ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Σύγκριση Αλγορίθμων για τον Χαρακτηρισμό Σιδηρομαγνητικών Καταλυτικών Νανοσωματιδίων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΙΔΑΚΗΣ
Α.Μ. MT118

Επιβλέπων: Χρήστος Νικολόπουλος

Χανιά, 18/4/2024

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΜΕΣΟΓΕΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

Σύγκριση Αλγορίθμων για τον Χαρακτηρισμό Σιδηρομαγνητικών Καταλυτικών Νανοσωματιδίων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΙΔΑΚΗΣ
Α.Μ. ΜΤ118

Επιβλέπων: Χρήστος Νικολόπουλος, Επ. Καθηγητής Ελ.Με.Πα.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18.05.2024

.....	.....	.....
Χρήστος Νικολόπουλος	Ιωάννης Βαρδιάμπασης	Ανάργυρος Μπακλέζος
Επ. Καθηγητής Ελ.Με.Πα.	Καθηγητής Ελ.Με.Πα.	Επ. Καθηγητής Ελ.Με.Πα.

Χανιά, 18/4/2024

……
ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΙΔΑΚΗΣ
Διπλωματούχος Ηλεκτρονικός Μηχανικός Ελ.Με.Πα

Copyright © **ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ ΣΠΥΡΙΔΑΚΗΣ**,2024
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Ελληνικού Μεσογειακού Πανεπιστημίου.

Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ....8
Αναφορά....8
ABSTRACT....8
Acknowledgement....8
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ....9
2. ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ MAGNECAT....10
2.1 Επισκόπηση της μαγνητικής κατάλυσης και η σημασίας της....10
2.2 Αντίκτυπο στην βιομηχανία και την επιστήμη....12
2.3 Συμβατικές πειραματικές προσεγγίσεις....12
2.4 Διεπιστημονική προσέγγιση....13
2.5 Το εύρος των υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν....14
2.6 Συμπληρωματικές τεχνικές χαρακτηρισμού....15
3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ....19
3.1 Χαρακτηρισμός φάσης καταλύτη με την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης....19
3.2 Πειραματική Διάταξη και μοντελοποίηση με πρότυπες πηγές....19
3.3 Τεχνικές μέτρησης μαγνητικών πεδίων....21
3.4 Ανάπτυξη μηχανικών υποσυστημάτων....23
4. NATURE INSPIRED ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ....27
4.1 Εισαγωγή στους nature inspired αλγορίθμους....27
4.2 Ανεπτυγμένοι αλγόριθμοι....29
4.3 Περαιτέρω επιλογές για την ανάπτυξη των αλγορίθμων στο μέλλον....55
5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ....57
6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ....63

Ευρετήριο Σχημάτων

Σχήμα 2-1 : Διάφορα setup για την μέτρηση των μαγνητικών πεδίων....10
Σχήμα 2-2 : Πηνία Helmholtz για μαγνήτιση- αριστερά. Αρχικός σχεδιασμός για ατμοσφαιρική πίεση, βασισμένος σε αντιδραστήρα χαλαζία συμπεριλαμβανομένου ενός συστήματος θέρμανσης και ενός δείκτη θερμοκρασίας- δεξιά. Ο αντιδραστήρας θα ενσωματωθεί στο ομογενές μαγνητικό πεδίο των πηνίων Helmholtz με αισθητήρες στο χείλος....17
Σχήμα 2-3 : Ελάχιστη ανιχνεύσιμη μάζα δείγματος από τους αισθητήρες fluxgate- αριστερά. Μελέτη που αφορά την τοποθέτηση μαγνητόμετρων στο εσωτερικό του πηνίου Helmholtz για την αποφυγή κορεσμού για μάζα δείγματος 1 gr- δεξιά....17
Σχήμα 2-4 : Διαμόρφωση δύο μαγνητόμετρων fluxgate στα πηνία Helmholtz, όπου το φιαλίδιο του δείγματος βρίσκεται στο κέντρο.; αριστερά. Υπολειπόμενη μαγνήτιση σε NP κοβαλτίου με επικάλυψη άνθρακα στο εσωτερικό του φιαλιδίου.; δεξιά....18
Σχήμα 3-1. Διατύπωση του προβλήματος χαρακτηρισμού της πηγής μαγνητικού διπόλου σε σχεδιο....19
Σχήμα 3-2. Πρότυπη μετρητική διάταξη τυπωμένη σε 3D εκτυπωτή για την επαλήθευση της μεθοδολογίας χαρακτηρισμού με πρότυπους μαγνήτες νεοδυμίου....23
Σχήμα 3-3. Η μετρητική διάταξη με προσαρμοσμένα τα μαγνητόμετρα τύπου πύλης-ροής της Bartington MAG-690....24
Σχήμα 3-4. Αποτύπωση του συνόλου του εξοπλισμού για την υλοποίηση της μέτρησης, DAQ, τροφοδοτικά και καλωδιώσεις....25
Σχήμα 3-5. Αποτύπωση της μέτρησης στο εργαστήριο....26
Σχήμα 4-1 : Flowchart του Grey Wolf Optimizer....29
Σχήμα 4-2 : Flowchart του Whale Optimization Algorithm....30
Σχήμα 4-3 : Flowchart του Ant Lion Optimizer....31
Σχήμα 4-4 : Flowchart του Moth Flame Optimizer....32

Σχήμα 4-5: Flowchart του αλγορίθμου Dragonfly. 33
Σχήμα 4-6 : Το flowchart του Grasshopper Optimization Algorithm. 34
Σχήμα 4-7 : Το flowchart του Multi-Verse Optimizer. 35
Σχήμα 4-8 : Το flowchart του αλγορίθμου Sine Cosine Algorithm. 36
Σχήμα 4-9 : Το flowchart του Salp Swarm Algorithm. 37
Σχήμα 4-10 : Το flowchart του αλγόριθμου Equilibrium Optimizer 38
Σχήμα 4-11 : Το flowchart του Marine Predator Algorithm. 39
Σχήμα 4-12: Το flowchart του αλγόριθμου βελτιστοποίησης διαλυτότητας αερίου Henry. 40
Σχήμα 4-13 : Το flowchart του αλγόριθμου αριθμητικής βελτιστοποίησης. 41
Σχήμα 4-14: Το flowchart του αλγόριθμου Generalized Normal Distribution Optimization. 42
Σχήμα 4-15 : Το flowgraph του Flow Direction Algorithm. 43
Σχήμα 4-16 : Το flowchart του African vultures optimization algorithm. 44
Σχήμα 4-17 : Το flowchart του Artificial gorilla troops optimizer. 45
Σχήμα 4-18 : Το flowchart του Artificial Hummingbird Algorithm. 46
Σχήμα 4-19 : Το flowchart του Cheetah Optimizer. 47
Σχήμα 4-20 : Το flowchart του Mountain Gazelle Optimizer. 48
Σχήμα 4-21 : Το flowchart του Geometric Mean Optimizer. 49
Σχήμα 4-22 : Το flowchart του αλγόριθμου βελτιστοποίησης καραβίδας. 50
Σχήμα 4-23 : Το flowchart του αλγόριθμου Particle Swarm Optimization. 51
Σχήμα 4-24 : Το flowchart του αλγόριθμου βελτιστοποίησης Ant Colony Optimization. 52
Σχήμα 4-25 : Το flowchart του Genetic Algorithm. 53
Σχήμα 4-26 : Το flowchart του Hill climbing. 53
Σχήμα 4-27 : Το flowchart του αλγορίθμου differential evolution. 54

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η σύνθεση, ο χαρακτηρισμός και η μελέτη της ετερογενούς κατάλυσης συγκεντρώνει σημαντικό ενδιαφέρον τα τελευταία χρόνια λόγω της ευρείας χρήσης της σε διάφορους τομείς της βιομηχανίας. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μια νέα προσέγγιση για τη μελέτη της φάσης της κατάλυσης μέσω της μέτρησης της παραμένουσας μαγνήτισης των σιδηρομαγνητικών καταλυτικών νανοσωματιδίων με χρήση μαγνητόμετρων τύπου πύλης ροής. Πιο συγκεκριμένα μελετάται η χρήση αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη φύση για τη μεταγενέστερη επεξεργασία των δεδομένων των μετρήσεων της παραμένουσας μαγνήτισης των καταλυτικών υλικών και την επίλυση αντίστροφων ηλεκτρομαγνητικών προβλημάτων με σκοπό την ορθή αντιστοίχισή τους με ισοδύναμες πηγές ακτινοβολίας. Αναπτύσσεται πρότυπη πειραματική διάταξη με σκοπό την βέλτιστη αντιστοίχιση του καταλύτη με ένα μαγνητικό δίπολο. Ιδιαίτερη έμφαση γίνεται στην παρουσίαση και σύγκρισή διάφορων αλγορίθμων με σκοπό την βέλτιστη αντιστοίχιση του καταλύτη τόσο ως προς την τιμή της παραμένουσας μαγνήτισης και με αυτό τον τρόπο τον έμμεσο χαρακτηρισμό της εναπομείνασας δραστικότητας του καταλύτη, όσο και τον καθορισμό χωροταξικά των ενεργών νανοσωματιδίων. Τέλος, παρουσιάζονται συγκριτικά αποτελέσματα για την επίδοση των εν λόγω αλγορίθμων.

Αναφορά

Η παρούσα διπλωματική εργασία υλοποιήθηκε στο πλαίσιο του ερευνητικού έργου με τίτλο «**Modeling Catalytic Nanoparticles via Magnetic Measurements & Machine Learning Techniques**» που υλοποιείται στο πλαίσιο της δράσης του ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ. «Χρηματοδότηση της Βασικής Έρευνας (Οριζόντια υποστήριξη όλων των Επιστημών)» του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας «Ελλάδα 2.0» με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης – NextGenerationEU (Αριθμός Έργου ΕΛ.ΙΔ.Ε.Κ.: 14993)

ABSTRACT

The synthesis, characterization and study of heterogeneous catalysis has attracted considerable interest in recent years due to its widespread use in various fields. In this paper, a new approach to study the catalysis phase by measuring the residual magnetization of ferromagnetic catalytic nanoparticles using flow gate type magnetometers is presented. More specifically, the use of nature-inspired algorithms is studied for the post-processing of the data from the measurements of the residual magnetization of the catalytic materials and the solution of inverse electromagnetic problems in order to correctly match them with equivalent radiation sources. A model experimental setup is developed with the aim of optimally matching the catalyst with a magnetic dipole . Particular emphasis is placed on the presentation and comparison of various algorithms with the aim of optimally matching the catalyst both in terms of the value of the remanent magnetization and spatial determination of the active nanoparticles. Finally, comparative results are presented on the performance of these algorithms.

Acknowledgement

The present diploma thesis has been conducted under the research project entitled: “**Modeling Catalytic Nanoparticles via Magnetic Measurements & Machine Learning Techniques**” is implemented in the framework of H.F.R.I call “Basic research Financing (Horizontal support of all Sciences)” under the National Recovery and Resilience Plan “Greece 2.0” funded by the European Union – NextGenerationEU (H.F.R.I. Project Number: 14993).

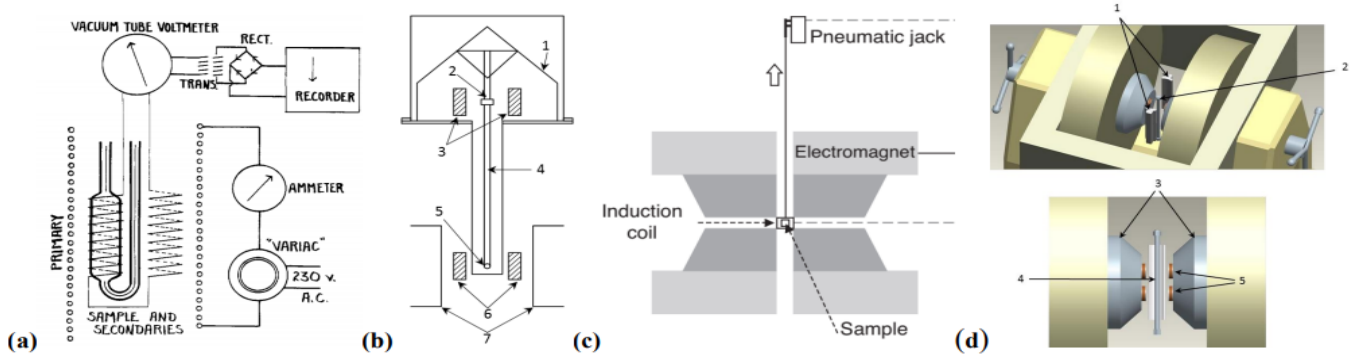
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κατάλυση, είναι ένα φαινόμενο που αυξάνει τον ρυθμό των αντιδράσεων και έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον λόγω του δυνητικού της αντίκτυπου σε διάφορες βιομηχανίες. Η ακριβής μέτρηση των μαγνητικών πεδίων των καταλυτών σε εργαστηριακή κλίμακα αποτελεί επιτακτική ανάγκη για την μελέτη και κατανόηση της πολυπλοκότητας αυτού του φαινομένου με σκοπό την ανάπτυξη αποτελεσματικών εφαρμογών. Η επίτευξη αυτής της ακρίβειας απαιτεί όχι μόνο σχολαστικές πειραματικές διατάξεις αλλά και την ενσωμάτωση καινοτόμων μεθοδολογιών, συμπεριλαμβανομένων αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη φύση και αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης, για τον ακριβή προσδιορισμό της μαγνητικής ροπής και της θέσης της μαγνητικής πηγής. Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να εμβαθύνει στην περίπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ της κατάλυσης, των μαγνητικών πεδίων και των πειραματικών μεθοδολογιών, των εφαρμογών και των πρόσφατων εξελίξεων. Με τη διερεύνηση των υποκείμενων αρχών που διέπουν τη κατάλυση, οι ερευνητές μπορούν να ξεκλειδώσουν νέες δυνατότητες για την επιτήρηση και έλεγχο των χημικών αντιδράσεων και τη βελτιστοποίηση των βιομηχανικών διεργασιών. Ωστόσο, οι προσπάθειες αυτές απαιτούν ακριβείς μετρήσεις των μαγνητικών πεδίων, οι οποίες μπορεί να είναι δύσκολο να επιτευχθούν στο πεδίο. Για να αντιμετωπίσουν αυτή την πρόκληση, οι ερευνητές έχουν στραφεί σε καινοτόμα μαγνητόμετρα και αλγορίθμους που αντλούν έμπνευση από τη φύση. Οι αλγόριθμοι εμπνευσμένοι από τη φύση, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι και η νοημοσύνη σμήνους, μιμούνται τα φυσικά φαινόμενα για τον υπολογισμό διαφόρων παραμέτρων ενός μαθηματικού προβλήματος, στην περίπτωσή μας, της μαγνητικής ροπής και της θέσης των καταλυτών μέσα από μετρήσεις και την εύρεση αντίστροφων μαθηματικών συναρτήσεων των εξισώσεων του μαγνητικού πεδίου του καταλύτη.

2. ΑΝΑΣΚΟΠΙΣΗ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΙΚΗΣ ΚΑΤΑΛΥΣΗΣ ΚΑΙ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ MAGNECAT

2.1 Επισκόπηση της μαγνητικής κατάλυσης και η σημασίας της

Οι καταλυτικές διεργασίες αποτελούν τη ραχοκοκαλιά του σύγχρονου πολιτισμού, διευκολύνοντας βασικές αντιδράσεις από τη διατήρηση της ζωής στους μικροοργανισμούς έως την προώθηση βιομηχανικών μετατροπών κλίμακας μεγατόνων. Η ετερογενής κατάλυση, ιδίως με τη βοήθεια νανοσωματιδίων (ΝΣ), διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στην παραγωγή διαφόρων χημικών προϊόντων, καθώς περίπου το 85% των βιομηχανικών χημικών προϊόντων υφίσταται καταλυτικές διεργασίες, το 80% των οποίων περιλαμβάνει στερεούς καταλύτες. Μεταξύ αυτών, η κατάλυση από σιδηρομαγνητικά ΝΣ έχει ιδιαίτερη σημασία, καταλύοντας κρίσιμες αντιδράσεις όπως η σύνθεση αμμωνίας για την παραγωγή λιπασμάτων, η παραγωγή υδρογόνου ως μελλοντικού φορέα ενέργειας και η διάσπαση ρύπων τόσο από κινητές (οχήματα) όσο και από άλλες σταθερές πηγές. Καθώς η κοινωνία παλεύει με την επιτακτική στροφή προς τη βιώσιμη, μη ορυκτών καυσίμων ενέργεια και τις χημικές βιομηχανίες για τον μετριασμό των κλιματικών επιπτώσεων, η ανάγκη για καινοτόμες ανακαλύψεις και πιο αποτελεσματικές διεργασίες εντείνεται. Η κατάλυση αποτελεί βασική τεχνολογία για την επίτευξη αυτού του στόχου, οδηγώντας την πρόοδο σε μεγάλους ρυθμούς και προωθώντας μας προς ένα μέλλον βιώσιμης προόδου και ευημερίας.



Σχήμα 2-1 : Διάφορα setup για την μέτρηση των μαγνητικών πεδίων.

Η εξέλιξη των μαγνητικών μετρήσεων στην κατάλυση, ξεκινά από την πρωτοποριακή εργασία του P. W. Selwood στο Πανεπιστήμιο Northwestern στα μέσα του 20ού αιώνα. Ο ορισμός του για τη μαγνητοχημεία ως τη χρήση μαγνητικών μεγεθών για την επίλυση χημικών προβλημάτων έθεσε τις βάσεις για την περαιτέρω εξερεύνηση αυτού του τομέα. Οι σχέσεις μαγνητισμού και χημικών δεσμών είναι οι πρώτες πραγματικές in situ προσεγγίσεις μαγνητικών μετρήσεων σε κατάλυση. (Σχημα 2-1 a) Στο Γραφείο Μεταλλείων, αναπτύχθηκε ανεξάρτητα ένας μαγνητικός ζυγός εκκρεμούς τύπου Mathieu για την παρακολούθηση των αλλαγών φάσης του σιδήρου, αποδεικνύοντας τις πρώτες εφαρμογές των μαγνητικών τεχνικών στην ανάλυση υλικών. Στη συνέχεια, οι ερευνητές του Centre national de la recherche scientifique (CNRS) ανέπτυξαν μια διάταξη μέτρησης ειδικά για τη μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων σε καταλυτικά συστήματα υπό ήπιες συνθήκες. Αυτό πιθανότατα αντιπροσώπευε μια σημαντική πρόοδο, επιτρέποντας πιο πολλές έρευνες σε καταλυτικές διεργασίες. Η εισαγωγή διαμορφώσεων μαγνητόμετρου δονούμενου δείγματος (VSM) διεύρυνε περαιτέρω τις δυνατότητες των μαγνητικών μελετών στην κατάλυση. (Σχημα 2-1 c) Η χρήση ακουστικών ταλαντώσεων στα όργανα VSM αντιπροσώπευε μια άλλη καινοτόμο προσέγγιση, προσφέροντας ενδεχομένως πλεονεκτήματα στην ευαισθησία ή στις πειραματικές συνθήκες. (Σχημα 2-1 b) Τα τελευταία χρόνια, ένας παρόμοιος σχεδιασμός VSM κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από ακαδημαϊκούς του Τμήματος Χημικών Μηχανικών του

Πανεπιστημίου του Κέιπ Τάουν, σε συνεργασία με επιστήμονες της Sasol R&T. (Σχημα 2-1 d) Αυτό αναδεικνύει τις συνεχιζόμενες προσπάθειες βελτιστοποίησης των τεχνικών μαγνητικών μετρήσεων για τη μελέτη καταλυτικών συστημάτων, γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε περαιτέρω γνώσεις και εξελίξεις στον τομέα.[1-6]

Το κείμενο παρακάτω θα εξετάσει τους περιορισμούς των παραδοσιακών διατάξεων VSM (μαγνητόμετρο δονούμενου δείγματος) στις μαγνητικές μετρήσεις και θα προτείνει την ανάπτυξη μιας συμπαγούς, οικονομικά συμφέρουσας διάταξης που βασίζεται στη σύγχρονη τεχνολογία αισθητήρων για χρήση σε καταλυτικούς αντιδραστήρες. Οι παραδοσιακές διατάξεις VSM βασίζονται σε ξεπερασμένες αρχές μέτρησης και συχνά περιλαμβάνουν ογκώδεις ηλεκτρομαγνήτες και πολύπλοκες τεχνικές, οδηγώντας σε περιορισμούς όπως η χαμηλή ευαισθησία, η χαμηλή χρονική ανάλυση και η αδυναμία επίλυσης χωρικών πληροφοριών. Για την αντιμετώπιση αυτών των μειονεκτημάτων, η παρούσα εργασία προτείνει τη χρήση νέων τεχνολογιών αισθητήρων, όπως αισθητήρες που βασίζονται σε πηνία, οπτικοί αισθητήρες και ατομική μαγνητομετρία, οι οποίες προσφέρουν βελτιωμένη ευαισθησία και χωρική ανάλυση του δείγματος του καταλύτη. Στόχος είναι η χρήση μιας συμπαγούς και απλουστευμένης διάταξης που μπορεί να μετρήσει με ακρίβεια τις χωροχρονικές μεταβολές που σχετίζονται με τη χημική κατάσταση των νανοσωματιδίων (ΝΣ) εντός καταλυτικών αντιδραστήρων. Αυτό περιλαμβάνει τη διερεύνηση σύγχρονων τεχνικών μαγνητομετρίας, συμπεριλαμβανομένων των αισθητήρων πύλης ροής (fluxgate), μαγνητικής επαγωγής και μαγνητο-οπτικών αισθητήρων, μαζί με προηγμένες μεθόδους επεξεργασίας σήματος. [7-16]

Στόχος είναι να αξιοποιηθούν οι εξελίξεις στους υπερευαίσθητους μαγνητικούς αισθητήρες, στην επεξεργασία σήματος, στις τεχνικές μηχανικής μάθησης και στον χαρακτηρισμό καταλυτών operando για την ανάπτυξη μιας απλοποιημένης και ευέλικτης σειράς διατάξεων μαγνητόμετρων. Αυτά τα μαγνητόμετρα θα επιτρέψουν την παρακολούθηση των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από λειτουργικά καταλυτικά υλικά υπό τις συνθήκες λειτουργίας τους, χωρίς να μεταβάλλεται η ροή των αερίων αντός του αντιδραστήρα. Ως απόδειξη της ιδέας , θα αναπτυχθεί μια ολοκληρωμένη διάταξη που μοιάζει με τυπικό χημικό αντιδραστήρα plug flow. Η διάταξη αυτή θα περιλαμβάνει συστοιχίες μαγνητόμετρων με πηνία για τη μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων ενός καταλυτικού υλικού κατά τη λειτουργία του. Στη συνέχεια, το σύστημα θα δοκιμαστεί υπό βιομηχανικά συναφείς συνθήκες για να επικυρωθεί η αποτελεσματικότητά του. Η προτεινόμενη λύση αυτής της εργασίας έχει ως στόχο να είναι ο προπομπός (η απόδειξη της βασικής ιδέας) μιας ευέλικτης, οικονομικά αποδοτικής και φορητής λύσης, επιτρέποντας την πρακτική εφαρμογή της σε διάφορες βιομηχανικές συνθήκες. Επιτρέποντας την παρακολούθηση των μαγνητικών ιδιοτήτων σε πραγματικό χρόνο κατά τη διάρκεια καταλυτικών διεργασιών, η προσέγγιση αυτή θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την κατανόηση των καταλυτικών μηχανισμών και να διευκολύνει τη βελτιστοποίηση της απόδοσης των καταλυτικών αντιδραστήρων.

2.2 Αντίκτυπο στην βιομηχανία και την επιστήμη

Αυτή η εργασία έχει ως στόχο να προωθήσει την κατανόηση του μαγνητισμού και της χημείας σε νανοφάσεις που εμπλέκονται σε αλληλεπιδράσεις αερίου-στερεού υπό βιομηχανικές συνθήκες. Εφαρμόζοντας τον χαρακτηρισμό ακτινών-Χ συγχρότρου παράλληλα με τη μαγνητομετρία, η βασική ιδέα επιδιώκει να συγκρίνει και να αντιπαραβάλει ώριμες μεθοδολογίες ακτινών-Χ με λιγότερο διερευνημένες μαγνητοχημικές καταλυτικές ιδιότητες και ποιο συγκεκριμένα το λογισμικό για την επεξεργασία των δεδομένων. Στόχος την βασικής ιδέας είναι να επανεξεταστούν και να αξιολογηθούν τρεις αρχές μαγνητομέτρησης για πρώτη φορά ως προς την καταλληλόλητά τους στη βιομηχανική καταλυτική χημεία. Αν και η προσέγγιση στοχεύει αρχικά σε αντιδραστήρες ροής με βύσματα, η μαγνητομετρία είναι εφαρμόσιμη σε διάφορους τύπους αντιδραστήρων, εφόσον η μάζα και η απόσταση του μαγνητικού υλικού επιτρέπουν την ανίχνευση.

Η κατάλυση με σιδηρομαγνητικά νανοσωματίδια (ΝΣ) υπόσχεται σημαντικές προοπτικές για διάφορες εφαρμογές, ιδίως στη διαμόρφωση καυσίμων, καθώς και στη διάσπαση των ρύπων. Η επιτάχυνση των ανακαλύψεων στην επιστήμη της κατάλυσης μπορεί να έχει άμεσο αντίκτυπο στη διατήρηση και παραγωγή ενέργειας (ευθυγραμμισμένη με τον στόχο 7 του ΟΗΕ για τη βιώσιμη ανάπτυξη) και στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (ευθυγραμμισμένη με τον στόχο 13 του ΟΗΕ για τη βιώσιμη ανάπτυξη). Σημειώνεται ότι ο κλάδος χρησιμοποιεί την τεχνολογία νανοσωματιδίων μαγνητικού σιδήρου για τον καθαρισμό του νερού και πρόσφατα για τη δοκιμή COVID-19. [19]

Αρκετές σημαντικές διεργασίες βασίζονται σε σιδηρομαγνητικά ΝΣ :

- *Παραγωγή υδρογόνου (H2)*: H2 είναι ένα βασικό μόριο που αναμένεται να διαδραματίσει σημαντικό ρόλο ως φορέας ενέργειας και αντιδραστήριο για τις αντιδράσεις υδρογόνωσης. Η κατάλυση με σιδηρομαγνητικά ΝΣ θα μπορούσε να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των διεργασιών παραγωγής H2.
- *Σύνθεση αμμωνίας*: Η αμμωνία αποτελεί κρίσιμη πρώτη ύλη για την παραγωγή νιτρικού οξέος, το οποίο είναι απαραίτητο για την παραγωγή λιπασμάτων. Η απόδοση των ΝΣ σιδήρου (Fe) με σιδηρομαγνητισμό στην κατάλυση της σύνθεσης αμμωνίας επηρεάζει άμεσα την ανθρώπινη τροφική αλυσίδα, επηρεάζοντας τη διαθεσιμότητα λιπασμάτων και τη γεωργική παραγωγικότητα.
- *Παραγωγή υπερκαθαρού καυσίμου αεριωθουμένων*: Η υδρογόνωση CO σε καταλύτες κοβαλτίου (Co) υπόσχεται την παραγωγή υπερκαθαρού καυσίμου αεριωθούμενων αεροσκαφών. Η διαδικασία αυτή θα μπορούσε να συμβάλει στην ανάπτυξη βιώσιμων αεροπορικών καυσίμων από απόβλητα ή ανανεώσιμες πρώτες ύλες που περιέχουν άνθρακα, μειώνοντας έτσι το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των αεροπορικών ταξιδιών.

2.3 Συμβατικές πειραματικές προσεγγίσεις

Οι συμβατικές πειραματικές προσεγγίσεις της μηχανικής χημικών αντιδράσεων χρησιμοποιούνται εδώ και πολύ καιρό για την κατανόηση των καταλυτικών λειτουργιών από την άποψη της κινητικής των αντιδράσεων μέσω της αξιολόγησης των ροών προϊόντων από χημικούς αντιδραστήρες. Τις τελευταίες δεκαετίες έχουν εμφανιστεί πειραματικές προσεγγίσεις Operando, οι οποίες χρησιμοποιούν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και νετρόνια για τη μελέτη υλικών υπό συνθήκες λειτουργίας. Ωστόσο, αυτές οι τεχνικές, εκτός από τις ακτινοβολίες υψηλής διείσδυσης, όπως οι ακτίνες Χ υψηλής ενέργειας, οι ακτίνες γ και τα νετρόνια, απαιτούν προσαρμοσμένους αντιδραστήρες, οι οποίοι μπορούν να θέσουν σε

κίνδυνο την κινητική των αντιδράσεων. Ως αποτέλεσμα, συχνά απαιτούνται συμπληρωματικές συμβατικές κινητικές μελέτες χημικών αντιδράσεων. Δυστυχώς, οι εγκαταστάσεις ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας όπου μπορούν να διεξαχθούν τέτοια πειράματα δεν είναι εύκολα προσβάσιμες σε όλους τους ερευνητές και υπάρχουν ανησυχίες για την υγεία και την ασφάλεια που σχετίζονται με τη χρήση τους. Ο μαγνητισμός προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση, καθώς επιτρέπει την απομακρυσμένη ανίχνευση και μπορεί να γίνει με ασφάλεια. Ωστόσο, οι τρέχουσες μαγνητικές προσεγγίσεις operando περιλαμβάνουν συνήθως ογκώδη συστήματα με κινούμενα μέρη, όπως οι διατάξεις VSM, οι οποίες μπορεί να στερούνται υψηλών συχνοτήτων μέτρησης και χωρικής ανάλυσης. [20]

Ως εκ τούτου, προκύπτουν διάφορα ερευνητικά ερωτήματα:

- Μπορούμε να αναπτύξουμε ένα συμπαγές σύστημα ικανό να παρακολουθεί μικρά μαγνητικά πεδία που παράγονται από λειτουργικά νανοϋλικά, και αν ναι, τι συμβιβασμοί είναι απαραίτητοι?

- Ποια είναι τα όρια των εντάσεων πεδίου που μπορούν να μετρηθούν και υπό ποιες συνθήκες?

- Είναι εφικτή η ενσωμάτωση σε υφιστάμενες διαμορφώσεις αντιδραστήρων σε κλίμακα πάγκου?

- Πώς συσχετίζονται οι πληροφορίες που λαμβάνονται για το μαγνητικό πεδίο με τις φυσικές ιδιότητες του υλικού?

Η αντιμετώπιση αυτών των ερωτημάτων θα μπορούσε να οδηγήσει στην ανάπτυξη πιο προσιτών και αποτελεσματικών μεθόδων για τη μελέτη καταλυτικών διεργασιών σε πραγματικό χρόνο, προωθώντας τελικά την κατανόηση της κινητικής των αντιδράσεων και των καταλυτικών λειτουργιών.

2.4 Διεπιστημονική προσέγγιση

Η βασική ερευνητική ιδέα απαιτεί μια διεπιστημονική προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει τη συνεργασία μεταξύ των κλάδων της μηχανικής για την αντιμετώπιση διαφόρων συνιστωσών:

- *Σύνθεση και φυσική χημεία σιδηρομαγνητικών λειτουργικών ΝΣ (μηχανική της κατάλυσης)*: Αυτή η πτυχή επικεντρώνεται στην κατανόηση της σύνθεσης και της φυσικής χημείας των σιδηρομαγνητικών νανοσωματιδίων, ιδίως στο πλαίσιο καταλυτικών εφαρμογών.

- *Σχεδιασμός πειραμάτων κινητικής αντίδρασης (Χημική μηχανική)*: Οι χημικοί μηχανικοί θα είναι υπεύθυνοι για το σχεδιασμό πειραμάτων για τη μελέτη της κινητικής των αντιδράσεων, διασφαλίζοντας ότι η πειραματική διάταξη είναι κατάλληλη για την αξιολόγηση των καταλυτικών λειτουργιών υπό διαφορετικές συνθήκες.

- *Αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με την ύλη (Επιστήμη και φυσική των υλικών)*: Οι φυσικοί και οι επιστήμονες υλικών θα διερευνήσουν τον τρόπο με τον οποίο η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αλληλοεπιδρά με τα υλικά, συμπεριλαμβανομένων των σιδηρομαγνητικών νανοσωματιδίων, για να συγκεντρώσουν γνώσεις σχετικά με τη συμπεριφορά και τις ιδιότητές τους.

- *Αλληλεπίδραση ηλεκτρισμού και μαγνητισμού (Ηλεκτρολόγος μηχανικός)*: Οι ηλεκτρολόγοι μηχανικοί θα διερευνήσουν τη σχέση μεταξύ ηλεκτρισμού και μαγνητισμού, ιδίως στο πλαίσιο της παραγωγής και του ελέγχου μαγνητικών πεδίων για πειραματικούς σκοπούς.

- *Τεχνολογία αισθητήρων και απόκτηση και ανάλυση δεδομένων (Ηλεκτρονικός μηχανικός)*: Οι ηλεκτρονικοί μηχανικοί θα αναπτύξουν τεχνολογία αισθητήρων και συστήματα απόκτησης δεδομένων για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων και την ανάλυση των δεδομένων που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια πειραμάτων.

Προφανώς η εργασία αυτή εστιάζει στην τεχνολογία των αισθητήρων και την απόκτηση και ανάλυση των δεδομένων στα πλαίσια της εργασίας ενός ηλεκτρονικού μηχανικού.

Η βασική πειραματική ανάπτυξη σε κλίμακα εργαστηρίου θα μπορούσε να περιλαμβάνει την εξέταση τριών σταδιακών προσεγγίσεων από την άποψη της απλότητας και της συμπαγούς λειτουργίας:

- *Ενσωμάτωση μαγνητικών αρχών με βάση αισθητήρες σε έναν τροποποιημένο γυάλινο αντιδραστήρα*: Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει την ενσωμάτωση μεθόδων μαγνητικής ανίχνευσης με βάση πηνία, όπως διαμορφώσεις fluxgate, σε έναν γυάλινο αντιδραστήρα για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων. Η διάταξη αυτή θα καλύπτει χαμηλές εντάσεις πεδίου.

- *Αξιοποίηση των μαγνητικών πεδίων από τη γη και τους μόνιμους μαγνήτες νεοδυμίου*: Θα διερευνηθούν διάφορες μέθοδοι παραγωγής μαγνητικών πεδίων, συμπεριλαμβανομένης της αξιοποίησης του μαγνητικού πεδίου της γης και της χρήσης μόνιμων μαγνητών Νεοδυμίου. Αυτές οι μέθοδοι θα προσφέρουν διαφορετικά επίπεδα ελέγχου της ισχύος του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου.

- *Αξιοποίηση ηλεκτρομαγνητών και πηνίων Helmholtz*: Αυτή η προσέγγιση περιλαμβάνει τη χρήση ηλεκτρομαγνητών και πηνίων Helmholtz για τη δημιουργία μαγνητικών πεδίων υψηλότερης έντασης, προσφέροντας πλήρη έλεγχο του εφαρμοζόμενου μαγνητικού πεδίου. Ωστόσο, αυτές οι διατάξεις μπορεί να είναι πιο ογκώδεις σε σύγκριση με τις προηγούμενες προσεγγίσεις.

Με τη διερεύνηση αυτών των προσεγγίσεων, η ερευνητική ιδέα αποσκοπεί στην ανάπτυξη συμπαγών και αποτελεσματικών συστημάτων για την παρακολούθηση των μαγνητικών πεδίων που παράγονται από λειτουργικά νανοϋλικά, προωθώντας έτσι την κατανόηση των καταλυτικών διεργασιών.

2.5 Το εύρος των υλικών που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν

Τα υλικά που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν θα αποτελούνται από νανοσωματίδια (ΝΣ) που παρασκευάζονται με τη χρήση υφιστάμενων συνταγών. Συγκεκριμένα, το κοβάλτιο (Co) θα εμποτιστεί πάνω σε οξείδιο του αλουμινίου (Al2O3) μέσω αδρανούς υγρού εμποτισμού, με αποτέλεσμα καταλύτες με διαφορετικές κατανομές μεγέθους σωματιδίων που κυμαίνονται κατά μέσο όρο μεταξύ 3 και 20 nm. Αυτά τα υλικά με βάση το Co θα χρησιμεύσουν ως υλικά αναφοράς καθ' όλη τη διάρκεια της εργασίας. Τα υλικά με βάση το κοβάλτιο και το Co επιλέγονται για την ευπροσάρμοστη μαγνητική τους συμπεριφορά, η οποία περιλαμβάνει σιδηρομαγνητικές, υπερπαραμαγνητικές και αντισιδηρομαγνητικές ιδιότητες ανάλογα με τη φάση και το μέγεθος των νανοδομών. Το μεταλλικό κοβάλτιο έχει υψηλή θερμοκρασία

Curie (1130°C), γεγονός που το κάνει να παρουσιάζει σιδηρομαγνητική συμπεριφορά σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών. Η ιδιότητα αυτή επιτρέπει τη διεξαγωγή μαγνητικών μετρήσεων ακόμη και υπό ακραίες συνθήκες αντίδρασης. Το κοβάλτιο διαθέτει επίσης μια σχετικά υψηλή ειδική για τη μάζα μαγνήτιση κορεσμού 168 Am^2/kg, η οποία είναι επωφελής για τον μαγνητικό χαρακτηρισμό. Σε μεταγενέστερα στάδια της ερευνητικής ιδέας (τα οποία δεν περιλαμβάνονται σε αυτήν την εργασία), θα αξιολογηθούν καταλύτες με βάση το νικέλιο (Ni) ή το σίδηρο (Fe) για να καταδειχθεί η καθολικότητα της προσέγγισης σε διαφορετικά μεταλλικά συστήματα. Αυτό διευρύνει το πεδίο εφαρμογής της έρευνας και ενισχύει τη δυνατότητα εφαρμογής της σε ένα ευρύτερο φάσμα καταλυτικών υλικών και συστημάτων.[21]

Οι αντιδραστήρες σταθερής κλίνης (FBR) χρησιμοποιούνται συνήθως σε κινητικές μελέτες εργαστηριακής κλίμακας στη μηχανική αντιδράσεων λόγω της απλής κατασκευής και λειτουργίας τους. Ένα πλεονέκτημα των FBR είναι η γεωμετρία τους με βύσμα ροής, η οποία διασφαλίζει ότι όλα τα αέρια διέρχονται από την κλίνη καταλύτη, διατηρώντας την υδροδυναμική και επιτρέποντας την ακριβή μελέτη της κινητικής των εγγενών αντιδράσεων χωρίς συμβιβασμούς. Βάση της ερευνητικής ιδέας, θα μπορούσαν να αναπτυχθούν και να χρησιμοποιηθούν δύο σωληνοειδείς αντιδραστήρες σταθερής κλίνης: ο ένας με σχεδιασμό τύπου U και ο άλλος με ομόκεντρο σχεδιασμό. Αυτοί οι αντιδραστήρες θα κατασκευαστούν από χαλαζία (SiO2), ο οποίος δεν παρεμβαίνει μαγνητικά και μπορεί να αντέξει υψηλές θερμοκρασίες (έως <1000°C). Η ομόκεντρη γεωμετρία είναι ιδανική για την ενίσχυση των φαινομένων πόλωσης με τη βελτιστοποίηση του μήκους της οπτικής διαδρομής. Οι αρχικές αντιδράσεις που θα μελετηθούν θα περιλαμβάνουν ακολουθίες αναγωγής του H2 ακολουθούμενες από οξείδωση στον αέρα, οι οποίες είναι γνωστό ότι επηρεάζουν τη φάση των νανοσωματιδίων που υποστηρίζονται. Στη συνέχεια, σκοπός της ερευνητικής ιδέας είναι να διερευνήσει ρεαλιστικά προβλήματα απενεργοποίησης καταλυτών, όπως αλλαγές φάσης κατά την ενισχυμένη με απορρόφηση αναμόρφωση υδρογονανθράκων με ατμό για παραγωγή H2 ή υδρογόνωση CO, καθώς και αναδυόμενες διεργασίες μετατροπής CO2. Χρησιμοποιώντας αυτούς τους αντιδραστήρες σταθερής κλίνης και μελετώντας ένα εύρος αντιδράσεων, η ερευνητική πρόταση αποσκοπεί στην απόκτηση γνώσεων σχετικά με τη συμπεριφορά των νανοσωματιδίων με φορέα σε διαφορετικές συνθήκες, προωθώντας την κατανόηση των καταλυτικών διεργασιών και των μηχανισμών απενεργοποίησης του καταλύτη.[22]

2.6 Συμπληρωματικές τεχνικές χαρακτηρισμού

Συμπληρωματικές τεχνικές χαρακτηρισμού θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για να επιβεβαιώσουν και να επικυρώσουν τις νέες μαγνητικές μετρήσεις που προτείνονται στην ερευνητική ιδέα. Οι τεχνικές αυτές μπορούν να παράσχουν πρόσθετες πληροφορίες για τη μαγνητική ροπή, το μέγεθος και τη φάση των νανοϋλικών που μελετώνται.

- *Χημειοαπορρόφηση H2*: Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συνήθως για την αξιολόγηση της ενεργού επιφάνειας των μεταλλικών νανοσωματιδίων. Παρέχει πληροφορίες σχετικά με το μέσο επιφανειακό μέγεθος των νανοσωματιδίων.

- *Ηλεκτρονική μικροσκοπία διέλευσης (TEM)*: Η TEM είναι μια ισχυρή τεχνική που παρέχει λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τα νανοσωματιδία. Με την ανάλυση πολλαπλών εικόνων TEM, μπορεί να προσδιοριστεί η κατανομή μεγέθους των νανοσωματιδίων.

- *Δυναμικός χαρακτηρισμός*: Πρόκειται για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς των υλικών υπό δυναμικές συνθήκες. Αν και συγκεκριμένες δυναμικές τεχνικές δεν αναφέρονται στο κείμενο, θα

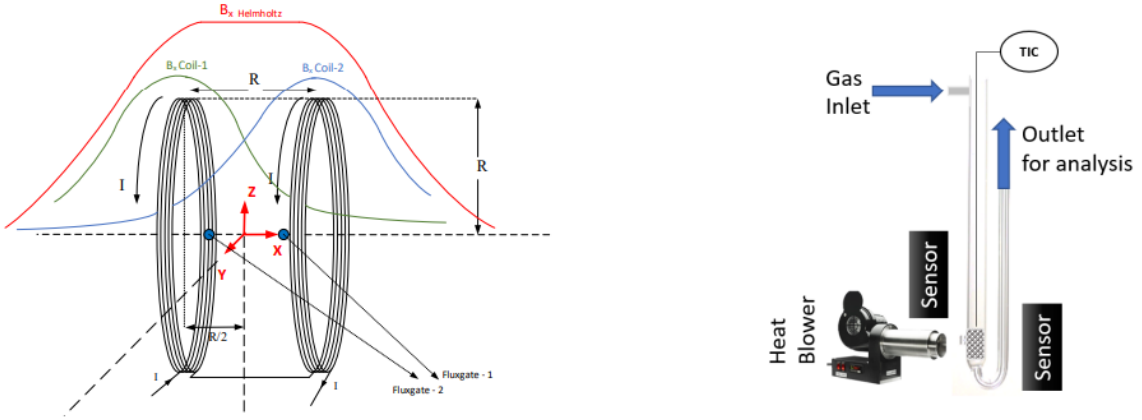
μπορούσαν να περιλαμβάνουν μεθόδους όπως η φασματοσκοπία in situ για την παρακολούθηση των μεταβολών των μαγνητικών ιδιοτήτων υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Επιπλέον, θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν μαγνητόμετρα SQUID για την επαλήθευση των τιμών μαγνήτισης υπολειπόμενου μαγνητισμού και κορεσμού που λαμβάνονται από την αναπτυχθείσα αρχιτεκτονική σε στατικές συνθήκες. Τα μαγνητόμετρα SQUID είναι εξαιρετικά ευαίσθητα όργανα ικανά να μετρούν εξαιρετικά μικρά μαγνητικά πεδία, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για την επικύρωση μαγνητικών μετρήσεων σε νανοϋλικά. Χρησιμοποιώντας έναν συνδυασμό αυτών των τεχνικών στατικού και δυναμικού χαρακτηρισμού, η ερευνητική ιδέα αποσκοπεί στη διασφάλιση της ακρίβειας και της αξιοπιστίας των μαγνητικών μετρήσεων και στην παροχή ολοκληρωμένων γνώσεων σχετικά με τις ιδιότητες των νανοϋλικών που μελετώνται.[17]

Είναι συναρπαστικό το πώς τα σημερινά μαγνητόμετρα μπορούν να επιτύχουν υψηλότερες αναλύσεις, επιτρέποντας τη λεπτομερή χαρτογράφηση των μαγνητικών πεδίων. Ανάλογα με τον τρόπο μέτρησης και την υποκείμενη αρχή του μαγνητόμετρου, καθίσταται δυνατή η χαρτογράφηση της κατανομής των μαγνητικών πεδίων. Για να εμβαθύνουμε στις τεχνικές πτυχές, μαγνητικά πεδία με συχνότητες έως 250 kHz αντιστοιχούν σε μήκη κύματος της τάξης των χιλιομέτρων. Ωστόσο, δεδομένου ότι οι μετρήσεις γίνονται συνήθως σε αποστάσεις εκατοστών, εφαρμόζεται η προσέγγιση του κοντινού πεδίου. Σε αυτό το πλαίσιο, η προσέγγιση κοντινού πεδίου επιτρέπει τον ακριβή χαρακτηρισμό των μαγνητικών ιδιοτήτων των νανοϋλικών που είναι κοντά στο μαγνητόμετρο. Η προσέγγιση αυτή είναι δικαιολογημένη, καθώς εστιάζει στις χωρικές λεπτομέρειες της κατανομής του μαγνητικού πεδίου γύρω από τα νανοϋλικά, επιτρέποντας τον ακριβή χαρακτηρισμό χωρίς την ανάγκη να εξεταστεί η πλήρης έκταση του μήκους κύματος του μαγνητικού πεδίου. Αξιοποιώντας την προσέγγιση του κοντινού πεδίου, οι ερευνητές μπορούν να μελετήσουν αποτελεσματικά τη μαγνητική συμπεριφορά των νανοϋλικών σε τοπικό επίπεδο, αποκτώντας πολύτιμες πληροφορίες για τις ιδιότητες και τις αλληλεπιδράσεις τους.

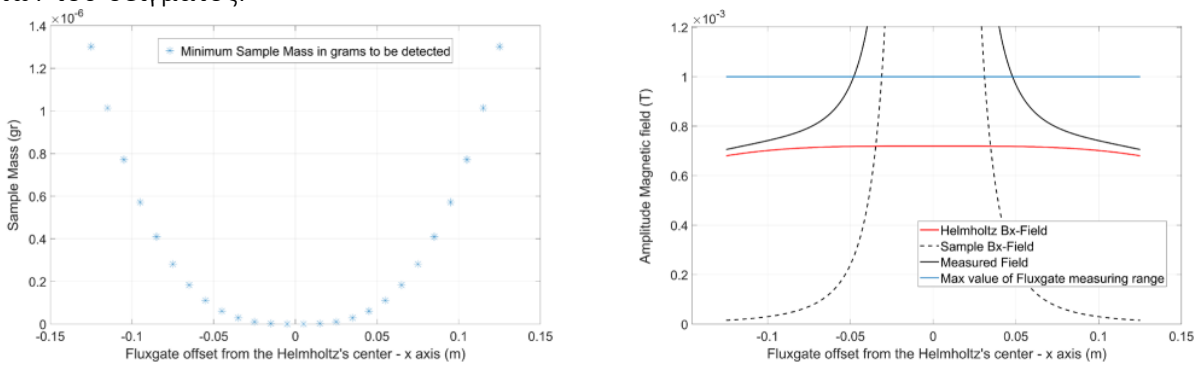
Η χρήση πηνίων Helmholtz για τη μαγνήτιση επιτρέπει τη δημιουργία ομοιογενούς μαγνητικού πεδίου σε μια σχετικά μεγάλη περιοχή, διευκολύνοντας την παρουσία εξοπλισμού μεγάλου μεγέθους. Τα μαγνητόμετρα fluxgate, που λειτουργούν σε βαθμωτή λειτουργία, τοποθετούνται εντός του πηνίου Helmholtz κατά μήκος του άξονα x. Το δείγμα του καταλύτη τοποθετείται στο κέντρο του πηνίου Helmholtz, χρησιμεύοντας ως σημείο αναφοράς για το σύστημα συντεταγμένων. Με την ευθυγράμμιση των μαγνητόμετρων κατά μήκος του άξονα x του Helmholtz, η πολυπλοκότητα του προβλήματος αντίστροφης σκέδασης μειώνεται σε έναν μόνο άξονα, απλοποιώντας τη διάταξη της μέτρησης. Το δείγμα τοποθετείται συμμετρικά μεταξύ δύο παράλληλων μαγνητόμετρων fluxgate με τους ευαίσθητους άξονές τους προσανατολισμένους κάθετα στο μαγνητικό πεδίο (άξονας x).Όταν εφαρμόζεται ένα εξωτερικό πεδίο , οι μαγνητικές ροπές των νανοσωματιδίων αρχίζουν να ευθυγραμμίζονται με το εξωτερικό πεδίο και εκπέμπουν με την σειρά τους ένα μαγνητικό πεδίο (Bs). Η μέτρηση της μαγνητικής ροπής μιας ασθενούς μαγνητικής πηγής με τη χρήση μαγνητόμετρων fluxgate καθίσταται δυνατή μέσω αυτής της διάταξης, όπως αποδείχθηκε σε πρόσφατες μελέτες. Πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις για την αξιολόγηση των περιορισμών όσον αφορά την αξιολόγηση των μαγνητικών πεδίων που δημιουργούνται από ρεαλιστικές μάζες δειγμάτων. Η προτεινόμενη διάταξη μέτρησης περιλαμβάνει ένα τριαξονικό πηνίο Helmholtz (HC) και ένα τριαξονικό μαγνητόμετρο fluxgate. Το HC έχει ακτίνα 0,25 m, 10 στροφές σε κάθε πηνίο και μέγιστο ρεύμα ανά άξονα 20 A. Μπορεί να παράγει μαγνητικά πεδία έως ±500μT σε συνεχές ρεύμα και έως ±100μT στα 3 kHz. Το μαγνητόμετρο fluxgate έχει εύρος μέτρησης ±1000μT και κατώτατο όριο θορύβου 20 pT/√Hz στο 1 Hz. Με τα μεταλλικά νανοσωματίδια κοβαλτίου με μέγιστη τιμή ροπής 150 Am^2/kg, έγιναν

προσπάθειες για τον προσδιορισμό της ελάχιστης και μέγιστης μάζας δείγματος που μπορεί να διεγείρει τον αισθητήρα fluxgate χωρίς κορεσμό, λαμβάνοντας υπόψη τη θέση του fluxgate σε σχέση με το κέντρο του πηνίου Helmholtz.[23-26]



Σχήμα 2-2 : Πηνία Helmholtz για μαγνήτιση- αριστερά. Αρχικός σχεδιασμός για ατμοσφαιρική πίεση, βασισμένος σε αντιδραστήρα χαλαζία συμπεριλαμβανομένου ενός συστήματος θέρμανσης και ενός δείκτη θερμοκρασίας- δεξιά. Ο αντιδραστήρας θα ενσωματωθεί στο ομογενές μαγνητικό πεδίο των πηνίων Helmholtz με αισθητήρες στο χείλος.

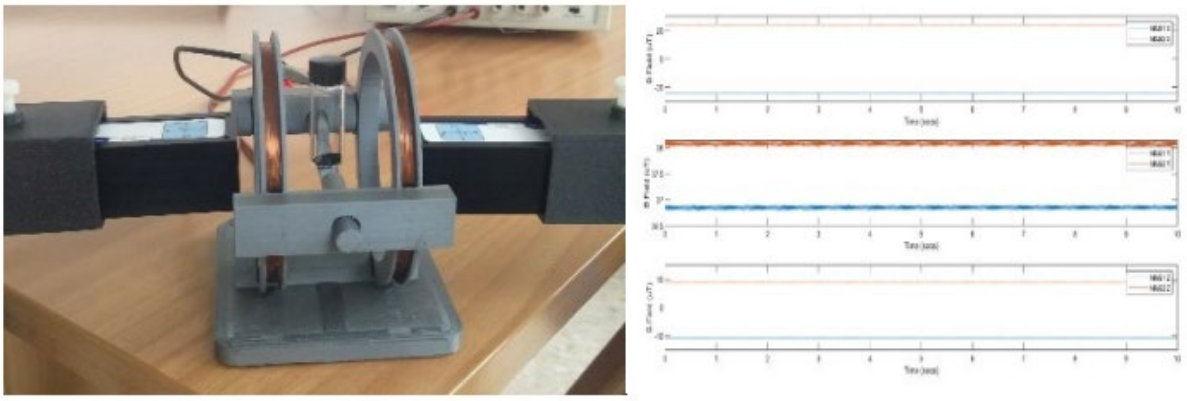
Τα αποτελέσματα προσομοίωσης στο παρακάτω απεικονίζουν την ευαισθησία των μετρήσεων σε σχέση με τη μέγιστη μάζα δείγματος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποφεύγοντας τον κορεσμό των αισθητήρων fluxgate, λαμβάνοντας υπόψη την απόστασή τους από το δείγμα και το μέγιστο μαγνητικό πεδίο που παράγεται από το πηνίο Helmholtz. Για να αποφευχθεί ο κορεσμός των αισθητήρων fluxgate, είναι προφανές ότι πρέπει να τοποθετούνται συμμετρικά γύρω από το δείγμα σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 5 cm. Τα μαγνητόμετρα που βασίζονται σε πηνία, όπως τα fluxgates, μετρούν τις μεταβολές της μαγνητικής ροής στο πεδίο του χρόνου, παρέχοντας πληροφορίες για το μαγνητικό πεδίο σε τρεις ορθογώνιους άξονες. Στην παρούσα εργασία, για τη μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων ενός καταλυτικού δείγματος, εφαρμόζεται ομογενές μαγνητικό πεδίο στο δείγμα και μετράτε ταυτόχρονα το συνολικό μαγνητικό πεδίο. Υποθέτοντας ότι το μαγνητικό πεδίο Helmholtz στους δύο αισθητήρες εξουδετερώνεται, καθώς και ο θόρυβος λόγω της ταυτόχρονης μέτρησης, η διάταξη αυτή επιτρέπει την ακριβή μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων του δείγματος.



Σχήμα 2-3 : Ελάχιστη ανιχνεύσιμη μάζα δείγματος από τους αισθητήρες fluxgate- αριστερά. Μελέτη που αφορά την τοποθέτηση μαγνητόμετρων στο εσωτερικό του πηνίου Helmholtz για την αποφυγή κορεσμού για μάζα δείγματος 1 gr- δεξιά.

Η μέτρηση των επαγόμενων μαγνητικών πεδίων εντός καταλυτικών αντιδραστήρων έχει αποδειχθεί στο παρελθόν με τη χρήση ειδικά κατασκευασμένων διατάξεων. Ωστόσο, η προσέγγισή μας

επιδιώκει να υπερβεί την τελευταία λέξη της τεχνολογίας, εισάγοντας έναν ριζικά νέο σχεδιασμό για μαγνητικές μετρήσεις σε αντιδραστήρες σε λειτουργία. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη συστοιχιών αισθητήρων που απλοποιούν τη διάταξη (εξαλείφοντας τα κινούμενα μέρη), μειώνουν το μέγεθος (εξαλείφοντας τους ηλεκτρομαγνήτες), αυξάνουν την ανάλυση μέχρι την περιοχή των νάνο-Tesla (χρησιμοποιώντας τόσο εμπορικά όσο και προσαρμοσμένα μαγνητόμετρα σε υβριδική λειτουργία) και παρέχουν χωρικές πληροφορίες. Προσομοιώσεις και απλουστευμένες διαμορφώσεις μέτρησης έχουν δείξει ότι μαγνητικά πεδία χαμηλής έντασης μπορούν να ανιχνευθούν από συστοιχίες αισθητήρων fluxgate από σημαντικές αποστάσεις. Ωστόσο, η κύρια πρόκληση έγκειται στην ανίχνευση δυναμικών αλλαγών φάσης που συμβαίνουν στο υλικό και στην επίτευξη πλήρους μαγνητικής χαρτογράφησης της καταλυτικής κλίνης.



Σχήμα 2-4 : Διαμόρφωση δύο μαγνητόμετρων fluxgate στα πηνία Helmholtz, όπου το φιαλίδιο του δείγματος βρίσκεται στο κέντρο.; αριστερά. Υπολειπόμενη μαγνήτιση σε NP κοβαλτίου με επικάλυψη άνθρακα στο εσωτερικό του φιαλιδίου.; δεξιά.

Η μελέτη σκοπιμότητας και η ανάπτυξη πρωτοτύπων καταδεικνύουν ελπιδοφόρα αποτελέσματα για την αξιολόγηση καταλυτικών υλικών σε συνθήκες αντίδρασης. Οι προσομοιώσεις και οι στατικές μετρήσεις προκαθορισμένων δειγμάτων δείχνουν ότι τα μαγνητόμετρα fluxgate μπορούν να ανιχνεύσουν μαγνητικά πεδία που παράγονται από δείγματα βάρους μικρότερου από 1g στην περιοχή των micro Tesla από απόσταση, αφήνοντας χώρο για εξοπλισμό ελέγχου της διαδικασίας, όπως θερμαντήρες, μόνωση και θερμοστοιχεία. Αυτή η ικανότητα είναι ζωτικής σημασίας για την πρακτική εφαρμογή σε αντιδραστήρων της βιομηχανίας. Το πρωτότυπο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιώντας υπερευαίσθητα μαγνητόμετρα fluxgate από την Bartington Instruments Ltd και ειδικά κατασκευασμένα τρισδιάστατα τυπωμένα πηνία Helmholtz επικυρώνει περαιτέρω τη δυνατότητα μέτρησης μικρών μαγνητικών πεδίων με υψηλή ακρίβεια. Τα αποτελέσματά, που βασίζονται σε αλγόριθμους προσέγγισης κοντινού πεδίου, αποδεικνύουν την ικανότητα μέτρησης μαγνητικών πεδίων από δείγματα που περιέχουν μόλις 200 mg υλικού με 20wt% σιδηρομαγνητικό Co. Η παραμένουσα μαγνήτιση νανοσωματιδίων Co με επικάλυψη άνθρακα που υποστηρίζονται σε Al2O3 ελήφθη επιτυχώς σε μόλις 10 δευτερόλεπτα, από απόσταση 7 cm, αναδεικνύοντας την αποτελεσματικότητα της προσέγγισής σας.[24]

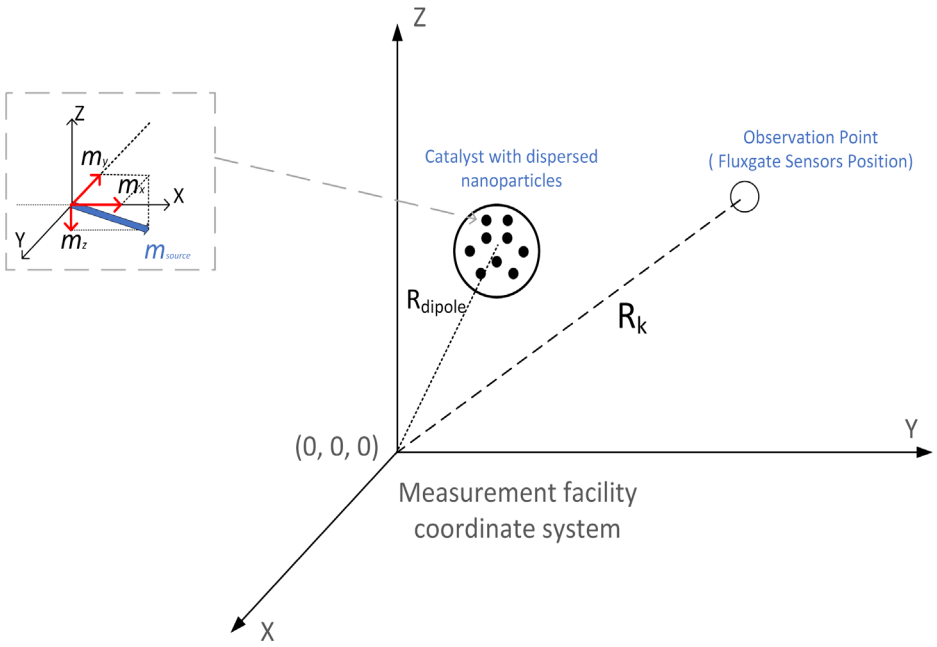
3. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ

3.1 Χαρακτηρισμός φάσης καταλύτη με την επίλυση του αντίστροφου προβλήματος ηλεκτρομαγνητικής σκέδασης.

Όπως μπορεί να έχει γίνει σαφές από τα παραπάνω είναι πολύ σημαντικό να μπορεί να γίνει χαρακτηρισμός της φάσης ενός καταλυτή κατά το δυνατών ποιο εύκολα. Ειδικότερα, το μαγνητικό πεδίο των σωματιδίων για κάθε υπό δοκιμή δείγμα (SUT) αντιπροσωπεύεται από ένα μαγνητικό δίπολο. Υποθέτοντας ότι $\boldsymbol{Rdipole}$ είναι το διάνυσμα θέσης της πηγής του διπόλου, $\boldsymbol{m}$ είναι το διάνυσμα ροπής του διπόλου και $\boldsymbol{Rk}$ είναι το διάνυσμα θέσης ενός σημείου παρατήρησης K τοτε:

$$B(\vec{n},t) = \frac{\mu_0}{4\pi}[3\vec{n}(\vec{n}\cdot\vec{m}) - \vec{m}]\,\frac{1}{r^3}$$

$$\vec{r} = \overrightarrow{R_k} - \overrightarrow{R_{dipole}},\ r = |\vec{r}|,\ \text{and}\ \vec{n} = \vec{r}/r$$



Σχήμα 3-1. Διατύπωση του προβλήματος χαρακτηρισμού της πηγής μαγνητικού διπόλου σε σχεδιο.

3.2 Πειραματική Διάταξη και μοντελοποίηση με πρότυπες πηγές .

Σε αυτή την φάση, θα υιοθετήσουμε μια απλουστευμένη πειραματική διάταξη με σταθερές μαγνητικές πηγές, μια επιλογή που αποσκοπεί στη δημιουργία μιας σταθερής πλατφόρμας για την εκπαίδευση και την τελειοποίηση των αλγορίθμων. Με την επιλογή αυτής της απλής διάταξης, επιδιώκετε ο εξ ορθολογισμός της πειραματικής διαδικασίας, διατηρώντας παράλληλα την ουσιαστική δυναμική των μαγνητικών πεδίων που είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική εκπαίδευση των αλγορίθμων μας. Η απόφαση για τη χρήση σταθερών μαγνητικών πηγών προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Πρώτον, παρέχει

ένα σταθερό και ελεγχόμενο περιβάλλον, εξασφαλίζοντας ότι οι εισροές για τους αλγορίθμους μας παραμένουν σταθερές καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας εκπαίδευσης. Αυτή η σταθερότητα είναι ζωτικής σημασίας για την ακριβή αξιολόγηση της απόδοσης των αλγορίθμων και τον εντοπισμό περιοχών για βελτίωση. Επιπλέον, η χρήση σταθερών μαγνητικών πηγών ενισχύει την αναπαραγωγιμότητα και την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας. Με γνωστά και αμετάβλητα μαγνητικά πεδία, μπορούμε με σιγουριά να επαναλάβουμε τα πειράματα και να επαληθεύσουμε τη συνέπεια των ευρημάτων μας. Επικεντρώνοντας την προσοχή μας στην εκπαίδευση των αλγορίθμων μας μέσα σε αυτή την απλοποιημένη διάταξη, μπορούμε να αφιερώσουμε περισσότερους πόρους στην ανάπτυξη και βελτίωση των ίδιων των υπολογιστικών μεθοδολογιών. Αυτή η προσέγγιση μας επιτρέπει να ενισχύουμε την απόδοση των αλγορίθμων, βελτιώνοντας σταδιακά την ικανότητά τους να αναλύουν δεδομένα μαγνητικού πεδίου και να προβαίνουν σε ακριβείς προσδιορισμούς της μαγνητικής ροπής και της θέσης. Επιπλέον, η απλότητα της πειραματικής διάταξης επιτρέπει την απομόνωση και την μελέτη συγκεκριμένων πτυχών της μαγνητικής κατάλυσης με μεγαλύτερη ακρίβεια. Αφαιρώντας τις ξένες μεταβλητές και τις πολυπλοκότητες που σχετίζονται με τα μεταβλητά μαγνητικά πεδία, μπορούμε να επικεντρώσουμε τις προσπάθειές μας στην κατανόηση των θεμελιωδών αρχών που διέπουν τα μαγνητικά φαινόμενα. Επιπλέον, η χρήση μιας απλής πειραματικής διάταξης δεν αποκλείει με τον οποιανδήποτε τρόπο την ενσωμάτωση προηγμένων αλγοριθμικών τεχνικών. Αντιθέτως, μας επιτρέπει να επικεντρώσουμε τις προσπάθειές μας στην ανάπτυξη αλγορίθμων που είναι ειδικά προσαρμοσμένοι στα χαρακτηριστικά των σταθερών μαγνητικών πηγών. Μπορούμε να αξιοποιήσουμε αλγορίθμους μηχανικής μάθησης και τεχνητής νοημοσύνης αιχμής για την ανάλυση των δεδομένων που παράγονται από την πειραματική διάταξη.

Ορισμένα βασικά βήματα για να ολοκληρωθεί η πειραματική διαδικασία ώστε να πάρουμε κάποιες μετρήσεις για την περεταίρω επεξεργασία τους είναι τα εξής:

- πραγματοποιείται η πρώτη μέτρηση χωρίς το σιδηρομαγνητικό δείγμα αμέσως μετά ακολουθεί η δεύτερη μέτρηση με την παρουσία του δείγματος.
- Δεδομένου ότι το καταλυτικό δείγμα σε σκόνη έχει τη μικρότερη διάσταση στο συνολικό σύστημα, το δείγμα μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα απειροελάχιστο μαγνητικό δίπολο που τοποθετείται στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων της διάταξης μέτρησης.
- Με αυτή την υπόθεση, η απειροελάχιστη πηγή έχει ροπή ίση με τη μέση μαγνητική ροπή των διαφόρων μαγνητικών πηγών του δείγματος. Αυτή η ισοδύναμη ροπή μπορεί να εξαχθεί αξιοποιώντας την προαναφερθείσα μέτρηση με τη χρήση μιας ευρετικής μεθοδολογίας, όπως ο αλγόριθμος διαφορικής εξέλιξης (DE).
- Ο χαρακτηρισμός της πηγής, όταν δίνονται οι τιμές του μετρούμενου μαγνητικού πεδίου, θέτει ένα αντίστροφο πρόβλημα.

3.3 Τεχνικές μέτρησης μαγνητικών πεδίων

Στο εργαστήριο, η ακριβής μέτρηση των μαγνητικών πεδίων είναι ζωτικής σημασίας για ένα ευρύ φάσμα πειραμάτων και εφαρμογών, συμπεριλαμβανομένων των μελετών μαγνητικής κατάλυσης. Όπως έχουμε δει και παραπάνω υπάρχουν διάφορες τεχνικές για το σκοπό αυτό, η καθεμία με τα δικά της πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Ακολουθεί μια επισκόπηση ορισμένων μεθόδων που χρησιμοποιούνται σε αντίστοιχες μετρητικές διατάξεις:

- *Αισθητήρες επίδρασης Hall*: Οι αισθητήρες επίδρασης Hall είναι διατάξεις ημιαγωγών που παράγουν τάση ανάλογη του μαγνητικού πεδίου κάθετα στην επιφάνεια του αισθητήρα. Είναι συμπαγείς, φθηνοί και προσφέρουν υψηλή ευαισθησία, καθιστώντας τους κατάλληλους για πολλές εφαρμογές. Ωστόσο, συνήθως απαιτούν βαθμονόμηση και ενδέχεται να παρουσιάζουν μη γραμμικές αποκρίσεις σε ορισμένες συνθήκες.[27]

- *Μαγνητόμετρα Fluxgate*: Τα μαγνητόμετρα Fluxgate αποτελούνται από έναν ή περισσότερους πυρήνες τυλιγμένους με πηνία μέσω των οποίων διέρχεται ρεύμα διέγερσης εναλλασσόμενου ρεύματος. Η παρουσία εξωτερικού μαγνητικού πεδίου προκαλεί αλλαγές στη διαπερατότητα του πυρήνα, με αποτέλεσμα μετρήσιμα σήματα εξόδου. Τα μαγνητόμετρα Fluxgate προσφέρουν υψηλή ευαισθησία και σταθερότητα, καθιστώντας τα κατάλληλα για ακριβείς μετρήσεις σε εργαστηριακό περιβάλλον.[28]

- *SQUIDs (Συσκευές κβαντικής παρεμβολής υπεραγωγών στοιχείων)*: Οι SQUIDs είναι εξαιρετικά ευαίσθητοι ανιχνευτές που βασίζονται στις κβαντομηχανικές ιδιότητες των υπεραγωγών. Μπορούν να μετρήσουν εξαιρετικά ασθενή μαγνητικά πεδία, μέχρι το επίπεδο των picoteslas (10^-12 tesla). Τα SQUIDs χρησιμοποιούνται ευρέως σε τομείς όπως η μαγνητοεγκεφαλογραφία (MEG), ο βιομαγνητισμός και η έρευνα στις επιστήμες των υλικών. Ωστόσο, απαιτούν κρυογονική ψύξη και εξελιγμένα όργανα, περιορίζοντας την προσβασιμότητα και την πρακτικότητά τους σε ορισμένα εργαστηριακά περιβάλλοντα. [29]

- *Search Coils*: Τα πηνία αναζήτησης αποτελούνται από ένα πηνίο σύρματος τυλιγμένο γύρω από έναν πυρήνα. Όταν τοποθετούνται σε μαγνητικό πεδίο, προκαλείται τάση στο πηνίο λόγω του νόμου του Faraday για την ηλεκτρομαγνητική επαγωγή. Τα πηνία αναζήτησης χρησιμοποιούνται συνήθως για τη μέτρηση εναλλασσόμενων μαγνητικών πεδίων με υψηλή ακρίβεια και εύρος ζώνης. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για τη μελέτη δυναμικών μαγνητικών φαινομένων, όπως η μαγνητική υστέρηση και τα δινορρεύματα.[30]

- *Οπτικά μαγνητόμετρα*: Τα οπτικά μαγνητόμετρα χρησιμοποιούν την αλληλεπίδραση μεταξύ φωτός και ατομικών ή μοριακών ιδιοτήτων για τη μέτρηση μαγνητικών πεδίων. Τεχνικές όπως η περιστροφή Faraday, η ατομική μαγνητομετρία και τα μαγνητόμετρα με οπτική άντληση προσφέρουν υψηλή ευαισθησία και ανοσία στις ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές. Τα οπτικά μαγνητόμετρα χρησιμοποιούνται σε μετρήσεις ακριβείας, συμπεριλαμβανομένων εκείνων στη βασική έρευνα της φυσικής και στην απεικόνιση μαγνητικού συντονισμού (MRI).[31]

- *Μικροσκοπία μαγνητο-οπτικού φαινομένου Kerr (MOKE)*: Η μικροσκοπία MOKE είναι μια εξειδικευμένη τεχνική που χρησιμοποιείται για τη μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων στη

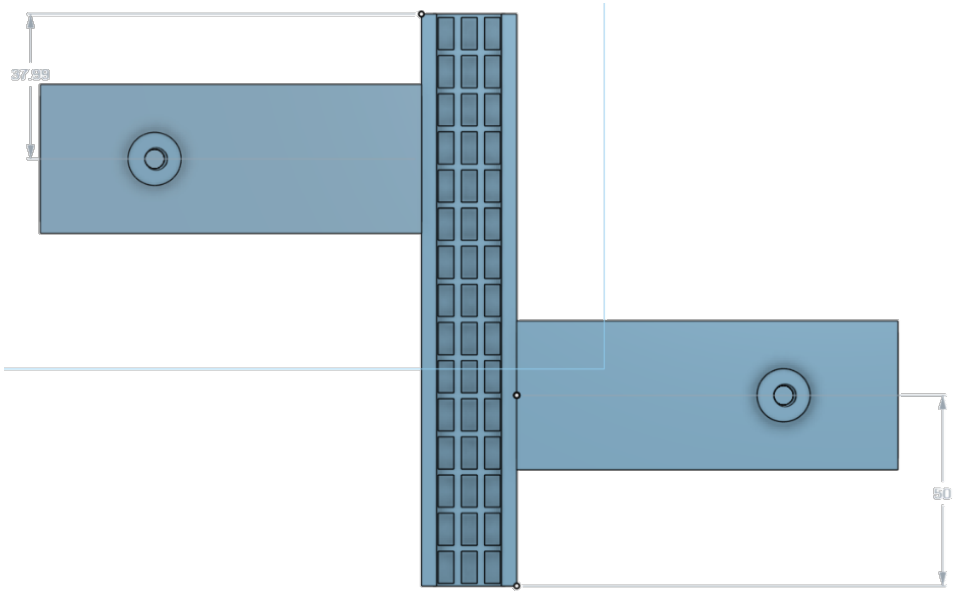
νανοκλίμακα. Μετρά τις αλλαγές στην πόλωση του φωτός που ανακλάται από ένα μαγνητικό δείγμα, παρέχοντας πληροφορίες σχετικά με τη μαγνήτιση και τη δομή του μαγνητικού τομέα του. Η μικροσκοπία MOKE χρησιμοποιείται ευρέως στην έρευνα της επιστήμης των υλικών για τη μελέτη μαγνητικών λεπτών υμένων, νανοσωματιδίων και μαγνητικών μέσων εγγραφής.[32]

Κάθε μία από αυτές τις τεχνικές έχει τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς της και η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από παράγοντες όπως η απαιτούμενη ευαισθησία, η χωρική ανάλυση, το εύρος μέτρησης και οι πειραματικές συνθήκες. Με την κατανόηση των αρχών και των δυνατοτήτων των διαφόρων τεχνικών μέτρησης μαγνητικού πεδίου, οι ερευνητές μπορούν να επιλέξουν την καταλληλότερη προσέγγιση για τις συγκεκριμένες εφαρμογές τους σε εργαστηριακές συνθήκες.

3.4 Ανάπτυξη μηχανικών υποσυστημάτων

Η χρήση ενός τρισδιάστατα εκτυπωμένου πλαισίου ενσωματωμένου με μαγνήτες προσφέρει μια ευέλικτη και προσαρμόσιμη πλατφόρμα για πειράματα μαγνητικού πεδίου σε εργαστηριακές συνθήκες. Ακολουθεί ο τρόπος με τον οποίο θα μπορούσε να υλοποιηθεί μια τέτοια διάταξη:

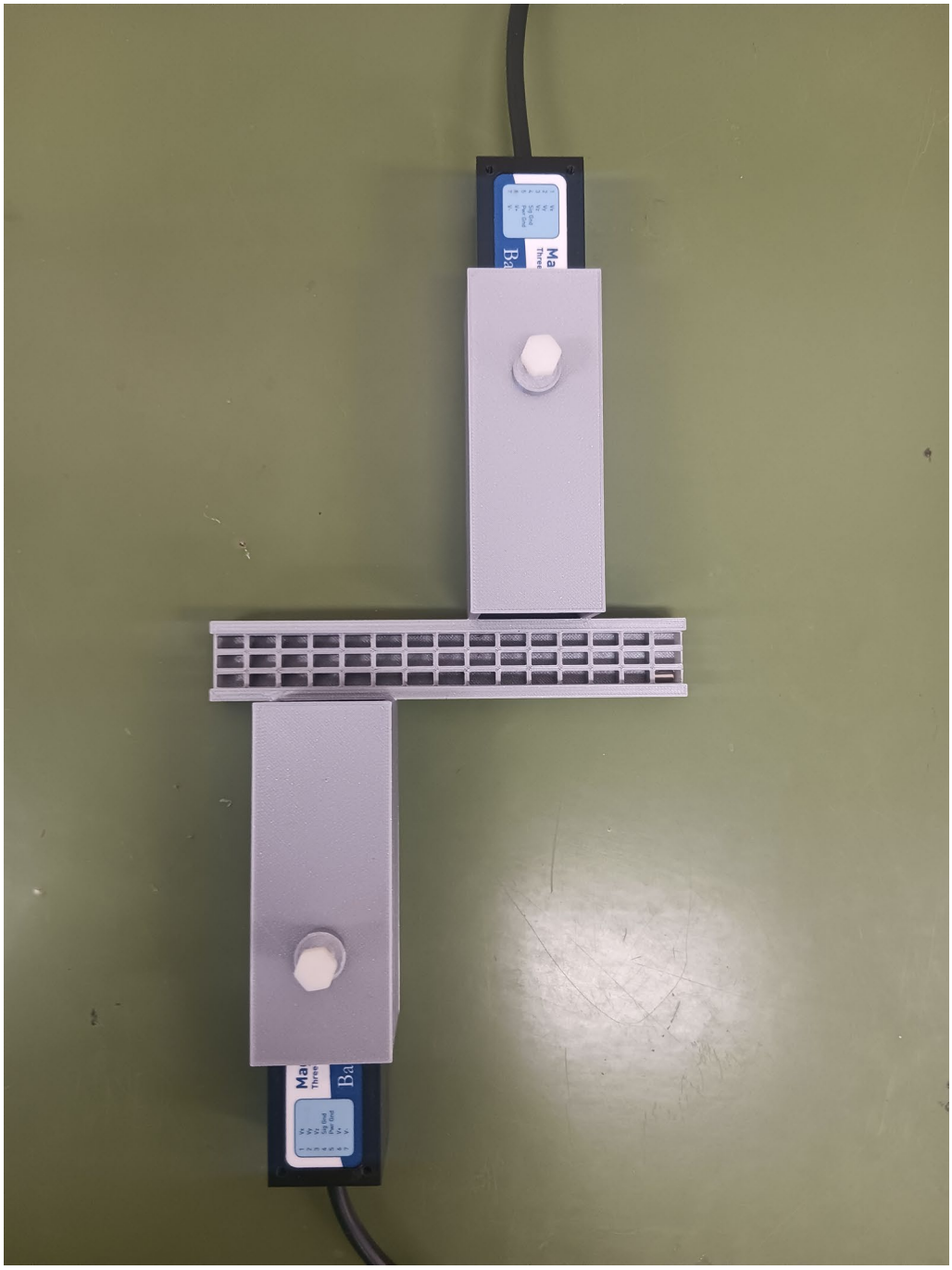
- *Σχεδιασμός και κατασκευή*: Σχεδιασμός του πλαισίου χρησιμοποιώντας λογισμικό σχεδιασμού με τη βοήθεια υπολογιστή (CAD). Το πλαίσιο πρέπει να σχεδιαστεί έτσι ώστε να φιλοξενεί την πειραματική διάταξη, συμπεριλαμβανομένου του χώρου για την τοποθέτηση μαγνητών, αισθητήρων και τυχόν πρόσθετων εξαρτημάτων. Θα πρέπει ο σχεδιασμός είναι στιβαρός, σταθερός και να επιτρέπει την εύκολη πρόσβαση στα εξαρτήματα για ρυθμίσεις και συντήρηση. Μόλις οριστικοποιηθεί ο σχεδιασμός, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένας τρισδιάστατος εκτυπωτής για να κατασκευάσετε το πλαίσιο.



Σχήμα 3-2. Πρότυπη μετρητική διάταξη τυπωμένη σε 3D εκτυπωτή για την επαλήθευση της μεθοδολογίας χαρακτηρισμού με πρότυπους μαγνήτες νεοδυμίου.

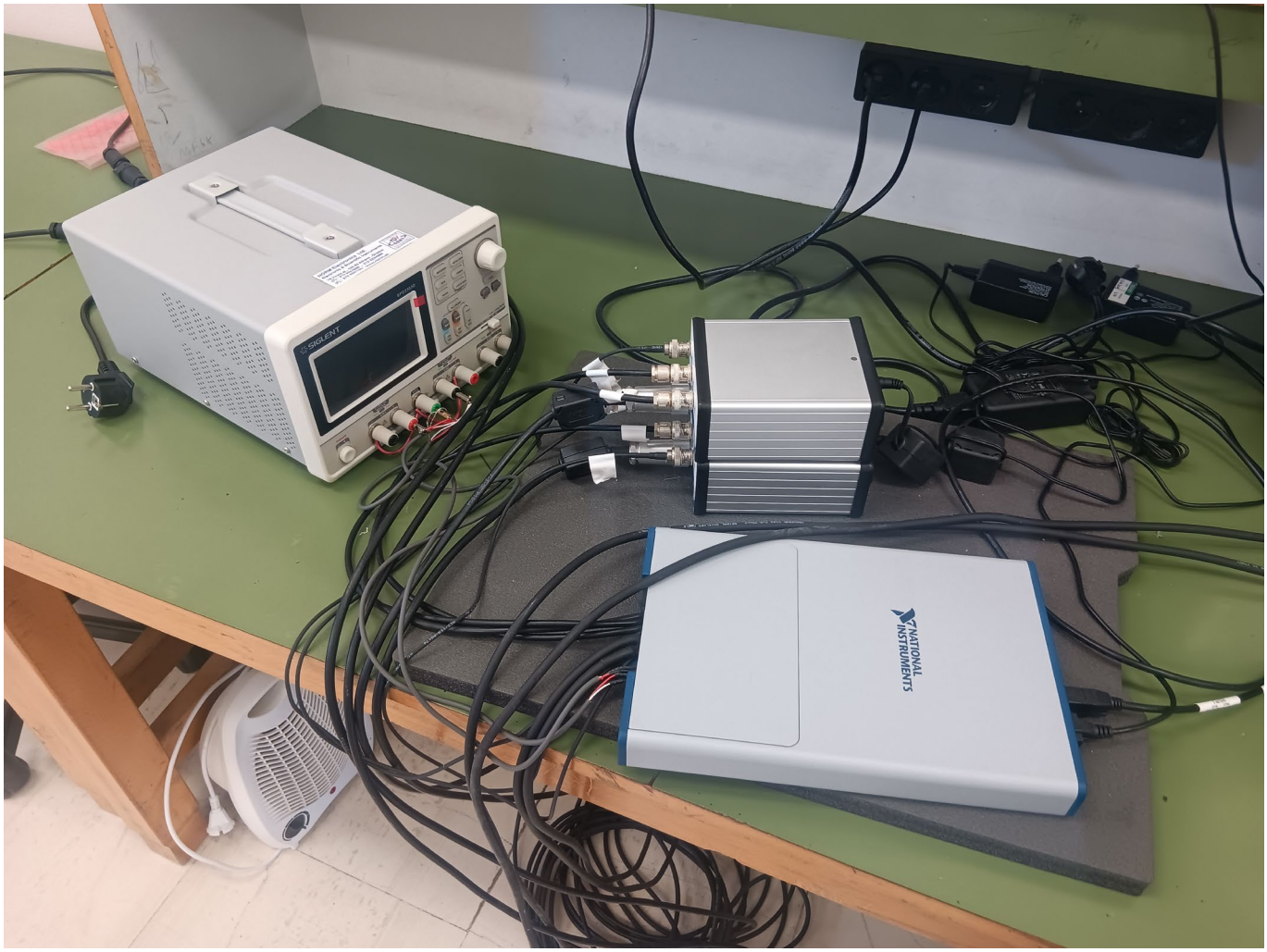
- *Ενσωμάτωση μαγνητών*: Ακολουθεί η ενσωμάτωση των μαγνητών στα σημεία τοποθέτησης ή στις εσοχές στον σχεδιασμό του. Ανάλογα με τις πειραματικές απαιτήσεις, μπορεί να χρησιμοποιηθούν διαφορετικοί τύποι μαγνητών, τοποθετημένους σε συγκεκριμένες διαμορφώσεις για τη δημιουργία των επιθυμητών μαγνητικών πεδίων. Στην συνέχεια, ακολουθεί η προσεκτική τοποθέτηση μέσα στο πλαίσιο σύμφωνα με την πειραματική διάταξη, εξασφαλίζοντας τη σωστή ευθυγράμμιση και απόσταση μεταξύ τους, ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή κατανομή μαγνητικού πεδίου. Εξετάστε το ενδεχόμενο χρήσης ρυθμιζόμενων βάσεων ή βραχιόνων για τη λεπτομερή ρύθμιση των θέσεων των μαγνητών ανάλογα με τις ανάγκες.

- *Τοποθέτηση αισθητήρα*: Καθορίζεται η τοποθέτηση των αισθητήρων μαγνητικού πεδίου, όπως αισθητήρες επίδρασης Hall ή μαγνητόμετρα fluxgate, εντός του πλαισίου.



Σχήμα 3-3. Η μετρητική διάταξη με προσαρμοσμένα τα μαγνητόμετρα τύπου πύλης-ροής της Bartington MAG-690.

- *Τοποθέτηση άλλων εξαρτημάτων*: Εκτός από τους μαγνήτες και τους αισθητήρες, το πλαίσιο μπορεί να χρειαστεί να φιλοξενήσει και άλλα εξαρτήματα, όπως πηγές ισχύος, μονάδες επεξεργασίας σήματος και συστήματα συλλογής δεδομένων.



Σχήμα 3-4. Αποτύπωση του συνόλου του εξοπλισμού για την υλοποίηση της μέτρησης, DAQ, τροφοδοτικά και καλωδιώσεις.

- *Δοκιμές και βαθμονόμηση*: Πριν από τη διεξαγωγή πειραμάτων, δοκιμάζεται διεξοδικά η διάταξη του τρισδιάστατα εκτυπωμένου πλαισίου για να διασφαλιστεί η λειτουργικότητα και η σταθερότητα.

- *Πειραματική ρύθμιση και συλλογή δεδομένων*: Μόλις επικυρωθεί η λειτουργεία της εγκατάστασης, ακολουθεί η διεξαγωγή πειραμάτων για τη μέτρηση και ανάλυση μαγνητικών πεδίων στο εργαστήριο. Χρησιμοποιώντας, τους ενσωματωμένους αισθητήρες για τη συλλογή δεδομένων και προσαρμόζοντας τις πειραματικές παραμέτρους ανάλογα με τις ανάγκες για την επίτευξη των επιθυμητών αποτελεσμάτων.



Σχήμα 3-5. Αποτύπωση της μέτρησης στο εργαστήριο.

Με την ενσωμάτωση μαγνητών σε ένα τρισδιάστατα εκτυπωμένο πλαίσιο, οι ερευνητές μπορούν να δημιουργήσουν μια προσαρμόσιμη και προσαρμόσιμη πλατφόρμα για τη μελέτη μαγνητικών πεδίων σε εργαστηριακές συνθήκες. Αυτή η προσέγγιση προσφέρει ευελιξία στο σχεδιασμό πειραμάτων και επιτρέπει την επαναληπτική βελτίωση και βελτιστοποίηση για την επίτευξη συγκεκριμένων ερευνητικών στόχων.

4. NATURE INSPIRED ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

4.1 Εισαγωγή στους nature inspired αλγορίθμους

Στο πεδίο της ανάλυσης μαγνητικών πεδίων, ο προσδιορισμός της μαγνητικής ροπής και της χωρικής θέσης ενός μαγνήτη γίνεται με την ενσωμάτωση προηγμένων μεθοδολογιών και αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη φύση. Οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης είναι οι εξαιρετικά αποδοτικοί αλγόριθμοι που επικεντρώνονται στην εύρεση λύσεων σε εξαιρετικά πολύπλοκα προβλήματα βελτιστοποίησης. Με τη χρήση αυτών των αλγορίθμων εμπνευσμένων από τη φύση, το πρόβλημα μπορεί να επιλυθεί με λιγότερους υπολογιστικούς πόρους και μικρότερο χρόνο. Τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορούν να ταξινομηθούν ανάλογα με το αν είναι: (i) συνεχή, διακριτά, δυαδικά και μικτά, (ii) μεμονωμένα, πολλαπλά (iii) χωρίς περιορισμούς και με περιορισμούς. Όσον αφορά τις αντικειμενικές συναρτήσεις, τα προβλήματα βελτιστοποίησης μπορεί να έχουν μια ή περισσότερες.

Η λειτουργεία ενός τέτοιου αλγόριθμου είναι ποιο κατανοητή όταν χωριστεί σε τέσσερεις βασικές ενότητες:

- *Εξερεύνηση (Exploration)*: Η εξερεύνηση διασχίζει ολόκληρο το τοπίο αναζήτησης για να αναζητήσει νέες λύσεις που είναι διαφορετικές από την τρέχουσα λύση.

- *Εκμετάλλευση (Exploitation)*: Επικεντρώνεται σε μια τοπική περιοχή αναζήτησης, η οποία θα οδηγήσει στην εξεύρεση καλύτερης λύσης.

- *Σύγκλιση (Convergence)*: Μπορεί να οριστεί ως η ταχύτητα με την οποία ο αλγόριθμός μας συγκλίνει σε μια λύση κατά τη διάρκεια ορισμένων επαναλήψεων πέραν των οποίων δημιουργείται μια επαναλαμβανόμενη ακολουθία.

- *Τυχαιοποίηση (Randomization)*: Καλύτερη εξερεύνηση στο τοπίο αναζήτησης για την εύρεση εναλλακτικών λύσεων.

Παρακάτω θα παρουσιαστούν συνοπτικά ορισμένες επιλογές που αξιολογήθηκαν για αυτήν την εργασία και ορισμένα ενδεικτικά διαγράμματα ροής τα οποία εξηγούν την λειτουργία κάθε αλγορίθμου.

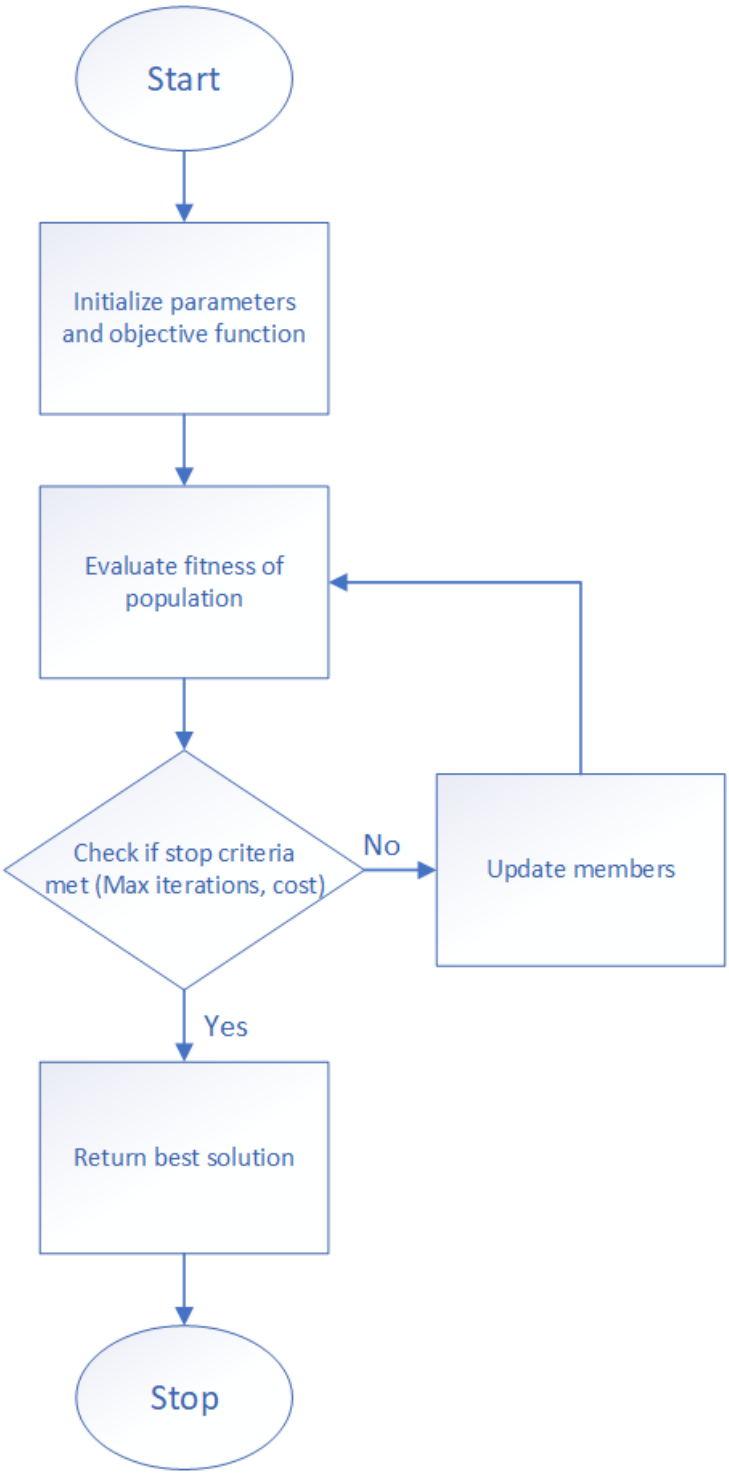
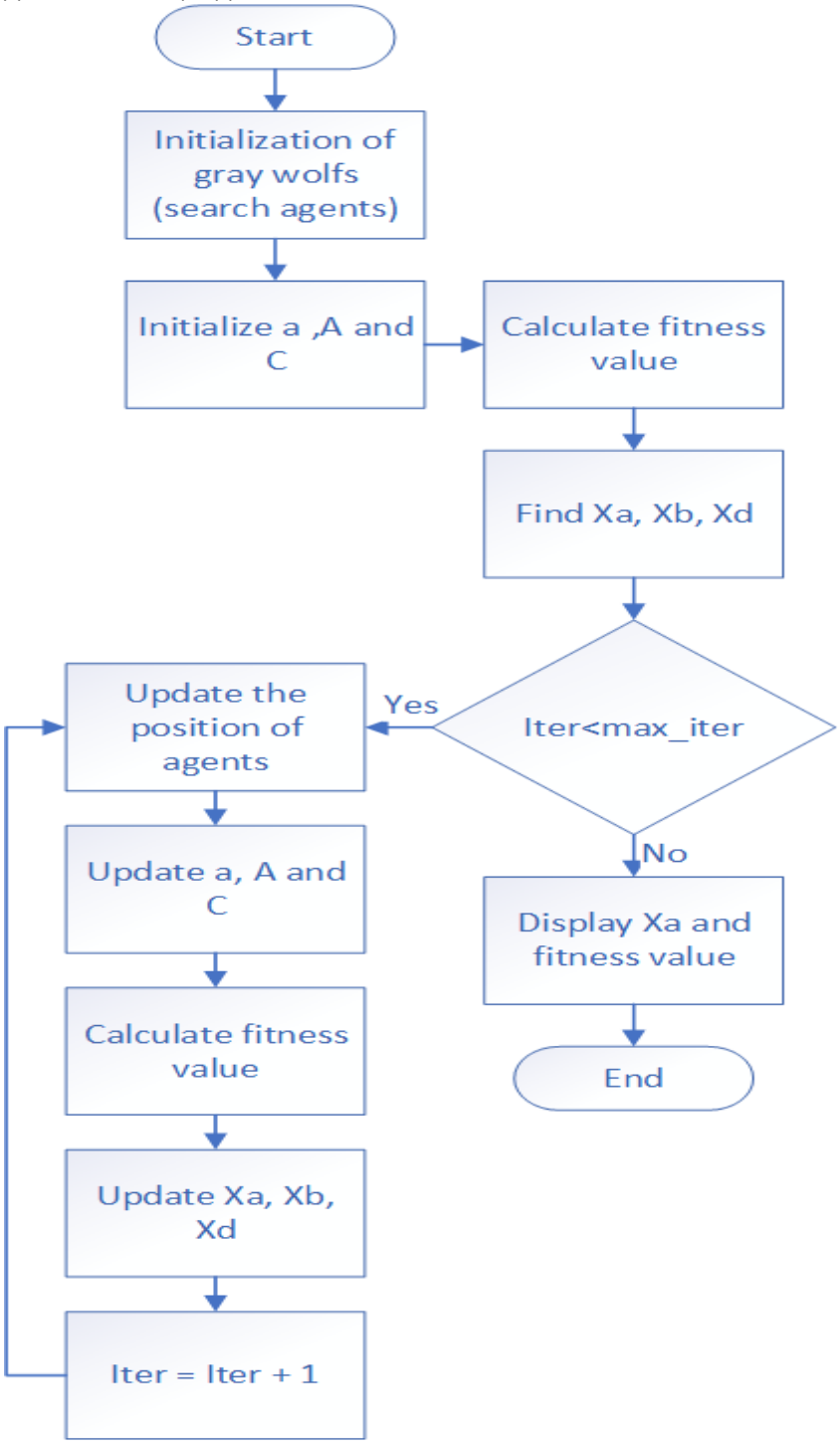


Figure 4-1 : Generic διάγραμμα ενός nature inspired αλγόριθμου

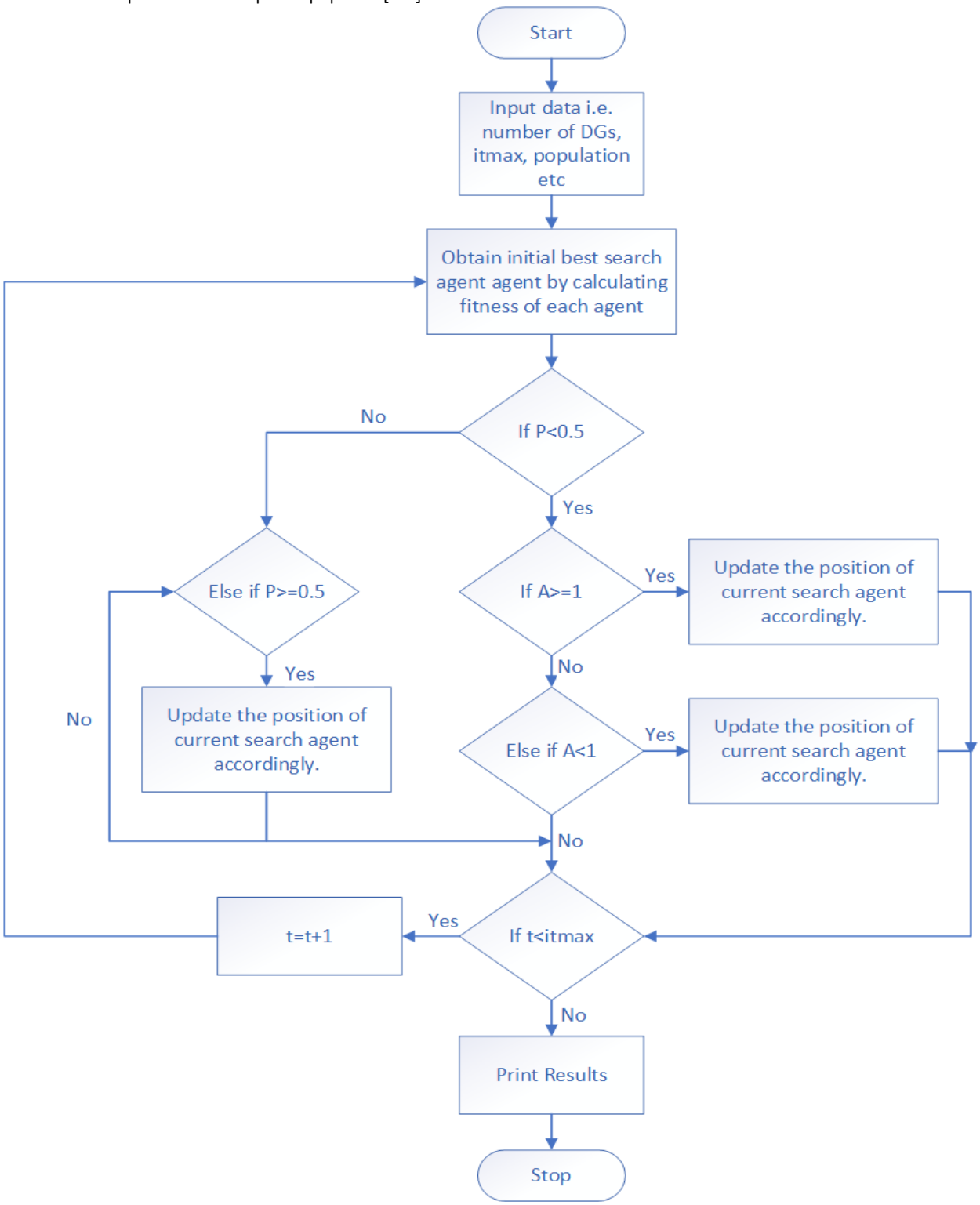
4.2 Ανεπτυγμένοι αλγόριθμοι

Ο Grey Wolf Optimizer (GWO) μιμείται την ιεραρχία ηγεσίας και τον μηχανισμό κυνηγιού των γκρίζων λύκων στη φύση. Τέσσερις τύποι γκρίζων λύκων, όπως ο άλφα, ο βήτα, ο δέλτα και ο ωμέγα, χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση της ιεραρχίας ηγεσίας. Επιπλέον, υλοποιούνται τρία κύρια βήματα του κυνηγιού, η αναζήτηση θηράματος, η περικύκλωση του θηράματος και η επίθεση στο θήραμα, για την εκτέλεση της βελτιστοποίησης.[33]



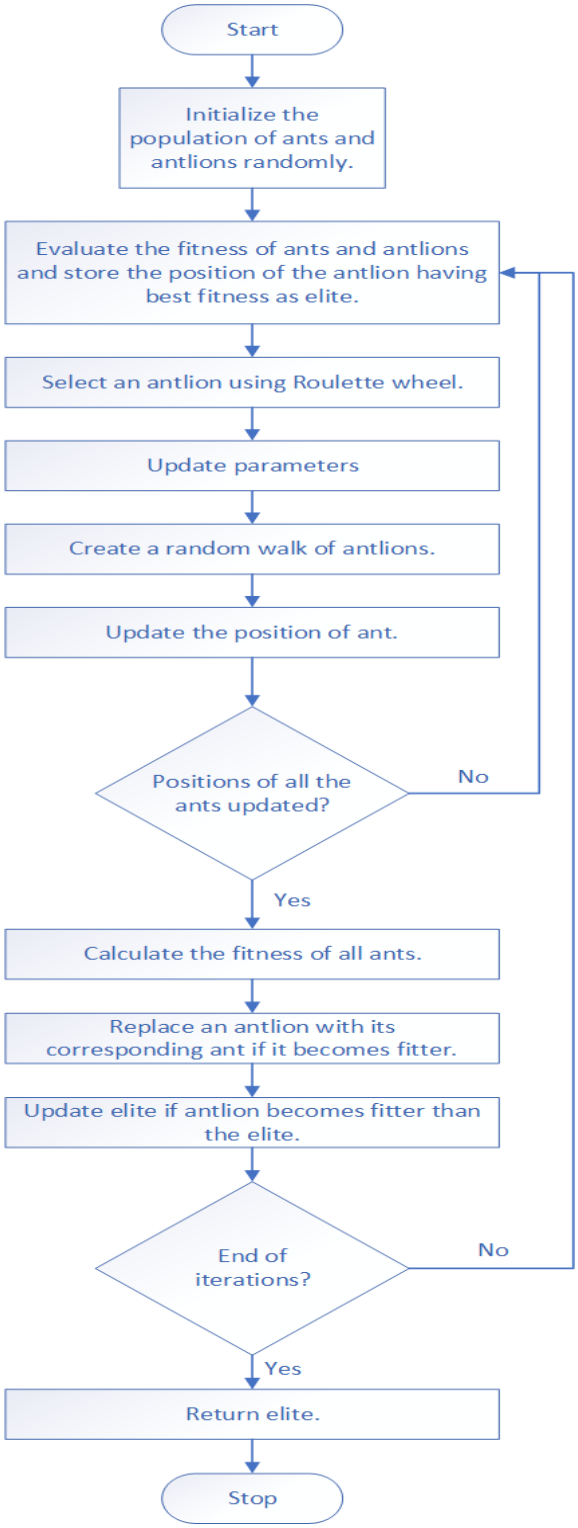
Σχήμα 4-1 : Flowchart του Grey Wolf Optimizer.

Ο Whale Optimization Algorithm (WOA) είναι μια νέα τεχνική βελτιστοποίησης για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης. Αυτός ο αλγόριθμος περιλαμβάνει τρεις τελεστές για την προσομοίωση της αναζήτησης θηραμάτων, της περικύκλωσης θηραμάτων και της συμπεριφοράς τροφοληψίας με δίχτυ φυσαλίδων των φαλαινών-καμπούρηδων.[33]



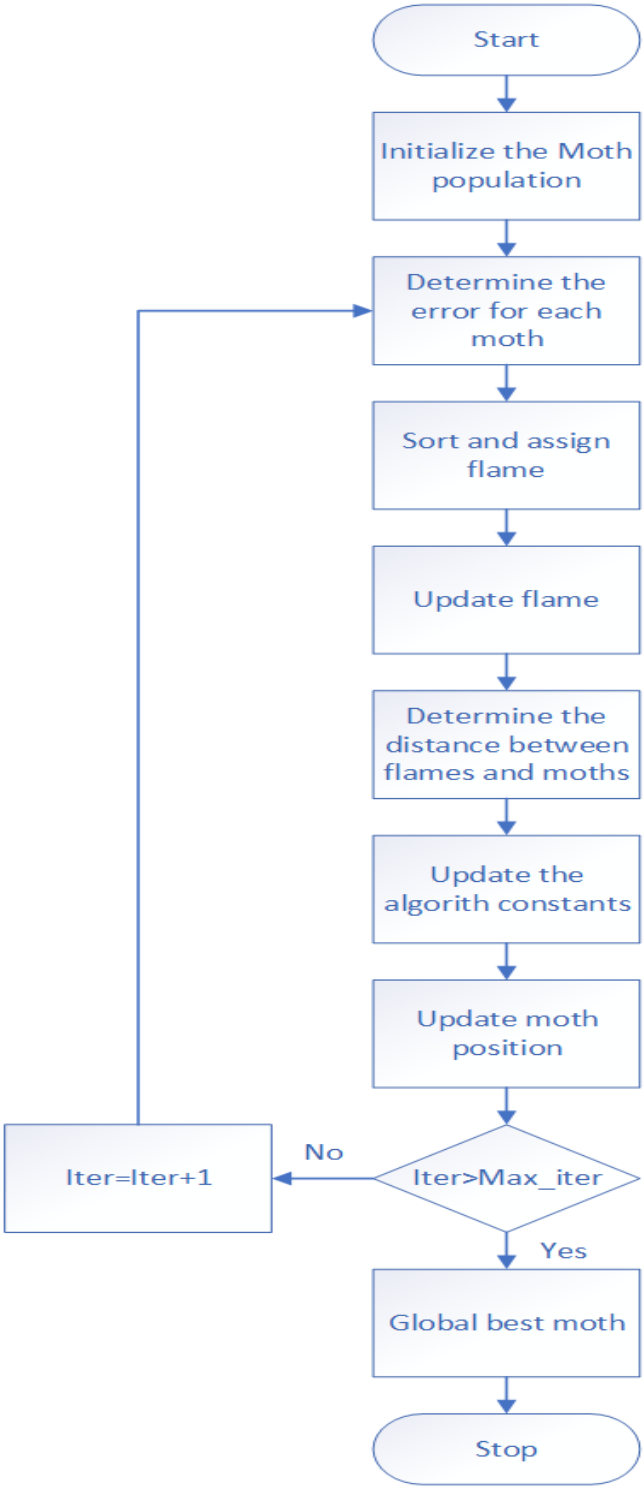
Σχήμα 4-2 : Flowchart του Whale Optimization Algorithm.

Ο Ant Lion Optimizer (ALO) μιμείται τον μηχανισμό κυνηγιού των μυρμηγκιών στη φύση. Υλοποιούνται πέντε βασικά βήματα του κυνηγιού θηραμάτων, όπως ο τυχαίος περίπατος των μυρμηγκιών, η κατασκευή παγίδων, ο εγκλωβισμός των μυρμηγκιών στις παγίδες, η σύλληψη θηραμάτων και η εκ νέου κατασκευή παγίδων.[33]



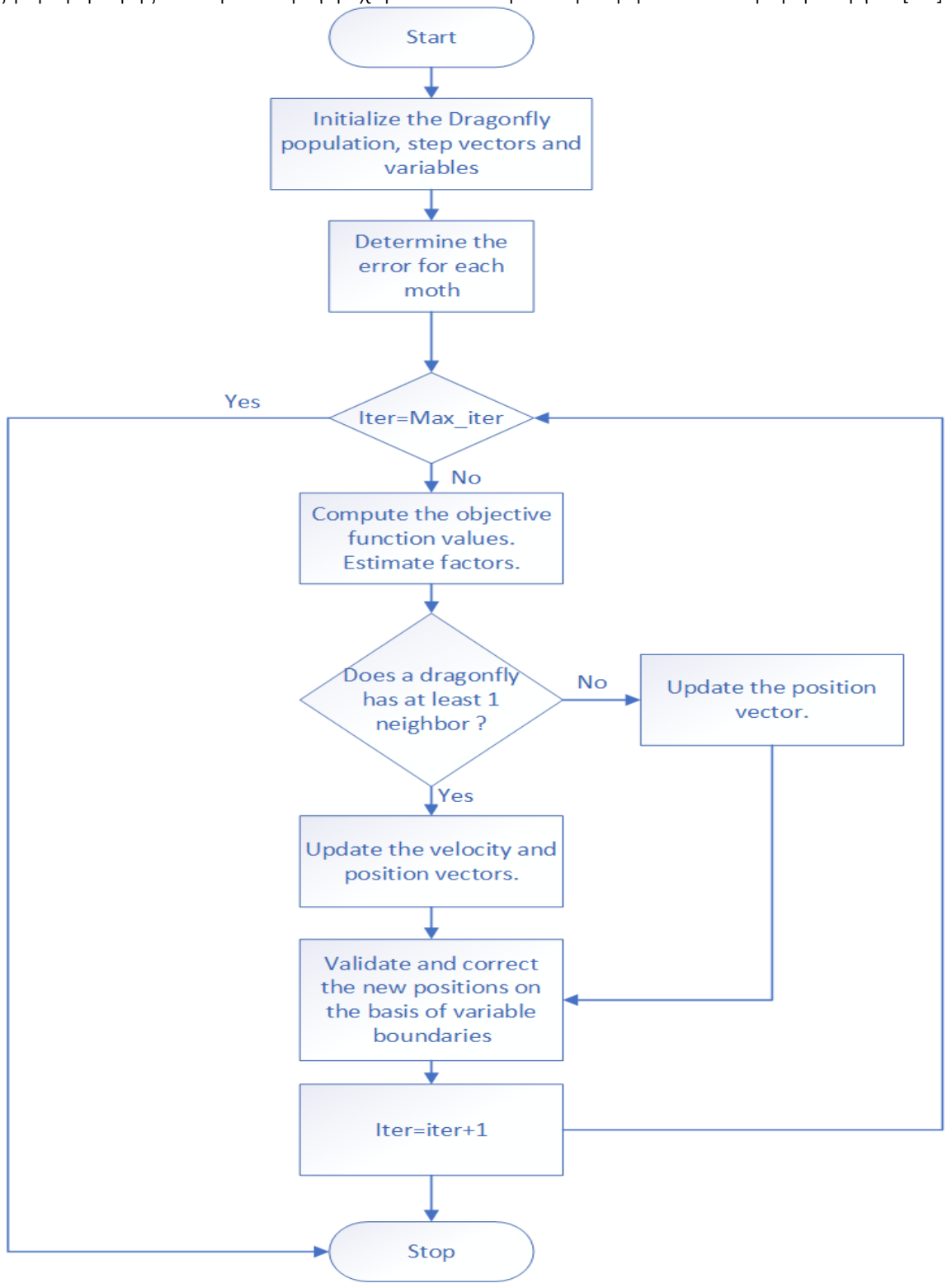
Σχήμα 4-3 : Flowchart του Ant Lion Optimizer.

Ο Moth Flame Optimizer (MFO) η κύρια έμπνευση αυτού του βελτιστοποίησή είναι η μέθοδος πλοήγησης των moth στη φύση που ονομάζεται εγκάρσιος προσανατολισμός. Οι σκώροι πετούν τη νύχτα διατηρώντας μια σταθερή γωνία σε σχέση με το φεγγάρι, ένας πολύ αποτελεσματικός μηχανισμός για να ταξιδεύουν σε ευθεία γραμμή για μεγάλες αποστάσεις. Ωστόσο, αυτά τα φανταχτερά έντομα παγιδεύονται σε μια άχρηστη/θανάσιμη σπειροειδή διαδρομή γύρω από τεχνητά φώτα. Η παρούσα εργασία μοντελοποιεί μαθηματικά αυτή τη συμπεριφορά για να πραγματοποιήσει βελτιστοποίηση.[33]



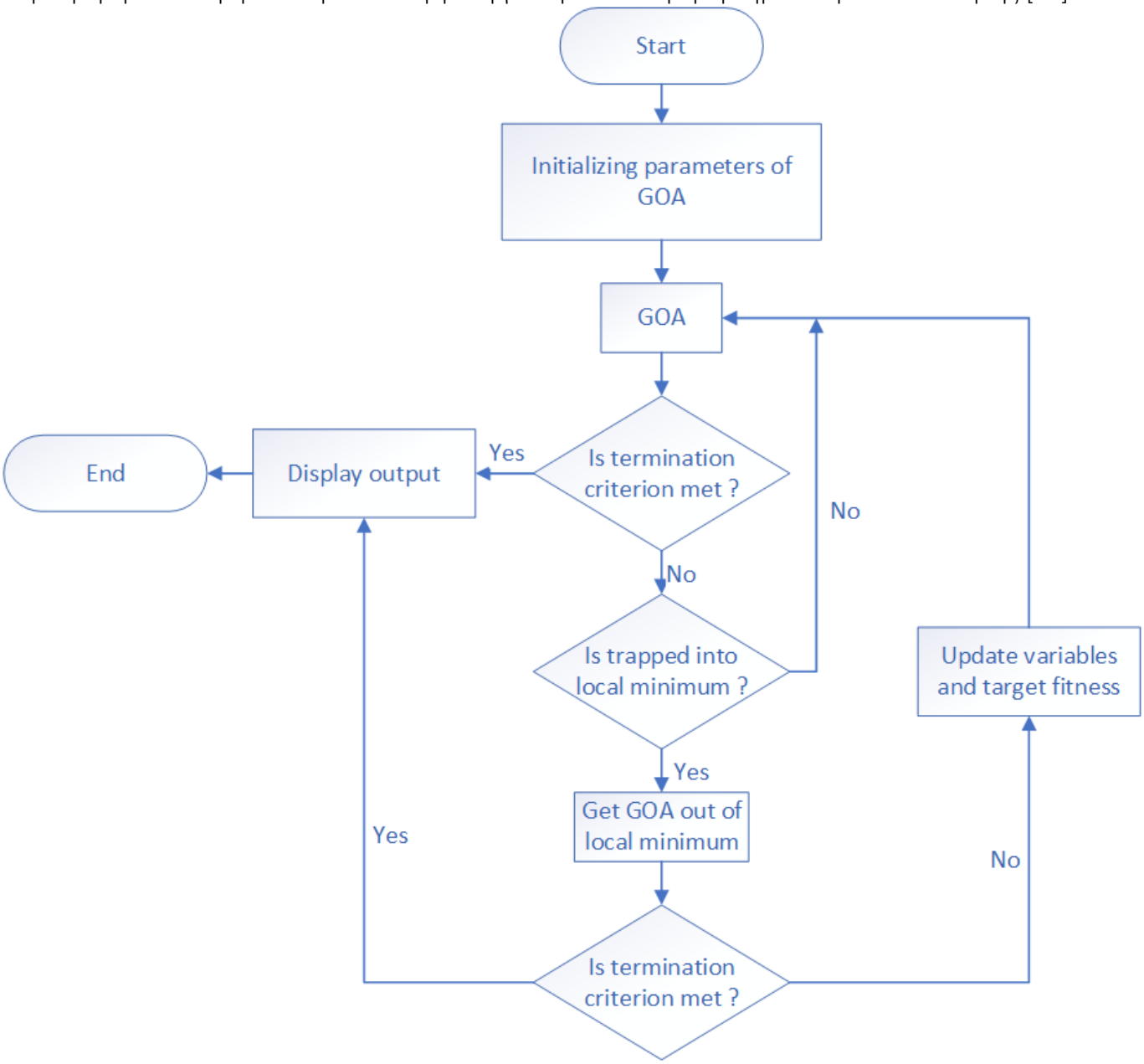
Σχήμα 4-4 : Flowchart του Moth Flame Optimizer.

Ο Dragonfly Algorithm (DA) προέρχεται από τις στατικές και δυναμικές συμπεριφορές σμήνους των λιβελούλων στη φύση. Δύο βασικές φάσεις βελτιστοποίησης, η εξερεύνηση και η εκμετάλλευση, σχεδιάζονται με τη μοντελοποίηση της κοινωνικής αλληλεπίδρασης των λιβελούλων κατά την πλοήγηση, την αναζήτηση τροφής και την αποφυγή εχθρών κατά τη δυναμική ή στατιστική σμηνουργία.[33]



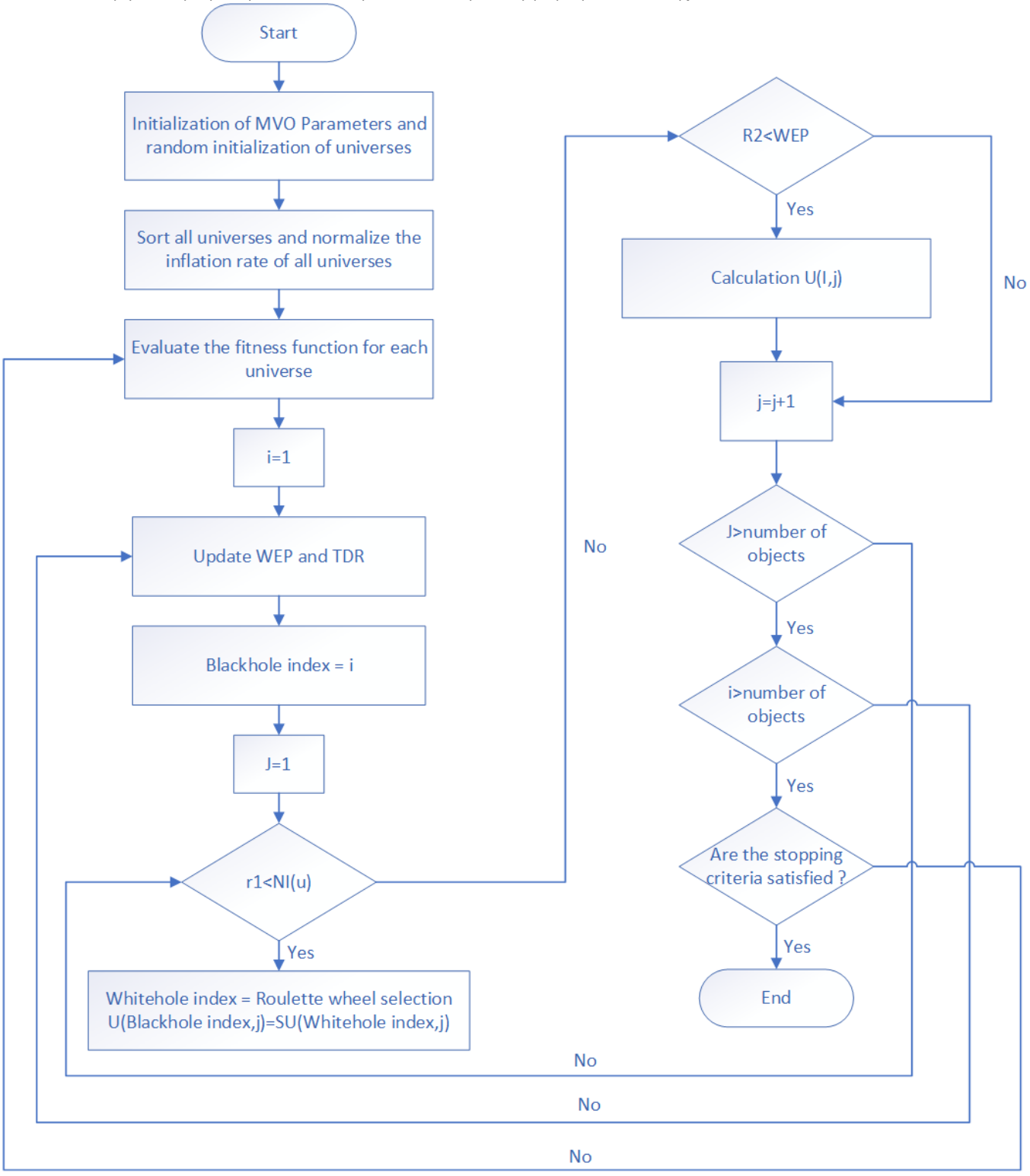
Σχήμα 4-5: Flowchart του αλγορίθμου Dragonfly.

Ο Grasshopper Optimization Algorithm (GOA) μοντελοποιεί μαθηματικά και μιμείται τη συμπεριφορά των σμηνών ακρίδων στη φύση για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης.[33]



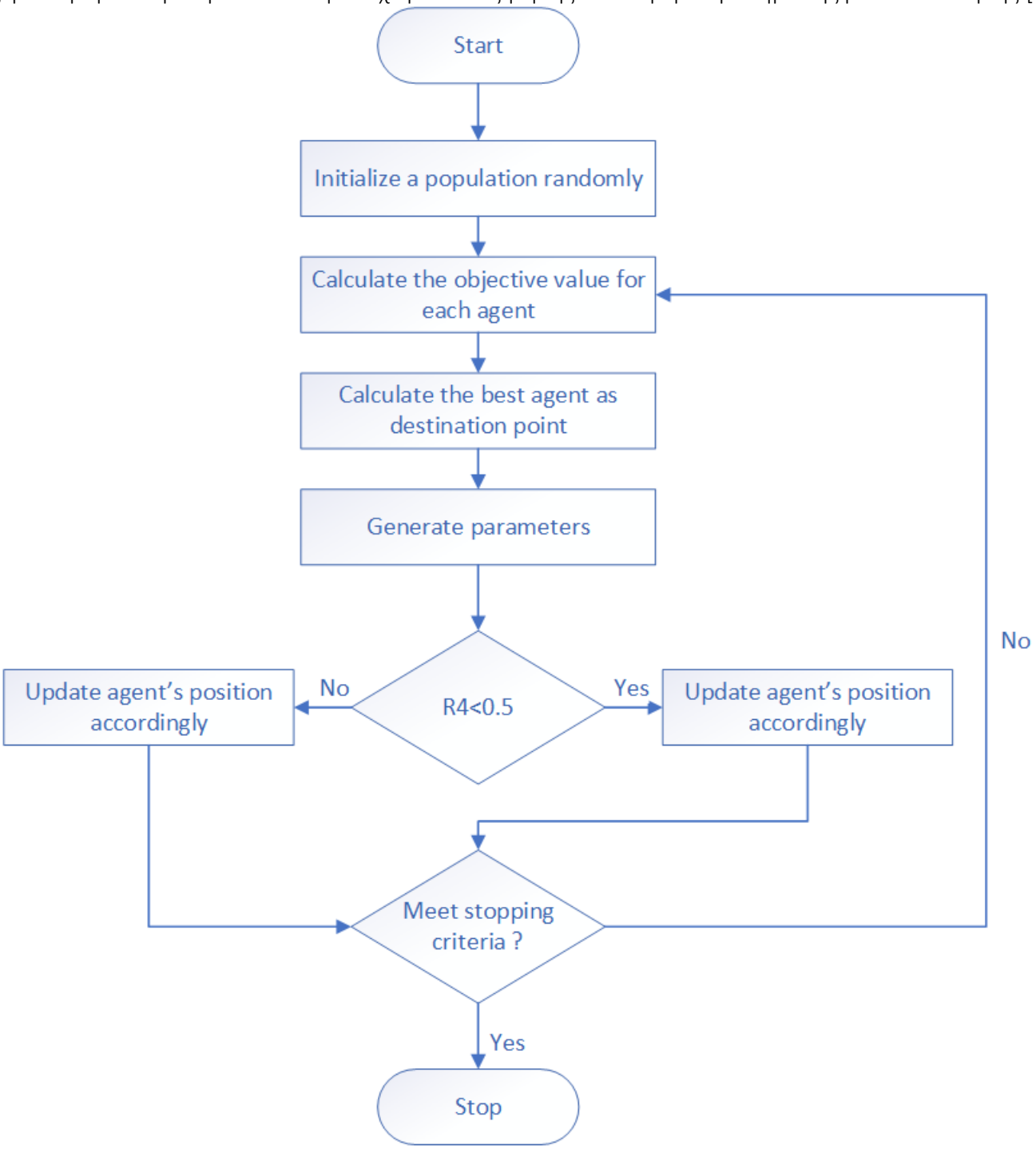
Σχήμα 4-6 : Το flowchart του Grasshopper Optimization Algorithm.

Ο Multi-Verse Optimizer (MVO) βασίζεται σε τρεις έννοιες της κοσμολογίας: λευκή τρύπα, μαύρη τρύπα και σκουληκότρυπα. Τα μαθηματικά μοντέλα αυτών των τριών εννοιών αναπτύσσονται για να εκτελούν εξερεύνηση, εκμετάλλευση και τοπική αναζήτηση, αντίστοιχα.[33]



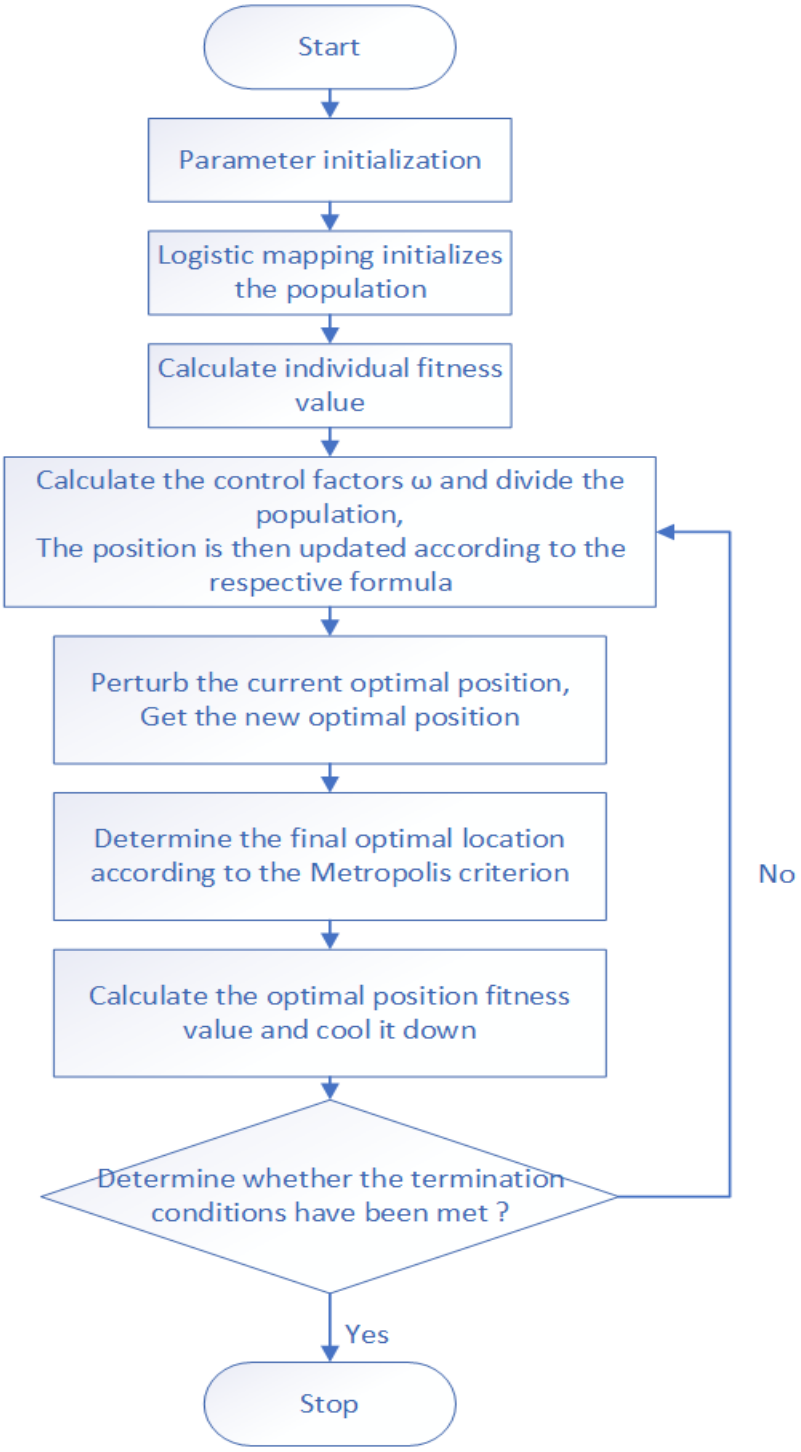
Σχήμα 4-7 : Το flowchart του Multi-Verse Optimizer.

Ο αλγόριθμος Sine Cosine Algorithm (SCA) δημιουργεί πολλαπλές αρχικές τυχαίες υποψήφιες λύσεις και απαιτεί από αυτές να αυξομειώνονται προς τα έξω ή προς την καλύτερη λύση χρησιμοποιώντας ένα μαθηματικό μοντέλο που βασίζεται στις συναρτήσεις ημιτόνου και συνημιτόνου. Αρκετές τυχαίες και προσαρμοστικές μεταβλητές ενσωματώνονται επίσης σε αυτόν τον αλγόριθμο για να δοθεί έμφαση στην εξερεύνηση και την εκμετάλλευση του χώρου αναζήτησης σε διάφορα ορόσημα της βελτιστοποίησης.[33]



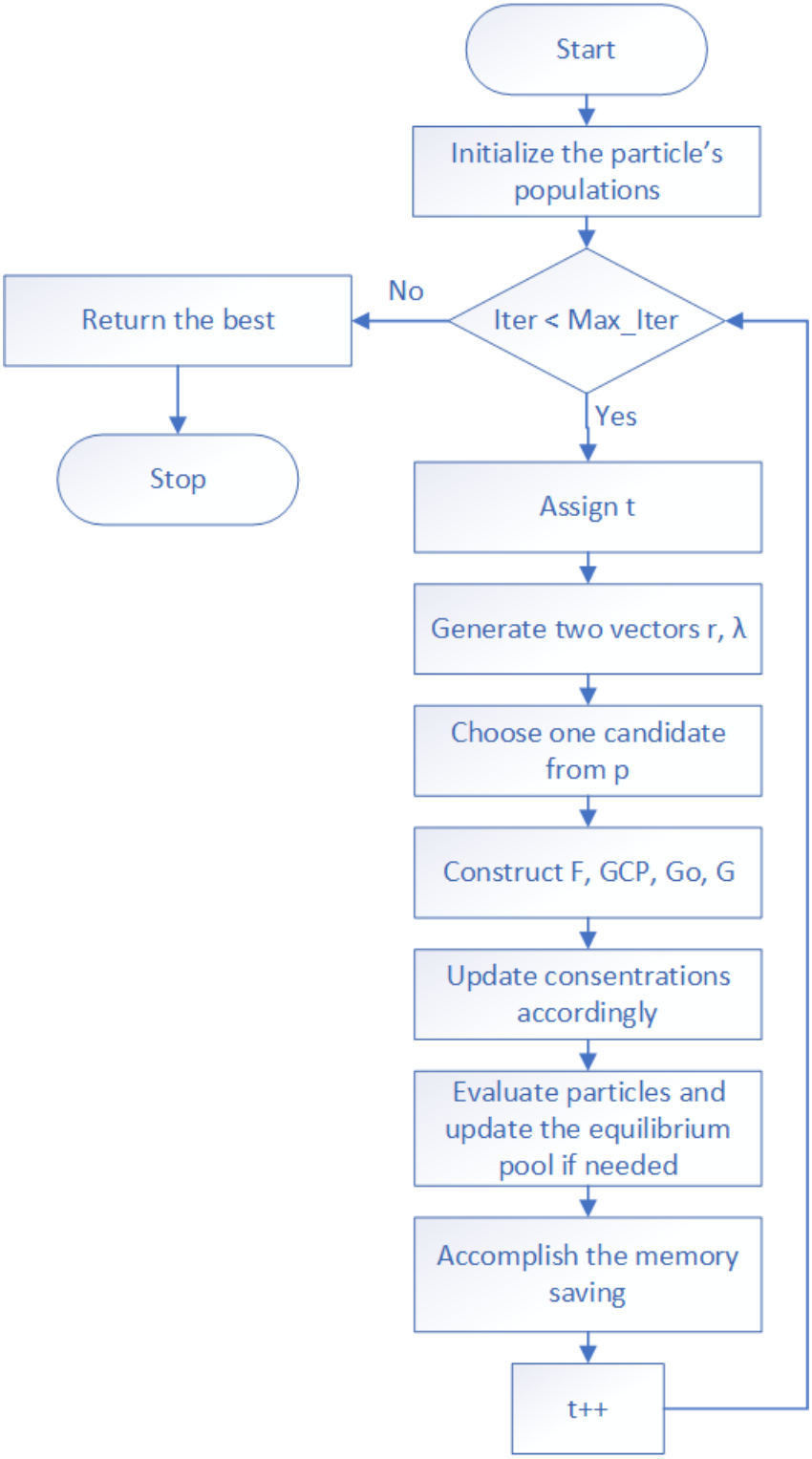
Σχήμα 4-8 : Το flowchart του αλγορίθμου Sine Cosine Algorithm.

Ο αλγόριθμος Salp Swarm Algorithm (SSA) έχει ως κύρια έμπνευση τη συμπεριφορά σμήνους των σαλπίγγων όταν πλοηγούνται και αναζητούν τροφή στους ωκεανούς. Μια από τις πιο ενδιαφέρουσες συμπεριφορές των σαλπίγγων, η οποία ενδιαφέρει την εργασία, είναι η συμπεριφορά σμήνους. Στα βάθη των ωκεανών, τα σαλπς συχνά σχηματίζουν ένα σμήνος που ονομάζεται αλυσίδα σαλπς. Ο κύριος λόγος αυτής της συμπεριφοράς δεν είναι ακόμη πολύ σαφής, αλλά ορισμένοι ερευνητές πιστεύουν ότι αυτό γίνεται για την επίτευξη καλύτερης μετακίνησης με τη χρήση γρήγορων συντονισμένων αλλαγών και την αναζήτηση τροφής.[33]



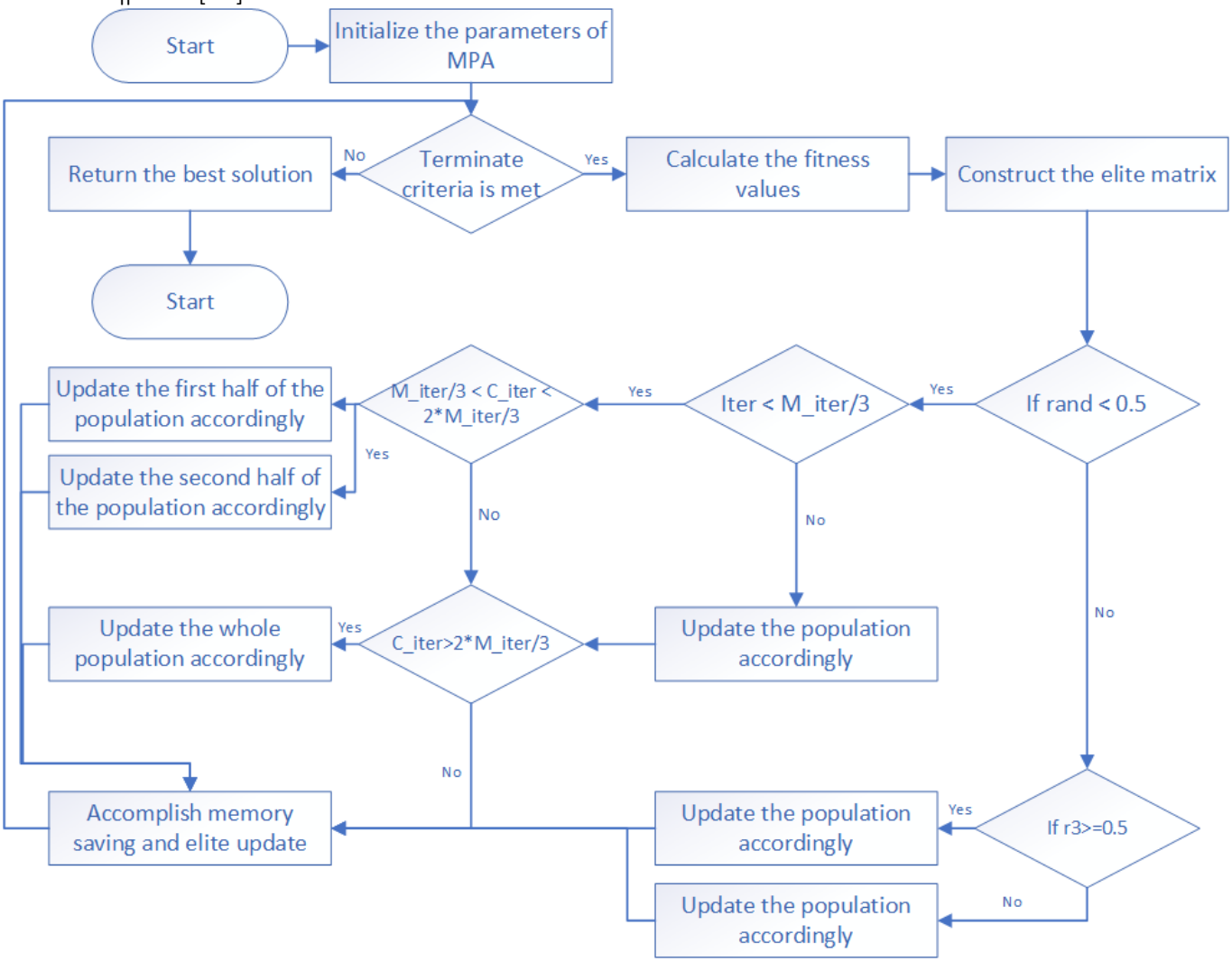
Σχήμα 4-9 : To flowchart του Salp Swarm Algorithm.

Ο αλγόριθμος Equilibrium Optimizer (EO) είναι εμπνευσμένος από μοντέλα ισοζυγίου μάζας όγκου ελέγχου που χρησιμοποιούνται για την εκτίμηση τόσο της δυναμικής όσο και της κατάστασης ισορροπίας. Στον EO, κάθε σωματίδιο (διάλυμα) με τη συγκέντρωσή του (θέση) ενεργεί ως agent αναζήτησης. [34]



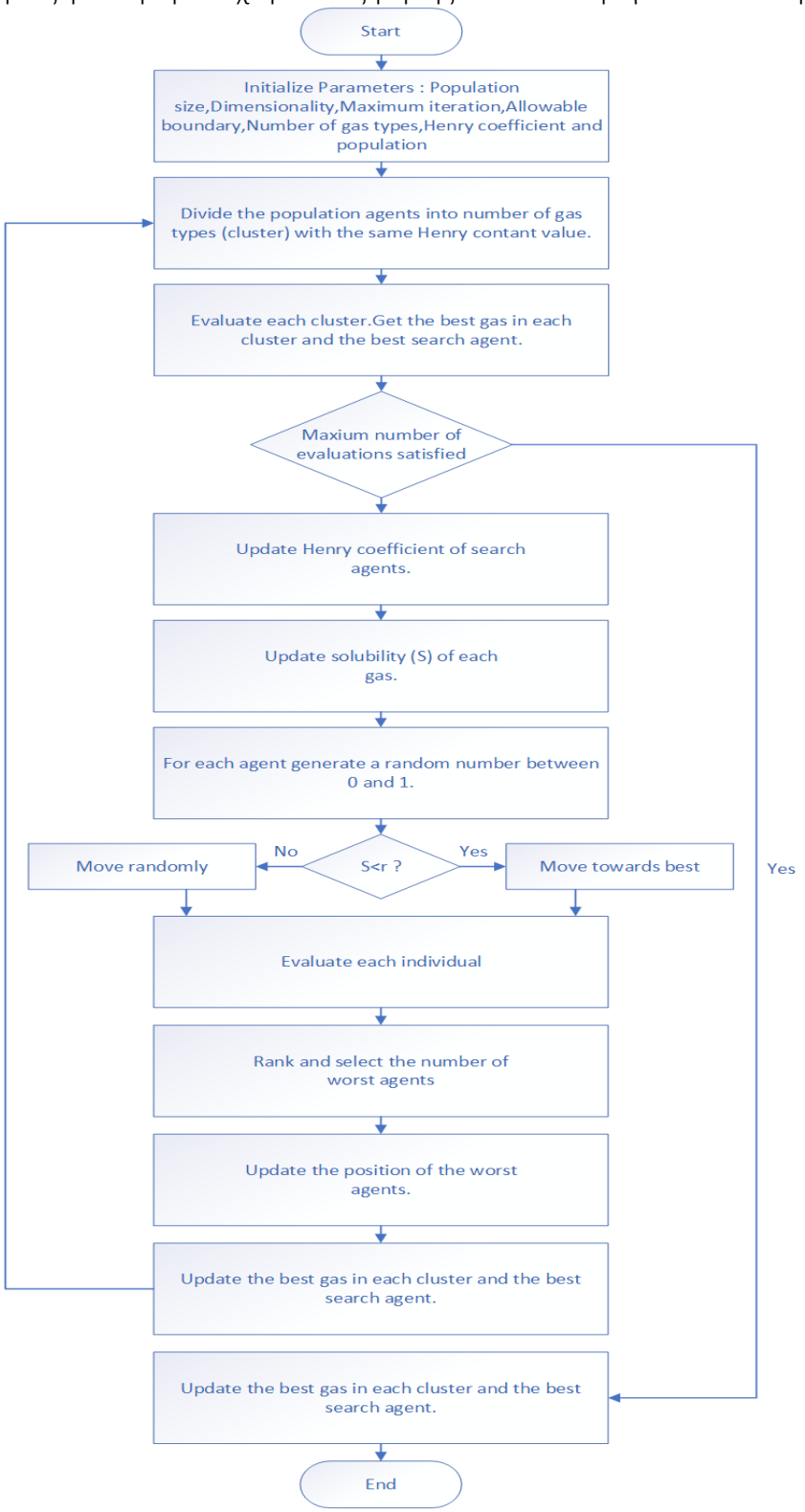
Σχήμα 4-10 : Το flowchart του αλγόριθμου Equilibrium Optimizer.

Ο αλγόριθμος Marine Predator Algorithm (MPA) έχει ως κύρια έμπνευση την ευρέως διαδεδομένη στρατηγική αναζήτησης τροφής, δηλαδή τις κινήσεις Lévy και Brown στα ωκεάνια αρπακτικά μαζί με την πολιτική βέλτιστου ρυθμού συνάντησης στη βιολογική αλληλεπίδραση μεταξύ αρπακτικού και θηράματος. Ο MPA ακολουθεί τους κανόνες που διέπουν φυσικά τη βέλτιστη στρατηγική αναζήτησης τροφής και την πολιτική του ρυθμού συνάντησης μεταξύ θηρευτή και θηράματος στα θαλάσσια οικοσυστήματα. [35]



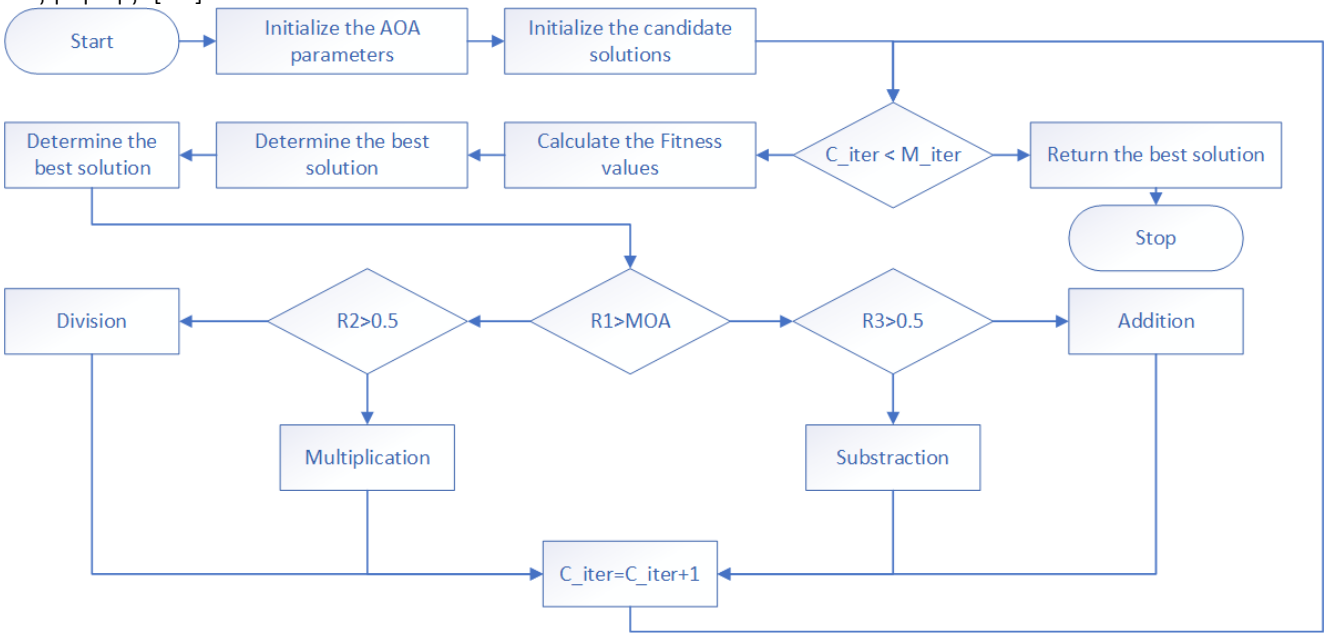
Σχήμα 4-11 : Το flowchart του Marine Predator Algorithm.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης διαλυτότητας αερίου Henry (HGSO) μιμείται τη συμπεριφορά που διέπετε από το νόμο του Henry για την επίλυση δύσκολων προβλημάτων βελτιστοποίησης. Ο αλγόριθμος HGSO μιμείται τη συμπεριφορά του αερίου ως προς τη συσσώρευση για να εξισορροπήσει την εκμετάλλευση και την εξερεύνηση στο χώρο αναζήτησης και να αποφύγει τα τοπικά βέλτιστα. [36]



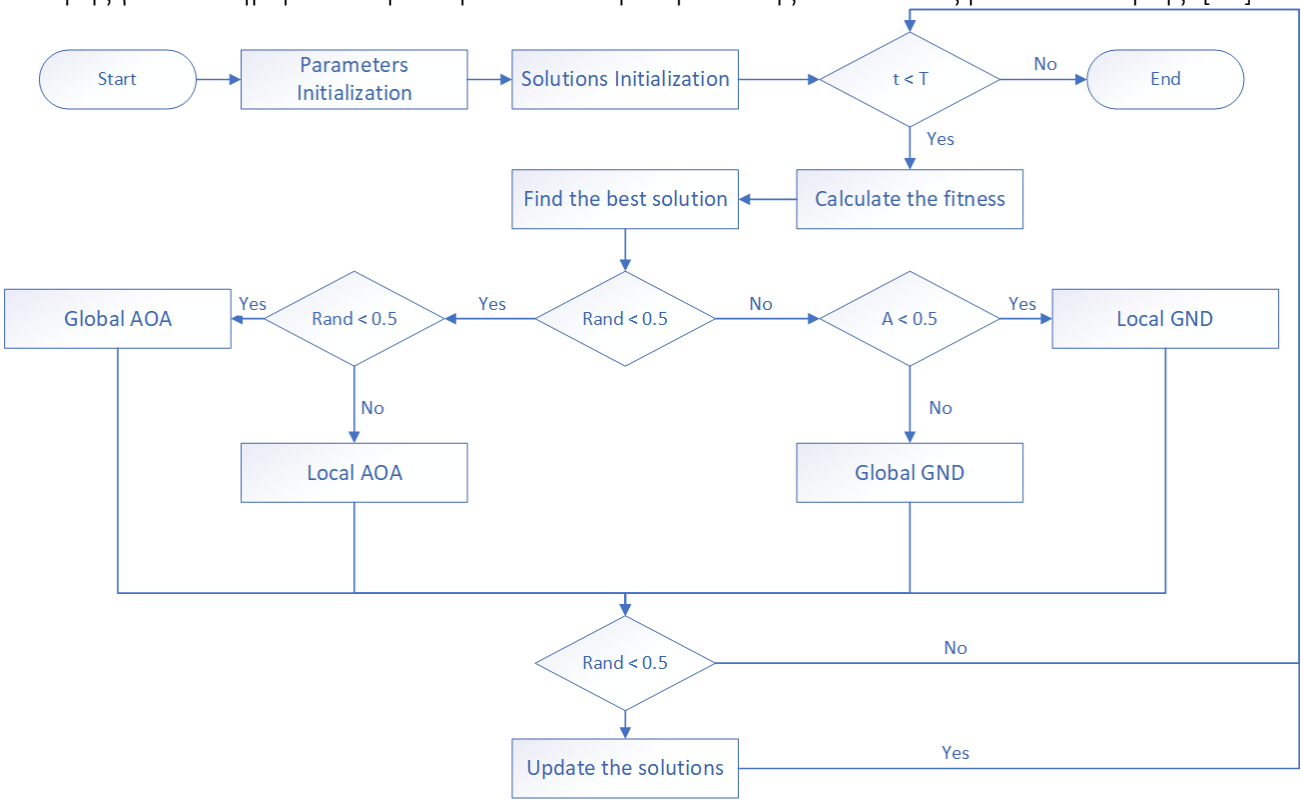
Σχήμα 4-12: Το flowchart του αλγόριθμου βελτιστοποίησης διαλυτότητας αερίου Henry.

Ο αλγόριθμος αριθμητικής βελτιστοποίησης (AOA) που χρησιμοποιεί τη συμπεριφορά κατανομής των κύριων αριθμητικών τελεστών στα μαθηματικά, συμπεριλαμβανομένων (πολλαπλασιασμός (M), διαίρεση (D), αφαίρεση (S) και πρόσθεση (A)). Η AOA μοντελοποιείται μαθηματικά και υλοποιείται για την εκτέλεση των διαδικασιών βελτιστοποίησης σε ένα ευρύ φάσμα χώρων αναζήτησης. [37]



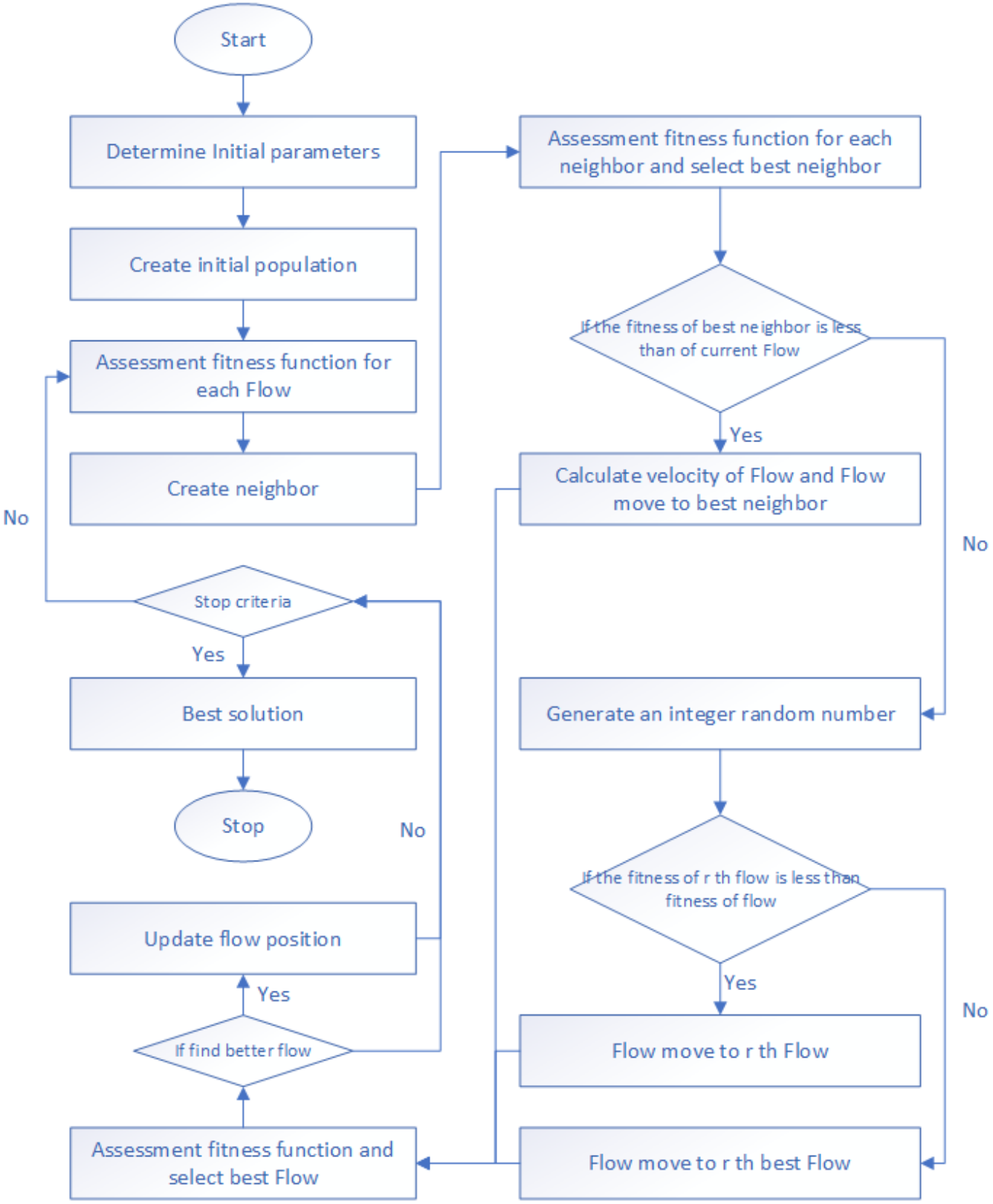
Σχήμα 4-13 : Το flowchart του αλγόριθμου αριθμητικής βελτιστοποίησης.

Ο αλγόριθμος Generalized Normal Distribution Optimization (GNDO) χρησιμοποιεί το μοντέλο γενικευμένης κανονικής κατανομής. Κάθε άτομο χρησιμοποιεί μια καμπύλη γενικευμένης κανονικής κατανομής για να ενημερώνει τη θέση του κατά τη διάρκεια της διαδικασίας βελτιστοποίησης. [38]



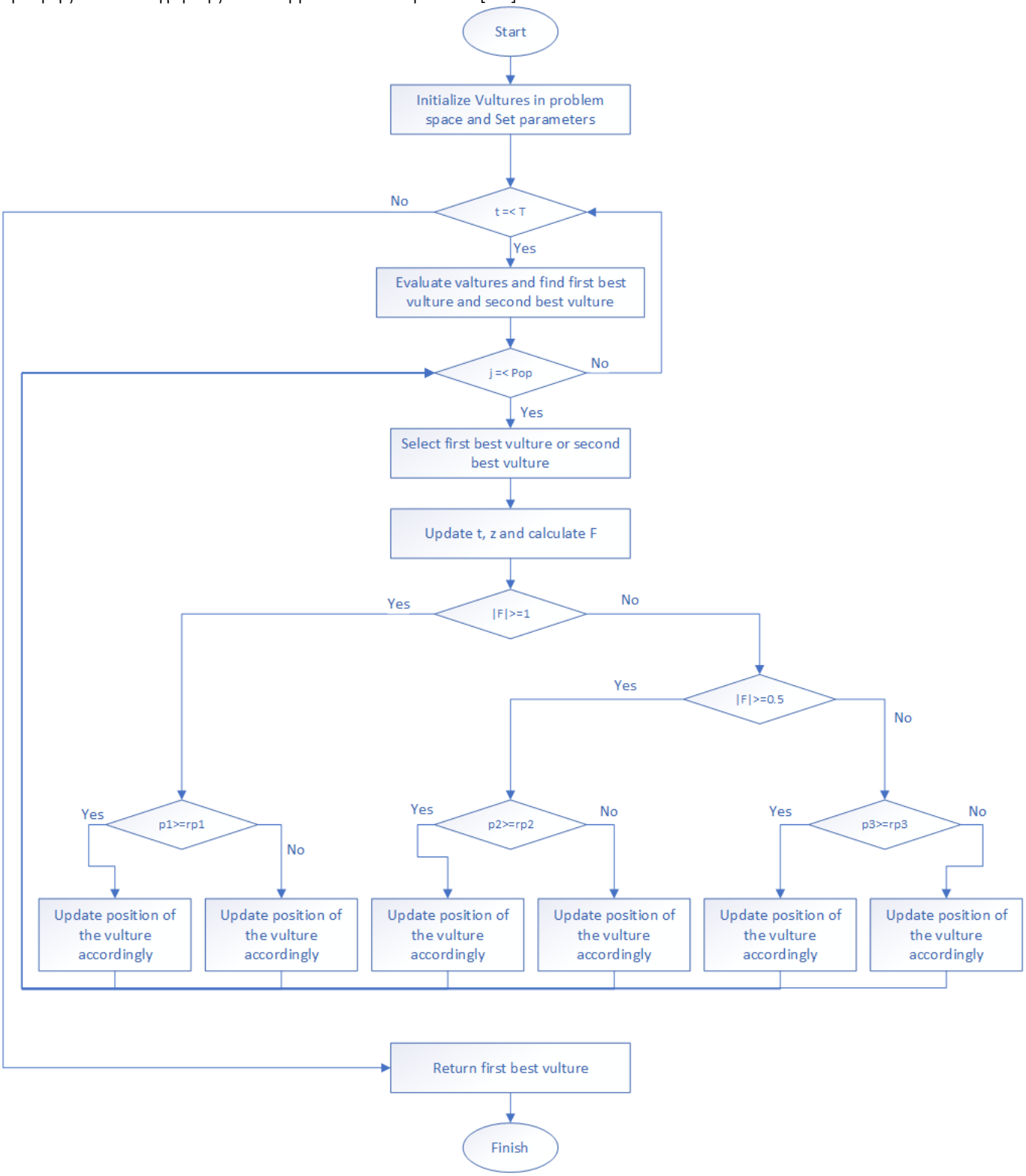
Σχήμα 4-14: Το flowchart του αλγόριθμου Generalized Normal Distribution Optimization.

Ο Flow Direction Algorithm (FDA) μιμείται την κατεύθυνση της ροής προς το σημείο εξόδου με το χαμηλότερο ύψος σε μια λεκάνη απορροής. Με άλλα λόγια, η ροή κινείται προς τον γείτονα με το χαμηλότερο ύψος ή την καλύτερη αντικειμενική συνάρτηση. [39]



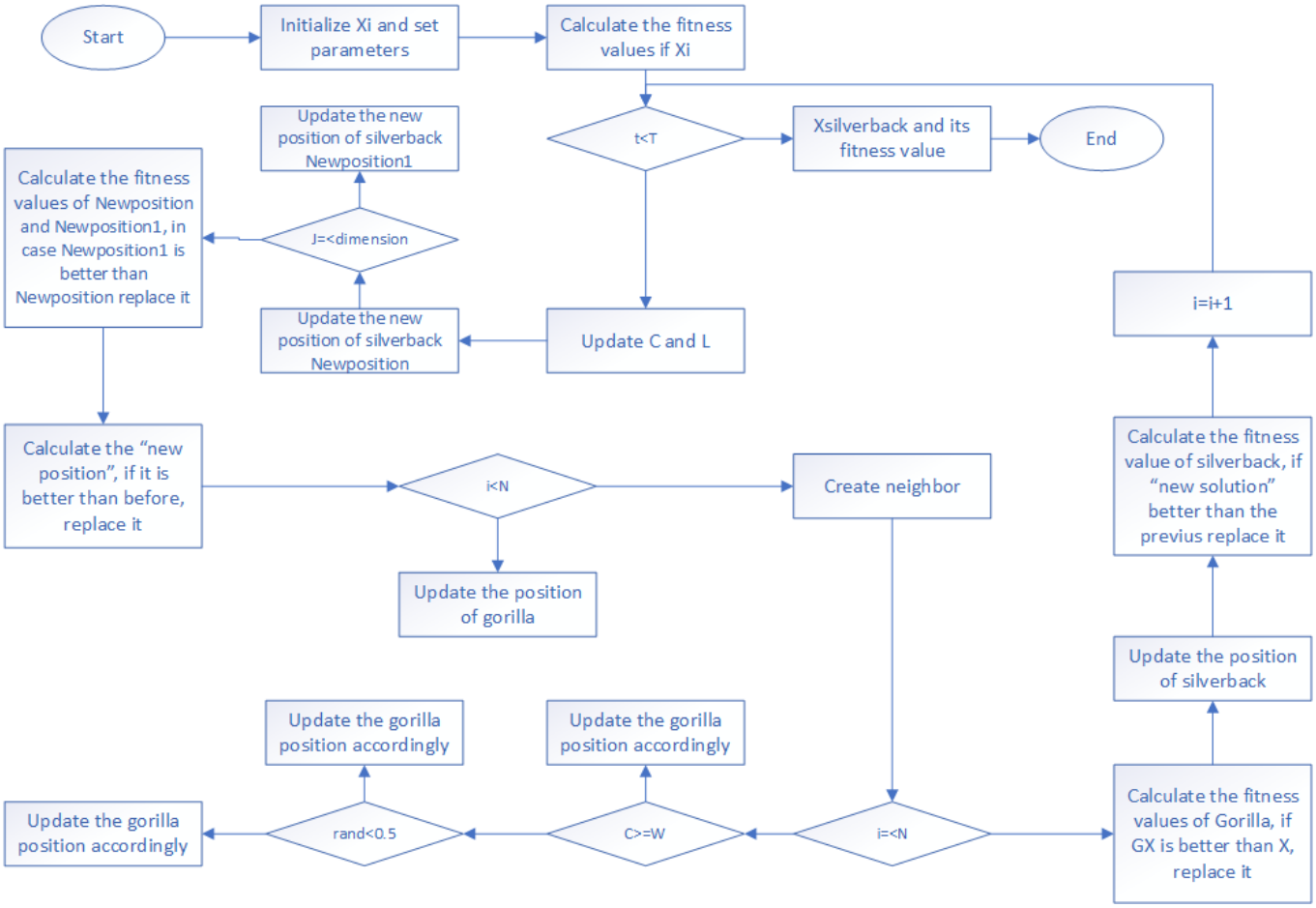
Σχήμα 4-15 : Το flowgraph του Flow Direction Algorithm.

Ο African vultures optimization algorithm (AVOA) προσομοιώνει τις συμπεριφορές αναζήτησης τροφής και πλοήγησης των αφρικανικών όρνεων.[40]



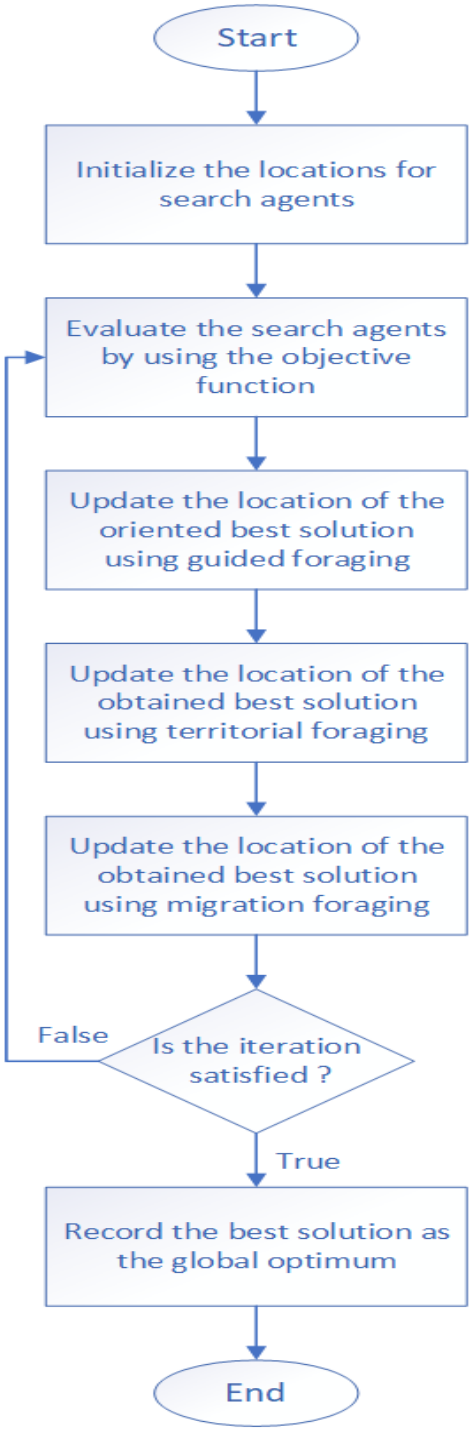
Σχήμα 4-16 : Το flowchart του African vultures optimization algorithm.

Ο Artificial gorilla troops optimizer (AGTO) είναι εμπνευσμένος από την κοινωνική νοημοσύνη των γορίλων στη φύση. [41]



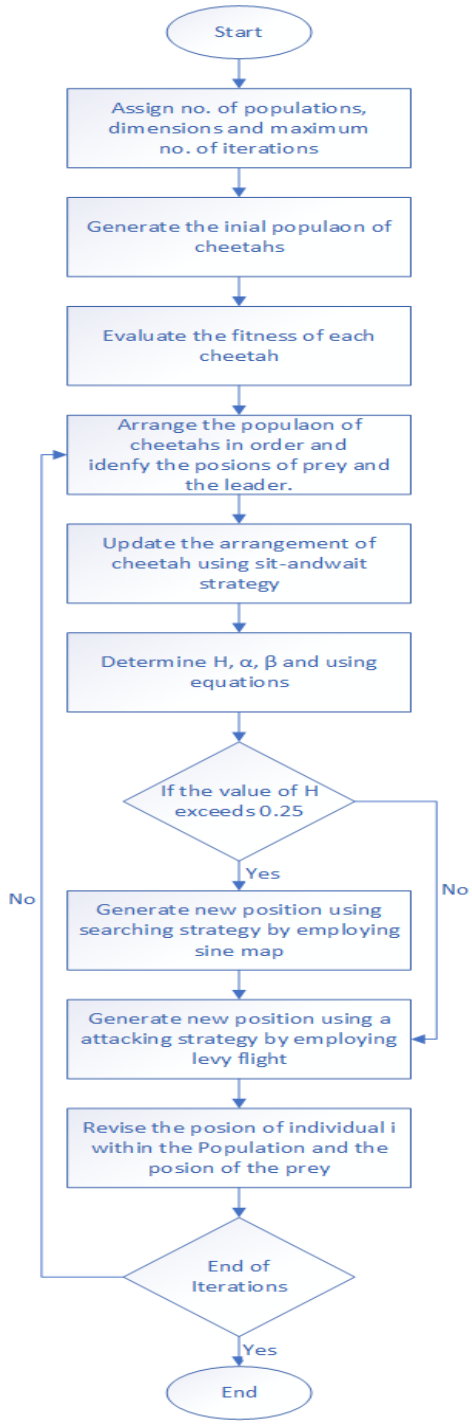
Σχήμα 4-17 : Το flowchart του Artificial gorilla troops optimizer.

Ο Artificial Hummingbird Algorithm (AHA) προσομοιώνει τις ιδιαίτερες ικανότητες πτήσης και τις έξυπνες στρατηγικές αναζήτησης τροφής των κολιμπρί στη φύση. Μοντελοποιούνται τρία είδη δεξιοτήτων πτήσης που χρησιμοποιούνται στις στρατηγικές αναζήτησης τροφής, συμπεριλαμβανομένων των αξονικών, διαγώνιων και πανκατευθυντικών πτήσεων. Επιπλέον, υλοποιούνται η καθοδηγούμενη αναζήτηση τροφής, η εδαφική αναζήτηση τροφής και η μεταναστευτική αναζήτηση τροφής και κατασκευάζεται ένας πίνακας επισκέψεων για τη μοντελοποίηση της λειτουργίας μνήμης των κολιμπρί για τις πηγές τροφής.[42]



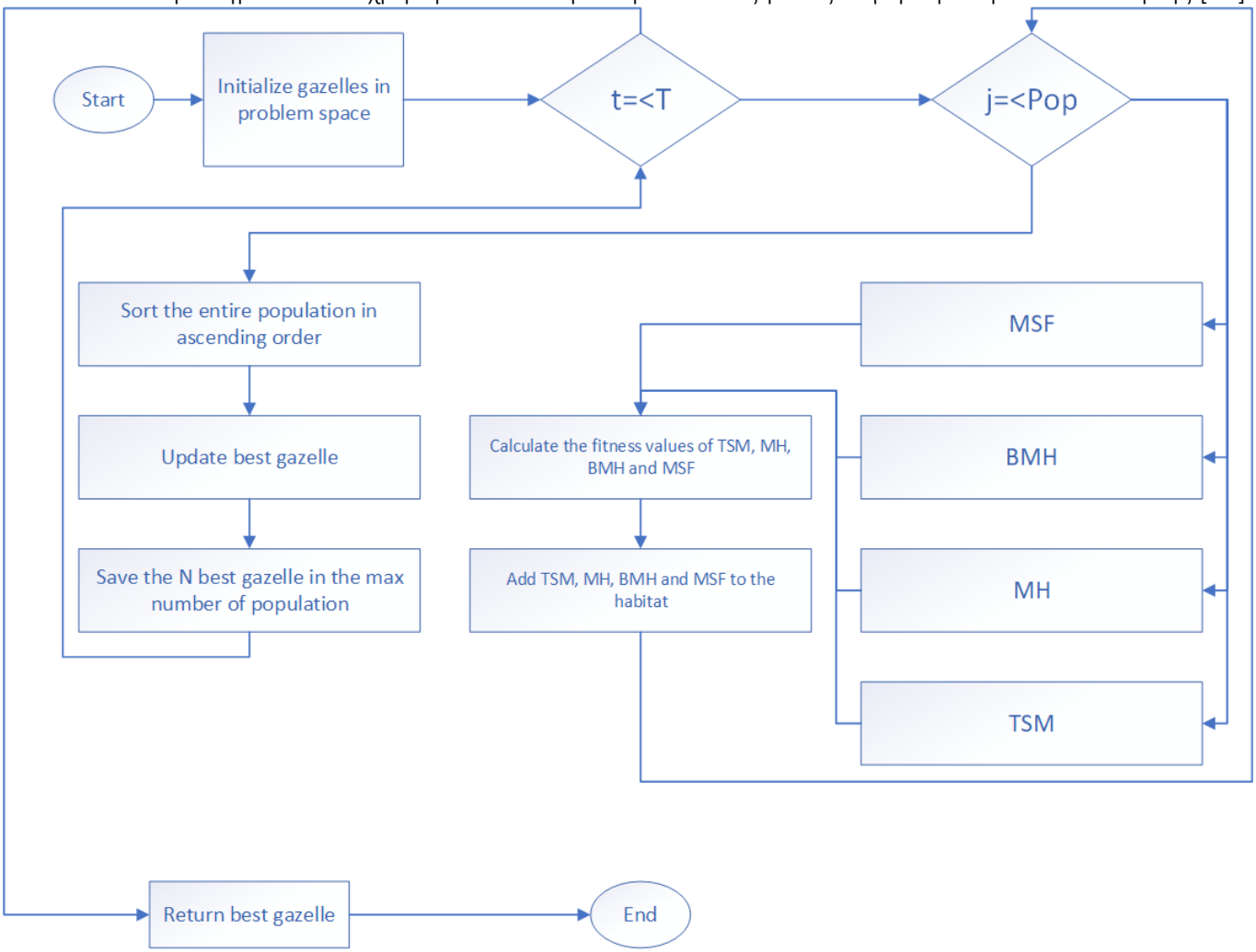
Σχήμα 4-18 : Το flowchart του Artificial Hummingbird Algorithm.

Ο Cheetah Optimizer (CO) προσομοιώνει την ειδική στρατηγική cheetah. Οι τσίτα χρησιμοποιούν συνήθως τρεις βασικές στρατηγικές κατά τη διάρκεια των κυνηγετικών τους προσπαθειών, δηλαδή την αναζήτηση, το κάθισμα και την αναμονή και την επίθεση. Η παρούσα μελέτη ενσωματώνει αυτές τις στρατηγικές στο πλαίσιό της. Επιπλέον, η στρατηγική της εγκατάλειψης του θηράματος και της επιστροφής στον βιότοπο ενσωματώνεται επίσης στη διαδικασία κυνηγιού για να ενισχυθεί η διαφοροποίηση του πληθυσμού, η απόδοση σύγκλισης και η ευρωστία του προτεινόμενου πλαισίου.[43]



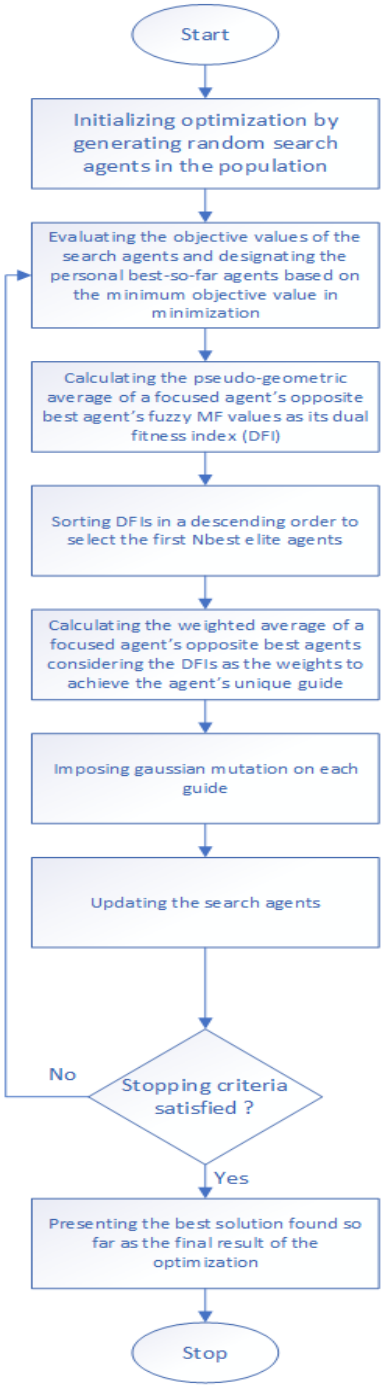
Σχήμα 4-19 : Το flowchart του Cheetah Optimizer.

Στον αλγόριθμο Mountain Gazelle Optimizer (MGO), η ιεραρχική και κοινωνική ζωή των γαζελών διατυπώνεται μαθηματικά και χρησιμοποιείται για την ανάπτυξη ενός αλγορίθμου βελτιστοποίησης.[44]



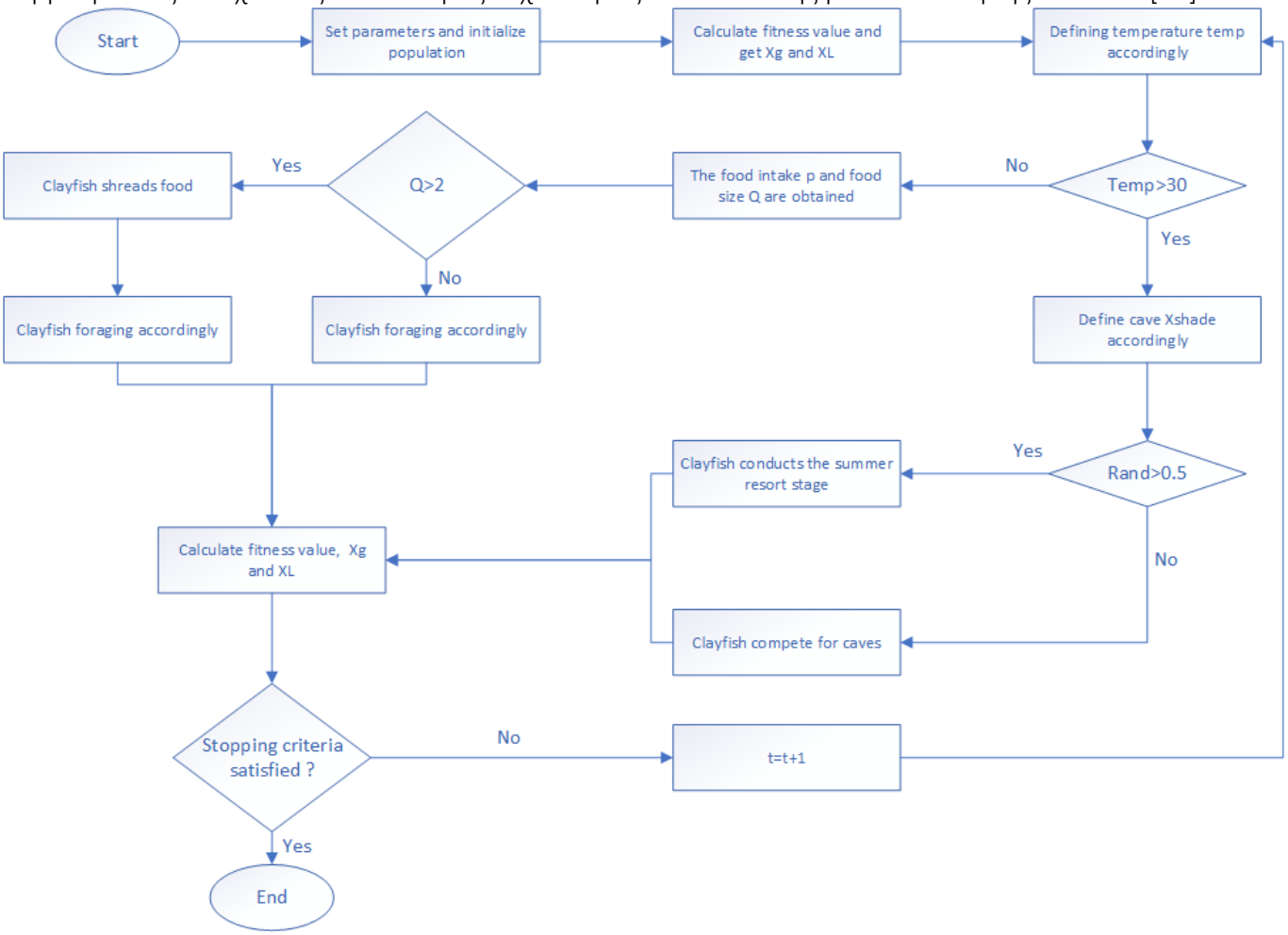
Σχήμα 4-20 : Το flowchart του Mountain Gazelle Optimizer.

Ο αλγόριθμος Geometric Mean Optimizer (GMO) μιμείται τον τελεστή γεωμετρικού μέσου των μαθηματικών. Εισάγει τον δείκτη διπλής καταλληλότητας (Dual-Fitness Index - DFI), έναν νέο δείκτη που αξιολογεί τόσο την καταλληλόλητά όσο και την ποικιλομορφία των παραγόντων αναζήτησης. Αυτό βοηθά στην επιλογή ικανών οδηγών χωρίς να χρειάζεται να γνωρίζει κανείς τη φάση της διαδικασίας βελτιστοποίησης. Επιλύει το πρόβλημα της οριοθέτησης των φάσεων εξερεύνησης και εκμετάλλευσης, η οποία διαφέρει από πρόβλημα σε πρόβλημα. Άλλα πλεονεκτήματα περιλαμβάνουν τη χρήση μοναδικών οδηγών για τους πράκτορες αναζήτησης, την εφαρμογή μετάλλαξης Gauss και τη μη απαίτηση συντονισμού παραμέτρων για αξιόπιστα αποτελέσματα.[45]



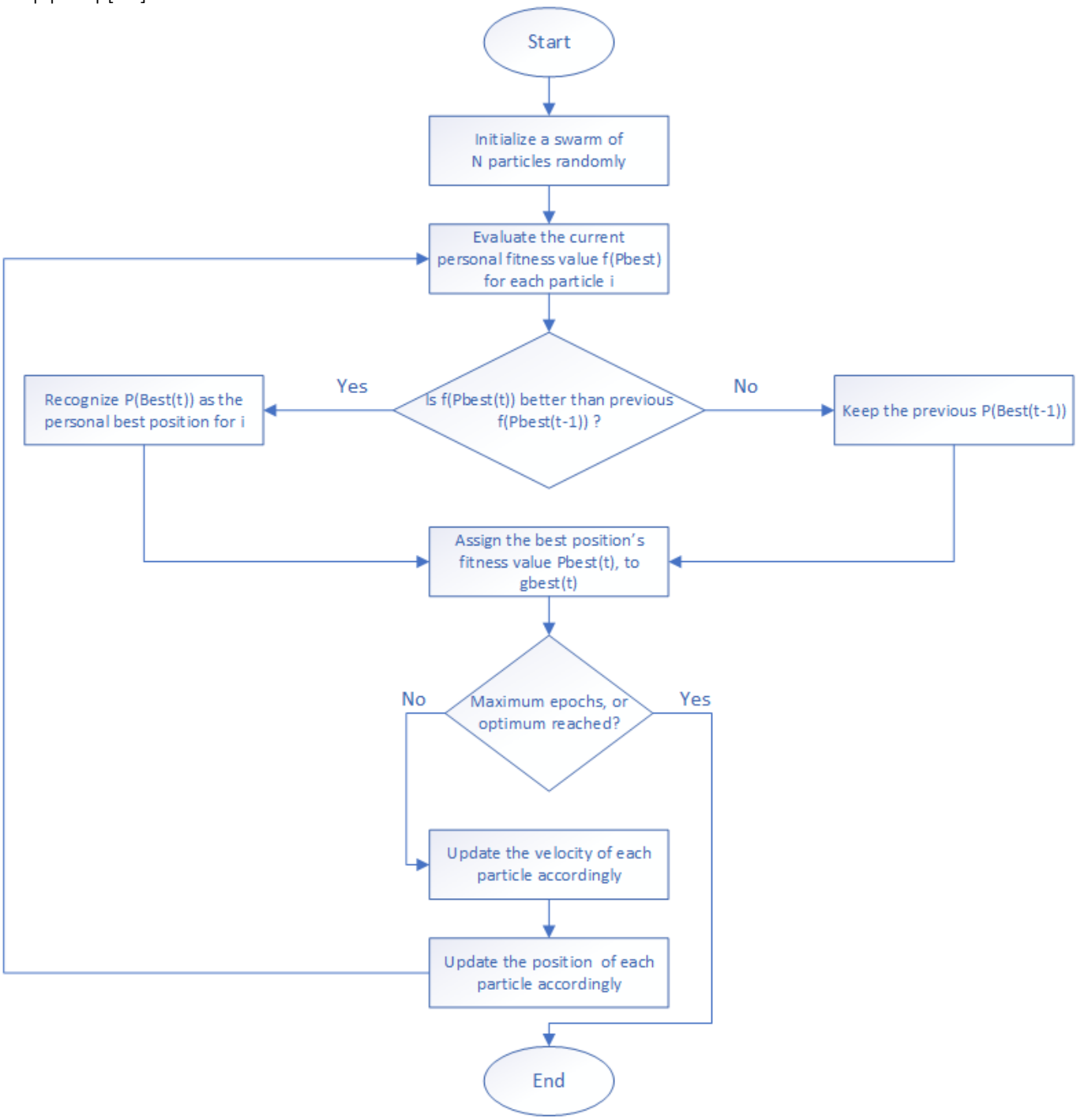
Σχήμα 4-21 : Το flowchart του Geometric Mean Optimizer.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης καραβίδας (COA) είναι μια μεταευρετική μέθοδος βελτιστοποίησης εμπνευσμένη από τη συμπεριφορά καραβίδας. Ο COA μιμείται τρεις βασικές συμπεριφορές των καραβίδων - τη συμπεριφορά θερινού καταφυγίου, τη συμπεριφορά ανταγωνισμού και τη συμπεριφορά αναζήτησης τροφής, καθεμία από τις οποίες αντιστοιχεί σε διαφορετικά αλγοριθμικά στάδια. Τα στάδια αυτά αποσκοπούν στην εξισορρόπηση της εξερεύνησης και της εκμετάλλευσης. Κατά τη διάρκεια του σταδίου "θερινό θέρετρο", ο COA διερευνά λύσεις. Τα στάδια "ανταγωνισμού" και "αναζήτησης τροφής" αντιπροσωπεύουν τη φάση της εκμετάλλευσης. Ο έλεγχος της θερμοκρασίας καθοδηγεί τη μετάβαση μεταξύ αυτών των σταδίων, με τις υψηλές θερμοκρασίες να ωθούν τις καραβίδες να αναζητήσουν καταφύγιο ή να ανταγωνιστούν για σπηλιές, ενώ οι κατάλληλες θερμοκρασίες υπαγορεύουν στρατηγικές αναζήτησης τροφής με βάση το μέγεθος της τροφής. Η ρύθμιση της θερμοκρασίας ενισχύει τις δυνατότητες τυχαιότητας και συνολικής βελτιστοποίησης του COA.[46]



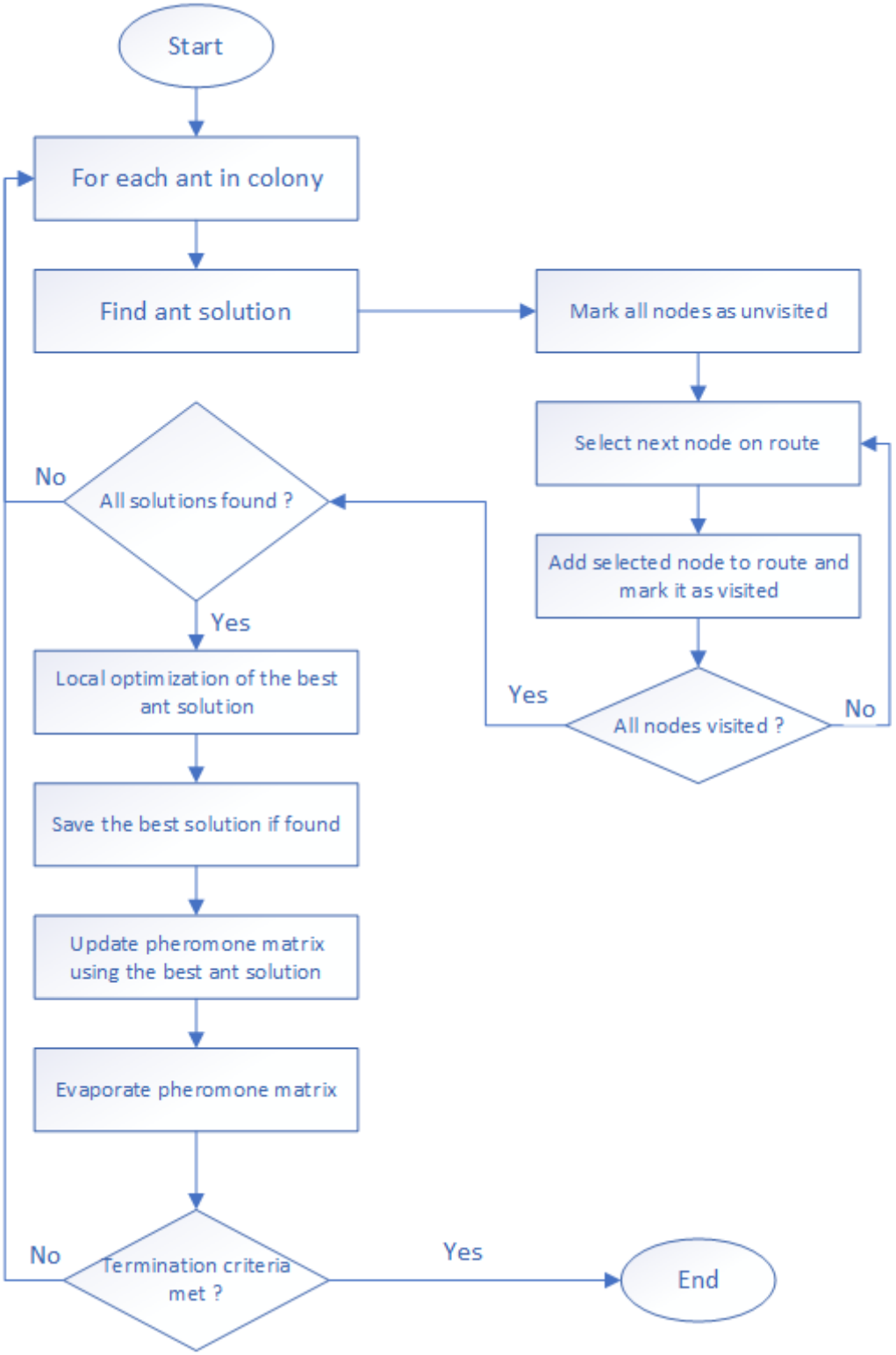
Σχήμα 4-22 : Το flowchart του αλγόριθμου βελτιστοποίησης καραβίδας.

Ο αλγόριθμος Particle Swarm Optimization (PSO) μιμείται τη συμπεριφορά των σμηνών πουλιών στη φύση.[47]



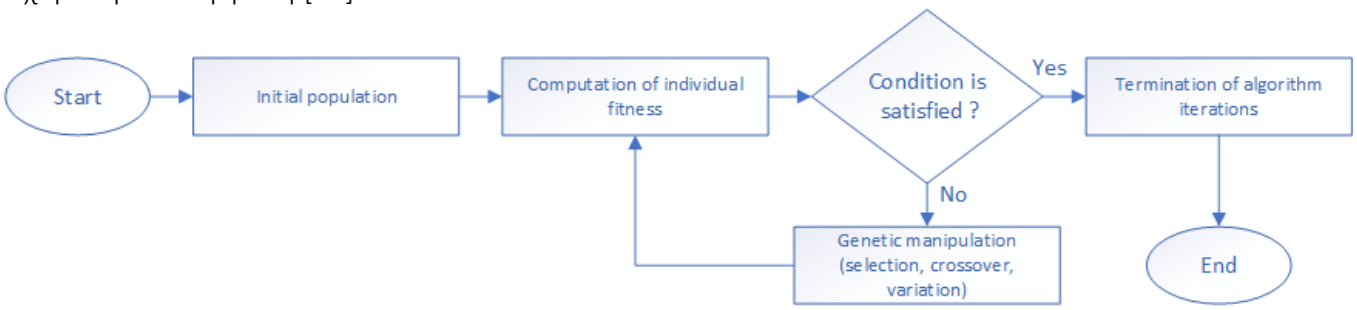
Σχήμα 4-23 : Το flowchart του αλγόριθμου Particle Swarm Optimization.

Ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης Ant Colony Optimization (ACO) επιλύει προβλήματα βελτιστοποίησης με παρόμοιο τρόπο που τα μυρμήγκια βρίσκουν τη συντομότερη διαδρομή από μια πηγή τροφής προς τη φωλιά τους.[48]



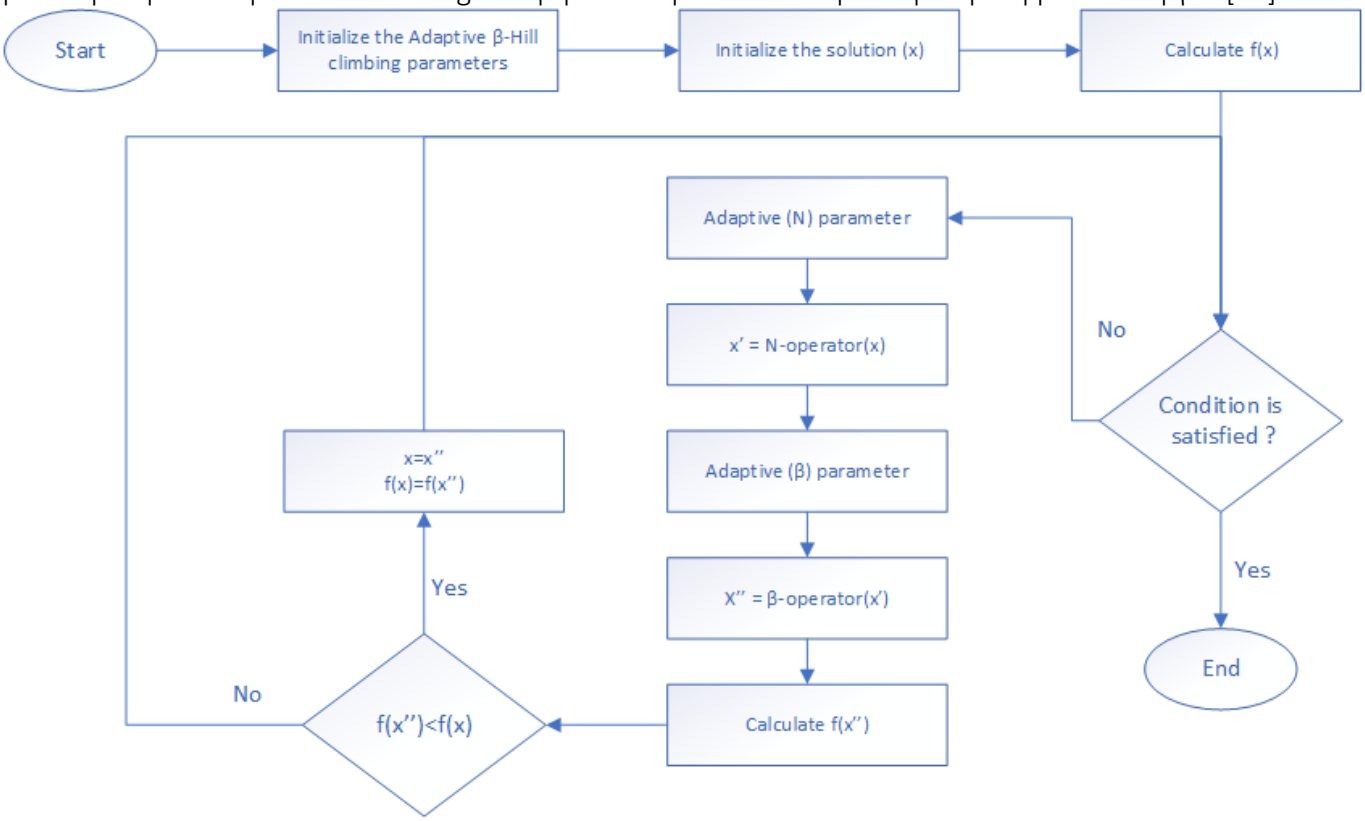
Σχήμα 4-24 : Το flowchart του αλγόριθμου βελτιστοποίησης Ant Colony Optimization.

Ο αλγόριθμος Genetic Algorithm (GA) εμπνέεται από τη δαρβινική θεωρία της επιβίωσης του ισχυρότερου στη φύση.[33]



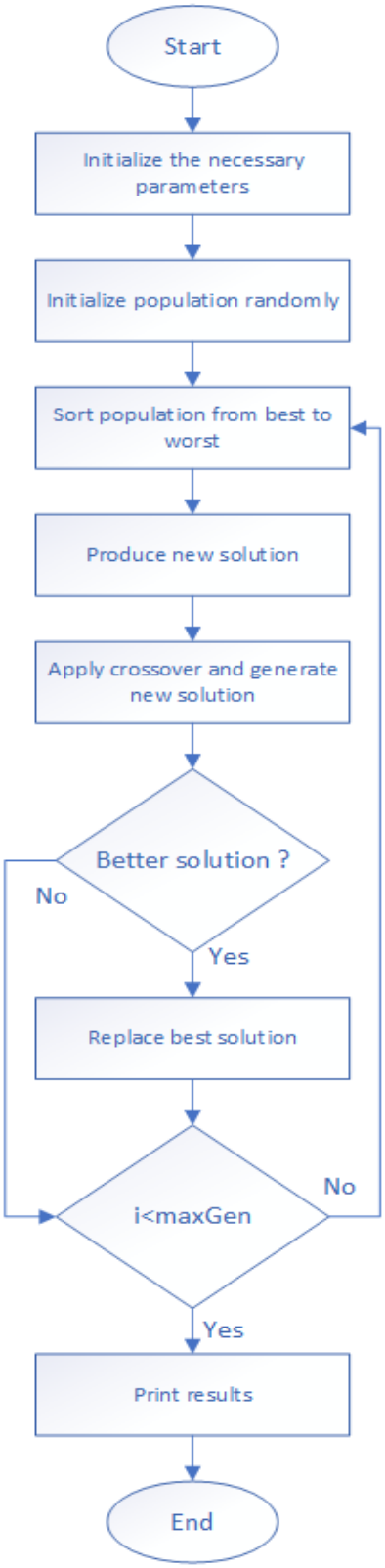
Σχήμα 4-25 : Το flowchart του Genetic Algorithm.

Ο αλγόριθμος Hill Climbing (HC) είναι ένας αλγόριθμος τοπικής αναζήτησης που προσπαθεί να βρει μια καλύτερη λύση κάνοντας μια σταδιακή αλλαγή στη λύση. Η Simulated Annealing (SA) είναι μια βελτιωμένη έκδοση του hill climbing που μιμείται τη διαδικασία βασισμένη στη μεταλλουργία.[49]



Σχήμα 4-26 : Το flowchart του Hill climbing.

Η Differential evolution (DE) είναι ένας αλγόριθμος βελτιστοποίησης που βελτιστοποιεί ένα πρόβλημα προσπαθώντας επαναληπτικά να βελτιώσει μια υποψήφια λύση σε σχέση με ένα δεδομένο μέτρο ποιότητας.[50]



Σχήμα 4-27 : Το flowchart του αλγορίθμου differential evolution.

4.3 Περαιτέρω επιλογές για την ανάπτυξη των αλγορίθμων στο μέλλον.

Στο πεδίο της επίλυσης προβλημάτων και της βελτιστοποίησης, η συγχώνευση των νευρωνικών δικτύων (NN) με αλγορίθμους τύπου nature inspired αποτελεί μια νέα ενδιαφέρουσα προσέγγιση. Η παρούσα ενότητα εμβαθύνει στη συμβιωτική σχέση μεταξύ αυτών των δύο μεθοδολογιών, διερευνώντας πώς η ενσωμάτωσή τους ενισχύει τις δυνατότητες των συστημάτων βελτιστοποίησης σε διάφορους τομείς γενικώς αλλά και στην περίπτωση της κατάλυσης ειδικώς.

Τα νευρωνικά δίκτυα, που μιμούνται τις περίπλοκες λειτουργίες του ανθρώπινου εγκεφάλου, διαθέτουν μια αξιοσημείωτη ικανότητα να επεξεργάζονται τεράστιες ποσότητες δεδομένων και να διακρίνουν περίπλοκα μοτίβα μέσα σε αυτές. Αυτή η ικανότητα αποτελεί τη βάση των αλγορίθμων βελτιστοποίησης, όπου η ανάλυση σύνθετων, πολυδιάστατων συνόλων δεδομένων είναι συχνά καθοριστική. Αξιοποιώντας μηχανισμούς προσαρμοστικής μάθησης, τα NN μπορούν να εξάγουν σημαντικές γνώσεις από τα ακατέργαστα δεδομένα, διευκολύνοντας έτσι τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σε διαδικασίες βελτιστοποίησης.

Από την άλλη πλευρά, οι αλγόριθμοι nature inspired αντλούν έμπνευση από βιολογικά συστήματα και φυσικά φαινόμενα για να αντιμετωπίσουν προκλήσεις βελτιστοποίησης. Οι γενετικοί αλγόριθμοι (ΓΑ), για παράδειγμα, μιμούνται τη διαδικασία της φυσικής επιλογής για να εξελίσσουν λύσεις επαναληπτικά, βελτιώνοντάς τις σταδιακά σε διαδοχικές γενιές. Ομοίως, οι αλγόριθμοι βελτιστοποίησης αποικιών μυρμηγκιών (ACO) αναπαράγουν τη συμπεριφορά αναζήτησης τροφής των μυρμηγκιών, χρησιμοποιώντας ίχνη φερόμενης για να καθοδηγήσουν την αναζήτηση βέλτιστων λύσεων.

Η ενσωμάτωση των NN με αλγορίθμους nature inspired προαναγγέλλει μια νέα εποχή στις τεχνικές βελτιστοποίησης, όπου τα πλεονεκτήματα και των δύο προσεγγίσεων συνδυάζονται. Ενδεικτικά θα μπορούσε να εκπαιδευτεί ένα νευρωνικό δίκτυο για να προβλέψει την καταλληλόλητά των υποψήφιων λύσεων που παράγονται από έναν ΓΑ, η διαδικασία βελτιστοποίησης γίνεται πιο αποτελεσματική και στοχευμένη. Το NN λειτουργεί ως υποκατάστατο μοντέλο, παρακάμπτοντας την ανάγκη για εξαντλητικές αξιολογήσεις κάθε λύσης και καθοδηγώντας την αναζήτηση προς υποσχόμενες περιοχές του χώρου των λύσεων.

Επιπλέον, ακόμα ένα ενδεικτικό παράδειγμα είναι η σύζευξη των NN με τους αλγορίθμους ACO που εισάγει μια δυναμική διάσταση στη βελτιστοποίηση. Αξιοποιώντας τις δυνατότητες αυτοοργάνωσης των NN, η συμπεριφορά των μυρμηγκιών μπορεί να προσαρμοστεί με βάση τις προβλέψεις, οδηγώντας σε πιο αποτελεσματικούς συμβιβασμούς εξερεύνησης-εκμετάλλευσης. Αυτή η δυναμική προσαρμογή επιτρέπει στον αλγόριθμο ACO να συγκλίνει προς βέλτιστες λύσεις με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, ακόμη και σε πολύπλοκα και δυναμικά περιβάλλοντα.

Συμπερασματικά, η ενσωμάτωση των νευρωνικών δικτύων με αλγορίθμους εμπνευσμένους από τη φύση αποτελεί ένα από τα επόμενα βήματα στην ανάπτυξη λογισμικού για το post process της μαγνητικής κατάλυσης. Αξιοποιώντας τη δύναμη της προσαρμοστικής μάθησης, της αναγνώρισης προτύπων και της αυτοοργάνωσης, τα υβριδικά συστήματα αναδεικνύονται ως ευέλικτα εργαλεία για την αντιμετώπιση σύνθετων εργασιών βελτιστοποίησης (ακόμα και σε άλλους τομείς).

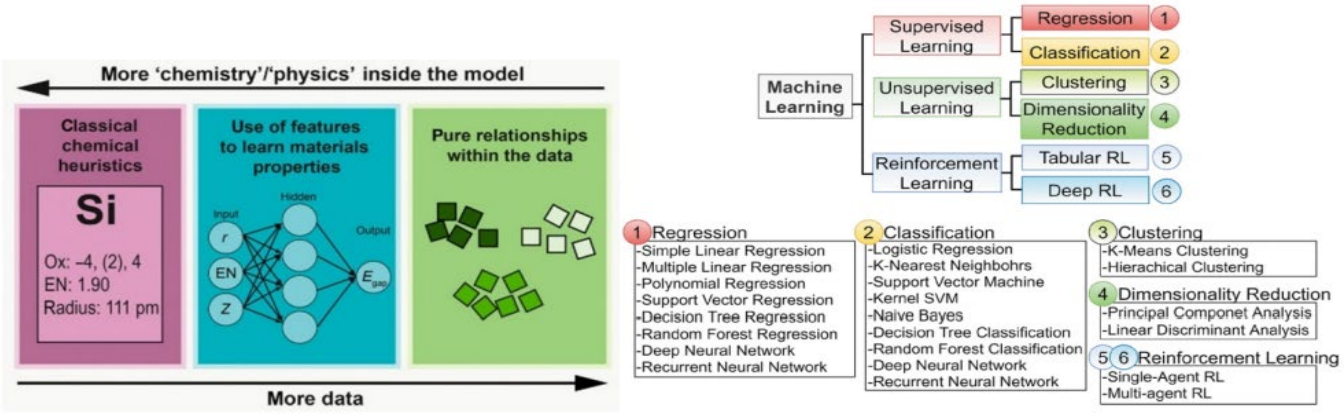


Figure 4-2 : Νέες τάσεις στις χημικές διεργασίες (αριστερά) - Επισκόπηση των σύγχρονων μεθόδων ML και των εφαρμογών τους (δεξιά)

5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας αναπτύχθηκε ένα σύστημα συγκριτικής αξιολόγησης των αλγορίθμων με σκοπό την καλύτερη κατανόηση τους και την εύρεση των στοιχείων στα οποία διακρίνεται ο κάθε ένας. Ορισμένα από αυτά είναι η λειτουργία σε περιβάλλον υψηλού θορύβου, ο χρόνος εκτέλεσης, τα περιθώρια παραλληλοποίησης μέρους του αλγορίθμου με σκοπό την καλύτερη απόδοση στα πλαίσια ενός ετερογενούς συστήματος, το βέλτιστο κόστος και ο αριθμός κλήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης.

Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα αποτελέσματα:

- Λειτουργία σε περιβάλλον υψηλού θορύβου : EDE

Algorithm	mx	my	mz	x	y	z
"DE"	0.13866	0.13561	0.13041	0.03769	0	0
"COF1"	0.18959	0.03651	0.23036	0.0171	0	0
"GWO"	0.17658	0.17284	0.04766	0.0423	0	0
"WOA"	0.01956	0.00201	0.04703	0.01925	0	0
"ALO"	0.17949	0.24898	0.10847	0.03142	0	0
"MFO"	0.27936	0.27601	0.26901	0.07911	0	0
"GOA"	2.3072	0.70791	0.30087	0.90893	0	0
"MVO"	0.16701	0.16774	0.16226	0.04663	0	0
"SCA"	0.17066	0.20171	0.19749	0.05236	0	0
"SSA"	0.05109	0.08445	0.04375	0.00267	0	0
"EO"	0.23126	0.22768	0.2213	0.0646	0	0
"MPA"	0.06388	0.06628	0.07071	0.0451	0	0
"HGSO"	0.69943	0.67199	0.69475	0.32971	0	0
"AOA"	0.66419	0.67163	0.67964	0.2823	0	0
"FDA"	0.08311	0.08544	0.08982	0.05432	0	0
"AVOA"	0.13217	0.13581	0.09837	0.03494	0	0
"GTO"	0.0934	0.09549	0.0997	0.06592	0	0
"MGO"	0.24273	0.23889	0.23278	0.06871	0	0
"COA"	0.05099	0.05575	0.05152	0.01	0	0
"PSO"	0.13052	0.12867	0.12223	0.02282	0	0
"HC"	0.0355	1.10622	4.28787	0.9506	0	0

Figure 5-1 : Το σχετικό σφάλμα τον μαγνητικών ροπών και της θέσης στον άξονα X για θόρυβο 1%.

Algorithm	mx	my	mz	x	y	z
"DE"	0.16363	0.21455	0.16301	0.04249	0	0
"COF1"	0.01933	4.98881	0.1017	0.03063	0	0
"GWO"	0.12758	0.42011	0.12429	0.02932	0	0
"WOA"	0.05463	0.22321	0.04879	0.00893	0	0
"ALO"	0.107	0.0112	0.08596	0.02652	0	0
"MFO"	0.21258	0.27161	0.22053	0.05521	0	0
"GOA"	0.51613	0.7372	0.55663	2.04721	0	0
"MVO"	0.16872	0.19718	0.17296	0.03827	0	0
"SCA"	0.20356	1.59778	0.17568	0.05948	0	0
"SSA"	0.14037	0.1652	0.18046	0.03726	0	0
"EO"	0.16503	0.21335	0.16613	0.0439	0	0
"MPA"	0.09959	0.15011	0.09449	0.01492	0	0
"HGSO"	0.51833	1.52997	0.52638	0.24412	0	0
"AOA"	0.0396	0.58424	0.52383	0.05786	0	0
"FDA"	0.09311	0.14337	0.08834	0.01625	0	0
"AVOA"	0.02956	0.02366	0.02906	0.00277	0	0
"GTO"	0.09302	0.14334	0.08823	0.01596	0	0
"MGO"	0.19714	0.24869	0.19783	0.05282	0	0
"COA"	0.04386	0.13576	0.04428	0.00358	0	0
"PSO"	0.26362	0.32054	0.23503	0.07	0	0
"HC"	0.78567	33.5042	0.71879	0.93547	0	0

Figure 5-2: Το σχετικό σφάλμα τον μαγνητικών ροπών και της θέσης στον άξονα X για θόρυβο 5%.

- Χρόνος εκτέλεσης : COF1, HC

Algorithm	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6	Run 7	Run 8	Run 9	Run 10
"DE"	0.61681	0.51417	0.34968	0.31707	0.33343	0.32123	0.32449	0.31849	0.3174	0.32663
"COF1"	0.11134	0.08701	0.04103	0.03046	0.05332	0.03124	0.03116	0.02604	0.03045	0.02642
"GWO"	0.16481	0.1404	0.11946	0.11059	0.11015	0.08721	0.08605	0.08061	0.08522	0.0845
"WOA"	0.16032	0.12331	0.09355	0.07351	0.07507	0.07712	0.06992	0.06627	0.06461	0.06528
"ALO"	2.71396	2.58472	1.97959	1.86875	1.98067	1.88513	1.87399	1.8795	1.87296	1.88282
"MFO"	0.16132	0.15917	0.12372	0.10305	0.09129	0.08384	0.0876	0.09521	0.08209	0.08055
"MVO"	0.31946	0.19717	0.16982	0.11854	0.11617	0.11029	0.10738	0.12598	0.11113	0.11001
"SCA"	0.17522	0.14355	0.115	0.0784	0.08617	0.07421	0.07517	0.0829	0.07657	0.08037
"EO"	0.20168	0.17957	0.13613	0.09403	0.12401	0.086	0.08652	0.08456	0.08945	0.08728
"MPA"	0.44554	0.38692	0.33196	0.29685	0.23866	0.23083	0.27081	0.20608	0.22007	0.20871
"AOA"	0.16675	0.15436	0.11673	0.10777	0.11735	0.0952	0.11334	0.07808	0.07892	0.07361
"FDA"	0.87653	0.8843	0.76288	0.51503	0.65887	0.58045	0.62735	0.50897	0.51734	0.51728
"AVOA"	0.22253	0.17846	0.13926	0.10072	0.10107	0.09663	0.09258	0.09185	0.09129	0.09774
"GTO"	0.36563	0.3137	0.26024	0.17498	0.21365	0.17937	0.16972	0.24103	0.17461	0.17027
"COA"	0.24241	0.15976	0.12018	0.10698	0.08854	0.08914	0.08319	0.11758	0.08477	0.0876
"MGO"	1.51955	1.2814	1.04915	0.81106	0.85292	0.90461	0.79949	1.00604	0.80763	0.82627
"PSO"	1.14128	1.00608	0.63878	0.72597	0.65776	0.64411	0.74115	0.7658	0.58719	0.57438
"HGSO"	1.07374	0.73956	0.67307	0.48746	0.51497	0.52284	0.48868	0.47515	0.48573	0.4747
"ACO"	5.08518	4.0124	3.23154	3.11649	3.07476	3.09295	3.06464	3.0273	3.23723	3.036
"HC"	0.14785	0.09381	0.09651	0.41072	0.37808	0.0814	0.13492	0.08036	0.07864	0.08209
"GOA"	4.66953	4.2299	4.49731	4.2458	4.24079	4.20193	4.20954	4.1857	4.17679	4.22389
"SSA"	0.16295	0.09173	0.08494	0.08788	0.09135	0.08342	0.08325	0.08362	0.08703	0.08113

Figure 5-3: Ο χρόνος εκτέλεσης (σε δευτερόλεπτα) του κάθε αλγορίθμου για μια σειρά 10 δοκιμών.

- Βέλτιστη σύγκληση : EDE, SSA

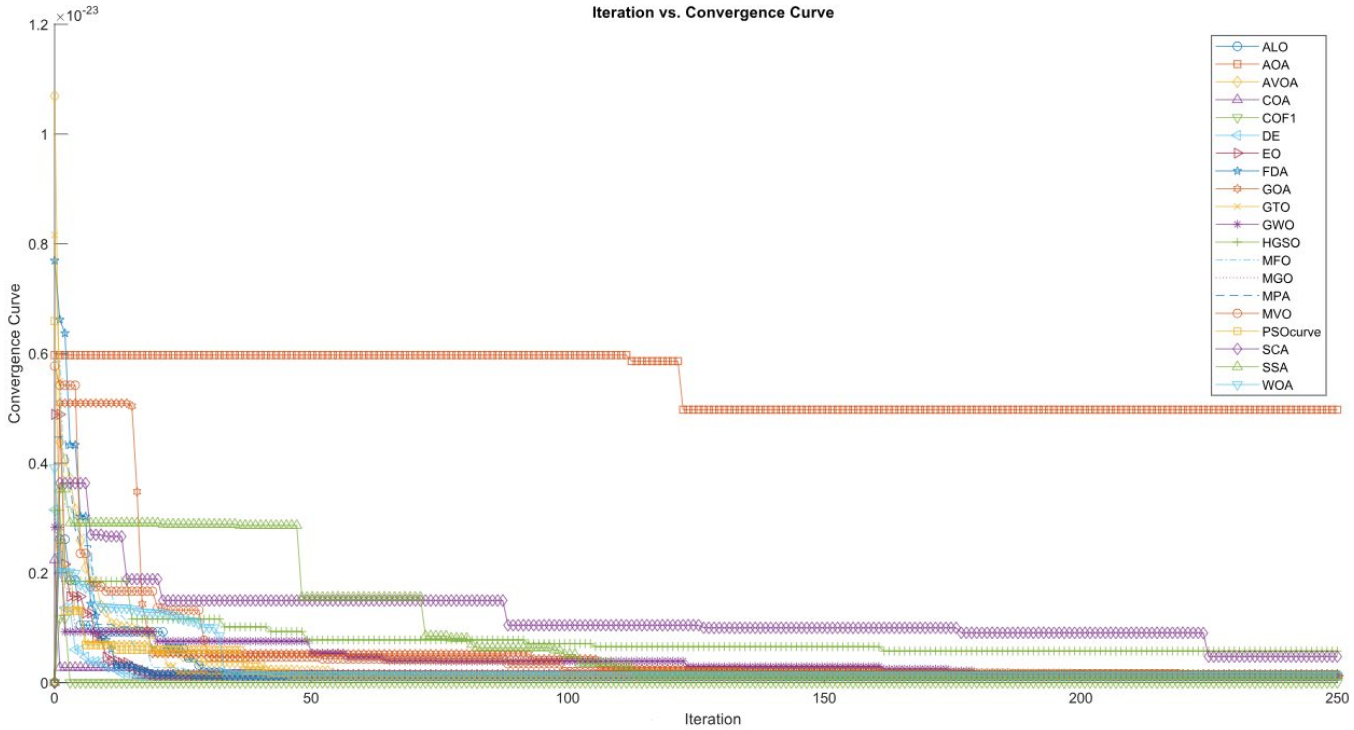


Figure 5-4: Ενδεικτικό διάγραμμα σύγκλισης για 144 Search agents και 250 Iterations.

- Αριθμός κλήσεων της αντικειμενικής συνάρτησης : MGO

Algorithm	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4	Run 5	Run 6	Run 7	Run 8	Run 9	Run 10
"DE"	9018	9018	9018	9018	9018	9018	9018	9018	9018	9018
"COF1"	558	558	558	558	558	558	558	558	558	558
"GWO"	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
"WOA"	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
"ALO"	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
"MFO"	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
"MVO"	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
"SCA"	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
"EO"	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
"MPA"	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000	18000
"AOA"	9018	9018	9018	9018	9018	9018	9018	9018	9018	9018
"FDA"	50050	50050	50050	50050	50050	50050	50050	50050	50050	50050
"AVOA"	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
"GTO"	18018	18018	18018	18018	18018	18018	18018	18018	18018	18018
"COA"	15422	15890	15494	15386	15548	15620	15458	15314	15512	15566
"MGO"	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
"PSO"	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
"HGSO"	3006	3006	3006	3006	3006	3006	3006	3006	3006	3006
"HC"	17929	29929	5941	5941	5941	5941	5941	5941	5941	5941
"GOA"	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000
"SSA"	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000	9000

Figure 5-5: Οι κλήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης του κάθε αλγορίθμου για μια σειρά 10 δοκιμών.

Τα παραπάνω αποτελέσματα οδηγούν σε μια σειρά από συμπεράσματα. Αρχικά, υπάρχει μια μεγάλη ανάγκη για τη μελέτη των καταλυτικών νανοσωματιδίων για όλες τις πιθανές εφαρμογές τους, κάτι το οποίο γίνεται εύκολο αν τα εξετάσουμε ως μικρά στοιχειώδη δίπολα. Η κατανόηση των ιδιοτήτων και των συμπεριφορών τους από αυτήν την οπτική μπορεί να αποκαλύψει νέες δυνατότητες για τη χρήση τους σε τομείς όπως η χημεία και τα πετρελαϊκά. Η μελέτη των νανοσωματιδίων μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη τις τεχνολογίας και της κατανόησης των καταλυτών που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν σε χημικές αντιδράσεις, αισθητήρες και πετρελαϊκά συστήματα γενικότερα.

Στη συνέχεια, γίνεται σαφές ότι είναι εύκολο να υλοποιηθεί μια απλή διάταξη για έναν βασικό πειραματικό έλεγχο με χρήση απλώς μερικών μαγνητόμετρων (με μεγάλο εύρος επιλογών με βάση το κόστος και τα χαρακτηριστικά), μιας 3D εκτυπωμένης βάσης και ενός μικρού μαγνήτη. Αυτή η απλή αλλά αποτελεσματική διάταξη επιτρέπει την διεξαγωγή και τη μέτρηση των μαγνητικών ιδιοτήτων του μαγνητη που προσομοιώνει τα νανοσωματιδια, παρέχοντας κρίσιμες πληροφορίες. Επιπλέον, η χρήση 3D εκτυπωμένων εξαρτημάτων προσφέρει ευελιξία και οικονομία, επιτρέποντας την προσαρμογή της διάταξης στις συγκεκριμένες ανάγκες κάθε πειράματος.

Ακόμα, υπάρχει και ένα μεγάλο πλήθος αλγορίθμων το οποίο μπορεί να εξεταστεί για κάθε εφαρμογή ενώ παράλληλα κάθε αλγόριθμος έχει μια σειρά από πιθανές υλοποιήσεις οι οποίες μπορούν να αξιοποιηθούν. Στην περίπτωση αυτής της εργασίας από τους αλγορίθμους που μελετήθηκαν και τελικά αξιολογήθηκαν, έχοντας και ως βασικό κριτήριο την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων κάτι το οποίο μετρήθηκε μέσω του σχετικού σφάλματος ανάμεσα στην σωστή απάντηση και την απάντηση των αλγορίθμων που είναι εμπνευσμένοι από την φύση, προέκυψε ότι η καλύτερη επιλογή «overall» είναι η Differential evolution (DE).

Τέλος, είναι σαφές ότι υπάρχει και ένα μεγάλο περιθώριο έρευνας στις επιλογές του λογισμικού, όπως είναι τα νευρωνικά δίκτυα, κάτι που θα αποτελέσει πεδίο μελλοντικής έρευνας. Τα νευρωνικά δίκτυα, με την ικανότητά τους να μαθαίνουν από δεδομένα και να προσαρμόζονται αναλόγως, μπορούν να ανοίξουν νέους δρόμους για την ανάλυση και την κατανόηση των ιδιοτήτων των νανοσωματιδίων. Η μελλοντική έρευνα σε αυτόν τον τομέα μπορεί να οδηγήσει σε καινοτόμες λύσεις και τεχνολογίες που θα επηρεάσουν θετικά μια ευρεία γκάμα βιομηχανιών και εφαρμογών.

6. ΑΝΑΦΟΡΕΣ

[1] P. W. Selwood. Magnetochemistry. (Interscience Publishers INC, 1943).
[2] Selwood, P. W. The Mechanism of Chemisorption: Hydrogen on Nickel. I. J. Am. Chem. Soc. 78, 3893–3897 (1956).
[3] Hofer, L. J. E. & Toor, E. W. Magnetic balance for ferromagnetism. Rev. Sci. Instrum. 33, 417–422 (1962).
[4] Dalmon, J.-A. Magnetic Measurements and Catalysis - Catalyst Characterization: Physical Techniques for Solid Materials. in (eds. Imelik, B. & Vedrine, J. C.) 585–609 (Springer US, 1994). doi:10.1007/978-1-4757-9589-9_21.
[5] Chernavskii, P. A., Pankina, G. V & Lunin, V. V. Magnetometric methods of investigation of supported catalysts. Russ. Chem. Rev. 80, 579–604 (2011).
[6] Claeys, M., Steen, E. W. J. Van, Visagie, J. L. & Loosdrecht, J. Van De. Magnetometer. (2011).
[7] Luomahaara, J., Vesterinen, V., Grönberg, L. & Hassel, J. Kinetic inductance magnetometer. Nat. Commun. 5, 1–7 (2014).
[8] Tatarakis, M. et al. Measuring huge magnetic fields. Nature 415, 280 (2002).
[9] Kominis, I. K., Kornack, T. W., Allred, J. C. & Romalis, M. V. A subfemtotesla multichannel atomic magnetometer. Nature 422, 596–599 (2003).
[10] Junge, A. & Marliani, F. Prediction of DC magnetic fields for magnetic cleanliness on spacecraft. in IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (2011). doi:10.1109/ISEMC.2011.6038424.
[11] Baklezos, A. T., Nikolopoulos, C. D., Katsouris, A. G., Koutantos, G. I. & Capsalis, C. N. Electromagnetic Emission Modeling in Case of Shielded Cabling with Respect to the Ground Dielectric Properties. IEEE Trans. Electromagn. Compat. (2016) doi:10.1109/TEMC.2016.2588583.
[12] Akai, N. & Ozaki, K. 3D magnetic field mapping in large-scale indoor environment using measurement robot and Gaussian processes. in 2017 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, IPIN 2017 (2017). doi:10.1109/IPIN.2017.8115960.
[13] Ashraf, C., Joshi, N., Beck, D. A. C. & Pfaendtner, J. Data Science in Chemical Engineering: Applications to Molecular Science. Annual Review of Chemical and Biomolecular Engineering at https://doi.org/10.1146/annurev-chembioeng-101220-102232 (2021).
[14] Kakkar, S., Kwapinski, W., Howard, C. A. & Kumar, K. V. Deep neural networks in chemical engineering classrooms to accurately model adsorption equilibrium data. Educ. Chem. Eng. (2021) doi:10.1016/j.ece.2021.04.003.
[15] Trinh, C., Meimaroglou, D. & Hoppe, S. Machine learning in chemical product engineering: The state of the art and a guide for newcomers. Processes at https://doi.org/10.3390/pr9081456 (2021).
[16] Dobbelaere, M. R., Plehiers, P. P., Van de Vijver, R., Stevens, C. V. & Van Geem, K. M. Machine Learning in Chemical Engineering: Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats. Engineering (2021) doi:10.1016/j.eng.2021.03.019.
[17] Tsakoumis, N. E. et al. Fischer–Tropsch synthesis: An XAS/XRPD combined in situ study from catalyst activation to deactivation. J. Catal. 291, 138–148 (2012).

[18] Newton, M. a & van Beek, W. Combining synchrotron-based X-ray techniques with vibrational spectroscopies for the in situ study of heterogeneous catalysts: a view from a bridge. Chem. Soc. Rev. 39, 4845–63 (2010).

[19] A new test method for COVID-19. https://www.ntnu.edu/ntnu-covid-19-test (2020).

[20] Tsakoumis, N. E., York, A. P. E., Chen, D. & Rønning, M. Catalyst characterisation techniques and reaction cells operating at realistic conditions; towards acquisition of kinetically relevant information. Catal. Sci. Technol. 5, 4859–4883 (2015).

[21] Tsakoumis, N. E. et al. Evaluation of Reoxidation Thresholds for γ-Al 2 O 3 -Supported Cobalt Catalysts under Fischer–Tropsch Synthesis Conditions. J. Am. Chem. Soc. 139, 3706–3715 (2017).

[22] Tsakoumis, N. E. et al. Capturing metal-support interactions in situ during the reduction of a Repromoted Co/γ-Al2O3 catalyst. Chem. Commun. 52, 3239–3242 (2016).

[23] Baklezos, A. T. et al. Steady State Emissions Modeling of Low Frequency Magnetic and Electric Fields Generated by GOCE CDMU. in Proceedings of 2019 ESA Workshop on Aerospace EMC, Aerospace EMC 2019 (2019). doi:10.23919/AeroEMC.2019.8788927.

[24] Tsakoumis, N., Baklezos, A. T., Vardiambasis, I. O., Kapetanakis, T. N. & Nikolopoulos, C. D. Fluxgate configuration for obtaining magnetic properties of catalytic nanoparticles: A feasibility study. in I2MTC 2020 - International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Proceedings (2020). doi:10.1109/I2MTC43012.2020.9129568.

[25] Hrvoic, I. Magnetometers. Encycl. Earth Sci. Ser. (2011) doi:10.1007/978-90-481-8702-7_122.

[26] Macharet, D. G. et al. Autonomous aeromagnetic surveys using a fluxgate magnetometer. Sensors (Switzerland) (2016) doi:10.3390/s16122169.

[27] Heidari, Hadi and Vahid Nabaei. “Magnetic Sensors Based on Hall Effect.” Magnetic Sensors for Biomedical Applications (2019): n. pag.

[28] Fluxgate Magnetometers Eva M. Wakefield*, S.W. Billingsley Aerospace & Defense, 20936 Theseus Terrace, Germantown, Maryland U.S.A. 20876

[29] Mangin, P., Kahn, R. (2017). SUPERCONDUCTING QUANTUM INTERFERENCE DEVICE “SQUID”. In: Superconductivity. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-50527-5_11

[30] Slawomir Tumanski 2007 Meas. Sci. Technol. 18 R31, DOI 10.1088/0957-0233/18/3/R01

[31] Alexey Kimel et al 2022 J. Phys. D: Appl. Phys. 55 463003

[32] M.R. Parker, The Kerr magneto-optic effect (1876–1976), Physica B+C, Volumes 86–88, Part 3, 1977, Pages 1171-1176,ISSN 0378-4363,https://doi.org/10.1016/0378-4363(77)90836-1. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378436377908361)

[33] Studies in Computational Intelligence 811, Seyedali Mirjalili ,Jin Song Dong ,Andrew Lewis Editors ,ISBN 978-3-030-12127-3 (eBook)

[34] Afshin Faramarzi, Mohammad Heidarinejad, Brent Stephens, Seyedali Mirjalili, Equilibrium optimizer: A novel optimization algorithm, Knowledge-Based Systems, Volume 191, 2020, 105190, ISSN 0950-7051, https://doi.org/10.1016/j.knosys.2019.105190. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950705119305295)

[35] Afshin Faramarzi, Mohammad Heidarinejad, Seyedali Mirjalili, Amir H. Gandomi, Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic, Expert Systems with Applications, Volume 152, 2020, 113377, ISSN 0957-4174, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113377. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417420302025)

[36] Fatma A. Hashim, Essam H. Houssein, Mai S. Mabrouk, Walid Al-Atabany, Seyedali Mirjalili,Henry gas solubility optimization: A novel physics-based algorithm,Future Generation Computer

Systems,Volume 101,2019,Pages 646-667,ISSN 0167-739X,https://doi.org/10.1016/j.future.2019.07.015. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X19306557)

[37] Laith Abualigah, Ali Diabat, Seyedali Mirjalili, Mohamed Abd Elaziz, Amir H. Gandomi,The Arithmetic Optimization Algorithm,Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,Volume 376,2021,113609,ISSN 0045-7825,https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782520307945)

[38] Yiying Zhang, Zhigang Jin, Seyedali Mirjalili,Generalized normal distribution optimization and its applications in parameter extraction of photovoltaic models,Energy Conversion and Management,Volume 224,2020,113301,ISSN 0196-8904, https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113301. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890420308402)

[39] Hojat Karami, Mahdi Valikhan Anaraki, Saeed Farzin, Seyedali Mirjalili, Flow Direction Algorithm (FDA): A Novel Optimization Approach for Solving Optimization Problems,Computers & Industrial Engineering,Volume 156,2021,107224,ISSN 0360-8352, https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107224. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835221001285)

[40] Benyamin Abdollahzadeh, Farhad Soleimanian Gharehchopogh, Seyedali Mirjalili, African vultures optimization algorithm: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems, Computers & Industrial Engineering,Volume 158, 2021,107408,ISSN 0360-8352,https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107408. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835221003120)

[41] Abdollahzadeh B, Soleimanian Gharehchopogh F, Mirjalili S. Artificial gorilla troops optimizer: A new nature-inspired metaheuristic algorithm for global optimization problems. Int J Intell Syst. 2021; 36: 5887-5958. https://doi.org/10.1002/int.22535

[42] Weiguo Zhao, Liying Wang, Seyedali Mirjalili, Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering,Volume 388,2022, 114194,ISSN 0045-7825,https://doi.org/10.1016/j.cma.2021.114194. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045782521005259)

[43] Akbari, M.A., Zare, M., Azizipanah-abarghooee, R. et al. The cheetah optimizer: a nature-inspired metaheuristic algorithm for large-scale optimization problems. Sci Rep 12, 10953 (2022). https://doi.org/10.1038/s41598-022-14338-z

[44] Benyamin Abdollahzadeh, Farhad Soleimanian Gharehchopogh, Nima Khodadadi, Seyedali Mirjalili, Mountain Gazelle Optimizer: A new Nature-inspired Metaheuristic Algorithm for Global Optimization Problems, Advances in Engineering Software, Volume 174,2022,103282,ISSN 0965-9978,https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2022.103282. (https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997822001831)

[45] Rezaei, F., Safavi, H.R., Abd Elaziz, M. et al. GMO: geometric mean optimizer for solving engineering problems. Soft Comput 27, 10571–10606 (2023). https://doi.org/10.1007/s00500-023-08202-z

[46] Jia, H., Rao, H., Wen, C. et al. Crayfish optimization algorithm. Artif Intell Rev 56 (Suppl 2), 1919–1979 (2023). https://doi.org/10.1007/s10462-023-10567-4

[47] https://www.udemy.com/course/optimisation/?couponCode=ST12MT030524

[48] Mirjalili, S. (2019). Ant Colony Optimisation. In: Evolutionary Algorithms and Neural Networks. Studies in Computational Intelligence, vol 780. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93025-1_3

[49] https://scholar.google.com/citations?user=TJHmrREAAAAJ&hl=en

[50] Nadimi-Shahraki, M. H., Taghian, S., Mirjalili, S., & Faris, H. (2020). MTDE: An effective multi-trial vector-based differential evolution algorithm and its applications for engineering design problems. Applied Soft Computing Journal, 97, Article 106761. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106761

.