ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Συνεργαζόμενοι Πληθυσμοί

ꕥ

Βελτίωση της απόδοσης Παράλληλων Γενετικών Αλγόριθμων χρησιμοποιώντας Συνεργαζόμενους Πληθυσμούς με Διαφορετικές Συμπεριφορές Εξέλιξης

Διδακτορική διατριβή
του
Παναγιώτη Αδαμίδη

Φυσικού, MSc. in Information Technology Systems

Θεσσαλονίκη, Δεκέμβριος 1996

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Κατάλογος Σχημάτων iv

Κατάλογος Συντμήσεων vi

ABSTRACT vii

ΠΕΡΙΛΗΨΗ viii

1. Εισαγωγή 1

1.1. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι 2

1.2. Γενετικοί Αλγόριθμοι 3

1.3. Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι 5

1.4. Κίνητρα και Στόχοι 5

1.5. Επισκόπηση της διατριβής 6

2. Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι 8

2.1. Εισαγωγή 8

2.2. Τυπική παράλληλη προσέγγιση 9

2.3. Προσέγγιση διαχωρισμού (The Decomposition Approach) 11

2.3.1. Χαμηλής Ανάλυσης Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι 12

2.3.2. Υψηλής Ανάλυσης Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι 18

2.3.3. Υβριδικοί Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι 23

2.3.4. Σύγκριση Απόδοσης Παράλληλων Γενετικών Αλγόριθμων 24

2.4. Εφαρμογές Παράλληλων Γενετικών Αλγόριθμων 25

3. Συνεργαζόμενοι Πληθυσμοί 27

3.1. Ορισμός του μοντέλου 27

3.2. Συνεργαζόμενοι πληθυσμοί επιπέδου 0 ($ΣΠ^0$) 30

3.3. Συνεργαζόμενοι πληθυσμοί επιπέδου 1 ($ΣΠ^1$) 32

4. Συνεργαζόμενοι Πληθυσμοί με Διαφορετικές Εξελικτικές Συμπεριφορές 35

4.1. Εισαγωγή 35

4.2. Ορισμός Εξελικτικής Συμπεριφοράς 36

4.3. Κίνητρα και Αναγκαιότητα των ΣΠΔΕΣ 36

4.4. Πλεονεκτήματα των ΣΠΔΕΣ 39

4.5. Διευθέτηση Υπο-πληθυσμών των ΣΠΔΕΣ 40

5. Υλοποίηση 41

5.1. Εισαγωγή 41
5.2. Συστήματα Παράλληλης Επεξεργασίας 41
5.3. Υλοποίηση των ΣΠΔΕΣ και του Μοντέλου Νησίδων 44
5.3.1. Διάταξη Αναπαραγωγής Επιπέδου 0 του Μοντέλου Νησίδων 47
5.3.2. Διάταξη Αναπαραγωγής Επιπέδου 0 των ΣΠΔΕΣ 48

6. Προσομοιώσεις 51
6.1. Περιγραφή των Προβλημάτων 51
6.1.1. Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων 52
6.1.2. Βελτιστοποίηση Συνάρτησης Rastrigin 53
6.1.3. Πρόβλημα του Περιοδεύοντος Πωλητή 54
6.2. Αποτελέσματα Προσομοιώσεων 56
6.2.1. Εκπαίδευση Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων 57
6.2.2. Βελτιστοποίηση Συνάρτησης Rastrigin 61
6.2.3. Πρόβλημα του Περιοδεύοντος Πωλητή 67
7. Συμπεράσματα 72
Βιβλιογραφία 76
Παράρτημα Α: Απόδοση Όρων 86
Παράρτημα Β: Πρόβλημα Περιοδεύοντος Πωλητή 88
Παράρτημα Γ: Περιγραφή του Transputer IMS T800 90
Παράρτημα Δ: Περιγραφή της κάρτας Fast9 93
Παράρτημα Ε: Περιληπτική περιγραφή της 3L Parallel C 98
Παράρτημα ΣΤ: Αρχεία Διαμόρφωσης (Configuration Files) 103
Α. Περιεχόμενα του αρχείου διαμόρφωσης της τοπολογίας σύνδεσης των transputers 103
Β. Αρχεία διαμόρφωσης των παράλληλων υλοποιήσεων. 104
Παράρτημα Ζ: Οδηγίες Χρήσης Προγραμμάτων 112
Α. Περιγραφή των αρχείων 112
Β. Εκτέλεση των προσομοιώσεων 115

Κατάλογος Σχημάτων

Α/Α	Περιγραφή	Σελίδα
1.1	Τυπική διαδικασία Εξελικτικού Αλγόριθμου	3
2.1	Πρότυπο Συντονιστή/Εργαζόμενου ΠΓΑ	10
2.2	Τοπολογία μετανάστευσης πλήρους διασύνδεσης	13
2.3	Τοπολογία μετανάστευσης δακτυλίου	13
2.4	Τοπολογία μετανάστευσης γειτονιάς (Διδιάστατη υλοποίηση)	13
2.5	Δομή γραμμικής γειτονιάς	19
2.6	Διδιάστατη γειτονιά: (α) πλήρους-ημίσεος σταυρού, (β) πλήρους-ημίσεος αστέρα	19
2.7	Εμφάνιση νησίδων στο μοντέλο διάχυσης	20
5.1	Κύριοι τύποι παράλληλων αρχιτεκτονικών	42
5.2	Τοπολογία σύνδεσης των transputer	44
6.1	Τοπολογία Αναδρομικού Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου	52
6.2	Κατανομή των ελαχίστων για την συνάρτηση Rastrigin	54
6.3	Επιτυχή πειράματα για τους ΣΠΔΕΣ και το μοντέλο Νησίδων (ΑΤΝΔ)	57
6.4	Πειράματα που έμειναν σε τοπικά βέλτιστα. (ΑΤΝΔ)	58
6.5	Πειράματα που σταμάτησαν λόγω ορίου γενεών. (ΑΤΝΔ)	58
6.6	Μέσος αριθμός γενεών για τα επιτυχή πειράματα (ΑΤΝΔ)	59
6.7	Επιτυχή πειράματα των ΣΠΔΕΣ (100 και 200 άτομα ανά πληθυσμό)	59
6.8	Μέσος αριθμός γενεών των ΣΠΔΕΣ (100 και 200 άτομα ανά πληθυσμό)	60
6.9	Μέσος αριθμός ωρών ανά πείραμα (ΑΤΝΔ)	60
6.10	Απόδοση των ΣΠΔΕΣ και του μοντέλου νησίδων για διάφορα μεγέθη υπο-πληθυσμών (Συνάρτηση Rastrigin)	62
6.11	Μέσος αριθμός γενεών για διάφορα μεγέθη υπο-πληθυσμών (Συνάρτηση Rastrigin)	63
6.12	Μέσος αριθμός ωρών ανά πείραμα (Συνάρτηση Rastrigin)	64
6.13	Βελτίωση του μέσου λάθους για το μοντέλο νησίδων (Συνάρτηση Rastrigin)	65
6.14	Βελτίωση του μέσου λάθους για τους ΣΠΔΕΣ (Συνάρτηση Rastrigin)	66

6.15	Απόδοση των ΣΠΔΕΣ και του μοντέλου νησίδων για διάφορα μεγέθη υπο-πληθυσμών στο πρόβλημα TSP	68
6.16	Μέσος αριθμός γενεών για διάφορα μεγέθη υπο-πληθυσμών στο πρόβλημα TSP	69
6.17	Σύγκριση απόδοσης διαφορετικών μεγεθών υπο-πληθυσμού των ΣΠΔΕΣ και του μοντέλου νησίδων για διάφορες τιμές *εποχής* στο πρόβλημα TSP	70
6.18	Μέσος αριθμός ωρών ανά πείραμα (TSP)	71
Γ1	Διάγραμμα του INMOS T800 Transputer	90
Δ1	Κάρτα Fast9	93
Δ2	Host Interface	93
Δ3	Master	94
Δ4	Slaves	94
Δ5	Link Exchange	95
Δ6	Μόνιμη τοπολογία των Transputers στην κάρτα Fast9	95
Δ7	Τοπολογία πλέγματος	97
Ε1	Διεργασία (Task)	100

Κατάλογος Συντμήσεων

Ελληνικοί Όροι

ΑνΠ	Ανάθεση Πληθυσμών
ΓΑ	Γενετικοί Αλγόριθμοι
ΔοΓ	Δομή Γειτονιάς
ΕΑ	Εξελικτικοί Αλγόριθμοι
ΜεΓ	Μέγεθος Γειτονιάς
ΜεΠ	Μέγεθος Πληθυσμού
ΠΓΑ	Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι
ΣΓΑ	Σειριακοί Γενετικοί Αλγόριθμοι
ΣΠ	Συνεργαζόμενοι Πληθυσμοί
ΣΠΔΕΣ	Συνεργαζόμενοι Πληθυσμοί με Διαφορετικές Εξελικτικές Συμπεριφορές
υαΠΓΑ	Υψηλής Ανάλυσης Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι
χαΠΓΑ	Χαμηλής Ανάλυσης Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι

Αγγλικοί Όροι

CoP	Co-operating Populations
CoPDEB	Co-operating Populations with Different Evolution Behavior
GAs	Genetic Algorithms
MIMD	Multiple Instructions Multiple Data
PVM	Parallel Virtual Machine
RANN	Recurrent Artificial Neural Network
SGA	Serial Genetic Algorithm
TSP	Travelling Salesperson Problem

ABSTRACT

Genetic Algorithms (GAs) are stochastic search techniques that explore combinatorial search spaces using simulated evolution (Holland, 1975). The effectiveness of GAs, is limited by their ability to balance the need for a diverse set of sampling points with the desire to quickly focus search upon potential solutions. Exploration is achieved through the recombination of data structures (which represent candidate solutions). The data structures constitute the population of the GA which is evolved towards the optimum, concentrating search in those areas of higher fitness (exploitation). Recombination and mutation perturb the individuals of the population providing general heuristics for exploration.

The objective of this thesis is twofold. First, a framework for unifying Simple and Parallel Genetic Algorithm implementations is introduced. A recursive model at different levels is defined (*Co-operating populations*) offering an engine to implement any type of GA in any kind of hardware layout, including simple GAs, fine-grained and coarse-grained PGAs (cgPGAs). Following the definition one has a range of various population structures, selection methods, parameters, operators and mechanisms to choose. Theoretical analysis cannot provide a tool that can help the appropriate choice of these, leaving the selection of the appropriate operators, parameters and their rates, to depend on the demands of the problem and on the user's experience and aesthetic preferences.(Davis, 1989; Davis, 1991; Schaffer, Caruana, Eshelman & Das, 1989; Srinivas & Patnaik, 1994; Bäck, 1994).

Although separating individuals into independent populations is a natural way to achieve a better balance of exploration and exploitation for a particular problem, the above problem of choice still remains. Common PGA paradigms are described throughout the literature and use the same evolution behaviour on each population. One still has to optimize the evolutionary algorithm running on each population trying to select the most appropriate operators, parameters, mechanisms and communication methods. The level one of Co-operating Populations can represent any implementation of cgPGAs.

The second objective of this thesis is to propose and establish a method for overcoming the problem of choice, using a variety of selection mechanisms, operators, communication methods, and parameters. The optimization method is called *Co-operating Populations with Different Evolution Behaviours (CoPDEB)*, and uses different evolution behaviour on each population to overcome the problem of operator selection and improve the performance of cgPGAs. In CoPDEB a number of populations co-evolve on different processors. Thus we can integrate a variety of tools, in the same evolutionary engine, which match well the properties of different parts of the search space, improving the exploration and exploitation of the search space.

A function proposed by Rastrigin (Törn & Zilinskas, 1989) was used to study some of the characteristics of the proposed method. We also tested our results in training a fully connected Recurrent Artificial Neural Network as a pattern generator and solving the TSP problem. Our results from these three problems show that CoPDEB significantly outperforms cgPGAs where each population evolves using the same operators, parameters, and mechanisms.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Γ.Α.) είναι στοχαστικές τεχνικές αναζήτησης οι οποίες διερευνούν πολύπλοκους χώρους προσομοιώνοντας τεχνικές φυσικής εξέλιξης (Holland, 1975). Η αποτελεσματικότητα των Γ.Α., περιορίζεται από την δυνατότητά τους να ισορροπήσουν την ανάγκη ύπαρξης ενός ευρέως συνόλου διαφορετικών σημείων δειγματοληψίας με την επιθυμία να εστιάσουν σύντομα σε πιθανές λύσεις.

Η διερεύνηση του χώρου επιτυγχάνεται με τον ανασυνδυασμό δομών δεδομένων (οι οποίες αναπαριστούν υποψήφιες λύσεις). Οι δομές δεδομένων αποτελούν τον πληθυσμό των Γ.Α., ο οποίος εξελίσσεται προς το βέλτιστο, εστιάζοντας την έρευνα στις καταλληλότερες περιοχές (εκμετάλλευση/exploitation). Ο ανασυνδυασμός (recombination/ crossover) και η μετάλλαξη (mutation) διαταράσσουν τις δομές δεδομένων οι οποίες αποτελούν τα άτομα του πληθυσμού παρέχοντας γενικές ευριστικές κατευθυντήριες γραμμές για την διερεύνηση του χώρου.

Ο στόχος αυτής της διατριβής είναι διττός. Αρχικά, εισάγεται ένα πλαίσιο για την ενοποίηση των απλών σειριακών και παράλληλων γενετικών αλγόριθμων. Ορίζεται ένα επαναληπτικό μοντέλο σε διάφορα διακριτά επίπεδα (*Συνεργαζόμενοι πληθυσμοί*) προσφέροντας μια μηχανή υλοποίησης οιουδήποτε τύπου εξελικτικού αλγορίθμου σε οιουδήποτε υπολογιστικό σύστημα, συμπεριλαμβάνοντας σειριακούς και παράλληλους Γ.Α. (ΠΓΑ). Ακολουθώντας τον ορισμό δίνεται η δυνατότητα επιλογής ενός εύρους διαφόρων δομών πληθυσμών (population structures), μεθόδων επιλογής (selection methods), παραμέτρων, τελεστών και μηχανισμών. Η θεωρητική ανάλυση που υπάρχει στο χώρο των εξελικτικών αλγόριθμων δεν παρέχει ένα εργαλείο που μπορεί να βοηθήσει στην κατάλληλη παραμετροποίησή τους, αφήνοντας την επιλογή των κατάλληλων τελεστών παραμέτρων και τιμών τους να εξαρτάται από τις απαιτήσεις του προβλήματος και την εμπειρία και τις προτιμήσεις του χρήστη (Davis, 1989; Davis, 1991; Schaffer, Caruana, Eshelman & Das, 1989; Srinivas & Patnaik, 1994; Bäck, 1994).

Αν και ο χωρισμός των ατόμων σε ανεξάρτητους πληθυσμούς είναι ένας φυσικός τρόπος να επιτευχθεί καλύτερη εξισορρόπηση μεταξύ διερεύνησης και εκμετάλλευσης για κάποιο πρόβλημα, το παραπάνω πρόβλημα της παραμετροποίησης των εξελικτικών αλγόριθμων παραμένει. Οι συνήθεις τρόποι υλοποίησης των ΠΓΑ που περιγράφονται στην βιβλιογραφία χρησιμοποιούν την ίδια εξελικτική συμπεριφορά σε κάθε πληθυσμό. Σε αυτό το πλαίσιο πρέπει πάλι να βελτιστοποιηθεί ο αλγόριθμος εξέλιξης κάθε πληθυσμού, διαλέγοντας τους πιο κατάλληλους τελεστές, παραμέτρους, μηχανισμούς και μεθόδους επικοινωνίας των πληθυσμών. Το πρώτο επίπεδο των συνεργαζόμενων πληθυσμών μπορεί να αναπαραστήσει οποιαδήποτε υλοποίηση των χαμηλής ανάλυσης ΠΓΑ.

Ο δεύτερος στόχος της διατριβής είναι να προτείνει και να επικυρώσει μια μέθοδο βελτιστοποίησης η οποία ξεπερνά το παραπάνω πρόβλημα επιλογής χρησιμοποιώντας μια ποικιλία

παραμέτρων, τελεστών, μηχανισμών και μεθόδων επικοινωνίας. Η μέθοδος βελτιστοποίησης ονομάζεται *"Συνεργαζόμενοι Πληθυσμοί με Διαφορετικές Εξελικτικές Συμπεριφορές - ΣΠΔΕΣ (Co-operating Populations with Different Evolution Behaviours - CoPDEB)"*, και χρησιμοποιεί διαφορετική εξελικτική συμπεριφορά σε κάθε πληθυσμό για να ξεπεράσει το πρόβλημα της επιλογής και να βελτιώσει την απόδοση των ΠΓΑ. Στην μέθοδο *ΣΠΔΕΣ,* ένας αριθμός πληθυσμών συν-εξελίσσεται σε διαφορετικούς επεξεργαστές. Έτσι μπορούμε να ολοκληρώσουμε μια ποικιλία εργαλείων στην ίδια εξελικτική μηχανή, τα οποία είναι κατάλληλα για την διερεύνηση διαφορετικών περιοχών του χώρου λύσεων, βελτιώνοντας την διερεύνηση και εκμετάλλευση του.

Μία συνάρτηση που προτάθηκε από τον Rastrigin (Törn & Zilinskas, 1989) χρησιμοποιήθηκε για την μελέτη των χαρακτηριστικών της προτεινόμενης μεθόδου. Η απόδοση του μοντέλου ελέγχθηκε και επιβεβαιώθηκε επίσης και στο πρόβλημα εκπαίδευσης ενός πλήρως συνδεμένου Αναδρομικού Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου ως γεννήτριας προτύπων, καθώς επίσης και στο πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή (Travelling Salesperson Problem - TSP). Τα αποτελέσματα από τα τρία αυτά προβλήματα δείχνουν ότι η μέθοδος ΣΠΔΕΣ υπερισχύει σημαντικά των ΠΓΑ όπου κάθε πληθυσμός εξελίσσεται χρησιμοποιώντας τους ίδιους τελεστές, μηχανισμούς και παραμέτρους.

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η φύση επιδεικνύει εκπληκτική πολυπλοκότητα και ποικιλία σε όλες τις εκδηλώσεις της. Χαρακτηριστικά αναφέρονται τα πολύπλοκα κοινωνικά συστήματα, το ανοσοποιητικό και το νευρικό σύστημα των ειδών της, καθώς και οι πολύπλοκες σχέσεις που τα διέπουν. Καθώς αυξάνει η ικανότητά μας να εξετάζουμε τους εαυτούς μας και τον κόσμο γύρω μας, οι εκδηλώσεις αυτές γίνονται όλο και πιο εμφανείς. Η επιστήμη αποτελεί ένα διαρκώς μεταβαλλόμενο σύστημα κανόνων και πεποιθήσεων, το οποίο επιχειρεί να εξηγήσει τις παρατηρήσεις μας. Είναι αξιοσημείωτο ότι μία και μόνο επιστημονική θεωρία, η θεωρία της εξέλιξης μέσω της ποικιλίας και της επιλογής, περιγράφει και επεξηγεί τόσο πολλές εκδηλώσεις του κόσμου που μας περιβάλλει.

Η εξέλιξη μέσω της φυσικής επιλογής, με την τυχαία αναζήτηση στο χώρο των πιθανών αλυσίδων DNA, έχει καθιερωθεί σαν ένας ισχυρός μηχανισμός για την προβολή και την βελτίωση των οργανισμών. Αν και σε αρκετές περιπτώσεις πολλές παράμετροι της εξέλιξης ερευνούνται ακόμη, οι βασικοί μηχανισμοί της εξέλιξης μπορούν να επεξηγήσουν ένα μεγάλο εύρος συμπεριφορών και φαινομένων που παρατηρούνται στον φυσικό κόσμο. Κάτω από αυτές τις προυποθέσεις, δεν είναι περίεργο που πολλοί επιστήμονες χρησιμοποιούν την φυσική εξέλιξη σαν πηγή έμπνευσης. Η πιθανότητα ένα υπολογιστικό σύστημα, εμπλουτισμένο με απλούς μηχανισμούς επιλογής και αναπαραγωγής, να επιδείξει ικανότητες εξέλιξης ανάλογες με αυτές των φυσικών συστημάτων είναι μια ιδέα ιδιαίτερα ελκυστική.

Μία από τις δυσκολίες υλοποίησης αυτής της ιδέας είναι ότι η εξέλιξη των φυσικών συστημάτων είναι μη κατευθυνόμενη, ενώ η δικιά μας δραστηριότητα είναι κατ'ουσίαν έντονα κατευθυνόμενη. Χρησιμοποιούμε τον Η/Υ σαν εργαλείο επίλυσης προβλημάτων και δίνουμε μεγάλη έμφαση στην όσο το δυνατόν ταχύτερη επίλυση τους με την ελάχιστη δυνατή σπατάλη πόρων. Τα φυσικά συστήματα δεν έχουν τέτοιο στόχο ή τέτοιους περιορισμούς. Η επιβίωση δεν είναι κατευθυνόμενη σε κάποιο προκαθορισμένο σταθερό στόχο. Θεωρούμε ότι οι προσπάθειες υλοποίησης αυτής της ιδέας, μπορούν να χωριστούν σε δύο ευρείες κατηγορίες:

- Χρήσιμα συστήματα τα οποία είναι ελάχιστα βασισμένα σε βιολογικές αρχές. Τα συστήματα αυτά είναι κατασκευασμένα για την επίλυση συγκεκριμένων προβλημάτων,

όπως η βελτιστοποίηση συναρτήσεων. Επίσης, είναι δυνατόν να περιγραφούν εύκολα με μή-βιολογικούς όρους και αρκετές φορές έχουν απόδοση χειρότερη από άλλους αλγόριθμους οι οποίοι δεν έχουν σχέση με τα φυσικά συστήματα και την βιολογία.

- Συστήματα τα οποία έχουν περισσότερα βιολογικά χαρακτηριστικά, αλλά δεν έχουν αποδειχτεί ιδιαίτερα χρήσιμα. Αυτά είναι πιο πιστά στα βιολογικά συστήματα και είναι πολύ λιγότερο (ή καθόλου) κατευθυνόμενα. Επιδεικνύουν σύνθετη και ενδιαφέρουσα συμπεριφορά, αλλά πρέπει να αποδείξουν και την πρακτική χρησιμότητά τους

Φυσικά στην πράξη ο διαχωρισμός δεν είναι τόσο ξεκάθαρος. Αυτές είναι δύο γενικές κατηγορίες μεταξύ των οποίων βρίσκονται ποικίλα υπολογιστικά συστήματα. Κοντά στην πρώτη κατηγορία βρίσκονται οι *Εξελικτικοί Αλγόριθμοι*, όπως οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, οι Στρατηγικές Εξέλιξης και ο Εξελικτικός Προγραμματισμός. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν συστήματα που περιγράφονται με τον όρο "*Τεχνητή Ζωή*".

1.1. Εξελικτικοί Αλγόριθμοι

Τις δύο τελευταίες δεκαετίες υπάρχει ένα διαρκώς αυξανόμενο ενδιαφέρον για αλγόριθμους οι οποίοι είναι βασισμένοι στις αρχές της εξέλιξης. Υπάρχει μία ποικιλία εξελικτικών υπολογιστικών μοντέλων τα οποία αναφέρονται με τον όρο "*Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (ΕΑ)*". Οι ΕΑ είναι στοχαστικοί αλγόριθμοι οι οποίοι χρησιμοποιούν μεθόδους αναζήτησης βασισμένους στη φυσική εξέλιξη των ειδών. Είναι γενικά αποδεκτό ότι οποιοσδήποτε ΕΑ πρέπει να διαθέτει πέντε βασικά στοιχεία:

- γενετική αναπαράσταση των λύσεων του προβλήματος,
- κάποια μέθοδο δημιουργίας του αρχικού πληθυσμού λύσεων,
- κάποια μέθοδο (συνάρτηση) υπολογισμού της ποιότητας των λύσεων,
- γενετικούς τελεστές οι οποίοι μεταβάλουν τον τρέχοντα πληθυσμό δημιουργώντας την νέα γενιά κατά την διάρκεια της αναπαραγωγής και
- τιμές για τις παραμέτρους (μέγεθος πληθυσμού, πιθανότητες εφαρμογής των γενετικών τελεστών, κλπ.)

Πιο συγκεκριμένα, οι ΕΑ διατηρούν ένα πληθυσμό δομών (άτομα-λύσεις) οι οποίες εξελίσσονται σύμφωνα με κάποιους κανόνες που αφορούν την επιλογή και τους άλλους γενετικούς τελεστές, όπως ο ανασυνδυασμός και η μετάλλαξη. Σε κάθε άτομο ανατίθεται μία τιμή ποιότητας. Η επιλογή εστιάζει στα άτομα με την καλύτερη τιμή ποιότητας. Οι γενετικοί τελεστές μεταβάλλουν τα άτομα παρέχοντας την δυνατότητα αναζήτησης του χώρου λύσεων. Αν και από βιολογικής άποψης οι αλγόριθμοι αυτοί είναι εξαιρετικά απλοποιημένοι, είναι αρκετά σύνθετοι ώστε να παράσχουν έναν αρκετά ισχυρό και πολύ χρήσιμο μηχανισμό αναζήτησης. Το σχήμα 1.1 περιγράφει την διαδικασία ενός τυπικού ΕΑ.

```
διαδικασία ΕΑ {
    t=0
    Αρχικοποίηση πληθυσμού Π(t)
    Υπολογισμός ποιότητας του Π(t)
    Επανέλαβε {
        t=t+1;
        Επιλογή γονέων Π(t) από τον πληθυσμό Π(t-1)
        Μεταβολή/Εξέλιξη του πληθυσμού Π(t)
        Υπολογισμός ποιότητας του Π(t)
    } μέχρι την εκπλήρωση του κριτηρίου τέλους
}
```

Σχήμα 1.1. Τυπική διαδικασία Εξελικτικού Αλγόριθμου

Όπως έχει ήδη αναφερθεί οι γνωστότερες μεθοδολογίες ΕΑ είναι οι:

- ***Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ - Genetic Algorithms)***, οι οποίοι προτάθηκαν από τον Holland (1975). Συνήθως χρησιμοποιούν δυαδική αναπαράσταση η οποία είναι σχετικά ανεξάρτητη από το πρόβλημα. Ο ανασυνδυασμός είναι ο κύριος γενετικός τελεστής. Η μετάλλαξη αναστρέφει τα δυαδικά ψηφία με κάποια πιθανότητα και θεωρείται δευτερεύων τελεστής.
- ***Εξελικτικές Στρατηγικές (ΕΣ - Evolution Strategies)***, οι οποίες προτάθηκαν από τον Rechenberg (1973), με επιλογή, μετάλλαξη και μέγεθος πληθυσμού ένα. Ο Schwefel (1981) εισήγαγε τον ανασυνδυασμό και πληθυσμούς με περισσότερα του ενός μέλη. Τυπικά, οι ΕΣ χρησιμοποιούν κωδικοποίηση με πραγματικές τιμές. Η μετάλλαξη είναι πολύ σημαντική. Ο αριθμός των παιδιών που αναπαράγονται είναι μεγαλύτερος του πληθυσμού των γονέων και γίνεται επιλογή των παιδιών που θα επιβιώσουν.
- ***Εξελικτικός Προγραμματισμός (ΕΠ - Evolutionary Programming)***, που αναπτύχθηκε από τον Fogel (1966). Χρησιμοποιεί κωδικοποίηση προσαρμοσμένη στο πρόβλημα. Η μετάλλαξη είναι ο κύριος γενετικός τελεστής. Ο ανασυνδυασμός χρησιμοποιείται σπάνια. Η μορφή της μετάλλαξης εξαρτάται από την αναπαράσταση που χρησιμοποιείται και συχνά είναι προσαρμόσιμη.

Αν και υπάρχουν πάρα πολλά υβριδικά συστήματα τα οποία συμπεριλαμβάνουν στοιχεία των ανωτέρω μεθοδολογιών, όλοι οι εξελικτικοί αλγόριθμοι είναι αρκετά όμοιοι.

1.2. Γενετικοί Αλγόριθμοι

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (ΓΑ) είναι αλγόριθμοι γενικής βελτιστοποίησης και αναζήτησης γενικής εφαρμογής. Βασίζονται σε αρχές εμπνευσμένες από τους πραγματικούς μηχανισμούς της γενετικής και της εξέλιξης των ειδών που διέπουν τα φυσικά βιολογικά συστήματα.

Οι ΓΑ χρησιμοποιούν ένα πληθυσμό αλυσίδων δυαδικών ψηφίων, που εξελίσσονται για πολλές γενιές, μέχρι να βρεθεί μία καλή λύση, ή μετά από κάποιο χρόνο. Οι αλυσίδες χαρακτήρων αντιπροσωπεύουν πιθανές λύσεις και ονομάζονται *χρωμοσώματα*, χρησιμοποιώντας τον αντίστοιχο βιολογικό όρο.

Μία πιθανή λύση του προβλήματος μπορεί να αναπαρασταθεί ως ένα σύνολο παραμέτρων. Αυτές οι παράμετροι (*γονίδια*) ενώνονται για να σχηματίσουν ένα άτομο (*χρωμόσωμα*) του συνολικού πληθυσμού. Στην βιολογία, το σύνολο των παραμέτρων που αναπαριστούν ένα χρωμόσωμα αναφέρεται ως *γονότυπος*. Ο γονότυπος περιέχει τις πληροφορίες που απαιτούνται για την σύνθεση ενός οργανισμού, ο οποίος αναφέρεται ως *φαινότυπος*. Οι ίδιοι όροι χρησιμοποιούνται και στους ΓΑ. Η ποιότητα του ατόμου υπολογίζεται από το χρωμόσωμα, χρησιμοποιώντας την συνάρτηση ποιότητας.

Για κάθε πρόβλημα είναι απαραίτητη η δημιουργία μιας συνάρτησης ποιότητας. Η συνάρτηση ποιότητας επιστρέφει μία αριθμητική τιμή η οποία αντιπροσωπεύει την ποιότητα του ατόμου. Για πολλά προβλήματα, όπως η βελτιστοποίηση συναρτήσεων, η συνάρτηση ποιότητας είναι απλή και είναι εμφανής ο τρόπος υπολογισμού της τιμής της. Σε άλλες όμως περιπτώσεις όπως τα συνδυαστικά προβλήματα η συνάρτηση ποιότητας είναι πολύπλοκη και δύσκολο να δημιουργηθεί.

Το επόμενο βήμα είναι ο καθορισμός του τρόπου επιλογής των γονέων προς αναπαραγωγή. Ο σκοπός της επιλογής είναι η εστίαση στα ικανότερα άτομα του πληθυσμού με την προσδοκία η ποιότητα των απογόνων τους να είναι ακόμη καλύτερη. Εάν η επιλογή είναι έντονα εστιασμένη υπέρ των καλύτερων ατόμων, τότε κάποια άτομα θα καταλάβουν τον πληθυσμό, ελαττώνοντας την απόκλιση του πληθυσμού και οδηγώντας στην πρόωρη σύγκλιση σε κάποιο τοπικό βέλτιστο. Η απόκλιση του πληθυσμού είναι απαραίτητη για την παραπέρα αλλαγή και βελτίωση του πληθυσμού. Αντίθετα, όταν η επιλογή είναι πολύ λίγο εστιασμένη στην επιλογή των καλύτερων ατόμων, τότε η βελτίωση του πληθυσμού είναι πολύ αργή.

Μία άλλη απόφαση αφορά τους τελεστές που θα χρησιμοποιηθούν κατά την αναπαραγωγή της νέας γενιάς. Οι δύο βασικοί τελεστές είναι ο ανασυνδυασμός και η μετάλλαξη. Ο ανασυνδυασμός είναι ο τελεστής που διαχωρίζει τους ΓΑ. Η ιδέα είναι ο ανασυνδυασμός τμημάτων των αλυσίδων δυαδικών ψηφίων διαφορετικών ατόμων. Ο ανασυνδυασμός μπορεί να είναι ενός ή περισσοτέρων σημείων. Παραδοσιακά, η μετάλλαξη θεωρείται δευτερεύον τελεστής, γεγονός που έχει αρχίσει να αλλάζει με την αυξανόμενη αξιοποίηση της μετάλλαξης ως γενετικού τελεστή.

Η επόμενη απόφαση αφορά τις παραμέτρους των τελεστών. Τυπικά οι παράμετροι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η βελτιστοποίηση των τιμών τους μία-μία. Ένα μεγάλο μέρος της έρευνας αφορά τον καθορισμό των παραμέτρων και την δυνατότητα προσαρμογής τους. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχουν κάποια συμπεράσματα που να αφορούν την βέλτιστη παραμετροποίηση των τελεστών.

Η τελική απόφαση αφορά την χρήση ενός συνόλου από τεχνικές οι οποίες έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί για να βελτιώσουν την απόδοσή των ΓΑ. Αυτές περιλαμβάνουν την

διατήρηση του καλύτερου σε απόδοση ατόμου μίας γενιάς και στην επόμενη (ελιτισμός - elitism), την κλιμάκωση της ποιότητας (fitness scaling) κλπ.

Η δύναμη των ΓΑ οφείλεται στο γεγονός ότι είναι ιδιαίτερα προσαρμόσιμοι, σταθεροί και μπορούν να εφαρμοστούν επιτυχώς σε ένα μεγάλο εύρος προβλημάτων και ειδικότερα σε προβλήματα τα οποία άλλες μέθοδοι αδυνατούν να αντιμετωπίσουν. Οι ΓΑ δεν εγγυώνται την εύρεση του ολικού βέλτιστου, αλλά είναι καλοί στην εύρεση μιας αποδεκτά καλής λύσης σε σχετικά λογικό χρόνο.

1.3. Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι

Για κάποιους ερευνητές, ένας Παράλληλος Γενετικός Αλγόριθμος (ΠΓΑ) είναι ένα εξελικτικό μοντέλο το οποίο είναι ανεξάρτητο από το υλικό στο οποίο θα υλοποιηθεί, ενώ για άλλους είναι μία μορφή προγραμματισμού η οποία εκμεταλλεύεται τους παράλληλους Η/Υ για να μειώσει τον χρόνο επίλυσης ενός προβλήματος και για άλλους είναι και τα δύο.

Η διαθεσιμότητα γρήγορων και φθηνών παράλληλων Η/Υ, κάνει δυνατή την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων σε δύσκολα και σύνθετα προβλήματα στα οποία γενικώς απαιτείται η χρήση μεγάλων πληθυσμών. Επίσης, μερικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι συμβατικοί Γ.Α. (όπως η πρόωρη σύγκλιση και η διερεύνηση χώρων με πολλαπλά βέλτιστα) μπορούν να αντιμετωπιστούν πιο αποτελεσματικά με την χρήση των ΠΓΑ.

Δύο είναι οι βασικές προσεγγίσεις στην υλοποίηση των ΠΓΑ: η τυπική παράλληλη προσέγγιση (standard or global parallelization), όπου ο παράλληλος Η/Υ χρησιμοποιείται για να υλοποιηθεί συνήθως ένας σειριακός Γ.Α. και η προσέγγιση διαχωρισμού (decomposition approach), με τον ΠΓΑ σαν ιδιαίτερο μοντέλο Γ.Α. Μία πλήρης ανάλυση του χώρου των ΠΓΑ υπάρχει στο δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας διατριβής.

1.4. Κίνητρα και Στόχοι

Υπάρχουν πάρα πολλές διαφορετικές υλοποιήσεις των ΠΓΑ, που εξαρτώνται τόσο από το διαθέσιμο Η/Υ, όσο και από το συγκεκριμένο πρόβλημα. Ένα από τα κίνητρα αυτής της διατριβής ήταν ο κατακερματισμός των υλοποιήσεων και η μή ύπαρξη ενός κοινού μοντέλου.

Ένας από τους στόχους αυτής της διατριβής είναι η δημιουργία ενός πλαισίου ενοποίησης των απλών σειριακών και παράλληλων γενετικών αλγόριθμων. Αρχικά η συμβολή αυτής της διατριβής έγκειται στον ορισμό ενός επαναληπτικού μοντέλου σε διάφορα διακριτά επίπεδα (*Συνεργαζόμενοι Πληθυσμοί*) προσφέροντας ένα εργαλείο υλοποίησης οιουδήποτε τύπου εξελικτικού αλγόριθμου σε οιοδήποτε υπολογιστικό σύστημα, συμπεριλαμβάνοντας σειριακούς

και παράλληλους Γ.Α. Ακολουθώντας τον ορισμό παρέχεται στον ερευνητή η δυνατότητα να υλοποιήσει το συγκεκριμένου μοντέλου ΓΑ που επιθυμεί μέσω της επιλογής διαφόρων δομών πληθυσμών, μεθόδων επιλογής, παραμέτρων, τελεστών και μηχανισμών.

Η θεωρητική ανάλυση που υπάρχει στο χώρο των εξελικτικών αλγόριθμων δεν παρέχει ένα εργαλείο που μπορεί να βοηθήσει στην κατάλληλη παραμετροποίησή τους, αφήνοντας την επιλογή των κατάλληλων τελεστών, παραμέτρων και μηχανισμών να εξαρτάται από τις απαιτήσεις του προβλήματος και την εμπειρία και τις προτιμήσεις του χρήστη. Το γεγονός αυτό αποτελεί ένα ακόμη κίνητρο για την διεξαγωγή αυτής της έρευνας.

Αν και ο χωρισμός των ατόμων σε ανεξάρτητους πληθυσμούς είναι ένας φυσικός τρόπος να επιτευχθεί καλύτερη εξισορρόπηση μεταξύ διερεύνησης και εκμετάλλευσης για κάποιο πρόβλημα, το παραπάνω πρόβλημα της παραμετροποίησης των εξελικτικών αλγόριθμων παραμένει. Οι συνήθεις τρόποι υλοποίησης των ΠΓΑ που περιγράφονται στην βιβλιογραφία χρησιμοποιούν την ίδια εξελικτική συμπεριφορά σε κάθε πληθυσμό. Σε αυτό το πλαίσιο πρέπει πάλι να βελτιστοποιηθεί ο αλγόριθμος εξέλιξης κάθε πληθυσμού, διαλέγοντας τους πιο κατάλληλους τελεστές, παραμέτρους, μηχανισμούς και μεθόδους επικοινωνίας των πληθυσμών. Το πρώτο επίπεδο των συνεργαζόμενων πληθυσμών μπορεί να αναπαραστήσει οποιαδήποτε υλοποίηση των χαμηλής ανάλυσης ΠΓΑ.

Μία ακόμη συμβολή της διατριβής αποτελεί ο δεύτερος στόχος της που είναι να προτείνει και να επιβεβαιώσει μέσω προσομοιώσεων, μία μέθοδο βελτιστοποίησης η οποία ξεπερνά το παραπάνω πρόβλημα επιλογής χρησιμοποιώντας μια ποικιλία παραμέτρων, τελεστών, μηχανισμών και μεθόδων επικοινωνίας. Η μέθοδος βελτιστοποίησης ονομάζεται *"Συνεργαζόμενοι Πληθυσμοί με Διαφορετικές Εξελικτικές Συμπεριφορές - ΣΠΔΕΣ (Co-operating Populations with Different Evolution Behaviours - CoPDEB)"*, και χρησιμοποιεί διαφορετική εξελικτική συμπεριφορά σε κάθε πληθυσμό για να ξεπεράσει το πρόβλημα της επιλογής και να βελτιώσει την απόδοση των ΠΓΑ. Στην μέθοδο *ΣΠΔΕΣ,* ένας αριθμός πληθυσμών συν-εξελίσσεται σε διαφορετικούς επεξεργαστές. Έτσι μπορούμε να ολοκληρώσουμε μια ποικιλία εργαλείων στην ίδια εξελικτική μηχανή, τα οποία είναι κατάλληλα για την διερεύνηση διαφορετικών περιοχών του χώρου λύσεων, βελτιώνοντας την διερεύνηση και εκμετάλλευση του.

1.5. Επισκόπηση της διατριβής

Στο επόμενο κεφάλαιο της διατριβής αυτής (κεφ. 2) παρατίθεται μία εκτενής παρουσίαση της κατάστασης στο χώρο των ΠΓΑ. Αναλύονται τα διάφορα μοντέλα υλοποίησης και γίνεται μία κατηγοριοποίηση τους. Επισημαίνονται οι παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση των ΠΓΑ καθώς επίσης και η επίδρασή τους στην απόδοση των ΠΓΑ.

Στο τρίτο κεφάλαιο εισάγουμε το μοντέλο των *Συνεργαζόμενων Πληθυσμών (ΣΠ)*, ένα πλαίσιο ενοποίησης των απλών σειριακών και παράλληλων γενετικών αλγόριθμων, προσφέροντας ένα εργαλείο υλοποίησης οιουδήποτε τύπου εξελικτικού αλγορίθμου σε οιοδήποτε υπολογιστικό σύστημα, συμπεριλαμβάνοντας σειριακούς και παράλληλους Γ.Α. Το μοντέλο ορίζεται

επαναληπτικά σε διάφορα διακριτά επίπεδα. Γίνεται παρουσίαση του αρχικού επιπέδου, το οποίο συμπεριλαμβάνει τον απλό σειριακό γενετικό αλγόριθμο και τους υψηλής ανάλυσης ΠΓΑ, καθώς επίσης και του πρώτου επίπεδου του μοντέλου το οποίο περιλαμβάνει τους χαμηλής ανάλυσης ΠΓΑ. Τα δύο πρώτα επίπεδα του μοντέλου περιλαμβάνουν το σύνολο των υλοποιήσεων που υπάρχουν στο χώρο των εξελικτικών αλγόριθμων.

Στην μέθοδο *ΣΠΔΕΣ,* ένας αριθμός πληθυσμών συν-εξελίσσεται σε διαφορετικούς επεξεργαστές. Έτσι είναι δυνατόν να ολοκληρωθεί μια ποικιλία εργαλείων στην ίδια εξελικτική μηχανή, βελτιώνοντας την διερεύνηση και εκμετάλλευση του χώρου λύσεων. Μετά από τον ορισμό των παραμέτρων που καθορίζουν την εξελικτική συμπεριφορά, δικαιολογείται η αναγκαιότητα των ΣΠΔΕΣ και παρουσιάζονται τα πλεονεκτήματα τους. Τέλος δίνονται κατευθυντήριες γραμμές στην επιλογή της διευθέτησης των διαφορετικών υπο-πληθυσμών.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, χρησιμοποιώντας τον ορισμό των ΣΠ του τρίτου κεφαλαίου, δίνουμε μία υλοποίηση για τους ΣΠΔΕΣ καθώς επίσης και για μία υλοποίηση του μοντέλου νησίδων. Αναλύονται οι δύο υλοποιήσεις και δίνονται κάποιες κατευθυντήριες γραμμές που μπορούν να βοηθήσουν κάποιον ερευνητή στην επιλογή και διευθέτηση της πιο κατάλληλης υλοποίησης των ΣΠΔΕΣ για την αντιμετώπιση κάποιου προβλήματος.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα προβλήματα που χρησιμοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων. Τα αποτελέσματα αυτά χρησιμοποιούνται για να επιβεβαιωθεί η καλύτερη απόδοση των ΣΠΔΕΣ, όπως και για να μελετηθεί η επίδραση κάποιων παραμέτρων στην απόδοση τους.

Η διατριβή τελειώνει με την εξαγωγή κάποιων συμπερασμάτων και την παροχή κατευθυντήριων γραμμών για την περαιτέρω έρευνα στον χώρο των εξελικτικών αλγόριθμων.

Κεφάλαιο 2

Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι

Η διερεύνηση μεγάλων χώρων αναζήτησης (search spaces) με πολύπλοκες συναρτήσεις ποιότητας (quality function ή fitness function) και η χρήση πολυάριθμων πληθυσμών επιβάλλουν την ανάγκη γρήγορων, υπολογιστικά ισχυρών υλοποιήσεων. Η διαθεσιμότητα γρήγορων και φθηνών παράλληλων Η/Υ, κάνει δυνατή την εφαρμογή των γενετικών αλγορίθμων σε δύσκολα και σύνθετα προβλήματα στα οποία γενικώς απαιτείται η χρήση μεγάλων πληθυσμών. Επίσης, μερικές δυσκολίες που αντιμετωπίζουν οι συμβατικοί Γ.Α. (όπως η πρόωρη σύγκλιση και η διερεύνηση χώρων με πολλαπλά βέλτιστα) μπορούν να αντιμετωπιστούν πιο αποτελεσματικά με την χρήση των Παράλληλων Γενετικών Αλγόριθμων (ΠΓΑ).

2.1. Εισαγωγή

Οι ΠΓΑ έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς στην επίλυση πολλών δύσκολων προβλημάτων. Σ' αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ανασκόπηση των τεχνικών υλοποίησης των Γ.Α. σε παράλληλους Η/Υ.

Είναι σημαντικό να διαχωρίσουμε δύο προσεγγίσεις στην υλοποίηση των ΠΓΑ

- Η τυπική παράλληλη προσέγγιση (standard or global parallelization), όπου ο παράλληλος Η/Υ χρησιμοποιείται για να υλοποιηθεί συνήθως ένας σειριακός Γ.Α.
- Η προσέγγιση διαχωρισμού (decomposition approach), με τον ΠΓΑ σαν ιδιαίτερο μοντέλο Γ.Α. [Levi94], [TaBe91].

Ο πληθυσμός είτε είναι κατανεμημένος σε πολλούς ανεξάρτητους ή αλληλεπιδρόντες υπο-πληθυσμούς (sub-populations), είτε υπάρχει μόνο ένας πληθυσμός, όπου κάθε γόνος αλληλεπιδρά μόνο με τους γειτονικούς του γόνους. Ανάλογα με την θέση και το μέγεθος των κατανεμημένων υπο-πληθυσμών (granularity of the distributed population) καθώς και τον τρόπο εφαρμογής των

γενετικών τελεστών και την μέθοδο μετανάστευσης, οι διάφορες υλοποιήσεις μπορούν να ταξινομηθούν σε τρία (3) μοντέλα.

Στο πρώτο μοντέλο, που ονομάζεται χαμηλής ανάλυσης ΠΓΑ (*coarse-grained PGA*) ή μοντέλο μετανάστευσης (*migration model*), ο πληθυσμός είναι χωρισμένος σε λίγους, σχετικά απομονωμένους υπο-πληθυσμούς. Κάθε υπο-πληθυσμός χρησιμοποιεί έναν ανεξάρτητο Γ.Α., παράλληλα με τους άλλους, για την βελτιστοποίηση των γόνων του. Περιστασιακά, κάποιοι από τους καλύτερους γόνους μεταναστεύουν (migrate) τυχαία μεταξύ οποιωνδήποτε υπο-πληθυσμών (*Μοντέλο νησίδων - island model*). Σε μερικές υλοποιήσεις η μετανάστευση των καλύτερων γόνων γίνεται μόνο μεταξύ γειτονικών πληθυσμών (*Βηματικό μοντέλο - stepping-stone model*). Μερικές φορές αυτό το μοντέλο αναφέρεται ως "κατανεμημένοι Γ.Α." (*distributed GAs*) επειδή υλοποιούνται σε Η/Υ κατανεμημένης μνήμης. Συνήθως δεν γίνεται διάκριση μεταξύ του μοντέλου νησίδων και του βηματικού μοντέλου και αντιμετωπίζονται μέσα στα πλαίσια του μοντέλου μετανάστευσης.

Στο δεύτερο μοντέλο υψηλής ανάλυσης ΠΓΑ (*fine-grained PGA*), ο πληθυσμός διαιρείται σε πολλούς πολύ μικρούς πληθυσμούς. Η ιδανική περίπτωση είναι κάθε γόνος να ανατίθεται σε ένα επεξεργαστή. Η επιλογή, ο ανασυνδυασμός, και η αντικατάσταση γίνεται μεταξύ γόνων σε μια περιορισμένη περιοχή (neighborhood/deme). Επειδή υπάρχει επικάλυψη των γειτονιών, οι καλοί γόνοι διαδίδονται σε ολόκληρο τον πληθυσμό *(Μοντέλο Διάχυσης ή απομόνωσης-μέσω-απόστασης ή γειτνίασης / Diffusion or isolation-by-distance or neighborhood model*). Αυτό το μοντέλο είναι κατάλληλο για υλοποίηση σε μαζικά παράλληλους Η/Υ.

Το τελευταίο μοντέλο συνδυάζει χαρακτηριστικά των προηγουμένων και αποτελεί το υβριδικό μοντέλο ΠΓΑ (*hybrid PGAs*).

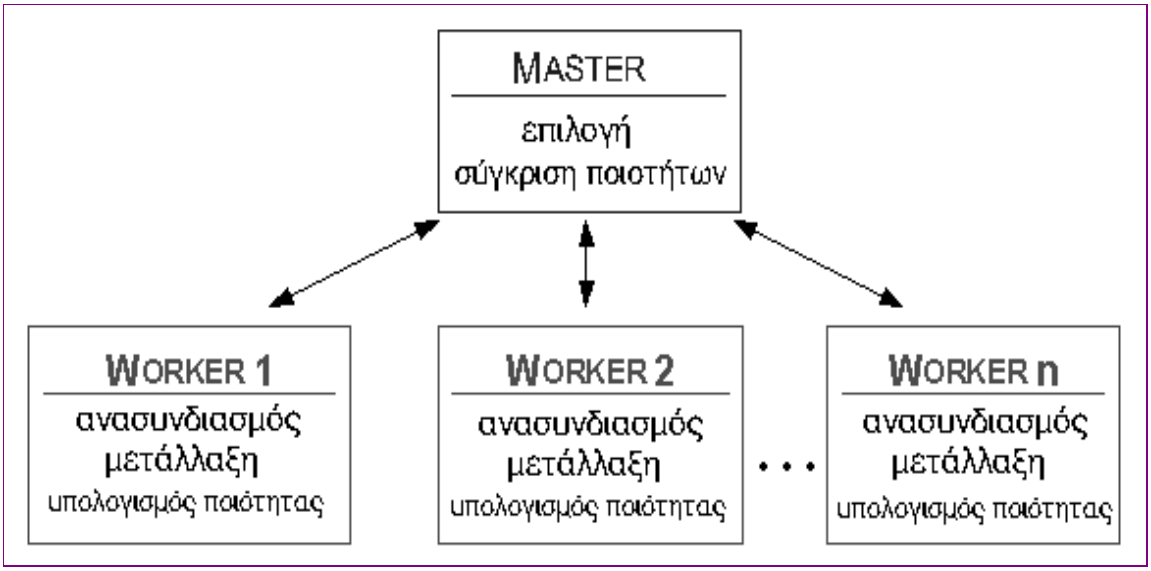
Τα μοντέλα αυτά επιτρέπουν την ύπαρξη αποκλινόντων πληθυσμών οι οποίοι αντιμετωπίζουν αποτελεσματικότερα το πρόβλημα της πρόωρης σύγκλισης. Επίσης ταιριάζουν περισσότερο με τον τρόπο που η ίδια η φύση εξελίσσεται, με ένα μεγάλο βαθμό ανεξαρτησίας στο συνολικό πληθυσμό.

2.2. Τυπική παράλληλη προσέγγιση

Ένας απλός τρόπος υλοποίησης αυτής της προσέγγισης, είναι η παραλληλοποίηση του βρόχου δημιουργίας της επόμενης γενιάς από την προηγούμενη. Τα περισσότερα βήματα αυτού του βρόχου (αξιολόγηση, ανασυνδυαστικός γενετικός τελεστής, μετάλλαξη, και τοπική αναζήτηση (local search), αν χρησιμοποιείται), μπορούν να εκτελεσθούν-υλοποιηθούν παράλληλα. Η επιλογή γόνων (selection), αν και εξαρτάται από τον αλγόριθμο επιλογής και το πρόβλημα, συνήθως απαιτεί αξιολόγηση όλου του πληθυσμού και είναι προτιμότερη η σειριακή υλοποίησή της. Εάν εκτελεστεί παράλληλα, είναι δυνατόν να προκαλέσει συμφόρηση (bottleneck).

Η χρήση του πρότυπου συντονιστή-εργαζόμενου (master-worker), που παρουσιάζεται στο σχήμα 2.1, είναι η κλασσική μέθοδος υλοποίησης αυτής της προσέγγισης. Ο συντονιστής (master) είναι υπεύθυνος για την εγκατάσταση των εργαζόμενων (worker), την ταξινόμηση της ποιότητας

και την επιλογή των γόνων, την επικοινωνία με τον χρήστη και την επίβλεψη του συνολικού πληθυσμού. Συνήθως ο συντονιστής δεσμεύει έναν επεξεργαστή (συντονιστής επεξεργαστής/master processor) και δημιουργεί τις διαδικασίες που αντιστοιχούν στους εργαζόμενους. Οι γόνοι που επιλέγονται στέλνονται στους επεξεργαστές εργασίας, όπου ανασυνδυάζονται ή/και μεταλλάσσονται για να δημιουργήσουν τους απογόνους. Οι απόγονοι αξιολογούνται και επιστρέφονται στον κύριο επεξεργαστή.



Σχήμα 2.1. Πρότυπο Συντονιστή/Εργαζόμενου ΠΓΑ

Ο Beyer [Beye93], χρησιμοποίησε αυτό το πρότυπο για την υλοποίηση της μεθόδου Εξελικτικής Στρατηγικής (Evolution Strategy) στον supercomputer KSR1, για την επίλυση του προβλήματος του περιοδεύοντος πωλητή (Travelling salesperson problem) και του προβλήματος της βέλτιστης διάταξης γραμμικών επιταχυντών (LINAC). Ο συντονιστής δημιουργεί (π-1) pthreads (π: συνολικός αριθμός των pthreads) που εκτελούν τον κώδικα που αντιστοιχεί στον εργαζόμενο. Κάθε εργαζόμενος πραγματοποιεί την επιλογή, την μετάλλαξη και την αξιολόγηση. Η υλοποίηση εμφανίζει γραμμική επιτάχυνση όσο το π είναι μικρότερο από τον αριθμό των απογόνων (ή για μεγαλύτερη ακρίβεια, εάν κ(π-1)=λ)

Το πρότυπο επίσης χρησιμοποιήθηκε από τους Fogarty και Huang [FoHu90], στο πρόβλημα της εξέλιξης του συνόλου των κανόνων για την εξισορρόπηση μιας ράβδου σε ένα μικρό κινούμενο όχημα. Σ'αυτό το πρόβλημα η αξιολόγηση ενός απογόνου είναι αρκετά χρονοβόρα. Έτσι χρησιμοποίησαν transputer για την παράλληλη αξιολόγηση των 250 γόνων του πληθυσμού. Ο συντονιστής επεξεργαστής εκτελεί το πρόγραμμα του Γ.Α. και κατανέμει τους απογόνους για αξιολόγηση στους άλλους transputers. Ερεύνησαν την απόδοση τριών τοπολογιών: ι) Δίκτυο διασωλήνωσης (Pipeline network), ιι) Δίκτυο γεφύρωσης (bridged network) και ιιι) Διδιάστατο πίνακα (two-dimensional (2-D) array). Η τοπολογία διδιάστατου πίνακα είναι καλύτερη από τις άλλες δύο όταν ο αριθμός των transputers αυξάνεται. Η τοπολογία γέφυρας είναι λίγο καλύτερη από το δίκτυο σωλήνα. Η βελτίωση της απόδοσης μειωνόταν καθώς ο αριθμός των transputers μεγάλωνε. Η βελτίωση της επιτάχυνσης είναι σχεδόν γραμμική (λίγο χειρότερη) μέχρι 16-20 επεξεργαστές, αλλά μετά μειώνεται πολύ γρήγορα λόγω της μεγάλης επιβάρυνσης των

επικοινωνιών. Μέγιστη επιτευχθείσα επιτάχυνση για τις 3 τοπολογίες είναι 27.27 (72 transputers), 25 (40 transputers) και 24.74 (36 transputers) αντίστοιχα.

Μια άλλη μέθοδος ταυτόχρονης δημιουργίας των γόνων της νέας γενιάς χρησιμοποιήθηκε από τον Abramson και τους συνεργάτες του. Ένας αριθμός από παράγοντες (agents) είναι υπεύθυνος για την δημιουργία των παιδιών του νέου πληθυσμού. Κάθε παράγων επιλέγει δύο γονείς και δημιουργεί ένα προκαθορισμένο αριθμό παιδιών. Είναι σημαντικό να ελαχιστοποιηθεί ο συγχρονισμός των διαδικασιών, έτσι ώστε να μεγιστοποιηθεί η επιτάχυνση του αλγόριθμου. Η τεχνική χρησιμοποιήθηκε για:

- την επίλυση του προβλήματος δημιουργίας σχολικού ωρολογίου προγράμματος (school time-tabling problem). Η μέγιστη επιτάχυνση που επιτεύχθηκε ήταν 9.2 χρησιμοποιώντας 10 επεξεργαστές με 200 γόνους και 9.3 με 15 επεξεργαστές και 120 γόνους, με τον Η/Υ διαμοιραζόμενης μνήμης (shared memory) Encore Multimax (16 επεξεργαστές) [Abra92]. Η επιτάχυνση δεν ήταν βέλτιστη επειδή κάποια μέρη του αλγόριθμου δεν παραλληλοποιήθηκαν.

- τον υπολογισμό αποτελεσματικών προγραμμάτων κίνησης τραίνων. Χρησιμοποιήθηκαν ο Η/Υ Encore Multimax, ένας Fujitsu AP1000 κατανεμημένης μνήμης (distibuted memory) με 128 επεξεργαστές και ένα δίκτυο σταθμών εργασίας DEC. Τόσο ο Encore, όσο και ο Fujitsu είχαν πολύ καλή απόδοση με την χρήση μέχρι και 16 επεξεργαστών (επιτάχυνση: 14 και 13.5 αντίστοιχα). Η χρήση περισσότερων επεξεργαστών του Fujitsu συνέχισε να αυξάνει την επιτάχυνση αλλά ήταν πολύ κάτω από το ιδεατό (48.1 με 128 επεξεργαστές). Η επιτάχυνση του δικτύου των DEC (χρησιμοποιώντας PVM) είναι πολύ μικρή, σχεδόν μηδενική με δύο και 4 επεξεργαστές, λόγω των τεράστιων επιβαρύνσεων που εισάγονται από τις επικοινωνίες όταν χρησιμοποιούνται τα πρωτόκολλα επικοινωνίας ethernet and UNIX TCP/IP [AbMP92].

Γενικά η τυπική παράλληλη προσέγγιση μπορεί να υλοποιηθεί αποτελεσματικά σε Η/Υ διαμοιραζόμενης μνήμης. Σε Η/Υ κατανεμημένης μνήμης υπάρχει επιβάρυνση λόγω των επικοινωνιών μεταξύ των επεξεργαστών, η οποία μεγαλώνει ανάλογα με το τετράγωνο του μεγέθους του πληθυσμού. Η επιβάρυνση αυτή οφείλεται στην κατανομή των δομών δεδομένων μεταξύ των επεξεργαστών, και στον συγχρονισμό και τη συλλογή των αποτελεσμάτων, Οι επικοινωνίες, είναι δυνατόν να ελαχιστοποιήσουν την βελτίωση της απόδοσης λόγω της ύπαρξης πολλών επεξεργαστών, εκτός εάν ο βρόχος δημιουργίας της νέας γενιάς είναι χρονοβόρος.

2.3. Προσέγγιση διαχωρισμού (The Decomposition Approach)

Ενώ η προηγούμενη προσέγγιση δεν επηρεάζει την συμπεριφορά του αλγορίθμου, η προσέγγιση διαχωρισμού εισάγει βασικές αλλαγές στον τρόπο λειτουργίας του Γ.Α. Εδώ, ο ΠΓΑ αποτελεί ένα ιδιαίτερο μοντέλο αλγόριθμου βασισμένου στη φυσική εξέλιξη των ειδών.

Ο χωρισμός του πληθυσμού σε υπο-πληθυσμούς (ή γειτονιές), με την δυνατότητα ανταλλαγής γενετικού υλικού μεταξύ τους, κάνει δυνατή την έρευνα διαφορετικών περιοχών του χώρου λύσεων ταυτόχρονα και βελτιώνει την δυνατότητα αποφυγής της πρόωρης σύγκλισης του αλγορίθμου και την καλύτερη προσαρμογή του στο περιβάλλον. Η δυναμική προσαρμογής και

βελτίωσης, καθιστά τους πληθυσμούς βιώσιμους στις μεταβολές του περιβάλλοντος και συμβάλλει στην βελτίωση των χαρακτηριστικών τους. Αυτή η δυναμική των υπο-πληθυσμών επιτρέπει όχι μόνο την καλύτερη εξομοίωση, μοντελοποίηση και μελέτη των φυσικών βιολογικών συστημάτων, όπου κάθε υπο-πληθυσμός μπορεί να αντιπροσωπεύει και ένα διαφορετικό βιολογικό είδος, αλλά και την καλύτερη απόδοση σε προβλήματα βελτιστοποίησης και εκμάθησης.

2.3.1. Χαμηλής Ανάλυσης Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι (Μοντέλο Μετανάστευσης)

Το μοντέλο μετανάστευσης είναι το πιο δημοφιλές και το καλύτερα μελετημένο μοντέλο ΠΓΑ. Πολλές φορές οι χαΠΓΑ αναφέρονται ως “κατανεμημένοι ΓΑ”, επειδή συνήθως υλοποιούνται σε κατανεμημένους MIMD Η/Υ.

Το μοντέλο μετανάστευσης διαιρεί τον πληθυσμό σε περισσότερους υπο-πληθυσμούς. Κάθε υπο-πληθυσμός εξελίσσεται ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους για κάποιο αριθμό γενιών (περίοδος απομόνωσης/isolation time). Μετά την περίοδο απομόνωσης ένας αριθμός ατόμων ανταλλάσσεται μεταξύ των υπο-πληθυσμών. Ο αριθμός των ατόμων που ανταλλάσσονται (ρυθμός μετανάστευσης/ migration rate), η μέθοδος επιλογής των ατόμων προς μετανάστευση και η μέθοδος μετανάστευσης καθορίζει την γενετική απόκλιση μεταξύ των υπο-πληθυσμών και την ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των υπο-πληθυσμών.

Οι απομονωμένοι υπο-πληθυσμοί βοηθούν στην διατήρηση της γενετικής απόκλισης. Οι γόνοι ενός υπο-πληθυσμού είναι σχετικά απομονωμένοι από τους γόνους των υπολοίπων. Έτσι κάθε υπο-πληθυσμός διερευνά ένα διαφορετικό μέρος του χώρου λύσεων.

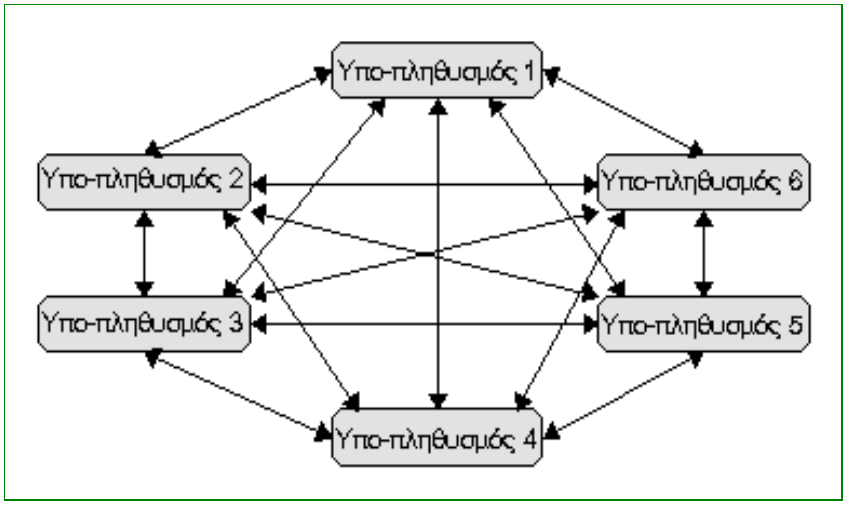
Τα κύρια χαρακτηριστικά αυτού του μοντέλου είναι η χρήση λίγων, σχετικά μεγάλων υπο-πληθυσμών και η εισαγωγή της μετανάστευσης μεταξύ τους.

Μερικές από τις πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τοπολογίες μετανάστευσης ατόμων είναι οι εξής:

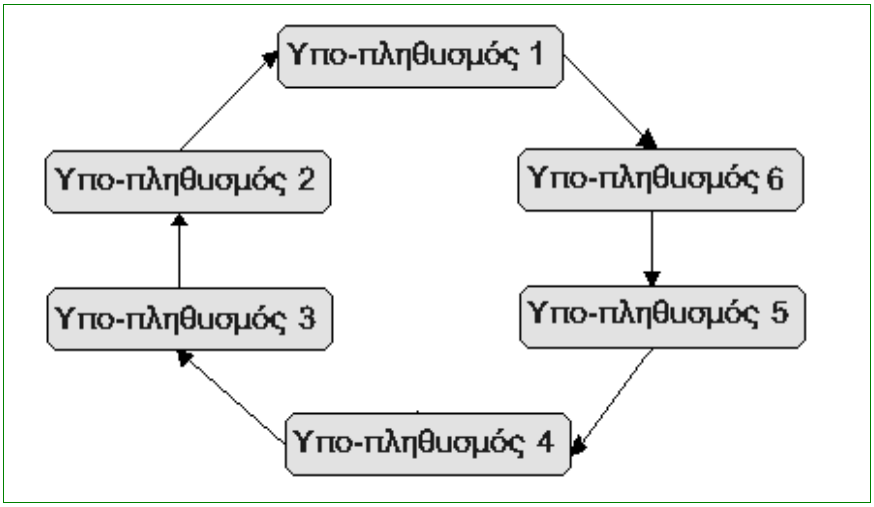
- μεταξύ όλων των υπο-πληθυσμών, τοπολογία πλήρους διασύνδεσης. Τα άτομα μπορούν να μεταναστεύουν μεταξύ οποιωνδήποτε υπο-πληθυσμών (σχ. 2.2).
- τοπολογία δακτυλίου (σχ. 2.3)
- τοπολογία γειτονιάς (σχ. 2.4)

Οι πιο σημαντικές επιλογές στην υλοποίηση αυτού του μοντέλου είναι οι εξής:

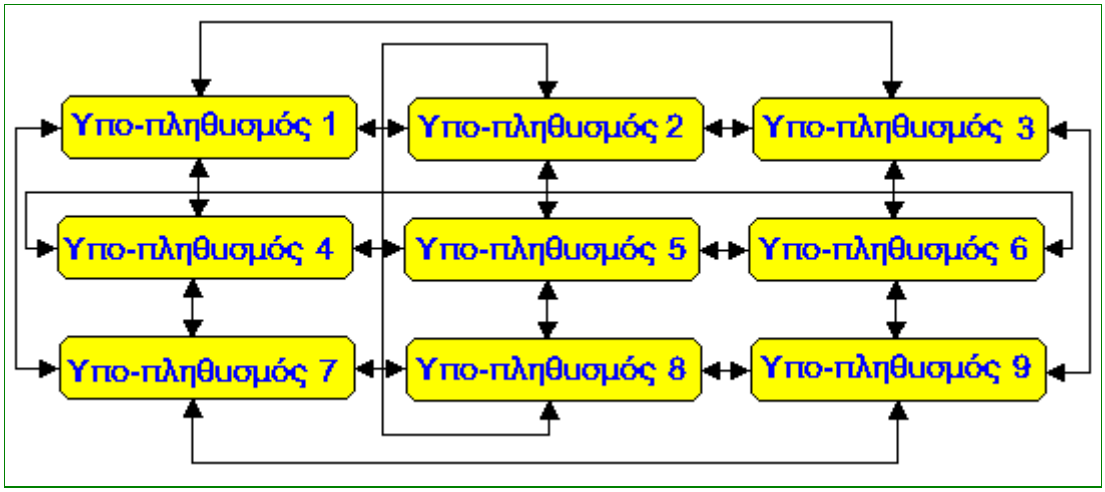
- ποιοι επεξεργαστές ανταλλάσσουν γόνους μεταξύ τους (*μέθοδος μετανάστευσης*),
- πόσο συχνά ανταλλάσσονται γόνοι μεταξύ των επεξεργαστών (*εποχή ή συχνότητα μετανάστευσης*),
- πόσοι γόνοι ανταλλάσσονται μεταξύ των επεξεργαστών (*ποσοστό μετανάστευσης*),
- η μέθοδος επιλογής των γόνων που θα ανταλλαγούν.



Σχήμα 2.2. Τοπολογία μετανάστευσης πλήρους διασύνδεσης



Σχήμα 2.3. Τοπολογία μετανάστευσης δακτυλίου



Σχήμα 2.4. Τοπολογία μετανάστευσης γειτονιάς (Διδιάστατη υλοποίηση)

Αν και υπήρξαν προσπάθειες θεωρητικής ανάλυσης οι επιλογές αυτές γίνονται ακόμη βασισμένες στην εμπειρία του χρήστη παρά σε τεκμηριωμένη θεωρητική ανάλυση.

Μια πρωτοποριακή προσπάθεια αποτελεί η διατριβή του Grosso [Gros85]. Ο συνολικός πληθυσμός χωρίστηκε σε πέντε υπο-πληθυσμούς, οι οποίοι ανταλλάσσουν ένα ποσοστό των γόνων τους. Ο ρυθμός βελτίωσης είναι ταχύτερος χρησιμοποιώντας μικρότερους υπο-πληθυσμούς, παρά ένα μοναδικό πληθυσμό. Όταν όμως οι υπο-πληθυσμοί είναι πλήρως απομονωμένοι, αυτή η ταχεία βελτίωση σταματάει σε χειρότερη τιμή από την τιμή του ενός και μοναδικού πληθυσμού. Πραγματοποίησε πειράματα χρησιμοποιώντας διαφορετικά ποσοστά μετανάστευσης γόνων. Σε μέσες τιμές ποσοστού μετανάστευσης, οι κατανεμημένοι υπο-πληθυσμοί συμπεριφέρονται ως ένας και μοναδικός πληθυσμός. Σε μικρές τιμές οι υπο-πληθυσμοί έχουν την δυνατότητα να ερευνήσουν διαφορετικές περιοχές του χώρου λύσεων, αλλά οι πολύ μικρές τιμές ποσοστών δεν έχουν ιδιαίτερη επίδραση στην επίδοση του αλγόριθμου. Τα αποτελέσματά του δείχνουν ότι υπάρχει ένα κρίσιμο ποσοστό μετανάστευσης κάτω ή πάνω από το οποίο περιορίζεται η απόδοση του αλγορίθμου.

Άρθρα με σημαντική επιρροή άρχισαν να δημοσιεύονται από το δεύτερο διεθνές συνέδριο με θέμα τους Γ.Α. το 1987. Η Tanese [Tane87], χρησιμοποίησε ένα 4-D υπερ-κύβο με 64 επεξεργαστές ως τοπολογία επικοινωνίας των υπο-πληθυσμών. Περιοδικά, γόνοι με καλή ποιότητα, τυχαία διαλεγμένοι, μεταναστεύουν μεταξύ γειτονικών επεξεργαστών και αντικαθιστούν τους χειρότερους γόνους των ληπτών. Η ανταλλαγή γόνων δεν γίνεται πάντα με τους ίδιους επεξεργαστές, αλλά σε διαφορετικές διαστάσεις του υπερ-κύβου κάθε φορά. Ο ΠΓΑ βρήκε το ολικό μέγιστο το ίδιο συχνά με τον σειριακό ΓΑ (ΣΓΑ), αλλά με το πλεονέκτημα της σχεδόν γραμμικής επιτάχυνσης.

Συνεχίζοντας την έρευνα του μοντέλου, πειραματίστηκε με διάφορες συχνότητες και ποσοστά μετανάστευσης [Tane89]. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανταλλαγή πολλών γόνων πολύ συχνά, ή λίγων γόνων πολύ αραιά μειώνει την απόδοση. Τα καλύτερα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με ποσοστό μετανάστευσης 20% κάθε 20 γενιές. Με τον ΠΓΑ, ποιοτικά αποτελέσματα βρέθηκαν ταχύτερα από την χρήση ΣΓΑ, ακόμη και στην περίπτωση μη ανταλλαγής γόνων μεταξύ των υπο-πληθυσμών.

Μία πρόσφατη έρευνα του Belding [Beld95] χρησιμοποιεί το μοντέλο της Tanese με τυχαία μετανάστευση γόνων και όχι την τοπολογία υπερ-κύβου. Και οι δύο τρόποι μετανάστευσης είχαν παρόμοια απόδοση. Το ολικό βέλτιστο βρέθηκε συχνότερα με την χρήση μετανάστευσης, παρά με την χρήση απομονωμένων πληθυσμών. Η σύγκλιση ήταν ταχύτερη με την χρήση μεγάλου ποσοστού μετανάστευσης.

Επίσης το 1987, οι Cohoon, Hedge, Martin και Richards [CHMR87] πρότειναν την υλοποίηση ενός ΠΓΑ βασισμένου στην βιολογική θεωρία των “punctuated equilibria” που είχε προταθεί από τους Elredge και Gould. Μία από τις θέσεις αυτής της θεωρίας είναι ότι στους μικρούς σχετικά απομονωμένους πληθυσμούς είναι πιθανόν να δημιουργηθούν νέα είδη σε σύντομο χρόνο μετά από κάποια αλλαγή στο περιβάλλον τους. Η γενετική σύνθεση ενός πληθυσμού είναι σημαντικό μέρος του περιβάλλοντος ενός οργανισμού. Έτσι, η μετανάστευση γόνων είναι δυνατό να ενεργοποιήσει εξελικτικές αλλαγές. Οι ερευνητές παρατήρησαν ότι ο αριθμός των μεταναστών επηρεάζει την ταχύτητα αλλαγής και ότι νέες λύσεις βρέθηκαν σύντομα μετά την μετανάστευση. Αν και στα πειράματά τους χρησιμοποίησαν τοπολογία πλέγματος (mesh topology), υποστήριξαν ότι η τοπολογία δεν είναι τόσο σημαντική εάν υπάρχει “αρκετά πυκνή σύνδεση και μικρή διάμετρος, έτσι ώστε να διασφαλίζεται επαρκής ‘μείξις’ με την πάροδο του

χρόνου". Η υλοποίησή του ΠΓΑ με μετανάστευση είχε καλύτερα αποτελέσματα και από τον ΠΓΑ χωρίς μετανάστευση και από τον ΣΓΑ.

Επεκτείνοντας αυτή την δουλειά χρησιμοποίησαν ένα 4-D υπερκύβο όπου κάθε κόμβος συνδέεται με άλλους 4 και η διάμετρος είναι $\log_2 n$ [CoMR90][CoMR91]. Εδώ εισήγαγαν την χρήση μιας συνάρτησης τιμωρίας p(x) (penalty function) με τυχαία επιλογή συντελεστή κλίμακας λ στη συνάρτηση ποιότητας c(x)+λp(x). Η χρήση ομοιόμορφα κατανεμημένου λ στην περιοχή (0,1] είχε καλύτερα αποτελέσματα από την χρήση σταθερού λ.

Μία άλλη υλοποίηση του 1987, από τους Pettey, Leuze και Grefenstette χρησιμοποιεί ΠΓΑ για την ταχεία σύγκλιση των όλο και μεγαλύτερων πληθυσμών που χρειάζονται σε μερικές εφαρμογές [PeLG87]. Ένα αντίγραφο του καλύτερου γόνου κάθε υπο-πληθυσμού στέλνεται κάθε γενιά σ'όλους τους γείτονές του. Αυτή η προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ισοδύναμη με ένα ΣΓΑ, με την μόνη διαφορά ότι η επιλογή γίνεται σε επίπεδο υπο-πληθυσμού. Τα αποτελέσματά τους δείχνουν αυξημένη πιθανότητα πρόωρης σύγκλισης, λόγω της μεγάλης συχνότητας μετανάστευσης και της ανταλλαγής με τους ίδιους υπο-πληθυσμούς. Επίσης, η πρόσθεση περισσοτέρων επεξεργαστών βελτιώνει την ταχύτητα σύγκλισης αλλά όχι την ποιότητα της λύσης.

Μεταβλητή συχνότητα μετανάστευσης γόνων ασύγχρονα και τυχαία μεταξύ των υπο-πληθυσμών χρησιμοποιήθηκε από τον Norman [Norm88]. Οι γόνοι γίνονται δεκτοί, αν είναι καλύτεροι από τον καλύτερο του τοπικού πληθυσμού, αλλιώς γίνονται δεκτοί με πιθανότητα p1 (p1: γραμμική παρεμβολή μεταξύ 1 και p0 - p0: πιθανότητα αποδοχής γόνου με ποιότητα ίση με την ποιότητα του χειρότερου γόνου). Ο ΠΓΑ έδωσε καλύτερες λύσεις και ήταν ταχύτερος από τον ΣΓΑ.

Ίσως η πρώτη προσπάθεια θεωρητικής θεμελίωσης της απόδοσης του μοντέλου μετανάστευσης των ΠΓΑ, είναι ένα άρθρο του 1989 από τους Pettey και Leuze [PeLe89] όπου περιγράφουν την εξαγωγή της θεωρίας σχημάτων (schemata theory) για τους ΠΓΑ Αποδεικνύουν ότι ο προσδοκώμενος αριθμός δοκιμών που ανατίθενται σε σχήματα είναι μικρότερος από μια εκθετική συνάρτηση, όταν τυχαία διαλεγμένοι γόνοι ανταλλάσσονται κάθε γενιά.

Θεωρείται ότι σχετικά απομονωμένοι υπο-πληθυσμοί είναι δυνατόν να βρούν διαφορετικές μερικές λύσεις σε κάποιο πρόβλημα. Μία σημαντική παρατήρηση σ'αυτό το θέμα έκαναν οι Starkweather, Whitley και Mathias [StWM90]. Εάν οι μερικές λύσεις μπορούν να συνδυαστούν σχηματίζοντας μία καλύτερη λύση, τότε κατά πάσα πιθανότητα, ο ΠΓΑ θα δώσει καλύτερα αποτελέσματα από τον ΣΓΑ. Αλλιώς, αν από τον ανασυνδυασμό των μερικών λύσεων προκύπτει χειρότερος γόνος, τότε ο ΣΓΑ θα έχει καλύτερα αποτελέσματα. Στα πειράματά τους χρησιμοποίησαν προσαρμογή της πιθανότητας μετάλλαξης, με την πιθανότητα μετάλλαξης να αυξάνεται καθώς αυξάνονταν η ομοιότητα των δύο γονέων. Η χρήση προσαρμογής της πιθανότητας μετάλλαξης είχε καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τον ΣΓΑ. Όσο πιο κατανεμημένος ήταν ο πληθυσμός (μικρότεροι υπο-πληθυσμοί) τόσο πιο συχνή ήταν η προσαρμογή της πιθανότητας μετάλλαξης, αφού οι μικροί πληθυσμοί συγκλίνουν ταχύτερα από τους μεγαλύτερους. Επίσης, η πολύ συχνή ή πολύ αραιή μετανάστευση γόνων είχε αρνητικά αποτελέσματα στην απόδοση του ΠΓΑ [WhSB90].

Τα πλεονεκτήματα των ΠΓΑ έγιναν φανερά με την έρευνα της ομάδας του Mühlenbein [MüSB91a][MüSB91b], όπου ο ΠΓΑ βρήκε το ολικό βέλτιστο σε δύσκολα προβλήματα βελτιστοποίησης συναρτήσεων. Η ανταλλαγή γόνων γίνεται μεταξύ γειτονικών υπο-πληθυσμών.

Η χρήση ενός τελεστή τοπικής βελτιστοποίησης, έκανε τον αλγόριθμο περισσότερο αποτελεσματικό. Ο τελεστής εφαρμόζονταν όταν ο υπο-πληθυσμός δεν βελτιωνόταν για έναν αριθμό γενεών. Δεν είναι όμως καθαρό αν τα αποτελέσματα οφείλονται στην κατανομή των πληθυσμών ή στον τελεστή τοπικής βελτιστοποίησης. Καταφέρνοντας να επιλύσουν πολύπλοκα προβλήματα, άλυτα μέχρι τότε, καταλήγουν στο ότι η παράλληλη αναζήτηση αποδίδει κυρίως σε περιπτώσεις όπου ο χώρος λύσεων είναι μεγάλος και πολύπλοκος. Στις δημοσιεύσεις τους υποδεικνύουν την χρήση ΠΓΑ ως εργαλεία μελέτης της εξέλιξης βιολογικών οργανισμών [Mühl89][Mühl91].

Ο Levine [Levi94], χρησιμοποίησε ένα παράλληλο υπολογιστή με 128 κόμβους σε τοπολογία διδιάστατου πλέγματος. Κάθε εποχή, κάθε επεξεργαστής ανταλλάσσει μόνο ένα γόνο με τους τέσσερις γείτονες του. Δοκίμασε δύο μεθόδους επιλογής του γόνου που θα μεταναστεύσει. Στην πρώτη, μετανάστης ήταν ο καλύτερος γόνος. Στην δεύτερη, η επιλογή έγινε με "επιλογή με ανταγωνισμό" (Binary Tournament Selection). Αν ο μετανάστης γόνος έχει ποιότητα πάνω της μέσης, η επιλογή κάποιας εκ των δύο δεν είναι σημαντική, αν και η σύγκλιση της πρώτης μεθόδου είναι ταχύτερη. Η χρήση της επιλογής με ανταγωνισμό για την επιλογή του γόνου που θα διαγραφεί, είχε μεγαλύτερη επιτυχία στην εύρεση του ολικού βέλτιστου, αλλά ήταν σημαντικά βραδύτερη. Η πρόσθεση περισσοτέρων υπο-πληθυσμών απέφερε καλύτερα αποτελέσματα.

Ο Maresky [Mare94] χρησιμοποίησε το μοντέλο γενετικού αλγόριθμου ECO[1] του Davidor ως βάση της δικιάς του υλοποίησης ΠΓΑ Κάθε επεξεργαστής υλοποιεί ένα ECO Γ.Α. Ερευνήθηκαν διάφορες μέθοδοι μετανάστευσης με ποικίλο βαθμό πολυπλοκότητας. Η απλούστερη μέθοδος είναι η μη χρήση μετανάστευσης και η πιο πολύπλοκη χρησιμοποιεί μετανάστευση ολόκληρων γειτονιών. Επίσης ερεύνησε διάφορες μεθόδους αποδοχής των μεταναστών με οριακό όφελος. Η εισαγωγή των μεταναστών με κάποια μέθοδο η οποία λαμβάνει υπ'όψη της την ποιότητα του γόνου που θα αντικατασταθεί και την βελτίωση των υπο-πληθυσμών, συνήθως βελτιώνει την απόδοση

Μία άλλη μη συμβατική μέθοδο μετανάστευσης χρησιμοποιήθηκε από τους Marin, Trelles-Salazar και Sandoval [MaTS94]. Πρότειναν ένα μοντέλο όπου οι υπο-πληθυσμοί στέλνουν περιοδικά τις καλύτερες λύσεις τους σε ένα κύριο υπο-πληθυσμό. Ο συντονιστής υπο-πληθυσμός επιλέγει τους καλύτερους από αυτούς που δέχεται και τους αποστέλλει σε όλους τους υπο-πληθυσμούς. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι μπορεί να επιτευχθεί σχεδόν γραμμική επιτάχυνση με ένα μικρό αριθμό υπο-πληθυσμών (περίπου έξι), και οι συγγραφείς ισχυρίζονται ότι μπορεί να προσαρμοστεί σε μεγαλύτερα δίκτυα σταθμών εργασίας.

Πρόσφατα, οι Koza και Andre [KoAn95] χρησιμοποίησαν ένα δίκτυο από transputers για να παραλληλίσουν μια εφαρμογή Γενετικού Προγραμματισμού (Genetic Programming). Μετά την ανάλυση του αλγόριθμου τους, διάλεξαν τους transputers ως την οικονομικότερη και αποτελεσματικότερη λύση. Επιλέγοντας το μοντέλο νησίδων πειραματίστηκαν με διάφορα ποσοστά μετανάστευσης γόνων χρησιμοποιώντας 64 υπο-πληθυσμούς. Αναφέρουν υπερ-γραμμική επιτάχυνση σε σύγκριση με τον ΣΓΑ, χρησιμοποιώντας μέσα ποσοστά μετανάστευσης (περίπου 8%).

[1] ECO Γ.Α.: Ο πληθυσμός είναι τοποθετημένος σε ένα διδιάστατο πίνακα όπου κάθε γόνος έχει ένα αριθμό αναγνώρισης και μία λίστα με γειτονικούς γόνους. Η ποιότητα κάθε γόνου αναφέρεται στη γειτονιά του και όχι στο συνολικό πληθυσμό. Η αναπαραγωγή γίνεται στα πλαίσια της γειτονιάς.

Η τοπολογία είναι ένας σημαντικός παράγοντας της απόδοσης των ΠΓΑ Οι περισσότερες υλοποιήσεις χρησιμοποιούν την τοπολογία του H/Y που γίνεται η υλοποίηση. Οι McClurkin, Geary, και Durrani βρήκαν σχεδόν ίδιο χρόνο σύγκλισης για διάφορες τοπολογίες ΠΓΑ [McGD90]. Ο ΠΓΑ (ανεξαρτήτως τοπολογίας συγκλίνει ταχύτερα από τον ΣΓΑ. Όσο πιο πυκνά συνδεδεμένη τοπολογία χρησιμοποιείται, τόσο ταχύτερη είναι η σύγκλιση του αλγορίθμου. Αυτό όμως μπορεί να έχει την αρνητική εξέλιξη της σύγκλισης σε κάποιο τοπικό βέλτιστο.

Οι Bianchini και Brown [BiBr93] αντιμετωπίζοντας το πρόβλημα της επιλογής τοπολογίας παρουσίασαν πειραματικά αποτελέσματα τα οποία στηρίζουν στην χρήση απομονωμένων και επικοινωνούντων πληθυσμών. Τα αποτελέσματά τους δείχνουν ότι κάποια απόκλιση των πληθυσμών βελτιώνει την ποιότητα της γενετικής αναζήτησης, ενώ κάποιος κεντρικός έλεγχος των πληθυσμών παράγει καλύτερες λύσεις, όταν περιορίζεται ο αριθμός γενεών. Οι ερευνητές είχαν καλά αποτελέσματα, αν και χρησιμοποίησαν σχετικά αραιές τοπολογίες.

Μία πιο πρόσφατη πειραματική μελέτη διαφορετικών τοπολογιών από τους Cantú-Paz και Mejva-Olvera [CaMe94], δείχνει ότι τοπολογίες με πυκνότερη σύνδεση βρίσκουν το ολικό βέλτιστο ταχύτερα από τις πιο αραιές. Αυτή η μελέτη συμπεριέλαβε πλήρως συνδεδεμένες τοπολογίες, 4-D υπερ-κύβους, 4x4 toroidal mesh και δακτυλίους μονής και διπλής κατεύθυνσης.

Σε όλες τις προηγούμενες αναφορές, η μετανάστευση γόνων γίνεται σε καθορισμένα σταθερά χρονικά διαστήματα. Μια διαφορετική προσέγγιση υλοποίησαν οι Kroger, Schwenderling και Vornberger [KrSV90] χρησιμοποιώντας ένα δίκτυο με 32 transputers. Οι ανταλλαγές γόνων δεν γίνονται σε σταθερά διαστήματα. Όταν κάποιος υπο-πληθυσμός βελτιώνει τον καλύτερο γόνο του, μόνο τότε τον στέλνει στους γειτονικούς του (immigration model). Οι λύσεις με 64 ή 128 επεξεργαστές ήταν ελάχιστα καλύτερες. Σε μετέπειτα μελέτη τους με χρήση 48 υπο-πληθυσμών, παρουσίασαν το "μοντέλο αστυφιλίας - emigration model", όπου οι γόνοι στέλνονται μόνο σε έναν από τους γείτονες [KrSV93]. Οι λύσεις βελτιώνονται με την αύξηση των επεξεργαστών. Το μοντέλο αστυφιλίας είχε καλύτερη απόδοση από το προηγούμενο αλλά και από το μοντέλο διάχυσης, το οποίο είχε επίσης καλύτερη απόδοση από το "immigration model".

Μία άλλη προσέγγιση όπου η μετανάστευση γίνεται μετά την σύγκλιση των υπο-πληθυσμών (ο συγγραφέας χρησιμοποιεί τον όρο "degenerate") υλοποιήθηκε από τον Braun [Brau90]. Η ίδια ιδέα, (με κάποιες τροποποιήσεις) χρησιμοποιήθηκε αργότερα από τους Munetomo, Takai και Sato [MuTS94]. Οι αποφάσεις για μετανάστευση γόνων παίρνονται από τον κάθε υπο-πληθυσμό ανεξάρτητα.

Οι Lin, Punch και Goodman [LiPG94] πειραματίστηκαν με διάφορες μεθόδους μετανάστευσης και τοπολογίες σύνδεσης στην προσπάθειά τους να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα της πρόωρης σύγκλισης. Τα πειράματά τους έδειξαν ότι οι ΣΓΑ δεν είναι τόσο αποτελεσματικοί όσο οι ΠΓΑ. Για τους χαΠΓΑ, η χρήση ενός μεγάλου αριθμού κόμβων και η ασύγχρονη ανταλλαγή ατόμων μεταξύ τους είναι πολύ αποτελεσματική. Επίσης, όταν η ανταλλαγή ατόμων βασίζεται στην ομοιότητα των πληθυσμών και όχι σε κάποια σταθερή τοπολογία σύνδεσης τα αποτελέσματα είναι καλύτερα και δεν υπάρχει μείωση της ταχύτητας σύγκλισης. Τελικά, προτείνουν ένα μοντέλο ΠΓΑ, που το ονομάζουν Injection Island GA, το οποίο είναι ένας ασύγχρονος, ετερογενής ΠΓΑ με στατική ή δυναμική τοπολογία και με διαφορετική κωδικοποίηση των ατόμων σε κάθε ΓΑ. Η μετανάστευση γόνων γίνεται μόνο από κόμβους μικρότερης προς κόμβους μεγαλύτερης διακριτικότητας.

Συμπερασματικά, το μοντέλο μετανάστευσης ΠΓΑ έχει καλύτερη απόδοση από τον ΣΓΑ. Η μετανάστευση μεταξύ των υπο-πληθυσμών βελτιώνει την απόδοση του μοντέλου. Το ποσοστό μετανάστευσης δεν πρέπει να είναι πολύ μεγάλο.

Συνήθως η μετανάστευση γόνων γίνεται σε καθορισμένα διαστήματα, αλλά μπορεί να γίνει αφού συγκλίνουν οι πληθυσμοί ([Brau90], [MuTK93]), ή ασύγχρονα ([LiPG94], [Norm88]). Γενικά, τα σωστά τμήματα κατασκευής των μεταναστών επηρεάζουν την αναζήτηση προς την σωστή κατεύθυνση, και έτσι η μετανάστευση δεν πρέπει να γίνεται πολύ νωρίς. Αν η συχνότητα μετανάστευσης είναι μεγάλη, ο αριθμός των σωστών "τμημάτων κατασκευής" (building blocks) στους μετανάστες γόνους είναι συνήθως πολύ μικρός για να επηρεάσει την αναζήτηση προς την σωστή κατεύθυνση και έτσι δαπανούνται πολύτιμοι πόροι χωρίς ιδιαίτερο κέρδος.

Εάν η τοπολογία έχει σχετικά πυκνή σύνδεση (ή μικρή διάμετρο ή και τα δύο), οι καλές λύσεις θα διαδοθούν γρήγορα σε όλους τους υπο-πληθυσμούς και θα καταλάβουν σύντομα όλο τον πληθυσμό. Αντιθέτως αν η τοπολογία είναι αραιή (ή έχει μεγάλη διάμετρο), οι λύσεις θα διαδοθούν βραδύτερα και οι υπο-πληθυσμοί θα είναι περισσότερο απομονωμένοι μεταξύ τους, επιτρέποντας την εμφάνιση διαφορετικών λύσεων. Αυτές οι λύσεις μπορεί αργότερα να συνδυαστούν σχηματίζοντας καλύτερους γόνους.

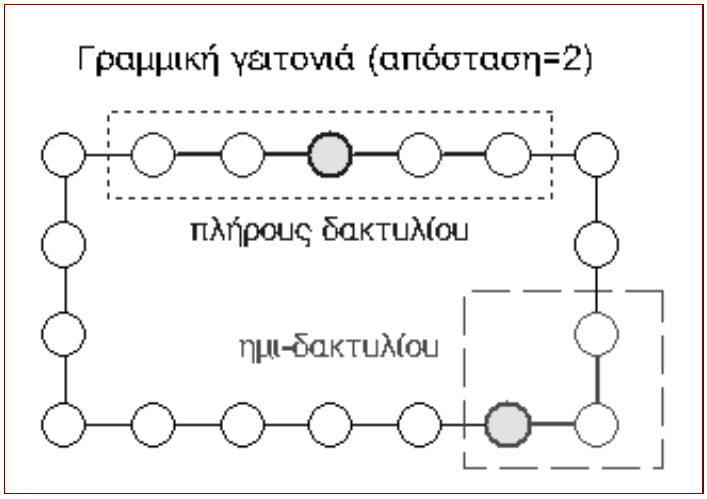
2.3.2. Υψηλής Ανάλυσης Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι *(Μοντέλο Διάχυσης ή απομόνωσης-λόγω-απόστασης ή γειτνίασης)*

Στους υψηλής ανάλυσης ΠΓΑ (υαΠΓΑ) ο πληθυσμός είναι χωρισμένος σε πολλές μικρές περιορισμένες περιοχές που ονομάζονται γειτονιές. Η επιλογή και η αναπαραγωγή γίνονται μόνο μεταξύ ατόμων της ίδιας γειτονιάς. Η γειτονιά μπορεί να ειδωθεί ως το σύνολο των πιθανών ζευγών. Το πρώτο βήμα είναι η επιλογή των μισών ατόμων που θα ζευγαρώσουν. Μετά, για κάθε άτομο ορίζεται μία γειτονιά. Μέσα από αυτή την γειτονιά θα γίνει η επιλογή του ζευγαριού του (mating partner). Η δομή της γειτονιάς μπορεί να είναι:

- γραμμική
  - πλήρους δακτυλίου, ή ημι-δακτυλίου (σχ. 2.5)
- διδιάστατη
  - πλήρους σταυρού, ή ημίσεος σταυρού (σχ. 2.6α)
  - πλήρους αστέρα, ή ημίσεος αστέρα (σχ. 2.6β)
- τρι-διάστατη ή πιο σύνθετη συνδυάζοντας τις προηγούμενες δομές (π.χ. υπερ-κύβου)

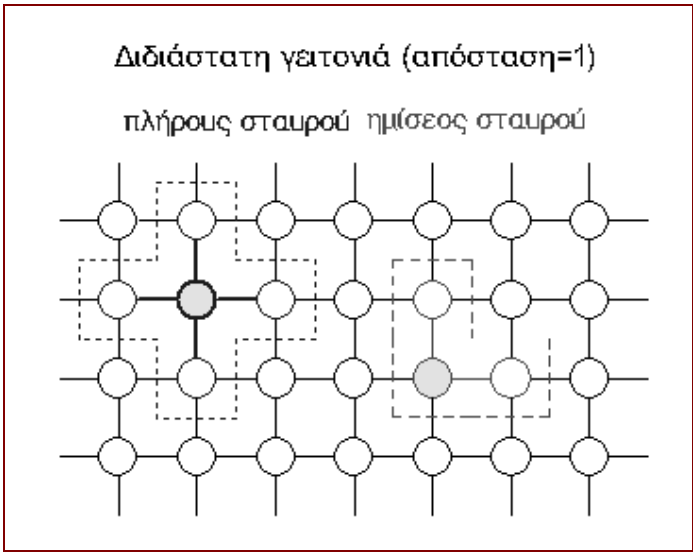
Η απόσταση μεταξύ των πιθανών γειτόνων και η δομή καθορίζουν το μέγεθος της γειτονιάς. Παραδείγματα του μεγέθους γειτονιάς για τις παραπάνω δομές και διαφορετικές τιμές απόστασης δίνονται στον πίνακα 2.1.

Μεταξύ των ατόμων ενός πληθυσμού υπάρχει "απομόνωση λόγω απόστασης". Όσο μικρότερη είναι η γειτονιά, τόσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση απομόνωσης. Όμως, λόγω της επικάλυψης των γειτονιών υπάρχει η δυνατότητα της διάχυσης των καλών λύσεων σε ολόκληρο τον πληθυσμό. Αυτό διασφαλίζει την ανταλλαγή της γενετικής πληροφορίας μεταξύ όλων των ατόμων του πληθυσμού.

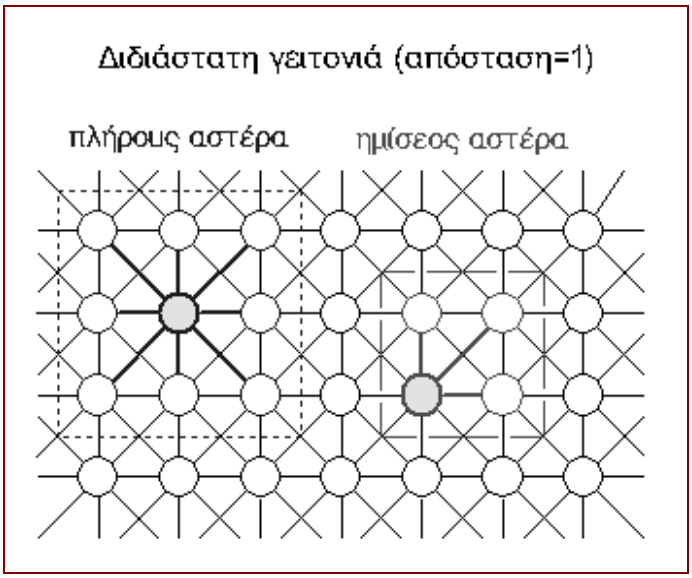


Σχήμα 2.5. Δομή γραμμικής γειτονιάς

(α)



(β)



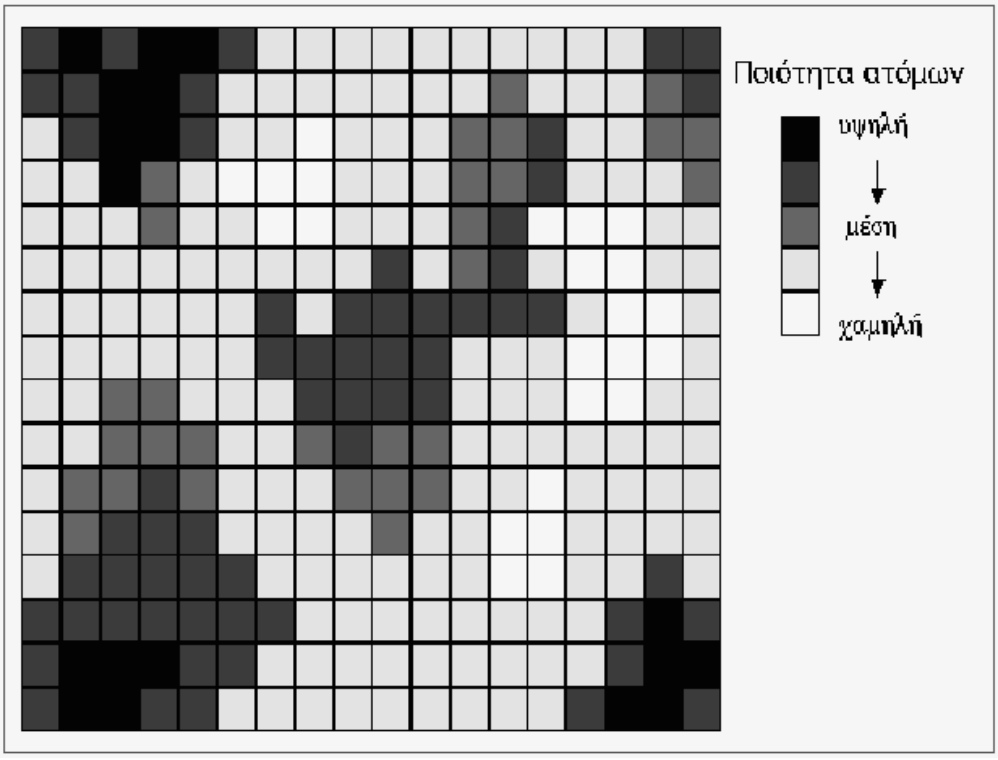
Σχήμα 2.6. Διδιάστατη γειτονιά: (α) πλήρους-ημίσεος σταυρού, (β) πλήρους-ημίσεος αστέρα

Πίνακας 2.1. Αριθμός γειτόνων

	Απόσταση	
Δομή	1	2
Πλήρους δακτυλίου	2	4
Ημι-δακτυλίου	1	2
Πλήρους σταυρού	4	8(12)
Ημίσεος σταυρού	2	4(5)
Πλήρους αστέρα	8	24
Ημίσεος αστέρα	3	8

Κατά την εξέλιξη του πληθυσμού εμφανίζονται εικονικές νησίδες (σχ. 2.7). Συνήθως ένας γόνος ανατίθεται σε κάθε επεξεργαστή. Οι πιο σημαντικές επιλογές στην υλοποίηση αυτού του μοντέλου είναι οι εξής:

- το μέγεθος και η δομή της γειτονιάς,
- η τοπολογία σύνδεσης των επεξεργαστών,
- η μέθοδος αντικατάστασης των γόνων.



Σχήμα 2.7. Εμφάνιση νησίδων στο μοντέλο διάχυσης

Η ερευνητική ομάδα του Mühlenbein χρησιμοποίησε ένα H/Y Encore με 16 επεξεργαστές και τον πληθυσμό τοποθετημένο σε τοπολογία διδιάστατου πίνακα [MüGK87] [MüGK88]. Κάθε γόνος είναι τοποθετημένος σε ένα διαφορετικό επεξεργαστή και έχει τέσσερις γείτονες από τους οποίους επιλέγει κάποιον για την αναπαραγωγή νέων γόνων. Κάθε γόνος προσπαθεί να βελτιωθεί

εφαρμόζοντας ένα τελεστή αναρρίχησης. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, η ποιότητα της λύσης εξαρτάται από τον αριθμό των γόνων και τον αριθμό των επεξεργαστών. Ο ελάχιστος αριθμός επεξεργαστών εξαρτάται από το μέγεθος του προβλήματος.

Το 1989 προτάθηκε το σύστημα ASPARAGOS από τους Gorges-Schleuter [Gorg89] και Mühlenbein [Mühl89] για την επίλυση δύσκολων συνδυαστικών προβλημάτων με πολύ καλά αποτελέσματα. Το σύστημα χρησιμοποιεί μία δομή πληθυσμού που μοιάζει με σκάλα με το πάνω και κάτω άκρο ενωμένα (σχηματίζοντας δύο δακτυλίους). Κάθε γόνος έχει τέσσερις γείτονες, δύο σε κάθε δακτύλιο. Ο καλύτερος γόνος όλου του πληθυσμού συμμετέχει σε όλες τις γειτονιές. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος είναι αναμφισβήτητη, αλλά λόγω της χρήσης μη συμβατικών τελεστών (PMX crossover, τελεστής αναρρίχησης) είναι δύσκολο να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη αυτού του μοντέλου ΠΓΑ Στο [vLaM90] τα καλύτερα αποτελέσματα επιτεύχθηκαν με μικρό μέγεθος γειτονιάς και μεγάλο μέγεθος πληθυσμού. Στο [Gorg90] συγκρίνονται διάφορες μέθοδοι αποδοχής των απογόνων και στο [Gorg92] διάφορες μέθοδοι ζευγαρώματος. Αργότερα [Mühl92], χρησιμοποιήθηκε και ελιτισμός. Στην προσπάθεια επίσης να αποφευχθεί η πρόωρη σύγκλιση του αλγορίθμου, επεβλήθη αργή διάδοση των γόνων μεταξύ των γειτονιών χρησιμοποιώντας οκτώ γόνους ως μέγεθος γειτονιάς με επικάλυψη δύο γόνων.

Ένας άλλος μαζικά παράλληλος ΓΑ με πιο συμβατική δομή πληθυσμού (οι γόνοι τοποθετήθηκαν σε επίπεδο πλέγμα) μελετήθηκε από τους Manderick και Spiesens [MaSp89] [SpMa91]. Η επιλογή και ο ανασυνδυασμός περιορίζονται στους άμεσους γείτονες ενός γόνου και έτσι οι γειτονιές ορίζονται από την κατανομή των γόνων στον χώρο. Η διάχυση των γόνων κάνει δυνατή την διερεύνηση νέων περιοχών του χώρου αναζήτησης. Η χρήση ομοιόμορφου ανασυνδυασμού είχε καλύτερα αποτελέσματα από τον ανασυνδυασμό ενός και δύο σημείων. Η απόδοση του αλγόριθμου επιδεινώνεται με την αύξηση του μεγέθους των γειτονιών.

Ο Davidor [Davi91] πρότεινε το μοντέλο ECO όπου ο πληθυσμός είναι τοποθετημένος σε ένα διδιάστατο πλέγμα του οποίου οι αντίθετες ακμές είναι ενωμένες. Κάθε γόνος έχει ένα αριθμό αναγνώρισης και μία λίστα από οκτώ γειτονικούς γόνους. Η επιλογή των γόνων γίνεται ανάλογα με την ποιότητά τους. Οι απόγονοι τοποθετούνται σε κάποια θέση στην γειτονιά των γονέων. Εάν η θέση είναι κατειλημμένη τότε η σύγκρουση επιλύεται πιθανοτικά, ανάλογα με την ποιότητα των δύο γόνων. Τα αποτελέσματα του μοντέλου δείχνουν την δυνατότητα του να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της πρόωρης σύγκλισης του αλγόριθμου.

Η προηγούμενη τοπολογία (torus) χρησιμοποιήθηκε επίσης από τους Talbi, Bessiere και Muntean [MuTa91] [TaMu91][TaBe91] κυρίως στο πρόβλημα της κατανομής διαδικασιών σε επεξεργαστές. Χρησιμοποίησαν ένα H/Y με 64 ή 128 transputers, τοποθετώντας ένα μόνο γόνο ανά επεξεργαστή. Η γειτονιά περιορίζεται στους άμεσα συνδεδεμένους γόνους για να μην υπάρξει επιβάρυνση λόγω των επικοινωνιών.

Στα αποτελέσματα αναφέρεται ότι η ποιότητα της λύσης βελτιώνεται με την χρήση μεγαλύτερου πληθυσμού. Με πολύ μικρό πληθυσμό υπάρχει πρόωρη σύγκλιση. Για δεδομένο αριθμό γενιών η ποιότητα της λύσης αυξάνεται με το μέγεθος του πληθυσμού. Αλλάζοντας τον αριθμό των επεξεργαστών επέτυχαν γραμμική επιτάχυνση. Για δεδομένη ποιότητα λύσης παρατηρήθηκε υπερ-γραμμική επιτάχυνση αυξάνοντας τον αριθμό των επεξεργαστών. Συγκρίνοντας με μεθόδους αναρρίχησης (hill-climbing) και simulated annealing ο ΠΓΑ είχε καλύτερη απόδοση και στην ποιότητα της λύσης και στο χρόνο σύγκλισης. Στο [TaMu93]

χρησιμοποίησαν ένα αλγόριθμο αναρρίχησης για την δημιουργία του αρχικού πληθυσμού. Η ποιότητα της λύσης βελτιώνεται, αλλά ο χρόνος σύγκλισης πολλαπλασιάζεται.

Ο αλγόριθμος εφαρμόστηκε και στο πρόβλημα της οδήγησης ενός ρομπότ σε μεταβαλλόμενο περιβάλλον [ATBM92][BATM93]. Το μοντέλο, το οποίο ονομάστηκε "Ο μίτος της Αριάδνης (Ariadne's Clew Algorithm)", παράγει μία διαδρομή σε δύο δευτερόλεπτα.

Σε ένα υαΠΓΑ, συνήθως οι γόνοι τοποθετούνται σε ένα διδιάστατο πλέγμα επειδή είναι η τοπολογία των περισσότερων μαζικά παράλληλων Η/Υ. Άλλες τοπολογίες μπορούν να προσομοιωθούν σε αυτό το πλέγμα, με μεγαλύτερο υπολογιστικό κόστος. Μία μελέτη του Schwehm [Schw92] συγκρίνει διαφορετικές τοπολογίες σύνδεσης χρησιμοποιώντας τον Η/Υ MasPar MP-1. Η τοπολογίες που υλοποιήθηκαν ήταν η τοπολογία torus, η τοπολογία δακτυλίου, και τρεις τοπολογίες υπερ-κύβου. Τα αποτελέσματα από το πρόβλημα επιμερισμού γραφήματος (graph partitioning) που επέλυσαν έδειξαν ότι η τοπολογία torus έχει καλύτερη απόδοση από τις υπόλοιπες.

Οι Anderson και Ferris [AnFe90] επίσης δοκίμασαν διαφορετικές τοπολογίες και διαφορετικές μεθόδους αποδοχής των απογόνων. Πειραματίστηκαν με δύο τοπολογίες δακτυλίου, ένα υπερ-κύβο, δύο τυχαία συνδεδεμένων δικτύων, και μίας "νησίδων" όπου οι γειτονιές είχαν επικάλυψη ενός μόνο γόνου. Συμπέραναν ότι στο πρόβλημα που χρησιμοποίησαν (κατανομή υλικών σε γραμμή συναρμολόγησης), οι τοπολογίες δακτυλίου και νησίδων είχαν τα καλύτερα αποτελέσματα.

Διαφορετικές τοπολογίες του μοντέλου διάχυσης συνέκρινε και ο Baluja [Balu92] χρησιμοποιώντας τον Η/Υ MasPar MP-1. Δοκίμασε δύο γραμμικές τοπολογίες και μία διδιάστατου πίνακα. Η τοπολογία διδιάστατου πίνακα επιτρέπει την ταχύτερη διάδοση γόνων από την μία εκ των δύο γραμμικών. Η τοπολογία διδιάστατου πίνακα, που είχε μικρότερη διάμετρο από τις άλλες δύο, είχε και τα καλύτερα αποτελέσματα. Όλες οι τοπολογίες είχαν καλύτερα αποτελέσματα από τον ΣΓΑ.

Το μέγεθος της γειτονιάς προσδιορίζει την ταχύτητα μετάδοσης της πληροφορίας μεταξύ των ατόμων του πληθυσμού, επιλέγοντας μεταξύ γρήγορης διάδοσης ή διατήρησης της ποικιλίας/απόκλισης του πληθυσμού. Συχνά επιλέγεται μεγαλύτερη ποικιλία των ατόμων, εμποδίζοντας έτσι την πρόωρη σύγκλιση του πληθυσμού.

Γενικά, η τοπική επιλογή και αναπαραγωγή είναι προτιμότερη της συνολικής. Η τοπική επιλογή βρίσκει τις βέλτιστες λύσεις ταχύτερα και επιτρέπει την διατήρηση μεγαλύτερης ποικιλίας γονοτύπων. Η χρήση μικρότερων γειτονιών έχει καλύτερη απόδοση από την χρήση μεγαλύτερων γειτονιών. Επίσης πρέπει να δοθεί και η διασύνδεση (τοπολογία) ολόκληρου του πληθυσμού η οποία επηρεάζει την απόδοση του υαΠΓΑ. Μία τοπολογία με μέση διάμετρο δίνει καλά αποτελέσματα. Ειδικότερα, για μικρούς πληθυσμούς συνίσταται γραμμική δομή (π.χ. ημίσεος αστέρος) με απόσταση 1, ενώ εάν ο πληθυσμός είναι μεγαλύτερος (>100 άτομα) θα έπρεπε να χρησιμοποιηθεί μεγαλύτερη απόσταση και/ή διδιάστατη τοπολογία.

2.3.3. Υβριδικοί Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι

Μερικοί ερευνητές προσπάθησαν να συνδυάσουν τις δύο μεθόδους παραλληλισμού των Γ.Α. Κάποιοι από αυτούς τους νέους υβριδικούς αλγόριθμους περιπλέκουν περισσότερο το ήδη πολύπλοκο πεδίο των ΠΓΑ, αλλά άλλοι αλγόριθμοι καταφέρνουν να κρατήσουν την ίδια πολυπλοκότητα με κάποιον από τους δύο επιμέρους αλγορίθμους.

Ο Gruau [Grua94] δημιούργησε ένα ΠΓΑ συνδυάζοντας το βηματικό μοντέλο και το μοντέλο απομόνωσης-λόγω-απόστασης. Ο πληθυσμός κάθε γειτονιάς είναι τοποθετημένος σε ένα διδιάστατο πλέγμα. Περίπου οι μισές θέσεις σε κάθε γειτονιά καταλαμβάνονται από γόνους. Οι γειτονιές είναι συνδεδεμένες σε τοπολογία διδιάστατου torus. Κάθε γειτονιά ανατίθεται σε ξεχωριστό επεξεργαστή και μπορεί να επικοινωνήσει μόνο με τους τέσσερις γειτονικούς επεξεργαστές. Μετανάστευση γόνων γίνεται σε τακτά διαστήματα. Ο αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε σε μια πρωτότυπη εφαρμογή σχεδίασης και εκπαίδευσης τεχνητών νευρωνικών δικτύων. Το βέλτιστο μέγεθος πληθυσμού εξαρτάται από το πλήθος των επεξεργαστών. Παρατήρησε υπερ-γραμμική επιτάχυνση με την χρήση μέχρι 16 επεξεργαστών. Με περισσότερους επεξεργαστές η απόδοση μειώνεται. Το μοντέλο λειτουργεί καλά με γειτονιές τουλάχιστον οκτώ γόνων.

Οι Sepehri κλπ. [SWLD94] υλοποίησαν ένα υβριδικό ΠΓΑ για την εκτίμηση των παραμέτρων ενός υδραυλικού συστήματος. Το μοντέλο συνδυάζει το μοντέλο μετανάστευσης ("συνεργαζόμενος" Γ.Α. στη δημοσίευση) και την τυπική παράλληλη προσέγγιση (πρότυπο συντονιστή-εργαζόμενου στη δημοσίευση) για κάθε μία από τις νησίδες Γ.Α. Υπάρχουν τέσσερις σειριακά συνδεδεμένοι Γ.Α. (συντονιστές), κάθε ένας από τους οποίους είναι συνδεδεμένος με τρεις εργαζόμενους. Ο συντονιστής διανέμει τους γόνους στους εργαζόμενους όπου υπολογίζεται η ποιότητά τους. Ο συντονιστής είναι υπεύθυνος για την αναπαραγωγή γόνων (επιλογή, ανασυνδυασμός, μετάλλαξη). Οι κύριοι Γ.Α. ανταλλάσσουν τον καλύτερο γόνο τους με καθορισμένη συχνότητα. Χρησιμοποιώντας 16 transputers επιτάχυναν τον αλγόριθμο κατά 12 φορές με 120 γόνους συνολικό πληθυσμό (30 γόνοι σε κάθε κύριο Γ.Α.). Αυτή η προσέγγιση δεν εισάγει νέα προβλήματα ανάλυσης και μπορεί να είναι πολύ χρήσιμη σε σύνθετες εφαρμογές με μεγάλο πληθυσμό και συναρτήσεις ποιότητας που απαιτούν σημαντικό υπολογιστικό χρόνο.

Οι Potts κλπ. [PoGY94] εισήγαγαν ένα μοντέλο ΠΓΑ το οποίο δημιουργεί πολλαπλούς πληθυσμούς (species-είδη) και παράγουν λύσεις με τον συνδυασμό των ειδών. Χρησιμοποιούν τέσσερις υπο-πληθυσμούς. Κάθε υπο-πληθυσμός έχει συγκεκριμένο σκοπό. Αρχικά δημιουργούνται οι υπο-πληθυσμοί II, III και IV. Ο υπο-πληθυσμός II (πληθυσμός διερεύνησης) έχει μεγάλο ρυθμό μετάλλαξης και η αρχική τιμή των γόνων του έχει περισσότερα μηδενικά. Ο υπο-πληθυσμός IV (πληθυσμός εκμετάλλευσης) έχει μικρό ρυθμό μετάλλαξης και η αρχική τιμή των γόνων του έχει περισσότερα ένα. Ο ρυθμός μετάλλαξης και η αρχικοποίηση των γόνων του υπο-πληθυσμού III βρίσκεται μεταξύ των II και IV. Τυχαία διαλεγμένοι γόνοι μεταναστεύουν μεταξύ των πληθυσμών II, III και IV. Η συχνότητα μετανάστευσης είναι μεγαλύτερη στην αρχή και μειώνεται με την αύξηση του αριθμού γενιών. Οι καλύτεροι γόνοι των υπο-πληθυσμών II, III και IV τοποθετούνται στον υπο-πληθυσμό I. Η τοποθέτηση γόνων στον υπο-πληθυσμό I συνεχίζεται σε κάθε γενιά, εάν οι γόνοι των II, III και IV είναι καλύτεροι. Οι γόνοι του υπο-πληθυσμού I είναι απομονωμένοι και δεν αναπαράγονται. Σε προκαθορισμένο αριθμό γενιών, οι

γόνοι του υπο-πληθυσμού I μεταφέρονται στον υπο-πληθυσμό IV και αντικαθιστούν τους ήδη υπάρχοντες γόνους. Μετά από 60 γενιές οι υπο-πληθυσμοί II, III και IV αρχικοποιούνται ξανά. Τα αποτελέσματά τους ήταν πολύ καλύτερα από τον ΣΓΑ. Η εισαγωγή του υπο-πληθυσμού IV στον I, καθώς και η μετανάστευση γόνων βελτιώνει την απόδοση του αλγόριθμου. Η απόδοση μειώνεται όταν χρησιμοποιείται ο ίδιος ρυθμός μετάλλαξης σε όλους τους υπο-πληθυσμούς. Επίσης μειώνεται χωρίς μετανάστευση γόνων και χωρίς την αντικατάσταση των γόνων του υπο-πληθυσμού I από τους γόνους του υπο-πληθυσμού IV.

Οι Surry and Radcliffe [SuRa94] δημιούργησαν το σύστημα RPL2 (Reproductive Plan Language), το οποίο λειτουργεί σαν γλώσσα προγραμματισμού για το γράψιμο και την χρήση προγραμμάτων εξελικτικών αλγορίθμων. Το σύστημα υποστηρίζει οποιαδήποτε γενετική αναπαράσταση, όλα τα μοντέλα παραλληλισμού (ακόμη και υβριδικά) και τρέχει σε παράλληλους ή σειριακούς H/Y, κρύβοντας τον παραλληλισμό από τον χρήστη. Το σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί σε πολλές εφαρμογές με πολύ επιτυχία.

Ένα άλλο περιβάλλον προγραμματισμού γενετικών αλγορίθμων αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος PAPAGENA στα πλαίσια του ESPRIT III. Το σύστημα παρέχει μια βιβλιοθήκη γνωστών Γ.Α. και ένα ισχυρό περιβάλλον γραφικής διασύνδεσης. Επιπλέον εκμεταλλεύεται τον ενδογενή παραλληλισμό των Γ.Α. και αναπτύσσει ένα σύστημα μεταγλώττισης και αντιστοίχισης με στόχο H/Y βασισμένους σε transputers και μελλοντικές αρχιτεκτονικές.

2.3.4. Σύγκριση Απόδοσης Παράλληλων Γενετικών Αλγόριθμων

Στα προηγούμενα υπο-κεφάλαια, μέσα από τις σημαντικότερες δημοσιεύσεις, παρουσιάστηκε η αποτελεσματικότητά τους στην αντιμετώπιση δύσκολων προβλημάτων.

Η έρευνα στο χώρο των ΠΓΑ κυριαρχείται από την παρουσίαση πειραματικών αποτελεσμάτων. Αν και οι εργασίες που παρουσιάστηκαν υποστηρίζουν την χρήση κάποιων τοπολογιών, συχνοτήτων και ποσοστών μετανάστευσης, δεν υπάρχει ακόμη κάποια θεωρητική ανάλυση της επίδρασης αυτών των παραμέτρων στην ικανότητα αναζήτησης ή στην ταχύτητα του αλγόριθμου.

Κάποιες εργασίες συγκρίνουν την απόδοση των fine και coarse grained ΠΓΑ Υπάρχουν αρκετές επιφυλάξεις για τα αποτελέσματα αυτών των εργασιών, κυρίως, όπως επισημαίνει ο Baluja [Balu93], επειδή είναι πολύ δύσκολο να υπάρξει κάποιο μέτρο της απόδοσης το οποίο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να συγκρίνει απ'ευθείας την απόδοση των δύο ειδών ΠΓΑ Ο Baluja συνέκρινε τρεις τοπολογίες υαΠΓΑ (δύο τοπολογίες γραμμικής διάταξης, και μία πίνακα), και ένα χαΠΓΑ με κυκλική διάταξη των υπο-πληθυσμών. Γενικά τα αποτελέσματά του στα περισσότερα προβλήματα ευνοούν τους υαΠΓΑ και ειδικότερα την τοπολογία πίνακα.

Αντιθέτως τα αποτελέσματα των Gordon και Whitley [GoWh93] είναι περισσότερο θετικά για τους χαΠΓΑ Γενικά, οι αλγόριθμοι χωρίς ελιτισμό έχουν την χειρότερη απόδοση. Οι ΠΓΑ έχουν καλύτερη απόδοση από τον ΣΓΑ., ειδικά σε δύσκολα προβλήματα. Και αυτοί καταλήγουν

στο ότι οι ΠΓΑ με κάποια μορφή τοπικής επιλογής και αναπαραγωγής έχουν καλύτερα αποτελέσματα από τον ένα και μοναδικό πληθυσμό όπου η αναπαραγωγή γίνεται συνολικά.

Οι Macfarlane και East [MaEa89][EaMa93] σύγκριναν ένα ΣΓΑ, ένα μοντέλο μετανάστευσης (τοπολογία δακτυλίου και μετανάστευση σταθερού ποσοστού γόνων κατά μία φορά γύρω από τον δακτύλιο) και δύο μοντέλο διάχυσης με γειτονιές τεσσάρων γόνων και τοπολογία torus (A-αντικατάσταση γονέα με απόγονο, B-αντικατάσταση μόνο εάν ο απόγονος είναι καλύτερος). Στα περισσότερα προβλήματα το μοντέλο διάχυσης B είχε καλύτερα αποτελέσματα με δεύτερο το μοντέλο μετανάστευσης και τελευταίο το ΣΓΑ.

Το μοντέλο μετανάστευσης είναι η πιο ρεαλιστική προσομοίωση των μοντέλων φυσικής εξέλιξης και η πιο δημοφιλής προσέγγιση. Ανεξάρτητα από τα αποτελέσματα σύγκρισης μεταξύ των διαφόρων μοντέλων και τοπολογιών ΠΓΑ, είναι εμφανής η υπεροχή τους απέναντι στους ΣΓΑ. Η παράλληλη υλοποίηση των ΓΑ επέδειξε όχι μόνο επιτάχυνση του υπολογιστικού χρόνου αλλά είχε και λιγότερους υπολογισμούς της συνάρτησης ποιότητας σε σύγκριση με τους ΓΑ ενός πληθυσμού. Έτσι, ακόμη και όταν διατίθεται μόνο ένας επεξεργαστής, η υλοποίηση του ΓΑ με παράλληλο τρόπο (ψευδο-παράλληλα) αποδίδει καλύτερα αποτελέσματα. Γενικά, οι ΠΓΑ επιταχύνουν την σύγκλιση και βελτιώνουν την ικανότητα αναζήτησης των ΣΓΑ.

2.4. Εφαρμογές Παράλληλων Γενετικών Αλγόριθμων

Εκτός από κλασικές συναρτήσεις δοκιμής και ελέγχου της απόδοσης (συναρτήσεις De Jong, Rastrigin, Schwefel, Griewangk κ.α.), ο ΠΓΑ έχει χρησιμοποιηθεί για την επίλυση πολλών προβλημάτων σε πολλούς τομείς της επιστήμης. Μερικά παραδείγματα εφαρμογών είναι τα εξής:

- Πρόβλημα επιμερισμού γραφήματος ([CoJe91][CoMR91][Levi94][LiPG94][vLaM90] [MüGK87][MüGK88][Mühl92][TaBe91])
- Κατανομή διαδικασιών σε επεξεργαστές ([MuTa91][Neuh90][TaMu91] [TaMu93])
- Πρόβλημα τετραγωνικής εκχώρησης ([LiMa90][Mare94][Mühl89])
- Ρομποτική ([ATBM92][BATM93][ToLo93])
- Σχεδίαση κυκλωμάτων VLSI ([CoMR90][CoMR91])
- Βελτιστοποίηση τοπολογίας ([Norm88])
- Προβλήματα συσκευασίας ([KrSV90][KrSV93])
- Προβλήματα ωρολογίου προγράμματος ([Abra92][AbMP92][SuRa94])
- Βελτιστοποίηση της αρχιτεκτονικής και εκπαίδευση τεχνητών νευρωνικών δικτύων ([Grua94][PoGY94][StWM90][SuRa94][WhSB90])
- Γραμμικός προγραμματισμός ([BiBr93])
- Γενικευμένο πρόβλημα προγραμματισμού γραμμής παραγωγής ([HuMi91])
- Κατανομή αρχείων σε ένα κατανεμημένο σύστημα ([PoGY94])
- Εκτίμηση παραμέτρων υδραυλικού συστήματος βαρέων εργασιών ([SWLD94])
- Πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή ([Brau90][Gorg90][MüGK87][MüGK88] [Mühl92])

- Συστήματα εκμάθησης κανόνων ([KiSH91])

Κεφάλαιο 3

Συνεργαζόμενοι Πληθυσμοί

Υπάρχουν πάρα πολλές διαφορετικές υλοποιήσεις των ΠΓΑ, που εξαρτώνται τόσο από το διαθέσιμο Η/Υ, όσο και από το συγκεκριμένο πρόβλημα. Ο κατακερματισμός αυτός των υλοποιήσεων και η μη ύπαρξη ενός κοινού μοντέλου ήταν ένα από τα κίνητρα αυτής της διατριβής. Σε αυτό το κεφάλαιο εισάγουμε ένα πλαίσιο ενοποίησης των απλών σειριακών και παράλληλων γενετικών αλγόριθμων, προσφέροντας ένα εργαλείο υλοποίησης οιοδήποτε τύπου εξελικτικού αλγορίθμου σε οιοδήποτε υπολογιστικό σύστημα, συμπεριλαμβά-νοντας σειριακούς και παράλληλους Γ.Α.

3.1. Ορισμός του μοντέλου

Η γενετική εξέλιξη συντελείται σύμφωνα με ένα σύνολο κανόνων που αφορούν την επιλογή τον ανασυνδυασμό και την μετάλλαξη.

Παρακάτω ορίζεται ένα μοντέλο συνεργαζόμενων πληθυσμών (ΣΠ), στα πλαίσια της τυποποίησης σύνθετων γενετικών συστημάτων, με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Το σύστημα αποτελείται από διάφορα επίπεδα κάθε ένα από τα οποία απαρτίζεται από ένα πεπερασμένο αριθμό στοιχείων.
2. Η δομή των στοιχείων κάθε επιπέδου εξαρτάται από την δομή των στοιχείων όλων των προηγουμένων επιπέδων.
3. Η δομή των στοιχείων σε κάποιο επίπεδο είναι παρόμοια, όπως και η δομή των στοιχείων των διαφόρων επιπέδων.
4. Τα στοιχεία κάποιου επιπέδου μπορούν να ανταλλάσσουν κάποιες πληροφορίες, οι οποίες είναι το αποτέλεσμα κάποιας επεξεργασίας, ενώ διατηρούν την δομή τους.
5. Κάθε στοιχείο λειτουργεί ως μια μέθοδος ολικής αναζήτησης, μιμούμενο την φυσική εξέλιξη.

Οι συνεργαζόμενοι πληθυσμοί (ΣΠ) μπορούν άτυπα να περιγραφούν ως εξής. Πληθυσμοί ατόμων ζούν σε νησίδες οι οποίες έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους. Σε ένα δεύτερο επίπεδο, πληθυσμοί νησίδων σχηματίζουν μεγαλύτερες οντότητες όπου κάθε νησίδα θεωρείται ως ένα άτομο. Όπως και στο προηγούμενο επίπεδο οι οντότητες έχουν την δυνατότητα να επικοινωνούν μεταξύ τους. Στο επόμενο επίπεδο, αυτές οι μεγαλύτερες οντότητες μπορούν επίσης να σχηματίσουν ένα πληθυσμό όπου κάθε οντότητα θεωρείται ως άτομο. Η διαδικασία μπορεί να συνεχιστεί μέχρι το επιθυμητό επίπεδο. Σε όλα τα επίπεδα η δημιουργία νέων ατόμων γίνεται με την χρήση γενετικών τελεστών.

Ένα άτομο μπορεί να είναι ένας γόνος, μία νησίδα ή μία οντότητα σε ανώτερο επίπεδο. Κάθε πληθυσμός μπορεί να εξελίσσεται συνολικά, ή τοπικά όπου τα άτομα επιλέγουν, ανασυνδυάζονται και αντικαθιστούν άτομα σε μια περιορισμένη περιοχή (γειτονιά/υπο-πληθυσμός/γειτονιά). Κάθε πληθυσμός είναι δυνατό να χρησιμοποιεί διαφορετικούς τελεστές και παραμέτρους. Κάθε *κ* γενιές μερικά από τα καλύτερα άτομα στέλνονται σε άλλους πληθυσμούς. Η γενετική εξέλιξη συντελείται σύμφωνα με ένα σύνολο κανόνων που αφορούν την επιλογή τον ανασυνδυασμό και την μετάλλαξη.

Ορισμός. Το επίπεδο κ του μοντέλου των ΣΠ ($\Sigma\Pi^{\kappa}$) ορίζεται αναδρομικά ως προς κ ως μία τετράδα στοιχείων

$$\Sigma\Pi^{\kappa} = \langle\ \Sigma\Pi^{\kappa-1},\ \tau,\ Αναπαραγωγή,\ Δομή\ \rangle \tag{3.1}$$

με το αρχικό επίπεδο να ορίζεται για κ=0 ως:

$$\Sigma\Pi^{0} = \langle\ \Pi^{0},\ \tau,\ Αναπαραγωγή,\ Δομή\ \rangle \tag{3.2}$$

όπου:

- $\Sigma\Pi^{\kappa-1}$, συμβολίζει το επίπεδο *κ-1* του μοντέλου
- Π^{0}, συμβολίζει τον αρχικό πληθυσμό χρωμοσωμάτων του επιπέδου 0
- τ, συμβολίζει το κριτήριο τέλους
- ***Αναπαραγωγή*** είναι η διάταξη η οποία χρησιμοποιείται για να αναπαραχθεί μία γενιά στο επίπεδο κ, και αποδίδεται από την ακόλουθη πεντάδα στοιχείων

$$Αναπαραγωγή = \langle\ εποχή,\ επιλογή,\ τελεστές,\ μηχανισμοί,\ παράμετροι\ \rangle \tag{3.3}$$

  - ***εποχή***, συμβολίζει τον αριθμό των γενεών του επιπέδου κ-1, που χρειάζονται για να αρχίσει η αναπαραγωγή της νέας γενιάς στο επίπεδο κ. Στο αρχικό επίπεδο 0 ($\Sigma\Pi^{0}$) η *εποχή* ισούται με 1.
  - ***επιλογή,*** συμβολίζει τις μεθόδους επιλογής γονέων, όπως αναλογική επιλογή, επιλογή

κατόπιν αγώνων, επιλογή κατάταξης, επιλογή Boltzmann, αποκοπή σίγμα κλπ.

- ***τελεστές***, είναι το σύνολο των γενετικών τελεστών που χρησιμοποιείται για την δημιουργία του πληθυσμού της χρονικής στιγμής t+1 από τον πληθυσμό της προηγούμενης χρονικής στιγμής t. Αυτοί οι τελεστές περιλαμβάνουν τους δύο βασικούς γενετικούς τελεστές, τον ανασυνδυασμό και την μετάλλαξη καθώς και τις διάφορες παραλλαγές τους, την αναστροφή, την αναρρίχηση, και άλλους τελεστές εξειδικευμένους σε συγκεκριμένες κατηγορίες προβλημάτων ή υλοποιήσεων
- ***μηχανισμοί***, είναι οι γενικοί μηχανισμοί όπως ο ελιτισμός, η μέθοδος αντικατάστασης, η κλιμάκωση της ποιότητας, η κατάταξη της ποιότητας, η εξέλιξη των τελεστών, η μέθοδος μετανάστευσης γόνων μεταξύ γειτονιών ή μεταξύ υπο-πληθυσμών κλπ.
- ***παράμετροι***, συμβολίζει το σύνολο των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο επίπεδο κ, δηλαδή τις παραμέτρους της μεθόδου επιλογής όπως πιθανότητες επιλογής, μέγεθος ομάδας, αριθμός αναπαραγωγικών δοκιμών, και τις παραμέτρους των τελεστών όπως ο ρυθμός μετάλλαξης, η πιθανότητα ανασυνδυασμού, ο αριθμός και θέση των σημείων κοπής κατά τον ανασυνδυασμό, το μήκος του κάθε γόνου (το μήκος είναι δυνατόν να διαφέρει μεταξύ των πληθυσμών ή/και από γενιά σε γενιά), την συχνότητα προσαρμογής των παραμέτρων, τον αριθμό των γόνων που μεταναστεύουν μεταξύ των πληθυσμών κλπ.

◆ **Η *Δομή*** του μοντέλου των ΣΠ στο επίπεδο κ, περιγράφεται από την ακόλουθη εξάδα στοιχείων

$$\textit{Δομή} = \langle\ \textit{ΜεΠ, ΜεΓ, ΔοΓ, λ, τοπολογία, ΑνΠ}\ \rangle \tag{3.4}$$

- ***ΜεΠ*** συμβολίζει τον αριθμό των ατόμων ενός πληθυσμού
- ***ΜεΓ*** συμβολίζει το μέγεθος κάθε γειτονιάς, δηλαδή τον αριθμό των ατόμων σε μια περιορισμένη περιοχή, όταν ο πληθυσμός δεν είναι "παν-μικτικός"
- ***ΔοΓ*** συμβολίζει την δομή των γειτονιών. Στην περίπτωση που οι γειτονιές επικαλύπτονται, το γενετικό υλικό εξαπλώνεται μεταξύ των γειτονιών και δεν είναι απαραίτητο να γίνει άμεση ανταλλαγή γόνων.
- ***λ*** συμβολίζει τον αριθμό των διαθέσιμων μονάδων επεξεργασίας.
- ***τοπολογία*** συμβολίζει την φυσική σύνδεση των επεξεργαστών και επηρεάζει την απόδοση του μοντέλου. Η τοπολογία είναι δυνατόν να είναι στατική (όταν οι αρχικές συνδέσεις μεταξύ των επεξεργαστών μένουν σταθερές κατά την διάρκεια της εκτέλεσης του αλγόριθμου, διατηρώντας σταθερή την τοπολογία του δικτύου) ή δυναμική (όταν οι συνδέσεις μεταξύ των επεξεργαστών αλλάζουν με τον χρόνο). Γενικά, αν η τοπολογία έχει πυκνή σύνδεση (ή μικρή διάμετρο, ή και τα δύο), οι καλές λύσεις θα διαδοθούν γρήγορα και θα καταλάβουν γρήγορα ολόκληρο τον πληθυσμό. Αντιθέτως, αν η τοπολογία έχει αραιή σύνδεση (ή έχει μεγάλη διάμετρο), οι λύσεις θα διαδοθούν πιο αργά και οι πληθυσμοί θα είναι απομονωμένοι μεταξύ τους, επιτρέποντας την εμφάνιση διαφορετικών λύσεων.
- ***ΑνΠ*** συμβολίζει τον ακριβή σχηματισμό που χρησιμοποιείται για την ανάθεση των πληθυσμών (ή του πληθυσμού) στους επεξεργαστές (ή τον επεξεργαστή).

Όταν κ > 0, η αναπαραγωγή συνήθως μειώνεται σε απλή ανταλλαγή γόνων (μετανάστευση), και η *εποχή* αντιστοιχεί στο διάστημα μετανάστευσης. Ανάλογα με το επίπεδο αυτό θα μπορούσε να σημαίνει μετανάστευση γόνων, νησίδων, ή μεγαλύτερων οντοτήτων. Υπάρχει η δυνατότητα εξέλιξης των ατόμων πριν την μετανάστευση. Τελεστές όπως ο ανασυνδυασμός και η μετάλλαξη, είναι δυνατό να οριστούν για κάθε επίπεδο του μοντέλου.

Το μοντέλο είναι ιεραρχικά δομημένο και βασισμένο στη δυνατότητα ύπαρξης πολλών επιπέδων. Αυτό του δίνει την δυνατότητα υλοποίησης διαφορετικών επιπέδων παραλληλισμού.

Ο ορισμός του μοντέλου αποτελεί ένα πλαίσιο ενοποίησης όλων των ειδών των ΠΓΑ και των χαμηλής και των υψηλής ανάλυσης.

Το αρχικό επίπεδο των ΣΠ ($ΣΠ^0$) μπορεί να περιγράψει και τους μαζικά παράλληλους Γ.Α. και τους απλούς Γ.Α. Όταν το μέγεθος γειτονιάς (*ΜεΓ*) ισούται με το μέγεθος όλου του πληθυσμού (*ΜεΠ*) δεν υπάρχουν γειτονιές και ο πληθυσμός είναι "παν-μικτικός", δηλαδή. κάθε γόνος μπορεί να ζευγαρώσει με οποιοδήποτε άλλο. Όταν χρησιμοποιούνται μόνο ο ανασυνδυασμός και η μετάλλαξη ως γενετικοί τελεστές, το μοντέλο αντιστοιχεί στον απλό ΓΑ. Παρακάτω αναλύεται το μοντέλο των ΣΠ για τα δύο πρώτα επίπεδα, δηλαδή τα επίπεδα 0 και 1.

3.2. Συνεργαζόμενοι πληθυσμοί επιπέδου 0 ($ΣΠ^0$)

Ένα από τα κυριότερα χαρακτηριστικά του μοντέλου ΣΠ είναι η ιεραρχική και αναδρομική δομή του. Ο ορισμός κάθε επιπέδου στηρίζεται στον ορισμό του προηγούμενου επιπέδου με τελική κατάληξη, σε όλες τις περιπτώσεις, το αρχικό επίπεδο 0, $ΣΠ^0$.

Το αρχικό επίπεδο του μοντέλου $ΣΠ^0$ περιγράφει οποιαδήποτε υλοποίηση των ΣΓΑ αλλά και οποιαδήποτε υλοποίηση των υαΠΓΑ. Η επιλογή των στοιχείων των διατάξεων *Αναπαραγωγής* και *Δομής*, είναι αυτό που ουσιαστικά προσδιορίζει το είδος του εξελικτικού αλγόριθμου που θα υλοποιηθεί.

Σύμφωνα με τον ορισμό 3.2, για να ορισθεί το αρχικό επίπεδο πρέπει να οριστεί η τετράδα των στοιχείων που το αποτελούν, σύμφωνα με τον ορισμό του μοντέλου (σχέση 3.2), δηλαδή, ο αρχικός πληθυσμός $Π^0$, η συνθήκη τερματισμού και οι διατάξεις *Αναπαραγωγή* και *Δομή*.

Η επιλογή της αναπαράστασης και η δημιουργία του αρχικού πληθυσμού $Π^0$, είναι κρίσιμη για την απόδοση του μοντέλου. Αν και η δυαδική κωδικοποίηση είναι η πιο συνήθης κωδικοποίηση στο χώρο των ΓΑ, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε αναπαράσταση των γόνων του αρχικού πληθυσμού (π.χ. κωδικοποίηση πραγματικών τιμών, χαρακτήρων, ή άλλη αναπαράσταση η οποία αρμόζει στην φύση του προβλήματος). Η χρήση τελεστών προσαρμογής της κωδικοποίησης (π.χ. τελεστές αναστροφής, διαγραφής, διπλασιασμού γονιδίων) συνήθως βελτιώνει την απόδοση [Mitc96].

Τα στοιχεία της διάταξης *Αναπαραγωγής* του επιπέδου 0, ορίζονται ως ακολούθως:

- Σύμφωνα με τον ορισμό του μοντέλου η τιμή της ***εποχής*** είναι 1.

- ***επιλογή*** συμβολίζει την μέθοδο επιλογής των γονέων που θα χρησιμοποιηθούν στην αναπαραγωγή νέων ατόμων. Περιλαμβάνονται όλες οι μέθοδοι επιλογής οι οποίες έχουν αναφερθεί στην βιβλιογραφία των ΓΑ [Bäck94b][BäHo91][Bram91][CoJe91][Davi91] [Gold89][GoDe91][Mitc96].
- Είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί οποισδήποτε ***τελεστής*** ή συνδυασμός ***τελεστών*** αναφέρεται στην βιβλιογραφία των ΓΑ. Βασικοί είναι οι δύο γενετικοί τελεστές, ανασυνδυασμός και μετάλλαξη μαζί με τις διάφορες παραλλαγές τους. Στην περίπτωση των υαΠΓΑ όπου έχει νόημα η ύπαρξη της γειτονιάς, κάθε άτομο έχει μία θέση στον συνολικό πληθυσμό και η αλλαγή της θέσης δύο ατόμων υλοποιεί την αντίστοιχη παραλλαγή του τελεστή της μετάλλαξης.
- ***μηχανισμοί***, αναφέρεται σε γενικές τεχνικές οι οποίες βελτιώνουν την απόδοση του αλγόριθμου (π.χ. απόδοση αρχικών τυχαίων τιμών στα άτομα κάτω από κάποιες προυποθέσεις, μέθοδος αντικατάστασης των γονέων από τους απογόνους κλπ.). Ο ελιτισμός θεωρείται ένας βασικός μηχανισμός για όλες τις κατηγορίες εξελικτικών αλγορίθμων. Πολύ συχνή είναι και η χρήση μηχανισμού προσαρμογής της συχνότητας εφαρμογής των γενετικών τελεστών.
- Οι ***παράμετροι*** περιλαμβάνουν τις παραμέτρους της μεθόδου επιλογής όπως πιθανότητες επιλογής, μέγεθος ομάδας, αριθμός αναπαραγωγικών δοκιμών, και τις παραμέτρους των τελεστών όπως ο ρυθμός μετάλλαξης, η πιθανότητα ανασυνδυασμού, ο αριθμός και θέση των σημείων κοπής κατά τον ανασυνδυασμό, το μήκος του κάθε γόνου (το μήκος είναι δυνατόν να είναι μεταβλητό), την συχνότητα προσαρμογής των παραμέτρων κλπ.

Τα στοιχεία της διάταξης ***Δομής*** του επιπέδου 0, ορίζονται ως ακολούθως:

- ***ΜεΠ*** ισούται με τον αριθμό των ατόμων του πληθυσμού
- ***ΜεΓ*** ισούται με τον αριθμό των ατόμων που αποτελούν την γειτονιά εντός της οποίας θα αναπαραχθεί το νέο άτομο, δηλαδή το πλήθος των ατόμων τα οποία χρησιμοποιούνται για να επιλεγούν οι γονείς για την αναπαραγωγή ενός νέου ατόμου. Στην περίπτωση των ΣΓΑ η επιλογή γίνεται μεταξύ όλων των ατόμων του πληθυσμού, οπότε η τιμή των ***ΜεΠ*** και ***ΜεΓ*** είναι ίδια. Αντιθέτως στην περίπτωση των υαΠΓΑ, όπου ο πληθυσμός δεν είναι παν-μικτικός, η επιλογή των γονέων προς αναπαραγωγή γίνεται σε μια περιορισμένη περιοχή η οποία ορίζει την γειτονιά.
- ***ΔοΓ*** αντιπροσωπεύει την δομή της γειτονιάς νησίδων η οποία μπορεί να είναι σε σχήμα σταυρού, ρόμβου, τετραγώνου, ευθείας γραμμής κλπ.
- λ ισούται με τον αριθμό των επεξεργαστών που είναι διαθέσιμοι στο επίπεδο 0. Στους ΣΓΑ συνήθως ολόκληρος ο πληθυσμός ανατίθεται σε έναν επεξεργαστή, ενώ στην περίπτωση των υαΠΓΑ, συνήθως σε κάθε επεξεργαστή ανατίθεται ένα άτομο.
- ***τοπολογία*** αναφέρεται στην σύνδεση μεταξύ των επεξεργαστών που χρησιμοποιούνται στο επίπεδο 0.
- ***ΑνΠ*** αναφέρεται στην ανάθεση του πληθυσμού στους διαθέσιμους επεξεργαστές.

Συνήθως, το κριτήριο τέλους ***τ*** ικανοποιείται όταν βρεθεί η λύση του προβλήματος, ή εάν δεν υπάρχει περαιτέρω βελτίωση ή εάν συμπληρωθεί ένας προκαθορισμένος αριθμός γενεών.

3.3. Συνεργαζόμενοι πληθυσμοί επιπέδου 1 ($\Sigma\Pi^1$)

Το μοντέλο ΣΠ είναι ιεραρχικά δομημένο. Αποτελείται από διάφορα υπο-συστήματα τα οποία αποτελούνται από ακόμη μικρότερα υπο-συστήματα, κ.ο.κ. Στο επίπεδο 1 του μοντέλου, τα υπο-συστήματα αντιστοιχούν σε νησίδες. Ένας αλγόριθμος βασισμένος σε τεχνικές φυσικής εξέλιξης (εξελικτικός αλγόριθμος) χρησιμοποιείται σε κάθε νησίδα για την εξέλιξη του πληθυσμού της, παράλληλα με τις υπόλοιπες νησίδες. Ο αρχικός πληθυσμός κάθε νησίδας αποτελείται από τον αρχικό πληθυσμό χρωμοσωμάτων, δηλαδή ένα πληθυσμό υποψηφίων λύσεων κάποιου προβλήματος, αφού κωδικοποιηθεί κατάλληλα.

Ο κύριος αντιπρόσωπος των $\Sigma\Pi^1$, όπως παρουσιάστηκε στην αναδρομή της βιβλιογραφίας στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι οι χαΠΓΑ και ιδιαίτερα το μοντέλο νησίδων. Οι χαΠΓΑ είναι το καλύτερα μελετημένο παράδειγμα του μοντέλου $\Sigma\Pi^1$. Όπως και στο μοντέλο νησίδων, οι $\Sigma\Pi^1$ έχουν την δυνατότητα να διερευνήσουν διαφορετικές περιοχές του χώρου λύσεων. Τα άτομα κάποιου υπο-πληθυσμού είναι σχετικά απομονωμένα από τα άτομα των υπολοίπων. Οι απομονωμένες νησίδες βοηθούν στην διατήρηση της γενετικής απόκλισης. Κάθε νησίδα έχει την δυνατότητα διερεύνησης διαφορετικής περιοχής του χώρου λύσεων. Περιστασιακά, ικανά άτομα μεταναστεύουν μεταξύ των νησίδων.

Στους $\Sigma\Pi^1$ οι νησίδες αποτελούν τα άτομα του συνολικού πληθυσμού. Όταν η θέση των ατόμων στον πληθυσμό κάθε νησίδας δεν έχει σημασία, όπως στην περίπτωση "παν-μικτικών" πληθυσμών, τα άτομα κάθε ατόμου-νησίδας αντιπροσωπεύουν τα γονίδια των ατόμων του συνολικού πληθυσμού. Στην περίπτωση αλγορίθμων που επιτρέπουν την διατήρηση γειτονιών, οι γειτονιές επιτρέπουν την εμφάνιση ξεχωριστών ειδών τα οποία αντιστοιχούν στα γονίδια, αφού κάθε είδος επιτρέπει την ανάπτυξη διαφορετικών χαρακτηριστικών. Επιτρέποντας την επικοινωνία και την αναπαραγωγή μόνο μεταξύ γειτονικών νησίδων, είναι δυνατή η δημιουργία γειτονιών και στους $\Sigma\Pi^1$.

Για να οριστεί πλήρως το μοντέλο στο επίπεδο 1, θα πρέπει να οριστεί η τετράδα των στοιχείων που το αποτελούν, σύμφωνα με τον ορισμό του μοντέλου (Σχέση 3.1).

Τα στοιχεία της διάταξης ***Αναπαραγωγής*** του επιπέδου 1, ορίζονται ως ακολούθως:

- ***εποχή*** είναι ο αριθμός γενεών που συμπληρώνονται στο επίπεδο 0, πριν δημιουργηθεί η νέα γενιά του επιπέδου 1. Και εδώ υπάρχουν διακριτές γενιές. Όσο ο πληθυσμός κάθε νησίδας εξελίσσεται ανεξάρτητα, βρισκόμαστε στην ίδια γενιά. Η επόμενη γενιά αρχίζει με την έναρξη της επικοινωνίας και της αναπαραγωγής των νέων νησίδων. Στις υλοποιήσεις των χαΠΓΑ *εποχή* είναι ο αριθμός γενιών που εξελίσσεται ανεξάρτητα ο πληθυσμός κάθε νησίδας πριν την μετανάστευση ατόμων μεταξύ των πληθυσμών, δηλαδή πόσο συχνά οι νησίδες ανταλλάσσουν άτομα, (καλείται επίσης και συχνότητα

μετανάστευσης). Συνήθως η τιμή της ***εποχής*** μετανάστευσης είναι σταθερή (σύγχρονη μετανάστευση). Σε σπάνιες περιπτώσεις, είναι μεταβλητή και η μετανάστευση γίνεται μετά την σύγκλιση των υπο-πληθυσμών ([Brau90],[MuTS94]), ή ασύγχρονα βασισμένη σε κάποιο συμβάν το οποίο δεν σχετίζεται με την κατάσταση της εξέλιξης σε όλους τους υπο-πληθυσμούς ([LiPG94], [Norm88]).

- ***επιλογή*** συμβολίζει την μέθοδο επιλογής των νησίδων γονέων που θα χρησιμοποιηθούν στην αναπαραγωγή νέων νησίδων. Χρησιμοποιώντας κάποιο μέτρο σύγκρισης της ποιότητας των νησίδων, είναι δυνατόν να υλοποιηθούν οι διάφορες μέθοδοι επιλογής. Στις υλοποιήσεις των χαΠΓΑ αναφέρεται στην μέθοδο επιλογής των ατόμων που θα μεταναστεύσουν.
- Οι δύο βασικοί ***τελεστές***, ανασυνδυασμός και μετάλλαξη, είναι δυνατόν να υλοποιηθούν και στους $\Sigma\Pi^{1}$. Αφού σ'αυτό το επίπεδο οι νησίδες αποτελούν τα άτομα του συνολικού πληθυσμού, ο ανασυνδυασμός των γενετικών χαρακτηριστικών δύο ατόμων του επιπέδου 1, είναι ο ανασυνδυασμός των πληθυσμών δύο νησίδων, οι οποίες έχουν επιλεγεί με κάποια μέθοδο, δημιουργώντας μία καινούρια νησίδα με άτομα και των δύο νησίδων. Εάν η θέση των ατόμων στον πληθυσμό κάθε νησίδας δεν έχει σημασία, όπως στην περίπτωση "παν-μικτικού" πληθυσμού, τότε η αλλαγή της θέσης δύο ατόμων κάποιας νησίδας (γονίδια) δεν έχει φυσική σημασία. Σε αντίθετη περίπτωση η αλλαγή της θέσης δύο ατόμων σε μια νησίδα υλοποιεί την αντίστοιχη παραλλαγή του τελεστή της μετάλλαξης. Εκτός των ατόμων-νησίδων υπάρχει η δυνατότητα εφαρμογής γενετικών τελεστών στα άτομα-γόνους της κάθε νησίδας τα οποία μεταναστεύουν μεταξύ των διαφόρων νησίδων. Στις υλοποιήσεις των χαΠΓΑ που αναφέρθηκαν στην ανασκόπηση της βιβλιογραφίας δεν χρησιμοποιούνται ***τελεστές.***
- ***μηχανισμοί***, αναφέρεται σε γενικές τεχνικές οι οποίες βελτιώνουν την απόδοση του αλγόριθμου (π.χ. απόδοση αρχικών τυχαίων τιμών στα άτομα κάποιας νησίδας κάτω από κάποιες προυποθέσεις), αλλά και στην απαραίτητη περιγραφή της μεθόδου μετανάστευσης, δηλαδή ποιες νησίδες ανταλλάσσουν άτομα μεταξύ τους και ποια είναι η μέθοδος που θα χρησιμοποιηθεί προκειμένου τα άτομα-μετανάστες να αντικαταστήσουν κάποια άτομα στον πληθυσμό που θα τα δεχτεί (μέθοδος αντικατάστασης).
- Αν και οι ***παράμετροι*** είναι δυνατόν να περιλαμβάνουν παραμέτρους τελεστών, και μεθόδων επιλογής, πιθανότητες, και άλλες ποσότητες, στις υλοποιήσεις των χαΠΓΑ αναφέρεται στον αριθμό των ατόμων που μεταναστεύουν μεταξύ των νησίδων (ρυθμός μετανάστευσης).

Τα στοιχεία της διάταξης ***Δομής*** του επιπέδου 1, ορίζονται ως ακολούθως:

- ***ΜεΠ*** ισούται με τον συνολικό αριθμό των διαθέσιμων νησίδων
- ***ΜεΓ*** ισούται με τον αριθμό των νησίδων που επικοινωνούν μεταξύ τους κατά την αναπαραγωγή της νέας γενιάς
- ***ΔοΓ*** αντιπροσωπεύει την δομή της κάθε γειτονιάς νησίδων
- λ ισούται με τον αριθμό των επεξεργαστών που είναι διαθέσιμοι στο επίπεδο 1

- ***τοπολογία*** αναφέρεται στην σύνδεση μεταξύ των επεξεργαστών που χρησιμοποιούνται στο επίπεδο 1. Στις υλοποιήσεις των χαΠΓΑ που αναφέρθηκαν η *τοπολογία* σύνδεσης των επεξεργαστών είναι στατική. Η *τοπολογία* της υλοποίησης είναι πολύ σημαντική. Αν και οι περισσότερες υλοποιήσεις χρησιμοποιούν την *τοπολογία* του διαθέσιμου Η/Υ, υπάρχει ένας σημαντικός αριθμός εφαρμογών με διαφορετικές τοπολογίες καθώς και με σύγκριση μεταξύ διαφορετικών τοπολογιών.
- ***ΑνΠ*** αναφέρεται στην ανάθεση των νησίδων στους επεξεργαστές. Μία ή περισσότερες νησίδες είναι δυνατόν να ανατεθούν σε ένα ή περισσότερους επεξεργαστές

Επειδή το μοντέλο ορίζεται αναδρομικά, πρέπει να οριστεί το μοντέλο στο επίπεδο 0 πριν είναι δυνατή οποιαδήποτε υλοποίηση των $\Sigma\Pi^1$. Αν και η υλοποίηση των $\Sigma\Pi^0$ μπορεί να είναι οποιοσδήποτε εξελικτικός αλγόριθμος (ή ακόμη και κάποιος άλλος αλγόριθμος βελτιστοποίησης όπως simulated annealing) συνήθως είναι ένας απλός ΓΑ.

Κεφάλαιο 4

Συνεργαζόμενοι Πληθυσμοί με Διαφορετικές Εξελικτικές Συμπεριφορές

4.1. Εισαγωγή

Η γενετική εξέλιξη συντελείται σύμφωνα με ένα σύνολο κανόνων που αφορούν την επιλογή, τον ανασυνδυασμό και την μετάλλαξη. Ένα από τα πιο βασικά προβλήματα στην εφαρμογή των μεθόδων βελτιστοποίησης που στηρίζονται στους μηχανισμούς εξέλιξης που διέπουν τα φυσικά βιολογικά συστήματα, είναι η επιλογή των κατάλληλων τελεστών και παραμέτρων.

Πολλοί κανόνες, μέθοδοι, τελεστές και μηχανισμοί έχουν προταθεί για την εξέλιξη του αρχικού πληθυσμού, αλλά η επιλογή μεταξύ τους είναι περισσότερο τέχνη παρά επιστήμη. Η επιλογή αυτή συνήθως εξαρτάται από τις απαιτήσεις του προβλήματος καθώς και από την εμπειρία και τις αισθητικές προτιμήσεις του χρήστη, ιδιαίτερα στην περίπτωση κατά την οποία ελάχιστα είναι γνωστά για την φύση του προβλήματος. Επίσης η πλειάδα των διαθέσιμων τελεστών καθώς και των πολλών παραλλαγών τους κάνουν περισσότερο επιτακτική την ανάγκη εύρεσης κάποιας λογικής μεθόδου επιλογής.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι δεν είναι δυνατό να καθιερωθούν και να χρησιμοποιούνται από μη ειδικούς μέχρι να υπάρξουν κάποιες κατευθυντήριες γραμμές. Σε αυτό το κεφάλαιο προτείνονται οι *Συνεργαζόμενοι πληθυσμοί* ως μέθοδος αντιμετώπισης του προβλήματος επιλογής των κατάλληλων μηχανισμών μεθόδων και παραμέτρων, αλλά και ως μέθοδος βελτίωσης της απόδοσης των ΠΓΑ.

4.2. Ορισμός Εξελικτικής Συμπεριφοράς

Το σύνολο των τελεστών, παραμέτρων και μηχανισμών που χρησιμοποιείται για την εξέλιξη του πληθυσμού, καθορίζουν την εξελικτική συμπεριφορά του πληθυσμού. Χρησιμοποιώντας διαφορετικούς τελεστές και παραμέτρους έχουμε διαφορετική εξελικτική συμπεριφορά. Ειδικότερα, η διαφορετική εξελικτική συμπεριφορά εξαρτάται από τα εξής χαρακτηριστικά:

α. την μέθοδο επιλογής, όπως αναλογική επιλογή, επιλογή ανταγωνισμού, επιλογή κατάταξης, επιλογή Boltzmann, αποκοπή σίγμα κλπ.

β. τους τελεστές όπως ο ανασυνδυασμός και η μετάλλαξη καθώς και οι διάφορες παραλλαγές τους, η αναστροφή, η αναρρίχηση, και άλλοι τελεστές εξειδικευμένοι σε συγκεκριμένες κατηγορίες προβλημάτων ή υλοποιήσεων

γ. τις παραμέτρους των μεθόδων επιλογής, όπως πιθανότητες επιλογής, μέγεθος ομάδας, αριθμός αναπαραγωγικών δοκιμών, κλπ.

δ. τις παραμέτρους των τελεστών, όπως ο ρυθμός μετάλλαξης, η πιθανότητα ανασυνδυασμού, ο αριθμός και θέση των σημείων κοπής κατά τον ανασυνδυασμό, η συχνότητα προσαρμογής των τελεστών κλπ.

ε. τους γενικότερους μηχανισμούς όπως ελιτισμός, μέθοδος αντικατάστασης (π.χ. γενεαλογική, σταθερής κατάστασης), κλιμάκωση ποιότητας, κατάταξη ποιότητας, εξέλιξη τελεστών, fitness windowing κλπ.

στ. τις γενικές παραμέτρους όπως μέγεθος πληθυσμού, το μήκος του κάθε γόνου κλπ.

4.3. Κίνητρα και Αναγκαιότητα των ΣΠΔΕΣ

Υπάρχουν λίγες προσπάθειες για κάποια λογική προσέγγιση της επιλογής τελεστών και παραμέτρων, μερικές από τις οποίες αναφέρονται στην ανασκόπηση του Davis [Davi91, σελ.92]. Μερικές φορές ακολουθήθηκε μια χειροκίνητη και άμεση (manual ή brute force) προσέγγιση με απ'ευθείας επιλογή και προσαρμογή των τελεστών και παραμέτρων από τον χρήστη. Αυτή την προσέγγιση ακολούθησαν για παράδειγμα οι DeJong [DeJo75] και Schaffer, Caruana, Eshelman & Das [SCED89] οι οποίοι εξέτασαν διάφορους συνδυασμούς μεγεθών πληθυσμού, ρυθμών μετάλλαξης, πιθανοτήτων ανασυνδυασμού, χρήση ή μη χρήση ελιτισμού και άλλων παραμέτρων. Παρά τις χρήσιμες επισημάνσεις και τις προτάσεις τους, τα μειονεκτήματα της χειροκίνητης βελτιστοποίησης είναι προφανή (αυτός είναι και ο σημαντικότερος σοβαρός λόγος της δημιουργίας των αυτομάτων μεθόδων βελτιστοποίησης όπως οι ΓΑ).

Ο Grefenstette [Gref86] χρησιμοποίησε ένα μετα-γενετικό αλγόριθμο για την βελτιστοποίηση του γενετικού αλγόριθμου. Αυτή η προσέγγιση είχε επιτυχία αφού οι γενετικοί αλγόριθμοι (όπως και οι υπόλοιποι εξελικτικοί αλγόριθμοι) δεν είναι ιδιαίτερα ευαίσθητοι στο θόρυβο. Αυτή η μέθοδος όμως είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα και τα αποτελέσματά της γενικεύονται δύσκολα.

Ο Davis [Davi89][Davi91] πρότεινε μεθόδους προσαρμογής των τελεστών, όπου η σχετική βαρύτητα των διαφόρων τελεστών μεταβάλλεται ανάλογα με την συχνότητα με την οποία προκαλούν κάποια βελτίωση. Υπάρχει κάποια σύνθετη διαδικασία τήρησης στοιχείων κατά την

οποία μέρος της πίστωσης που παίρνει κάποιο άτομο περνά και στους γονείς του και στους προγόνους του. Οι συχνότητες εφαρμογής των τελεστών μεταβάλλονται ανάλογα με την απόδοσή τους. Επιπλέον εισάγονται μερικές ακόμη παράμετροι, όπως η συχνότητα επανα-υπολογισμού των παραμέτρων, ο τρόπος ανάθεσης της πίστωσης, το ποσοστό της πίστωσης που μεταφέρεται στους γονείς κλπ. για τις οποίες όμως δεν υπάρχουν κάποιες κατευθυντήριες γραμμές.

Οι Srinivas και Patnaik [SrPa94] προσπάθησαν να ξεπεράσουν το πρόβλημα της επιλογής των πιθανοτήτων των τελεστών, μέσω της προσαρμογής των πιθανοτήτων τους προσπαθώντας να διατηρήσουν την απόκλιση του πληθυσμού και ταυτόχρονα την δυνατότητα σύγκλισής του. Οι πιθανότητες του ανασυνδυασμού και της μετάλλαξης μεταβάλλονται ανάλογα με την ποιότητα των λύσεων. Οι καλές λύσεις προστατεύονται, ενώ οι λύσεις με ποιότητα κάτω του μετρίου μεταλλάσσονται σε μεγάλο βαθμό.

Αν και ο διαχωρισμός του συνόλου των ατόμων σε ανεξάρτητους υπο-πληθυσμούς είναι ένας φυσικός τρόπος επίτευξης καλύτερης ισορροπίας μεταξύ διερεύνησης και εκμετάλλευσης του χώρου αναζήτησης, το πρόβλημα της επιλογής της κατάλληλης εξελικτικής συμπεριφοράς παραμένει αφού πρέπει να επιλεγεί η συμπεριφορά εξέλιξης των πληθυσμών

Το θεώρημα "Μή Δωρεάν Γεύμα (No Free Lunch)" [WoMa95] δηλώνει ότι όταν κάποιο σύνολο παραμέτρων βελτιώνει την σύγκλιση του αλγορίθμου σε κάποιο πρόβλημα βελτιστοποίησης, τότε υπάρχει κάποιο άλλο πρόβλημα για το οποίο οι ίδιες παράμετροι μειώνουν την απόδοση του αλγόριθμου. Δεν είναι δυνατόν να οριστούν ιδανικές παράμετροι για οποιαδήποτε εφαρμογή.

Για την αντιμετώπιση και την απάλυνση του προβλήματος της επιλογής των κατάλληλων τελεστών, παραμέτρων και γενικότερων μηχανισμών προτείνονται οι *"Συνεργαζόμενοι Πληθυσμοί με Διαφορετικές Εξελικτικές Συμπεριφορές - ΣΠΔΕΣ (Co-operating Populations with Different Evolution Behaviours - CoPDEB)"*, όπου γίνεται χρήση μιας ποικιλίας εργαλείων στην ίδια εξελικτική μηχανή. Φροντίζοντας έτσι ώστε τα εργαλεία αυτά να είναι κατάλληλα για διερεύνηση διαφορετικών περιοχών του χώρου λύσεων είναι δυνατόν να βελτιωθεί η διερεύνηση και εκμετάλλευσή του χώρου λύσεων.

Η κύρια ιδέα των ΣΠΔΕΣ είναι η διατήρηση και ταυτόχρονη εξέλιξη ενός αριθμού πληθυσμών που παρουσιάζουν διαφορετική εξελικτική συμπεριφορά. Η διαφοροποίηση της εξελικτικής συμπεριφοράς προκύπτει από την διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών α, β,...στ για κάθε πληθυσμό.

Στις μέχρι τώρα υλοποιήσεις των χαΠΓΑ, κάθε πληθυσμός εξελίσσεται χρησιμοποιώντας τον ίδιο εξελικτικό αλγόριθμο σε κάθε υπο-πληθυσμό (επίπεδο 0 του μοντέλου των ΣΠ). Κάποιες μικρές παρεκκλίσεις από αυτόν τον κανόνα αποτελούν οι διαφορετικές κωδικοποιήσεις του ίδιου προβλήματος με την χρήση διαφορετικού μεγέθους γόνων σε διαφορετικούς πληθυσμούς [PuGo94], η ανταγωνιστική εξέλιξη, όπου χρησιμοποιούνται δύο διαφορετικοί τελεστές ανασυνδυασμού και διαφορετικά μεγέθη πληθυσμού, επιτρέποντας μόνο στους καλύτερους πληθυσμούς να συνεχίσουν να εξελίσσονται [Pham94] και οι διαφορετικοί ρυθμοί μετάλλαξης που χρησιμοποιούνται στο σύστημα GAMAS [PoGY94].

Η πρώτη σοβαρή πρόταση ενός ολοκληρωμένου μοντέλου είναι οι συνεργαζόμενοι πληθυσμοί, όπου διαφορετικοί πληθυσμοί αφήνονται να εξελιχθούν χρησιμοποιώντας διαφορετικές συμπεριφορές εξέλιξης [AdPe96].

Ένας άλλος λόγος της εισαγωγής των Συνεργαζόμενων Πληθυσμών με Διαφορετικές Εξελικτικές Συμπεριφορές (ΣΠΔΕΣ) είναι η δυνατότητα που έχουν να δημιουργήσουν μεγαλύτερη ποικιλία ωφέλιμων ειδών.

Ο Δαρβινισμός περιγράφει την εξέλιξη μέσω της διαφοροποίησης των ειδών, όπως συμβαίνει με τις διακλαδώσεις ενός ποταμού. Η αντίστροφη διαδικασία - η σύνθεση των ειδών για την δημιουργία εξελικτικών καινοτομιών - ονομάζεται "***συμβιογένεση***". Μέσω των ΣΠΔΕΣ υλοποιούνται και οι δύο διαδικασίες ως ένας τρόπος εκμετάλλευσης των δυνατοτήτων των εξελικτικών τεχνικών σε περιβάλλον παράλληλης επεξεργασίας.

Προσθέτοντας την διαφοροποίηση των ειδών σε ένα αρχικά ομογενές περιβάλλον, γίνεται δυνατή η δημιουργία νέων διευθετήσεων οι οποίες είναι περισσότερο προσαρμοσμένες στις συνθήκες του δεδομένου χώρου λύσεων/αναζήτησης.

Όπως υποστηρίζει ο Κ. Δαρβίνος στο έργο του "Η προέλευση των ειδών" (C. Darwin, The origin of species, 1859)

> "... διαφορετικές συνθήκες ζωής προκαλούν μεγαλύτερη ποικιλία ειδών, παρέχοντας μεγαλύτερη πιθανότητα δημιουργίας ωφέλιμων ποικιλιών. Εάν δεν υπάρξουν τέτοιες ποικιλίες η φυσική επιλογή δεν μπορεί να λειτουργήσει ..."

Οι διαφορετικοί τελεστές, παράμετροι και μηχανισμοί του κάθε πληθυσμού αντιστοιχούν στις διαφορετικές συνθήκες ζωής που αναφέρει ο Δαρβίνος.

Οι δύο προταθέντες μηχανισμοί για την διαφοροποίηση των ειδών ονομάζονται "***αλλοπατρικός***" και "***συμπατρικός***". Ο αλλοπατρικός μηχανισμός αναφέρεται στην διαφοροποίηση των ειδών μέσω του γεωγραφικού διαχωρισμού των ειδών και είναι η περισσότερο αποδεκτή άποψη για την αιτιολόγηση του φαινομένου.

Ο συμπατρικός μηχανισμός οδηγεί στην απόκλιση των πληθυσμών στο ίδιο περιβάλλον. Ένας αριθμός αιτίων έχει προταθεί για αυτό τον μηχανισμό διαφοροποίησης των ειδών, όπως η εμφάνιση φαινοτυπικών χαρακτηριστικών τα οποία επηρεάζουν την αναπαραγωγή, την γονιμότητα ορισμένων συνδυασμών γονιδίων κλπ.

Ο αλλοπατρικός μηχανισμός, που ήταν και η έμπνευση για την εισαγωγή του μοντέλου νησίδων [CHMR87], χρησιμοποιείται και από τους ΣΠΔΕΣ. Αυτός ο διαχωρισμός αποτρέπει την ροή του γενετικού υλικού μεταξύ των υπο-πληθυσμών. Σε συνδυασμό με το διαφορετικό περιβάλλον και εξελικτική συμπεριφορά κάθε υπο-πληθυσμού των ΣΠΔΕΣ οδηγεί σε ακόμη μεγαλύτερη διαφοροποίηση των υπο-πληθυσμών. Ταυτόχρονα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και ο συμπατρικός διαχωρισμός των ειδών χρησιμοποιώντας τοπική επιλογή των γονέων και όχι παν-μικτικό πληθυσμό, σε κάποιον ή σε όλους τους υπο-πληθυσμούς.

Προσθέτοντας την διαδικασία της συμβιογένεσης, μέσω της ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των υπο-πληθυσμών, είναι δυνατή η ελάττωση των μη αποτελεσματικών διαιρέσεων του χώρου αναζήτησης. Στο τέλος κάθε εποχής, επιλεγμένα μέλη από κάθε υπο-πληθυσμό μεταναστεύουν σε άλλους υπο-πληθυσμούς.

Η ανταλλαγή της πληροφορίας μεταξύ των υπο-πληθυσμών, τους επιτρέπει να συνεργάζονται. Έτσι, είναι δυνατόν να εκμεταλλευτούν τις ελπιδοφόρες περιοχές του χώρου αναζήτησης που ανακαλύπτουν οι υπόλοιποι πληθυσμοί, καθώς επίσης και να δεχτούν νέο γενετικό υλικό ή γενετικό υλικό το οποίο είχαν χάσει νωρίτερα. Λόγω της ανταλλαγής

πληροφοριών μεταξύ των υπο-πληθυσμών, κάποια εξελικτική συμπεριφορά είναι δυνατόν να έχει μεγάλη επίδραση στην απόδοση των υπολοίπων.

Έτσι το μοντέλο των ΣΠΔΕΣ μπορεί να ολοκληρώσει τους φυσικούς μηχανισμούς εξέλιξης σε ένα εργαλείο μειώνοντας και την a priori απαιτούμενη γνώση.

Ο ορισμός του μοντέλου του υπο-κεφάλαιου 3.3 για τις διατάξεις *Αναπαραγωγής* και *Δομής* ισχύουν και στην περίπτωση των ΣΠΔΕΣ.

Η διαφορά στην εξελικτική συμπεριφορά είναι αποτέλεσμα της διαφοροποίησης της υλοποίησης του μοντέλου του επιπέδου 1 για κάθε νησίδα. Η κύρια επιλογή πριν την υλοποίηση των ΣΠΔΕΣ είναι η επιλογή της εξελικτικής συμπεριφοράς για κάθε νησίδα, δηλαδή η επιλογή των κατάλληλων τελεστών, παραμέτρων και μηχανισμών για κάθε νησίδα. Σ'αυτή την κατεύθυνση πρέπει να βρούμε αντίστοιχες διευθετήσεις των στοιχείων για κάθε νησίδα οι οποίες θα επιτρέπουν την ενοποίηση ενός συνόλου εργαλείων στην ίδια εξελικτική μηχανή. Αυτές οι διευθετήσεις θα πρέπει να ταιριάζουν σε διαφορετικές περιοχές του χώρου λύσεων, βελτιώνοντας τις δυνατότητες διερεύνησης και εκμετάλλευσης του χώρου λύσεων.

Η επιλογή των τελεστών, παραμέτρων και μηχανισμών για κάθε νησίδα είναι πολύ σημαντική και έχει άμεσο αντίκτυπο στην απόδοση των ΣΠΔΕΣ.

4.4. Πλεονεκτήματα των ΣΠΔΕΣ

Τα πλεονεκτήματα των ΣΠΔΕΣ έναντι των χαΠΓΑ με την ίδια εξελικτική συμπεριφορά του κάθε πληθυσμού είναι:

1. Αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της επιλογής τελεστών, παραμέτρων και άλλων μηχανισμών. Όπως προαναφέρθηκε, αν και έχουν προταθεί αρκετοί κανόνες για την επιλογή τους, ο καθορισμός των παραμέτρων και η γενικότερη διευθέτηση του εξελικτικού αλγόριθμου συνεχίζει να μην είναι επιστημονικά τεκμηριωμένη, αλλά να εξαρτάται από τις απαιτήσεις του προβλήματος και την εμπειρία και τις αισθητικές προτιμήσεις του χρήστη. Στους ΣΠΔΕΣ, η χρήση μιας ποικιλίας διευθετήσεων, κάνει ευκολότερο τον καθορισμό της εξελικτικής συμπεριφοράς του κάθε πληθυσμού, αφού δεν είναι ανάγκη να είναι η βέλτιστη.
2. Κατά την εξέλιξη του αλγόριθμου είναι πιο πιθανό να επιβιώσουν (διατηρηθούν) μεγαλύτερα τμήματα κατασκευής. Η ύπαρξη ή η απουσία ενός τελεστή είναι δυνατό να έχει αρνητική επίδραση, η οποία δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων. Κάποιοι τελεστές μπορεί να είναι προσανατολισμένοι στο χειρισμό μεγαλυτέρων σχημάτων, ανασυνδυάζοντας τα άτομα χωρίς να επιδρούν στο μήκος ορισμού του σχήματος. Έτσι, η χρήση διαφορετικού τύπου τελεστών σε διαφορετικούς πληθυσμούς κάνουν δυνατή την διατήρηση ενός σχήματος μεγάλου μήκους σε κάποιους από αυτούς. Την ίδια στιγμή, σε κάποιους πληθυσμούς χρησιμοποιούνται τελεστές προσανατολισμένοι στην διάσπαση των σχημάτων μεγάλου μήκους. Όταν η μέση ποιότητα των ατόμων που αντιπροσωπεύουν κάποιο σχήμα είναι πάνω του μέσου όρου, θα διαδοθεί σε όλους τους πληθυσμούς και θα χειριστεί από τους διαφορετικούς τελεστές όλων

των πληθυσμών. Έτσι η αρνητική επίδραση κάποιου τελεστή, ή η απουσία του, δεν θα επηρεάσει όλους τους πληθυσμούς επιτρέποντας τμήματα κατασκευής μεγαλύτερου μήκους να διατηρηθούν σε κάποιους πληθυσμούς και αργότερα να διαδοθούν στους υπόλοιπους

3. Ενισχύεται ο σχηματισμός ομαδοποιήσεων (niches) και η δημιουργία νέων ειδών. Κάθε πληθυσμός χρησιμοποιεί διαφορετική εξελικτική συμπεριφορά, δημιουργώντας ένα ξεχωριστό είδος, το οποίο μπορεί να ειδωθεί ως μία τάξη οργανισμών με κοινά χαρακτηριστικά. Με αυτό τον τρόπο, παρατηρούνται σταθεροί υπο-πληθυσμοί ατόμων (είδη) τα οποία εξυπηρετούν διαφορετικές περιοχές του χώρου διερεύνησης των λύσεων. Στους ΣΠΔΕΣ, η διαφορετική εξελικτική συμπεριφορά κάθε πληθυσμού, ενισχύει τον σχηματισμό ομαδοποιήσεων των ατόμων του πληθυσμού και τον σχηματισμό νέων ειδών.
4. Αυξάνεται η ταχύτητα σύγκλισης λόγω της μείωσης των πιθανών συνδυασμών λύσεων. Ο ΓΑ βρίσκει νέες λύσεις μέσω της θεώρησης πολλών συνδυασμών των καλύτερων μερικών λύσεων που περιέχονται στον τρέχοντα πληθυσμό. Λόγω της ύπαρξης μεγαλύτερων τμημάτων κατασκευής, ο ΓΑ έχει να εκτιμήσει λιγότερους συνδυασμούς και δημιουργώντας ικανά άτομα που οδηγούν στο ολικό βέλτιστο.
5. Γενικά, κάθε λύση είναι κωδικοποιημένη σε μία σειρά από σύμβολα (string). Είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί διαφορετική κωδικοποίηση των λύσεων του προβλήματος σε κάθε υπο-πληθυσμό. Έτσι δημιουργούνται διαφορετικά επίπεδα ανάλυσης μεταξύ των υπο-πληθυσμών. Χρησιμοποιώντας χαμηλή ανάλυση, ο χώρος αναζήτησης είναι μικρότερος. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ταχύτερη εύρεση καλών λύσεων. Αυτές οι λύσεις εκλεπτύνονται και γίνονται πιο ακριβείς, όταν μεταναστεύουν σε υπο-πληθυσμούς με υψηλότερη ανάλυση.

4.5. Διευθέτηση Υπο-πληθυσμών των ΣΠΔΕΣ

Όταν κάποιος προσπαθεί να δημιουργήσει την κατάλληλη υλοποίηση των ΣΠΔΕΣ για την αντιμετώπιση κάποιου προβλήματος, είναι πολύ σημαντικό να συγκεντρώσει μαζί υπο-πληθυσμούς οι οποίοι είναι προσανατολισμένοι είτε στην διερεύνηση, είτε στην εκμετάλευση του χώρου λύσεων. Αυτό θα δώσει την ευκαιρία στις καλύτερες των λύσεων να επεξεργαστούν από διαφορετικούς τελεστές.

Καμμία ρύθμιση παραμέτρων δεν είναι δυνατόν να είναι η βέλτιστη όχι μόνο για όλα τα προβλήματα, αλλά ούτε και για ολόκληρο τον χώρο λύσεων του ίδιου προβλήματος. Μπορεί να είναι η βέλτιστη για κάποια περιοχή του χώρου λύσεων αλλά δεν είναι για κάποια άλλη. Έχοντας αυτό υπ'όψη, μπορούμε να προτείνουμε δύο διαφορετικές περιπτώσεις στην επιλογή της καλύτερης ρύθμισης των υπο-πληθυσμών των ΣΠΔΕΣ.

- Όταν αναζητείται η λύση ενός συγκεκριμένου προβλήματος, τότε είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθεί η υπάρχουσα γνώση από προηγούμενες προσπάθειες αντιμετώπισης του προβλήματος. Η γνώση αυτή θα βοηθήσει να δημιουγηθούν διαφορετικοί υπο-πληθυσμοί με

τελεστές μηχανισμούς και παραμέτρους οι οποίοι έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί στην επίλυση του προβλήματος με θετικά αποτελέσματα.

- Όταν στόχος είναι η δημιουργία ενός γενικού εργαλείου βελτιστοποίησης, ή όταν είναι πολύ λίγο (ή καθόλου) γνωστή η φύση του προβλήματος, τότε είναι σημαντική η ολοκλήρωση ενός πλήθους εργαλείων στην εξελικτική μηχανή. Ο ελιτισμός και ο τελεστής αναρρίχησης είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν σε όλους τους υπο-πληθυσμούς, με θετικά αποτελέσματα στην πλειοψηφία των προβλημάτων. Η χρήση διαφορετικών κωδικοποιήσεων σε διαφορετικούς υπο-πληθυσμούς μπορεί να φανεί πολύ χρήσιμη, όπως και η χρήση διαφορετικών τύπων ανασυνδυασμού σε διαφορετικούς υπο-πληθυσμούς. Είναι ιδιαίτερα θετική η χρήση είτε πολύ μεγάλων, είτε πολύ μικρών τιμών του ρυθμού μετάλλαξης και σε αντιστοιχία με την πιθανότητα ανασυνδυασμού. Οι πιθανότητες των τελεστών μπορεί να μεταβάλλονται και να προσαρμόζονται στο χώρο λύσεων αλλά σε καμμία περίπτωση δεν πρέπει να δρούν καταστροφικά για την ιδιαιτερότητα κάποιου υπο-πληθυσμού.

Και στις δύο περιπτώσεις μεταβλητή τοπολογία σύνδεσης των υπο-πληθυσμών είναι δυνατόν να οδηγήσει σε καλύτερα αποτελέσματα. Η επίδραση των υπολοίπων παραμέτρων επικοινωνίας ερευνάται στα επόμενα κεφάλαια