

Πανεπιστήμιο Πειραιώς – Τμήμα Πληροφορικής  
Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Πληροφορική»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Διατριβής	<b>(Ελληνικά) Ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας αιολικού πάρκου με χρήση του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας</b> <b>(Αγγλικά) Minimization of the operation cost of a wind farm using firefly algorithm</b>
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	<b>Σταματούλα Γκλεζάκου</b>
Πατρώνυμο	<b>Γεώργιος</b>
Αριθμός Μητρώου	<b>ΜΠΠΛ/ 10003</b>
Επιβλέπων	<b>Γεώργιος Τσιχριντζής, Καθηγητής</b>

Ημερομηνία Παράδοσης **Οκτώβριος 2014**

---

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

(υπογραφή)

Γ. Τσιχριντζής  
Καθηγητής

(υπογραφή)

Ε. Αλέπης  
Λέκτορας

(υπογραφή)

Κ. Πατσάκης  
Λέκτορας

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Η συγκεκριμένη εργασία περατώθηκε μετά από πολλούς μήνες προετοιμασίας. Θα ήθελα να ευχαριστήσω και από τη θέση αυτή την οικογένεια μου και τους φίλους μου για τη στήριξη που μου παρείχαν.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές της σχολής για τη μεταλαμπάδευση των γνώσεων τους και για τις κατευθύνσεις που παρείχαν. Τέλος ένα μεγάλο ευχαριστώ στον κύριο Τσιχριντζή για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπό μου.

Πανεπιστήμιο Πειραιώς

## Περιεχόμενα

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
Περίληψη	8
Abstract	8
Εισαγωγή	9
Κεφάλαιο 1 <sup>ο</sup> :	10
«Εξέλιξη και αλγόριθμος πυγολαμπίδας»	10
1.1 Βελτιστοποίηση (optimization)	10
1.1.1 Τοπική Βελτιστοποίηση	11
1.1.2 Ολική Βελτιστοποίηση	11
1.2 Εξελικτική Υπολογιστική (Evolutionary Computation)	12
1.2.1 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms)	13
1.2.2 Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming)	14
1.2.3 Εξελικτικές Στρατηγικές (Evolution Strategies)	14
1.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)	15
1.3.1 Εισαγωγή	15
1.3.2 Ιστορική αναδρομή	15
1.3.3 Στοιχεία από τη θεωρία της Εξέλιξης	15
1.3.4 Βασικές έννοιες	16
1.3.5 Συνοπτική περιγραφή λειτουργίας	16
1.3.6 Συνάρτηση αποτίμησης (αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση καταλληλότητας)	16
1.3.7 Επιλογή γονέων	17
1.3.8 Διασταύρωση	17
1.3.9 Μετάλλαξη	18
1.3.10 Κριτήριο τερματισμού	18
1.3.11 Διαδικασία γενετικών αλγορίθμων	19
1.3.12 Παράδειγμα εφαρμογής γενετικού αλγορίθμου	19
1.3.13 Προβλήματα που λύνουν οι γενετικοί αλγόριθμοι	21
1.4 Αλγόριθμος της πυγολαμπίδας (Firefly Algorithm)	21
1.4.1 Εισαγωγή	21
1.4.2 Πηγή έμπνευσης του αλγορίθμου firefly	21
1.4.3 Ο αλγόριθμος firefly σε ψευδοκώδικα	22
1.4.4 Ελκυστικότητα, Απόσταση και μετακίνηση	22
1.4.5 Διαμόρφωση παραμέτρων στον αλγόριθμο firefly	24
1.4.6 Ειδικές περιπτώσεις στον αλγόριθμο firefly	24
1.4.7 Πολυπλοκότητα του αλγορίθμου firefly	25
1.4.8 Εφαρμογές του αλγορίθμου firefly	25

1.4.9	Τι κάνει τόσο αποδοτικό τον αλγόριθμο firefly	25
Κεφάλαιο 2 <sup>ο</sup> : 28		
«Αιολική Ενέργεια και Αιολικά Πάρκα» 28		
2.1	Εισαγωγή	28
2.2	Ανεμογεννήτριες – Αιολικά Πάρκα	29
2.2.1	Είδη ανεμογεννητριών	30
2.2.2	Τρόπος λειτουργίας των ανεμογεννητριών	33
2.2.3	Αιολικά Πάρκα	34
2.2.4	Είδη αιολικών πάρκων	34
2.3	Οφέλη της Αιολικής Ενέργειας	35
2.4	Αιολικό Δυναμικό - Δυνατότητες	36
2.5	Υφιστάμενη Κατάσταση	36
2.6	Προοπτικές της Ελληνικής Αγοράς Αιολικής Ενέργειας	39
Κεφάλαιο 3 <sup>ο</sup> : 39		
«Ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας (firefly algorithm) στην ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου» 39		
3.1	Εισαγωγή	39
3.2	Περιγραφή του προβλήματος	40
3.3	Σύντομη περιγραφή του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας (firefly algorithm)	41
3.4	Περιγραφή του προβλήματος με τον αλγόριθμο firefly	44
3.4.1	Παραδοχές και αρχικοποιήσεις μεταβλητών	44
3.4.2	Βήματα του αλγορίθμου	45
3.5	Εφαρμογή	49
3.5.1	Αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν	49
3.5.2	Γλώσσα Υλοποίησης	49
3.5.3	Απαιτήσεις συστήματος	49
3.6	Αποτελέσματα και διαγράμματα	49
3.6.1	Αποτελέσματα του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας	49
3.7	Συμπεράσματα	57
3.7	Εγχειρίδιο εφαρμογής	62
Κεφάλαιο 4 <sup>ο</sup> : 64		
«Συμπεράσματα από την εφαρμογή του αλγορίθμου firefly στο πρόβλημα βελτιστοποίησης κόστους λειτουργίας αιολικού πάρκου» 64		
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ 65		
	Κώδικας εφαρμογής	65
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 72		

## Εικόνες και πίνακες

Εικόνα 1: Απεικόνιση του ολικού και τοπικού ελαχίστου	12
Εικόνα 2: Εξελικτικός κύκλος	13
Εικόνα 3: Πληθυσμός	16
Εικόνα 4: Διασταύρωση ενός σημείου	18
Εικόνα 5: Διαδικασία Γενετικών Αλγορίθμων	19
Εικόνα 6: Αποτελέσματα αποκωδικοποίησης	19
Εικόνα 7: Αποτέλεσμα εφαρμογής ρουλέτας	20
Εικόνα 8: Αποτελέσματα αποκωδικοποίησης	20
Εικόνα 9: Πυγολαμπίδα	21
Πίνακας 1: Αποτελέσματα σύγκρισης firefly με άλλους αλγορίθμους	26
Εικόνα 10: Γραφική παράσταση $f$	27
Εικόνα 11: Αρχική θέση πυγολαμπίδων	27
Εικόνα 12: Τελική θέση πυγολαμπίδων	28
Εικόνα 13: Εξέλιξη της Ευρωπαϊκής Αγοράς Αιολικής Ενέργειας	29
Εικόνα 14: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα	31
Εικόνα 15: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα	32
Εικόνα 16 : Ανεμογεννήτρια οριζόντιου και κάθετου άξονα	32
Εικόνα 17: Τρίπτερες ανεμογεννήτριες	33
Εικόνα 18: Δίπτερες ανεμογεννήτριες	33
Πίνακας 2: Μετρήσεις Αιολικού Δυναμικού ΔΕΗ/ΔΕΜΕ	36
Εικόνα 19: Εξέλιξη της Ελληνικής Αγοράς Αιολικής Ενέργειας	37
Πίνακας 3: Εγκατεστημένη Ισχύς Συνδεδεμένων Αιολικών Πάρκων στην Ελλάδα	38
Εικόνα 20: Διάγραμμα ροής firefly	44
Πίνακας 4: Αντιστοίχιση μεγεθών του firefly με τον παρόν πρόβλημα	45
Εικόνα 21: Διάγραμμα ροής αρχικοποίησης	46
Εικόνα 22: Διάγραμμα ροής επαναληπτικού τμήματος	48

## Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διατριβή ασχολείται με την ελαχιστοποίηση του κόστους που επενδύεται για τη λειτουργία ενός αιολικού πάρκου. Για την επίλυση του προβλήματος αυτού χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας. Ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου στηρίζεται στο πώς βρίσκουν οι πυγολαμπίδες σύντροφο λαμβάνοντας υπόψη την φωτοβολία κάθε τέτοιου εντόμου. Ο αλγόριθμος αυτός επιλέχθηκε γιατί είναι πολύ αποτελεσματικός, συγκρινόμενος με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα λαμβάνει υπόψη του το πλήθος των ανεμογεννητριών από τις οποίες αποτελείται το αιολικό πάρκο, την ενέργεια που παράγει η καθεμία από αυτές και την ταχύτητα του ανέμου η οποία μεταβάλλει το ρυθμό μεταβολής της ενέργειας. Για να αποδειχτεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου, γίνεται η εφαρμογή του σε ένα αιολικό πάρκο το οποίο αποτελείται από 10, 20, 30 και 40 ανεμογεννήτριες.

Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε μία εφαρμογή στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Ο χρήστης σε κάθε εκτέλεση εισάγει τον αριθμό των ανεμογεννητριών που επιθυμεί καθώς και τον αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου. Η εφαρμογή εξάγει διάφορα διαγράμματα καθώς και για ποιες τιμές ταχύτητας του ανέμου και ενέργειας ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται το βέλτιστο κόστος λειτουργίας του πάρκου

## Abstract

This master thesis deals with the minimization of the cost which is invested in the function of a wind farm. To solve this problem the firefly algorithm is used. The way the algorithm works is based on how fireflies find their mate accounting for the brightness of any such insect. This algorithm is selected because it is very effective in comparison with other optimization techniques. The problem takes into account the number of the turbines they constitute the wind farm, the power that each one produces and the velocity of the wind which alters the change rate of the power. In order to prove the effectiveness of the algorithm, it is applied in a wind farm which consists 10, 20, 30 and 40 turbines.

In this context an application was developed in MATLAB language. The user gives at each execution the number of the turbines he wants and the number of the iterations of the algorithm. The application produces various charts and for what values of velocity and power of the turbine is achieved the best operating cost of the wind farm.



## Εισαγωγή

Αντικείμενο της παρούσας Μεταπτυχιακής διατριβής είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου. Στα βουνά της πατρίδας μας τα τελευταία χρόνια εμφανίζονται ανεμογεννήτριες. Πολλές φορές αλλοιώνεται το περιβάλλον αισθητικά αλλά και ουσιαστικά, αφού για την τοποθέτηση των ανεμογεννητριών διανοίγονται δρόμοι με αποτέλεσμα την οικολογική διαταραχή. Γι' αυτό το λόγο εγείρεται το ερώτημα αν τα αιολικά πάρκα πρέπει να τοποθετούνται σε οποιαδήποτε κορυφογραμμή περιέχοντας μεγάλο ή μικρό αριθμό ανεμογεννητριών.

Η εργασία αυτή χρησιμοποιεί ως εργαλείο έναν μετεωρετικό αλγόριθμο, τον αλγόριθμο της πυγολαμπίδας για να ελαχιστοποιήσει την αντικειμενική συνάρτηση στην οποία υπακούει το κόστος λειτουργίας ενός τυπικού αιολικού πάρκου. Στο πλαίσιο αυτό αναπτύχθηκε μία εφαρμογή στη γλώσσα προγραμματισμού MATLAB. Ο χρήστης σε κάθε εκτέλεση εισάγει τον αριθμό των ανεμογεννητριών που επιθυμεί καθώς και τον αριθμό επαναλήψεων του αλγορίθμου. Η εφαρμογή εξάγει διάφορα διαγράμματα καθώς και για ποιες τιμές ταχύτητας του ανέμου και ενέργειας ανεμογεννήτριας επιτυγχάνεται το βέλτιστο κόστος λειτουργίας του πάρκου.

Ακολουθεί περιγραφή της δομής της Μεταπτυχιακής Διατριβής:

Το πρώτο κεφάλαιο καλείται «Εξέλιξη και αλγόριθμος πυγολαμπίδας» και πραγματεύεται τις έννοιες της βελτιστοποίησης, της εξελικτικής υπολογιστικής, των γενετικών αλγορίθμων και του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας.

Το δεύτερο κεφάλαιο ονομάζεται «Αιολική Ενέργεια και Αιολικά Πάρκα». Σε αυτό περιγράφονται τα βασικά χαρακτηριστικά των αιολικών πάρκων, των ανεμογεννητριών καθώς και οι προοπτικές που υπάρχουν στην Ελλάδα στον τομέα αυτόν.

Το τρίτο κεφάλαιο έχει τίτλο «Ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας (firefly algorithm) στην ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου». Γίνεται αναφορά στο πως προσαρμόστηκε ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας στο πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του κόστους του αιολικού πάρκου, στη γλώσσα που χρησιμοποιήθηκε καθώς και στον ίδιο τον αλγόριθμο, στις απαιτήσεις του συστήματος και τέλος παρέχεται κι ένα εγχειρίδιο χρήσης της εφαρμογής που αναπτύχθηκε.

Η ονομασία του τέταρτο Κεφαλαίου είναι "Συμπεράσματα και Επεκτάσεις" όπου γίνεται σύντομη αναφορά στα συμπεράσματα από την χρήση της εφαρμογής ενώ προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις που θα βελτιώσουν περισσότερο την εφαρμογή

Στο τελευταίο τμήμα, το παράρτημα, παρατίθεται ο κώδικας της εφαρμογής εφοδιασμένος με επεξηγηματικά σχόλια καθώς και η Ελληνική και Ξένη βιβλιογραφία που χρησιμοποιήθηκε για την συγγραφή αυτής της διατριβής.

## Κεφάλαιο 1<sup>ο</sup>:

### «Εξέλιξη και αλγόριθμος πυγολαμπίδας»

#### 1.1 Βελτιστοποίηση (optimization)

Με τον όρο βελτιστοποίηση μιας συνάρτησης, της οποίας οι μεταβλητές υπόκεινται σε κάποιους περιορισμούς, εννοούμε τη διαδικασία εκείνη με την οποία υπολογίζονται οι τιμές των μεταβλητών αυτών ώστε η συνάρτηση να αποκτά την καλύτερη δυνατή τιμή. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι μέγιστη ή ελάχιστη, ανάλογα με το είδος του προβλήματος. Για παράδειγμα, όταν αφορά ποσότητες όπως κέρδος ή απόδοση αντιστοιχεί σε μεγιστοποίηση ενώ όταν σχετίζεται με ποσότητες όπως σφάλμα ή κόστος, σε ελαχιστοποίηση. Εδώ πρέπει να σημειωθεί ότι οι όροι μεγιστοποίηση και ελαχιστοποίηση είναι ισοδύναμοι για το λόγο ότι στο σημείο που μία συνάρτηση  $f$  παρουσιάζει μέγιστο, η αντίθετή της,  $-f$ , παρουσιάζει ελάχιστο. Η βελτιστοποίηση εφαρμόζεται για την επίλυση πολλών επιστημονικών ή πρακτικών προβλημάτων που άπτονται της φυσικής, της χημείας, της οικονομίας κ.α.

Υπάρχουν δύο πολύ βασικές κατηγορίες προβλημάτων στα οποία εφαρμόζεται η διαδικασία της βελτιστοποίησης: Σε αυτά που ακολουθούν γραμμικά μοντέλα και σε αυτά που ακολουθούν μη γραμμικά μοντέλα. Τα πρώτα ονομάζονται προβλήματα γραμμικής βελτιστοποίησης (linear optimization problems) λύνονται με διαδικασίες γραμμικού προγραμματισμού. Τα δεύτερα είναι γνωστά με την ονομασία προβλήματα μη γραμμικής βελτιστοποίησης (non-linear optimization problems) και τα περισσότερα από αυτά λύνονται πού δύσκολα.

Μία ακόμη διάκριση στα προβλήματα βελτιστοποίησης είναι στα προβλήματα ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς και σε αυτά με περιορισμούς. Τα προβλήματα ελαχιστοποίησης χωρίς περιορισμούς (unconstrained minimization problems) έχουν ως γενική διατύπωση την παρακάτω:

« Έστω συνάρτηση  $f, f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ . Να υπολογιστεί η ελάχιστη τιμή της.»

Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να βρεθεί εκείνο το  $x \in \mathbb{R}^n$  για το οποίο θα ισχύει  $f(x^*) \leq f(x)$  (1.1), για κάθε  $x^* \in \mathbb{R}^n$ .

Στα προβλήματα ελαχιστοποίησης με περιορισμούς (constrained minimization problems) οι μεταβλητές της συνάρτησης πρέπει να ικανοποιούν κάποιους περιορισμούς, όπως να παίρνουν συγκεκριμένο εύρος τιμών, για παράδειγμα να είναι όλες θετικές. Τα προβλήματα αυτά είναι σε γενικές γραμμές δυσκολότερο να λυθούν.

Με τεχνικές βελτιστοποίησης λύνονται και τα προβλήματα ελαχίστων τετραγώνων (least-square problems). Μία γενική διατύπωση τους είναι η παρακάτω:

« Έστω συνάρτηση  $r, r: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ , όπου  $n < m$ . Να υπολογιστεί το  $x \in \mathbb{R}^n$ , για το οποίο ελαχιστοποιείται η ποσότητα  $\sum_{i=1}^m (r_i(x))^2$  (1.2) .»

Τα προβλήματα αυτά λύνονται χρησιμοποιώντας τη σχέση (1.1), αν οριστεί σε αυτή ως :

$$f(x) = \sum_{i=1}^m (r_i(x))^2 \quad (1.3) \text{ και στη συνέχεια ελαχιστοποιηθεί η } f.$$

Η ελαχιστοποίηση συμβαίνει σε τρία αριθμητικά πεδία. Στο πεδίο των παραμέτρων, σε αυτό της συνάρτησης και σε αυτό της καταλληλότητας.

Το πεδίο των παραμέτρων (parameter space) περιέχει το πεδίο ορισμού της συνάρτησης, δηλαδή όλες τις επιτρεπτές τιμές που μπορούν να πάρουν οι μεταβλητές-παραμέτροι της συνάρτησης.

Το πεδίο της συνάρτησης (function space) είναι οι τιμές που εξάγονται αν αυτή εφαρμοστεί στις μεταβλητές-παραμέτρους της, μιας και κάθε συνάρτηση είναι μια λειτουργία πάνω στις παραμέτρους της.

Τέλος, το πεδίο καταλληλότητας (fitness space) είναι ο χώρος μιας διάστασης και περιέχει το ποσοστό επιτυχίας για κάθε συνδυασμό παραμέτρων για τη δοσμένη συνάρτηση.

Στα προβλήματα μεγιστοποίησης τα δύο τελευταία πεδία ενδέχεται να είναι τα ίδια ενώ σε προβλήματα ελαχιστοποίησης μπορεί να είναι ακριβώς τα αντίθετα.

Τα προβλήματα ελαχιστοποίησης μπορούν να λυθούν με τεχνικές που διακρίνονται σε δύο κατηγορίες:

- Αλγόριθμοι τοπικής βελτιστοποίησης (local optimization algorithms)
- Αλγόριθμοι ολικής βελτιστοποίησης (global optimization algorithms)

### 1.1.1 Τοπική Βελτιστοποίηση

Με τον όρο τοπική βελτιστοποίηση εννοούμε μία τοπική τιμή  $X_B^*$  της περιοχής  $B$ , που ελαχιστοποιεί (local minimizer) τη συνάρτηση  $f$  και ορίζεται ως εξής:

$$f(x_B^*) \leq f(x), \forall x \in B \quad (1.4)$$

Με  $B \subset S \subset R^n$ . Το  $S$  είναι ο χώρος αναζήτησης (search space). Προφανώς όταν οι μεταβλητές της συνάρτησης δεν υπόκεινται σε περιορισμούς, τότε το  $S$  ταυτίζεται με το  $R^n$ . Το  $B$  είναι ένα ακριβές υποσύνολο του  $S$  και μάλιστα ο χώρος αναζήτησης μπορεί να περιέχει πολλά  $B_i$ , τέτοια ώστε  $B_i, B_j$  να είναι ξένα μεταξύ τους όταν  $i \neq j$ . Επίσης κάθε τιμή  $x_{B_i}^*$  είναι μοναδική σε συγκεκριμένο σύνολο  $B_i$ , με άλλα λόγια κάθε ελάχιστη τιμή είναι μοναδική σε κάθε  $B_i$ . Τέλος, καθένα από τα  $x_{B_i}^*$  μπορεί να θεωρηθεί ως ελάχιστη τιμή στα το  $B$ , αν είναι τοπική ελάχιστη τιμή. Τοπικό ελάχιστο (local minimum) συμβολίζεται το  $f(x_{B_i}^*)$ .

Στα περισσότερα προβλήματα ελαχιστοποίησης ορίζεται ένα σημείο έναρξης  $z_0 \in S$ . Κάθε αλγόριθμος που χρησιμοποιείται για τοπική βελτιστοποίηση οφείλει να βρίσκει της ελάχιστη τιμή  $X_B^*$  της περιοχής  $B$ , αν  $z_0 \in B$ . Σε κάποιους αλγόριθμους ενδέχεται να βρεθεί η ζητούμενη τιμή  $X_B^*$  της περιοχής  $B$  αλλά όχι απαραίτητα αυτή που βρίσκεται πιο κοντά στο σημείο έναρξης  $z_0$ .

Έχουν κατασκευαστεί πολλοί αλγόριθμοι τοπικής ελαχιστοποίησης. Υπάρχει η διάκριση ανάμεσα στους ντετερμινιστικούς, τους αναλυτικούς και τους στοχαστικούς. (π.χ. Newton-Raphson, Steepest Descent, Fletcher-Reeves, Polar-Ribiere κ.α)

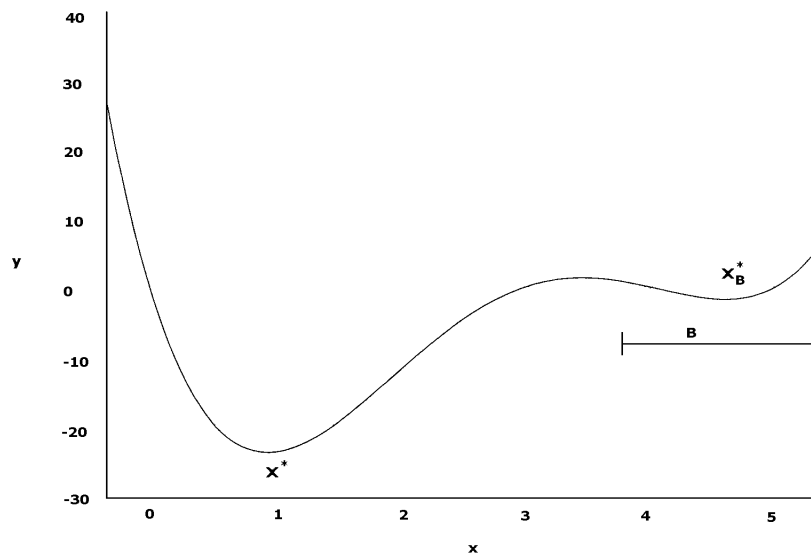
### 1.1.2 Ολική Βελτιστοποίηση

Με τον όρο ολική βελτιστοποίηση της συνάρτησης  $f$  εννοούμε μία τιμή  $x^*$ , που ελαχιστοποιεί (global minimizer) τη συνάρτηση  $f$  και ορίζεται ως εξής:

$$f(x^*) \leq f(x), \forall x \in S \quad (1.5)$$

Το  $S$  είναι όπως και πριν ο χώρος αναζήτησης (search space). Όταν επιλύεται ένα πρόβλημα χωρίς περιορισμούς τότε ο χώρος αναζήτησης ορίζεται συνήθως ως ο  $R^n$ , όπου  $n$  ο βαθμός της διάστασης του χώρου όπου ανήκει το  $x$ . Στην περίπτωση αυτή και πάλι επιλέγεται μία αρχική τιμή  $z_0$ , ως σημείο έναρξης.

Στο παρακάτω γράφημα φαίνεται καθαρά η διαφορά ανάμεσα σε ένα τοπικό ελάχιστο  $X_B^*$  και σε ένα ολικό  $x^*$ . Αν ο αλγόριθμος που βελτιστοποιεί ολικά μία συνάρτηση είναι ορθός, τότε πρέπει να βρει το ολικό μέγιστο  $x^*$  ανεξάρτητα της επιλογής του σημείου έναρξης  $z_0$ .



Εικόνα 1: Απεικόνιση του ολικού και τοπικού ελαχίστου

## 1.2 Εξελικτική Υπολογιστική (Evolutionary Computation)

Η εξελικτική υπολογιστική χρησιμοποιεί τους Εξελικτικούς Αλγόριθμους (EA) που είναι αλγόριθμοι ανίχνευσης – αναζήτησης, οι οποίοι μιμούνται τις διαδικασίες βιολογικής εξέλιξης με την υλοποίηση των ιδεών της φυσικής επιλογής και της επικράτησης του ισχυρότερου, έτσι ώστε να παρέχουν αποτελεσματικές λύσεις. Χρησιμοποιούνται σε προβλήματα αναζήτησης και βελτιστοποίησης.

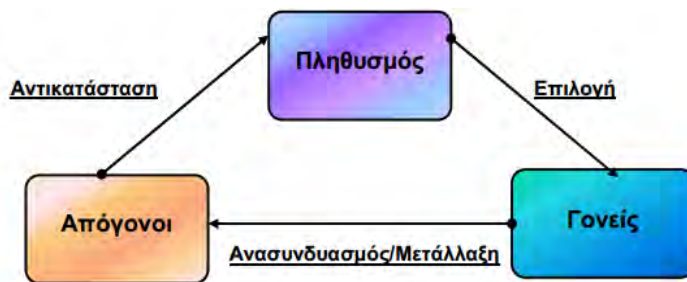
Στο χώρο των EA έχουν κυριαρχήσει τρεις κυρίως μεθοδολογίες : οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (genetic algorithms), οι Εξελικτικές Στρατηγικές (evolution strategies) και ο Εξελικτικός Προγραμματισμός (evolutionary programming).

Αν και οι τρεις αυτές μεθοδολογίες στηρίζονται σε όμοιες αρχές, κάθε μία υλοποιείται με διαφορετικό τρόπο. Και οι τρεις είναι γνωστές περισσότερο από 30 χρόνια, ωστόσο οι Γενετικοί Αλγόριθμοι έχουν κερδίσει περισσότερο ενδιαφέρον από της Εξελικτικές Στρατηγικές και τον Εξελικτικό Προγραμματισμό. Οι μεθοδολογίες αυτές έχουν δώσει την έμπνευση για την ανάπτυξη επιπρόσθετων μεθοδολογιών στον «Γενετικό Προγραμματισμό – Genetic Programming» (Koza, 1991) στα «Συστήματα Κατάταξης – Classifiers Systems» (Holland, 1986), στα «Συστήματα LS – LS systems» (Smith, 1983) και σε διάφορα άλλα.

Παρόλο που οι Αρχαίοι Έλληνες απέκτησαν στοιχειώδεις γνώσεις για την εξέλιξη, αυτός που έκανε διάσημο το θέμα της εξέλιξης ήταν ο Κάρολος Δαρβίνος αλλά ταυτόχρονα και ανεξάρτητα ανέπτυξε το ίδιο θέμα και Alfred Russel Wallace. Παρόλο που οι έρευνες τους παρουσιάστηκαν ταυτόχρονα σε μία συνάντηση, το όνομα του Κάρολου Δαρβίνου είναι αυτό που έγινε περισσότερο γνωστό. Η βασική αρχή της εξέλιξης είναι η βελτιστοποίηση, όπου σε αυτήν την περίπτωση ως σκοπός θεωρείται η επιβίωση των ειδών. Φυσικά δεν είναι σωστό να θεωρηθεί ότι οι μέθοδοι EC χρησιμοποιούνται μόνο σε προβλήματα βελτιστοποίησης αλλά και σε προβλήματα που παλαιότερα θεωρούνταν υπολογιστικά ασύμφορα. Μερικές κατηγορίες στις οποίες έχουν χρησιμοποιηθεί οι EC μέθοδοι είναι ο σχεδιασμός, η προσομοίωση, ο έλεγχος και η ταξινόμηση.

Σε γενικές γραμμές ένας τυπικός εξελικτικός αλγόριθμος ακολουθεί την παρακάτω διαδικασία: Ο πληθυσμός δομών αρχικοποιείται και κατόπιν εξελίσσεται από γενιά σε γενιά με την εφαρμογή της επιλογής, του αναπαραγωγικού και της μετάλλαξης. Το μέγεθος του πληθυσμού είναι γενικά σταθερό της EA. Τυπικά, ένας εξελικτικός αλγόριθμος αρχικοποιεί τον πληθυσμό του σε τυχαίες τιμές. Ακολουθεί η αξιολόγηση (evaluation) του πληθυσμού αποδίδοντας αντίστοιχες τιμές ποιότητας (fitness) σε κάθε άτομο του πληθυσμού. Η αξιολόγηση γίνεται μέσω της συνάρτησης ποιότητας η οποία

μπορεί να είναι πολύ απλή ή εξαιρετικά πολύπλοκη. Η επιλογή (selection) συνήθως υλοποιείται σε δύο βήματα, στην επιλογή γονέων και στην επιβίωση απογόνων. Κατά την επιλογή των γονέων καθορίζεται της άτομα θα γίνουν γονείς και πόσους απογόνους θα αποκτήσουν. Οι απόγονοι δημιουργούνται μέσω ανασυνδυασμού των γονέων, δηλαδή με την ανταλλαγή πληροφορίας μεταξύ των γονέων και μέσω μετάλλαξης η οποία διαταράσσει περαιτέρω της απογόνους. Ακολουθεί η χρήση της συνάρτησης ποιότητας για την αξιολόγηση των απογόνων και τελικά η επιλογή των ατόμων του πληθυσμού που θα επιβιώσουν στην επόμενη γενιά. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται εξελικτικός κύκλος (evolutionary cycle) και περιγράφεται στην παρακάτω εικόνα:

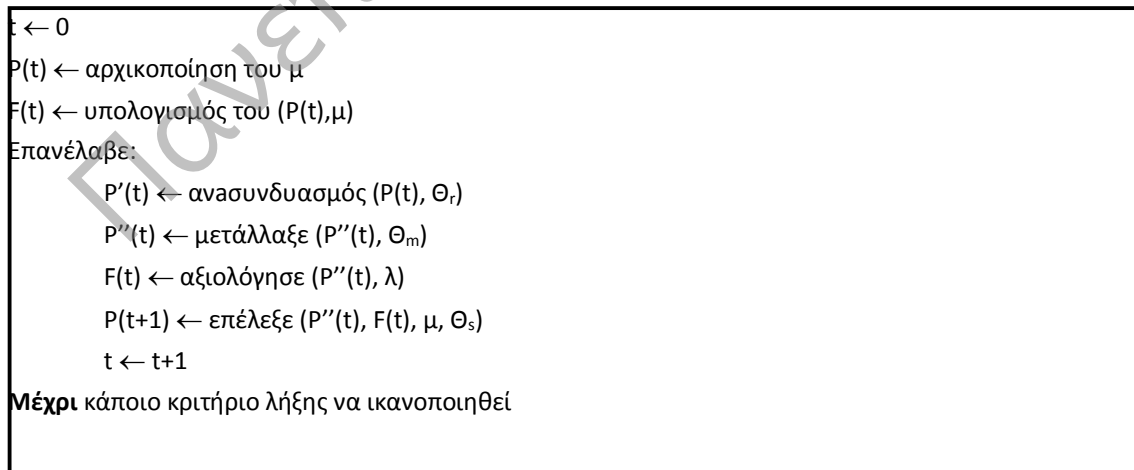


Εικόνα 2: Εξελικτικός κύκλος

### 1.2.1 Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms)

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (EA) αποτελούν μια ομάδα αλγορίθμων που ανήκουν στον εξελικτικό υπολογισμό. Ανάλογα με τον τύπο της λειτουργίας των εξελικτικών αλγορίθμων καθώς και τη σχέση ανάμεσα στα μεγέθη των πληθυσμών των απογόνων και των προγόνων οι αλγόριθμοι αυτοί μπορεί να ανήκουν στον Εξελικτικό Προγραμματισμό (EP) ή στις Εξελικτικές Στρατηγικές (ES) ή στους Γενετικούς Αλγορίθμους (GA) που αναφέρθηκαν παραπάνω.

Θεωρούμε έναν πληθυσμό με  $\mu$  άτομα  $P(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_\mu(t))$  τη χρονική στιγμή  $t$ . Κάθε  $x_i$  αναπαριστά μία πιθανή λύση του προβλήματος στο χώρο αναζήτησης  $S$ . Έστω τώρα μία συνάρτηση  $f(x)$  που βαθμολογεί το πόσο σωστή είναι η λύση. Αυτή η συνάρτηση ονομάζεται αντικειμενική συνάρτηση (fitness function) και όταν αναφέρεται σε όλο τον πληθυσμό συμβολίζεται ως  $F(t) = (f(x_1(t)), f(x_2(t)), \dots, f(x_\mu(t)))$ . Οι παράμετροι  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $\Theta_r$ ,  $\Theta_m$ ,  $\Theta_s$  θεωρούνται τυχαίοι και τα  $\Theta_r$ ,  $\Theta_m$ ,  $\Theta_s$  είναι αντίστοιχα οι πιθανότητες να εφαρμοστεί μία από τις λειτουργίες της αντικατάστασης, της μεταλλαγής και της επιλογής. Η λειτουργία των εξελικτικών αλγορίθμων παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Με την παράμετρο  $\mu$  δηλώνεται ο πληθάρηθος του αρχικού πληθυσμού ενώ με την ποσότητα  $\mu + \lambda$  αναπαρίσταται το άθροισμα του αρχικού πληθυσμού μαζί με τους απογόνους, ο οποίος προκύπτει

μετά τις διαδικασίες του ανασυνδυασμού και της μετάλλαξης. Ωστόσο στη συνέχεια, με την εφαρμογή της λειτουργίας την επιλογής προκύπτει ο πληθυσμός  $P''(t)$  με πληθάρημο ίσο με αυτόν του αρχικού. Η διαδικασία αυτή ολοκληρώνεται με την παράμετρο  $\Theta_s$ .

Η επιλογή κάνει τα εξής: Έστω ότι η αντικειμενική συνάρτηση έχει μία συγκεκριμένη τιμή για μία οντότητα και η τιμή αυτή πρέπει να συγκριθεί με τιμές που δίνει η ίδια συνάρτηση για άλλες οντότητες, έστω  $q$  το πλήθος. Τότε στην ουσία συγκρίνεται η τιμή αυτή για τη συγκεκριμένη οντότητα με τις αντίστοιχες τιμές των  $q$  οντοτήτων. Κάθε φορά που η οντότητα για την οποία γίνεται η σύγκριση εμφανίζει καλύτερη τιμή από μία άλλη, τότε της προστίθεται μία μονάδα, η λεγόμενη «μονάδα νίκης». Στο τέλος της διαδικασίας αυτή μπορεί να ταξινομηθούν οι οντότητες του πληθυσμού ανάλογα με τις «μονάδες νίκης» τους. Αν ισχύει  $q=\lambda$ , τότε κάθε άτομο του πληθυσμού έχει συγκριθεί με όλα τα υπόλοιπα. Στην επόμενη γενιά περνάν μόνο οι  $\mu$  πρώτες οντότητες. Οι υπόλοιπες δεν υπολογίζονται. Κάθε φορά που είναι  $q < \lambda$  τότε η επιλογή παράγει μη ντετερμινιστικά αποτελέσματα, γεγονός ανεπιθύμητο.

Με τον ανασυνδυασμό γίνεται το εξής: Επιλέγονται συνήθως δύο στοιχεία από τον αρχικό πληθυσμό και σχηματίζονται απόγονοι με γενετικό υλικό που είναι μία μείξη αυτού των προγόνων τους. Στη διαδικασία αυτή ρόλο παίζει και η παράμετρος  $\Theta_r$ . Τέλος με τη διαδικασία της μεταλλαγής επιλέγεται ένα άτομο του πληθυσμού από το οποίο παράγεται συνήθως ένας απόγονος με απλή μεταλλαγή στο γενετικό υλικό του γονέα-προγόνου. Η διαδικασία αυτή ελέγχεται από την παράμετρο  $\Theta_m$ .

Οι παράμετροι  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $\Theta_r$ ,  $\Theta_m$ ,  $\Theta_s$  που συμμετέχουν στον εξελικτικό αλγόριθμο λέγονται στρατηγικές παράμετροι (strategy parameters). Μέσα στο πρόγραμμα μπορεί να διατηρούνται σταθερές ή να δίνονται δυναμικά μέσω κάποιου άλλου αλγόριθμου.

### 1.2.2 Εξελικτικός Προγραμματισμός (Evolutionary Programming)

Ο εξελικτικός προγραμματισμός (EP) αναπτύχθηκε από τον Larry J. Fogel. Υπάρχει μία βασική διαφοροποίηση σε σχέση με τους εξελικτικούς αλγόριθμους στο γεγονός ότι δεν υπάρχει η λειτουργία του ανασυνδυασμού αλλά μόνο της μετάλλαξης. Η ομάδα του Fogel επικεντρώθηκε σε μηχανές πεπερασμένων καταστάσεων (finite state machines), ασχολήθηκε με τη μηχανική ευφυΐα (machine intelligence) και κατάφερε να λύσει προβλήματα με χρήση εξελικτικού προγραμματισμού, τα οποία δεν λυνόντουσαν εύκολα με γενετικούς αλγόριθμους.

Όσο για τη διαδικασία της μεταλλαγής, εφαρμόζεται τυχαία ακολουθώντας την κανονική κατανομή. Η επιλογή των προγόνων γίνεται με τον τρόπο που περιεγράφηκε πριν, στους εξελικτικούς αλγόριθμους. Κάθε μία επανάληψη έχει ως αποτέλεσμα κάθε γονέας να αποκτά και από ένα παιδί. Κατά συνέπεια:  $\lambda=2\mu$ , δηλαδή ο αρχικός πληθυσμός αποκτά διπλάσιες οντότητες. Στη συνέχεια, με τη διαδικασία της επιλογής, όσες οντότητες έχουν τιμή αντικειμενικής συνάρτησης κάτω του μέσου όρου του πληθυσμού  $P''(t)$  που έχει δημιουργηθεί, δεν περνάν στην επόμενη γενιά κι έτσι ο πληθυσμός αποκτά και πάλι πληθάρημο οντοτήτων ίσο με  $\mu$ .

Μία πιο σύγχρονη μορφή του εξελικτικού προγραμματισμού εμπλουτίστηκε με γενικότερες αναπαραστάσεις, όπως οι ταξινομημένες λίστες και τα διανύσματα πραγματικών τιμών. Η πρώτη προσθήκη για παράδειγμα βοήθησε να εφαρμοστούν οι μέθοδοι του στο πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή ενώ η δεύτερη συνέβαλε στη βελτιστοποίηση συνεχών συναρτήσεων.

### 1.2.3 Εξελικτικές Στρατηγικές (Evolution Strategies)

Η ομάδα των Rechenberg και Schwefel ανέπτυξε τις εξελικτικές στρατηγικές (ES). Η κατηγορία αυτή χρησιμοποιείται σε προβλήματα όπου γίνεται βελτιστοποίηση με πραγματικές τιμές. Σε αυτές εφαρμόζονται οι διαδικασίες της μεταλλαγής και της επανασύνδεσης ενώ ελέγχονται παράλληλα τόσο ο χώρος αναζήτησης όσο και ο χώρος των στρατηγικών παραμέτρων. Τις περισσότερες φορές οι πληθάρημοι του αρχικού πληθυσμού με αυτόν του τελικού δεν είναι ίσοι. Σε κάθε περίπτωση όμως ο

τελευταίος πληθυσμός θα πρέπει να έχει το λιγότερο ίσο αριθμό οντοτήτων με τον αρχικό. Υπάρχουν δύο βασικές στρατηγικές, οι *comma* και οι *plus*.

Στην *comma* στρατηγική χρησιμοποιείται ο συμβολισμός ( $\mu, \lambda$ ), ο οποίος έχει το νόημα ότι οι γονείς είναι  $\mu$  τω αριθμώ και γεννιούνται  $\lambda$  απογόνους. Από αυτούς τους απογόνους, επιλέγονται οι  $\mu$  καλύτεροι για να περάσουν στην επόμενη γενιά, οπότε θα είναι οι επόμενοι γονείς. Εδώ γίνεται φανερό ότι ο αρχικός πληθυσμός δε διατηρείται με πιθανή συνέπεια να χαθούν κάποιες καλές λύσεις που έχουν εμφανιστεί νωρίς, ωστόσο έτσι εμφανίζεται ποικιλομορφία.

Στην *plus* στρατηγική χρησιμοποιείται ο συμβολισμός ( $\mu+\lambda$ ), δηλαδή σχηματίζεται ένας μεγάλος πληθυσμός με τους  $\mu$  γονείς μαζί με τους  $\lambda$  απογόνους τους. Οι γονείς για την επόμενη γενιά είναι οι  $\mu$  βέλτιστες λύσεις από τον πληθυσμό αυτό. Η διαφορά με την *comma* στρατηγική είναι ότι οι πιθανές καλές λύσεις δεν χάνονται. Η διαδικασία την επιλογής σε αυτή τη στρατηγική είναι απαραίτητη.

Σε κάθε μία από τις δύο παραπάνω στρατηγικές, οι  $\mu$  γονείς που περνάν στην επόμενη γενιά επιλέγονται με ντετερμινιστικό τρόπο και έχουν ίσες πιθανότητες να «ζευγαρώσουν» και να έχουν απογόνους στην επόμενη γενιά.

### 1.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι (Genetic Algorithms)

#### 1.3.1 Εισαγωγή

Οι γενετικοί αλγόριθμοι είναι αλγόριθμοι που προσπαθούν να μιμηθούν διαδικασίες της βιολογικής εξέλιξης για να λύσουν ένα πρόβλημα. Για το σκοπό αυτό, δεν χρησιμοποιούν αναλυτικό / μαθηματικό τρόπο αλλά μηχανισμούς της Δαρβινικής θεωρίας της εξέλιξης. Στην ουσία είναι ευριστικοί αλγόριθμοι αναζήτησης (heuristics).

#### 1.3.2 Ιστορική αναδρομή

Η εισαγωγή των αλγορίθμων αυτών έγινε το 1958 από τον *Friedberg*, ο οποίος επιχειρήσε να συνδυάσει μικρά προγράμματα FORTRAN, χωρίς μεγάλη επιτυχία όμως.

Την προσπάθεια συνέχισε ο John Holland και οι συνεργάτες του τη δεκαετία του 1960, με επιτυχία αυτή τη φορά.

Μέχρι τις αρχές της δεκαετίας του 1980 η μελέτη των γενετικών αλγορίθμων περιοριζονταν σε θεωρητικό επίπεδο, με λίγες πρακτικές εφαρμογές. Στην περίοδο αυτή οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνταν κυρίως για προβλήματα βελτιστοποίησης συναρτήσεων, χρησιμοποιώντας χρωμοσώματα συγκεκριμένου μήκους, δυαδικής κωδικοποίησης. Χαρακτηριστικές είναι οι μελέτες των Hollstien και De Jong.

Από το 1980 και μετά, έχουν δημιουργηθεί πολλές εφαρμογές που εκτείνονται σε πολλούς τομείς ερευνητικής και όχι μόνο δραστηριότητας. Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διάφορες κατηγορίες προβλημάτων και αποτελούν μία ισχυρή μέθοδο βελτιστοποίησης. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται συστηματική ανάπτυξη των γενετικών αλγορίθμων στις φυσικές επιστήμες, στη μηχανική και στον κόσμο των επιχειρήσεων καθώς χρησιμοποιούνται σε προβλήματα προγραμματισμού (scheduling), βελτιστοποίησης (optimization) κτλ.

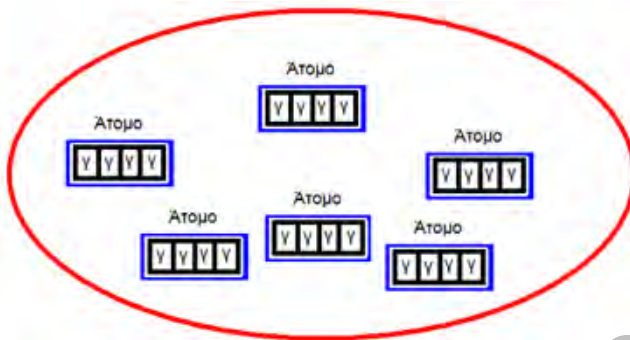
#### 1.3.3 Στοιχεία από τη θεωρία της Εξέλιξης

Οι οργανισμοί στη φύση εξελίσσονται βάσει του κανόνα της φυσικής επιλογής που ορίζει ότι οι οργανισμοί που αδυνατούν να επιβιώσουν στο περιβάλλον τους πεθαίνουν, ενώ οι υπόλοιποι πολλαπλασιάζονται αναπαραγόμενοι. Οι απογόνους είναι σχεδόν ίδιοι με τους προγόνους τους. Συνήθως υπερσχύουν αυτοί που συγκεντρώνουν τα καλύτερα χαρακτηριστικά.

Αν το περιβάλλον μεταβάλλεται με αργούς ρυθμούς, τα διάφορα είδη μπορούν να εξελίσσονται σταδιακά ώστε να προσαρμόζονται σε αυτό. Αν όμως συμβούν ραγδαίες μεταβολές, αρκετά είδη οργανισμών θα εξαφανιστούν. Σποραδικά, συμβαίνουν τυχαίες μεταλλάξεις, από τις οποίες οι περισσότερες οδηγούν τα μεταλλαγμένα άτομα στο θάνατο, αν και είναι πιθανό, πολύ σπάνια όμως, να οδηγήσουν στη δημιουργία νέων «καλύτερων» οργανισμών.

### 1.3.4 Βασικές έννοιες

Η έννοια του γονιδίου είναι βασική στους γενετικούς αλγόριθμους. Κάθε γονίδιο επηρεάζει την κληρονομικότητα ενός ή περισσότερων χαρακτηριστικών. Ένα χρωμόσωμα αποτελείται από γονίδια διατεταγμένα σε γραμμική ακολουθία. Κάθε άτομο – γενότυπος είναι και μία λύση στο πρόβλημα που εξετάζεται. Έτσι οι πιθανές λύσεις του προβλήματος συγκροτούνται από έναν πληθυσμό ατόμων. Αυτό μπορούμε να το δούμε σχηματικά στην παρακάτω εικόνα, όπου υποθέτουμε ότι κάθε άτομο του πληθυσμού έχει χρωμόσωμα αποτελούμενο από τέσσερα γονίδια.



Εικόνα 3: Πληθυσμός

Πιο συγκεκριμένα, κάθε υποψήφια λύση παριστάνεται κωδικοποιημένη ως με μια συμβολοσειρά ενός πεπερασμένου αλφαβήτου. Κάθε στοιχείο της συμβολοσειράς είναι ένα γονίδιο και η ίδια η συμβολοσειρά είναι ένα χρωμόσωμα.

Στη βιολογία (DNA) τα αλφάβητο έχει μήκος τέσσερα και αποτελείται από τα στοιχεία A,G,T και C ενώ στους γενετικούς αλγόριθμους χρησιμοποιείται συνήθως δυαδικό αλφάβητο. Ωστόσο υπάρχουν περιπτώσεις γενετικών αλγόριθμων που χρησιμοποιούν πιο σύνθετες μορφές αναπαράστασης (π.χ. πραγματικούς αριθμούς, αλφαριθμητικά στοιχεία κ.λπ.).

### 1.3.5 Συνοπτική περιγραφή λειτουργίας

Ο πληθυσμός των κωδικοποιημένων πιθανών λύσεων του προβλήματος υφίσταται προσομοιωμένη γενετική εξέλιξη. Το περιβάλλον εξέλιξης του πληθυσμού είναι στην ουσία μια αντικειμενική συνάρτηση, η οποία αποτιμά τις λύσεις. Η επόμενη γενιά του πληθυσμού γίνεται μετά την αποτίμηση της ορθότητας και καταλληλότητας κάθε ατόμου και την επιλογή των πιο κατάλληλων μελών του τρέχοντος πληθυσμού. Από αυτά τα μέλη επιλέγονται κάποια για γονείς και παράγονται από αυτούς απόγονοι με τη διαδικασία της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού που έχει τεθεί.

### 1.3.6 Συνάρτηση αποτίμησης (αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση καταλληλότητας)

Η γενική μορφή της δίνεται παρακάτω. Δέχεται σαν είσοδο ένα χρωμόσωμα και υπολογίζει την καταλληλότητα του. Η τιμή που επιστρέφει είναι συνήθως δεκαδική, στο διάστημα  $[0,1]$ . Η τιμή αυτή



θα πρέπει να διαφοροποιείται για διαφορετικά χρωμοσώματα του πληθυσμού, ώστε ο αλγόριθμος να εξελίσσεται καλά.

```
Function fitness(x)
    do_somethingcompute_value
    return value
End fitness
```

### 1.3.7 Επιλογή γονέων

Στη φύση έχει διαπιστωθεί ότι τα καταλληλότερα μέλη ενός πληθυσμού επιλέγουν το ένα το άλλο για να αναπαράγουν το είδος. Οι γενετικοί αλγόριθμοι δουλεύουν με παρόμοιο τρόπο μόνο που οι γονείς που επιλέγονται για να διασταυρωθούν μεταξύ τους δεν αποτελούνται αυστηρά από τα καλύτερα μέλη του πληθυσμού γιατί κάτι τέτοιο θα οδηγούσε σε εύρεση λύσεως σύντομα, γεγονός διαφορετικό από την πραγματικότητα. Οι γονείς που θα ανταλλάξουν γενετικό υλικό αντιγράφονται σε μια λίστα, την mating pool.

Υπάρχουν τρεις βασικές τεχνικές επιλογής γονέων:

- Η τεχνική της ρουλέτας, όπου η επιλογή γονέα είναι ανάλογη της καταλληλότητας τους. Έχει δύο παραλλαγές υλοποίησης, με πίνακα ακεραίων και με δεκαδική υλοποίηση. Η πρώτη χρησιμοποιείται σπάνια. Η δεύτερη έχει μικρότερες απαιτήσεις από την πρώτη και είναι και πιο αργή. Γενικά η τεχνική της ρουλέτας δίνει περισσότερες ευκαιρίες σε ένα άτομο να γίνει γονέας αν έχει καλύτερη καταλληλότητα κάτι που μπορεί να οδηγήσει σε πρόωρη σύγκλιση ή στασιμότητα.
- Η Tournament επιλογή χρησιμοποιείται στις πιο πολλές περιπτώσεις. Είναι η μέθοδος που ακολουθείται στη φύση και λειτουργεί επιλέγοντας τον καλύτερο για γονέα από μια μικρή ομάδα υποψηφίων. Επιλέγει βάσει της καταλληλότητας, χωρίς να δίνει ευκαιρίες περισσότερες παράλληλα όπως πριν με αποτέλεσμα να μη παρουσιάζει τα αντίστοιχα μειονεκτήματα.
- Η τεχνική της Ελιτίστικής επιλογής είναι μια τροποποίηση των δύο παραπάνω και χρησιμοποιείται συμπληρωματικά με αυτές. Αντιβαίνει τις αρχές της εξέλιξης αφού εξασφαλίζει ότι τουλάχιστον ένα αντίγραφο γονέα θα περάσει στην επόμενη γενιά. Η χρησιμοποίηση της εξασφαλίζει εγγυημένη σύγκλιση αλλά υπάρχει κίνδυνος παγιδύματος σε τοπικά ακρότατα.

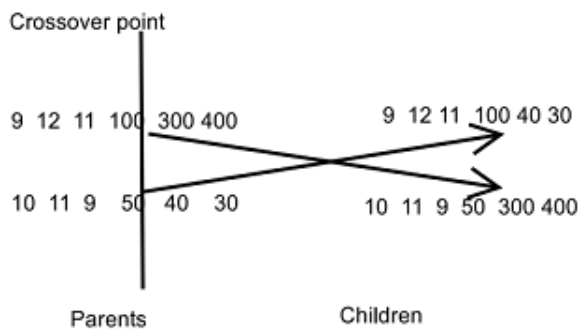
### 1.3.8 Διασταύρωση

Η διαδικασία της διασταύρωσης συμβαίνει αμέσως μετά τη διαδικασία της επιλογής γονέων. Τα μέλη που έχουν συγκεντρωθεί στη mating pool επιλέγονται και ανταλλάσσουν γενετικό υλικό. Κατά τη διαδικασία αυτή δημιουργούνται καινούργια χρωμοσώματα με βάση τα παλαιά. Πολλοί ερευνητές πιστεύουν πως η διασταύρωση, χωρίς τη μετάλλαξη, φτάνει για να δουλέψει ένας γενετικός αλγόριθμος.

Στη διαδικασία της διασταύρωσης υπεισέρχεται η πιθανότητα διασταύρωσης, η οποία καθορίζει το ποσοστό των παλαιών χρωμοσωμάτων που πρέπει να αντικατασταθούν από καινούργια στα μέλη του νέου πληθυσμού. Τα υπόλοιπα χρωμοσώματα δημιουργούνται με αντιγραφή των παλαιών χρωμοσωμάτων (cloning). Αν η πιθανότητα αυτή είναι μικρή, τότε μπορεί να εγκλωβιστεί ο πληθυσμός σε κάποιο τοπικό ακρότατο, αφού πολλοί πρόγονοι θα περνάν στη νέα γενιά. Αν η πιθανότητα αυτή είναι μεγάλη, τότε μέσα στους απογόνους θα εμφανιστεί το ολικό ακρότατο.

Υπάρχουν τρεις βασικές τεχνικές διασταύρωσης:

- Η Διασταύρωση ενός σημείου είναι η πιο απλή μορφή και χρησιμοποιείται στις περισσότερες περιπτώσεις. Επιλέγεται τυχαία ένα μία θέση στα διασταυρούμενα χρωμοσώματα και ανταλλάσσεται το δεξί τμήμα του πρώτου χρωμοσώματος με το αριστερό του δεύτερου και τούμπαλιν, όπως βλέπουμε και στο παρακάτω σχήμα:



**Εικόνα 4: Διασταύρωση ενός σημείου**

- Η Διασταύρωση δύο σημείων, η οποία χρησιμοποιείται σπάνια και δεν έχει κάποιο ουσιαστικό όφελος στην εξέλιξη του γενετικού αλγορίθμου. Σε αυτήν την περίπτωση, επιλέγονται δύο σημεία ανταλλαγής γενετικού υλικού και μεταφέρονται τα αντίστοιχα τμήματα.
- Η Ομοιόμορφη διασταύρωση, στην οποία τα χρωμοσώματα πρέπει να έχουν το ίδιο μήκος. Εδώ οι απόγονοι παίρνουν τα στοιχεία τους είτε από τον πρώτο είτε από το δεύτερο γονέα με πιθανότητα 50%.

### 1.3.9 Μετάλλαξη

Η μετάλλαξη ενεργεί σε ένα μέλος κάθε φορά. Καθώς αντιγράφονται χρωμοσώματα από τον γονέα στο παιδί, επιλέγεται βάσει της πιθανότητας μετάλλαξης ένα από αυτά και αλλάζει ( αν έχει χρησιμοποιηθεί το δυαδικό αλφάβητο, το στοιχείο αυτό αντιστρέφεται.) Η μετάλλαξη λειτουργεί ως ασφαλιστική δικλείδα για τις περιπτώσεις που κατά τις παραπάνω διαδικασίες χαθούν κάποιες πολύτιμες γενετικές πληροφορίες. Δε γίνεται, δηλαδή, με σκοπό τη δημιουργία νέων λύσεων. Τέλος η μετάλλαξη χρησιμοποιείται και για να γίνουν μικρές αλλαγές στον πληθυσμό.

### 1.3.10 Κριτήριο τερματισμού

Το κριτήριο τερματισμού ορίζει πότε θα σταματήσει να εκτελείται ο γενετικός αλγόριθμος. Πρέπει να είναι τέτοιο, ώστε α) να μην επιτρέπει να επαναλαμβάνεται ο αλγόριθμος ενώσω δεν παράγει καλύτερο αποτέλεσμα και β) να τον διακόπτει όταν με κάποια βεβαιότητα έχει βρεθεί η λύση του προβλήματος.

Κάποια από τα γνωστότερα κριτήρια τερματισμού είναι τα παρακάτω:

- Αριθμός επαναλήψεων. Είναι το πιο γνωστό κριτήριο τερματισμού. Τίθεται από την αρχή ένας αριθμός ως ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων του αλγορίθμου. Η χρήση αυτού του κριτηρίου δημιουργεί προβλήματα αφού δεν χρησιμοποιεί πληροφορίες του προβλήματος που λύνεται ή μπορεί ο αριθμός των επαναλήψεων να εξαντληθεί χωρίς να έχει βρεθεί η πραγματική λύση ή μπορεί η λύση να έχει προσπεραστεί, ευρισκόμενη σε κάποια προηγούμενη επανάληψη.
- Προσέγγιση στόχου. Χρησιμοποιείται όταν είναι γνωστή η από την αρχή ή η λύση ή μια γενική της περιγραφή. Κάτι τέτοιο όμως συμβαίνει πολύ σπάνια ( πχ σφάλμα εκπαίδευσης σε τεχνητά νευρωνικά δίκτυα).
- Κριτήριο ομοιότητας. Χρησιμοποιείται αρκετά συχνά υπολογίζοντας τη μέση απόσταση μεταξύ όλων των χρωμοσωμάτων. Αν αυτή ευρεθεί μικρότερη από ένα όριο, τότε ο αλγόριθμος τερματίζεται. Η μέθοδος αυτή είναι ιδιαίτερα χρονοβόρα εάν ο πληθυσμός είναι πολυάριθμος και επίσης είναι ευαίσθητη σε σφάλματα πράξεων.

- Διαφορά καλύτερου χειρότερου. Αυτό το κριτήριο χρησιμοποιείται συχνά και υπερέχει του προηγούμενου αφού απαιτούνται λιγότερες πράξεις για την υλοποίηση του. Υπολογίζεται κάθε φορά η καταλληλότητα του καλύτερου και του χειρότερου χρωμοσώματος και ο αλγόριθμος τερματίζεται εάν η διαφορά τους είναι μικρότερη ενός αριθμού.

### 1.3.11 Διαδικασία γενετικών αλγορίθμων

Τώρα που περιγράψαμε τους όρους και τις διαδικασίες που χρησιμοποιούν οι αλγόριθμοι αυτοί, μπορούμε να παραθέσουμε ένα γενικό σχήμα της λειτουργίας τους:

```

begin
  t ← 0
  Αρχικοποίηση το P(t)
  Αξιολόγηση το P(t)
  while ( not συνθήκη τερματισμού) do
    begin
      t ← t+1
      Επιλογή του P(t) από το P(t-1)
      Τροποποίηση του P(t)
      Αξιολόγηση του P(t)
    end
  end

```

Εικόνα 5: Διαδικασία Γενετικών Αλγορίθμων

Όπου P(t), ο πληθυσμός τη χρονική στιγμή t.

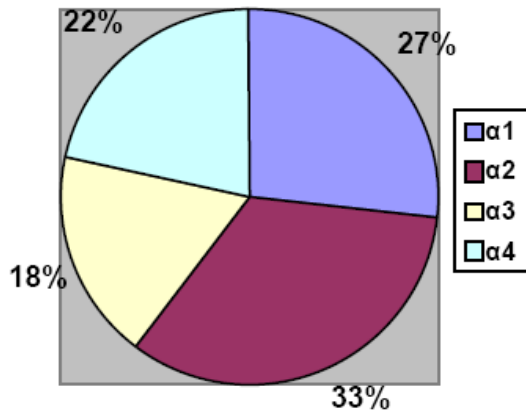
### 1.3.12 Παράδειγμα εφαρμογής γενετικού αλγορίθμου

Έστω τώρα ότι θέλουμε να βρούμε το μέγιστο της συνάρτησης  $F = x^2 + y$  με πεδία ορισμού  $0 \leq x, y \leq 15$ . Κατ' αρχήν πρέπει να κωδικοποιήσουμε τα άτομα. Έχουμε δύο μεταβλητές των οποίων οι τιμές κυμαίνονται από 0 έως 15. Σε δυαδική μορφή χρειαζόμαστε 4 ψηφία για να κωδικοποιήσουμε αυτούς τους αριθμούς. Επομένως, το άτομο θα αποτελείται από 8 ψηφία όπου τα 4 πρώτα αντιστοιχούν στην τιμή του x ενώ τα επόμενα 4 στην τιμή του y. Το άτομο 00101010 κωδικοποιεί την τιμή 2 για το x και 10 για το y. Τώρα έστω ο αρχικός πληθυσμός  $\alpha_1 = 01000101$ ,  $\alpha_2 = 01100010$ ,  $\alpha_3 = 01000101$ ,  $\alpha_4 = 01001001$ . Η συνάρτηση αποτίμησης σε αυτή την περίπτωση είναι το ίδιο το πρόβλημα. Έτσι αποκωδικοποιώντας τις συμβολοσειρές παίρνουμε τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα:

Συμβολοσειρά	Απόδοση	Λόγος Απόδοσης/ Συνολικής Απόδοσης.
01000101 $\rightarrow x=4, y=5$	21	27%
01100010 $\rightarrow x=6, y=2$	38	33%
01000101 $\rightarrow x=4, y=5$	21	18%
01001001 $\rightarrow x=4, y=9$	25	22%
Συνολική απόδοση	115	

Εικόνα 6: Αποτελέσματα αποκωδικοποίησης

Μετά ακολουθεί η διαδικασία της επιλογής. Η εφαρμογή της ρουλέτας θα είχε το παρακάτω αποτέλεσμα:



Εικόνα 7: Αποτέλεσμα εφαρμογής ρουλέτας

Έτσι θα μπορούσαμε να παραγάγουμε 4 τυχαίους αριθμούς από το 0 ως το 99 για να σχηματίσουμε τη δεξαμενή ζευγαρώματος. Αν ο αριθμός ήταν από 0 ως 26 τότε επιλέγεται το α1, από 27 έως 59 επιλέγεται το α2, από 60 έως 77 το α3 και 78 μέχρι το 99 το α4.

Έστω τώρα ότι επιλέγονται για γονείς ο α2 και ο α3. Πρέπει να βρούμε ένα τυχαίο αριθμό μεταξύ 1 και 8 όπου θα γίνει η διασταύρωση. Έστω ότι ο αριθμός είναι το 6.

α2=011000|10                      □01100001

α3=010001|01                        □01000110

Η μετάλλαξη που γίνεται με πιο μικρή πιθανότητα έστω ίση με 2%. Ας υποθέσουμε ότι εφαρμόζεται στο 1 bit του α4 για χάριν του παραδείγματος.

α4=01001001                        □11001001

Η νέα γενιά θα είναι τώρα η εξής α1=01000101, α2=01100001, α3=01000110, α4=11001001. Έτσι αποκωδικοποιώντας τις συμβολοσειρές παίρνουμε τα αποτελέσματα του παρακάτω πίνακα:

Συμβολοσειρά	Απόδοση	Λόγος Απόδοσης/ Συνολικής Απόδοσης.
01000101 → x=4,y=5	21	10%
01100001 → x=6,y=1	37	16%
01000110 → x=4,y=6	22	9%
11001001 → x=12,y=9	153	65%
Συνολική απόδοση	233	

Εικόνα 8: Αποτελέσματα αποκωδικοποίησης

Παρατηρούμε ότι σε μία και μόνο επανάληψη η συνολική απόδοση έχει αυξηθεί κατά πολύ.

### 1.3.13 Προβλήματα που λύνουν οι γενετικοί αλγόριθμοι

Οι γενετικοί αλγόριθμοι χρησιμοποιούνται για να λύσουν προβλήματα εύρεσης μεγίστου – ελαχίστου μιας συνάρτησης πολλών μεταβλητών, στην επεξεργασία εικόνων στις οποίες ανιχνεύονται από τις ακμές τους μέχρι αντικείμενα απεικονισμένα σε αυτές και τέλος μία σειρά γνωστών προβλημάτων όπως αυτά του περιοδεύοντος πωλητή, της αποθήκευσης κιβωτίων, της σχεδίασης VLSI κυκλωμάτων, του καταμερισμού εργασιών, του ωρολογίου προγράμματος κ.α.

## 1.4 Αλγόριθμος της πυγολαμπίδας (Firefly Algorithm)

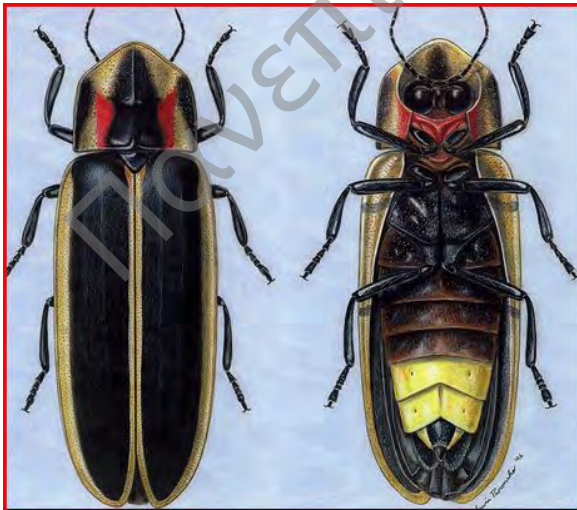
### 1.4.1 Εισαγωγή

Ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας (FA) είναι ένας πολύ σύγχρονος μετεωρετικός αλγόριθμος βελτιστοποίησης, εμπνευσμένος από τη φύση, που αναπτύχθηκε από τον Xin - She Yang το 2007. Από την εφαρμογή του σε διάφορα προβλήματα έχει προκύψει ότι υπερέρχει σε άλλους ομόλογους του, όπως ο αλγόριθμος σμήνους (Particle Swarm Optimization) για τους εξής λόγους: συγκλίνει πιο γρήγορα στη βέλτιστη τιμή που αναζητείται και η σύγκλιση αυτή γίνεται με πιο φυσικό τρόπο από ό,τι στους ομόλογους αλγόριθμους.

### 1.4.2 Πηγή έμπνευσης του αλγορίθμου firefly

Οι πυγολαμπίδες ανήκουν στην οικογένεια των Λαμπυρίδων και είναι έντομα που μοιάζουν με μικρά φτερωτά σκαθάκια, τα οποία έχουν την ικανότητα να παράγουν ένα φως με ελάχιστη θερμότητα τις νυχτερινές ώρες, ώστε να προσελκύουν συντρόφους. Οι επιστήμονες πιστεύουν ότι το φως αυτό παράγεται από έναν μηχανισμό που μοιάζει αυτόν του πυκνωτή, ο οποίος φορτίζει αργά μέχρι να συσσωρευτεί μία συγκεκριμένη ποσότητα φορτίου. Από το σημείο αυτό και μετά απελευθερώνεται ενέργεια με τη μορφή φωτός και μετά ο κύκλος επαναλαμβάνεται.

Ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας αναπτύχθηκε από τον Xin-She Yang το 2008. Αυτό που κίνησε το ενδιαφέρον του επιστήμονα δεν ήταν το φως που εκπέμπει το έντομο που αναβοσβήνει αλλά η εξασθένηση της φωτεινότητας σε συνάρτηση με την απόσταση σε συνδυασμό με την αμοιβαία έλξη των πυγολαμπίδων. Ο αλγόριθμος θεωρεί ότι κάθε πυγολαμπίδα παρατηρεί από τη θέση της την ένταση του φωτός των υπόλοιπων εντόμων καθώς ψάχνει να μετακινηθεί κοντά στη φωτεινότερη ενώ δεν αντιλαμβάνεται την ένταση του δικού της φωτισμού.



Εικόνα 9: Πυγολαμπίδα

### 1.4.3 Ο αλγόριθμος firefly σε ψευδοκώδικα

Ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας είναι ένας σχετικά νέος μετα-ευριστικός αλγόριθμος. Σε αυτόν έχουν γίνει κάποιες παραδοχές που εξιδανικεύουν τη συμπεριφορά των εντόμων αυτών, οι οποίες είναι:

1. Όλες οι πυγολαμπίδες είναι αμφισεξουαλικές.
2. Κάθε πυγολαμπίδα προσελκύεται μόνο από αυτή που εκπέμπει πιο λαμπερό φως από την ίδια. Η δύναμη της έλξης είναι ανάλογη με τη λάμψη της πυγολαμπίδας, η οποία εξασθενεί όσο αυξάνεται η απόσταση από αυτή. Όσο για την πιο λαμπερή πυγολαμπίδα, κινείται τυχαία.
3. Η ένταση της λάμψης κάθε πυγολαμπίδας καθορίζει την ποιότητα της λύσης. Στις περισσότερες περιπτώσεις η λάμψη αυτή είναι ανάλογη της αντικειμενικής συνάρτησης του προβλήματος.

Βάσει αυτών των παραδοχών ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας περιγράφεται σε ψευδοκώδικα ως εξής:

```

Είσοδος :  $f(x) = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ; //αντικειμενική συνάρτηση
            $M, I_0, \gamma, \alpha$ ; //σταθερές οριζόμενες από το χρήστη
Έξοδος :  $x^{\min}$ ; //θέση ελαχίστου στην αντικειμενική συνάρτηση
for  $i \leftarrow 1$  to  $m$  do
   $x^i \leftarrow$  Αρχική_Λύση ;
end
while κριτήρια τερματισμού δεν έχουν ικανοποιηθεί do
   $\min \leftarrow \arg \min (f(x^i))$ ; // $i \in \{1, \dots, m\}$ 
  for  $i \leftarrow 1$  to  $m$  do
    for  $j \leftarrow 1$  to  $m$  do
      if  $f(x^i) < f(x^j)$  then //μετακίνηση του  $x^i$  προς το  $x^j$ 
         $d_{i,j} \leftarrow$  Απόσταση  $(x^i, x^j)$ ;
         $\beta \leftarrow$  Ελκυστικότητα  $(I_0, \gamma, d_{i,j})$ ;
         $x^i \leftarrow (1-\beta) * x^i + \beta * x^j + \alpha * (\text{τυχαίος αριθμός}() - 1/2)$ ; //μετακίνηση
      end
    end
  end
   $x^{\min} \leftarrow x^{\min} + \alpha * (\text{τυχαίος αριθμός}() - 1/2)$ ; //τυχαία μετακίνηση πιο λαμπερών
end

```

Στον παραπάνω αλγόριθμο ισχύουν οι παρακάτω συμβολισμοί:

- $m$ : ο αριθμός των πυγολαμπίδων
- $I_0$ : η ένταση του φωτός της πηγής
- $\gamma$ : συντελεστής απορρόφησης
- $\alpha$ : μέγεθος του τυχαίου βήματος

Όλα αυτά θα αναλυθούν στη συνέχεια.

### 1.4.4 Ελκυστικότητα, Απόσταση και μετακίνηση

- Ελκυστικότητα (attractiveness)  
Ας φανταστούμε μια νύχτα στην εξοχή χωρίς κανένα φως εκτός από αυτό που παράγουν οι πυγολαμπίδες που ζουν στην περιοχή. Η ένταση του φωτός κάθε πυγολαμπίδας σε μία

συγκεκριμένη θέση είναι ανάλογη της ποιότητας της λύσης που αναπαριστά στο πρόβλημα που επιλύεται με τον αλγόριθμο. Έστω τώρα ότι κάθε πυγολαμπίδα θέλει να αποκτήσει λύση καλύτερης ποιότητας. Τότε θα πρέπει να προχωρήσει προς την κατεύθυνση που βρίσκεται μία άλλη πυγολαμπίδα που βγάζει περισσότερο φως από το δικό της. Κάθε πυγολαμπίδα αντιλαμβάνεται τη φωτεινότητα μίας άλλης διαφορετικά. Δηλαδή δεν υπάρχει αντικειμενική αντίληψη της φωτεινότητας μιας συγκεκριμένης πυγολαμπίδας από τις άλλες. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του ότι ο αέρας απορροφά το φως της συναρτήσει της απόστασης των παρατηρητών.

Η μείωση της έντασης του φωτός κάθε πυγολαμπίδας ακολουθεί τον τύπο:

$$I(I_0, d) \leftarrow I_0 / d^2 \quad (1.6)$$

όπου  $I_0$ : η ένταση του φωτός σε μηδενική απόσταση

$d$ : η απόσταση της πυγολαμπίδας από της πηγή φωτός

Η εξασθένηση της φωτεινότητας εξαιτίας της απορρόφησης του αέρα υπακούει στον τύπο:

$$A(I_0, \gamma, d) \leftarrow I_0 * e^{-\gamma * d} \quad (1.7)$$

όπου  $\gamma$ : συντελεστής απορρόφησης

Συνδυάζοντας τις δύο παραπάνω σχέσεις έχουμε τη συνάρτηση ελκυστικότητας:

$$\text{Attractiveness}(I_0, \gamma, d) \leftarrow I_0 * e^{-\gamma * d * d} \quad (1.8)$$

Σε προβλήματα που θέλουμε πιο γρήγορους υπολογισμούς, η παραπάνω συνάρτηση πρέπει να μειώνεται με ελαφρώς πιο αργό ρυθμό, οπότε μπορεί να χρησιμοποιηθεί αυτός ο τύπος:

$$\text{Attractiveness}(I_0, \gamma, d) \leftarrow I_0 / (1 + \gamma * d^2) \quad (1.9)$$

Αντί των συμβόλων  $I$  και  $I_0$  θα χρησιμοποιούνται αντίστοιχα τα σύμβολα  $\beta$  και  $\beta_0$ .

#### ➤ Απόσταση (distance)

Έστω δύο πυγολαμπίδες  $x^i, x^j$  και  $d_{i,j}$  μεταξύ τους απόσταση. Τότε ισχύει ότι  $d_{i,j}: X \times X \rightarrow \mathbb{R}$ , όπου με  $X$  αναπαρίσταται το σύνολο όλων των λύσεων. Η συνάρτηση της απόστασης έχει το ρόλο να δίνει ποικιλομορφία στις λύσεις. Εάν για το χώρο των λύσεων  $X$  ισχύει ότι  $X = \mathbb{R}^n$ , τότε η συνάρτηση της απόστασης μπορεί να πάρει τη μορφή της Ευκλείδειας απόστασης ανάμεσα σε δύο πυγολαμπίδες:

$$d_{i,j} = \text{Distance}(x^i, x^j) = r_{ij} = \|x_i - x_j\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (1.10)$$

Αν πρόκειται για συμβολοσειρές, τότε η συνάρτηση της απόστασης μπορεί να αναπαρασταθεί με την απόσταση Hamming ανάμεσα στις συμβολοσειρές αυτές. Για ακόμη πιο περίπλοκες δομές, η συνάρτηση της απόστασης θα πρέπει να δίνει πληροφορίες για το ποσό των διαφορετικών οντοτήτων σε κάθε δομή.

#### ➤ Μετακίνηση (Movement)

Η διαδικασία της μετακίνησης αποτελείται από δύο στοιχεία: την προσέγγιση των καλύτερων τοπικών λύσεων και το τυχαίο βήμα. Για να γίνει μια αποτελεσματική αναζήτηση, θα πρέπει αυτά τα δύο στοιχεία να βρίσκονται σε ισορροπία μιας και είναι κατά κάποιον τρόπο συμπληρωματικά.

Οι τύποι για τη μετακίνηση μιας πυγολαμπίδας  $x^i$  προς μία  $x^j$  διαμορφώνονται ως εξής:

$$x^i \leftarrow x^i + \text{Attractiveness}(I_0, \gamma, \text{Distance}(x^i, x^j)) * (x^j - x^i) + \alpha * (\text{τυχαίος αριθμός}() - 1/2) \quad (1.11)$$

$$x^i \leftarrow x^i + \text{Attractiveness}(I_0, \gamma, d(x^i, x^j)) * (x^j - x^i) + \alpha * (\text{τυχαίος αριθμός}() - 1/2) \quad (1.12)$$

$$x^i \leftarrow x^i + I_0 * e^{-\gamma * d} * (x^j - x^i) + \alpha * (\text{τυχαίος αριθμός}() - 1/2) \quad (1.13)$$

$$x^i \leftarrow x^i + \beta * (x^j - x^i) + \alpha * (\text{τυχαίος αριθμός}() - 1/2) \quad (1.14)$$

$$x^i \leftarrow (1 - \beta) * x^i + \beta * x^j + \alpha * (\text{τυχαίος αριθμός}() - 1/2) \quad (1.15)$$

όπου:  $\gamma \in [0, \infty)$ , σταθερά συντελεστή απορρόφησης που ορίζεται από το χρήστη

$I_0$ : η ένταση φωτός στην πηγή

$\alpha$ : τιμή οριζόμενη από το χρήστη και επηρεάζει το μεγαλύτερο τυχαίο βήμα

Αξίζει να σημειωθεί ότι όταν το  $I_0$  μπορεί να είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης ( $I_0 = f(x^i)$ ) τότε πρέπει να ελεγχθεί ότι για κάθε  $x \in X$ :  $f(x) \geq 0$  ή συνήθως τίθεται από το χρήστη ως σταθερά,

πχ  $Io=1$ . Τέλος η συνάρτηση τυχαίος αριθμός() στις ισότητες αυτές παράγει ένα διάνυσμα αριθμών που ακολουθούν την κανονική κατανομή και ανήκουν στο διάστημα  $[0,1)$ .

Παρατηρώντας κανείς την τελευταία σχέση μπορεί να αντιληφθεί ότι οι παράμετροι  $\alpha$  και  $\beta$  επηρεάζουν το βήμα κάθε πυγολαμπίδας ως εξής: Το  $\beta$  καθορίζει το μέγεθος του βήματος κάθε πυγολαμπίδας προς την πιο φωτεινή της ενώ το  $\alpha$  τη μεγαλύτερη ακτίνα ενός τυχαίου βήματος.

#### 1.4.5 Διαμόρφωση παραμέτρων στον αλγόριθμο firefly

Η παράμετρος  $\alpha$  ελέγχει την τυχειότητα και κατά κάποιον τρόπο την ποικιλομορφία των λύσεων. Έτσι μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων ώστε να μεταβάλλεται καθώς αυτές αυξάνονται. Αν συμβολίσουμε με  $t$  τον αριθμό των επαναλήψεων, τότε η παράμετρος  $\alpha$  θα συμβολίζεται σε σχέση με τις επαναλήψεις ως  $\alpha_t$  και μπορεί να εφαρμοσθεί ο τύπος:

$$\alpha_t = \alpha_0 * \delta^t \quad (1.16) , \text{ με } 0 < \delta < 1$$

Ως  $\alpha_0$  ορίζεται ο αρχικός παράγοντας κλιμάκωσης τυχειότητας, ενώ το  $\delta$  είναι ουσιαστικά ένας σταθεροποιητικός παράγοντας. Στις περισσότερες εφαρμογές τίθεται συνήθως  $\delta = 0.95$  ως  $0.97$ .

Σχετικά με το αρχικό  $\alpha_0$ , οι προσομοιώσεις έχουν δείξει ότι ο αλγόριθμος γίνεται πιο αποδοτικός εάν το  $\alpha_0$  κλιμακώνεται με τρόπο ανάλογο με τις μεταβλητές του προβλήματος. Εάν υποθέσουμε ότι το  $L$  είναι η μέση κλίμακα του προβλήματος, τότε μπορεί να τεθεί  $\alpha_0 = 0.01 * L$ . Ο αριθμός  $0,01$  προκύπτει στη σχέση αυτή αν σκεφτούμε ότι τυχαίες διαδρομές απαιτούν έναν αριθμό τυχαίων βημάτων ώστε να επιτευχθεί ο στόχος ενόσω εξισορροπείται η εκμετάλλευση του χώρου αναζήτησης χωρίς όμως να φτάνει η πυγολαμπίδα μακριά σε λίγα βήματα.

Η παράμετρος  $\gamma$  που αποτελεί το συντελεστή απορρόφησης της φωτεινότητας θα πρέπει να συσχετίζεται με τη μέση κλίμακα του προβλήματος. Σε γενικές γραμμές μπορεί να τεθεί  $\gamma = 1/\sqrt{L}$ . Αν κλιμάκωση δε μεταβάλλεται αισθητά μέσα στο πρόβλημα τότε τίθεται  $\gamma = 0$  (1). Όπως ειπώθηκε και πιο πάνω η παράμετρος  $\beta$  ελέγχει τη φωτεινότητα ενώ για το  $\beta_0$  που αποτελεί την αρχική φωτεινότητα, έχει διαπιστωθεί ότι η ανάθεση της τιμής 1 είναι ικανοποιητική για τα περισσότερα προβλήματα. Τέλος για στον πληθυσμό  $n$  τίθενται τιμές μέσα από το διάστημα  $[15,100]$  με προτιμώμενες αυτές που ανήκουν στο  $[25,40]$ .

#### 1.4.6 Ειδικές περιπτώσεις στον αλγόριθμο firefly

Υπάρχουν δύο ειδικές περιπτώσεις στον αλγόριθμο της πυγολαμπίδας και σχετίζονται με τις ακραίες τιμές που μπορεί να πάρει ο συντελεστής απορρόφησης  $\gamma$ . Είπαμε πιο πάνω ότι  $\gamma \in [0, \infty)$ , επομένως οι ακραίες αυτές τιμές είναι  $\gamma = 0$  και  $\gamma = \infty$ .

- Αν  $\gamma = 0$ , τότε  $\beta = Io * e^{-0 * d} * d = Io$ . Αυτό μεταφράζεται στο ότι η ατμόσφαιρα στην οποία πετάν οι πυγολαμπίδες είναι πολύ καθαρή με αποτέλεσμα το φως τους να μη διασπείρεται. Κατά συνέπεια, κάθε πυγολαμπίδα μπορεί να δει τις υπόλοιπες καθαρά από όποια απόσταση και αν να βρίσκεται, αφού το φως τους δεν μειώνεται με την απόσταση. Σε αυτή την περίπτωση, το  $b$  παίρνει τη μεγαλύτερη τιμή που μπορεί να πάρει και οι πυγολαμπίδες προσπαθούν να μετακινηθούν προς αυτές που εκπέμπουν δυνατότερης έντασης φως με τα μεγαλύτερα δυνατά βήματα. Οι συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  εδώ δεν βρίσκονται σε ισορροπία μεταξύ τους αφού εάν ο  $\beta$  εκφράζει το κατά πόσο αξιοποιείται ο χώρος αναζήτησης και ο  $\alpha$  το πόσο γρήγορα γίνεται αυτό, τότε ο πρώτος είναι ο μέγιστος δυνατός ενώ ο δεύτερος είναι κανονικός.
- Αν  $\gamma = \infty$ , τότε  $\beta = Io * e^{-\infty * d} * d$ . Αυτό σημαίνει ότι οι πυγολαμπίδες βρίσκονται σε μια περιοχή που έχει πέσει πυκνή ομίχλη με αποτέλεσμα να μην μπορεί να δει η μία την άλλη. Τα μόνα βήματα που μπορούν να κάνουν οι πυγολαμπίδες είναι τυχαία βήματα, δηλαδή να κινούνται προς τυχαίες κατευθύνσεις. Εδώ και πάλι δεν υπάρχει ισορροπία ανάμεσα στους συντελεστές  $\alpha$  και  $\beta$  αφού με το σκεπτικό που αναφέρθηκε πιο πάνω, οι πυγολαμπίδες αδυνατούν να εκμεταλλευτούν το γύρω χώρο.



### 1.4.7 Πολυπλοκότητα του αλγόριθμου firefly

Η πολυπλοκότητα των μετα-ευριστικών αλγορίθμων υπολογίζεται σχετικά γεγονός που καθιστά εύκολη την υλοποίησή τους. Παρατηρώντας τον ψευδοκώδικα που έχει παρατεθεί πιο πάνω βλέπουμε ότι ο αλγόριθμος αποτελείται από δύο εσωτερικές επαναλήψεις καθώς εξετάζει τις  $n$  οντότητες ( τις επαναλήψεις for) καθώς και μία εξωτερική επανάληψη (την επανάληψη while) για τις  $t$  επαναλήψεις του. Κατά συνέπεια ο αλγόριθμος αυτός στη χειρότερη περίπτωση έχει πολυπλοκότητα  $O(n^2t)$ . Συνήθως το  $n$  παίρνει μικρές τιμές, από 15 έως 100, με καλύτερο εύρος το 25-40. Έτσι λοιπόν, αν το  $n$  είναι μικρό και το  $t$  μεγάλο (έστω 5000) τότε το υπολογιστικό κόστος του αλγορίθμου είναι σχετικά φθηνό αφού η πολυπλοκότητα του είναι γραμμική σε σχέση με το  $t$ . Το κύριο υπολογιστικό κόστος θα είναι στις αξιολογήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης. Ειδικότερα εάν αυτές είναι πολύπλοκες, κάτι που συμβαίνει συχνά στις βελτιστοποιήσεις που γίνονται με μετα-ευριστικούς αλγόριθμους.

Εάν το πλήθος των πυγολαμπίδων  $n$  είναι σχετικά μεγάλο, τότε είναι πιθανό να χρησιμοποιηθεί μία εσωτερική επανάληψη ώστε να ταξινομήσει τη φωτεινότητα κάθε πυγολαμπίδας με κατάλληλους αλγόριθμους γι' αυτή τη δουλειά. Σε αυτή την περίπτωση η πολυπλοκότητα του αλγορίθμου γίνεται ίση με  $O(n t \log(n))$ .

### 1.4.8 Εφαρμογές του αλγόριθμου firefly

Ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας έχει εφαρμοστεί σε πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης. Ο Horng χρησιμοποίησε έναν αλγόριθμο βασισμένο στον firefly στην ψηφιακή συμπίεση εικόνας με σκοπό να μειώσει τον υπολογιστικό χρόνο της διαδικασίας αυτής. Οι Banati και Bajaj χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο firefly στη διαδικασία επιλογής χαρακτηριστικών και έδειξαν ότι παρουσίασε καλύτερη χρονική απόδοση από τους άλλους αλγορίθμους που είχαν χρησιμοποιεί.

Στα προβλήματα σχεδίασης μηχανικών προβλημάτων οι Gandomi, Azad και Azad επιβεβαίωσαν ότι ο αλγόριθμος firefly μπορεί να λύσει μη γραμμικά, πολλών καταστάσεων σχεδιαστικά προβλήματα. Οι Basu και Mahanti καθώς και ο Chatterjee χρησιμοποίησαν τον αλγόριθμο αυτό στη βελτιστοποίηση σχεδιασμού κεραιών. Στο ίδιο θέμα είχε εφαρμοστεί και ο αλγόριθμος του σμήνους των μελισσών. Η πράξη απέδειξε ότι ο firefly είναι ο καλύτερος από τους δύο. Ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας όμως ξεπερνάει σε απόδοση και τον αλγόριθμο σμηνών (PSO), όπως απέδειξαν οι Zaman και Matin και μάλιστα βρίσκει και καλύτερα ολικά ακρότατα.

Ο Sayadi και η ομάδα του κατάφεραν να λύσουν μη ντετερμινιστικά προβλήματα σχεδιασμού πολυωνυμικού χρόνου πολύ αποδοτικά αναπτύσσοντας μία κατάλληλη έκδοση του firefly. Επίσης, έχουν γίνει λεπτομερείς μελέτες που αποδεικνύουν την αποτελεσματικότητα του firefly στην επίλυση μιας πλατιάς γκάμας προβλημάτων δοκιμών (test problems), όπως αυτά της διανομής φορτίου σε πολλά αντικείμενα (multiojective load dispatch problems). Ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας μπορεί να εφαρμοστεί επιτυχώς και στο πρόβλημα του περιοδεύοντος πωλητή.

Ο firefly όμως δεν περιορίζεται μόνο σε αυτά που αναφέρθηκαν αλλά μπορεί να εφαρμοστεί και σε προβλήματα ομαδοποίησης και ταξινόμησης παρουσιάζοντας άριστη απόδοση. Για παράδειγμα ο Senthilnath και η ομάδα του διεξήγαγαν μια εκτεταμένη μελέτη συγκρίνοντας τον firefly με 11 διαφορετικούς αλγόριθμους καταλήγοντας ότι είναι απόλυτα κατάλληλος για να κάνει ομαδοποίηση. Στις περισσότερες των περιπτώσεων μάλιστα ο firefly ξεπερνούσε σε απόδοση τους άλλους αλγόριθμους.

Τέλος, όπως έδειξαν οι Farahani και Abshouri ο firefly μπορεί να εφαρμοστεί ακόμη και σε προβλήματα βελτιστοποίησης σε περιβάλλοντα δυναμικού προγραμματισμού.

### 1.4.9 Τι κάνει τόσο αποδοτικό τον αλγόριθμο firefly

Από το εύρος των εφαρμογών του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας από το 2008 που αναπτύχθηκε μέχρι σήμερα γίνεται φανερό ότι έχει κερδίσει το ενδιαφέρον των επιστημόνων της πληροφορικής. Αυτό το

γεγονός σημαίνει ότι είναι ένας πολύ αποδοτικός αλγόριθμος. Ας κάνουμε μια προσπάθεια να εξετάσουμε την ουσία του αλγορίθμου.

Ο firefly πρόκειται για έναν αλγόριθμο που βασίζεται στη νοημοσύνη του σμήνους. Μάλιστα αν ο συντελεστής απορρόφησης της φωτεινότητας τεθεί ίσος με το μηδέν, τότε πρόκειται για μία ειδική περίπτωση του αλγορίθμου των σμηνών (PSO), ενός ακόμη καταξιωμένου εργαλείου βελτιστοποίησης.

Ωστόσο ο firefly έχει δύο βασικά πλεονεκτήματα έναντι των άλλων προγενέστερων αλγορίθμων της ίδιας οικογένειας: α) γίνεται υποδιαίρεση σε αυτόν αυτόματα και β) βρίσκει πολλά ακρότατα. Πρώτα από όλα η λειτουργία του βασίζεται στην έλξη και αυτή μειώνεται συναρτησίως της απόστασης. Το γεγονός αυτό έχει ως αποτέλεσμα το ότι όλος ο πληθυσμός μπορεί να υποδιαιρεθεί σε υποκατηγορίες, οπότε στο καθένα από αυτά μπορεί να ευρεθεί τοπικό ακρότατο. Επομένως το ολικό ακρότατο μπορεί να βρεθεί μέσα από αυτά τα τοπικά ακρότατα. Δεύτερον αυτή η υποδιαίρεση επιτρέπει στον αλγόριθμο να βρίσκει όλα τα ακρότατα ταυτόχρονα ακόμη και αν ο πληθυσμός είναι μεγάλος. Με μαθηματικούς όρους η ποσότητα  $1/\sqrt{V}$  ελέγχει τη μέση επιφάνεια που καταλαμβάνει μία ομάδα πυγολαμπίδων, η οποία μπορεί να γίνει ορατή από γειτονικές ομάδες. Οπότε ένας ολόκληρος πληθυσμός μπορεί να χωριστεί σε υποκατηγορίες αν έχει δοθεί αυτή η μέση απόσταση. Προφανώς, στην ακραία περίπτωση που εξετάσαμε πιο πάνω, όπου  $\gamma=0$ , ο πληθυσμός δεν χωρίζεται σε κανένα γκρουπ. Η εν λόγω υποδιαίρεση είναι πολύ σημαντική γιατί επιτρέπει την εφαρμογή του αλγορίθμου σε μη γραμμικά προβλήματα.

Επιπρόσθετα, οι παράμετροι που αναφέρθηκαν προτύτερα μπορούν να μεταβάλλονται κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων, κάτι που μπορεί να φέρει τη σύγκλιση του αλγορίθμου. Αυτό μπορεί να γίνει σε περιπτώσεις που οι συνήθεις τιμές των παραμέτρων αυτών δεν καταφέρνουν να βγάλουν ακρότατο στον αλγόριθμο.

Το παρακάτω παράδειγμα δείχνει την ισχύ και την υπεροχή του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας έναντι του αλγορίθμου των σμηνών (PSO). Έστω η συνάρτηση :  $f(x) = (\sum_{i=1}^d |x_i|) * \exp[-\sum_{i=1}^d \sin(x_i^2)]$ , με  $-2\pi \leq x_i \leq 2\pi$ . Τότε η βελτιστοποίηση της θέτοντας  $d=16$  παράγει τον παρακάτω πίνακα, αν πραγματοποιηθεί με έναν γενετικό αλγόριθμο (GA), με τον αλγόριθμο των σμηνών (PSO) και με τον αλγόριθμο της πυγολαμπίδας (FA):

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ	ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΠΙΤΥΧΙΑΣ
GA	37079 ± 8920	88%
PSO	19725 ± 3204	98%
FA	5152 ± 2493	100%

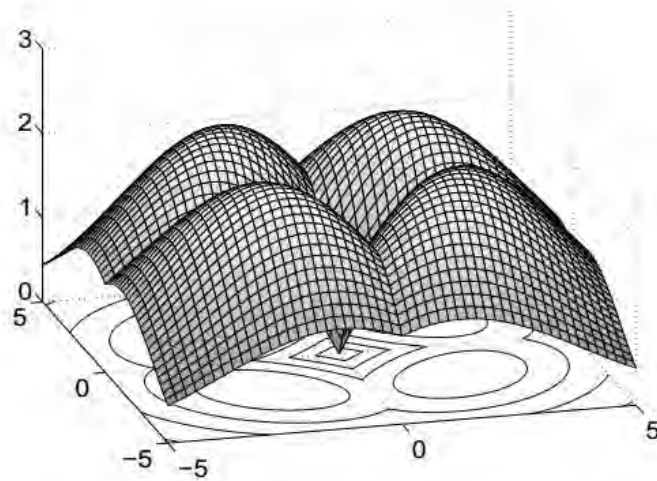
**Πίνακας 1: Αποτελέσματα σύγκρισης firefly με άλλους αλγορίθμους**

Με μία πρόχειρη ματιά στα αποτελέσματα βλέπουμε ότι ο FA εξοικονόμησε περίπου 86% σε σχέση με τον GA ενώ το αντίστοιχο ποσοστό σε σχέση με τον PSO είναι 74%.

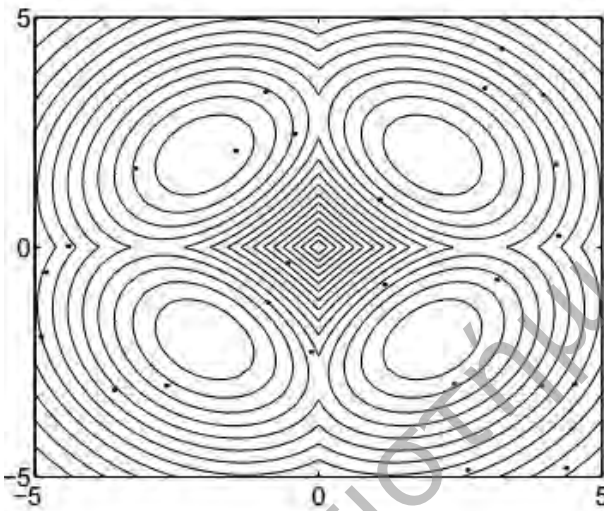
Τέλος, παρατίθεται κι ένα ακόμη παράδειγμα που δείχνει την υποδιαίρεση του πληθυσμού, ώστε να βρεθούν τα ακρότατα συνάρτησης. Έστω η συνάρτηση :

$f(x) = (\sum_{i=1}^2 |x_i|) * \exp[-\sum_{i=1}^2 (x_i^2)]$ , με  $n -10 \leq x_i \leq 10$ . Η συνάρτηση αυτή έχει τέσσερα ολικά μέγιστα ίσα μεταξύ τους με 0.6065 στις θέσεις:  $(1/2, 1/2)$ ,  $(1/2, -1/2)$ ,  $(-1/2, 1/2)$ ,  $(-1/2, -1/2)$  κι ένα ολικό ελάχιστο στη θέση  $(0,0)$ . Είναι δηλαδή μία συνάρτηση τεσσάρων κορυφών. Τα ολικά μέγιστα της μπορούν να βρεθούν με τον αλγόριθμο firefly μετά από περίπου 500 αξιολογήσεις της αντικειμενικής συνάρτησης  $f$ . Αυτό μπορεί να γίνει παίρνοντας ως πληθυσμό 25 πυγολαμπίδες για 20 γενεές.

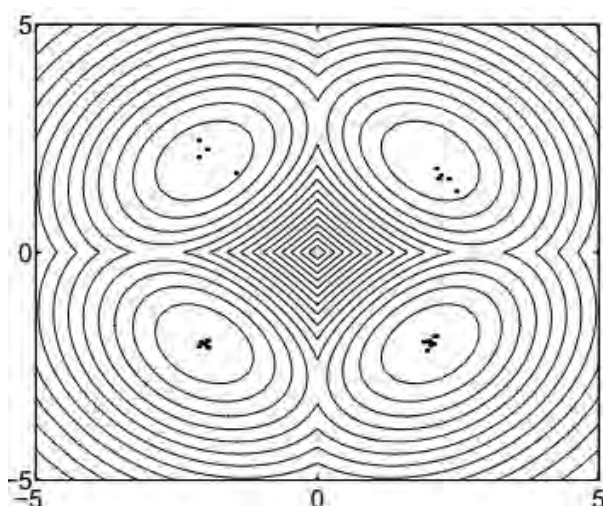
Η γραφική παράσταση της συνάρτησης καθώς και οι μορφές της αρχικής και της τελικής θέσης των πυγολαμπίδων παρουσιάζονται στις επόμενες εικόνες.



Εικόνα 10: Γραφική παράσταση  $f$



Εικόνα 11: Αρχική θέση πυγολαμπίδων



Εικόνα 12: Τελική θέση πυγολαμπίδων

## Κεφάλαιο 2<sup>ο</sup>:

### «Αιολική Ενέργεια και Αιολικά Πάρκα»

#### 2.1 Εισαγωγή

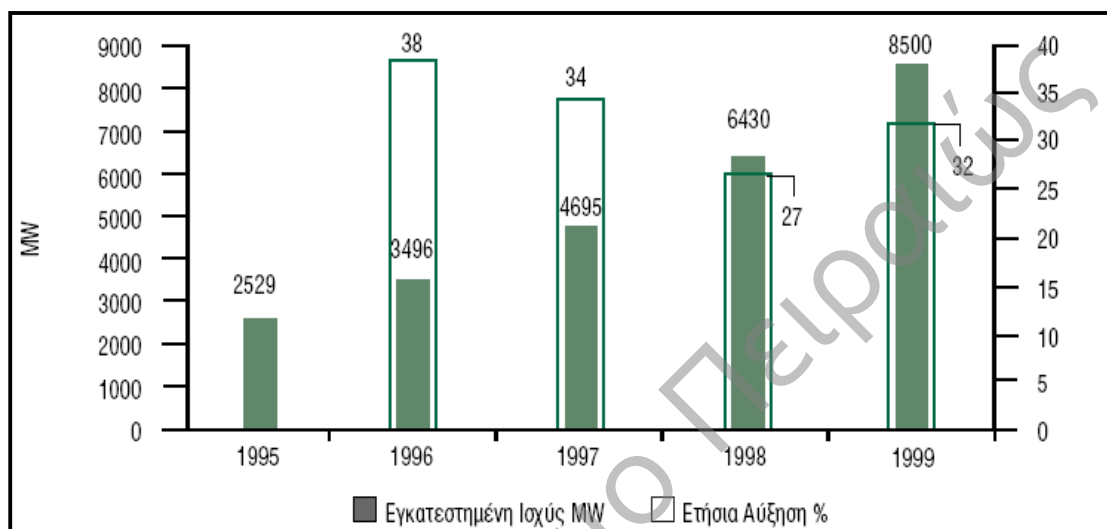
Η αιολική ενέργεια είναι μια από τις πλέον γνωστές και από τις παλαιότερα χρησιμοποιούμενες μορφές ενέργειας. Ο άνθρωπος έχει εκμεταλλευτεί την αιολική ενέργεια από πολύ παλιά. Η αιολική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά για την κίνηση των πλοίων. Επίσης η τεχνολογία των ανεμόμυλων, με τη βοήθεια των οποίων η ενέργεια του ανέμου μετατρέπεται σε μηχανική ενέργεια, είναι γνωστή εδώ και αιώνες. Με τη χρήση των ανεμόμυλων πραγματοποιούνταν το άλεσμα των δημητριακών, η άντληση των νερών από τις πλημμυρισμένες περιοχές και η μεταφορά τους στη θάλασσα (για παράδειγμα στην Ολλανδία) καθώς και άλλες λειτουργίες χρήσιμες για την επιβίωση των κοινωνιών.

Σήμερα, στη γενική τους μορφή οι ανεμοκινητήρες μετατρέπουν την κινητική ενέργεια του ανέμου σε πιο χρήσιμες μορφές ενέργειας, όπως θερμική, ηλεκτρική και φυσικά μηχανική ενέργεια. Ο άνεμος, όμως, είναι μια ανεξέλεγκτη και χρονικά μεταβαλλόμενη σε όλες τις παραμέτρους πηγή ενέργειας, με αποτέλεσμα, η δέσμευση και η χρησιμοποίηση της ενέργειας αυτής να είναι μια πολύ δαπανηρή διαδικασία. Η σχεδίαση και η κατασκευή μιας αποδοτικής και παράλληλα οικονομικής ανεμομηχανής δεν είναι εύκολη δουλειά. Παρόλα αυτά, οι σύγχρονες ανεμομηχανές (η επιστημονική ορολογία που χρησιμοποιείται είναι «συστήματα μετατροπής» της αιολικής ενέργειας, ή πιο απλά «ανεμοκινητήρες», ή όταν παράγουν ηλεκτρική ενέργεια «ανεμογεννήτριες»), χρησιμοποιώντας τα πρόσφατα επιτεύγματα στην τεχνολογία των υλικών, στη μηχανολογία, στην ηλεκτρονική και στην αεροδυναμική, έχουν ανεβάσει σε υψηλά επίπεδα την απόδοσή τους, μειώνοντας συνεχώς το κόστος της παραγόμενης ενέργειας.

Η χρησιμοποίηση του ανέμου ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας βασίζεται στη μετατροπή της ενέργειας που υπάρχει στις κινούμενες μάζες του αέρα σε μηχανική ενέργεια, αποδιδόμενη μέσω ενός περιστρεφόμενου άξονα που τελικά μέσω μιας ηλεκτρογεννήτριας μετατρέπεται σε ηλεκτρισμό. Υπολογίζεται ότι στο 25% της επιφάνειας της γης επικρατούν άνεμοι μέσης ετήσιας ταχύτητας πάνω από 5,1 m/s σε ύψος 10 m. Υποθέτοντας ότι, ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο επιφάνειας μπορούν να εγκατασταθούν κατά μέσον όρο ανεμογεννήτριες ισχύος περίπου 1/3 MW καθώς και το γεγονός ότι ανά MW εγκατεστημένης ισχύος παράγονται περίπου 2000 MWh/έτος, σε συνθήκες μέτριου αιολικού

δυναμικού συνεπάγεται ότι η συνολική ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ανέρχεται σε 20.000 TWh, για εγκατεστημένη ισχύ 10.000 GW. Συγκριτικά, αξίζει να αναφερθεί ότι η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κατά το έτος 1987 ήταν περίπου 9.000 TWh παγκοσμίως. Συνεπώς, είναι φανερό ότι το παγκόσμιο αιολικό δυναμικό είναι πολύ σημαντικό.

Η ανάπτυξη της παγκόσμιας αγοράς αιολικής ενέργειας είναι πολύ γρήγορη και οι εγκαταστάσεις έχουν ήδη ξεπεράσει τα 14.000-15.000 MW, μέγεθος αντίστοιχο σχεδόν με το μέγεθος του ελλαδικού ηλεκτρικού συστήματος. Στο παρακάτω διάγραμμα παρουσιάζεται η εξέλιξη της ευρωπαϊκής αγοράς αιολικής ενέργειας κατά το χρονικό διάστημα 1995-1999.



Εικόνα 13: Εξέλιξη της Ευρωπαϊκής Αγοράς Αιολικής Ενέργειας

## 2.2 Ανεμογεννήτριες – Αιολικά Πάρκα

Για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, χρησιμοποιούμε τις ανεμογεννήτριες με τη βοήθεια των οποίων μετατρέπεται η κινητική ενέργεια του ανέμου σε ηλεκτρική. Αιολικό πάρκο ονομάζεται μια συστοιχία ανεμογεννητριών σε ένα καθορισμένο μέρος.

Η πρώτη μεγάλη ανεμογεννήτρια, γνωστή ως «Smith-Putman» σχεδιάστηκε και εγκαταστάθηκε στις ΗΠΑ. Η σχεδιάσή της παραπάνω ανεμογεννήτριας άρχισε στα τέλη της δεκαετίας του '30 και οι δοκιμές της πραγματοποιήθηκαν στις αρχές της δεκαετίας του '40. Η ισχύς της ήταν 1250 KW και είχε δύο πτερύγια από χάλυβα με διάμετρο περιστροφής 53 μέτρα, τοποθετημένα σε ένα πύργο ύψους 33,5 μέτρων.

Το σύγχρονο ενδιαφέρον για τις ανεμογεννήτριες, άρχισε στις ΗΠΑ το 1973 με κρατική χρηματοδότηση. Το πρόγραμμα της πρώτης μεγάλης ανεμογεννήτριας, με κωδικό Mod-0, ανατέθηκε στη NASA και περιλάμβανε τη σχεδίαση, κατασκευή και δοκιμή μιας ανεμογεννήτριας ισχύος 100 KW με διάμετρο δρομέα 38 μέτρα. Σκοπός του προγράμματος αυτού, ήταν η εξαγωγή πληροφοριών και συμπερασμάτων για την εκπόνηση ενός ευρύτερου προγράμματος αιολικής ενέργειας. Στην Ευρώπη την πρωτοπορία στην αγορά των ανεμογεννητριών την κατέχει η Γερμανία. Άλλες χώρες με ανεπτυγμένο τον κλάδο σχεδίασης και κατασκευής ανεμογεννητριών, είναι η Δανία, η Ολλανδία, η Βρετανία και πρόσφατα η Ιταλία και η Ισπανία.

## 2.2.1 Είδη ανεμογεννητριών

Τα συστήματα αιολικής ενέργειας ανάλογα με τον τρόπο περιστροφής του άξονα της ανεμογεννήτριας, μπορούν να διαχωριστούν σε δύο τύπους:

- ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα
- ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα

Στον πρώτο τύπο, δηλαδή στις ανεμογεννήτριες με οριζόντιο άξονα, ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος σε σχέση με την επιφάνεια του εδάφους και συνήθως παράλληλος και με την διεύθυνση του ανέμου. Ο δρομέας είναι τύπου έλικα και ο άξονας μπορεί να περιστρέφεται συνεχώς παράλληλα προς τον άνεμο. Οι ανεμογεννήτριες αυτού του τύπου έχουν συνήθως 2 ή 3 πτερύγια, σε αντίθεση με τους ανεμόμυλους που έχουν πολλά. Ένα χαρακτηριστικό των πτερυγίων αυτών είναι ότι έχουν μεγάλο αεροδυναμικό βαθμό απόδοσης. Τα κύρια μηχανικά μέρη, όπως φαίνονται και στην εικόνα 5, είναι ο δρομέας ή φτερωτή, το σύστημα μετάδοσης κίνησης (κύριος άξονας και κιβώτιο ταχυτήτων), η γεννήτρια, ο πύργος στήριξης στον οποίο είναι τοποθετημένος ο δρομέας, το σύστημα πέδησης (η ανεμογεννήτρια πρέπει να μειώνει ταχύτητα όταν υπερβαίνει ένα όριο ταχύτητας, για να μην υποστεί βλάβη) και το σύστημα ελέγχου, σύνδεσης και αποθήκευσης (συσσωρευτές) της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος υπάρχει και το σύστημα προσανατολισμού ανάλογα με τη διεύθυνση του ανέμου, το οποίο γίνεται είτε με αισθητήρες, είτε με καθοδηγητικό πτερύγιο.

Τα βασικότερα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα μιας ανεμογεννήτριας με οριζόντιο άξονα είναι τα εξής :

**Πλεονεκτήματα**

- Λόγω του ύψους της ανεμογεννήτριας μπορεί να εκμεταλλευτεί και ανέμους μεγαλύτερης ταχύτητας.
- Εύκολη συναρμολόγηση.
- Διαθέτει υψηλό αεροδυναμικό συντελεστή
- Υψηλότερη απόδοση σε σχέση με τις ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα.

**Μειονεκτήματα**

- Η λειτουργία της ανεμογεννήτριας προκαλεί αρκετό θόρυβο
- Λόγω του μεγέθους της κοστίζει πολύ η κατασκευή και η μεταφορά της.
- Για να έχουμε συνεχή εκμετάλλευση του ανέμου, χρειάζεται ένας μηχανισμός περιστροφής για τον προσανατολισμό των πτερυγίων στην διεύθυνση του ανέμου.

Στο δεύτερο τύπο, δηλαδή στις ανεμογεννήτριες με κατακόρυφο άξονα, ο άξονας περιστροφής είναι οριζόντιος και παραμένει σταθερός. Οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα μπορούν να εκμεταλλευτούν τον άνεμο ανεξάρτητα από την κατεύθυνση του, ενώ δεν υπάρχει η ανάγκη ρύθμισης του δρομέα με αλλαγή της κατεύθυνσης του ανέμου. Οι ανεμογεννήτριες αυτές περιστρέφονται γύρω από έναν κάθετο άξονα στην κατεύθυνση του ανέμου. Το μηχανικό έργο που παράγεται μεταφέρεται μέσω του κατακόρυφου άξονα στο έδαφος όπου εγκαθίσταται η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Οι σύγχρονες ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα που έχουν αναπτυχθεί είναι του τύπου Savonius και Darrieus. Η διαφορά αυτών των 2 τύπων ανεμογεννητριών πέρα από το σχεδιασμό τους είναι ότι η Savonius ξεκινάει πιο εύκολα και δεν είναι τόσο αποδοτική, ενώ η Darrieus δεν ξεκινάει τόσο εύκολα αλλά είναι πολύ αποδοτική. Για το λόγο αυτό έχουν κατασκευαστεί ανεμογεννήτριες που είναι συνδυασμός και των 2 τύπων έτσι ώστε να έχουμε εύκολη εκκίνηση και υψηλή απόδοση. Υπάρχουν επίσης και άλλες ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα, αλλά όλες βασίζονται στην λογική των Savonius και Darrieus απλά γίνονται μετατροπές στο σχεδιασμό τους. Σε γενικές γραμμές τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα μιας ανεμογεννήτριας κατακόρυφου άξονα είναι τα εξής :

**Πλεονεκτήματα**

- Η γεννήτρια και το κιβώτιο ταχυτήτων είναι τοποθετημένο στη βάση με αποτέλεσμα να είναι πιο εύκολη η τοποθέτηση και η συντήρηση αυτών των μηχανικών μερών.
- Παράγει λιγότερο θόρυβο.

- Μπορεί να τοποθετηθεί σε περισσότερα μέρη λόγω του μικρότερου μεγέθους( όπως μέσα στην πόλη, σε ταράτσες, σε αυτοκινητόδρομους).
- Η κατασκευή της είναι πιο απλή και χαμηλότερου κόστους.

Μειονεκτήματα

- Χαμηλή απόδοση
- Υψηλή ροπή εκκίνησης με συνέπεια την χαμηλή ταχύτητα περιστροφής.
- Αδυναμία να εκμεταλλευτεί ανέμους υψηλών ταχυτήτων λόγω του μικρού της μεγέθους.
- Δυσκολία συντήρησης σε κάποια μηχανικά μέρη, όπως για παράδειγμα η αλλαγή των εδράνων κύλισης.

Στις παρακάτω εικόνες απεικονίζονται ο καθένας από τους δυο τύπους ανεμογεννητριών.



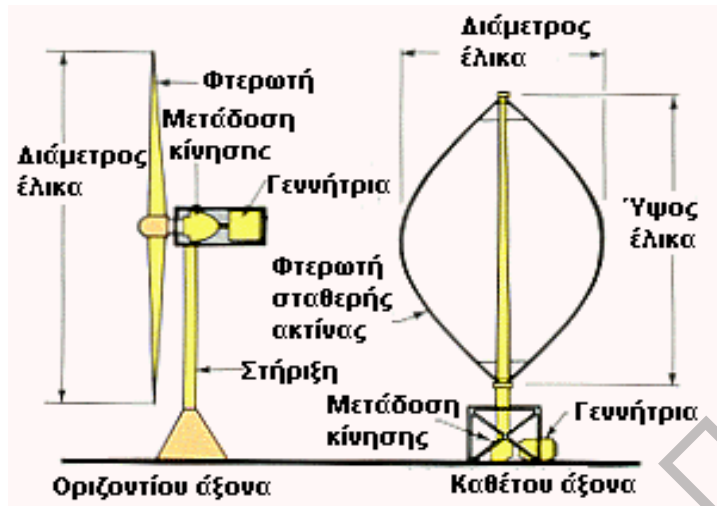
Εικόνα 14: Ανεμογεννήτρια οριζόντιου άξονα



Ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας αιολικού πάρκου με χρήση του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας

**Εικόνα 15: Ανεμογεννήτρια κατακόρυφου άξονα**

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα είναι εκείνα στα οποία ο άξονας περιστρέφεται οριζόντια και καταλαμβάνουν το 90%-95% των διαθέσιμων συστημάτων αιολικής ενέργειας. Η ισχύς τους μπορεί να ξεπερνά τα 500 KW και μπορούν να συνδεθούν απευθείας στο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας .



**Εικόνα 16 : Ανεμογεννήτρια οριζόντιου και κάθετου άξονα**

Στις εικόνες απεικονίζονται οι δυο τύποι ανεμογεννητριών ενώ περιγράφονται και οι δύο τύποι συστημάτων και τυπικά υποσυστήματα τους που απαιτούνται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Τα υποσυστήματα περιλαμβάνουν τις λεπίδες (ή έλικες ή πτερύγια), το μηχανισμό περιστροφής, τη μονάδα μετατροπής κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική, τον πυλώνα στήριξης καθώς και την έδρασή του. Στην παγκόσμια αγορά έχουν επικρατήσει οι ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα σε ποσοστό 90%. Η ισχύς τους μπορεί να ξεπερνά τα 500 KW και μπορούν να συνδεθούν κατευθείαν στο ηλεκτρικό δίκτυο της χώρας.

Επίσης, μπορούμε να διακρίνουμε τις ανεμογεννήτριες ανάλογα με το πλήθος των πτερυγίων που έχουν, σε

- δίπτερες ανεμογεννήτριες
- τρίπτερες ανεμογεννήτριες

Οι τρίπτερες με ρότορα μικρότερο των 10 μέτρων, έχουν τη δυνατότητα εκμετάλλευσης ασθενούς αιολικού δυναμικού (ευρύ φάσμα ταχυτήτων ανέμου) και κόστος κατασκευής και συντήρησης μικρό καθώς τα προβλήματα αντοχής και δυναμικής καταπόνησης μηχανικών μερών είναι περιορισμένα στις ανεμογεννήτριες αυτής της κατηγορίας. Στις μηχανές μεγάλου μεγέθους επικρατούν οι δίπτερες με κόστος κατασκευής και συντήρησης μικρότερο από αυτό των τρίπτερων αντίστοιχου μεγέθους. Η σύγχρονη τεχνολογία χρήσης της αιολικής ενέργειας ξεκίνησε με μικρές ανεμογεννήτριες δυναμικότητας 20-75 KW. Σήμερα χρησιμοποιούνται ανεμογεννήτριες δυναμικότητας 200-2000 KW. Στην εικόνα που ακολουθεί, απεικονίζονται οι δίπτερες και οι τρίπτερες ανεμογεννήτριες.





Εικόνα 17: Τρίπτερες ανεμογεννήτριες



Εικόνα 18: Δίπτερες ανεμογεννήτριες

### 2.2.2 Τρόπος λειτουργίας των ανεμογεννητριών

Ο άνεμος περιστρέφει τα πτερύγια μιας ανεμογεννήτριας, τα οποία είναι συνδεδεμένα με ένα περιστρεφόμενο άξονα. Ο άξονας περνάει μέσα σε ένα κιβώτιο μετάδοσης της κίνησης στο οποίο αυξάνεται η ταχύτητα περιστροφής. Το κιβώτιο συνδέεται με έναν άξονα μεγάλης ταχύτητας περιστροφής που κινεί μια γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Αν η ένταση του ανέμου ενισχυθεί πάρα πολύ, η ανεμογεννήτρια έχει ένα φρένο, το οποίο περιορίζει την υπερβολική αύξηση περιστροφής των πτερυγίων για να περιοριστεί η φθορά της και να αποφευχθεί η καταστροφή της.

Η ταχύτητα του ανέμου πρέπει να είναι μεγαλύτερη από 15 km/h για να μπορέσει μια τυπική ανεμογεννήτρια να παράγει ηλεκτρισμό. Ανάλογα με τη δυναμικότητα της ανεμογεννήτριας μπορούν να παραχθούν έως αρκετές εκατοντάδες KW. Αξίζει να σημειωθεί ότι 1 KW ηλεκτρικού ρεύματος μπορεί να ανάψει 100 λάμπες των 100 W.

Καθώς η ανεμογεννήτρια περιστρέφεται, παράγει ηλεκτρισμό με τάση 25.000 Volt. Στην ηλεκτροπαραγωγική μονάδα υπάρχει ένας μετασχηματιστής από τον οποίο περνάει πρώτα το ηλεκτρικό ρεύμα. Ο μετασχηματιστής ανεβάζει την τάση του ρεύματος στα 400.000 Volt, γιατί όταν το ηλεκτρικό ρεύμα διανύει μεγάλες αποστάσεις είναι καλύτερο να έχουμε υψηλή τάση.

Τα μεγάλα χοντρά σύρματα της μεταφοράς του ηλεκτρικού ρεύματος είναι κατασκευασμένα από χαλκό ή αλουμίνιο έτσι ώστε να υπάρχει μικρότερη αντίσταση στη μεταφορά του ρεύματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η αντίσταση του σύρματος τόσο πιο πολύ θερμαίνεται με αποτέλεσμα κάποιο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας να χάνεται, επειδή μετατρέπεται σε θερμική ενέργεια. Τα σύρματα μεταφοράς του ρεύματος καταλήγουν σε ένα υποσταθμό, όπου οι μετασχηματιστές μετατρέπουν την υψηλή τάση σε χαμηλή για να μπορέσουν να λειτουργήσουν οι ηλεκτρικές συσκευές.

### 2.2.3 Αιολικά Πάρκα

Συστοιχίες ανεμογεννητριών, σχηματίζουν τα αιολικά πάρκα, τα οποία επιτρέπουν τη μαζική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας καθώς και τη διοχέτευση του συνόλου της παραγόμενης ενέργειας στο ηλεκτρικό σύστημα. Τα αιολικά πάρκα είναι η πιο οικονομική εφαρμογή αιολικής ενέργειας, καθότι το κόστος κατασκευής και συντήρησης μειώνεται σημαντικά με τα μεγαλύτερα ποσά παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Παρά το γεγονός ότι πολλά συστήματα τοποθετούνται σε υψώματα, η απαίτηση για μεγάλη έκταση, μεταφέρει την εγκατάστασή τους σε παράλιες περιοχές ή ανοιχτά της θάλασσας, ειδικά σε χώρες με μικρή γεωγραφική έκταση. Τα αιολικά πάρκα στη θάλασσα αποτελούν τη μοναδική διεξοδο σε χώρες με μεγάλη πυκνότητα πληθυσμού και έλλειψη χώρου. Το μεγαλύτερο κόστος κατασκευής στη θάλασσα εξισώνεται με τη μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας.

Το πρώτο αιολικό πάρκο, στα ανοιχτά της θάλασσας, κατασκευάστηκε το 1991 στο Vindeby της Δανίας και περιλάμβανε 11 ανεμογεννήτριες. Το πάρκο αυτό αποτέλεσε φάρο ανάδειξης της αιολικής ενέργειας και σύντομα άρχισε να αντιγράφεται από άλλες χώρες. Το αιολικό πάρκο Lely είναι το πρώτο το οποίο κατασκευάστηκε στην Ολλανδία και τα κριτήρια αξιολόγησης για τη λειτουργία του ήταν μηδαμινά, εξαιτίας της ανυπαρξίας νομοθετικών ρυθμίσεων και της έλλειψης τεχνολογίας. Βέβαια, αποτέλεσε την αρχή για τη δημιουργία νομοθετικού πλαισίου και έτσι τα τελευταία χρόνια τα αιολικά πάρκα στην Ολλανδία, απαιτούν την έγκριση των αρμόδιων υπηρεσιών του Υπουργείου Ανάπτυξης τόσο για την κατασκευή όσο και για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Έτσι, σήμερα η διαδικασία περιλαμβάνει δύο στάδια. Το πρώτο στάδιο αποτελεί την αξιολόγηση και την έγκριση της περιοχής εφαρμογής και το δεύτερο την κατασκευή και τη λειτουργία του, καθώς και τις επιπτώσεις του στο περιβάλλον.

### 2.2.4 Είδη αιολικών πάρκων

Τα αιολικά πάρκα διακρίνονται σε 4 μεγάλους τύπους, σύμφωνα με την υπάρχουσα βιβλιογραφία, ανάλογα με τον τρόπο με τον οποίο εδράζονται :

- **Πρώτος τύπος:** Ο πρώτος τύπος περιλαμβάνει τα αιολικά πάρκα τα οποία χρησιμοποιούν οπλισμένο σκυρόδεμα για τη θεμελίωση τους στον πυθμένα της θάλασσας. Τα πρώτα αιολικά πάρκα ανοιχτά της θάλασσας κατασκευάστηκαν στη Δανία στις περιοχές Vindeby και Tunoe Knob. Η θεμελίωση κατασκευάστηκε στη στεριά και στη συνέχεια με πλωτά μέσα μεταφέρθηκε στα σημεία έδρασης και βυθίστηκε, αφού πρώτα διοχετεύτηκε άμμος και χαλίκι για τη στήριξή του. Στη συνέχεια, πάνω στην έδραση στηρίζεται ο πυλώνας, ο μηχανισμός περιστροφής, οι λεπίδες και στη συνέχεια το απαιτούμενο ηλεκτρολογικό υλικό. Η παραπάνω κατασκευαστική αρχή χρησιμοποιείται και στην κατασκευή γεφυρών. Παρόμοια κατασκευή χρησιμοποιήθηκε για τη θεμελίωση της γέφυρας του Ρίου-Αντιρρίου. Η θεμελίωση συνήθως έχει κωνικό σχήμα. Αυτό γίνεται για την αποφυγή παγετού, ιδιαίτερα σε χώρες με έντονες χιονοπτώσεις κατά τη διάρκεια του χειμώνα. Το κόστος κατασκευής εξαρτάται από το βάθος του πυθμένα, όσο αυξάνεται το βάθος εφαρμογής, τόσο αυξάνεται και το κόστος. Το επιτρεπτό βάθος για κατασκευή έχει οριστεί τα 10 μέτρα, γιατί μετά το βάθος αυτό το κόστος αυξάνεται ραγδαία ή χρησιμοποιούνται διαφορετικές κατασκευαστικές τεχνικές για τη μείωσή του.
- **Δεύτερος τύπος:** Ο δεύτερος τύπος κατασκευής υιοθετεί την ίδια διαδικασία κατασκευής με τον πρώτο τύπο. Η διαφορά τους είναι ότι η θεμελίωση γίνεται από ένα μεταλλικό σωλήνα αντί για οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο σωλήνας βιδώνεται και συγκολλείται πάνω σε πλάκα έδρασης που αγκυρώνεται στον πυθμένα αφού πρώτα το έδαφος έχει υποστεί κατάλληλη γεωτεχνική προετοιμασία.
- **Τρίτος τύπος:** Ο τρίτος τύπος κατασκευής είναι παρόμοιος με το δεύτερο, με τη διαφορά ότι στη διαδικασία της θεμελίωσης χρησιμοποιείται τρίποδο. Το τρίποδο αυτό αποτελείται από μεταλλικά μέρη και αποτελεί την πιο σταθερή κατασκευαστική

διάταξη, ιδιαίτερα για μεγάλο φορτίο και ύψος που ασκείται στη βάση από τον πυλώνα, καθώς και για την αποφυγή υψηλών κυμάτων.

- **Τέταρτος τύπος:** Ο τέταρτος τύπος κατασκευής δεν έχει υλοποιηθεί ακόμα, καθώς αποτελεί τμήμα ερευνητικού προγράμματος στο Πανεπιστήμιο UCL στο Λονδίνο. Βέβαια, έχει επιτευχθεί εξομίωση αυτού του τύπου σε εργαστηριακό περιβάλλον. Πρόκειται, λοιπόν, για πλωτό σύστημα αιολικής ενέργειας το οποίο μπορεί να τοποθετηθεί οπουδήποτε χωρίς περιορισμούς για το βάθος του πυθμένα. Η διαφορά στην όλη κατασκευαστική διάταξη, είναι το πλωτό σύστημα στο οποίο ενσωματώνεται ο πυλώνας και η ανεμογεννήτρια. Το πλωτό σύστημα είναι μερικώς βυθισμένο για την αποφυγή έντονων διακυμάνσεων στη θαλάσσια επιφάνεια και έτσι επιτυγχάνεται μεγαλύτερη πλευστότητα στην όλη κατασκευή. Το πλωτό μέρος στις δοκιμές που έγιναν, είχε διάμετρο 80-120 μέτρα και με κυμαινόμενο φορτίο της τάξεως των 12.000-40.000 τόνους. Έρευνα στον τομέα των πλωτών κατασκευών, θα συμβάλλει στο σχεδιασμό και στην ανάπτυξη πλωτών αιολικών πάρκων.

Αναμφισβήτητα, η αιολική ενέργεια τα τελευταία χρόνια αναπτύσσεται με ραγδαίους ρυθμούς. Σε χώρες όπως η Ολλανδία, η Δανία και η Μεγάλη Βρετανία, οι καταναλωτές μπορούν να επιλέξουν παροχή ηλεκτρικού ρεύματος από αιολικά πάρκα για μείωση του τιμολογίου του ηλεκτρικού ρεύματος ή για μείωση του φόρου. Σε πολλές περιπτώσεις, ολόκληρες πόλεις ηλεκτροδοτούνται αποκλειστικά από αιολικά πάρκα.

Η αιολική ενέργεια μπορεί να παραχθεί σε οποιαδήποτε τοποθεσία, όπως απομακρυσμένα χωριά, ακόμα και σε νησιά χωρίς ηλεκτρικό ρεύμα. Η έρευνα που συντελείται τα τελευταία χρόνια σε αυτόν τον τομέα, είναι ο σχεδιασμός και η ανάπτυξη έξυπνων αιολικών πάρκων που κάνουν χρήση των κλιματικών αλλαγών αλλά και ενεργούν με γνώμονα τις ενεργειακές απαιτήσεις του δικτύου. Επίσης, έρευνα γίνεται ιδιαίτερα στο σχεδιασμό λεπίδων για αύξηση της απόδοσης της ανεμογεννήτριας καθώς και στους τρόπους κατασκευής, θεμελίωσης και στον τρόπο που εδράζεται στον πυθμένα για τη μείωση του κόστους.

## 2.3 Οφέλη της Αιολικής Ενέργειας

Κατά τη διάρκεια της λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου δεν εκπέμπεται διοξείδιο του άνθρακα ή άλλα αέρια που ρυπαίνουν την ατμόσφαιρα (μονοξείδιο του άνθρακα, διοξείδιο του θείου, καρκινογόνα μικροσωματίδια κ.α.), όπως συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Σε όλη τη διάρκεια της χρήσης της, μία και μόνο ανεμογεννήτρια 1,5 MW μπορεί να εξοικονομήσει περί τους 80.000 τόνους ορυκτού άνθρακα (brown coal). Αυτό σημαίνει αφενός ότι δεν εντείνεται το φαινόμενο του θερμοκηπίου (κάθε κιλοβατώρα που παράγεται από αιολικά πάρκα συνεπάγεται την αποφυγή έκλυσης ενός κιλού διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα), αφετέρου δεν υπάρχουν και αρνητικές συνέπειες στη δημόσια υγεία από την ατμοσφαιρική ρύπανση. Ταυτόχρονα, πάνω από το 90% της έκτασης που φιλοξενεί ένα αιολικό πάρκο είναι διαθέσιμο για άλλες χρήσεις και για άλλες δραστηριότητες όπως για παράδειγμα οι αγροτικές.

Συμπερασματικά, η συστηματική εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας οδηγεί στην αύξηση της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας ενώ ταυτόχρονα εξοικονομούνται σημαντικές ποσότητες συμβατικών καυσίμων, γεγονός που συνεπάγεται πολλαπλά οφέλη. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, περιορίζει τη ρύπανση του περιβάλλοντος κάτι το οποίο είναι ζητούμενο σε όλες τις ανεπτυγμένες χώρες. Τέλος, από την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, δημιουργούνται πολλές νέες θέσεις εργασίας, αφού εκτιμάται ότι για κάθε 1 MW αιολικής ενέργειας δημιουργούνται 14 νέες θέσεις εργασίας.

Από την άλλη πλευρά, τα ενδεχόμενα προβλήματα από την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας είναι ο θόρυβος από τη λειτουργία των ανεμογεννητριών, οι σπάνιες ηλεκτρομαγνητικές παρεμβολές στο ραδιόφωνο, στην τηλεόραση και στις τηλεπικοινωνίες, οι οποίες επιλύονται με την ανάπτυξη της τεχνολογίας και επίσης πιθανά προβλήματα αισθητικής.

## 2.4 Αιολικό Δυναμικό - Δυνατότητες

Η βιομηχανία της αιολικής ενέργειας έχει παρουσιάσει ραγδαία ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια. Ενώ το παγκόσμιο εγκατεστημένο δυναμικό αιολικής ενέργειας ανερχόταν το 1998 σε λίγο περισσότερο από 10.000 MW συνολικά, το 2005 είχε ήδη φτάσει τα 60.000 MW. Το νούμερο αυτό αναμένεται να ανέβει στα 150.000 MW μέχρι το 2012.

Μόνο το 2003, εγκαταστάθηκαν σε παγκόσμιο επίπεδο, νέες ανεμογεννήτριες με δυνατότητα παραγωγής αιολικής ενέργειας άνω των 8300 MW. Το ένα τρίτο αυτών βρίσκονται στη Γερμανία, το ένα τρίτο στην υπόλοιπη Ευρώπη και το άλλο στον υπόλοιπο κόσμο. Η Ευρώπη πρόκειται να παραμείνει η κινητήριος δύναμη στην παγκόσμια αγορά αιολικών για τα επόμενα 5 με 10 χρόνια .

Η Ελλάδα διαθέτει εξαιρετικά πλούσιο αιολικό δυναμικό και η αιολική ενέργεια μπορεί να γίνει σημαντικός μοχλός για την ανάπτυξη της ενεργειακής αγοράς. Από το 1982, οπότε εγκαταστάθηκε από τη ΔΕΗ το πρώτο αιολικό πάρκο στην Κύθνο, μέχρι και σήμερα έχουν κατασκευαστεί σε πολλά σημεία της Ελλάδας, αιολικά πάρκα, συνολικής ισχύος πάνω από 30 MW. Μεγάλο ενδιαφέρον, επίσης, δείχνει και ο ιδιωτικός τομέας για την εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας, ιδιαίτερα στην Κρήτη, όπου το Υπουργείο Ανάπτυξης έχει εκδώσει άδειες εγκατάστασης για νέα αιολικά πάρκα συνολικής ισχύος δεκάδων MW. Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι μετρήσεις του αιολικού δυναμικού της χώρας μας κατά τη χρονική περίοδο 1981-1990.

Τοποθεσία Location	Μέση Ταχύτητα Average Speed (m/s)	Περίοδος Μετρήσεων Measurement Period
Τήνος/ Tinos	9.5	1987-90
Σύρος/ Syros	8.1	1988-90
Κρήτη/ Crete	8.1	1981-83
Λέσβος/ Lesvos	8.7	1987-90
Εύβοια/ Euboea	9.2	1989-90
Σαμοθράκη/ Samothraki	6.6	1986-89

Πίνακας 2: Μετρήσεις Αιολικού Δυναμικού ΔΕΗ/ΔΕΜΕ

Η συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα κάλυψε μόλις το 0,1% της συνολικής ενέργειας το 1998. Οι προοπτικές όμως διείσδυσης των ανεμογεννητριών στο ελληνικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής είναι πολύ θετικές και έτσι ένας στόχος των 2000 MW για το 2010 θεωρείται εφικτός. Με την επίτευξη αυτού του στόχου θα έχει καλυφθεί λιγότερο από το 20% του εκμεταλλεύσιμου δυναμικού το 2010.

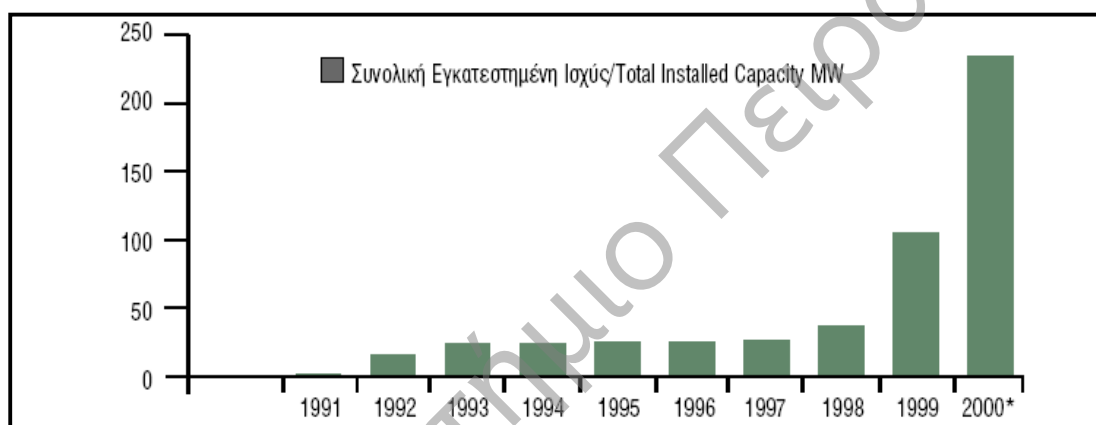
Επιπλέον, η μείωση εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) θα είναι της τάξεως των 5.600.000 μετρικών τόνων το έτος 2010, συνεισφέροντας ουσιαστικά στη μείωση των ατμοσφαιρικών ρυπαντών στη χώρα. Για την περίοδο 2000-2010 το όφελος από το αποφευγόμενο κόστους καυσίμων υπολογίζεται στα 700.000.000€ περίπου, ενώ δημιουργήθηκαν και 6000 νέες θέσεις εργασίας.

## 2.5 Υφιστάμενη Κατάσταση

Η νομοθεσία που ίσχυε μέχρι τον Αύγουστο του 1994 (Ν. 1559/85), επέτρεπε στον ιδιωτικό τομέα και στους Οργανισμούς Τοπικής Αυτοδιοίκησης την εγκατάσταση ανεμογεννητριών ισχύος μέχρι τρεις φορές την εγκατεστημένη ισχύ του αυτοπαραγωγού, με στόχο την κάλυψη των αναγκών τους και την πώληση της περισσευούμενης ενέργειας στη ΔΕΗ. Παρόλα αυτά, η συνεισφορά του νόμου στην

ανάπτυξη του αιολικού δυναμικού από τον ιδιωτικό τομέα ήταν μηδαμινή, λόγω της πολυπλοκότητας των διαδικασιών αδειοδότησης, της χαμηλής τιμής αγοράς της περίσσειας ενέργειας από τη ΔΕΗ και γιατί περιόριζε το δικαίωμα παραγωγής ηλεκτρισμού από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) σε ιδιοκαταναλωτές, οι οποίοι όμως δεν είχαν τη δυνατότητα να αξιοποιήσουν μια κατάλληλη θέση και να μεταφέρουν την παραγωγή τους στον τόπο κατανάλωσης.

Η τροποποίηση του νομοθετικού πλαισίου και της τιμολογιακής πολιτικής για την παραγόμενη ενέργεια από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, με το νόμο (Ν. 2244/94) «Ρύθμιση θεμάτων ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και από συμβατικά καύσιμα και άλλες διατάξεις» και τις υπουργικές αποφάσεις, ΦΕΚ ΑΦ 385 10/5/95, συντέλεσε στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα. Προφανώς παρατηρείται μια χρονική υστέρηση στην ανάπτυξη της αγοράς, αφού μόλις το 1999 η εγκατεστημένη ισχύς ξεπέρασε τα 100 MW. Στο παρακάτω διάγραμμα, απεικονίζεται η εξέλιξη της ελληνικής αγοράς στον τομέα της αιολικής ενέργειας για το χρονικό διάστημα από 1991-2000. Παρατηρούμε στο παρακάτω διάγραμμα, ότι μετά το έτος 1998 σημειώθηκε ραγδαία άνοδος στον τομέα της αιολικής ενέργειας για την ελληνική αγορά.



Εικόνα 19: Εξέλιξη της Ελληνικής Αγοράς Αιολικής Ενέργειας

Τα κύρια σημεία του νόμου Ν. 2244/94 που συντέλεσε στην εξέλιξη της αγοράς στο χώρο της αιολικής ενέργειας είναι τα ακόλουθα :

- Επιτρέπει σε ανεξάρτητους παραγωγούς εκτός από τους αυτοπαραγωγούς, την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η διάθεση της οποίας γίνεται αποκλειστικά από τη ΔΕΗ. Η δυνατότητα αυτή ισχύει για δημιουργία αιολικών πάρκων μεγέθους μέχρι 50 MW.
- Διασφαλίζει και αυξάνει σημαντικά την τιμή αγοράς της KWh από τη ΔΕΗ. Για ανεξάρτητη παραγωγή, η πώληση της παραγόμενης ενέργειας γίνεται στη ΔΕΗ με τιμολόγια που διαμορφώνονται στο 90% του εκάστοτε μηνιαίου τιμολογίου χαμηλής τάσης για τις εγκαταστάσεις των μη διασυνδεδεμένων νησιών. Για τις εγκαταστάσεις του διασυνδεδεμένου δικτύου, τα τιμολόγια αποτελούνται από δύο μέρη. Το ενεργειακό μέρος, δηλαδή την ενέργεια που δίνεται στο δίκτυο της ΔΕΗ και το μέρος που αφορά την παρεχόμενη ισχύ στο δίκτυο. Η τιμολογιακή αυτή διαμόρφωση περιλαμβάνει το 90% του τιμολογίου ενέργειας και το 50% του τιμολογίου ισχύος στη μέση τάση.
- Εξασφαλίζει συμβόλαια σχετικά μεγάλης διάρκειας (δεκαετή με δυνατότητα παράτασης).
- Επιτρέπει στους αυτοπαραγωγούς τη μεταφορά της παραγόμενης ενέργειας από τον τόπο των εγκαταστάσεων στον τόπο της κατανάλωσης.

Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζεται η εξέλιξη των συνδεδεμένων με το δίκτυο αιολικών εγκαταστάσεων στην Ελλάδα. Διαπιστώνεται ότι η συνολική εγκατεστημένη ισχύς των συνδεδεμένων ανεμογεννητριών ανήλθε έως τον Οκτώβριο του 2000 σε 189.080 KW.

Θέση Location	Εταιρία Company	Αριθμός Α/Γ No. of wind generators	Ισχύς Α/Γ Capacity in MW	Θέση σε Λειτουργία Entered Operation	Ισχύς Αιολικών Πάρκων Capacity of Wind Parks in KW
Διάφορες θέσεις/ Various	Ιδιώτες/Individuals	28	-	Εως Μάιο/By May 1998	4.000
Κρήτη/ Crete Εύβοια/Euboea Νησιά/Islands	ΔΕΗ/ΔΕΜΕ/PPC/ΔΕΜΕ	129	-	Εως Μάιο/By May 1998	24.000
Κρήτη/Crete	Ρόκας Αιολική ΑΒΕΕ/Rokas Aioliiki SA	17	600	Μάιο/May 1998	10.200
Σάμος/Samos	Ενεργειακή Σάμου Α.Ε./Energeiaki Samou SA	1	750	Οκτώβριος/October 1998	750
Σύρος/Syros	Enercon GmbH	1	500	Νοέμβριος/November 1998	500
Κρήτη/Crete	IWECO	18	550	Ιούνιος/June 1999	9.900
Κρήτη/Crete	IWECO	9	550	Ιούνιος/June 1999	4.950
Μήλος/Milos	Αιολικά Πάρκα Κυκλάδων/Cyclades Wind Parks	2	600	Αύγουστος/August 1999	1.200
Κρήτη/Crete	Αιολικά Πάρκα Αχλαδίων Α.Ε./Achladia Wind Parks SA	20	500	Σεπτέμβριος/September 1999	10.000
Κρήτη/Crete	Ανεμόεσσα Α.Ε./Anemoessa SA	10	500	Σεπτέμβριος/September 1999	5.000
Κρήτη/Crete	Αιολικά Πάρκα Κρυών Α.Ε./ Krya Wind Parks SA	20	500	Σεπτέμβριος/September 1999	10.000
Κρήτη/Crete	ΟΑΣ/ΟΑΣ	5	500	Σεπτέμβριος/September 1999	2.500
Λέσβος/Lesvos	ΔΕΗ/PPC	9	225	Οκτώβριος/October 1999	2.025
Κύθηρος/Kythnos	ΔΕΗ/PPC	1	500	Οκτώβριος/October 1999	500
Εύβοια/Euboea	ΕΝ.ΤΕ.ΚΑ. Αιολικά Πάρκα Α.Ε./ΕΝ.ΤΕ.ΚΑ Wind Parks SA	2	750	Νοέμβριος/November 1999	1.500
Εύβοια/Euboea	Ενεργειακό Δίκτυο/Energy Network	1	400	Δεκέμβριος/December 1999	400
Εύβοια/Euboea	Ρόκας Αιολική ΑΒΕΕ/Rokas Aioliiki SA	21	600	Νοέμβριος/November 1999	12.600
Εύβοια/Euboea	Ρόκας Αιολική ΑΒΕΕ/Rokas Aioliiki SA	19	600	Νοέμβριος/November 1999	11.400
Σάμος /Samos	Ενεργειακή Σάμου Α.Ε./Energeiaki Samou SA	1	225	Ιανουάριος/January 2000	225
Εύβοια/Euboea	Ρόκας Αιολική Εύβοια ΑΒΕΕ/Rokas Aioliiki, Evvia, SA	40	600	Απρίλιος/April 2000	24.000
Μύκονος/Mykonos	ΔΕΥΑΜ/ΔΕΥΑΜ	1	300	Ιούλιος/July 2000	300
Κρήτη/Crete	ΔΕΗ/PPC	17	600	Ιούλιος/July 2000	10.200
Εύβοια/Euboea	Τέρνα Ενεργειακή ΑΕ/Terna Energeiaki SA	17	600	Αύγουστος/August 2000	10.200
Εύβοια/Euboea	Τέρνα Ενεργειακή ΑΕ/Terna Energeiaki SA	17	750	Αύγουστος/August 2000	12.750
Εύβοια/Euboea	Αιολικά Πάρκα Κυκλάδων/Cyclades Wind Park	13	660	Σεπτέμβριος/September 2000	8.580
Εύβοια/Euboea	Ρόκας Αιολική ΑΒΕΕ/Rokas Aioliiki SA	19	600	Οκτώβριος/October 2000	11.400
Συνολική Εγκατεστημένη Ισχύς Συνδεδεμένων Α/Γ/Total Installed Capacity of Interconnected Wind Generators					189.080

**Πίνακας 3: Εγκατεστημένη Ισχύς Συνδεδεμένων Αιολικών Πάρκων στην Ελλάδα**

Πρέπει να επισημανθεί ότι ο ιδιωτικός τομέας ανταποκρίθηκε στην πρόκληση της ανάπτυξης της αιολικής ηλεκτροπαραγωγής, καθώς το σύνολο των αιτήσεων έως το 2000 για την ανάπτυξη αιολικών έργων σε όλη τη χώρα υπερβαίνει τα 3000 MW.

## 2.6 Προοπτικές της Ελληνικής Αγοράς Αιολικής Ενέργειας

Οι κλιματολογικές συνθήκες στην Ελλάδα είναι ιδιαίτερα ευνοϊκές για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, συνεπώς οι προοπτικές για την περαιτέρω εξέλιξη της αγοράς κρίνονται θετικές, ιδιαίτερα αν αντιμετωπιστούν κάποιοι ανασταλτικοί παράγοντες. Οι ανασταλτικοί παράγοντες αφορούν κυρίως το δύσκαμπτο διοικητικό και νομοθετικό πλαίσιο, στο οποίο είναι υποχρεωμένοι να δραστηριοποιούνται οι ιδιώτες επενδυτές. Ένας ακόμα ανασταλτικός παράγοντας είναι η ανεπάρκεια των συστημάτων μεταφοράς ενέργειας της ΔΕΗ.

Το Δεκέμβριο του 1999 ψηφίστηκε από τη Βουλή ο νόμος Ν. 2773 ο οποίος συμπληρώνει το νόμο Ν. 2244/94. Ο παραπάνω νόμος εστιάζει κυρίως στο θεσμικό πλαίσιο της αναμενόμενης απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Όμως, ο νέος νόμος ενώ δεν παρέχει επιπλέον κίνητρα για την ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας σε σύγκριση με το νόμο Ν. 2244/94, σε κάποιες περιπτώσεις περιέχει δυσμενέστερες διατάξεις, οι οποίες εγκυμονούν κινδύνους για την περαιτέρω ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας. Από τους φορείς του κλάδου επισημαίνεται έντονα η δυσμενής στάση της πολιτείας στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας και επίσης εκφράζεται ανησυχία για την πορεία του κλάδου. Πιθανότατα, η πιο σημαντική εξέλιξη σε ευρωπαϊκό επίπεδο είναι η πρόταση οδηγίας, με τίτλο «Προώθηση της Ηλεκτροπαραγωγής από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Εσωτερική Αγορά Ηλεκτρισμού». Η παραπάνω οδηγία προβλέπει δεσμεύσεις από όλες τις χώρες της ΕΕ, οι οποίες θα αποβλέπουν στην επίτευξη του κυρίαρχου περιβαλλοντικού στόχου, δηλαδή να διπλασιαστεί η συμμετοχή των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας στην ηλεκτροπαραγωγή της ΕΕ, η οποία θα ανέρχεται στο 12% της πρωτογενούς παραγωγής το 2010.

## Κεφάλαιο 3<sup>ο</sup>:

### «Ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας (firefly algorithm) στην ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου»

Σε αυτό το κεφάλαιο, παρουσιάζεται το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης του κόστους που επενδύεται για τη λειτουργία ενός αιολικού πάρκου. Αυτό επιτυγχάνεται εύκολα με την παράλληλη αύξηση της συνολικά παραγόμενης ενέργειας από τις ανεμογεννήτριες που αποτελούν το αιολικό πάρκο. Συνεπώς, μπορούμε να κάνουμε λόγο για ελαχιστοποίηση του κόστους ανά μονάδα ενέργειας που παράγεται. Για την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας (firefly algorithm - FA). Ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου FA στηρίζεται στο πώς βρίσκουν οι πυγολαμπίδες σύντροφο λαμβάνοντας υπόψη την φωτοβολία κάθε τέτοιου εντόμου. Χρησιμοποιείται αυτός ο αλγόριθμος γιατί είναι πολύ αποτελεσματικός, συγκρινόμενος με άλλες τεχνικές βελτιστοποίησης. Το πρόβλημα, λοιπόν, λαμβάνει υπόψη του το πλήθος των ανεμογεννητριών από τις οποίες αποτελείται το αιολικό πάρκο, την ενέργεια που παράγει η καθεμία από αυτές και την ταχύτητα του ανέμου στην οποία οφείλεται ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας. Για να αποδειχτεί η αποτελεσματικότητα του αλγορίθμου, γίνεται η εφαρμογή του σε ένα αιολικό πάρκο το οποίο αποτελείται από 10, 20, 30 και 40 ανεμογεννήτριες αντίστοιχα.

## 3.1 Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια είναι από τις πιο γνωστές και από τις ευρύτερα χρησιμοποιούμενες μορφές ενέργειας εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Ο άνθρωπος τη χρησιμοποίησε από πολύ παλιά στην ιστορία του για να διευκολύνει τη ζωή του σε καθημερινές του δραστηριότητες όπως για παράδειγμα στο άλεσμα δημητριακών και στην κίνηση νερόμυλων. Βέβαια τη χρησιμοποίησε και για οικονομικούς λόγους αφού χρησιμοποιήθηκε για την κίνηση των πλοίων, το οποίο είχε ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη του εμπορίου. Λόγω όλων αυτών των παραγόντων είναι απαραίτητο να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας.

Αξίζει να αναφερθεί, ότι δεν είναι σημαντική μόνο η ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας αλλά όλων των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας όπως της ηλιακής, της γεωθερμικής, της φωτοβολταϊκής κ.ο.κ. Είναι επιβεβλημένη ανάγκη η αξιοποίησή τους, όχι μόνο επειδή τα αποθέματα της ενέργειας που χρησιμοποιούμε καθημερινά για τις δουλειές μας (όπως το πετρέλαιο, η βενζίνη και τα παράγωγά τους) μειώνονται σημαντικά. Επιπρόσθετα, πρέπει να ευαισθητοποιηθεί ο κάθε ένας από εμάς στη χρησιμοποίηση μορφών ενέργειας που δεν επιβαρύνουν και δε μολύνουν το περιβάλλον. Μια τέτοια μορφή ενέργειας, που είναι φιλική στο περιβάλλον, είναι και η αιολική ενέργεια, με την οποία ασχολούμαστε στην παρούσα εργασία.

Σαν Έλληνες, πρέπει να ευαισθητοποιηθούμε και να δραστηριοποιηθούμε πολύ περισσότερο από τους πολίτες άλλων χωρών στην ανάπτυξη αυτής της μορφής ενέργειας. Αυτό συμβαίνει διότι η γεωγραφική θέση της Ελλάδας είναι τέτοια, που μπορεί να αξιοποιήσει την αιολική ενέργεια σε πολύ μεγάλο βαθμό καθώς διαθέτουμε ικανοποιητικές ταχύτητες αέρα ώστε να δημιουργηθούν αιολικά πάρκα σε πολλές περιοχές της Ελλάδας. Αυτές οι περιοχές μπορεί να είτε στη στεριά είτε στα ανοιχτά της θάλασσας, μέθοδος που έχει εφαρμοστεί επιτυχώς στη Δανία. Οι ανεμογεννήτριες που χρησιμοποιούνται σήμερα έχουν σχεδιαστεί σύμφωνα με αρχές της αεροδυναμικής μηχανικής. Άρα, η πλειοψηφία των αναγκών μας σε ενέργεια θα είναι δυνατό να καλύπτεται από την αξιοποίηση της ανεξάντλητης αιολικής ενέργειας. Το μόνο που μένει λοιπόν, είναι να διευκολυνθεί η διαδικασία δημιουργίας τέτοιων πάρκων παραγωγής ενέργειας τόσο από δημόσιες όσο και από ιδιωτικές επιχειρήσεις.

Η απόδοση ενός αιολικού πάρκου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Εκτός από τα υλικά από τα οποία γίνεται η κατασκευή των ανεμογεννητριών, πρέπει να ληφθούν υπόψη και μερικοί ακόμα παράγοντες. Ένας από αυτούς είναι η υφή του εδάφους, δηλαδή κατά πόσο τραχύ είναι το έδαφος ή όχι. Επίσης, η δύναμη και η διεύθυνση του αέρα παίζουν καθοριστικό ρόλο. Επιπρόσθετα, το ύψος του στύλου της ανεμογεννήτριας καθώς και η ακτίνα του έλικα συμβάλλουν στην αύξηση ή όχι της παραγόμενης ενέργειας. Τέλος, πρέπει να αναφερθεί ότι οι ανεμογεννήτριες όταν τοποθετούνται σε μία έκταση πρέπει να απέχουν κάποια απόσταση μεταξύ τους. Αφενός, να μην συμπίπτουν οι έλικες τους κατά την κίνησή τους και αφετέρου στη θέση που βρίσκονται να είναι σε θέση να εκμεταλλεύονται όσο το δυνατόν περισσότερο την κατεύθυνση και τη δύναμη του αέρα που επικρατεί στην περιοχή.

Στη συνέχεια του κεφαλαίου, θα γίνει μια αναφορά στα βασικά σημεία του αλγορίθμου FA και θα παρουσιαστούν τα βήματά του. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματός μας, περιγράφεται στη σχέση (3.2)

Το υπόλοιπο μέρος της εργασίας διαρθρώνεται ως εξής:

- 3.2: Περιγραφή του προβλήματος
- 3.3: Σύντομη περιγραφή του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας (FA)
- 3.4: Περιγραφή του προβλήματος με τον αλγόριθμο FA
- 3.5: Εφαρμογή
- 3.6: Αποτελέσματα και διαγράμματα

### **3.2 Περιγραφή του προβλήματος**

Στόχος της παρούσας εργασίας, όπως προαναφέρθηκε, είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου. Το κόστος λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου υπολογίζεται με τέτοιο τρόπο ώστε να επηρεάζεται μόνο από το πλήθος των ανεμογεννητριών που το συνθέτουν. Εφόσον, το κόστος εξαρτάται μόνο από το πλήθος των ανεμογεννητριών, μείωση του κόστους μπορεί να επιτευχθεί με αύξηση της συνολικά παραγόμενης ενέργειας (ισχύος) από το αιολικό πάρκο. Με αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνεται μείωση του κόστους ανά μονάδα ενέργειας που παράγεται. Άρα, για να επιτευχθεί ο ζητούμενος στόχος πρέπει να λάβουμε υπόψη τα δύο αυτά μεγέθη, τα οποία θα μας απασχολήσουν στην παρούσα εργασία,

- το συνολικό κόστος λειτουργίας του αιολικού πάρκου
- τη συνολικά παραγόμενη ενέργεια από το αιολικό πάρκο



Το ετήσιο κόστος λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου δίδεται από την παρακάτω σχέση :

$$C = \text{cost} = N \cdot \left( \frac{2}{3} + \frac{1}{3} e^{-0.00174N^2} \right) \quad (3.1)$$

Η μόνη παράμετρος που υπάρχει στον παραπάνω τύπο είναι το  $N$ , όπου το  $N$  συμβολίζει το πλήθος των ανεμογεννητριών.

Με όσα ήδη αναφέρθηκαν, ο αντικειμενικός στόχος του προβλήματός μας μπορεί να διατυπωθεί ως η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ανά μονάδα ενέργειας που παράγεται. Δηλαδή, όσο αυξάνεται η συνολικά παραγόμενη ενέργεια από  $N$  ανεμογεννήτριες τόσο θα μειώνεται το κόστος. Άρα, η αντικειμενική συνάρτηση με την οποία ασχολούμαστε στην παρούσα εργασία, περιγράφεται από την παρακάτω σχέση :

$$\min F = \frac{\text{cost}}{P_{\text{total}}} \quad (3.2)$$

όπου το κόστος ( $\text{cost}$ ) δίδεται από τη σχέση (3.1). Το  $P_{\text{total}}$  είναι η ολικά παραγόμενη ενέργεια από τις  $N$  ανεμογεννήτριες που αποτελούν το αιολικό πάρκο. Το  $P_{\text{total}}$  εκφράζεται ως:

$$P_{\text{total}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_N = \sum_{i=1}^N P_i$$

Όσο γίνεται ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης (3.2), η παραγωγή ενέργειας της κάθε ανεμογεννήτριας θα πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα σε ένα ελάχιστο και σε ένα μέγιστο όριο. Άρα, θα πρέπει να ικανοποιείται ο ακόλουθος περιορισμός ανισότητας για κάθε ανεμογεννήτρια.

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad (3.3)$$

όπου,

$P_{i,\min}$ ,  $P_{i,\max}$ : η ελάχιστη και η μέγιστη παραγόμενη ενέργεια αντίστοιχα για την ανεμογεννήτρια  $i$ .

### 3.3 Σύντομη περιγραφή του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας (firefly algorithm)

Ο Xin – She Yang ανέπτυξε τον αλγόριθμο της πυγολαμπίδας (firefly algorithm – FA) βασιζόμενος στον τρόπο με τον οποίο αναζητάν σύντροφο οι πυγολαμπίδες. Η ανάπτυξη του αλγορίθμου έγινε το 1997. Η εύκολη υλοποίησή του τον έχει καταστήσει ιδιαίτερα δημοφιλή και ως εκ τούτου έχει πολλές εφαρμογές.

Στον αλγόριθμο υπάρχει ένας πληθυσμός *οντοτήτων*, όπου κάθε οντότητα αντιπροσωπεύει μία πιθανή λύση για το πρόβλημα βελτιστοποίησης. Στον αλγόριθμο firefly, η αναζήτηση της καλύτερης λύσης γίνεται παράλληλα από ένα σύνολο οντοτήτων όπως συμβαίνει και σε τεχνικές βελτιστοποίησης που βασίζονται στις αρχές της Τεχνητής Νοημοσύνης (Artificial Intelligence). Κάθε οντότητα αντιστοιχεί σε μία πιθανή λύση του προβλήματος. Κάθε πυγολαμπίδα αντιπροσωπεύεται από μερικά χαρακτηριστικά. Τα χαρακτηριστικά είναι τα εξής:

- $x_i$ : η τωρινή θέση της πυγολαμπίδας  $i$
- $r_{ij}$ : η απόσταση της πυγολαμπίδας  $i$  από την πυγολαμπίδα  $j$
- $f(x_i)$ : η τιμή που αντιπροσωπεύει το πόσο φωτεινή είναι η πυγολαμπίδα

Για την απόσταση  $r_{ij}$  ισχύει ότι:

$$r_{ij} = || x_i - x_j || = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (3.4), \text{ όπου } d \text{ η διάσταση του χώρου της συνάρτησης.}$$

Με το γράμμα  $f$  συμβολίζουμε την αντικειμενική συνάρτηση, η οποία πρόκειται να μεγιστοποιηθεί. Έτσι το  $f(x_i)$  είναι η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που έχει η πυγολαμπίδα  $i$  με τωρινή θέση  $x_i$ . Ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας χρησιμοποιείται για να μεγιστοποιήσει μία συνάρτηση, επομένως, όταν εφαρμόζεται σε προβλήματα ελαχιστοποίησης τότε ως αντικειμενική συνάρτηση λαμβάνεται η αντίστροφη της  $f(x)$ .

Να υπενθυμίσουμε επιγραμματικά ότι ο αλγόριθμος χρησιμοποιεί και τις παραμέτρους  $\alpha$ ,  $\gamma$  και  $\delta$ . Η παράμετρος  $\alpha$  ελέγχει την τυχειότητα και κατά κάποιον τρόπο την ποικιλομορφία των λύσεων. Έτσι μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια των επαναλήψεων ώστε να μεταβάλλεται καθώς αυτές αυξάνονται. Αν συμβολίσουμε με  $t$  τον αριθμό των επαναλήψεων, τότε η παράμετρος  $\alpha$  θα συμβολίζεται σε σχέση με τις επαναλήψεις ως  $\alpha_t$  και μπορεί να εφαρμοσθεί ο τύπος:

$$\alpha_t = \alpha_0 * \delta^t \quad (3.5), \text{ με } 0 < \delta < 1$$

Ως  $\alpha_0$  ορίζεται ο αρχικός παράγοντας κλιμάκωσης τυχειότητας, ενώ το  $\delta$  είναι ουσιαστικά ένας σταθεροποιητικός παράγοντας. Στις περισσότερες εφαρμογές τίθεται συνήθως  $\delta = 0.95$  ως  $0.97$ . Τέλος το  $\gamma$  τίθεται συνήθως ίσο με  $1$ .

Όλα αυτά μπορούν να παρασταθούν στον παρακάτω πίνακα:

Παράμετρος	Χρήση στον αλγόριθμο
φωτεινότητα	αντικειμενική συνάρτηση
$\beta$	ελκυστικότητα
$\alpha$	παράμετρος τυχειότητας
$\gamma$	συντελεστής απορρόφησης
αριθμός γενεών	επαναλήψεις
αριθμός πυγολαμπίδων	πληθυσμός
διάσταση	διάσταση χώρου προβλήματος

Ακολουθεί το διάγραμμα ροής του αλγόριθμου firefly:



**Εικόνα 20: Διάγραμμα ροής firefly****3.4 Περιγραφή του προβλήματος με τον αλγόριθμο firefly****3.4.1 Παραδοχές και αρχικοποιήσεις μεταβλητών**

Σε αυτό το σημείο, είναι καλό να διευκρινιστούν μερικές παραδοχές που γίνονται στη συγκεκριμένη εργασία όσον αφορά τα αιολικά πάρκα αλλά και τον αλγόριθμο firefly.

- Παραδοχές για τα αιολικά πάρκα

Στην πραγματικότητα, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την απόδοση ενός αιολικού πάρκου. Σε αυτήν την εργασία, θεωρήθηκε ότι οι ανεμογεννήτριες είναι βέλτιστα τοποθετημένες σε μια έκταση καθορισμένων διαστάσεων. Δηλαδή δεν υπάρχει περίπτωση να συμπέσουν οι έλικες των ανεμογεννητριών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας τους. Επίσης, η λειτουργία του πάρκου δεν επηρεάζεται από την υφή του εδάφους. Όλες αυτές οι παραδοχές γίνονται διότι στόχος μας είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ενός αιολικού πάρκου με τη βοήθεια του αλγορίθμου firefly.

Έχει ήδη επισημανθεί, ότι στον υπολογισμό του κόστους παίζει ρόλο μόνο το πλήθος των ανεμογεννητριών που αποτελούν το αιολικό πάρκο. Για αυτό το λόγο θεωρήθηκε σκόπιμο, να εξεταστεί η συμπεριφορά του προβλήματος για διαφορετικό πλήθος ανεμογεννητριών. Για την παρούσα εργασία, οι ανεμογεννήτριες μπορεί να είναι 10, 20, 30 ή 40. Με αυτόν τον τρόπο, είναι δυνατή η εκτέλεση του αλγορίθμου με το ίδιο σύνολο παραμέτρων, για διαφορετική τιμή ανεμογεννητριών κάθε φορά. Μια τέτοια παραδοχή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη καθώς μπορούν να εξαχθούν ενδιαφέροντα συμπεράσματα σε ότι αφορά το μέγεθος του αιολικού πάρκου.

Η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία δίδεται από τη σχέση (3.2), υπολογίζεται κάθε φορά στο τέλος της κάθε επανάληψης. Αυτά είναι και τα ζητούμενα αποτελέσματα του προβλήματος. Όμως, σε κάθε επανάληψη υπολογίζεται και η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που δίνει η κάθε ανεμογεννήτρια ( $cost/P_i$ ). Αυτό συμβαίνει, γιατί αυτό το μέγεθος χρειάζεται για τον υπολογισμό διαφόρων μεγεθών του αλγορίθμου firefly.

- Παραδοχές για τον αλγόριθμο firefly

Η σχέση που δίνει την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, αναφέρονται σε n-διάστατο χώρο αναζήτησης. Στην παρούσα εργασία, θεωρούμε ότι ο χώρος είναι δύο διαστάσεων. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ξανά όλες οι σχέσεις που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία για διευκόλυνση.

Υπολογισμός απόστασης

$$r_{ij} = || x_i - x_j || = \sqrt{\sum_{k=1}^d (x_{i,k} - x_{j,k})^2} \quad (3.6)$$

Υπολογισμός ελκυστικότητας  $\beta$

$$\beta = \beta_0 * e^{-\nu * r^{1+\beta_0}}, \quad \beta_0 = 1 \quad (3.7)$$

Υπολογισμός παραμέτρου τυχαιότητας  $\alpha$

$$\alpha = \alpha * \delta \quad (3.8)$$

Υπολογισμός του ολικού μεγίστου

$$f(x,y) \in \{f_0(x,y), f_1(x,y), \dots, f_n(x,y)\} | f(x,y) = \min\{f_0(x,y), f_1(x,y), \dots, f_n(x,y)\} \} \quad (3.9)$$

και στη συνέχεια η τιμή αυτή αντιστρέφεται

Υπολογισμός αρχικής τιμής  $x_0$  μεταβλητής  $x$

$$x_0 = \text{τυχαίος\_αριθμός}() * \text{εύρος\_x} + x_{\min} \quad (3.10)$$

Υπολογισμός αρχικής τιμής  $y_0$  μεταβλητής  $y$

$$y_0 = \text{τυχαίος\_αριθμός}() * \text{εύρος\_y} + y_{\min} \quad (3.11)$$

Υπολογισμός καινούργιων τιμών  $x_i'$  της μεταβλητής  $x_i$  όταν η πυγολαμπίδα  $x_j$  παρουσιάζει καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης

Ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας αιολικού πάρκου με χρήση του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας

$$\underline{x}'_i = \underline{x}_i * (1-\beta) + x_{o,j} * \beta + \alpha * (\text{τυχαίος\_αριθμός}() - 0,5) \quad (3.12)$$

Υπολογισμός καινούργιων τιμών  $y'_i$  της μεταβλητής  $y_i$  όταν η πυγολαμπίδα  $y_i$  παρουσιάζει καλύτερη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης

$$\underline{y}'_i = \underline{y}_i * (1-\beta) + y_{o,j} * \beta + \alpha * (\text{τυχαίος\_αριθμός}() - 0,5) \quad (3.13)$$

Υπολογισμός τιμής αντικειμενικής συνάρτησης

$$f(x, y) = (x + y) / \left( \frac{2}{3} + \frac{1}{3} e^{-0.00174N^2} \right) \quad (3.14)$$

Οι πυγολαμπίδες (fireflies) του αλγορίθμου στη συγκεκριμένη εργασία αποτελούν τις ανεμογεννήτριες του αιολικού πάρκου. Το πλήθος των ανεμογεννητριών είναι πολύ σημαντικός παράγοντας.

Επίσης, η θέση της κάθε πυγολαμπίδας, στην εργασία αντιστοιχεί στην ενέργεια-ισχύ που παράγει κάθε ανεμογεννήτρια. Όσο για την ταχύτητα της κάθε οντότητας αντιστοιχεί στην ταχύτητα του ανέμου στην οποία οφείλεται ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας για κάθε ανεμογεννήτρια. Η ενέργεια που παράγει κάθε ανεμογεννήτρια πρέπει να περιορίζεται ανάμεσα σε μία μέγιστη και σε μία ελάχιστη τιμή σύμφωνα με τα δεδομένα του προβλήματος (3.3). Έχει οριστεί ως η μέγιστη ποσότητα ενέργειας που παράγει η κάθε ανεμογεννήτρια ίση με  $x_{\max}=6\text{kW}=6000\text{W}$  και η ελάχιστη  $x_{\min}=1,5\text{kW}=1500\text{W}$ . Δηλαδή, για την παραγόμενη από μία ανεμογεννήτρια ενέργεια, πρέπει να ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$1500\text{W} < \text{παραγόμενη ενέργεια} < 6000\text{W} \quad (3.15)$$

Επίσης, ο άνεμος στον οποίο οφείλεται ο ρυθμός μεταβολής της ενέργειας, πρέπει να βρίσκεται ανάμεσα σε κάποια όρια παίρνει τιμές στο διάστημα  $[y_{\min}, y_{\max}]$ . Στο συγκεκριμένο πρόβλημα τα όρια αυτά έχουν οριστεί ως  $y_{\max}=60\text{m/s}$  και  $y_{\min}=3\text{m/s}$ . Άρα, η σχέση που πρέπει να ικανοποιείται είναι η εξής:

$$3\text{m/s} < \text{ταχύτητα ανέμου} < 60\text{m/s} \quad (3.16)$$

Η παράμετρος  $\alpha$  έχει τεθεί στην αρχή ίση με 0,2 ενώ ισχύουν και:

$$\gamma=1$$

$$\delta=0,97$$

Αλγόριθμος firefly-Αιολικά Πάρκα	Πρόβλημα ελαχιστοποίησης
Πλήθος οντοτήτων $[N]$	Πλήθος ανεμογεννητριών $[n]$
Περιορισμός της τιμής της ταχύτητας $[y_{\min}, y_{\max}]$	Περιορισμός της ταχύτητας του ανέμου $[3, 60]$
Περιορισμός της τιμής της ισχύος $[x_{\min}, x_{\max}]$	Περιορισμός της παραγόμενης ενέργειας $[1500, 6000]$
Αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση $[minF]$	Αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση $[f(x,y)]$
Ισχύς $x$	Πρώτη μεταβλητή αντικειμενικής συνάρτησης
Ταχύτητα $y$	Δεύτερη μεταβλητή αντικειμενικής συνάρτησης

Πίνακας 4: Αντιστοίχιση μεγεθών του firefly με τον παρόν πρόβλημα

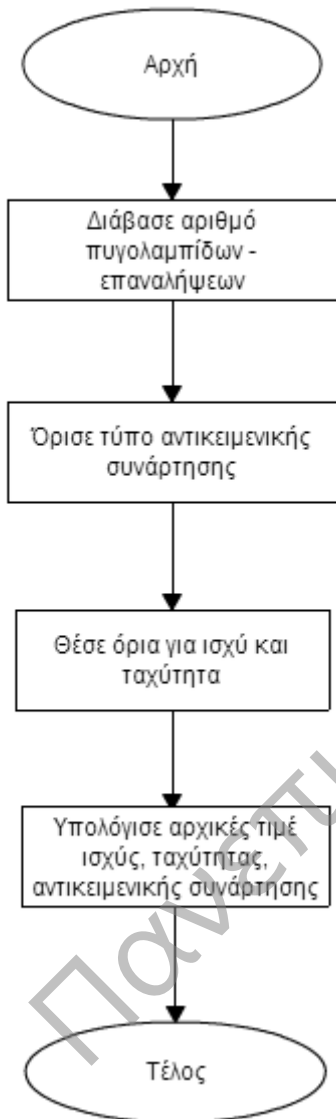
### 3.4.2 Βήματα του αλγορίθμου

Ακολουθεί η περιγραφή των βημάτων του αλγορίθμου. Για να γίνει ευκολότερη η ανάγνωση του διαγράμματος ροής που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο πρόβλημα, θεωρήθηκε φρόνιμο λόγω της μεγάλης του έκτασης να παρουσιαστεί τμηματικά στην αρχή.

- 1° Βήμα: Αρχικοποίηση

Ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας αιολικού πάρκου με χρήση του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας

Το πρώτο και από τα κυριότερα βήματα του αλγορίθμου είναι η αρχικοποίηση του πλήθους καθώς και ο ορισμός του αριθμού των επαναλήψεων. Στην προκειμένη περίπτωση, η αρχικοποίηση αφορά στις ανεμογεννήτριες ενός αιολικού πάρκου. Η ενέργεια της κάθε ανεμογεννήτριας για την πρώτη επανάληψη παίρνει μια τυχαία τιμή, η οποία δεν πρέπει να ξεπερνά τα 6000W ή να είναι μικρότερη από 1500W. Η ταχύτητα του ανέμου, στην οποία οφείλεται ο ρυθμός ανανέωσης της ενέργειας, παίρνει μία τιμή ανάμεσα στα 3 m/s και στα 60 m/s. Οι τιμές αυτές υπολογίζονται από τις σχέσεις (3.10), (3.11). Στη συνέχεια υπολογίζεται το κόστος μέσω τα αντικειμενικής συνάρτησης που δίνεται με τον τύπο (3.14). Αφού, υπολογιστούν όλα αυτά τα μεγέθη ο αλγόριθμος συνεχίζει την κανονική του εκτέλεση. Το διάγραμμα ροής της διαδικασίας της αρχικοποίησης είναι το παρακάτω:



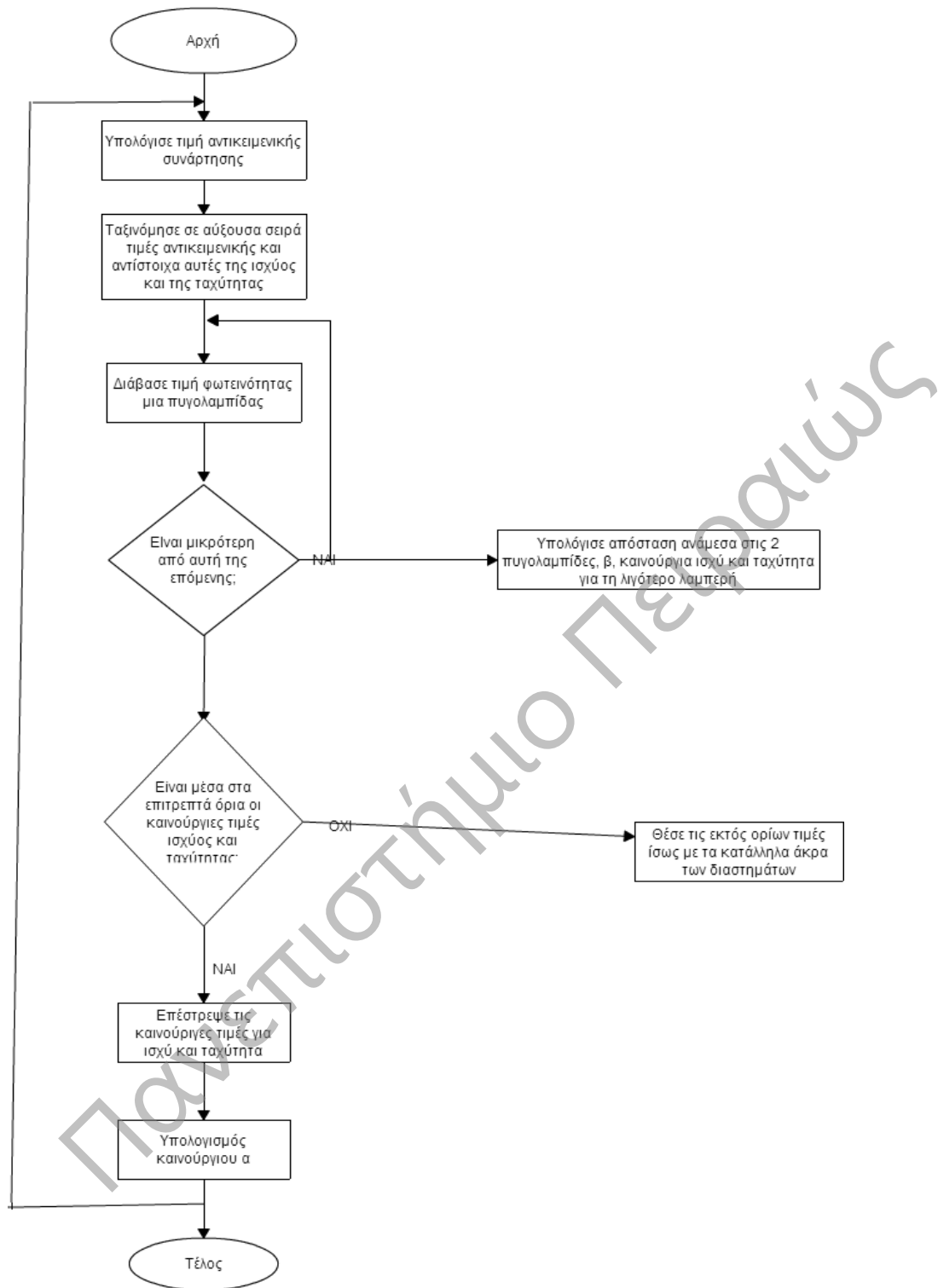
**Εικόνα 21: Διάγραμμα ροής αρχικοποίησης**

➤ 2<sup>ο</sup> Βήμα: Επαναληπτικό σώμα αλγορίθμου

Οι διαδικασίες που παρουσιάζονται σε αυτό το βήμα είναι οι διαδικασίες που επαναλαμβάνονται τόσες φορές όσες έχει οριστεί από το μέγιστο αριθμό επαναλήψεων. Ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων έχει οριστεί ίσος με 25. Έτσι, υπολογίζονται οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης σύμφωνα με τον τύπο (3.14). Οι τιμές αυτές ταξινομούνται σε αύξουσα σειρά και με τρόπο ανάλογο

ταξινομούνται και οι ισχείς μαζί με τις ταχύτητες που της παρήγαγαν. Στη συνέχεια συγκρίνεται η φωτεινότητα κάθε πυγολαμπίδας με τις υπόλοιπες. Αν μεταξύ δύο οντοτήτων η δεύτερη έχει μεγαλύτερη φωτεινότητα από την πρώτη, τότε υπολογίζεται η μεταξύ τους απόσταση  $r$  σύμφωνα με τη σχέση (3.6) καθώς και καινούργιο  $\beta$  κατά τον τύπο (3.7). Τέλος ανανεώνονται οι τιμές ισχύος και ταχύτητας  $x_i$  και  $y_i$  της λιγότερο λαμπερής πυγολαμπίδας, με το σκεπτικό να πλησιάσει προς τη φωτεινότερη. Εδώ χρησιμοποιούνται οι τύποι (3.11) και (3.12) αντίστοιχα. Όταν τελειώσουν αυτές οι επαναλήψεις, τότε επιστρέφονται τα καινούργια διανύσματα για τις τιμές  $x$  και  $y$ , της ισχύος και της ταχύτητας του ανέμου αντίστοιχα, αφού γίνει έλεγχος πρώτα για το αν οι τιμές της ισχύος και της ταχύτητας δεν υπερβαίνουν τα προκαθορισμένα όρια. Αν γίνει κάτι τέτοιο τότε η υπερβαίνουσα τιμή αντικαθίσταται με τα ανάλογα όρια. Ακολουθεί ο υπολογισμός καινούργιου  $\alpha$  σύμφωνα με τον τύπο (3.8). Οι διαδικασίες που παρουσιάστηκαν παραπάνω εκτελούνται συνέχεια μέχρι να συμπληρωθούν οι επαναλήψεις του αλγορίθμου.

Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν ολοκληρωθούν οι επαναλήψεις, με την επιστροφή των καλύτερων τιμών για την αντικειμενική συνάρτηση, τη μεταβλητή  $x$  και τη μεταβλητή  $y$ , δηλαδή, του κόστους, της ισχύος και της ταχύτητας αντίστοιχα. Εδώ να σημειωθεί και πάλι ότι ο firefly αλγόριθμος χρησιμοποιείται για μεγιστοποίηση, επομένως ο τύπος της αντικειμενικής συνάρτησης (3.14) είναι ο αντίστροφος του κανονικού. Συνεπώς στο τέλος, παίρνεται η αντίστροφη τιμή για τον υπολογισμό του κόστους λειτουργίας. ο διάγραμμα ροής της διαδικασίας που περιεγράφηκε είναι το παρακάτω:



Εικόνα 22: Διάγραμμα ροής επαναληπτικού τμήματος



## 3.5 Εφαρμογή

### 3.5.1 Αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν

Για την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, χρησιμοποιήθηκε όπως ήδη έχει αναφερθεί, ο αλγόριθμος firefly.

### 3.5.2 Γλώσσα Υλοποίησης

Η εργασία υλοποιήθηκε στη γλώσσα MATLAB και πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε η έκδοση MATLAB 8 Η λέξη MATLAB προέρχεται από τις λέξεις «Matrix Laboratory». Έχει παρουσιάσει ιδιαίτερη ανάπτυξη τα τελευταία χρόνια με εμπλουτισμούς που δέχεται από πολλούς χρήστες. Είναι ιδιαίτερα δημοφιλές πρόγραμμα στο χώρο των πανεπιστημιακών και γίνεται χρήση του σε πολλές περιπτώσεις μαθηματικών, μηχανικών και προβλημάτων φυσικής. Στη βιομηχανία, το MATLAB είναι το εργαλείο απόφασης για έρευνα υψηλής αποτελεσματικότητας, για ανάπτυξη και ανάλυση.

Επιλέχτηκε το συγκεκριμένο πρόγραμμα καθώς είναι ιδιαίτερα διαδεδομένο για περιπτώσεις προσομοιώσεων ποικίλων καταστάσεων και προβλημάτων ανάπτυξης αλγορίθμων. Με τη χρήση εύκολων μαθηματικών συμβολισμών γίνεται ο προγραμματισμός και η απεικόνιση των αποτελεσμάτων σε γραφικές παραστάσεις. Είναι φιλικό στη χρήση και δίνει πολλές δυνατότητες επεξεργασίας γραφημάτων στο χρήστη.

### 3.5.3 Απαιτήσεις συστήματος

Η ανάπτυξη της εργασίας έγινε σε desktop υπολογιστή με επεξεργαστή Pentium 4 στα 3.0GHz, με μνήμη RAM 1 GB και λειτουργικό σύστημα Windows XP Professional Service Pack 2.

## 3.6 Αποτελέσματα και διαγράμματα

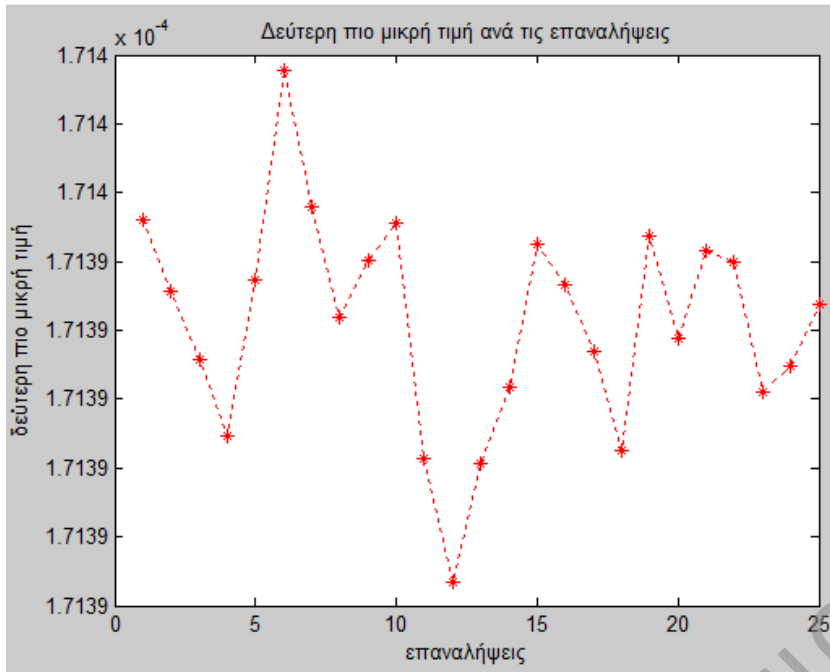
Στο συγκεκριμένο τμήμα της εργασίας, θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα που προκύπτουν από τον αλγόριθμο κατά τη διάρκεια εκτέλεσής του. Οι γραφικές παραστάσεις που προκύπτουν αφορούν την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (4.2) που προκύπτει στο τέλος κάθε επανάληψης και της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης που δίνει η κάθε ανεμογεννήτρια σε κάθε επανάληψη.

Αρχικά θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα για το gbest μοντέλο με τη χρήση της παραμέτρου inertia weight για 10, 20, 30 και 40 ανεμογεννήτριες αντίστοιχα.

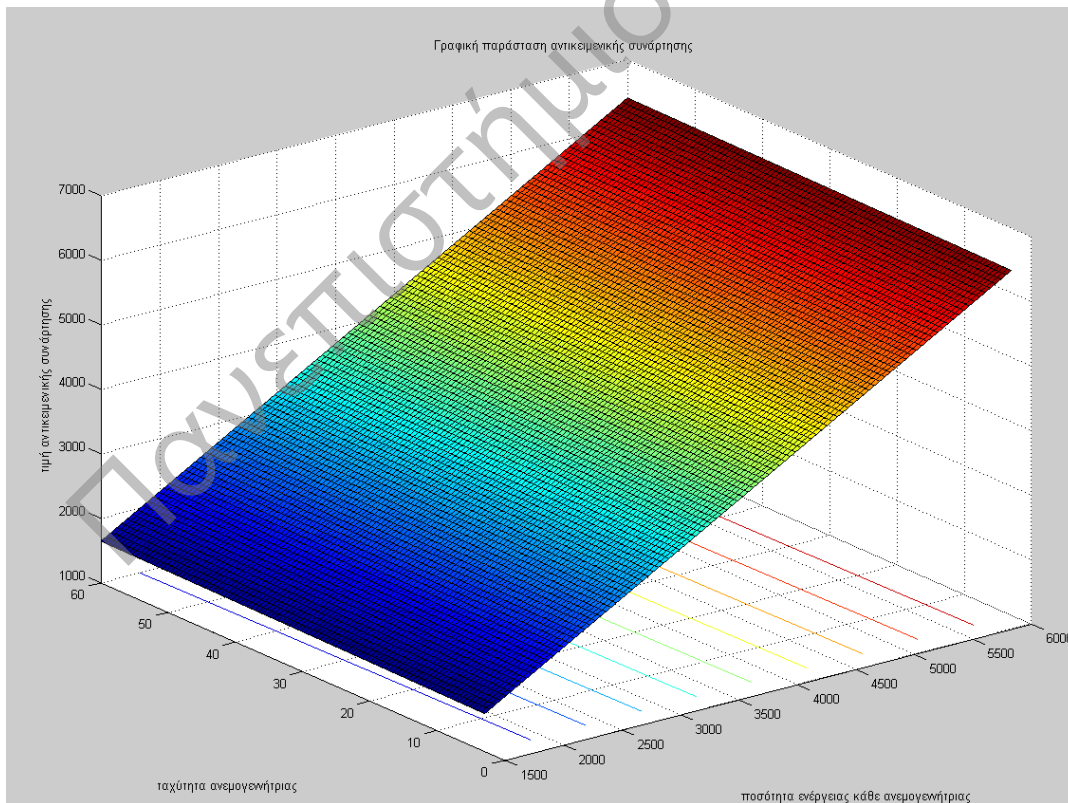
### 3.6.1 Αποτελέσματα του αλγόριθμου της πυγολαμπίδας

1<sup>η</sup> Περίπτωση: 10 ανεμογεννήτριες

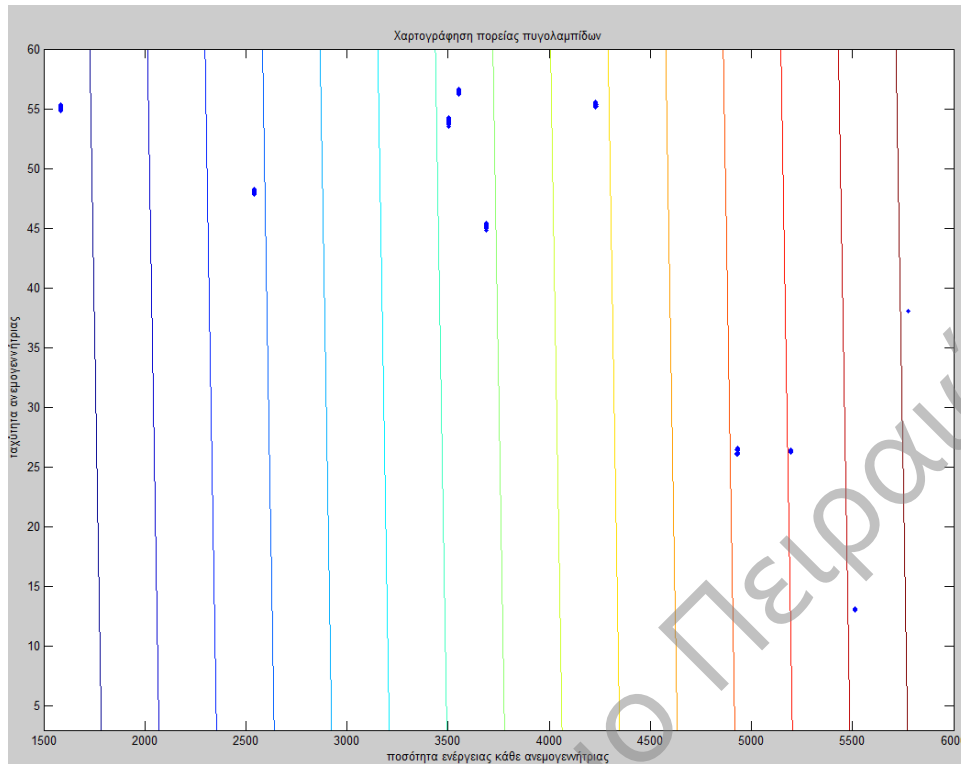
Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο αλγόριθμος ορίστηκε να εκτελεί 25 επαναλήψεις. Με την ολοκλήρωση των πρώτων 25 επαναλήψεων προκύπτουν τα αποτελέσματα στην περίπτωση όπου το αιολικό πάρκο αποτελείται από 10 ανεμογεννήτριες. Η πρώτη γραφική παράσταση, απεικονίζει τις τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης (4.2) για την προτελευταία πυγολαμπίδα, δηλαδή τη δεύτερη μεγαλύτερη τιμή της. Σημειώνεται μία τιμή σε κάθε επανάληψη, η οποία στο διάγραμμα απεικονίζεται με ένα αστεράκι (\*). Η μορφή της είναι η εξής:



Η δεύτερη γραφική παράσταση απεικονίζει την τρισδιάστατη γραφική παράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης.

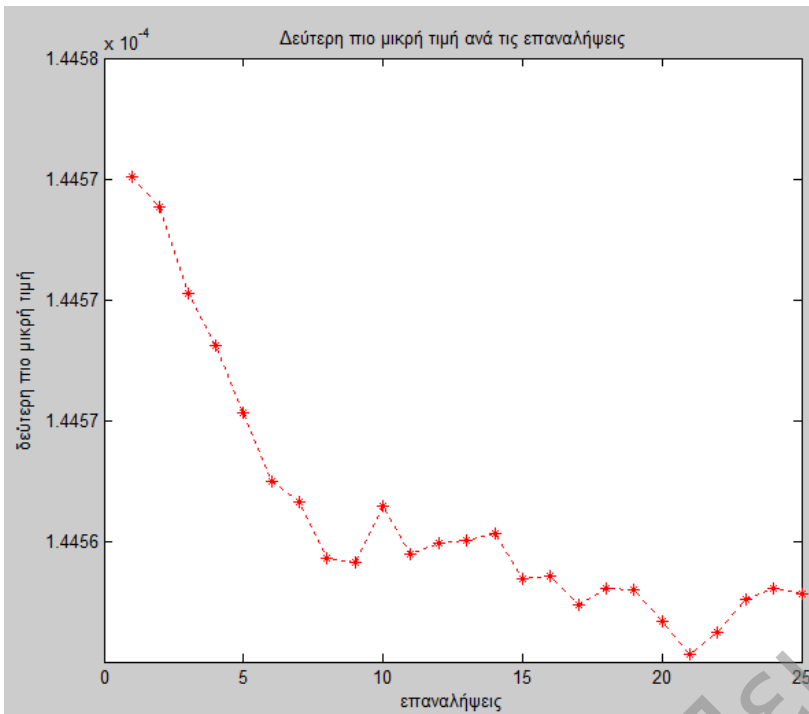


Η τρίτη γραφική παράσταση απεικονίζει την πορεία των πυγολαμπίδων – ανεμογεννητριών στη διάρκεια εκτέλεσης του αλγόριθμου.

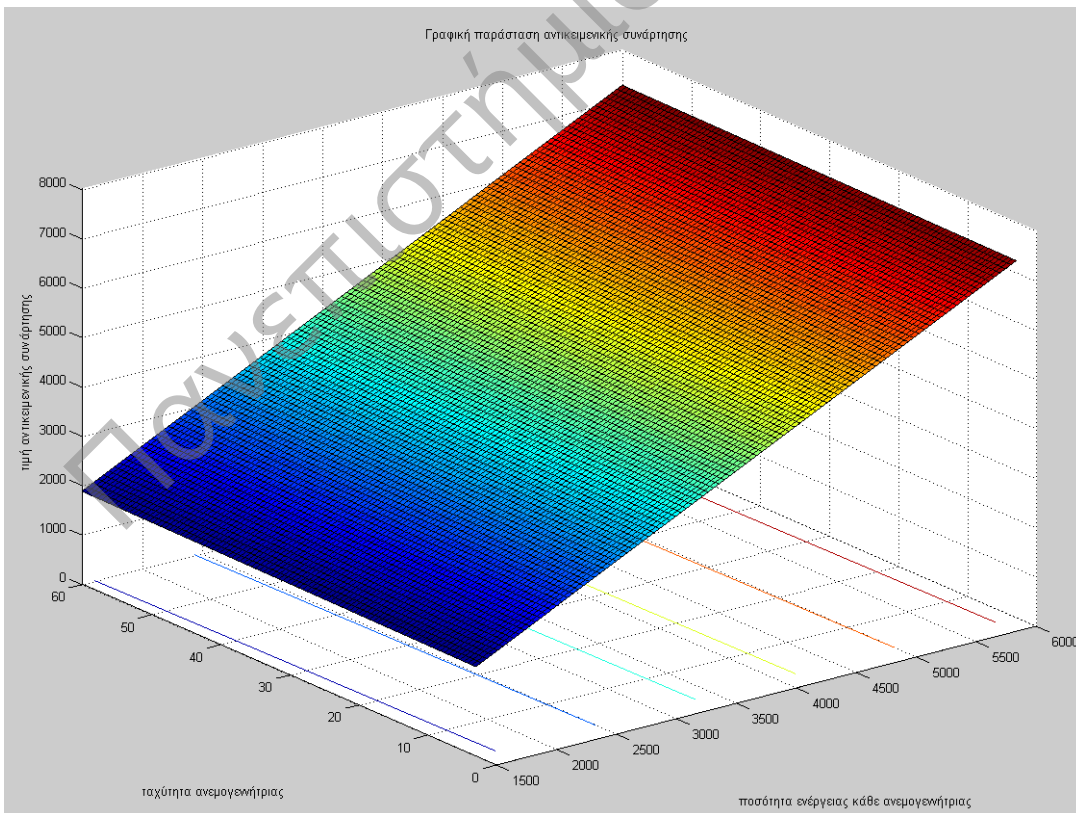


2<sup>η</sup> Περίπτωση: 20 ανεμογεννητρίες

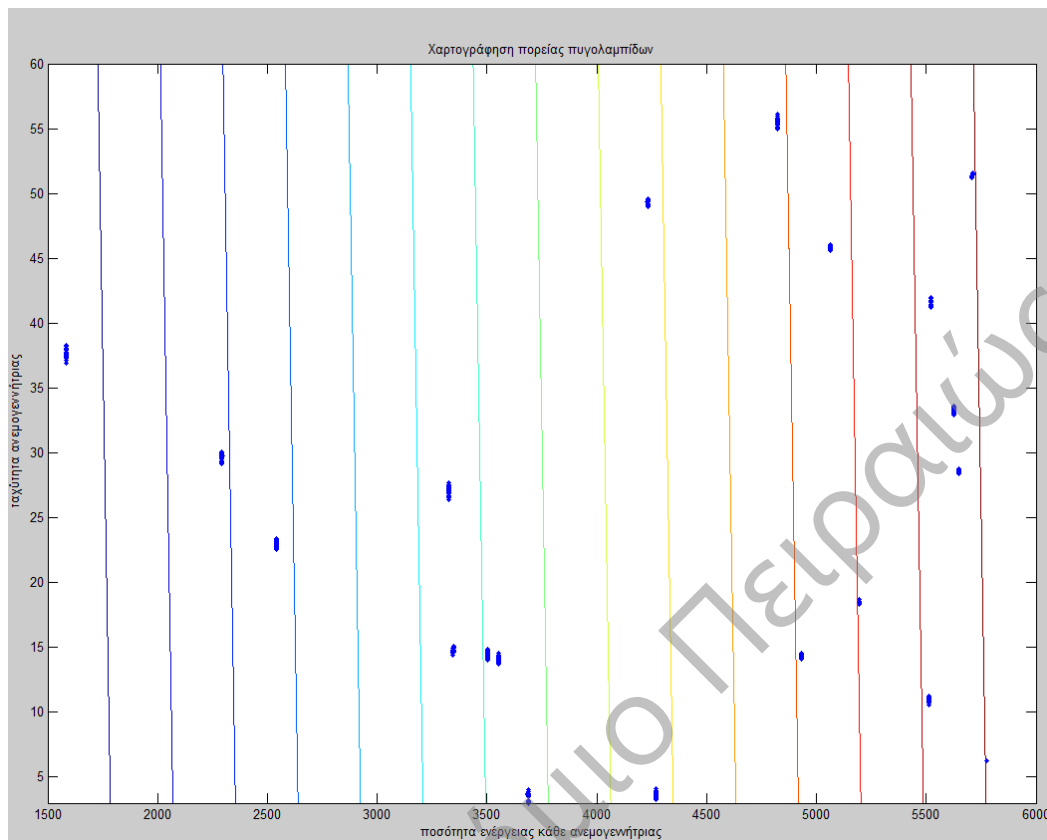
Μετά το πέρας άλλων 25 επαναλήψεων προκύπτουν τα αποτελέσματα της αντικειμενικής συνάρτησης για την δεύτερη μικρότερη τιμή στην περίπτωση ενός αιολικού πάρκου με 20 ανεμογεννητρίες.



Ακολουθεί η τρισδιάστατη γραφική παράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης αιολικού πάρκου που αποτελείται από 20 ανεμογεννήτριες.

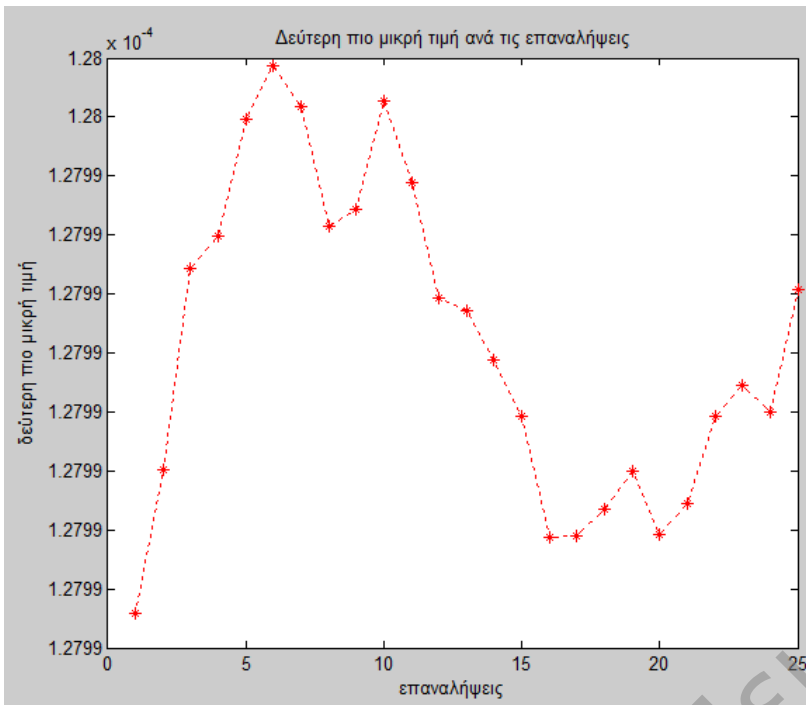


Η τρίτη γραφική παράσταση απεικονίζει την πορεία των πυγολαμπίδων – ανεμογεννητριών στη διάρκεια εκτέλεσης του αλγόριθμου.

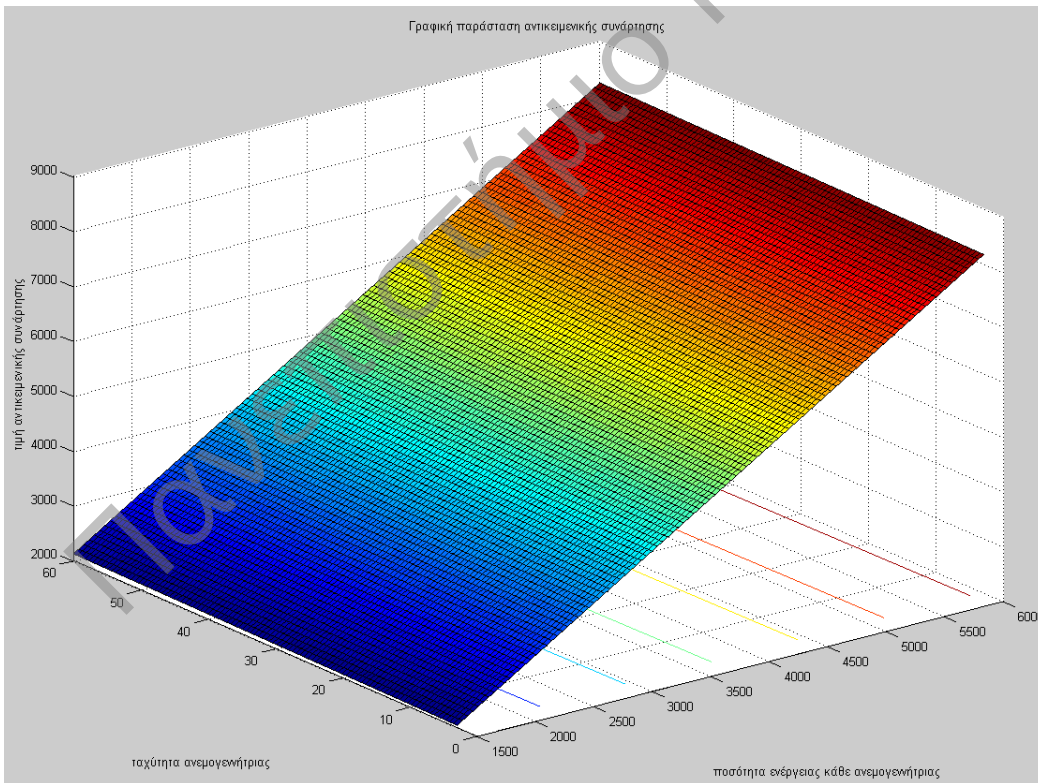


3<sup>η</sup> Περίπτωση: 30 ανεμογεννήτριες

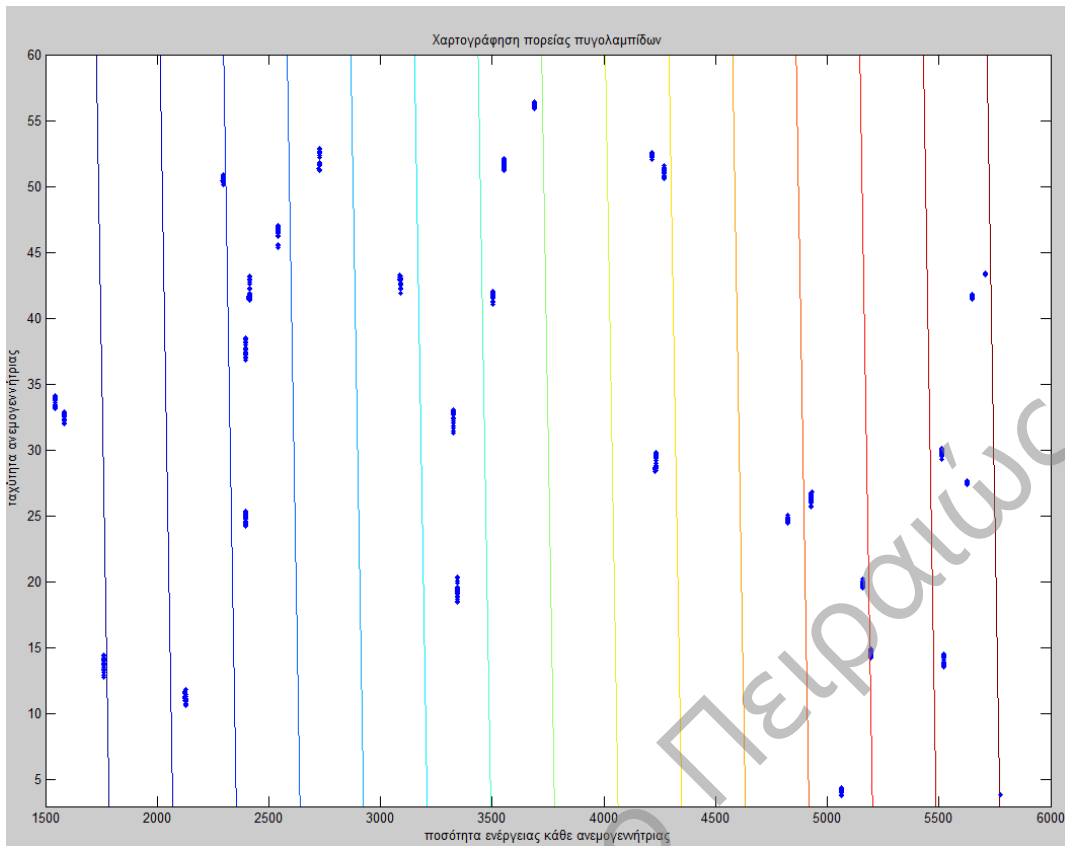
Μετά το πέρας άλλων 25 επαναλήψεων προκύπτουν τα αποτελέσματα της δεύτερης μικρότερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στην περίπτωση ενός αιολικού πάρκου με 30 ανεμογεννήτριες.



Ακολουθεί η γραφική παράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης σε τρισδιάστατη μορφή, στην περίπτωση του αιολικού πάρκου που αποτελείται από 30 ανεμογεννήτριες.

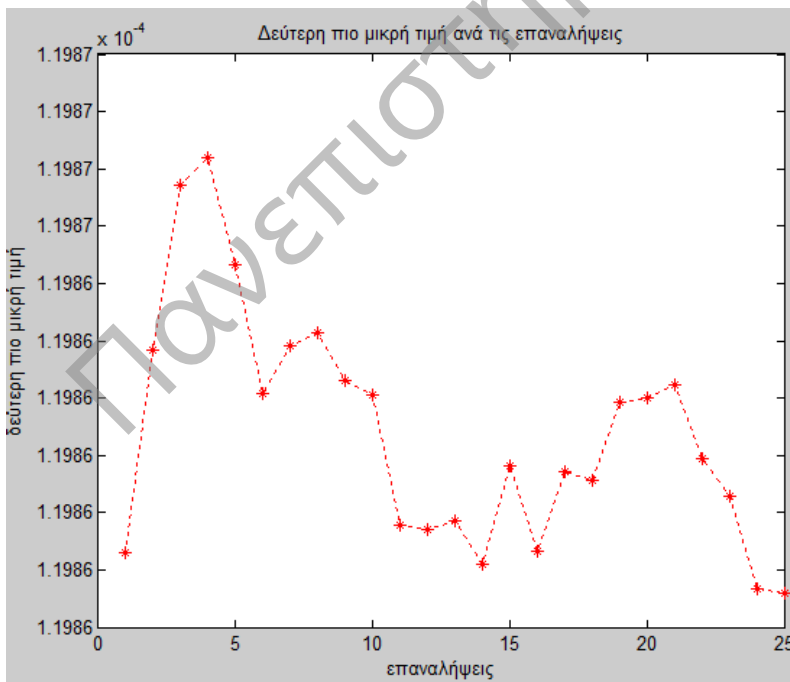


Η τρίτη γραφική παράσταση απεικονίζει την πορεία των πυγολαμπίδων – ανεμογεννητριών στη διάρκεια εκτέλεσης του αλγόριθμου.

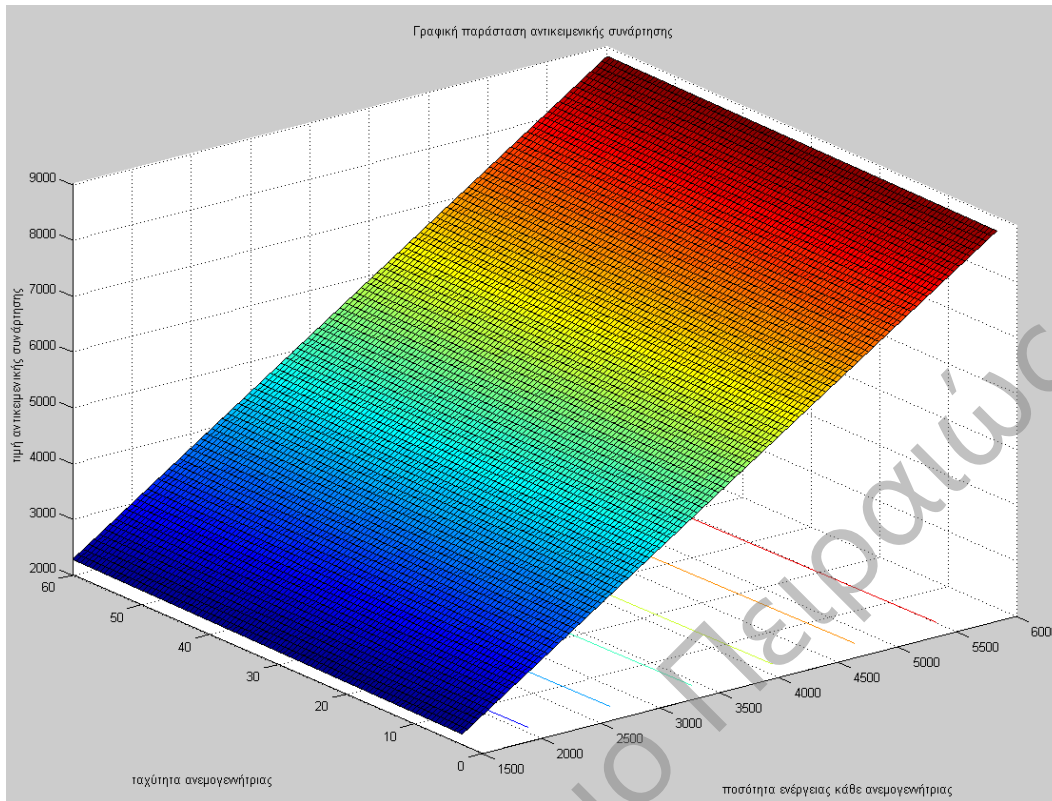


4<sup>η</sup> Περίπτωση: 40 ανεμογεννήτριες

Μετά το πέρας άλλων 25 επαναλήψεων προκύπτουν τα αποτελέσματα της δεύτερης μικρότερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης στην περίπτωση ενός αιολικού πάρκου με 40 ανεμογεννήτριες.

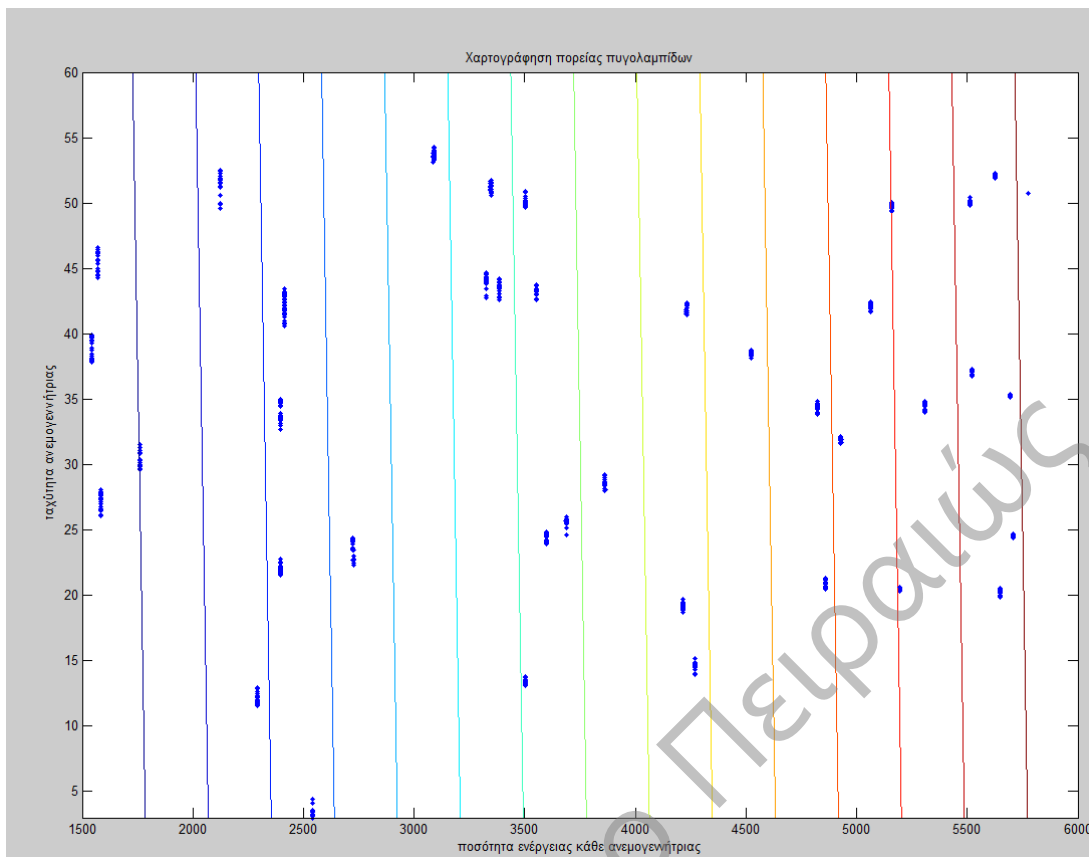


Ακολουθεί η γραφική παράσταση της αντικειμενικής συνάρτησης, στην περίπτωση του αιολικού πάρκου που αποτελείται από 40 ανεμογεννήτριες.



Τέλος, παρατίθεται η τροχιά των πυγολαμπίδων κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου στην περίπτωση που το αιολικό πάρκο αποτελείται από 40 ανεμογεννήτριες – πυγολαμπίδες.





### 3.7 Συμπεράσματα

Σε αυτό το κεφάλαιο, θα παρουσιαστούν τα συμπεράσματα που προκύπτουν από την παρούσα εργασία για την ελαχιστοποίηση του κόστους λειτουργίας ενός αιολικού πάρκου με τη βοήθεια του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας. Η δομή που θα χρησιμοποιηθεί, ακολουθεί τον τρόπο παρουσίασης των διαγραμμάτων παραπάνω.

Αυτό που παρατηρήθηκε με έκπληξη είναι ότι ο αλγόριθμος της πυγολαμπίδας βρίσκει το ελάχιστο κατά την πρώτη επανάληψη. Φυσικά, στην πορεία της εκτέλεσης του αυξομειώνει και τις τιμές των μεταβλητών της αντικειμενικής συνάρτησης, ωστόσο καμία από αυτές που προκύπτουν δεν γίνεται πιο ελάχιστη από τη βέλτιστη. Γι' αυτό το λόγο έχουν παρατεθεί παραπάνω οι τιμές που δίνει η αντικειμενική συνάρτηση για την αμέσως μεγαλύτερη τιμή της ευρεθείσας ελάχιστης.

Από τα διαγράμματα αντιλαμβανόμαστε ότι η βέλτιστη λύση αναζητείται ανάμεσα σε όλο το σύνολο των οντοτήτων - πυγολαμπίδων. Καθώς παρατηρούμε τις γραφικές παραστάσεις της αντικειμενικής συνάρτησης, για το διαφορετικό πλήθος των ανεμογεννητριών, είναι φανερό ότι καθώς το πλήθος των ανεμογεννητριών στο αιολικό πάρκο αυξάνεται, τόσο πιο γρήγορη σύγκλιση επιτυγχάνεται. Με άλλα λόγια, είναι δυνατή η εύρεση όλο και καλύτερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης. Βέβαια, σε αυτό παίζει ρόλο και ο τύπος με τον οποίο υπολογίζεται η τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης (3.2) όπου ενώ το κόστος για ένα συγκεκριμένο πλήθος ανεμογεννητριών παραμένει σταθερό όσο αυξάνουμε τη συνολικά παραγόμενη ενέργεια, τόσο καλύτερη τιμή πετυχαίνουμε. Οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης που είναι ελάχιστα μεγαλύτερες από το κάθε ελάχιστο (η δεύτερη καλύτερη τιμή, δηλαδή), φαίνονται στο ακόλουθο πίνακα. Μπορούμε να πούμε ότι για να επιτευχθεί ελαχιστοποίηση του κόστους συντελεί και η αύξηση της συνολικά παραγόμενης ενέργειας, άρα και του πλήθους των ανεμογεννητριών. Συνεπώς, η τοποθέτηση του μέγιστου δυνατού αριθμού ανεμογεννητριών σε ένα αιολικό πάρκο καθορισμένων διαστάσεων, είναι σημαντικής αξίας για την ελαχιστοποίηση του κόστους.

Επα ναλ ήψ εις	10 Ανεμογ.	20 Ανεμογ.	30 Ανεμογ.	40 Ανεμογ.
1 <sup>η</sup>	0.0001713956151	0.0001445751070	0.0001279875771	0.00011985929
2 <sup>η</sup>	0.0001713945580	0.0001445738243	0.0001279900300	0.00011986283
3 <sup>η</sup>	0.0001713935642	0.0001445702356	0.0001279934205	0.00011986571
4 <sup>η</sup>	0.000171392463	0.0001445680836	0.0001279939866	0.00011986619
5 <sup>η</sup>	0.0001713947287	0.0001445653190	0.0001279959683	0.00011986432
6 <sup>η</sup>	0.0001713977730	0.0001445624517	0.0001279968732	0.00011986207
7 <sup>η</sup>	0.000171395783	0.0001445616439	0.0001279961862	0.00011986291
8 <sup>η</sup>	0.0001713941910	0.0001445592638	0.0001279941422	0.00011986312
9 <sup>η</sup>	0.0001713950173	0.0001445590976	0.0001279944362	0.00011986229
10 <sup>η</sup>	0.0001713955579	0.0001445614640	0.0001279962835	0.00011986204
11 <sup>η</sup>	0.0001713921440	0.0001445594593	0.0001279948921	0.00011985978
12 <sup>η</sup>	0.0001713903419	0.0001445599235	0.0001279929417	0.00011985969
13 <sup>η</sup>	0.0001713920752	0.0001445600267	0.0001279927257	0.00011985984
14 <sup>η</sup>	0.0001713931775	0.0001445603194	0.0001279918732	0.00011985908
15 <sup>η</sup>	0.0001713952422	0.0001445584407	0.0001279909191	0.00011986082
16 <sup>η</sup>	0.0001713946644	0.0001445585667	0.0001279888808	0.00011985932
17 <sup>η</sup>	0.0001713936857	0.0001445573712	0.0001279889075	0.00011986071
18 <sup>η</sup>	0.0001713922457	0.0001445580487	0.0001279893449	0.00011986056
19 <sup>η</sup>	0.0001713953730	0.0001445579723	0.0001279899949	0.00011986193
20 <sup>η</sup>	0.0001713938762	0.0001445566591	0.0001279889129	0.00011986200
21 <sup>η</sup>	0.0001713951551	0.0001445552871	0.0001279894375	0.00011986223
22 <sup>η</sup>	0.0001713949998	0.0001445562076	0.0001279909357	0.00011986094
23 <sup>η</sup>	0.0001713931112	0.0001445575713	0.0001279914468	0.00011986028
24 <sup>η</sup>	0.0001713934781	0.0001445580416	0.0001279909956	0.00011985865
25 <sup>η</sup>	0.0001713943783	0.0001445578044	0.0001279930687	0.00011985858

Πρέπει να σημειωθεί ότι η τιμή κάθε ανεμογεννήτριας παραμένει πάντα στα επιτρεπτά όρια (3.21). Παρατηρώντας τους πίνακες των βέλτιστων λύσεων για κάθε ανεμογεννήτρια, δηλαδή της καλύτερης τιμές που αφορούν την ταχύτητα και την ισχύ σε σχέση με την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, παρατηρούμε ότι μεγάλες τιμές στην ισχύ δίνουν καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης, δηλαδή, μικρότερο κόστος λειτουργίας.

Οι τελικές καλύτερες τιμές για 10 ανεμογεννήτριες:

Ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας αιολικού πάρκου με χρήση του αλγορίθμου της πυγολαμπίδας

Ισχύς	Ταχύτητα	Κόστος
1583,276	55,18854	0,000578
2540,264	48,04659	0,000366
3500,922	53,72806	0,000266
3554,7	56,12356	0,000262
3686,815	44,99058	0,000254
4230,978	55,40363	0,000221
4929,468	26,72617	0,000191
5196,815	26,21664	0,000181
5510,845	13,08714	0,000171
5775,582	38,07964	0,000163

Οι τελικές καλύτερες τιμές για 20 ανεμογεννήτριες:

Ισχύς	Ταχύτητα	Κόστος
1584,19	38,24908	0,000513
2293,725	29,96256	0,000358
2539,554	22,80891	0,000325
3324,811	27,34653	0,000248
3346,455	14,84397	0,000248
3502,154	14,86228	0,000237
3553,762	13,95315	0,000233
3686,102	3,466628	0,000226
4270,391	3,563137	0,000195
4231,295	48,82298	0,000195
4821,647	55,92007	0,000171
4930,295	14,11265	0,000168
5064,747	46,09049	0,000163
5195,945	18,62954	0,00016
5511,21	11,19898	0,000151
5521,182	41,81813	0,00015
5625,522	33,37628	0,00014717
5648,375	28,75296	0,00014670
5710,053	51,48517	0,00014455
5775,582	6,299804	0,00014404

Οι τελικές καλύτερες τιμές για 30 ανεμογεννήτριες:

Ισχύς	Ταχύτητα	Κόστος
1543,384	33,41553	0,000467
1584,844	32,83216	0,000455

1759,191	14,49998	0,000415
2125,921	11,18262	0,000345
2296,009	50,48698	0,000314
2395,6	25,20123	0,000304
2395,335	38,51598	0,000303
2411,554	41,48418	0,0003
2540,33	46,56739	0,000285
2725,841	52,66333	0,000265
3087,581	43,29597	0,000235
3325,259	32,88127	0,000219
3345,582	19,22888	0,000219
3502,17	41,71633	0,000208
3554,258	51,44622	0,000204
3687,275	56,11106	0,000197
4231,482	29,65844	0,000173
4216,71	52,50952	0,000172
4269,14	51,58603	0,00017
4822,365	24,87146	0,000152
4928,799	25,69454	0,000149
5063,041	4,337792	0,000145
5158,83	19,75626	0,000142
5195,575	14,83104	0,000141
5521,201	14,45684	0,000133
5510,719	30,13481	0,000133
5626,45	27,57432	0,00013
5648,456	41,54545	0,000129
5709,432	43,37467	0,00012799
5775,582	3,870614	0,00012740

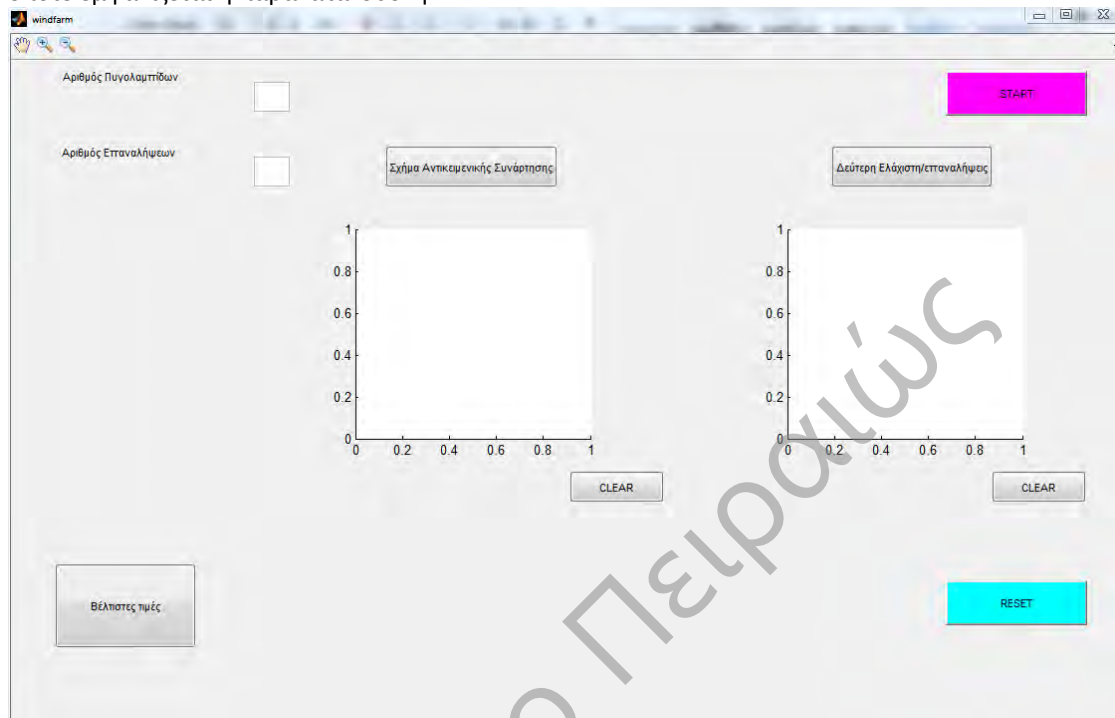
Οι τελικές καλύτερες τιμές για 40 ανεμογεννήτριες:

Ισχύς	Ταχύτητα	Κόστος
1543,606	37,92733	0,000435
1582,065	25,75229	0,000427
1571,277	46,77408	0,000425
1762,776	29,73802	0,000383
2125,575	52,09456	0,000316
2291,08	13,2697	0,000298
2396,114	21,5402	0,000284
2393,991	35,16493	0,000283
2414,959	43,76726	0,00028

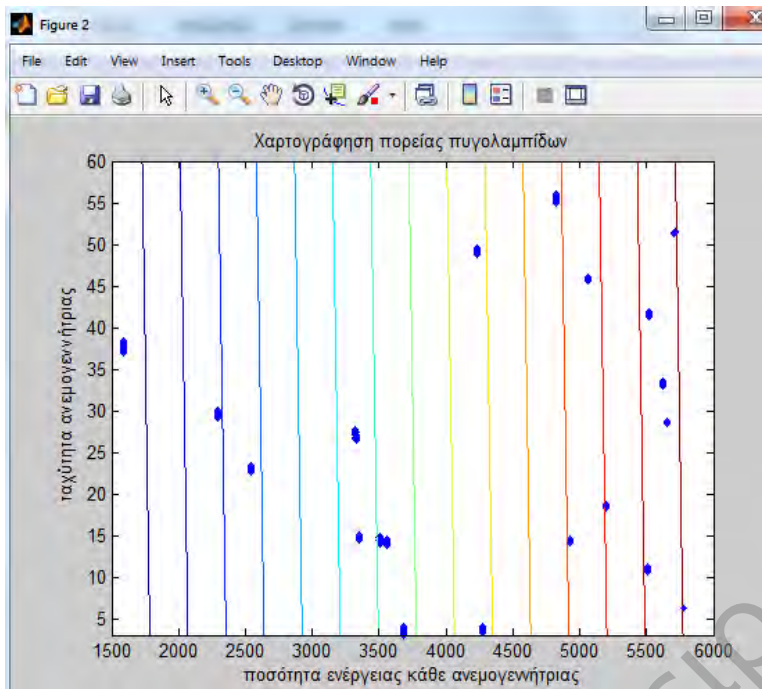
2415,147	43,6512	0,00028
2540,872	3,212897	0,00027
2724,671	24,6531	0,00025
3087,814	52,81649	0,000219
3325,716	45,01853	0,000204
3346,45	51,65832	0,000202
3384,681	42,777	0,000201
3501,722	13,35592	0,000196
3503,574	50,47141	0,000193
3554,205	43,13295	0,000191
3597,291	24,98052	0,00019
3686,16	25,5468	0,000185
3863,141	28,76224	0,000177
4216,192	18,93588	0,000162
4231,399	42,47009	0,000161
4268,141	14,75627	0,00016
4524,132	39,06796	0,000151
4821,654	34,33321	0,000142
4860,065	21,28795	0,000141
4928,433	32,0957	0,000139
5064,55	41,56544	0,000135
5158,675	49,05999	0,000132
5196,058	20,70199	0,000132
5308,156	34,78465	0,000129
5521,479	36,69339	0,000124
5510,381	49,93281	0,000124
5648,314	19,87764	0,000121
5625,929	51,90191	0,000121
5692,871	34,98328	0,00012
5709,675	24,54024	0,00012
5775,582	50,77275	0,000118

### 3.7 Εγχειρίδιο εφαρμογής

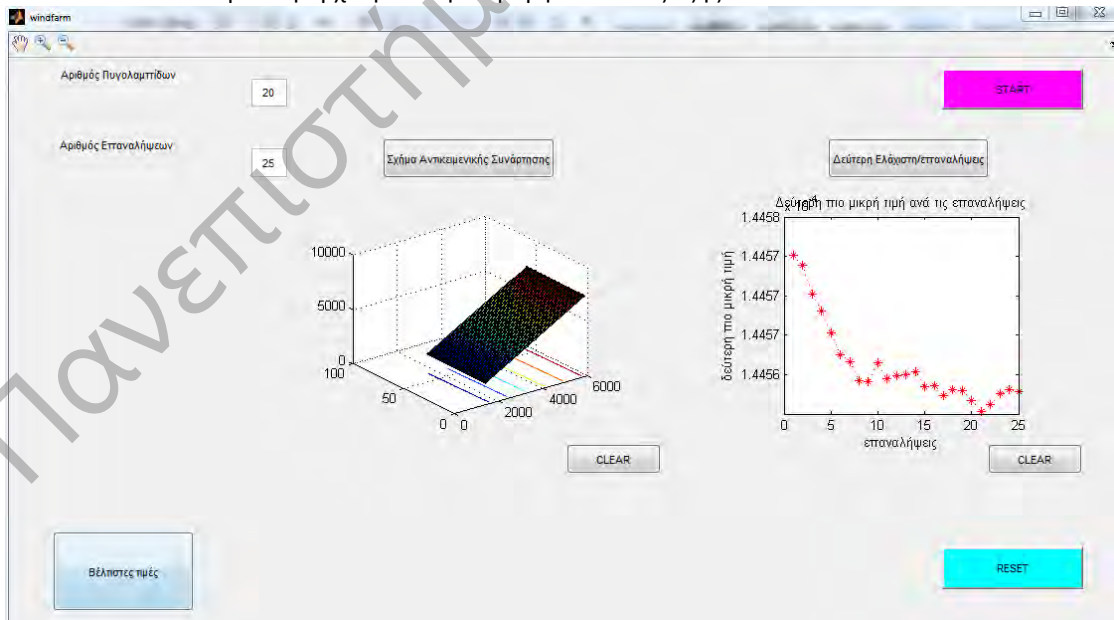
Για να τρέξουμε την εφαρμογή πληκτρολογούμε στον editor του Matlab τη λέξη windfarm, οπότε εμφανίζεται η παρακάτω οθόνη:



Στη συνέχεια ο χρήστης πρέπει να συμπληρώσει τα πεδία 'Αριθμός Πυγολαμπίδων' και 'Αριθμός επαναλήψεων' με τους αριθμούς με τους οποίους επιθυμεί να τρέξει τον αλγόριθμο και να πατήσει το φούξια κουμπί Start. Αν για παράδειγμα θέσει τις τιμές 20 και 25 αντίστοιχα, τότε εμφανίζεται η μία φιγούρα που απεικονίζει την πορεία των πυγολαμπίδων κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης, που είναι η παρακάτω:



Η κεντρική οθόνη παραμένει ως έχει. Αν ο χρήστης θέλει να εμφανιστεί η τρισδιάστατη μορφή της αντικειμενικής συνάρτησης που βελτιστοποιείται, πρέπει να πατήσει το κουμπί 'Εμφάνιση Αντικειμενικής Συνάρτησης' ενώ αν θέλει να δει τη γραφική παράσταση τις δεύτερης χειρότερης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με τον αριθμό των επαναλήψεων, πρέπει να πατήσει το κουμπί 'Δεύτερη ελάχιστη / επαναλήψεις'. Αν πατηθούν και τα δύο αυτά κουμπιά η αρχική οθόνη διαμορφώνεται ως εξής:



Αν ο χρήστης θέλει να δει καλύτερα τις γραφικές αυτές παραστάσεις τότε μπορεί να επιλέξει τα σύμβολα του Zoom In και Zoom Out καθώς και το χεράκι από τη γραμμή του menu πάνω αριστερά.

Αν ο χρήστης επιθυμεί να σβήσει τα γραφήματα, τότε πρέπει να πατήσει τα αντίστοιχα κουμπιά 'CLEAR' κάτω από τις γραφικές παραστάσεις.

Τέλος οι βέλτιστες τιμές τις αντικειμενικής συνάρτησης παρουσιάζονται σε ξεχωριστή φιγούρα, αν πατηθεί το κουμπί 'Βέλτιστες τιμές'. Η φιγούρα που αντιστοιχεί στις παραπάνω τιμές είναι η ακόλουθη:

	Ισχύς	Ταχύτητα	αντικειμενική συνάρτηση
1	1.5842e+03	38.2491	5.1335e-04
2	2.2937e+03	29.9626	3.5843e-04
3	2.5396e+03	22.8089	3.2504e-04
4	3.3248e+03	27.3465	2.4846e-04
5	3.3465e+03	14.8440	2.4778e-04
6	3.5022e+03	14.8623	2.3681e-04
7	3.5538e+03	13.9532	2.3345e-04
8	3.6861e+03	3.4666	2.2574e-04
9	4.2704e+03	3.5631	1.9487e-04
10	4.2313e+03	48.8230	1.9459e-04
11	4.8216e+03	55.9201	1.7076e-04
12	4.9303e+03	14.1127	1.6845e-04
13	5.0647e+03	46.0905	1.6296e-04
14	5.1959e+03	18.6295	1.5972e-04
15	5.5112e+03	11.1990	1.5082e-04
16	5.5212e+03	41.8181	1.4972e-04
17	5.6255e+03	33.3763	1.4718e-04
18	5.6484e+03	28.7530	1.4671e-04
19	5.7101e+03	51.4852	1.4456e-04
20	5.7756e+03	6.2998	1.4405e-04

Τέλος αν ο χρήστης επιθυμεί να τρέξει μια καινούργια προσομοίωση πρέπει να πατήσει το κουμπί 'RESET'.

## Κεφάλαιο 4<sup>ο</sup>:

### «Συμπεράσματα από την εφαρμογή του αλγόριθμου firefly στο πρόβλημα βελτιστοποίησης κόστους λειτουργίας αιολικού πάρκου»

Οι ανεμογεννήτριες έχουν εμφανιστεί σε αρκετά σημεία τα τελευταία χρόνια. Η χρήση τους κρίνεται απαραίτητη καθώς αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας. Ωστόσο η προχειρότητα που μασιάζει τη χώρα μας έχει ως αποτέλεσμα να τοποθετούνται σε διάφορα ακατάλληλα σημεία με συνέπεια να μην αποδίδουν τα αναμενόμενα αλλά και να αλλοιώνουν το φυσικό περιβάλλον.

Η διαδικασία του υπολογισμού του βέλτιστου πλήθους ανεμογεννητριών καθώς και της κατάλληλης ισχύς που πρέπει να έχουν, ώστε το αιολικό πάρκο να λειτουργεί με ελάχιστο κόστος ίσως ήταν επίπονη πριν κάποια χρόνια. Ωστόσο η ανακάλυψη μετεωρετικών αλγορίθμων έχει απλοποιήσει πολύ τη διαδικασία της βελτιστοποίησης. Ο Αλγόριθμος της πυγολαμπίδας είναι ένας από αυτούς. Υλοποιείται εύκολα χάριν της απλότητας του και καταλήγει σε ασφαλή συμπεράσματα. Έκπληξη προκάλεσε μάλιστα πώς μια τόσο απλή υπολογιστική ακολουθία έχει σωστά αποτελέσματα σε αντίθεση με τις δύσκολες διαδικασίες εύρεσης ακροτάτων της αριθμητικής ανάλυσης.



## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

### Κώδικας εφαρμογής

```
% ===== %
% Ο παρακάτω κώδικας έχει στηριχτεί σε αυτόν που βρίσκεται %
% στο βιβλίο του Xin-She Yang: %
% "Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms", Δεύτερη έκδοση%
% εκδοτικός οίκος Luniver, (2010). www.luniver.com %
% ===== %
```

```
% =====%
% Ελαχιστοποίηση κόστους λειτουργίας αιολικού πάρκου %
% Χρήση: firefly_simple %
% eg: firefly_simple; %
% ===== %
```

```
function varargout = windfarm(varargin)
```

```
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name', mfilename, ...
    'gui_Singleton', gui_Singleton, ...
    'gui_OpeningFcn', @windfarm_OpeningFcn, ...
    'gui_OutputFcn', @windfarm_OutputFcn, ...
    'gui_LayoutFcn', [], ...
    'gui_Callback', []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end

if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT
```

```
% --- Executes just before windfarm is made visible.
```

```
function windfarm_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
```

```

% Choose default command line output for windfarm
handles.output = hObject;

% Update handles structure
guidata(hObject, handles);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = windfarm_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)

% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

% --- Εκτελείται όταν πατιέται το START.
function pushbutton1_Callback(hObject, eventdata, handles)
pugolampides=get(handles.edit1,'String') %ari8mos fireflies
a=str2num(pugolampides);
epanalhpseis=get(handles.edit2,'String') %epanalhspeis fireflies
b=str2num(epanalhpseis);
[best]=firefly_simple(a,b) %klsh synarthshs ektelei ton firefly

function [best]=firefly_simple(n,r) %metablhtes gia ta koumpia
global c;
global x;
global y;
global z;
global besta;
global bestb;
global bestc;
format long g; %katalhlh diamorfws ari8mwn

MaxGeneration=r;
r=num2str(n);
% xrhsima stoixeia
help firefly_simple.m
rand('state',0); % Reset sth gennhtria
str1='(x+y)/(0.6667+0.3333*exp(-0.00174*^1); %orismos antikeimenikh
str2=num2str(r);

```

```

str3='^2));
funstr=strcat(str1,str2,str3);
% metatroph se inline sunarthsh
f=vectorize(inline(funstr));
% range=[xmin xmax ymin ymax];
range=[1500 6000 3 60]; %oria isxuos -taxuthtas

% -----
alpha=0.2; % Randomness 0--1 (highly random)
gamma=1.0; % Absorption coefficient
delta=0.97; % Randomness reduction
% -----
% diamorfwsh plegmatos
Ngrid=100;
dx=(range(2)-range(1))/Ngrid;
dy=(range(4)-range(3))/Ngrid;
[x,y]=meshgrid(range(1):dx:range(2),...
               range(3):dy:range(4));
z=f(x,y);
% -----
% arxikes times gia tis fireflies
[xn,yn,Lightn]=init_ffa(n,range);
% deixnei thn troxia twn fireflies
figure(2);
%%%%%%%% epanalhpseis sumfwna me do8en
for i=1:MaxGeneration, %%%%%%%%% arxh epanalhpshs
% deixnei contour
contour(x,y,z,15); hold on;
% upologismos newn lusewn
zn=f(xn,yn);
% ba8mologhsh twn fireflies sumfwna me thn entash tou fwtos
[Lightn,Index]=sort(zn);
xn=xn(Index); yn=yn(Index);
xo=xn; yo=yn; Lighto=Lightn;
% shmeiwsh troxias twn fireflies
plot(xn,yn,'.','markersize',10,'markerfacecolor','g');
title('Χαρτογράφηση πορείας πυγολαμπίδων');
xlabel('ποσότητα ενέργειας κάθε ανεμογεννήτριας');
ylabel('ταχύτητα ανεμογεννήτριας');
% metakinsh olwn twn pugolampidwn se kallhterh topo8esia
[xn,yn]=ffa_move(xn,yn,Lightn,xo,yo,Lighto,alpha,gamma,range);
drawnow;

```

```

% Use "hold on" to show the paths of fireflies
    hold on;
% meiwsh tuxaiothtas me tis epanalhpseis
alpha=newalpha(alpha,delta);
megisto_ka8e_epanalhpshs_f=Lighto(n-1);
b(i)=megisto_ka8e_epanalhpshs_f;
end %%%%%%%%% telos epanalhpsewn
disp('Πίνακας με τη δεύτερη μικρότερη τιμή για κάθε επανάληψη');
c=1./b;
c' %ta megista ka8e epanalhpshs
length(b)
disp('βέλτιστη ενέργεια');
best(:,1)=xo';
disp('βέλτιστη ταχύτητα');
best(:,2)=yo';
disp('βέλτιστη τιμή αντικειμενικής συνάρτησης');
best(:,3)=(1./Lighto');
bestc=best(:,3);
besta=best(:,1);
bestb=best(:,2);
global k;
k=1:1:MaxGeneration; %ena ena o ari8mos ka8e epanalhpshs

% ----- uposunarthseis -----
% arxikh 8esh pugolampidwn
function [xn,yn,Lightn]=init_ffa(n,range)
xrange=range(2)-range(1);
yrange=range(4)-range(3);
xn=rand(1,n)*xrange+range(1);
yn=rand(1,n)*yrange+range(3);

Lightn=zeros(size(yn));

% metakinshsh olwn twn pugolampidwn pros tis fwteinoteres
function [xn,yn]=ffa_move(xn,yn,Lightn,xo,yo,...
    Lighto,alpha,gamma,range)
ni=size(yn,2); nj=size(yo,2);
for i=1:ni,
% elkustikothta beta=exp(-gamma*r)
    for j=1:nj,
r=sqrt((xn(i)-xo(j))^2+(yn(i)-yo(j))^2);

```

```

if Lightn(i)<Lighto(j), % pio lamperh ara kai pio elkustikh
beta0=1; beta=beta0*exp(-gamma*r.^2);
xn(i)=xn(i).*(1-beta)+xo(j).*beta+alpha.*(rand-0.5);
yn(i)=yn(i).*(1-beta)+yo(j).*beta+alpha.*(rand-0.5);
end
end % end for j
end % end for i
[xn,yn]=findrange(xn,yn,range);

```

```

% meiwsh tuxaiothtas me tis epanalhpseis
function alpha=newalpha(alpha,delta)
alpha=alpha*delta;

```

```

% elegxos oriwn
function [xn,yn]=findrange(xn,yn,range)
for i=1:length(yn),
if xn(i)<=range(1), xn(i)=range(1); end
if xn(i)>=range(2), xn(i)=range(2); end
if yn(i)<=range(3), yn(i)=range(3); end
if yn(i)>=range(4), yn(i)=range(4); end
end

```

```

function edit1_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function edit1_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

function edit2_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

% --- Executes during object creation, after setting all properties.

```

```

function edit2_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```

```

% --- Executes on button press in sxhma_deuterhs.
function pushbutton2_Callback(hObject, eventdata, handles)
axes(handles.axes2)
global k;
global c;
plot(k,c,'r*');
title('Δεύτερη πιο μικρή τιμή ανά τις επαναλήψεις');
xlabel('επαναλήψεις');
ylabel('δεύτερη πιο μικρή τιμή')

```

```

% --- Executes on button press in clear_deuterou.
function pushbutton3_Callback(hObject, eventdata, handles)
cla(handles.axes2,'reset')
guidata(hObject,handles);

```

```

% --- Executes on button press in sxhma_antikeimenikhs.
function pushbutton4_Callback(hObject, eventdata, handles)
global x;
global y;
global z;
axes(handles.axes1)
surf(x,y,z);

```

```

% --- Executes on button press in clear_antikeimenikhs.
function pushbutton5_Callback(hObject, eventdata, handles)
cla(handles.axes1,'reset')
guidata(hObject,handles);

```

```

% --- Executes on button press in reset.
function pushbutton7_Callback(hObject, eventdata, handles)
cla(handles.axes2,'reset')
cla(handles.axes1,'reset')

```

```
set(handles.edit1,'String',num2str(0))  
set(handles.edit2,'String',num2str(0))
```

```
guidata(hObject,handles);
```

```
function edit5_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
% --- Executes during object creation, after setting all properties.
```

```
function edit5_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
```

```
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))  
    set(hObject,'BackgroundColor','white');  
end
```

```
% --- Executes on button press in veltistes times.
```

```
function pushbutton6_Callback(hObject, eventdata, handles)
```

```
global besta;
```

```
global bestb;
```

```
global bestc;
```

```
olikos=[besta bestb bestc];
```

```
f = figure;
```

```
cname={'Ισχύς','Ταχύτητα','αντικειμενική συνάρτηση'};
```

```
t = uitable('Parent',f,'Data',olikos,'ColumnName',cname,'Position',[0 0 300 800]);
```

**ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- [1] D. M. Greig. Optimisation, chapter 3-4. Longman Inc., New York, USA, 1980.
- [2] T. Back, D. B. Fogel and T. Michalewicz. Basic Algorithms and Operators, vol.1 of Evolutionary Optimization. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1999.
- [3] T. Back, D. B. Fogel and T. Michalewicz. Advanced Algorithms and Operators, vol.2 of Evolutionary Optimization. Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1999.
- [4] L. J. Fogel and D. B. Fogel. Artificial Intelligence through Evolutionary Programming. Final Report Contract PO-9-X56-1102C-1, US Army Research Institute, 1986.
- [5] R. C. Eberhart, P. Simpson and R. Dobbins. Computational Intelligence PC Tools. Academic Press Professional, 1996.
- [6] J. Kennedy. The Particle Swarm: Social Adaptation of Knowledge. In Proceedings of the International Conference on Evolutionary Computation, USA, 1997.
- [7] S.A. Grady, M. Y. Hussaini, M. M. Abdullah. Placement of wind turbines using genetic algorithms, technical note. ELSEVIER, 2004.
- [8] U. Aytum Ozturk, Bryan A. Norman. Heuristic methods for wind energy conversion system positioning. ELSEVIER, 2003.
- [9] A. K. Akella, M. P Sharma, R. P. Saini. Optimum utilization of renewable energy sources in a remote area. ELSEVIER, 2005.
- [10] Xin – She Yang. Nature – Inspired Metaheuristic Algorithms. Luniver Press, 2010.
- [11] Xin-She Yang and Xingshi He. Firefly Algorithm: Recent Advances and Applications. Int. J. Swarm Intelligence, 2013
- [12] Xin-She Yang. Cuckoo Search and Firefly Algorithm. Springer, 2014
- [13] Xin-She Yang. Firefly algorithm for multimodal optimization. Stochastic Algorithms: Foundation and Application, 5th, 2009.
- [14] Karel Durkota. Implementation of a discrete firefly algorithm for the QAP problem within the seage framework. Bachelor thesis, 2011
- [15] Michal Smith. Simple Firefly Synchronization. PhD thesis, University of Daleware, 2008.



- [16] <http://www.physics4u.gr>
- [17] <http://www.cres.gr>
- [18] <http://energotech.gr>
- [19] <http://www.saintpaul.gr>
- [20] <http://www.greanpeace.org>
- [21] <http://climate.wwf.gr>
- [22] <http://www.energia.gr>
- [23] <http://kpe-kastor.kas.sch.gr>
- [24] [http://www.scholarpedia.org/article/Metaheuristic\\_Optimization](http://www.scholarpedia.org/article/Metaheuristic_Optimization)
- [25] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/207935/firefly>
- [26] <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/207935/firefly>