



Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Πληροφορική»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	«Ο Αλγόριθμος των μελισσών και οι εφαρμογές του»
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	ΠΑΛΗΘΟΔΩΡΟΣ ΙΩΑΝΝΗΣ
Πατρώνυμο	ΓΕΩΡΓΙΟΣ
Αριθμός Μητρώου	ΜΠΠΛ/ 07025
Επιβλέπων	ΦΟΥΝΤΑΣ ΕΥΑΓΓΕΛΟΣ,ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ,2012

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

(υπογραφή)

(υπογραφή)

(υπογραφή)

Φούντας Ευάγγελος

Βίβου Μαρία

Τσιχριντζής Γεώργιος

Καθηγητής

Καθηγητής

Καθηγητής

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ.....	3-5
Εισαγωγή.....	6
ΜΙΑ ΙΔΕΑ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΣΜΗΝΟΣ ΜΕΛΙΤΟΦΟΡΩΝ ΜΕΛΙΣΣΩΝ ΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ	
ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΜΗΝΟΥΣ ΜΕΛΙΤΟΦΟΡΩΝ ΜΕΛΙΣΣΩΝ	
ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ	
ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ	
Η Προσέγγιση του Συστήματος των Μελισσών στη Μοντελοποίηση Προβλημάτων Συνδυαστικής Βελτιστοποίησης	
Συμπεριφορά αληθινών μελισσών	
Τεχνητές Μέλισσες	
Επιλύοντας το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή μέσω του Συστήματος των Μελισσών.....	
Αλγόριθμοι βελτίωσης της διαδρομής	
Πειραματική μελέτη του συστήματος των μελισσών.....	
Αλγόριθμος Αποικίας Τεχνητών Μελισσών και η εφαρμογή του σε Γενικευμένα Προβλήματα Ανάθεσης	
Περιγραφή της συμπεριφοράς των Μελισσών στην Φύση.....	
Αναφορά και Κατηγοριοποίηση των Μελετών των Συστημάτων Τεχνητών Μελισσών.....	
Γενικευμένο Πρόβλημα Ανάθεσης	
Αλγόριθμος Τεχνητής Αποικίας Μελισσών για το GAP	
Δομές Γειτονιάς	
Υπολογιστική Μελέτη.....	
Συμπέρασμα.....	
Μία Προσέγγιση Ανόπτησης στις Τροχιές των Γαμήλιων Πτήσεων στον Αλγόριθμο Βελτιστοποίησης	
Μελιτοφόρων Μελισσών.....	
Συνοπτική Περιγραφή	
Βιβλιογραφικό Υλικό	
Το Στοχαστικό Πρόβλημα Ικανοποιησιμότητας.....	
Νοημοσύνη Σμήνους.....	
Ο ‘Γάμος’ στις Μελιτοφόρες Μέλισσες.....	
Τροποποιημένος MBO για SAT	
Απεικόνιση	
Προτεινόμενη Τροποποίηση του MBO.....	
Ο Αλγόριθμος	
Πειράματα	

Πειραματική Οργάνωση.....

Αποτελέσματα και Ανάλυση: Ευρετικές που δουλεύουν αυτόνομα (Χωρίς MBO).....

Αποτελέσματα και Ανάλυση: Μονή Ευρετική Προσέγγιση που χρησιμοποιεί MBO.....

Αποτελέσματα και Ανάλυση: Προσέγγιση Επιτροπής-Μηχανής που χρησιμοποιεί MBO.....

Περίληψη αποτελεσμάτων.....

Συμπέρασμα και Μελλοντική Εργασία.....

Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Αποικίας Τεχνητών Μελισσών (ABC) για την Επίλυση Περιορισμένων Προβλημάτων Βελτιστοποίησης.....

Αλγόριθμος Αποικίας Τεχνητών Μελισσών.....

Ο ABC Αλγόριθμος χρησιμοποιείται για Μη-περιορισμένα Προβλήματα Βελτιστοποίησης.....

Ο ABC Αλγόριθμος Χρησιμοποιημένος για Περιορισμένα Προβλήματα Βελτιστοποίησης.....

Πειραματική Μελέτη και Συζήτηση.....

Ρυθμίσεις.....

Αποτελέσματα και Συζήτηση.....

Ένας αλγόριθμος μελισσών για πολυπρακτορικά συστήματα.....

Συνοπτική Περιγραφή.....

Βιολογικό Υπόβαθρο.....

Μοντελοποιώντας την συμπεριφορά των μελισσών.....

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΟΡΓΑΝΩΣΗ.....

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΛΙΣΣΩΝ, ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΟΙΚΙΑ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΓΙΑ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟ ΕΛΕΓΚΤΗ PID...

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΛΙΣΣΩΝ (BA).....

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ (ΤΗΣ) ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΥΡΜΥΓΚΙΩΝ.....

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ.....

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΤΗΡΗΣΕΙΣ.....

Βελτιστοποίηση με Αποικία Μελισσών με Τοπική Έρευνα για το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή.....

Το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή (TSP).....

ΤΟΠΙΚΗ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ: 2-ΟΡΤ ΕΥΡΕΤΙΚΗ.....

ΤΟ VCO ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕ ΤΟΠΙΚΗ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ.....

ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ.....

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....

Δομική αντίστροφη ανάλυση από υβριδικούς αλγόριθμους απλόκου αποικίας τεχνητών μελισσών.....

Αντίστροφη ανάλυση σκυρόδετων φραγμάτων	
Στατιστική ανάλυση της καταγεγραμμένης μετατόπισης σκυρόδετων φραγμάτων	
Συμπεριφορά πραγματικών μελισσών.....	
Αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών.....	
Υβριδικοί αλγόριθμοι απλόκου αποικίας τεχνητών μελισσών.....	
Η μονοκατευθυντική ερευνητική μέθοδος Nelder-Mead	
Υβριδικοί αλγόριθμοι απλόκου αποικίας τεχνητών μελισσών	
Αριθμητικά παραδείγματα και συζήτηση	
Ρυθμίσεις παραμέτρων	
Ένα δυσδιάστατο σκυρόδετο φράγμα βαρύτητας	
Ένα τρισδιάστατο σκυρόδετο φράγμα τόξου.....	
Σχετικά με την απόδοση του αλγορίθμου με αποικία τεχνητών μελισσών (ABC).....	
Συμπεριφορά πραγματικών μελισσών.....	
Αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών (ABC).....	
Πειράματα	
Αποτελέσματα και συζήτηση.....	
Ένας αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών για το ελάχιστου ύψους πρόβλημα επικαλυπτικού δέντρου περιορισμένου φύλλου	
Ο αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών.....	
Ο ABC αλγόριθμος για το LCMST πρόβλημα (ABC-LCMST)	
Υπολογιστικά αποτελέσματα	
Γενικό Συμπέρασμα	
ΒΑΣΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΜΕΛΙΣΣΩΝ ΣΕ ΚΩΔΙΚΑ ΜΑΤΛΑΒ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΩΣ ΑΝΑΦΟΡΑ ΤΙΣ ΚΟΡΥΦΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ	75-87
Βιβλιογραφία	88-90

Περίληψη(Abstract)

Οι μέλισσες κάνουν μαθηματικούς υπολογισμούς πιο γρήγορα και από υπολογιστή «Ο περιοδεύων πωλητής» Μία ακόμη ικανότητα ενστικτώδους νοημοσύνης στο ζωικό βασίλειο έρχεται να καταδείξει βρετανική επιστημονική έρευνα, φέρνοντας στο φως την εκπληκτική δυνατότητα των μελισσών να δίνουν τη λύση σε πολύπλοκα μαθηματικά προβλήματα, κάνοντας υπολογισμούς πιο γρήγορα και από ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Οι ερευνητές του πανεπιστημίου του Λονδίνου (Royal Holloway), υπό τον δρ Νάιτζελ Ρέιν της Σχολής Βιολογικών Επιστημών, δημοσίευσαν τη σχετική μελέτη στο αμερικανικό περιοδικό οικολογίας και βιολογίας The American Naturalist.

Σύμφωνα με τις βρετανικές εφημερίδες Guardian και Independent, οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι οι μέλισσες μαθαίνουν να πετούν ακολουθώντας τη συντομότερη δυνατή διαδρομή ανάμεσα στα λουλούδια που έχουν προηγουμένως ανακαλύψει με τυχαία σειρά, με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά «λύνοντας» το λεγόμενο «πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή», ένα διάσημο και δυσεπίλυτο γρίφο στον χώρο των οικονομικών και των μαθηματικών. Στο πρόβλημα αυτό, ένας άνθρωπος (πωλητής) καλείται να βρει τη συντομότερη δυνατή διαδρομή ανάμεσα σε όλους τους προορισμούς που πρέπει να επισκεφτεί. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές λύνουν το πρόβλημα συγκρίνοντας το μήκος όλων των πιθανών διαδρομών και επιλέγοντας τον πιο σύντομο. Όμως οι μέλισσες φαίνεται να κάνουν ουσιαστικά το ίδιο πράγμα κάθε μέρα, χωρίς καν τη βοήθεια υπολογιστή, απλώς με ένα εγκέφαλο που δεν είναι μεγαλύτερος από ένα σπόρο φυτού.

Όπως είπαν οι επιστήμονες, καθημερινά οι μέλισσες ξεκινούν να επισκεφτούν μια πληθώρα λουλουδιών σε διάφορες τοποθεσίες και, επειδή θέλουν να κάνουν εξοικονόμηση ενέργειας για το πέταγμά τους, «υπολογίζουν» μια διαδρομή που τους επιτρέπει να βρίσκονται στον αέρα το ελάχιστο δυνατό χρονικό διάστημα.

Χρησιμοποιώντας τεχνητά άνθη, συνδεδεμένα με υπολογιστές, οι ερευνητές έδειξαν ότι οι μέλισσες δεν χαράζουν μια πορεία απλώς με βάση την τυχαία σειρά που βρήκαν προηγουμένως τα λουλούδια, αλλά πάνε από λουλούδι σε λουλούδι ακολουθώντας συγκεκριμένο «σχέδιο», που τους επιτρέπει να πετάνε όσο γίνεται λιγότερο.

Αφού εντοπίσουν τις θέσεις των λουλουδιών, στη συνέχεια οι μέλισσες επιστρέφουν σε αυτά έχοντας μάθει -με μυστηριώδη τρόπο- να ακολουθούν πια τον καλύτερο δυνατό δρόμο, δηλαδή τον πιο σύντομο, ώστε να εξοικονομούν χρόνο και ενέργεια (ή χρήμα, όπως θα έλεγε ένας πωλητής!).

«Παρά τους μικροσκοπικούς εγκέφαλούς τους, οι μέλισσες είναι ικανές για εντυπωσιακά κατορθώματα στη συμπεριφορά τους. Πρέπει να καταλάβουμε με ποιο τρόπο μπορούν να λύσουν το πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή χωρίς κομπιούτερ» δήλωσε ο υπεύθυνος της έρευνας.

Οι επιστήμονες ευελπιστούν ότι μια τέτοια ανακάλυψη θα μπορούσε να βοηθήσει και τους ανθρώπους σε διάφορα πρακτικά προβλήματα, όπως στην καλύτερη ρύθμιση της κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο (π.χ. κυκλοφοριακό) ή στην εκτεταμένη αλυσίδα τροφοδοσίας μιας επιχείρησης, που στέλνει φορτηγά σε όλα σημεία του ορίζοντα και θέλει να εξοικονομήσει χρόνο και χρήμα στις μετακινήσεις.

An ingenious new mathematical procedure based on the behaviour of honey bees is delivering sweet results for industry.

Researchers at the Manufacturing Engineering Centre (MEC) developed the procedure, or algorithm, after observing the "waggle dance" of bees foraging for nectar. It enables companies to maximise results by changing basic elements of their processes.

When a bee finds a source of nectar, it returns to the hive and performs a dance to show other bees the direction and distance of the flower patch and how plentiful it is. The other workers then decide how many of them will fly off to find the new source, depending on its distance and quality. The MEC's Bees Algorithm mimics this behaviour. A computer can be set up to calculate the results of different settings on a manufacturing process. More computing power is then devoted to searching around the most successful settings, in the same way as more bees are sent to the most promising flower patches.

The Algorithm has been shown to cope with up to 3,000 variables and is faster than existing calculations. By

entering basic data about all or part of a company, or even just one machine, the MEC 'Bees' team can calculate the best outcome for a wide range of business processes. They have already used the Bees Algorithm to work out the most efficient settings on welding systems and for the design of springs. The Algorithm was unveiled by the team at the recent internet-based Innovative Production and Machines Conference hosted by MEC as part of its work with the EU-funded Network of Excellence in this field. The team's research was one of 110 papers presented to 4,000 delegates from 73 countries at the conference, which was held entirely on-line.

The Algorithm can help business work out the most effective way to set up their machines, and save them a lot of money through running their processes as efficiently as possible.

Εισαγωγή

ΜΙΑ ΙΔΕΑ ΒΑΣΙΣΜΕΝΗ ΣΕ ΣΜΗΝΟΣ ΜΕΛΙΤΟΦΟΡΩΝ ΜΕΛΙΣΣΩΝ ΓΙΑ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ

ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗ. Τα τελευταία χρόνια, η νοημοσύνη του σμήνους έχει εμφανιστεί ως θέμα έρευνας για πολλούς επιστήμονες σχετικών ερευνητικών πεδίων. Ο Bonabeau έχει ορίσει την νοημοσύνη του σμήνους ως ' οποιαδήποτε προσπάθεια να σχεδιαστούν αλγόριθμοι ή καταναμημένες μηχανές επίλυσης προβλημάτων, εμπνευσμένοι από την συλλογική συμπεριφορά αποικιών κοινωνικών εντόμων και άλλων κοινωνιών ζώων. Ο Bonabeau και άλλοι εστίασαν την θεωρία τους μόνο σε κοινωνικά έντομα, όπως οι τερμίτες, οι μέλισσες, οι σφήκες καθώς και άλλα διαφορετικά είδη μυρμηγκιών. Παρόλα αυτά, ο όρος σμήνος χρησιμοποιείται γενικότερα για οποιαδήποτε περιορισμένη ομάδα αλληλεπιδρώντων πρακτόρων ή ατόμων. Ένα κλασικό παράδειγμα σμήνους είναι οι μέλισσες που μαζεύονται γύρω από την κυψέλη τους· ωστόσο, η αλληγορία μπορεί άνετα να μεταφερθεί σε άλλα συστήματα με παρόμοια αρχιτεκτονική. Μια αποικία μυρμηγκιών μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σμήνος του οποίου οι ανεξάρτητοι πράκτορες είναι μυρμηγκία. Κατά παρόμοιο τρόπο, ένα σμάρι πουλιών είναι ένα σμήνος πουλιών. Ένα ανοσοποιητικό σύστημα είναι ένα σμήνος κυττάρων και μορίων ενώ ένα πλήθος ανθρώπων είναι ένα σμήνος ανθρώπων. Ο Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης με Σμήνος Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization: PSO) προβάλλει την κοινωνική συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών ή την εκπαίδευση ψαριών. Δύο θεμελιώδεις έννοιες, η αυτό-οργάνωση και ο καταμερισμός της εργασίας είναι απαραίτητες και επαρκείς ιδιότητες για την επίτευξη νοήμου συμπεριφοράς σμήνους όπως στα καταναμημένα συστήματα επίλυσης προβλημάτων που αυτό-οργανώνονται και προσαρμόζονται στο δεδομένο κάθε φορά περιβάλλον. α) Η αυτό-οργάνωση μπορεί να οριστεί ως ένα σύνολο δυναμικών μηχανισμών, οι οποίοι οδηγούν σε δομές που βρίσκονται στο καθολικό επίπεδο ενός συστήματος μέσω της αλληλεπίδρασης των κατώτερων στοιχείων του. Αυτοί οι μηχανισμοί κατοχυρώνουν βασικούς κανόνες για την αλληλεπίδραση μεταξύ των συστατικών μονάδων του συστήματος. Οι κανόνες αυτοί διασφαλίζουν ότι οι αλληλεπιδράσεις εκτελούνται με βάση καθαρά τοπική πληροφόρηση χωρίς καμία επαφή με το γενικό πλαίσιο. Ο Bonabeau και άλλοι έχουν ορίσει τέσσερις βασικές ιδιότητες πάνω στις οποίες βασίζεται η αυτό-οργάνωση: η θετική αντίδραση, η αρνητική αντίδραση, οι αυξομειώσεις και οι πολλαπλές αλληλεπιδράσεις :

- 1) Η θετική ανατροφοδότηση είναι μια απλή συμπεριφορική 'κατευθυντήρια γραμμή' που οδηγεί στην δημιουργία βολικών δομών. Η στρατολόγηση και η ενίσχυση όπως η διαγραφή ενός μονοπατιού που ακολουθούν κάποια είδη μυρμηγκιών ή οι χοροί των μελισσών μπορούν να θεωρηθούν παραδείγματα θετικής ανατροφοδότησης.
- 2) Η αρνητική ανατροφοδότηση εξισορροπεί την θετική ανατροφοδότηση και βοηθάει στην σταθεροποίηση του συλλογικού πλαισίου. Για να αποφευχθεί ο κορεσμός που μπορεί να συμβεί σε σχέση με τα διαθέσιμα βοσκήματα, την εξάντληση των πηγών τροφής, το συνωστισμό ή τον ανταγωνισμό στις πηγές της τροφής, είναι απαραίτητος ένας μηχανισμός αρνητικής ανατροφοδότησης.
- 3) Οι αυξομειώσεις όπως ο τυχαίος περίπατος, τα λάθη, η τυχαία εναλλαγή καθηκόντων ανάμεσα στα άτομα του σμήνους είναι καθοριστικά για την δημιουργικότητα και την πρωτοπορία. Η έννοια του τυχαίου είναι συχνά καθοριστική για νεοπαγείς δομές μιας που επιτρέπει την ανακάλυψη καινούριων λύσεων.

4) Σε γενικές γραμμές, η αυτό-οργάνωση απαιτεί ένα μικρό αριθμό ατόμων αμοιβαία ανεκτικών και τους επιτρέπει να κάνουν χρήση των αποτελεσμάτων των δικών τους δραστηριοτήτων καθώς και άλλων.

β) Μέσα σε ένα σμήνος, υπάρχουν διαφορετικά καθήκοντα τα οποία εκτελούνται ταυτόχρονα από ειδικευμένα άτομα. Αυτό το είδος φαινομένου ονομάζεται καταμερισμός εργασίας. Η ταυτόχρονη εκτέλεση καθηκόντων από συνεργαζόμενα ειδικευμένα άτομα πιστεύεται ότι είναι πιο αποτελεσματική από την διαδοχική εκτέλεση καθηκόντων από ανειδίκευτα άτομα. Ο καταμερισμός εργασίας επιτρέπει στο σμήνος να ανταποκριθεί σε τροποποιημένες συνθήκες μέσα στο χώρο έρευνας. Οι δύο θεμελιώδεις έννοιες για την συλλογική απόδοση ενός σμήνους που παρουσιάστηκαν παραπάνω-η αυτό-οργάνωση και ο καταμερισμός εργασίας-είναι απαραίτητες και επαρκείς ιδιότητες για την επίτευξη νοήμου συμπεριφοράς σμήνους όπως τα κατανοημένα συστήματα επίλυσης προβλημάτων που αυτό-οργανώνονται και προσαρμόζονται στο δεδομένο περιβάλλον.

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΜΗΝΟΥΣ ΜΕΛΙΤΟΦΟΡΩΝ ΜΕΛΙΣΣΩΝ

Το μινιμαλιστικό μοντέλο επιλογής συγκομιδής που οδηγεί στην εμφάνιση συλλογικής νοημοσύνης στα σμήνη των μελιτοφόρων μελισσών αποτελείται από τρία βασικά συστατικά: τις πηγές της τροφής, τις απασχολούμενες συλλέκτριες και τις μη απασχολούμενες συλλέκτριες. Το μοντέλο αυτό καθορίζει και τους δύο βασικούς τρόπους συμπεριφοράς: την στρατολόγηση προς μία πηγή νέκταρος και την εγκατάλειψη αυτής της πηγής.

1. Οι πηγές τροφής: Η αξία μίας πηγής τροφής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το πόσο κοντά βρίσκεται στη φωλιά, το πόσο πλούσια είναι ή αλλιώς την περιεκτικότητα της ενέργειας της, καθώς και την ευκολία με την οποία μπορεί να γίνει εξαγωγή αυτής της ενέργειας. Χάριν ευκολίας, η 'αποδοτικότητα' μιας πηγής τροφής μπορεί να απεικονιστεί με μία απλή ποσότητα.

2. Απασχολούμενες συλλέκτριες: Αυτές συνδέονται με κάποια συγκεκριμένη πηγή τροφής την οποία αξιοποιούν ή στην οποία 'απασχολούνται' τη δεδομένη στιγμή. Μεταφέρουν μαζί τους πληροφορίες για την συγκεκριμένη πηγή, την απόσταση της από τη φωλιά, την κατεύθυνση στην οποία βρίσκεται, καθώς και την αποδοτικότητα της και μοιράζονται αυτές τις πληροφορίες με μια σχετική πιθανότητα.

3. Μη απασχολούμενες συλλέκτριες: Αυτές βρίσκονται συνέχεια σε αναζήτηση πηγών τροφής προς εκμετάλλευση. Υπάρχουν δύο είδη μη απασχολούμενων συλλεκτριών: οι ανιχνεύτριες που αναζητούν στο περιβάλλον γύρω από τη φωλιά νέες πηγές τροφής και οι παρατηρητές που περιμένουν στη φωλιά και επισημοποιούν την ύπαρξη μίας πηγής τροφής μέσω των πληροφοριών που μοιράζονται με τις απασχολούμενες συλλέκτριες. Ο καθαρός μέσος όρος ανιχνευτριών ανάλογα με τις συνθήκες είναι 5-10%.

Η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στις μέλισσες είναι το πιο σημαντικό γεγονός στη διαμόρφωση της συλλογικής γνώσης. Καθώς εξετάζουμε ολόκληρη την κυψέλη είναι δυνατόν να διακρίνουμε ορισμένα μέρη που είναι κοινά σε όλες τις κυψέλες. Το σημαντικότερο μέρος σε μία κυψέλη-σε σχέση με την ανταλλαγή πληροφοριών- είναι το σημείο χορού. Η επικοινωνία των μελισσών που συνδέεται με την ποιότητα των πηγών τροφής λαμβάνει χώρα στο σημείο χορού. Αυτός ο χορός λέγεται κουνιστός ή μικτός χορός (waggle dance).

Μιας που οι πληροφορίες για τις παρούσες πλούσιες πηγές είναι διαθέσιμες σε έναν παρατηρητή στο σημείο του χορού, μια μέλισσα πρέπει να βλέπει κατά πάσα πιθανότητα πολλούς χορούς και να αποφασίζει να ασχοληθεί με την πιο αποδοτική πηγή. Υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα οι παρατηρητές να επιλέγουν πιο κερδοφόρες πηγές μιας που κυκλοφορούν περισσότερες πληροφορίες για τις πιο αποδοτικές πηγές. Οι απασχολούμενες συλλέκτριες μοιράζονται τις πληροφορίες τους με πιθανότητα ανάλογη της αποδοτικότητας της πηγής, ενώ η ανταλλαγή των πληροφοριών μέσω του κουνιστού χορού είναι μεγαλύτερη σε διάρκεια. Κατά συνέπεια, η στρατολόγηση είναι ανάλογη της αποδοτικότητας της πηγής της τροφής. Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη βασική συμπεριφορά των συλλεκτριών, ας εξετάσουμε το Διάγραμμα. Ας υποθέσουμε ότι έχουν βρεθεί δύο πηγές τροφής: η Α και η Β. Αρχικά, μια πιθανή συλλέκτρια θα ξεκινήσει ως μη απασχολούμενη συλλέκτρια. Αυτή η μέλισσα δεν θα έχει καμία γνώση των πηγών τροφής γύρω από τη φωλιά. Υπάρχουν, λοιπόν, δύο επιλογές για μια τέτοια μέλισσα:

i. Μπορεί να γίνει ανιχνεύτρια και να αρχίσει να ψάχνει αυθόρμητα γύρω από τη φωλιά για τροφή χάρη σε μια εσωτερική παρόρμηση ή κάποιο εξωτερικό στοιχείο (S στο διάγραμμα).

ii. Μπορεί να στρατολογηθεί έχοντας παρακολουθήσει κάποιο κουνιστό χορό και να αρχίσει να αναζητά πηγές τροφής. (R στο διάγραμμα).

Έχοντας βρει την πηγή της τροφής, η μέλισσα χρησιμοποιεί την ικανότητα της για να απομνημονεύσει την τοποθεσία και αμέσως αρχίζει να την αξιοποιεί. Τότε, η μέλισσα θα μετατραπεί σε 'απασχολούμενη συλλέκτρια'. Η

συλλέκτρια παίρνει ένα φορτίο από νέκταρ από την πηγή και επιστρέφει την κυψέλη όπου και ξεφορτώνει το νέκταρ σε ένα κελί αποθήκευσης τροφής. Αφού ξεφορτώσει το φαγητό, η μέλισσα έχει τις ακόλουθες τρεις επιλογές:

- i. Μετατρέπεται σε μη αφοσιωμένο ακόλουθο μετά την εγκατάλειψη της πηγής της τροφής (Uncommitted follower: UF).
- ii. Χορεύει και στη συνέχεια στρατολογεί άλλα μέλη της φωλιάς πριν να επιστρέψει στην ίδια πηγή τροφής (EF1).
- iii. Συνεχίζει να συλλέγει στην ίδια πηγή τροφής χωρίς να στρατολογεί άλλες μέλισσες (EF2).

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι δεν αρχίζουν τη συγκομιδή όλες οι μέλισσες ταυτόχρονα. Τα πειράματα επιβεβαίωσαν ότι νέες μέλισσες ξεκινούν την συγκομιδή με ρυθμό ανάλογο της διαφοράς ανάμεσα στον τελικό αριθμό των μελισσών και τον αριθμό που συλλέγουν τη δεδομένη στιγμή.

Στην περίπτωση των μελιτοφόρων μελισσών, οι βασικές ιδιότητες στις οποίες βασίζεται η αυτό-οργάνωση είναι οι ακόλουθες:

- i. Θετική ανατροφοδότηση: Όσο μεγαλώνει η ποσότητα του νέκταρος από τις πηγές της τροφής τόσο αυξάνεται και ο αριθμός των παρατηρητών που τις επισκέπτεται.
- ii. Αρνητική ανατροφοδότηση: Σταματά η διαδικασία αναζήτησης τροφής σε μία πηγή εγκαταλελειμμένη από μέλισσες.
- iii. Αυξομειώσεις: Οι ανιχνεύτριες διεξάγουν μια τυχαία διαδικασία έρευνας για την ανακάλυψη καινούριων πηγών τροφής.
- iv. Πολλαπλές αλληλεπιδράσεις: Οι μέλισσες μοιράζονται τις πληροφορίες τους για την θέση πηγών τροφής με τα άλλα μέλη της φωλιάς στο σημείο χορού.

ΠΡΟΤΕΙΝΟΜΕΝΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ

Στην εργασία αυτή, ερευνάται μία συγκεκριμένη νοήμουσα συμπεριφορά ενός σμήνους μελιτοφόρων μελισσών-η συμπεριφορά των συλλεκτριών- και περιγράφεται ένας νέος αλγόριθμος μιας αποικίας τεχνητών μελισσών (Artificial Bee Colony: ABC) ο οποίος προσομοιάζει αυτή τη συμπεριφορά (πραγματικών μελιτοφόρων μελισσών) και βοηθάει στην επίλυση πολυδιάστατων και πολυκόρυφων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Σε αυτό το μοντέλο, η αποικία των τεχνητών μελισσών αποτελείται από τρεις ομάδες: τις απασχολούμενες μέλισσες, τις μέλισσες παρατηρητές και τις ανιχνεύτριες. Το πρώτο μισό της αποικίας αποτελείται από τις απασχολούμενες τεχνητές μέλισσες και το υπόλοιπο περιλαμβάνει τους παρατηρητές. Για κάθε πηγή τροφής, υπάρχει μόνο μία απασχολούμενη μέλισσα. Με άλλα λόγια, ο αριθμός των απασχολούμενων μελισσών ισούται με τον αριθμό των πηγών τροφής γύρω από την κυψέλη. Η απασχολούμενη μέλισσα της οποίας η πηγή τροφής έχει εξαντληθεί από τις υπόλοιπες μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια. Τα βασικά βήματα για τον αλγόριθμο αυτό είναι τα ακόλουθα:

Στείλτε τις ανιχνεύτριες στις αρχικές πηγές τροφής

ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ

Στείλτε τις απασχολούμενες μέλισσες στις πηγές τροφής και προσδιορίστε την ποσότητα του νέκταρος τους

Υπολογίστε την τιμή της πιθανότητας των πηγών τις οποίες προτιμούν οι μέλισσες παρατηρητές

Σταματήστε τη διαδικασία αξιοποίησης των εγκαταλελειμμένων πηγών

Στείλτε τις ανιχνεύτριες στο χώρο έρευνας για την ανακάλυψη νέων πηγών τροφής, τυχαία

Απομνημονεύστε τις καλύτερες πηγές τροφής μέχρι τώρα

ΜΕΧΡΙ (να ικανοποιηθούν οι παράμετροι)

Κάθε κύκλος έρευνας αποτελείται από τρία βήματα: την μετακίνηση των απασχολούμενων μελισσών και των παρατηρητών στις πηγές τροφής και τον υπολογισμό της ποσότητας του νέκταρος τους, και επίσης τον προσδιορισμό των ανιχνευτριών μελισσών και τον προσανατολισμό τους προς πιθανές πηγές τροφής. Μία τοποθεσία πηγής τροφής αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα προς βελτιστοποίηση. Η ποσότητα του νέκταρος σε μια πηγή τροφής ισοδυναμεί με την ποιότητα της λύσης που αναπαριστάται από αυτή την πηγή τροφής. Οι παρατηρητές τοποθετούνται στις πηγές τροφής ακολουθώντας μία διαδικασία επιλογής που βασίζεται σε μία πιθανότητα. Καθώς αυξάνεται η ποσότητα νέκταρος σε μια πηγή τροφής, μεγαλώνει και η τιμή της πιθανότητας με την οποία προτιμάται η συγκεκριμένη πηγή τροφής από τους παρατηρητές. Κάθε αποικία μελισσών έχει ανιχνεύτριες που είναι οι εξερευνητές της αποικίας. Οι εξερευνητές δεν έχουν καμία καθοδήγηση ως προς την ανεύρεση τροφής. Αρχικά ασχολούνται μόνο με το να βρουν οποιαδήποτε πηγή τροφής. Ως αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς, οι ανιχνεύτριες χαρακτηρίζονται από ένα χαμηλό κόστος έρευνας και ένα χαμηλό μέσο όρο ποιότητας στην πηγή της τροφής. Σε μερικές περιπτώσεις, οι ανιχνεύτριες μπορεί να ανακαλύψουν κατά λάθος

πλούσιες και εντελώς άγνωστες πηγές τροφής. Στην περίπτωση των τεχνητών μελισσών, οι τεχνητές ανιχνεύτριες μπορεί να έχουν ως αποστολή την γρήγορη ανακάλυψη μιας ομάδας εφικτών λύσεων. Σε αυτήν την εργασία, μία από τις απασχολούμενες μέλισσες επιλέγεται και ορίζεται ως ανιχνεύτρια μέλισσα. Η επιλογή ελέγχεται από μία παράμετρο ελέγχου που ονομάζεται 'όριο'. Αν μία λύση που αντιπροσωπεύει μία πηγή τροφής δεν βελτιώνεται μετά από ένα προκαθορισμένο αριθμό δοκιμών, τότε αυτή η πηγή τροφής εγκαταλείπεται από την απασχολούμενη μέλισσα και αυτή μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια. Ο αριθμός των δοκιμών για την αποδέσμευση μιας πηγής ισούται με την τιμή αυτού του 'ορίου' που είναι ένας σημαντικός παράγοντας του ABC. Σε μία εύρωστη διαδικασία έρευνας, οι μέθοδοι εξερεύνησης και αξιοποίησης πρέπει να εφαρμοστούν μαζί. Στον αλγόριθμο ABC, ενώ οι παρατηρητές και οι απασχολούμενες μέλισσες εκτελούν την διαδικασία αξιοποίησης στο χώρο έρευνας, οι ανιχνεύτριες ελέγχουν τη διαδικασία εξερεύνησης.

Στην περίπτωση αληθινών μελιτοφόρων μελισσών, ο ρυθμός στρατολόγησης αντιπροσωπεύει ένα 'μέτρο' για το πόσο γρήγορα ένα σμήνος μελισσών εντοπίζει και αξιοποιεί μία νέο-ανακαλυφθείσα πηγή τροφής. Η τεχνητή μέθοδος στρατολόγησης θα μπορούσε ομοίως να αντιπροσωπεύει την 'μέτρηση' της ταχύτητας με την οποία οι εφικτές λύσεις ή οι βέλτιστες λύσεις των δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης μπορούν να ανακαλυφθούν. Η επιβίωση και η πρόοδος του αληθινού σμήνους μελισσών βασίζονταν στην γρήγορη ανακάλυψη και την αποτελεσματική χρήση των καλύτερων πόρων τροφής. Κατά όμοιο τρόπο, η βέλτιστη λύση σε δύσκολα μηχανικά προβλήματα συνδέεται με την σχετικά γρήγορη ανακάλυψη 'καλών λύσεων', ιδιαίτερα για προβλήματα που χρειάζονται λύση σε πραγματικό χρόνο.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗΣ

Στις έρευνες προσομοίωσης, ο αλγόριθμος Αποικίας Τεχνητών Μελισσών (ABC) εφαρμόστηκε για να βρεθεί το καθολικό ελάχιστο των γνωστών τριών δοκιμαστικών συναρτήσεων. Μία από αυτές είναι η συνάρτηση Sphere που είναι ομαλή, με ένα ακρότατο και συμμετρική. Το χ είναι στο διάστημα $[-100, 100]$. Η καθολική ελάχιστη τιμή για αυτήν τη συνάρτηση είναι 0 και η βέλτιστη λύση είναι αυτή. Η δεύτερη συνάρτηση είναι ένα κλασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης: η κοιλάδα του Rosenbrock. Το καθολικό μέγιστο είναι μέσα σε μία μεγάλη, στενή παραβολική επίπεδη κοιλάδα. Κατά συνέπεια, είναι πολύ δύσκολο να συγκλίνει το καθολικό μέγιστο. Οι μεταβλητές της συνάρτησης είναι έντονα εξαρτημένες, και οι κλίσεις δεν συγκλίνουν γενικά προς το βέλτιστο. Το βέλτιστο είναι στο διάστημα $[-2.048, 2048]$, η καθολική ελάχιστη τιμή είναι το 0 και η βέλτιστη λύση είναι στο μηδέν. Το καθολικό βέλτιστο της συνάρτησης είναι το μοναδικό βέλτιστο και η συνάρτηση είναι μονοκόρυφη. Η τρίτη συνάρτηση είναι η συνάρτηση Rastrigin που βασίζεται στην συνάρτηση Sphere προσθέτοντας την τροποποίηση του συνημίτονου για να παράγουμε πολλά τοπικά ελάχιστα. Το καλύτερο είναι στο διάστημα $[-600, 600]$ και η ελάχιστη τιμή είναι 0. Η βέλτιστη λύση για αυτή την συνάρτηση είναι

Στον αλγόριθμο ABC, ο μέγιστος αριθμός κύκλων ορίστηκε στο 2000. Τα ποσοστά των μελισσών παρατηρητών και των απασχολούμενων μελισσών ήταν το 50% της αποικίας και ο αριθμός των ανιχνευτριών μελισσών επιλέχθηκε να είναι ένα. Η αύξηση στον αριθμό των ανιχνευτριών ενθαρρύνει την διαδικασία της εξερεύνησης ενώ η αύξηση των παρατηρητών ενθαρρύνει την διαδικασία της αξιοποίησης. Οι παράμετροι που υιοθετούνται από τον αλγόριθμο ABC.

Κάθε ένα από τα πειράματα επαναλήφθηκε 30 φορές με διαφορετικούς τυχαίους πυρήνες και καταγράφηκαν οι μέσες τιμές της συνάρτησης των καλύτερων λύσεων. Οι μέσες και συνήθεις αποκλίσεις των τιμών της συνάρτησης που επιτεύχθηκαν μέσω του αλγόριθμου ABC για τις ίδιες συνθήκες.

Σε αυτήν την εργασία, περιγράφηκε ένας νέος αλγόριθμος βελτιστοποίησης βασισμένος στην νοήμουσα συμπεριφορά ενός σμήνους μελιτοφόρων μελισσών. Ο νέος αλγόριθμος του σμήνους είναι πολύ απλός και ευέλικτος όταν συγκρίνεται με τους υπάρχοντες αλγόριθμους βασισμένους σε σμήνη. Είναι, επίσης, πολύ εύρωστος, τουλάχιστον σε σχέση με τα δοκιμαστικά προβλήματα που εξετάστηκαν σε αυτήν την εργασία. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, φτάνουμε στο συμπέρασμα ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση μονοκόρυφων και πολυκόρυφων αριθμητικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Εδώ, ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε σε μία πολύ περιορισμένη ομάδα δειγματικών προβλημάτων. Η έρευνα προσομοίωσης θα πρέπει να εφαρμοσθεί σε μία μεγαλύτερη ομάδα δειγματικών συναρτήσεων και η απόδοση του αλγόριθμου θα πρέπει να εξεταστεί λεπτομερώς.

Η Προσέγγιση του Συστήματος των Μελισσών στη Μοντελοποίηση Προβλημάτων Συνδυαστικής Βελτιστοποίησης

Συμπεριφορά αληθινών μελισσών

Η αποικία των μελιτοφόρων μελισσών επιλέγει τα κομμάτια μίας έκτασης που είναι πιο αποδοτικά ανάμεσα σε διάφορες διαθέσιμες πηγές νέκταρος. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι η αποικία γρήγορα και με ακρίβεια

προσαρμόζει το σχέδιο έρευνας της στο χρόνο και στο χώρο ακολουθώντας τις αλλαγές του περιβάλλοντος σε σχέση με τις πηγές νέκταρος. Η αυτό-οργάνωση των μελισσών βασίζεται σε μερικούς σχετικά απλούς κανόνες ατομικής συμπεριφοράς εντόμων. Εδώ θα περιγραφεί το πως μέσα από τις κινήσεις ενός μεγάλου αριθμού ανεξάρτητων μελισσών μπορεί να προβάλλει ένα οργανωμένο σχέδιο συλλογικής συγκομιδής.

Είναι φυσικό να θεωρούμε μια αποικία ως ένα σύστημα ατόμων που αλληλεπιδρούν-οι συλλέκτριες μέλισσες (Camazine και Sneyd, 1991). Με βάση αυτό το συλλογισμό, είναι πιθανό να εξετάσουμε πρώτα τη σχετική συμπεριφορά των ατόμων και μετά τις πληροφορίες που μοιράζονται τα άτομα έτσι ώστε να επιτύχουν μια κοινή γνώση. 'Η Συλλογική-Νοημοσύνη του Σμήνους' είναι η ιδιότητα που ξεπροβάλλει σε μια αποικία ατόμων και απαιτεί μόνο περιορισμένη και τοπική γνώση που κάθε συμμετέχων θα πρέπει να κατέχει. Η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στα άτομα είναι το πιο σημαντικό συμβάν στη δημιουργία της συλλογικής γνώσης. Καθώς ερευνάται ολόκληρη η κυψέλη είναι δυνατόν να διακρίνουμε ορισμένα μέρη που είναι κοινά σε όλες τις κυψέλες. Το πλέον σημαντικό τμήμα της κυψέλης σε σχέση με την ανταλλαγή πληροφοριών είναι το σημείο του χορού. Ο σχετικός χορός ονομάζεται 'κουνιστός ή μικτός χορός' (waggle dance).

Σε γενικές γραμμές, σε μια κοινωνική αποικία εντόμων τα άτομα δεν εκτελούν συνήθως όλες τις εργασίες. Εξειδικεύονται σε μία ομάδα εργασιών ανάλογα με τη μορφολογία τους, την ηλικία και την τύχη (Bonabeau και άλλοι, 1999). Παρόλα αυτά, ένα μεγάλο κομμάτι ολόκληρης της αποικίας των μελισσών θα είναι συλλέκτριες. Τα βασικά χαρακτηριστικά του συμπεριφορικού κύκλου της αναζήτησης των ανιχνευτριών μελιτοφόρων μελισσών για νέκταρ.

Αρχικά, μια πιθανή συλλέκτρια θα ξεκινήσει ως μη απασχολούμενη συλλέκτρια. Αυτή η μέλισσα δεν θα έχει καμία γνώση των πηγών τροφής στη συγκεκριμένη έκταση. Για μία τέτοια μέλισσα υπάρχουν δυο δυνατότητες:

- Μπορεί να αρχίσει να ψάχνει για τροφή αυθόρμητα χάρη σε μια εσωτερική παρόρμηση ή κάποιο εξωτερικό στοιχείο και κατά συνέπεια να γίνει ανιχνεύτρια.
- Ως αποτέλεσμα της παρουσίας της στον κουνιστό χορό κάποιας άλλης μέλισσας, αρχίζει να ψάχνει για μια πηγή τροφής και κατά συνέπεια στρατολογείται.

Έχοντας βρει την πηγή της τροφής, η μέλισσα χρησιμοποιεί τη δική της ικανότητα για απομνημόνευση της τοποθεσίας και αρχίζει κατευθείαν να την αξιοποιεί. Κατά αυτόν τον τρόπο, η μέλισσα θα μετατραπεί σε 'απασχολούμενη συλλέκτρια'.

Η συλλέκτρια μέλισσα παίρνει ένα φορτίο νέκταρ από την έκταση και επιστρέφει στην κυψέλη, απελευθερώνοντας το νέκταρ σε ένα κελί αποθήκευσης. Μετά την αποδέσμευση του φαγητού, η μέλισσα έχει τις ακόλουθες επιλογές:

- α) εγκαταλείπει την πηγή της τροφής και μετατρέπεται έτσι σε μη αφοσιωμένο ακόλουθο,
- β) συνεχίζει την συγκομιδή στην ίδια πηγή τροφής χωρίς να στρατολογεί άλλες μέλισσες από τη φωλιά, ή
- γ) χορεύει και στη συνέχεια στρατολογεί άλλα μέλη από τη φωλιά πριν να επιστρέψει στην ίδια πηγή τροφής.

Η μέλισσα επιλέγει μία από τις παραπάνω εναλλακτικές με μια σχετική πιθανότητα. Οι πιθανότητες εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από την ποιότητα της πηγής της τροφής που έχει επισκεφτεί. Μέσα στο σημείο του χορού, οι μέλισσες που χορεύουν 'διαφημίζουν' διαφορετικές τοποθεσίες φαγητού. Οι μηχανισμοί με τους οποίους η μέλισσα αποφασίζει να ακολουθήσει μία συγκεκριμένη χορεύτρια δεν είναι ακόμα απόλυτα κατανοητοί, ωστόσο, θεωρείται ότι 'η στρατολόγηση ανάμεσα στις μέλισσες γίνεται πάντα σε συνάρτηση με την ποιότητα της πηγής της τροφής' (Camazine και Sneyd, 1991).

Με το πέρασμα του χρόνου, οι πηγές τροφής μπορεί να εξαντληθούν έτσι ώστε κάποιες απασχολούμενες συλλέκτριες μπορεί να πάνουν να απασχολούνται-να πάνουν να αξιοποιούν μία πηγή.

Οι μέλισσες έχουν μια κάποια μνήμη και όσο μία μέλισσα διατηρεί πληροφορίες για αυτή την πηγή τροφής στη μνήμη της, αυτή ονομάζεται έμπειρη μη απασχολούμενη μέλισσα. Κάποιες φορές, οι έμπειρες μη απασχολούμενες μέλισσες θα κάνουν εποπτικές πτήσεις στην πηγή της τροφής και τότε η μέλισσα ονομάζεται επόπτης. Μία επαναδραστηριοποιημένη συλλέκτρια είναι μία έμπειρη μη απασχολούμενη μέλισσα που έχει παρευρεθεί σε ένα χορό που περιείχε πληροφορίες για μία ήδη γνωστή πηγή τροφής και βασιζόμενη σε αυτό παίρνει την απόφαση να πάει και να εξερενήσει την γνωστή και ταυτόχρονα διαφημισμένη πηγή τροφής. Στις περιπτώσεις που μία έμπειρη μη απασχολούμενη μέλισσα παρακολούθησε ένα χορό που διαφημίζει μία άγνωστη πηγή τροφής, είναι πιθανό η μέλισσα να ήθελε να ξεκινήσει την εξερεύνηση αυτής της άγνωστης πηγής τροφής και να στρατολογηθεί. Στην περίπτωση που έμπειρες μη απασχολούμενες μέλισσες δεν βρήκαν κάποιο κουνιστό χορό να ακολουθήσουν, μπορεί να αρχίσουν να αναζητούν κάποια εντελώς καινούρια και άγνωστη πηγή τροφής αυθόρμητα και να γίνουν και πάλι ανιχνεύτριες.

Είναι φανερό ότι υπάρχουν διάφορες κατηγορίες συλλεκτριών (De Vries και Biesmeijer, 1998):

- Η απασχολούμενη συλλέκτρια-γνωρίζει και αξιοποιεί μια αποδοτική πηγή τροφής. Πετάνει απλά από την πηγή στο σημείο εκφόρτωσης της κυψέλης και το αντίθετο .

- Η μη απασχολούμενη συλλέκτρια θα μπορούσε να είναι τα παρακάτω (να ξεκινήσει τη συλλογή-διάγραμμα):
 - Ανιχνεύτρια, αρχίζει να ψάχνει αυθόρμητα, χωρίς καμία γνώση των πηγών τροφής .
 - Νεοσύλλεκτη, ξεκινάει να ψάχνει έχοντας πρώτα παραβρεθεί σε κάποιο χορό μέσα στην κυψέλη-γνωρίζει περίπου την θέση της πηγής της τροφής χωρίς όμως να ξέρει την ποιότητα της .
- Η έμπειρη συλλέκτρια που έχει κάποια γνώση όσον αφορά τη θέση και την αποδοτικότητα της πηγής μπορεί να έχει τα ακόλουθα καθήκοντα:
 - Επόπτης, επιθεωρεί το μέγεθος της αποδοτικότητας της πηγής που έχει ήδη ανακαλυφθεί
 - Επαναδραστηριοποιημένη συλλέκτρια, εξερευνά την ίδια πηγή τροφής μόνο όμως μετά από την παρουσία της στο σημείο του χορού-έχοντας λάβει επιβεβαίωση για την πηγή από άλλα μέλη της φωλιάς .
 - Ανιχνεύτρια, αρχίζει να ψάχνει για μια καινούρια πηγή αφού όμως η προηγούμενη έχει αλλοιωθεί .
 - Νεοσύλλεκτη, ανικανοποίητη από την παρούσα πηγή τροφής, θα ξεκινήσει να ψάχνει για μία καινούρια πηγή που έχει προηγουμένως διαφημιστεί στο σημείο του χορού.

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι δεν αρχίζουν τη συγκομιδή όλες οι μέλισσες ταυτόχρονα. Τα πειράματα επιβεβαίωσαν ότι νέες μέλισσες ξεκινούν την συγκομιδή με ρυθμό ανάλογο της διαφοράς ανάμεσα στον τελικό αριθμό των μελισσών και τον αριθμό που συλλέγουν τη δεδομένη στιγμή. Σε κάθε δεδομένη στιγμή, κάθε συλλέκτρια θα μπορούσε να είναι σε ένα από τα ακόλουθα μέρη:

- μη ενεργή,
- να εκφορτώνει νέκταρ από την πηγή της τροφής,
- να χορεύει για κάποια πηγή τροφής,
- να τρέφεται σε κάποια πηγή τροφής,
- να ακολουθεί κάποια χορεύτρια, και
- να ανιχνεύει.

Τεχνητές Μέλισσες

Οι επιτυχημένες εφαρμογές του Συστήματος των Μυρμηγκιών σε πολύπλοκα μηχανικά και διοικητικά προβλήματα είναι σίγουρα ενθαρρυντικές. Την ίδια στιγμή, αυτές οι επιτυχίες λειτουργούν ως μεγάλη έμπνευση στην προσπάθεια να εξερευνήσουμε την συμπεριφορά των μελισσών και ως μοντέλα για την ανάπτυξη διαφόρων τεχνητών συστημάτων.

Μία μεγάλη μερίδα των δραστηριοτήτων των κοινωνικών εντόμων συνδέεται με την συγκομιδή τροφής. Είναι γνωστό ότι οι μελιτοφώρες μέλισσες 'κανονικά περνούν το τελευταίο στάδιο της ζωής τους συλλέγοντας φαγητό' (Biesmeijer και άλλοι, 1998). Επίσης, 'περνούν ένα σημαντικό κομμάτι της διάρκειας της ζωής τους μαθαίνοντας και βελτιώνοντας τις ικανότητες συλλογής που έχουν' (Dukas και Visscher, 1994). Κάθε αποικία μελισσών έχει ανιχνεύτριες που είναι οι εξερευνητές της αποικίας (Seeley και Visscher, 1988). Οι εξερευνητές δεν έχουν καμία καθοδήγηση ενώ ψάχνουν για τροφή. Είναι πρωτίστως αφοσιωμένοι στην ανεύρεση οποιασδήποτε μορφής πηγής τροφής. Ως αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς, οι ανιχνεύτριες χαρακτηρίζονται από χαμηλό κόστος έρευνας και χαμηλό μέσο όρο στην ποιότητα της πηγής της τροφής. Μερικές φορές, οι ανιχνεύτριες μπορεί κατά λάθος να ανακαλύψουν πλούσιες και εντελώς άγνωστες πηγές τροφής. Στην περίπτωση των τεχνητών μελισσών, οι τεχνητές ανιχνεύτριες που προσπαθούν να λύσουν δύσκολα συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να έχουν ως εργασία τη γρήγορη ανακάλυψη της ομάδας των εφικτών λύσεων. Κάποιες από αυτές τις εφικτές λύσεις στα δύσκολα συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης θα μπορούσαν να αποδειχθούν λύσεις πολύ καλής ποιότητας.

Στην περίπτωση των μελιτοφόρων μελισσών, ο ρυθμός στρατολόγησης αντιπροσωπεύει ένα 'μέτρο' για το πόσο γρήγορα η αποικία των μελισσών βρίσκει και αξιοποιεί μια νεοανακαλυφθείσα πηγή τροφής. Η τεχνητή στρατολόγηση θα μπορούσε παρομοίως να αντιπροσωπεύει τη 'μέτρηση' της ταχύτητας με την οποία εμφανίζονται οι εφικτές λύσεις ή οι λύσεις 'καλής ποιότητας'.

Η συνεργασία ανάμεσα στα έντομα μειώνει το κόστος των συλλεκτριών στην ανεύρεση νέων πηγών τροφής. Αυτό υποδηλώνει ότι η συνεργασία ανάμεσα σε τεχνητές μέλισσες θα επέτρεπε επίσης την γρήγορη ανακάλυψη της εφικτής λύσης.

Είναι ακόμη γνωστό ότι η συνεργασία αυξάνει την ποιότητα των πηγών τροφής που εντοπίζονται από τις συλλέκτριες. Αυτό αφήνει να εννοηθεί ότι η συνεργασία θα μπορούσε επίσης να μας βοηθήσει να βρούμε τις καλύτερες λύσεις στα δύσκολα συνδυαστικά προβλήματα βελτιστοποίησης.

Η επιβίωση και η πρόοδος της αποικίας των μελισσών εξαρτάται από την γρήγορη ανακάλυψη και την αποτελεσματική εκμετάλλευση των καλύτερων διατροφικών πόρων. Με άλλα λόγια, η επιτυχημένη επίλυση δύσκολων μηχανικών προβλημάτων (ειδικά αυτών που χρειάζεται να επιλυθούν σε πραγματικό χρόνο) συνδέεται με τη σχετικά γρήγορη ανακάλυψη των 'καλών λύσεων'.

Επιλύοντας το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή μέσω του Συστήματος των Μελισσών

Ο κύριος στόχος της έρευνας είναι να εξερευνήσει τις πιθανές εφαρμογές της νοημοσύνης του σμήνους (και ιδιαίτερα, σε αυτήν τη φάση, της συλλογικής νοημοσύνης των μελισσών) στην επίλυση πολύπλοκων μηχανικών προβλημάτων κίνησης και μεταφορών. Η ανάπτυξη του νέου ευρετικού αλγορίθμου για το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή μέσω της χρήσης του Συστήματος των Μελισσών θα χρησιμεύσει ως ένα διαφωτιστικό παράδειγμα για τέτοιες εφαρμογές και θα επιδείξει τα χαρακτηριστικά της προτεινόμενης έννοιας.

Το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή (Traveling Salesman Problem: TSP) επιλέχθηκε για τα ακόλουθα χαρακτηριστικά του:

- Πολύ δύσκολο (NP-hard) πρόβλημα.
- Υπάρχουν πολλά χαρακτηριστικά προβλήματα (το TSP έχει μελετηθεί πολύ και μέσα από αυτήν την διαδικασία και με σκοπό την τεχνική σύγκριση, εμφανίζονται πολλές περιπτώσεις).
- Εύκολο στην κατανόηση.
- Αν υποθέσουμε ότι η πλησιέστερη πηγή τροφής είναι πιο ελκυστική για τις μελιτοφόρες μέλισσες, η συμπεριφορά των συλλεκτριών θα μπορούσε να εφαρμοστεί ώστε να βρεθεί η καλύτερη λύση.

Το TSP θα μπορούσε να διατυπωθεί ακολούθως:

Ας υποθέσουμε ότι $G = (N, A)$ είναι ένας γράφος όπου N είναι ένα σύνολο κόμβων και A είναι ένα σύνολο τόξων ή ακμών. Ας εισάγουμε επίσης το διάστημα ως την απόσταση ή τον πίνακα κόστους που συνδέεται με ένα σύνολο τόξων. Στο TSP πρέπει να καθοριστεί η ελάχιστη απόσταση διαδρομής που περνάει μέσα από κάθε κόμβο μία και μοναδική φορά. Στη βιβλιογραφία, η διαδρομή αυτή είναι γνωστή ως διαδρομή (ή κύκλος) Hamilton. Υπάρχουν πολλές διαφορετικές μορφές στο πρόβλημα. Οι πιο σημαντικές είναι το συμμετρικό TSP όπως και το ασύμμετρο TSP που συμβαίνει σε αντίθετη περίπτωση.

Υπάρχουν αρκετοί τρόποι για να διατυπώσουμε το TSP μαθηματικά. Μία από τις πρώτες διατυπώσεις που έκαναν οι Dantzig, Fulkerson και Johnson (1954) θα παρουσιάσουμε εδώ. Ας υποθέσουμε ότι καλύτερη είναι το η ακόλουθη δυαδική μεταβλητή:

Ο στόχος είναι να βρεθεί η πιο ανέξοδη διαδρομή. Οι περιορισμοί 3.2 και 3.3 θα πρέπει να περιορίσουν τις φορές που επισκεπτόμαστε κάθε κόμβο στην τιμή 1. Ο περιορισμός 3.4 αντιπροσωπεύει περιορισμούς εξάλειψης υποδιαδρομών-απαγορεύουν την δημιουργία υποδιαδρομών (διαδρομών με λιγότερους από Ν.κόμβους). Εδώ, η εστίαση δεν είναι στο TSP και στις λύσεις του που αναπτύχθηκαν στο παρελθόν· λεπτομερέστερη έρευνα υπάρχει στον Laporte (1992).

Ας υποθέσουμε ότι $G = (N, A)$ είναι ο γράφος στον οποίο οι μέλισσες συλλέγουν νέκταρ (ο γράφος στον οποίο η διαδρομή του περιπλανώμενου πωλητή θα πρέπει να ανακαλυφθεί). Ας τοποθετήσουμε επίσης τυχαία την κυψέλη σε έναν από τους κόμβους. Όταν συλλέγουν τροφή, οι μέλισσες προσπαθούν να μαζέψουν όσο περισσότερο νέκταρ γίνεται. Ας υποθέσουμε, ακόμα, ότι η ποσότητα του νέκταρος που μπορεί να συλλεγεί πετώντας κατά μήκος ενός συγκεκριμένου συνδέσμου είναι αντιστρόφως ανάλογη του μήκους του συνδέσμου. Με άλλα λόγια, όσο πιο μικρός ο σύνδεσμος τόσο μεγαλύτερη η ποσότητα του νέκταρος που θα συλλεγεί κατά μήκος του συνδέσμου αυτού. Αυτό σημαίνει ότι η μεγαλύτερη δυνατή ποσότητα νέκταρος μπορεί να μαζευτεί όταν πετούν κατά μήκος της μικρότερης διαδρομής του περιπλανώμενου πωλητή. Οι τεχνητές μας μέλισσες θα συλλέξουν το νέκταρ κατά τη διάρκεια ενός καθορισμένου χρονικού διαστήματος. Μετά από αυτό, θα αλλάξουμε τυχαία τη θέση της κυψέλης. Οι μέλισσες θα αρχίσουν να συλλέγουν το νέκταρ από τη νέα τοποθεσία. Στη συνέχεια θα αλλάξουμε και πάλι τυχαία τη θέση της κυψέλης και ούτω καθεξής. Η επανάληψη στην ερευνητική διαδικασία αντιπροσωπεύει μία αλλαγή στη θέση της κυψέλης. Οι τεχνητές μας μέλισσες ζουν σε ένα περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από διακριτό χρόνο. Κάθε επανάληψη αποτελείται από ένα συγκεκριμένο αριθμό σταδίων. Το στάδιο είναι μία μονάδα στοιχειώδους χρόνου στο περιβάλλον των μελισσών. Κατά τη διάρκεια ενός σταδίου η μέλισσα θα επισκεφτεί s κόμβους, θα δημιουργήσει μία επιμέρους διαδρομή περιπλανώμενου πωλητή και μετά από αυτό θα επιστρέψει στη κυψέλη (ο αριθμός των κόμβων s προς επίσκεψη σε ένα στάδιο είναι προκαθορισμένος από τον αναλυτή στην αρχή της ερευνητικής διαδικασίας). Στην κυψέλη η μέλισσα θα συμμετέχει στη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η μέλισσα θα αποφασίσει αν θα εγκαταλείψει την πηγή τροφής και θα γίνει ξανά μη αφοσιωμένος ακόλουθος, αν θα συνεχίσει να συλλέγει στην πηγή χωρίς την στρατολόγηση άλλων μελών της φωλιάς, ή θα χορέψει και έτσι θα στρατολογήσει τα

μέλη της φωλιάς πριν επιστρέψει στην πηγή της τροφής. Ας δηλώσουμε ως B το συνολικό αριθμό μελισσών στην κυψέλη και ως $B(u, z)$ το συνολικό αριθμό των συλλεκτριών μελισσών στο στάδιο u στην επανάληψη z . Θα υποθέσουμε ότι στην αρχή κάθε επανάληψης z όλες οι μέλισσες είναι στην κυψέλη, π.χ.:

$$B(0, z) = 0$$

Σημειώνεται ότι δεν συλλέγουν νέκταρ όλες οι μέλισσες την ίδια στιγμή στη φύση. Στην περίπτωση των τεχνητών μελισσών, αυξάνουμε τον αριθμό των συλλεκτριών σε κάθε επακόλουθο στάδιο με τον ακόλουθο τρόπο:

Ας εισάγουμε τις δυαδικές μεταβλητές που ορίζονται ως:

όπου M είναι ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων.

Κάποιες μέλισσες θα αρχίσουν την συλλογή στο πρώτο στάδιο. Οι εναπομείναντες μέλισσες θα προστεθούν στα υπόλοιπα μέλη της φωλιάς στο δεύτερο στάδιο, ή στο τρίτο στάδιο, ή στο τέταρτο στάδιο κτλ. Μόλις μία μέλισσα αρχίσει να συλλέγει τροφή, θα παραμείνει 'ενεργή' μέχρι το τέλος της συγκεκριμένης επανάληψης. Η πράξη της συγκομιδής κάθε μέλισσας μπορεί να περιγραφεί από την διάταξη των 0 και 1. Η διάταξη $[1, 1, 1, \dots, 1]$ περιγράφει την δραστηριότητα μίας μέλισσας που έχει αρχίσει τη συγκομιδή από το πρώτο στάδιο· η διάταξη $[0, 0, 0, 1, 1, 1, \dots, 1]$ περιγράφει τη δραστηριότητα μια μέλισσας που ξεκινάει τη συγκομιδή από το τέταρτο στάδιο και ούτω καθεξής.

Ας εισάγουμε τις δυαδικές μεταβλητές που ορίζονται ως:

όπου w είναι η παράμετρος που δίνεται από τον αναλυτή ο τυχαίος αριθμός που έχει παρθεί από το διάστημα $[0,1]$

Οι δυαδικές μεταβλητές υποδεικνύουν το στάδιο στο οποίο μια συγκεκριμένη μέλισσα αρχίζει τη συγκομιδή. Για κάθε μέλισσα k που δεν έχει συμμετάσχει στη διαδικασία συγκομιδής στο στάδιο $(u - 1)$, έχουμε επιλέξει τον τυχαίο αριθμό. Η k -th μέλισσα θα ενωθεί με τα άλλα μέλη της φωλιάς στο στάδιο συγκομιδής u .

Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της παραμέτρου w που δίνεται από τον αναλυτή, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα για οποιαδήποτε μέλισσα να αρχίσει τη συγκομιδή. Άρα, όλες οι μέλισσες της κυψέλης πρακτικά θα αρχίσουν τη διαδικασία της συγκομιδής πολύ γρήγορα. Μικρότερη τιμή στην παράμετρο w υποδηλώνει μία μικρότερη αύξηση στον αριθμό των συλλεκτριών μελισσών.

Η δυαδική μεταβλητή ισούται:

Ο συνολικός αριθμός των συλλεκτριών μελισσών κατά τη διάρκεια του σταδίου u - th στην επανάληψη z -th .

Κατά τη διάρκεια οποιοδήποτε σταδίου, οι μέλισσες επιλέγουν με τυχαίο τρόπο τους κόμβους που θα επισκεφθούν. Το μοντέλο Logit είναι ένα από τα πιο επιτυχημένα και ευρέως αποδεκτά μοντέλα διακριτής επιλογής. Εμπνευσμένοι από το μοντέλο Logit, θεωρήσαμε ότι η πιθανότητα η k -th μέλισσα να επιλέξει τον κόμβο j , που βρίσκεται στον κόμβο i (κατά τη διάρκεια του σταδίου $u+1$ και της επανάληψης z) ισούται:

Ας συζητήσουμε τη σχέση (3.12) με περισσότερες λεπτομέρειες. Όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση ανάμεσα στον κόμβο i και στον κόμβο j , τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα η k -th μέλισσα που βρίσκεται στον κόμβο i να επιλέξει τον κόμβο j κατά τη διάρκεια του σταδίου u και της επανάληψης z . Η απόσταση είναι προφανώς ένας πολύ σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει την επιλογή της μέλισσας για τον επόμενο κόμβο. Η επίδραση της απόστασης είναι μικρότερη στην αρχή της ερευνητικής διαδικασίας. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων z , τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της απόστασης. Αυτό εκφράζεται από τον όρο z στον παρανομαστή του κλάσματος (σχέση 3.12). Με άλλα λόγια, στην αρχή της ερευνητικής διαδικασίας, οι μέλισσες έχουν 'περισσότερη ελευθερία πτήσης'. Έχουν περισσότερη ελευθερία να ψάξουν το χώρο λύσης. Όσο πιο κοντά ερχόμαστε στο τέλος της ερευνητικής διαδικασίας, τόσο πιο προσηλωμένες είναι οι τεχνητές μέλισσες στα λουλούδια (κόμβους) της περιοχής. Όπως οι αληθινές μέλισσες, έτσι και οι τεχνητές έχουν μνήμη· μπορούν να λαμβάνουν και να θυμούνται πληροφορίες για το πόσες μέλισσες έχουν επισκεφτεί ένα συγκεκριμένο σύνδεσμο κατά τη διάρκεια των τελευταίων b επαναλήψεων. Όσο μεγαλύτερος είναι ο συνολικός αριθμός των μελισσών που επισκέφθηκαν ένα συγκεκριμένο σύνδεσμο στο παρελθόν, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να διαλέξουν αυτό το σύνδεσμο και στο μέλλον. Αυτό αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση ανάμεσα στα άτομα της αποικίας.

Για κάθε μέλισσα, τώρα πια γνωρίζουμε την ποσότητα του νέκταρος που συλλέχθηκε από αυτήν (το μήκος μέρους της διαδρομής του περιπλανώμενου πωλητή). Μετά την επιστροφή τους στην κυψέλη, οι μέλισσες παραδίδουν το νέκταρ σε μια μέλισσα επιβαρυνόμενη με το καθήκον αποθήκευσης τροφής. Μετά την παράδοση της τροφής, η μέλισσα αποφασίζει αν θα εγκαταλείψει την πηγή τροφής ή θα συνεχίσει τη συγκομιδή σε αυτήν. Η βασική υπόθεση είναι ότι κάθε μέλισσα μπορεί να αντλήσει τις πληροφορίες για την ποιότητα του νέκταρος που έχει μαζευτεί από κάθε άλλη μέλισσα. Η πιθανότητα ότι η μέλισσα k , στην αρχή του σταδίου $u+1$, θα χρησιμοποιήσει το ίδιο κομμάτι διαδρομής που ορίζεται στο στάδιο u στην επανάληψη z ισοδυναμεί με όπου είναι το μήκος της μερικής διαδρομής που ανακαλύπτεται από την μέλισσα k στο στάδιο u στην επανάληψη z .

Μπορούμε να δούμε από την σχέση (3.13) ότι η μέλισσα θα πετάξει κατά μήκος της ίδιας μερικής διαδρομής με πιθανότητα ίση με αυτήν κατά την οποία η μέλισσα έχει ανακαλύψει τη μικρότερη μερική διαδρομή του περιπλανώμενου πωλητή στο στάδιο u στην επανάληψη z . Όσο μεγαλύτερη είναι η διαδρομή που έχει ανακαλύψει

η μέλισσα, τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα να ξαναπετάξει κατά μήκος της ίδιας διαδρομής. Όταν η μέλισσα αποφασίσει να μην εγκαταλείψει την πηγή τροφής μπορεί:

- α) να συνεχίσει να συλλέγει στην ίδια πηγή τροφής χωρίς να στρατολογήσει άλλα μέλη της φωλιάς;
- β) να πετάξει προς το σημείο χορού και να αρχίσει να χορεύει, στρατολογώντας έτσι άλλα μέλη της φωλιάς πριν την επιστροφή στην πηγή.

Η μέλισσα επιλέγει κάθε μία από τις παραπάνω εναλλακτικές με βάση κάποια πιθανότητα. Μέσα στο σημείο του χορού οι χορεύτριες μέλισσες 'διαφημίζουν' διαφορετικές τοποθεσίες φαγητού. Αναφέρθηκε και νωρίτερα ότι οι μηχανισμοί με τους οποίους μια μέλισσα στη φύση αποφασίζει να ακολουθήσει μια χορεύτρια δεν είναι απόλυτα κατανοητοί. Παρόλα αυτά, όμως, πιστεύεται ότι η στρατολόγηση των μελισσών είναι συνάρτηση της ποιότητας της διαφημιζόμενης πηγής τροφής. Μιας που οι μέλισσες είναι, πριν από όλα τα άλλα, κοινωνικά έντομα (η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα άτομα της αποικίας είναι καλά τεκμηριωμένη), θεωρείται ότι σε αυτή την εργασία η πιθανότητα p^* μιας περίπτωσης κατά την οποία η μέλισσα θα συνεχίσει την συγκομιδή στην πηγή της τροφής χωρίς τη στρατολόγηση άλλων μελών της φωλιάς είναι πολύ χαμηλή: $p^* \ll 1$

Μετά την παράδοση της τροφής, και αφού αποφασίσει να συνεχίσει τη συγκομιδή στην πηγή της τροφής, η μέλισσα πετάει στο σημείο χορού και ξεκινάει να χορεύει με μία πιθανότητα ίση με $(1 - p^*)$. Ο χορός των μελισσών αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση ανάμεσα στα άτομα της αποικίας. Αυτού του είδους η επικοινωνία ανάμεσα στα άτομα συμβάλλει στην δημιουργία της 'συλλογικής νοημοσύνης' της αποικίας των μελισσών.

Στην αρχή του σταδίου $u+1$, αν μία μέλισσα δεν ακολουθήσει τη ίδια μερική διαδρομή του περιπλανώμενου πωλητή, τότε θα πάει στο σημείο του χορού και θα ακολουθήσει άλλη μέλισσα (μέλισσες). Κάθε μερική διαδρομή του περιπλανώμενου πωλητή ξ που διαφημίζεται στο σημείο του χορού έχει δύο κύρια χαρακτηριστικά:

- α) το συνολικό μήκος, και
- β) τον αριθμό των μελισσών που διαφημίζουν την μερική διαδρομή.

Εισάγουμε την ομαλοποιημένη τιμή του συνολικού μήκους της μερικής διαδρομής του περιπλανώμενου πωλητή και την ομαλοποιημένη τιμή του αριθμού των μελισσών που διαφημίζουν τη μερική διαδρομή. Και οι δύο ομαλοποιημένες τιμές ορίζονται με τον ακόλουθο τρόπο: α) Μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή ανάμεσα στο 0 και το 1· β) Όσο μικρότερη είναι η ομαλοποιημένη τιμή του συνολικού μήκους, τόσο καλύτερη είναι η μερική διαδρομή· γ) Όσο μεγαλύτερη είναι η ομαλοποιημένη τιμή του αριθμού των μελισσών, τόσο καλύτερη είναι η μερική διαδρομή.

Ας ορίσουμε ως $Y(u, z)$, το σύνολο των μερικών διαδρομών που έγιναν από τουλάχιστον μία μέλισσα και ως – τον αριθμό των μελισσών που ανακάλυψαν την μερική διαδρομή ξ . Η ομαλοποιημένη τιμή του μήκους της μερικής διαδρομής ισούται με:

Η ομαλοποιημένη τιμή του αριθμού των μελισσών που διαφημίζουν τη μερική διαδρομή ισούται με:

Εμπνευσμένοι από το μοντέλο Logit, υποθέσαμε ότι η πιθανότητα να επιλεγεί η μερική διαδρομή ξ από οποιαδήποτε μέλισσα αποφασισμένη να επιλέξει τη νέα διαδρομή ισούται με: όπου ρ και θ είναι οι παράμετροι που δίνονται από τον αναλυτή.

Πριν την μεταστέγαση της κυψέλης, προσπαθήσαμε να βελτιώσουμε τη λύση που δόθηκε από τις μέλισσες στο παρόν δρομολόγιο, εφαρμόζοντας τους πολύ γνωστούς 2-opt και 3-opt ευρετικούς αλγόριθμους. Η δημιουργία των επιμέρους διαδρομών του Περιπλανώμενου Πωλητή, όπου σε κάθε στάδιο κάθε μέλισσα θα επισκεφτεί μόνο ένα κόμβο ($s=1$) φαίνεται στο διάγραμμα 3.2. Είναι εμφανές ότι η μέλισσα (- -) έχει εγκαταλείψει την πηγή τροφής που ανακάλυψε στο στάδιο 1 και ακολουθεί τη μέλισσα () στο στάδιο 2.

Αλγόριθμοι βελτίωσης της διαδρομής

Οι πιο συνηθισμένοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για τη βελτίωση της διαδρομής αναπτύσσονται με βάση τη διαδικασία 3-opt. Η βασική ιδέα είναι να αντικαταστήσουμε το υποσύνολο των k τόξων στην προηγούμεως ορισμένη διαδρομή με το υποσύνολο των νέων τόξων με τον ίδιο αριθμό στοιχείων συνόλου και μικρότερο συνολικό μήκος ούτως ώστε να δημιουργηθεί μία νέα μικρότερη διαδρομή. Η πολυπλοκότητα του k -opt αλγόριθμου είναι, όπου n είναι ο αριθμός των κόμβων που χρησιμοποιούμε στην TSP περίπτωση. Στη βιβλιογραφία, οι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει 2-opt και 3-opt αλγορίθμους πολύ συχνά.

Για να εξηγήσουμε την διαδικασία 2-opt, ας θεωρήσουμε 2 τόξα που δεν είναι παρακείμενα (για παράδειγμα από το διάγραμμα 3.3). Αν τα απομακρύνουμε από τη διαδρομή, το υπόλοιπο της διαδρομής θα περιείχε 2 μονοπάτια με τελικούς κόμβους. Υπάρχουν δύο τρόποι για να επανασυνδέσουμε αυτά τα δύο μονοπάτια σε μία διαδρομή: να εισάγουμε τα δύο τόξα που έχουμε ήδη απομακρύνει, κάτι που θα μας έφερνε πάλι στην παλιά διαδρομή, ή να εισάγουμε τις άκρες. Η αρχική διαδρομή θα έχει αλλάξει στην περίπτωση που το συνολικό μήκος του νέου ζεύγους

τόξων είναι μικρότερο από το συνολικό μήκος του προηγούμενου ζεύγους τόξων που απομακρύνθηκε (είναι αρνητικό).

Ο ψευδοκώδικας για τον 2-opt αλγόριθμο θα μπορούσε να σχηματιστεί ως εξής:

Ο 3-opt αλγόριθμος χρησιμοποιεί την ίδια ιδέα με τον 2-opt. Η μόνη διαφορά είναι ότι το γεγονός ότι τώρα τρία τόξα απομακρύνονται αρχικά και μετά τρία νέα τόξα προστίθενται. Ο αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για την βελτίωση τη διαδρομής είναι ο αλγόριθμος Lin (Lin, 1965). Ο ψευδοκώδικας για τον 3-opt αλγόριθμο θα μπορούσε να σχηματιστεί ως εξής:

Η διαδικασία για τον 3-opt αλγόριθμο που περιγράφεται από το ψευδοκώδικα παίρνει πολύ χρόνο εξαιτίας του ότι ο αλγόριθμος θα επιχειρήσει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς αντικατάστασης των τριών τόξων. Υπάρχει η δυνατότητα να τρέξουμε τον αλγόριθμο πολύ πιο γρήγορα με μια μικρή πιθανότητα να χαθεί κάτι από την ποιότητα των λύσεων. Ένας απλός τρόπος για να το κάνουμε αυτό είναι το να μειώσουμε το μέγεθος του ερευνητικού χώρου. Οι κόμβοι θα πρέπει να είναι 'αρκετά κοντά' ο ένας στον άλλον ώστε να θεωρηθούν ως οι αρχικοί κόμβοι των τόξων που θα απομακρυνθούν. Θα ξεκινήσει αλγόριθμος με τον κόμβο στην αρχή κάθε βελτιούμενης δοκιμής. Ο αριθμός των πλησιέστερων κόμβων στον κόμβο που θα χρησιμοποιηθούν για πιθανή βελτίωση δίνεται εκ των προτέρων.

Πειραματική μελέτη του συστήματος των μελισσών

Το προτεινόμενο Σύστημα των Μελισσών δοκιμάστηκε σε ένα μεγάλο αριθμό αριθμητικών παραδειγμάτων. Σε όλες τις περιπτώσεις εφαρμόστηκε ένας από τους αλγόριθμους βελτίωσης της διαδρομής. Υπάρχουν τρία σύνολα αποτελεσμάτων που αντιστοιχούν στον 2-opt, 3-opt και στην 'μικρότερη εκδοχή' του 3-opt αλγορίθμων βελτίωσης της διαδρομής αντιστοίχως. Τα χαρακτηριστικά προβλήματα πάρθηκαν από την ακόλουθη ιστοσελίδα: <http://www.iwr.uni-heidelberg.de/iwr/comopt/software/TSPLIB95/tsp/>. Εξετάστηκαν οι παρακάτω 10 περιπτώσεις προβλημάτων:

Οι περιπτώσεις προβλημάτων .εξετάστηκαν μόνο με τη 'μικρότερη εκδοχή' του 3-opt αλγορίθμου βελτίωσης της διαδρομής. Όλα τα τεστ πραγματοποιήθηκαν σε IBM compatible PC με επεξεργαστή PIII (533MHz). Οι πίνακες 3.1, 3.2 και 3.3 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της χρήσης του Συστήματος των Μελισσών όταν η έρευνα περιορίστηκε σε 100 κύκλους.

Από τον πίνακα 3.1 είναι εμφανές ότι το Σύστημα των Μελισσών, ενισχυμένο με τον 2-opt ευρετικό αλγόριθμο βελτίωσης διαδρομής, θα προσφέρει θαυμάσια αποτελέσματα για ένα μικρό αριθμό TSP περιπτώσεων. Παρόλα αυτά, αν ο αριθμός των περιπτώσεων αυξηθεί, η ποιότητα των λύσεων θα μειωθεί (τελευταία στήλη πίνακας 3.1).

Μπορούμε να παρατηρήσουμε από τους πίνακες 3.1, 3.2 και 3.3 ότι το προτεινόμενο Σύστημα των Μελισσών παρουσίασε αποτελέσματα πολύ υψηλής ποιότητας. Το Σύστημα των Μελισσών κατάφερε να επιτύχει τις αντικειμενικές τιμές συνάρτησης που είναι πολύ κοντά στις βέλτιστες τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης. Σε όλες τις περιπτώσεις με λιγότερους από 100 κόμβους, το Σύστημα των Μελισσών έδωσε την βέλτιστη λύση (πίνακας 3.2 και 3.3). Οι φορές που απαιτούνται για την εύρεση των καλύτερων λύσεων από το Σύστημα των Μελισσών είναι λίγες. Με άλλα λόγια, το Σύστημα των Μελισσών μπόρεσε να παράγει 'πολύ καλές' λύσεις σε 'ένα σχετικό διάστημα' υπολογιστικού χρόνου.

Οι καλύτερες λύσεις που ανακαλύφθηκαν από το Σύστημα των Μελισσών παρουσιάζονται στα παρακάτω σχήματα.

Αλγόριθμος Αποικίας Τεχνητών Μελισσών και η εφαρμογή του σε Γενικευμένα Προβλήματα Ανάθεσης-Εισαγωγή

Υπάρχει μια τάση στην επιστημονική κοινότητα να διαμορφώνουμε και να επιλύουμε πολύπλοκα προβλήματα βελτιστοποίησης χρησιμοποιώντας αλληγορίες από τη φύση. Αυτό οφείλεται κυρίως στην αναποτελεσματικότητα των κλασικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης να επιλύσουν μεγαλύτερης κλίμακας συνδυαστικά και/ή σε μεγάλο βαθμό μη-γραμμικά προβλήματα. Η κατάσταση δεν είναι πολύ διαφορετική αν ο ακέραιος αριθμός και/ή οι διακριτές μεταβλητές αποφάσεων απαιτούνται και στις περισσότερες περιπτώσεις γραμμικών μοντέλων βελτιστοποίησης. Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά των κλασικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης είναι η μη ευελιξία τους να προσαρμόσουν τον αλγόριθμο λύση στο δεδομένο πρόβλημα. Γενικά, ένα δεδομένο πρόβλημα είναι διαμορφωμένο με τέτοιο τρόπο που ένας κλασικός αλγόριθμος όπως ο αλγόριθμος simplex μπορεί να το χειριστεί. Αυτό σε γενικές γραμμές απαιτεί να γίνουν αρκετές υποθέσεις που μπορεί να μην επαληθεύονται εύκολα σε πολλές περιπτώσεις. Για να ξεπεραστούν αυτοί οι περιορισμοί χρειάζονται περισσότερο ευέλικτοι και ευπροσάρμοστοι αλγόριθμοι γενικού ενδιαφέροντος. Θα έπρεπε να είναι εύκολο να προσαρμόσουμε αυτούς τους αλγόριθμους για να διαμορφώσουμε ένα δεδομένο πρόβλημα όσο πιο κοντά στην πραγματικότητα γίνεται.

Βασιζόμενοι σε αυτό το κίνητρο, δημιουργήθηκαν στη βιβλιογραφία πολλοί αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι, η προσομοιωμένη απόπτηση και η έρευνα ταμπού. Έχει επίσης αποδειχτεί ότι αυτοί οι αλγόριθμοι μπορούν να προσφέρουν πολύ καλύτερες λύσεις σε σχέση με τους κλασικούς αλγόριθμους. Ένας κλάδος των εμπνευσμένων από τη φύση αλγορίθμων που είναι γνωστοί ως η νοημοσύνη του σμήνους επικεντρώνονται στην συμπεριφορά των εντόμων ώστε να αναπτύξουν μετα-ευρετικές μεθόδους που μπορούν να μιμηθούν τις ικανότητες επίλυσης προβλημάτων των εντόμων. Η βελτιστοποίηση της αποικίας μυρμηγκιών, η βελτιστοποίηση με σμήνος σωματιδίων, τα δίκτυα των σφηκών κτλ. είναι κάποιοι από τους γνωστούς αλγόριθμους που μιμούνται την συμπεριφορά των εντόμων στη διαμόρφωση και λύση προβλημάτων. Η Αποικία Τεχνητών Μελισσών (ABC) είναι ένα σχετικά νέο μέλος της νοημοσύνης του σμήνους. Η ABC προσπαθεί να μοντελοποιήσει τη φυσική συμπεριφορά των αληθινών μελιτοφόρων μελισσών στη συγκομιδή τροφής. Οι μελιτοφόρες μέλισσες χρησιμοποιούν διάφορους μηχανισμούς όπως ο κουνιστός ή μικτός χορός για την βέλτιστη εξεύρεση και την αναζήτηση νέων πηγών τροφής. Αυτό τις κάνει έναν καλό υποψήφιο για την ανάπτυξη νέων αλγορίθμων νοήμουσας έρευνας. Σε αυτό το κεφάλαιο γίνεται μία εκτενής αναφορά σε εργασίες πάνω σε αλγόριθμους τεχνητών μελισσών. Στη συνέχεια, θα παρουσιαστεί λεπτομερώς μαζί με κάποιες συγκρίσεις η ανάπτυξη ενός αλγόριθμου ABC για την επίλυση γενικευμένων προβλημάτων ανάθεσης που είναι γνωστά ως προβλήματα NP-hard.

Είναι ευρέως γνωστό ότι οι κλασικές τεχνικές βελτιστοποίησης επιβάλλουν αρκετούς περιορισμούς στην επίλυση μαθηματικών μοντέλων προγραμματιστικής και λειτουργικής έρευνας. Αυτό οφείλεται κυρίως σε κάποιους έμφυτους μηχανισμούς επίλυσης τέτοιων τεχνικών. Οι στρατηγικές επίλυσης κλασικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης εξαρτώνται γενικά από τον τύπο των αντικειμενικών και περιοριστικών συναρτήσεων (γραμμική, μη-γραμμική κτλ.) και τον τύπο των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στη μοντελοποίηση του προβλήματος (ακέραιες, πραγματικές κτλ.) Η αποτελεσματικότητά τους εξαρτάται επίσης σε μεγάλο βαθμό από το μέγεθος του χώρου επίλυσης, του αριθμού των μεταβλητών και των περιορισμών που υπάρχουν στη μοντελοποίηση του προβλήματος, και στη δομή του χώρου επίλυσης (κυρτός, μη κυρτός κτλ.). Επίσης, δεν προσφέρουν γενικές στρατηγικές λύσεων που να μπορούν να εφαρμοστούν σε διαφορετικές περιπτώσεις προβλημάτων όπου χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τύποι μεταβλητών και αντικειμενικές και περιοριστικές συναρτήσεις. Για παράδειγμα, ο αλγόριθμος simplex μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λύσουμε μοντέλα με γραμμικές αντικειμενικές και περιοριστικές συναρτήσεις· ο γεωμετρικός προγραμματισμός μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να λύσει μη-γραμμικά μοντέλα με μια ποζώνυμη ή μονο-ώνυμη αντικειμενική συνάρτηση κτλ. (Bay... 2001). Παρόλα αυτά, τα περισσότερα προβλήματα βελτιστοποίησης απαιτούν στη διαμόρφωση τους διαφορετικούς τύπους μεταβλητών, αντικειμενικές και περιοριστικές συναρτήσεις την ίδια στιγμή. Κατά συνέπεια, οι κλασικές διαδικασίες βελτιστοποίησης δεν είναι γενικά επαρκείς ή εύκολες στη χρήση για τη λύση αυτών. Ερευνητές έχουν προσπαθήσει πολύ ώστε να προσαρμόσουν πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης στις κλασικές διαδικασίες βελτιστοποίησης. Δεν είναι γενικά εύκολο να διαμορφώσει κανείς ένα πραγματικό πρόβλημα που να ταιριάζει σε μία συγκεκριμένη διαδικασία επίλυσης. Για να το επιτευχθεί αυτό, είναι απαραίτητο να γίνουν κάποιες μετατροπές και/ή υποθέσεις στις αρχικές παραμέτρους του προβλήματος (στρογγυλοποιημένες μεταβλητές, αμβλυμμένοι περιορισμοί κτλ.) Αυτό σίγουρα επηρεάζει την ποιότητα της λύσης. Ένα νέο σύνολο ανεξάρτητων_εμπνευσμένων από τη φύση-ευρετικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης προβλημάτων και μοντέλων προτάθηκαν από τους ερευνητές ώστε να ξεπεραστούν τα εμπόδια των κλασικών διαδικασιών βελτιστοποίησης. Αυτές οι τεχνικές είναι αποτελεσματικές και ευέλικτες. Μπορούν να τροποποιηθούν και/ή να προσαρμοστούν για να ταιριάξουν με συγκεκριμένες απαιτήσεις προβλημάτων (βλ. Διάγραμμα 1). Η έρευνα πάνω σε αυτές τις τεχνικές συνεχίζεται σε ολόκληρο τον κόσμο.

Ένας κλάδος των εμπνευσμένων από τη φύση αλγορίθμων που είναι γνωστοί ως η νοημοσύνη του σμήνους, επικεντρώνονται στην συμπεριφορά των εντόμων ώστε να αναπτύξουν μετα-ευρετικές μεθόδους που να μπορούν να μιμηθούν τις ικανότητες επίλυσης προβλημάτων των εντόμων. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στα έντομα συμβάλλει στην συλλογική νοημοσύνη των αποικιών των κοινωνικών εντόμων. Αυτά τα συστήματα επικοινωνίας ανάμεσα στα έντομα έχουν προσαρμοστεί σε επιστημονικά προβλήματα προς βελτιστοποίηση. Ένα παράδειγμα τέτοιας αλληλεπίδρασης είναι ο κουνιστός χορός των μελισσών κατά τη διάρκεια της προμήθειας τροφής. Με την εκτέλεση αυτού του χορού, οι επιτυχημένες συλλέκτριες μοιράζονται τις πληροφορίες για την κατεύθυνση και την απόσταση των εκτάσεων των λουλουδιών και της ποσότητας του νέκταρος μέσα σε αυτό το λουλούδι, με τα μέλη της κυψέλης τους. Άρα αυτός είναι ένας επιτυχημένος μηχανισμός κατά τον οποίο οι συλλέκτριες μπορούν να στρατολογήσουν άλλες μέλισσες στην αποικία τους σε αποδοτικές τοποθεσίες για τη συλλογή διαφόρων πόρων. Η αποικία των μελισσών μπορεί γρήγορα και με ακρίβεια να προσαρμόσει το ερευνητικό της σχέδιο στο χρόνο και στο χώρο σύμφωνα με τις εναλλασσόμενες πηγές νέκταρος.

Η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στα διάφορα έντομα είναι το πλέον σημαντικό κομμάτι της συλλογικής γνώσης. Η επικοινωνία ανάμεσα στις μέλισσες για την ποιότητα των πηγών τροφής επιτυγχάνεται στο σημείο χορού με την εκτέλεση του κουνιστού ή μικτού χορού (Σχήμα 2).

Οι προηγούμενες μελέτες πάνω στην χορευτική συμπεριφορά των μελισσών δείχνει ότι κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του κουνιστού χορού, η κατεύθυνση των μελισσών υποδεικνύει την κατεύθυνση της πηγής τροφής σε σχέση με τον Ήλιο, η ένταση της ταλάντευσης των φτερών δείχνει πόσο μακριά είναι η πηγή και η διάρκεια του χορού την ποσότητα του νέκταρος στη σχετική πηγή τροφής. Οι μέλισσες-χορευτρίες του κουνιστού χορού που έχουν παραμείνει στην κυψέλη για μεγάλο χρονικό διάστημα προσαρμόζουν τις γωνίες του χορού τους για να ταιριάξουν με την αλλαγή της κατεύθυνσης του ήλιου. Κατά συνέπεια, οι μέλισσες που ακολουθούν την κίνηση του χορού συνεχίζουν να οδηγούνται σωστά στην πηγή της τροφής αν και η γωνία σε σχέση με τον ήλιο έχει αλλάξει. Άρα, η συλλογική νοημοσύνη των μελισσών βασίζεται στην συνεργική ανταλλαγή πληροφοριών κατά τη διάρκεια του κουνιστού χορού. Έρευνες και μελέτες πάνω στις συμπεριφορές των μελιτοφόρων μελισσών οδήγησαν σε μία νέα γενιά αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Σε αυτό το κεφάλαιο, θα γίνει μία λεπτομερής αναφορά των αλγορίθμων που βασίζονται σε αποικίες μελισσών. Στη συνέχεια, θα εξηγηθεί με λεπτομέρειες ο βασισμένος στις μέλισσες αλγόριθμος που ονομάζουμε 'αποικία τεχνητών μελισσών' μαζί με μια εφαρμογή σε 'γενικευμένα προβλήματα ανάθεσης' γνωστά και ως προβλήματα NP-hard.

Περιγραφή της συμπεριφοράς των Μελισσών στην Φύση

Οι κοινωνικές αποικίες εντόμων μπορούν να θεωρηθούν ως ένα δυναμικό σύστημα συλλογής πληροφοριών από το περιβάλλον και προσαρμογής της συμπεριφοράς τους σε σχέση με αυτό. Κατά τη διάρκεια των διαδικασιών συλλογής πληροφοριών και προσαρμογής, κάθε έντομο δεν εκτελεί όλα τα καθήκοντα λόγω της εξειδίκευσης του. Σε γενικές γραμμές, όλες οι αποικίες κοινωνικών εντόμων συμπεριφέρονται ανάλογα με το δικό τους διαχωρισμό καθηκόντων που σχετίζεται με τη μορφολογία τους. Το σύστημα των μελισσών αποτελείται από δύο βασικά συστατικά:

- Τις πηγές τροφής
Η αξία μιας πηγής τροφής εξαρτάται από διαφορετικές παραμέτρους όπως το πόσο κοντά είναι στη φωλιά, το πόσο πλούσια είναι σε ενέργεια και το πόσο εύκολο είναι να βγάλεις αυτήν την ενέργεια.
- Τις συλλέκτριες
 - Μη απασχολούμενες συλλέκτριες: Υποθέτουμε ότι μια μέλισσα δεν έχει καμία γνώση των πηγών τροφής που υπάρχουν στο ερευνητικό της πεδίο. Η μέλισσα ξεκινάει την έρευνα της ως μη απασχολούμενη συλλέκτρια. Υπάρχουν δύο επιλογές για μια μη απασχολούμενη συλλέκτρια:
 - Ανιχνεύτρια μέλισσα (S στο διάγραμμα 3): Αν η μέλισσα ξεκινήσει την έρευνα αυθόρμητα, χωρίς καμία γνώση, θα γίνει μία ανιχνεύτρια μέλισσα. Το ποσοστό των ανιχνευτριών μελισσών ποικίλλει από 5% έως 30% σύμφωνα με τις πληροφορίες μέσα στην φωλιά. Ο καθαρός μέσος όρος των ανιχνευτριών σε σχέση με τις συνθήκες είναι περίπου 10%. (Seeley, 1995).
 - Νεοσύλλεκτη μέλισσα (R στο διάγραμμα 3): Αν η μη απασχολούμενη συλλέκτρια παρακολουθήσει ένα κουνιστό χορό από κάποια άλλη μέλισσα, αυτή θα αρχίσει την έρευνα χρησιμοποιώντας τη γνώση από αυτόν το χορό.
 - Απασχολούμενες συλλέκτριες (EF στο διάγραμμα 3): Όταν η νεοσύλλεκτη μέλισσα βρει και αξιοποιήσει μια πηγή τροφής, θα μεγαλώσει έχοντας απομνημονεύσει την τοποθεσία της πηγής τροφής. Αφού η απασχολούμενη συλλέκτρια φορτώσει ένα φορτίο νέκταρος από την πηγή, επιστρέφει στην κυψέλη και ξεφορτώνει το νέκταρ στο κελί αποθήκευσης τροφής. Υπάρχουν τρεις πιθανές επιλογές σε σχέση με το απόθεμα του νέκταρος για τη συλλέκτρια.
 - Αν η ποσότητα του νέκταρος μειωθεί σε πολύ μεγάλο βαθμό ή εξαντληθεί, η συλλέκτρια εγκαταλείπει την πηγή τροφής και μετατρέπεται σε μη απασχολούμενη μέλισσα.
 - Αν υπάρχουν ακόμα αρκετά αποθέματα νέκταρος στην πηγή τροφής, μπορεί να συνεχίσει τη συγκομιδή χωρίς να μοιραστεί πληροφορίες για την πηγή με τα άλλα μέλη της φωλιάς.
 - Η μπορεί να επιστρέψει στο σημείο του χορού για να εκτελέσει ένα κουνιστό χορό και να ενημερώσει τα μέλη της φωλιάς για την ίδια πηγή τροφής. Οι τιμές πιθανότητας για αυτές τις περιπτώσεις σχετίζονται σε μεγάλο βαθμό με την ποιότητα της πηγής της τροφής.
 - Έμπειρες συλλέκτριες: Αυτός ο τύπος συλλέκτριας χρησιμοποιεί την ιστορική του μνήμη για την τοποθεσία και την ποιότητα των πηγών τροφής.
 - Μπορεί να είναι επόπτης που ελέγχει την πρόσφατη κατάσταση της πηγής τροφής που έχει ήδη ανακαλυφθεί.

- Μπορεί να είναι μία επαναδραστηριοποιημένη συλλέκτρια που χρησιμοποιεί την πληροφόρηση από τον κουνιστό χορό. Προσπαθεί να εξερευνήσει την ίδια πηγή τροφής που ανακαλύφθηκε από αυτήν εφόσον υπάρχουν άλλες μέλισσες που επιβεβαιώνουν την ποιότητα της ίδιας πηγής τροφής (RF στο διάγραμμα S).
- Μπορεί να είναι μια ανιχνεύτρια μέλισσα που ψάχνει καινούριες εκτάσεις αν ολόκληρη η πηγή τροφής έχει εξαντληθεί. (ES στο διάγραμμα 3).
- Μπορεί να είναι μια νεοσύλλεκτη μέλισσα που ψάχνει για την νέα πηγή τροφής που δηλώθηκε στο σημείο του χορού μέσω μιας άλλης απασχολούμενης μέλισσας (ER στο διάγραμμα 3).

Αναφορά και Κατηγοριοποίηση των Μελετών των Συστημάτων Τεχνητών Μελισσών

Η συμπεριφορά της συγκομιδής και τα χαρακτηριστικά εκμάθησης, απομνημόνευσης και ανταλλαγής πληροφοριών των μελισσών έχουν βρεθεί πρόσφατα στο επίκεντρο ενδιαφερόντων μελετών γύρω από τη νοημοσύνη του σμήνους. Οι μελέτες πάνω στις μελιτοφόρες μέλισσες βρίσκονται σε ανοδική πορεία στη βιβλιογραφία των τελευταίων χρόνων. Μετά από μία λεπτομερειακή βιβλιογραφική έρευνα, οι προηγούμενοι αλγόριθμοι κατηγοριοποιούνται εδώ σε σχέση με τα συμπεριφορικά χαρακτηριστικά των μελιτοφόρων μελισσών.

- Συμπεριφορές συλλεκτριών
- Γαμήλιες συμπεριφορές
- Η έννοια της βασιλίσσας

Οι μελέτες, οι κύριες συνεισφορές τους και οι εφαρμογές τους συνοψίζονται στον Πίνακα 1.

Σε αυτό το κομμάτι, αναφέρονται με λεπτομέρειες οι συνεισφορές αυτών των μελετών ώστε να αποσαφηνιστεί το υπόβαθρο των αλγορίθμων βελτιστοποίησης που βασίζονται στις μελιτοφόρες μέλισσες.

Οι Yonezawa και Kikuchi (1996) εξετάζουν την συμπεριφορά των μελιτοφόρων μελισσών σε σχέση με την συγκομιδή τροφής και κατασκευάζουν έναν αλγόριθμο για να δείξουν την σημασία των αρχών συλλογικής συμπεριφοράς. Ο αλγόριθμος προσομοιώνεται με μία και με τρεις συλλέκτριες μέλισσες και τα αποτελέσματα της υπολογιστικής προσομοίωσης έδειξαν ότι οι τρεις συλλέκτριες είναι πολύ πιο γρήγορες από το σύστημα με τη μία συλλέκτρια όσον αφορά τη διαδικασία λήψης αποφάσεων. Υποδεικνύουν, επίσης, ότι οι μελιτοφόρες μέλισσες έχουν μια συμπεριφορά συγκομιδής τροφής που προσαρμόζεται σε πολύπλοκο περιβάλλον.

Οι Seeley και Buhrtman (1996) ερευνήσαν την συμπεριφορά των αποικιών των μελιτοφόρων μελισσών σε σχέση με την επιλογή της θέσης της φωλιάς. Η διαδικασία επιλογής θέσης για τη φωλιά ξεκινάει με αρκετές χιλιάδες ανιχνεύτριες που ψάχνουν για πιθανές θέσεις για φωλιά. Οι ανιχνεύτριες στη συνέχεια επιστρέφουν στο κατάλυμα, αναφέρουν τα ευρήματά τους μέσα από κουνιστούς χορούς και αποφασίζουν για τη νέα θέση της φωλιάς. Ο τύπος του κουνιστού χορού εξαρτάται από την ποιότητα της θέσης που διαφημίζεται. Οι συγγραφείς επανέλαβαν τις παρατηρήσεις του Lindauer το 1955 εκμεταλλευόμενοι την μοντέρνα καταγραφή μέσω βίντεο και τις τεχνικές επικόλλησης ετικετών σε τρεις αποικίες μελιτοφόρων μελισσών. Πολλά από τα αποτελέσματα επιβεβαίωσαν την προηγούμενη μελέτη και κάποια από αυτά έριξαν νέο φως στο θέμα. Υπέδειξαν ότι η στρατηγική λήψης αποφάσεων μιας αποικίας είναι μία ζυγισμένη επιπλέον στρατηγική που είναι η πιο ακριβής αλλά συγχρόνως και η πιο απαιτητική από άποψη πληροφοριών. Αυτή η στρατηγική αξιολογεί κάθε εναλλακτική σύμφωνα με τα σχετικά γνωρίσματα, δίνει βαρύτητα σε κάθε γνώρισμα σύμφωνα με την σημασία του, συνοψίζει τα πιο σημαντικά γνωρίσματα για κάθε εναλλακτική και τέλος επιλέγει την εναλλακτική αυτή της οποίας η συνολική αποτίμηση είναι η υψηλότερη. Κατά τον ίδιο τρόπο, η αποικία των μελισσών εξετάζει δώδεκα ή περισσότερες εναλλακτικές για τη θέση της φωλιάς, αξιολογεί κάθε εναλλακτική θέση σε σχέση με τουλάχιστον έξι διαφορετικά γνωρίσματα με ξεχωριστό βάρος το καθένα για παράδειγμα τον όγκο της κοιλότητας, το ύψος της εισόδου, την κατεύθυνση της εισόδου κτλ. Κατά συνέπεια, η αποικία των μελισσών χρησιμοποιεί αυτή τη στρατηγική με το να διανέμει ανάμεσα σε πολλές μέλισσες τόσο το καθήκον του να εξετάσουν τις εναλλακτικές θέσεις όσο και το καθήκον του να αναγνωρίσουν τις καλύτερες θέσεις.

Ο Schmickl και άλλοι (2005) εξετάζουν την ευρωστία της συμπεριφοράς συγκομιδής των μελισσών με το να χρησιμοποιούν μία πλατφόρμα προσομοίωσης πολλαπλών πρακτόρων. Εξερευνούν το πως το χρονικό πλαίσιο των περιβαλλοντολογικών διακυμάνσεων επηρεάζει τη στρατηγική συγκομιδής και την αποτελεσματικότητα αυτής. Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η συλλογική στρατηγική συγκομιδής μίας αποικίας μελιτοφόρων μελισσών είναι εύρωστη και ευπροσάρμοστη, και ότι τα προβαλλόμενα χαρακτηριστικά της επιτρέπουν στην αποικία να βρει βέλτιστες λύσεις.

Ο Lemmens (2006) ερευνήσε κατά πόσο αλγόριθμοι πλοήγησης βασισμένοι σε φερομόνες (εμπνευσμένοι από την βιολογική συμπεριφορά αποικίας μυρμηγκιών) ξεπερνιούνται στην απόδοση από αλγόριθμους πλοήγησης που δεν βασίζονται σε φερομόνες (εμπνευσμένοι από τη βιολογική συμπεριφορά αποικίας μελισσών) όσον αφορά την

εργασία της συγκομιδής τροφής. Τα αποτελέσματα των πειραμάτων έδειξαν ότι (i) οι αλγόριθμοι πλοήγησης βασισμένοι σε φερομόνες χρησιμοποιούν λιγότερο χρόνο ανά βήμα επανάληψης σε κόσμους σε ένα μικρόκοσμο, (ii) οι αλγόριθμοι πλοήγησης που δεν βασίζονται σε φερομόνες είναι σημαντικά γρηγορότεροι στην ανακάλυψη και τη συγκομιδή τροφής και χρησιμοποιούν λιγότερα χρονικά βήματα για να ολοκληρώσουν την εργασία, και (iii) με κόσμους μεγαλύτερου μεγέθους, ο αλγόριθμος που δεν βασίζεται σε φερομόνες τελικά ξεπερνά σε απόδοση τους αλγόριθμους βασισμένους σε φερομόνες έχοντας ένα χρόνο με το χρόνο μέτρο. Παρά όλα αυτά τα οφέλη, αναφέρεται ότι οι αλγόριθμοι που δεν βασίζονται σε φερομόνες είναι λιγότερο ευπροσάρμοστοι από αυτούς που βασίζονται σε αυτές.

Οι Sato και Hagiwara (1997) πρότειναν έναν βελτιωμένο γενετικό αλγόριθμο που να βασίζεται στην συμπεριφορά συγκομιδής των μελιτοφόρων μελισσών. Σε μία τέτοια αποικία, κάθε μέλισσα ψάχνει για την τροφή ανεξάρτητα. Όταν μία μέλισσα βρει τροφή, τότε ενημερώνει τις υπόλοιπες μέλισσες μέσω του χορού και αυτές ασχολούνται με την εργασία της μεταφοράς της τροφής. Όταν ολοκληρώσουν την εργασία, κάθε μέλισσα προσπαθεί να βρει μια καινούρια πηγή ανεξάρτητα και πάλι. Με τον ίδιο τρόπο, στον προτεινόμενο αλγόριθμο που ονομάζεται Σύστημα Μελισσών, γίνεται πρώτα μία ολική έρευνα, και κάποια χρωμοσώματα με πολύ καλή φυσική κατάσταση (τα λεγόμενα ανώτερα χρωμοσώματα) αντλούνται χρησιμοποιώντας τον απλό γενετικό αλγόριθμο. Επίσης, πολλά χρωμοσώματα αντλούν τις πληροφορίες των ανώτερων χρωμοσωμάτων μέσα από τη συμπυκνωμένη διασταύρωση και ψάχνουν εντατικά τριγύρω χρησιμοποιώντας πολλαπλούς πληθυσμούς. Στην παραδοσιακή διασταύρωση κάθε ζευγάρι δημιουργείται τυχαία, ενώ στη συμπυκνωμένη διασταύρωση όλα τα χρωμοσώματα ζευγαρώνουν με ανώτερα χρωμοσώματα. Τέλος, η μέθοδος ψευδο-simplex συνεισφέρει στην ενίσχυση της τοπικής ικανότητας έρευνας του Συστήματος Μελισσών. Αν η λύση που θα δοθεί από τον ένα κύκλο δεν είναι ικανοποιητική, η ολική έρευνα επαναλαμβάνεται. Όπως είναι γνωστό, οι γενετικοί αλγόριθμοι έχουν καλή ικανότητα ολικής έρευνας. Παρόλα αυτά, δεν έχουν την ικανότητα τοπικής έρευνας. Από την άλλη, με το Σύστημα Μελισσών, η πιθανότητα του να πέσεις μέσα σε ένα τοπικό βέλτιστο είναι μικρή εξαιτίας του συνδυασμού τοπικής και ολικής έρευνας μιας που ο σκοπός του αλγόριθμου είναι να βελτιώσει την ικανότητα της τοπικής έρευνας του γενετικού αλγορίθμου χωρίς να υποβαθμίσει την ικανότητα ολικής έρευνας. Στις πειραματικές μελέτες το Σύστημα Μελισσών συγκρίνεται με τον παραδοσιακό γενετικό αλγόριθμο και αποδεικνύεται ότι το Σύστημα Μελισσών έχει καλύτερη απόδοση από τον παραδοσιακό γενετικό αλγόριθμο κυρίως για ιδιαίτερα πολύπλοκες συναρτήσεις με πολλές μεταβλητές.

Ο Karaboga (2005) αναλύει την συμπεριφορά συγκομιδής του σμήνους μελιτοφόρων μελισσών και προτείνει ένα νέο αλγόριθμο που να προσομοιώνει αυτή τη συμπεριφορά για την επίλυση πολυδιάστατων και πολυκόρυφων προβλημάτων βελτιστοποίησης, που ονομάζεται Αποικία Τεχνητών Μελισσών (Artificial Bee Colony: ABC). Τα κύρια βήματα του αλγορίθμου είναι τα εξής:

- 1) Στείλτε τις απασχολούμενες μέλισσες στις πηγές τροφής και διευκρινίστε την ποσότητα του νέκταρος·
- 2) Υπολογίστε την τιμή της πιθανότητας των πηγών με την οποία θα επιλεγούν από τις ανιχνεύτριες μέλισσες·
- 3) Σταματήστε την διαδικασία αξιοποίησης των πηγών που εγκαταλείπονται από τις μέλισσες·
- 4) Στείλτε τις ανιχνεύτριες στο χώρο έρευνας για την ανακάλυψη νέων πηγών τροφής, τυχαία·
- 5) Αποστηθίστε την καλύτερη πηγή τροφής που έχει βρεθεί μέχρι τώρα.

Στον αλγόριθμο, μια αποικία τεχνητών μελισσών αποτελείται από τρεις ομάδες μελισσών: τις απασχολούμενες μέλισσες, τις μέλισσες παρατηρητές και τις ανιχνεύτριες. Οι απασχολούμενες μέλισσες συνδέονται με μία συγκεκριμένη πηγή την οποία αξιοποιούν. Μεταφέρουν την πληροφορία της συγκεκριμένης πηγής και την μοιράζονται με μια συγκεκριμένη πιθανότητα μέσω του κουνιστού χορού. Οι μη απασχολούμενες μέλισσες αναζητούν μια πηγή τροφής προς αξιοποίηση. Υπάρχουν δύο είδη μη απασχολούμενων μελισσών: οι παρατηρητές και οι ανιχνεύτριες. Οι ανιχνεύτριες ψάχνουν το περιβάλλον για νέες πηγές τροφής χωρίς καμία καθοδήγηση. Μερικές φορές, οι ανιχνεύτριες μπορεί να ανακαλύψουν τυχαία πλούσιες και εντελώς άγνωστες πηγές τροφής. Από την άλλη πλευρά, οι παρατηρητές παρακολουθούν τον κουνιστό χορό και τοποθετούνται έτσι στις πηγές της τροφής ακολουθώντας μια διαδικασία επιλογής βασισμένη σε μία πιθανότητα. Καθώς αυξάνεται η ποσότητα του νέκταρος σε μία πηγή τροφής, αυξάνεται και η τιμή της πιθανότητας με την οποία αυτή η πηγή επιλέγεται από τους παρατηρητές. Στον αλγόριθμο ABC το πρώτο μισό της αποικίας αποτελείται από τις απασχολούμενες μέλισσες και το υπόλοιπο μισό περιλαμβάνει τους παρατηρητές. Για κάθε πηγή τροφής, υπάρχει μόνο μία απασχολούμενη μέλισσα. Άλλο ένα ζήτημα που εξετάζεται στον αλγόριθμο είναι ότι η απασχολούμενη μέλισσα της οποίας η πηγή τροφής έχει εξαντληθεί από τις υπόλοιπες μέλισσες, μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια. Με άλλα λόγια, αν μία λύση που αντιπροσωπεύει μία πηγή τροφής, δεν βελτιωθεί μέσα σε ένα προκαθορισμένο αριθμό δοκιμών, τότε η πηγή τροφής εγκαταλείπεται από την απασχολούμενη μέλισσα και αυτή μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια. Ο αλγόριθμος ελέγχεται με

βάση τρεις πολύ γνωστές πειραματικές συναρτήσεις. Από τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, συμπεραίνεται ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επίλυση μονοκόρυφων και πολυκόρυφων προβλημάτων αριθμητικής βελτιστοποίησης.

Ο Yang (2005) παρουσιάζει έναν εικονικό αλγόριθμο μελισσών (Virtual Bee Algorithm: VBA) που είναι αποτελεσματικός σε προβλήματα βελτιστοποίησης συναρτήσεων. Τα βασικά βήματα του αλγόριθμου είναι: 1) η δημιουργία ενός αρχικού πληθυσμού εικονικών μελισσών όπου κάθε μέλισσα συνδέεται με μία μνήμη· 2) η κωδικοποίηση της συνάρτησης βελτιστοποίησης μέσα στην εικονική τροφή· 3) ο ορισμός του κριτηρίου με το οποίο θα μεταφέρεται η πληροφορία της τοποθεσίας της τροφής στις άλλες μέλισσες· 4) η κατεύθυνση όλων των εικονικών μελισσών σε νέες τυχαίες θέσεις για εικονική αναζήτηση τροφής, ανακάλυψη τροφής και επικοινωνίας με γειτονικές μέλισσες μέσω ενός εικονικού κουνιστού χορού· 5) η αξιολόγηση της κωδικοποιημένης έντασης/τοποθεσίας των μελισσών· 6) η αποκωδικοποίηση των αποτελεσμάτων για να επιτευχθεί η επίλυση του προβλήματος. Παρόλο που ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι παρόμοιος με τον γενετικό αλγόριθμο, είναι πολύ πιο αποτελεσματικός χάρη στον παραλληλισμό των πολλαπλών ανεξάρτητων μελισσών. Για να καταλάβουμε καλύτερα αυτή την πρόταση, ο VBA αλγόριθμος εξετάζεται πάνω σε δύο συναρτήσεις με δύο παραμέτρους, η μία είναι μονοκόρυφη και η άλλη είναι πολυκόρυφη. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο νέος αλγόριθμος είναι πολύ πιο αποτελεσματικός από τον γενετικό αλγόριθμο.

Οι Basturk και Karaboga (2006) παρουσίασαν άλλον ένα ABC αλγόριθμο και διεύρυναν τα πειραματικά αποτελέσματα του Karaboga (2005). Η απόδοση του αλγορίθμου εξετάζεται πάνω σε πέντε χαρακτηριστικές πολυδιάστατες συναρτήσεις και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τους γενετικούς αλγόριθμους. Επισημαίνεται ότι ο ABC αλγόριθμος ξεπερνά σε απόδοση τον γενετικό αλγόριθμο για συναρτήσεις που έχουν πολλές και μία κορυφές.

Ο Pham και άλλοι (2006a) πρότειναν έναν αλγόριθμο βελτιστοποίησης εμπνευσμένο από τη φυσική συμπεριφορά συγκομιδής των μελιτοφόρων μελισσών, που ονομάζεται Αλγόριθμος Μελισσών. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μπορεί επίσης να εφαρμοστεί τόσο σε συνδυαστικά όσο και συναρτησιακά προβλήματα βελτιστοποίησης. Στην πραγματική ζωή, η διαδικασία συγκομιδής τροφής ξεκινάει από τις ανιχνεύτριες μέλισσες που στέλνονται για να ψάξουν για πολλά υποσχόμενα παρτέρια λουλουδιών. Όταν επιστρέφουν στην κυψέλη, ξεφορτώνουν το νέκταρ τους και πηγαίνουν στο σημείο χορού για την εκτέλεση ενός χορού γνωστού ως κουνιστού ή μικτού χορού που είναι απαραίτητος για την επικοινωνία της αποικίας. Μετά τον κουνιστό χορό, η χορεύτρια πηγαίνει πίσω στο παρτέρι των λουλουδιών με άλλες μέλισσες να ακολουθούν, μέλισσες που περίμεναν μέσα στην κυψέλη. Περισσότερες μέλισσες ακολουθούν κατευθυνόμενες στα πιο υποσχόμενα παρτέρια. Αυτό επιτρέπει στην αποικία να μαζεύει τροφή γρήγορα και αποτελεσματικά. Κατά παρόμοιο τρόπο, ο Αλγόριθμος των Μελισσών ξεκινάει με τις ανιχνεύτριες μέλισσες να τοποθετούνται τυχαία στο χώρο έρευνας. Τα βασικά βήματα του αλγορίθμου είναι: 1) ξεκίνημα του πληθυσμού με τυχαίες λύσεις· 2) εξέταση της καλής κατάστασης του πληθυσμού· 3) προσδιορισμός ενός συγκεκριμένου αριθμού των πιο κατάλληλων μελισσών και επιλογή των θέσεων τους για γειτονική έρευνα· 4) στρατολόγηση ενός ορισμένου αριθμού μελισσών για συγκεκριμένες θέσεις, εξέταση της φυσικής τους κατάστασης· 5) επιλογή της πιο κατάλληλης μέλισσας από κάθε σημείο για τη δημιουργία νέου πληθυσμού· 6) τοποθέτηση των μελισσών που έχουν απομείνει για τυχαία έρευνα και εξέταση της φυσικής τους κατάστασης. Ο Αλγόριθμος Μελισσών εφαρμόζεται σε δύο συνηθισμένα προβλήματα συναρτησιακής βελτιστοποίησης με δύο και έξι διαστάσεις, αντίστοιχα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι ο Αλγόριθμος Μελισσών έχει την ικανότητα να βρει λύσεις πολύ κοντά στο βέλτιστο. Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται επίσης σε οκτώ συναρτήσεις χαρακτηριστικών προβλημάτων και τα αποτελέσματα συγκρίνονται με τη ντετερμινιστική μέθοδο simplex, την στοχαστική διαδικασία βελτιστοποίησης με προσομοιωμένη απόκτηση, το γενετικό αλγόριθμο και το σύστημα αποικίας μυρμηγκιών. Ο Αλγόριθμος Μελισσών ξεπέρασε γενικά σε απόδοση άλλες τεχνικές σε σχέση με την ταχύτητα της βελτιστοποίησης και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων. Από την άλλη πλευρά, ο Αλγόριθμος Μελισσών έχει πάρα πολλές παραμέτρους που μπορούν να συντονιστούν.

Οι Luck και Teodorovic (2001) δημοσίευσαν την πρώτη μελέτη πάνω στο Σύστημα των Μελισσών βασιζόμενοι στην διδακτορική διατριβή του Luck για 6 πειραματικά προβλήματα του Προβλήματος του Περιπλανώμενου Πωλητή (TSP). Ο Luck (2002) είχε ως στόχο την εξερεύνηση των πιθανών εφαρμογών της συλλογικής νοημοσύνης των μελισσών στην επίλυση πολύπλοκων μηχανικών προβλημάτων κίνησης και μεταφοράς. Σε αυτό το πλαίσιο, μελετήθηκαν το (TSP) και το στοχαστικό πρόβλημα καθοδήγησης οχημάτων (SVRP). Το (TSP) είναι ένα NP-hard πρόβλημα που στοχεύει στη εύρεση της διαδρομής ελάχιστης απόστασης που να περνάει μέσα από κάθε κόμβο μόνο μία φορά. Ο αλγόριθμος ξεκινάει με τον εντοπισμό της κυψέλης σε έναν από τους κόμβους του γράφου όπου οι μέλισσες συλλέγουν νέκταρ, δηλαδή το γράφο στον οποίο το δρομολόγιο του περιπλανώμενου πωλητή θα πρέπει να ανακαλυφθεί. Οι τεχνητές μέλισσες συλλέγουν το νέκταρ κατά τη διάρκεια ενός συγκεκριμένου χρονικού ορίου και η τοποθεσία της κυψέλης αλλάζει τυχαία. Οι μέλισσες αρχίζουν να συλλέγουν το νέκταρ από τη νέα τοποθεσία

και ξανά η τοποθεσία της κυψέλης αλλάζει τυχαία. Η επανάληψη στην ερευνητική διαδικασία αντιπροσωπεύει μία αλλαγή στην θέση της κυψέλης και η επανάληψη λήγει όταν δημιουργείται μία εφικτή λύση. Οι τεχνητές μέλισσες ζουν σε ένα περιβάλλον που χαρακτηρίζεται από διακριτό χρόνο και κατά συνέπεια κάθε επανάληψη αποτελείται από ένα συγκεκριμένο αριθμό σταδίων. Κατά τη διάρκεια κάθε σταδίου, οι μέλισσες επιλέγουν κόμβους προς επίσκεψη με τυχαίο τρόπο. Από αυτή την συνάρτηση πιθανότητας προβλέπεται ότι όσο μεγαλύτερη είναι η απόσταση ανάμεσα στους δύο κόμβους, τόσο μικρότερη η πιθανότητα η μέλισσα να επιλέξει αυτόν τον σύνδεσμο. Η επίδραση της απόστασης είναι μικρότερη στην αρχή της ερευνητικής διαδικασίας. Όσο μεγαλύτερος είναι ο αριθμός των επαναλήψεων, τόσο μεγαλύτερη είναι η επίδραση της απόστασης. Από την άλλη πλευρά, όσο μεγαλύτερος είναι ο συνολικός αριθμός των μελισσών που επισκέφτηκαν ένα συγκεκριμένο σύνδεσμο στο παρελθόν, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα επιλογής αυτού του συνδέσμου και στο μέλλον. Αυτό αντιπροσωπεύει την αλληλεπίδραση ανάμεσα σε ανεξάρτητες μέλισσες μέσα στην αποικία. Κατά τη διάρκεια ενός σταδίου, η μέλισσα επισκέπτεται ένα συγκεκριμένο αριθμό κόμβων, δημιουργεί μία επιμέρους διαδρομή περιπλανώμενου πωλητή, και επιστρέφει στην κυψέλη. Εκεί, η μέλισσα συμμετέχει στην διαδικασία λήψης αποφάσεων. Η μέλισσα αποφασίζει αν θα στρατολογήσει τα μέλη της φωλιάς μέσω του χορού πριν να επιστρέψει στην πηγή της τροφής, αν θα συνεχίσει τη συγκομιδή στην πηγή χωρίς να στρατολογήσει τα υπόλοιπα μέλη της φωλιάς, ή θα εγκαταλείψει την πηγή της τροφής. Η δεύτερη εναλλακτική έχει πολλή μικρή πιθανότητα μιας που οι μέλισσες είναι κοινωνικά έντομα και επικοινωνούν μεταξύ τους. Η πιθανότητα μία μέλισσα να χρησιμοποιήσει την ίδια επιμέρους διαδρομή (ή να την εγκαταλείψει) εξαρτάται από το μήκος της επιμέρους διαδρομής. Όσο μεγαλύτερη είναι η διαδρομή που η μέλισσα έχει ανακαλύψει, τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα η μέλισσα να πετάξει ξανά κατά μήκος της ίδιας διαδρομής. Επισημαίνεται ότι η ποσότητα του νέκταρος κατά μήκος ενός συγκεκριμένου συνδέσμου είναι αντιστρόφως ανάλογη με το μήκος του συνδέσμου. Στην αρχή κάθε σταδίου αν μία μέλισσα δεν χρησιμοποιήσει την ίδια επιμέρους διαδρομή του περιπλανώμενου πωλητή, πηγαίνει στο σημείο χορού και ακολουθεί μια άλλη μέλισσα σύμφωνα με μια συνάρτηση πιθανοτήτων. Αυτή η συνάρτηση εξαρτάται από το συνολικό μήκος της επιμέρους διαδρομής και τον αριθμό των μελισσών που διαφημίζουν αυτή την διαδρομή.

Επιπλέον, πριν την επανατοποθέτηση της κυψέλης, οι ευρετικοί αλγόριθμοι 2-opt και 3-opt εφαρμόζονται για την βελτίωση της λύσης που έχει βρεθεί από τις μέλισσες στην παρούσα διαδρομή. Από την άλλη πλευρά, στη φύση, δεν ξεκινούν την συγκομιδή όλες οι μέλισσες ταυτόχρονα και στον αλγόριθμο θεωρείται ότι στην αρχή κάθε διαδρομής όλες οι μέλισσες είναι στην κυψέλη και ο αριθμός των συλλεκτριών σε κάθε επόμενο στάδιο αυξάνεται. Η απόδοση του αλγορίθμου ελέγχθηκε σε 10 χαρακτηριστικά προβλήματα. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι σε όλες τις περιπτώσεις με λιγότερους από 100 κόμβους, το Σύστημα Μελισσών παρήγαγε την βέλτιστη λύση και οι φορές που απαιτήθηκαν για να βρεθεί η καλύτερη λύση από το Σύστημα Μελισσών ήταν λίγες. Στο δεύτερο μέρος αυτής της μελέτης το Σύστημα Μελισσών ενσωματώθηκε με ασαφή λογική και η εφαρμογή αυτή εφαρμόστηκε σε Προβλήματα Κυκλοφορίας Οχημάτων (VRP). Η διαδικασία και τα αποτελέσματα παρουσιάστηκαν στους Luck και Teodorovic (2003b). Οι Luck και Teodorovic (2002, 2003a) δημοσίευσαν την δεύτερη και τρίτη μελέτη τους πάνω στο Σύστημα Μελισσών βασισμένοι στα 8 και 10 TSP πειραματικά προβλήματα του Luck (2002).

Οι Luck και Teodorovic (2003b) συνδύασαν τον αλγόριθμο του Συστήματος των Μελισσών, που παρουσιάστηκε πρώτα στους Luck και Teodorovic (2001), και την προσέγγιση της ασαφούς λογικής για να οδηγηθούν σε σωστές λύσεις για στοχαστικά VRP. Η προτεινόμενη προσέγγιση αποτελείται από δύο στάδια: 1) λύνουμε το VRP ως TSP με τη χρησιμοποίηση του Συστήματος Μελισσών και καταλήγουμε συχνά σε μία μη εφικτή λύση του αρχικού προβλήματος· 2) αποφασίζουμε πότε θα τελειώνει η διαδρομή του ενός οχήματος και θα ξεκινάει του επόμενου χρησιμοποιώντας τη λύση που δημιουργήθηκε στο προηγούμενο στάδιο και ένα ασαφή κανόνα βάσης που γεννήθηκε από τον αλγόριθμο των Wang-Mendel. Το στοχαστικό VRP είναι η εύρεση ενός συνόλου διαδρομών που θα μείωνε στο ελάχιστο το κόστος μεταφοράς και όπου τα σημεία στάθμευσης, οι κόμβοι που θα εξυπηρετούνται και η χωρητικότητα των οχημάτων είναι γνωστά και η ζήτηση στους κόμβους μόνο κατά προσέγγιση. Εξαιτίας της αβεβαιότητας για την ζήτηση στους κόμβους, ένα όχημα μπορεί να μην μπορεί να εξυπηρετήσει ένα κόμβο μόλις φτάσει σε αυτόν εξαιτίας της ανεπαρκούς χωρητικότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις θεωρείται ότι το όχημα επιστρέφει στο χώρο στάθμευσης, αδειάζει ότι έχει μαζέψει μέχρι τη δεδομένη στιγμή, επιστρέφει στον κόμβο όπου είχε μια αποτυχία, και συνεχίζει να εξυπηρετεί κατά μήκος του υπολοίπου σχεδιασμένου δρομολογίου. Κατά συνέπεια, η ζήτηση στους κόμβους εκλαμβάνεται ως μία τυχαία μεταβλητή και η πραγματική τιμή της γίνεται γνωστή μόνο μετά την επίσκεψη στον κόμβο. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε ελέγχθηκε σε 10 TSP παραδείγματα. Για να μπορέσουν να μετατραπούν τα αρχικά TSP προβλήματα σε αντίστοιχα VRP, ο πρώτος κόμβος ορίζεται ως χώρος στάθμευσης. Τα αποτελέσματα παραλληλίστηκαν με την καλύτερη λύση που δόθηκε από τον ευρετικό αλγόριθμο που βασίστηκε στο Σύστημα των Μελισσών. Τα αποτελέσματα βρέθηκαν να είναι πολύ κοντά στην καλύτερη λύση θεωρώντας ότι στο μέλλον το πλαίσιο της ζήτησης στον κόμβο θα είναι γνωστό.

Οι Teodorovic και Dell'Orto (2005) πρότειναν τον μετα-ευρετικό αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Αποικίας Μελισσών (BCO) που ήταν η γενίκευση του Συστήματος Μελισσών που παρουσιάστηκε από τον Luck (2002). Ο BCO κατάφερε να λύσει ντετερμινιστικά συνδυαστικά προβλήματα καθώς επίσης και συνδυαστικά προβλήματα χαρακτηριζόμενα από αβεβαιότητα. Ο βασικός στόχος της εργασίας τους ήταν να εξερευνήσουν τις πιθανές εφαρμογές της συλλογικής νοημοσύνης των μελισσών στην επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων που χαρακτηρίζονται από αβεβαιότητα. Με βάση αυτό το συλλογισμό, δημιουργήθηκε το Ασαφές Σύστημα Μελισσών (FBS) όπου οι πράκτορες χρησιμοποιούν συλλογισμούς κατά προσέγγιση και νόμους ασαφούς λογικής στην επικοινωνία και συμπεριφορά τους. Η απόδοση του FBS αλγορίθμου ελέγχθηκε στο πρόβλημα συνδυασμού διαδρομών που στοχεύει στην συγκρότηση πλοήγησης και προγραμματισμού των οχημάτων και των επιβατών με την ελαχιστοποίηση της συνολικής διαδρομής που διανύθηκε από όλους τους συμμετέχοντες, με την ελαχιστοποίηση της συνολικής καθυστέρησης, ή την εξισορρόπηση της χρήσης των οχημάτων. Δεν υπήρξαν θεωρητικά αποτελέσματα που να μπορούν να υποστηρίξουν την προτεινόμενη προσέγγιση αλλά τα προκαταρκτικά αποτελέσματα ήταν πολύ ενθαρρυντικά.

Οι Nakrani και Tovey (2003) πρότειναν έναν αλγόριθμο μελιτοφόρων μελισσών για τη δυναμική κατανομή των υπηρεσιών ίντερνετ. Στον προτεινόμενο αλγόριθμο, οι διακομιστές και οι ουρές αιτημάτων HTTP σε μία αποικία διακομιστών ίντερνετ απεικονίζονται ως συλλέκτριες μέλισσες και παρτέρια λουλουδιών αντίστοιχα. Ο αλγόριθμος συγκρίθηκε με έναν παντογνώστη αλγόριθμο που υπολογίζει μία ιδανική πολιτική κατανομής- ένας άπληστος αλγόριθμος που χρησιμοποιεί ιστορία του παρελθόντος για να υπολογίσει την πολιτική κατανομής, και με έναν ιδανικό-στατικό αλγόριθμο που υπολογίζει πάνσοφα την καλύτερη στατική πολιτική κατανομής ανάμεσα σε όλες τις πιθανές πολιτικές. Τα πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο αλγόριθμος αποδίδει καλύτερα από τους στατικούς ή τους άπληστους αλγόριθμους. Από την άλλη πλευρά, ξεπεράστηκε σε απόδοση από τον άπληστο αλγόριθμο για κάποια σχέδια πρόσβασης χαμηλής μεταβλητότητας.

Ο Wedde και άλλοι (2004) εισήγαγαν ένα ανεκτικό στο σφάλμα, ευπροσάρμοστο και εύρωστο πρωτόκολλο πλοήγησης εμπνευσμένο από τη γλώσσα του χορού και την συμπεριφορά συγκομιδής των μελιτοφόρων μελισσών για την πλοήγηση του δικτύου τηλεπικοινωνιών, που ονομάστηκε ΚυψέληΜελισσών. Για την αξιολόγηση της απόδοσης του, ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε στο Ιαπωνικό Internet Backbone και συγκρίθηκε με το AntNet, το DGA και το OSPF. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ΚυψέληΜελισσών επιτυγχάνει μία παρόμοια ή καλύτερη απόδοση συγκρινόμενη με τους άλλους αλγόριθμους.

Ο Bianco (2004) παρουσίασε ένα παράδειγμα χαρτογράφησης για μεγάλης κλίμακας ναυσιπλοΐα με ακρίβεια που εμπνέεται από τη συμπεριφορά ναυσιπλοΐας μεγάλης κλίμακας των μελισσών. Οι μέλισσες εκτελούν πολύ μεγάλα δρομολόγια όταν τρέφονται, ταξιδεύοντας για πολλά χιλιόμετρα αλλά ταυτόχρονα επιστρέφοντας με απόλυτη ακρίβεια στις μικρές τους κυψέλες. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι αυτές οι ικανότητες είναι αρκετές για την εξεύρεση σχετικά καλής ακρίβειας.

Ο Chong και άλλοι (2006) παρουσίασαν μία καινούρια προσέγγιση που χρησιμοποιεί το μοντέλο συγκομιδής των μελιτοφόρων μελισσών, εμπνευσμένη από τους Nakrani και Tovey (2004), για την επίλυση του σχεδιαστικού προβλήματος job shop. Ο σχεδιασμός job shop ασχολείται με την εύρεση διαδοχικής κατανομής ανταγωνιστικών πόρων που να βελτιστοποιεί μία συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση. Κάθε μηχανήμα μπορεί να επεξεργαστεί μόνο μία δουλειά και κάθε δουλειά μπορεί να επεξεργαστεί μόνο από ένα μηχανήμα τη φορά. Η απόδοση του αλγορίθμου δοκιμάστηκε σε 82 περιπτώσεις προβλημάτων job shop και συγκρίθηκε με αλγορίθμους αποικίας μυρμηγκιών και έρευνας ταμπού. Τα πειραματικά αποτελέσματα απέδειξαν ότι αυτή η έρευνα ταμπού ξεπερνάει σε απόδοση δύο άλλες ευρετικές σύμφωνα με την ποιότητα της λύσης και το χρόνο εκτέλεσης. Από την άλλη πλευρά, ο αλγόριθμος των μελισσών απέδωσε καλύτερα από αυτόν των μυρμηγκιών και ο χρόνος εκτέλεσης και για τις δύο ευρετικές ήταν περίπου ίσος.

Ο Drias και άλλοι (2005) εισήγαγαν μία νέα έξυπνη προσέγγιση που ονομάζεται Βελτιστοποίηση Σμήνους Μελισσών (Bees Swarm Optimization: BSO), που εμπνέεται από την συμπεριφορά των αληθινών μελισσών σε σχέση κυρίως με τη συγκομιδή του νέκταρος από τις ευκολότερες πηγές πρόσβασης ενώ ταυτόχρονα προωθούν τις πλουσιότερες. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος προσαρμόστηκε στο μέγιστο πρόβλημα ικανοποιησιμότητας βαρών (MAX-W-SAT) που ήταν NP-Complete. Το πρόβλημα MAX-W-SAT αναζητά το μέγιστο βάρος που μπορεί να ικανοποιηθεί με οποιαδήποτε ανάθεση, με δεδομένο ένα σύνολο βαρών. Η απόδοση του αλγορίθμου συγκρίθηκε με τον GRASP, SSAT και AGO και βγήκε ως συμπέρασμα ότι ο BSO ξεπέρασε σε απόδοση τους άλλους εξελικτικούς αλγορίθμους.

Ο Pham και άλλοι (2006b) παρουσίασαν τη χρήση του Αλγορίθμου Μελισσών, προτεινόμενη από τον Pham και άλλους (2006a) για να εκπαιδεύσει το νευρωνικό δίκτυο Εκμάθησης Διανυσματικής Κβαντοποίησης (LVQ) για την αναγνώριση ενός σχεδίου διαγράμματος ελέγχου. Η εκπαίδευση για ένα LVQ δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί ως η ελαχιστοποίηση μίας συνάρτησης λάθους. Η συνάρτηση λάθους ορίζει την συνολική διαφορά ανάμεσα στο

πραγματικό προϊόν παραγωγής και το επιθυμητό προϊόν παραγωγής ενός δικτύου σε σχέση με ένα σύνολο εκπαιδευτικών σχεδίων. Όσον αφορά τον Αλγόριθμο Μελισσών, κάθε μέλισσα αντιπροσωπεύει ένα LVQ δίκτυο με ένα συγκεκριμένο σύνολο διανυσμάτων σημείων αναφοράς. Ο στόχος του αλγόριθμου ήταν να βρεθεί η μέλισσα με το σύνολο των διανυσμάτων σημείων αναφοράς που να παράγει την μικρότερη τιμή της συνάρτησης λάθους. Παρά την μεγάλη διάσταση του προβλήματος, ο αλγόριθμος κατάφερε να εκπαιδεύσει πολύ πιο ακριβείς τελεστές από αυτούς που παράχθηκαν από τον κλασικό LVQ εκπαιδευτικό αλγόριθμο.

Ο Pham και άλλοι (2006c) παρουσίασαν τη χρήση του Αλγορίθμου των Μελισσών, που προτάθηκε από τον Pham και άλλους (2006a), για να εκπαιδεύσει το νευρωνικό δίκτυο Πολύ-επίπεδης Αντίληψης (MLP) για την αναγνώριση σχεδίου διαγράμματος ελέγχου. Η εκπαίδευση ενός MLP δικτύου μπορεί να θεωρηθεί ως η ελαχιστοποίηση μίας συνάρτησης λάθους. Η συνάρτηση λάθους ορίζει την συνολική διαφορά ανάμεσα στο πραγματικό προϊόν παραγωγής και το επιθυμητό προϊόν παραγωγής ενός δικτύου σε σχέση με ένα σύνολο εκπαιδευτικών σχεδίων. Όσον αφορά τον Αλγόριθμο των Μελισσών, κάθε μέλισσα αντιπροσωπεύει ένα MLP δίκτυο με ένα συγκεκριμένο σύνολο διανυσμάτων βαρών. Ο στόχος του αλγόριθμου ήταν να βρεθεί η μέλισσα με το σύνολο των διανυσμάτων βαρών που να παράγει την μικρότερη τιμή της συνάρτησης λάθους. Παρά την μεγάλη διάσταση του προβλήματος, ο αλγόριθμος κατάφερε να εκπαιδεύσει πολύ πιο ακριβείς τελεστές από αυτούς του αλγορίθμου πίσω διάδοσης.

Ο Pham και άλλοι (2006d) παρουσίασαν μία εφαρμογή του Αλγορίθμου των Μελισσών, που προτάθηκε από τον Pham και άλλους (2006a), στην βελτιστοποίηση των νευρωνικών δικτύων για την ταυτοποίηση των ελαττωμάτων στα φύλλα λούστρου του ξύλου. Ο Αλγόριθμος των Μελισσών χρησιμοποιήθηκε αντί για έναν αλγόριθμο πίσω διάδοσης για τη βελτιστοποίηση των βαρών του νευρωνικού δικτύου. Η βελτιστοποίηση μέσω του Αλγορίθμου των Μελισσών περιλαμβάνει τις μέλισσες που ψάχνουν για τις ιδανικές τιμές των βαρών που έχουν ανατεθεί στις συνδέσεις ανάμεσα στους νευρώνες του δικτύου και όπου κάθε μέλισσα αντιπροσωπεύει ένα νευρωνικό δίκτυο με ένα συγκεκριμένο σύνολο βαρών. Ο στόχος του Αλγορίθμου των Μελισσών ήταν να βρει την μέλισσα που να παράγει την μικρότερη τιμή της συνάρτησης λάθους. Τα πειραματικά αποτελέσματα δείχνουν ότι ο Αλγόριθμος των Μελισσών μπόρεσε να επιτύχει μία ακρίβεια που μπορεί να συγκριθεί με τη μέθοδο της πίσω διάδοσης. Παρόλα αυτά, ο Αλγόριθμος των Μελισσών αποδείχθηκε ότι ήταν σημαντικά πιο γρήγορος.

Οι Quijano και Passino (2007) ανέπτυξαν έναν αλγόριθμο, βασισμένο στην συμπεριφορά συγκομιδής των μελιτοφόρων μελισσών, για να λύσουν το πρόβλημα κατανομής πόρων. Οι κύριες πηγές για την κατασκευή των συστατικών του προτεινόμενου μοντέλου είναι: προσδιορισμός δύναμης χορού, κατώφλι χορού, σημείο εκφόρτωσης, σημείο χορού και ποσοστά στρατολόγησης, κατανομή εξερευνητών και η σχέση της με τη στρατολόγηση. Πρότειναν, επίσης, μια μηχανική εφαρμογή πάνω στη δυναμική κατανομή πόρων για πολύ-ζωνικό έλεγχο θερμοκρασίας, για να υπερτονίσουν τα βασικά χαρακτηριστικά της δυναμικής λειτουργίας του αλγορίθμου κοινωνικής συγκομιδής των μελιτοφόρων μελισσών.

Ο Markovic και άλλοι (2007) χρησιμοποίησαν τον BCO αλγόριθμο, που τον εισήγαγαν οι Teodorovic και Dell'Orto (2005) για να λύσουν το πρόβλημα Max-Routing and Wavelength Assignment (Max-RWA) σε καθαρά οπτικά δίκτυα. Το πρόβλημα Max-RWA είναι η μεγιστοποίηση του αριθμού των εγκατεστημένων οπτικών καναλιών σε ένα δεδομένο οπτικό δίκτυο για ένα δεδομένο πλέγμα αιτημάτων κίνησης και ένα δεδομένο αριθμό μηκών κύματος. Ο προτεινόμενος BCO- RWA αλγόριθμος δοκιμάστηκε στο Ευρωπαϊκό Οπτικό Δίκτυο και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με αυτά που αντλήθηκαν από την LP προσέγγιση χαλάρωσης και τον ταμπού μετά-ευρετικό αλγόριθμο. Ο BCO- RWA αλγόριθμος πάντα ξεπερνούσε σε απόδοση τα αποτελέσματα των συγκρινόμενων αλγορίθμων και κατάφερε να παράγει πολύ καλές λύσεις σε ένα λογικό υπολογιστικό χρόνο.

Ο Abbass (2001a) παρουσίασε τον πρωτότυπο ερευνητικό αλγόριθμο εμπνευσμένο από την γαμήλια διαδικασία των μελιτοφόρων μελισσών. Μία αποικία μελιτοφόρων μελισσών αποτελείται από την βασίλισσα (-ες), τους κηφήνες, την εργάτρια (-ες) και τους γόνους. Σε αυτή τη μελέτη, η αποικία θεωρήθηκε ότι έχει μία βασίλισσα και μία εργάτρια. Στην πραγματική ζωή, μία γαμήλια πτήση ξεκινά με ένα χορό που πραγματοποιεί η βασίλισσα ώστε οι κηφήνες να την ακολουθήσουν και να ζευγαρώσουν μαζί της. Σε κάθε ζευγάρι, το σπέρμα φτάνει στην σπερματοθήκη και συσσωρεύεται εκεί για να αποτελέσει τη γενετική τράπεζα της αποικίας. Κάθε φορά που η βασίλισσα αποθέτει τα γονιμοποιημένα αυγά, παίρνει ένα τυχαίο μείγμα από το σπέρμα που έχει συσσωρευτεί στην σπερματοθήκη για να γονιμοποιήσει το αυγό. Κατά τον ίδιο τρόπο, στον MBO αλγόριθμο η γαμήλια πτήση μπορεί να οπτικοποιηθεί ως ένα σύνολο μεταβάσεων σε ένα χώρο κατάστασης όπου η βασίλισσα κινείται ανάμεσα σε διαφορετικές καταστάσεις στο χώρο και ζευγαρώνει με τον κηφήνα που συναντά σε κάθε κατάσταση πιθανολογικά. Η πιθανότητα ζευγαρώματος είναι μεγάλη όταν είτε η βασίλισσα είναι στην αρχή της γαμήλιας πτήσης της και άρα η ταχύτητα της είναι υψηλή, είτε όταν η φυσική κατάσταση του κηφήνα είναι τόσο καλή όσο της βασίλισσας. Ο αλγόριθμος ξεκινάει ρυθμίζοντας τυχαία το γονότυπο της βασίλισσας. Μετά από αυτό, μία ευρετική χρησιμοποιείται για να βελτιωθεί ο γονότυπος της βασίλισσας που πραγματοποιείται από τις εργάτριες. Στη συνέχεια, λαμβάνει χώρα μια σειρά από γαμήλιες πτήσεις. Σε κάθε γαμήλια πτήση, η ενέργεια και η ταχύτητα της

βασιλίσσας ρυθμίζονται τυχαία. Η βασίλισσα τότε κινείται ανάμεσα στις διάφορες καταστάσεις (λύσεις) στο χώρο σύμφωνα με την ταχύτητα της και ζευγαρώνει με τους κηφίνες. Αν ένας κηφίνας ζευγαρώσει επιτυχώς με την βασίλισσα (ο κηφίνας περνάει τον κανόνα της πιθανολογικής απόφασης), το σπέρμα του προστίθεται στην σπερματοθήκη της βασίλισσας (λίστα μερικών λύσεων) και η ταχύτητα και ενέργεια της βασίλισσας μειώνονται. Αφού η βασίλισσα ολοκληρώσει την γαμήλια πτήση της, επιστρέφει στη φωλιά, επιλέγει τυχαία ένα σπέρμα, και εκτελεί τη διασταύρωση και την μετάλλαξη. Κατόπιν, η εργάτρια χρησιμοποιείται για τη βελτίωση του παραγόμενου γόνου και ο αριθμός των εργατριών αντιπροσωπεύει τον αριθμό των κωδικοποιημένων στο πρόγραμμα ευρετικών. Στη συνέχεια, η βασίλισσα αντικαθίσταται από τον καλύτερο γόνο αν ο τελευταίος είναι καλύτερος από την πρώτη. Οι εναπομείναντες γόνοι θανατώνονται και μία καινούρια γαμήλια πτήση ξεκινά. Ο MBO αλγόριθμος έχει τρεις παραμέτρους καθορισμένες από τον χρήστη: το μέγεθος της σπερματοθήκης της βασίλισσας που αντιπροσωπεύει το μέγιστο αριθμό των ζευγαρωμάτων σε μία μόνο γαμήλια πτήση, τον αριθμό των γόνων που θα γεννηθούν από τη βασίλισσα, και την ποσότητα του χρόνου που αφιερώνεται στην φροντίδα των γόνων η οποία υποδηλώνει το βάθος της τοπικής έρευνας. Ένα πρόβλημα ικανοποίησης γενικού περιορισμού (CSP) είναι το πρόβλημα εύρεσης μιας εργασίας σε ένα σύνολο μεταβλητών που να ικανοποιεί ένα σύνολο περιορισμών στους τομείς αυτών των μεταβλητών. Τα προβλήματα εμπρόθετης ικανοποιησιμότητας (SAT) είναι μία ειδική περίπτωση CSP όπου ο τομέας κάθε μεταβλητής είναι είτε σωστός είτε λάθος. Επίσης, το 3-SAT είναι μία ειδική περίπτωση SAT όπου κάθε περιορισμός περιέχει τρεις μεταβλητές. Ο MBO αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε εκατό διαφορετικά 3-SAT προβλήματα και τα πειραματικά αποτελέσματα απέδειξαν ότι ο αλγόριθμος ήταν πολύ επιτυχημένος. Οι ευρετικές που χρησιμοποιούν οι εργάτριες είναι η Greedy SAT (GSAT) και ο τυχαίος περίπατος. Στις πειραματικές μελέτες, το GSAT, τυχαίος περίπατος, το MBO με GSAT και το MBO με τυχαίο περίπατο συγκρίθηκαν και το MBO- GSAT απέδωσε καλύτερα από τα υπόλοιπα τρία.

Ο Abbass (2001b) παρουσίασε μία παραλλαγή του MBO αλγορίθμου που προτάθηκε αρχικά από τον Abbass (2001a) όπου η αποικία περιέχει μία μοναδική βασίλισσα με πολλαπλές εργάτριες. Για τις εργάτριες χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές ευρετικές: GSAT, τυχαίος περίπατος, τυχαία εκτίναξη, τυχαίο νέα, 1-point και 2-point διασταύρωση. Ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε σε εκατό δύσκολα 3-SAT προβλήματα. Τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από το μικρότερο μέγεθος αποικίας και ένα μέσο μέγεθος σπερματοθήκης. Από την άλλη πλευρά, η καλύτερη εργάτρια ήταν η GSAT, που ακολουθήθηκε από τον τυχαίο περίπατο. Φάνηκε, επίσης, ότι ο MBO απέδωσε καλύτερα από την GSAT μόνη της αν και η GSAT ήταν η ευρετική με την καλύτερη φυσική κατάσταση στον MBO.

Ο Abbass (2001c) ανέλυσε ξανά τη γαμήλια συμπεριφορά των μελιτοφόρων μελισσών ως συνέχεια της εργασίας του Abbass (2001a). Η αντίθεση ανάμεσα σε αυτές τις μελέτες ήταν ο αριθμός των βασιλισσών και των εργατριών. Ο Abbass (2001c) θεώρησε ότι η αποικία των μελιτοφόρων μελισσών είναι με πάνω από μία βασίλισσες σε συνδυασμό με μία ομάδα εργατριών, ενώ στην αποικία του Abbass (2001a) υπήρχε μόνο μία βασίλισσα και μία εργάτρια. Σε αυτήν την εργασία, ο MBO αλγόριθμος εφαρμόστηκε σε πενήντα διαφορετικά 3-SAT προβλήματα που περιείχαν 50 μεταβλητές και 215 περιορισμούς. Τα πειραματικά αποτελέσματα κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το μεγαλύτερο μέγεθος σπερματοθήκης, ένα μέσο μέγεθος αποικίας, και ο μικρότερος αριθμός βασιλισσών είχαν την καλύτερη απόδοση. Από την άλλη πλευρά, ο αλγόριθμος συγκρίθηκε με τον WalkSAT, έναν από τους πιο σύγχρονους αλγόριθμους για την SAT, και ο MBO αλγόριθμος ξεπέρασε σε απόδοση τον WalkSAT.

Οι Teo και Abbass (2001) παρουσίασαν μία τροποποίηση του MBO αλγορίθμου που μπορεί να θεωρηθεί ως επέκταση του Abbass (2001a) και του Abbass (2001c). Ο σκοπός αυτής της τροποποίησης ήταν να χρησιμοποιηθεί μία πιο παραδοσιακή προσέγγιση ανόπτησης κατά την απόφαση αποδοχής τροχιάς ώστε να κατευθύνει την ερευνητική διαδικασία προς ένα χώρο ιδανικής λύσης. Νέες τροχιές θα ήταν μόνο αποδεκτές ως πιθανοί κηφίνες για ζευγάρωμα αν ήταν μια πιο ιδανική τροχιά, δηλαδή αν η τροχιά ήταν σε καλύτερη κατάσταση από το γονότυπο της βασίλισσας. Διαφορετικά, αν ήταν μία τροχιά που οδηγεί την έρευνα σε ένα λιγότερο ιδανικό χώρο λύσης, τότε είναι αποδεκτή μόνο πιθανολογικά και υπόκειται στη νέα συνάρτηση ανόπτησης. Με άλλα λόγια, αντί να δεχόμαστε όλες τις τροχιές που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια της πτήσης μιας βασίλισσας όπως στον αρχικό MBO αλγόριθμο, μια νέα τροχιά γίνεται αποδεκτή μόνο αν οδηγεί σε ένα καλύτερο χώρο επίλυσης. Διαφορετικά, ο αλγόριθμος θα δεχτεί πιθανολογικά μία μετάβαση σε ένα λιγότερο ιδανικό χώρο επίλυσης σύμφωνα με τη συνάρτηση fitness της βασίλισσας. Από την άλλη πλευρά, πέντε διαφορετικές ευρετικές χρησιμοποιήθηκαν από τις εργάτριες για τη βελτίωση των γόνων: GSAT, τυχαίος περίπατος, πιθανολογικά άπληστη, 1-point διασταύρωση και WalkSAT. Όπως στον Abbass (2001a), οι Teo και Abbass θεώρησαν ξανά την αποικία των μελιτοφόρων μελισσών με μία βασίλισσα. Πειραματικές έρευνες διεξήχθησαν με τρεις τρόπους: δοκιμάζοντας κάθε μία από τις πέντε διαφορετικές ευρετικές δουλεύοντας χωρίς MBO, δοκιμάζοντας την απόδοση κάθε ευρετικής σε σχέση με τον αρχικό MBO και τον τροποποιημένο MBO, και τέλος δοκιμάζοντας τον προτεινόμενο αλγόριθμο σε αντιπαραβολή με τον αρχικό MBO χρησιμοποιώντας τις πέντε διαφορετικές ευρετικές που λειτουργούν σε συνδυασμό ως

επιτροπή ευρετικών. Για τα πειραματικά προβλήματα, δημιουργήθηκαν δέκα διαφορετικά 3-SAT προβλήματα που αποτελούνται από 1075 περιορισμούς και 250 μεταβλητές. Το αποτέλεσμα όσον αφορά την απόδοση των ευρετικών προήλθε με την ακόλουθη σειρά για την πρώτη ομάδα πειραμάτων: WalkSAT, GSAT, τυχαίος περίπατος, πιθανολογικά άπληστη, 1-point διασταύρωση. Στη δεύτερη ομάδα πειραμάτων, τόσο οι αρχικές όσο και οι προτεινόμενες συναρτήσεις ανόπτησης που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της γαμήλιας πτήσης ήταν το ίδιο αποτελεσματικές με όλες τις ευρετικές. Παρόλα αυτά, η αποτελεσματικότητα ενός MBO με WalkSAT στην εύρεση λύσεων βελτιώθηκε ελαφρά από την νέα συνάρτηση ανόπτησης μιας που η προτεινόμενη έκδοχή του MBO βρήκε περισσότερες λύσεις από την αρχική έκδοση. Τέλος, στην τρίτη ομάδα πειραμάτων, και οι δύο στρατηγικές ανόπτησης ήταν το ίδιο αποτελεσματικές.

Οι Teo και Abbass (2003) πρότειναν άλλη μία τροποποίηση του MBO αλγορίθμου βασισμένοι στους Teo και Abbass (2001). Τόσο στον Abbass (2001a) όσο και στους Teo και Abbass (2001), η συνάρτηση ανόπτησης χρησιμοποίησε την φυσική κατάσταση/fitness της βασίλισσας σαν βάση για την αποδοχή ή την απόρριψη της μετάβασης στο χώρο του κηφήνα, είτε κατά τη διάρκεια της ωτοκίας είτε κατά τη διάρκεια του ζευγαρώματος. Σε μία παραδοσιακή προσομοιωμένη μέθοδο ανόπτησης, το προηγούμενο στάδιο χρησιμοποιήθηκε σαν βάση για τη μετάβαση. Επίσης, από βιολογικής πλευράς, η δημιουργία του κηφήνα είναι ανεξάρτητη από τη βασίλισσα μιας που συνήθως προέρχονται από διαφορετική αποικία, αν και είναι πιθανό να σχετίζονται. Κατά συνέπεια, είναι πιο φυσικό να δεχτούμε μία μετάβαση βασιζόμενοι στη φυσική κατάσταση του ίδιου του κηφήνα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, ο στόχος της εργασίας τους να είναι η δοκιμή μιας καθαρά παραδοσιακής μεθόδου ανόπτησης ως βάση για τον προσδιορισμό της τράπεζας των κηφήνων. Η απόδοση του τροποποιημένου αλγορίθμου δοκιμάστηκε πάνω σε δέκα διαφορετικά 3-SAT προβλήματα και συγκρίθηκε με τις προηγούμενες εκδοχές του MBO. Όλες οι ευρετικές απέτυχαν στην προσπάθεια να βρουν έστω και μία λύση όταν δούλευαν μόνες τους ενώ οι αποδόσεις τους βελτιώθηκαν σημαντικά όταν συνδυάστηκαν με τον MBO. Από την άλλη πλευρά, η προτεινόμενη έκδοχή του MBO κυριάρχησε των προηγούμενων μελετών και κατόρθωσε να βρει λύσεις για προβλήματα στα οποία οι προηγούμενες εκδοχές απέτυχαν.

Οι Bozorg Haddad και Afshar (2004) επωφελήθηκαν από τον MBO αλγόριθμο βασισμένοι στη μελέτη του Abbass (2001c) και τον εφάρμοσαν σε προβλήματα διαχείρισης αποθεμάτων νερού. Ο αλγόριθμος μοντελοποιήθηκε για να βρει καλές λύσεις για την βέλτιστη διαχείριση ενός μόνο αποθέματος. Τα αποτελέσματα βρέθηκαν καλά στη σύγκριση με παρόμοιες ευρετικές μεθόδους καθώς και με ολικά βέλτιστα αποτελέσματα.

Ο Bozorg Haddad και άλλοι (2006) πρότειναν τον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Ζευγαρώματος Μελιτοφόρων Μελισσών (HBMO), βασισμένοι στον Abbass (2001a, 2001c), για την επίλυση μαθηματικών μοντέλων αληθινών τιμών που ήταν σε μεγάλο βαθμό μη-γραμμικά, με περιορισμούς ή χωρίς περιορισμούς. Η απόδοση ενός HBMO δοκιμάστηκε σε διάφορες μαθηματικές συναρτήσεις βελτιστοποίησης με περιορισμούς ή χωρίς και συγκρίθηκε με τα αποτελέσματα ενός γενετικού αλγορίθμου. Τα αποτελέσματα από ένα γενετικό αλγόριθμο και ο HBMO αλγόριθμος συγκλίνουν αρκετά με μικρή βελτίωση στην λύση HBMO. Επίσης, για να απεικονιστεί η εφαρμογή και απόδοση του μοντέλου, ο HBMO αλγόριθμος χρησιμοποιήθηκε ακόμα για τη δημιουργία μιας βέλτιστης πολιτικής λειτουργίας ενός μόνο αποθέματος. Ο HBMO παρήγαγε ξανά μία σημαντικά καλύτερη λύση.

Ο Chang (2006) απεικόνισε για πρώτη φορά την ικανότητα της MBO προσέγγισης σε μια θεωρητική προοπτική για την επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και στοχαστικών σειριακών προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Η εργασία αρχικά ασχολήθηκε με τον MBO αλγόριθμο για την επίλυση μη-στοχαστικών συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης και απέδειξε ότι ο MBO έχει την ικανότητα να συγκλίνει προς την ολική βέλτιστη τιμή. Ο MBO στη συνέχεια, προσαρμόστηκε σε έναν αλγόριθμο που ονομάζεται 'Επανάληψη Πολιτικής Μελιτοφόρων Μελισσών' (HBPI) για την επίλυση άπειρων οριζόντων στοχαστικών δυναμικών προγραμματιστικών προβλημάτων προεξοφλημένου κόστους (SDP), γνωστών και ως διαδικασίες αποφάσεων markov (MDPs) και εκεί ο HBPI αλγόριθμος απεδείχθη ότι συγκλίνει στην βέλτιστη τιμή. Ο Chang (2006) υπογραμμίζει ότι ο MBO μπορεί να θεωρηθεί ως ένα υβριδικό σχέδιο προσομοιωμένου γενετικού αλγορίθμου και αλγορίθμου ανόπτησης. Η προσομοιωμένη ανόπτηση αντιστοιχεί στην γαμήλια πτήση της βασίλισσας για τη λήψη του σπέρματος από τον πιθανό κηφήνα στην σπερματοθήκη και ο γενετικός αλγόριθμος αντιστοιχεί στην γενιά των γόνων και στο βήμα των βελτιώσεων με κάποιες διαφορές.

Ο Afshar και άλλοι (2007) παρουσίασαν μία βελτιωμένη έκδοση του HBMO αλγορίθμου για συνεχή προβλήματα βελτιστοποίησης και την εφαρμογή της σε ένα μη γραμμικό-με περιορισμούς συνεχές πρόβλημα ενός μόνο αποθέματος. Μέσα από τη σύγκριση με τις ολικές βέλτιστες τιμές που αντλήθηκαν από τον λύτη LINGO 8.0 NLP, παρατηρήθηκε ότι η σύγκλιση του αλγορίθμου με το βέλτιστο ήταν εξαιρετικά γρήγορη.

Ο Fathian και άλλοι (2007) παρουσίασαν μία εφαρμογή του HBMO αλγορίθμου για την διαδικασία της ομαδοποίησης που είναι μία από τις πλέον ελκυστικές τεχνικές εξαγωγής δεδομένων που χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς. Για να αξιολογηθεί η απόδοση του αλγορίθμου στην ομαδοποίηση, δοκιμάστηκε σε διάφορα

πραγματικά σύνολα δεδομένων και συγκρίθηκε με διάφορους στοχαστικούς αλγόριθμους συμπεριλαμβανομένων και του ACO αλγόριθμου, της προσομοιωμένης μεθόδου απόκτησης, των γενετικών αλγόριθμων, και της μεθόδου έρευνας ταμπού. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η προτεινόμενη HBMO προσέγγιση μπορεί να θεωρηθεί ως μία βιώσιμη και αποτελεσματική ευρετική για την εύρεση ιδανικών ή σχεδόν ιδανικών λύσεων σε προβλήματα ομαδοποίησης μιας που τα αποτελέσματα ήταν πολύ ενθαρρυντικά σε σχέση με την ποιότητα των λύσεων που βρέθηκαν, τον μέσο αριθμό των αξιολογήσεων συνάρτησης και του χρόνου επεξεργασίας που χρειάστηκε.

Ο Koudil και άλλοι (2007) προσάρμοσαν τον MBO αλγόριθμο που πρωτοπαρουσιάστηκε από τον Abbass (2001) για να λύσουν ενσωματωμένα προβλήματα διαχωρισμού/σχεδιασμού στην συν-σχεδίαση. Η προτεινόμενη προσέγγιση δοκιμάστηκε σε ένα χαρακτηριστικό πρόβλημα και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με το γενετικό αλγόριθμο. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι ο MBO παρουσιάζει καλά αποτελέσματα σε σχέση με την ποιότητα της λύσης, και δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τον γενετικό αλγόριθμο σε σχέση με τους χρόνους εκτέλεσης.

Ο Benatchba και άλλοι (2005) χρησιμοποίησαν τον MBO αλγόριθμο που πρωτοπαρουσιάστηκε από τον Abbass (2001a, 2001b, 2001c) για να λύσουν ένα πρόβλημα εξαγωγής δεδομένων που ονομάζεται πρόβλημα Max-Sat. Στον MBO, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερις διαφορετικές ευρετικές για την βελτίωση των γόνων από τις εργάτριες: ένας αλγόριθμος τοπικής έρευνας LS, ο GSAT, ο HSAT, και ο GWSAT. Το εκπαιδευτικό σύνολο που χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς αποσπάστηκε από ένα ιατρικό, και είχε ως στόχο την ανάλυση των πιο αποκαλυπτικών συμπτωμάτων της παρουσίας ή όχι μιας λαπαροτομίας στην κύρια χοληφόρο οδό. Το καλύτερο αποτέλεσμα με τον MBO ήταν η λύση με 96% ικανοποίηση που χρησιμοποίησε τον GSAT ως εργάτρια.

Ο Sung (2003) πρότεινε την εξέλιξη της βασίλισσας-μέλισσας για την ενίσχυση της ικανότητας των γενετικών αλγόριθμων. Στον εξελικτικό αλγόριθμο της βασίλισσας, αυτή διασταυρώνεται με τις άλλες μέλισσες που έχουν επιλεγεί ως γονείς από ένα διαφορετικό αλγόριθμο επιλογής αντί για τους γνωστούς (αλγόριθμους επιλογής) όπως αυτός της επιλογής με τον τροχό της ρουλέτας. Αυτή η διαδικασία αυξάνει την αξιοποίηση των γενετικών αλγόριθμων αλλά από την άλλη πλευρά αυξάνει και την πιθανότητα να καταλήξουμε σε πρόωρη σύγκλιση. Για να μειωθεί αυτή η πιθανότητα, μόνο κάποια άτομα μεταλλάσσονται περισσότερο αντί να μεταλλαχθούν όλα με μικρή πιθανότητα μετάλλαξης όπως στην φυσιολογική εξέλιξη. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος δοκιμάστηκε σε ένα συνδυαστικό και δύο τυπικά προβλήματα βελτιστοποίησης συνάρτησης. Πειραματικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος επέτρεψε στους γενετικούς αλγόριθμους να φτάσουν σύντομα στο ολικό βέλτιστο.

Ο Qin και άλλοι (2004) εφάρμοσαν την εξέλιξη των βασιλισσών-μελισσών που προτάθηκε από τον Sung (2003) σε προβλήματα κατανομής οικονομικής ενέργειας (EPD). Το πρόβλημα EPD έγκειται στην ελαχιστοποίηση της τιμής του συνολικού κόστους και στην ταυτόχρονη ανταπόκριση στη ζήτηση του φορτίου ενός ενεργειακού συστήματος και διαμορφώθηκε ως ένα μη γραμμικό περίπλοκο πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς. Τα αριθμητικά αποτελέσματα έδειξαν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος ήταν γρηγορότερος και πιο εύρωστος από τον παραδοσιακό γενετικό αλγόριθμο.

Ο Kara (2004) πρότεινε ένα νέο τύπο διασταύρωσης, που ονομάζεται Διασταύρωση Μελισσών για να βελτιώσει την απόδοση του γενετικού αλγόριθμου. Η βασίλισσα μέλισσα έχει σεξουαλική συνεύρεση με άλλα αρσενικά. Κατά τον ίδιο τρόπο ένα συγκεκριμένο χρωμόσωμα μπορεί να θεωρηθεί ως βασίλισσα μέλισσα για τον πρώτο γονέα του της διασταύρωσης και ο δεύτερος γονέας μπορεί να είναι ένα από τα υπόλοιπα χρωμοσώματα της αποικίας. Ο συγγραφέας πρότεινε τρεις διαφορετικούς τύπους διασταύρωσης. Στον πρώτο τύπο, το χρωμόσωμα με την καλύτερη τιμή fitness είναι ο σταθερός γονέας και όλα τα υπόλοιπα χρωμοσώματα διασταυρώνονται με αυτόν τον γονέα τουλάχιστον μία φορά σε κάθε γενιά. Στο δεύτερο τύπο, το χρωμόσωμα με τη χειρότερη τιμή fitness είναι ο σταθερός γονέας και η υπόλοιπη διαδικασία είναι ίδια με αυτή του πρώτου τύπου. Στον τρίτο τύπο, ο πληθυσμός ταξινομείται σε σχέση με τις τιμές fitness και ο σταθερός γονέας στην πρώτη γενιά καθορίζεται από το πρώτο χρωμόσωμα σε αυτή τη λίστα. Στη δεύτερη γενιά, ο σταθερός γονέας είναι το δεύτερο χρωμόσωμα στη λίστα και ούτω καθεξής. Η απόδοση αυτών των τύπων διασταύρωσης συγκρίθηκε με την ομοιόμορφη διασταύρωση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στις περισσότερες περιπτώσεις, οι διασταυρώσεις των μελιτοφόρων μελισσών απέφεραν αποτελέσματα σε μικρότερο αριθμό επαναλήψεων και τα χειρότερα αποτελέσματα ήρθαν στις ομοιόμορφες διασταυρώσεις. Από την άλλη πλευρά, η ομοιόμορφη διασταύρωση έχασε την ποικιλομορφία του πληθυσμού σε μικρότερο χρονικό όριο ενώ οι διασταυρώσεις των μελιτοφόρων μελισσών έχασαν την πληθυσμιακή τους ποικιλομορφία σε μεγαλύτερα χρονικά όρια.

Οι Azeem και Saad (2004) πρότειναν έναν τροποποιημένο εξελικτικό αλγόριθμο βασιλικής μέλισσας που παρουσιάστηκε πρώτη φορά από τον Sung (2003). Στον προτεινόμενο αλγόριθμο, αν οποιαδήποτε λύση έχει την τιμή fitness πολύ κοντά ή πάνω από την τιμή fitness της βασίλισσας, αυτή ή λύση αναγνωρίζεται σε ένα νέο απόθεμα ως η βασίλισσα ενώ στον αρχικό αλγόριθμο περιορίζεται σε ένα μόνο απόθεμα. Μία άλλη διαφορά ανάμεσα στον αρχικό και τον προτεινόμενο αλγόριθμο είναι στον τελεστή της διασταύρωσης. Ο αρχικός

αλγόριθμος χρησιμοποιεί ομοιόμορφη διασταύρωση όπου κάθε γονίδιο διασταυρώνεται με κάποια πιθανότητα. Από την άλλη πλευρά, ο προτεινόμενος αλγόριθμος χρησιμοποιεί ομοιόμορφη διασταύρωση με βάρη τα οποία τοποθετούνται σε κάθε γονίδιο σύμφωνα με τα πειραματικά σχέδια του πληθυσμού. Με αυτόν τον τύπο διασταύρωσης, ο γενετικός αλγόριθμος θα ψάξει για περισσότερους χώρους καταστάσεων. Ο αλγόριθμος δοκιμάστηκε για τον συγχρονισμό του κλιμακωτού παράγοντα του Ελεγκτή Βάσης Ασαφούς Γνώσης (FKBC) σε δύο πολύπλοκα μη-γραμμικά παραδείγματα. Πειράματα έδειξαν ότι ο FKBC απέφερε ανώτερα αποτελέσματα από τους παραδοσιακούς αλγορίθμους ελέγχου στις περίπλοκες περιπτώσεις κατά τις οποίες το συστηματικό μοντέλο ή οι παράμετροι ήταν δύσκολο να επιτευχθούν.

Στις ακόλουθες ενότητες αυτής της εργασίας, παρουσιάζεται η πρώτη εφαρμογή ενός αλγορίθμου βασισμένου στις μέλισσες και εμπνευσμένου από τη φύση (που ονομάζουμε Αποικία Τεχνητών Μελισσών, ABC) σε γενικευμένα προβλήματα ανάθεσης.

Γενικευμένο Πρόβλημα Ανάθεσης

Το Γενικευμένο Πρόβλημα Ανάθεσης (GAP) έχει ως στόχο του την ανάθεση ενός συνόλου καθηκόντων σε ένα σύνολο πρακτόρων με ελάχιστο κόστος. Κάθε πράκτορας αντιπροσωπεύει μία και μόνο πηγή με μειωμένη δυνατότητα. Κάθε καθήκον πρέπει να ανατεθεί σε ένα μόνο πράκτορα και απαιτεί ένα συγκεκριμένο ποσό από τον πόρο του πράκτορα.

Υπάρχουν πολλοί τομείς εφαρμογών του GAP όπως τα δίκτυα υπολογιστών και επικοινωνιών, τα προβλήματα εντοπισμού, η πλοήγηση οχημάτων, η τεχνολογία ομάδας, ο σχεδιασμός και άλλα. Εκτεταμένη ανάλυση αυτού του προβλήματος και των πιθανών εφαρμογών του. Αρκετοί λεπτομερείς αλγόριθμοι για το GAP έχουν προταθεί από τους και πρόσφατα (2003). Επίσης, αρκετές ευρετικές έχουν προταθεί για την επίλυση του GAP. Οι Martello και Toth (1981, 1990) πρότειναν έναν συνδυασμό τοπικής έρευνας και άπληστης μεθόδου. Ο Osman (1995) ανέπτυξε νέους αλγορίθμους Προσομοιωμένης Ανόπτησης και Έρευνας Ταμπού για να διερευνήσει την απόδοση τους στο GAP. Οι Chu και Beasley (1997) παρουσίασαν έναν Γενετικό Αλγόριθμο για το GAP που προσπαθεί να βελτιώσει τη δυνατότητα υλοποίησης και βελτιστοποίησης ταυτόχρονα.

Διάφοροι ερευνητικοί αλγόριθμοι ποικίλου βάθους.

Αλγόριθμοι Έρευνας Ταμπού βασισμένοι σε Αλυσίδα Απόρριψης (1995), προσεγγίσεις Επανασύνδεσης Διαδρομής, Βελτιστοποίηση με Αποικία Μυρμηγκιών, Max-Min Σύστημα Μυρμηγκιών Ευρετικής βασισμένο σε άπληστη, τυχαία προσαρμόσιμη ευρετική μπορούν να αναφερθούν ως οι άλλες μετα-ευρετικές προσεγγίσεις που προτάθηκαν για το GAP τα τελευταία χρόνια.

Ο σκοπός αυτής της μελέτης είναι να παρουσιάσει έναν αλγόριθμο τεχνητής αποικίας μελισσών για την επίλυση του GAP. Το κύριο ενδιαφέρον μας για αυτό το πρόβλημα προήλθε από την NP-hard δομή του που επαληθεύτηκε από τον Fisher και άλλους. Επίσης, οι Martello και Toth (1990) παρουσίασαν την NP-ολοκλήρωση της απόδειξης ότι η λύση είναι μία εφικτή λύση. Το GAP μπορεί να διατυπωθεί ως ένα ακέραιο προγραμματιστικό μοντέλο ως εξής:

Το I είναι ένα σύνολο καθηκόντων ; το J είναι ένα σύνολο πρακτόρων Το πρώτο σύνολο περιορισμών συνδέεται με την δυνατότητα πόρων των πρακτόρων. Το δεύτερο σύνολο περιορισμών εξασφαλίζει το ότι κάθε καθήκον ανατίθεται σε μόνο ένα πράκτορα.

Αλγόριθμος Τεχνητής Αποικίας Μελισσών για το GAP

Σε αυτήν την ενότητα παρουσιάζονται το γενικό πλαίσιο ABC και οι βασικοί αλγόριθμοι για την παραγωγή της αρχικής λύσης και των γειτονικών λύσεων για το GAP. Τα βασικά βήματα του προτεινόμενου ABC αλγορίθμου

Η αρχική αποικία μελισσών κατασκευάζεται χρησιμοποιώντας GRAH αλγορίθμους (Lourenco και Serra, 2001). Η άπληστη ευρετική δημιουργεί μία λύση ως εξής:

- Σε κάθε βήμα, επιλέγεται το επόμενο καθήκον προς ανάθεση.
- Επιλέγεται ο πράκτορας (στον οποίο πρόκειται να ανατεθεί το επιλεγμένο καθήκον).
- Επανάληψη αυτών των δύο βημάτων μέχρι όλα τα καθήκοντα να έχουν ανατεθεί σε κάποιο πράκτορα.

Στην διαδικασία GRAH η επιλογή είναι πιθανολογική, επηρεασμένη κατά μιας συνάρτησης πιθανότητας. Αυτή η συνάρτηση αναβαθμίζεται σε κάθε επανάληψη μέσω ανατροφοδότησης, χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά των καλών λύσεων. Τα κύρια βήματά εκτέλεσης του GRAH αλγορίθμου συνοψίζονται, όπως φαίνεται, στον Πίνακα 4.

Δομές Γειτονιάς

Μετατόπιση γειτονιάς: Αυτός ο τύπος γειτονιάς αντλείται από την αρχική λύση με την αλλαγή του πράκτορα που έχει ανατεθεί σε ένα καθήκον. Τα βήματα του αλγορίθμου συνοψίζονται στον Πίνακα 5. Ένα παράδειγμα εφαρμογής αυτού του αλγορίθμου απεικονίζεται στο Σχήμα 4.

Διπλής μετατόπισης γειτονιά: Αυτή η δομή γειτονιάς είναι η ειδική περίπτωση της μεγάλης αλυσίδας γειτονιάς. Μιας που οι δύο κινήσεις μετατόπισης πραγματοποιούνται στη διπλή μετατόπιση, αυτή είναι η κατάσταση μακριάς αλυσίδας ($EC\text{-}Length=2$). Η γειτονιά διπλής μετατόπισης περιλαμβάνει την γειτονιά ανταλλαγής, που είναι η ανταλλαγή των πρακτόρων που έχουν ανατεθεί σε δύο διαφορετικά καθήκοντα, μέσα στο φάσμα της. Στην γειτονιά μακριάς αλυσίδας, το καθήκον για κάθε κίνηση μετατόπισης επιλέγεται από τη λίστα Β. Στη γειτονιά διπλής μετατόπισης, η νέα κίνηση μετατόπισης καθορίζεται από τη χρήση του συνόλου όλων των καθηκόντων, μιας που δεν υπάρχει κανένας περιορισμός στην επίτευξη μιας νέας κίνησης μετατόπισης. Μία απλουστευμένη εκδοχή της γειτονιάς φαίνεται στο Σχήμα 5.

Γειτονιά μακριάς αλυσίδας: Ένας γείτονας αντλείται από την εκτέλεση των πολλαπλών κινήσεων μετατόπισης των οποίων το μήκος καθορίζεται ως μήκος αλυσίδας. Εδώ παρουσιάζονται μία απλή εξήγηση της δομής της γειτονιάς και τα βασικά βήματα του αλγορίθμου, αλλά περισσότερες λεπτομέρειες μπορούν να βρεθούν στον Yagiura και άλλους (2004). Ας υποθέσουμε ότι το καθήκον i απορρίπτεται από τον πράκτορα σ () ως ελεύθερο καθήκον όπου το ... υποδηλώνει τον πράκτορα στον οποίο έχει ανατεθεί το καθήκον i . Η ποσότητα του πόρου του ... αυξάνεται από την κίνηση απόρριψης. Η ωφέλεια χαρακτηρίζεται ως το αποτέλεσμα-ποσό του πόρου .

Αν υποθέσουμε ότι το καθήκον είναι το έργο του οποίου η μετατόπιση είναι πιο αποδοτική ανάμεσα στα έργα που ικανοποιούν. Το έργο μετατρέπεται σε πράκτορα. Αυτό χρησιμοποιείται ως δομή αναφοράς. Μετά την πρώτη κίνηση απόρριψης, το ελεύθερο έργο θα προσπαθήσει να ανατεθεί σε κάποιους άλλους πράκτορες σύμφωνα με την επίδραση του στη συνάρτηση fitness. Αυτό ονομάζεται δοκιμαστική κίνηση. Η επόμενη κίνηση απόρριψης εφαρμόζεται στην προηγούμενη δομή αναφοράς και όχι στις λύσεις που παράγονται από τις δοκιμαστικές κινήσεις. Τα ίδια βήματα επαναλαμβάνονται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού. Ο γενικός μηχανισμός της γειτονιάς μακριάς αλυσίδας παρουσιάζεται στο

Έργο 5 επιλέγεται ως ελεύθερο έργο και απομακρύνεται από τον Πράκτορα 2. Μετά την αναβάθμιση της ωφέλειας (TaskS), το Έργο 13 καθορίζεται από την κίνηση μετατόπισης που έχει την καλύτερη βαθμολογία ανάμεσα στα άλλα έργα που ικανοποιούν την ωφέλεια (Task5). Το Έργο 13 απομακρύνεται από τον Πράκτορα 5 και ανατίθεται στον Πράκτορα 2. Αυτή είναι η δομή αναφοράς για αυτή τη γειτονιά. Στο επόμενο βήμα, καθορίζεται μία δοκιμαστική κίνηση για την ανάθεση του ελεύθερου Έργου 5 σε έναν πράκτορα, σύμφωνα με την επίδραση της ανάθεσης στην τιμή συνάρτησης fitness. Αν υποθέσουμε ότι ο Πράκτορας 1 είναι καθορισμένος, το Έργο 5 ανατίθεται σε αυτόν τον πράκτορα για να ολοκληρωθεί η δοκιμαστική κίνηση. Το αποτέλεσμα μιας δοκιμαστικής κίνησης είναι μία ολοκληρωμένη γειτονιά για την αρχική λύση. Αυτή η γειτονιά επιτυγχάνεται εφαρμόζοντας $l=2$ (δύο κινήσεις μετατόπισης) κάτι που ονομάζεται γειτονιά διπλής μετατόπισης. Αν το μήκος της αλυσίδας απόρριψης > 2 , τότε τα ίδια βήματα επαναλαμβάνονται στην προηγούμενη δομή αναφοράς, η οποία στην περίπτωση του ελεύθερου έργου δεν ανατίθενται σε κάποιο πράκτορα. Στο Σχήμα 6, η ωφέλεια (Task!3) αναβαθμίζεται και το Έργο 2 καθορίζεται από την επόμενη κίνηση μετατόπισης. Αφού το Έργο 2 ανατεθεί στον Πράκτορα 5, μία καινούρια δοκιμαστική κίνηση εκτελείται για να ανατεθεί έργο απόρριψης. Αν υποθέσουμε ότι ο πιο αποδοτικός πράκτορας είναι ο Πράκτορας 2, το Έργο 5 ανατίθεται στον Πράκτορα 2 για να επιτευχθεί η λύση της ολοκληρωμένης γειτονιάς. Αυτή είναι η μακριά αλυσίδα με μήκος 3 (τρεις κινήσεις μετατόπισης). Τα ίδια βήματα επαναλαμβάνονται για να ολοκληρωθεί το προηγούμενο καθορισμένο μήκος απόρριψης.

Υπολογιστική Μελέτη

Ο προτεινόμενος ABC αλγόριθμος κωδικοποιείται ως C# και δοκιμάζεται σε ένα σύνολο προβλημάτων που ξεκινούν από 5 παράγοντες-15 έργα και φτάνουν μέχρι 10 παράγοντες-60 έργα. Αυτά τα δοκιμαστικά προβλήματα είναι διαθέσιμα στο κοινό στο www.OR-Library.com. Το σύνολο των δοκιμαστικών προβλημάτων μπορεί να χωριστεί σε δύο ομάδες: τα Gap1-Gap6/easy και τα Gap7-Gap12/difficult. Κάθε σύνολο προβλημάτων αποτελείται από 5 διαφορετικά προβλήματα με το ίδιο μέγεθος, έτσι υπάρχουν $12 \times 5 = 60$ προβλήματα προς επίλυση. Αυτό το σύνολο των προβλημάτων είναι η μέγιστη μορφή του GAP και οι βέλτιστες τιμές είναι γνωστές.

Σε αυτήν την ενότητα, σχεδιάζεται ένα απλό παράδειγμα GAP για να εξηγηθεί η εκτέλεση μίας επανάληψης του προτεινόμενου ABC αλγορίθμου. Ένα παράδειγμα που αποτελείται από ένα πρόβλημα ανάθεσης με 3 πράκτορες και 6 έργα εφαρμόζεται για την επίλυση ενός προβλήματος ελαχιστοποίησης. Μία λύση μελισσών εμφανίζεται ως σειρά καθηκόντων που περιέχει την ανάθεση των πρακτόρων.

Στο παράδειγμα υπάρχουν 3 Απασχολούμενες μέλισσες και 5 Παρατηρητές. Οι αρχικές λύσεις της αποικίας μελισσών παράγονται χρησιμοποιώντας τον GRAH αλγόριθμο. Μία δομή μετατόπισης γειτονιάς εφαρμόζεται σε κάθε Απασχολούμενη Μέλισσα. Για την Μέλισσα 1, μετά την μετατόπιση γειτονιάς, βρίσκεται μία καλύτερη λύση με την αλλαγή της ανάθεσης του Έργου 1 από τον Πράκτορα 2 στον Πράκτορα 1. Έτσι, η αρχική λύση Μέλισσα 1 μετατρέπεται σε λύση γειτονιάς όπως φαίνεται στο Σχήμα 7. Στο επόμενο βήμα, εφαρμόζεται η διπλή μετατόπιση γειτονιάς σε μια νέα Μέλισσα 1. Μιας που δεν υπάρχει καλύτερη λύση από την Μέλισσα 1, η λύση απασχολούμενη

μέλισσα δεν αλλάζει στην γειτονιά. Τα βήματα της μετατόπισης και της διπλής μετατόπισης επαναλαμβάνονται για τη Μέλισσα 2 και 3. Μετά από αυτά τα βήματα, δημιουργείται μία μεταβατική αποικία μελισσών για να καθοριστούν οι πιθανότητες. Αυτές οι πιθανότητες υπολογίζονται χρησιμοποιώντας την εξίσωση στον Πίνακα 3 (3.2.c) για να καθορίσουν τον αριθμό των παρατηρητών μελισσών που ανατίθενται σε κάθε απασχολούμενη μέλισσα. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, η χειρότερη μέλισσα (Μέλισσα 3) διατηρεί το μικρότερο αριθμό παρατηρητών μελισσών. Για κάθε απασχολούμενη μέλισσα, εφαρμόζεται η γειτονιά αλυσίδας απόρριψης και η ποσότητα των γειτόνων που παράγονται καθορίζεται σύμφωνα με τον αριθμό των παρατηρητών που ανατίθενται σε κάθε απασχολούμενη μέλισσα. Η τιμή fitness των παρατηρητών μελισσών συγκρίνεται με την αρχική (τιμή) της απασχολούμενης μέλισσας και ο καλύτερος παρατηρητής επιλέγεται ως νικητής. Η αναβαθμισμένη αποικία μελισσών για την επόμενη επανάληψη φαίνεται στο Σχήμα 7. Εκτός από αυτό το στάδιο αναβάθμισης, η καλύτερη εφικτή λύση μέσα στην αποικία των μελισσών συγκρίνεται και με την καλύτερη λύση που έχει βρεθεί ως τώρα. Αν η απασχολούμενη μέλισσα υπερτερεί της καλύτερης λύσης, τότε αυτή αναβαθμίζεται.

Πειραματική Οργάνωση για Προβλήματα GAP

Οι παράμετροι για τον προτεινόμενο αλγόριθμο καθορίζονται ως εξής:

- Αριθμός απασχολούμενων μελισσών (n)
- Αριθμός παρατηρητών μελισσών ($m > n$)
- Αριθμός ανιχνευτών μελισσών ($0.1 * n$)
- Μέγιστος αριθμός επαναλήψεων (Iteration)
- Αρχική τιμή συντελεστή ποινής (...)
- Μήκος γειτονιάς αλυσίδας απόρριψης (EC-Length)

Η συνάρτηση ποινής χρησιμοποιείται για να υπολογίσουμε την συνάρτηση fitness. Κατά τη διάρκεια κατασκευής αρχικών λύσεων χρησιμοποιώντας τον GRAH αλγόριθμο και παραγωγής γειτόνων χρησιμοποιώντας τους αλγορίθμους μετατόπισης, διπλής μετατόπισης και αλυσίδας απόρριψης, η προτεινόμενη προσέγγιση επιτρέπει την παραγωγή ανέφικτων λύσεων. Κατά συνέπεια, υπάρχει ένας επιπλέον όρος στην αντικειμενική συνάρτηση που καθορίζεται βάζοντας ποινή στις ανέφικτες λύσεις με συντελεστή ... ($\dots > 0$). Η συνάρτηση fitness υπολογίζεται .

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης υποδηλώνει το συνολικό κόστος των αναθέσεων έργων σε πράκτορες. Ο δεύτερος όρος ορίζεται ως μία επιπλέον συνάρτηση ποινής για ελαχιστοποίηση, το ... αντιπροσωπεύει το κόστος χρησιμοποίησης μίας μονάδας υπερφορτωμένης χωρητικότητας... πράκτορα. Οι αρχικές τιμές του ... ορίζονται ως παράμετροι καθοριζόμενοι από το χρήστη. Αν μία λύση δεν είναι εφικτή, ο δεύτερος όρος θα είναι θετικός και άρα η έρευνα θα οδηγηθεί σε εφικτή λύση. Αν η χωρητικότητα δεν ξεπεραστεί, αυτός ο όρος θα είναι 0 για να εξασφαλιστεί ότι δεν θα υπάρχει ποινή. Η παράμετρος ... μπορεί να αυξηθεί κατά τη διάρκεια της δοκιμής για να δώσει ποινή σε ανέφικτες λύσεις και να οδηγήσει την έρευνα σε εφικτές κάτι που δείχνει τον ευπροσάρμοστο έλεγχο του κόστους των ποινών.

Οι αρχικές τιμές των ... σχεδιάζονται ως καθοριζόμενες από τον χρήστη ($\dots > 0$). Το στάδιο αναβάθμισης προσαρμόζεται από τον Yagiura και άλλους (2004) χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες εξισώσεις. Μετά την παραγωγή των παρατηρητών γειτόνων κάθε απασχολούμενης μέλισσας οι τιμές ... αναβαθμίζονται.

1. Αν δεν υπάρχει εφικτή λύση στους παρατηρητές γείτονες, αυξάνονται για όλα τα
2. (Διαφορετικά) Αν υπάρχει τουλάχιστον μία εφικτή λύση στους παρατηρητές γείτονες, τότε όλα τα μειώνονται χρησιμοποιώντας τις ίδιες εξισώσεις .

Οργάνωση Παραμέτρων

Οι παράμετροι των αλγορίθμων εκλαμβάνονται ως δύο διαφορετικές ομάδες. Όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, οι ομάδες προβλημάτων Gap1 έως Gap6 ορίζονται ως εύκολες ενώ οι Gap7 έως Gap12 ως δύσκολες. Αναλόγως, ορίζονται δύο διαφορετικές ομάδες παραμέτρων.

Αξιολογούνται πέντε δοκιμές για κάθε πρόβλημα. Διαφορετικοί αλγόριθμοι που έλυσαν το Gap1 και Gap12 στην βιβλιογραφία χρησιμοποιούνται για σύγκριση. Οι τιμές στον Πίνακα 8 αντιπροσωπεύουν την μέση απόκλιση από την βέλτιστη τιμή για κάθε ομάδα προβλημάτων. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος βρήκε τις βέλτιστες λύσεις και για τις πέντε δοκιμές για όλες τις ομάδες προβλημάτων με παραμέτρους προηγουμένως καθορισμένες. Μετά τη σύγκριση με άλλους 12 αλγόριθμους, ο προτεινόμενος αλγόριθμος έχει αναμφίβολα την καλύτερη απόδοση.

Σε αυτή τη μελέτη εξηγείται με λεπτομέρεια ένα σχετικό νέο μέλος της οικογένειας της νοημοσύνης του σμήνους που ονομάζεται 'αποικία τεχνητών μελισσών'. Για την ακρίβεια, χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά ονόματα στην βιβλιογραφία για τους αλγόριθμους που έχουν εμπνευστεί από τις πραγματικές μελιτοφόρες μέλισσες. Εδώ, προτιμάμε να χρησιμοποιούμε τον όρο 'αποικία τεχνητών μελισσών' για να δείξουμε τα χαρακτηριστικά πληθυσμού του αλγορίθμου. Σε αυτή τη μελέτη, παρουσιάζεται μια λεπτομερής βιβλιογραφική επισκόπηση μαζί με

μία κατηγοριοποίηση. Γίνεται προσπάθεια να αξιολογηθούν όλες οι προηγούμενες προσβάσιμες εργασίες πάνω στους αλγορίθμους βελτιστοποίησης βασισμένες στις μέλισσες. Το μεγαλύτερο μέρος της εργασίας πάνω στη βιβλιογραφία διεξάγεται τα τελευταία δύο χρόνια και οι ερευνητές επικεντρώθηκαν κυρίως στην συνεχή βελτιστοποίηση των προβλημάτων TSP. Προηγούμενες εργασίες έδειξαν ότι οι αλγόριθμοι που είναι εμπνευσμένοι από τις μέλισσες έχουν πολλά υποσχόμενες δυνατότητες για μοντελοποίηση και επίλυση πολύπλοκων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Παρόλα αυτά όμως, έχουμε μπροστά μας πολύ δρόμο ακόμα όσον αφορά την πλήρη χρήση των δυνατοτήτων των αλγορίθμων εμπνευσμένων από τις μέλισσες. Επίσης, σε αυτή την μελέτη, γίνεται προσπάθεια να παρουσιαστεί η απόδοση ενός αλγορίθμου εμπνευσμένου από τις μέλισσες, μιας ‘αποικία τεχνητών μελισσών’ σε ένα NP-hard πρόβλημα που είναι γνωστό ως γενικευμένο πρόβλημα ανάθεσης. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος μελισσών είναι πολύ αποτελεσματικός στην επίλυση μικρού προς μεσαίου μεγέθους γενικευμένα προβλήματα ανάθεσης. Για την ακρίβεια, ο προτεινόμενος αλγόριθμος βρήκε εύκολα όλες τις βέλτιστες λύσεις εκεί όπου οι 12 συγκρινόμενοι αλγόριθμοι δεν μπόρεσαν να τις βρουν στις περισσότερες περιπτώσεις. Η έρευνα μας ακόμη προχωράει και ελπίζουμε να βρούμε αποτελεσματικές λύσεις για μεγάλου μεγέθους γενικευμένα προβλήματα ανάθεσης με πολλούς περιορισμούς. Αυτά τα προβλήματα είναι πολύ περίπλοκα, άρα η επίλυση τους μπορεί να θεωρηθεί ως μία πολύ καλή ένδειξη για την προοπτική των εμπνευσμένων από τη φύση αλγορίθμων συμπεριλαμβανομένης και της ‘αποικία τεχνητών μελισσών’.

Μία Προσέγγιση Ανόπτησης στις Τροχιές των Γαμήλιων Πτήσεων στον Αλγόριθμο Βελτιστοποίησης Μελιτοφόρων Μελισσών Ο γάμος στην Βελτιστοποίηση των Μελιτοφόρων Μελισσών (MBO) είναι μία νέα τεχνική στην νοημοσύνη του σμήνους εμπνευσμένη από τη γαμήλια διαδικασία των μελιτοφόρων μελισσών. Αποδείχτηκε ότι είναι πολύ αποτελεσματική στην επίλυση μιας ειδικής ομάδας στοχαστικών προβλημάτων ικανοποιησιμότητας που ονομάζονται 3-SAT. Στην παρούσα εφαρμογή του MBO, η αποδοχή ενός κηφήνα για ζευγάριωμα καθορίζεται πιθανολογικά χρησιμοποιώντας μία παραλλαγή της συνάρτησης ανόπτησης. Παρόλα αυτά, ο αλγόριθμος δεν εφαρμόζει ακριβώς μια προσέγγιση ανόπτησης μιας που ακολουθεί μια καθαρά εξερευνητική στρατηγική. Στην παρούσα φάση, όλες οι μεταβάσεις κατάστασης που γίνονται κατά τη διάρκεια της γαμήλιας πτήσης της βασίλισσας, παράγονται ανεξάρτητα από την φυσική κατάσταση αυτής, και γίνονται πάντα αποδεκτές εφόσον δημιουργούνται και χρησιμοποιούνται για την φωτοκία των κηφήνων. Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι να ερευνήσει μια πιο παραδοσιακή προσέγγιση ανόπτησης για τη διαδικασία της γαμήλιας πτήσης ώστε να ισορροπήσει την εξερεύνηση της αναζήτησης με την εντατικοποίηση της αναζήτησης. Προτείνεται οι τροχιές της γαμήλιας πτήσης της βασίλισσας στο χώρο έρευνας να γίνονται αποδεκτές σύμφωνα με μία πιθανολογική συνάρτηση της fitness της βασίλισσας. Αυτός ο τροποποιημένος MBO αλγόριθμος δοκιμάζεται μέσω της χρήσης μιας ομάδας δύσκολων 3-SAT προβλημάτων που έχουν παραχθεί τυχαία ώστε να συγκριθεί η συμπεριφορά και η αποτελεσματικότητα του απέναντι στην αρχική εφαρμογή. Βρέθηκε ότι η προτεινόμενη προσέγγιση ανόπτησης βελτίωσε μία από τις MBO εφαρμογές και ο MBO ξεπέρασε σε απόδοση όλες τις αυτόνομες SAT ευρετικές συμπεριλαμβανομένης και της WalkSAT.

Η ερευνητική ευρετική που εμπνεύστηκε από τη βιολογική διαδικασία του ‘γάμου’ στις μελιτοφόρες μέλισσες (MBO) αποδείχτηκε ότι είναι πολύ αποτελεσματική όταν εφαρμόζεται σε μία ειδική ομάδα στοχαστικών προβλημάτων ικανοποιησιμότητας (SAT) που ονομάζονται 3-SAT [Garey & Johnson, 1979]. Βρέθηκε ότι ξεπέρασε σε απόδοση γνωστούς αλγορίθμους για SAT, όπως ο WalkSAT, ο GSAT και ο τυχαίος περίπατος [Abbass, 2001a; Abbass, 2001b]. Ο παρών MBO αλγόριθμος για το 3-SAT χρησιμοποιεί μία παραλλαγή της συνάρτησης ανόπτησης και όχι ακριβώς μία προσέγγιση ανόπτησης.

Ο σκοπός αυτής της εργασίας είναι να επεκτείνει το έργο του Abbass με την τροποποίηση του υπάρχοντος MBO αλγόριθμου για να υιοθετήσει μια πιο παραδοσιακή προσέγγιση ανόπτησης και να συγκρίνει την απόδοση της απέναντι στην αρχική MBO εφαρμογή σε μια ομάδα δύσκολων 3-SAT προβλημάτων. Ως τέτοια, η κύρια συνεισφορά αυτής της εργασίας είναι να αναλύσει και να αποσαφηνίσει τις επιδράσεις στην συμπεριφορά του MBO αλγορίθμου που έχει η εφαρμογή διαφορετικών στρατηγικών ανόπτησης για την αποδοχή των τροχιών γαμήλιας πτήσης.

Οι κύριες διαδικασίες στον MBO είναι οι εξής: (1) η γαμήλια πτήση της βασίλισσας με τους κηφήνες, (2) η δημιουργία καινούριων γόνων από τις βασίλισσες, (3) η βελτίωση της φυσικής κατάστασης των γόνων από τις εργάτριες, (4) η προσαρμογή της φυσικής κατάστασης των εργατριών, και (5) η αντικατάσταση της λιγότερο ικανής βασίλισσας (-ων) από τον ικανότερο γόνο (-ους). Η διαδικασία κλειδί που ενδιαφέρει περισσότερο αυτήν την εργασία είναι η διαδικασία (1): η γαμήλια πτήση της βασίλισσας με τους κηφήνες. Σε αυτή τη διαδικασία, μία βασίλισσα φεύγει για την γαμήλια πτήση της και ζευγαρώνει πιθανολογικά με τους κηφήνες που συναντάει στην πτήση της. Στην περίπτωση μιας επιτυχημένης πτήσης, ο γονότυπος του κηφήνα περνάει στην βασίλισσα,

αποθηκεύεται στην σπερματοθήκη της και αργότερα χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της δημιουργίας νέων γόνων μέσω της διασταύρωσης με το γονότυπο της ίδιας της βασίλισσας.

Η γαμήλια πτήση της βασίλισσας μεταφράζεται σε βήματα που ακολουθούνται από τον MBO αλγόριθμο στον χώρο καταστάσεων (γειτονιά) του προβλήματος βελτιστοποίησης. Η παρούσα εφαρμογή του MBO ασχολείται με μία καθαρά εξερευνητική στρατηγική όπου κάθε μία από τις τροχιές της βασίλισσας προς μία νέα θέση στον χώρο καταστάσεων κατά τη διάρκεια της γαμήλιας πτήσης της γίνεται αποδεκτή, φτάνει να δημιουργείται. Στη συνέχεια, ωοτοκείται ένας κηφήνας χρησιμοποιώντας τη θέση της βασίλισσας σε κάθε μία από αυτές τις τροχιές γαμήλιας πτήσης. Χρησιμοποιώντας μία παραλλαγή της προσέγγισης απόπτησης, ο κηφήνας ζευγαρώνει τότε με τη βασίλισσα πιθανολογικά σύμφωνα με μία συνάρτηση που κυβερνάται από την φυσική κατάσταση του κηφήνα και την ταχύτητα της βασίλισσας.

Ο στόχος αυτής της εργασίας είναι να ισορροπήσει την εξερευνητική φύση της παρούσας MBO εφαρμογής με την εντατικοποίηση της έρευνας χρησιμοποιώντας μια πιο παραδοσιακή προσέγγιση απόπτησης για την παραγωγή των τροχιών της γαμήλιας πτήσης της βασίλισσας. Αντί να γίνονται αποδεκτές όλες οι τροχιές που δημιουργούνται κατά τη διάρκεια πτήσης της, τροποποιούμε τον MBO αλγόριθμο ώστε η νέα τροχιά να είναι αποδεκτή μόνο εάν είναι μια κίνηση προς μια 'ικανότερη' λύση χώρου. Διαφορετικά, ο αλγόριθμος θα δεχτεί μία μετάβαση σε μια λιγότερο ιδανική λύση χώρου πιθανολογικά σύμφωνα με μια συνάρτηση της fitness της βασίλισσας. Αυτό είναι το σημείο όπου η προτεινόμενη συνάρτηση απόπτησης θα εισάγει την εντατικοποίηση της έρευνας στον MBO αλγόριθμο. Η εργασία διαρθρώνεται ως εξής: το βιβλιογραφικό υλικό παρουσιάζεται στην ενότητα 2, ο προτεινόμενος αλγόριθμος συζητείται στην ενότητα 3, πειράματα και αντίστοιχα αποτελέσματα αναλύονται στην ενότητα 4, και τα συμπεράσματα βγαίνουν στην ενότητα 5.

Το Στοχαστικό Πρόβλημα Ικανοποιησιμότητας

Η στοχαστική ικανοποιησιμότητα (SAT) είναι το πρόβλημα του να καθορίσουμε αν υπάρχει ανάθεση για μια ομάδα μεταβλητών Boolean σε μια στοχαστική φόρμουλα ώστε αυτή η φόρμουλα να είναι αληθής. Ένα πρόβλημα SAT αποτελείται από τέσσερα συστατικά: (1) ένα σύνολο μεταβλητών, (2) ένα σύνολο σταθερών, (3) ένα σύνολο όρων που αποτελούνται από μία διάζευξη σταθερών και (4) μια θεωρία (Σ) που αποτελείται από μία σύζευξη όρων. Ο σκοπός του SAT είναι να βρει αν υπάρχει ανάθεση τιμών (0 ή 1) στις μεταβλητές Boolean που να επιβεβαιώνει ότι η θεωρία είναι σωστή [Garey & Johnson, 1979].

Το SAT είναι το πρώτο πρόβλημα που δείχνει να είναι NP-πλήρες και είναι επίσης ένα από τα απλούστερα NP-πλήρη προβλήματα προς κατανόηση [Garey & Johnson, 1979]. Έχει μετατραπεί σε ένα ιδιαίτερα ελκυστικό τομέα έρευνας διότι πολλά σχεδιαστικά, προγραμματιστικά και διαγνωστικά προβλήματα μπορεί να τα αντιπροσωπεύσει το SAT. Τα προβλήματα SAT μπορούν να λυθούν είτε μέσω ολοκληρωμένων είτε μέσω ανολοκλήρωτων μεθόδων απαρίθμησης. Οι ολοκληρωμένες μέθοδοι απαρίθμησης εκτελούν μια εξαντλητική έρευνα και εγγυώνται μία λύση εφόσον αυτή υπάρχει αλλά είναι υπολογιστικά πολύ ακριβές και κατά συνέπεια μπορούν να χειριστούν μόνο μικρά προβλήματα. Οι ανολοκλήρωτες μέθοδοι (από την άλλη) ταιριάζουν σε μεγαλύτερα προβλήματα μιας που είναι πολύ πιο γρήγορες στην εκτέλεση αλλά δεν εγγυώνται λύση.

Η συγκεκριμένη ομάδα προβλημάτων SAT που μας ενδιαφέρει ονομάζεται 3-SAT [Garey & Johnson, 1979]. Αυτό σημαίνει ότι όλοι οι όροι στα προβλήματα έχουν ακριβώς τρεις σταθερές. Ένα πρόβλημα στο SAT θεωρείται ένα εύκολο πρόβλημα πριν την μετάβαση φάσης του και μετατρέπεται σε δύσκολο μετά την μετάβαση αυτή. Η μετάβαση φάσης ορίζεται ως η αναλογία του αριθμού των όρων προς τον αριθμό των σταθερών. Η μετάβαση φάσης του 3-SAT βρέθηκε πειραματικά ότι είναι 4.3 [Cook & Mitchell, 1997].

Νοημοσύνη Σμήνους

Η νοημοσύνη του σμήνους είναι ένα αναδυόμενο πεδίο τεχνητής νοημοσύνης εμπνευσμένο από τα συμπεριφοριστικά μοντέλα των κοινωνικών εντόμων όπως είναι τα μυρμήγκια, οι μέλισσες, οι σφήγκες και οι τερμίτες [Bonabeau et. all., 1999]. Αυτή η προσέγγιση χρησιμοποιεί απλούς και ευέλικτους πράκτορες που σχηματίζουν μια συλλογική νοημοσύνη σαν ομάδα. Η νοημοσύνη του σμήνους είναι μια εναλλακτική θεώρηση σε σχέση με τα παραδοσιακά μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, που επιδεικνύει στοιχεία αυτονομίας, ανάδειξης, ευρωστίας και αυτό-οργάνωσης. Με το να είναι υπεραπλουστευμένη και ευέλικτη στον πυρήνα της, γίνεται ιδιαίτερα συμπαθής στους ερευνητές για την επίλυση αληθινών προβλημάτων τα οποία γίνονται όλο και πιο πολύπλοκα στη φύση τους και υπερφορτωμένα με πληροφορίες [Bonabeau et. all., 1999]. Ένα από τα πιο επιτυχημένα μοντέλα νοημοσύνης σμήνους είναι η ομάδα των συνδυαστικών αλγορίθμων βελτιστοποίησης που είναι εμπνευσμένοι από τα μυρμήγκια και ονομάζεται βελτιστοποίηση με αποικία μυρμηγκιών. (ACO) [Dorigo & Di Caro, 1999].

Ο ‘Γάμος’ στις Μελιτοφόρες Μέλισσες

Οι μελιτοφόρες μέλισσες αντιπροσωπεύουν ένα μοναδικό είδος για την διεξαγωγή πειραμάτων πάνω στην συμπεριφοριστική γενετική [Moritz & Brandes, 1987]. Είναι κοινωνικά έντομα που επιδεικνύουν πολλά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά όπως ο καταμερισμός εργασιών, η επικοινωνία σε ατομικό και ομαδικό επίπεδο, και η συνεργατική συμπεριφορά. Η συμπεριφορά των μελιτοφόρων μελισσών είναι ένας συνδυασμός του γονότυπου τους, των συνθηκών της φωλιάς τους και του οικολογικού περιβάλλοντος τους. Έχει συσσωρευτεί πολλή γνώση από τις βιολογικές μελέτες των μελιτοφόρων μελισσών που ξεκινούν από μοριακά γενετικά προβλήματα και φτάνουν μέχρι πολύπλοκα κοινωνικό-γενετικά θέματα. Πιο συγκεκριμένα, η δομή του πληθυσμού των αρσενικών απλοειδών επιτρέπει μοναδική γενετική ανάλυση πληθυσμών που προέρχονται από εκφράσεις γονιδίων τόσο απλοειδών όσο και διπλοειδών ατόμων [Moritz & Brandes, 1987]. Ένας νέος αλγόριθμος νοημοσύνης σμήνους αναπτύχθηκε από τον Abbass, [2001a· 2001b] βασισμένος σε αυτήν την απλοειδή-διπλοειδή γενετική αναπαραγωγική λειτουργία των μελιτοφόρων μελισσών γνωστή και ως ‘Γάμος’ στην Βελτιστοποίηση Μελιτοφόρων Μελισσών (MBO) για την επίλυση συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Παρακάτω ακολουθεί μία σύντομη εισαγωγή στην συμπεριφορά των μελιτοφόρων μελισσών στη φύση και στο τεχνητό αναλογικό της μοντέλο.

Τροποποιημένος MBO για SAT

Αυτή η ενότητα εξηγεί τις τροποποιήσεις που έγιναν στον αρχικό MBO αλγόριθμο και την εφαρμογή του στην επίλυση του στοχαστικού προβλήματος ικανοποιησιμότητας. Η ενότητα 3.1 εξηγεί τη βασική περιγραφή μιας αποικίας μελιτοφόρων μελισσών για την επίλυση του SAT. Η ενότητα 3.2 σκιαγραφεί τις τροποποιήσεις που έγιναν για την ενσωμάτωση μιας πιο παραδοσιακής προσέγγισης ανόπτησης στην αποδοχή νέων τροχιών κατά την γαμήλια πτήση της βασίλισσας. Η ενότητα 3.3 εξηγεί την εφαρμογή του τροποποιημένου MBO αλγορίθμου για την επίλυση του SAT.

Απεικόνιση

Ο γονότυπος των ατόμων αντιπροσωπεύεται από μία σειρά δυαδικών τιμών των οποίων το μήκος ισούται με τον αριθμό των μεταβλητών του προβλήματος. Κάθε κελί στη σειρά αντιστοιχεί σε μία μεταβλητή και του έχει ανατεθεί η τιμή 1 αν η αντίστοιχη μεταβλητή είναι αληθής ή 0 αν είναι ψευδής. Η φυσική κατάσταση ενός συγκεκριμένου γονότυπου αξιολογείται σύμφωνα με τον αριθμό των περιορισμών που ικανοποιείται σε σχέση με τον συνολικό αριθμό περιορισμών στο πρόβλημα.

Κάθε βασίλισσα έχει έναν γονότυπο, μια σπερματοθήκη, ενέργεια και ταχύτητα. Ένας κηφήνας έχει ένα γονότυπο και έναν δείκτη γονότυπου. Μιας που όλοι οι κηφήνες είναι απλοειδείς, απαιτείται ένας δείκτης γονότυπου ώστε να μαρκάρει τυχαία ακριβώς τα μισά γονίδια για να εξασφαλιστεί ότι μόνο τα μισά γονίδια χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ενός νέου γόνου. Ο γόνος έχει μόνο ένα γονότυπο και δημιουργείται αντιγράφοντας πάνω στα μη μαρκαρισμένα γονίδια του κηφήνα και συμπληρώνοντας τον απλοειδή γονότυπο με τα γονίδια της βασίλισσας ώστε να ολοκληρωθεί το νέο γένωμα του γόνου. Μιας που οι εργάτριες χρησιμοποιούνται μόνο για να βελτιωθεί η φυσική κατάσταση των γόνων, κάθε εργάτρια είναι απλά μια ευρετική. Πέντε διαφορετικές ευρετικές χρησιμοποιούνται σε αυτήν την εργασία: GSAT, τυχαίος περίπατος, πιθανολογική άπληστη, one-point διασταύρωση, και WalkSAT. Η πιθανολογική άπληστη ευρετική αποδέχεται όλες τις λύσεις που είναι καταλληλότερες από την παρούσα καλύτερη λύση και μόνο πιθανολογικά δέχεται λύσεις που είναι λιγότερο κατάλληλες. Η ευρετική one-point διασταύρωση απλά δια-σταυρώνει το γονότυπο του γόνου με ένα τυχαία παραγόμενο γονότυπο.

Προτεινόμενη Τροποποίηση του MBO

Στον MBO αλγόριθμο, υπάρχουν δύο σημαντικές αποφάσεις αποδοχής κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της γαμήλιας πτήσης: (1) η αποδοχή μιας τροχιάς γαμήλιας πτήσης ως πιθανός κηφήνας, και (2) η αποδοχή ενός κηφήνα για ζευγάρι με τη βασίλισσα. Στην αρχική εκδοχή του MBO, η πιθανότητα να γίνει αποδεκτή μια τροχιά γαμήλιας πτήσης ως πιθανός κηφήνας ισούται με 1, που σημαίνει ότι είναι πάντα αποδεκτή εφόσον δημιουργηθεί, ενώ η πιθανότητα ένας κηφήνας να γίνει αποδεκτός για ζευγάρι με τη βασίλισσα υπόκειται σε μια παραλλαγή της συνάρτησης ανόπτησης. Η συνάρτηση ανόπτησης σε αυτήν την περίπτωση επηρεάζει μόνο το ποιος γονότυπος κηφήνα θα αποθηκευτεί επιτυχώς στην σπερματοθήκη της βασίλισσας και δεν καθοδηγεί τις μεταβάσεις καταστάσεων που έγιναν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ως τέτοια, η έρευνα που γίνεται από τον αρχικό MBO αλγόριθμο είναι καθαρά εξερευνητική.

Η πρόταση σε αυτήν την εργασία είναι να χρησιμοποιηθεί μια πιο παραδοσιακή μέθοδος ανόπτησης για τη διαδικασία της γαμήλιας πτήσης. Ο στόχος αυτής της τροποποίησης είναι να γίνει χρήση μιας πιο παραδοσιακής

μεθόδου ανόπτησης κατά τη διάρκεια της απόφασης αποδοχής τροχιάς ώστε να κατευθύνει τη διαδικασία έρευνας προς ένα πιο ιδανικό χώρο λύσης, με άλλα λόγια να επιτρέψει να συμβεί η εντατικοποίηση έρευνας. Νέες τροχιές θα γίνουν αποδεκτές τώρα μόνο ως πιθανός κηφήνας για ζευγάρι αν είναι μια πιο ιδανική τροχιά, δηλαδή αν αυτή η τροχιά είναι καλύτερη από το γονότυπο της βασίλισσας. Διαφορετικά, αν είναι μια τροχιά που οδηγεί την έρευνα σε ένα λιγότερο ιδανικό χώρο λύσης, τότε θα γίνει μόνο αποδεκτή πιθανολογικά και θα υπόκειται σε μια νέα συνάρτηση ανόπτησης. Με άλλα λόγια, η πιθανότητα να γίνει δεκτή μια νέα μετάβαση κατάστασης δεν ισούται πλέον με το 1 αλλά είναι τώρα συνάρτηση της fitness της βασίλισσας. Μιας που νέες μεταβάσεις κατάστασης έχουν ήδη υποβληθεί σε μια συνάρτηση ανόπτησης κατά την απόφαση τροχιάς, δεν απαιτούνται περαιτέρω δοκιμές για την απόφαση του ζευγαρώματος. Όλοι οι κηφήνες θα ζευγαρώνουν πάντα επιτυχώς με τη βασίλισσα στην προτεινόμενη εκδοχή. Αυτό σημαίνει ότι η τροχιά που θα κωδικοποιηθεί από το γονότυπο του κηφήνα θα είναι πάντα αποθηκευμένη στην σπερματοθήκη της βασίλισσας για όσο είναι αποδεκτή κατά την απόφαση της τροχιάς. Η νέα συνάρτηση ανόπτησης που προτείνεται είναι:

όπου αντιπροσωπεύει την πιθανότητα της τροχιάς R να γίνει αποδεκτή ως πιθανός κηφήνας D. $\Delta(f)$ είναι η διαφορά ανάμεσα στη fitness την νέας τροχιάς και τη fitness του γονότυπου της βασίλισσας, και $S(t)$ είναι η ταχύτητα της βασίλισσας σε χρόνο t.

Ο Αλγόριθμος

Ο τροποποιημένος αλγόριθμος παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.

Όρισε αριθμό βασίλισσών Q, εργατριών W, γόνων B, γαμήλιες πτήσεις G, μέγεθος σπερματοθήκης M, βελτιώσεις γόνων P

Όρισε ως energy και speed την ενέργεια και την ταχύτητα της βασίλισσας αντίστοιχα

Ξεκίνησε κάθε εργάτρια με μια ξεχωριστή ευρετική

Ξεκίνησε κάθε γονότυπο βασίλισσας τυχαία

Επέλεξε μια εργάτρια τυχαία και εφάρμοσε την για να βελτιωθεί ο γονότυπος της βασίλισσας

ενώ αριθμός γαμήλιων πτήσεων G ή λύση δεν βρίσκεται

για βασίλισσα = 1 έως Q

ξεκίνησε energy και speed τυχαία ανάμεσα σε [0.5,1]

ξεκίνησε βήμα = 0.5 energy / M

ξεκίνησε τροχιά τυχαία

ενώ energy > 0

δημιούργησε νέα τροχιά αλλάζοντας κάθε μεταβλητή με μια πιθανότητα speed

αξιολόγησε τη fitness της νέας τροχιάς

αν η νέα τροχιά είναι καλύτερη τότε

αποδέξου νέα τροχιά ως πιθανό κηφήνα

αν η σπερματοθήκη της βασίλισσας δεν είναι γεμάτη τότε

πρόσθεσε σπέρμα κηφήνα στην σπερματοθήκη της βασίλισσας

τέλος εάν

διαφορετικά αν η νέα τροχιά είναι κατώτερη τότε

αποδέξου μόνο τη νέα τροχιά πιθανολογικά ως πιθανό κηφήνα

αν η σπερματοθήκη της βασίλισσας δεν είναι γεμάτη τότε

πρόσθεσε σπέρμα κηφήνα στην σπερματοθήκη της βασίλισσας

τέλος εάν

τέλος εάν

energy = energy - γ

speed = speed ... α

τέλος ενώ

τέλος ενώ

για γόνου = 1 έως B

επέλεξε μια βασίλισσα σε αναλογία με τη fitness της

επέλεξε σπέρμα από την σπερματοθήκη της βασίλισσας τυχαία

δημιούργησε ένα γόνου διασταυρώνοντας το γονιδίωμα της βασίλισσας με το επιλεγμένο σπέρμα

μετάλλαξε τον γονότυπο του γόνου που δημιουργήθηκε

επέλεξε μια εργάτρια σε αναλογία με τη fitness της

για βελτιώσεις = 1 έως P

χρησιμοποίησε την επιλεγμένη εργάτρια για τη βελτίωση του γονότυπου του γόνου

τέλος για
 αναβάθμισε τη fitness της εργάτριας βασισμένος στην ποσότητα της βελτίωσης του γόνου
 τέλος για
 ενώ ο καλύτερος γόνος είναι καλύτερος από τη χειρότερη βασίλισσα
 αντικατέστησε την λιγότερο δυνατή βασίλισσα με τον καλύτερο γόνο
 απομάκρυνε τον καλύτερο γόνο από την λίστα των γόνων
 τέλος ενώ
 σκότωσε όλους τους γόνους
 τέλος για

Στο ξεκίνημα του αλγόριθμου, απαιτούνται έξι παράμετροι: (1) ο αριθμός των βασιλισσών, (2) ο αριθμός των εργατριών, (3) ο αριθμός των γόνων, (4) ο αριθμός των γαμήλιων πτήσεων, (5) το μέγεθος της σπερματοθήκης της βασίλισσας, και (6) ο αριθμός των βελτιώσεων των γόνων.

Στη διαδικασία της έρευνας, οι βασίλισσες αντιπροσωπεύουν ελιτίστικες λύσεις ενώ οι εργάτριες αντιπροσωπεύουν ευρετικές που χρησιμοποιούνται για να εκτελέσουν τοπική έρευνα σε δοκιμαστικές λύσεις. Ο αριθμός των γόνων που δημιουργήθηκαν ανά γαμήλια πτήση πολλαπλασιασμένος με τον αριθμό των γαμήλιων πτήσεων καθορίζει τον συνολικό αριθμό των δοκιμαστικών λύσεων που δημιουργούνται ανά διαδρομή. Το μέγεθος της σπερματοθήκης αντιπροσωπεύει το συνολικό πιθανό αριθμό των ζευγαρωμάτων ανά βασίλισσα ανά γαμήλια πτήση και ο αριθμός των βελτιώσεων των γόνων καθορίζει το ποσό της τοπικής έρευνας που εκτελέστηκε από μια ευρετική σε κάθε δοκιμαστική λύση.

Στην αρχή του αλγόριθμου, κάθε μία από τις εργάτριες ξεκινάει με κάποια ευρετική. Ένα σύνολο βασιλισσών παράγεται τυχαία και οι γονότυποι τους βελτιώνονται χρησιμοποιώντας μία τυχαία επιλεγμένη ευρετική για να διατηρηθεί η θεώρηση ότι οι βασίλισσες συνήθως έχουν τα καλύτερα γονίδια. Ένα σύνολο γαμήλιων πτήσεων γίνεται αποδεκτό από τις βασίλισσες σύμφωνα με τις ταχύτητες και τις ενέργειες τους.

Στην αρχή μιας γαμήλιας πτήσης, η ενέργεια της βασίλισσας και η ταχύτητα της ξεκινούν τυχαία ανάμεσα σε [0,5, 1] ώστε να εξασφαλιστεί ότι θα πετάει για ένα ορισμένο αριθμό φορών, και η τροχιά ξεκινάει τυχαία. Νέες τροχιές γαμήλιων πτήσεων δημιουργούνται κατόπιν μέσω πιθανολογικού τινάγματος κάθε κομματιού στον παρόντα γονότυπο τροχιάς σύμφωνα με την ταχύτητα της βασίλισσας. Ως τέτοια, η πιθανότητα να γίνουν μεγαλύτερα βήματα στον χώρο έρευνας είναι αυξημένη στην αρχή της ερευνητικής διαδικασίας και μειώνεται ανάλογα καθώς μειώνεται η ταχύτητα της βασίλισσας. Νέες τροχιές θα γίνουν αποδεκτές ως πιθανοί κηφήνες σύμφωνα με την προτεινόμενη συνάρτηση απόπτωσης. Αν μια νέα τροχιά γίνει αποδεκτή, τότε το σπέρμα του κηφήνα θα αποθηκευτεί στην σπερματοθήκη της βασίλισσας χωρίς περαιτέρω αποφάσεις ζευγαρώματος μιας που η μετάβαση κατάστασης έχει ήδη υποβληθεί σε μια συνάρτηση απόπτωσης κατά την απόφαση αποδοχής τροχιάς.

Όταν όλες οι βασίλισσες έχουν ολοκληρώσει τις γαμήλιες πτήσεις τους, η διαδικασία παραγωγής γόνων ξεκινάει. Για την δημιουργία ενός νέου γόνου, μια βασίλισσα επιλέγεται σε αναλογία με την φυσική της κατάσταση και το σπέρμα επιλέγεται τυχαία από την επιλεγμένη σπερματοθήκη της βασίλισσας. Ένας νέος γόνος παράγεται διασταυρώνοντας το γονίδιο της βασίλισσας με το επιλεγμένο σπέρμα. Η μετάλλαξη εφαρμόζεται κατόπιν στο νέο γόνο και μια εργάτρια επιλέγεται σε αναλογία με την φυσική της κατάσταση για να βελτιωθεί ο γονότυπος του νέου γόνου. Η fitness της εργάτριας αναβαθμίζεται στη συνέχεια σύμφωνα με το ποσό βελτίωσης που έχει επιτευχθεί από το γόνο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τον απαιτούμενο αριθμό των γόνων. Στη συνέχεια οι νέοι βελτιωμένοι γόνοι ταξινομούνται σύμφωνα με την φυσική τους κατάσταση και οι πιο αδύναμες βασίλισσες αντικαθίστανται με ικανότερους γόνους μέχρι να μην υπάρχει κανένας γόνος που να είναι ικανότερος από οποιαδήποτε βασίλισσα. Όλοι οι εναπομείναντες γόνοι κατόπιν σκοτώνονται και ένα νέο σύνολο γαμήλιων πτήσεων ξεκινά. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι όλες οι γαμήλιες πτήσεις να έχουν ολοκληρωθεί ή μέχρι να βρεθεί μία λύση.

Πειράματα-Πειραματική Οργάνωση

Οι σκοποί αυτών των πειραμάτων είναι να δοκιμάσουν και να αναλύσουν την συμπεριφορά και την απόδοση του προτεινόμενου MBO αλγόριθμου ο οποίος χρησιμοποιηθεί μια πιο παραδοσιακή προσέγγιση απόπτωσης για τη διαδικασία έρευνας. Η πρώτη ομάδα πειραμάτων δοκιμάζει τον προτεινόμενο αλγόριθμο απέναντι στην εφαρμογή του αρχικού αλγόριθμου, χρησιμοποιώντας τις πέντε διαφορετικές ευρετικές για τις εργάτριες (GSAT, τυχαίος περίπατος, πιθανολογική άπληστη, one-point διασταύρωση, και WalkSAT) λειτουργώντας σε συνδυασμό ως μια επιτροπή ευρετικών (η προσέγγιση επιτροπής-μηχανήματος). Η δεύτερη ομάδα αντιγράφει την πρώτη ομάδα πειραμάτων με τη διαφορά ότι όλοι οι MBO αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μόνο μία ευρετική για τις εργάτριες (την μονή-ευρετική προσέγγιση) και επαναλαμβάνεται για κάθε μία από τις πέντε διαφορετικές ευρετικές. Η τελική ομάδα πειραμάτων δοκιμάζει κάθε μία από τις πέντε διαφορετικές ευρετικές δουλεύοντας χωρίς τον MBO αλγόριθμο. Αυτό συμβαίνει για να μπορέσουν να γίνουν παρατηρήσεις πάνω στο ποιες επιδράσεις έχει η MBO

μετά-ευρετική στην απόδοση των βασικών ευρετικών. Στην δική μας εφαρμογή, όλες οι εκδοχές των ευρετικών που χρησιμοποιούνται ανεξάρτητα, έξω από τον MBO, είναι πανομοιότυπες με αυτές που χρησιμοποιούνται μέσα στον MBO. Αυτό εξασφαλίζει ότι η αποτελεσματικότητα της εφαρμογής θα είναι σίγουρη ώστε να μπορέσει να γίνει μια δίκαιη σύγκριση απόδοσης ανάμεσα στις διαφορετικές προσεγγίσεις αλγορίθμων.

Σε αυτήν την εργασία, ορίζονται δύο από τις έξι παραμέτρους καθοριζόμενες από τον χρήστη για τους MBO αλγόριθμους: ο αριθμός των βασιλισσών ορίζεται στο 1 και το μέγεθος της έρευνας ορίζεται στο 200. Στην αρχική εργασία, αυτές οι τιμές απεδείχθη ότι δουλεύουν καλά για την επίλυση δύσκολων 3-SAT προβλημάτων [Abbass, 2001a· Abbass, 2001b]. Το μέγεθος της σπερματοθήκης της βασίλισσας δοκιμάζεται με το 10, 20, 30, 40, και 50. Για να εξασφαλιστεί μια δίκαιη σύγκριση με τις ευρετικές να δουλεύουν χωρίς τον MBO, κάθε δοκιμή ορίζεται να παράγει 6000 πειραματικές λύσεις. Ως τέτοιος, ο αριθμός των γαμήλιων πτήσεων ορίζεται στο 600, 300, 200, 150 και 120, με τον αριθμό των γόνων που παράγονται ανά πτήση να ορίζεται στο 10, 20, 30, 40 και 50 αντίστοιχα. Παρομοίως, για τα πειράματα που δοκιμάζουν τις ευρετικές που δουλεύουν ανεξάρτητα, έξω από τον MBO, ο αριθμός των πειραματικών λύσεων ορίζεται στο 6000 και ο αριθμός των βελτιώσεων σε κάθε πειραματική λύση ορίζεται στο 200.

Ο παράγοντας μείωσης της ταχύτητας της βασίλισσας, α , θεωρείται ότι είναι 0.9 και το βήμα μείωσης για την ενέργεια της βασίλισσας, γ , θεωρείται ότι είναι $(0.5 \times E(0) / M$, όπου $E(0)$ είναι το αντικείμενο αρχικής ενέργειας στην αρχή της γαμήλιας πτήσης, που ξεκινάει τυχαία, και M είναι το μέγεθος της σπερματοθήκης. Ο ρυθμός μετάλλαξης σταθεροποιείται στο 1% σε όλες τις δοκιμές. Αυτές οι τιμές είναι παρόμοιες με αυτές που χρησιμοποιούνται στην αρχική εργασία [Abbass, 2001a· Abbass, 2001b].

Δέκα διαφορετικά 3-SAT προβλήματα δημιουργήθηκαν ομοιόμορφα, κάθε ένα αποτελούμενο από 1075 περιορισμούς και 250 μεταβλητές. Αυτό διασφαλίζει ότι όλα τα προβλήματα τοποθετούνται στη μετάβαση φάσης των 3-SAT, που συμβαίνει με ποσοστό 4.3 ανάμεσα στον αριθμό των όρων και των αριθμό των σταθερών. Ως τέτοια, όλα τα προβλήματα είναι δύσκολα και οι λύσεις δεν μπορούν να εγυνηθούν ότι υπάρχουν. Κάθε πρόβλημα δοκιμάστηκε 10 φορές για κάθε πειραματική οργάνωση και κάθε οργάνωση ξεκίνησε τυχαία.

Για να εδραιωθεί μια βάση για συγκρίσεις ανάμεσα στους διαφορετικούς αλγορίθμους, παρουσιάζουμε πρώτα τα αποτελέσματα που αντλούνται από κάθε μία από τις ευρετικές που δούλευαν ως μία εργάτρια μέσα στον MBO, και τελικά και με τις πέντε ευρετικές να συνεργάζονται σαν επιτροπή εργατριών μέσα στον MBO. Η αποτελεσματικότητα των διαφορετικών αλγορίθμων που ερευνήθηκε σε αυτή τη μελέτη συγκρίνεται σύμφωνα με το συνολικό αριθμό των λύσεων που βρέθηκαν από τον αλγόριθμο και το μέσο αριθμό των ανικανοποίητων όρων για τις δοκιμές που δεν είχαν λύσεις.

Αποτελέσματα και Ανάλυση: Ευρετικές που δουλεύουν αυτόνομα (Χωρίς MBO)

Από την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων που αντλήθηκαν, παρατηρήσαμε ότι κάποια προβλήματα ήταν πιθανώς με πολλούς περιορισμούς μιας που κανένας από τους αλγόριθμους δεν μπορούσε να βρει λύσεις ενώ για τα άλλα προβλήματα, κάποιες λύσεις μπορούσαν συστηματικά να βρεθούν από κάποιους αλγόριθμους. Επιλέξαμε το Πρόβλημα 1 σαν ένα αντιπροσωπευτικό πρόβλημα που έχει πιθανώς πολλούς περιορισμούς και το Πρόβλημα 3 ως αντιπροσωπευτικό πρόβλημα που μπορεί να λυθεί.

Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για κάθε ευρετική που δουλεύει ανεξάρτητα, έξω από τον MBO αλγόριθμο, για την επίλυση του Προβλήματος 3.

Καμία από τις ευρετικές δεν μπόρεσαν να βρουν λύση για το Πρόβλημα 3 όταν δούλευαν μόνες, χωρίς τον MBO αλγόριθμο. Σε σχέση με τον μέσο αριθμό των ανικανοποίητων όρων που επιτεύχθηκαν στο τέλος των δοκιμών, η WalkSAT ήταν η ευρετική που απέδωσε καλύτερα, με την GSAT να ακολουθεί από κοντά δεύτερη. Ο τυχαίος περίπατος και η πιθανολογική άπληστη ευρετική ήταν σημαντικά πιο αναποτελεσματικές αλλά έμοιαζαν αρκετά όσον αφορά την σχετική τους απόδοση. Τέλος, η one-point διασταύρωση ήταν η λιγότερο αποτελεσματική ευρετική ανάμεσα σε όλες τις ευρετικές με μεγάλη διαφορά.

Αποτελέσματα και Ανάλυση: Μονή Ευρετική Προσέγγιση που χρησιμοποιεί MBO

Στον Πίνακα 2, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την μονή ευρετική προσέγγιση που χρησιμοποιεί MBO γι την επίλυση του Προβλήματος 3. Κάθε μία από τις πέντε ευρετικές εφαρμόστηκε τόσο στην αρχική όσο και στην προτεινόμενη εκδοχή του MBO, δίνοντας συνολικά 10 διαφορετικούς MBO αλγόριθμους για την μονή ευρετική προσέγγιση. Τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται σύμφωνα με την εκδοχή του MBO και την ευρετική που χρησιμοποιείται στις 10 δοκιμές που διεξήχθησαν για κάθε ένα από τους 25 διαφορετικούς συνδυασμούς μεγέθους σπερματοθήκης και γόνων.

(Πίνακας 2: αποτελέσματα για τον αρχικό (o-) και προτεινόμενο (p-) MBO αλγόριθμο που χρησιμοποιεί τη μονή ευρετική προσέγγιση για το Πρόβλημα 3 σε σχέση με 25 διαφορετικούς συνδυασμούς 10 δοκιμών, ένας για το μέγεθος των γόνων και ένας για το μέγεθος της σπερματοθήκης. Η τελευταία στήλη απεικονίζει το ποσό της σχετικής βελτίωσης που επιτεύχθηκε σε σχέση με τις ευρετικές που δουλεύουν αυτόνομα, έξω τον MBO, σε σχέση με την μείωση του αριθμού των ανικανοποίητων όρων.)

Συνολικά, οι αποδόσεις και των δύο εκδοχών του MBO ήταν αρκετά όμοιες. Για την ακρίβεια, η αποτελεσματικότητα της μονής ευρετικής MBO με χρήση WalkSAT στην εύρεση λύσεων βελτιώθηκε ελαφρά με την νέα συνάρτηση ανόπτησης μιας που η προτεινόμενη εκδοχή του MBO (p-MBO-WSAT) βρήκε περισσότερες λύσεις από την αρχική εκδοχή (o-MBO-WSAT). Σε σχέση με την ελαχιστοποίηση του αριθμού των ανικανοποίητων όρων, τόσο η αρχική όσο και η προτεινόμενη εκδοχή του αλγορίθμου ήταν το ίδιο αποτελεσματικές, αν και η αρχική έκδοση απέδωσε καλύτερα περιφερειακά από την προτεινόμενη εκδοχή όταν χρησιμοποίησε τον GSAT, αλλά όχι σημαντικά. Κατά συνέπεια, τόσο η αρχική όσο και η προτεινόμενη συνάρτηση ανόπτησης που χρησιμοποιήθηκαν κατά την διαδικασία της γαμήλιας πτήσης φαίνονται να είναι όμοια αποτελεσματικές στην επίλυση αυτής της ομάδας προβλημάτων όταν εφαρμοστούν σε ένα μονό ευρετικό MBO αλγόριθμο. Παρόλα αυτά, υπήρχαν πολύ μικρές διαφορές ανάμεσα στις δύο εκδοχές του MBO αλγορίθμου ανάλογα με το ποια ευρετική χρησιμοποιήθηκε.

Το πιο ενδιαφέρον εύρημα που προέκυψε από τη σύγκριση του Πίνακα 1 με τον 2 είναι η προφανής αντίθεση ανάμεσα στις αποδόσεις του WalkSAT όταν εφαρμόζεται ως ευρετική που δουλεύει αυτόνομα, έξω από τον MBO, και όταν εφαρμόζεται ως εργάτρια μέσα στον MBO. Απέτυχε να βρει έστω και μία λύση όταν δούλεψε μόνη της ενώ βρήκε συνολικά 79 και 88 λύσεις αντίστοιχα όταν εφαρμόστηκε στις αρχικές και τις προτεινόμενες εκδοχές της μονής ευρετικής MBO σε σύνολο 250 δοκιμών. Επίσης, σε αυτές τις δοκιμές που απέτυχαν να βρουν οποιαδήποτε λύση, ο μέσος αριθμός των ανικανοποίητων όρων μειώθηκε κατά 83% και στις δύο MBO εκδοχές όπως φαίνεται στην τελευταία στήλη του Πίνακα 2. Παρομοίως, για όλες τις άλλες ευρετικές, η αποτελεσματικότητα της έρευνας τους βελτιώθηκε σημαντικά όταν εφαρμόστηκε μέσα στην MBO μετά-ευρετική, με βελτιώσεις που κυμαίνονται από 13% έως 70% σε σχέση με την μείωση του αριθμού των ανικανοποίητων όρων.

Αποτελέσματα και Ανάλυση: Προσέγγιση Επιτροπής-Μηχανής που χρησιμοποιεί MBO

Τα αποτελέσματα για τους MBO αλγόριθμους που χρησιμοποιούν την προσέγγιση επιτροπής-μηχανής στην επίλυση του Προβλήματος 3 παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Τα αποτελέσματα ομαδοποιούνται σύμφωνα με την εκδοχή του MBO που χρησιμοποιείται στις 10 δοκιμές που διεξήχθησαν για κάθε ένα από τους 25 διαφορετικούς παραμετρικούς συνδυασμούς για το μέγεθος της σπερματοθήκης και των γόνων.

Οι αποδόσεις και των δύο εκδοχών του MBO αλγορίθμου είναι ξανά πολύ όμοιες, αν και η αρχική εκδοχή βρήκε έναν ελαφρά μεγαλύτερο αριθμό λύσεων. Παρόλα αυτά, για αυτές τις δοκιμές που δεν βρήκαν καμία λύση, η αποτελεσματικότητα της έρευνας τους σε σχέση με την ελαχιστοποίηση του αριθμού των ανικανοποίητων όρων ήταν πανομοιότυπη. Ως τέτοιες, και οι δύο στρατηγικές ανόπτησης ήταν και πάλι όμοια αποτελεσματικές στην επίλυση αυτής της ομάδας προβλημάτων όταν εφαρμοστούν στην προσέγγιση επιτροπής-μηχανής.

Πρώτα απ' όλα, και οι δύο στρατηγικές ανόπτησης βρέθηκαν να είναι το ίδιο αποτελεσματικές στην επίλυση αυτής της ομάδας προβλημάτων μιας που οι αποδόσεις τους παρατηρήθηκαν να είναι πολύ όμοιες. Η προτεινόμενη συνάρτηση ανόπτησης βελτίωσε ελάχιστα την απόδοση της μονής-ευρετικής MBO που χρησιμοποιεί τον WalkSAT σε σχέση με την εξεύρεση λύσεων. Η αρχική συνάρτηση ανόπτησης απέδωσε περιφερειακά καλύτερα σε σχέση με την ελαχιστοποίηση του αριθμού των ανικανοποίητων όρων στην μονή-ευρετική MBO που χρησιμοποιεί τον WalkSAT όπως και στον MBO επιτροπής-μηχανής όπου βρήκε περισσότερες λύσεις. Συνεπώς, δεν φαίνεται να δημιουργούνται προφανείς τάσεις σε αυτήν την μελέτη σε σχέση με την χρήση της νέας συνάρτησης ανόπτησης για την αποδοχή των τροχιών γαμήλιας πτήσης σε σύγκριση με την αρχική συνάρτηση ανόπτησης. Κατά συνέπεια, μπορούμε να εικάσουμε σε αυτό το σημείο ότι οι συνέπειες της εισαγωγής της εντατικοποίησης έρευνας στον MBO μέσω της χρήσης της προτεινόμενης συνάρτησης ανόπτησης εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο των ευρετικών που χρησιμοποιούνται και την προσέγγιση στην οποία αυτές οι ευρετικές εφαρμόζονται ως εργάτριες στον MBO αλγόριθμο.

Δευτερευόντως, τα αποτελέσματα δείχνουν ξεκάθαρα ότι ο MBO έπαιξε ένα πολύ σημαντικό ρόλο στην βελτίωση της αποτελεσματικότητας των πέντε βασικών ευρετικών κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Αυτό το γεγονός ήταν πιο εμφανές με τον WalkSAT, που μπορούσε σταθερά να βρει τουλάχιστον 1 λύση και μέχρι 6 λύσεις σε 10 δοκιμές για το Πρόβλημα 3 όταν εφαρμόστηκε μέσα στον προτεινόμενο και αρχικό MBO αλγόριθμο αλλά απέτυχε να βρει έστω και μία λύση όταν δούλεψε ανεξάρτητα, έξω από τον MBO. Ο μέσος αριθμός των ανικανοποίητων όρων ήταν επίσης αξιοσημείωτα υψηλός για όλες τις ευρετικές που δούλευαν μόνες, χωρίς MBO.

Αυτό το εύρημα υποστηρίζει έντονα τα αποτελέσματα των αρχικών μελετών στον MBO [Abbass, 2001a· Abbass, 2001b].

Επίσης, φαίνεται να είναι μια πολύ σταθερή τάση στην σχετική αποτελεσματικότητα των πέντε βασικών ευρετικών είτε δουλεύει μόνη της είτε μέσα στον MBO ως επιτροπή ευρετικών. Οι αλγόριθμοι που σχετίζονται με τον WalkSAT σταθερά ξεπερνούσαν σε απόδοση τις άλλες ευρετικές, με τον GSAT να ακολουθεί από κοντά δεύτερος. Οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν την πιθανολογική άπληστη και τον τυχαίο περίπατο ήταν σημαντικά λιγότερο αποτελεσματικοί αλλά ήταν σε μεγάλο βαθμό όμοιοι σε σχέση με την σχετική τους απόδοση. Η one-point διασταύρωση ήταν κατά πολύ η λιγότερο αποτελεσματική ευρετική στις εφαρμογές.

Επιπλέον, ο MBO αλγόριθμος που εφαρμόσε την μονή-ευρετική προσέγγιση που χρησιμοποιεί τον WalkSAT απέδωσε ένα αρκετά μεγαλύτερο αριθμό λύσεων και κατώτερο αριθμό ανικανοποίητων όρων σε σύγκριση με τους MBO αλγόριθμους που εφαρμόζουν την επιτροπή-μηχανή. Ως τέτοια, η προσέγγιση επιτροπής-μηχανής που χρησιμοποιείται σε αυτή τη μελέτη δεν μπορούσε να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα της MBO διαδικασίας βελτιστοποίησης, κάτι που έρχεται σε αντίθεση με τα προηγούμενα ευρήματα [Abbass, 2001b]. Αυτό το φαινόμενο μπορεί να οφείλεται στην συμπερίληψη κάποιων ευρετικών μέσα στην επιτροπή που ήταν ιδιαίτερα αναποτελεσματικές, όπως η πιθανολογική άπληστη και κυρίως η one-point διασταύρωση, που μπορεί να υποβάθμισαν σημαντικά την συνολική αποτελεσματικότητα της επιτροπής-μηχανής. Επιπροσθέτως, η χρήση του WalkSAT, που διεξάγει την έρευνα του μέσω της πιθανολογικής χρήσης του GSAT και του τυχαίου περιπάτου, σε συνδυασμό με τον GSAT και τον τυχαίο περίπατο μέσα στην επιτροπή εργατριών, μπορεί να είχε μια επίδραση 'αραίωσης' στην προσέγγιση επιτροπής-μηχανής του MBO μιας που ο WalkSAT συμπεριφέρεται ήδη σχεδόν σαν μετά-ευρετική εφαρμογή για τον GSAT και τον τυχαίο περίπατο.

Συνοψίζοντας, τα καλύτερα αποτελέσματα αντλήθηκαν χρησιμοποιώντας τον WalkSAT που δούλεψε μέσα στον μονό-ευρετικό MBO. Ξεπέρασε σε απόδοση την προσέγγιση επιτροπής-μηχανής, από την οποία αντλήθηκε η δεύτερη καλύτερη ομάδα αποτελεσμάτων. Όλοι οι άλλοι αλγόριθμοι απέτυχαν στην εύρεση οποιασδήποτε λύσης. Κάθε ευρετική που δούλεψε ανεξάρτητα, έξω από τον MBO, απέδωσε χειρότερα σε όλες τις περιπτώσεις συγκρινόμενη με όταν δούλεψε μέσα στον MBO. Επίσης, ο WalkSAT, η καλύτερη από πλευράς απόδοσης ευρετική σε όλες τις εκδοχές του MBO, απέτυχε να βρει έστω και μία λύση όταν λειτουργούσε μόνη της, έξω από την MBO μετά-ευρετική. Για μια πιο λεπτομερή ανάλυση στην συμπεριφορά των διαφορετικών προσεγγίσεων του MBO σε σχέση με το μέγεθος των γόνων και της σπερματοθήκης, παρακαλώ ανατρέξτε στο [Technical Report, 2001].

Σε αυτή τη μελέτη, προτάθηκε μια συνάρτηση ανόπτησης για να εισάγει την εντατικοποίηση της έρευνας στον MBO αλγόριθμο. Διαπιστώθηκε ότι η προτεινόμενη συνάρτηση ανόπτησης βελτίωσε την απόδοση μίας εκ των εφαρμογών. Συνολικά, η επίδραση της εντατικοποίησης της έρευνας στην διαδικασία βελτιστοποίησης του MBO αλγόριθμου εξαρτήθηκε από τον τύπο της ευρετικής και της προσέγγισης εργατών που χρησιμοποιήθηκε. Επιπλέον, η μονή-ευρετική προσέγγιση ξεπέρασε σε απόδοση την προσέγγιση επιτροπής-μηχανής και η WalkSAT ήταν η πιο αποτελεσματική ευρετική σε σχέση με όλες τις εφαρμογές. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων καταδεικνύει σε μεγάλο βαθμό ότι η MBO μετά-ευρετική βελτίωσε σημαντικά την αποτελεσματικότητα όλων των βασικών ευρετικών σε σχέση με όταν οι ευρετικές λειτουργούσαν μόνες τους, εκτός MBO. Αυτά τα ευρήματα επιβεβαιώνουν τις αρχικές μελέτες που εμφάνισαν τον MBO ως έναν αποτελεσματικό, βασισμένο σε σμήνος, μετά-ευρετικό, αλγόριθμο βελτιστοποίησης για την επίλυση δύσκολων 3-SAT προβλημάτων.

Απαιτούνται περισσότερες και διεξοδικές αναλύσεις όσον αφορά τα επακόλουθα της διαδικασίας γαμήλιας πτήσης στην συμπεριφορά του MBO. Για μελλοντική εργασία, θα ήταν χρήσιμα πειράματα με ποικίλους αριθμούς βασιλισσών και βελτιώσεων γόνων καθώς επίσης και μεγαλύτεροι αριθμοί μεγεθών σπερματοθήκης και γόνων για τη μελέτη της επίπτωσης της νέας συνάρτησης ανόπτησης σε ένα μεγαλύτερο εύρος παραμέτρων. Για την περαιτέρω αποσαφήνιση της χρησιμότητας της προσέγγισης επιτροπής-μηχανής, θα ήταν θετικό να εφαρμόσουμε περισσότερο αποτελεσματικές και σημαντικά διαφορετικές SAT ευρετικές για την συμπερίληψη στην επιτροπή των εργατριών. Επίσης, η προτεινόμενη συνάρτηση ανόπτησης θα πρέπει να δοκιμαστεί με διάφορα επίπεδα εντατικοποίησης έρευνας. Επί του παρόντος, διεξάγουμε δοκιμές χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση ανόπτησης που εντατικοποιεί την ερευνητική διαδικασία σε υψηλότερο ρυθμό από την παρούσα προτεινόμενη συνάρτηση, η οποία πιστεύουμε ότι θα αποδώσει πιο σαφή αποτελέσματα όσον αφορά τις επιπτώσεις της εντατικοποίησης της έρευνας στην διαδικασία βελτιστοποίησης της MBO μετά-ευρετικής.

Αλγόριθμος Βελτιστοποίησης Αποικίας Τεχνητών Μελισσών (ABC) για την Επίλυση Περιορισμένων Προβλημάτων Βελτιστοποίησης

Συνοπτική Περιγραφή. Αυτή η εργασία παρουσιάζει τα αποτελέσματα της σύγκρισης πάνω στην απόδοση του Αλγορίθμου Αποικίας Τεχνητών Μελισσών (ABC) για περιορισμένα προβλήματα βελτιστοποίησης. Ο ABC αλγόριθμος προτάθηκε πρώτα για μη περιορισμένα προβλήματα βελτιστοποίησης και απέδειξε ότι έχει ανώτερη

απόδοση σε αυτού του είδους τα προβλήματα. Σε αυτήν την εργασία, ο ABC αλγόριθμος επεκτάθηκε και στην επίλυση περιορισμένων προβλημάτων βελτιστοποίησης και εφαρμόστηκε σε μια ομάδα περιορισμένων προβλημάτων. Τα περιορισμένα προβλήματα Βελτιστοποίησης (CO) εμφανίζονται σε διάφορες εφαρμογές. Διαρθρωτική βελτιστοποίηση, μηχανικό σχέδιο, σχέδιο VLSI, οικονομικά, προβλήματα κατανομής και τοποθέτησης είναι μερικά μόνο από τα επιστημονικά πεδία στα οποία μπορούμε να συναντήσουμε τα προβλήματα CO [1]. Το συγκεκριμένο πρόβλημα ανασημασιάζεται έτσι ώστε να πάρει τη μορφή της βελτιστοποίησης δύο συναρτήσεων, της αντικειμενικής συνάρτησης και της συνάρτησης παραβίασης περιορισμών [2]. Ένα γενικό περιορισμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης είναι να βρεθεί το x ώστε να ελαχιστοποιηθεί το $f(x)$ όπου το x . Η αντικειμενική συνάρτηση f ορίζεται στο χώρο έρευνας και το σύνολο ορίζει την εφικτή περιοχή. Συνήθως, ο χώρος έρευνας ορίζεται ως ένα n -ορθογώνιο παραλληλόγραμμο (οι τομείς των μεταβλητών ορίζονται από τα κατώτερα και ανώτερα όρια τους):

όπου η πιθανή περιοχή καθορίζεται από ένα σύνολο m επιπλέον περιορισμών :

Σε κάθε σημείο, οι περιορισμοί που ικανοποιούν ονομάζονται ενεργοί περιορισμοί στο x . Κατ'επέκταση, οι περιορισμοί ισότητας επίσης ονομάζονται ενεργοί σε όλα τα σημεία του.

Διαφορετικοί ντετερμινιστικοί και στοχαστικοί αλγόριθμοι έχουν αναπτυχθεί για την αντιμετώπιση των περιορισμένων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ντετερμινιστικές προσεγγίσεις όπως η Εφικτή Κατεύθυνση και η Γενικευμένη Κλίση Καθόδου κάνουν σημαντικές διαπιστώσεις πάνω στην συνέχεια και την διαφορετικότητα της αντικειμενικής συνάρτησης [4,5]. Συνεπώς, η δυνατότητα εφαρμογής τους είναι περιορισμένη μιας που τα χαρακτηριστικά τους συναντώνται σπάνια σε προβλήματα που ανακύπτουν σε πραγματικές εφαρμογές. Από την άλλη πλευρά, οι στοχαστικοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης όπως οι Γενετικοί Αλγόριθμοι, οι Στρατηγικές Εξέλιξης, ο Εξελικτικός Προγραμματισμός και η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (PSO) δεν κάνουν τέτοιες διαπιστώσεις και έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς για την αντιμετώπιση περιορισμένων προβλημάτων βελτιστοποίησης τα τελευταία χρόνια. [6, 7, 8, 9, 16].

Ο Karaboga έχει περιγράψει έναν αλγόριθμο Αποικίας Τεχνητών Μελισσών (ABC) βασισμένος στην συμπεριφορά συγκομιδής των μελιτοφόρων μελισσών για αριθμητικά προβλήματα βελτιστοποίησης [11]. Οι Karaboga και Basturk έχουν συγκρίνει την απόδοση ενός ABC αλγορίθμου με αυτήν άλλων πολύ γνωστών μοντέρνων ευρετικών αλγορίθμων όπως ο Γενετικός Αλγόριθμος (GA), η Διαφορική Εξέλιξη (DE), η Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (PSO) σε μη περιορισμένα προβλήματα [12]. Σε αυτήν την εργασία, ο ABC αλγόριθμος έχει επεκταθεί και στην επίλυση περιορισμένων προβλημάτων βελτιστοποίησης (CO). Η επέκταση του αλγορίθμου εξαρτάται από την αντικατάσταση του μηχανισμού επιλογής του απλού ABC αλγορίθμου με τον μηχανισμό επιλογής Deb [13] για να αντιμετωπίσει τους περιορισμούς. Η απόδοση του αλγορίθμου δοκιμάστηκε σε 13 πολύ γνωστά περιορισμένα προβλήματα βελτιστοποίησης, παρμένα από τη βιβλιογραφία, και συγκρίθηκε με την Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (PSO) και την Διαφορική Εξέλιξη (DE) [14]. Ο αλγόριθμος Βελτιστοποίηση Σμήνους Σωματιδίων (PSO) παρουσιάστηκε από τους Eberhart και Kennedy το 1995 [15]. Ο PSO είναι μια στοχαστική τεχνική βελτιστοποίησης βασισμένη σε πληθυσμό καλά προσαρμοσμένη στην βελτιστοποίηση μη-γραμμικών συναρτήσεων σε πολυδιάστατο χώρο. Μοντελοποιεί την κοινωνική συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών ή ενός κοπαδιού ψαριών. Ο DE αλγόριθμος είναι επίσης ένας αλγόριθμος βασισμένος σε πληθυσμό που χρησιμοποιεί χειριστές διασταύρωσης, μετάλλαξης και επιλογής. Αν και ο DE χρησιμοποιεί χειριστές διασταύρωσης και μετάλλαξης όπως ο GA, η βασική λειτουργία βασίζεται στις διαφορές των τυχαίων δειγμάτων ζευγαριών στις λύσεις του πληθυσμού. Η εργασία είναι οργανωμένη ως εξής: στην Ενότητα II, παρουσιάζονται ο ABC αλγόριθμος και ο προσαρμοσμένος ABC αλγόριθμος για την επίλυση περιορισμένων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Στην Ενότητα III, δοκιμάζεται ένα σημείο αναφοράς 13 περιορισμένων συναρτήσεων. Κατόπιν, παρουσιάζονται και συζητούνται τα αποτελέσματα της σύγκρισης των PSO και DE αλγορίθμων. Τέλος, δίνεται ένα συμπέρασμα.

Αλγόριθμος Αποικίας Τεχνητών Μελισσών-Ο ABC Αλγόριθμος χρησιμοποιείται για Μη-περιορισμένα Προβλήματα Βελτιστοποίησης

Στον ABC αλγόριθμο [11,12], η αποικία των τεχνητών μελισσών αποτελείται από τρεις ομάδες μελισσών: τις απασχολούμενες μέλισσες, τις μέλισσες παρατηρητές και τις ανιχνεύτριες. Το πρώτο μισό της αποικίας αποτελείται από τις απασχολούμενες τεχνητές μέλισσες και το δεύτερο μισό από τους παρατηρητές. Για κάθε πηγή τροφής, υπάρχει μόνο μια απασχολούμενη μέλισσα. Με άλλα λόγια, ο αριθμός των απασχολούμενων μελισσών είναι ίσος με τον αριθμό των πηγών τροφής γύρω από την κυψέλη. Η απασχολούμενη μέλισσα της οποίας η πηγή τροφής έχει εγκαταλειφθεί από τις μέλισσες μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια.

Στον ABC αλγόριθμο, η θέση της πηγής τροφής αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση για το πρόβλημα βελτιστοποίησης και η ποσότητα του νέκταρος της πηγής αντιστοιχεί στην ποιότητα (fitness) της σχετικής λύσης. Ο

αριθμός των απασχολούμενων μελισσών ή των παρατηρητών είναι ίσος με τον αριθμό των λύσεων σε ένα πληθυσμό. Κάθε λύση είναι ένα D-διαστατό άνωσμα. Εδώ, D είναι ο αριθμός των παραμέτρων βελτιστοποίησης. Μετά την εκκίνηση, ο πληθυσμός των θέσεων (λύσεων) υπόκειται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους, $C = 1, 2, \dots, MCN$, των διαδικασιών έρευνας των απασχολούμενων μελισσών, των παρατηρητών και των ανιχνευτών. Μια απασχολούμενη μέλισσα δημιουργεί μια τροποποίηση στη θέση (λύση) στην μνήμη της, βασισμένη στην τοπική πληροφόρηση (οπτική πληροφορία) και δοκιμάζει την ποσότητα νέκταρος (τιμή fitness) της νέας πηγής (νέα λύση). Με την προϋπόθεση ότι η ποσότητα του νέκταρος της νέας πηγής είναι μεγαλύτερη από αυτήν της προηγούμενης, η μέλισσα απομνημονεύει τη νέα θέση και ξεχνάει την παλιά. Διαφορετικά, κρατάει τη θέση της προηγούμενης στην μνήμη της. Αφού όλες οι απασχολούμενες μέλισσες ολοκληρώσουν την ερευνητική διαδικασία, μοιράζονται τις πληροφορίες για το νέκταρ και τις θέσεις των πηγών τροφής με τους παρατηρητές στο σημείο του χορού. Μια μέλισσα παρατηρητής αξιολογεί τις πληροφορίες για το νέκταρ που έχουν παρθεί από όλες τις απασχολούμενες μέλισσες και επιλέγει μια πηγή τροφής με πιθανότητα που σχετίζεται με την ποσότητα του νέκταρος. Όπως στην περίπτωση της απασχολούμενης μέλισσας, αυτή δημιουργεί μια τροποποίηση στη θέση (της πηγής) στη μνήμη της και ελέγχει την ποσότητα του νέκταρος στην υποψήφια πηγή. Με την προϋπόθεση ότι το νέκταρ είναι περισσότερο από αυτό της προηγούμενης, η μέλισσα απομνημονεύει τη νέα θέση και ξεχνάει την παλιά.

Μια τεχνητή μέλισσα παρατηρητής επιλέγει μια πηγή τροφής βασισμένη στην τιμή πιθανότητας που σχετίζεται με αυτή την πηγή τροφής, ..., και που υπολογίζεται από τον ακόλουθο τύπο (1): όπου είναι η τιμή fitness της λύσης που είναι ανάλογη της ποσότητας νέκταρος της πηγής τροφής στην θέση και SN είναι ο αριθμός των πηγών τροφής που είναι ίσος με τον αριθμό των απασχολούμενων μελισσών (BN).

. Αν επιλέγεται τυχαία, πρέπει να είναι διαφορετικό από το άλλο ως ένας τυχαίος αριθμός ανάμεσα στο $[-1, 1]$. Ελέγχει την παραγωγή γειτονικών πηγών τροφής γύρω από το σημείο και αντιπροσωπεύει την οπτική σύγκριση δύο θέσεων τροφής από μια μέλισσα. Όπως φαίνεται στο (2), καθώς μειώνεται η διαφορά ανάμεσα στις παραμέτρους του και η διατάραξη στη θέση μειώνεται επίσης. Συνεπώς, καθώς η έρευνα φτάνει στην ιδανική λύση στο χώρο έρευνας, το μήκος του βήματος προσαρμόζεται και μειώνεται και αυτό.

Αν μία τιμή παραμέτρου που παράγεται από αυτή την λειτουργία υπερβεί το προκαθορισμένο της όριο, η παράμετρος μπορεί να οριστεί σε μια αποδεκτή τιμή. Σε αυτήν την εργασία, η τιμή της παραμέτρου που ξεπερνάει το όριο της ορίζεται στην οριακή τιμή της.

Η πηγή τροφής της οποίας το νέκταρ εγκαταλείπεται από τις μέλισσες αντικαθίσταται από μια νέα πηγή τροφής από τις ανιχνεύτριες. Στον ABC, αυτό προσομοιώνεται δημιουργώντας τυχαία μια θέση και αντικαθιστώντας την με την εγκαταλελειμμένη. Στον ABC, με την προϋπόθεση ότι όταν μια θέση δεν μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω μετά από ένα προκαθορισμένο αριθμό κύκλων, τότε αυτή η πηγή τροφής θεωρείται ότι έχει εγκαταλειφθεί. Η τιμή του προκαθορισμένου αριθμού κύκλων είναι μια σημαντική παράμετρος ελέγχου του ABC αλγορίθμου, που ονομάζεται 'όριο' για εγκατάλειψη.

Αφού παραχθεί και αξιολογηθεί από την τεχνητή μέλισσα κάθε υποψήφια θέση πηγής, η απόδοση της συγκρίνεται με αυτή της παλιάς. Αν η νέα τροφή έχει ίδιο ή καλύτερο νέκταρ από την παλιά πηγή, αντικαθιστά στη μνήμη την παλιά. Διαφορετικά, η παλιά διατηρείται στη μνήμη. Με άλλα λόγια, ένας άπληστος μηχανισμός επιλογής τοποθετείται ως λειτουργία επιλογής ανάμεσα στην παλιά και την υποψήφια καινούρια. Είναι ξεκάθαρο από την παραπάνω εξήγηση, ότι υπάρχουν τέσσερις παράμετροι ελέγχου που χρησιμοποιούνται στον ABC: ο αριθμός των πηγών τροφής που είναι ίσος με τον αριθμό των απασχολούμενων ή παρατηρητών μελισσών (SN), η τιμή του ορίου, και ο μέγιστος αριθμός κύκλων (MCN).

Ένας λεπτομερής ψευδο-κώδικας του ABC αλγορίθμου δίνεται παρακάτω:

1: Ξεκίνησε τον πληθυσμό λύσεων

2: Αξιολόγησε τον πληθυσμό

3: κύκλος = 1

4: επανέλαβε

5: Δημιούργησε νέες λύσεις για τις απασχολούμενες μέλισσες χρησιμοποιώντας τον (2) και αξιολόγησε τις

6: Εφάρμοσε την άπληστη διαδικασία επιλογής

7: Υπολόγισε τις τιμές πιθανότητας για τις λύσεις με τον (1)

8: Δημιούργησε τις νέες λύσεις για τους παρατηρητές από τις επιλεγμένες λύσεις βασισμένος και αξιολόγησε τις

9: Εφάρμοσε την άπληστη διαδικασία επιλογής

10: Καθόρισε την εγκαταλελειμμένη λύση για την ανιχνεύτρια, αν υπάρχει, και αντικατέστησε την με μια καινούρια τυχαία παραγμένη λύση με τον (3)

11: Απομνημόνευσε την καλύτερη λύση που έχει βρεθεί μέχρι στιγμής

12: κύκλος = κύκλος + 1

13: μέχρι κύκλος = MCN

Ο ABC Αλγόριθμος Χρησιμοποιημένος για Περιορισμένα Προβλήματα Βελτιστοποίησης

Για να μπορέσει ο ABC αλγόριθμος να προσαρμοστεί στην επίλυση περιορισμένων προβλημάτων βελτιστοποίησης, υιοθετήσαμε την περιορισμένη μέθοδο χειρισμού του Deb [13] αντί για την διαδικασία επιλογής (άπληστη επιλογή) του ABC αλγορίθμου που περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα μιας που η μέθοδος του Deb αποτελείται από τρεις ευρετικούς κανόνες. Η μέθοδος του Deb χρησιμοποιεί έναν χειριστή επιλογής τουρνουά, όπου δυο λύσεις συγκρίνονται κάθε φορά, και τα ακόλουθα κριτήρια επιβάλλονται πάντα: 1) Οποιαδήποτε εφικτή λύση προτιμάται οποιασδήποτε ανέφικτης λύσης. 2) Ανάμεσα σε δυο εφικτές λύσεις, προτιμάται αυτή που έχει την καλύτερη αντικειμενική τιμή συνάρτησης, 3) Ανάμεσα σε δυο ανέφικτες λύσεις, προτιμάται αυτή που έχει μικρότερη παραβίαση περιορισμών.

Επειδή η εκκίνηση με εφικτές λύσεις είναι μια πολύ χρονοβόρα διαδικασία και σε κάποιες περιπτώσεις είναι αδύνατο να παραχθεί τυχαία μια εφικτή λύση, ο ABC αλγόριθμος δεν θεωρεί ότι ο αρχικός πληθυσμός είναι εφικτός. Η δομή του αλγορίθμου ήδη κατευθύνει τις λύσεις προς μια εφικτή περιοχή κατά την διαδρομή πράγμα που οφείλεται στο ότι εφαρμόζονται οι κανόνες του Deb αντί για την άπληστη επιλογή. Η διαδικασία παραγωγής ανιχνευτών του αλγορίθμου προσφέρει ένα μηχανισμό ποικιλομορφίας που επιτρέπει νέα και πιθανόν ανέφικτα άτομα να ανήκουν στον πληθυσμό.

Αν είναι ένας τυχαία επιλεγμένος πραγματικός αριθμός στην κλίμακα $[0, 1]$. Το MR (ρυθμός τροποποίησης) είναι μια παράμετρος ελέγχου που ελέγχει αν η παράμετρος θα τροποποιηθεί ή όχι. Στην εκδοχή του ABC αλγορίθμου που προτείνεται για περιορισμένα προβλήματα βελτιστοποίησης, οι τεχνητοί ανιχνευτές παράγονται σε μια προκαθορισμένη περίοδο κύκλων για την τυχαία ανακάλυψη νέων πηγών τροφής. αυτή η περίοδος είναι άλλη μια παράμετρος ελέγχου που ονομάζεται περίοδος παραγωγής ανιχνευτών (SPP) του αλγορίθμου. Σε κάθε SPP κύκλο, ελέγχεται αν υπάρχει εγκαταλελειμμένη πηγή τροφής ή όχι. Αν υπάρχει, διεξάγεται μια διαδικασία παραγωγής ανιχνευτών.

Ο ψευδο-κώδικας του ABC αλγορίθμου που προτείνεται για την επίλυση περιορισμένων προβλημάτων βελτιστοποίησης δίνεται παρακάτω:

- 1: Ξεκίνησε τον πληθυσμό λύσεων
- 2: Αξιολόγησε τον πληθυσμό
- 3: κύκλος = 1
- 4: επανέλαβε
- 5: Δημιούργησε νέες λύσεις για τις απασχολούμενες μέλισσες χρησιμοποιώντας τον (4) και αξιολόγησε τις
- 6: Εφάρμοσε την διαδικασία επιλογής βασιζόμενος στην μέθοδο Deb
- 7: Υπολόγισε τις τιμές πιθανότητας για τις λύσεις με τον (1)
- 8: Δημιούργησε τις νέες λύσεις για τους παρατηρητές από τις επιλεγμένες λύσεις βασιζόμενος στο ... και αξιολόγησε τις
- 9: Εφάρμοσε την διαδικασία επιλογής βασιζόμενος στην μέθοδο Deb
- 10: Καθόρισε την εγκαταλελειμμένη λύση για την ανιχνεύτρια, αν υπάρχει, και αντικατέστησε την με μια καινούρια τυχαία παραγμένη λύση με τον (3)
- 11: Απομνημόνευσε την καλύτερη λύση που έχει βρεθεί μέχρι στιγμής
- 12: κύκλος = κύκλος + 1
- 13: μέχρι κύκλος = MCN

Πειραματική Μελέτη και Συζήτηση

Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε την απόδοση του ABC αλγορίθμου, χρησιμοποιήσαμε ένα σύνολο 13 χαρακτηριστικών προβλημάτων που μπορούν να βρεθούν στο [16]. Αυτό το σύνολο περιλαμβάνει διάφορες μορφές αντικειμενικών συναρτήσεων όπως η γραμμική, η μη-γραμμική και η δευτεροβάθμια. Η απόδοση του ABC αλγορίθμου συγκρίνεται με αυτήν των αλγορίθμων της διαφορικής εξέλιξης (DE) και της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO).

Ρυθμίσεις

Ο PSO εφαρμόζει του κανόνες του Deb για τον χειρισμό των περιορισμών. Το μέγεθος του σμήνους είναι 50 και ο αριθμός παραγωγής είναι 7000. Συνεπώς, ο PSO εκτελεί 350000 αξιολογήσεις αντικειμενικών συναρτήσεων. Οι γνωστικές και κοινωνικές συνιστώσες ορίζονται στο 1. Το βάρος αδράνειας είναι ένας ενιαίος τυχαίος πραγματικός αριθμός στην κλίμακα του $[0.5, 1]$. Όλοι οι περιορισμοί ισότητας μετατρέπονται σε περιορισμούς ανισότητας, Στον DE, το F είναι μια πραγματική σταθερά που επηρεάζει την διαφορική παραλλαγή ανάμεσα σε δύο λύσεις και έχει οριστεί στο 0.5 στα πειράματά μας. Η τιμή του ρυθμού διασταύρωσης, που ελέγχει την αλλαγή της

ποικιλομορφίας του πληθυσμού, έχει επιλεγεί να είναι 0.9 όπως υποδεικνύεται στο [17]. Το μέγεθος του πληθυσμού είναι 40, ο μέγιστος αριθμός παραγωγής είναι 6000 και χρησιμοποιεί τους κανόνες του Deb.

Στον ABC, η τιμή του ρυθμού τροποποίησης (MR) είναι 0.8, το μέγεθος της αποικίας ($2 \cdot SN$) είναι 40 και ο μέγιστος αριθμός κύκλων MCN είναι 6000. Έτσι, ο συνολικός αριθμός αξιολόγησης αντικειμενικής συνάρτησης είναι 240000 όπως και στον DE. Η τιμή του 'ορίου' είναι ίση με το $SN \times D$ όπου D είναι η διάσταση του προβλήματος και SPP είναι επίσης $SN \times D$. Τα πειράματα επαναλήφθηκαν 30 φορές ξεκινώντας από ένα τυχαίο πληθυσμό με διαφορετικούς σπόρους.

Αποτελέσματα και Συζήτηση

Στον Πίνακα 1 δίνονται τα αποτελέσματα δύο πειραμάτων για τον ABC αλγόριθμο. Στον Πίνακα 2, στον Πίνακα 4 και στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται τα συγκριτικά αποτελέσματα των καλύτερων, των μέσων και των χειρότερων λύσεων των αλγορίθμων που έχουν ερευνηθεί αντίστοιχα.

Πίνακας 1. Στατιστικά Αποτελέσματα που Αντλήθηκαν από τον ABC αλγόριθμο για 13 δοκιμαστικές συναρτήσεις πάνω σε 30 ανεξάρτητες διαδρομές χρησιμοποιώντας 240.000 αντικειμενικές αξιολογήσεις συναρτήσεων

Πίνακας 2. Οι Καλύτερες Λύσεις που Αντλήθηκαν από τον DE, PSO και ABC αλγόριθμο για 13 δοκιμαστικές συναρτήσεις πάνω σε 30 ανεξάρτητες διαδρομές. – Σημαίνει ότι δεν βρέθηκε καμία Εφικτή Λύση. Na = Not Available (Μη διαθέσιμο)

Όπως φαίνεται από τον Πίνακα 2, ο ABC αλγόριθμος βρήκε το ολικό ελάχιστο των επτά από τα δεκατρία προβλήματα (g01, g03, g04, g06, g08, g11, g12) μέσα από 240 000 κύκλους. Σε πέντε συναρτήσεις (g02, g04, g05, g07, g10), ο ABC αλγόριθμος έδωσε αποτελέσματα αρκετά κοντά στο ολικό βέλτιστο. Σε ένα πρόβλημα, το g13, ο ABC αλγόριθμος δεν μπόρεσε να βρει το βέλτιστο στον καθορισμένο μέγιστο αριθμό κύκλων.

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 2, ο PSO αλγόριθμος είναι καλύτερος από τον ABC σε τρία προβλήματα (g09, g10, g13) ενώ ο ABC αλγόριθμος έδειξε καλύτερη απόδοση από τον PSO σε τέσσερα προβλήματα (g02, g03, g07, g12). Συγκρινόμενος με τον DE, είναι καλύτερος από τον ABC σε τέσσερις συναρτήσεις (g07, g09, g10, g13) καθώς και ο ABC αλγόριθμος είναι καλύτερος από τον DE σε τρία προβλήματα (g02, g06, g11) σε σχέση με τα καλύτερα αποτελέσματα.

Από τα χειρότερα αποτελέσματα που δίνονται στον Πίνακα 3, ο PSO είναι καλύτερος από τον ABC σε τρία προβλήματα (g05, g06, g09) ενώ ο ABC ξεπερνά σε απόδοση τον PSO σε οκτώ προβλήματα (g01, g02, g03, g07, g10, g11, g12, g13). Ο DE δείχνει καλύτερη απόδοση σε δύο προβλήματα σε σχέση με τον ABC αλγόριθμο (που αποδίδει) σε τρία προβλήματα (g07, g09, g13), ενώ ο ABC είναι καλύτερος σε έξι προβλήματα (g01, g02, g05, g06, g10, g11).

Πίνακας 3. Οι Χειρότερες Λύσεις που Αντλήθηκαν από τον DE, PSO και ABC αλγόριθμο για 13 δοκιμαστικές συναρτήσεις πάνω σε 30 ανεξάρτητες διαδρομές. – Σημαίνει Ότι Δεν Βρέθηκε Καμία Εφικτή Λύση. Na = Not Available (Μη διαθέσιμο)

Πίνακας 4. Οι Μέσες Λύσεις Αποτελέσματα που Αντλήθηκαν από τον DE, PSO και ABC αλγόριθμο για 13 δοκιμαστικές συναρτήσεις πάνω σε 30 ανεξάρτητες διαδρομές και οι συνολικοί αριθμοί επιτυχίας των αλγορίθμων. Ένα Αποτέλεσμα σε Μαύρα Γράμματα υποδεικνύει ένα Καλύτερο Αποτέλεσμα ή Ότι το Ολικό Βέλτιστο (ή η Καλύτερη Γνωστή Λύση) Έχει Βρεθεί. – Σημαίνει Ότι Δεν Βρέθηκε Καμία Εφικτή Λύση.

Παρομοίως, σε ότι αφορά τις μέσες λύσεις στον Πίνακα 4, ο PSO δείχνει καλύτερη απόδοση σε σχέση με τον ABC αλγόριθμο σε πέντε προβλήματα (g05, g06, g09, g10, g13) και ο ABC αλγόριθμος είναι καλύτερος από τον PSO σε έξι προβλήματα (g01, g02, g03, g07, g11, g12). Ο DE έχει καλύτερη απόδοση από τον ABC σε τέσσερα προβλήματα (g07, g09, g10, g13) ενώ ο ABC είναι καλύτερος από τον DE σε πέντε προβλήματα (g01, g02, g05, g06, g11).

Από τα μέσα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στον Πίνακα 4, μπορεί να διαπιστωθεί ότι ο ABC αλγόριθμος αποδίδει καλύτερα από τον DE και τον PSO.

Συνεπώς, ο ABC αλγόριθμος χρησιμοποιώντας τους κανόνες του Deb δεν μπορεί να βρει την βέλτιστη λύση για το g05, g10, g13 σε κάθε διαδρομή. Το g05 και το g13 είναι μη-γραμμικά προβλήματα και η τιμή του ρ για το g05 και το g13 είναι %0.000. Επίσης, αυτά τα προβλήματα έχουν μη-γραμμικούς περιορισμούς ισότητας. Το g10 είναι γραμμικό και η τιμή του ρ είναι %0.0020 για αυτό το πρόβλημα. Παρόλα αυτά, το g10 δεν έχει γραμμική ισότητα και μη-γραμμικούς περιορισμούς ισότητας. Άρα, δεν είναι πιθανό να γίνει οποιαδήποτε γενίκευση για τον ABC αλγόριθμο ώστε να είναι καλύτερος ή όχι για ένα καθορισμένο σύνολο προβλημάτων. Με άλλα λόγια, δεν είναι ξεκάθαρο ποια χαρακτηριστικά των δοκιμαστικών προβλημάτων δυσκολεύουν τον ABC.

Μια τροποποιημένη εκδοχή του ABC αλγορίθμου για περιορισμένα προβλήματα βελτιστοποίησης έχει παρουσιαστεί και η απόδοση της έχει συγκριθεί με αυτήν πρωτοποριακών αλγορίθμων. Έχει βγει το συμπέρασμα ότι ο ABC αλγόριθμος μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την επίλυση περιορισμένων προβλημάτων

βελτιστοποίησης. Η απόδοση του ABC αλγορίθμου μπορεί επίσης να δοκιμαστεί σε πραγματικά μηχανικά προβλήματα που υπάρχουν στην βιβλιογραφία και να συγκριθεί με αυτή άλλων αλγορίθμων. Επίσης, η επίδραση των περιορισμένων μεθόδων χειρισμού στην απόδοση του ABC αλγορίθμου μπορεί να ερευνηθεί σε μελλοντικές εργασίες.

Ένας αλγόριθμος μελισσών για πολυπρακτορικά συστήματα-Συνδυασμός στρατολόγησης και πλοήγησης Σε αυτή την εργασία παρουσιάζουμε ένα νέο αλγόριθμο που δεν βασίζεται στις φερομόνες και είναι εμπνευσμένος από την συμπεριφορά των βιολογικών μελισσών. Ο αλγόριθμος συνδυάζει τόσο στρατηγικές στρατολόγησης όσο και πλοήγησης. Ερευνούμε κατά πόσο αυτός ο νέος αλγόριθμος ξεπερνά σε απόδοση τους βασισμένους στις φερομόνες αλγορίθμους στο έργο της συλλογής (τροφής). Από τα πειράματά μας, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι (i) ο μη βασισμένος στις φερομόνες αλγόριθμος είναι σημαντικά πιο αποτελεσματικός στην εύρεση και τη συλλογή τροφής, για παράδειγμα χρησιμοποιεί λιγότερες επαναλήψεις για την ολοκλήρωση μιας εργασίας; (ii) ο μη βασισμένος στις φερομόνες αλγόριθμος είναι περισσότερο επιδεκτικός στη μεταβολή της κλίμακας του, για παράδειγμα απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο για να ολοκληρώσει μια εργασία, αν και σε ένα μικρόκοσμο, οι βασισμένοι στη φερομόνη αλγόριθμοι είναι γρηγορότεροι όταν μετράμε τον χρόνο προς την επανάληψη και τέλος, (iii) ο παρών μη βασισμένος στην φερομόνη αλγόριθμος μας προσαρμόζεται πιο δύσκολα από τους βασισμένους στην φερομόνη αλγόριθμους.

Λέξεις Κλειδιά

Σύστημα Μελισσών, Βελτιστοποίηση με Αποικία Μυρμηγκιών, Στρατολόγηση, Πλοήγηση, Διαδικασία Απόφασης του Markov, Σύγκριση

Σε αυτήν την εργασία εισάγουμε έναν νέο αλγόριθμο εμπνευσμένο από την κοινωνική συμπεριφορά των μελιτοφόρων μελισσών. Αποτελείται από μια στρατηγική στρατολόγησης και μία πλοήγησης. Οι στρατηγικές στρατολόγησης χρησιμοποιούνται για την μετάδοση παλαιότερων εμπειριών έρευνας σε άλλα μέλη της αποικίας. Οι στρατηγικές πλοήγησης χρησιμοποιούνται για την πλοήγηση σε ένα άγνωστο κόσμο. Ο αλγόριθμος δεν χρησιμοποιεί φερομόνες ούτε για την στρατολόγηση ούτε για την πλοήγηση, όπως κάνουν οι αλγόριθμοι των μυρμηγκιών. Στους αλγόριθμους των μυρμηγκιών, τα μονοπάτια χρειάζονται συγκεκριμένο χρόνο για να εμφανιστούν. Εξαιτίας της φύσης της συμπεριφοράς των μελισσών, μπορούμε να μειώσουμε τον χρόνο εμφάνισης ενός μονοπατιού. Εφαρμόζουμε τον αλγόριθμο στον τομέα της συλλογής (τροφής), επιδεικνύουμε την αποτελεσματικότητά του, και τον συγκρίνουμε εμπειρικά με ένα βασισμένο στη φερομόνη αλγόριθμο, την Βελτιστοποίηση με Αποικία Μυρμηγκιών (ACO) [8].

Οι βασισμένοι στην φερομόνη αλγόριθμοι εμπνέονται από την συμπεριφορά των μυρμηγκιών. Για μια γενική επισκόπηση, ανατρέχουμε στο [8]. Περιληπτικά, τα μυρμηγκία αφήνουν φερομόνη στο μονοπάτι που ακολουθούν καθώς ταξιδεύουν. Χρησιμοποιώντας αυτό το ίχνος, μπορούν να καθοδηγηθούν προς την φωλιά ή το φαγητό τους. Για την στρατολόγηση, τα μυρμηγκία εφαρμόζουν μια έμμεση στρατηγική συσσωρεύοντας τα ίχνη φερομόνης. Αν ένα ίχνος είναι αρκετά δυνατό, τα άλλα μυρμηγκία προσελκύονται από αυτό και θα ακολουθήσουν αυτό το ίχνος προς ένα προορισμό. Αυτό είναι γνωστό ως αυτό-καταλυτική διαδικασία; όσο περισσότερα τα μυρμηγκία ακολουθούν ένα ίχνος, τόσο πιο ελκυστικό γίνεται αυτό το ίχνος. Στο τέλος θα προτιμηθούν μικρότερα μονοπάτια.

Οι μη βασισμένοι στην φερομόνη αλγόριθμοι εμπνέονται από την συμπεριφορά (κυρίως) των μελισσών και δεν χρησιμοποιούν φερομόνες για την πλοήγηση μέσα σε άγνωστους κόσμους. Αντίθετα, για την πλοήγηση χρησιμοποιούν μια στρατηγική που ονομάζεται Ενσωμάτωση Μονοπατιού (PI). Οι μέλισσες έχουν την δυνατότητα να υπολογίζουν συνέχεια την τωρινή τους θέση με βάση την προηγούμενη τροχιά τους. Κατά συνέπεια, μπορούν να επιστρέψουν στην αρχική τους θέση επιλέγοντας απευθείας τη διαδρομή αντί να ακολουθήσουν τα ίχνη της εξερχόμενης τροχιάς τους [11, 14]. Για την στρατολόγηση, οι μέλισσες εφαρμόζουν μια άμεση στρατηγική με το να χορεύουν στην φωλιά. Ο χορός τους επικοινωνεί την απόσταση και την κατεύθυνση προς έναν προορισμό [18].

Αν και οι τεχνικές συλλογής των μυρμηγκιών και των μελισσών διαφέρουν σημαντικά, και τα δύο είδη λύνουν το πρόβλημα συγκομιδής αποτελεσματικά. Στο πεδίο της Επιστήμης των Υπολογιστών, οι ερευνητές έχουν εμπνευστεί από την συμπεριφορά των κοινωνικών εντόμων, μιας που τα προβλήματα τα οποία αντιμετωπίζουν αυτά τα έντομα είναι παρόμοια με τα προβλήματα βελτιστοποίησης που οι άνθρωποι επιθυμούν να λύσουν αποτελεσματικά, για παράδειγμα το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή. Οι βασισμένοι στην φερομόνη αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται ήδη για να αντιμετωπιστούν τέτοια προβλήματα επιτυχώς [8].

Οι μη βασισμένοι στην φερομόνη αλγόριθμοι μελετώνται λιγότερο εκτεταμένα και η έρευνα σε ότι τους αφορά άρχισε μόλις πρόσφατα. Για παράδειγμα, τα [15, 3, 17] παρουσιάζουν παρόντες βασισμένους στις μέλισσες αλγόριθμους που δίνουν λύσεις σε διάφορους τύπους προβλημάτων εφαρμόζοντας τη συμπεριφορά στρατολόγησης μελισσών. Στο [11] η συμπεριφορά πλοήγησης των μελισσών ερευνάται και εφαρμόζεται σε ένα ρομπότ. Παρόλα αυτά, αυτοί οι αλγόριθμοι χρησιμοποιούν μόνο μία πλευρά της συμπεριφοράς των μελισσών, δηλαδή την

συμπεριφορά στρατολόγησης ή πλοήγησης αντίστοιχα. Ως τέτοια, υπάρχουν ακόμα δύο σημαντικά ανοιχτά ζητήματα. Πρώτα απ'όλα, οι αλγόριθμοι στρατολόγησης και πλοήγησης μελετώνται μόνο ξεχωριστά για την ώρα: ένας συνδυασμένος αλγόριθμος είναι ανεξερεύνητη περιοχή. Δεύτερον, μιας που ένας συνδυασμένος μη βασισμένος αλγόριθμος δεν υπάρχει αυτή τη στιγμή, δεν έχουν γίνει ακόμα συγκριτικές μελέτες. Θέλουμε να ερευνήσουμε αν ο δικός μας μη βασισμένος στην φερομόνη αλγόριθμος δίνει καλύτερη λύση στο πρόβλημα συγκομιδής από έναν βασισμένο στην φερομόνη αλγόριθμο. Για την ακρίβεια, θέλουμε να ερευνήσουμε αν τα μονοπάτια δημιουργούνται γρηγορότερα με τον μη βασισμένο στην φερομόνη αλγόριθμο μας. Οι συγκριτικές μελέτες θα έπρεπε να εστιάσουν στην αποτελεσματικότητα, την δυνατότητα μεταβολής της κλίμακας τους και την προσαρμοστικότητα των αλγορίθμων.

Η έρευνα μας ασχολείται και με τα δύο ζητήματα. Πρώτα απ'όλα, παρουσιάζεται ένας νέος μη βασισμένος στην φερομόνη αλγόριθμος, που εφαρμόζει τόσο τις στρατηγικές στρατολόγησης των μελισσών όσο και πλοήγησης τους. Επίσης, έχουμε αναπτύξει ένα περιβάλλον προσομοίωσης, ονομαζόμενο BeeHave, στο οποίο οι αλγόριθμοι συλλογής μπορούν να συγκριθούν άμεσα. Χρησιμοποιώντας το BeeHave, έχουμε τη δυνατότητα να συγκρίνουμε τον μη βασισμένο στην φερομόνη αλγόριθμο με ένα βασισμένο στη φερομόνη αλγόριθμο. Εκτεταμένα πειράματα έχουν πραγματοποιηθεί σε σχέση με την αποτελεσματικότητα και την δυνατότητα μεταβολής της κλίμακας. Επίσης, μπορούμε να δώσουμε μια ένδειξη της προσαρμοστικότητας του νέου μας αλγόριθμου.

Σε αυτήν την εργασία, παρουσιάζουμε μια γενική επισκόπηση της έρευνας μας [12]. Το υπόλοιπο της έρευνας μας δομείται ως εξής. Στην Ενότητα 2 περιγράφουμε το βιολογικό υπόβαθρο της συμπεριφοράς των μελισσών. Η Ενότητα 3 περιγράφει την μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των μελισσών. Η Ενότητα 4 περιγράφει την πειραματική οργάνωση· η Ενότητα 5 ασχολείται με τα αποτελέσματα. Τέλος, στην Ενότητα 6 παρουσιάζουμε το συμπέρασμα και τρεις επιλογές για μελλοντική έρευνα.

Βιολογικό Υπόβαθρο

Η συμπεριφορά συγκομιδής των μελιτοφόρων μελισσών αποτελείται από δύο τύπους συμπεριφοράς, δηλαδή την (i) συμπεριφορά στρατολόγησης και (ii) την συμπεριφορά πλοήγησης.

Για να στρατολογηθούν μέλη μιας αποικίας για πηγές τροφής, οι μελιτοφόρες μέλισσες ενημερώνουν τα μέλη της φωλιάς τους για την απόσταση και την κατεύθυνση αυτών των πηγών τροφής μέσω ενός κουνιστού ή μικτού χορού που εκτελείται στην κάθετη επιφάνεια των κηρηθρών στην κυψέλη [18]. Αυτός ο χορός (δηλαδή, η γλώσσα των μελισσών) αποτελείται από μια σειρά εναλλασσόμενων αριστερών και δεξιών ζικ-ζακ, που διασπείρονται από ένα κομμάτι στο οποίο η μέλισσα κουνάει την κοιλιά της από την μια πλευρά στην άλλη. Η διάρκεια της φάσης του κουνιστού χορού είναι ένα μέτρο για την απόσταση του φαγητού, και η γωνία ανάμεσα στον ήλιο και τον άξονα του σημείου του κουνιστού χορού στην κάθετη κηρήθρα αντιπροσωπεύει την αζιμουθιακή(ορθογώνια) γωνία ανάμεσα στον ήλιο και την κατεύθυνση στην οποία η νεοσύλλεκτη πρέπει να πετάξει για να βρει τον στόχο [18, 13, 9] (δείτε Σχήμα 1). Η 'διαφήμιση' μιας πηγής τροφής μπορεί να υιοθετηθεί από άλλα μέλη της αποικίας. Ο μηχανισμός αποφάσεων για την υιοθέτηση μιας 'διαφημισμένης' πηγής τροφής από μια πιθανή νεοσύλλεκτη, δεν είναι απόλυτα γνωστός. Θεωρείται ότι η στρατολόγηση ανάμεσα στις μέλισσες είναι πάντα μια συνάρτηση της ποιότητας των πηγών τροφής [2].

Διαφορετικά είδη κοινωνικών εντόμων, όπως οι μελιτοφόρες μέλισσες και τα μυρμήγκια της ερήμου χρησιμοποιούν την μη βασισμένη στην φερομόνη πλοήγηση. Η μη βασισμένη στην φερομόνη πλοήγηση αποτελείται κυρίως από την Ενσωμάτωση Μονοπατιού (PI) που είναι η συνεχιζόμενη αναβάθμιση ενός ανύσματος ενσωματώνοντας όλες τις γωνίες κατεύθυνσης και όλες τις αποστάσεις που καλύφθηκαν [11]. Ένα άνυσμα PI αντιπροσωπεύει τη γνώση των εντόμων για την κατεύθυνση και την απόσταση προς τον προορισμό του. Για να δημιουργηθεί ένα άνυσμα PI, το έντομο δεν χρησιμοποιεί μια μαθηματική διανυσματική σύνοψη όπως κάνει ο άνθρωπος, αλλά εφαρμόζει μια απλή υπολογιστική προσέγγιση [14]. Χρησιμοποιώντας αυτήν την προσέγγιση το έντομο μπορεί να επιστρέψει στον προορισμό του απευθείας. Πιο συγκεκριμένα, όταν το μονοπάτι δεν έχει εμπόδια, το έντομο λύνει το πρόβλημα ιδανικά. Παρόλα αυτά, όταν το μονοπάτι έχει εμπόδια, το έντομο πρέπει να βασιστεί σε άλλες στρατηγικές όπως η πλοήγηση με σημείο αναφοράς [4, 5] για την επίλυση του προβλήματος. Προφανώς, οι μέλισσες μπορούν να πετάξουν και όταν συναντούν ένα εμπόδιο μπορούν να επιλέξουν να περάσουν από πάνω του. Ωστόσο, ακόμα και αν το μονοπάτι δεν έχει εμπόδια, οι μέλισσες έχουν την τάση να χρησιμοποιούν την πλοήγηση με σημείο αναφοράς για να μειώσουν τα λάθη του PI ανύσματος. Τα σημεία αυτά χωρίζουν όλο το μονοπάτι σε κομμάτια και κάθε σημείο έχει ένα άνυσμα PI που να συνδέεται με αυτό. Στο υπόλοιπο αυτής της εργασίας, αναφερόμαστε σε ένα άνυσμα PI που να δείχνει προς το σπίτι ως το Άνυσμα Σπιτιού (HV). Το PI χρησιμοποιείται τόσο στην εξερεύνηση και την αξιοποίηση. Κατά τη διάρκεια της εξερεύνησης, τα έντομα αναβαθμίζουν συνεχώς το HV τους. Εντούτοις, δεν χρησιμοποιείται ως στρατηγική εξερεύνησης. Κατά την αξιοποίηση, τα έντομα αναβαθμίζουν τόσο το HV τους

όσο και το άνυσμα PI που δείχνει την πηγή τροφής, και χρησιμοποιούν αυτά τα ανύσματα ως καθοδήγηση προς έναν προορισμό.

Μοντελοποιώντας την συμπεριφορά των μελισσών

Όπως παρατηρήσαμε νωρίτερα, η συμπεριφορά συγκομιδής των μελισσών αποτελείται κυρίως από δύο τύπους συμπεριφοράς, δηλαδή την (i) συμπεριφορά στρατολόγησης και (ii) την συμπεριφορά πλοήγησης. Σε αντίθεση με τα υπάρχοντα μοντέλα [15, 3, 17], το μοντέλο μας συνδυάζει και τις δύο συμπεριφορές.

Η συμπεριφορά στρατολόγησης μοντελοποιείται σε αναλογία με την βιολογική συμπεριφορά του χορού των μελισσών. Οι τεχνητές μέλισσες μοιράζονται πληροφορίες όταν είναι παρούσες στην κυψέλη (δηλαδή το σημείο-σπίτι για κάθε τεχνητή μέλισσα). Όποτε μια τεχνητή μέλισσα είναι παρούσα μέσα στην κυψέλη, ψάχνει για οποιαδήποτε άλλη τεχνητή μέλισσα που να έχει προηγούμενη ερευνητική εμπειρία. Όταν βρει μία, αποφασίζει αν θα αξιοποιήσει ή όχι αυτήν την προηγούμενη ερευνητική εμπειρία. Η αξιοποίηση προηγούμενης ερευνητικής εμπειρίας σημαίνει την αντιγραφή του ανύσματος PI (δηλαδή τις κατευθύνσεις που αντλήθηκαν από το χορό). Ωστόσο, η τεχνητή μέλισσα μπορεί να αποφασίσει επίσης την αξιοποίηση της δικής της ερευνητικής εμπειρίας, αν είναι διαθέσιμη. Οι βιολογικές μέλισσες χρησιμοποιούν έναν (ακόμα) άγνωστο μηχανισμό αποφάσεων για να αποφασίσουν αν θα υιοθετήσουν ή όχι τα ‘διαφημισμένα’ ανύσματα PI. Ο μηχανισμός αποφάσεων θεωρείται ότι είναι μια συνάρτηση της ποιότητας των πηγών τροφής [2]. Το μοντέλο μας, παρόλα αυτά, δεν λαμβάνει υπόψη την αποτίμηση ποιότητας, μιας που αυτή δεν συνδεόταν απευθείας με την σύγκριση μας. Η απόφαση να υιοθετήσουμε ένα άνυσμα PI βασίζεται στην αποτίμηση ποιότητας. Πιο συγκεκριμένα, οι πράκτορες προτιμούν να υιοθετήσουν ανύσματα PI που δείχνουν μια τοποθεσία πηγής τροφής σε μικρότερη απόσταση από τα τωρινά τους ανύσματα.

Η συμπεριφορά πλοήγησης που χρησιμοποιείται στο μοντέλο είτε αξιοποιεί προηγούμενη ερευνητική εμπειρία είτε αφήνει τις τεχνητές μέλισσες να εξερευνήσουν τον κόσμο τυχαία. Η αξιοποίηση προηγούμενης ερευνητικής εμπειρίας καθοδηγείται από το άνυσμα PI που οι τεχνητές μέλισσες μπορούν να αντλήσουν ‘ακολουθώντας’ ένα χορό μέσα στην κυψέλη ή χρησιμοποιώντας τη δική τους προηγούμενη ερευνητική εμπειρία.

Ο αλγόριθμος 1, που μοιάζει πολύ με τον αλγόριθμο που χρησιμοποιήθηκε για το ACO [8], εφαρμόζει τόσο τη συμπεριφορά στρατολόγησης όσο και πλοήγησης και αποτελείται από τρεις συναρτήσεις.

Αλγόριθμος 1 Μη βασιζόμενος στη φερομόνη αλγόριθμος

1: Δραστηριότητα Διαχείρισης Μελισσών

2: Ανύσματα Υπολογισμού

3: Δαιμονικές Πράξεις (Προαιρετικό)

Πρώτα απ’ όλα, η Δραστηριότητα Διαχείρισης Μελισσών ασχολείται με την δραστηριότητα των πρακτόρων βασισμένη στην εσωτερική τους κατάσταση. Κάθε πράκτορας έχει έξι εσωτερικές καταστάσεις. Σε κάθε κατάσταση εκτελείται μια συγκεκριμένη συμπεριφορά. Η κατάσταση πράκτορα ‘Στο Σπίτι’ δείχνει ότι ο πράκτορας βρίσκεται στην κυψέλη. Όταν βρίσκεται σ’ αυτή την κατάσταση, ο πράκτορας καθορίζει σε ποια νέα κατάσταση θα μεταβεί. Οι εναλλαγές κατάστασης συμβαίνουν σύμφωνα με τον Αλγόριθμο 2. Η κατάσταση πράκτορα ‘Μείνε Σπίτι’ δείχνει επίσης ότι ο πράκτορας βρίσκεται στην κυψέλη. Ωστόσο, ενώ είναι σε αυτή την κατάσταση θα μείνει εκεί μόνο αν δεν υπάρχει προηγούμενη ερευνητική εμπειρία διαθέσιμη προς αξιοποίηση. Στην τελευταία περίπτωση, ο πράκτορας θα αφήσει την κυψέλη για να αξιοποιήσει την προηγούμενη ερευνητική εμπειρία. Η κατάσταση πράκτορα ‘Αξιοποίηση’ δείχνει ότι ο πράκτορας αξιοποιεί προηγούμενη ερευνητική εμπειρία. Αυτή η ερευνητική εμπειρία αντιπροσωπεύει ένα άνυσμα PI που δείχνει μια πηγή τροφής. Ο πράκτορας καθορίζει σε ποιο κελί θα πρέπει να μετακινηθεί ώστε να ταιριάζει με το άνυσμα PI που δείχνει μια πηγή τροφής. Η κατάσταση πράκτορα ‘Εξερεύνηση’ δείχνει ότι ο πράκτορας εξερευνά το περιβάλλον αναζητώντας τροφή. Η κατάσταση πράκτορα ‘Κατευθύνσου Σπίτι’ υποδεικνύει ότι ο πράκτορας κατευθύνεται προς το σπίτι χωρίς να μεταφέρει τροφή. Ο πράκτορας βρίσκει το δρόμο για το σπίτι ακολουθώντας το HV του. Από την στιγμή που ένας πράκτορας ξεκινάει το δικό του ταξίδι συγκομιδής, αυτό το HV υπολογίζεται συνεχόμενα για κάθε πράκτορα. Η κατάσταση πράκτορα ‘Μεταφορά Τροφής’ δείχνει ότι ο πράκτορας έχει ανακαλύψει ήδη τροφή και τη μεταφέρει πίσω στην κυψέλη. Το μονοπάτι επιστροφής του πράκτορα εξαρτάται από το ίδιο HV του πράκτορα ‘Κατευθύνσου Σπίτι’

Δευτερευόντως, το Ανύσμα Υπολογισμού χρησιμοποιείται για διαχειριστικούς σκοπούς και υπολογίζει τα ανύσματα PI για κάθε πράκτορα, δηλαδή, το άνυσμα σπιτιού και πιθανώς το άνυσμα PI που δείχνει μια πηγή τροφής. Το μοντέλο μας χρησιμοποιεί έναν ακριβή υπολογισμό του ανύσματος PI το οποίο αποκλείει τα λάθη κατευθύνσης και απόστασης τα οποία το βιολογικό PI έχει την τάση να είναι επιρρεπές [14, 5]. Δουλεύει, παρόλα αυτά, με παραπλήσιο τρόπο.

Το νέο άνυσμα PI υπολογίζεται σε σχέση με το παλαιότερο. Αν στο Σχήμα 2, το A είναι το σημείο αναφοράς, το B είναι το σημείο αφετηρία του πράκτορα και το C είναι ο προορισμός του πράκτορα τότε το a είναι η απόσταση που έχει διανυθεί, το b είναι η νέα απόσταση προς το σπίτι και το c είναι η παλαιά απόσταση προς το σπίτι. Επίσης, β

είναι η γωνία που οδηγεί προς το C και α είναι η γωνία που χρησιμοποιείται για την προσαρμογή της παλιάς κατευθυνόμενης γωνίας. Για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε τη νέα κατευθυνόμενη απόσταση, χρησιμοποιούμε τον κανόνα του συνημίτονου και το ξαναγράφουμε ως εξής:

Χρησιμοποιώντας την Εξίσωση 1 μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε το α (τη γωνία που χρησιμοποιείται για την προσαρμογή), χρησιμοποιώντας τον κανόνα του συνημίτονου για ακόμα μια φορά.

Οι τιμές που αντλήθηκαν από την Εξίσωση 1 και 2 χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία νέου ανύσματος PI. Ένα άνυσμα PI αποτελείται, λοιπόν, από δύο τιμές, μία που να δείχνει την κατεύθυνση και μία που να δείχνει την απόσταση. Αυτές οι δύο τιμές τοποθετούνται σε μια μεταβλητή για κάθε πράκτορα. Για να είμαστε πιο σαφείς, στο μοντέλο μας, υπολογίζουμε τις ακριβείς γωνίες. Οι βιολογικές μέλισσες, παρόλα αυτά, τις πλησιάζουν κατά προσέγγιση.

Το κύριο γνώρισμα της συμπεριφοράς των μελισσών είναι ότι από τη φύση τους φτιάχνουν ένα άμεσο, βέλτιστο μονοπάτι ανάμεσα σε ένα σημείο εκκίνησης, (δηλαδή την κυψέλη) και ένα προορισμό (δηλαδή την πηγή τροφής). Θα μπορούσε να πει κανείς ότι αυτή η συμπεριφορά είναι ένας φυσικός τρόπος δημιουργίας επιλογών στην Διαδικασία Απόφασης του Markov (MDP). Οι επιλογές είναι ροές δράσεων μέσα στο MDP των οποίων τα αποτελέσματα είναι μεταβάσεις κατάστασης εκτεταμένης και μεταβλητής διάρκειας [16]. Αυτές οι δράσεις έχουν φανερά πολύ χρήσιμες στην επίτευξη της εκμάθησης και του σχεδιασμού, στην εξασφάλιση ευρωστίας και στην δυνατότητα ενσωμάτωσης προηγούμενης γνώσης στα συστήματα AI. Μια επιλογή προσδιορίζεται από ένα σύνολο καταστάσεων στο οποίο η επιλογή μπορεί να ξεκινήσει, μια εσωτερική τακτική και μια κατάσταση τερματισμού. Αν καθοριστεί το σύνολο εκκίνησης και η κατάσταση τερματισμού, οι παραδοσιακές ενισχυτικές μέθοδοι εκμάθησης μπορούν να χρησιμεύουν στην εκμάθηση της εσωτερικής τακτικής της επιλογής. Στην πλοήγηση των μελισσών, οι βασικές δράσεις δημιουργούνται μέσω της μετακίνησης σε διαφορετικές κατευθύνσεις πάνω από τους κόμβους στο MDP (δηλαδή, τον κόσμο της συγκομιδής τροφής). Η τακτική της επιλογής αναπαριστάται από το (τεχνητό) άνυσμα PI του εντόμου, όπου η κατάσταση εκκίνησης είναι η κυψέλη και η κατάσταση τερματισμού είναι η τοποθεσία της πηγής τροφής.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΟΡΓΑΝΩΣΗ

Για να παρουσιάσουμε τον αλγόριθμο μας και να συγκρίνουμε την απόδοση του με το ACO, έχουμε δημιουργήσει ένα περιβάλλον προσομοίωσης. Αυτό το περιβάλλον ονομάζεται BeeHave και απεικονίζεται στο Σχήμα 3.

Η σύγκριση μας βασίζεται στην αποτελεσματικότητα, την δυνατότητα μεταβολής της κλίμακας του και την προσαρμοστικότητα. Για να αντλήσουμε τα δεδομένα μας, τρία σύνολα πειραμάτων έχουν εκτελεστεί: σε ένα μικρόκοσμο (δηλαδή, Πείραμα 1; 110 κελιά), σε μεσαίου μεγέθους κόσμο (Πείραμα 2; 440 κελιά) και σε ένα μεγάλο μεγέθους (Πείραμα 3; 2800 κελιά). Καθένα από τα Πειράματα 1 και 2 περιέχει πέντε διαφορετικές περιπτώσεις προβλημάτων (π.χ ανεμπόδιστα, με εμπόδια, μετατόπιση πηγής τροφής, ένας συνδυασμός του δεύτερου και του τρίτου, και πολλαπλές πηγές ενέργειας). Το Πείραμα 3 περιέχει μόνο μία περίπτωση προβλήματος, την ανεμπόδιτη περίπτωση. Κάθε πείραμα εκτελείται τόσο με τον βασισμένο στην φερομόνη αλγόριθμο όσο και με τον μη βασισμένο (τον νέο μας αλγόριθμο Αποικίας Μελισσών) και επαναλαμβάνεται πολλές φορές.

Το Πείραμα 1 εκτελείται με 50 και 100 πράκτορες, ενώ το Πείραμα 2 με 100 και 250 πράκτορες. Η επιλογή υψηλότερου αριθμού πρακτόρων σε οποιοδήποτε από τα δύο πειράματα οδηγεί στο να πλημμυρίσουν τον κόσμο, εμποδίζοντας την δημιουργία οποιουδήποτε μονοπατιού. Το Πείραμα 3 εκτελείται με 500 πράκτορες. Τα αποτελέσματα του Πειράματος 1 και 2 χρησιμοποιούνται για να οδηγηθούμε στα κύρια συμπεράσματα μας. Το Πείραμα 3 χρησιμεύει στον καθορισμό του πόσο ευμετάβλητοι στην κλίμακα τους είναι οι αλγόριθμοι. Αυτή η ευμεταβλητότητα των αλγορίθμων υπολογίζεται με βάση το μέγεθος του κόσμου και τον αριθμό των πρακτόρων που χρησιμοποιούνται. Για μια πιο διεξοδική επισκόπηση αυτής της οργάνωσης, ανατρέξτε στο [12].

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Στο Σχήμα 4, παρουσιάζεται ένα παράδειγμα ενός κόσμου μεσαίου μεγέθους. Τα Σχήματα 5 και 6 μας δείχνουν τα αντίστοιχα μεγέθη των αποτελεσμάτων. Το πρώτο δείχνει ένα ιστόγραμμα των συνολικών επαναλήψεων που απαιτούνται για την ολοκλήρωση του παρόντος έργου συγκομιδής τροφής και το δεύτερο ένα ιστόγραμμα του μέσου υπολογιστικού χρόνου που απαιτείται ανά επανάληψη.

Στο Σχήμα 5, μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι μη βασισμένοι στην φερομόνη αλγόριθμοι είναι πολύ αποτελεσματικοί, μιας που χρησιμοποιούν σημαντικά λιγότερες επαναλήψεις για να ολοκληρώσουν το κάθε έργο. Αυξάνοντας τον αριθμό των πρακτόρων, ανεβαίνει και η αποτελεσματικότητα (σχετική και απόλυτη) του αλγορίθμου. Αυτά είναι τυπικά αποτελέσματα που βρίσκονται σε αυτήν την έρευνα, δηλαδή συμβαίνουν σε κάθε πείραμα που εκτελείται.

Στο Σχήμα 6(a), παρουσιάζουμε ένα ιστόγραμμα του μέσου υπολογιστικού χρόνου που χρειάζεται ανά επανάληψη σε ένα πείραμα μεσαίου μεγέθους με 100 πράκτορες. Παρατηρούμε ότι οι αλγόριθμοι κατά μέσο όρο βρίσκονται σε ένα υπολογιστικό χρόνο 108ms και 106ms ανά επανάληψη, αντίστοιχα. Στο Σχήμα 6(b) βλέπουμε ότι με 250 πράκτορες, ο μη βασισζόμενος στη φερομόνη αλγόριθμος έχει ένα μέσο 353 ms ενώ ο βασισζόμενος στην φερομόνη αλγόριθμος έχει μέσο 341 ms και έχει μεγάλη διασπορά. Αν και ένα στατιστικό τεστ αποκαλύπτει ότι και στις δύο περιπτώσεις, υπάρχει σημαντική διαφορά υπέρ του βασισζόμενου στην φερομόνη αλγόριθμου, ο συνολικός υπολογιστικός χρόνος που απαιτείται για την ολοκλήρωση της εργασίας είναι πολύ χαμηλότερος για το μη βασισζόμενο στην φερομόνη αλγόριθμο. Για ακόμα μια φορά, αυτά είναι αναμενόμενα αποτελέσματα: συμβαίνουν σε κάθε μικρού και μεσαίου μεγέθους πείραμα που εκτελείται.

Σκεπτόμενοι την ευμεταβλητότητα, λαμβάνουμε υπόψη (i) την αύξηση του αριθμού των πρακτόρων και (ii) την αύξηση του μεγέθους του κόσμου, χρησιμοποιώντας τις ρυθμίσεις του Πειράματος 3. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Πρώτα απ' όλα, όταν αυξάνουμε τον αριθμό των πρακτόρων και διατηρούμε το μέγεθος του κόσμου σταθερό, παρατηρούμε ότι οι αναλογίες μειώνονται (ο βασισζόμενος στην φερομόνη αλγόριθμος είναι σχετικά πιο ευμετάβλητος στην μεταβολή της κλίμακας του σε σχέση με τον αριθμό των πρακτόρων). Δευτερευόντως, όταν αυξάνουμε το μέγεθος του κόσμου και διατηρούμε τον αριθμό των πρακτόρων σταθερό, παρατηρούμε ότι οι αναλογίες αυξάνονται (ο μη βασισζόμενος στην φερομόνη αλγόριθμος είναι σχετικά πιο ευμετάβλητος στην μεταβολή της κλίμακας του σε σχέση με τον μέγεθος του κόσμου). Σε αναλογία με τις παρατηρήσεις από τα Πειράματα 1 και 2, βλέπουμε ότι ο μη βασισζόμενος στη φερομόνη αλγόριθμος είναι περισσότερο ευμετάβλητος στην μεταβολή της κλίμακας του σε απόλυτα μέτρα από τον βασισζόμενο στη φερομόνη αλγόριθμο, μιας που ολοκληρώνει πάντα το έργο του χρησιμοποιώντας σημαντικά λιγότερο συνολικό υπολογιστικό χρόνο.

Για να μπορέσουμε να δείξουμε την προσαρμοστικότητα των αλγορίθμων, εκτελέσαμε ένα πείραμα στο οποίο το σύνολο των εργασιών ήταν η Γέφυρα Deneubourg [7]. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο βασισζόμενος στην φερομόνη αλγόριθμος είναι πολύ πιο ευπροσάρμοστος από τον παρόντα μη βασισζόμενο στην φερομόνη αλγόριθμο.

Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των πειραμάτων, σε αυτήν την έρευνα μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι μη βασισζόμενοι στην φερομόνη αλγόριθμοι είναι σημαντικά πιο αποτελεσματικοί από τους βασισζόμενους στην φερομόνη αλγόριθμους στην αναζήτηση και τη συγκομιδή τροφής: κατά μέσο όρο, απαιτούν τρεις φορές λιγότερες επαναλήψεις για να συλλέξουν όλο το φαγητό που υπάρχει. Σε σχέση με την ευμεταβλητότητα, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι ακόμα και στους μικρότερους κόσμους, ο μη βασισζόμενος στην φερομόνη αλγόριθμος μας απαιτεί λιγότερο συνολικό υπολογιστικό χρόνο από ότι ένας βασισζόμενος στην φερομόνη αλγόριθμος, ακόμα κι αν σε κάποιες περιπτώσεις, ο τελευταίος απαιτεί λιγότερο υπολογιστικό χρόνο ανά επανάληψη. Εκτός από αυτά τα οφέλη, πρέπει να σημειώσουμε ότι ο μη βασισζόμενος στην φερομόνη αλγόριθμος μας είναι λιγότερο ευμετάβλητος από έναν βασισζόμενο στην φερομόνη αλγόριθμο.

Δίνουμε τρεις επιλογές για μελλοντική έρευνα. Πρώτα απ' όλα, μπορεί να είναι ενδιαφέρον να δημιουργήσουμε έναν υβριδικό αλγόριθμο. Επεκτείνοντας τον μη βασισζόμενο στην φερομόνη αλγόριθμο με κατευθυντήριους δείκτες φερομόνης ή πλοήγηση με σημείο αναφοράς, για παράδειγμα, μπορούμε να βελτιώσουμε την προσαρμοστικότητα του αλγορίθμου πιθανώς χωρίς μείωση της αποτελεσματικότητας ή της ευμεταβλητότητας του. Επίσης, συνδυάζοντας στρατηγικές PI με πιθανή έρευνα πεδίου [6], μπορούμε να βελτιώσουμε την τοπική έρευνα. Τέλος, ερευνούμε την επέκταση της εφαρμογής του αλγορίθμου των μελισσών σε άλλους τομείς.

Επί του παρόντος, επεκτείνουμε την στρατηγική στρατολόγησης του αλγορίθμου των μελισσών για να ενισχύσουμε την συλλογική διαδικασία λήψης αποφάσεων. Επίσης, ερευνούμε μεθόδους αξιοποίησης της δομής φυσικής επιλογής του αλγορίθμου.

ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΛΙΣΣΩΝ, ΤΗΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΜΕ ΑΠΟΙΚΙΑ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ ΓΙΑ ΣΥΝΤΟΝΙΣΜΟ ΕΛΕΓΚΤΗ PID

Συνοπτική Περιγραφή: ο Εξελικτικός Υπολογισμός (EC) είναι ένας ζωντανός τομέας έρευνας, με κάποιες από τις πιο γνωστές προσεγγίσεις του να είναι η Βελτιστοποίηση με Αποικία Μυρμηγκιών, η Βελτιστοποίηση Σμήνου Σωματιδίων και ο Αλγόριθμος των Μελισσών, που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Αυτή η εργασία συγκρίνει την αποτελεσματικότητα των τριών μεθόδων σε ένα συγκεκριμένο πρόβλημα βελτιστοποίησης, πιο συγκεκριμένα το συντονισμό των παραμέτρων για έναν PID ελεγκτή.

Λέξεις-Κλειδιά: βελτιστοποίηση με αποικία μυρμηγκιών, αλγόριθμος των μελισσών, έλεγχος PID, συντονισμός

Ο πιο γνωστός ελεγκτής στην βιομηχανία είναι ο Αναλογικός-Ολοκληρωτικός-Διαφορικός (PID) ελεγκτής. Έχει απλή δομή που ευνοεί την εύκολη εφαρμογή, την εύρωστη απόδοση και εφαρμόζεται σε πλήθος διαδικασιών. Η σωστή εφαρμογή ενός PID εξαρτάται από τον προσδιορισμό τριών παραμέτρων: το αναλογικό κέρδος (K_p), ο

ολοκληρωτικός χρόνος (T_i) και ο διαφορικός χρόνος (T_d). Αυτές οι τρεις παράμετροι συντονίζονται συχνά χειροκίνητα μέσω δοκιμής και πλάνης, πράγμα που παρουσιάζει μεγάλο πρόβλημα στον χρόνο που απαιτείται για την ολοκλήρωση του έργου. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα έχουν αναπτυχθεί πολλές μέθοδοι, όπως η Ziegler-Nichols [1]. Το κύριο πρόβλημα είναι ότι η λύση που βρέθηκε με αυτές τις μεθόδους ικανοποιεί μόνο τα κριτήρια απόδοσης για τη συγκεκριμένη μέθοδο. Βελτίωση στο συντονισμό μπορεί να επιτευχθεί χρησιμοποιώντας τεχνικές βελτιστοποίησης, και πιο συγκεκριμένα αυτές που βασίζονται στην τεχνητή νοημοσύνη.

Οι αλγόριθμοι Εξελικτικού Υπολογισμού (EC) είναι μέρος ενός πεδίου τεχνητής νοημοσύνης, και συχνά δανείζονται τις αρχές λειτουργίας τους από την φυσική συμπεριφορά των ζώων. Ο πιο γνωστός από αυτούς τους εξελικτικούς αλγορίθμους είναι ο Γενετικός Αλγόριθμος (GA) που βασίζεται στη Θεωρία της Εξέλιξης του Δαρβίνου. Οι GA έχουν εφαρμοστεί σε πλήθος προβλημάτων, και είναι σήμερα γνωστοί ως μία αποτελεσματική μέθοδος βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται συχνά στην βιομηχανία. Οι GA έχουν εφαρμοστεί στον συντονισμό PID και έχουν παράγει πολύ ισχυρά αποτελέσματα [2]. Άλλες τεχνικές EC χρησιμοποιούν την συνεργασία ανάμεσα σε μέλη του πληθυσμού, όμοια με την συμπεριφορά των κοινωνικών ζώων, άρα αν ένα ανεξάρτητο άτομο δεν μπορεί να εκτελέσει μια εργασία, μπορεί ένα συνεργαζόμενο.

Αυτή η εργασία συνεχίζει από εκεί που σταμάτησε μια παλαιότερη εργασία που ασχολήθηκε με την χρήση της Βελτιστοποίησης με Αποικίας Μυρμηγκιών (ACO) για το συντονισμό ενός PID ελεγκτή [3]. Αυτή η επέκταση ασχολείται τώρα με την εφαρμοσιμότητα του Αλγορίθμου των Μελισσών (BA) [4] και της Βελτιστοποίησης Σμήνους Σωματιδίων (PSO) [5] στην ίδια εργασία. Η ACO δημιουργήθηκε με βάση τη συμπεριφορά συγκομιδής των μυρμηγκιών και της έμμεσης επικοινωνίας τους που προέρχεται από τις φερομόνες, και έχει εφαρμοστεί σε διάφορα συνδυαστικά προβλήματα όπως ο σχεδιασμός εργασίας [6] και η βελτιστοποίηση δρομολογίου σε δεδομένα. Η αρχή πίσω από την PSO βασίζεται στους αυτονόητους κανόνες που ακολουθούν τα μέλη σμηνών πουλιών και κοπαδιών ψαριών, που τους επιτρέπει να κινούνται συγχρονισμένα χωρίς να συγκρούονται [7]. Υπάρχει η γενική εντύπωση ότι η κοινωνική ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα σε άτομα ενός πληθυσμού, μπορεί να οδηγήσει σε ένα εξελικτικό πλεονέκτημα, και υπάρχουν ποικίλα παραδείγματα προερχόμενα από τη φύση που το στηρίζουν αυτό. Η PSO εφαρμόζεται εύκολα και είναι υπολογιστικά ανέξοδη μιας που η μνήμη της και οι απαιτήσεις ταχύτητας της CPU είναι χαμηλές [8]. Η PSO αποδείχθηκε μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος για ένα πλήθος προβλημάτων βελτιστοποίησης, και σε κάποιες περιπτώσεις δεν πάσχει από τα προβλήματα που συναντώνται σε άλλες τεχνικές Εξελικτικού Υπολογισμού [7]. Η PSO έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε μια σειρά προβλημάτων, από τις συναρτήσεις βελτιστοποίησης μέχρι την εκπαίδευση νευρωνικών δικτύων.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΟΥ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΤΩΝ ΜΕΛΙΣΣΩΝ (BA)

Ο Αλγόριθμος των Μελισσών είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης εμπνευσμένη από την φυσική συμπεριφορά συγκομιδής των μελιτοφόρων μελισσών για την εύρεση μιας ποιοτικής πηγής τροφής. Ο Πίνακας 1 δείχνει τον απλοποιημένο ψευδο-κώδικα για τον αλγόριθμο. Ο αλγόριθμος απαιτεί τον ορισμό ενός αριθμού παραμέτρων, όπως ο αριθμός των μελισσών στον πληθυσμό, ο αριθμός των σημείων που έχουν επιλεγεί από το συνολικό αριθμό των σημείων που επισκέφτηκαν (τα καλύτερα σημεία), ο αριθμός των μελισσών που στρατολογήθηκαν για τα καλύτερα σημεία, και το κριτήριο τερματισμού. Ο αλγόριθμος ξεκινάει με τις ανιχνεύτριες μέλισσες να τοποθετούνται τυχαία σε ένα χώρο έρευνας. Στη συνέχεια αξιολογούνται οι τιμές fitness των σημείων που επισκέφτηκαν οι ανιχνεύτριες. Επιλέγεται ένας αριθμός μελισσών με τις υψηλότερες τιμές fitness ως 'επιλεγμένες μέλισσες' και κατόπιν επιλέγονται τα σημεία επίσκεψης για μια έρευνα στη γειτονιά. Οι υπόλοιπες μέλισσες του πληθυσμού τοποθετούνται τυχαία γύρω από το χώρο έρευνας ψάχνοντας για νέες πιθανές λύσεις. Αυτά τα βήματα επαναλαμβάνονται μέχρι να ικανοποιηθεί ένα κριτήριο τερματισμού.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ (ΤΗΣ) ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΑΠΟΙΚΙΑΣ ΜΥΡΜΗΓΚΙΩΝ

Η ACO βασίζεται στην ικανότητα των μυρμηγκιών να βρίσκουν πάντα το συντομότερο μονοπάτι ανάμεσα στη φωλιά τους και μια πηγή τροφής. Μια ACO δημιουργείται σε τρεις φάσεις (Πίνακας 2): πρώτον, το συγκεκριμένο πρόβλημα χαρτογραφείται σε μορφή γραφήματος, δεύτερον, δημιουργείται ένας γύρος λύσεων, και τέλος, αναβαθμίζεται η φερομόνη.

Το πρόβλημα πρέπει να χαρτογραφηθεί σε ένα γράφημα βαρών, έτσι ώστε τα μυρμήγκια να μπορούν να καλύψουν το πρόβλημα για την εύρεση μιας λύσης. Τα μυρμήγκια οδηγούνται από έναν κανόνα πιθανότητας ώστε να διαλέξουν τη λύση τους στο πρόβλημα (που ονομάζεται γύρος). Ο κανόνας πιθανότητας (που ονομάζεται Κανόνας Επιλογής Ψευδο-Τυχαίας-Αναλογικής Δράσης) ανάμεσα σε δύο κόμβους i και j , εξαρτάται από δύο παράγοντες: τον ευρετικό και τον μετα-ευρετικό:

Ο ευρετικός παράγοντας ή ορατότητα συνδέεται με το συγκεκριμένο πρόβλημα ως το αντίστροφο της συνάρτησης κόστους. Αυτός ο παράγοντας δεν αλλάζει κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου, αντιθέτως ο μετα-ευρετικός

παράγοντας (που συνδέεται με φερομόνες) αναβαθμίζεται μετά από κάθε επανάληψη. Οι παράμετροι α και β επιτρέπουν στο χρήστη να οδηγήσει την έρευνα του αλγορίθμου να είναι υπέρ του ευρετικού ή παράγοντα φερομόνης. Αυτοί οι δύο παράγοντες είναι ειδικοί σε κάθε άκρη ανάμεσα στους δύο κόμβους και κάθε βάρος του γραφήματος λύσης. Οι φερομόνες αναβαθμίζονται αφού δημιουργηθεί ένας γύρος, με δύο τρόπους: πρώτον, οι φερομόνες υπόκεινται σε έναν παράγοντα εξάτμισης (ρ), που επιτρέπει στα μυρμηγκία να ξεχνούν το παρελθόν τους και να αποφεύγουν να παγιδευτούν σε τοπικά ελάχιστα (εξίσωση 2). Δεύτερον, αναβαθμίζονται σε σχέση με την ποιότητα του γύρους τους (εξισώσεις 3 και 4), όπου η ποιότητα συνδέεται με την συνάρτηση κόστους, όπου m είναι ο αριθμός των μυρμηγκιών, L είναι οι ακμές του γράφου λύσης, και είναι η συνάρτηση κόστους του γύρου, που δημιουργήθηκε από το μυρμηγκί.

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΜΗΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

Η PSO βελτιστοποιεί μια αντικειμενική συνάρτηση κάνοντας μια βασισμένη σε πληθυσμό έρευνα. Ο πληθυσμός αποτελείται από πιθανές λύσεις, συγκεκριμένα σωματίδια, που ουσιαστικά είναι παραλληλισμός πουλιών σε ένα σμήνος. Αυτά τα σωματίδια ξεκινούν τυχαία και πετούν ελεύθερα μέσα στον πολυδιάστατο χώρο έρευνας. Κατά τη διάρκεια της πτήσης, κάθε σωματίδιο αναβαθμίζει την ταχύτητα και τη θέση του βασισμένο στην δική του εμπειρία και σε αυτήν ολόκληρου του πληθυσμού. Η τακτική αναβάθμισης οδηγεί το σμήνος σωματιδίων να κινηθεί προς την περιοχή με την υψηλότερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης, και εντέλει όλα τα σωματίδια θα συγκεντρωθούν γύρω από το σημείο με την μεγαλύτερη αντικειμενική τιμή. Η λεπτομερής λειτουργία της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων φαίνεται παρακάτω:

Βήμα 1: Εκκίνηση. Η θέση και η ταχύτητα όλων των σωματιδίων ορίζεται τυχαία με προκαθορισμένη σειρά.

Βήμα 2: Αναβάθμιση Ταχύτητας. Οι ταχύτητες όλων των σωματιδίων αναβαθμίζονται σε κάθε επανάληψη:

όπου είναι η θέση και η ταχύτητα του σωματιδίου i , αντίστοιχα; και είναι η θέση με την 'καλύτερη' αντικειμενική τιμή που έχει βρεθεί μέχρι τώρα στο σωματίδιο i και ολόκληρο τον πληθυσμό αντίστοιχα; w είναι η παράμετρος που ελέγχει τις δυναμικές πτήσης; $R1$ και $R2$ είναι τυχαίες μεταβλητές στο εύρος $[0, 1]$; είναι οι παράγοντες που ελέγχουν το σχετικό βάρος των αντίστοιχων όρων. Μετά την αναβάθμιση, θα πρέπει να ελεγχθεί και να διατηρηθεί σε ένα καθορισμένο όριο ώστε να αποφευχθεί ο βίαιος τυχαίος περίπατος.

Βήμα 3: Αναβάθμιση Θέσης. Αναλαμβάνοντας μια μονάδα χρονικού διαστήματος ανάμεσα στις διαδοχικές επαναλήψεις, οι θέσεις όλων των σωματιδίων αναβαθμίζονται σύμφωνα με: .

Μετά την αναβάθμιση, το ... θα πρέπει να ελεγχθεί και να περιοριστεί σε ένα επιτρεπόμενο όριο.

Βήμα 4: Αναβάθμιση Μνήμης. Αναβάθμισε το ... και το ... όταν ικανοποιηθεί η συνθήκη.

όπου είναι η αντικειμενική συνάρτηση που υπόκειται σε μεγιστοποίηση.

Βήμα 5: Έλεγχος Τερματισμού. Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει τα Βήματα 2 και 4 μέχρι να ικανοποιηθούν συγκεκριμένες συνθήκες τερματισμού, όπως ένας προκαθορισμένος αριθμός επαναλήψεων ή μια αποτυχία να προχωρήσει μετά από ένα συγκεκριμένο αριθμό επαναλήψεων.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Η έρευνα για την αποτελεσματικότητα των μεθόδων για έλεγχο PID βασίστηκε στον προσδιορισμό των παραμέτρων για τον έλεγχο της διαδικασίας (με μια είσοδο μονάδας):

Μια επιλογή συναρτήσεων κόστους χρησιμοποιήθηκε σε αυτήν την εργασία (Πίνακας 3) ώστε να βρεθεί μια βάση για τη σύγκριση της λειτουργίας των τεχνικών. Υπάρχουν άλλες συναρτήσεις κόστους που μπορεί να είναι πιο αποτελεσματικές; Παρόλα αυτά, αυτές που είναι στη λίστα είναι αρκετές για αυτή την έρευνα. Οι πίνακες αποτελεσμάτων παρέχουν τις τιμές των PID παραμέτρων που έχουν οριστεί για τους διάφορους EC αλγορίθμους, καθώς και κάποια κριτήρια απόδοσης για την μεταβατική απόκριση του ελεγχμένου συστήματος όπως η υπέρβαση ποσοστού, ο χρόνος ανόρθωσης και 2% χρόνος διακανονισμού.

Αν κάποιος χρησιμοποιήσει τα κριτήρια σχεδιασμού του Zeigler-Nichols ως βάση για σύγκριση, δηλαδή 25% υπέρβαση με ένα μέτριο όριο χρόνου ανόρθωσης και χρόνου διακανονισμού τότε σε όλες εκτός από μία περίπτωση οι συντονισμένες PID αποκρίσεις είναι αποδεκτές σε μεγάλο βαθμό μιας που οι υπερβάσεις είναι λιγότερο από 16% και οι χρόνοι ανόρθωσης και διακανονισμού έχουν σχετικά μικρή τιμή. Η μοναδική εξαίρεση είναι η εφαρμογή του PSO με την ITAE συνάρτηση κόστους: η εξαιρετικά μεγάλη υπέρβαση δεν είναι αποδεκτή αν και ο χρόνος ανόρθωσης και διακανονισμού είναι αποδεκτός.

Σε όλες τις περιπτώσεις, ο ACO παράγει ένα συντονισμένο PID ελεγκτή που έχει την μικρότερη υπέρβαση (ίση με την BA για την ITAE συνάρτηση κόστους). Ωστόσο, σε σχέση με το χρόνο ανόρθωσης και διακανονισμού ο ACO έχει συνεχόμενα την χειρότερη απόδοση-σε αυτήν την περίπτωση τα καλύτερα αποτελέσματα προέρχονται από τον PSO αλγόριθμο. Ανάμεσα σε όλα τα τεστ, η χαμηλότερη τιμή fitness για τη συγκεκριμένη συνάρτηση κόστους επιτυγχάνεται με τον PSO.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι και οι τρεις μέθοδοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για συντονισμό ελεγκτή. Το δυνατό σημείο των τριών μεθόδων βρίσκεται στην προσέγγιση παράλληλης έρευνας που εφαρμόζουν. Με υπολογιστικούς όρους, η προσέγγιση PSO είναι γρηγορότερη, αν και κανένας από τους αλγόριθμους δεν χρειάζεται πολύ χρόνο. Τα αποτελέσματα για τον BA υποδηλώνουν ότι παρότι είναι μια αξιόλογη τεχνική, δεν προσφέρει καμία βελτίωση σε σχέση με τις άλλες δύο τεχνικές. Όσον αφορά την μεταβατική απόκριση του ελεγχμένου συστήματος, η απόφαση για το αν ο PSO ή ο ACO προσφέρουν μια βελτιωμένη μέθοδο σχετίζεται με τα κριτήρια απόδοσης που απαιτούνται για την ελεγχμένη απόκριση: ελάχιστη υπέρβαση θα υποδήλωνε ACO, ενώ ένας γρήγορος χρόνος ανόρθωσης και διακανονισμού δείχνει προς τον PSO.

Τεχνικές όπως αυτές που συζητούνται εδώ, έχουν αποδειχτεί αποτελεσματικές λύσεις σε προβλήματα βελτιστοποίησης (BA σε μικρότερο βαθμό). Παρόλα αυτά, τέτοιες τεχνικές δεν είναι μια οικουμενική λύση, παρά την ευρωστία που δείχνουν. Κάθε τεχνική έχει παραμέτρους ελέγχου που ορίζονται από το χρήστη, και η σωστή επιλογή αυτών των παραμέτρων είναι το κλειδί της επιτυχίας. Μόνο ένα πρόβλημα παραμένει και για τις τρεις προσεγγίσεις, η κατάλληλη επιλογή μιας αντικειμενικής συνάρτησης: αν και αυτό δημιουργεί πρόβλημα σε όλες τις τεχνικές βελτιστοποίησης.

Βελτιστοποίηση με Αποικία Μελισσών με Τοπική Έρευνα για το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου

Πωλητή .Συνοπτική Περιγραφή: Πολλές πραγματικές βιομηχανικές εφαρμογές ασχολούνται με την εύρεση ενός μονοπατιού Hamilton με το λιγότερο κόστος. Περιπτώσεις που ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία είναι το πρόβλημα πλοήγησης μεταφορών, η αλυσίδα βελτιστοποίησης ανίχνευσης και το πρόβλημα γεώτρησης σε πείραμα και παραγωγή ενσωματωμένης διαδρομής. Αυτή η εργασία παρουσιάζει τον αλγόριθμο Βελτιστοποίησης με Αποικίας Μελισσών (BCO) για το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή (TSP). Το μοντέλο BCO δημιουργείται αλγοριθμικά βασισμένο στην συλλογική νοημοσύνη όπως αυτή φαίνεται στην συμπεριφορά συγκομιδής των μελισσών. Το μοντέλο ενσωματώνεται με 2- opt ευρετική για να βελτιώσουμε περαιτέρω τις προηγούμενες λύσεις που παράγονται από το μοντέλο BCO. Παρουσιάζονται επίσης, τα πειραματικά αποτελέσματα της σύγκρισης του προτεινόμενου μοντέλου BCO με τις υπάρχουσες εφαρμογές σε ένα σύνολο χαρακτηριστικών προβλημάτων. Το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή ασχολείται με την εύρεση ενός μονοπατιού Hamilton με το λιγότερο κόστος. Είναι σύνθετες σε χώρους όπως η διοικητική υποστήριξη, οι μεταφορές και οι βιομηχανίες ημιαγωγών. Για παράδειγμα, η εύρεση ενός βελτιστοποιημένου δρομολογίου αλυσίδων ανίχνευσης σε δοκιμή ενσωματωμένων τσιπ, η συλλογή πακέτων και η αποστολή τους σε εταιρείες logistics, είναι κάποιες από τις πιθανές εφαρμογές του TSP. Μια αποτελεσματική λύση σε τέτοια προβλήματα θα εξασφαλίσει ότι οι εργασίες διεξάγονται αποτελεσματικά και άρα αυξάνουν την παραγωγικότητα. Εξαιτίας της σημασίας του για πολλές βιομηχανίες, το TSP μελετάται ακόμα από ερευνητές διαφόρων κλάδων. Κάποιες συμπεριφορές ζώων έχουν την δυνατότητα να προσαρμοστούν ώστε να λύσουν το TSP. Ένα τέτοιο παράδειγμα θα ήταν οι κατά πολύ συντονισμένες δομές συμπεριφοράς των μελισσών [1] και των μυρμηγκιών [2] στη συγκομιδή τροφής. Τα μυρμηγκία αφήνουν μια χημική ουσία γνωστή ως φερομόνη κατά μήκος της διαδρομής ανάμεσα στην αποικία τους και την πηγή τροφής. οι μέλισσες εκτελούν τον κουνιστό ή μικτό χορό επιστρέφοντας στην κυψέλη τους αφού έχουν βρει μια πηγή τροφής. Το ίχνος φερομόνης και ο κουνιστός χορός χρησιμοποιούνται ως ένα μέσο επικοινωνίας ανάμεσα στα άτομα στην αποικία των μυρμηγκιών και των μελισσών. Αυτά τα άτομα εκτελούν συνήθως τις πράξεις τους (το να αφήνουν φερομόνη ή να εκτελούν τον κουνιστό χορό) τοπικά με περιορισμένη γνώση του γενικού συστήματος. Ωστόσο, όταν οι τοπικές τους πράξεις συνδυαστούν, θα προκύψουν γενικές επιδράσεις όπως το να κατευθυνθούν περισσότερα άτομα στην νέα πηγή τροφής που ανακαλύφθηκε. Έχουμε περιγράψει προηγουμένως έναν αλγόριθμο Βελτιστοποίησης με Αποικία Μελισσών (BCO) για TSP στο [3]. Το μοντέλο βασίζεται στην συμπεριφορά συγκομιδής των μελισσών όπου αυτές χρησιμοποιούνται για την παραγωγή εφικτών λύσεων για χαρακτηριστικά προβλήματα TSP που βρίσκονται στο TSPLIB. Η αρχική μας εργασία [3] έδειξε ότι ο αρχικός BCO αλγόριθμος στο TSP μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω. Σε αυτήν την εργασία αναφέρουμε το πως ενσωματώνουμε το μοντέλο BCO με μια 2-opt ευρετική τοπικής έρευνας έτσι ώστε ο BCO αλγόριθμος να μπορέσει να δώσει καλύτερες λύσεις για επιλεγμένα προβλήματα TSP. Αυτή η εργασία ξεκινάει με μια συζήτηση πάνω στο TSP στην Ενότητα II. Η Ενότητα III εξηγεί την 2-opt ευρετική. Στην Ενότητα IV παρουσιάζεται μια συζήτηση πάνω στο μοντέλο BCO. Η Ενότητα V ασχολείται με τις λεπτομέρειες της εφαρμογής του αλγορίθμου BCO για το TSP. Στην Ενότητα VI παρουσιάζονται πειράματα και αποτελέσματα. Τέλος, η εργασία αυτή ολοκληρώνεται με το συμπέρασμα και με μελλοντικές εργασίες.

Το Πρόβλημα του Περιπλανώμενου Πωλητή (TSP)

Ας υποθέσουμε ότι έχει δοθεί σε ένα περιπλανώμενο πωλητή μια ομάδα πόλεων συσχετιζόμενων με ταξιδιωτικές αποστάσεις (ή κόστη) από μια πόλη σε μία άλλη. Ο πωλητής πρέπει να κάνει μια πλήρη διαδρομή (δηλαδή πρέπει

να επισκεφτεί κάθε πόλη μόνο μια φορά και μετά να επιστρέψει στην πόλη αφετηρία) ακολουθώντας τη μικρότερη απόσταση (ή κόστος). Το TSP πρέπει να καθορίσει, λοιπόν, μια διαδρομή Hamilton με το λιγότερο κόστος. Το TSP είναι ένα από τα διακριτά προβλήματα βελτιστοποίησης που ταξινομούνται ως NP-hard [4].

Γενικά, το TSP μπορεί να δηλωθεί μέσω γραφικών παραστάσεων ακολούθως:

- $G = (V, E)$ είναι το γράφημα
- V είναι ένα σύνολο πόλεων m ,
- E είναι ένα σύνολο τόξων ή ακμών,

Το E συνδέεται συνήθως με ένα δίκτυο απόστασης (ή κόστους), που ορίζεται ως το πρόβλημα είναι ένα συμμετρικό TSP (STSP). Διαφορετικά, μετατρέπεται σε ένα ασύμμετρο TSP (ATSP).

Στο TSP, ο στόχος είναι να καθοριστεί η μετάθεση π του συνόλου V που ελαχιστοποιεί την απόσταση της πλήρους διαδρομής όπως φαίνεται στην Εξίσωση (1). Μια επισκόπηση και οι θεμελιώδεις έννοιες του TSP βρίσκονται στο [5, 6].

Ποικίλες τεχνικές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την επίλυση του TSP. Σε γενικές γραμμές, αυτές οι τεχνικές ταξινομούνται σε δύο εκτεταμένες κατηγορίες: ακριβείς και προσεγγιστικούς αλγόριθμους [4]. Οι ακριβείς αλγόριθμοι είναι μέθοδοι που χρησιμοποιούν μαθηματικά μοντέλα ενώ οι προσεγγιστικοί αλγόριθμοι κάνουν χρήση των ευρετικών και επαναληπτικών βελτιώσεων ως διαδικασία επίλυσης του προβλήματος. Κάποιες περιπτώσεις στην κατηγορία των μεθόδων αυτών είναι οι Διακλάδωση και Οριοθέτηση, Χαλάρωση Lagrange και Ακέραιος Γραμμικός Προγραμματισμός.

Οι προσεγγιστικοί αλγόριθμοι μπορούν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε δύο ομάδες: σε εποικοδομητικές ευρετικές και ευρετικές βελτίωσης. Περιπτώσεις εποικοδομητικών ευρετικών είναι οι Κοινοτόρη Γειτονιά, Άπληστες Ευρετικές, Ευρετικές Ένθεσης [7], Ευρετικές Χριστοφίδη [8] κτλ. Περιπτώσεις ευρετικών βελτίωσης είναι οι k-opt [9], Ευρετικές Lin-Kernighan [10, 11], Προσομοιωμένη Ανόπτηση [12], Έρευνα Ταμπού [13], Εξελκτικό Αλγόριθμοι [14-16], Βελτιστοποίηση με Αποκίες Μυρμηγκιών [17, 18] και Σύστημα Μελισσών [19]. Στην επόμενη ενότητα, παρουσιάζεται μια τοπική ευρετική βελτίωσης για το TSP βασισμένη σε απλές τροποποιήσεις διαδρομής.

ΤΟΠΙΚΗ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ: 2-ΟΡΤ ΕΥΡΕΤΙΚΗ

Οι ευρετικές βελτίωσης χρησιμοποιούνται ευρέως για την επίλυση πολλών συνδυαστικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Γενικά, οι ευρετικές αυτής της κατηγορίας αποτελούνται από τα ακόλουθα βήματα:

1. Παραγωγή μιας ψευδο-τυχαίας εφικτής λύσης, R .
2. Εκτέλεση τροποποίησης στο R ώστε να γίνει R' .
3. Αντικατάσταση του R με το R' αν το R' βρεθεί να είναι καλύτερο από το R . Επανάληψη του βήματος 2 μέχρι να μην παρατηρείται πια κάποια βελτίωση. Σε αυτό το στάδιο, το R θεωρείται το τοπικό βέλτιστο.
4. Επανάληψη του βήματος 1 έως 3 μέχρι ένας προκαθορισμένος υπολογιστικός χρόνος να ξεπεραστεί ή μέχρι να βρεθεί ένα ικανοποιητικό αποτέλεσμα.

Στο πλαίσιο του TSP, το R μπορεί να θεωρηθεί ως μία μετάθεση πόλεων όπου Ένα εφικτό R πρέπει να εκπληρώσει την αντικειμενική συνάρτηση C που περιγράφεται στην Ενότητα II. Ένας μηχανισμός τροποποίησης διεξάγεται ώστε να βρεθεί ένα καλύτερο R . Όταν βρεθεί, το R αντικαθίσταται από το R' . Η τροποποίηση επαναλαμβάνεται μέχρι το R να γίνει τοπικό βέλτιστο.

Ένα παρόμοιο πλαίσιο έχει εφαρμοστεί και σε αυτήν την εργασία. Ωστόσο, το μοντέλο BCO χρησιμοποιείται περισσότερο για να παράγει ένα σύνολο εφικτών λύσεων παρά για να χρησιμοποιήσει μια ψευδο-τυχαία προσέγγιση. Αυτές οι παραγόμενες λύσεις βελτιώνονται περαιτέρω με τη χρήση τοπικής προσέγγισης αναζήτησης, πιο συγκεκριμένα την 2-opt ευρετική. Και οι δύο προσεγγίσεις ενσωματώνονται για την επίλυση του TSP. Σε αυτήν την ενότητα, παρουσιάζεται η 2-opt ευρετική. Ο BCO αλγόριθμος, που παράγει ένα σύνολο εφικτών λύσεων θα συζητηθεί στην επόμενη ενότητα.

Η 2-opt ευρετική είναι μια μέθοδος που εφαρμόζεται συχνά για την επίλυση του TSP. Κάποια από τα πλεονεκτήματα την εφαρμογής της 2-opt ευρετικής στο TSP είναι η απλότητα της εφαρμογής του και η ικανότητα του να αντλεί σχεδόν βέλτιστα αποτελέσματα. Η βασική ιδέα πίσω από την 2-opt ευρετική η απαλοιφή δύο τόξων στο R ώστε να επιτευχθούν δύο διαφορετικά μονοπάτια. Αυτά τα δύο μονοπάτια επανασυνδέονται στη συνέχεια με τον άλλο δυνατό τρόπο. Ας θεωρήσουμε μια εφικτή λύση, R , με την αντιμετάθεση 'A, B, C, D, E, F, A' με συνολικό μήκος γύρου/διαδρομής 8 μονάδων όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(a). Αυτή η κλειστή διαδρομή τροποποιείται παραπάνω απαλείφοντας πρώτα τα δύο τόξα (B, C) και (E, F) και δημιουργώντας έτσι δύο ξεχωριστά μονοπάτια 'F, A, B' και 'C, D, E'. Κατόπιν, αυτά τα δύο μονοπάτια ενώνονται ξανά για την δημιουργία άλλης μιας κλειστής διαδρομής, $R' = 'A, B, E, D, C, F, A'$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1(b). Να σημειώσουμε ότι υπάρχει μόνο

ένας πιθανός τρόπος για να ενώσουμε αυτά τα δύο μονοπάτια ώστε να διατηρήσουμε το μήκος των τεσσάρων άλλων τόξων. Εκτελώντας μια τροποποίηση δύο τόξων, το συνολικό μήκος της κλειστής διαδρομής μειώνεται από 8 μονάδες σε 6 μονάδες (μέτρησης). Ο 2-opt μηχανισμός τροποποίησης μπορεί να γενικευτεί για την περίπτωση περισσότερων τόξων στην διαδικασία απαλοιφής-και-επανασύνδεσης. k-opt [9] είναι η γενική ορολογία για αυτήν την προσέγγιση.

ΤΟ BCO ΜΟΝΤΕΛΟ ΜΕ ΤΟΠΙΚΗ ΑΝΑΖΗΤΗΣΗ

Αυτή η ενότητα περιγράφει πρώτα το φυσικό μοντέλο συγκομιδής μιας τυπικής αποικίας μελισσών. Στη συνέχεια, περιλαμβάνεται μια επισκόπηση του πώς το μοντέλο συγκομιδής χρησιμοποιείται στην κατασκευή εφικτών μονοπατιών για το TSP. Θα δοθεί έμφαση στον μηχανισμό καταλληλότητας του τόξου στον κανόνα μετάβασης κατάστασης. Στο τέλος αυτής της ενότητας, παρουσιάζεται ένας BCO αλγόριθμος για το TSP.

A. Αποικία Μελισσών

Η συμπεριφορά συγκομιδής σε μια αποικία μελισσών παρέμενε μυστήριο για πολλά χρόνια μέχρις ότου ο von Frisch να μεταφράσει την γλώσσα που είναι ενσωματωμένη στον κουνιστό χορό των μελισσών [1]. Ο κουνιστός χορός λειτουργεί ως επικοινωνιακό εργαλείο ανάμεσα στις μέλισσες. Αν μία μέλισσα βρει μια πλούσια πηγή τροφής, καθώς επιστρέφει στην κυψέλη, αρχίζει να χορεύει σχηματίζοντας ένα οκτώ. Αυτός ο χορός αποτελείται από μία ευθεία κουνιστή διαδρομή που ακολουθείται από μια στροφή προς τα δεξιά και πίσω στην αφετηρία, και στη συνέχεια από άλλη μία ευθεία κουνιστή διαδρομή που ακολουθείται από μια στροφή προς τα αριστερά και ξανά πίσω στην αφετηρία. Συνήθως, η μέλισσα το επαναλαμβάνει αυτό αρκετές φορές. Παράδοξως, μέσω αυτού του διαφωτιστικού χορού, η μέλισσα έχει καταφέρει να ενημερώσει τα μέλη της κυψέλης της για την κατεύθυνση και την απόσταση της πηγής τροφής. η κατεύθυνση εκφράζεται μέσω της γωνίας του χορού σε σχέση με τη θέση του ήλιου ενώ η απόσταση εκφράζεται μέσω του μήκους της ευθείας κουνιστής διαδρομής. Αυτή η διαδικασία κωδικοποίησης και αποκωδικοποίησης θα φέρει εντέλει περισσότερες μέλισσες προς τη νέα πηγή τροφής. συζητήσεις για τον κουνιστό χορό μπορούν να βρεθούν στο [20, 21].

B. Κατασκευή Μονοπατιού στις Τεχνητές Μέλισσες

Στο προτεινόμενο μοντέλο, μια μέλισσα μπορεί να εξερευνήσει και να αναζητήσει ένα ολοκληρωμένο μονοπάτι διαδρομής. Πριν να φύγει από την κυψέλη, η μέλισσα θα παρατηρήσει τυχαία τους χορούς που θα εκτελεστούν από τις άλλες μέλισσες. Η μέλισσα στη συνέχεια εξοπλίζεται με μια σειρά από κινήσεις εντολές που παρατηρήθηκαν στον χορό. Αυτό το σύνολο κινήσεων, που ονομάζεται 'προτεινόμενο μονοπάτι' και ορίζεται ως θ , θα λειτουργήσει ως οδηγός σε αυτήν την διαδικασία συγκομιδής. Το θ περιέχει μια ολοκληρωμένη διαδρομή που έχει προηγουμένως εξερευνηθεί από άλλο μέλος και θα κατευθύνει τη μέλισσα προς τον προορισμό. Είναι μία από τις αντιμεταθέσεις π του συνόλου V όπως περιγράφεται στην Ενότητα II,

Κατά τη διάρκεια της διαδικασίας συγκομιδής, μια μέλισσα θα ταξιδέψει από μια πόλη σε μία άλλη μέχρι να φτάσει στον προορισμό της. Στο μοντέλο μελισσών, ο κανόνας ευρετικής μετάβασης εφαρμόζεται για να βοηθήσει την μέλισσα στην απόφαση της για το ποια πόλη να επισκεφτεί στη συνέχεια. Αυτός ο κανόνας αποτελείται από δύο παράγοντες: την καταλληλότητα του τόξου και την ευρετική απόσταση. Η καταλληλότητα του τόξου υπολογίζεται για όλα τα πιθανά μονοπάτια σε πόλεις που μπορεί να επισκεφτεί μια μέλισσα από μια συγκεκριμένη πόλη σε συγκεκριμένο χρόνο. Μια υψηλότερη τιμή fitness δίνεται στο τόξο που είναι μέρος του επιλεγμένου μονοπατιού. Μέσω αυτής της κίνησης, μια μέλισσα τείνει να επιλέγει την επόμενη πόλη προς επίσκεψη που είναι πιο κοντά στην πόλη που ήδη βρίσκεται.

Ιδού ένα παράδειγμα μιας μέλισσας που επισκέπτεται πέντε πόλεις κάτω από την επίδραση της fitness του τόξου. Ας υποθέσουμε ότι μια μέλισσα θα επισκεφτεί πέντε απόλυτα συνδεδεμένες πόλεις, που ορίζονται από το $V = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. Θεωρείται ότι η μέλισσα θα ξεκινήσει τη συγκομιδή από την κυψέλη της, που ορίζεται ως πόλη H. Εξοπλίζεται με το επιλεγμένο μονοπάτι, $\theta = \{3, 2, 1, 4, 5, 3\}$, που παρατηρείται μέσω ενός χορού από μια άλλη μέλισσα πριν να εγκαταλείψει την κυψέλη. Η κυψέλη και οι υπόλοιπες πόλεις είναι σε ίση απόσταση μεταξύ τους. Υποθέτοντας την ύπαρξη αυτής της απόστασης, μια μέλισσα επηρεάζεται υπέρ του να επισκεφτεί την πρώτη πόλη στο θ . Αυτό απλοποιεί το παράδειγμα μιας που η ευρετική απόσταση δεν θα έχει καμία επίδραση στην λήψη αποφάσεων σε αυτό το παράδειγμα. Η επίδραση της ευρετικής απόστασης στο μοντέλο μας θα συζητηθεί στην επόμενη ενότητα.

Όταν μια μέλισσα είναι στην πόλη i μετά από n μεταβάσεις, δύο σύνολα επόμενων πόλεων προς επίσκεψη μπορούν να βρεθούν, πιο συγκεκριμένα το σύνολο των 'επόμενων επιτρεπόμενων πόλεων', και το σύνολο της 'επιλεγμένης επόμενης πόλης', Το A_i μπορεί να οριστεί ως ένα σύνολο πόλεων που μπορεί να φτάσει η μέλισσα από την πόλη i στην μετάβαση n . F_i είναι το σύνολο που περιέχει μια πόλη προς την οποία η μέλισσα επιλέγει να κινηθεί από την πόλη i στην μετάβαση n , όπως ορίζεται από το θ . Ας υποθέσουμε ότι το $\theta(n)$ δείχνει το

m -th στοιχείο στο θ . Αν μια μέλισσα έχει μόλις αρχίσει την εξερεύνηση της από την κυψέλη, το F είναι ∞ . Αν η παρούσα επισκεπτόμενη πόλη είναι $\theta(q)$ μετά από n μεταβάσεις, τότε

Όταν το $n = 0$, μια μέλισσα εγκαταλείπει την κυψέλη της και αποφασίζει την πρώτη πόλη προς επίσκεψη. Βασισμένοι στο $\theta = \{3, 2, 1, 4, 5, 3\}$, προσδιορίζονται δύο ομάδες πόλεων: $\dots = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ και $\dots = \{3\}$. Σε όλα τα τόξα που συνδέουν την κυψέλη και τις πόλεις στο A_{\dots} δίνεται μια τιμή fitness: το λ δίνεται στο τόξο $(H, 3)$ και το $(1-\lambda)$ στα τόξα $(H, 1)$, $(H, 2)$, $(H, 4)$ και $(H, 5)$.

Οι τιμές fitness στην μετάβαση n από την πόλη i μπορούν να συνοψιστούν στον πίνακα τόξων fitness. Φ_{\dots} με διάσταση $1 \times \dots$. Κάθε καταχώριση Φ_{\dots} ορίζεται από το ρ_{\dots} που δείχνει την τιμή fitness που έχει δοθεί στο τόξο από την πόλη i στην πόλη j όπου \dots . Ο παρακάτω πίνακας αντιπροσωπεύει τις τιμές fitness των τόξων από την κυψέλη στην πόλη $j \dots$ όπου $n = 0$.

Το λ αντιπροσωπεύει την πιθανότητα να ακολουθήσει μια πόλη στο επιλεγμένο μονοπάτι. Προσέξτε ότι ο πίνακας fitness τόξων συνδέεται με την ακόλουθη ιδιότητα όπως φαίνεται στην Εξίσωση (2).

Όταν το $n = 1$ και αν υποθέσουμε ότι η πόλη 3 επιλέγεται στο προηγούμενο στάδιο: $A_{\dots} = \{1, 2, 4, 5\}$ και $\dots = \{2\}$. Κατά τον ίδιο τρόπο, η fitness τόξων όλων των πόλεων στο A_{\dots} φαίνεται παρακάτω:

Η ιδέα του μηχανισμού είναι να εξασφαλίσει ότι η προτεινόμενη πόλη του επιλεγμένου μονοπατιού έχει μεγαλύτερη πιθανότητα (το λ σε αυτήν την περίπτωση) να επιλεγεί ενώ τα υπόλοιπα τόξα μοιράζονται την πιθανότητα $1-\lambda$.

Ας υποθέσουμε ότι όταν το $n = 1$, επιλέγεται η πόλη 5. Όταν περάσουμε στο $n = 2$, το $A_{\dots} = \{1, 2, 4\}$ και το $\dots = \{3\}$. Προσέξτε ότι η προτεινόμενη από το επιλεγμένο μονοπάτι πόλη 3 δεν είναι πλέον εφικτή (λύση) μιας που την έχουν επισκεφτεί όταν το $n = 0$. Άρα, σε όλα τα τόξα που συνδέουν την πόλη 5 με τις πόλεις στο A_{\dots} θα δοθεί η πιθανότητα του $1/3$ όπως φαίνεται στον επόμενο πίνακα fitness τόξων:

Γ. BCO Αλγόριθμος με 2-opt για το TSP

Διάφορα μοντέλα βελτιστοποίησης με αποικίες μελισσών έχουν επιχειρηθεί σε διαφορετικούς τομείς, από δυναμική κατανομή εξυπηρετητή για κέντρο υποδοχής ίντερνετ [22], βελτιστοποίηση αριθμητικής συνάρτησης [23], εξαπλό πρόγραμμα παιχνιδιού [24], χώρος σχεδιασμού εργασίας [25, 26] στο TSP [3, 19]. Στο [19], οι Lucic και Teodorovic πρότειναν ένα Σύστημα Μελισσών (BS) για την επίλυση του TSP. Στο μοντέλο τους, οι μέλισσες χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία τμηματικών διαδρομών σε κάθε επανάληψη. Η θέση της κυψέλης θα επαναπροσδιοριστεί σε νέα πόλη μετά από κάθε επανάληψη. Η αλληλεπίδραση ανάμεσα στις μέλισσες στο μοντέλο τους εφαρμόζεται με δύο τρόπους: τη μνήμη και τον κουνιστό χορό. Οι μέλισσες έχουν την δυνατότητα να απομνημονεύουν το πόσες μέλισσες επισκέφτηκαν συγκεκριμένους συνδέσμους στο παρελθόν και μπορούν να διαφημίσουν τμηματικές διαδρομές σε άλλα μέλη της κυψέλης. Αμέσως μετά την έναρξη μιας νέας επανάληψης, η λύση βελτιώνεται με τις 2-opt, 3-opt και τροποποιημένες 3-opt ευρετικές.

Σε αυτήν την ενότητα, περιγράψαμε τον προτεινόμενο BCO αλγόριθμο μας με αλγόριθμο τοπικής αναζήτησης για το TSP. Το πλαίσιο του BCO αλγορίθμου μας φαίνεται στο Σχήμα 2. Παρατηρούμε τις παρακάτω διακρίσεις ανάμεσα στο προτεινόμενο μοντέλο μας και το [19]:

- Οι μέλισσες στο προτεινόμενο μοντέλο μας δεν έχουν την δυνατότητα να θυμούνται τον αριθμό των μελισσών που έχουν επισκεφτεί ένα τόξο.
- Οι μέλισσες στο προτεινόμενο μοντέλο μας δείχνουν ολόκληρο το εφικτό μονοπάτι και όχι τμηματικές διαδρομές μέσω του κουνιστού χορού.
- Η κυψέλη των μελισσών στο προτεινόμενο μοντέλο μας θεωρείται ότι έχει ίση απόσταση από όλες τις πόλεις.
- Οι μέλισσες επηρεάζονται τόσο από την καταλληλότητα του τόξου όσο και από την απόσταση ανάμεσα στις πόλεις όσον αφορά την εύρεση λύσεων.

Στο προτεινόμενο μοντέλο μας, δημιουργείται μια ομάδα μελισσών κατά το αρχικό στάδιο. Ο αριθμός των μελισσών, N_{\dots} είναι ίσος με τον συνολικό αριθμό των πόλεων στην περίπτωση του προβλήματος TSP. Κατά συνέπεια, ξεκινάει η διαδικασία συγκομιδής. Οι μέλισσες μπορούν να εξερευνήσουν και να αξιοποιήσουν το χώρο έρευνας για να δημιουργήσουν ένα εφικτό μονοπάτι για το TSP. Όταν όλες οι μέλισσες έχουν ολοκληρώσει την κατασκευή του μονοπατιού, αυτό θεωρείται ένας ολοκληρωμένος κύκλος μελισσών. Μιας που οι μέλισσες δεν έχουν κανένα χορό για να ακολουθήσουν στον πρώτο κύκλο μελισσών, τους επιτρέπεται να εξερευνήσουν τυχαία το χώρο έρευνας. Αυτό θα επιτρέψει την διαφοροποίηση της έρευνας. Η φάση εκκίνησης μπορεί να τροποποιηθεί για να περιορίσει τις μέλισσες στην κατασκευή μονοπατιών βασισμένη σε συγκεκριμένες κατασκευαστικές ευρετικές που έχουν αναφερθεί στην Ενότητα II, όπως η Κοντινότερη Γειτονιά, οι Άπληστες Ευρετικές και οι Ευρετικές Ένθεσης.

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα IV.B, μια μέλισσα βοηθιέται από έναν κανόνα μετάβασης κατάστασης ώστε να λάβει την απόφαση για το ποια πόλη να επισκεφτεί στη συνέχεια. Η πιθανότητα μετάβασης κατάστασης, P_{\dots} , δίνει

την πιθανότητα να κινηθεί από την πόλη i στην πόλη j μετά από n μεταβάσεις. Είναι μια συνάρτηση της απόστασης ανάμεσα στις πόλεις και της fitness του τόξου που υπάρχει στις συνδεδεμένες άκρες. Επίσημα, ορίζεται στην Εξίσωση (3): όπου ρ_{ij} είναι η fitness του τόξου από την πόλη i στην πόλη j μετά από n μεταβάσεις και d_{ij} είναι η απόσταση ανάμεσα στην πόλη i και στην πόλη j . Ας σημειώσουμε ότι το P_{ij} είναι αντιστρόφως ανάλογο με την απόσταση των πόλεων. Με άλλα λόγια, όσο μικρότερη είναι η απόσταση, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα αυτής της πόλης να επιλεγεί. α είναι μια διττή μεταβλητή που ενεργοποιεί ή απενεργοποιεί την επίδραση της fitness του τόξου στο μοντέλο. Το β χρησιμεύει για τον έλεγχο του ενδεικτικού επιπέδου της ευρετικής απόστασης.

Η fitness του τόξου ρ_{ij} , καθορίζεται όπως στην Εξίσωση (4). Ο μηχανισμός της fitness του τόξου στην κατασκευή μονοπατιού έχει συζητηθεί στην Ενότητα IV.B. είναι 1 όπου υπάρχει μια κοινή περίπτωση τόσο στο A_{ij} όσο και στο F_{ij} ή διαφορετικά 0. δείχνει την διαφορά ανάμεσα σε ομάδες A_{ij} και F_{ij} . Περιέχει όλα τα στοιχεία του A_{ij} που δεν είναι παρόντα στο F_{ij} . όταν έχει απομείνει μόνο μια πόλη στο A_{ij} , το ρ_{ij} ορίζεται στο 1 για να δείξει ότι η πόλη είναι η μόνη επιλογή. Αυτό συμβαίνει στην τελευταία μετάβαση πριν η μέλισσα να ξαναεπισκεφτεί την αρχική πόλη και να ολοκληρώσει την διαδρομή.

Αφού μια μέλισσα έχει χτίσει ένα ολοκληρωμένο μονοπάτι σύμφωνα με τον κανόνα μετάβασης, το μονοπάτι θα βελτιωθεί από την 2-opt ευρετική όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα III. Η 2-opt ευρετική εφαρμόζεται επανειλημμένα μέχρι να φτάσει το 2-opt βέλτιστο όπου το μήκος της διαδρομής δεν δείχνει περαιτέρω βελτίωση.

Μετά από την λειτουργία 2-opt, θα εκτελεστεί ένας χορός από την μέλισσα σε άλλα μέλη της κυψέλης σύμφωνα με την ακόλουθη τακτική: επιτρέπεται να χορέψουν μόνο οι μέλισσες που δημιουργούν ένα μικρότερο μονοπάτι σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές. Με άλλα λόγια, δεν επιτρέπεται να χορέψουν όλες οι μέλισσες με το που επιστρέφουν στην κυψέλη. Μια μέλισσα πρέπει να βρει ένα μικρότερο μήκος διαδρομής σε σχέση με το προηγούμενο καλύτερο μονοπάτι της ώστε να μπορέσει να χορέψει. Έτσι, οι μέλισσες στο προτεινόμενο μοντέλο μας έχουν την δυνατότητα να θυμούνται το καλύτερο μονοπάτι που έχουν βρει προηγουμένως. Χρησιμοποιώντας αυτή την τακτική, είναι πιθανό να μην χορέψει καμία μέλισσα τελικά. Αυτό μπορεί να συμβεί όταν καμία μέλισσα δεν μπορεί να βρει καλύτερο μονοπάτι σε σχέση με τις προηγούμενες δοκιμές της. Για να αποφευχθεί αυτό, εφαρμόζεται μια άλλη τακτική: αν δεν υπάρχει καμία μέλισσα να χορέψει για δέκα συνεχόμενους κύκλους, η μνήμη των μελισσών θα 'ανανεωθεί' για να κρατήσει μια τιμή που είναι δέκα τοις εκατό υψηλότερη από το καλύτερο μήκος μονοπατιού της. Αυτή η τακτική μπορεί να θεωρηθεί ως μηχανισμός αρνητικής ανατροφοδότησης στην ομοιόσταση, μια περίπτωση στην οποία ρυθμίζονται οι ορμόνες στο ανθρώπινο σώμα [27]. Ο σκοπός του να υπάρχει αυτός ο αυτό-ρυθμιζόμενος μηχανισμός στο BCO μοντέλο είναι η διατήρηση μιας ισορροπίας και σταθερής κατάστασης τέτοιας που οι κουνιστοί χοροί να εκτελούνται συνέχεια.

Ένας κουνιστός χορός θα διαρκέσει για συγκεκριμένο χρόνο που καθορίζεται από μια γραμμική συνάρτηση. Η διάρκεια του κουνιστού χορού μιας μέλισσας i , D_{ij} , ορίζεται στην Εξίσωση (5):

όπου το K δείχνει τον παράγοντα κλιμάκωσης του κουνιστού χορού, το P_{ij} δείχνει τον βαθμό αποδοτικότητας της μέλισσας i όπως ορίζεται στην Εξίσωση (6) και το P_{ij} δείχνει την μέση αποδοτικότητα της αποικίας όπως στην Εξίσωση (7) και αναβαθμίζεται αφού κάθε μέλισσα ολοκληρώσει τη διαδρομή της.

Το P_{ij} μπορεί να μεταφραστεί ως η ποσότητα νέκταρος που συλλέγεται από την μέλισσα i , όπου η μέλισσα θεωρείται ότι μπορεί να συλλέξει όσο περισσότερο νέκταρ γίνεται. Μεγαλύτερη ποσότητα νέκταρος θα συλλεγεί αν η μέλισσα ταξιδέψει κατά μήκος μιας μικρότερης διαδρομής. Άρα, το P_{ij} ορίζεται ως αντιστρόφως ανάλογο με το μήκος της διαδρομής.

Πριν μια μέλισσα αφήσει την κυψέλη, θα αποφασίσει αν θα παρατηρήσει και θα ακολουθήσει το χορό προηγούμενης χορεύτριας με μια πιθανότητα P_{ij} . Η πιθανότητα P_{ij} προσαρμόζεται δυναμικά σύμφωνα με τον βαθμό αποδοτικότητας της μέλισσας και της αποικίας βασισμένη στον πίνακα αντιστοίχισης όπως φαίνεται στον Πίνακα 1, που έχει προσαρμοστεί από το [22, 26]. Στην ακραία περίπτωση στην οποία το P_{ij} είναι μηδέν, η μέλισσα θα κρατήσει το δικό της μονοπάτι.

Μια μέλισσα είναι πιο πιθανό να παρατηρήσει και να ακολουθήσει τυχαία ένα κουνιστό χορό αν ο ρυθμός αποδοτικότητας του είναι αργός όταν συγκρίνεται με την μέση αποδοτικότητα της αποικίας. Αν και μια μέλισσα τείνει να επηρεάζεται είτε από τη δική της είτε από την εμπειρία μιας άλλης μέλισσας, μπορεί να παρεκκλίνει περιστασιακά από το επιλεγμένο μονοπάτι της όπως δείχνει η Εξίσωση (3).

ΛΕΠΤΟΜΕΡΕΙΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ

Ο BCO αλγόριθμος που περιγράφεται σε αυτήν την εργασία αναπτύσσεται χρησιμοποιώντας JAVA με Netbeans IDE 5.5 ως εργαλείο ανάπτυξης. Δημιουργείται μια λίστα μονοπατιών για να αντιπροσωπεύσει τους χορούς των μελισσών. Κάθε κουνιστός χορός συνδέεται με μια διάρκεια που δίνεται από την Εξίσωση (5) που μετρείται με κύκλους μελισσών. Η διάρκεια θα καθορίσει πόσο διάστημα ο χορός θα διατηρηθεί στη λίστα. Η λίστα στη

συνέχεια θα ανανεωθεί και θα αναβαθμιστεί μετά από κάθε κύκλο χορού έτσι ώστε οι χοροί που έχουν λήξει να αφαιρεθούν.

Η εφαρμογή μας χρησιμοποιεί το συνδυασμό τυχαίας εξερεύνησης και ευρετικής Κοντινότερης Γειτονιάς για να παράγει αρχικές λύσεις κατά τον πρώτο κύκλο μελισσών. Αυτές οι δύο προσεγγίσεις έχουν την ίδια πιθανότητα να εφαρμοστούν από μία μέλισσα. Η τυχαία εξερεύνηση εφαρμόζεται με τέτοιο τρόπο που η μέλισσα ξεκινάει από μια τυχαία πόλη, και επιλέγει την επόμενη πόλη προς επίσκεψη χρησιμοποιώντας τον κανόνα μετάβασης κατάστασης που συζητήθηκε στην Ενότητα IV.C. Χρησιμοποιώντας την Κοντινότερη Γειτονιά, μια μέλισσα ξεκινάει από μια αυθαίρετη πόλη και μετά επιλέγει την κοντινότερη πόλη για να προχωρήσει. Η τυχαία επιλογή εφαρμόζεται αν υπάρχει ισοπαλία στην απόσταση.

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΚΑΙ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αυτή η ενότητα περιγράφει τα χαρακτηριστικά προβλήματα, τους χαρακτηριστικούς αλγόριθμους και τα πειραματικά αποτελέσματα στην συγκριτική μελέτη μας.

A. Χαρακτηριστικά Προβλήματα

Η απόδοση ενός BCO μοντέλου ερευνάται εφαρμόζοντας τον αλγόριθμο σε χαρακτηριστικά προβλήματα παρμένα από το TSPLB. 20 περιπτώσεις προβλημάτων επιλέγονται από τις σειρές A, ATT, BERLIN, EIL, KRO, LIN, PR, ST και TSP. Η διάσταση των προβλημάτων κυμαίνεται από 48 έως 318 πόλεις. Το αριθμητικό ψηφίο που εμφανίζεται στο όνομα κάθε περίπτωσης προβλήματος δείχνει την διάσταση του προβλήματος. Για παράδειγμα, ATT48 είναι ένα πρόβλημα με 48 πόλεις, LIN318 είναι ένα πρόβλημα με 318 πόλεις και ούτω καθεξής. Ο Πίνακας II περιέχει και τις 20 περιπτώσεις προβλημάτων με τις οποίες ασχολούμαστε σε αυτήν την εργασία.

B. Χαρακτηριστικοί Αλγόριθμοι

Επτά άλλοι χαρακτηριστικοί αλγόριθμοι περιλαμβάνονται στην συγκριτική μας μελέτη. Αυτοί είναι οι εξής: Σύστημα με Αποικία Μυρμηγκιών (ACS) [17], MAX-MIN Σύστημα Μυρμηγκιών (MMAS) [18], Γενετικοί Αλγόριθμοι (GA) [14, 15], Υβρίδια GA με πέρασμα διατήρησης απόστασης (HGA) [16], Lin-Kernighan ευρετική (Lin-Ker) [11, 28], Σύστημα Μελισσών (BS) [19] και Βελτιστοποίηση με Αποικία Μελισσών (BCO) [3]. Τα αποτελέσματα που αναφέρθηκαν σε αυτές τις εργασίες θα συζητηθούν στην Ενότητα VI.C. Ας σημειώσουμε ότι τρεις παραλλαγές συστήματος μελισσών αναφέρθηκαν στο [19]: σύστημα μελισσών με 2-opt, 3-opt και τροποποιημένη 3-opt. Ωστόσο, μόνο τα συστήματα μελισσών με 2-opt και τροποποιημένη 3-opt περιλαμβάνονται στον πίνακα μας που τα αποτελέσματα για 3-opt και τροποποιημένη 3-opt ταυτίζονται.

Διεξήγαμε επίσης μια σύγκριση ανάμεσα στο προτεινόμενο BCO μοντέλο μας και μια τυχαία προσέγγιση. Στην τυχαία προσέγγιση, οι μέλισσες μπορούν να κατασκευάσουν ένα μονοπάτι τυχαία. Όταν μια μέλισσα χρειάζεται να αποφασίσει για την επόμενη πόλη προς επίσκεψη, χρησιμοποιεί ένα τυχαίο κανόνα με την πιθανότητα μετάβασης να καθορίζεται από την Εξίσωση (8). Βασισμένη σε αυτόν τον τυχαίο κανόνα, η πιθανότητα P_{ij} επίσκεψης κάθε πόλης στο A_{ij} είναι ισότιμη.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Αυτή τη ενότητα δείχνει τα αποτελέσματα που βασίζονται στον BCO αλγόριθμο και που συζητήθηκαν στην Ενότητα IV. Μιας που ο BCO αλγόριθμος που περιγράφεται σε αυτήν την εργασία είναι ένας στοχαστικός αλγόριθμος, τα αποτελέσματα αυτής της μελέτης είναι οι μέσοι όροι των πέντε επιβεβαιωτικών επαναλήψεων. Αναφέρουμε επίσης το καλύτερο αποτέλεσμα των πέντε επιβεβαιωτικών επαναλήψεων. Όλα τα αποτελέσματα εμφανίζονται σε σχέση με την απόκλιση του ποσοστού από την γνωστή βέλτιστη τιμή (O_{best}) για κάθε περίπτωση προβλήματος. Για το σενάριο της καλύτερης περίπτωσης, η απόκλιση του ποσοστού ορίζεται ως \dots ενώ για το σενάριο μιας μέσης περίπτωσης, ορίζεται ως \dots . Το Y_{best} δείχνει την καλύτερη τιμή και το Z_{best} δείχνει την μέση τιμή πέντε γύρων για κάθε περίπτωση προβλήματος. Οι Πίνακες II, III, IV και V συνοψίζουν τα πειραματικά αποτελέσματα αυτής της εργασίας.

Όλα τα πειράματα έτρεξαν σε συστοιχία Windows με τέσσερις μονάδες IBM BladeCenter HS21. Κάθε μονάδα εξοπλίζεται με δύο επεξεργαστές Intel Xeon Quad Core E5335 (2.0GHz). Αν και η συστοιχία έχει συνολικά 32 Intel Xeon Core επεξεργαστές, τα πειράματα διανέμονται έτσι ώστε κάθε πείραμα να το χειρίζεται μόνο ένας επεξεργαστής. Μετά την εκτέλεση μιας σειράς από συντονισμούς παραμέτρων, οι ρυθμίσεις παραμέτρων στη διάρκεια των πειραμάτων είναι οι εξής: $BC_{max} = 10000$, $N_{bee} = 0$ συνολικός αριθμός των πόλεων, $\alpha = 1$, $\beta = 10$, $\lambda = 0,95$, $K = 100$. Για να απεικονίσουμε την επίδραση της 2-opt λειτουργίας, άλλο ένα σύνολο πειραμάτων που βασίζεται στην αναφορά του αρχικού BCO μοντέλου στο [3] διεξάγεται με ταυτόσημες ρυθμίσεις παραμέτρων.

Ο Πίνακας II δείχνει την σύγκριση ανάμεσα στον αρχικό BCO και στον BCO+2-opt στα χαρακτηριστικά προβλήματα. Ο πίνακας ταξινομείται με αύξουσα σειρά σύμφωνα με την διάσταση των προβλημάτων. Σημειώνουμε ότι φτάνουμε σε σημαντική βελτίωση μετά την ενσωμάτωση της 2-opt ευρετικής στο BCO μοντέλο. Η 2-opt

ευρετική εκτελείται μέχρι 50 φορές μετά την κατασκευή κάθε μονοπατιού από μια μέλισσα. Με άλλα λόγια, η ευρετική δεν εκτελείται μέχρι να είναι 2-βέλτιστο. Για το σενάριο καλύτερης λύσης, ο BCO+2-opt αλγόριθμος επιτυγχάνει το βέλτιστο αποτέλεσμα για όλες τις περιπτώσεις προβλημάτων. Για την μέση λύση των πέντε επιβεβαιωτικών επαναλήψεων, ο αλγόριθμος επιτυγχάνει το βέλτιστο αποτέλεσμα για όλες τις περιπτώσεις προβλημάτων εκτός από το LIN318. Ο χρόνος για την επίτευξη της καλύτερης λύσης, tbest φαίνεται επίσης στον πίνακα.

Για να ερευνήσουμε την απόδοση και των δύο αλγορίθμων σε αυτές τις 20 περιπτώσεις προβλημάτων, το μέσο των αποκλίσεων ποσοστού για την καλύτερη περίπτωση (mbest) και τη μέση περίπτωση (maverage) φαίνεται στον Πίνακα II. Για τον αρχικό BCO αλγόριθμο, κατά μέσο όρο, το mbest είναι 0,40% και το maverage 0,92% από το βέλτιστο. Αντιθέτως, το mbest και το maverage για τον BCO+2-opt [3] είναι 0,00% και 0,005%.

Ο Πίνακας III συνοψίζει τα αποτελέσματα της τυχαίας προσέγγισης στα 20 προβλήματα. Η τυχαία προσέγγιση συζητείται στην Ενότητα V.B. Όπως φαίνεται στον Πίνακα III, το mbest και το maverage είναι 523,68% και 533,65% αντίστοιχα μετά από 50000 επαναλήψεις, που είναι μακριά από το βέλτιστο. Όταν η επανάληψη αυξηθεί στο 100000, η τυχαία προσέγγιση δείχνει μικρή βελτίωση και το mbest πέφτει 4,48% και το maverage 3,88%. Όταν η τυχαία προσέγγιση ενσωματώνεται με τον 2-opt, το mbest και το maverage πέφτουν σημαντικά. Παρόλα αυτά, όταν η τυχαία προσέγγιση συγκριθεί με τον BCO+2-opt όπως φαίνεται στον Πίνακα II, ο BCO+2-opt ξεπερνάει ακόμα σε απόδοση τον Random+2-opt κυρίως στα προβλήματα με μεγάλη διάσταση.

Ο Πίνακας IV υπογραμμίζει την σύγκριση του BCO+2-opt με έξι άλλες προσεγγίσεις. Τρία χαρακτηριστικά προβλήματα επιλέγονται από την συγκριτική μελέτη: EIL51, KROA 100 και LIN318. Οι διαστάσεις των προβλημάτων αυτών είναι 51, 100 και 318 πόλεις αντίστοιχα. τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο BCO+2-opt μπορεί να ξεπεράσει σε απόδοση τον BS+2-opt και είναι συγκρίσιμο με άλλες προσεγγίσεις.

Ο Πίνακας V δείχνει την σύγκριση ανάμεσα στον BCO+2-opt και τον BS. Αυτή η σύγκριση διεξάγεται μιας που και οι δύο προσεγγίσεις δείχνουν μεγάλη ομοιότητα στην ουσία τους. Και οι δύο χρησιμοποιούν συμπεριφορές συγκομιδής με τοπική έρευνα για το TSP. Από τον πίνακα, βλέπουμε ότι ο BCO+2-opt ξεπερνάει σε απόδοση και τις δύο BS μεταβλητές αντλώντας βέλτιστες λύσεις για όλα τα προβλήματα. Όπως φαίνεται στην βελτίωση που επιτυγχάνεται από τον BS με την 3-opt πάνω από την 2-opt, προβλέπουμε ότι ενσωματώνοντας τον BCO αλγόριθμο με 3-opt επιτρέπουμε βέλτιστες λύσεις να αντληθούν για προβλήματα μεγαλύτερης διάστασης.

Ένας BCO αλγόριθμος βασισμένος στην συλλογική συμπεριφορά συγκομιδής των μελισσών έχει παρουσιαστεί για την επίλυση του TSP. Η ενσωμάτωση της 2-opt ευρετικής στον BCO αλγόριθμο μας έχει βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του. Ο αλγόριθμος έχει δοκιμαστεί σε ένα σύνολο χαρακτηριστικών προβλημάτων και έχει την δυνατότητα να λύσει αυτά τα προβλήματα βέλτιστα εκτός από τα προβλήματα μεγαλύτερης διάστασης. Εξερευνούμε ακόμα την περαιτέρω χρήση ευρετικών k-opt μεγαλύτερης διάστασης (π.χ 3-opt) για να βελτιώσουμε τον BCO αλγόριθμο και να αντλήσουμε βέλτιστη λύση για προβλήματα μεγαλύτερης διάστασης.

Μια γραμμική συνάρτηση στον υπολογισμό της διάρκειας του κουνιστού χορού εφαρμόζεται στο παρόν BCO και BCO+2-opt μοντέλο. Θα διεξάγουμε έρευνες για να δούμε αν μπορεί να αντικατασταθεί από άλλους τύπους συναρτήσεων όπως οι σιγμοειδείς ή οι τετραγωνικές συναρτήσεις. Αυτό γίνεται διότι ο κουνιστός χορός παίζει σημαντικό ρόλο στην κατεύθυνση των μελισσών προς την επίτευξη του βέλτιστου. Διατηρώντας και αξιοποιώντας μια σχετικά καλή λύση με μια σχετική διάρκεια, βοηθάμε στην επίτευξη του βέλτιστου για αυτά τα χαρακτηριστικά προβλήματα.

Δομική αντίστροφη ανάλυση από υβριδικούς αλγόριθμους απλόκου αποικίας τεχνητών μελισσών ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ. Ο υβριδικός μονοκατευθυντικός αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών (HSABCA) που συνδυάζει την μέθοδο απλόκου Nelder-Mead με τον αλγόριθμο αποικίας τεχνητών μελισσών (ABCA) προτείνεται για προβλήματα αντίστροφης ανάλυσης. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόζεται σε ταυτοποίηση παραμέτρων συστημάτων θεμελίωσης σκυρόδετων φραγμάτων. Για να επιβεβαιωθεί η απόδοση του HSABCA, συγκρίνεται με τον βασικό ABCA και έναν πραγματικό κωδικοποιημένο γενετικό αλγόριθμο (RCGA) σε δύο παραδείγματα: ένα φράγμα βαρύτητας και ένα φράγμα τόξου. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για αντίστροφη ανάλυση και αποδίδει πολύ καλύτερα από τον ABCA και τον HSABCA σε τέτοια προβλήματα.

Η ποσοτική αξιολόγηση των καταστατικών παραμέτρων μέσω αντίστροφης ανάλυσης δείχνει επί του παρόντος αυξανόμενο επιστημονικό ενδιαφέρον και πρακτική χρησιμότητα, μιας που τα υλικά μοντέλα γίνονται πιο ρεαλιστικά και πολύπλοκα, και τα υπολογιστικά εργαλεία όλο και πιο δυνατά [1]. Σε γενικές γραμμές, η προηγμένη μοντελοποίηση μας επιτρέπει να απαντήσουμε σε ερωτήσεις όπως ‘τι απάντηση θα πρέπει να αναμένεται από αυτή την κατανομή υλικών ιδιοτήτων κάτω από αυτές τις αρχικές συνθήκες.’ Τα αντίστροφα προβλήματα απαιτούν απάντηση σε μια ερώτηση που πηγάζει προς την αντίθετη κατεύθυνση. Η αντίστροφη ανάλυση έχει ευρέως

χρησιμοποιηθεί σε διάφορα πεδία, όπως η γεωλογική διαδικασία μοντελοποίησης [2], δομική βλάβη ή ανίχνευση ρωγμών [3-5], σχεδιασμός συστήματος αποστράγγισης [6], προσομοίωση συστήματος στήριξης ανασκαφών [7], ταυτοποίηση παραμέτρων λιθόρριπτων φραγμάτων [8] και φράγματα από σκυρόδεμα [9-11].

Το όριο Young είναι απαραίτητη παράμετρος της δομικής ανάλυσης για τον προσδιορισμό των κατανομών και των μετατοπίσεων της τάσης, κυρίως όταν το σχέδιο της δομής βασίζεται σε συντελεστές ελαστικότητας. Σε ένα σύστημα θεμελίωσης φράγματος, το μέγεθος ελαστικότητας του σκυροδέματος του φράγματος είναι δύσκολο να καθοριστεί κατευθείαν μέσω δοκιμών μιας που χρειάζονται μεγάλα δείγματα και μηχανήματα δοκιμών [12]. Το μέγεθος του βράχου είναι επίσης δύσκολο να καθοριστεί εξαιτίας των δύσκολων γεωλογικών συνθηκών. Η αντίστροφη ανάλυση είναι ένα δυνατό εργαλείο για τον προσδιορισμό των μηχανικών παραμέτρων των συστημάτων θεμελίωσης φραγμάτων. Μέσω της αντίστροφης ανάλυσης, οι ακριβείς παράμετροι των συστημάτων θεμελίωσης φραγμάτων μπορούν να καθοριστούν, και μπορεί να γίνει μια σχολαστική αξιολόγηση σε σχέση με τις συνθήκες ασφαλείας των φραγμάτων. Ποικίλες στρατηγικές έχουν αναπτυχθεί για την διαγνωστική αντίστροφη ανάλυση των σκυρόδετων φραγμάτων. Μια προσέγγιση διάγνωσης βλαβών για τα σκυρόδετα φράγματα μέσω παρακολούθησης ραντάρ προτείνεται από τον Ardito και άλλους [10, 13]. Μια συνολική μέθοδος αντίστροφης ανάλυσης για σκυρόδετα φράγματα βασισμένη στα νευρωνικά δίκτυα προτείνεται από τον Fedele και άλλους [9, 14]. Μια μέθοδος αντίστροφης ανάλυσης για την ταυτοποίηση των καταστάσεων τάσης και ελαστικών ιδιοτήτων σε σκυρόδετα φράγματα μέσω δοκιμής flat-jack αναπτύχθηκε από τους Fedele και Maier [11].

Τα τελευταία χρόνια, η αντίστροφη ανάλυση βασίζεται κυρίως σε δύο μεθοδολογίες: τα νευρωνικά δίκτυα [8, 9, 15] και τους αλγόριθμους βελτιστοποίησης. Σε αυτήν την εργασία, εστιάζουμε στην αντίστροφη ανάλυση που βασίζεται στην βελτιστοποίηση. Υπάρχουν τρεις τύποι αλγορίθμων βελτιστοποίησης που έχουν χρησιμοποιηθεί στην αντίστροφη ανάλυση. Ο πρώτος τύπος είναι οι άμεσοι ερευνητικοί αλγόριθμοι βασισμένοι στην κλίση, όπως η μέθοδος Levenberg-Marquardt [16], η μέθοδος συζυγών κλίσεων [17] και η μέθοδος περιοχής εμπιστοσύνης [10, 13]. Ο δεύτερος τύπος είναι οι αλγόριθμοι νοήμονας ολικής έρευνας, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι [7, 20, 21], η διαφορική εξέλιξη [22], η βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων [23] και η βελτιστοποίηση με αποικίες μυρμηγκιών [24]. Ο πρώτος και ο δεύτερος τύπος αλγορίθμων έχουν και οι δύο το πλεονέκτημα εκτίμησης λύσεων σε σχετικά μικρό υπολογιστικό χρόνο, αλλά τα αποτελέσματα επηρεάζονται από τις αρχικές τιμές και η πρόωμη σύγκλιση μπορεί να συμβεί. Ως εναλλακτική στους άμεσους ερευνητικούς αλγόριθμους, οι αλγόριθμοι νοήμονας ολικής έρευνας έχουν χρησιμοποιηθεί ευρέως στην αντίστροφη ανάλυση, αλλά έχουν και το μειονέκτημα του ότι είναι πολύ χρονοβόροι.

Σε αυτήν την εργασία, προτείνεται μια μέθοδος ταυτοποίησης παραμέτρων για τα συστήματα θεμελίωσης σκυρόδετων φραγμάτων που βασίζεται στην στατιστική ανάλυση των καταγεγραμμένων μετατοπίσεων φράγματος με έναν υβριδικό αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Ένας καινούριος αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών (ABCA) [25] εμπνευσμένος από την συγκομιδή των μελιτοφόρων μελισσών υιοθετείται για προβλήματα αντίστροφης ανάλυσης. Έχει αποδειχθεί ότι ο ABCA ξεπερνά σε απόδοση τον γενετικό αλγόριθμο, την βελτιστοποίηση σμήνους σωματιδίων σε πολύ-μεταβλητή συνάρτηση βελτιστοποίησης [26, 27]. Για να συνδυάσουμε τα πλεονεκτήματα των άμεσων ερευνητικών μεθόδων με τους αλγόριθμους νοήμονας ολικής έρευνας, ένας υβριδικός μονοκατευθυντικός αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών (HSABCA) που συνδυάζει τον ABCA με την μονοκατευθυντική ερευνητική μέθοδο Nelder-Mead (NMSS) [28-30] προτείνεται για αντίστροφα προβλήματα. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος εφαρμόζεται στην αντίστροφη ανάλυση ενός σκυρόδετου φράγματος βαρύτητας και τόξου. Στα παραδείγματα, τα ψευδο-πειραματικά δεδομένα υιοθετούνται στην αντίστροφη ανάλυση. Οι ψευδο-πειραματικές μετατοπίσεις επιτυγχάνονται μέσω προηγμένης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και μέσω ορισμού επιπέδου νερού και υλικών παραμέτρων σε συγκεκριμένες τιμές. Αυτό σημαίνει ότι δεν χρησιμοποιούνται πειραματικά καταγεγραμμένες μετατοπίσεις φραγμάτων σε αυτήν την μελέτη. Το αποτέλεσμα που επιτυγχάνεται από τον HSABCA συγκρίνεται επίσης και με τον NMSS, ABCA και ένα πραγματικό κωδικοποιημένο γενετικό αλγόριθμο (RCGA).

Αυτή η εργασία οργανώνεται ως εξής. Η Ενότητα 2 παρουσιάζει τη θεωρία της αντίστροφης ανάλυσης για τα σκυρόδετα φράγματα. Η Ενότητα 3 εισάγει τον ABCA ενώ η Ενότητα 4 τον NMSS, και στη συνέχεια αναπτύσσεται ο HSABCA. Η Ενότητα 5 δείχνει την απόδοση του NMSS, RCGA, ABCA και HSABCA σε προβλήματα αντίστροφης ανάλυσης σκυρόδετων φραγμάτων. Τέλος, τα συμπεράσματα δίνονται στην Ενότητα 6.

Αντίστροφη ανάλυση σκυρόδετων φραγμάτων-Στατιστική ανάλυση της καταγεγραμμένης μετατόπισης σκυρόδετων φραγμάτων

Η παρακολούθηση της δομικής κατάστασης των μεγάλων σκυρόδετων φραγμάτων βασίζεται στην απόκτηση των μετρήσεων μετατόπισης. Αυτές οι μετατοπίσεις ερμηνεύονται έτσι ώστε να ανιχνευθούν σημαντικές αποκλίσεις από

αυτό που θα μπορούσε να θεωρηθεί φυσιολογική απόκριση στατιστικών ή ντετερμινιστικών μοντέλων συμπεριφοράς φράγματος.

Στο HST (υδροστατικός, εποχιακός, χρόνος) στατιστικό μοντέλο, οι καταγεγραμμένες μετατοπίσεις φράγματος εκλαμβάνονται ως η συσσωμάτωση προφανώς αναστρέψιμων υδροστατικών, $u(h)$, εποχιακών (συνδεδεμένων κυρίως με θερμικές) επιδράσεων $u(s)$, και μη αναστρέψιμων επιδράσεων $u(t)$, εξαιτίας κατάλοιπων παραμορφώσεων στον χρόνο που συνδέονται με ερπυσμό, αντίδραση αλκαλικής συσσωμάτωσης και άλλες μη γραμμικές επιδράσεις που μπορεί να βάλουν σε κίνδυνο την δομική ακεραιότητα.

όπου h είναι το επίπεδο του ταμιευτήρα, s είναι η εποχή που κυμαίνεται ανάμεσα σε 0 και 2π από 1 Ιανουαρίου έως 31 Δεκεμβρίου σύμφωνα όπου j είναι ο αριθμός των ημερών από 1 Ιανουαρίου· $h(t)$ είναι το επίπεδο του ταμιευτήρα στο χρόνο t . Αν και έχουν προταθεί διαφορετικές εκφράσεις για το $u(t)$ στη βιβλιογραφία, η Εξίσωση (2) φαίνεται επαρκής τουλάχιστον από πρακτικής άποψης.

Στατιστικά μοντέλα αναπτύσσονται από μια γραμμική ανάλυση παλινδρόμησης για να υπολογιστούν οι συντελεστές $a0$ έως $a10$ από τις προηγούμενες καταγεγραμμένες μετατοπίσεις και επιτρέπουν έτσι το διαχωρισμό των αναστρέψιμων $u(h)$, $u(s)$, και του μη αναστρέψιμου $u(t)$, στοιχείων μετατόπισης. Το χωρισμένο $u(h)$ κάτω από ένα συγκεκριμένο επίπεδο ταμιευτήρα υιοθετείται για να επιτευχθεί μια εκτίμηση πραγματικών φυσικών παραμέτρων, όπως το όριο ελαστικότητας Young, ένας συνολικός δείκτης δομικής ακεραιότητας, που βασίζεται σε μοντέλα πεπερασμένων στοιχείων και τεχνική δομικής ταυτοποίησης.

Μαθηματικά μοντέλα για αντίστροφη ανάλυση σκυρόδετων φραγμάτων

Η μέθοδος ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων υιοθετείται για την επίλυση του άμεσου προβλήματος ενός συστήματος θεμελίωσης φράγματος. Το αναλυτικό στατικό μοντέλο στο σχηματισμό πεπερασμένου στοιχείου είναι $Ku = P$ όπου K είναι το δομικό μητρώο ακαμψίας, u είναι το άνυσμα μετατόπισης, και P είναι το άνυσμα φορτίου.

Το μητρώο ακαμψίας του στοιχείου ith μπορεί να εκφραστεί ως εξής.

όπου B είναι το μητρώο παραμόρφωσης-μετατόπισης· D είναι το μητρώο τάσης-παραμόρφωσης· E είναι το όριο Young και μ είναι η αναλογία Poisson.

Θεωρείται ότι υπάρχει ισοτροπία, και η αναλογία Poisson, που παίζει ένα μικρό ρόλο στη συνολική δομική απόκριση, θεωρείται γνωστή [13]. Το όριο Young του σκυρόδετου φράγματος και θεμελίων θεωρείται μια άγνωστη με αντίληψη ζωνών ομοιογενής κατανομή. Μπορεί να υπολογιστεί με την ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία εκφράζεται μέσα από ένα σύνολο λαθών εμβαδού ανάμεσα σε αριθμητικές μετατοπίσεις και μετρήσιμες μετατοπίσεις σε συγκεκριμένα σημεία του σκυρόδετου φράγματος. Το μαθηματικό μοντέλο για την αντίστροφη ανάλυση των σκυρόδετων φραγμάτων μπορεί να εκφραστεί ως συνάρτηση

όπου x είναι το άνυσμα των υλικών παραμέτρων· n είναι ο αριθμός των σημείων που πρέπει να μετρηθούν· $u..$ και $w..$ είναι οι πειραματικές και αριθμητικές μετατοπίσεις του σημείου ith · $w..$ είναι το βάρος του σημείου ith · $a..$ και $b..$ είναι οι κατώτερες και οι ανώτερες τιμές ορίου της παραμέτρου ith · k είναι ο αριθμός των παραμέτρων προς ταυτοποίηση.

Στην πράξη, το $u..$ επιτυγχάνεται μέσα από την Εξίσωση (2). Είναι η μετατόπιση $u(h)$ στο σημείο i που συνδέεται με την υδροστατική πίεση. Στα ακόλουθα παραδείγματα, τα ψευδο-πειραματικά δεδομένα υιοθετούνται στην αντίστροφη ανάλυση [9, 10]. Το ψευδο-πειραματικό $u..$ επιτυγχάνεται μέσω προηγμένης ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και μέσω ορισμού επιπέδου νερού και υλικών παραμέτρων σε συγκεκριμένες τιμές.

Αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών-Συμπεριφορά πραγματικών μελισσών

Οι μελιτοφόρες μέλισσες είναι πλάσματα απροσδόκητης πολυπλοκότητας-μοντέλα οικογενειακής ζωής που μπορούν να παράγουν τροφή, να μαθαίνουν, να πλοηγούν και να επικοινωνούν μέσω περίπλοκων χορών. Όντως, οι αποικίες τους αντιπροσωπεύουν την απόλυτη σοσιαλιστική κατάσταση, με απόλυτη έλλειψη εγωισμού και αναδιανομή του 'πλούτου' [32]. Εικονικά όλες οι μέλισσες σε αυτόν τον αποικιακό οργανισμό είναι θηλυκές: μία βασίλισσα και οι δεκάδες εκατοντάδες εργάτριες στην κυψέλη είναι θηλυκές. Κατά τη διάρκεια ενός διαστήματος του χρόνου, μερικές εκατοντάδες (σε μεγάλες κυψέλες ίσως και μερικές χιλιάδες) αρσενικά-οι κηφήνες-ανατρέφονται. Οι εργάτριες χτίζουν την κηρύθρα, ανατρέφουν τα μικρά, καθαρίζουν την αποικία, ταΐζουν την βασίλισσα και τους κηφήνες, φυλούν την κυψέλη, και συλλέγουν τροφή. Περίπου στην ηλικία των τριών εβδομάδων, μια εργάτρια ξεκινά τη συγκομιδή, κάνοντας το ένα ταξίδι μετά το άλλο για τη συλλογή τροφής.

Το ελάχιστο μοντέλο επιλογής συγκομιδής που οδηγεί στην εμφάνιση της συλλογικής μνήμης των σμηνών μελιτοφόρων μελισσών αποτελείται από τρία βασικά συστατικά: τις πηγές τροφής, τις απασχολούμενες μέλισσες και τις μη απασχολούμενες μέλισσες [25]. Η αξία μιας πηγής φαγητού εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Με

απλά λόγια, η ‘αποδοτικότητα’ μιας πηγής τροφής μπορεί να απεικονιστεί με μία μόνο ποσότητα. Οι απασχολούμενες μέλισσες συνδέονται με μια συγκεκριμένη πηγή τροφής, την οποία αξιοποιούν επί του παρόντος. Μεταφέρουν μαζί τους την πληροφορία για την συγκεκριμένη πηγή και την μοιράζονται με μια συγκεκριμένη πιθανότητα. Οι μη απασχολούμενες μέλισσες ψάχνουν να αξιοποιήσουν μια πηγή τροφής. Υπάρχουν δύο τύποι μη απασχολούμενων μελισσών: οι ανιχνεύτριες που ερευνούν το περιβάλλον γύρω από τη φωλιά για νέες πηγές τροφής και οι παρατηρητές που περιμένουν στη φωλιά και βρίσκουν μια πηγή τροφής μέσω των πληροφοριών που μοιράζονται μαζί τους οι απασχολούμενες μέλισσες.

Όλος ο σχεδιασμός της κοινωνίας των μελιτοφόρων μελισσών βασίζεται στην επικοινωνία. Η επικοινωνία ανάμεσα στις μέλισσες που σχετίζεται με την ποιότητα πηγών τροφής συμβαίνει στο σημείο του χορού. Ο σχετικός χορός ονομάζεται κουνιστός ή μικτός χορός. Ένα παράδειγμα κουνιστού χορού φαίνεται στο Σχήμα 1 [33]. Η κατεύθυνση και η διάρκεια κάθε γύρου συνδέεται στενά με την κατεύθυνση και την απόσταση από το παρτέρι λουλουδιών που διαφημίζεται από την χορεύτρια μέλισσα. Οι απασχολούμενες μέλισσες μοιράζονται τις πληροφορίες τους με μια πιθανότητα, που είναι ανάλογη της αποδοτικότητας της πηγής τροφής. Άρα, η στρατολόγηση είναι ανάλογη της αποδοτικότητας μιας πηγής τροφής.

Αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών

Ο ABCA είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης νοήμονος σμήνους που εμπνέεται από τη συγκομιδή των μελιτοφόρων μελισσών. Στον ABCA, η αποικία των τεχνητών μελισσών περιέχει τρεις ομάδες μελισσών: τις απασχολούμενες μέλισσες, τους παρατηρητές και τις ανιχνεύτριες. Το πρώτο μισό της αποικίας αποτελείται από τις απασχολούμενες μέλισσες και το δεύτερο μισό περιλαμβάνει τις μέλισσες παρατηρητές. Για κάθε πηγή τροφής, υπάρχει μόνο μία απασχολούμενη μέλισσα. Η απασχολούμενη μέλισσα μιας εγκαταλελειμμένης πηγής τροφής μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια.

Η θέση της πηγής τροφής αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα βελτιστοποίησης και η ποσότητα του νέκταρος αντιστοιχεί στην ποιότητα (fitness) της σχετικής λύσης. Στο πρώτο βήμα, ο αλγόριθμος παράγει ένα τυχαία κατανομημένο αρχικό πληθυσμό από $N = \dots$ λύσεις και επιλέγει \dots καλύτερες λύσεις ως αρχικές πηγές τροφής, όπου το N δείχνει το μέγεθος του πληθυσμού· είναι ο αριθμός των απασχολούμενων μελισσών και είναι ο αριθμός των παρατηρητών μελισσών. Κάθε λύση, είναι ένα D-διάστατο άνωσμα. D είναι ο αριθμός των παραμέτρων βελτιστοποίησης.

Μια μέλισσα παρατηρητής επιλέγει μια πηγή τροφής βασιζόμενη στην τιμή πιθανότητας ... που σχετίζεται με αυτή την πηγή τροφής, όπου fit_i είναι η τιμή fitness της λύσης i . NF είναι ο αριθμός των πηγών τροφής που είναι ίσος με τον αριθμό των απασχολούμενων μελισσών. Η Εξίσωση (9) ταιριάζει σε προβλήματα μεγιστοποίησης. Για να μπορέσουμε να εφαρμόσουμε τον αλγόριθμο σε προβλήματα ελαχιστοποίησης, υιοθετούμε την βασισμένη στην κατάταξη fitness όπως στην Εξίσωση (10) όπου pos είναι η σειρά της θέσης σε ολόκληρο τον πληθυσμό, η sp είναι πίεση επιλογής και η $fit(pos)$ είναι βασισμένη στην κατάταξη fitness. Όταν υιοθετείται η βασισμένη στην κατάταξη fitness, η Εξ. (9) μπορεί να μετατραπεί στην Εξ. (11):

Μια υποψήφια λύση $v..$ από την παλιά λύση $x..$ μπορεί να παραχθεί ως, όπου k και j είναι τυχαία επιλεγμένοι δείκτες· το k πρέπει να είναι διαφορετικό από το i · το $\phi..$ είναι ένας τυχαίος αριθμός στο όριο $[-1, 1]$.

Αφού κάθε θέση υποψήφιας πηγής τροφής παραχθεί και αξιολογηθεί από την τεχνητή μέλισσα, η απόδοση της συγκρίνεται με αυτή της παλιάς. Αν η νέα πηγή τροφής έχει την ίδια ή καλύτερη ποιότητα από την παλιά πηγή, η παλιά αντικαθίσταται από την καινούρια. Διαφορετικά, η παλιά διατηρείται.

Αν μια θέση δεν μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω μέσω ενός προκαθορισμένου αριθμού I_c (περιορισμένων κύκλων), τότε αυτή η πηγή τροφής θεωρείται εγκαταλελειμμένη. Η αντίστοιχη απασχολούμενη μέλισσα μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια. Η εγκαταλελειμμένη θέση αντικαθίσταται από μια καινούρια πηγή τροφής που βρίσκει η ανιχνεύτρια. Ας υποθέσουμε ότι η εγκαταλελειμμένη πηγή είναι $x..$ και η ανιχνεύτρια ανακαλύπτει μια νέα πηγή τροφής. Τα βασικά βήματα του ABCA περιγράφονται στο Σχήμα 2.

Υβριδικοί αλγόριθμοι απλόκου αποικίας τεχνητών μελισσών-Η μονοκατευθυντική ερευνητική μέθοδος Nelder-Mead

Η μονοκατευθυντική ερευνητική μέθοδος Nelder-Mead είναι ένας τοπικός αλγόριθμος καθόδου σχεδιασμένος για μη περιορισμένη βελτιστοποίηση χωρίς τη χρήση στοιχείων κλίσης. Το άπλοκον είναι το γεωμετρικό σχήμα που αποτελείται, στις D διαστάσεις, από D + 1 σημεία (ή κορυφές). Στις δύο διαστάσεις είναι τρίγωνο. Στις τρεις είναι ένα τετράεδρο, όχι απαραίτητα το συνηθισμένο τετράεδρο. Αν ένα οποιοδήποτε σημείο ενός μη-παρηκμασμένου απλόκου θεωρηθεί ως αφετηρία, τότε τα υπόλοιπα D σημεία καθορίζουν τις κατευθύνσεις ανύσματος που ανοίγουν τον D-διάστατο χώρο ανύσματος [29]. Οι λειτουργίες αυτής της μεθόδου γίνονται για να επανακλιμακώσουν το

άπλοκο βασισμένες στην τοπική συμπεριφορά της συνάρτησης χρησιμοποιώντας τέσσερις βασικές διαδικασίες: ανάκλαση, επέκταση, συμπίεση και συρρίκνωση. Μέσα από αυτές τις διαδικασίες, το άπλοκο μπορεί να βελτιωθεί επιτυχώς και να φτάσει πιο κοντά στο βέλτιστο. Μια δυσδιάστατη περίπτωση απεικονίζεται στο Σχήμα 3. Η αρχική NMSS διαδικασία περιγράφεται παρακάτω:

1. Εκκίνηση. Εκκινήστε τον συντελεστή ανάκλασης α , τον συντελεστή διαστολής γ , τον συντελεστή συστολής β και τον συντελεστή συρρίκνωσης δ . Οι Nelder και Mead πρότειναν να είναι $\alpha = 1$, $\gamma = 2$, $\beta = \delta = 0,5$. Εκκινήστε το άπλοκο δημιουργώντας $D + 1$ κορυφές τυχαία στην ακτίνα έρευνας, και αξιολογήστε την fitness της αντικειμενικής συνάρτησης σε κάθε κορυφή του απλόκου.
2. Καθορίστε τις κορυφές, επισημαίνοντας τις κορυφές που έχουν τις υψηλότερες, τις αμέσως χαμηλότερες, και τις χαμηλότερες τιμές συνάρτησης, αντίστοιχα. f θα είναι οι σχετικές τιμές συνάρτησης. Υπολογίστε το κεντροειδές x του απλόκου απαλείφοντας στην περίπτωση ελαχιστοποίησης.
3. Ανάκλαση. Δημιουργήστε μια νέα κορυφή $x..$ ανακλώντας το χειρότερο σημείο σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση
Υπολογίστε την τιμή fitness $f..$, που αντιστοιχεί στο $x..$. Αν πηγαίνετε στο βήμα 4; Αν δεχτείτε την ανάκλαση αντικαθιστώντας το $x..$ με το $x..$ και πηγαίνετε στο βήμα 7; Αν πηγαίνετε στο βήμα 5.
4. Επέκταση. Η ανάκλαση διαστέλλεται έτσι ώστε να επεκταθεί ο χώρος έρευνας προς την ίδια κατεύθυνση και το σημείο διαστολής υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη συνάρτηση:
Αν η διαστολή γίνεται αποδεκτή αντικαθιστώντας το $x..$ με το $x..$ διαφορετικά αντικαθιστώντας το $x..$ με το $x...$. Πηγαίνετε στο βήμα 7.
5. Συμπίεσις. Όταν επιχειρείται συμπίεση, αντικαθιστώντας το $x..$ με το $x..$. Όταν εκτελείται απευθείας συμπίεση χωρίς την αντικατάσταση του το $x..$ από το $x...$. Η κορυφή συμπίεσης υπολογίζεται από την ακόλουθη συνάρτηση:
Αν., η συμπίεση γίνεται αποδεκτή αντικαθιστώντας το $x..$ με το $x...$ και πηγαίνετε στο βήμα 7; Διαφορετικά πηγαίνετε στο βήμα 6.
6. Συρρίκνωση. Όταν η συμπίεση στο βήμα 5 αποτυγχάνει, η συρρίκνωση είναι το επόμενο που επιχειρείται. Η συρρίκνωση επιτυγχάνεται μέσω της συρρίκνωσης όλων των σημείων ολόκληρου του απλόκου εκτός από το το $x..$ όπως στην Εξ. (17), μετά πηγαίνετε στο βήμα 7:
7. Αν ικανοποιηθεί η συνθήκη τερματισμού, σταματήστε τον υπολογισμό; Διαφορετικά μια νέα επανάληψη ξεκινά με το βήμα 2.

Υβριδικοί αλγόριθμοι απλόκου αποικίας τεχνητών μελισσών

Ο NMSS είναι ένας κλασικός, ισχυρός τοπικός αλγόριθμος καθόδου, που δεν χρησιμοποιεί τα παράγωγα αντικειμενικής συνάρτησης. Τα πλεονεκτήματά του είναι απλά και αποτελεσματικά: Παρόλα αυτά παγιδεύεται εύκολα σε ένα τοπικό βέλτιστο και η σύγκλιση του είναι εξαιρετικά ευαίσθητη στο αρχικό σημείο αφετηρίας. Το πλεονέκτημα των ευρετικών ολικής έρευνας αλγορίθμων είναι ότι παγιδεύονται πιο δύσκολα σε τοπικά βέλτιστα, αλλά ο ρυθμός σύγκλισης τους θα μειωθεί και το υπολογιστικό κόστος θα είναι υψηλότερο σε επόμενο στάδιο. Η υβριδποίηση της προσέγγισης Nelder-Mead με ευρετικούς αλγορίθμους είναι μια πολύ δημοφιλής προσέγγιση για την επιτάχυνση της σύγκλισης.

Ο ABCA είναι ένας από τους ευρετικούς αλγορίθμους ολικής έρευνας. Ο στόχος της ενσωμάτωσης του NMSS με τον ABCA είναι να συνδυαστούν τα πλεονεκτήματά τους και να αποφευχθούν τα μειονεκτήματά τους. Επίσης, το σχέδιο έρευνας του ABCA γίνεται σύμφωνα με την Εξ. (12). Ο συνδυασμός του ABCA με τον NMSS μπορεί να εμπλουτίσει τις στρατηγικές έρευνας του.

Τα γενικά σχήματα υβριδποίησης εμπίπτουν σε δύο ευρείες κατηγορίες: στο υβρίδιο στημένου τύπου σωληνώσεων και στο υβρίδιο τύπου επιπλέον-χειριστή [34]. Στον πρώτο τύπο υβριδίου, η διαδικασία στοχαστικής βελτιστοποίησης εφαρμόζεται σε όλα τα άτομα του πληθυσμού, ακολουθούμενη από περαιτέρω βελτίωση χρησιμοποιώντας τη μέθοδο απλόκου. Στον δεύτερο τύπο υβριδίου, η μέθοδος απλόκου εφαρμόζεται σαν να ήταν ένας συνηθισμένος γενετικός χειριστής για τον οποίο καθορίζεται μια αντίστοιχη πιθανότητα από τον χρήστη. Σύμφωνα με την εμπειρία του Das και άλλων [35], το υβρίδιο στημένου τύπου σωληνώσεων χρησιμοποιείται εδώ. Κάθε γενιά, μετά την εφαρμογή της διαδικασίας στοχαστικής βελτιστοποίησης σε όλα τα άτομα του πληθυσμού, επιλέγει $D + 1$ σημεία από τον πληθυσμό βασισμένη σε fitness κατάταξης για να παράγει το αρχικό άπλοκο. Στη συνέχεια, εφαρμόζει τους NMSS χειριστές αρκετές φορές στο αρχικό άπλοκο για να το αναβαθμίσει και να αντικαταστήσει τα επιλεγμένα σημεία με νέες κορυφές απλόκου. Αυτό είναι διαφορετικό από το υβρίδιο των στημένων σωληνώσεων του Barbosa και άλλων [34], διότι στην μέθοδο του η ρουτίνα του απλόκου χρησιμοποιείται μόνο τη στιγμή που ο GA χειριστής βρίσκει μία νέα υποψήφια λύση που είναι καλύτερη από το παρόν καλύτερο άτομο στον πληθυσμό.

Για να μπορέσει να ξεκινήσει ο NMSS, πρέπει να καθοριστεί το αρχικό άπλοκο, που στην ουσία αποτελείται από $D + 1$ διακριτά ανύσματα. Η προσέγγιση που επιλέγει τις $D + 1$ λύσεις κατάταξης από τον πληθυσμό υιοθετείται για να ξεκινήσει το άπλοκο. Τα στοιχεία του απλόκου προέρχονται από τον παρόντα πληθυσμό και άρα αποφεύγουν επιπλέον αξιολογήσεις και επίσης 'μετρούν' αυτόματα το άπλοκο στην εξελικτική διαδικασία: τα μεγάλα στην αρχή και τα μικρότερα καθώς συγκλίνει ο πληθυσμός. Τα βήματα του HSABCA συνοψίζονται στο Σχήμα 4.

Αριθμητικά παραδείγματα και συζήτηση-Ρυθμίσεις παραμέτρων

Ο HSABCA εφαρμόζεται για να ταυτοποιηθεί το όριο Young των συστημάτων θεμελίωσης των σκυρόδετων φραγμάτων. Ένα φράγμα βαρύτητας και ένα τόξο υιοθετούνται ως παραδείγματα εφαρμογής. Για να αξιολογηθεί η απόδοση του προτεινόμενου αλγόριθμου, συγκρίνεται με τον NMSS, τον ABCA και τον RCGA. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον HSABCA απεικονίζονται στον Πίνακα 1. Επιλέγονται σύμφωνα με την έρευνα του Karaboga και Basturk [27] και τις εμπειρίες του συντάκτη. Οι παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον ABCA είναι οι ίδιοι με του HSABCA απλά δεν χρησιμοποιούν την παράμετρο NS. Στην Εξίσωση (6), για την παραγωγή μιας πιο κατάλληλης τιμής για την αντικειμενική συνάρτηση, το $w_{..}$ ορίζεται στο $1,0e8$. Στον RCGA, χρησιμοποιείται η στρατηγική επιλογής βασισμένης σε κατάταξη, ο χειριστής ευρετική σταύρωση δ [36, 37] και ένας τυχαίος χειριστής μετάλλαξης. Το μέγεθος του πληθυσμού στον RCGA είναι το ίδιο με του ABCA, η πιθανότητα περάσματος είναι $P_{..} = 0,8$ και η πιθανότητα μετάλλαξης είναι $P_{..} = 0,01$.

Οι αξιολογήσεις fitness των προβλημάτων βελτιστοποίησης στην αντίστροφη ανάλυση των συστημάτων θεμελίωσης των σκυρόδετων φραγμάτων είναι συνήθως χρονοβόρες, και ο χρόνος που ξοδεύεται στον ABCA αλγόριθμο είναι αμελητέος, έτσι ώστε ο αριθμός των αξιολογήσεων fitness (NFE) να είναι μια καλή αναφορά για την αποτελεσματικότητα των αλγορίθμων.

Η στατιστική ανάλυση είναι ένας καλός τρόπος για να συγκρίνουμε διαφορετικούς στοχαστικούς αλγορίθμους. Παρόλα αυτά, η αντίστροφη ανάλυση ενός σκυρόδετου φράγματος απαιτεί περισσότερο χρόνο. Για να συγκριθούν διαφορετικοί στοχαστικοί αλγόριθμοι σε αυτά τα χρονοβόρα προβλήματα υιοθετούνται συνήθως τα καλύτερα αποτελέσματα διαφόρων δοκιμών [23], και αυτό μπορεί να αποτρέψει σε κάποιο βαθμό το τυχαίο. Σε αυτήν την εργασία, κάθε στοχαστικός αλγόριθμος εκτελεί τρεις ανεξάρτητες δοκιμές, και τα καλύτερα αποτελέσματα από κάθε αλγόριθμο παρουσιάζονται ως αντιπροσωπευτικά ώστε να βγάλουμε πιο ξεκάθαρα συμπεράσματα μιας που οι τιμές που αντλούνται δεν διαφέρουν ιδιαίτερα.

Ένα δυσδιάστατο σκυρόδετο φράγμα βαρύτητας

Το πρώτο παράδειγμα για την εξακρίβωση της προτεινόμενης μεθοδολογίας είναι ένα σκυρόδετο φράγμα βαρύτητας. Η εγκάρσια διατομή του φράγματος φαίνεται στο Σχήμα 5a και το σύστημα θεμελίωσης του φράγματος στο πλέγμα του Σχήματος 5b. Τα προηγμένα αποτελέσματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, όπου το βάθος του νερού είναι $h = 95.0$ m, υιοθετούνται ως ψευδο-πειραματικά δεδομένα. Το θεωρούμενο όριο Young για το σκυρόδετο φράγμα είναι $E_{..} = 20.0$ GPa, και το όριο της βραχόδους θεμελίωσης είναι $E_{..} = 25.0$ GPa. Οι αναλογίες Poisson του φράγματος και των θεμελίων είναι $\mu_{..} = 0.17$ και $\mu_{..} = 0.22$, αντίστοιχα. η πυκνότητα του φράγματος είναι $\rho = 2400$ kg/m 3 . Η μετατόπιση της κατεύθυνσης $X u_{..} = 11.48$ mm και η μετατόπιση της κατεύθυνσης $Y u_{..} = -5.03$ mm στο σημείο P1, που απεικονίζονται στο Σχήμα 5a, εφαρμόζονται για την ταυτοποίηση του ορίου Young του σκυρόδετου φράγματος $E_{..}$ και του ορίου της βραχόδους θεμελίωσης $E_{..}$. Αυτό σημαίνει ότι στη Εξίσωση (6) το $np = 2$ και στην Εξίσωση (8) το $k = 2$. Στο προηγμένο μοντέλο, το φράγμα βαρύτητας θεωρείται ως πρόβλημα παραμόρφωσης επιπέδων. Για να μπορέσει να προσομοιωθεί η αληθινή κατάσταση, η υπερπίεση θεωρείται επίσης μέρος του μοντέλου. Κατά τη διάρκεια της αντίστροφης ανάλυσης, το $E_{..}$ κυμαίνεται σε [5GPa, 35 GPa] και το $E_{..}$ σε [10GPa, 40GPa].

Ένα ισοϋνές διάγραμμα της αντικειμενικής συνάρτησης φαίνεται στο Σχήμα 6. Για να φτιάξουμε το ισοϋνές διάγραμμα, η αντικειμενική συνάρτηση υπολογίζεται από την ανάλυση πεπερασμένων στοιχείων για κάθε ένα από τα 128.. ζευγάρια τιμών των παραμέτρων ($E_{..}$, $E_{..}$). Από το ισοϋνές διάγραμμα, φαίνεται ότι η αντικειμενική συνάρτηση του πρώτου παραδείγματος δεν έχει τοπικά ελάχιστα. Ωστόσο, το βέλτιστο σημείο είναι σε μια λεπτή καμπύλη περιοχή. Αυτό μπορεί να είναι δύσκολο να εντοπιστεί με ακρίβεια από τον RCGA και τον ABCA.

Ο HSABCA συγκρίνεται πρώτα με τον NMSS. Τα σημεία αφετηρίας για τον NMSS καθορίζονται δίνοντας ένα αρχικό σημείο $x_{..}$ και το πλευρικό μήκος s για το άπλοκο. Εξετάζονται τρεις διαφορετικές περιπτώσεις των αρχικών σημείων αφετηρίας για τον NMSS, περίπτωση 1: $x_{..} = (15, 15)$, $s = 1.0$ · περίπτωση 2: $x_{..} = (30, 35)$, $s = 1.0$ · περίπτωση 3: $x_{..} = (30, 35)$, $s = 0.1$. Οι καλύτερες εξελικτικές διαδικασίες fitness απέναντι στον αριθμό των αξιολογήσεων του NMSS και του HSABCA φαίνονται στο Σχήμα 7. Μπορεί να δει κανείς ότι η καλύτερη τιμή fitness του NMSS συγκλίνει πιο γρήγορα από τον HSABCA, άρα ο NMSS αποδίδει καλύτερα από τον HSABCA σε αυτό το παράδειγμα.

Οι καλύτερες εξελικτικές διαδικασίες fitness των τριών στοχαστικών αλγορίθμων φαίνονται στο Σχήμα 8. Μπορεί να βρεθεί ότι η καλύτερη τιμή fitness του HSABCA συγκλίνει πολύ πιο γρήγορα από τους άλλους δύο αλγορίθμους. Σε λιγότερο από 600 NFE, η καλύτερη fitness φτάνει στην τάξη του $1 \times 10^..$ για τον HSABCA. Εντωμεταξύ ο RCGA μπορεί να συγκλίνει μόνο στην τάξη του $1 \times 10^..$ σε 1500 NFE. Ο ABCA αποδίδει χειρότερα από τον RCGA σε αυτό το πρόβλημα αν και συγκλίνει πιο γρήγορα από τον RCGA στο αρχικό στάδιο.

Επίσης, οι διαδικασίες εκτίμησης για τα άγνωστα $E..$ και $E..$ απέναντι στο NFE ερευνώνται έτσι ώστε να αξιολογηθεί η απόδοση κάθε στοχαστικού αλγορίθμου όπως φαίνεται στο Σχήμα 9. Γίνεται αντιληπτό ότι όταν χρησιμοποιείται ο HSABCA, το $E..$ και το $E..$ συγκλίνουν γρήγορα προς 20GPa και 25 GPa αντίστοιχα· όταν χρησιμοποιείται ο ABCA το $E..$ και το $E..$ συγκλίνουν γρήγορα προς την γειτονιά των θεωρούμενων τιμών και παγιδεύονται στην αποτελμάτωση. Όταν χρησιμοποιείται ο RCGA το $E..$ και το $E..$ συγκλίνουν αργά, αλλά μπορούν να ερευνηθούν ακριβέστερες τιμές από ότι για τον ABCA.

Στον RCGA, το καλύτερο άτομο πάντα επιβιώνει. Στον ABCA, η καλύτερη θέση μπορεί να εγκαταλειφθεί από τον πληθυσμό αν δεν βελτιωθεί σε περιορισμένους κύκλους. Η αντίστοιχη απασχολούμενη μέλισσα μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια, και η εγκαταλελειμμένη καλύτερη θέση θα αντικατασταθεί από μια νέα πηγή τροφής που βρίσκεται από τις ανιχνεύτριες. Αυτός είναι ένας σημαντικός λόγος για τον οποίο ο ABCA παγιδεύεται σε αποτελμάτωση στο πρώτο παράδειγμα.

Τα τελικά αποτελέσματα ταυτοποίησης των $E..$ και $E..$ συνοψίζονται στον Πίνακα 2. Τα σχετικά λάθη και οι μέσες τιμές τους παρουσιάζονται για να συγκριθεί η ακρίβεια των εκτιμητέων αποτελεσμάτων. Τη στιγμή που η καλύτερη fitness φτάσει το όριο/τάξη του $1 \times 10^..$, ο NFE παρουσιάζεται επίσης για να συγκριθεί η ταχύτητα σύγκλισης. Μπορεί να αποδειχτεί ότι οι στοχαστικοί αλγόριθμοι συγκριτικά εκτιμούν το $E..$ και $E..$ κοντά στις πραγματικές λύσεις. Ανάμεσα σε τρεις στοχαστικούς αλγορίθμους, ο HSABCA έχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια και ο χρόνος που χρειάστηκε για να φτάσει στην συγκεκριμένη ακρίβεια είναι περίπου το 1/5 του χρόνου που κατανάλωσε ο RCGA. Αυτό σημαίνει ότι ο HSABCA μπορεί να εξοικονομήσει 80% του χρόνου συγκρινόμενος με τον RCGA σε αυτό το πρόβλημα.

Ένα τρισδιάστατο σκυρόδετο φράγμα τόξου

Το δεύτερο παράδειγμα για να επαληθευτεί η προτεινόμενη μεθοδολογία είναι ένα σκυρόδετο φράγμα τόξου που υιοθετήθηκε από τον Kang και άλλους [38]. Το μέγιστο ύψος του φράγματος είναι 240m. Τα πλέγματα του συστήματος θεμελίωσης φράγματος τόξου φαίνονται στο Σχήμα 10a και τα τρία σημεία μέτρησης P1, P2, P3 που εφαρμόστηκαν στην αντίστροφη ανάλυση φαίνονται στο Σχήμα 10b. Τα προηγμένα αποτελέσματα ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων, όταν το βάθος του νερού είναι $h = 23..0m$, υιοθετούνται ως ψευδο-πειραματικά δεδομένα. Το υποτιθέμενο όριο Young του σκυρόδετου φράγματος είναι $E.. = 20.0GPa$. Το υποτιθέμενο όριο Young της δεξιάς πλευράς, της αριστερής και της βάσης της βραχώδους θεμελίωσης είναι $E.. = 18.0 GPa$, $E.. = 22.0 GPa$, $E.. = 25.0 GPa$, αντίστοιχα. Οι αναλογίες Poisson του φράγματος και της θεμελίωσης είναι $\mu.. = 0.17$ και $\mu.. = 0.22$ αντίστοιχα. Η πυκνότητα του φράγματος είναι $\rho.. = 2400kg/m^3$. Η μετατόπιση της κατεύθυνσης Y και Z στα σημεία P1, P2, και P3 που φαίνονται στον Πίνακα 3, εφαρμόζεται για να ταυτοποιηθεί το όριο Young του σκυρόδετου φράγματος και της θεμελίωσης. Αυτό σημαίνει ότι στην Εξίσωση (6) $np = 6$ και στην Εξίσωση (8) $k = 4$. Τα όρια διακύμανσης του $E..$ και $E..$ είναι τα ίδια όπως στο παράδειγμα 1.

Ο HSABCA συγκρίνεται επίσης πρώτα με τον NMSS. Εξετάζονται τέσσερις διαφορετικές περιπτώσεις αρχικών σημείων αφετηρίας για τον NMSS, περίπτωση/υπόθεση 1: $x.. = (15, 15, 15, 15)$, $s = 1.0$ · υπόθεση 2: $x.. = (20, 35, 35, 35)$, $s = 1.0$ · υπόθεση 3: $x.. = (25, 32, 32, 32)$, $s = 1.0$ · υπόθεση 4: $x.. = (25, 32, 32, 32)$, $s = 0.1$. Οι καλύτερες διαδικασίες εξέλιξης fitness του NMSS και του HSABCA φαίνονται στο Σχήμα 11. Μπορεί να βρεθεί ότι οι διαδικασίες σύγκλισης του NMSS επηρεάζονται σημαντικά από τα αρχικά σημεία. Στις περιπτώσεις 2 και 4, ο NMSS συγκλίνει σε πολύ μεγάλες τιμές που είναι μακριά από το ολικό βέλτιστο. Αυτά τα φαινόμενα μας δείχνουν ότι μπορεί γά υπάρχει τοπικό βέλτιστο όταν ο αριθμός των παραμέτρων που πρέπει να καθοριστεί αυξάνεται. Ο HSABCA είναι πολύ πιο εύρωστος από τον NMSS σε αυτό το παράδειγμα, εξαιτίας του ότι η εξελικτική διαδικασία του δεν είναι ευαίσθητη στα αρχικά σημεία και το ολικό βέλτιστο μπορεί να επιτευχθεί σε κάθε δοκιμή.

Οι καλύτερες εξελικτικές διαδικασίες fitness των τριών στοχαστικών αλγορίθμων για το παράδειγμα 2 φαίνονται στο Σχήμα 12. Μπορεί να γίνει αντιληπτό ότι η καλύτερη fitness του HSABCA ακόμα συγκλίνει πολύ πιο γρήγορα από των άλλων δύο αλγορίθμων. Σε λιγότερες από 3000 αξιολογήσεις συνάρτησης η καλύτερη fitness φτάνει στην τάξη του $1 \times 10^..$ για τον HSABCA. Εντωμεταξύ, ο ABCA μπορεί να φτάσει μόνο στην τάξη του $1 \times 10^..$ και ο RCGA στην τάξη του $1 \times 10^..$ μετά από 3000 αξιολογήσεις συνάρτησης. Ο ABCA αποδίδει πολύ καλύτερα από τον RCGA σε αυτό το πρόβλημα θεωρώντας ότι συγκλίνει πολύ γρηγορότερα και έχει λιγότερη αποτελμάτωση από τον RCGA. Όμοια με το προηγούμενο παράδειγμα, ο HSABCA αποδίδει πολύ καλύτερα συγκρινόμενος με τους άλλους στοχαστικούς αλγορίθμους στο ρυθμό σύγκλισης και στην ακρίβεια ταυτοποίησης.

Οι διαδικασίες ταυτοποίησης για τις άγνωστες παραμέτρους E., E., E. και E. απέναντι στις αξιολογήσεις συνάρτησης ερευνώνται για να εξεταστεί η απόδοση κάθε στοχαστικού αλγόριθμου όπως φαίνεται στο Σχήμα 13. Γίνεται αντιληπτό ότι όταν χρησιμοποιείται ο HSABCA, το E., E. E. και E. συγκλίνουν γρήγορα προς τα 20GPa, 18GPa, 22GPa και 25GPa αντίστοιχα. Ο ABCA και ο RCGA ερευνούν πολύ αργά, ιδιαίτερα κοντά στην ακριβή τιμή. Ο ABCA αποδίδει πολύ καλύτερα από τον RCGA λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους που έχουν βρεθεί από τον ABCA, συγκλίνει πολύ πιο γρήγορα και η ακρίβεια είναι πολύ μεγαλύτερη από αυτήν που έχει βρεθεί από τον RCGA.

Τα τελικά αποτελέσματα αντίστροφης ταυτοποίησης του E., E., E. και E. συνοψίζονται στον Πίνακα 4. Τα σχετικά λάθη και οι μέσες τιμές τους παρουσιάζονται για να συγκριθεί η ακρίβεια των εκτιμητών αποτελεσμάτων. Παρουσιάζεται επίσης και ο NFE τη στιγμή που η καλύτερη fitness φτάνει στην τάξη του $1 \times 10 \dots$ για να συγκριθεί η ταχύτητα σύγκλισης. Μπορεί να αποδειχθεί ότι όλοι οι αλγόριθμοι συγκριτικά ταυτοποιούν τα E., E., E. και E. κοντά στις πραγματικές λύσεις. Ο HSABCA έχει τη μεγαλύτερη ακρίβεια και ο χρόνος που χρησιμοποιείται για φτάσει στη συγκεκριμένη ακρίβεια είναι περίπου $\frac{1}{4}$ του χρόνου που κατανάλωσε ο ABCA. Αυτό σημαίνει ότι ο HSABCA μπορεί να εξοικονομήσει 75% του χρόνου σε σχέση με τον ABCA σε αυτό το πρόβλημα.

Ο RCGA αποδίδει καλύτερα από τον ABCA στο πρώτο παράδειγμα, αλλά παρουσιάζει μια ξεκάθαρη κάμψη στην αποτελεσματικότητα καθώς ο αριθμός των άγνωστων παραμέτρων προς ταυτοποίηση είναι παραπάνω από δύο στο δεύτερο παράδειγμα. Παρόμοια αποτελέσματα παρατηρήθηκαν όταν εφάρμοσαν γενετικούς αλγορίθμους ή υβριδικούς γενετικούς αλγορίθμους σε αντίστροφη ανάλυση ραδιενέργειας.

Ο ABCA αποδίδει καλύτερα στο δεύτερο παράδειγμα από τον RCGA. Και στα δύο παραδείγματα ο ABCA συγκλίνει πολύ πιο γρήγορα από τον RCGA εξαιτίας της στρατηγικής επιλογής και του γειτονικού μηχανισμού παραγωγής που εφαρμόζεται.

Προτείνεται ένας παράγωγος-ελεύθερος αλγόριθμος HSABCA που συνδυάζει την ερευνητική μέθοδο απλόκου Nelder-Mead και έναν αλγόριθμο με αποικία τεχνητών μελισσών για δομική αντίστροφη ανάλυση. Ο νέος αλγόριθμος συνδυάζει την ικανότητα τοπικής έρευνας του NMSS και την παγκόσμια ικανότητα έρευνας του ABCA.

Για να μπορέσουμε να εξακριβώσουμε τη δυνατότητα υλοποίησης και την απόδοση του προτεινόμενου αλγόριθμου, διεξήχθη μια αντίστροφη ανάλυση για την εύρεση του ορίου Young για συστήματα θεμελίωσης σκυρόδετων φραγμάτων. Ερευνήθηκαν δύο παραδείγματα για τη σύγκριση της συνολικής ερευνητικής ικανότητας του HSABCA με αυτή του NMSS, του ABCA και του RCGA. Από τα αποτελέσματα φαίνεται ότι ούτε ο ABCA ούτε και ο RCGA μπορούν να λύσουν τα δύο προβλήματα επαρκώς. Όταν ο αριθμός των παραμέτρων του προβλήματος αυξάνεται, ο ABCA αποδίδει καλύτερα από τον RCGA. Ο HSABCA αποδίδει καλύτερα από τους άλλους δύο στοχαστικούς αλγόριθμους και στα δύο αριθμητικά παραδείγματα διότι χρειάζεται λιγότερο χρόνο για να φτάσει στην ίδια ακρίβεια και γενικά η μεγαλύτερη ακρίβεια μπορεί να αναζητηθεί. Αν και η ταχύτητα σύγκλισης του HSABCA δεν είναι το ίδιο γρήγορη με του NMSS, ο HSABCA είναι πιο εύρωστος από τον NMSS διότι η ερευνητική ικανότητα του NMSS επηρεάζεται σημαντικά από το αρχικό άπλοκο στο δεύτερο παράδειγμα. Κατά συνέπεια, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι ο HSABCA έχει επαληθευτεί επιτυχώς ως μια αποτελεσματική μέθοδος για αντίστροφη ανάλυση συστημάτων θεμελίωσης φραγμάτων.

Ο HSABCA δεν μπορεί απλά να αντιμετωπίσει αντίστροφα προβλήματα με τέσσερις ή λιγότερες μεταβλητές. Έχει επίσης την προοπτική να αντιμετωπίσει προβλήματα με περισσότερες από τέσσερις μεταβλητές εξαιτίας της παγκόσμιας ερευνητικής ικανότητας που προέρχεται από τον ABCA.

Σχετικά με την απόδοση του αλγόριθμου με αποικία τεχνητών μελισσών (ABC)

Συνοπτική περιγραφή

Ο αλγόριθμος με αποικία τεχνητών μελισσών (ABC) είναι ένα αλγόριθμος βελτιστοποίησης βασισμένος σε μια συγκεκριμένη νόημουσα συμπεριφορά των σημνών των μελιτοφόρων μελισσών. Αυτή η εργασία συγκρίνει την απόδοση του ABC αλγόριθμου με αυτήν της διαφορικής εξέλιξης (DE), της βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO) και του εξελικτικού αλγόριθμου (EA) για πολυδιάστατα αριθμητικά προβλήματα. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν ότι η απόδοση του ABC αλγόριθμου είναι συγκρίσιμη με αυτές των προαναφερθέντων αλγορίθμων και μπορεί να εφαρμοστεί αποτελεσματικά για την επίλυση μηχανικών προβλημάτων με υψηλή διαστατότητα.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (EA) είναι γενικώς γνωστοί ως αλγόριθμοι βελτιστοποίησης πολλαπλών χρήσεων, που είναι ικανοί να βρουν σχεδόν βέλτιστες λύσεις σε αριθμητικά, πειραματικά προβλήματα πραγματικών τιμών για τα οποία οι ακριβείς και αναλυτικές μέθοδοι δεν παράγουν βέλτιστες λύσεις μέσα σε ένα λογικό υπολογιστικό χρόνο. Ένας από τους εξελικτικούς αλγορίθμους που έχει παρουσιαστεί πρόσφατα είναι ο αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης (DE) [1]. Ο αλγόριθμος DE προτάθηκε για να ξεπεραστεί το κύριο μειονέκτημα της μειωμένης ικανότητας τοπικής

έρευνας του γενετικού αλγόριθμου (GA) [2]. Η σημαντική διαφορά ανάμεσα στον GA και στον DE έγκειται στις λειτουργίες επιλογής που εφαρμόζουν.

Στην λειτουργία επιλογής του GA, η πιθανότητα να επιλεγεί κανείς από μια λύση ως γονιός εξαρτάται από την τιμή fitness αυτής της λύσης. Στον DE αλγόριθμο, όλες οι λύσεις έχουν ίση πιθανότητα να επιλεγούν ως γονείς, δηλαδή η πιθανότητα δεν εξαρτάται από την τιμή fitness τους. Αφού παραχθεί μια νέα λύση χρησιμοποιώντας μια αυτορυθμιζόμενη λειτουργία μετάλλαξης και διασταύρωσης, η νέα λύση συναγωνίζεται με το γονιό της για την επόμενη γενιά και ο καλύτερος κερδίζει τον διαγωνισμό. Με άλλα λόγια, ένα άπληστο σχέδιο εφαρμόζεται για να επιλεγεί ένα από αυτά για την επόμενη γενιά. Η χρήση της λειτουργίας μετάλλαξης, που έχει το χαρακτηριστικό να αυτορυθμίζεται, μια λειτουργία διασταύρωσης και μια άπληστη διαδικασία για την επιλογή, κάνουν τον DE να είναι ένας γρήγορος συγκλίνων εξελικτικός αλγόριθμος. Εκτός από την απλότητα και την ευελιξία του, ο DE δεν αντιμετωπίζει κανένα πρόβλημα Hamming Cliff όπως ο δυαδικός GA [3, 4]. Συνεπώς, ο DE αλγόριθμος έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα ενδιαφέρον για ερευνητές που μελετούν διαφορετικούς τομείς έρευνας και έχει εφαρμοστεί σε διάφορα πραγματικά προβλήματα [5-8].

Η νοημοσύνη του σμήνους έχει γίνει αντικείμενο έρευνας για πολλούς ερευνητές επιστήμονες σχετικών τομέων τα τελευταία χρόνια. Η νοημοσύνη του σμήνους καθορίζεται ως '...κάθε προσπάθεια να σχεδιαστούν αλγόριθμοι ή κατανεμημένες συσκευές επίλυσης προβλημάτων εμπνευσμένες από την συλλογική συμπεριφορά αποικιών κοινωνικών εντόμων και άλλων κοινωνικών ζώων...' από τον Bonabeau και άλλους [9]. Ο Bonabeau και άλλοι εστίασαν την θεωρία τους μόνο σε κοινωνικά έντομα, όπως τερμίτες, μέλισσες, σφήκες καθώς και διαφορετικά είδη μυρμηγκιών. Παρόλα αυτά, ο όρος σμήνος χρησιμοποιείται γενικά για να αναφερθούμε σε οποιαδήποτε περιορισμένη συλλογή αλληλεπιδρώντων πρακτόρων ή ατόμων. Το κλασικό παράδειγμα ενός σμήνους είναι οι μέλισσες που συγκεντρώνονται γύρω από την κυψέλη τους; Ωστόσο ο παραλληλισμός μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε άλλα συστήματα με παρόμοια αρχιτεκτονική. Για παράδειγμα, μια αποικία μυρμηγκιών μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σμήνος του οποίου οι ανεξάρτητοι πράκτορες είναι μυρμηγκία· ένα σμάρι πουλιών είναι ένα σμήνος πουλιών; Ένα ανοσοποιητικό σύστημα [10] είναι ένα σμήνος κυττάρων καθώς και ένα πλήθος είναι ένα σμήνος ανθρώπων [11].

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (PSO), που έχει γίνει αρκετά δημοφιλής τελευταία, μοντελοποιεί την κοινωνική συμπεριφορά ενός σμήνους πουλιών ή την εκπαίδευση ψαριών [12]. Ο PSO είναι μια стоχαστική τεχνική βελτιστοποίησης βασισμένη σε πληθυσμό και καλά προσαρμοσμένη στην βελτιστοποίηση μη-γραμμικών συναρτήσεων σε πολυδιάστατο χώρο. Ο PSO αποτελείται από ένα σμήνος σωματιδίων που κινούνται σε ένα χώρο έρευνας πιθανών λύσεων για ένα πρόβλημα. Κάθε σωματίδιο έχει ένα άνυσμα θέσης που αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα και ένα άνυσμα ταχύτητας. Επίσης, κάθε σωματίδιο περιέχει μια μικρή μνήμη που αποθηκεύει την δική του καλύτερη θέση μέχρι τώρα και μια ολική καλύτερη θέση επιτυγχάνεται μέσω επικοινωνίας με τα γειτονικά του σωματίδια.

Έχουν αναπτυχθεί κάποια μοντέλα για δείξουν τις νοήμουσες συμπεριφορές των σμηνών των μελιτοφόρων μελισσών και έχουν εφαρμοστεί για την επίλυση συνδυαστικών τύπων προβλημάτων [13-20]. Υπάρχει μόνο ένας αριθμητικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης στην βιβλιογραφία βασισμένος στην νοήμουσα συμπεριφορά των σμηνών μελιτοφόρων μελισσών [21]. Ο Yang ανέπτυξε έναν εικονικό αλγόριθμο μελισσών (VBA) [21] για την επίλυση αριθμητικών προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ο VBA εμφανίστηκε για να βελτιστοποιήσει μόνο τις συναρτήσεις με δύο παραμέτρους. Στον VBA, ένα σμήνος από εικονικές μέλισσες παράγεται και αρχίζει να κινείται τυχαία στο χώρο φάσης. Αυτές οι μέλισσες αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όταν βρίσκουν κάποιο νέκταρ στόχο που να αντιστοιχεί στις κωδικοποιημένες τιμές της συνάρτησης. Η λύση για το πρόβλημα βελτιστοποίησης μπορεί να επιτευχθεί μέσω της έντασης των αλληλεπιδράσεων των μελισσών. Για πολύ-μεταβλητές αριθμητικές συναρτήσεις βελτιστοποίησης, ο Karaboga έχει περιγράψει έναν αλγόριθμο σμήνους μελισσών που ονομάζεται αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών (ABC) [22], ο οποίος είναι διαφορετικός από τον εικονικό αλγόριθμο μελισσών, και οι Basturg και Karaboga σύγκριναν την απόδοση του ABC αλγορίθμου με την απόδοση του GA στο [23].

Αυτή η εργασία συγκρίνει την απόδοση του ABC αλγορίθμου με αυτήν του DE και του PSO αλγορίθμου, και του EA για ένα σύνολο γνωστών πειραματικών συναρτήσεων. Επίσης, η απόδοση του ABC αναλύεται κάτω από την αλλαγή των τιμών των παραμέτρων ελέγχου. Στην Ενότητα 2, η συμπεριφορά των πραγματικών μελιτοφόρων μελισσών περιγράφεται και στη συνέχεια ο αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών εισάγεται στην Ενότητα 3. Στην Ενότητα 4, περιγράφεται η πειραματική μελέτη και τέλος, τα αποτελέσματα προσομοίωσης που αντλήθηκαν παρουσιάζονται και συζητούνται στην Ενότητα 5.

Συμπεριφορά πραγματικών μελισσών

Το πιο απλό μοντέλο επιλογής συγκομιδής που οδηγεί στην εμφάνιση μιας συλλογικής νοημοσύνης σμηνών μελιτοφόρων μελισσών αποτελείται από τρία βασικά συστατικά: τις πηγές τροφής, τις απασχολούμενες μέλισσες

και τις μη απασχολούμενες μέλισσες, και καθορίζει δύο σημαντικούς τρόπους συμπεριφοράς: την στρατολόγηση σε μια πηγή τροφής και την εγκατάλειψη μιας πηγής [24].

1. Οι πηγές τροφής: Η αξία μίας πηγής τροφής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως το πόσο κοντά βρίσκεται στη φωλιά, το πόσο πλούσια είναι ή αλλιώς την περιεκτικότητα της ενέργειας της και την ευκολία με την οποία μπορεί να γίνει εξαγωγή αυτής της ενέργειας. Χάριν ευκολίας, η ‘αποδοτικότητα’ μιας πηγής τροφής μπορεί να απεικονιστεί με μία απλή ποσότητα [25].

2. Απασχολούμενες συλλέκτριες: Αυτές συνδέονται με κάποια συγκεκριμένη πηγή τροφής την οποία εκμεταλλεύονται ή στην οποία ‘απασχολούνται’ τη δεδομένη στιγμή. Μεταφέρουν μαζί τους πληροφορίες για την συγκεκριμένη πηγή, την απόσταση της από τη φωλιά καθώς και την κατεύθυνση στην οποία βρίσκεται, την αποδοτικότητα της και μοιράζονται αυτές τις πληροφορίες με μια σχετική πιθανότητα.

3. Μη απασχολούμενες συλλέκτριες: Αυτές βρίσκονται συνέχεια σε αναζήτηση πηγών τροφής προς εκμετάλλευση. Υπάρχουν δύο είδη μη απασχολούμενων συλλεκτριών: οι ανιχνεύτριες που αναζητούν στο περιβάλλον γύρω από τη φωλιά νέες πηγές τροφής και οι παρατηρητές που περιμένουν στη φωλιά και βρίσκουν μια πηγή τροφής μέσω των πληροφοριών που μοιράζονται με τις απασχολούμενες συλλέκτριες.

Ο καθαρός μέσος όρος ανιχνευτριών ανάλογα με τις συνθήκες είναι 5-10%.

Η ανταλλαγή πληροφοριών ανάμεσα στις μέλισσες είναι το πιο σημαντικό γεγονός στην διαμόρφωση της συλλογικής γνώσης. Καθώς εξετάζουμε ολόκληρη την κυψέλη είναι δυνατόν να διακρίνουμε ορισμένα μέρη που είναι κοινά σε όλες τις κυψέλες. Το σημαντικότερο μέρος σε μία κυψέλη-σε σχέση με την ανταλλαγή πληροφοριών- είναι το σημείο χορού. Η επικοινωνία των μελισσών που συνδέεται με την ποιότητα των πηγών τροφής λαμβάνει χώρα στο σημείο χορού. Αυτός ο χορός λέγεται κουνιστός ή μικτός χορός (waggle dance).

Μιας που οι πληροφορίες για τις παρούσες πλούσιες πηγές είναι διαθέσιμες σε ένα παρατηρητή στο σημείο του χορού, πρέπει να βλέπει κατά πάσα πιθανότητα πολλούς χορούς και να αποφασίζει να ασχοληθεί με την πιο αποδοτική πηγή. Υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα οι παρατηρητές να επιλέγουν πιο κερδοφόρες πηγές μιας που κυκλοφορούν περισσότερες πληροφορίες για τις πιο αποδοτικές πηγές. Οι απασχολούμενες συλλέκτριες μοιράζονται τις πληροφορίες τους με (μια) πιθανότητα ανάλογη της αποδοτικότητας της πηγής, ενώ η ανταλλαγή των πληροφοριών μέσω του κουνιστού χορού είναι μεγαλύτερη σε διάρκεια. Κατά συνέπεια, η στρατολόγηση είναι ανάλογη της αποδοτικότητας της πηγής της τροφής [15].

Για να κατανοήσουμε καλύτερα τη βασική συμπεριφορά των ανιχνευτριών ας εξετάσουμε το Διάγραμμα 1. Ας υποθέσουμε ότι έχουν βρεθεί δύο πηγές τροφής: η Α και η Β. Αρχικά, μια πιθανή συλλέκτρια θα ξεκινήσει ως μη απασχολούμενη συλλέκτρια. Αυτή η μέλισσα δεν θα έχει καμία γνώση των πηγών τροφής γύρω από τη φωλιά. Υπάρχουν, λοιπόν, δύο επιλογές για μια τέτοια μέλισσα:

- i. Μπορεί να γίνει ανιχνεύτρια και να αρχίσει να ψάχνει γύρω από τη φωλιά για τροφή αυθόρμητα χάρη σε μια εσωτερική παρόρμηση ή κάποιο εξωτερικό στοιχείο (S στο διάγραμμα 1).
- ii. Μπορεί να στρατολογηθεί έχοντας παρακολουθήσει κάποιο κουνιστό χορό και να αρχίσει να αναζητά πηγές τροφής. (R στο διάγραμμα 1)

Έχοντας βρει την πηγή της τροφής, η μέλισσα χρησιμοποιεί την ικανότητα της για να απομνημονεύσει την τοποθεσία και αμέσως αρχίζει να την αξιοποιεί. Τότε, η μέλισσα θα μετατραπεί σε ‘απασχολούμενη συλλέκτρια’. Η συλλέκτρια παίρνει ένα φορτίο νέκταρος από την πηγή και επιστρέφει την κυψέλη όπου και ξεφορτώνει το νέκταρ σε ένα κελί μια αποθήκη τροφής. Αφού ξεφορτώσει το φαγητό, η μέλισσα έχει τρεις επιλογές:

- i. Μετατρέπεται σε μη αφοσιωμένο ακόλουθο μετά την εγκατάλειψη της πηγής της τροφής (UF).
- ii. Χορεύει και στη συνέχεια στρατολογεί άλλα μέλη από τη φωλιά πριν να επιστρέψει στην ίδια πηγή τροφής (EF1).
- iii. Συνεχίζει να συλλέγει στην ίδια πηγή τροφής χωρίς να στρατολογεί άλλες μέλισσες (EF2).

Είναι σημαντικό να σημειώσουμε ότι δεν αρχίζουν όλες οι μέλισσες την συγκομιδή ταυτόχρονα. Τα πειράματα επιβεβαίωσαν ότι ο νέες μέλισσες ξεκινούν την συγκομιδή με ρυθμό ανάλογο της διαφοράς ανάμεσα στον τελικό συνολικό αριθμό των μελισσών και τον αριθμό αυτών που συλλέγουν στην παρούσα φάση.

Αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών (ABC)

Στον ABC αλγόριθμο, η αποικία των τεχνητών μελισσών αποτελείται από τρεις ομάδες μελισσών: τις απασχολούμενες συλλέκτριες, τις μέλισσες παρατηρητές και τις ανιχνεύτριες. Το πρώτο μισό της αποικίας αποτελείται από τις απασχολούμενες τεχνητές μέλισσες και το υπόλοιπο περιλαμβάνει τους παρατηρητές. Για κάθε πηγή τροφής, υπάρχει μόνο μία απασχολούμενη μέλισσα. Με άλλα λόγια, ο αριθμός των απασχολούμενων

μελισσών ισούται με τον αριθμό των πηγών τροφής γύρω από την κυψέλη. Η απασχολούμενη μέλισσα της οποίας η πηγή τροφής έχει εξαντληθεί από τις (υπόλοιπες) μέλισσες μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια. Η έρευνα που διεξάγεται από τις τεχνητές μέλισσες μπορεί να συνοψιστεί ως εξής:

-Οι απασχολούμενες μέλισσες καθορίζουν στη μνήμη τους μια πηγή τροφής μέσα στην γειτονιά της πηγής.

-Οι απασχολούμενες μέλισσες μοιράζονται τις πληροφορίες τους με παρατηρητές μέσα στην κυψέλη και στη συνέχεια οι παρατηρητές επιλέγουν μία από τις πηγές τροφής.

-Οι παρατηρητές διαλέγουν μια πηγή τροφής μέσα στην γειτονιά των πηγών που έχει επιλεγεί από τις ίδιες.

-Μια απασχολούμενη μέλισσα της οποίας η πηγή έχει εγκαταλειφθεί μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια και ξεκινάει τυχαία την αναζήτηση μιας νέας πηγής τροφής.

Τα βασικά βήματα του αλγορίθμου δίνονται παρακάτω:

Ξεκινήστε

ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ

- Στείλτε τις απασχολούμενες μέλισσες στις πηγές τροφής και προσδιορίστε την ποσότητα του νέκταρος.
- Στείλτε τους παρατηρητές στις πηγές τροφής και καθορίστε την ποσότητα του νέκταρος.
- Στείλτε τις ανιχνεύτριες για την ανακάλυψη νέων πηγών τροφής.
- Απομνημονεύστε τις καλύτερες πηγές τροφής μέχρι τώρα.

MEXPI (να ικανοποιηθούν οι παράμετροι)

Κάθε κύκλος έρευνας αποτελείται από τρία βήματα: την μετακίνηση των απασχολούμενων και των παρατηρητών μελισσών στις πηγές τροφής και τον υπολογισμό της ποσότητας του νέκταρος; Καθώς επίσης τον προσδιορισμό των ανιχνευτριών μελισσών και τον προσανατολισμό τους τυχαία προς πιθανές πηγές τροφής. Μία πηγή τροφής αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα προς βελτιστοποίηση. Η ποσότητα του νέκταρος σε μια πηγή τροφής ισοδυναμεί με την ποιότητα της λύσης που αναπαριστάται από αυτή την πηγή τροφής. Οι παρατηρητές τοποθετούνται στις πηγές τροφής ακολουθώντας μία μέθοδο ‘επιλογής ρώσικης ρουλέτας’ [26]. Κάθε αποικία μελισσών έχει ανιχνεύτριες που είναι οι εξερευνητές της αποικίας. Οι εξερευνητές δεν έχουν καμία καθοδήγηση ως προς την ανεύρεση τροφής. Ασχολούνται κυρίως με την εύρεση οποιαδήποτε πηγής τροφής. Ως αποτέλεσμα αυτής της συμπεριφοράς, οι ανιχνεύτριες χαρακτηρίζονται από ένα χαμηλό κόστος έρευνας και ένα χαμηλό μέσο όρο ποιότητας στην πηγή τροφής. Σε μερικές περιπτώσεις, οι ανιχνεύτριες μπορεί να ανακαλύψουν κατά λάθος πλούσιες και εντελώς άγνωστες πηγές τροφής. Στην περίπτωση των τεχνητών μελισσών, οι τεχνητές ανιχνεύτριες μπορεί να έχουν ως αποστολή την γρήγορη ανακάλυψη μιας ομάδας εφικτών λύσεων. Στον ABC αλγόριθμο, μία από τις απασχολούμενες μέλισσες επιλέγεται και ταξινομείται ως ανιχνεύτρια μέλισσα. Η επιλογή ελέγχεται από μία παράμετρο ελέγχου που ονομάζεται ‘όριο’. Αν μία λύση που αντιπροσωπεύει μία πηγή τροφής δεν βελτιώνεται μετά από ένα προκαθορισμένο αριθμό δοκιμών, τότε αυτή η πηγή τροφής εγκαταλείπεται από την απασχολούμενη μέλισσα και αυτή μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια. Ο αριθμός των δοκιμών για την αποδέσμευση μιας πηγής ισούται με την τιμή αυτού του ‘ορίου’ που είναι μια σημαντική παράμετρος ελέγχου του ABC αλγορίθμου.

Σε μία εύρωστη διαδικασία έρευνας, οι διαδικασίες εξερεύνησης και αξιοποίησης πρέπει να διεξαχθούν μαζί. Στον αλγόριθμο ABC, ενώ οι παρατηρητές και οι απασχολούμενες μέλισσες εκτελούν την διαδικασία αξιοποίησης στο χώρο έρευνας, οι ανιχνεύτριες ελέγχουν τη διαδικασία εξερεύνησης. Στην περίπτωση αληθινών μελιτοφόρων μελισσών, ο ρυθμός στρατολόγησης αντιπροσωπεύει ένα ‘μέτρο’ για το πόσο γρήγορα ένα σμήνος μελισσών εντοπίζει και αξιοποιεί μία νεοανακαλυφθείσα πηγή τροφής. Η τεχνητή μέθοδος στρατολόγησης θα μπορούσε ομοίως να αντιπροσωπεύει την ‘μέτρηση’ της ταχύτητας με την οποία οι εφικτές λύσεις ή οι λύσεις ‘καλής ποιότητας’ των δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης μπορούν να ανακαλυφθούν. Η επιβίωση και η πρόοδος της αποικίας μελισσών εξαρτάται από την γρήγορη ανακάλυψη και την αποτελεσματική χρήση των καλύτερων πόρων τροφής. Κατά όμοιο τρόπο, η επιτυχημένη λύση σε δύσκολα μηχανικά προβλήματα συνδέεται με τη σχετικά γρήγορη ανακάλυψη ‘καλών λύσεων’, ιδιαίτερα για προβλήματα που χρειάζονται λύση σε πραγματικό χρόνο.

Όπως και άλλοι κοινωνικοί συλλέκτες, οι μέλισσες αναζητούν πηγές τροφής με τρόπο που μεγιστοποιεί την αναλογία E/T (όπου E είναι η ενέργεια που αντλείται και T είναι ο χρόνος που ξοδεύεται για την συγκαμίδα). Στην περίπτωση σμήνους μελισσών, το E είναι ανάλογο με την ποσότητα νέκταρος πηγών τροφής που ανακαλύπτεται από τις μέλισσες και το σμήνος δουλεύει για να μεγιστοποιήσει την ποσότητα μελιού που αποθηκεύεται στην κυψέλη. Σε ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης, ο σκοπός είναι να βρεθεί το μέγιστο της αντικειμενικής συνάρτησης $F(\theta)$, . Ας υποθέσουμε ότι θ_i είναι η θέση της i th πηγής τροφής· το $F(\theta_i)$ αντιπροσωπεύει την ποσότητα νέκταρος της πηγής τροφής που βρίσκεται στο θ_i και είναι ανάλογο με την ενέργεια $E(\theta_i)$. Το $P(c) = \{\theta_i(c) \dots i = 1, 2, \dots, S\}$ (c: ο κύκλος, S: ο αριθμός των πηγών τροφής γύρω από την κυψέλη) θα αντιπροσωπεύει τον πληθυσμό των πηγών τροφής που επισκέπτονται οι μέλισσες.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, το να επιλεγεί μια πηγή τροφής από ένα παρατηρητή εξαρτάται από την ποσότητα νέκταρος $F(\theta)$ αυτής της πηγής. Καθώς αυξάνεται η ποσότητα νέκταρος της πηγής, η πιθανότητα της προτεινόμενης πηγής από ένα παρατηρητή αυξάνεται ανάλογα. Άρα, η πιθανότητα με την πηγή τροφής να βρίσκεται στο θ , που θα επιλεγεί από μια μέλισσα μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

Μετά την παρακολούθηση του χορού των απασχολούμενων μελισσών, μια μέλισσα παρατηρητής πηγαίνει στην περιοχή της πηγής τροφής που βρίσκεται στο θ ... με αυτήν την πιθανότητα και καθορίζει την γειτονική πηγή τροφής της οποίας θα πάρει το νέκταρ βασιζόμενη σε κάποια οπτική πληροφορία, όπως σημάδια που υπάρχουν στα παρτέρια. Με άλλα λόγια, ο παρατηρητής επιλέγει μία από τις πηγές τροφής αφού συγκρίνει αυτές που βρίσκονται γύρω από το θ . Η θέση της επιλεγμένης γειτονικής πηγής υπολογίζεται παρακάτω: φ ... είναι ένα τυχαίο παραγόμενο βήμα για την εύρεση μιας πηγής τροφής με περισσότερο νέκταρ γύρω από το θ Το φ ... υπολογίζεται βρίσκοντας τη διαφορά ανάμεσα στα δύο ίδια τμήματα των φ ... και φ ... θέσεων τροφής (το k είναι ένας τυχαία παραγόμενος δείκτης). Αν η ποσότητα του νέκταρος F ... στο θ ... είναι μεγαλύτερη από αυτή στο θ ... τότε η μέλισσα πηγαίνει στην κυψέλη και μοιράζεται τις πληροφορίες της με άλλες και η θέση θ ... της πηγής τροφής μετατρέπεται σε θ ... διαφορετικά το θ ... παραμένει ως έχει.

Κάθε πηγή τροφής έχει μόνο μία απασχολούμενη μέλισσα. Κατά συνέπεια, ο αριθμός των απασχολούμενων μελισσών είναι ίσος με τον αριθμό των πηγών τροφής. Αν η θέση θ ... της πηγής τροφής i δεν μπορεί να βελτιωθεί σε ένα συγκεκριμένο αριθμό δοκιμών- το 'όριο'- τότε η πηγή τροφής θ ... εγκαταλείπεται από την απασχολούμενη μέλισσα τους και τότε η απασχολούμενη μέλισσα μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια. Η ανιχνεύτρια αρχίζει να αναζητά μια νέα πηγή τροφής, και αφού την βρει, η νέα θέση γίνεται θ ...

Πειράματα

Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε την απόδοση του ABC αλγορίθμου, κάποιες κλασικές χαρακτηριστικές συναρτήσεις που δίνονται από τον Krink και άλλους [27] παρουσιάζονται στον Πίνακα 1. Τα αποτελέσματα του ABC αλγορίθμου έχουν συγκριθεί με τα αποτελέσματα του DE, του PSO και του EA που παρουσιάστηκαν από τον Krink και άλλους [27]. Στον ABC αλγόριθμο, ο μέγιστος αριθμός κύκλων ήταν 1000 για 5000 ώστε να ισοροπηθεί ο συνολικός αριθμός αξιολόγησης σε 100.000 για τις πρώτες δύο συναρτήσεις και σε 500.000 για τις άλλες τρεις συναρτήσεις, αντίστοιχα, όπως στην παραπομπή [27]. Το ποσοστό των παρατηρητών μελισσών ήταν το 50% της αποικίας, των απασχολούμενων μελισσών το 50% και ο αριθμός των ανιχνευτριών επιλέχθηκε να είναι το μέγιστο μία σε κάθε κύκλο. Στον ABC, ο αριθμός των παρατηρητών μελισσών θεωρείται ίσος με τον αριθμό των απασχολούμενων μελισσών έτσι ώστε ο ABC να έχει λιγότερες παραμέτρους ελέγχου. Η αύξηση του αριθμού των ανιχνευτριών ενθαρρύνει την εξερεύνηση όπως το ίδιο κάνει και η αύξηση στον αριθμό των παρατηρητών. Οι τιμές των παραμέτρων ελέγχου του ABC αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες προσομοίωσης και οι τιμές που δόθηκαν για τις παραμέτρους ελέγχου του PSO, του DE και του EA στην παραπομπή [27] δίνονται στον Πίνακα 2. Από τον πίνακα αυτό, διαφαίνεται ότι οι τιμές που δόθηκαν για τον DE και τον PSO στην παραπ. [27] είναι οι ενδεδειγμένες τιμές στην βιβλιογραφία για τις συναφείς παραμέτρους ελέγχου.

Στα πειράματα, η ... συνάρτηση Schaffer έχει 2 παραμέτρους, η ... συνάρτηση Sphere έχει 5 παραμέτρους, οι συναρτήσεις ... Griewank, Rastrigin και Rosenbrock έχουν 50 παραμέτρους. Το εύρος των παραμέτρων, οι σχηματισμοί και οι ολικές βέλτιστες τιμές αυτών των συναρτήσεων δίνονται στον Πίνακα 1.

Η συνάρτηση ... είναι μια δισδιάστατη συνάρτηση F6 Schaffer. ... είναι το διάστημα [-100, 100]. Η ολική ελάχιστη τιμή για αυτή τη συνάρτηση είναι 0 και η βέλτιστη λύση είναι ... = $(\chi \dots) = (0, 0, \dots, 0)$. Το διάγραμμα επιφάνειας και οι ισοϋψείς καμπύλες φαίνονται στο Σχήμα 2. Η συνάρτηση ... είναι συνάρτηση Sphere και είναι συνεχής, κυρτή και μονοκόρυφη. Το διάστημα [-100, 100]. Η ολική ελάχιστη τιμή για αυτή τη συνάρτηση είναι 0 και η βέλτιστη λύση είναι = $(0, 0, \dots, 0)$. Το διάγραμμα επιφάνειας και οι ισοϋψείς καμπύλες φαίνονται στο Σχήμα 3. Η συνάρτηση ... είναι συνάρτηση Griewank. Το διάστημα [-600, 600]. Η ολική ελάχιστη τιμή για αυτή τη συνάρτηση είναι 0 και η αντίστοιχη ολική βέλτιστη λύση είναι = $(100, 100, \dots, 100)$. Μιας που ο αριθμός των τοπικών βέλτιστων αυξάνεται με την διαστατότητα, αυτή η συνάρτηση είναι έντονα πολυκόρυφη. Η έννοια των πολλών κορυφών εξαφανίζεται για αρκετά υψηλές διαστατότητες ($n > 30$) και το πρόβλημα μοιάζει μονοκόρυφο. Το διάγραμμα επιφάνειας και οι ισοϋψείς καμπύλες της ... φαίνονται στο Σχήμα 4. Η συνάρτηση ... είναι μια συνάρτηση Rastrigin. Αυτή η συνάρτηση βασίζεται στην συνάρτηση Sphere με την προσθήκη της διαμόρφωσης του συνημίτονου για την παραγωγή πολλών τοπικών ελαχίστων. Άρα, η συνάρτηση είναι πολυκόρυφη. Οι θέσεις των ελαχίστων είναι συμμετρικά διανεμημένες. Το δύσκολο σε σχέση με την εύρεση βέλτιστων λύσεων σε αυτή τη συνάρτηση είναι ότι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης μπορεί εύκολα να παγιδευτεί σε ένα τοπικό βέλτιστο οδεύοντας προς το ολικό βέλτιστο. Το ... είναι στο διάστημα [-5.12, 5.12]. Η ολική ελάχιστη τιμή για αυτή τη συνάρτηση είναι 0 και η αντίστοιχη ολική βέλτιστη λύση είναι ... = $(0, 0, \dots, 0)$. Το διάγραμμα επιφάνειας και οι ισοϋψείς καμπύλες της ... φαίνονται στο Σχήμα 5. Η συνάρτηση ... είναι ένα κλασικό πρόβλημα βελτιστοποίησης: η κοιλάδα Rosenbrock. Το

ολικό βέλτιστο είναι μέσα σε μια μακριά, στενή επίπεδη κοιλάδα σε σχήμα παραβολής. Μιας που είναι δύσκολο να συγκλίνουν προς το ολικό βέλτιστο αυτής της συνάρτησης, οι μεταβλητές είναι έντονα εξαρτημένες, και οι κλίσεις γενικά δεν στρέφονται προς το βέλτιστο, το πρόβλημα αυτό χρησιμοποιείται επανειλημμένα για να δοκιμαστεί η απόδοση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης. Το ... είναι στο διάστημα $[-50, 50]$. Η ολική ελάχιστη τιμή για αυτή τη συνάρτηση είναι 0 και η βέλτιστη λύση είναι $(1, 1, \dots, 1)$. Το ολικό βέλτιστο είναι το μοναδικό βέλτιστο και η συνάρτηση είναι μονοκόρυφη. Το διάγραμμα επιφάνειας και οι ισοϋψείς καμπύλες της .

Αποτελέσματα και συζήτηση

Κάθε ένα από τα πειράματα επαναλήφθηκε 30 φορές με διαφορετικά τυχαία δείγματα, και καταγράφηκαν οι μέσες τιμές συνάρτησης των καλύτερων λύσεων που βρέθηκαν. Οι μέσες και συνηθισμένες αποκλίσεις των τιμών συνάρτησης που αντλήθηκαν από τον DE, τον PSO, τον EA [26] και τον ABC αλγόριθμο για τις ίδιες συνθήκες δίνονται στον Πίνακα 3. Τιμές μικρότερες του E-12 αναφέρονται ως 0. Στις ... και ... συναρτήσεις, οι DE, EA και ABC βρήκαν την βέλτιστη τιμή κατά τη διάρκεια του δεδομένου κύκλου ενώ ο PSO δεν μπόρεσε. Στις .. και .. συναρτήσεις, ενώ οι DE και ABC έδειξαν την ίδια απόδοση και βρήκαν το βέλτιστο, οι PSO και EA έδειξαν χειρότερη απόδοση από τους άλλους δύο. Στην .. συνάρτηση, ο ABC έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα. Όπως φαίνεται και από τα αποτελέσματα στον Πίνακα 3, ο ABC αλγόριθμος έχει την καλύτερη απόδοση ανάμεσα στους αλγόριθμους αυτούς στην παρούσα έρευνα.

Για να μπορέσουμε να αναλύσουμε την συμπεριφορά του ABC αλγορίθμου, τον τρέξαμε με διαφορετικά μεγέθη πληθυσμού (μεγέθη αποικιών) και τιμές ορίου. Στον Πίνακα 4, παρουσιάζονται τα μέσα μεγέθη των καλύτερων τιμών συνάρτησης με διαφορετικά μεγέθη αποικιών που κυμαίνονται από 10, 50 έως και 100. Η πρόοδος των μέσων καλύτερων τιμών που παρουσιάζεται στον Πίνακα 4 φαίνεται στα Σχήματα 7-11. Από τον Πίνακα 4 και τα Σχήματα 7-12, μπορεί κανείς να συμπεράνει ότι καθώς αυξάνεται το μέγεθος του πληθυσμού, ο αλγόριθμος παράγει καλύτερα αποτελέσματα. Παρόλα αυτά, μετά από μια επαρκή τιμή μεγέθους αποικίας, οποιαδήποτε αύξηση στην τιμή δεν βελτιώνει σημαντικά την απόδοση του ABC αλγορίθμου. Για τα δοκιμαστικά προβλήματα που διεξήχθησαν σε αυτήν την εργασία, το μέγεθος αποικίας 50-100 παρέχει μια αποδεκτή ταχύτητα σύγκλισης για έρευνα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η παραγωγή της 'ανιχνεύτριας μέλισσας' ελέγχεται από μια παράμετρο ελέγχου, το 'όριο', στον ABC αλγόριθμο. Υπάρχει μια αντίστροφη αναλογικότητα ανάμεσα στην τιμή του 'ορίου' και στην συχνότητα της παραγωγής ανιχνεύτριας. Καθώς η τιμή του 'ορίου' πλησιάζει το άπειρο, ο συνολικός αριθμός των ανιχνευτριών που παράγονται φτάνει στο μηδέν. Τα αποτελέσματα του ABC αλγορίθμου που παρουσιάζονται στον Πίνακα 3 αντλήθηκαν από την αποικία με μέγεθος 100. Για να φανεί η επίδραση της διαδικασίας παραγωγής ανιχνευτών στην απόδοση του αλγορίθμου, η μέση από τις καλύτερες τιμές συνάρτησης που βρέθηκαν για τις διαφορετικές τιμές 'ορίου' (.....) και τα μεγέθη αποικιών (20, 40 και 100) δίνονται στον Πίνακα 5. Όπως φαίνεται στον Πίνακα 5, για τις πολυκόρυφες συναρτήσεις και, όταν η συχνότητα παραγωγής ανιχνευτών είναι πολύ υψηλή (τιμή ορίου =) ή μηδέν (χωρίς τον ανιχνευτή), τα αποτελέσματα που αντλούνται από τον ABC αλγόριθμο είναι χειρότερα από αυτά που παράγονται χρησιμοποιώντας τις μέτριες τιμές για όριο, όπως και Για τις μονοκόρυφες και ..., η παραγωγή ανιχνευτών δεν επηρεάζει σημαντικά την απόδοση του αλγορίθμου. Ωστόσο, όπως ήταν αναμενόμενο, βελτιώνει την δυνατότητα αναζήτησης του αλγορίθμου για τις μονοκόρυφες συναρτήσεις και το όφελος του γίνεται πολύ πιο ξεκάθαρο για τα μικρότερα μεγέθη αποικιών.

Στον ABC αλγόριθμο, ενώ ένα πλάνο στοχαστικής επιλογής βασισμένο στις τιμές fitness (του νέκταρος), που είναι όμοιο με την 'επιλογή ρουλέτας' του GA, διεξάγεται από παρατηρητές μέλισσες, ένα πλάνο άπληστης επιλογής όπως στον DE χρησιμοποιείται από τους παρατηρητές και τις απασχολούμενες μέλισσες για να γίνει η επιλογή ανάμεσα στη θέση της πηγής που υπάρχει στη μνήμη τους και της νέας πηγής. Επίσης, μια διαδικασία τυχαίας επιλογής διεξάγεται από παρατηρητές. Ακόμα, ο μηχανισμός παραγωγής της γειτονικής πηγής (λύσης) που χρησιμοποιείται στον ABC είναι παρόμοιος με τη διαδικασία μετάλλαξης, που είναι αυτό-προσαρμοστική, του DE. Από αυτήν την πλευρά, στους DE και ABC αλγορίθμους, οι λύσεις στον πληθυσμό επηρεάζουν άμεσα την διαδικασία μετάλλαξης μιας που η λειτουργία βασίζεται στην διαφορά τους. Κατά αυτόν τον τρόπο, η πληροφορία ενός καλού μέλους του πληθυσμού διανέμεται στα άλλα μέλη εξαιτίας του μηχανισμού άπληστης επιλογής που εφαρμόζεται. Στον ABC αλγόριθμο, δεν υπάρχει ξεκάθαρη διασταύρωση όπως στον DE και στον GA. Ωστόσο, στον ABC η μεταφορά της καλής πληροφορίας ανάμεσα στα μέλη διεξάγεται μέσω της διαδικασίας μετάλλαξης, ενώ αυτή η μεταφορά διευθύνεται από τις λειτουργίες μετάλλαξης και διασταύρωσης μαζί στον DE. Άρα, αν και η τοπική ταχύτητα σύγκλισης ενός συνηθισμένου DE είναι αρκετά καλή, μπορεί να συναντήσει την πρόωρη σύγκλιση σε πολυκόρυφα προβλήματα βελτιστοποίησης αν δεν δοθεί μια επαρκής ποικιλία μέσα στον αρχικό πληθυσμό. Στον ABC, ενώ η διαδικασία εντατικοποίησης ελέγχεται από τα πλάνα στοχαστικής και άπληστης επιλογής, η διαφοροποίηση ελέγχεται από την τυχαία επιλογή. Η απόδοση του ABC είναι πολύ καλή σε σχέση με την τοπική

και την ολική βελτιστοποίηση χάρη στα πλάνα επιλογής που εφαρμόστηκαν και τον μηχανισμό γειτονικής παραγωγής που χρησιμοποιήθηκε. Συνεπώς, τα αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν ότι ο ABC αλγόριθμος, που είναι ένας ευέλικτος και απλός στη χρήση αλγόριθμος βελτιστοποίησης, μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά στην βελτιστοποίηση πολυκόρυφων και πολύ-μεταβλητών προβλημάτων.

Στην παρούσα έρευνα, η απόδοση του ABC αλγορίθμου έχει συγκριθεί με αυτήν της διαφορικής εξέλιξης, της βελτιστοποίησης με σμήνος σωματιδίων και του εξελικτικού αλγορίθμου για πολυδιάστατα και πολυκόρυφα αριθμητικά προβλήματα. Η συμπεριφορά του ABC αλγορίθμου κάτω από διαφορετικές τιμές παραμέτρων ελέγχου έχει επίσης αναλυθεί. Τα αποτελέσματα προσομοίωσης δείχνουν ότι ο ABC αλγόριθμος αποδίδει καλύτερα από τους αναφερθέντες αλγορίθμους και μπορεί να εφαρμοσθεί αποτελεσματικά για την επίλυση των πολυκόρυφων μηχανικών προβλημάτων με υψηλή διαστατότητα.

Ένας αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών για το ελάχιστου ύψους πρόβλημα επικαλυπτικού δέντρου περιορισμένου φύλλου

ΣΥΝΟΠΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ Με ένα μη κατευθυντικό, συνδεδεμένο γράφο με βάρη, το ελάχιστο πρόβλημα επικαλυπτικού δέντρου περιορισμένου φύλλου (LCMST) αναζητά σε αυτό το γράφο ένα επικαλυπτικό δέντρο ελάχιστου βάρους ανάμεσα σε όλα τα επικαλυπτικά δέντρα του γράφου που έχουν τουλάχιστον... φύλλα. Σε αυτήν την εργασία, προτείνουμε έναν αλγόριθμο με αποικία τεχνητών μελισσών (ABC) για το πρόβλημα LCMST. Ο αλγόριθμος ABC είναι μια νέα μετα-ευρετική προσέγγιση εμπνευσμένη από την νοήμουσα συμπεριφορά συγκομιδής του σμήνους μελιτοφόρων μελισσών. Συγκρίναμε την απόδοση του ABC αλγορίθμου μας απέναντι στις καλύτερες προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν στην βιβλιογραφία. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα δείχνουν την ανωτερότητα της νέας ABC προσέγγισης σε σχέση με όλες τις άλλες προσεγγίσεις. Η νέα προσέγγιση έφερε λύσεις καλύτερης ποιότητας σε μικρότερο χρόνο.

Εισαγωγή

Με ένα μη κατευθυντικό, συνδεδεμένο γράφο με βάρη με n κόμβους και ένα θετικό πραγματικό αριθμό., το ελάχιστο πρόβλημα επικαλυπτικού δέντρου περιορισμένου φύλλου (LCMST) αναζητά σε αυτό το γράφο ένα επικαλυπτικό δέντρο που περιέχει τουλάχιστον ... φύλλα και έχει το ελάχιστο συνολικό βάρος από όλα τα επικαλυπτικά δέντρα τέτοιου είδους. Τυπικά, ας υποθέσουμε ότι $G = (V, E)$ είναι ένας μη κατευθυντικός, συνδεδεμένος γράφος, όπου το V είναι το σύνολο των κόμβων και το E το σύνολο των ακμών. Με μία μη-αρνητική συνάρτηση βαρών w : Εσδεδεμένη με τις ακμές της και ένα θετικό πραγματικό αριθμό, το πρόβλημα LCMST αναζητά ένα επικαλυπτικό δέντρο που να έχει τουλάχιστον f φύλλα και που ελαχιστοποιεί:

Γενικά, αυτό το πρόβλημα είναι NP-hard [1]. Αν ο περιορισμός φύλλων ... είναι μικρότερος από τον αριθμό των φύλλων σε ένα μη περιορισμένο ελάχιστο επικαλυπτικό δέντρο (MST), τότε αυτό το MST είναι επίσης LCMST. Άρα, το πρόβλημα LCMST μπορεί να επιλυθεί σε αυτήν την περίπτωση σε πολυώνυμο χρόνο. Ωστόσο, αν το ... είναι μεγαλύτερο από τον αριθμό των φύλλων σε οποιοδήποτε MST, τότε το πρόβλημα LCMST είναι NP-hard. Συνήθως, η δυσκολία του προβλήματος αυξάνεται με την αύξηση του ...

Το πρόβλημα LCMST έχει διάφορες πρακτικές εφαρμογές. Μπορεί να εφαρμοστεί σε τοποθεσία εγκαταστάσεων, και σε σχέδια κυκλώματος και δικτύου [2]. Αυτό το πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί ως προέκταση του προβλήματος p -διάμεσος, όπου οι διάμεσοι συνδέονται επίσης και μεταξύ τους [3].

Διάφορες ευρετικές έχουν αποτέλεσμα για το πρόβλημα LCMST αφού πρώτα υπολογίσουμε ένα MST και στη συνέχεια τροποποιήσουμε αυτό το MST σε επικαλυπτικό δέντρο περιορισμένων φύλλων (LCST), δηλαδή ένα επικαλυπτικό δέντρο με τουλάχιστον f φύλλα. Οι Deo και Micikevicius [1] παρουσίασαν μια τέτοια ευρετική. Προσπαθεί επαναληπτικά να μεταμορφώσει ένα MST σε LCST. Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης, ανταλλάσσει μια ακμή δέντρου με μια ακμή μη-δέντρου έτσι ώστε ο αριθμός των φύλλων στο δέντρο να αυξηθεί με την ελάχιστη αύξηση στο βάρος του δέντρου. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι είτε ο αριθμός των φύλλων του δέντρου να φτάσει το f είτε καμία ανταλλαγή ακμής που να αυξάνει τον αριθμό των φύλλων να μην είναι δυνατή. Συνεπώς, αυτή η ευρετική κάποιες φορές αποτυγχάνει να βρει ένα LCST. Η πολυπλοκότητα χρόνου είναι $O(\dots)$. Ο Julstrom [4] πρότεινε μια άλλη ευρετική που ονομάζεται ML και ξεκινάει επίσης με τον υπολογισμό του MST. Μετά μετατρέπει επαναληπτικά αυτό το MST σε LCST. Κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης, επιλέγει ένα εσωτερικό κόμβο (ένα κόμβο που δεν είναι φύλλο) από ένα σύνολο παρόντων εσωτερικών κόμβων και τον μετατρέπει σε φύλλο. Ο εσωτερικός κόμβος επιλέγεται σύμφωνα με το ακόλουθο κριτήριο. Δοκιμάζει ένα προς ένα κάθε εσωτερικό κόμβο ως φύλλο. Κατά τη διάρκεια κάθε δοκιμής βρίσκει ένα MST στον γράφο προερχόμενο από τους υπόλοιπους εσωτερικούς κόμβους και στη συνέχεια συνδέει όλα τα φύλλα συμπεριλαμβανομένου και του καινούριου στον πλησιέστερο εσωτερικό κόμβο. Ο εσωτερικός κόμβος για τον οποίο το προερχόμενο επικαλυπτικό δέντρο έχει το μικρότερο βάρος επιλέγεται για μετατροπή σε φύλλο. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι ο

αριθμός των φύλλων στο επικαλυπτικό δέντρο να φτάσει το ... Αν ο υποκείμενος γράφος είναι πλήρης τότε το ML βρίσκει πάντα ένα LCST. Η πολυπλοκότητα του ML είναι επίσης $O(n)$. Ο Julstrom [4] παρατήρησε ότι για $n = 0.6n$, το ML βρίσκει LCST μικρότερου βάρους από την ευρετική των Deo και Micikevicius [1] και για $n = 0.9n$ η τελευταία ευρετική αποτυγχάνει πάντα στην εύρεση LCST.

Οι Edelson και Gargano [5] ανέπτυξαν έναν γενετικό αλγόριθμο κωδικοποιημένης αντιμετάθεσης για το πρόβλημα LCST που κωδικοποιεί το LCST χρησιμοποιώντας σύμβολα. Ένας αποκωδικοποιητής δύο επιπέδων μετατρέπει αυτήν την κωδικοποίηση πρώτα σε κώδικα Prufer [6] και μετά αυτόν τον κώδικα Prufer σε αντίστοιχο LCST. Αυτό το πλαίσιο αντιπροσωπεύει μόνο τις εφικτές λύσεις. Παρόλα αυτά, το μήκος χρωμοσώματος είναι ιδιαίτερα μεγάλο με αυτό το σχήμα. Ο Julstrom [2] παρουσίασε δύο γενεαλογικούς γενετικούς αλγορίθμους. Ένας από αυτούς τους δύο γενετικούς αλγορίθμους χρησιμοποιεί τον κώδικα Blob [7], ενώ ο άλλος χρησιμοποιεί την κωδικοποίηση υποσυνόλου. Η κωδικοποίηση υποσυνόλου αντιπροσωπεύει ένα LCST μέσω του συνόλου μόνο των εσωτερικών του κόμβων. Μια διαδικασία δύο βημάτων μετατρέπει αυτή την κωδικοποίηση στο αντίστοιχο της LCST. Το πρώτο βήμα δημιουργεί ένα MST στον γράφο προερχόμενο από το σύνολο των εσωτερικών κόμβων, ενώ το δεύτερο βήμα συνδέει το κάθε φύλλο με το πλησιέστερο εσωτερικό κόμβο. Όπως η κωδικοποίηση των Edelson και Gargano [5], και οι δύο αυτές κωδικοποιήσεις αντιπροσωπεύουν επίσης μόνο εφικτές λύσεις. Την ίδια στιγμή, τα μήκη των χρωμοσωμάτων τους είναι πολύ μικρότερα. Το μήκος χρωμοσωμάτων για τον κώδικα Blob είναι $n-2$, ενώ αυτό για την κωδικοποίηση υποσυνόλου είναι $n-1$. Οι γενετικοί χειριστές για αυτούς τους δύο γενετικούς αλγορίθμους σχεδιάζονται με τέτοιο τρόπο που παράγουν μόνο εφικτές λύσεις. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα στις περιπτώσεις των δοκιμών που μελετήθηκαν στο [2] έδειξαν ότι ο γενετικός αλγόριθμος κωδικοποιημένου υποσυνόλου βρίσκει πάντα το LCST με το μικρότερο βάρος ενώ ακολουθείται από την ML ευρετική. Ο γενετικός αλγόριθμος κωδικοποίησης Blob απέδωσε χειρότερα και από την ML ευρετική. Από δω και στο εξής, ο γενετικός αλγόριθμος κωδικοποιημένου υποσυνόλου θα αναφέρεται ως SCGA.

Οι Singh και Baghel [8] παρουσίασαν δύο μετα-ευρετικές προσεγγίσεις, μία βασισμένη στην βελτιστοποίηση με αποικία μυρμηγκιών (ACO) και μία βασισμένη στην έρευνα ταμπού, για το LCST πρόβλημα και σύγκριναν τις προσεγγίσεις τους με τον γενετικό αλγόριθμο κωδικοποιημένου υποσυνόλου και την ML ευρετική [2]. Και οι δύο αυτές μέθοδοι χρησιμοποιούν την κωδικοποίηση υποσυνόλου [2] για να απεικονίσουν ένα LCST και κατασκευάζουν το LCST σύμφωνα με την διαδικασία δύο βημάτων που αναφέρθηκε παραπάνω. Η ACO προσέγγιση κατασκευάζει ένα LCST αναγνωρίζοντας πρώτα τους $(n-1)$ εσωτερικούς κόμβους του μέσω και στη συνέχεια δημιουργεί ένα πλήρες LCST με τη διαδικασία των δύο βημάτων. Ξεκινώντας από μια αυθαίρετη αρχική λύση, η έρευνα ταμπού κάνει επαναληπτικές κινήσεις από την μια λύση στην άλλη ανταλλάσσοντας έναν εσωτερικό κόμβο με έναν κόμβο-φύλλο μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού. Κατά την διάρκεια κάθε επανάληψης, ανάμεσα σε όλες τις έγκυρες κινήσεις ανταλλαγής, επιλέγεται η κίνηση που έχει ως αποτέλεσμα ένα LCST κατώτατου κόστους (ακόμα κι αν το κόστος του είναι περισσότερο από την παρούσα λύση). Μόλις πραγματοποιηθεί μία κίνηση η ακριβώς αντίστροφη της απαγορεύεται για διάρκεια η οποία καθορίζεται από την διάρκεια ταμπού. Αυτή η έρευνα ταμπού διαθέτει επίσης έναν ενσωματωμένο μηχανισμό ανίχνευσης κύκλου. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα έδειξαν την ανωτερότητα αυτών των προσεγγίσεων σε σχέση με τον γενετικό αλγόριθμο κωδικοποιημένου υποσυνόλου και την ML ευρετική. Η έρευνα ταμπού και η ACO απέδωσαν περίπου το ίδιο σε σχέση με την ποιότητα της λύσης, αλλά η έρευνα ταμπού ήταν πολύ πιο γρήγορη από την ACO προσέγγιση. Από εδώ και στο εξής, οι προσεγγίσεις της έρευνας ταμπού και της ACO θα αναφέρονται ως TS-LCMST και ACO-LCMST, αντίστοιχα.

Σε αυτήν την εργασία, προτείναμε έναν αλγόριθμο αποικίας τεχνητών μελισσών (ABC) για το LCST πρόβλημα. Ο αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών είναι μια μετα-ευρετική προσέγγιση, που προτάθηκε από τον Karaboga [9]. Είναι εμπνευσμένη από την νοήμουσα συμπεριφορά συγκομιδής σμήνους μελιτοφόρων μελισσών. Συγκρίναμε την ABC προσέγγιση μας με τις TS-LCMST και ACO-LCMST προσεγγίσεις που προτάθηκαν στο [8] και τον SCGA που προτάθηκε στο [2]. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα δείχνουν την αποτελεσματικότητα της προσέγγισης μας σε σύγκριση με αυτές τις προσεγγίσεις.

Η υπόλοιπη εργασία χωρίζεται ως εξής: η Ενότητα 2 παρέχει μια εισαγωγή στον αλγόριθμο αποικίας τεχνητών μελισσών. Η Ενότητα 3 περιγράφει τον ABC αλγόριθμο μας για το LCST πρόβλημα. Τα υπολογιστικά αποτελέσματα παρουσιάζονται στην Ενότητα 4, ενώ η Ενότητα 5 δίνει κάποια συνοπτικά συμπεράσματα.

Ο αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών

Ο αλγόριθμος αποικίας τεχνητών μελισσών είναι μία νέα βασιζόμενη σε πληθυσμό μετα-ευρετική προσέγγιση που προτάθηκε από τον Karaboga [9] και αναπτύχθηκε περαιτέρω από τους Karaboga και Basturk [10-13]. Αυτή η προσέγγιση εμπνέεται από τη νοήμουσα συμπεριφορά συγκομιδής σμήνους μελιτοφόρων μελισσών. Οι συλλέκτριες μέλισσες χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες-τις απασχολούμενες, τις μέλισσες παρατηρητές και τις ανιχνεύτριες. Όλες

οι μέλισσες που αξιοποιούν επί του παρόντος μια πηγή τροφής ταξινομούνται ως ‘απασχολούμενες’. Οι απασχολούμενες μέλισσες φέρνουν φορτία νέκταρος από την πηγή τροφής στην κυψέλη και μπορεί να μοιραστούν την πληροφορία για την πηγή με τους παρατηρητές. Οι ‘παρατηρητές’ είναι αυτές οι μέλισσες που περιμένουν στην κυψέλη για την πληροφόρηση από τις απασχολούμενες μέλισσες σε σχέση με τις πηγές τροφής και οι ‘ανιχνεύτριες’ είναι αυτές που αυτή τη στιγμή ψάχνουν για νέες πηγές τροφής γύρω από την φωλιά. Οι απασχολούμενες μέλισσες μοιράζονται πληροφορίες για πηγές τροφής χορεύοντας σε ένα κοινό χώρο στην κυψέλη που ονομάζεται σημείο χορού. Η διάρκεια του χορού είναι ανάλογη με το περιεχόμενο του νέκταρος της πηγής τροφής που αξιοποιείται επί του παρόντος από την μέλισσα που χορεύει. Άρα, οι καλές πηγές τροφής προσελκύουν περισσότερες μέλισσες από ότι οι κακές. Όποτε μια μέλισσα, είτε είναι παρατηρητής είτε ανιχνεύτρια, βρίσκει μια πηγή τροφής μετατρέπεται σε απασχολούμενη. Όταν μια πηγή τροφής αξιοποιείται πλήρως, όλες οι απασχολούμενες μέλισσες που ασχολούνται με αυτήν την εγκαταλείπουν, και μπορεί να γίνουν ξανά ανιχνεύτριες ή παρατηρητές. Τις ανιχνεύτριες μέλισσες μπορούμε να τις φανταστούμε να εκτελούν την εργασία της εξερεύνησης, ενώ τις απασχολούμενες και τις μέλισσες παρατηρητές την εργασία της αξιοποίησης.

Παρακινημένος από αυτήν την συμπεριφορά συγκομιδής των μελιτοφόρων μελισσών, ο Karaboga [9] πρότεινε τον αλγόριθμο αποικίας τεχνητών μελισσών. Στον ABC αλγόριθμο, κάθε πηγή τροφής αντιπροσωπεύει μια πιθανή λύση στο πρόβλημα υπό συζήτηση και η ποσότητα του νέκταρος μιας πηγής τροφής αντιπροσωπεύει την ποιότητα της λύσης που εκπροσωπείται από αυτή την πηγή τροφής. Σε αυτόν τον αλγόριθμο επίσης αποικία τεχνητών μελισσών (μελισσών για πιο σύντομα) υπάρχουν τρεις τύποι μελισσών-απασχολούμενες, παρατηρητές και ανιχνεύτριες. Το πρώτο μισό της αποικίας μελισσών αποτελείται από απασχολούμενες μέλισσες, ενώ το υπόλοιπο μισό αποτελείται από παρατηρητές. Ο ABC αλγόριθμος υποθέτει ότι υπάρχει μόνο μία απασχολούμενη μέλισσα για κάθε πηγή τροφής, δηλαδή ο αριθμός των πηγών τροφής είναι ίσος με τον αριθμό των απασχολούμενων μελισσών. Η απασχολούμενη μέλισσα μιας εγκαταλελειμμένης πηγής τροφής γίνεται ανιχνεύτρια και αμέσως μόλις βρει μια νέα πηγή τροφής γίνεται και πάλι απασχολούμενη. Ο ABC αλγόριθμος είναι ένας επαναληπτικός αλγόριθμος. Ξεκινάει συνδέοντας όλες τις απασχολούμενες μέλισσες με τυχαία παραγόμενες πηγές τροφής (λύσεις). Στη συνέχεια, κατά τη διάρκεια κάθε επανάληψης, κάθε απασχολούμενη μέλισσα καθορίζει μια πηγή τροφής στην γειτονιά της παρούσης πηγής και αξιολογεί την ποσότητα του νέκταρος (fitness). Αν η ποσότητα του νέκταρος της είναι καλύτερη από αυτή της συναφούς πηγής τροφής τότε αυτή η απασχολούμενη μέλισσα κινείται προς αυτή τη νέα πηγή τροφής αφήνοντας την παλιά, διαφορετικά τη διατηρεί. Όταν όλες οι απασχολούμενες μέλισσες ολοκληρώσουν αυτήν την διαδικασία, μοιράζονται τις πληροφορίες τους περί νέκταρος με τους παρατηρητές, κάθε μία από τις οποίες επιλέγει μια πηγή τροφής σύμφωνα με μια πιθανότητα ανάλογη της ποσότητας του νέκταρος αυτής της πηγής τροφής. Η πιθανότητα ... επιλογής μιας πηγής τροφής ορίζεται χρησιμοποιώντας την παρακάτω εξίσωση: όπου είναι η fitness της λύσης που εκπροσωπείται από την πηγή τροφής και m είναι ο συνολικός αριθμός των πηγών τροφής. Ξεκάθαρα, με αυτό το σχέδιο οι καλές πηγές τροφής θα τραβήξουν περισσότερες παρατηρητές από ότι οι κακές. Αφού όλοι οι παρατηρητές έχουν επιλέξει την πηγή τροφής τους, κάθε μία από αυτές καθορίζει μια πηγή τροφής στην γειτονιά της επιλεγμένης πηγής τροφής της και υπολογίζει την fitness της. Η καλύτερη πηγή τροφής ανάμεσα σε όλες τις γειτονικές πηγές που ορίστηκαν από τους παρατηρητές, τις συνδεδεμένες με μια συγκεκριμένη πηγή τροφής i , και η ίδια η πηγή τροφής i , θα είναι η νέα τοποθεσία της πηγής τροφής i . Αν μία λύση που εκπροσωπείται από μια συγκεκριμένη πηγή τροφής δεν βελτιώνεται με ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων τότε αυτή η πηγή τροφής εγκαταλείπεται από την συνδεδεμένη σε αυτήν απασχολούμενη μέλισσα και αυτή μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια, δηλαδή θα ψάξει αυθαίρετα για νέα πηγή τροφής. Αυτό ισοδυναμεί με ανάθεση μια τυχαία παραγόμενης πηγής τροφής (λύσης) σε αυτήν την ανιχνεύτρια και με αλλαγή της ιδιότητας της ξανά από ανιχνεύτρια σε απασχολούμενη. Αφού καθοριστεί η νέα τοποθεσία κάθε πηγής τροφής, άλλη μια επανάληψη του ABC αλγόριθμου ξεκινάει. Όλη η διαδικασία επαναλαμβάνεται ξανά και ξανά μέχρι η συνθήκη τερματισμού να ικανοποιηθεί.

Η πηγή τροφής στην γειτονιά μιας συγκεκριμένης πηγής τροφής καθορίζεται από την αλλαγή της τιμής μιας τυχαία επιλεγμένης παραμέτρου λύσης και την διατήρηση των υπολοίπων παραμέτρων ως έχουν. Αυτό επιτυγχάνεται προσθέτοντας στην παρούσα τιμή της επιλεγμένης παραμέτρου το προϊόν μιας ομοιόμορφης μεταβλητής στο $[-1, 1]$, και την διαφορά στις τιμές αυτής της παραμέτρου για αυτήν την πηγή τροφής και κάποιας άλλης τυχαία επιλεγμένης πηγής. Τυπικά, αν υποθέσουμε ότι κάθε λύση αποτελείται από d παραμέτρους και αν είναι μία λύση με τιμές παραμέτρων \mathbf{p} Για να μπορέσουμε να ορίσουμε μια λύση στην γειτονιά του \mathbf{p} , η παράμετρος λύσης j και άλλη μία λύση επιλέγονται αυθαίρετα. Εκτός από την τιμή της επιλεγμένης παραμέτρου j , όλες οι άλλες τιμές παραμέτρων του είναι ίδιες \mathbf{p} , δηλαδή η τιμή της επιλεγμένης παραμέτρου j ορίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη φόρμουλα: όπου u είναι μια ομοιόμορφη μεταβλητή στο $[-1, 1]$. Αν η τιμή που βγαίνει ως αποτέλεσμα αποτύχει έξω από το αποδεκτό εύρος για την παράμετρο j , τότε τοποθετείται στην αντίστοιχη ακρότατη τιμή σε αυτό το εύρος.

Ο ABC αλγόριθμος για το LCMST πρόβλημα (ABC-LCMST)

Ο ABC αλγόριθμος για το LCMST πρόβλημα χρησιμοποιεί την κωδικοποίηση υποσυνόλου που προτάθηκε στο [2] για να αντιπροσωπεύσει ένα LCST. Τα βασικά χαρακτηριστικά αυτού του αλγορίθμου περιγράφονται παρακάτω:

Εκκίνηση: Ο αλγόριθμος ξεκινάει αναθέτοντας μια τυχαία παραγόμενη λύση σε κάθε απασχολούμενη μέλισσα.

Πιθανότητα επιλογής μιας πηγής τροφής: Μιας που το LCMST είναι ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης η πιθανότητα επιλογής μιας πηγής τροφής i ορίζεται χρησιμοποιώντας την ακόλουθη εξίσωση: όπου ... είναι το κόστος του LCST που εκπροσωπείται από την πηγή τροφής i και m είναι ο συνολικός αριθμός των πηγών τροφής.

Ορισμός μιας πηγής τροφής στην γειτονιά μιας πηγής τροφής: Το LCMST είναι ένα πρόβλημα διακριτής βελτιστοποίησης. Επίσης, έχουμε αντιπροσωπεύσει τις λύσεις με το σύνολο των εσωτερικών τους κόμβων, δηλαδή δεν υπάρχει διάταξη ανάμεσα στους εσωτερικούς κόμβους. Άρα, η μέθοδος που περιγράφηκε στην τελευταία παράγραφο της προηγούμενης ενότητας δεν μπορεί να εφαρμοστεί στο LCMST πρόβλημα. Ακόμα και η επιλογή ενός τυχαίου κόμβου από μια άλλη τυχαία επιλεγμένη λύση για την αλλαγή της λύσης μέσω του προαναφερθέντος τρόπου παράγει στην καλύτερη περίπτωση μια τυχαία επίδραση. Είναι επιθυμητή η χρησιμοποίηση κατά κάποιον τρόπο της πληροφόρησης που έχει συγκεντρωθεί για την πηγή τροφής από μια άλλη απασχολούμενη μέλισσα ενώ παράγεται μια γειτονική λύση. Στο LCMST πρόβλημα, αν ένας κόμβος είναι εσωτερικός κόμβος σε μια καλή λύση τότε είναι πολύ πιθανό να είναι εσωτερικός κόμβος και σε άλλες καλές λύσεις. Χρησιμοποιήσαμε αυτήν την παρατήρηση ενώ παράγονταν οι γειτονικές λύσεις. Απομακρύνουμε τυχαία έναν εσωτερικό κόμβο από την λύση και στη θέση του τοποθετούμε έναν εσωτερικό κόμβο επιλεγμένο από μια άλλη τυχαία επιλεγμένη λύση. Ο επιλεγμένος για τοποθέτηση κόμβος από μια άλλη λύση πρέπει να είναι διαφορετικός από όλους τους άλλους κόμβους που είναι παρόντες στην λύση καθώς και από τον κόμβο που απομακρύνθηκε. Οι δεσμοί σπάνε αυθαίρετα. Αν δεν μπορούμε να βρούμε κανένα τέτοιο κόμβο τότε αυτό σημαίνει ότι οι δύο λύσεις είναι πανομοιότυπες. Αυτήν την κατάσταση την ονομάζουμε σύγκρουση. Αν μια σύγκρουση συμβεί ενώ παράγεται μια γειτονική λύση για μια απασχολούμενη μέλισσα, τότε η αρχική λύση εγκαταλείπεται και η συγκεκριμένη απασχολούμενη μέλισσα γίνεται ανιχνεύτρια, δηλαδή μια νέα λύση παράγεται τυχαία και η ιδιότητα αυτής της ανιχνεύτριας μέλισσας μετατρέπεται και πάλι σε απασχολούμενη συνδέοντας την με αυτή τη λύση. Αυτό συμβαίνει για να αφαιρεθεί οποιαδήποτε πανομοιότυπη λύση. Αν μια σύγκρουση συμβεί ενώ παράγεται μια γειτονική λύση για έναν παρατηρητή τότε μια άλλη λύση προτιμάται τυχαία για την επιλογή ενός εσωτερικού κόμβου από αυτήν για να εισαχθεί στην αρχική λύση. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να βρούμε μια λύση που να είναι διαφορετική από την αρχική. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι για τους παρατηρητές δεν υπάρχει λόγος να παράγουν μία τυχαία λύση σε περίπτωση σύγκρουσης διότι για την επιβίωση αυτή η τυχαία παραγόμενη λύση πρέπει να ανταγωνιστεί τόσο με την αρχική λύση όσο και με τις λύσεις των άλλων παρατηρητών, που είναι επίσης συνδεδεμένες με την αρχική λύση. Άρα, τέτοιες τυχαία παραγόμενες λύσεις σπάνια επιβιώνουν.

Αξιολόγηση κόστους: Υπάρχει ένας πιο αποτελεσματικός τρόπος από την διαδικασία των δύο βημάτων που περιγράφηκε στην Ενότητα 1, για να υπολογίσουμε το κόστος του LCST που συνδέεται με μια γειτονική λύση. Αυτό συμβαίνει διότι η γειτονική λύση διαφέρει από την αρχική λύση μόνο σε ένα κόμβο. Ας υποθέσουμε ότι ο κόμβος ... απομακρύνεται από το σύνολο των εσωτερικών κόμβων της αρχικής λύσης και ο κόμβος εισάγεται στη θέση του για να παράγει την γειτονική λύση. Το συνολικό βάρος της γειτονικής λύσης μπορεί να υπολογιστεί με έναν πιο αποτελεσματικό τρόπο μέσω των δύο βημάτων που ακολουθούν. Το πρώτο βήμα δημιουργεί το MST στο νέο σύνολο των εσωτερικών κόμβων με τρόπο πανομοιότυπο με το πρώτο βήμα της διαδικασίας των δύο βημάτων. Στο δεύτερο βήμα, όλοι αυτοί οι κόμβοι-φύλλα που συνδέονταν σε έναν εσωτερικό κόμβο διαφορετικό από τον στην αρχική λύση ελέγχονται μόνο για το κόστος της ακμής τους με το νέο εσωτερικό κόμβο Αν αυτό το κόστος είναι λιγότερο από το κόστος της ακμής τους με τον εσωτερικό κόμβο στον οποίο συνδέονταν επί του παρόντος, τότε αποσπώνται από τον παρόντα εσωτερικό κόμβο και επανασυνδέονται στο δέντρο μέσω του Ωστόσο, όλοι οι εναπομείναντες κόμβοι-φύλλα (κόμβοι-φύλλα που είχαν συνδεθεί στο ... στην αρχική λύση και στο ίδιο το ...) πρέπει να ελεγχθούν για τη σύνδεση μικρότερου κόστους με κάθε εσωτερικό κόμβο. Μια παρόμοια προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε στο [8] για την έρευνα ταμπού.

Όλες οι τυχαία παραγόμενες λύσεις πρέπει να αξιολογηθούν από την διαδικασία δύο βημάτων που περιγράφηκε στην Ενότητα 1. Δεν υπάρχει καλύτερος τρόπος για την αξιολόγηση του κόστους τους.

Άλλα χαρακτηριστικά: Αν η λύση που συνδέεται με μια απασχολούμενη μέλισσα δεν βελτιωθεί μέσα σε ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων τότε αυτή μετατρέπεται σε ανιχνεύτρια. Στον ABC αλγόριθμο μας υπάρχει μια δεύτερη πιθανότητα στην οποία μια απασχολούμενη μέλισσα μπορεί να γίνει ανιχνεύτρια. Όπως περιγράφηκε προηγουμένως, μια απασχολούμενη μέλισσα μπορεί να γίνει ξανά ανιχνεύτρια και μέσω της σύγκρουσης. Δεν έχουμε βάλει κανένα όριο στον αριθμό των ανιχνευτριών σε μία μόνο επανάληψη όπως στους άλλους ABC αλγορίθμους. Στον ABC αλγόριθμο μας ο αριθμός των ανιχνευτριών εξαρτάται από τις δύο συνθήκες παραπάνω.

Μπορούν να υπάρξουν πολλές ανιχνεύτριες σε μία επανάληψη αν αυτές οι δύο συνθήκες ικανοποιηθούν πολλές φορές, ή μπορεί να μην υπάρξει καμία ανιχνεύτρια αν αυτές οι συνθήκες δεν ικανοποιηθούν.

Υπολογιστικά αποτελέσματα

Εφαρμόσαμε τον ABC-LCMST στο C και τον εκτελέσαμε σε ένα σύστημα Pentium 4 με 512 MB RAM που τρέχει στα 3.0GHz σε Red Hat Linux 9.0. Ακολουθώντας το [13], χρησιμοποιήσαμε μια αποικία 100 μελισσών. Οι μισές από αυτές τις μέλισσες απασχολούνται και οι υπόλοιπες μισές είναι παρατηρητές. Για ένα πρόβλημα μεγέθους n , αν η συνδεόμενη με μια απασχολούμενη μέλισσα λύση δεν βελτιωθεί σε $2n$ επαναλήψεις τότε αυτή η λύση αντικαθίσταται από κάποια τυχαία παραγόμενη λύση. Το όριο των $2n$ επαναλήψεων έχει οριστεί εμπειρικά. Συγκρίναμε τον ABC-LCMST με τον ACO-LCMST και τον TS-LCMST που προτάθηκαν στο [8] και τον SCGA που προτάθηκε στο [2]. Η σύγκριση με τον ACO-LCMST ήταν ιδιαίτερα σημαντική καθώς και οι δύο είναι βασισμένες σε σμήνος προσεγγίσεις. Άρα για να γίνει μια δίκαιη σύγκριση με τον ACO-LCMST χρησιμοποιήσαμε ένα κριτήριο τερματισμού για τον ABC-LCMST που είναι αντίστοιχο του κριτηρίου τερματισμού που χρησιμοποιήθηκε στον ACO-LCMST σε σχέση με τον αριθμό των αξιολογήσεων fitness (τον αριθμό των λύσεων που αντλήθηκαν). Ο ACO-LCMST τερματίζεται όταν η καλύτερη λύση δεν βελτιώνεται σε 2000 επαναλήψεις και έχει εκτελεστεί για τουλάχιστον $2000+20n$ επαναλήψεις. Σε κάθε επανάληψη, ο ACO-LCMST παράγει $n/5$ λύσεις, ενώ ο ABC-LCMST 100 λύσεις. Συνεπώς, ο ABC-LCMST τερματίζεται όταν η καλύτερη λύση δεν βελτιώνεται σε πάνω από $4n$ επαναλήψεις και έχει εκτελεστεί για τουλάχιστον $4n+.../25$ επαναλήψεις. Όσον αφορά τον αριθμό των αξιολογήσεων fitness αυτό το κριτήριο τερματισμού είναι ισοδύναμο με αυτό του ACO-LCMST, δηλαδή τόσο ο ACO-LCMST όσο και ο ABC-LCMST τερματίζονται όταν η καλύτερη λύση δεν βελτιώνεται σε πάνω από $400n$ αξιολογήσεις fitness και αφού έχουν εκτελεστεί για τουλάχιστον $400n+4n...$ αξιολογήσεις fitness. Ο SCGA παράγει 20.. λύσεις συνολικά, ενώ ο TS-LCMST τερματίζεται όταν η καλύτερη λύση δεν βελτιώνεται σε πάνω από 100 επαναλήψεις. Ο TS-LCMST παράγει λύσεις σε κάθε επανάληψη. Για την ακρίβεια, τόσο ο SCGA όσο και ο TS-LCMST παράγουν πολύ περισσότερες λύσεις από ότι ο ACO-LCMST και ο ABC-LCMST.

Για να ελέγξουμε τον ABC-LCMST, χρησιμοποιήσαμε τις ίδιες 65 περιπτώσεις προβλημάτων που χρησιμοποιήθηκαν και στο [2,8]. Αυτές οι περιπτώσεις χρησιμοποιήθηκαν πρώτα στο [2]. 45 από αυτές τις περιπτώσεις είναι Ευκλείδειες, ενώ οι υπόλοιπες παράγονται τυχαία. Οι Ευκλείδειες περιπτώσεις παρήχθησαν αρχικά για το πρόβλημα του Ευκλείδειου Δέντρου Steiner. Αυτές οι περιπτώσεις αποτελούνται από αυθαίρετα σημεία στο τετράγωνο μονάδα. Αυτά τα σημεία μπορούν να θεωρηθούν οι κόμβοι ενός ολοκληρωμένου γράφου, του οποίου οι ακμές-βάρη είναι οι Ευκλείδειες αποστάσεις μεταξύ τους. Αυτές οι περιπτώσεις είναι διαθέσιμες στην OR-βιβλιοθήκη του Beasley (<http://people.brunel.ac.uk/~mastijb/jeb/info.html>). Οι τυχαίες περιπτώσεις παρήχθησαν από τον Julstrom στο [2]. Οι ακμές-βάρη αυτών των τυχαίων περιπτώσεων είναι διανεμημένες/τοποθετημένες όμοια στο [0.01, 0.99]. Υπάρχουν 15 Ευκλείδειες περιπτώσεις για κάθε έναν από τους 50, 100 και 250 κόμβους, ενώ υπάρχουν 10 τυχαίες περιπτώσεις για κάθε έναν από τους 100 και 300 κόμβους. Ο Julstrom [2] όρισε τον περιορισμό-φύλλο .. στο 45, 90, 225 και 270 για τα προβλήματα μεγέθους $n = 50, 100, 250$ και 300 αντίστοιχα. Όπως στον SCGA, ACO-LCMST και TS-LCMST, εκτελέσαμε τον ABC-LCMST 30 ανεξάρτητες φορές σε κάθε περίπτωση.

Οι Πίνακες 1-3 δείχνουν τα αποτελέσματα του ABC-LCMST, του ACO-LCMST, TS-LCMST και του SCGA στις Ευκλείδειες περιπτώσεις, ενώ οι Πίνακες 4 και 5 κάνουν το ίδιο για τις τυχαίες περιπτώσεις. Για κάθε περίπτωση και κάθε προσέγγιση, αυτοί οι πίνακες αναφέρουν την καλύτερη λύση που βρέθηκε σε πάνω από 30 δοκιμές καθώς και την μέση και συνηθισμένη απόκλιση των τιμών των λύσεων. Δεδομένα για τον ACO-LCMST και τον TS-LCMST παίρνουμε από το [8], ενώ δεδομένα για τον SCGA από το [2]. Ο Πίνακας 6 συγκρίνει την απόδοση του ABC-LCMST με τον ACO-LCMST, TS-LCMST και SCGA όσον αφορά την ποιότητα της καλύτερης και της μέσης λύσης. Ο Πίνακας 6 αποδεικνύει ξεκάθαρα την ανωτερότητα του ABC-LCMST απέναντι στις άλλες προσεγγίσεις σε σχέση με την ποιότητα της λύσης. Οι καλύτερες και οι μέσες λύσεις που αντλήθηκαν από τον ABC-LCMST είναι πάντα τόσο καλές ή καλύτερες από αυτές των άλλων προσεγγίσεων εκτός από μία περίπτωση, όπου η μέση λύση που αντλήθηκε από τον TS-LCMST είναι καλύτερη. Ακόμα, οι Πίνακες 1-5 δείχνουν ότι οι συνήθεις αποκλίσεις των τιμών των λύσεων που αντλήθηκαν από τον ABC-LCMST είναι επίσης οι μικρότερες ανάμεσα σε όλες τις προσεγγίσεις. Αυτό υποδεικνύει την ευρωστία του.

Ο Πίνακας 7 αναφέρει τον μέσο χρόνο για να φτάσει στη μέση λύση και τον μέσο χρόνο εκτέλεσης για τον ABC-LCMST, ACO-LCMST και TS-LCMST στις Ευκλείδειες περιπτώσεις, ενώ ο Πίνακας 8 κάνει το ίδιο για τις τυχαίες περιπτώσεις. Αυτοί οι πίνακες αναφέρουν επίσης τον μέγιστο και τον μέσο αριθμό των αξιολογήσεων fitness που απαιτούνται από τον ABC-LCMST και ACO-LCMST για να φτάσουν στην καλύτερη λύση. Δεδομένα για τον ABC-LCMST και ACO-LCMST παίρνουμε από το [8]. Δεν παρέχεται τέτοια χρονομέτρηση ή πληροφορίες για αξιολόγηση fitness στο [2] για τον SCGA. Οι ABC-LCMST και TS-LCMST είναι πολύ πιο γρήγοροι από τον ACO-

LCMST. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όλες οι νέες λύσεις εκτός από την αρχική λύση στον TS-LCMST και σχεδόν όλες οι νέες λύσεις (εκτός από τις τυχαία παραγόμενες λύσεις) στον ABC-LCMST διαφέρουν μόνο σε ένα εσωτερικό κόμβο από την ήδη υπάρχουσα λύση. Συνεπώς, το κόστος δημιουργίας και αξιολόγησης μιας τέτοιας νέας λύσης είναι πολύ μικρότερο από αυτό μιας νέας λύσης στον ACO-LCMST, όπου κάθε νέα λύση πρέπει να δημιουργηθεί από την αρχή και να αξιολογηθεί χρησιμοποιώντας την διαδικασία των δύο βημάτων. Στις Ευκλείδειες περιπτώσεις ο ACO-LCMST απαιτεί περισσότερες αξιολογήσεις fitness από τον ABC-LCMST, ενώ αυτή η κατάσταση αντιστρέφεται στις τυχαίες περιπτώσεις. Μιας που ο ABC-LCMST αποδίδει σταθερά καλύτερα, τότε αυτό μπορεί να αποδοθεί στην πρόωρη σύγκλιση του ACO-LCMST στις τυχαίες περιπτώσεις.

Συμπεράσματα

Σε αυτήν την εργασία σχεδιάσαμε και εφαρμόσαμε έναν αλγόριθμο αποικίας τεχνητών μελισσών ABC-LCMST για το LCMST πρόβλημα. Συγκρίναμε την προσέγγισή μας απέναντι σε τρεις άλλες μετα-ευρετικές προσεγγίσεις-έναν γενετικό αλγόριθμο, μια προσέγγιση βελτιστοποίησης με αποικία μυρμηγκιών και μια προσέγγιση έρευνας ταμπού. Η προσέγγισή μας ξεπέρασε σε απόδοση όλες τις άλλες προσεγγίσεις. Οι ποιότητες καλύτερης και μέσης λύσης του ABC-LCMST είναι πάντα το ίδιο καλές ή και καλύτερες από αυτές που αντλήθηκαν από τις άλλες προσεγγίσεις εκτός από μια περίπτωση, όπου η μέση ποιότητα λύσης της έρευνας ταμπού ήταν καλύτερη. Οι υπολογιστικοί χρόνοι για τον ABC-LCMST είναι επίσης αρκετά μικρότεροι. Πιο συγκεκριμένα, ο ABC-LCMST ξεπέρασε εντελώς σε απόδοση τον ACO-LCMST τόσο σε σχέση με την ποιότητα της λύσης όσο και με το χρόνο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό καθώς και οι δύο προσεγγίσεις βασίζονται στην νοημοσύνη του σμήνους.

Από ότι γνωρίζουμε, αυτή είναι η πρώτη εφαρμογή αλγορίθμου αποικίας τεχνητών μελισσών για διακριτό πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αυτή η εργασία δείχνει την δυνατότητα του αλγορίθμου αποικίας τεχνητών μελισσών στην επίλυση ενός διακριτού προβλήματος βελτιστοποίησης. Οι ιδέες που παρουσιάστηκαν εδώ μπορούν να εφαρμοστούν σε πολλά άλλα προβλήματα επίσης. Η έννοια των συγκρούσεων που εισήχθηκε εδώ ελέγχει τον αριθμό των όμοιων λύσεων στον πληθυσμό. Όπως και σε άλλες προσεγγίσεις βασιζόμενες σε πληθυσμό, η παρουσία πανομοιότυπων λύσεων μπορεί επίσης να μειώσει την απόδοση του ABC αλγορίθμου. Η διαδικασία που αναπτύξαμε για τον ορισμό γειτονικών λύσεων μπορεί να προσαρμοστεί σε άλλα προβλήματα επιλογής υποσυνόλου όπως το 0/1 knapsack πρόβλημα, το δευτεροβάθμιο knapsack πρόβλημα, το ελάχιστο k-απολυτότητας πρόβλημα δέντρου, το ελάχιστο πρόβλημα κάλυψης κορυφής κτλ. Οι μέλισσες κάνουν μαθηματικούς υπολογισμούς πιο γρήγορα και από υπολογιστή «Ο περιοδεύων πωλητής». Μία ακόμη ικανότητα ενστικτώδους νοημοσύνης στο ζωικό βασίλειο έρχεται να καταδειχθεί βρετανική επιστημονική έρευνα, φέρνοντας στο φως την εκπληκτική δυνατότητα των μελισσών να δίνουν τη λύση σε πολύπλοκα μαθηματικά προβλήματα, κάνοντας υπολογισμούς πιο γρήγορα.

Οι ερευνητές του πανεπιστημίου του Λονδίνου (Royal Holloway), υπό τον δρ Νάιτζελ Ρέιν της Σχολής Βιολογικών Επιστημών, δημοσίευσαν τη σχετική μελέτη στο αμερικανικό περιοδικό οικολογίας και βιολογίας The American Naturalist. Σύμφωνα με τις βρετανικές εφημερίδες Guardian και Independent, οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι οι μέλισσες μαθαίνουν να πετούν ακολουθώντας τη συντομότερη δυνατή διαδρομή ανάμεσα στα λουλούδια που έχουν προηγουμένως ανακαλύψει με τυχαία σειρά, με τον τρόπο αυτό ουσιαστικά «λύνοντας» το λεγόμενο «πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή», ένα διάσημο και δυσεπίλυτο γρίφο στον χώρο των οικονομικών και των μαθηματικών.

Στο πρόβλημα αυτό, ένας άνθρωπος (πωλητής) καλείται να βρει τη συντομότερη δυνατή διαδρομή ανάμεσα σε όλους τους προορισμούς που πρέπει να επισκεφτεί. Οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές λύνουν το πρόβλημα συγκρίνοντας το μήκος όλων των πιθανών διαδρομών και επιλέγοντας τον πιο σύντομο. Όμως οι μέλισσες φαίνεται να κάνουν ουσιαστικά το ίδιο πράγμα κάθε μέρα, χωρίς καν τη βοήθεια υπολογιστή, απλώς με ένα εγκέφαλο. Όπως είπαν οι επιστήμονες, καθημερινά οι μέλισσες ξεκινούν να επισκεφτούν μια πληθώρα λουλουδιών σε διάφορες τοποθεσίες και, επειδή θέλουν να κάνουν εξοικονόμηση ενέργειας για το πέταγμά τους, «υπολογίζουν» μια διαδρομή που τους επιτρέπει να βρίσκονται στον αέρα το ελάχιστο δυνατό χρονικό διάστημα. Χρησιμοποιώντας τεχνητά άνθη, συνδεδεμένα με υπολογιστές, οι ερευνητές έδειξαν ότι οι μέλισσες δεν χαράζουν μια πορεία απλώς με βάση την τυχαία σειρά που βρήκαν προηγουμένως τα λουλούδια, αλλά πάνε από λουλούδι σε λουλούδι ακολουθώντας συγκεκριμένο «σχέδιο», που τους επιτρέπει να πετάνε όσο γίνεται λιγότερο. Αφού εντοπίσουν τις θέσεις των λουλουδιών, στη συνέχεια οι μέλισσες επιστρέφουν σε αυτά έχοντας μάθει -με μυστηριώδη τρόπο- να ακολουθούν πιο τον καλύτερο δυνατό δρόμο, δηλαδή τον πιο σύντομο, ώστε να εξοικονομούν χρόνο και ενέργεια (ή χρήμα, όπως θα έλεγε ένας πωλητής!). «Παρά τους μικροσκοπικούς εγκεφάλους τους, οι μέλισσες είναι ικανές για εντυπωσιακά κατορθώματα στη συμπεριφορά τους. Πρέπει να καταλάβουμε με ποιο τρόπο μπορούν να λύσουν το πρόβλημα του περιοδεύοντος

πωλητή χωρίς κομπούτερ» δήλωσε ο υπεύθυνος της έρευνας. Οι επιστήμονες ευελπιστούν ότι μια τέτοια ανακάλυψη θα μπορούσε να βοηθήσει και τους ανθρώπους σε διάφορα πρακτικά προβλήματα, όπως στην καλύτερη ρύθμιση της κυκλοφορίας σε ένα δίκτυο (π.χ. κυκλοφοριακό) ή στην εκτεταμένη αλυσίδα τροφοδοσίας μιας επιχείρησης, που στέλνει φορτηγά σε όλα σημεία του ορίζοντα και θέλει να εξοικονομήσει χρόνο και χρήμα στις μετακινήσεις.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ι

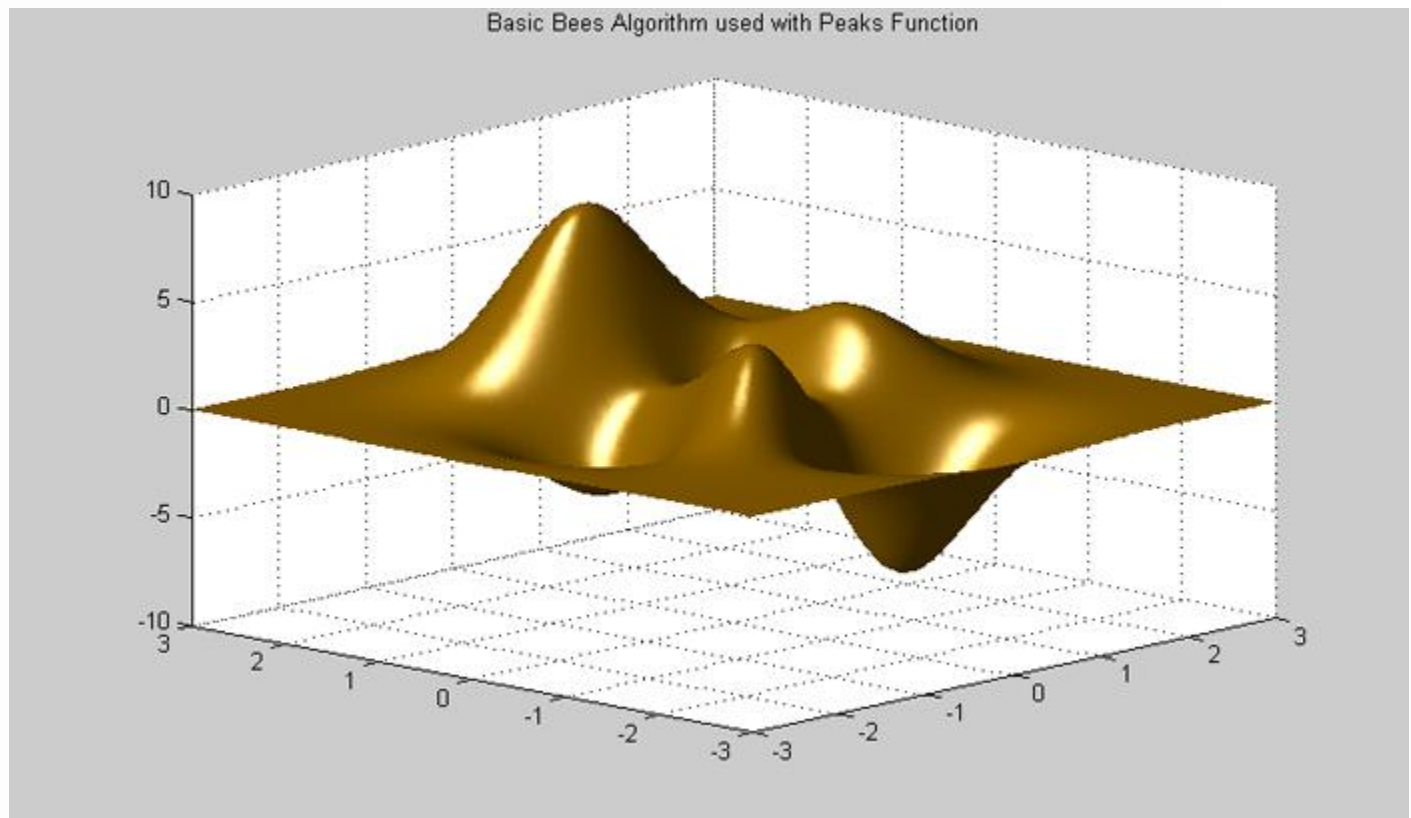
_ΒΑΣΙΚΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΥ ΜΕΛΙΣΣΩΝ ΣΕ ΚΩΔΙΚΑ ΜΑΤΛΑΒ ΠΟΥ ΕΧΕΙ ΩΣ ΑΝΑΦΟΡΑ ΤΙΣ ΚΟΡΥΦΕΣ ΤΩΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΩΝ `function main_peaksclc; close all; clear all;`

Setting the Parameter for the Algorithm

```
n= 30; % number of scout bees (e.g. 40-100)
itr=15; % number of iterations (e.g. 1000-5000)
m=20; % number of best selected patches (e.g. 10-50)
e=10; % number of elite selected patches (e.g. 10-50)
n1=15; % number of recruited bees around best selected patches (e.g. 10-50)
n2=30; % number of recruited bees around elite selected patches (e.g. 10-50)
ngh=0.0234; % Patch radius for neighbourhood search
x_max=3;
y_max=3;
x_min=-3;
y_min=-3;
Grid_step=0.05;
```

Plotting the Matlab Peaks Testfunction

```
[X1, X2]=meshgrid(x_min:Grid_step:x_max,y_min:Grid_step:y_max);
fig(1)= figure('PaperSize',[20.98 29.68],'WindowStyle','docked');
ax(1)=surf(X1,X2,peaks(X1,X2),'FaceColor',[0.6824 0.4667 0], 'EdgeColor','none',
'FaceLighting','phong');
view([-47 20]); camlight left; hold on;
title({'Basic Bees Algorithm used with Peaks Function';'copyright 2007 MEC Steffen Scholz,
Ahmed Haj Darwish'});
```

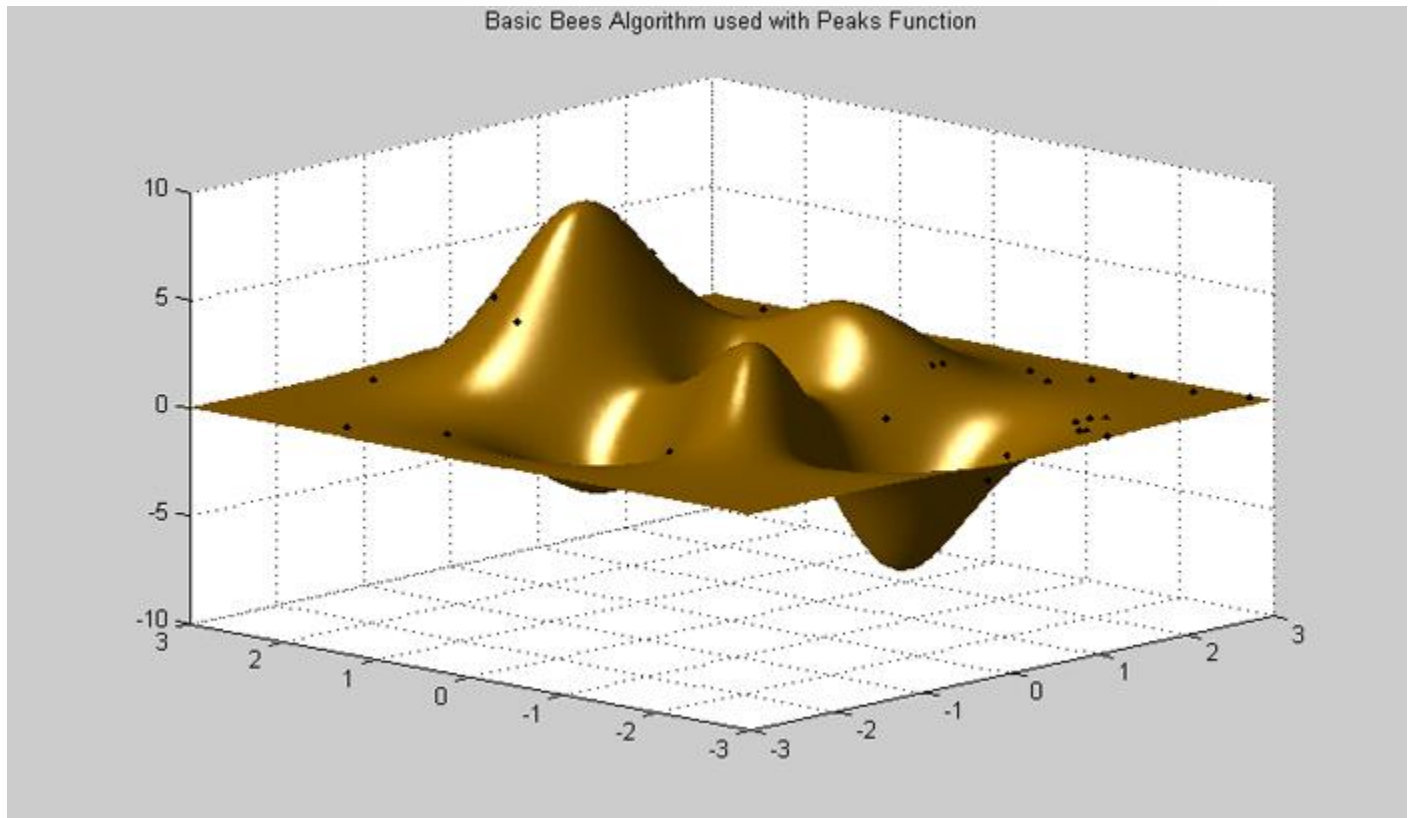



Scoutbees: random search (only once)

```
U=X_random(n,x_max, y_max, x_min, y_min);  
ax(1)=plot3(U(:,1),U(:,2),peaks(U(:,1),U(:,2)),'k.');
```

```
Par_Q=sortrows([U(:,1), U(:,2), peaks(U(:,1),U(:,2))],-3);
```

```
clear U; l=0;
```



Iterations of the algorithm

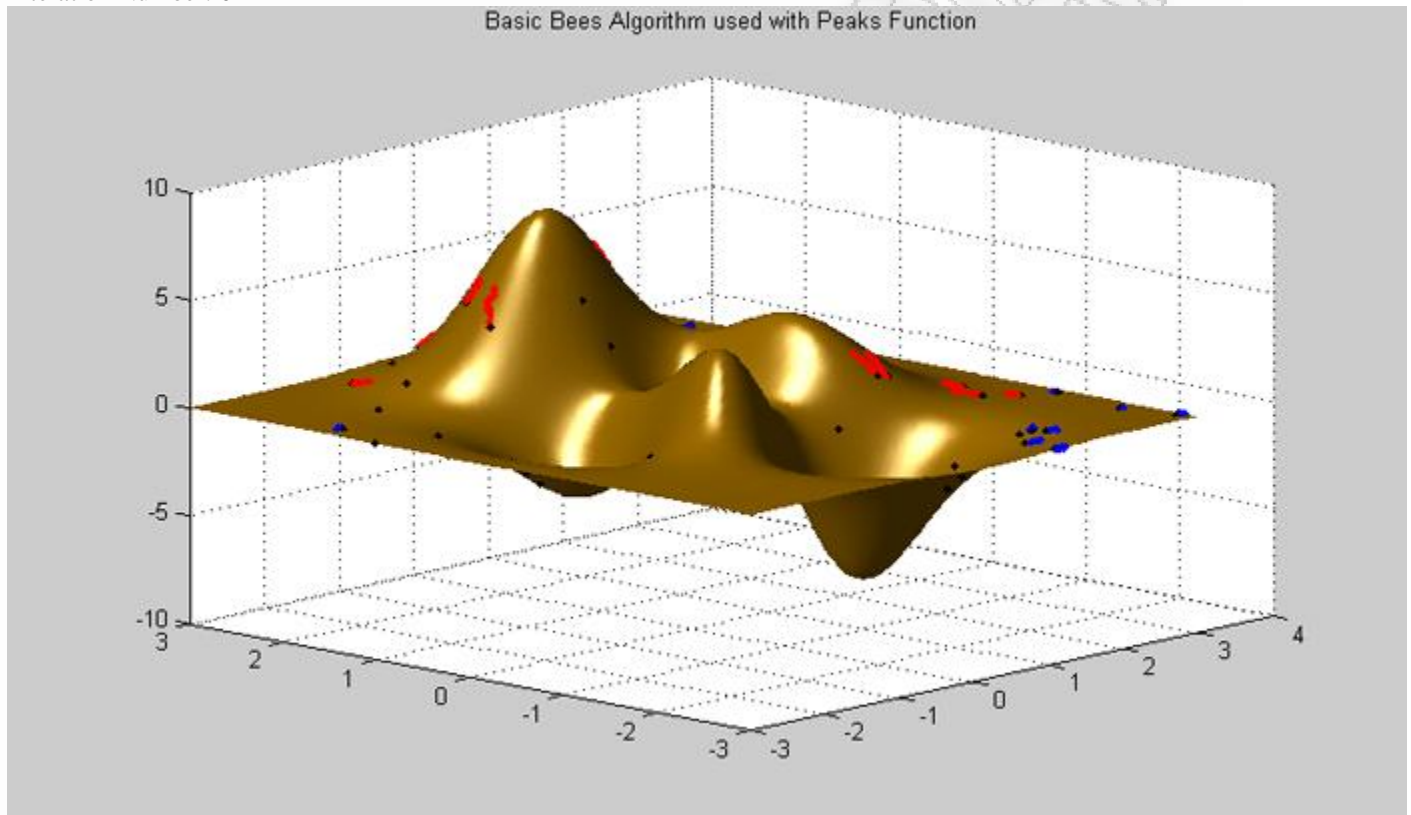
```

for k=1:itr    % iterations
disp(sprintf('Iteration Number: %02.0f,k));
% _____
for j=1:e    % number of elite selected patches
for i=1:n2 % number of bees around elite patches
U=bee_dance(ngh, Par_Q(j,1), Par_Q(j,2));
if peaks(U(1),U(2))> Par_Q(j,3)
Par_Q(j,:)= [U(1), U(2), peaks(U(1),U(2))];
ax(1)=plot3(U(1), U(2), peaks(U(1), U(2)),'r. ');
end
l=l+1;
end
end
end
% _____
for j=e+1:m    % number of best selected patches
for i=1 : n1 % number of bees around best patches
U=bee_dance(ngh,Par_Q(j,1),Par_Q(j,2));
if peaks(U(1),U(2))> Par_Q(j,3)
Par_Q(j,:)= [U(1), U(2), peaks(U(1), U(2))];
ax(1)=plot3 (U(1), U(2), peaks(U(1), U(2)), 'b. ');
end
l=l+1;
end
end
end
% _____
for i=m+1:n

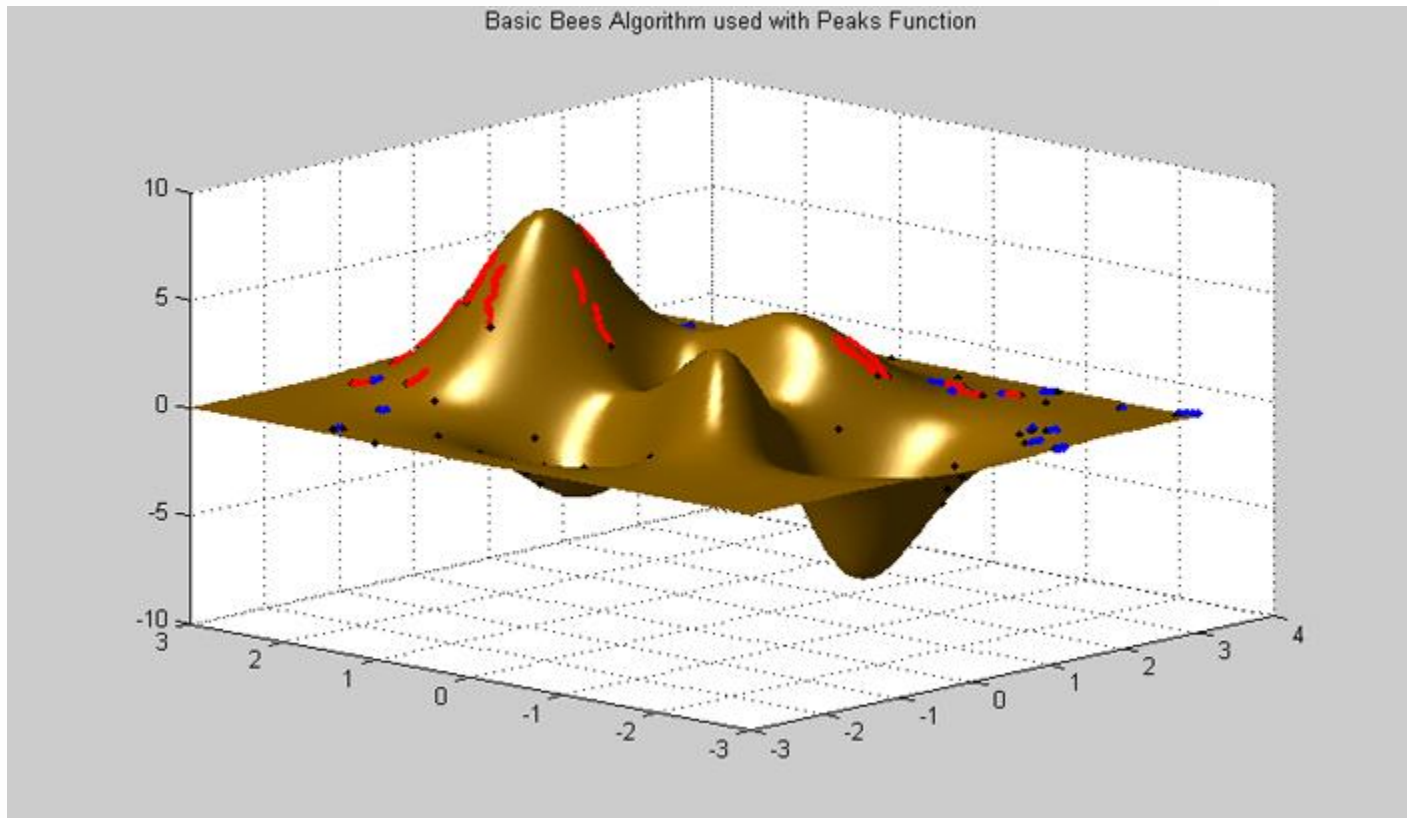
```

```

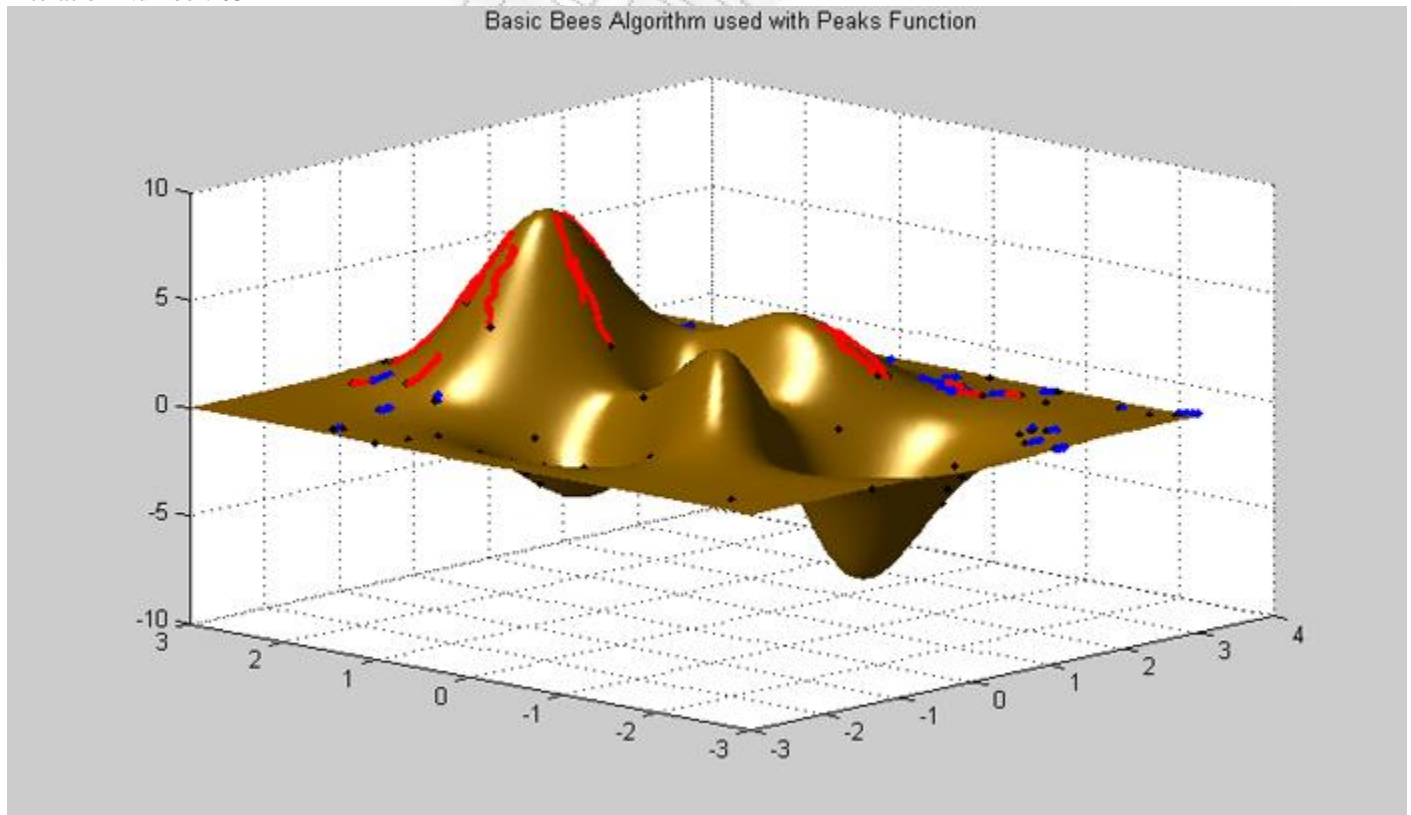
U=X_random(2,x_max, y_max, x_min, y_min);
Par_Q(i,:)= [U(1), U(2), peaks(U(1),U(2))];
ax(1)=plot3(U(1), U(2), peaks(U(1), U(2)), 'k. ');
l=l+1;
end
% _____
Par_Q=sortrows(Par_Q,-3);
Best(k,:)=Par_Q(1:15,3)';
Iteration Number: 01
    
```



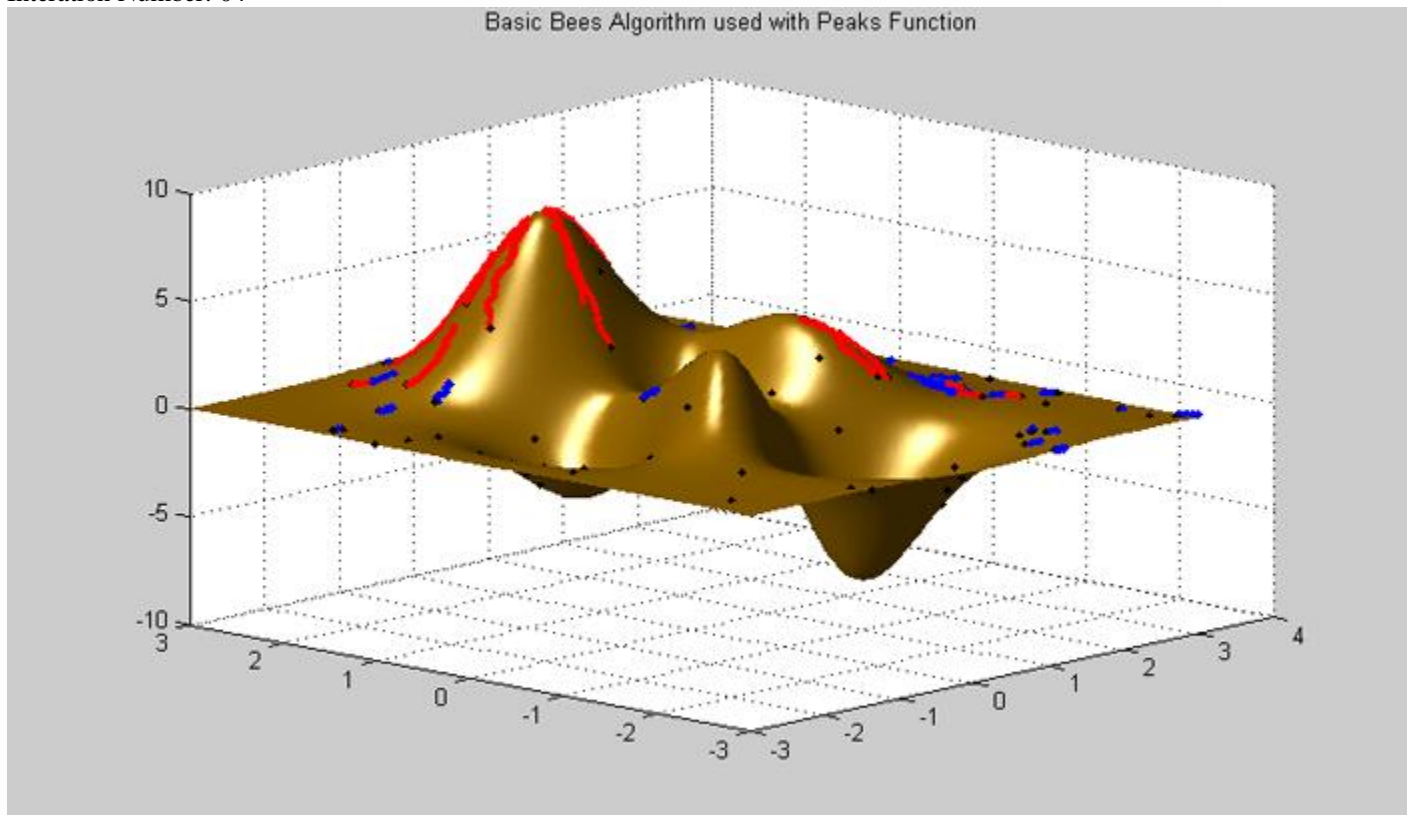
Iteration Number: 02



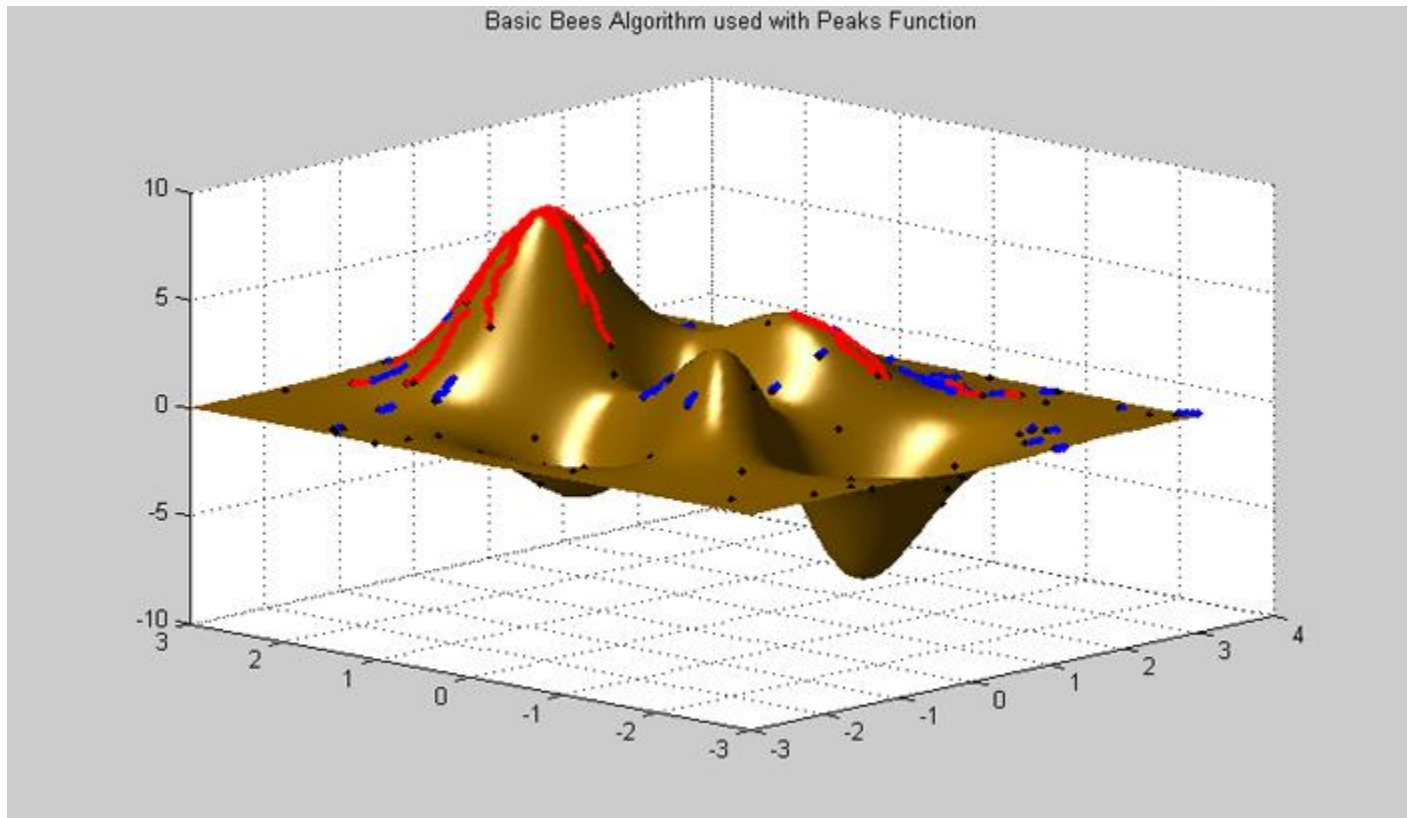
Iteration Number: 03



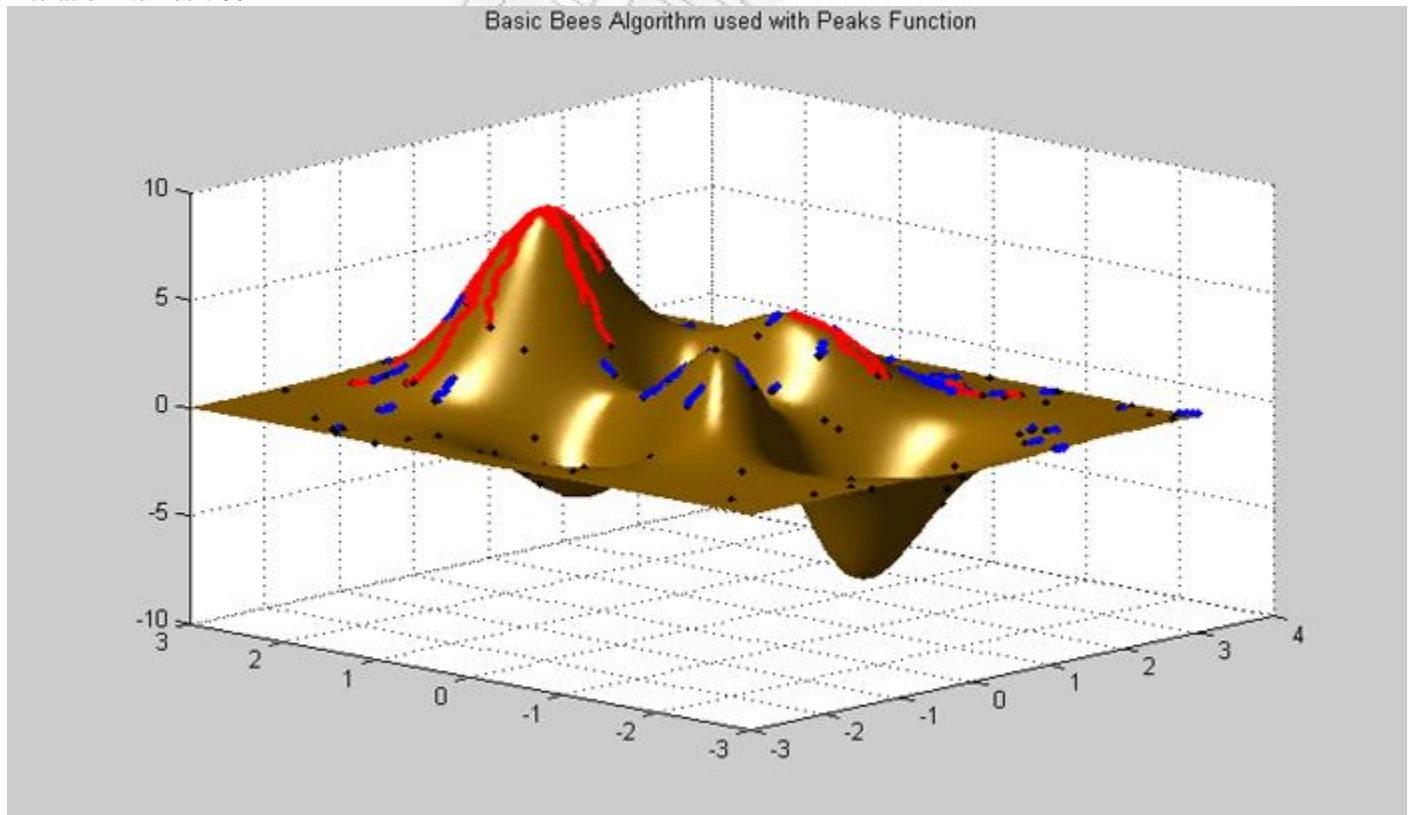
Iteration Number: 04



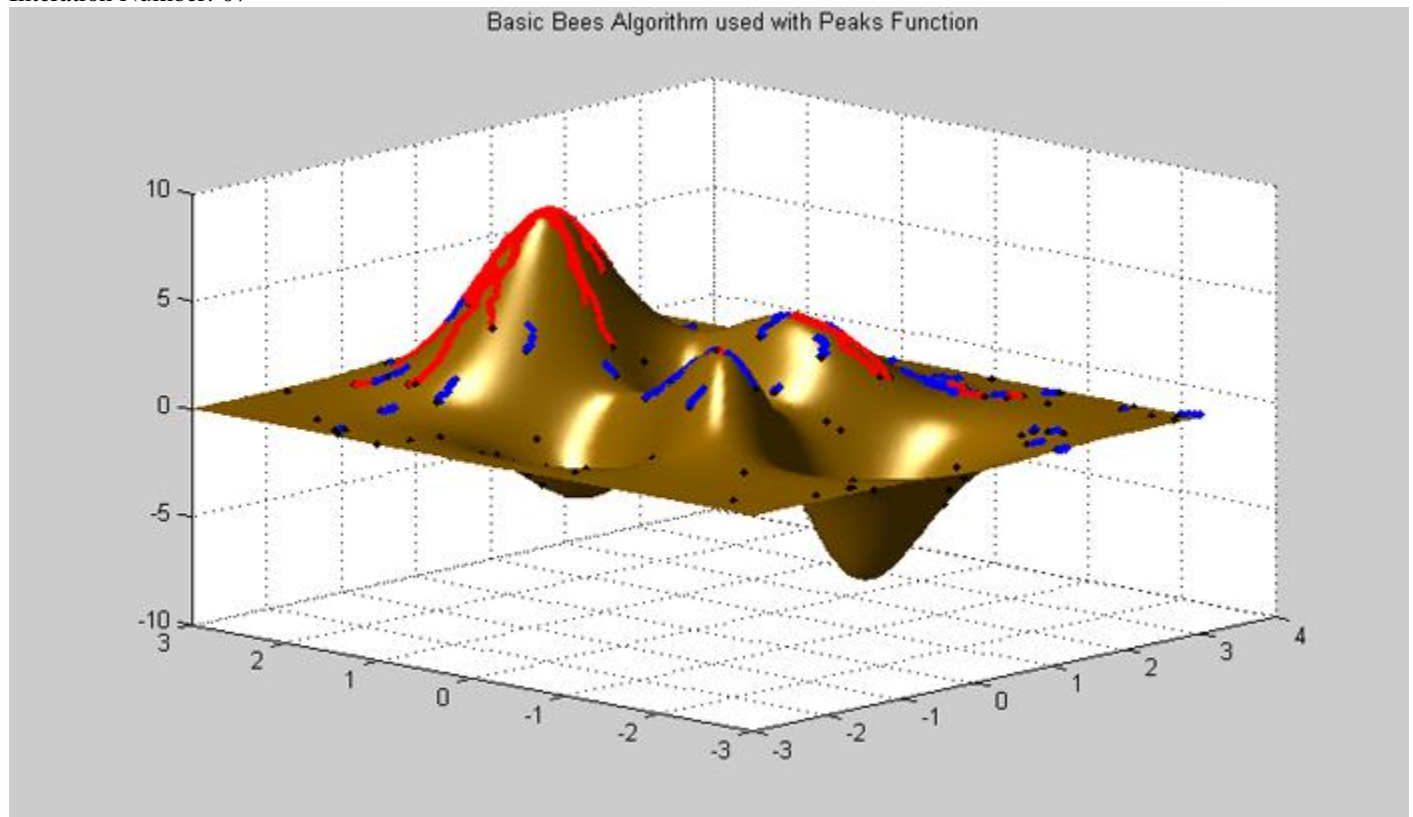
Iteration Number: 05



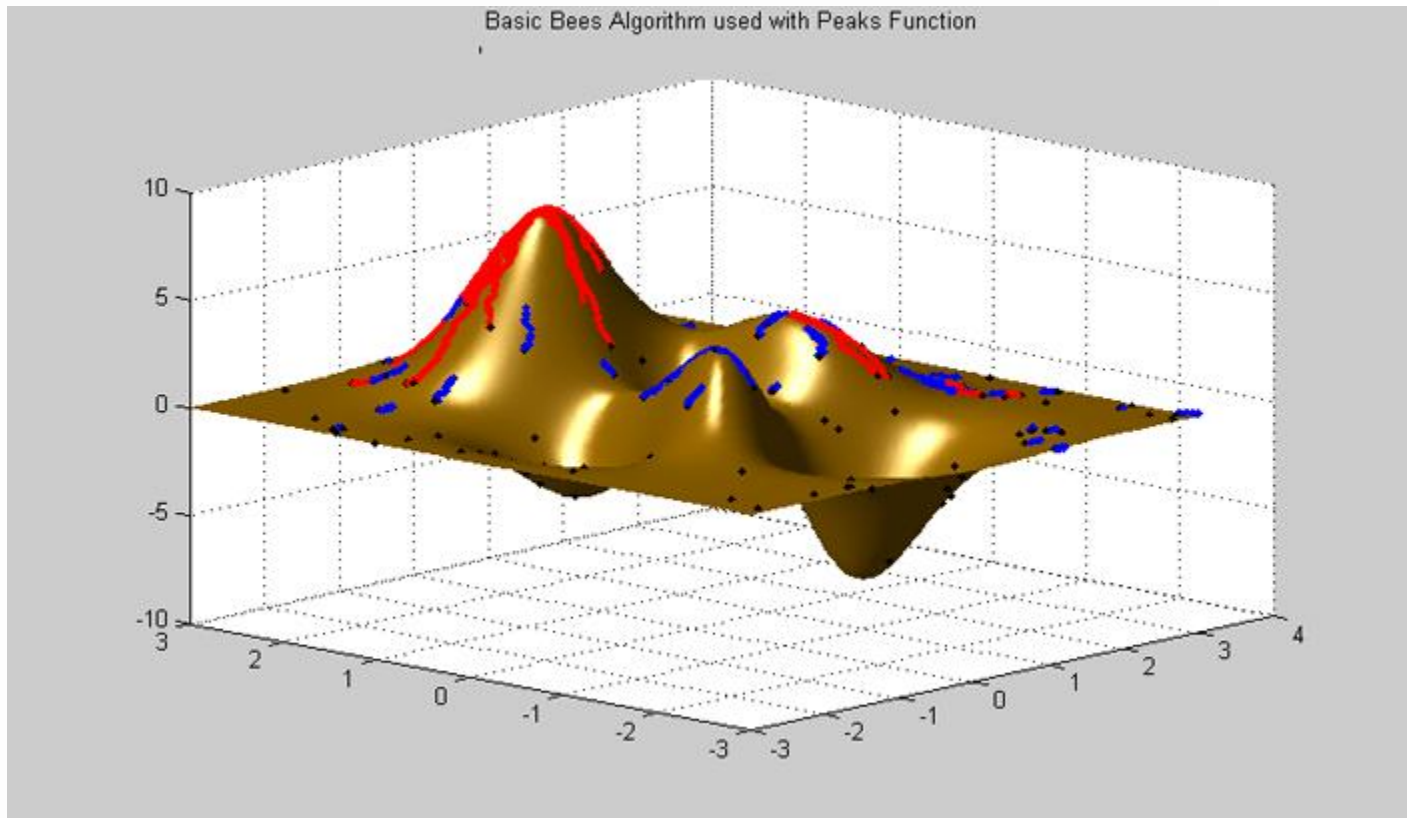
Iteration Number: 06



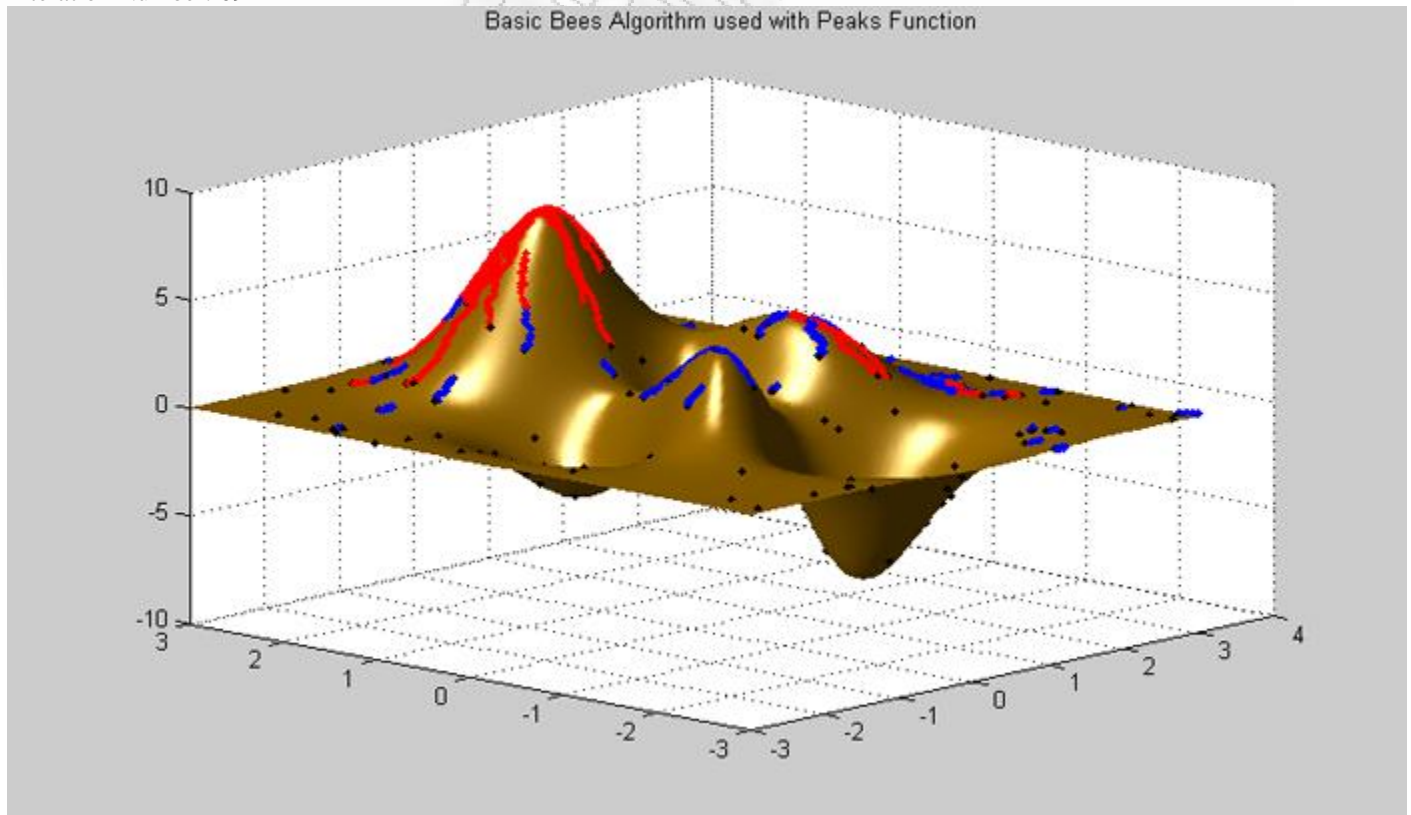
Iteration Number: 07



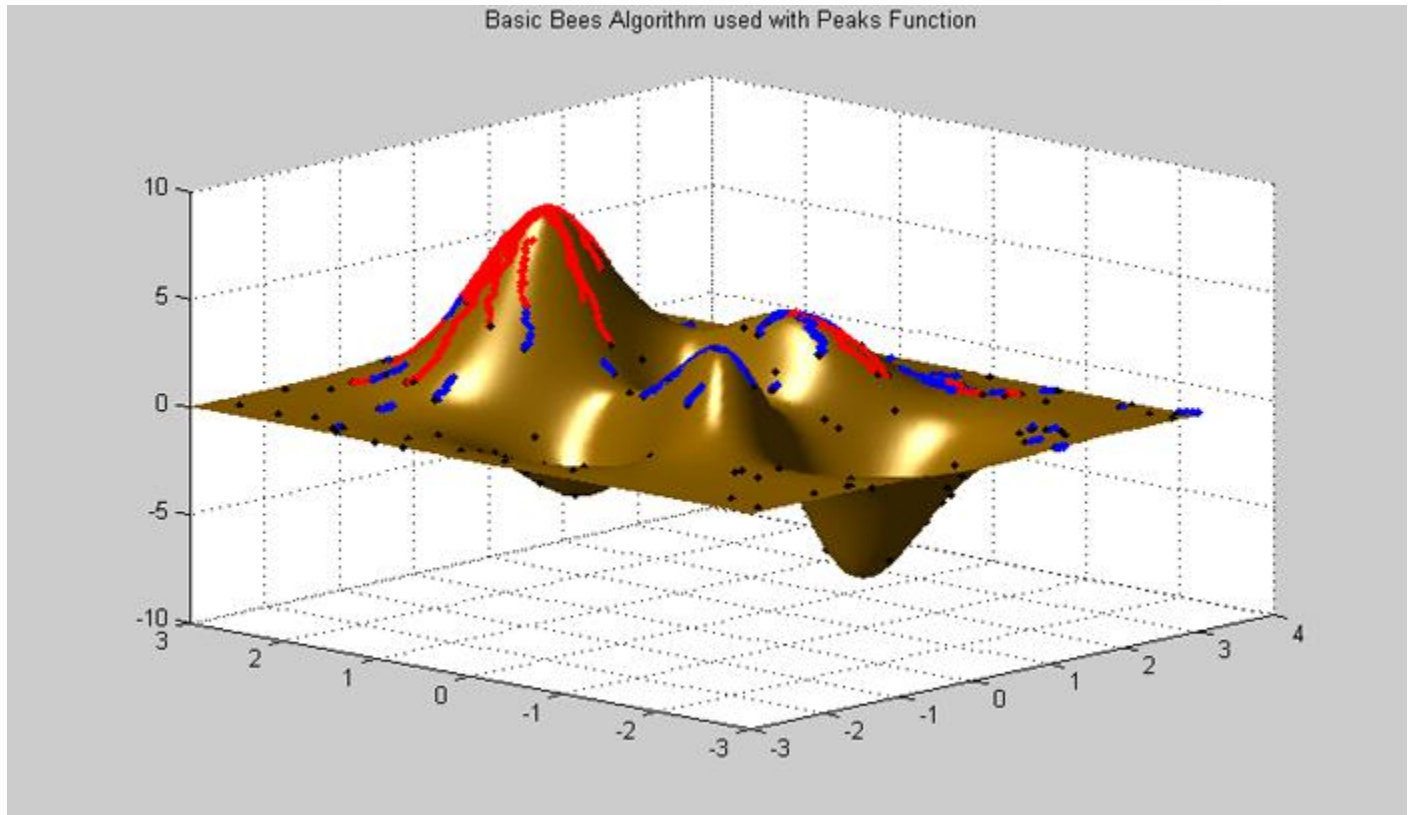
Iteration Number: 08



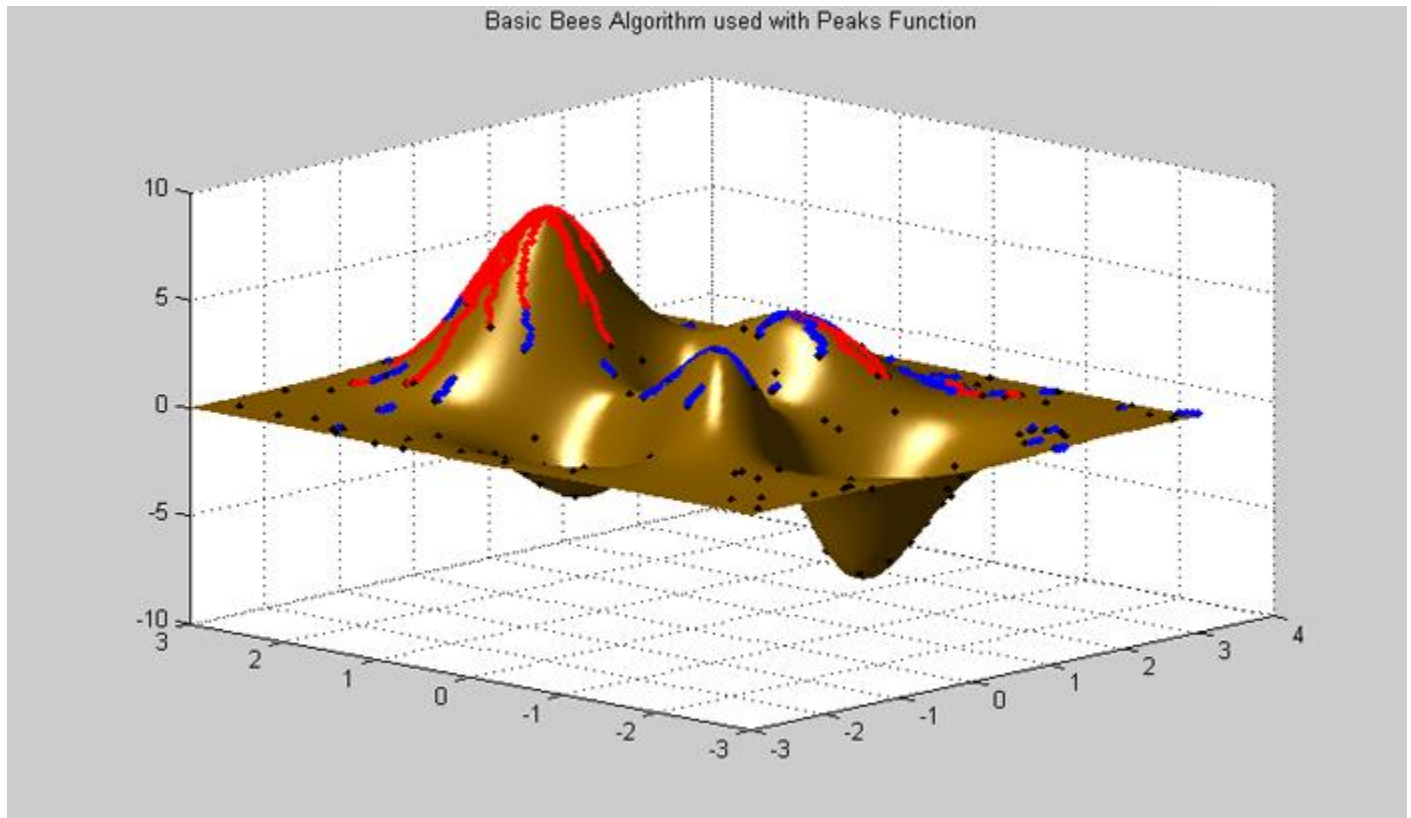
Iteration Number: 09



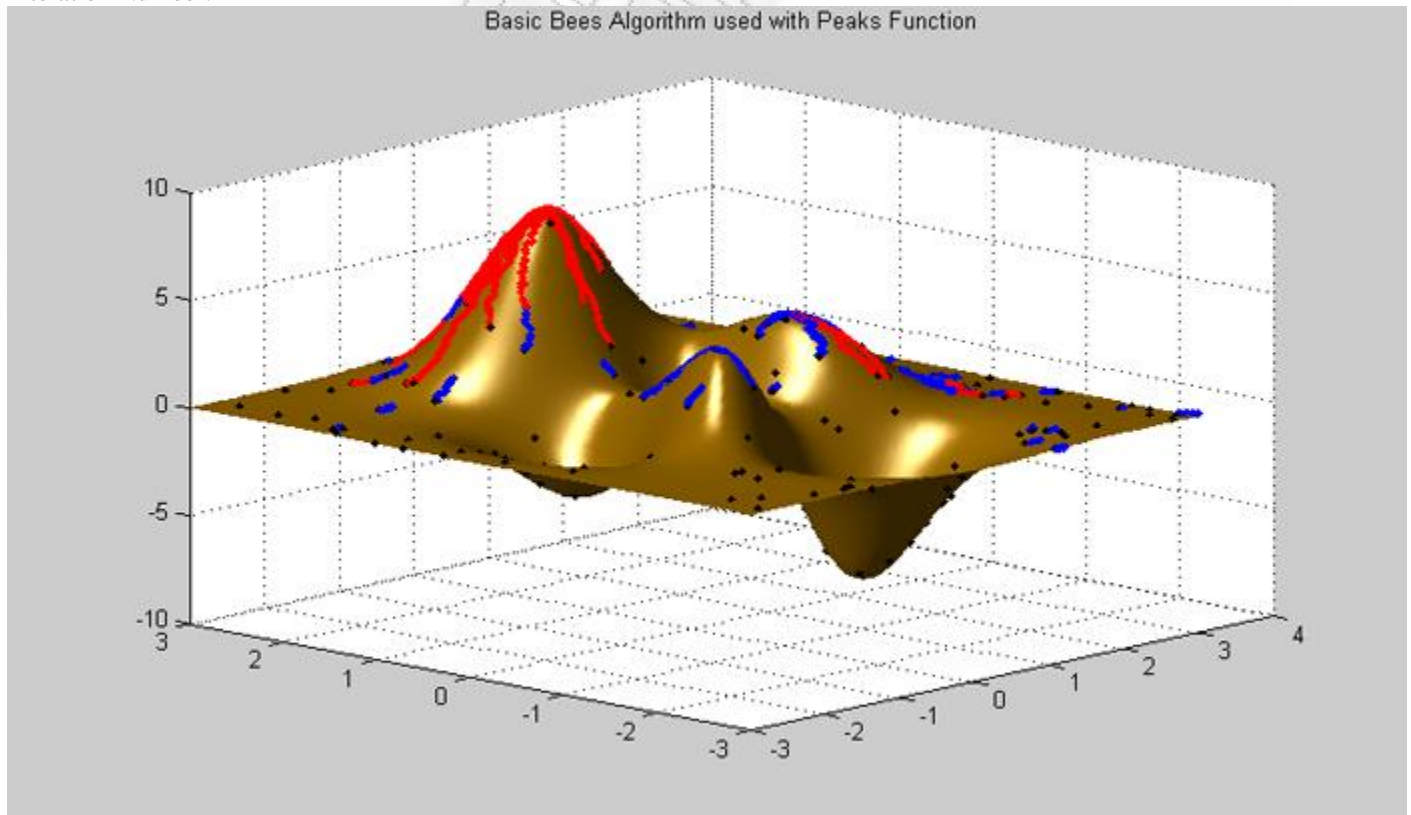
Iteration Number: 10



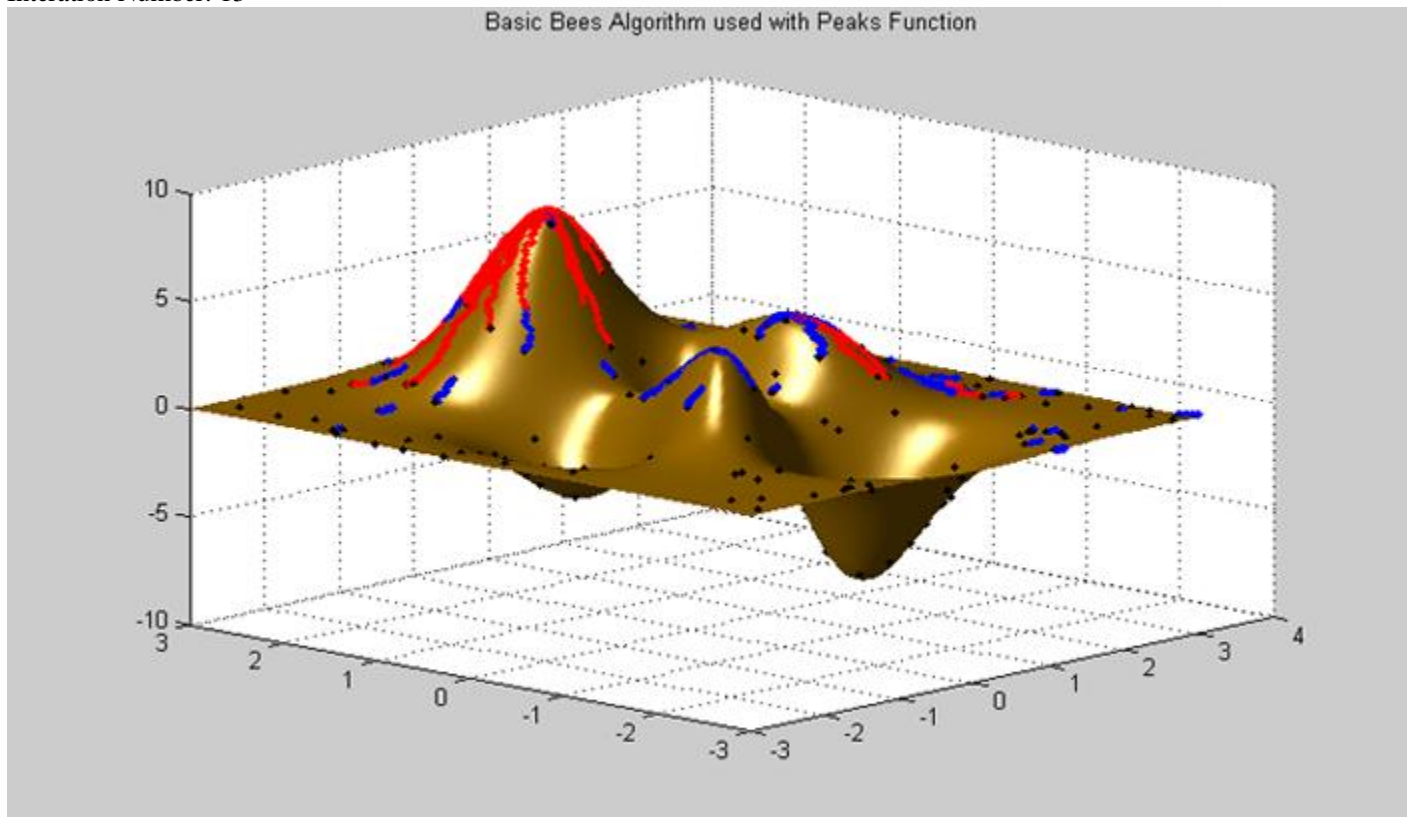
Iteration Number: 11



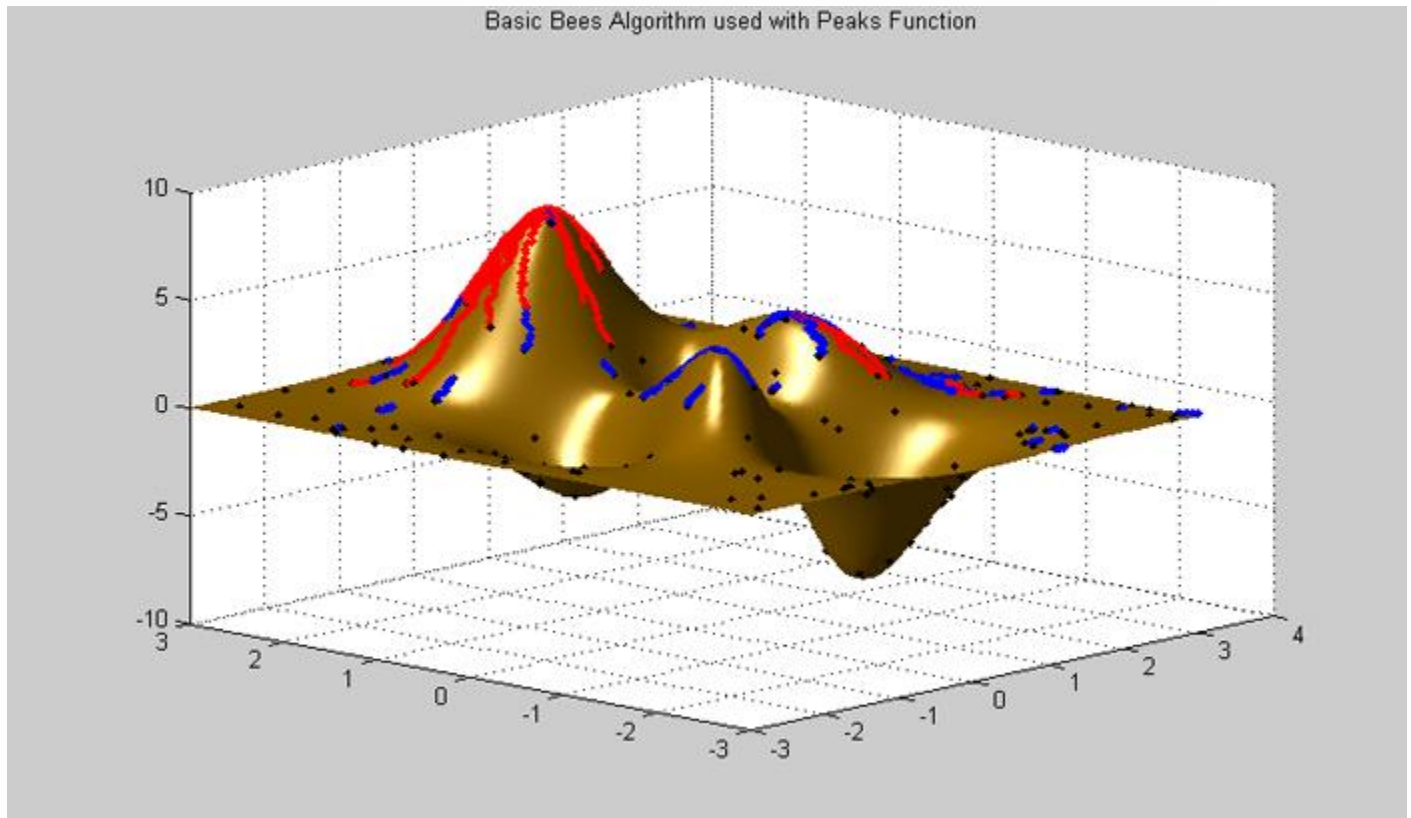
Iteration Number: 12



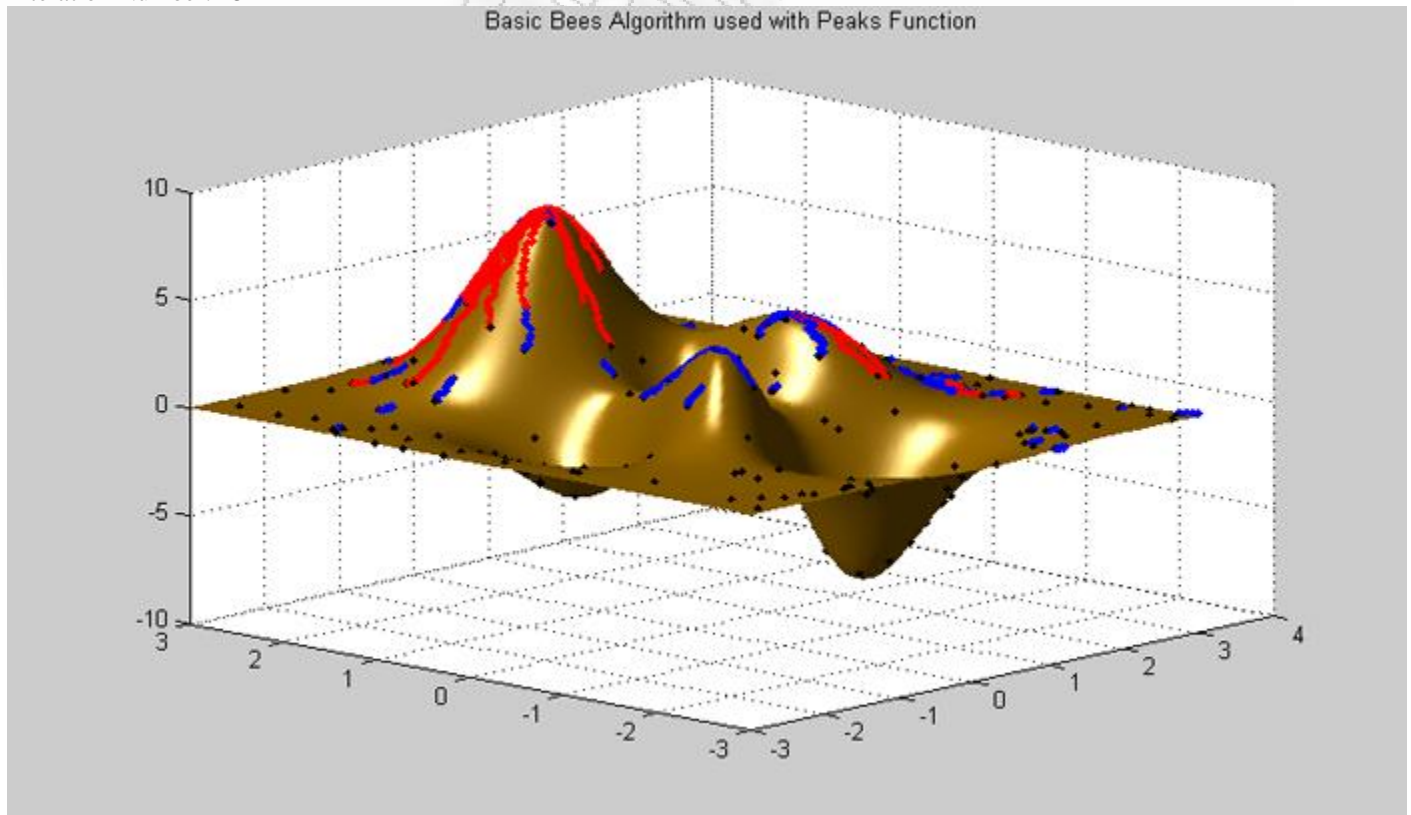
Iteration Number: 13



Iteration Number: 14



Iteration Number: 15




```
end % iterations
```

Function Bee Dance

```
function U=bee_dance(ngh,x1, x2)
    U(:,1)=(x1-ngh)+(2*ngh.*rand(size(x1,1),1));
    U(:,2)=(x2-ngh)+(2*ngh.*rand(size(x2,1),1));
end
```

Function X Random

```
function X=X_random(n, x_max, y_max, x_min, y_min)
    X=[x_min+((rand(n,1)).*(x_max-x_min)), y_min+((rand(n,1)).*(y_max-y_min))];
end
end% End SGS 2008
```

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [^] ^a ^b Pham DT, Ghanbarzadeh A, Koc E, Otri S, Rahim S and Zaidi M. The Bees Algorithm. Technical Note, Manufacturing Engineering Centre, Cardiff University, UK, 2005
- [^] ^a ^b Duc Truong Pham, Ashraf Afify, Ebubekir Koc "[Manufacturing cell formation using the Bees Algorithm](#)". IPROMS 2007 Innovative Production Machines and Systems Virtual Conference, Cardiff, UK.
- [^] ^a ^b D. T. Pham, E. Koç, J. Y. Lee, and J. Phruksanant, Using the Bees Algorithm to schedule jobs for a machine, Proc Eighth International Conference on Laser Metrology, CMM and Machine Tool Performance, LAMDAMAP, Euspen, UK, Cardiff, p. 430-439, 2007.
- [^] ^a ^b ^c ^d Pham D.T., Ghanbarzadeh A., Koç E., Otri S., Rahim S., and M.Zaidi "[The Bees Algorithm – A Novel Tool for Complex Optimisation Problems](#)", Proceedings of [IPROMS 2006 Conference](#), pp.454-461
- [^] ^a ^b Von Frisch K. Bees: Their Vision, Chemical Senses and Language. (Revised edn) Cornell University Press, N.Y., Ithaca, 1976.
- [^] Seeley TD. The Wisdom of the Hive: The Social Physiology of Honey Bee Colonies. Massachusetts: Harvard University Press, Cambridge, 1996.
- [^] Bonabeau E, Dorigo M, and Theraulaz G. Swarm Intelligence: from Natural to Artificial Systems. Oxford University Press, New York, 1999.
- [^] Camazine S, Deneubourg J, Franks NR, Sneyd J, Theraula G and Bonabeau E. Self-Organization in Biological Systems. Princeton: Princeton University Press, 2003.
- [^] D. T. Pham, E. Koç, A. Ghanbarzadeh, and S. Otri, Optimisation of the weights of multi-layered perceptrons using the Bees Algorithm, Proc 5th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems, Turkey, 2006.
- [^] D. T. Pham, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, and S. Otri, Application of the Bees Algorithm to the training of radial basis function networks for control chart pattern recognition, Proc 5th CIRP International Seminar on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering (CIRP ICME '06), Ischia, Italy, 2006.

- [^](#) D. T. Pham, S. Otri, A. Ghanbarzadeh, and E. Koç, Application of the Bees Algorithm to the training of learning vector quantisation networks for control chart pattern recognition, Proc Information and Communication Technologies (ICTTA'06), Syria, p. 1624-1629, 2006.
- [^](#) D. T. Pham, A. J. Soroka, A. Ghanbarzadeh, E. Koç, S. Otri, and M. Packianather, Optimising neural networks for identification of wood defects using the Bees Algorithm, Proc 2006 IEEE International Conference on Industrial Informatics, Singapore, 2006.
- [^](#) Pham D. T., Zaidi Muhamad, Massudi Mahmuddin, Afshin ghanbarzadeh, Ebubekir Koc, Sameh Otri. Using the bees algorithm to optimise a support vector machine for wood defect classification. IPROMS 2007 Innovative Production Machines and Systems Virtual Conference, Cardiff, UK. "[\[1\]](#)"
- [^](#) D. T. Pham, M. Castellani, and A. Ghanbarzadeh, Preliminary design using the Bees Algorithm, Proc Eighth International Conference on Laser Metrology, CMM and Machine Tool Performance, LAMDAMAP, Euspen, UK, Cardiff, p. 420-429, 2007.
- [^](#) D. T. Pham, S. Otri, A. A. Afify, M. Mahmuddin, and H. Al-Jabbouli, Data clustering using the Bees Algorithm, Proc 40th CIRP Int. Manufacturing Systems Seminar, Liverpool, 2007.
- [^](#) D. T. Pham, A. J. Soroka, E. Koç, A. Ghanbarzadeh, and S. Otri, Some applications of the Bees Algorithm in engineering design and manufacture, Proc Int. Conference on Manufacturing Automation (ICMA 2007), Singapore, 2007.
- [^](#) Pham D.T., Ghanbarzadeh A. "[Multi-Objective Optimisation using the Bees Algorithm](#)", Proceedings of [IPROMS 2007 Conference](#)
- [^](#) D.T Pham, Ahmed Haj Darwish, E.E Eldukhri, Sameh Otri. "[Using the Bees Algorithm to tune a fuzzy logic controller for a robot gymnast](#)", Proceedings of [IPROMS 2007 Conference](#)
- [^](#) Olague, G. and Puente, C. 2006. Parisian evolution with honeybees for three-dimensional reconstruction. In Proceedings of the 8th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation (Seattle, Washington, USA, July 08 - 12, 2006). GECCO '06. ACM, New York, NY, 191-198. DOI=<http://doi.acm.org/10.1145/1143997.1144030>
- [^](#) Olague, G.; Puente, C. Honeybees as an Intelligent based Approach for 3D Reconstruction. ICPR 2006. 18th International Conference on Pattern Recognition. 2006, Volume 1, Issue , 0-0 0 Page(s):1116 - 1119. Digital Object Identifier 10.1109/ICPR.2006.632
- [^](#) Olague, G. Puente, C.. The Honeybee Search Algorithm for Three-Dimensional Reconstruction. 8 th European Workshop on Evolutionary Computation in Image Analysis and Signal Processing. Lecture Notes in Computer Science 3907. Springer-Verlag. pp. 427-437. EvoIASP2006. Best Paper Award for EvoIASP 2006. DOI 10.1007/11732242.[ISBN 978-3-540-33237-4](#)
- **External links**
- [The Bees Algorithm Official Website](#)
- [NewScientist: The Honeybee Algorithm award Best Paper for EvoIASP 2006](#)
- [The Bees Algorithm - First Prize-winning Poster](#)

- [BBC Interview Records](#)
- [MEC Bees won 'best communication' prize at INTEGR8OR](#)
- [Boffins put dancing bees to work - BBC News](#)

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΡΑΙΑ