτης της υπό μελέτη περιοχής με τα σημεία φόρτωσης για το απορριμματοφόρο), όπου i και j είναι τα σημεία φόρτωσης (loading spots) που συνδέονται με το σύνδεσμο.
2. Ένα αντικείμενο «City» καθορίζει απλά τη θέση ενός κόμβου. Η μεταβλητή «node» χρησιμοποιείται για να προσδιορίσει ένα δεδομένο σημείο στο οποίο υπάρχουν κάδοι. Ένα διάνυσμα των σημείων φόρτωσης δημιουργείται για να απαριθμήσει όλους τους διαθέσιμους κόμβους που υπάρχουν στα δεδομένα μας.

- Πράκτορες – μυρμήγκια (Ant Agents)

Δημιουργήσαμε μία κλάση που λέγεται Ant, που περιέχει τα δεδομένα που συνδέονται με έναν πράκτορα. Επίσης, περιέχονται και οι ενέργειες/μέθοδοι που μπορούν να εκτελέσουν οι πράκτορες. Ο βασικός τύπος δεδομένων είναι η λίστα `tabu` που περιέχει τις πόλεις που επισκέπτονται από τον πράκτορα - μυρμήγκι. Η σημαντική μέθοδος είναι η «`nextMove`» μέθοδος που καθορίζει τη διαδικασία για το πώς ο πράκτορας επιλέγει το επόμενο σημείο φόρτωσης – κόμβο που θα επισκεφτεί.

Όταν τα μυρμήγκια πρέπει να επιλέξουν την επόμενη πόλη για να κινηθούν, πρέπει να αποφασίσουν με βάση τον τυχαίο ανάλογο κανόνα. Στο Σύστημα Αποικίας Μυρμηγκιών χρησιμοποιείται πιθανολογικά ο Τυχαίος Κανόνας Αναλογίας (Random Proportion Rule).

- Τυχαίος Ανάλογος Κανόνας (Random Proportional Rule)

Όταν ένα μυρμήγκι λαμβάνει μια απόφαση σχετικά με την επόμενη κίνησή του, πρέπει να υπολογιστεί μια τιμή πιθανότητας μεταξύ του 0 και του 1 για κάθε επιλογή (ο κόμβος στον οποίο μπορεί να κινηθεί). Αυτό γίνεται δυναμικά αφού κάθε μυρμήγκι αντιμετωπίζει αυτήν την κατάσταση. Όπως αναφέρεται, η πιθανότητα είναι μια συνάρτηση της έντασης ίχνους και της ορατότητας της άκρης, ευνοεί τις άκρες με υψηλή ένταση ίχνους και πιο σύντομες αποστάσεις. Η υλοποίηση αυτού του κανόνα βασίστηκε στην έννοια του τροχού ρουλέτας. Όταν το μυρμήγκι συναντάει ποικίλους συνδέσμους (edges), για να επιλέξει, δημιουργεί έναν τροχό ρουλέτας έτσι ώστε όλοι οι επιτρεπόμενοι κόμβοι μοιράζονται τον τροχό με διαφορετικές αναλογίες σύμφωνα με την τιμή της πιθανότητάς τους. Όσο υψηλότερη είναι η πιθανότητα ενός συνδέσμου τόσο μεγαλύτερη αναλογία αντιστοιχεί στον τροχό. Σε αυτό το σημείο, ο τροχός περιστρέφεται για να καθοριστεί ο σύνδεσμος που θα επιλέξει το μυρμήγκι ως επόμενο κόμβο για τη διαδρομή του.

8

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στην ενότητα αυτή παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την εφαρμογή των τεσσάρων αλγορίθμων, οι οποίοι έχουν αναλυθεί και υλοποιηθεί παραπάνω, για το πρόβλημα βελτιστοποίησης της μεταφοράς των δημοτικών στερεών αποβλήτων. Πριν από την παρουσίαση αυτών των αποτελεσμάτων προηγείται η αξιολόγηση της αποδοτικότητας των αλγορίθμων. Για την αξιολόγηση των αλγορίθμων χρησιμοποιήσαμε γνωστά περιστατικά του Ασύμμετρου Προβλήματος Πλανόδιου Πωλητή, τα οποία προέρχονται από την βιβλιοθήκη *TSPLIB* (TSPLIB 1997). Το *TSPLIB* είναι μια βιβλιοθήκη από περιστατικά δειγμάτων για το Πρόβλημα του Πλανόδιου Πωλητή από διάφορες πηγές διάφορων τύπων καθώς και τα σχετιζόμενα με αυτό προβλήματα, όπως το Ασύμμετρο Πρόβλημα Πλανόδιου Πωλητή (ΑΠΠΠ), το Διαδοχικό Πρόβλημα Διάταξης (Sequential Ordering Problem), το Εξουσιοδοτημένο Πρόβλημα Δρομολόγησης Οχημάτων (Capacitated Vehicle Routing Problem), κ.ά., καθώς και οι βέλτιστες λύσεις τους. Τα διάφορα περιστατικά της βιβλιοθήκης *TSPLIB* χρησιμοποιούνται ως δεδομένα (test data) για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας των αλγορίθμων. Έτσι, αρχικά εφαρμόσαμε τους αλγορίθμους στο ΑΠΠΠ πρόβλημα «ft70.atsp.gz», το οποίο βρίσκεται στην *TSPLIB*. Επιλέχθηκε αυτό το πρόβλημα επειδή έχει 70 κόμβους και τα κόστη των συνδέσμων του είναι ακέραιοι, δηλαδή, παρουσιάζει ομοιότητες με το πρόβλημα, που μελετήθηκε στην παρούσα εργασία και το οποίο αποτελείται από 72 σημεία φόρτωσης (κόμβοι) μαζί με τα αντίστοιχα κόστη μεταξύ των κόμβων τα οποία είναι και αυτά ακέραιες τιμές. Η είσοδος στα προγράμματα, που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά, είναι ένας πίνακας 70x70 που περιέχει τα κόστη όλων των συνδέσμων μεταξύ των κόμβων. Το κόστος της βέλτιστης διαδρομής για αυτό το πρόβλημα «ft70.atsp.gz» έχει βρεθεί ίσο με ft70:38673. Με βάση αυτή την τιμή θα υπολογιστούν και τα πιθανά σφάλματα των αλγορίθμων, τα οποία υλοποιήθηκαν στην εργασία αυτή.

Θα πρέπει, βέβαια, να σημειωθεί ότι στην ιστοσελίδα της TSPLIB (TSPLIB 1997) δε διευκρινίζεται εάν στον υπολογισμό των βέλτιστων τιμών των διαφόρων περιστατικών λαμβάνεται υπόψη το κόστος της διαδρομής μεταξύ της τελευταίας πόλης που επισκέπτεται ο πωλητής και της αρχικής, δηλαδή, εάν υπολογίζεται ο κλειστός γύρος (closed tour) του πωλητή. Αν και οι ορισμοί των ΠΠΠ και ΑΠΠΠ προβλημάτων αναφέρουν ότι αναζητείται το βέλτιστο κόστος του κλειστού γύρου, στα προγράμματά μας έχουμε υπολογίσει τη διαδρομή που εκτελεί το απορριματοφόρο από ένα αρχικό σημείο φόρτωσης (loading spot) σε ένα τελικό αφού περάσει από όλα τα σημεία τουλάχιστον μία φορά (δηλαδή το απορριματοφόρο δεν επιστρέφει στο σημείο εκκίνησης). Στο τέλος του κεφαλαίου συγκρίνονται οι αλγόριθμοι μεταξύ τους ανάλογα με τα αποτελέσματα που παράγουν και τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται για την εκτέλεσή τους.

8.1. Αλγόριθμος αναζήτησης ταμπού

8.1.1. Αξιολόγηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου

Για την αξιολόγηση του αλγορίθμου AT, εφαρμόσαμε τον AT στο περιστατικό ΑΠΠΠ «ft70.atsp.gz», ο οποίος περιέχεται στην TSPLIB, όπως έχει αναφερθεί και στην εισαγωγή. Ο αριθμός επαναλήψεων που επιλέχτηκε για την εκτέλεση του αλγορίθμου ανέρχεται στις 100 επαναλήψεις.

Ο αλγόριθμος AT έδωσε ως αποτέλεσμα την τιμή 42.443, και όπως μπορεί να παρατηρήσει κανείς υπάρχει μια σημαντική απόκλιση από το αναμενόμενο βέλτιστο κόστος (38673). Άρα ο αλγόριθμος AT παρουσιάζει ένα σφάλμα της τάξης του 9,75%. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι με την αύξηση του αριθμού επαναλήψεων εκτέλεσης του αλγορίθμου το αποτέλεσμα δε βελτιώνεται περαιτέρω, δηλαδή και με 1.000 επαναλήψεις το αποτέλεσμα παραμένει το ίδιο (42.443).

8.1.2. Εκτέλεση του αλγορίθμου AT στο πρόβλημά μας

Ο αλγόριθμος, μετά την αξιολόγηση της αποδοτικότητάς του, εφαρμόστηκε στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της αποκομιδής απορριμμάτων το οποίο έχει αναλυθεί λεπτομερώς στην ενότητα 6.3. Εκτελέσαμε τον αλγόριθμο AT αρκετές φορές έχοντας θέσει τον αριθμό επαναλήψεων ίσο με 100 και μεταβάλλοντας την

τιμή της διάρκειας (tenure) της λίστας ταμπού. Τα αποτελέσματα που λάβαμε παρουσιάζονται στον **Πίνακας 8-1**.

Διάρκεια της λίστας ταμπού	Μήκος Διαδρομής
5	5.007.653
7	7.007.521
10	7.007.521
15	7.007.521
20	4.007.919
25	6.007.878
30	7.007.521

Πίνακας 8-1: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΑΤ στο πρόβλημά μας για διάφορες τιμές της διάρκειας της λίστας ταμπού.

Από τα παραπάνω αποτελέσματα παρατηρούμε ότι το μικρότερο κόστος που παράγει ο ΑΤ είναι 4.007.919 και η ακολουθία των σημείων των κάδων που πρέπει να ακολουθήσει το απορριμματοφόρο (tour) παρουσιάζεται παρακάτω: [70, 0, 71, 57, 52, 51, 48, 55, 44, 42, 40, 37, 38, 43, 39, 61, 60, 53, 58, 62, 65, 46, 45, 59, 24, 26, 22, 13, 18, 31, 33, 34, 35, 67, 66, 1, 3, 4, 2, 21, 5, 19, 7, 8, 6, 9, 10, 11, 12, 29, 27, 23, 32, 14, 20, 30, 16, 17, 15, 41, 69, 68, 25, 28, 50, 36, 49, 56, 54, 47, 64, 63].

8.1.3. Παρατηρήσεις

Παρατηρούμε ότι όλα τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από τον ΑΤ έχουν τιμές πάνω από 1.000.000. Αυτό σημαίνει ότι κάποιοι από τους περιορισμούς που έχουν τεθεί στο πρόβλημα (βλέπε ενότητα 6.3) παραβιάζονται και επομένως, οι λύσεις που παράγει ο αλγόριθμος ΑΤ δεν μπορούν να θεωρηθούν αποδεκτές. Θα πρέπει να σημειωθεί ωστόσο ότι το γεγονός ότι ο αλγόριθμος ΑΤ, ο οποίος υλοποιήθηκε στην εργασία αυτή, δεν παράγει αποδεκτά αποτελέσματα, δε σημαίνει ότι και ο ΑΤ δεν είναι ικανός για την επίλυση Ασύμμετρων Προβλημάτων Πλανόδιου Πωλητή. Εξάλλου, λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αλγόριθμος ΑΤ, που υλοποιήθηκε παρουσιάζει ένα σφάλμα της τάξης του 10% μπορούμε να εξηγήσουμε την μη ικανοποιητική ποιότητα των αποτελεσμάτων που παράγει. Εάν μελλοντικά χρησιμοποιηθούν οι αλγόριθμοι Αντιδραστική Αναζήτηση Ταμπού (Reactive Tabu Search) ή Επαναληπτική Αναζήτηση Ταμπού

(Iterated Tabu Search), οι οποίοι αναλύονται στην ενότητα 6.3.8, είναι πιθανό ότι θα λάβουμε πολύ καλύτερα αποτελέσματα.

8.2. Γενετικός αλγόριθμος

8.2.1. Αξιολόγηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου

Για την αξιολόγηση της αποδοτικότητας αυτού του αλγορίθμου ακολουθήθηκε η διαδικασία που έχει περιγραφεί παραπάνω. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι παράμετροι του προγράμματος πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα, για να παραχθούν τα καλύτερα αποτελέσματα. Αρχικά, εφαρμόσαμε τον ΓΑ στο ΑΠΠΠ «ft70.atasp.gz» έχοντας θέσει στις παραμέτρους του αλγορίθμου τις εξής τιμές:

- Επαναλήψεις → **100.000**,
- Μέγεθος της δεξαμενής των γονιδίων (Pool Size) → **2x70**,
- Μέθοδος Μετάλλαξης (Mutation Policy) → **Ανταλλαγή (Swap) 2 κόμβων**,
- Πιθανότητα Μετάλλαξης (Mutation Probability) → **0,10**,
- Κατώτατο όριο ποικιλομορφίας (Diversity Threshold) → **0,01**,
- Παιδιά ανά γενιά (Children per Generation) → **3**.

Ο λόγος για τον οποίο επιλέχτηκαν οι συγκεκριμένες τιμές για τις παραμέτρους του ΓΑ είναι το γεγονός ότι αποτελούν συνήθη επιλογή από πολλούς χρήστες, όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά στη βιβλιογραφία. Εκτελώντας τον αλγόριθμο με τις παραπάνω τιμές παραμέτρων, το κόστος που προέκυψε είναι 42.637. Έτσι, για τις συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων το σφάλμα του αλγορίθμου βρέθηκε ίσο με 10,25%. Έπειτα, αλλάζοντας τη μέθοδο μετάλλαξης: «Αντιστροφή Υπό-Γύρου» (Reverse Sub-Tour) και παράλληλα, κρατώντας σταθερές τις υπόλοιπες ρυθμίσεις των παραμέτρων συνεχίστηκε η εκτέλεση του αλγορίθμου από το προηγούμενο σημείο για άλλες 100.000 επαναλήψεις και το νέο αποτέλεσμα του ΓΑ που προκύπτει είναι 41.806. Παρατηρείται ότι με την συγκεκριμένη εκτέλεση του ΓΑ το κόστος βελτιώθηκε σημαντικά και επομένως, το σφάλμα του αλγορίθμου σε αυτή την περίπτωση ανέρχεται σε 8,1%. Συνεχίζοντας την εκτέλεση του αλγορίθμου μεταβάλλοντας την μέθοδο μετάλλαξης σε ανταλλαγή 2 κόμβων για άλλες 100.000 επαναλήψεις το κόστος βελτιώνεται ακόμα περισσότερο (41.614) και το σφάλμα γίνεται 7,60%.

Διατηρώντας σταθερή την μέθοδο μετάλλαξης (ανταλλαγή 2 κόμβων) και εκτελώντας τον ΓΑ για άλλες 200.000 επαναλήψεις παρατηρείται μια μικρή ελάττωση του κόστους (41.329) και επομένως, και του σφάλματος (6,87%) του ΓΑ.

Αν εκτελεστεί ο ΓΑ θέτοντας το μέγεθος της δεξαμενής των γονιδίων (Pool Size) ίσο με 100 και διατηρώντας, παράλληλα, τις υπόλοιπες παραμέτρους ίδιες με αυτές που αναφέρονται στην αρχή της προηγούμενης παραγράφου προκύπτει κόστος ίσο με 41.279 σε μόνο 100.000 επαναλήψεις και το σφάλμα του ΓΑ για την συγκεκριμένη εκτέλεση ελαττώνεται στο 6,74%.

Από την παραπάνω περιγραφή των αποτελεσμάτων του ΓΑ που ληφθήκαν κατά την εφαρμογή του στο «ft70.atasp.gz» ΑΠΠΠ, εύκολα μπορεί να διαπιστωθεί ότι η αποδοτικότητα ενός γενετικού αλγορίθμου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την επιλογή των τιμών των παραμέτρων του καθώς και από τον τρόπο εκτέλεσης του. Για να βρεθούν οι βέλτιστοι συνδυασμοί των τιμών των παραμέτρων, οι οποίοι θα παράγουν τις καλύτερες λύσεις για ένα δεδομένο πρόβλημα απαιτείται πολύς πειραματισμός (Trial and Error).

8.2.2. Εκτέλεση του ΓΑ στο πρόβλημά μας

Προκειμένου να εκτελεσθεί ο αλγόριθμος ΓΑ, ο χρήστης πρέπει να ρυθμίσει τις τιμές των ακόλουθων έξι παραμέτρων: 1) Επαναλήψεις, 2) Μέγεθος της δεξαμενής των γονιδίων (Pool Size), 3) Μέθοδος Μετάλλαξης (Mutation Policy), 4) Πιθανότητα Μετάλλαξης (Mutation Probability), 5) Παιδιά ανά γενιά (Children per Generation), και 6) Κατώτατο όριο ποικιλομορφίας (Diversity Threshold). Οι τιμές των παραμέτρων μπορούν να επιλεχθούν από το ακόλουθο σύνολο τιμών:

- *Επαναλήψεις* $\in \{100.000, 1.000.000\}$,
- *Μέγεθος της δεξαμενής των γονιδίων* $\in \{20, 50, 72, 100, 144, 300\}$,
- *Μέθοδος Μετάλλαξης* $\in \{\text{Ανταλλαγή δύο κόμβων, Αντιστροφή Υπό-Γύρου}\}$,
- *Πιθανότητα Μετάλλαξης* $\in \{0, 0,05, 0,1, 0,2, 0,4, 0,8\}$,
- *Παιδιά ανά γενιά* $\in \{1, 2, 3, 4, 5\}$, και
- *Κατώτατο όριο ποικιλομορφίας* $\in \{0, 0,01, 0,05, 0,1, 0,5\}$.

Επομένως, μετά την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου, εφαρμόζεται ο ΓΑ στο πρόβλημά που εξετάζεται στην συγκεκριμένη εργασία και παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάποιους συνδυασμούς τιμών των ανωτέρω

παραμέτρων. Αρχικά, εκτελείται ο ΓΑ διατηρώντας σταθερές τις εξής τιμές των παραμέτρων:

- Επαναλήψεις → **100.000**,
- Μέγεθος της δεξαμενής των γονιδίων (Pool Size) → **2x72**,
- Μέθοδος Μετάλλαξης (Mutation Policy) → **Ανταλλαγή (Swap) 2 κόμβων**,
- Πιθανότητα Μετάλλαξης (Mutation Probability) → **0,10**,
- Παιδιά ανά γενιά (Children per Generation) → **3**.

και μεταβάλλοντας μόνο την τιμή της παραμέτρου «Κατώτατο όριο ποικιλομορφίας (Diversity Threshold)». Ακολουθεί ο **Πίνακας 8-2** με τα αποτελέσματα.

Κατώτατο όριο ποικιλομορφίας	Μήκος Διαδρομής
0	4.009.027
0,01	6.008.659
0,05	4.009.488
0,1	3.008.932
0,5	6.008.008

Πίνακας 8-2: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΓΑ για διάφορες τιμές του κατώτατου ορίου ποικιλομορφίας.

Στη συνέχεια, εκτελέστηκε ο ΓΑ για διάφορες τιμές της παραμέτρου «Παιδιά ανά γενιά (Children per Generation)», ενώ διατηρήθηκαν σταθερές οι υπόλοιπες παράμετροι όπως έχουν αναγραφεί παραπάνω. Στην παράμετρο «Κατώτατο όριο ποικιλομορφίας» δόθηκε η τιμή **0,01**. Τα αποτελέσματα για αυτές τις εκτελέσεις του ΓΑ παρουσιάζονται παρακάτω:

Παιδιά ανά Γενιά	Μήκος Διαδρομής
1	6.009.557
2	5.009.996
3	6.008.659
4	2.010.584
5	1.009.226

Πίνακας 8-3: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΓΑ για διάφορες τιμές της παραμέτρου «Παιδιά ανά Γενιά»

Μεταβάλλοντας την «Πιθανότητα Μετάλλαξης (*Mutation Probability*)» και διατηρώντας σταθερές όλες τις υπόλοιπες παραμέτρους του ΓΑ προκύπτουν τα ακόλουθα αποτελέσματα.

Πιθανότητα Μετάλλαξης	Μήκος Διαδρομής
0	3.009.447
0,05	2.008.650
0,1	6.008.659
0,2	2.011.159
0,4	5.008.300
0,8	4.009.425

Πίνακας 8-4: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΓΑ για διάφορες τιμές της παραμέτρου «Πιθανότητας Μετάλλαξης».

Τέλος, μεταβλήθηκε και το «Μέγεθος της δεξαμενής των γονιδίων (*Pool Size*)» και διατηρήθηκαν σταθερές οι άλλες παράμετροι. Τα αποτελέσματα αυτών των εκτελέσεων φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Μέγεθος Δεξαμενής των Γονιδίων	Μήκος Διαδρομής
20	4.008.347
50	2.010.096
72	8.902
100	8.007.082
144	6.008.659
300	4.009.961

Πίνακας 8-5: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΓΑ για διάφορες τιμές της παραμέτρου «Μέγεθος Δεξαμενής των Γονιδίων (*Gene Pool*)»

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα που περιέχονται στους παραπάνω πίνακες διαπιστώνεται ότι όλες οι τιμές του μήκους διαδρομής εκτός από μία είναι πάνω από 1.000.000. Αυτό σημαίνει ότι παραβιάζονται κάποιοι περιορισμοί του προβλήματος και επομένως, οι παραγόμενες λύσεις δεν μπορούν να γίνουν αποδεκτές. Πιο συγκεκριμένα, όσο μεγαλώνει ο αριθμός των μονάδων των εκατομμυρίων, τόσο πιο πολλοί περιορισμοί έχουν παραβιαστεί κατά την εύρεση της βέλτιστης λύσης από τον αλγόριθμο. Επομένως, απαιτούνται πολλές δοκιμές (*Trial and Error*) για την εύρεση αποδεκτών λύσεων για το πρόβλημά μας.

Τελικά, μετά από πάρα πολλές δοκιμές επιτυγχάνεται βέλτιστο κόστος ίσο με 8.902 για το εξής σύνολο παραμέτρων:

- Επαναλήψεις → **100.000**,
- Μέγεθος Δεξαμενής των Γονιδίων (Pool Size) → **72**,
- Μέθοδος Μετάλλαξης (Mutation Policy) → **Ανταλλαγή (Swap) 2 κόμβων**,
- Πιθανότητα Μετάλλαξης (Mutation Probability) → **0,1**,
- Κατώτατο όριο ποικιλομορφίας (Diversity Threshold) → **0,01**,
- Παιδιά ανά Γενιά (Children per Generation) → **3**.

Η ακολουθία των σημείων των κάδων για αυτό το μήκος διαδρομής (8.902) είναι: [0, 11, 12, 9, 2, 4, 3, 1, 71, 64, 63, 59, 24, 28, 50, 36, 25, 33, 34, 27, 23, 42, 40, 37, 47, 65, 46, 45, 61, 60, 62, 58, 53, 56, 52, 54, 55, 44, 35, 67, 66, 38, 43, 39, 49, 26, 22, 13, 69, 68, 41, 18, 31, 32, 17, 14, 8, 19, 6, 5, 21, 30, 29, 16, 15, 20, 7, 10, 48, 51, 57, 70].

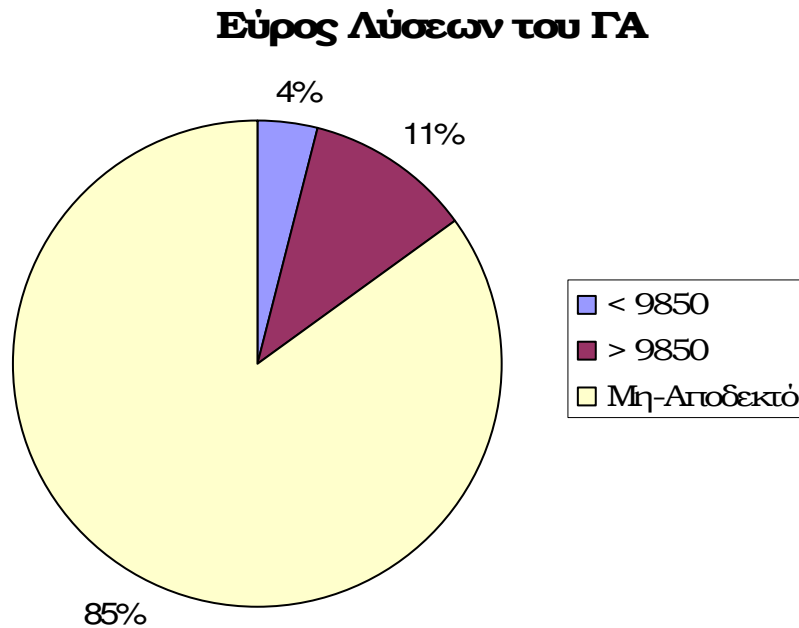
Βέβαια, προκειμένου να καλυφθούν όλες οι πιθανές λύσεις που τα προαναφερθείσα σύνολα παραμέτρων μπορούν να παράγουν, υπάρχουν 3.600 διαφορετικοί συνδυασμοί, οι οποίοι καθιστούν την πειραματική διαδικασία ακόμα δυσκολότερη. Τα σύνολα τιμών για τις παραμέτρους του ΓΑ που παρουσιάζονται ανωτέρω είναι κοινά στη βιβλιογραφία και για αυτό έχουν επιλεγεί. Η καλή ρύθμιση των παραμέτρων σημαίνει την παραγωγή μιας πιθανώς καλύτερης λύσης ΓΑ. Μέσω της διαδικασίας της «Δοκιμής και Λάθους», τελικά ο ΓΑ εκτελέστηκε περισσότερο από 12.000 φορές προκειμένου να βρεθεί ο καλύτερος συνδυασμός τιμών των παραμέτρων.

Ο **Πίνακας 8-6** παρουσιάζει το συνολικό αριθμό της εκτέλεσης αλγορίθμου ΓΑ και τις αποδεκτές λύσεις (λύσεις που η τιμή τους είναι λιγότερο από 1.000.000) καθώς επίσης, και τον αριθμό των λύσεων που είναι καλύτερες από την εμπειρική.

Αριθμός Εκτελέσεων	Μη Αποδεκτές	Αποδεκτές		
		Καλύτερες	Χειρότερες	Συνολικές
12.000	10.200	450	1.350	1.800

Πίνακας 8-6: Ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων του ΓΑ.

Επιπροσθέτως, το **Σχήμα 8-1** εμφανίζει την κατανομή των λύσεων (αποδεκτών και μη αποδεκτών) που παράγονται από την εκτέλεση του ΓΑ.



Σχήμα 8-1: Κατανομή του εύρους των λύσεων που παράγει ο ΓΑ.

Επιπλέον, στο **Σχήμα 8-2** παρουσιάζεται η γραφική αναπαράσταση της βέλτιστης εκτέλεσης του ΓΑ (8.902) και η περιοχή στην οποία συγκλίνει. Ωστόσο, θα πρέπει να αναφερθεί ότι η σύγκλιση του αλγορίθμου που απεικονίζεται στο **Σχήμα 8-2** αποτελεί και μία μέση τιμή σύγκλισης των ΓΑ που εκτελέστηκαν για το συγκεκριμένο πρόβλημα, διότι όλες οι εκτελέσεις των ΓΑ, ακόμα και με διαφορετικές τιμές στο σύνολο των προαναφερθέντων παραμέτρων, είχαν παρόμοια συμπεριφορά ως προς την σύγκλιση προς την βέλτιστη λύση.

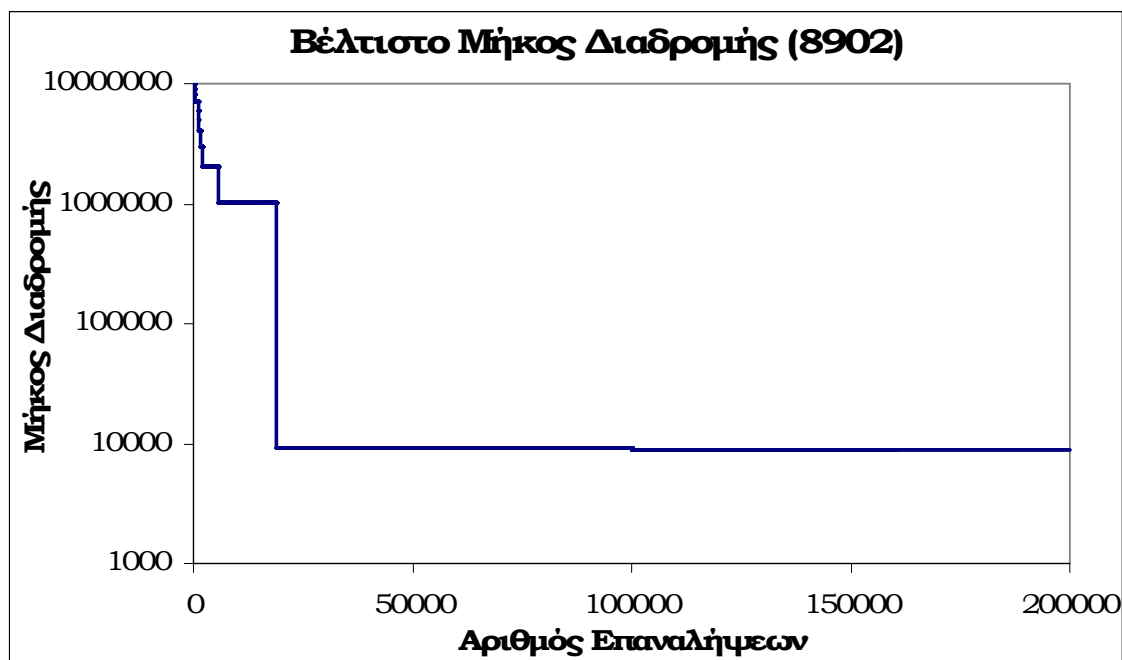
Στη γραφική παράσταση φαίνεται το μήκος της διαδρομής του απορριμματοφόρου σε συνάρτηση με τον αριθμό των επαναλήψεων, που είναι για την παρούσα εκτέλεση ίση με 200.000 επαναλήψεις. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι το μήκος της διαδρομής μειώνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό κατά τη διάρκεια των πρώτων επαναλήψεων και στις υπόλοιπες επαναλήψεις απλά διαμορφώνεται μία μικρή βελτίωση.

Βέβαια, στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι σε αντίθεση με τις υπόλοιπες εκτελέσεις του Γενετικού Αλγορίθμου, που έλαβαν μέρος στα πειράματα, έγιναν και εκτελέσεις του αλγόριθμου με 20 φορές περισσότερες επαναλήψεις (2.000.000), για να έχουμε ακόμα καλύτερη εικόνα της εκτέλεσης

του αλγορίθμου και να παρατηρήσουμε εάν θα υπάρξει κάποια διαφοροποίηση ως προς την βέλτιστη λύση.

Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος παρατηρήθηκε να συγκλίνει στις πρώτες 21.000 επαναλήψεις και μόνο μια μικρή βελτίωση να επιτυγχάνεται στις ακόλουθες επαναλήψεις. Είναι γεγονός ότι ένας σημαντικός αριθμός επαναλήψεων απαιτείται για τον ΓΑ ώστε να παράγει ικανοποιητικές λύσεις. Ωστόσο, στη συνέχεια, ο χρόνος υπολογισμού που απαιτείται είναι αρκετά μεγάλος και αυτό γίνεται καταστρεπτικό για τις πειραματικές δοκιμές. Επομένως, θα μπορούσε να παρατηρήσει κανείς ότι ο αλγόριθμος κατά μέσο όρο συγκλίνει σε μία πολύ καλή λύση σε περίπου 15.000 επαναλήψεις ανεξαρτήτως αριθμού επαναλήψεων.

Έτσι, ακόμα και για τα πειράματα που εκτελέστηκαν με 2.000.000 επαναλήψεις, ο αλγόριθμος δίνει πολύ καλά αποτελέσματα από το πρώτο 10% των εκτελέσεων, και γι αυτό όπως έχει αναφερθεί και παραπάνω οι εκτελέσεις του αλγορίθμου πραγματοποιήθηκαν τελικά στις 100.000 επαναλήψεις.



Σχήμα 8-2: Γραφική αναπαράσταση του βέλτιστου μήκους της διαδρομής (8.902) συναρτήσει του αριθμού επαναλήψεων του ΓΑ.

Τέλος, ο **Πίνακας 8-7** παρουσιάζει την καλύτερη λύση που παράγει ο Γενετικός Αλγόριθμος και η οποία έχει μια σημαντική βελτίωση σε σύγκριση με την αντίστοιχη της εμπειρικής μεθόδου (9.850m).

Εμπειρικό Μοντέλο (m)	ΓΑ Βέλτιστη Διαδρομή (m)	Βελτίωση (%)
9.850	8.902	9,62%

Πίνακας 8-7: Σύγκριση της καλύτερης λύσης του ΓΑ και της εμπειρικής λύσης.

8.3. Ο αλγόριθμος προσομοιωμένης ανόπτωσης

8.3.1. Αξιολόγηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου

Με τον ίδιο τρόπο που εφαρμόστηκε στους προηγούμενους αλγορίθμους αξιολογείται η επίδοση και του αλγορίθμου ΠΑ. Εκτελέστηκε το πρόγραμμα για αρκετούς συνδυασμούς παραμέτρων και τα αποτελέσματα που προέκυψαν παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα. Οι παράμετροι του αλγορίθμου ΠΑ είναι:

- Παράγοντας μείωσης της θερμοκρασίας ανόπτωσης (Factor),
- Αριθμός βημάτων θερμοκρασίας που θα εκτελεστούν (Ntemps),
- Αριθμός δοκιμών σε κάθε θερμοκρασία (Nlimit),
- Αριθμός καλών ανταλλαγών (Swaps) σε κάθε θερμοκρασία (Glimit).

Factor	Ntemps	Nlimit	Glimit	Μήκος Διαδρο μής	Σφάλμα αλγορίθμου
0,9	200	1.000	200	42.872	10,86%
0,95	200	1.000	200	41.868	8,26%
0,97	200	1.000	200	41.799	8,08%
0,99	200	1.000	200	44.654	15,47%
0,9	2.000	10.000	2.000	40.573	4,91%
0,95	2.000	10.000	2.000	39.063	1%
0,97	2.000	10.000	2.000	38.772	0,26%
0,99	2.000	10.000	2.000	38.423	-
0,99	2.000	10.000	3.000	39.190	1,34%
0,99	2.000	10.000	5.000	40.255	4,09%
0,99	2.000	10.000	500	39.467	2,05%
0,99	20.000	100.000	2.000	38.000	-
0,99	200.000	1.000.000	2.000	37.827	-

Πίνακας 8-8: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου ΠΑ στο «ft70.atstp.gz» για διάφορες τιμές των παραμέτρων του.

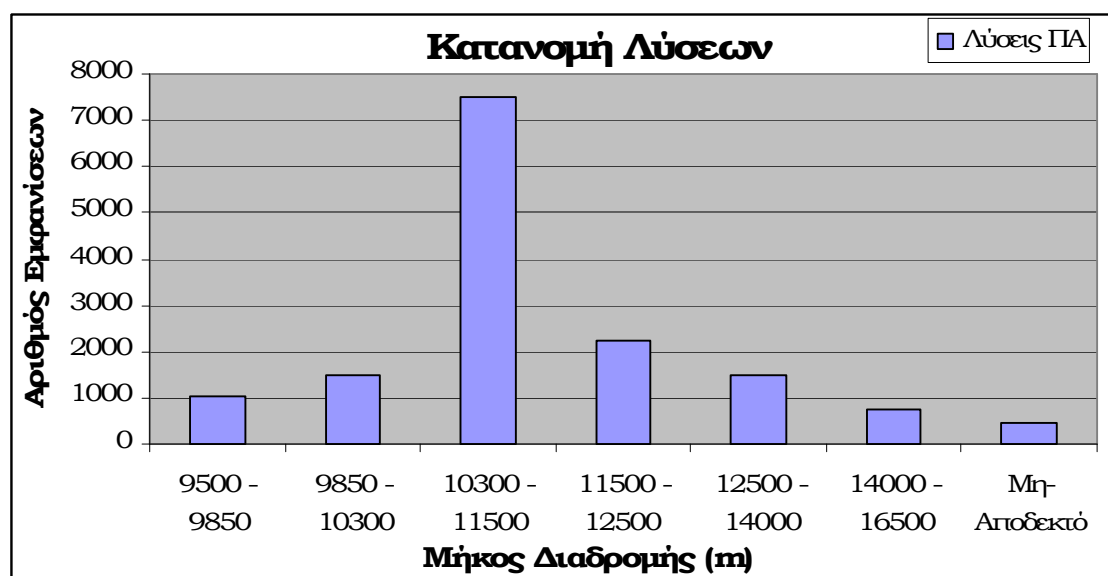
8.3.2. Εκτέλεση του αλγορίθμου ΠΑ στο πρόβλημά μας

Ο αλγόριθμος ΠΑ έχει εκτελεσθεί πολλές φορές (≈ 15.000) και με διαφορετικά σεί παραμέτρων προκειμένου να βρεθεί ποιος συνδυασμός παράγει τα καλύτερα αποτελέσματα. Παρατηρήθηκαν σημαντικές διαφορές απόδοσης με την αλλαγή στις τιμές των παραμέτρων. Ο **Πίνακας 8-9** παρουσιάζει την στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων που ελήφθησαν κατά τη διαδικασία των πειραμάτων.

Αριθμός Εκτελέσεων	Μη Αποδεκτές	Αποδεκτές		
		Καλύτερες	Χειρότερες	Συνολικές
15.000	450	1.050	13.500	14.550

Πίνακας 8-9: Ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων του ΠΑ.

Στο παρακάτω **Σχήμα 8-3** εμφανίζεται η κατανομή των λύσεων, που παράγονται από τον αλγόριθμο ΠΑ, όπως παρουσιάζει ο **Πίνακας 8-9**.



Σχήμα 8-3: Κατανομή των λύσεων του αλγορίθμου ΠΑ για διαφορετικά σεί παραμέτρων.

Ο ΠΑ εκτελέστηκε με τα δεδομένα του προβλήματος βελτιστοποίησης της αποκομιδής απορριμμάτων θέτοντας στις παραμέτρους τις εξής τιμές:

Factor	Ntemps	Nlimit	Glimit	Μήκος Διαδρομής
0,99	20.000	100.000	20.000	9.662
0,99	1.000	100.000	2.000	9.889
0,99	1.000	100.00	2.000	10.640
0,99	5.000	30.000	20.000	10.083
0,99	20.000	10.000	20.000	9.812
0,99	2.500	50.000	20.000	10.524
0,99	1.000	20.000	200	9.687
0,99	50.000	100.000	20.000	10.191

Πίνακας 8-10: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του αλγορίθμου ΠΑ στο πρόβλημά μας για διάφορες τιμές των παραμέτρων του.

Για το κόστος διαδρομής 9.889 η ακολουθία σημείων των κάδων (διαδρομή) είναι: [65, 64, 71, 58, 53, 55, 57, 54, 59, 61, 63, 66, 47, 46, 62, 60, 27, 23, 14, 26, 16, 7, 6, 10, 3, 31, 30, 36, 38, 69, 70, 68, 67, 39, 44, 40, 50, 25, 51, 37, 29, 15, 21, 8, 9, 22, 34, 35, 45, 24, 28, 33, 32, 42, 19, 17, 18, 20, 5, 2, 12, 13, 11, 4, 1, 72, 52, 49, 56, 48].

Για το κόστος διαδρομής 9.812 η ακολουθία σημείων των κάδων (διαδρομή) είναι: [0, 48, 51, 57, 52, 56, 54, 55, 44, 23, 27, 16, 29, 35, 32, 31, 15, 5, 9, 64, 63, 70, 71, 1, 11, 12, 21, 2, 3, 4, 30, 33, 34, 42, 40, 62, 58, 59, 39, 43, 26, 22, 24, 67, 66, 38, 37, 47, 65, 46, 45, 53, 60, 61, 49, 50, 36, 25, 69, 68, 41, 20, 19, 6, 10, 28, 13, 18, 17, 14].

Για το κόστος διαδρομής 9.687 η ακολουθία σημείων των κάδων (διαδρομή) είναι: [11, 12, 15, 21, 30, 29, 27, 32, 14, 9, 10, 64, 63, 70, 57, 52, 51, 47, 67, 66, 38, 43, 39, 49, 26, 22, 28, 69, 35, 68, 33, 34, 44, 55, 54, 56, 53, 62, 37, 65, 46, 45, 61, 60, 58, 59, 24, 25, 41, 31, 16, 17, 19, 6, 2, 3, 0, 71, 48, 23, 36, 50, 13, 18, 20, 7, 8, 5, 4, 1].

Για το κόστος διαδρομής 9.662 η ακολουθία σημείων των κάδων (διαδρομή) είναι: [36, 50, 13, 18, 20, 7, 8, 5, 4, 1, 11, 12, 15, 21, 30, 29, 27, 32, 14, 9, 10, 64, 63, 70, 57, 52, 51, 47, 67, 66, 38, 43, 39, 49, 26, 22, 28, 69, 35, 68, 33, 34, 44, 55, 54, 56, 53, 62, 37, 65, 46, 45, 61, 60, 58, 59, 24, 25, 41, 31, 16, 17, 19, 6, 2, 3, 0, 71, 48, 23].

Μέσω της μεθόδου της Δοκιμής και Λάθους (Trial & Error), το καλύτερο αποτέλεσμα (βέλτιστο μήκος διαδρομής) επιτεύχθηκε για το ακόλουθο σύνολο παραμέτρων:

- Παράγοντας μείωσης της θερμοκρασίας ανόπτησης (Factor) → **0,99**
- Αριθμός βημάτων θερμοκρασίας που θα εκτελεστούν (Ntemps) → **20.000**
- Αριθμός δοκιμών σε κάθε θερμοκρασία (Nlimit) → **100.000**,
- Αριθμός καλών ανταλλαγών σε κάθε θερμοκρασία (Glimit) → **20.000**.

Ο αλγόριθμος ΠΑ απέδωσε, για το προαναφερθέν σύνολο παραμέτρων, ένα μήκος διαδρομής 9.662, το οποίο είναι μια ελαφρώς καλύτερη σε σύγκριση με το αντίστοιχο αποτέλεσμα της παρούσας εμπειρικής μεθόδου (9.850). Πρέπει να παρατηρηθεί ότι η τιμή 0,99 για τον «Παράγοντα μείωσης της θερμοκρασίας ανόπτησης (Factor)» παράγει πάντα καλύτερα αποτελέσματα από οποιαδήποτε άλλη τιμή για την παράμετρο αυτή (αντίθετα, στη βιβλιογραφία, αυτή η συγκεκριμένη παράμετρος τις περισσότερες φορές τίθεται συνήθως ίση με 0,9) ανεξάρτητα από τις τοποθετήσεις των τριών (3) άλλων παραμέτρων.

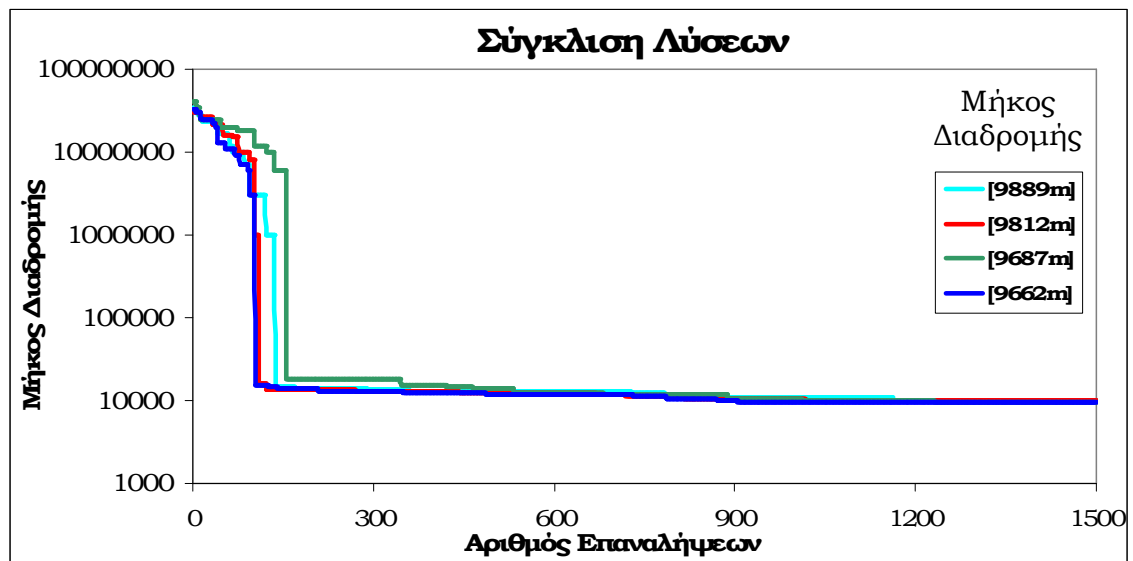
Ο **Πίνακας 8-11** παρουσιάζει τη σύγκριση μεταξύ του εμπειρικού μοντέλου, το οποίο χρησιμοποιείται στην παρούσα φάση από τον δήμο Αθηναίων και του καλύτερου αποτελέσματος που επιτυγχάνεται από τον αλγόριθμο ΠΑ.

Εμπειρικό Μοντέλο (m)	ΠΑ Βέλτιστη Διαδρομή (m)	Βελτίωση (%)
9.850	9.662	1,91%

Πίνακας 8-11: Σύγκριση της καλύτερης λύσης ΠΑ και της εμπειρικής λύσης.

Εκτός από το κόστος της διαδρομής, τα καλύτερα αποτελέσματα από τον **Πίνακας 8-10**, που παρήχθησαν μέσω της πειραματικής διαδικασίας, επιλέχθηκαν και τα διαγράμματα σύγκλισής τους και παρουσιάζονται στο **Σχήμα 8-4** προκειμένου να εξεταστεί, εκτός από τη βέλτιστη λύση που προσφέρουν, και πόσο γρήγορα ο αλγόριθμος βρίσκει την συγκεκριμένη βέλτιστη λύση για τις ανάλογες ρυθμίσεις των παραμέτρων.

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα εμφανίζονται τα τέσσερα (4) καλύτερα αποτελέσματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν και τις καλύτερες διαδρομές που παράγονται από τα παραμετροποιημένα σύνολα των παραμέτρων (Factor, Ntemps, Nlimit, Glimit). Η παράμετρος «Παράγοντας μείωσης της θερμοκρασίας ανόπτησης (Factor)» τέθηκε ίσος με 0,99, προκειμένου να εξεταστεί πότε η μέση εκτέλεση του αλγορίθμου ΠΑ συγκλίνει καθώς ο αλγόριθμος με αυτή την τιμή δίνει καλύτερα αποτελέσματα.

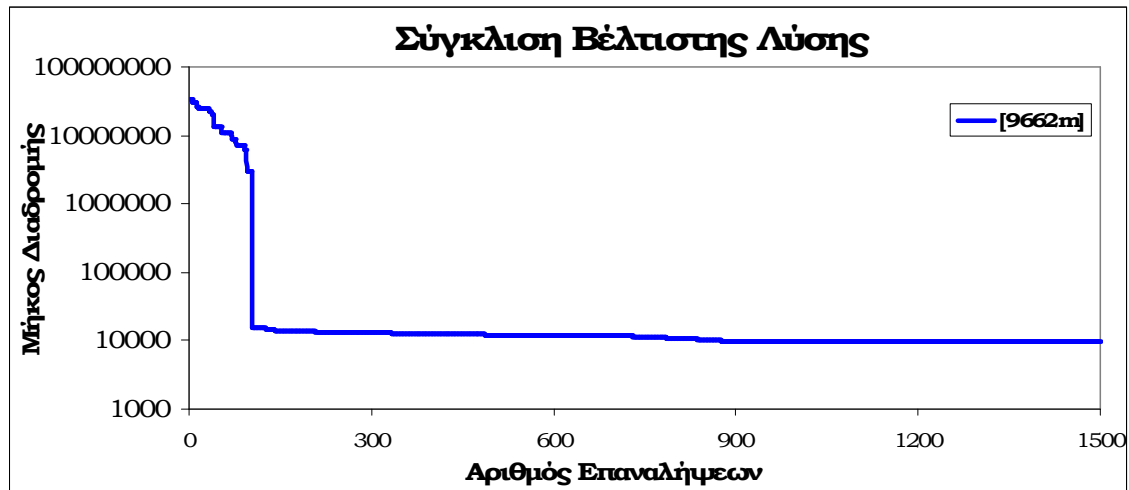


Σχήμα 8-4: Γραφική αναπαράσταση των τεσσάρων καλύτερων λύσεων συναρτήσει του αριθμού επαναλήψεων του ΠΑ.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 8-4** στους πρώτους κύκλους ο αλγόριθμος ΠΑ παράγει διαδρομές, οι οποίες είναι μακριά από το βέλτιστο αποτέλεσμα. Εντούτοις, καλές λύσεις καθορίζονται πολύ γρήγορα σε ένα εύρος 100-200 κύκλων για τα περισσότερα από τα πειραματικά σύνολα. Στη συνέχεια, η μεταβλητότητα των λύσεων μειώνεται και σταθεροποιείται τελικά σε μια βέλτιστη τιμή για το υπόλοιπο της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Πρακτικά, ο αλγόριθμος συγκλίνει στην τελική βέλτιστη λύση μετά από 1.000 περίπου κύκλους (στις περισσότερες των περιπτώσεων).

Γενικά, ο αλγόριθμος ΠΑ παράγει αποδεκτά αποτελέσματα (μήκος γύρου < 1.000.000) για ένα ευρύ φάσμα διαφορετικών σύνολο παραμέτρων, αλλά φαίνεται να «κολλάει» σε ένα τοπικό ελάχιστο και δεν μπορεί να βρει την βέλτιστη λύση. Το γεγονός ότι τα δεδομένα εισόδου του προγράμματός μας είναι πολύ περιορισμένα και όχι απολύτως ακριβή μπορεί να είναι ένας λόγος για την απόδοση και την αποδοτικότητα του αλγορίθμου.

Τέλος στο **Σχήμα 8-5** εμφανίζεται μόνο το διάγραμμα σύγκλισης της βέλτιστης διαδρομής σε συνάρτηση πάντα με τον αριθμό επαναλήψεων εκτέλεσης του αλγορίθμου.



Σχήμα 8-5: Διάγραμμα σύγκλισης της βέλτιστης διαδρομής (9662m) σε σχέση με τον αριθμό επαναλήψεων του ΠΑ.

8.4. Το σύστημα αποικίας μυρμηγκιών

8.4.1. Αξιολόγηση της αποδοτικότητας του αλγορίθμου

Αρχικά εφαρμόστηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης του Συστήματος Αποικίας Μυρμηγκιών (Ant Colony System) στο περιστατικό του ΑΠΠΠ «ft70.atsp.gz» για να εκτιμηθεί η αποδοτικότητά του στην επίλυση του ΑΠΠΠ. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι εκτελέστηκε ο αλγόριθμος του Συστήματος Αποικίας Μυρμηγκιών (ΣΑΜ) θέτοντας διάφορες τιμές στις παραμέτρους του και καταγράφηκαν τα αντίστοιχα αποτελέσματα στους πίνακες που ακολουθούν παρακάτω. Οι παράμετροι του αλγορίθμου ΣΑΜ, οι οποίοι πρέπει να ρυθμιστούν προκειμένου να βρεθεί η βέλτιστη λύση, είναι οι ακόλουθοι:

- **α** → Το σχετικό βάρος του ίχνους της φερομόνης,
- **β** → Το σχετικό βάρος της ορατότητας,
- **NC** → Αριθμός κύκλων,
- **ρ** → Η διατήρηση ίχνους της φερομόνης ($1-\rho$ αντιπροσωπεύει την εξάτμιση του ίχνους),
- **m** → Ο συνολικός αριθμός μυρμηγκιών σε κάθε επανάληψη, και
- **q_0** → Η σχετική βαρύτητα της αξιοποίησης ενάντια της εξερεύνησης.

Ο ρόλος των παραμέτρων **α** και **β** είναι ο ακόλουθος:

- Εάν το α τίθεται κοντά στο μηδέν, τότε τα πιο κοντινά σημεία φόρτωσης έχουν υψηλότερη πιθανότητα επιλογής από τον αλγόριθμο. Αυτό αντιστοιχεί σε έναν κλασσικό στοχαστικό άπληστο αλγόριθμο (με πολλαπλά σημεία εκκίνησης δεδομένου ότι τα μυρμήγκια αρχικά διανέμονται τυχαία στα σημεία φόρτωσης).
- Εάν αντίθετα το β τίθεται κοντά στο μηδέν, τότε μόνο η ενίσχυση της φερομόνης είναι ενεργή και έπειτα αυτή η μέθοδος θα οδηγήσει στη γρήγορη εμφάνιση της στασιμότητας, δηλαδή σε μια κατάσταση στην οποία όλα τα μυρμήγκια θα κάνουν τον ίδιο γύρο, που γενικά δεν αντιπροσωπεύει την καταλληλότερη διαδρομή.

Επομένως, μια κατάλληλη ανταλλαγή πρέπει να τεθεί μεταξύ της ευριστικής τιμής και της έντασης του ίχνους. Παράλληλα, όλοι οι παράμετροι του ΣΑΜ πρέπει να ρυθμιστούν κατάλληλα, για να παραχθούν τα καλύτερα αποτελέσματα. Ενδεικτικά, παρακάτω, εμφανίζονται ορισμένα σύνολα ρυθμίσεων των παραμέτρων του ΣΑΜ, τα οποία δίνουν τα καλύτερα αποτελέσματα στο περιστατικό του ΑΠΠΠ «ft70.atsp.gz»:

- Το σχετικό βάρος του ίχνους της φερομόνης $\rightarrow \alpha=1$,
- Το σχετικό βάρος της ορατότητας $\rightarrow \beta = \{0,1,2,5\}$,
- Αριθμός κύκλων $\rightarrow NC=1.000$,
- Η διατήρηση ίχνους της φερομόνης $\rightarrow \rho = \{0,1, 0,2, 0,45\}$,
- Ο συνολικός αριθμός μυρμηγκιών σε κάθε επανάληψη $\rightarrow m=70$, και
- Η σχετική βαρύτητα της αξιοποίησης ενάντια της εξερεύνησης $\rightarrow q_0 = \{0,25, 0,5, 0,75\}$.

Στην συνέχεια παρουσιάζονται στους πίνακες **Πίνακας 8-12**, **Πίνακας 8-13**, **Πίνακας 8-14** τα αποτελέσματα αυτά, τα οποία ελήφθησαν με την παραμετροποίηση των αντιστοίχων παραμέτρων.

Για $q_0 = 0,25$:

ρ	β	Μήκος Διαδρομής	Σφάλμα Αλγορίθμου
0,1	0	62.742	62,24%
	1	48.194	24,62%
	2	45.245	16,99%
	5	42.009	8,63%
0,2	1	48.518	25,46%
	2	45.142	16,73%
	5	41.168	6,45%

0,45	1	48.181	24,59%
	2	43.992	13,75%
	5	40.818	5,55%

Πίνακας 8-12: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΣΑΜ
στο «ft70.atasp.gz» για $q_0=0,25$.

Για $q_0 = 0,5$:

P	β	Μήκος Διαδρομής	Σφάλμα Αλγορίθμου
0,1	0	63.235	63,51%
	1	44.173	14,22%
	2	42.755	10,56%
	5	40.672	5,17%
0,2	1	43.814	13,29%
	2	42.488	9,86%
	5	40.695	5,23%
0,45	1	43.941	13,62%
	2	41.930	8,42%
	5	40.356	4,35%

Πίνακας 8-13: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΣΑΜ
στο «ft70.atasp.gz» για $q_0=0,5$.

Για $q_0 = 0,75$:

P	β	Μήκος Διαδρομής	Σφάλμα Αλγορίθμου
0,1	0	56.694	46,6%
	1	41.090	6,25%
	2	40.478	4,67%
	5	40.131	3,77%
0,2	1	40.786	5,46%
	2	39.851	3,05%
	5	39.742	2,76%
0,45	1	41.482	7,26%
	2	40.499	4,72%
	5	39.636	2,49%

Πίνακας 8-14: Αποτελέσματα της εκτέλεσης του ΣΑΜ
στο «ft70.atasp.gz» για $q_0=0,75$.

8.4.2. Εκτέλεση του αλγορίθμου ΣΑΜ στο πρόβλημά μας

Ο αλγόριθμος ΣΑΜ, μετά την αξιολόγηση της αποδοτικότητας του, εφαρμόστηκε στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της αποκομιδής απορριμμάτων. Ο αλγόριθμος ΣΑΜ εκτελέστηκε για περισσότερες από 27.700 φορές για διαφορετικούς συνδυασμούς παραμέτρων $(\alpha, \beta, \rho, q_0)$ όπου το $\alpha \in \{0, 0.5, 1, 2, 5\}$, το $\beta \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$, το $\rho \in \{0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.45\}$ και το $q_0 \in \{0.25, 0.5, 0.75\}$.

α	β	ρ	q_0			α	β	ρ	q_0		
			0,25	0,5	0,75				0,25	0,5	0,75
1	1	0,1	9.463	8.808	7.943	4		0,4	7.537	7.857	8.355
		0,2	10.321	9.021	8.046			0,45	7.973	7.831	7.994
		0,3	9.989	9.150	8.427			0,1	8.411	8.170	8.556
		0,4	9.818	9.176	7.826			0,2	7.894	7.488	8.139
		0,45	9.641	8.827	8.269			0,3	7.847	8.022	8.022
	2	0,1	8.107	7.328	7.605	5		0,4	8.143	7.835	8.025
		0,2	8.412	7.681	7.651			0,45	8.608	8.606	7.780
		0,3	7.948	7.622	7.603			0,1	8.185	7.897	8.314
		0,4	9.042	7.914	7.681			0,2	8.386	7.835	7.534
		0,45	8.667	8.612	8.110			0,3	8.213	8.021	7.841
	3	0,1	8.301	8.223	7.471	2		0,4	7.855	8.245	7.859
		0,2	8.116	7.984	7.999			0,45	8.307	7.859	7.646
		0,3	8.038	7.963	7.827			0,1	7.979	8.152	8.090
		0,4	8.071	7.847	7.955			0,2	7.875	7.628	7.928
		0,45	7.803	7.876	7.870			0,3	7.749	7.984	7.821
4	4	0,1	7.660	8.356	8.093	3		0,4	8.264	7.538	8.163
		0,2	7.923	8.284	8.116			0,45	8.050	7.783	7.728
		0,3	7.814	7.993	8.434						

Πίνακας 8-15: Υλοποίηση του αλγορίθμου ΣΑΜ για διάφορους συνδυασμούς των $(\alpha, \beta, \rho, q_0)$.

Μέσω αυτών των εκτελέσεων έχει παρατηρηθεί, και στο συγκεκριμένο πρόβλημα της αποκομιδής των απορριμμάτων, ότι για τις πολύ μικρές τιμές της παραμέτρου α , το σύστημα γίνεται νομοτελειακό χωρίς μνήμη και είναι τελικά ανίκανο να βρει μια κατάλληλη λύση, επειδή δεν είναι ικανό για να συγκλίνει σε μια βέλτιστη διαδρομή. Από την άλλη μεριά, για πολύ μεγάλες τιμές στο ζεύγος

(α , β), το σύστημα εμφανίζεται να λιμνάζει σε λύσεις που απέχουν από τη βέλτιστη λύση. Επομένως, ο **Πίνακας 8-15** παρουσιάζει την υλοποίηση του αλγορίθμου ΣΑΜ μόνο για ορισμένους από τους διάφορους συνδυασμούς των παραμέτρων (α , β , ρ , q_0), οι οποίοι παράγουν τις καλύτερες λύσεις. Κάθε τιμή στον συγκεκριμένο πίνακα αντιπροσωπεύει τη βέλτιστη τιμή για τις αντίστοιχες παραμέτρους, οι οποίοι προκύπτουν μετά από εκατοντάδες εκτελέσεων του αλγορίθμου ΣΑΜ για εκείνο το συγκεκριμένο σύνολο.

Επιπλέον, ο **Πίνακας 8-16** αποδεικνύει την αποδοτικότητα του αλγορίθμου ΣΑΜ, όπου από ένα συνολικό σύνολο 27.700 εκτελέσεων, ο αλγόριθμος ήταν ανίκανος να παραγάγει τις λύσεις μόνο για 120 εκτελέσεις, επειδή αυτές οι λύσεις φαίνονται να είναι σε κατάσταση αδιεξόδου. Πρέπει να σημειωθεί ότι 26.550 εκτελέσεις του αλγορίθμου ΣΑΜ παράγουν καλύτερα αποτελέσματα από το αποτέλεσμα της εμπειρικής μεθόδου που χρησιμοποιείται στην παρούσα φάση από το δήμο Αθηναίων (μήκος διαδρομής = 9.850m). Ο αλγόριθμος ΣΑΜ έχει εκτελεστεί για μια περίοδο έξι μηνών προκειμένου να επιτευχθούν τα στατιστικά αποτελέσματα που απεικονίζει ο **Πίνακας 8-16**.

Αριθμός Εκτελέσεων	Μη Αποδεκτές	Αποδεκτές		
		Καλύτερες	Χειρότερες	Συνολικές
27.700	120	26.550	1.030	27.580

Πίνακας 8-16: Ανάλυση των πειραματικών αποτελεσμάτων.

Τέλος, ο αλγόριθμος ΣΑΜ κατόρθωσε να βρει το καλύτερο μήκος γύρου που είναι ίσο με 7.328m για το ακόλουθο σύνολο παραμέτρων:

$$\alpha=1, \beta=2, NC=2.000, \rho=0,1, q_0=0,5$$

Η αντίστοιχη διαδρομή, που ακολουθεί το απορριμματοφόρο για να πετύχει τη βέλτιστη αυτή λύση, περνάει από τα ακόλουθα σημεία: [33, 32, 34, 35, 28, 24, 49, 52, 53, 58, 71, 1, 72, 65, 64, 60, 59, 54, 63, 66, 47, 46, 62, 61, 57, 55, 56, 48, 41, 38, 39, 44, 40, 68, 67, 43, 45, 36, 69, 42, 19, 15, 21, 8, 9, 20, 6, 22, 31, 30, 17, 18, 16, 7, 3, 5, 4, 2, 12, 13, 10, 11, 29, 25, 51, 37, 50, 27, 23, 14, 26, 70].

Αυτό το αποτέλεσμα είναι το καλύτερο σε όλη την πειραματική διαδικασία. Ο συγκεκριμένος αλγόριθμος ΣΑΜ έχει εκτελεστεί για 2.010 φορές με το προαναφερθέν σύνολο παραμέτρων και το **Σχήμα 8-6** απεικονίζει την συγκεκριμένη αυτή κατανομή των λύσεων για την προαναφερθείσα ρύθμιση των παραμέτρων.



Σχήμα 8-6: Κατανομή των αποτελεσμάτων για το σύνολο των παραμέτρων:

NC=2.000, $\alpha=1$, $\beta=2$, $\rho=0,1$, $q_0=0,5$.

Όπως φαίνεται στο **Σχήμα 8-6** οι τιμές της πλειοψηφίας των λύσεων κυμαίνονται σε ένα εύρος από 8.500 έως 8.900 και σχεδόν όλες οι λύσεις είναι καλύτερες σε σύγκριση με το αποτέλεσμα της εμπειρικής μεθόδου, της διαδρομής, δηλαδή, η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα φάση από το δήμο Αθηναίων. Ο **Πίνακας 8-17** παρουσιάζει τη σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του αλγορίθμου ΣΑΜ και του εμπειρικού μοντέλου. Ο αλγόριθμος ΣΑΜ παράγει αποδεκτές λύσεις (Μήκος Διαδρομής < 1.000.000) για αυτό το συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων και για τις 2.010 εκτελέσεις. Τα πειραματικά αποτελέσματα επιβεβαιώνουν μια βελτίωση της βέλτιστης διαδρομής περίπου του 25,6% και μια βελτίωση της μέσης διαδρομής περίπου του 10,45%. Αυτή η βελτίωση, όπως μπορεί να συνειδητοποιήσει κανείς, μειώνει αρκετά τις δαπάνες της αποκομιδής και της μεταφοράς των απορριμμάτων.

Εμπειρικό Μοντέλο (m)	Μέση Διαδρομή του ΣΑΜ (m)	Βέλτιστη Διαδρομή του ΣΑΜ (m)	Βελτίωση από Βέλτιστη Διαδρομή (%)	Βελτίωση από Μέση Διαδρομή (%)
9.850	8.820	7.328	25,6%	10,45%

Πίνακας 8-17: Σύγκριση μεταξύ του αλγορίθμου ΣΑΜ και της εμπειρικής μεθόδου.

Ωστόσο, πρέπει να σημειωθεί ότι ο αλγόριθμος ΣΑΜ είναι χρονοβόρος από την άποψη του χρόνου που απαιτείται από την κεντρική μονάδα επεξεργασίας του υπολογιστή, για να υπολογίσει μια διαδρομή ανεξαρτήτως συνόλου παραμέτρων. Κάθε εκτέλεση του αλγορίθμου ΣΑΜ για ένα οποιοδήποτε σύνολο παραμέτρων, διαρκεί περίπου 15 – 20 λεπτά, με αποτέλεσμα ο αλγόριθμος ΣΑΜ εκτελέστηκε για αρκετούς μήνες, προκειμένου να εξεταστεί η επίδοση και η αποδοτικότητα του σε σχέση με όλους τους συνδυασμούς των προαναφερθέντων συνόλων παραμέτρων. Φυσικά, αφού βρεθεί η βέλτιστη διαδρομή με ένα συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων, ο αλγόριθμος ACS, την επόμενη φορά που θα χρειαστεί να εκτελεστεί, προκειμένου να παραχθεί μια εναλλακτική βέλτιστη διαδρομή για ένα «What-If» σενάριο, θα χρειαστεί μόνο 10-20 λεπτά, για να παράγει την εναλλακτική αυτή βέλτιστη λύση.

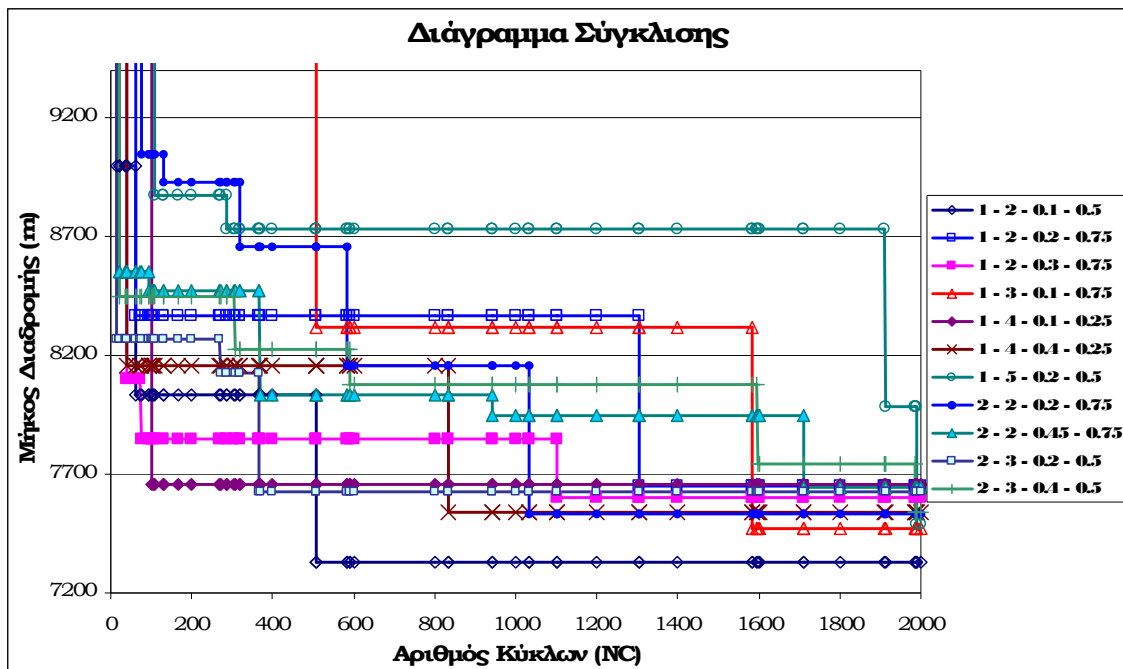
8.4.3. Διαγράμματα σύγκλισης του αλγορίθμου ΣΑΜ

Η τιμή της παραμέτρου του αριθμού των κύκλων (NC) είναι πολύ σημαντική και έχει προσδιοριστεί μέσω των εκατοντάδων επαναλήψεων των πειραμάτων, επειδή μια μικρή τιμή οδηγεί τον αλγόριθμο σε ανακριβή αποτελέσματα, ενώ μια αρκετά μεγάλη τιμή αυξάνει την πολυπλοκότητα του αλγορίθμου και συνεπώς το χρόνο εκτέλεσης του αλγορίθμου. Η τιμή της παραμέτρου NC τελικά τέθηκε ίση με 2.000 επαναλήψεις για κάθε μια από τις 27.700 εκτελέσεις, προκειμένου να είναι σίγουρο ότι ο αλγόριθμος παράγει υψηλής ποιότητας λύσεις. Με τη ρύθμιση της παραμέτρου NC ίση με 2.000, ο χρόνος υπολογισμού του προγράμματος έχει αυξηθεί αρκετά, αλλά η ανωτέρω επιλογή επιλέχθηκε διότι ο αρχικός στόχος ήταν η παραγωγή υψηλής ποιότητας αποτελεσμάτων. Εκτός αυτού, είναι ευρέως γνωστό ότι για τους περισσότερους από τους χρόνους, έχει επιτευχθεί μία ισορροπία μεταξύ της ποιότητας των λύσεων και του χρόνου υπολογισμού που απαιτείται.

Τα καλύτερα αποτελέσματα από τον **Πίνακα 8-16**, που παρήχθησαν μέσω της πειραματικής διαδικασίας, επιλέχθηκαν και τα διαγράμματα σύγκλισής τους παρουσιάζονται στο **Σχήμα 8-7** προκειμένου να εξεταστεί, εκτός από μία βέλτιστη λύση, και πόσο γρήγορα ο αλγόριθμος βρίσκει την συγκεκριμένη βέλτιστη λύση για κάθε ρύθμιση των παραμέτρων. Στο συγκεκριμένο διάγραμμα εμφανίζονται τα 11 καλύτερα αποτελέσματα, τα οποία αντιπροσωπεύουν τις καλύτερες διαδρομές που παράγονται από τα παραμετροποιημένα σύνολα των παραμέτρων (α , β , ρ ,

q_0). Η παράμετρος «Αριθμός των Κύκλων» (NC) τέθηκε ίση με 2.000, προκειμένου να εξεταστεί πότε συγκλίνει η μέση εκτέλεση του αλγορίθμου ΣΑΜ.

Όπως παρουσιάζει το **Σχήμα 8-7**, στους πρώτους κύκλους ο αλγόριθμος παράγει διαδρομές, οι οποίες είναι μακριά από το βέλτιστο αποτέλεσμα. Εντούτοις, η λύση καθορίζεται πολύ γρήγορα σε ένα εύρος 100-250 κύκλων για τα περισσότερα από τα πειραματικά σύνολα. Στη συνέχεια, η μεταβλητότητα των λύσεων μειώνεται και σταθεροποιείται τελικά σε μια βέλτιστη τιμή για το υπόλοιπο της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Πρακτικά, ο αλγόριθμος συγκλίνει στην τελική βέλτιστη λύση σε περίπου 1.000 κύκλους (στις περισσότερες των περιπτώσεων). Αυτή η τιμή για τον «Αριθμό Κύκλων» έχει προσδιοριστεί μέσω της βιβλιογραφίας και μέσω των εκατοντάδων των επαναλήψεων για κάθε πειραματικό σύνολο.



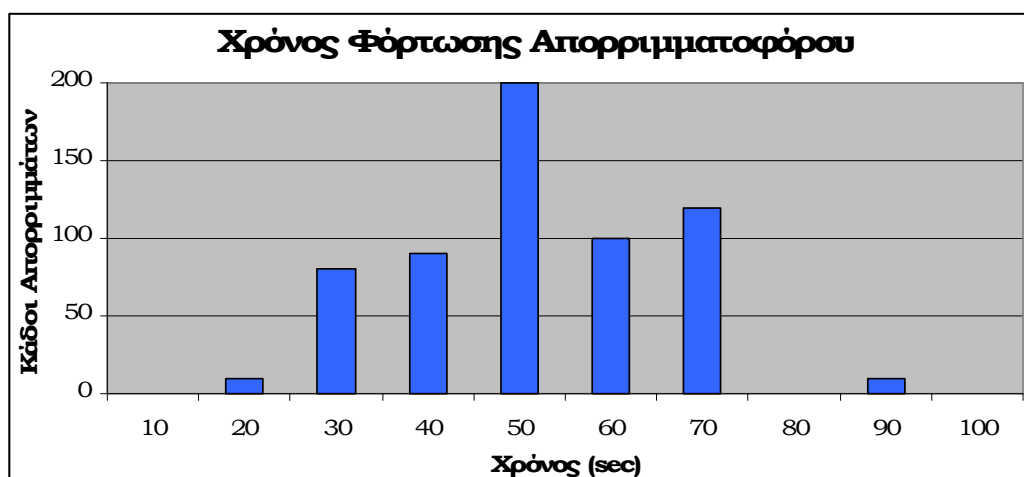
Σχήμα 8-7: Διάγραμμα σύγκλισης για τα καλύτερα αποτελέσματα που παρήχθησαν από τον αλγόριθμο ΣΑΜ.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο αλγόριθμος ΣΑΜ για το επόμενο σύνολο παραμέτρων: $\alpha=1$, $\beta=2$, $\rho=0,1$, $q_0=0,5$, το οποίο παράγει το βέλτιστο μήκος της διαδρομής, συγκλίνει σχετικά γρήγορα (στους πρώτους 500 κύκλους) σε σύγκριση με τις άλλες καλύτερες λύσεις, όπως παρουσιάζεται στο **Σχήμα 8-7**. Φυσικά, υπάρχουν μερικοί αλγόριθμοι ΣΑΜ με διαφορετικά σύνολα παραμέτρων, οι οποίοι συγκλίνουν γρηγορότερα (κάποιοι ακόμα και στους πρώτους 75-150 κύκλους), αλλά οι λύσεις τους δεν είναι τόσο υψηλής ποιότητας.

Ολοκληρώνοντας, θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι το συγκεκριμένο σύνολο παραμέτρων παράγει όχι μόνο τη βέλτιστη λύση, αλλά και μια από τις γρηγορότερες λύσεις.

8.4.4. Κόστος δρομολόγησης

Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα διατριβή για αυτήν την υπο-ενότητα λαμβάνονται από 27 διαφορετικά πειράματα αποκομιδής, τα οποία έχουν εκτελεστεί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους κατά τη διάρκεια της ημέρας. Αυτά τα πειράματα δείχνουν ότι ένας μέσος χρόνος αποκομιδής των ΔηΣΑ υπολογίζεται να είναι περίπου 55 δευτερόλεπτα ανά κάδο απορριμμάτων (**Σχήμα 8-8**). Θεωρώντας ότι κάθε υποπρόγραμμα περιέχει περίπου 60 κάδους απορριμμάτων, επομένως ένας μέσος χρόνος αποκομιδής όλων των κάδων απορριμμάτων σε ένα πρόγραμμα αποκομιδής είναι περίπου το **61%** του συνολικού χρόνου ενώ το υπόλοιπο **39%** είναι ο χρόνος μετακίνησης του απορριμματοφόρου από τον ένα κάδο στον άλλο.



Σχήμα 8-8: Κατανομή του χρόνου φόρτωσης των κάδων απορριμμάτων στο απορριμματοφόρο από ένα σύνολο 27 πειραμάτων του χρόνου αποκομιδής.

Με τη χρησιμοποίηση του αλγορίθμου ΣΑΜ, ο χρόνος μετακίνησης ελαττώνεται κατά 25,6% (**Πίνακας 8-17**) και επομένως υπάρχει ένα τελικό κέρδος χρόνου $39\% * 25,6\% = 9,94\%$. Το τελευταίο ποσοστό είναι μεταφρασμένο σε περίπου 9 λεπτά για κάθε υποπρόγραμμα αποκομιδής στερεών αποβλήτων, το οποίο διαρκεί περίπου 1:30 ώρα. Κάθε κύριο πρόγραμμα αποκομιδής στερεών αποβλήτων του Δήμου Αθηναίων καλύπτει 2 ή 3 από τα προαναφερθέντα

υποπρογράμματα. Επομένως, κάθε κύριο πρόγραμμα αποκομιδής στερεών αποβλήτων μπορεί να έχει ένα κέρδος κατ' ελάχιστο 18 λεπτών ανά ημέρα.

Ο Δήμος Αθηναίων έχει 122 κύρια προγράμματα αποκομιδής αποβλήτων, τα οποία εκτελούνται σε καθημερινή βάση, 7 ημέρες την εβδομάδα, προκειμένου να καλύψουν την περιοχή του (Municipality Of Athens 2003). Κατά συνέπεια, το συνολικό κέρδος χρόνου των μετακινήσεων θα είναι κατ' ελάχιστον 36 ώρες ανά ημέρα, αυξανόμενο ανάλογα με τον αριθμό υποπρογραμμάτων που περιλαμβάνει κάθε κύριο πρόγραμμα συλλογής. Ο υπολογισμός αυτός οδηγεί σε ένα εβδομαδιαίο κέρδος χρόνου κατ' ελάχιστον 252 ωρών.

Κάθε απορριμματοφόρο είναι επανδρωμένο από έναν οδηγό και δύο εργάτες. Η μέση αμοιβή ενός οδηγού είναι 90€ ανά ημέρα και η μέση αμοιβή ενός εργάτη είναι 75€ ανά ημέρα (συμπεριλαμβάνονται φόροι, ασφάλεια και άλλα πρόσθετα έξοδα). Η αποκομιδή των στερεών αποβλήτων πραγματοποιείται επτά ημέρες την εβδομάδα στο δήμο Αθηναίων και επομένως το κέρδος μόνο από την εργασία (οδηγοί και εργάτες) για τις προαναφερθείσες ώρες (252 ώρες) είναι περίπου από 7.560€ σε εβδομαδιαία βάση για όλα τα 122 προγράμματα αποκομιδής. Ως εκ τούτου, με τη χρησιμοποίηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας δρομολόγησης εκτιμάται ένα σαφές κέρδος κατ' ελάχιστον 7.500€ περίπου κατά μέσο όρο σε εβδομαδιαία βάση.

8.5. Συμπεράσματα

8.5.1. Σύγκριση των αλγορίθμων

Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων των τεσσάρων αλγορίθμων κατά την εφαρμογή τους στο πρόβλημα βελτιστοποίησης της αποκομιδής απορριμμάτων, μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί μία σύγκριση με τους τέσσερις αλγόριθμους. Εύκολα διαπιστώνεται ότι ο ΣΑΜ παράγει τις καλύτερες λύσεις αφού βρίσκει το μικρότερο μήκος διαδρομής ($7.328m$) σε σχέση με τους άλλους τρεις αλγόριθμους. Ακολουθεί ο αλγόριθμος ΓΑ με $8.902m$, και στη συνέχεια ο ΠΑ με $9662m$ και τέλος ο αλγόριθμος ΑΤ φαίνεται ότι παράγει τα χειρότερα αποτελέσματα. Ο ΠΑ παράγει αποδεκτές λύσεις (κόστος < 1.000.000) σχεδόν για όλους τους συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων του, αλλά φαίνεται ότι «κολλάει» σε κάποιο τοπικό ελάχιστο και δυσκολεύεται να βρει τιμή μικρότερη από $9.662m$ για το κόστος διαδρομής. Αυτό είναι περίεργο λαμβάνοντας υπόψη ότι η αποδοτικότητα του ΠΑ κατά την εφαρμογή του στο

περιστατικό του ΑΠΠΠ αξιολογήθηκε εξίσου καλή αν όχι καλύτερη από τον ΣΑΜ. Το παραπάνω γεγονός ίσως να οφείλεται στους πολλούς περιορισμούς, που υπάρχουν στο πρόβλημά μας και στη μορφή των δεδομένων μας. Από την άλλη μεριά, ο ΓΑ παράγει αποτελέσματα με τιμές μεγαλύτερες, αλλά πολύ κοντά στο 1.000.000 τις περισσότερες φορές. Όταν, όμως, ο αλγόριθμος εκτελείται πολλές φορές με κάποιες συγκεκριμένες τιμές παραμέτρων παράγει ικανοποιητικά αποτελέσματα (9.255). Ένα μειονέκτημα του ΓΑ αποτελεί το γεγονός ότι συγκλίνει γρήγορα σε μια τιμή και είναι πολύ δύσκολο να βελτιωθεί περαιτέρω. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η βαθιά κατανόηση των γενετικών αλγορίθμων βοηθάει σημαντικά το χρήστη στην επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων (για παράδειγμα σε ποιο σημείο της εκτέλεσης του ΓΑ θα χρειαστεί να αυξηθεί η ποικιλομορφία του πληθυσμού μέσω της μετάλλαξης).

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι παρόλο που ο ΣΑΜ παράγει τις καλύτερες λύσεις για το πρόβλημά μας απαιτεί πολύ υπολογιστικό χρόνο για την εκτέλεσή του (διπλάσιο ή τριπλάσιο μερικές φορές από τους αλγόριθμους ΠΑ και ΓΑ ανάλογα με τις παραμέτρους τους και περίπου πενταπλάσιο από τον αλγόριθμο ΑΤ). Το γεγονός αυτό εμπόδισε την εκτέλεση του αλγορίθμου πολλές φορές και με διαφορετικές τιμές κάθε φορά στις παραμέτρους, ώστε να μπορούσε να εξεταστεί καλύτερα η αποδοτικότητά του. Εάν ο αλγόριθμος ΣΑΜ ήταν γραμμένος σε γλώσσα προγραμματισμού C ή C++, ίσως η επίδοση του να ήταν καλύτερη. Αντίθετα, ο αλγόριθμος ΠΑ δεν απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο για την εκτέλεσή του και επομένως, ο αλγόριθμος εκτελέστηκε πολλές φορές για να εξεταστεί η αποδοτικότητά του με διάφορους συνδυασμούς τιμών των παραμέτρων του. Επίσης, θα πρέπει να σημειωθεί ότι εάν οι παράμετροι του αλγορίθμου ΠΑ έχουν πολύ υψηλές τιμές, ο υπολογιστικός χρόνος αυξάνεται και πλησιάζει αυτόν του ΣΑΜ.

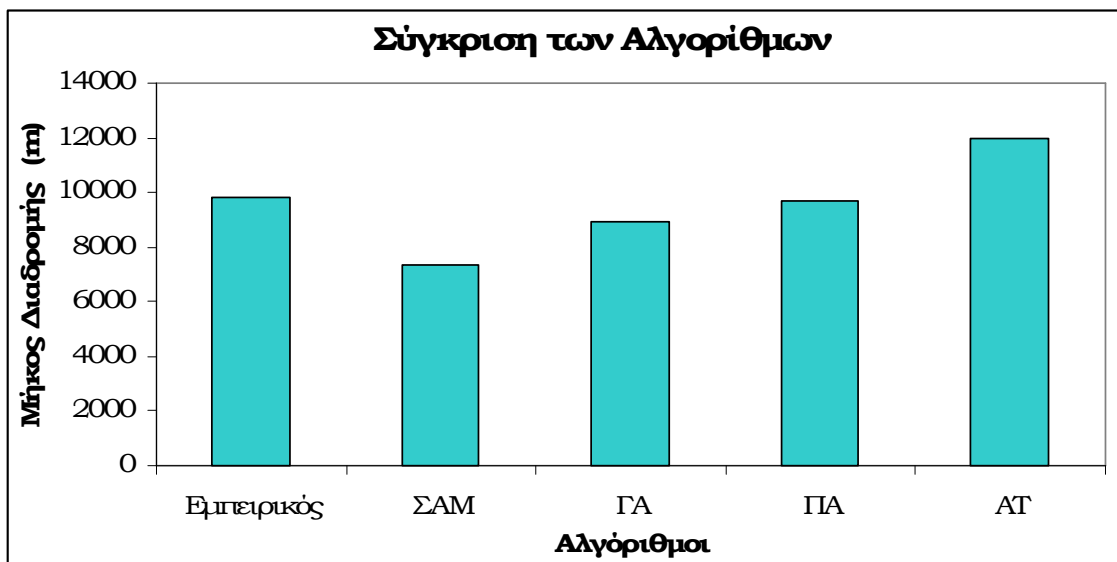
8.5.2. Σύγκριση με την εμπειρική μέθοδο

Ο Δήμος Αθηναίων, όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες, παραχώρησε κάποια στοιχεία σχετικά με τα δρομολόγια που εκτελούσαν κάποια συγκεκριμένα οχήματα κατά την συλλογή των απορριμμάτων στην ευρύτερη περιοχή του Αγίου Σώστη, πλησίον της κεντρικής λεωφόρου Α. Συγγρού, η οποία καλύπτει τα νότια όρια του Δήμου. Με βάση τα δεδομένα αυτά, υπολογίστηκε προσεγγιστικά με την εμπειρική μέθοδο το συνολικό μήκος της διαδρομής που εκτελεί ένα απορριμματοφόρο στην συγκεκριμένη εξεταζόμενη περιοχή. Η τιμή

που υπολογίστηκε είναι περίπου 9.850 μέτρα. Η αντίστοιχη ακολουθία των κάδων, για να επιτευχθεί η διαδρομή αυτή είναι: [70, 71, 0, 1, 3, 2, 5, 6, 19, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 15, 16, 17, 14, 20, 19, 21, 48, 51, 52, 54, 23, 27, 29, 32, 31, 33, 34, 35, 68, 41, 25, 50, 36, 49, 28, 13, 18, 64, 63, 59, 39, 43, 38, 24, 26, 22, 67, 66, 37, 40, 42, 44, 55, 47, 62, 53, 56, 57, 63, 58, 60, 65, 46, 45, 61].

Βέβαια, η εμπειρική μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε ακολουθεί τους κανόνες που έχουν περιγραφεί αναλυτικά σε προηγούμενη ενότητα. Συνοπτικά, οι διαδρομές διαμορφώνονται σε ένα δίκτυο με κόμβους και συνδέσεις (βέλη). Κάθε διασταύρωση δρόμων και κάθε αρχή ή τέλος ενός δρόμου αποτελεί ένα κόμβο. Σε κάθε δυνατή μετακίνηση του απορριματοφόρου μεταξύ δύο διαδοχικών κόμβων αντιστοιχεί ένα συγκεκριμένο βέλος. Κάθε αλληλουχία κόμβων και βελών αποτελούν μια διαδρομή συλλογής του οχήματος.

Συγκρίνοντας το αποτέλεσμα της εμπειρικής μεθόδου με τα αποτελέσματα των αλγορίθμων που εφαρμόστηκαν για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος, συμπεραίνεται ότι οι τρεις αλγόριθμοι (ΣΑΜ, ΓΑ και ΠΑ) παράγουν αρκετά καλύτερα αποτελέσματα (μικρότερο κόστος διαδρομής και επομένως λιγότερος χρόνος για τη συλλογή των απορριμμάτων) σε σχέση με την εμπειρική μέθοδο, η οποία χρησιμοποιείται στην παρούσα φάση από τον Δήμο Αθηναίων. Στο παρακάτω **Σχήμα 8-9** παρουσιάζεται ένα ιστόγραμμα που περιέχει τα βέλτιστα κόστη των αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και το κόστος της εμπειρικής μεθόδου.



Σχήμα 8-9: Ιστόγραμμα με τα βέλτιστα κόστη των τεσσάρων αλγορίθμων και σύγκρισή τους με το αντίστοιχο εμπειρικό.

8.5.3. Συνδυασμός των αποτελεσμάτων της παραγωγής και της αποκομιδής

Όπως αναφέρθηκε στην αρχική προσέγγιση αντιμετώπισης του προβλήματος, τούτο διαχωρίστηκε σε δύο (2) διακριτές φάσεις, την φάση παραγωγής και συγκέντρωσης, και την φάση αποκομιδής. Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε κατά την πρώτη φάση οδήγησε σε αποτελέσματα τα οποία διασφαλίζουν μία κατ' ελάχιστον εξοικονόμηση της τάξεως του 30% στο συνολικό αριθμό κάδων προς τοποθέτηση.

Στην δεύτερη φάση η συνολική διαδρομή για την αποκομιδή απορριμμάτων μειώνεται σε σχέση με την εμπειρική μέθοδο κατά 25,6%.

Σήμερα η διάρκεια μίας μέσης διαδρομής απορριμματοφόρου υπολογίζεται στα 90 λεπτά για την εξυπηρέτηση 60 περίπου κάδων. Δεδομένου ότι ο μέσος χρόνος φόρτωσης είναι 55 δευτερόλεπτα, από τα 90 λεπτά της διαδρομής, τα 55 διατίθενται για φόρτωση και τα 35 για κίνηση.

Σύμφωνα με το προτεινόμενο μοντέλο, ο συνολικός αριθμός των κάδων μειώνεται κατά 30%. Άρα στο παράδειγμα μας ο νέος αριθμός κάδων θα είναι 42 και ο νέος χρόνος φόρτωσης θα είναι $55 \times 42 = 38,5$ λεπτά. Επίσης η διαδρομή του απορριμματοφόρου σύμφωνα με το μοντέλο μας μειώνεται κατά 25,6% και κατά συνέπεια ο χρόνος κίνησης από 35 λεπτά μειώνεται σε 26,04 λεπτά για την περίπτωση που εξετάζουμε.

Προσθέτοντας τις δύο ανωτέρω εκτιμήσεις προκύπτει ότι ο αρχικός χρόνος των 90 λεπτών περιορίζεται στα 64,54 λεπτά ($38,5 + 26,04$). Άρα έχουμε μία συνολική εξοικονόμηση της τάξεως των 23%, όπως φαίνεται και στον επόμενο πίνακα (**Πίνακας 8-18**).

	Χρόνος Φόρτωσης (Λεπτά)	Χρόνος Κίνησης (Λεπτά)	Συνολικός Χρόνος (Λεπτά)
Εμπειρικό Μοντέλο	55	35	90
Προτεινόμενο Μοντέλο	38,50	26,04	64,54
Ποσοστό Βελτίωσης (%)	30	25,60	28,28

Πίνακας 8-18: Σύγκριση επιδόσεων μεταξύ εμπειρικού και προτεινόμενου μοντέλου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahluwalia P.K. and Nema A.K. (2006). Multi-objective reverse logistics model for integrated computer waste management. *Waste Management & Research*, 24(6), 514-527.
- Al-Jarrah O. and Abu-Qdais H. (2006). Municipal Solid Waste Landfill Siting Using Intelligent System, *Waste Management*, 26(3), pp. 299-306.
- Battiti R. (1996): Reactive search: Toward self-tuning heuristics. In Rayward-Smith V.J. (ed.): *Modern Heuristic Search Methods*. Chapter 4, pp 61-83, John Wiley and Sons Ltd.
- Battiti R. and Tecchiolli G. (1994): The reactive tabu search. *ORSA Journal on Computing*, 6(2), 126-140.
- Baum E.B. (1986): Towards practical "neural" computation for combinatorial optimization problems. In Denker J.S. (ed.): *Neural networks for computing*, 53-58. American Institute of Physics, New York.
- Beckerman W. (1995). *Small is Stupid: Blowing the Whistle on the Greens*. Duckworth, London Chapter 4, Section 2, p. 51.
- Bilenko M. and Mooney R.J. (2002). Learning to combine trained distance metrics for duplicate detection in databases. Technical report, Computer Science Dept., University of Texas, Austin.
- Bonabeau E., Dorigo M. and Theraulaz G. (1999). *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*. Oxford University Press. ISBN 0-19-513159-2.
- Boustead I. (1992): The Relevance of Re-use and Recycling Activities for the LCA Profile of products. *Procs. Third CESIO International Surfactants Congress and Exhibition*, London, 1-5 June, pp. 218-226.

- Burrough P.A. (1986). Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment. Oxford University Press, USA.
- Cerny V. (1985). A Thermo dynamical Approach to the Traveling Salesman Problem: An Efficient Simulation Algorithm. Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 45, No. 1, pp. 41-51.
- Chang N. and Wei Y.L. (2000). Siting Recycling Drop-off Stations in Urban Area by Genetic Algorithm-Based Fuzzy Multiobjective Nonlinear Integer Programming Modeling. Fuzzy Sets and Systems Vol. 14, pp 133-149.
- Chang N.B. and Wang S.F. (1996). Solid waste management system analysis by multiobjective mixed integer programming. Journal of Environment Management, Vol. 48, pp. 17-43.
- Chang N.B., Pan Y.C. and Huang S.D. (1993). Time Series Forecasting of Solid Waste Generation. Journal of Resource Management and Technology 21(1), 1-10.
- Charnpratheep K., Zhou Q. and Garmer B. (1997). Preliminary Landfill Site Screening Using Fuzzy Geographical Information Systems. Waste Management and Research 15, 197-215.
- Clark R.M. (1978): Analysis of Urban Solid Waste Services – A System Approach. Ann Arbor Science Publishers, Ann Arbor, MI.
- Delic K.A. (2005). Science and Engineering of Large-Scale Complex Systems. Ubiquity, Volume 6, Issue 7. Source: Ubiquity, Volume 6, Issue 7 (March 8 - March 15, 2005) <http://www.acm.org/ubiquity> (Accessed March 2006)
- Dorigo M. (1992). Optimization, Learning and Natural Algorithms, PhD thesis, Politecnico di Milano, Italy.
- Dorigo M. (2007). Ant Colony Optimization. Scholarpedia.
- Dorigo M. and Gambardella L.M. (1997). Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 1, No. 1, pp 53–66.

- Dorigo M. and Stützle T. (2004). Ant Colony Optimization. MIT Press. ISBN 0-262-04219-3.
- Dorigo M., Di Caro G. and Gambardella L.M. (1999). Ant Algorithms for Discrete Optimization. Artificial Life, Vol. 5, No. 2, pp 137–172.
- Dorigo M., Maniezzo V. and Colorni A. (1996). Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics–Part B, Vol. 26, No. 1, pp. 29–41.
- Dyson B. and Chang N. (2005). Forecasting Municipal Solid Waste Generation in a Fast-Growing Urban Region with System Dynamics Modeling. Waste Management, 25, 669-679.
- Emery A.D., Griffiths A.J. and Williams K.P. (2003). An in Depth Study of the Effects of Socio-Economic Conditions on Household Waste Recycling Practices. Waste Management & Research, 21 (3), 180-190.
- European Commission (2003). Towards a thematic strategy on the prevention and recycling of waste.
http://europa.eu.int/eurlex/en/com/cnc/2003/com2003_0301en01.pdf
(Accessed on October 2006)
- European Environmental Agency (2004). EEA Signals 2004.
<http://reports.eea.eu.int/signals-2004/en/ENSignals2004web.pdf>,
(Accessed on October 2006).
- Fabbricino M. (2001). An Integrated Programme for Municipal Solid Waste Management. Waste Management and Research, 19, 368–379.
- Glover F. (1986): Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. Computers and Operation Research, 13, 533-549.
- Glover F. (1989): Tabu Search – Part I. ORSA Journal on Computing, 1(3), 190-206.
- Glover F. (1990): Tabu Search – Part II. ORSA Journal on Computing, 2(1), 4-32.

- Glover F. and Laguna M. (1992). Tabu Search in Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. Blackwell Publishing, Blackwell Science Ltd.
<http://www.rose-hulman.edu/class/ma/rader/MA477/F01/Papers/tabusearch.pdf> (Accessed on February 2006)
- Glover F. and Laguna M. (1993): Tabu Search. In Reeves C.R. (ed.): Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems, pp. 70-150. John Wiley & Sons, Inc.
- Glover F., Kelly J. and Laguna M. (1992). Genetic Algorithms and Tabu Search: Hybrids for Optimization. Manuscript, University of Colorado, Boulder.
- Greenberg M., Caruanna J. and Krugman B. (1976). Solid Waste Management: a test of alternative strategies using optimization techniques. Environment and Planning, Vol. 8, pp. 587-597.
- Greening D.R. (1995). Simulated Annealing with Errors. PhD thesis, University of California, Los Angeles.
- Grossman D., Hudson J.F. and Marks D.H. (1974). Waste Generation Models for Solid-Waste Collection. Journal of the Environmental Engineering Division-ASCE, 100 (6), 1219-1230.
- Haag, S., Cummings, M., McCubbrey, D. J., Donovan, R. G. and Pinsonneault, A. (2006). Management Information Systems for the Information Age, 3rd Edition, Canada, McGraw-Hill Ryerson.
- Haastrup P., Maniezzo V., Mattarelli M., Mazzeo Rinaldi F., Mendes, I. and Paruccini, M. (1998). A Decision Support System for Urban Waste Management. European Journal of Operational Research, 109, 330-341.
- Hansen P. (1986): The steepest ascent mildest descent heuristic for combinatorial programming. Conference on Numerical Methods in Combinatorial Optimisation, Capri, Italy.

- Hertz A., Taillard E. and de Werra D. (1997): Tabu search. In Aarts E. & Lenstra J.K. (eds.): *Local Search in Combinatorial Optimization*, 121-136. Wiley, Chichester.
- Higgs G. (2006). Integrating multi-criteria techniques with geographical information systems in waste facility location to enhance public participation. *Waste Management & Research*, 24(2), 105-117.
- Hsieh H.N. and Ho K.H. (1993). Optimization of solid waste disposal system by linear programming technique. *Journal of Resource Management and Technology*, Vol. 21, No. 4, pp. 194-201.
- Huang G.H., Baetz B.W. and Patry G.G. (1995). A Grey Integer Programming for Solid Waste Management Planning under Uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 83, 594-620.
- Johnson D.S. (1990): Local optimization and the traveling salesman problem. In *Proceedings of the 17th International Colloquium on Automata, Languages and Programming*. Lecture Notes in Computer Science, 443, 446-461. Springer, Berlin.
- Kao J.J. and Lin H.U. (1996). Multifactorial Spatial Analysis of Landfill Siting. *Journal of Environmental Engineering*, 122, 902-908.
- Karadimas N., Kouzas G. Anagnostopoulos I. Loumos V. and Kayafas E. (2005). "Ant Colony Route Optimization for Municipal Services". ECMS 2005 - 19th European Conference on Modelling and Simulation. Riga, Latvia, ISBN: 1-84233-112-4, pp. 381-386.
- Karadimas N., Kouzas G., Loumos V. and Kayafas E. (2005). "An Innovative Algorithmic Approach for Urban Solid Waste Collection". 14th IMEKO TC4 Symposium on new Technologies in Measurement and Instrumentation. Gdynia-Jurata, Poland, 12-15 September, pp. 269-274.
- Karadimas N., Loumos V. and Mavrantza O. (2004). Quality of Service Ensuring in Urban Solid Waste Management. In: Yager, R. R., Sgurev, V. S. (eds.): *Intelligent Systems 2004. Proceedings of the 2nd International IEEE*

- Conference on Intelligent Systems, Sofia, Bulgaria, Vol .1, 22-24 June, pp 288-292.
- Karadimas N., Panagiotopoulos P. and Loumos V. (2004). "Methodologies for Mechanic Collection Optimization using GIS". 14th Meeting of ArcGIS Users, Athens, Greece, 3 November.
- Karadimas N.V. and Loumos V. (2007). "GIS Based Modelling for the Estimation of Municipal Solid Waste Generation and Collection". Journal of Waste Management and Research, SAGE Publications. [In Press, Corrected Proof].
- Karadimas N.V., Defteraiou G., Kolokathi M. and Loumos V. (2007). "Municipal Waste Collection of Large Items Optimized With ArcGIS Network Analyst". In Zelinka I., Oplatková Z. and Orsoni A. (eds.): ECMS 2007 – Proceedings of the 21st European Conference on Modelling and Simulation. Prague, Czech Republic, 4-6 June, ISBN 978-0-9553018-2-7, pp. 80-85.
- Karadimas N.V., Defteraiou G., Kolokathi M. and Loumos V. (2007). "Comparing Several Optimization Algorithms for Municipal Solid Waste Collection". 3rd Balkan Conference in Informatics, (BCI'07), 27-29 September 2007, Sofia, Bulgaria [Under Review].
- Karadimas N.V., Defteraiou G., Kolokathi M. and Loumos V. (2007). "Ant Colony Optimization vs ArcGIS Network Analyst for the Case of Municipal Solid Waste Collection". 6th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation, 9-13 September, Ljubljana, Slovenia [In Press, Corrected Proof].
- Karadimas N.V., Kouzas G., Anagnostopoulos I. and Loumos V. (2005): "Urban Solid Waste Collection and Routing: The Ant Colony Strategic Approach". IJS3T International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology. United Kingdom Simulation Society, Vol. 6, No 12-13, pp 45-53.
- Karadimas N.V., Loumos V. and Tsigkas A. (2006): "Mobile Agent Assisted Value-Adding Communities for Mass Customisation". IJS3T International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology. United Kingdom Simulation Society, Vol. 7, No 7, pp 56-65.

- Karadimas N.V., Loumos V. and Tsigkas A. (2006): "Self Organising Structures of AD-HOC Cooperations for Customized Products and Services". In Borutzky W. Orsoni A. and Zobel R. (eds.): ECMS 2006 – Proceedings of the 20th European Conference on Modelling and Simulation. Bonn, Sankt Augustin , Germany, 28-31 May, ISBN: 0-9553018-0-7, pp. 321-326.
- Karadimas N.V., Mavrantza O. and Loumos V. (2005): "GIS Integrated Waste Production Modeling". IEEE EUROCON 2005- The International Conference on "Computer as a Tool". Serbia & Montenegro, Belgrade, 22-24 November, pp. 1279-1282.
- Karadimas N.V., Orsoni A., and Loumos V. (2006): "Municipal Solid Waste Generation Modelling Based on Fuzzy Logic". In Borutzky W. Orsoni A. and Zobel R. (eds.): ECMS 2006 – Proceedings of the 20th European Conference on Modelling and Simulation. Bonn, Sankt Augustin , Germany, 28-31 May, ISBN: 0-9553018-0-7, pp. 309-314.
- Karadimas N.V., Papatzelou K. and Loumos V. (2007): "Genetic Algorithms for Municipal Solid Waste Collection and Routing Optimization". 4th IFIP Conference on Artificial Intelligence Applications & Innovations (AIAI), 19-21 September 2007, Athens, Greece [In Press, Corrected Proof].
- Karadimas N.V., Papatzelou K. and Loumos V. (2007): "Optimal Solid Waste Collection Routes Identified by the Ant Colony System Algorithm". Journal of Waste Management and Research. SAGE Publications, Vol. 25, No. 2, 139-147.
- Karadimas N.V., Rigopoulos G. and Bardis N. (2006): "Coupling Multiagent Simulation and GIS – an Application in Waste Management". World Scientific and Engineering Society, Transactions on Systems, Issue 10, Vol.5, ISSN: 1109-2777, pp 2367-2371.
- Katsamaki A., Willems S. and Diamantopoulos E. (1998). Time Series Analysis of Municipal Solid Waste Generation Rates. Journal of Environmental Engineering, Vol. 124, pp. 178-183.
- Kirkpatrick S., Gelatt C.D.Jr. and Vecchi M.P. (1983). Optimization by Simulated Annealing, Science. Vol. 220, No. 4598, pp. 671-680.

- Klang A., Vikman Per-Åke and Brattebø H. (2006). Systems analysis as support for decision making towards sustainable municipal waste management - a case study. *Waste Management & Research*, Vol. 24, No. 4, pp. 323-331.
- Koo H.J., Shin H.S. and Yoo H.C. (1991). Multiobjective siting planning for a regional hazardous waste treatment center. *Waste Management and Research*, Vol. 9, pp. 205-218.
- Korte G.B. (2000). *The GIS Book*. 5th edition, OnWord Press.
- Koukoutsis E., Papaodysseus C., Karadimas N.V. and Ballis A. (2006): "Designing a Flexible, Highly Adaptable and Gracefully Expandable Information System for the Implementation of Complex Decision Support Systems". *IJS3T International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*. United Kingdom Simulation Society, Vol. 7, No 4-5, pp 9-20.
- Koukoutsis E., Papaodysseus C., Karadimas N.V. and Ballis A. (2006): "An Informational Template for a Flexible, Highly Adaptable and Gracefully Expandable Decision Support System". *UKSIM 2006 - 9th International Conference on Computer Modelling and Simulation*. Oriel College, Oxford, 4-6 April, pp 146-151.
- Kouzas G., Anagnostopoulos I., Rouskas A., Karadimas N.V., and Loumos V. (2005): "Ant colony self-healing schemes for survivable optical networks". *IEEE EUROCON 2005- The International Conference on "Computer as a Tool"*. Serbia & Montenegro, Belgrade, 22-24 November, pp. 1345-1348.
- Land A.H. and Doig A.G. (1960): An Automatic Method for Solving Discrete Programming Problems. *Econometrica*, Vol. 28, pp. 497-520.
- Leao S., Bishop I. and Evans D. (2001). Assessing the Demand of Solid Waste Disposal in Urban Region by Urban Dynamics Modeling in a GIS Environment. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 33, pp. 289-313.
- Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J. and Rhind D.W. (2005). *Geographic Information Systems and Science*. 2nd edition, John Wiley, Chichester.

- Lourenco H.R., Martin O. and Stützle T. (2002): Iterated local search. In Glover F. & Kochenberger G. (eds.): Hand-book of Metaheuristics, pp. 321-353. Kluwer, Norwell.
- Lund J.R. and Tchobanoglous G. (1994). Linear programming for analysis of material recovery facilities. *Journal of Environment Engineering, ASCE*, Vol. 120, No. 5, pp. 1093-1095.
- Maniezzo, V., Mendes I. and Paruccini M., (1998). Decision Support for Siting Problems. *Decision Support Systems*, Vol. 23, pp. 273-284.
- Martin O., Otto S.W. and Felten E.W. (1991): Large-step Markov chains for the traveling salesman problem. *Complex Systems*, Vol. 5, pp. 299-326.
- McDonald M.L. (1996). A Multi-Attribute Spatial Decision Support System For Solid Waste Planning. *Comput., Environ. and Urban Systems*, Vol. 20, No. 1, pp. 1-17.
- McDougall F.R., White P.R., Franke M. and Hindle P. (2001): Integrated Solid Waste Management: a Life Cycle Inventory. 2nd Edition, Blackwell Science Ltd.
- Meadows D.H., Meadows D.L. and Randers J. (1992). Beyond the Limits: Global Collapse or Sustainable Future? Earthscan Publications Ltd, London.
- Meadows D.H., Meadows D.L., Randers J. and Behrens W.W. (1972). The Limits to Growth: A Report to the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. Universe Books, New York.
- Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H. and Teller E. (1953). Equations of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, Vol. 21, No. 6, pp. 1087-1092.
- Meyers N. and Simon J.L. (1994). Scarcity or Abundance? A Debate on the Environment. W.W. Norton, New York.

- Misevičius A. (2004): Using Iterated Tabu Search for the Traveling Salesman Problem. *Informacines Technologijos ir Valdymas*, ISSN 1392 – 124X, Vol. 3, No. 32, pp. 29-40.
- Mladenović N. and Hansen P. (1997): Variable neighbourhood search. *Computers & Operations Research*, Vol. 24, pp. 1097-1100.
- Municipality Of Athens (2003). Estimation, Evaluation and Planning of Actions for Municipal Solid Waste Services during Olympic Games 2004. Athens, Greece.
- Nilsson-Djerf J. (1999). Social Factors in Integrated Waste Management: Measuring the Social Elements of Sustainable Waste Management. Report available from European Recovery and Recycling Association, 83 Ave E. Mounier, Box 14, Brussels 1200, Belgium.
- O'Rourke K. (1999): Dynamic Unmanned Aerial Vehicle Routing with a Java Encoded Reactive Tabu Search Metaheuristic. MSc thesis, AFIT/GOA/ENS/99M-06. School of Engineering, Air Force Institute of Technology (AU), Wright-Patterson AFB OH.
- OECD (1997). Environmental Data Compendium. Organisation for Economic Cooperation and Development, Paris.
- OECD (2002). OECD Environmental Strategy for the First Decade of the 21st Century, Organization for Economic Co-operation and Development, Paris.
- OECD (2007). Factbook 2007 - Economic, Environmental and Social Statistics,
<http://lysander.sourceoecd.org/vl=1654340/cl=24/nw=1/rpsv/factbook/08-02-02.htm> (Accessed on April 2007)
- OECD/Eurostat, 1992, 1994, 1996 and 1998, 2002: Questionnaire on waste management.
- Orsoni A and Karadimas N.V. (2006): "Modelling and Simulation in Design-Build Projects: Current Issues and Challenges". *IJS3T International Journal*

- of Simulation: Systems, Science & Technology. United Kingdom Simulation Society, Vol. 7, No 9, pp 1-8.
- Orsoni A. and Karadimas N.V. (2006): "The Role of Modelling and Simulation in Design-Build Projects". In Borutzky W. Orsoni A. and Zobel R. (eds.): ECMS 2006 – Proceedings of the 20th European Conference on Modelling and Simulation. Bonn, Sankt Augustin , Germany, 28-31 May, ISBN: 0-9553018-0-7, pp. 315-320.
- Perlack R.D. and Willis C.E. (1985). Multiobjective decision-making in waste disposal planning. Journal of Environment Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 3, pp. 373-385.
- Pham D.T. and Karaboga D. (2000): Intelligent Optimisation Techniques: Genetic Algorithms, Tabu Search, Simulated Annealing and Neural Networks, Springer, ISBN 1-85233-028-7.
- Ramasamy S.M., Kumanan C.J. and Palanivel K. (2002). GIS-Based Solutions for Waste Disposals. GISdevelopment.net. <http://www.gisdevelopment.net/applications/miscellaneous/misc030.htm> (Accessed on October 2003).
- Ramuu N. and Kennedy W. (1994). Heuristic Algorithm to Locate Solid Waste Disposal Site. Journal of Urban Planning and Development, Vol. 120, pp. 14-21.
- Reeves C.R. (1995): Modern Heuristic Techniques for Combinatorial Problems. McGraw-Hill, Maidenhead, UK.
- Rigopoulos G and Karadimas N.V. (2007). "A Multiagent Model for Group Decision Support". ECMS 2007 – Proceedings of the 21th European Conference on Modelling and Simulation. Prague, Czech Republic, 4-6 June. [In Press, Corrected proof].
- Rigopoulos G., Karadimas N.V. and Orsoni A. (2006): "Multiagent Simulation for Business Decision Support in the Field of Electronic Payments". UKSIM 2006 - 9th International Conference on Computer Modelling and Simulation. Oriel College, Oxford, 4-6 April, pp 133-138.

- Rigopoulos G., Psarras J. and Karadimas N.V. (2006): "Multiagent Modeling and Simulation of Consumer Behavior Towards Payment System Selection". In Borutzky W. Orsoni A. and Zobel R. (eds.): ECMS 2006 – Proceedings of the 20th European Conference on Modelling and Simulation. Bonn, Sankt Augustin , Germany, 28-31 May, ISBN: 0-9553018-0-7, pp. 344-348.
- Rigopoulos G., Psarras J., Karadimas N.V. and Orsoni A. (2007): "Facilitatitng Group Decisions Through Multicriteria Analysis & Agent based Modeling". UKSIM 2007 - 10th International Conference on Computer Modelling and Simulation. Phuket, Thailand, 27-30 March, ISBN: 0-7695-2845-7/07, pp. 533-538.
- Sebastian M., Jayaraman V. and Chandrasekhar M.G. (1998). Facilities Management Using Remote Sensing Data In A GIS Environment. Acta Astronautica, Vol. 43, No. 9-10, pp. 487-491.
- Siddiqui M.Z., Everett J.W. and Vieux B.E. (1996). Landfill Siting Using Geographical Information Systems: a Demonstration. Journal of Environmental Engineering, Vol. 122, pp. 515-523.
- Simon J.L. (1996). The Ultimate Resource 2. Princeton University Press. Princeton, NJ.
- Small W.E (1971). Third pollution: The National Problem of Solid Waste Disposal. N.Y: Praeger.
- Sushil (1990). Waste Management: a system perspective. Industrial Management and Data Systems, Vol. 90, No. 5, pp. 7-66.
- Talbi E.G., Hafidi Z. and Geib J.M. (1998). A parallel adaptive tabu search approach. Parallel Computing, Vol. 24, pp. 2003–2019.
- Tchobanoglous G., Theisen H. and Vigil S. (1993). Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues. McGraw-Hill, Inc.: New York.
- Toulouse M., Crainic T.G., Sanso B. and Thulasiraman K. (1998): Self-organization in cooperative tabu search algorithms. IEEE International

- Conference on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 3, 11-14 Oct 1998, pp. 2379-2384.
- Tserng H.P., Veeramani D., Kunigahalli R. and Russell J.S. (1996). OPSALC: A computer-integrated operations planning system for autonomous landfill compaction. *Automation in Construction*, Vol. 5, pp. 39-50.
- TSPLIB (1997). Traveling Salesman Problem Library, <http://elib.zib.de/pub/mp-testdata/tsp/tsplib/tsplib.html> (Accessed on April 2006)
- UNDESA (1999). Sustainability through the Market – A Business-based Approach to Sustainable Consumption and Production. Background paper #11. Commission on Sustainable Development, Seventh Session, 19-30 April 1999, New York.
- UNDP (1998). Human Development Report 1998. Oxford University Press, for the United Nations Development Programme, p. 4.
- UNEP (1996). International Source Book on Environmentally Sound Technologies for Municipal Solid Waste Management. International Environmental Technology Centre Technical Publication Series (6). United Nations Environmental Programme.
- United Nations (2002). Report of the World Summit on Sustainable Development, Johannesburg, South Africa, 26 August-4 September 2002, <http://daccessdds.un.org/doc/UNDOC/GEN/N02/636/93/PDF/N0263693.pdf>, (Accessed on October 2006).
- Vijay R., Gupta A., Kalamdhad A.S. and Devotta S (2005). Estimation and allocation of solid waste to bin through geographical information systems. *Waste Management & Research*, Vol. 23, No. 5, pp. 479-484.
- WCED (1987). Our Common Future. World Commission on Environment and Development, Oxford University Press, Oxford.
- Καραδήμας Ν. και Λούμος Β. (2007). Ένα Δυναμικό Μοντέλο Συστήματος για Ακριβή Εκτίμηση της Παραγωγής των Αστικών Απορριμμάτων. Επιστημονικά

Δημοσιεύματα της Στρατιωτικής Σχολής Ευελπίδων (ΕΔ-ΣΣΕ), 3. [In Press, Corrected proof].

Κουτσόπουλος Κ. (2002). Γεωγραφικά Συστήματα Πληροφοριών και Ανάλυση Χώρου, Αθήνα.

Παναγιωτακόπουλος Δ. (2002). Βιώσιμη Διαχείριση Αστικών Στερεών Απόβλητων. Εκδόσεις Ζυγός, Θεσσαλονίκη.

ΥΠεΧωΔΕ (2001). Χώροι Υγειονομικής Ταφής Απορριμμάτων στην Ελλάδα. Υπουργείο Περιβάλλοντος, Χωροταξίας και Δημοσίων Έργων, Αναφορά III, Αθήνα.