

ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
&  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ



Διπλωματική Εργασία

---

Βελτιστοποίηση σχεδιασμού φωτοβολταϊκού συστήματος με  
χρήση παράλληλης επεξεργασίας

---

Χαράλαμπος Παράβαλος

Εξεταστική Επιτροπή:

Σαμολαδάς Β., Επίκουρος Καθηγητής (επιβλέπων)

Κουτρούλης Ευτ., Επίκουρος Καθηγητής

Πνευματικάτος Δ., Καθηγητής



# Περίληψη

Σε αυτή την εργασία υλοποιήθηκε μια μέθοδος για την εύρεση του βέλτιστου σχεδιασμού Φωτοβολταϊκών (Φ/Β) πάρκων μεγάλης κλίμακας που διασυνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο. Η βέλτιστοποίηση γίνεται με στόχο να ελαχιστοποιηθεί το οικονομικό κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Το μοντέλο του Φ/Β συστήματος που χρησιμοποιήθηκε προσομοιώνει τη λειτουργία για ένα έτος ενός συγκεκριμένου τρόπου τοποθέτησης των φωτοβολταϊκών στοιχείων και υπολογίζει τον οικονομικό συντελεστή (οικονομικό κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας) για την περίοδο του έτους για τον συγκεκριμένο τρόπο τοποθέτησης. Η προσομοίωση γίνεται με πραγματικές μετρήσεις ανά λεπτό από την περιοχή των Χανίων. Τυπικά, στις μελέτες για την κατασκευή Φ/Β συστημάτων, χρησιμοποιούνται μέσες ωριαίες τιμές ακτινοβολίας και θερμοκρασίας για την πρόβλεψη της παραγόμενης ενέργειας του συστήματος. Όμως, για να μπορούμε να εκτιμήσουμε ακριβέστερα την παραγόμενη ενέργεια, απαιτείται μεγαλύτερη ακρίβεια στην προσομοίωση, για αυτό και στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε μέσες τιμές ανά λεπτό με χρονικό βήμα προσομοίωσης το 1 λεπτό. Όμως, για την προσομοίωση με δεδομένα ανά λεπτό απαιτείται πολύ περισσότερος χρόνος για τους υπολογισμούς του μαθηματικού μοντέλου, και σε συμβατικό υπολογιστή δεν είναι εφικτό να υλοποιηθεί και να εκτελεστεί η διαδικασία βελτιστοποίησης. Για αυτό, είναι απαραίτητη η χρήση ενός συστήματος παράλληλης επεξεργασίας.

Για την εύρεση της βέλτιστης λύσης χρησιμοποιούνται εξελικτικοί αλγόριθμοι, διότι ο χώρος λύσεων του προβλήματος αυτού είναι μεγάλος και ανομοιόμορφος και με συμβατικές μεθόδους αναζήτησης δεν είναι εφικτή η βελτιστοποίηση του Φ/Β συστήματος.

Σε αυτή την εργασία υλοποιήθηκαν κατανεμημένοι Γενετικοί Αλγόριθμοι για την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Για την εκτέλεση χρησιμοποιήθηκε ο υπολογιστής πλέγματος του Πολυτεχνείου Κρήτης και για την διαδιεργασιακή επικοινωνία μεταξύ των υπολογιστικών μονάδων χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη OpenMPI.

Λέξεις Κλειδιά: photovoltaic systems, grid computing, parallel genetic algorithms, renewable energy sources, solar energy, large PV-plant optimisation



# Περιεχόμενα

<b>1 Φωτοβολταϊκά Συστήματα Συνδεδεμένα στο Ηλεκτρικό Δίκτυο</b>	<b>7</b>
1.1 Γιατί να εκμεταλευτούμε την ηλιακή ακτινοβολία . . . . .	7
1.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα μεγάλης κλίμακας . . . . .	7
1.3 Περιγραφή φωτοβολταϊκών συστημάτων . . . . .	8
1.3.1 Γενικά . . . . .	8
1.3.2 Φ/Β Πλαίσια (PV-Modules) . . . . .	8
1.3.3 Φ/Β Συστοιχίες (PV-Arrays) . . . . .	9
1.3.4 Μετατροπείς Ισχύος DC/AC (Solar Inverters) . . . . .	9
1.3.5 Χωροθέτηση Φ/Β συστοιχιών - Παράμετροι πεδίου εγκατάστασης . . . . .	10
1.4 Βελτιστοποίηση σχεδίασης Φ/Β συστήματος . . . . .	11
<b>2 Το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού κόστους ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας</b>	<b>15</b>
2.1 Εισαγωγή . . . . .	15
2.2 Αναλυτική περιγραφή κάθε μαθηματικού μοντέλου . . . . .	16
2.2.1 Μοντέλο υπολογισμού προσπίπουσας ηλιακής ακτινοβολίας . . . . .	16
2.2.2 Μοντέλο υπολογισμού περιοχής σκίασης . . . . .	19
2.2.3 Μοντέλο υπολογισμού παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β πλαίσια . . . . .	21
2.2.4 Μοντέλο υπολογισμών λειτουργίας των μετατροπέων DC/AC . . . . .	24
2.2.5 Μοντέλο υπολογισμού παραμέτρων πεδίου εγκατάστασης . . . . .	26
2.2.6 Καλωδίωση μονάδων Φ/Β πάρκου . . . . .	30
2.2.7 Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας Φ/Β πάρκου . . . . .	32
2.2.8 Υπολογισμός κόστους ανά μονάδα ενέργειας . . . . .	35
2.3 Σύνοψη . . . . .	40
<b>3 Παράλληλα συστήματα επεξεργασίας</b>	<b>43</b>
3.1 Υπολογιστές Πλέγματος (Grid Computing) . . . . .	43
3.2 Αρχιτεκτονικές συστημάτων παράλληλης επεξεργασίας . . . . .	45
3.3 Ο υπολογιστής πλέγματος του Πολυτεχνείου Κρήτης . . . . .	46
<b>4 Γενετικοί Αλγόριθμοι</b>	<b>47</b>
4.1 Γενικά . . . . .	47
4.2 Διαδικασία Επιλογής (Selection) . . . . .	49

4.3	Διαδικασία Διασταύρωσης (Crossover) . . . . .	50
4.4	Διαδικασία Μετάλαξης (Mutation) . . . . .	51
4.5	Προαγωγή του καλύτερου (Elitism) . . . . .	52
4.6	Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι . . . . .	52
4.6.1	Γενικά . . . . .	52
4.6.2	Master-Slave παραλληλοποίηση . . . . .	52
4.6.3	Στατικοί Υποπληθυσμοί με μετανάστευση . . . . .	53
4.6.4	Στατικοί υπερκαλυπτόμενοι υποπληθυσμοί χωρίς μετανάστευση . . . . .	53
4.6.5	Μαζικά παράλληλοι γενετικοί αλγόριθμοι . . . . .	54
4.6.6	Δυναμικοί υποπληθυσμοί . . . . .	54
4.6.7	Άλλα είδη παράλληλων γενετικών αλγορίθμων . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Εφαρμογή παράλληλης επεξεργασίας και εξελικτικών αλγορίθμων στο σχεδιασμό Φ/Β συστημάτων μεγάλης κλίμακας</b>	<b>55</b>
5.1	Περιγραφή του προβλήματος προς βελτιστοποίηση . . . . .	56
5.2	Master-Slave Παράλληλος Γενετικός Αλγόριθμος . . . . .	57
5.3	Αλγόριθμος Δυναμικών Πληθυσμών . . . . .	60
<b>6</b>	<b>Αποτελέσματα-Παρατηρήσεις</b>	<b>69</b>
6.1	Δεδομένα εισόδου . . . . .	69
6.2	Ανάλυση βέλτιστων λύσεων . . . . .	71
6.2.1	Αποτελέσματα προσομοίωσης ανά ώρα . . . . .	72
6.2.2	Αποτελέσματα προσομοίωσης ανά λεπτό . . . . .	74
6.2.3	Σύγκριση αποτελεσμάτων με δεδομένα ωριαίου χρονικού βήματος και δεδομένα ανά λεπτό . . . . .	79
6.3	Χρόνοι εκτέλεσης - Επιτάχυνση . . . . .	81
6.4	Αξιοποίηση διαθέσιμων πόρων . . . . .	82
6.5	Βελτιστοποίηση για διαφορετικές τιμές στην ισχύ αιχμής του Φ/Β πάρκου . . . . .	84
<b>7</b>	<b>Συμπεράσματα - μελλοντική δουλειά</b>	<b>89</b>

# Κεφάλαιο 1

## Φωτοβολταϊκά Συστήματα Συνδεδεμένα στο Ηλεκτρικό Δίκτυο

---

### 1.1 Γιατί να εκμεταλευτούμε την ηλιακή ακτινοβολία

Με την πάροδο των χρόνων οι τεχνολογικές ανακαλύψεις και η αύξηση του πληθυσμού στη Γη έχουν οδηγήσει σε μία υψηλή ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια ανά τον κόσμο. Σε συνδυασμό με την συνεχή αύξηση της τιμής του πετρελαίου αλλά και την μόλυνση του περιβάλλοντος που προκαλείται από την καύση υδρογονανθράκων, η ανάγκη για εναλλακτικές πηγές ενέργειας, οικονομικές και φιλικές προς το περιβάλλον είναι επιτακτική. Γι' αυτό το λόγο, έχει αναπτυχθεί και χρησιμοποιείται ευρέως ανά τον κόσμο η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον ήλιο. Μεγάλα φωτοβολταϊκά πάρκα παράγουν ηλεκτρική ενέργεια και την προωθούν στο ηλεκτρικό δίκτυο. Στην Ελλάδα, η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών πάρκων έχει αυξηθεί τα τελευταία χρόνια, και υπάρχουν προοπτικές για ακόμη μεγαλύτερη εκμετάλλευση της, υψηλής σε ένταση στη χώρα μας, ηλιακής ακτινοβολίας.

### 1.2 Φωτοβολταϊκά συστήματα μεγάλης κλίμακας

Τα φωτοβολταϊκά συστήματα μεγάλης κλίμακας συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο, δίνουν ισχύ που κυμαίνεται από εκατοντάδες kW έως πολλά MW (πχ. 10MW ή περισσότερα). Η ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας εξαρτάται τόσο από τις μετεωρολογικές συνθήκες, όσο και από τον στιγμιαίο φόρτο του ηλεκτρικού δικτύου. Γι' αυτό, συχνά υπάρχει περίσσια ενέργειας (το σύστημα παράγει περισσότερο απ' ότι ζητά το δίκτυο) η οποία απορρίπτεται (energy rejections). Επίσης, εάν συνδέουμε στο ηλεκτρικό δίκτυο μεγάλο αριθμό από Φ/Β συστήματα μεγάλης κλίμακας, αυτά μπορεί να προκαλέσουν διακυμάνσεις στην τάση του δυκτίου.

Στο παρελθόν, τα φωτοβολταϊκά συστήματα συνήθως ήταν μικρά σε έκταση και ισχύ αιχμής (< 1MW), αλλά τα τελευταία χρόνια, τα μεγάλης κλίμακας Φ/Β συστήματα γίνονται ελκυστικά για τους επενδυτές λόγω της ραγδαίας μείωσης στο κόστος των τεχνολογικών εξαρτημάτων για την παραγωγή ηλιακής ενέργειας, αλλά και λόγω του αυξανόμενου κόστους των ορυκτών και σίμων.

## 1.3 Περιγραφή φωτοβολταϊκών συστημάτων

### 1.3.1 Γενικά

Ένα φωτοβολταϊκό σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο, αποτελείται από διάφορα συστατικά στοιχεία και υποσυστήματα.

**Φωτοβολταϊκά Πλαίσια (PV-Module):** Είναι το βασικό δομικό στοιχείο ενός Φ/Β συστήματος. Κάθε πλαίσιο αποτελείται από πολλά Φ/Β στοιχεία (Solar cell) και παράγει μια συγκεκριμένη τιμή τάσης. Κάθε Φ/Β πλαίσιο χαρακτηρίζεται από την τάση που παράγει κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας, και τον συντελεστή απόδοσης, ο οποίος είναι ο λόγος της παραγόμενης ενέργειας προς την συνολική (ηλιακή) ενέργεια που προσπίπτει στο στοιχείο.

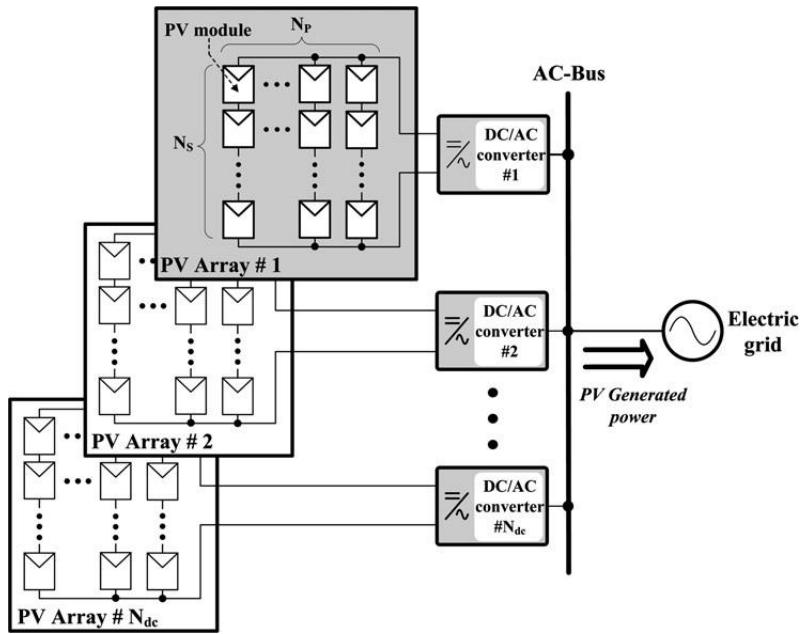
**Φωτοβολταϊκή Συστοιχία (PV-Array):** Μια φωτοβολταϊκή συστοιχία αποτελείται από πολλά Φ/Β πλαίσια. Συνήθως αποτελείται από πολλές παράλληλα συνδεδεμένες σειρές Φ/Β πλαίσιων.

**Μετατροπείς Ισχύος DC/AC(Solar Inverters):** Ο μετατροπέας ισχύος DC/AC είναι απαραίτητος στα Φ/Β συστήματα και η λειτουργία του είναι να μετατρέψει την συνεχή τάση που παράγει μια Φ/Β συστοιχία σε εναλλασσόμενη, ώστε να προωθήσει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Το διάγραμμα ενός φωτοβολταϊκού συστήματος διασυνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.1. Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται από φωτοβολταϊκές συστοιχίες (PV-arrays) και κάθε συστοιχία συνδέεται σε έναν μετατροπέα DC/AC ο οποίος μετατρέπει τη συνεχή τάση σε εναλλασσόμενη. Η προσθήκη μετατροπέα DC/AC είναι απαραίτητη, μιας και το σύστημα παράγει συνεχή τάση, ενώ το ηλεκτρικό δίκτυο λειτουργεί με εναλλασσόμενη τάση. Κάθε Φ/Β συστοιχία αποτελείται από  $N_p$  σειρές συνδεδεμένες παράλληλα και κάθε σειρά αποτελείται από  $N_s$  Φ/Β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια εξαρτάται τόσο από τις μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής που είναι εγκατεστημένο το Φ/Β σύστημα, όσο και από την αποδοτικότητα των Φ/Β πλαισίων και των μετατροπέων DC/AC. Επίσης, πολύ σημαντικό ρόλο παίζει και η γωνία κλίσης που θα εγκατασταθούν οι συστοιχίες (για Φ/Β συστήματα χωρίς sun-trackers).

### 1.3.2 Φ/Β Πλαίσια (PV-Modules)

Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια είναι το βασικότερο δομικό στοιχείο μετατροπής της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας σε ηλεκτρική. Ένα Φ/Β πλαίσιο αποτελείται από ημιαγωγικά, φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα οποία όταν προσπίπτει η ηλιακή ακτινοβολία, αναπτύσσουν τάση στα άκρα τους. Το μέγεθος της τάσης και του ρεύματος που παράγονται εξαρτώνται από την ένταση της προσπίπτουσας

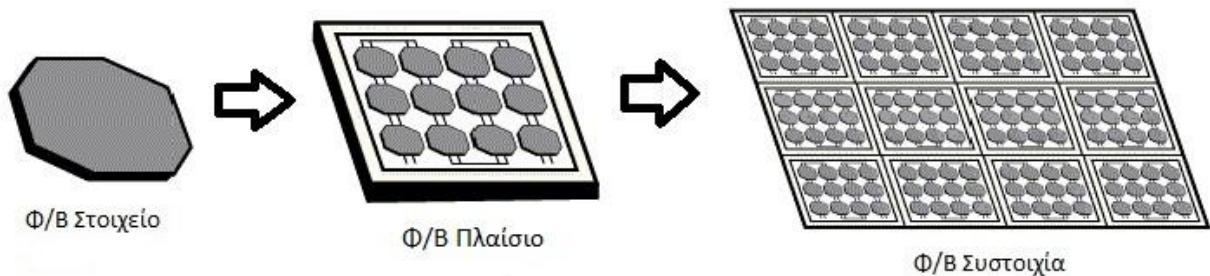


Σχήμα 1.1: Γενική μορφή φωτοβολταϊκού συστήματος διασυνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο

ηλιακής ακτινοβολίας και από τον συντελεστή απόδοσης του Φ/Β στοιχείου. Ο συντελεστής απόδοσης εξαρτάται από το υλικό που είναι κατασκευασμένο το Φ/Β πλαίσιο.

### 1.3.3 Φ/Β Συστοιχίες (PV-Arrays)

Οι Φ/Β Συστοιχίες αποτελούνται από Φ/Β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά, διότι η τάση που παράγει το κάθε πλαίσιο είναι μικρή. Με αυτό τον τρόπο διάταξης, μια Φ/Β συστοιχία παράγει υψηλή τάση σε μία έξοδο, την οποία μπορούμε να αξιοποιήσουμε πρακτικά. Επειδή η Φ/Β συστοιχία παράγει συνεχές ρεύμα, για την μεταφορά της ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο είναι απαραίτητη η προσθήκη μετατροπέα τάσης DC/AC στην έξοδο της συστοιχίας. Ένα Φ/Β σύστημα διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό συνήθως αποτελείται από πολλές Φ/Β συστοιχίες και όλες συνεισφέρουν την παραγόμενη ενέργεια στο ηλεκτρικό δίκτυο.



Σχήμα 1.2: Από το Φ/Β στοιχείο στη Φ/Β συστοιχία

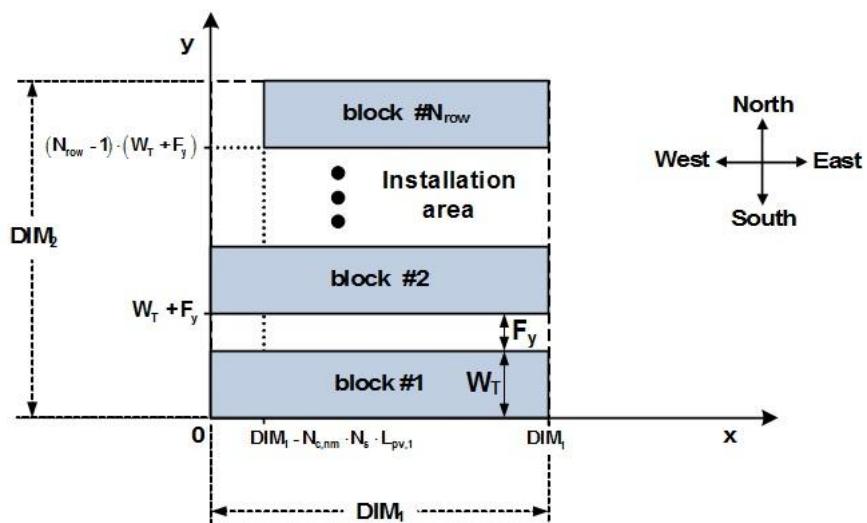
### 1.3.4 Μετατροπείς Ισχύος DC/AC (Solar Inverters)

Ο μετατροπέας ισχύος DC/AC είναι το δομικό στοιχείο που μετατρέπει το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο με σκοπό να μεταβιβάσει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια του Φ/Β πάρκου στο

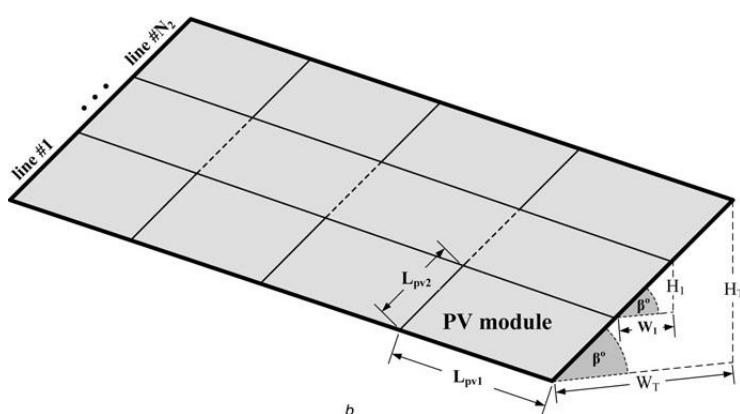
ηλεκτρικό δίκτυο. Κάθε μετατροπέας συνδέεται σε μια Φ/Β συστοιχία και δέχεται σαν είσοδο συνεχές ρεύμα. Υπάρχουν αρκετοί τύποι μετατροπέων DC/AC που μπορούν να χρησιμοποιηθούν που υλοποιούν διάφορες τεχνικές για βελτίωση της απόδοσης της λειτουργίας τους. Στη μελέτη αυτή χρησιμοποιούνται μετατροπέις ισχύος με δυνατότητα Maximum Power Point Tracking (MPPT). Αυτοί οι μετατροπέις μπορούν να λάβουν την μέγιστη δυνατή ισχύ από το Φ/Β σύστημα.

### 1.3.5 Χωροθέτηση Φ/Β συστοιχιών - Παράμετροι πεδίου εγκατάστασης

Στο μοντέλο υπολογισμού που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι η περιοχή εγκατάστασης έχει ορθογώνιο σχήμα, στραμμένη προς τον νότο και είναι επίπεδη. Τα φωτοβολταϊκά πλαίσια τοποθετούνται σε αυτή την περιοχή χωρισμένα σε γραμμές. Κάθε γραμμή αποτελείται από Φ/Β συστοιχίες συνδεδεμένες σε μετατροπέις ισχύος DC/AC. Στο Σχήμα 1.3 βλέπουμε πώς χωροθετούνται οι γραμμές στην διαθέσιμη έκταση ενώ στο Σχήμα 1.4 παρουσιάζεται η διάταξη της κάθε γραμμής.

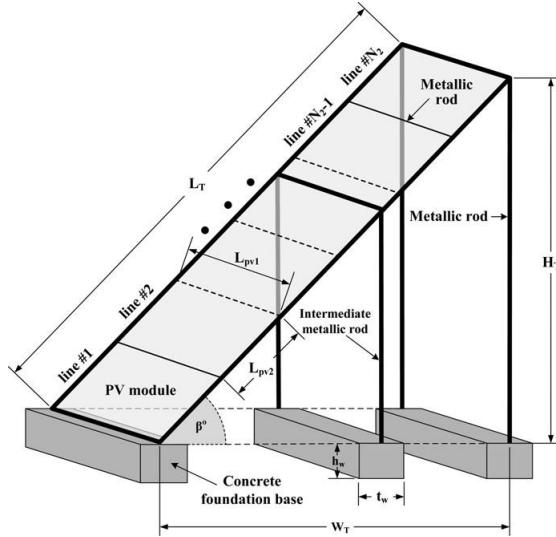


Σχήμα 1.3: Περιοχή πεδίου εγκατάστασης Φ/Β πάρκου



Σχήμα 1.4: Διάταξη γραμμής του Φ/Β πάρκου

Ακόμη, στο μοντέλο λαμβάνουμε υπόψιν τις μεταλλικές ράβδους που είναι απαραίτητες για την στήριξη των Φ/Β πλαισίων, μιας και πρέπει να υπολογιστούν για να εκτιμήσουμε σωστά το οικονομικό κόστος της κατασκευής. Το μοντέλο υπολογίζει το συνολικό μήκος των μεταλλικών εξαρτημάτων που χρειάζονται στην κατασκευή για να εκτιμήσει το κόστος, το οποίο επηρεάζεται και από τις τοπικές οικονομικές παραμέτρους. Στο Σχήμα 1.5 βλέπουμε πώς χρησιμοποιούμε τις μεταλλικές ράβδους στην κατασκευή του πάρκου.



Σχήμα 1.5: Διάγραμμα των δομικών μονάδων που χρησιμοποιούνται για την στήριξη της κάθε γραμμής του Φ/Β πάρκου

## 1.4 Βελτιστοποίηση σχεδίασης Φ/Β συστήματος

Κατά την σχεδίαση ενός Φ/Β συστήματος είναι πολλοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Στόχος της βέλτιστης κατασκευής του Φ/Β συστήματος είναι η μεγιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας [ $E_{tot}(MW)$ ] και η ελαχιστοποίηση του οικονομικού κόστους της κατασκευής [Cost(Euros)]. Αυτά τα δύο μεγέθη ορίζουν το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας [ $LCOE(Euro/MW)$ ] και είναι το μέγεθος το οποίο πρέπει να ελαχιστοποιήσουμε για να θεωρηθεί η Φ/Β εγκατάσταση οικονομικά βέλτιστη:

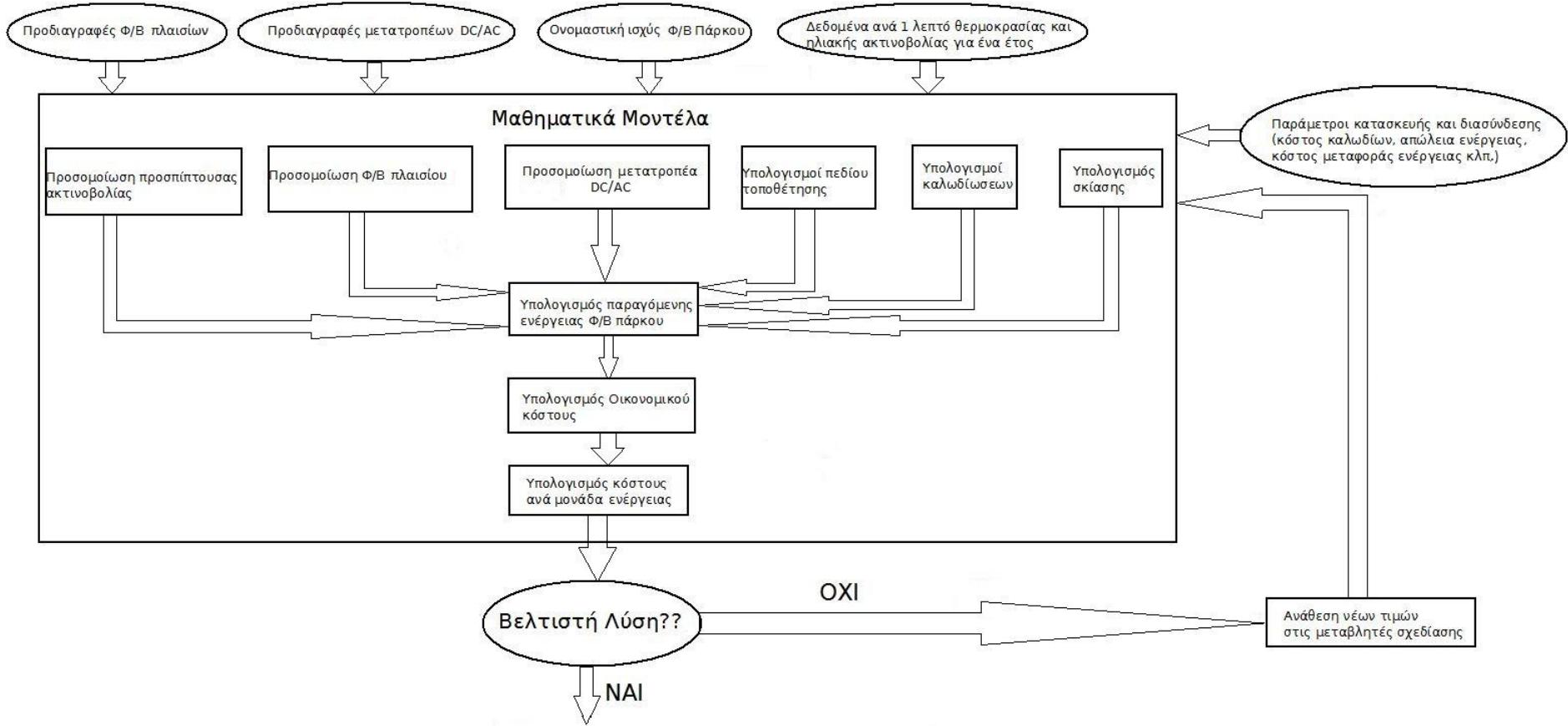
$$LCOE = \frac{Cost}{E_{tot}} \quad (1.1)$$

Κατά την σχεδίαση, πρέπει να ληφθούν υπόψη όλοι οι παράγοντες που επηρεάζουν την Εξίσωση 1.1. Ο αριθμός και ο τύπος των Φ/Β στοιχείων, ο αριθμός και ο τύπος των μετατροπέων, η γωνία κλίσης, η επιλογή συστατικών του συστήματος όπως τα καλώδια της γραμμής μεταφοράς, τα μεταλλικά εξαρτήματα και ο τρόπος που θα τοποθετηθούν τα Φ/Β πλαίσια στο Φ/Β πάρκο είναι μερικοί από τους παράγοντες που πρέπει να λάβουμε υπόψη. Επίσης, πρέπει να ληφθούν υπόψη και οικονομικοί παράγοντες οι οποίοι διαφέρουν από χώρα σε χώρα, όπως το κόστος των εξαρτημάτων, ο πληθωρισμός κλπ. Το μαθηματικό μοντέλο στο [1] λαμβάνει υπόψη του αυτούς τους

παράγοντες καθώς και άλλους παράγοντες που επηρεάζουν την σχεδίαση. Στο επόμενο κεφάλαιο θα εξηγήσουμε το μαθηματικό μοντέλο το οποίο υπολογίζει το κόστος ανά ενεργειακή μονάδα για κάθε διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα.

Η διαδικασία βελτιστοποίησης εκτελεί τους υπολογισμούς των μαθηματικών μοντέλων για ένα συγκεκριμένο τρόπο τοποθέτησης και αναζητά διάφορους συνδυασμούς κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης του αλγορίθμου. Στο Σχήμα 1.6 φαίνεται το διάγραμμα ροής της διαδικασίας βελτιστοποίησης που προτείνουμε. Η διαδικασία βελτιστοποίησης δέχεται στην είσοδό της τις προδιαγραφές των Φ/Β στοιχείων και των μετατροπέων DC/AC, την ονομαστική ισχύ αιχμής του Φ/Β πάρκου, τα δεδομένα θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας, καθώς και τις παραμέτρους που αφορούν την κατασκευή και την διασύνδεση του Φ/Β πάρκου (κόστη καλωδίων, απώλειες κλπ.) Έπειτα ξεκινά η διαδικασία της βελτιστοποίησης, εκτελώντας για κάποια συγκεκριμένη διάταξη τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούμε. Αφού η αξιολόγηση της συγκεκριμένης διάταξης ολοκληρωθεί, επαναλαμβάνουμε την διαδικασία μέχρι να βρεθεί η βέλτιστη διάταξη των μονάδων του Φ/Β πάρκου.

Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφηκε η βασική δομή ενός Φ/Β συστήματος μεγάλης κλίμακας διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο, καθώς και τα βασικά επιμέρους στοιχεία που το αποτελούν. Στο Κεφάλαιο 2 θα αναλύσουμε τα μαθηματικά μοντέλα που χρησιμοποιούμε για να αξιολογήσουμε ένα συγκεκριμένο τρόπο διάταξης των Φ/Β πλαισίων. Στο Κεφάλαιο 3 παρουσιάζονται πληροφορίες για τα συστήματα παράλληλης επεξεργασίας και στο Κεφάλαιο 4 παρατίθεται η βασική θεωρία σχετικά με τους γενετικούς αλγόριθμους. Στο Κεφάλαιο 5 αναλύουμε και εξηγούμε πως χρησιμοποιήσαμε τους γενετικούς αλγορίθμους και τον υπολογιστή πλέγματος ώστε να υλοποιήσουμε την διαδικασία βελτιστοποίησης που περιγράφηκε. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης καθώς και σχόλια σχετικά με την διαδικασία.



Σχήμα 1.6: Διαδικασία βελτιστοποίησης του σχεδιασμού ενός Φ/Β πάρκου



# Κεφάλαιο 2

## Το μαθηματικό μοντέλο υπολογισμού κόστους ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας

---

### 2.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία, για τον υπολογισμό του κόστους ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας ενός συγκεκριμένου τρόπου διάταξης των Φ/Β στοιχείων, χρησιμοποιούνται τα εξής μαθηματικά μοντέλα:

- μοντέλο υπολογισμού της ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε Φ/Β πλαίσια οποιασδήποτε κλίσης
- μοντέλο υπολογισμού της περιοχής που υπάρχει σκίαση των Φ/Β συλλεκτών
- μοντέλο υπολογισμού του αριθμού των Φ/Β πλαισίων
- μοντέλο υπολογισμού του αριθμού των μετατροπέων ισχύος DC/AC
- μοντέλο υπολογισμού παραμέτρων του πεδίου εγκατάστασης
- μοντέλο υπολογισμού καλωδιώσεων του Φ/Β πάρκου
- μοντέλο υπολογισμού παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας
- άλλα συστατικά του Φ/Β συστήματος
- συνάρτηση κόστους
- αλγόριθμος βελτιστοποίησης

Στις επόμενες παραγράφους αυτού του κεφαλαίου περιγράφονται τα παραπάνω μοντέλα των επιμέρους στοιχείων που συνθέτουν το Φ/Β σύστημα.

## 2.2 Αναλυτική περιγραφή κάθε μαθηματικού μοντέλου

### 2.2.1 Μοντέλο υπολογισμού προσπίπουσας ηλιακής ακτινοβολίας

Στο Σχήμα 2.1 φαίνονται οι γωνίες από τις οποίες επηρεάζεται η λαμβανόμενη ηλιακή ακτινοβολία από τους συλλέκτες [2]. Οι γωνίες εκφράζουν τα εξής:

$\beta$  : η κλίση της Φ/Β συστοιχίας

$\alpha$  : η γωνία που σχηματίζει ο ήλιος με το οριζόντιο επίπεδο

$\theta$  : η γωνία που σχηματίζεται από τις προσπίπουσες ηλιακές ακτίνες και την ευθεία που είναι κάθετη στο επίπεδο του συλλέκτη

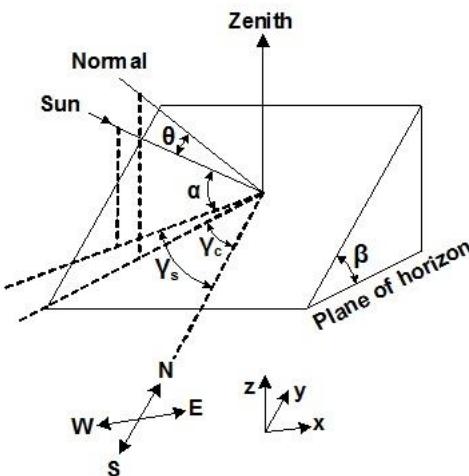
$\gamma_s$  : η ηλιακή αζιμούθια γωνία

$\gamma_c$  : η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη

$\phi$  : το γεωγραφικό πλάτος του συλλέκτη

$\delta$  : η γωνία απόκλισης

$\omega$  : η ωρολογιακή γωνία



Σχήμα 2.1: Γωνίες που επηρεάζουν το μέτρο της λαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από Φ/Β συλλέκτες τοποθετημένους σε κλίση  $\beta$ .

Η αζιμούθια γωνία εκφράζει την κατεύθυνση κατά την οποία είναι στραμμένος ο συλλέκτης. Κατά σύμβαση, η αζιμούθια γωνία  $0^\circ$  αντιστοιχεί σε κατεύθυνση προς το νότο και παίρνει θετικές τιμές σύμφωνα με την φορά του ρολογιού (άρα για αζιμούθια γωνία  $90^\circ$  έχουμε δυτικό προσανατολισμό, για  $-90^\circ$  ανατολικό, για  $180^\circ$  βόρειο κλπ). Οι σχέσεις μεταξύ των παραπάνω γωνιών είναι οι εξής:

$$\sin \alpha = \sin \phi \sin \delta + \cos \phi \cos \delta \cos \omega \quad (2.1)$$

$$\sin \gamma_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (2.2)$$

$$\cos \gamma_s = \frac{\sin \phi \cos \delta \cos \omega - \cos \phi \sin \delta}{\cos \alpha} \quad (2.3)$$

$$\cos \theta = \cos \beta \sin \alpha + \sin \beta \cos \alpha \cos \gamma \quad (2.4)$$

$$\gamma = \gamma_s - \gamma_c \quad (2.5)$$

$$\delta(^o) = 23.45^o \sin\left(\frac{360^o}{365^o}(d_n + 284)\right) \quad (2.6)$$

$$\omega(^o) = (t_s - 12)15 \quad (2.7)$$

$$t_s = t_c + \frac{\lambda - LSM}{15} + E - DT \quad (2.8)$$

$$E = 3.82(0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B) \quad (2.9)$$

$$B = 360 \frac{d_n - 1}{365} \quad (2.10)$$

$$LSM = GMT15^o \quad (2.11)$$

Στις παραπάνω εξισώσεις οφείλουμε να προσδιορίσουμε τις εξής μεταβλητές:

$LSM$  : το γεωγραφικό μήκος του τοπικού μεσημβρινού

$\lambda$  : το τοπικό γεωγραφικό πλάτος

$E$  : εξισωση υπολογισμού χρόνου

$d_n$  : αριθμός ημέρας του έτους

$DT$  : DT = 1 στα χρονικά διαστήματα που έχει αλλάξει η ώρα (daylight saving), αλλιώς DT = 0

$GMT$  : η τοπική ώρα με βάση την ώρα Greenwich

Για να χρησιμοποιήσουμε τις παραπάνω εξισώσεις, είναι απαραίτητο να μετατρέψουμε την τρέχουσα ώρα σε δεκαδική μορφή (πχ η ώρα 3:45 μμ θα είναι  $t_c = 15.75$ ). Αφού υπολογιστούν τα

παραπάνω μεγέθη, συνεχίζουμε τον υπολογισμό της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας. Ορίζουμε τις μεταβλητές:

$\theta_z$  : η γωνία ζενίθ. Ορίζεται ως η γωνία της κάθετης στο επίπεδο του εδάφους και της ευθείας του ήλιου με το επίπεδο.

$\omega_{sr}$  : η γωνία της ανατολής του ήλιου

$\omega_{ss}$  : η γωνία της δύσης του ήλιου

$\bar{G}_o$  : μέση εξωγήινη ηλιακή ακτινοβολία (average extraterrestrial horizontal radiation)

$G_{on}$  : κάθετη εξωγήινη ακτινοβολία (extraterrestrial normal radiation)

$G_{sc}$  : ηλιακή σταθερά =  $1.367 kW/m^2$

$\omega_1$  : ωριαία γωνία στην αρχή του χρονικού βήματος

$\omega_2$  : ωριαία γωνία στο τέλος του χρονικού βήματος

Οι παραπάνω παράμετροι σχετίζονται μεταξύ τους μέσω των παρακάτω εξισώσεων [2]:

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2.12)$$

$$\omega_{sr} = -\arccos(-\tan \delta \tan \phi) \quad (2.13)$$

$$\omega_{ss} = -\omega_{sr} \quad (2.14)$$

$$\bar{G}_o = \frac{12}{\pi} G_{on} \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \quad (2.15)$$

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 \cos \delta \left( \frac{360B}{365} \right) \right) \quad (2.16)$$

Η Εξισωση 2.15 μας δίνει την μέση τιμή της ποσότητας ηλιακής ακτινοβολίας που προσπίπτει σε οριζόντια επιφάνεια στο ανώτερο μέρος της ατμόσφαιρας σε οποιοδήποτε χρονικό βήμα της μοντελοποίησης. Ακόμη, ορίζουμε σαν δείκτη καθαρότητας (clearness index) της ατμόσφαιρας την μεταβλητή:

$$k_t = \frac{\bar{G}}{G_o} \quad (2.17)$$

όπου  $\bar{G}$  είναι η ολική ηλιακή ακτινοβολία που φτάνει στους συλλέκτες (global horizontal radiation). Ο δείκτης καθαρότητας παίρνει τιμές μεταξύ του 0 και του 1. Για την  $\bar{G}$ , που δίνουμε σαν είσοδο στην μοντελοποίηση, ισχύει η εξισωση:

$$\bar{G} = \bar{B} + \bar{D} \quad (2.18)$$

όπου:

$\bar{B}$  : απευθείας ακτινοβολία ( $kW/m^2$ )

$\bar{D}$  : διάχυτη ακτινοβολία ( $kW/m^2$ )

Προχωρώντας στην διαδικασία υπολογισμού της λαμβανόμενης ηλιακής ακτινοβολίας από τους συλλέκτες, υπολογίζουμε τους παρακάτω συντελεστές [3]:

$$f_d = \begin{cases} 1 - 0.09k_t & , k_t < 0.22 \\ 0.165 & , k_t > 0.8 \\ 0.9511 - 0.1604k_t + 4.338k_t^2 - 16.638k_t^3 + 12.336k_t^4 & , 0.22 \leq k_t \leq 0.88 \end{cases} \quad (2.19)$$

και:

$$R_b = \frac{\max(0, \cos \theta)}{\cos \theta_z} \quad (2.20)$$

Επίσης, τα  $\bar{B}$  και  $\bar{D}$ , υπολογίζονται ως εξής:

$$\bar{D} = f_d \bar{G} \quad (2.21)$$

$$\bar{B} = \bar{G} - \bar{D} \quad (2.22)$$

$$A_i = \frac{\bar{B}}{\bar{G}_o} \quad (2.23)$$

$$f = \sqrt{\frac{\bar{B}}{\bar{G}}} \quad (2.24)$$

Αν  $\omega_1 \leq \omega_{sr}$  ή  $\omega_2 \geq \omega_{ss}$  ή  $\bar{G} = 0$ , τότε η προσπίπτουσα ολική ηλιακή ακτινοβολία στους συλλέκτες,  $G(W/m^2)$  ισούται με 0. Διαφορετικά ισχύει ότι:

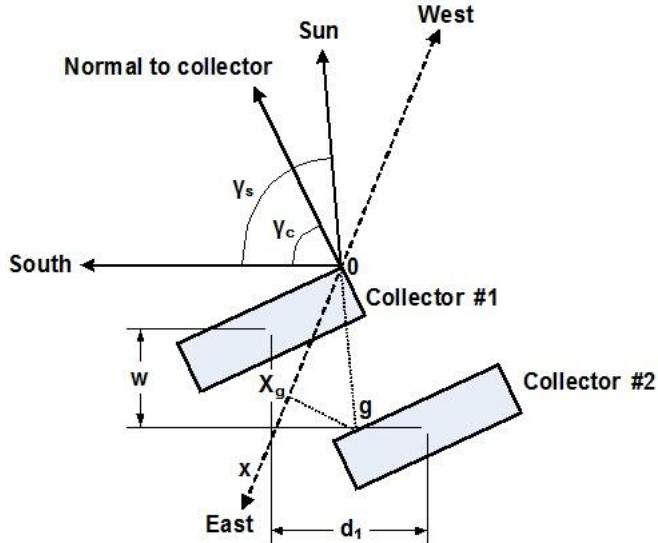
$$G(W/m^2) = (B + A_i D) R_b + (1 - A_i) D \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left( 1 + f \frac{\sin \beta}{2} \right) + \bar{G} \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.25)$$

Η μεταβλητή  $\rho$  ονομάζεται συντελεστής ανακλαστικότητας του εδάφους και η τιμή του εξαρτάται από τις συνθήκες που βρίσκεται το έδαφος του πεδίου εγκατάστασης. Αν δεν γνωρίζουμε τις συνθήκες αυτές, συνήθως θεωρούμε ότι  $\rho = 0.2$ .

## 2.2.2 Μοντέλο υπολογισμού περιοχής σκίασης

Έστω δύο ηλιακοί συλλέκτες που έχουν απόσταση μεταξύ τους ίση με  $d_1(m)$ , με κατεύθυνση βοράνότο, και μια απόσταση  $w(m)$  με κατεύθυνση ανατολή-δύση. Και οι δύο αποστάσεις εκφράζουν

την απόσταση μεταξύ του κέντρου των συλλεκτών των συλλέκτηών. Στο Σχήμα 2.2 φαίνεται πώς ο συλλέκτης #1 σκιάζει τμήμα του συλλέκτη #2.



Σχήμα 2.2: Θέση δυο ηλιακών συλλεκτών όπου ο συλλέκτης #1 σκιάζει τμήμα του συλλέκτη #2.

Το εμβαδόν της περιοχής σκίασης υπολογίζεται με τις παρακάτω εξισώσεις [4]:

$$A_s = u_{sh} v_{sh} \quad (2.26)$$

$$u_{sh} = \frac{Z_e}{\sin \beta} \quad (2.27)$$

$$v_{sh} = v - \frac{|X_g - w|}{\cos \gamma_c} \quad (2.28)$$

$$Z_e = u \sin(\beta(1 - \frac{d_1 + w \tan \gamma_c}{P_x \tan \gamma_c + P_y})) \quad (2.29)$$

$$X_g = P_x \frac{d_1 + w \tan \gamma_c}{P_x \tan \gamma_c + P_y} \quad (2.30)$$

$$P_x = u \cos \beta \sin \gamma_c + u \sin \gamma_s \cot \alpha \sin \beta \quad (2.31)$$

$$P_y = u \cos \beta \cos \gamma_c + u \cos \gamma_s \cot \alpha \sin \beta \quad (2.32)$$

όπου

$u_{sh}$  : ύψος σκίασης (m)

$v_{sh}$  : μήκος σκίασης (m)

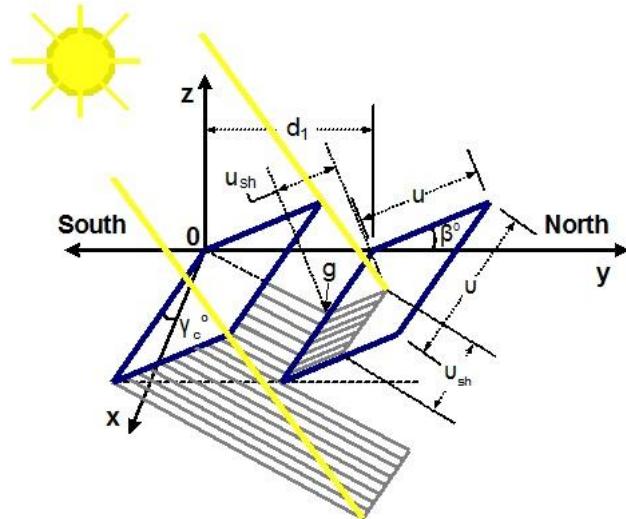
$X_g$  : συντεταγμένη κατά μήκος του άξονα  $x$  όπου ξεκινά η σκιά στον συλλέκτη #2

$u$  : διάσταση του συλλέκτη #1

$v$  : διάσταση του συλλέκτη #2

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι έγκυρες μόνο αν ισχύει  $u_{sh} \geq 0$  και  $v_{sh} \geq 0$ . Διαφορετικά, αν  $u_{sh} < 0$  ή  $v_{sh} < 0$ , τότε  $u_{sh} = 0, v_{sh} = 0, A_s = 0$ .

Η ειδική περίπτωση όπου δύο συλλέκτες είναι παράλληλοι με  $w = 0$  παρουσιάζεται στο Σχήμα 2.3.



Σχήμα 2.3: 2 παράλληλοι συλλέκτες με  $w = 0$  και η σκίαση που προκαλεί ο συλλέκτης #1 στον συλλέκτη #2

### 2.2.3 Μοντέλο υπολογισμού παραγόμενης ενέργειας από τα Φ/Β πλαίσια

Το υλικό κατασκευής των Φ/Β στοιχείων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη σύνθεση ενός Φ/Β πάρκου μπορεί να είναι μονοκρυσταλλικό πυρίτιο(Si), πολυκρυσταλλικό πυρίτιο ή άμορφο πυρίτιο. Ο τύπος Φ/Β πλαισίων που χρησιμοποιούνται είναι στην ευχέρεια του κατασκευαστή του Φ/Β πάρκου.

Η ισχύς που παράγει ένα Φ/Β στοιχείο σε λειτουργία Maximum Power Point (MPP) στο έτος  $y$  ( $1 \leq y \leq n$ ), την ημέρα  $d$  ( $1 \leq d \leq 365$ ) και ώρα  $t$  ( $1 \leq t \leq t_{max}$ ),  $P_M(y, d, t, \gamma_c, \beta)$  υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις προδιαγραφές του Φ/Β στοιχείου σε (Standard Test Conditions - STC) τις οποίες παρέχει ο κατασκευαστής του Φ/Β στοιχείου, καθώς και την θερμοκρασία του περιβάλλοντος στην περιοχή εγκατάστασης και την ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας. Ο υπολογισμός της παραγόμενης ισχύος γίνεται με βάση τις παρακάτω εξισώσεις [5]:

$$P_M(y, d, t, \gamma_c, \beta) = \frac{(1 - yr(y))(1 - df)V_{OC}(d, t, \gamma_c, \beta)I_{SC}(d, t, \gamma_c, \beta)FF(d, t, \gamma_c, \beta)}{1000} \quad (2.33)$$

$$I_{SC}(d, t, \gamma_c, \beta) = I_{SC,STC} + K_i(T_c(d, t) - 25) \frac{G(d, t, \gamma_c, \beta)}{1kW/m^2} \quad (2.34)$$

$$V_{OC}(d, t, \gamma_c, \beta) = V_{OC,STC} + K_v(T_c(d, t) - 25^\circ)(1 + \delta_i \ln \frac{G(d, t, \gamma_c, \beta)}{1kW/m^2}) \quad (2.35)$$

$$Tc(d, t, \gamma_c, \beta) = T_A(d, t) + \frac{NOCT - 20^\circ}{0.8kW/m^2} G(d, t, \gamma_c, \beta) \quad (2.36)$$

$$FF(d, t, \gamma_c, \beta) = FF_o(1 - r_s) \quad (2.37)$$

$$FF_o = \frac{\nu_{oc} - \ln(\nu_{oc} + 0.72)}{\nu_{oc} + 1} \quad (2.38)$$

$$r_s = R_s \frac{I_{SC}(d, t, \gamma_c, \beta)}{V_{OC}(d, t, \gamma_c, \beta)} \frac{n_{c,s}}{n_{c,p}} \quad (2.39)$$

$$\nu_{oc} = \frac{V_{OC}(d, t, \gamma_c, \beta)}{n_{c,s} V_t} \quad (2.40)$$

$$V_t = 0.025 \frac{273^\circ K + T_c(d, t, \gamma_c, \beta)}{300^\circ K} \quad (2.41)$$

$$R_s = r_{S,STC} \frac{V_{OC,STC}}{I_{SC,STC}} \frac{n_{c,p}}{n_{c,s}} \quad (2.42)$$

$$r_{S,STC} = 1 - \frac{FF_{STC}}{FF_{o,STC}} \quad (2.43)$$

$$FF_{STC} = \frac{P_{M,STC}}{V_{OC,STC} I_{SC,STC}} \quad (2.44)$$

$$FF_{o,STC} = \frac{\nu_{OC,STC} - \ln(\nu_{OC,STC} + 0.72)}{\nu_{OC,STC} + 1} \quad (2.45)$$

$$\nu_{OC,STC} = \frac{V_{OC,STC}}{n_{c,s} V_{t,STC}} \quad (2.46)$$

$$V_{t,STC} = 0.025 \frac{273^\circ K + 25^\circ C}{300^\circ K} \quad (2.47)$$

όπου:

$r(y)(\%/\text{year})$ : ο ετήσιος συντελεστής μείωσης της παραγόμενης ενέργειας του Φ/B στοιχείου.  
Αν  $y = 1$  τότε  $r(y) = 0$ . Για  $1 < y \leq n$ , το  $r(y)$  προσδιορίζεται από τον κατασκευαστή.

$df(\%)$ : συντελεστής μείωσης της απόδοσης του Φ/B στοιχείου λόγω επικάθησης ακαθαρσιών (πχ. σκόνης) στην επιφάνειά του.

$I_{SC}(d, t, \gamma_c, \beta)(A)$  : το ρεύμα βραχυκύλωσης (short-circuit) του Φ/Β πλαισίου.

$V_{OC}(d, t, \gamma_c, \beta)(V)$  : τάση ανοιχτοκυλώματος (open-circuit) του Φ/Β πλαισίου.

$I_{SC,STC}(A)$  : ρεύμα βραχυκύλωσης υπό STC.

$P_{M,STC}$  : ισχύς Φ/Β στοιχείου στο MPP υπό STC.

$G(d, t, \gamma_c, \beta)(kW/m^2)$  : προσπίπτουσα ηλιακή ακτινοβολία στο Φ/Β πλαίσιο.

$\beta(^o)$  : γωνία κλίσης Φ/Β πλαισίου.

$\gamma_c(^o)$  : αζιμούθια γωνία

$K_i(A/^oC)$  : θερμικός συντελεστής του ρεύματος βραχυκύλωματος.

$V_{OC,STC}(V)$  : τάση ανοιχτοκυλώματος υπό STC.

$K_v(V/^oC)$  : θερμικός συντελεστής της τάσης ανοιχτοκυλώματος.

$T_A(d, t)(^oC)$  : θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$\delta_i(\%)$  : συντελεστής διόρθωσης [6].

$NOCT(^oC)$  : Nominal Operating Cell Temperature (δίνεται από τον κατασκευαστή).

$FF(d, t, \gamma_c, \beta)$  : fill factor

$n_{c,s}$  : αριθμός Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά στο Φ/Β πλαίσιο.

$n_{c,p}$  : αριθμός παράλληλα συνδεδεμένων σειρών από Φ/Β στοιχεία στο Φ/Β πλαίσιο.

Η τάση που δίνει στην έξοδο του το Φ/Β πλαίσιο δίνεται από την παρακάτω σχέση [5]:

$$V_M(d, t, \gamma_c, \beta) = V_{OC}(d, t, \gamma_c, \beta)(1 - \frac{b \ln a_1}{\nu_{oc}} - r_s(1 - a_1^{-b})) \quad (2.48)$$

όπου:

$$a_1 = \nu_{oc} + 1 - 2\nu_{oc}r_s \quad (2.49)$$

$$b = \frac{a_1}{1 + a_1} \quad (2.50)$$

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι έγκυρες για  $\nu_{oc} > 15$  και  $r_s < 0.4$ . Αν παραβιάζεται κάποιος από αυτούς τους περιορισμούς τότε το μοντέλο αυτό δεν μπορεί να εφαρμοστεί στον συγκεκριμένο τύπο Φ/Β πλαισίων.

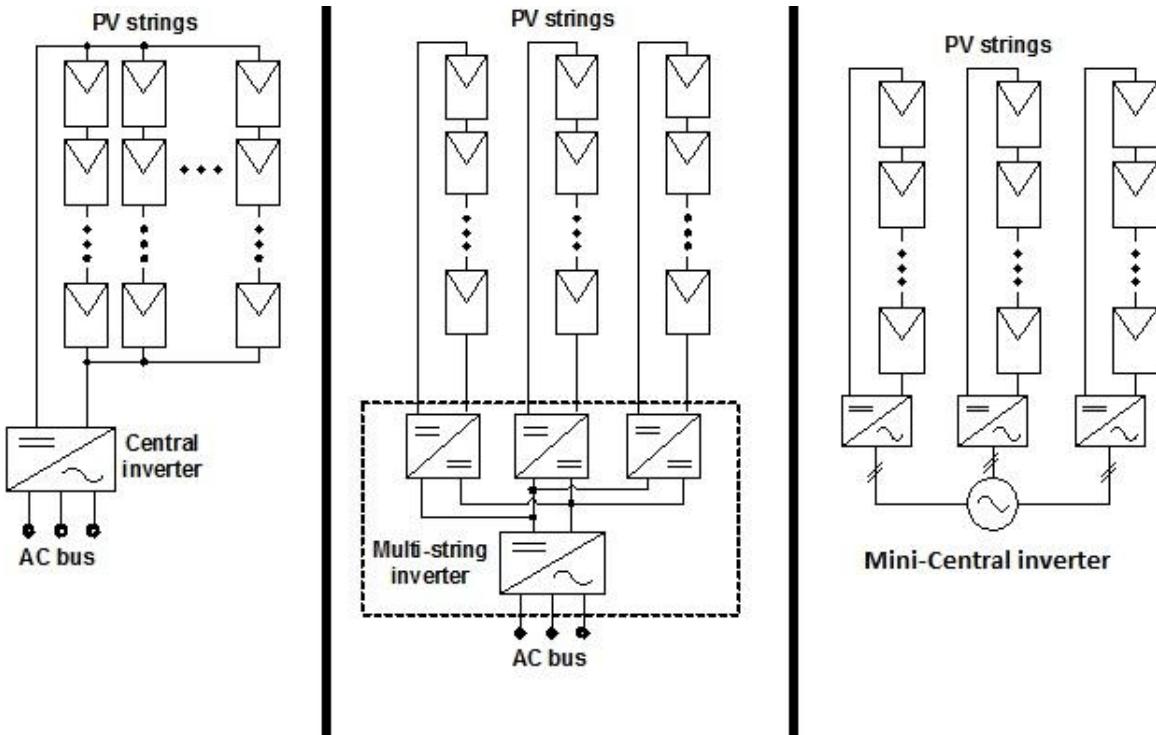
## 2.2.4 Μοντέλο υπολογισμών λειτουργίας των μετατροπέων DC/AC

Ο τύπος των μετατροπέων ισχύος DC/AC (αντιστροφείς, inverters) προσδιορίζεται από τον κατασκευαστή του Φ/B πάρκου και μπορεί να είναι (Σχήμα 2.4):

**Central Inverter:**  $> 50\text{kW}$ , βαθμός απόδοσης  $\approx 97\%$

**Multi-String inverter:**  $5\text{-}8\text{kW}$ , βαθμός απόδοσης  $\approx 96\%$

**Mini-Central inverter:**  $10\text{-}20\text{kW}$ , βαθμός απόδοσης  $\approx 98\%$



Σχήμα 2.4: 3 τύποι μετατροπέων DC/AC.

Στους Multi-String και στους Mini-Central αντιστροφείς πολλές σειρές Φ/B στοιχείων μπορούν να συνδεθούν παράλληλα σε κάθε DC είσοδο του μετατροπέα και ξεχωριστός MPP Tracker λειτουργεί σε κάθε DC είσοδο. Κάθε μετατροπέας χαρακτηρίζεται από διαφορετικό συντελεστή απόδοσης μετατροπής της ενέργειας και ποσοστό απωλειών λόγω αναντιστοιχιών του MPP σε περίπτωση μερικής σκίασης που επηρεάζει ένα ή παραπάνω Φ/B πλαίσιο σε κάθε σειρά από Φ/B πλαίσια [7], [8].

Στην παρούσα μεθοδολογία κάθε μετατροπέας DC/AC προσδιορίζεται από το εύρος της λειτουργίας MPP της DC εισόδου  $[V_{i,min}, \dots, V_{i,max}]$ , την μέγιστη επιτρεπόμενη DC τάση εισόδου,  $V_{DC,max}$ , και την ονομαστική ισχύ  $P_{i,n}(\text{kW})$ , για  $h > h_{ref}$  και  $T_A(d, t) > T_{ref}$ , όπου  $h_{ref}$  είναι το υψόμετρο αναφοράς και  $T_{ref}$  η θερμοκρασία αναφοράς. Υποθέτουμε ότι σε περίπτωση υψηλής DC ισχύος εισόδου η λειτουργική ισχύς του μετατροπέα περιορίζεται στο επίπεδο λειτουργικής ισχύος  $P_{i,na}(\text{kW})$  το οποίο υπολογίζεται ως:

$$P_{i,na} = (1 - f_{i,a}(h - h_{ref}))(1 - f_{i,t}(T_A(d, t) - T_{ref}))P_{i,n} \quad (2.51)$$

όπου:

$f_{i,a}(\% / km)$ : συντελεστής μείωσης της DC εισόδου λόγο υψημέτρου για τιμές υψημέτρου μεγαλύτερες από το  $h_{ref}$ .

$h(km)$ : το υψόμετρο εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος.

$f_{i,t}(\% / ^\circ C)$ : συντελεστής μείωσης της DC εισόδου λόγω θερμοκρασίας για τιμές θερμοκρασίας μεγαλύτερες από την  $T_{ref}$ .

$T_A(d, t)$ : η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

$T_{ref}$ : θερμοκρασία αναφοράς. Συνήθως  $45^\circ C$ , εξαρτάται από την κατασκευή του μετατροπέα.

Οι παράμετροι  $f_{i,a}, h_{ref}, f_{i,t}, T_{ref}$  προσδιορίζονται από τον κατασκευαστή των μετατροπέων DC/AC.

Ο ελάχιστος και ο μέγιστος αριθμός Φ/Β στοιχείων που μπορούν να συνδεθούν σε σειρά,  $[N_{smin}, N_{smax}]$ , υπολογίζονται με βάση το μέγιστο MPP επίπεδο τάσης της DC εισόδου,  $V_{i,max}$ , και την μέγιστη επιτρεπτή τάση της DC εισόδου,  $V_{DC,max}$ . Οι τιμές των  $V_{i,max}$ ,  $V_{DC,max}$  ορίζονται από τον κατασκευαστή του μετατροπέα DC/AC. Για τις τιμές των  $N_{smin}, N_{smax}$  ισχύει:

$$N_{smin} \leq N_s \leq N_{smax} \quad (2.52)$$

$$N_{smin} = 1 \quad (2.53)$$

$$N_{smax} = \min\{\lfloor \frac{V_{i,max}}{V_{M,max}} \rfloor, \lfloor \frac{V_{DC,max}}{V_{oc,max}} \rfloor\} \quad (2.54)$$

όπου  $V_{oc,max}$  είναι η μέγιστη τάση ανοιχτοκυλώματος και  $V_{M,max}$  είναι η μέγιστη τάση σε MPP. Το σύμβολο 'lfloor' αντιπροσωπεύει την συνάρτηση κατωφλίου (floor function). Και οι 2 αυτές τιμές υπολογίζονται από το μοντέλο των Φ/Β πλαισίων που περιγράψαμε στην προηγούμενη ενότητα, ενώ:

$$V_{M,max} = \max\{V_M(d, t, \gamma_c, \beta)\} \quad (2.55)$$

$$V_{oc,max} = \max\{V_{oc}(d, t, \gamma_c, \beta)\} \quad (2.56)$$

με:

$$1 \leq t \leq t_{max},$$

$$1 \leq d \leq 365,$$

$$\beta_{min} \leq \beta \leq \beta_{max},$$

$$\gamma_{c,min} \leq \gamma_c \leq \gamma_{c,max}$$

Η μεταβλητή  $N_s$  είναι σχεδιαστική παράμετρος και πρέπει να βρούμε την βέλτιστη τιμή της. Η μεταβλητή  $N_p$  είναι κι αυτή σχεδιαστική παράμετρος και εξαρτάται από τον τύπο του DC/AC μετατροπέα. Για Central inverters θα πρέπει να βρούμε την βέλτιστη τιμή της από τη διαδικασία βελτιστοποίησης. Για Multi-String και Mini-Central inverters για την μεταβλητή  $N_p$  θα ισχύει:

$$N_p = N_{i,mppt} N_{s,mppt} \quad (2.57)$$

όπου  $N_{i,mppt}$  είναι ο αριθμός των MPP trackers του κάθε DC/AC μετατροπέα,  $N_{s,mppt}$  είναι ο αριθμός των σειρών από Φ/Β στοιχεία που συνδέονται παράλληλα στην DC είσοδο του κάθε MPP tracker. Οι τιμές και των δυο αυτών μεταβλητών προσδιορίζονται από τον κατασκευαστή των μετατροπέων DC/AC.

Ο συνολικός αριθμός των Φ/Β πλαισίων που συνδέονται στον DC/AC μετατροπέα είναι  $N_{block} = N_s N_p$ . Οι τιμές του βαθμού απόδοσης,  $\eta_{inv}$ , του μετατροπέα DC/AC αποθηκεύονται σε look-up table συναρτήσει της DC ισχύος εισόδου του μετατροπέα,  $P_{in}$ . Ο βαθμός απόδοσης για οποιαδήποτε τιμή ενέργειας στην είσοδο του μετατροπέα υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή ως εξής:

$$n_{inv}(P_{in}) = n_1 + (P_{in} - P_1) \frac{n_2 - n_1}{P_2 - P_1} \quad (2.58)$$

όπου  $(n_1, P_1), (n_2, P_2)$  είναι τα ζεύγη απόδοσης που έχουμε αποθηκευμένα στο look-up table, τέτοια ώστε  $P_1 < P_{in} < P_2$ .

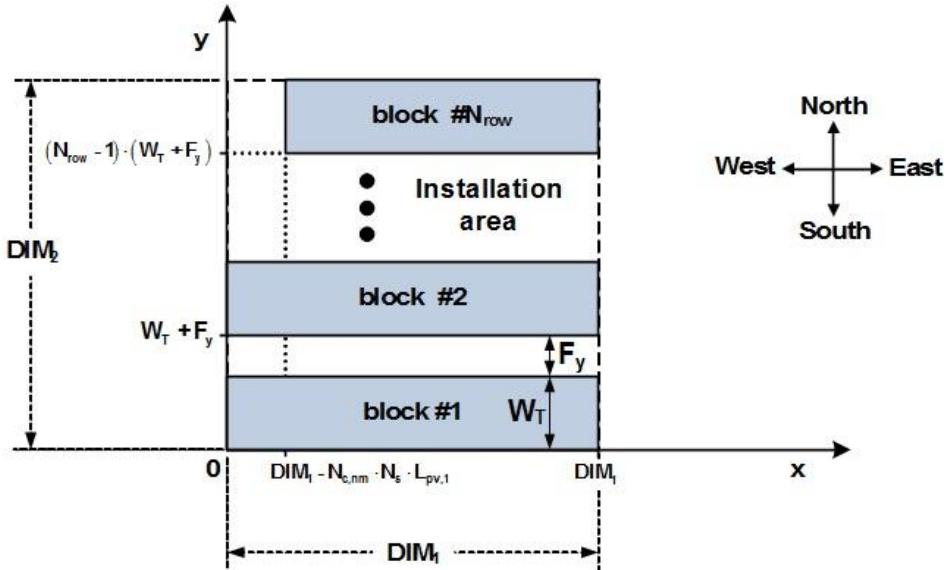
Επίσης, ο βαθμός απόδοσης της λειτουργίας MPPT του DC/AC μετατροπέα,  $\eta_{mppt}$ , αποθηκεύεται και αυτή σε look-up table συναρτήσει της DC ισχύος εισόδου του μετατροπέα,  $P_{in}$ , και υπολογίζεται με γραμμική παρεμβολή:

$$n_{mppt}(P_{in}) = n_{mppt,1} + (P_{in} - P_{mppt,1}) \frac{n_{mppt,2} - n_{mppt,1}}{P_{mppt,2} - P_{mppt,1}} \quad (2.59)$$

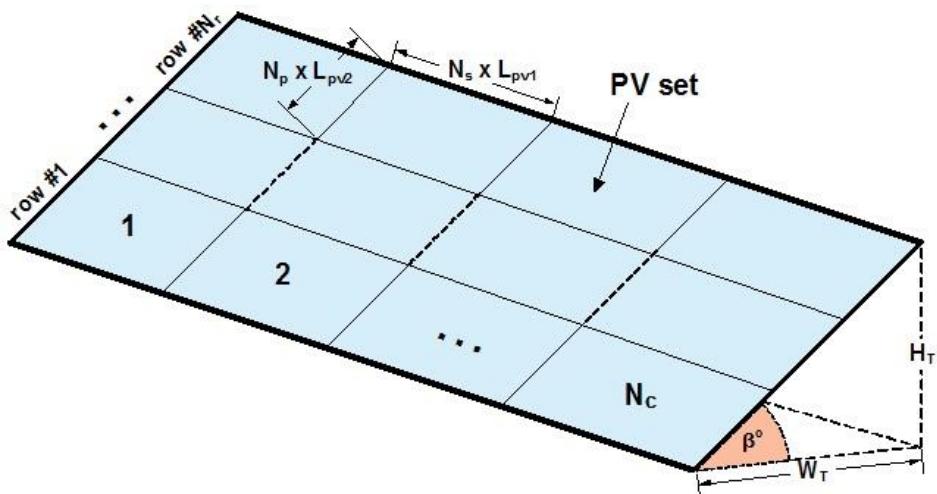
όπου  $(n_{mppt,1}, P_{mppt,1}), (n_{mppt,2}, P_{mppt,2})$  είναι τα ζεύγη απόδοσης που έχουμε αποθηκευμένα στο look-up table, τέτοια ώστε  $P_{mppt,1} < P_{in} < P_{mppt,2}$ .

## 2.2.5 Μοντέλο υπολογισμού παραμέτρων πεδίου εγκατάστασης

Στη παρούσα μεθοδολογία υποθέτουμε ότι η επιφάνεια εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος έχει ορθογώνιο σχήμα και νότιο προσανατολισμό. Οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας τοποθετούνται σε πολλαπλά block (Σχήμα 2.5), όπου κάθε block αποτελείται από πολλές γραμμές από Φ/Β πλαίσια (Σχήμα 2.6). Η γωνία κλίσης  $\beta(^{\circ})$  είναι σταθερή κατά την διάρκεια του έτους και είναι σχεδιαστική παράμετρος, άρα πρέπει να υπολογίσουμε την βέλτιστη τιμή της.



Σχήμα 2.5: Κάτοφη του πεδίου εγκατάστασης του Φ/Β πάρκου.



Σχήμα 2.6: Διάταξη κάθε γραμμής του Φ/Β πάρκου.

Το πλάτος,  $w_T(m)$ , της περιοχής που καταλαμβάνει κάθε block υπολογίζεται ως εξής:

$$W_T = N_r N_p L_{pv2} \cos \beta \quad (2.60)$$

όπου  $N_r$  είναι ο αριθμός γραμμών από σετ Φ/Β πλαισίων ανά block. Το  $N_r$  είναι σχεδιαστική παράμετρος του συστήματος και πρέπει να υπολογιστεί η βέλτιστη τιμή της. Ο συνολικός αριθμός από γραμμές Φ/Β πλαισίων ανά block,  $N_2$ , δίνεται από τη σχέση:

$$N_2 = N_r N_p \quad (2.61)$$

Ο συνολικός αριθμός από Φ/Β σετ που εγκαθιστούμε κατά μήκος του δυτικο-ανατολικού άξονα,  $N_c$ , υπολογίζεται σε σχέση με το μήκος της νοτιότερης πλευράς του πεδίου εγκατάστασης,  $DIM_1(m)$ . Είναι:

$$N_c = \lfloor \frac{DIM_1}{N_s L_{pv1}} \rfloor \quad (2.62)$$

Ο συνολικός αριθμός από Φ/Β πλαίσια που εγκαθιστούμε σε σειρά κατά μήκος του δυτικο-ανατολικού άξονα μιας γραμμής είναι:

$$n_t = N_c N_s \quad (2.63)$$

Ο συνολικός αριθμός από block που αποτελούν το Φ/Β πάρκο είναι:

$$N_{row} = \lceil \frac{N_{I,0}}{n_t N_2} \rceil \quad (2.64)$$

όπου  $N_{I,0}$  είναι ο συνολικός αριθμός των Φ/Β πλαισίων του Φ/Β πάρκου και δίνεται από την σχέση (2.82). Το σύμβολο ' $\lceil \rceil$ ' αντιπροσωπεύει την συνάρτηση ανωφλίου (ceiling function). Ο συνολικός αριθμός από Φ/Β πλαίσια που πρέπει να εγκατασταθούν στο βορειότερο block είναι:

$$N_{m,nr} = \lceil \frac{N_{I,0} - (N_{row} - 1)n_t N_2}{N_s N_p} \rceil \quad (2.65)$$

Αυτά τα Φ/Β πλαίσια διατάσσονται σε σετ των  $N_r$  γραμμών με  $N_{c,nm}$  σετ σε κάθε γραμμή, όπου:

$$N_{c,nm} = \lceil \frac{N_{m,nr}}{N_s N_p N_r} \rceil \quad (2.66)$$

Ακόμη, ο συνολικός αριθμός των Φ/Β στοιχείων του Φ/Β πάρκου που εγκαθίστανται πραγματικά στο πεδίο είναι:

$$N_I = [(N_{row} - 1)N_c + N_{c,nm}]N_r N_p N_s \quad (2.67)$$

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.5 οι γειτονικές γραμμές είναι εγκατεστημένες με μια απόσταση μεταξύ τους, η οποία καθορίζει τις συνθήκες σκίασης καθενός block. Η απόσταση μεταξύ των γραμμών,  $F_y(m)$ , είναι σχεδιαστική παράμετρος και πρέπει να υπολογιστεί η βέλτιστη τιμή της.

Η συνολική έκταση του πεδίου εγκατάστασης που αποτελείται από σταθερής κλίσης Φ/Β πλαίσια είναι:

$$A_p = N_{row} W_T L_{pv1} n_t + (N_{row} - 1) F_y L_{pv1} n_t \quad (2.68)$$

Το μήκος της νοτιότερης πλευράς της διαθέσιμης περιοχής εγκατάστασης,  $DIM_1$ , είναι σχεδιαστική παράμετρος που πρέπει να βελτιστοποιήσουμε. Ισχύει:  $DIM_1 \leq DIM_{1,max}$ , όπου  $DIM_{1,max}$  είναι το μέγιστο επιτρεπτό μήκος της νοτιότερης πλευράς της περιοχής εγκατάστασης.

Το πλάτος της περιοχής εγκατάστασης,  $DIM_2$  είναι:

$$DIM_2 = \frac{A_p}{DIM_{1,\alpha}} \quad (2.69)$$

όπου  $DIM_{1,a}$  είναι το πραγματικό μήκος της νοτιότερης πλευράς του οικοπέδου και υπολογίζεται από την σχέση:

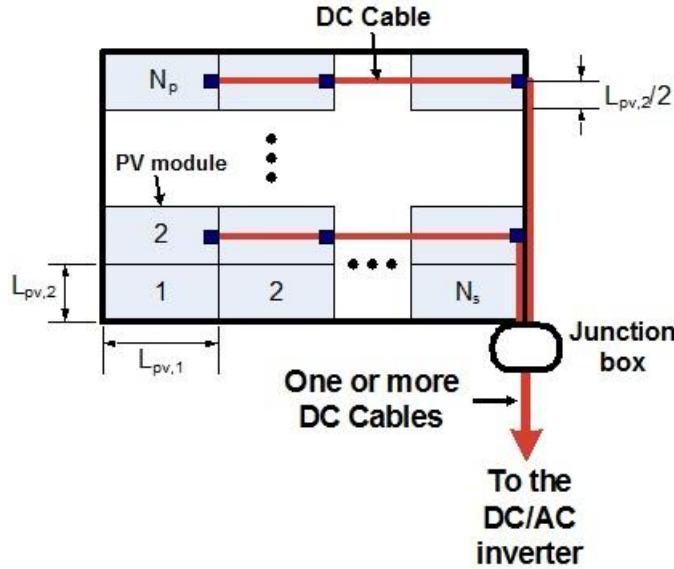
$$DIM_{1,\alpha} = L_{pv1}n_t \quad (2.70)$$

Η διαδικασία για τον υπολογισμό της επιφάνειας σκίασης σε κάθε block,  $A_s(i)(m^2)$  όπου  $i = 1...N_{row}$ , είναι η ακόλουθη:

- Το νοτιότερο block δεν έχει ποτέ σκιά, άρα  $A_s(1) = 0$ .
- Για τα block  $i = 2...N_{row}$  η συνολική περιοχή σκίασης  $A_s(i)$  υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις εξισώσεις  $2.26 - 2.32$  με  $w = 0$ ,  $d_1 = w_T + F_y$ ,  $v = DIM_1$  και  $u = N_2L_{pv2}$ . Επίσης, αυτό το μοντέλο δίνει στην έξοδό του το μήκος και το ύψος της περιοχής σκίασης  $u_{sh}(i)$  και  $v_{sh}(i)$  αντίστοιχα καθώς και την απόλυτη συντεταγμένη  $X_g(i)$  κατά μήκος του άξονα  $x$  (με κατεύθυνση ανατολή - δύση) του σημείου όπου ξεκινά η περιοχή σκίασης στο block  $i$  (Σχήμα 2.2). Αν  $X_g(i) < 0$ , τότε  $X_g(i) = 0$ .
- Θέτουμε  $X'_g = X_g(i)$ .
- Εφόσον το block  $i = N_{row}$  μπορεί να έχει μικρότερο μήκος, αν  $X_g(N_{row}) + v_{sh}(N_{row}) < DIM_1 - N_{c,nm}N_sN_pL_{pv1}$  τότε  $u_{sh}(N_{row}) = 0$ ,  $v_{sh}(N_{row}) = 0$ ,  $X'_g(N_{row}) = 0$ ,  $A_s(N_{row}) = 0$ . Άλλως, αν  $X'_g(N_{row}) < DIM_1 - N_{c,nm}N_sN_pL_{pv1}$  τότε  $X'_g(N_{row}) = DIM_1 - N_{c,nm}N_sN_pL_{pv1}$ . Τότε, η συνολική περιοχή σκίασης σε κάθε  $\Phi/B$  σετ που συνδέεται στον DC/AC μετατροπέα,  $A_{S,I}(i, j, k)(m^2)$  με  $i = [1....N_{row}]$ ,  $j = [1....N_c]$ ,  $k = [1....N_r]$  υπολογίζεται ως εξής:
- Για το  $\Phi/B$  σετ του block  $i = 1$ :  $A_{S,I}(i, j, k) = 0$ .
- Για τα  $\Phi/B$  σετ του block  $i = [2...N_{row} - 1]$  και για κάθε  $j = [1....N_c]$  και  $k = [1....N_r]$  θα είναι:
  1. Θέτουμε  $X_{g,1} = X'_g(i)$  και  $X_{g,2} = X'_g(i) + v_{sh}(i)$ .
  2. Αν  $(j - 1)N_sL_{pv1} > X'_g(i)$  τότε  $X_{g,1} = (j - 1)N_sL_{pv1}$ .
  3. Αν  $jN_sL_{pv1} < X'_g(i) + v_{sh}(i)$ , τότε  $X_{g,2} = jN_sL_{pv1}$ .
  4. Αν  $(j - 1)N_sL_{pv1} > X'_g(i) + v_{sh}(i)$  ή  $jN_sL_{pv1} < X'_g(i)$ , τότε  $X_{g,1} = 0$  και  $X_{g,2} = 0$ .
  5. Θέτουμε  $h_{g,1} = (k - 1)N_pL_{pv2}$  και  $h_{g,2} = u_{sh}(i)$ .
  6. Αν  $kN_pL_{pv2} < u_{sh}(i)$  τότε  $h_{g,2} = kN_pL_{pv2}$ .
  7. Αν  $(k - 1)N_pL_{pv2} > u_{sh}(i)$ , τότε  $h_{g,1} = 0$  και  $h_{g,2} = 0$ .
  8. Υπολογίζουμε  $A_{S,I}(i, j, k) = (X_{g,2} - X_{g,1})(h_{g,2} - h_{g,1})$ .
- Ο υπολογισμός του  $A_{S,I}(i, j, k)$  για τα  $\Phi/B$  σετ της γραμμής  $i = N_{row}$  υπολογίζεται εκτελώντας τα βήματα 1 - 7 για  $j = [(N_c - N_{c,nm} + 1)...N_c]$  και  $k = [1...N_r]$ .

## 2.2.6 Καλωδίωση μονάδων Φ/B πάρκου

Στην παρούσα μεθοδολογία υποθέτουμε ότι κάθε καλώδιο περιέχει 2 αγωγούς που απαιτούνται για την μεταφορά της ενέργειας (θετικής και αρνητικής πολικότητας, αντίστοιχα). Τα DC καλώδια από τα Φ/B block στους DC/AC μετατροπές και τα AC καλώδια από τους μετατροπές στον μετασχηματιστή διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο εγκαθίστανται σε βάθος  $h_d(m)$  κάτω από την επιφάνεια του εδάφους της περιοχής εγκατάστασης.



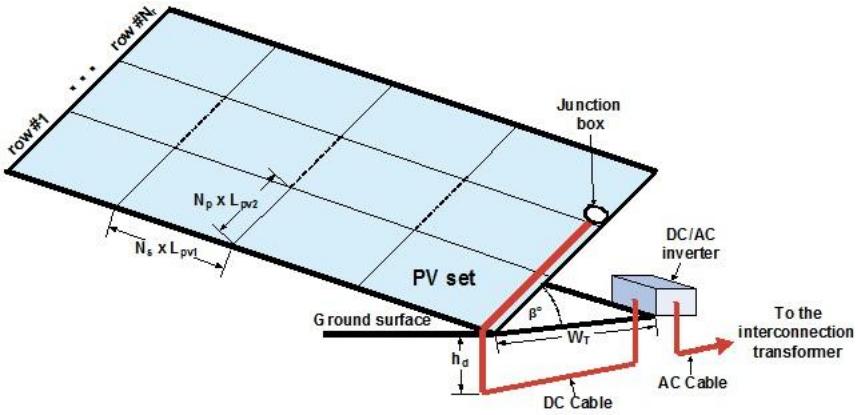
Σχήμα 2.7: Η DC καλωδίωση σε ένα Φ/B σετ που συνδέεται σε DC/AC μετατροπέα.

Η DC καλωδίωση σε ένα Φ/B σετ ( $N_s * N_p$  Φ/B πλαίσια) που συνδέεται στον μετατροπέα DC/AC φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Τα DC καλώδια ξεκινάνε από τις Φ/B γραμμές των Φ/B πλαισίων (PV-Strings) και φτάνουν μέχρι τον κόμβο που βρίσκεται εγκατεστημένος στην κάτω δεξιά γωνία αυτής της υπο-συστοιχίας κι έπειτα προωθούνται στον DC/AC μετατροπέα. Στην περίπτωση που έχουμε Multi-String ή Mini-Central inverters ο κόμβος αυτός παραλείπεται. Η DC καλωδίωση των Φ/B υποσυστοιχιών στον αντίστοιχο DC/AC μετατροπέα φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Κάθε μετατροπέας εγκαθίσταται στην κάτω στήλη της Φ/B συστοιχίας και στην πίσω πλευρά των Φ/B στοιχείων. Το Φ/B πάρκο περιέχει  $N_i$  τέτοιους σχηματισμούς, όπου  $N_i$  είναι ο συνολικός αριθμός από DC/AC μετατροπές εγκατεστημένους στο Φ/B πάρκο. Είναι:

$$N_i = \frac{N_I}{N_s N_p} \quad (2.71)$$

Το γινόμενο ενέργειας - μήκους ( $kW_p * m$ ) των DC αγωγών από τα Φ/B πλαίσια στους μετατροπές DC/AC δίνεται από τη σχέση:

$$\begin{aligned} PL_{DC} = & (1 + SF_1) \left\{ N_i N_s \frac{P_{m,STC}}{1000} [N_p(N_s - 1)L_{pv1} + S_1] + \right. \\ & \left. + (N_{row} - 1) N_c N_s N_p \frac{P_{m,STC}}{1000} S_2 + N_{c,nm} N_s N_p \frac{P_{m,STC}}{1000} S_2 \right\} \end{aligned} \quad (2.72)$$



Σχήμα 2.8: Καλωδίωση ενός Φ/Β σετ στον αντίστοιχο μετατροπέα DC/AC.

όπου  $P_{m,STC}$  είναι η ονομαστική ισχύς κάθε Φ/Β πλαισίου υπό STC ( $kW_p$ ) και προσδιορίζεται από τον κατασκευαστή του και  $SF_1(\%)$  είναι παράγοντας υπερδιαστασιολόγησης με σκοπό να ληφθούν υπόψιν οι επιπλέον (απρόβλεπτες) απαιτήσεις σε μήκος καλωδίων κατά την διάρκεια της κατασκευής του Φ/Β πάρκου (πχ  $SF_1 = 10\%$ ). Οι όροι  $S_1$  και  $S_2$  στην 2.72 δίνονται από τις σχέσεις:

$$S_1 = \sum_{j=1}^{N_p} ((j-1)L_{pv2} + \frac{L_{pv2}}{2}) \quad (2.73)$$

$$S_2 = \sum_{j=1}^{N_r} (2h_d + W_T + (j-1)N_p L_{pv1}) \quad (2.74)$$

Η AC καλωδίωση των block που αποτελούν το Φ/Β πάρκο φαίνεται στο Σχήμα 2.9. Κάθε block αποτελείται από μια συστοιχία από Φ/Β σετ που συνδέονται αντίστοιχα στους μετατροπείς DC/AC, όπως αναφέραμε παραπάνω. Ο μετασχηματιστής διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο τοποθετείται στην μέση της βορειότερης πλευράς του πεδίου εγκατάστασης με σκοπό να ελαχιστοποιήσουμε την επιδρασή του στην λειτουργία των Φ/Β στοιχείων (πχ. να αποφύγουμε την σκίαση των Φ/Β συστοιχιών). Το γινόμενο ενέργειας - μήκους ( $kW_p * m$ ) των AC καλωδίων που ξεκινάνε από τους DC/AC μετατροπείς και φτάνουν στον μετασχηματιστή διασύνδεσης υπολογίζεται από την σχέση:

$$PL_{AC} = [P_{in,ac} N_r S_3 (N_{row} - 1) + P_{in,ac} N_r S_4 + P_{in,ac} N_r N_c S_5 + P_{in,ac} N_i (L_{pv1} \frac{n_t}{2} + h_d)] (SF_2 + 1) \quad (2.75)$$

όπου  $P_{in,ac}$  είναι η ονομαστική AC ισχύς κάθε DC/AC μετατροπέα (η τιμή της καθορίζεται από τον κατασκευαστή) και  $SF_2(\%)$  είναι παράγοντας υπερδιαστασιολόγησης με σκοπό να καλυφθούν οι απαιτήσεις σε μήκος καλωδίων κατά την διάρκεια της εγκατάστασης. Επίσης, οι τιμές των  $S_3$ ,  $S_4$ ,  $S_5$  στην σχέση (2.75) δίνονται από τις σχέσεις:

$$S_3 = \sum_{j=1}^{N_c} (h_d + (j-1)N_s L_{pv1}) \quad (2.76)$$

$$S_4 = \sum_{j=1}^{N_{c,nm}} (h_d + (j-1)N_s L_{pv1}) \quad (2.77)$$

$$S_5 = \sum_{j=1}^{N_{row}} ((j-1)(W_T + F_y)) \quad (2.78)$$

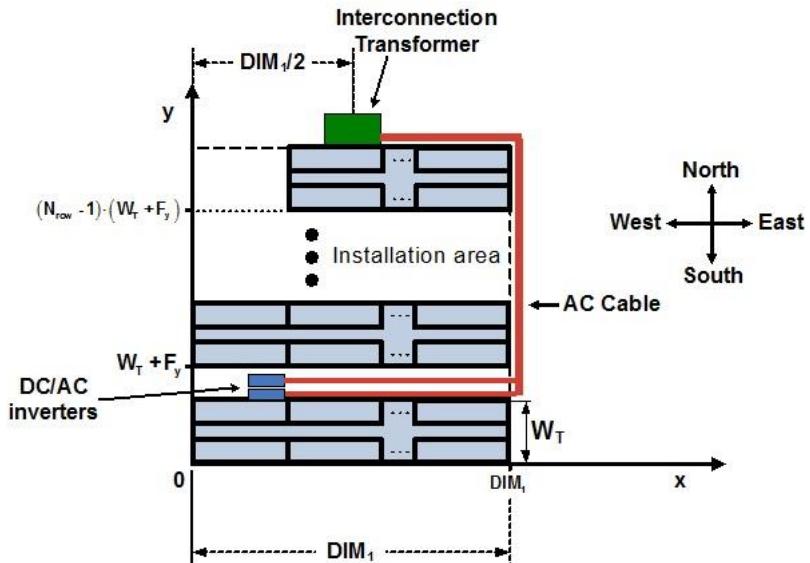
Η AC ισχύς του μετασχηματιστή διασύνδεσης,  $P_{i/c}$ , υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{i/c} = \frac{N_i P_{i,n/AC}}{1000} \quad (2.79)$$

όπου  $N_i$  είναι ο συνολικός αριθμός των μετατροπέων DC/AC και  $P_{i,n/AC}(kW_p)$  είναι η ονομαστική AC ισχύς του μετατροπέα DC/AC, προσδιορισμένη από τον κατασκευαστή. Το γινόμενο ενέργειας - μήκους ( $MW_p m$ ) του καλωδίου διασύνδεσης δίνεται από την σχέση:

$$PL_{I/C} = (1 + SF_3)\eta_t P_{i/c} * DPPC \quad (2.80)$$

όπου  $\eta_t$  είναι ο βαθμός απόδοσης του μετασχηματιστή διασύνδεσης (%),  $DPPC(m)$  είναι η απόσταση του μετασχηματιστή διασύνδεσης από τον κόμβο του ηλεκτρικού δικτύου που προσφέρουμε την παραγόμενη ενέργεια και  $SF_3$  είναι συντελεστής υπερδιαστασιολόγησης με σκοπό να καλυφθούν οι επιπλέον (απρόβλεπτες) απαιτήσεις σε μήκος καλωδίων κατά την διάρκεια της εγκατάστασης.



Σχήμα 2.9: Η AC καλωδίωση από τους μετατροπείς DC/AC στον μετασχηματιστή διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο.

## 2.2.7 Υπολογισμός παραγόμενης ενέργειας Φ/B πάρκου

Η ονομαστική ισχύς του Φ/B πάρκου,  $P_{plant,nom}$ , σχετίζεται με τον συνολικό αριθμό των Φ/B πλαισίων που το αποτελούν,  $N_{I,O}$ , με την σχέση:

$$P_{plant,nom} = \frac{N_{I,O} P_{M,STC}}{10^6} \quad (2.81)$$

συνεπώς,

$$N_{I,O} = \frac{P_{plant,nom} * 10^6}{P_{M,STC}} \quad (2.82)$$

Η χρήση πολλών γραφμάτων από ηλιακούς συλλέκτες σε περιορισμένο κομμάτι γης έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της συνολικής έκτασης που καταλαμβάνουν οι εγκατεστημένοι συλλέκτες, αλλά επίσης αυξάνει τις περιοχές σκίασης, ενώ μικρός αριθμός Φ/B σειρών (πχ. με μεγάλη απόσταση των προσκείμενων σειρών) μειώνει τις σκιές αλλά επίσης είναι πολύ πιθανό να μειώσει και την παραγόμενη ενέργεια λόγω δυνατότητας εγκατάστασης μικρότερου αριθμού Φ/B πλαισίων σε δεδομένη επιφάνεια [9]. Το μοντέλο υπολογισμού που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία εντοπίζει την βέλτιστη συνολική απόσταση των Φ/B σετ, ακόμη κι αν υπάρχει σκιά σε κάποια από τα Φ/B πλαισία. Εφόσον τα μεγάλα Φ/B πάρκα απαιτούν μια σχετικά μεγάλη έκταση γης, το κόστος της γης είναι σημαντικός παράγοντας και πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν στο οικονομικό κόστος. Η επίδραση των σκιασμένων χώρων στην ενέργεια που παράγεται είναι συνήθως μη-γραφμική. Αυτό σημαίνει ότι μικρή σκιά μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες απώλειες σε ενέργεια, συνεπώς μείωση της συνολικής παραγόμενης ενέργειας του Φ/B πάρκου. Η παραγόμενη ενέργεια μιας Φ/B συστοιχίας με σκιά εξαρτάται από διάφορους παράγοντες [10], [11]:

- ο τύπος της διασύνδεσης των Φ/B στοιχείων μέσα σε μια Φ/B συστοιχία (σειριακή ή παράλληλη).
- το ποσοστό της περιοχής που σκιάζεται σε κάθε Φ/B στοιχείο μέσα σε ένα Φ/B πλαίσιο μιας Φ/B συστοιχίας.
- το μοτίβο της σκιάς.
- η σύνδεση των Φ/B στοιχείων και των αντίστοιχων διόδων bypass που αποτελούν το Φ/B πλαίσιο.
- η διαφορά στην απόκριση κάθε Φ/B στοιχείου υπό σκιά λόγω διαφορών στα χαρακτηριστικά ανάστροφης πόλωσης των στοιχείων.
- το επίπεδο έντασης της προσπίπτουσας ηλιακής ακτινοβολίας.
- την MPPT στρατηγική του μετατροπέα DC/AC (δυνατότητα εντοπισμού του ολικού μέγιστου MPP έναντι τοπικών μεγίστων στην περίπτωση σκίασης).

Στην παρούσα μεθοδολογία η επίδραση της σκίασης στην παραγωγή ενέργειας υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον συντελεστή Shade Impact Factor (SIF), ως εξής [12]:

$$SIF = (1 - \frac{P_{shade}}{P_{sys}}) \frac{A_{sys}}{A_{shade}} \quad (2.83)$$

όπου

$A_{sys}$  : συνολική επιφάνεια της Φ/Β συστοιχίας

$A_{shade}$  : συνολική επιφάνεια της σκίασης επάνω στην Φ/Β συστοιχία

$P_{sys}$  : ονομαστική ισχύς της Φ/Β συστοιχίας

$P_{shade}$  : ισχύς που παράγεται υπό συνθήκες σκίασης

Στις μελέτες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ηλιακή, η παραγόμενη ενέργεια υπολογίζεται με την παραπάνω εξίσωση για  $SIF = 2$  [13].

Όπως αναφέραμε στο κεφάλαιο υπολογισμού της επιφάνειας σκίασης, η συνολική έκταση της περιοχής σκίασης,  $A_{S,I}(q)(m^2)$ ,  $q = [1...N_i]$ , σε κάθε Φ/Β σετ που συνδέεται σε DC/AC μετατροπέα, υπολογίζεται ως εξής:

$$A_{S,I}(q) = A_{S,I}(i, j, k), i = [1...N_{row}], j = [1...N_c], k = [1...N_r] \quad (2.84)$$

Λαμβάνοντας υπόψιν την μείωση της παραγόμενης ενέργειας λόγω σκίασης, η DC είσοδος στον αντίστοιχο μετατροπέα DC/AC υπολογίζεται ως εξής:

- Αν  $N_s * V_M(d, t, \gamma_c, \beta) < V_{i,min}$ , τότε  $P_{in}(q) = 0$ , αλλιώς  $P_{in}(q) = 1 - \frac{A_{S,I}}{N_s N_p L_{pv1} L_{pv2}} SIF(1 - n_{i,dc} PL_{dc}) N_s N_p \eta_{mppt} (1 - r(y) year) P_M(y, d, \gamma_c, \beta)$
- Αν  $P_{in}(q) < 0$ , τότε  $P_{in}(q) = 0$ .

όπου  $V_{i,min}(V)$  είναι η ελάχιστη DC τάση εισόδου στον μετατροπέα DC/AC, και  $n_{i,dc}(\% / kW/m)$  είναι ο συντελεστής απωλειών λόγω των καλωδίων DC.

Η AC έξοδος του μετατροπέα,  $P_o(q)$ , την ημέρα  $d (1 \leq d \leq 365)$  και ώρα  $t (1 \leq t \leq t_{max})$  είναι:

- Αν  $P_{in}(q) > P_{i,sc}$ , τότε:
  - Αν  $P_{in}(q) \leq P_{i,na}$  τότε  $P_o(q) = \eta_{inv}(P_{in}(q)) P_{in}(q)$ , αλλιώς  $P_o(q) = \eta_{inv}(P_{i,na}) P_{i,na}$
  - Αν  $P_{in}(q) \leq P_{i,sc}$ , τότε  $P_o(q) = 0$ .

Η συνολική ενέργεια που μπορεί να προσφέρει το Φ/Β πάρκο στο ηλεκτρικό δίκτυο,  $P_{plant}(y, d, t, \gamma_c, \beta)(MW)$  την ημέρα  $d, (1 \leq d \leq 365)$  και ώρα  $t, (1 \leq t \leq t_{max})$  υπολογίζεται ως εξής:

$$P_{plant}(y, d, t, \gamma_c, \beta) = \frac{\eta_t (1 - n_{l,ac} PL_{ac})(1 - n_{l,i/c} PL_{i/c})}{1000} \sum_{q=1}^{N_i} (P_o(q)) \quad (2.85)$$

όπου

$\eta_t$  : συντελεστής απόδοσης της γραμμής μεταφοράς (%).

$n_{l,ac}$  : συντελεστής απωλειών AC καλωδίων (% / kW/m).

$n_{l,ic}$  : συντελεστής απώλειας ενέργειας του καλωδίου που συνδέει το Φ/Β πάρκο με τον MV PCC μεταγωγό διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο (%/MW/m).

Η διακύμανση της παραγόμενης ενέργειας ενός μεγάλου Φ/Β συστήματος μπορεί να προκαλέσει διαταραχές στην σταθερή λειτουργία του συστήματος ενέργειας (πχ. στον έλεγχο τάσης και συχνότητας). Σε μικρά ηλεκτρικά δίκτυα αυτό το φαινόμενο είναι σημαντικό πρόβλημα.

Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να προσφέρει το Φ/Β σύστημα στο ηλεκτρικό δίκτυο έτσι ώστε η αλλαγή στην τάση του δικτύου να περιορίζεται στο μέγιστο επιτρεπτό επίπεδο  $k * U_n$  υπολογίζεται από την σχέση:

$$P_{plant,max} = k \frac{U_n^2}{R + n_{l,ic} U_n^2 D_{PCC} 10^6} \quad (2.86)$$

Αν  $P_{plant}(d, y, t, \gamma_c, \beta) > P_{plant,max}$ , τότε η ενέργεια στην έξοδο του μετατροπέα DC/AC περιορίζεται έτσι ώστε  $P_{plant} = P_{plant,max}$ .

Η συνολική ενέργεια που μπορεί το Φ/Β πάρκο να προσφέρει στο ηλεκτρικό δίκτυο δίνεται από την σχέση:

$$E_{pv}(y) = EAF \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{t_{max}} P_{plant}(y, d, t, \gamma_c, \beta) \Delta t \quad (2.87)$$

όπου  $EAF$  είναι ο Συντελεστής Διαθεσιμότητας Ενέργειας (Energy Availability Factor) λόγω προγραμματισμένων και μη εργασιών συντήρησης των δομικών μονάδων του Φ/Β συστήματος (Φ/Β στοιχεία, DC/AC μετατροπείς κλπ). Συνήθως,  $EAP > 99.5\%$ . Όμως, ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας (συντήρηση μονάδων, χαμηλός φόρτος κλπ) το δίκτυο μπορεί να μην δύναται να απορροφήσει όλη την παραγόμενη ενέργεια. Έτσι, αν  $P_{plant}(y, d, t, \gamma_c, \beta) > P_{grid,max}(y, d, t)(1 + (y - 1)S_g(y))$ , τότε  $P_{plant}(y, d, t, \gamma_c, \beta) = P_{grid,max}(y, d, t)(1 + (y - 1)S_g(y))$ .

Η συνολική ενέργεια που το Φ/Β πάρκο προσφέρει στην πραγματικότητα στο ηλεκτρικό δίκτυο κατά τα η χρόνια λειτουργίας του δίνεται από την σχέση:

$$E_{tot} = \sum_{y=1}^n E_{tot}(y) \quad (2.88)$$

όπου:

$$E_{tot}(y) = EAF \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{t_{max}} P_{plant}(y, d, t, \gamma_c, \beta) \Delta t \quad (2.89)$$

## 2.2.8 Υπολογισμός κόστους ανά μονάδα ενέργειας

Οι σχεδιαστικές παράμετροι του Φ/Β πάρκου των οποίων πρέπει να βρούμε τις βέλτιστες τιμές είναι:

$N_s$  : ο αριθμός των Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένα σε σειρά.

$N_p$  : ο αριθμός των παράλληλα συνδεδεμένων σειρών.

$N_r$  : ο αριθμός των γραμμών από Φ/B σετ ανά block.

$F_y$  : η απόσταση των προσκείμενων block.

$\beta$  : η γωνία κλίσης των Φ/B πλαισίων.

$DIM_1$  : το μήκος της νοτιότερης πλευράς της περιοχής εγκατάστασης.

Για τις παραπάνω μεταβλητές ισχύουν οι περιορισμοί:

- $1 \leq N_s \leq N_{s,max}$
- $1 \leq N_p \leq N_{s,mpp}$  (μόνο για Central inverters)
- $1 \leq N_r \leq 10$
- $0 \leq F_y \leq 50$
- $0 \leq \beta \leq 90$
- $0 \leq DIM_1 \leq DIM_{1,max}$

Το μέγεθος που πρέπει να βελτιστοποιηθεί είναι το κόστος της ενέργειας που παράγεται (Levelized Cost Of Electricity - LCOE) από το Φ/B πάρκο, το οποίο ορίζεται ως το συνολικό κόστος κατασκευής και συντήρησης του Φ/B πάρκου για η χρόνια λειτουργίας, προς την ποσότητα της ενέργειας που παράγει το Φ/B σύστημα κατά τη διάρκεια ζωής του.

$$\underset{\vec{x}}{minimize} LCOE = \underset{\vec{x}}{minimize} \frac{C_c(\vec{x}) + C_m(\vec{x})}{E_{tot}} \quad (2.90)$$

όπου:

$\vec{x}$  : το διάνυσμα των σχεδιαστικών παραμέτρων της βελτιστοποίησης ( $\vec{x} = [N_s, N_p, N_r, F_y, \beta, DIM_1]$ )

$C_c(\vec{x})$  : το κόστος εγκατάστασης του Φ/B πάρκου (Euros).

$C_m(\vec{x})$  : η παρούσα αξία του κόστους συντήρησης του Φ/B πάρκου (Euros).

$E_{tot}$  : η συνολική ενέργεια που παράγει το σύστημα κατά τη διάρκεια λειτουργίας του.

Το συνολικό κόστος του Φ/B πάρκου ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος ( $Euros/MW_p$ ) πρέπει να είναι μικρότερη από το άνω όριο που έχει θέσει ο κατασκευαστής,  $C_{p,max}$  ( $Euros/MW_p$ ), δηλαδή:

$$\frac{C_c(\vec{x}) + C_m(\vec{x})}{N_I \frac{P_{M,STC}}{1000}} \leq C_{p,max} \quad (2.91)$$

Το κόστος εγκατάστασης δίνεται από την σχέση:

$$C_c(\vec{x}) = (1-s)(1+POS)(N_i N_s N_p \frac{P_{M,STC}}{1000}(1-R_{pv})C_{pv} + N_i P_{i,n} C_{inv} + C_L + C_B + C_{i,t} + C_{c,dc} + C_{c,ac} + C_{IC}) \quad (2.92)$$

όπου

$s(\%)$  : συντελεστής επιδότησης.

$BOS(\%)$  : ποσοστό κόστους των λοιπών εξαρτημάτων του συστήματος (Balance-of system components - BOS) [14].

$C_{pv}(Euro/KW_p)$  : τιμή κάθε  $\Phi/B$  πλαισίου.

$C_{inv}(Euro/kW_p)$  : τιμή κάθε DC/AC μετατροπέα.

$R_{pv}(\%)$  : συντελεστής αξίας των  $\Phi/B$  στοιχείων στο τελευταίο ( $n$ -οστό) έτος λειτουργίας του  $\Phi/B$  πάρκου.

$C_L(Euro)$  : κόστος αγοράς περιοχής εγκατάστασης.

$C_B(Euro)$  : κόστος κατασκευής και εγκατάστασης των βάσεων στήριξης του  $\Phi/B$  συστήματος.

$C_{i,t}(Euro)$  : κόστος μετασχηματιστή διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο.

$C_{c,dc}(Euro)$  : κόστος DC καλωδίων.

$C_{c,ac}(Euro)$  : κόστος AC καλωδίων.

$C_{IC}(Euro)$  : κόστος καλωδίου διασύνδεσης του  $\Phi/B$  πάρκου με το ηλεκτρικό δίκτυο.

Τα παραπάνω μεγέθη υπολογίζονται ως εξής:

$$R_{PV} = (1 - nr(n)) \frac{n_{pv} - n}{n_p v} \quad (2.93)$$

όπου:

$n(years)$  : η διάρκεια ζωής του  $\Phi/B$  πάρκου.

$n_{pv}(years)$  : η διάρκεια ζωής των  $\Phi/B$  στοιχείων (δίνεται από τον κατασκευαστή τους).

$r(y)(\%/year)$  : ετήσιος συντελεστής μείωσης της παραγόμενης ισχύος από τα  $\Phi/B$  πλαίσια (Αν  $y = 1$  τότε  $r(y) = 0$ , διαφορετικά προσδιορίζεται από τον κατασκευαστή).

Το κόστος αγοράς της περιοχής εγκατάστασης είναι:

$$C_L = (A_p + A_{i/c,t} P_i / c) c_l \quad (2.94)$$

όπου:

$A_p(m^2)$  : η έκταση της περιοχής εγκατάστασης.

$A_{i/c,t}(m^2/MW)$  : έκταση που καταλαμβάνει ο μετασχηματιστής διασύνδεσης με το ηλεκτρικό δίκτυο.

$c_l(Euro/m^2)$  : το κόστος της γης ανά μονάδα επιφάνειας.

Το κόστος  $C_B$  δίνεται από την σχέση:

$$C_B = N_{row} n_t L_{pv1} N2 L_{pv2} c_b \quad (2.95)$$

όπου  $c_b$  το κόστος βάσεων στήριξης των δομικών στοιχείων ( $Euro/m^2$ ).

Τα κόστη  $C_{c,dc}$ ,  $C_{c,ac}$ , υπολογίζονται ως εξής:

$$C_{c,dc} = PL_{dc} c_{dc} \quad (2.96)$$

$$C_{c,ac} = PL_{ac} c_{ac} \quad (2.97)$$

όπου:

$C_{dc}(Euro/kW/m^2)$ : κόστος DC καλωδίων

$C_{ac}(Euro/kW/m^2)$ : κόστος AC καλωδίων

Το κόστος  $C_{i/t}$  δίνεται από την σχέση:

$$C_{i/t} = PL_{i/t} c_{i/t} \quad (2.98)$$

όπου  $c_{i/t}(Euro/kW/m^2)$  το κόστος του μετασχηματιστή διασύνδεσης.

Το κόστος  $C_{I,C}$  είναι:

$$C_{I/C} = PL_{I/C} c_{ic} \quad (2.99)$$

όπου  $c_{ic}(Euro/kW/m^2)$  το κόστος του καλωδίου διασύνδεσης.

Η παρούσα αξία του συνολικού κόστους συντήρησης του Φ/Β πάρκου κατά την διάρκεια του χρόνου ζωής του είναι::

$$C_M(\vec{x}) = (N_i N_s N_p \frac{P_{M,STC}}{1000} M_{pv} + N_i P_{i,n} M_{inv} + M_{i/t} + M_{c,dc} + M_{c,ac} + M_{IC})(1+g) \frac{1 - (\frac{1+g}{1+d_i})^n}{d_i - g} + R_{TC} \quad (2.100)$$

όπου:

$M_{PV}(Euro/kW_p)$ : ετήσιο κόστος συντήρησης Φ/Β πλαισίων.

$M_{inv}(Euro/kW_p)$ : ετήσιο κόστος συντήρησης μετατροπέων DC/AC.

$M_{i/t}(Euro)$ : ετήσιο κόστος συντήρησης μετασχηματιστή διασύνδεσης.

$M_{c,dc}(Euro)$ : ετήσιο κόστος συντήρησης DC καλωδίων.

$M_{c,ac}(Euro)$ : ετήσιο κόστος συντήρησης AC καλωδίων.

$M_{IC}$ : ετήσιο κόστος συντήρησης καλωδίου διασύνδεσης.

$g(\%)$  : ετήσιο ποσοστό πληθωρισμού.

$d_i(\%)$  : προεξοφλητικό επιτόκιο (discount rate).

Το κόστος επιδιόρθωσης των μετατροπέων DC/AC,  $R_{TC}(Euro)$  :, υπολογίζεται ως εξής:

$$R_{TC} = N_i P_{i,n} R_{cost} S_{rep} \quad (2.101)$$

όπου:

$$S_{rep} = \sum_{\forall j=k^*} \frac{(1+g)^j}{(1+d_i)^j} \quad (2.102)$$

και  $k^*$  οι αριθμοί των ετών που χρειάζονται επιδιόρθωση οι μετατροπείς DC/AC. Η τιμή του  $k^*$  εξαρτάται από την χρονική περίοδο  $T_r(year)$  μεταξύ των επιδιόρθώσεων των μετατροπέων που πρέπει να γίνουν που δίνεται από την σχέση:

$$T_r = \left\lceil \frac{n}{n_{rep}} \right\rceil \quad (2.103)$$

$$n_{rep} = \frac{24 * n * 365}{MTBF} \quad (2.104)$$

όπου  $n_{rep}$  είναι ο αριθμός των επισκευών και  $MTBF(hours)$  είναι ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών των μετατροπέων DC/AC, ο οποίος ορίζεται από τον κατασκευαστή των μετατροπέων.

Τα ετήσια κόστη συντήρησης των DC και AC καλωδίων υπολογίζονται από τις σχέσεις:

$$M_{c,dc} = PL_{dc} m_{dc} \quad (2.105)$$

και

$$M_{c,ac} = PL_{ac} m_{ac} \quad (2.106)$$

όπου  $m_{dc}, m_{ac}$  ( $Euro/kW/m$ ) είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης των DC και των AC καλωδίων αντίστοιχα, ανά μονάδα μήκους και μεταφερόμενης ισχύος.

Το ετήσιο κόστος συντήρησης του μετασχηματιστή διασύνδεσης είναι:

$$M_{i/t} = P_{i/c} m_{i/t} \quad (2.107)$$

όπου  $m_{i/t}$  ( $Euro/MW_p$ ) είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης του μετασχηματιστή διασύνδεσης, ανά μονάδα μήκους και ισχύος.

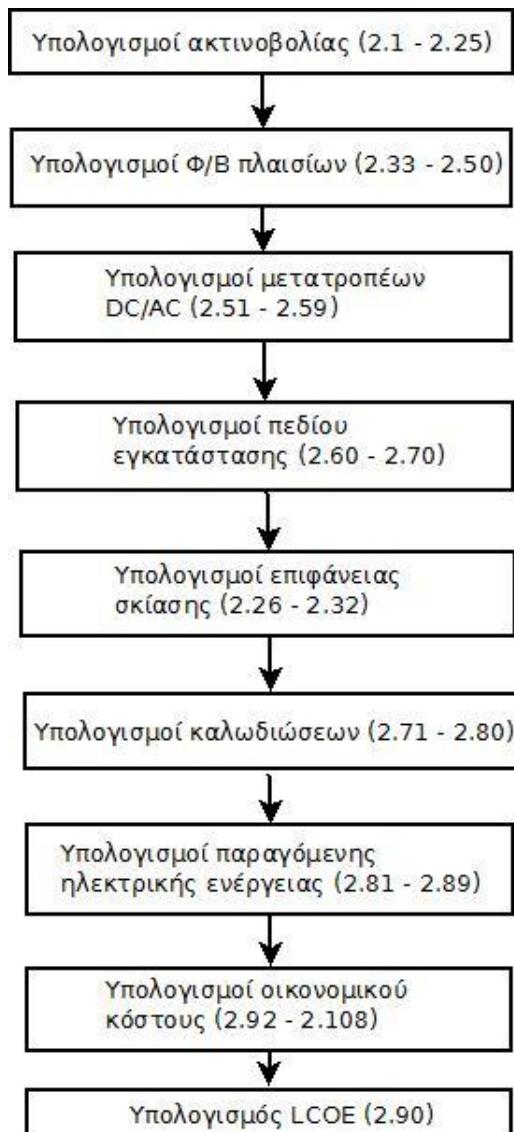
Το ετήσιο κόστος συντήρησης του καλωδίου διασύνδεσης είναι:

$$M_{IC} = PL_{I/C} m_{ic} \quad (2.108)$$

όπου  $m_{ic}$  ( $Euro/MW_p/m$ ) είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης του καλωδίου διασύνδεσης, ανά μονάδα μήκους και ισχύος.

## 2.3 Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάστηκε αναλυτικά η μεθοδολογία με την οποία υπολογίζεται το κόστος ανά μονάδα ενέργειας μιας συγκεκριμένης διάταξης των Φ/Β στοιχείων, με απώτερο σκοπό την εύρεση των βέλτιστων τιμών των σχεδιαστικών παραμέτρων οι οποίες οδηγούν στην ελαχιστοποίηση της ποσότητας αυτής. Στα επόμενα κεφάλαια θα εξηγήσουμε τον αλγόριθμο εύρεσης της βέλτιστης λύσης για το δεδομένο πρόβλημα, χρησιμοποιώντας εξελικτικούς αλγόριθμους σε σύστημα παράλληλης επεξεργασίας. Η αντικειμενική συνάρτηση που θα θέσουμε στους εξελικτικούς αλγόριθμους είναι η εκτέλεση των παραπάνω μεθόδων για τον υπολογισμό του κόστους ανά μονάδα ενέργειας, για συγκεκριμένες τιμές των σχεδιαστικών παραμέτρων. Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος δέχεται στην είσοδό της το διάνυσμα  $\vec{x} = [N_s, N_p, N_r, F_y, \beta, DIM_1]$ , την διάρκεια ζωής του Φ/Β συστήματος,  $n$ , καθώς την τιμή του προεξοφλητικού επιτοκίου,  $d_i$ , και στην έξοδο επιστρέφει τις τιμές που υπολόγισε για τις παραμέτρους  $LCOE, C_c, C_m$ . Η μεταβλητή  $LCOE$  εκφράζει το κόστος ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας και είναι η τιμή που ελαχιστοποιεί ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης. Αναλυτικά τα βήματα για τον υπολογισμό της αντικειμενικής συνάρτησης φαίνονται στο Σχήμα 2.10.



Σχήμα 2.10: Εκτέλεση υπολογισμών της αντικειμενικής συνάρτησης (στις παρενθέσεις σημειώνεται ποιες εξισώσεις από αυτές που περιγράψαμε χρησιμοποιούνται σε κάθε μοντέλο υπολογισμού).



# Κεφάλαιο 3

## Παράλληλα συστήματα επεξεργασίας

---

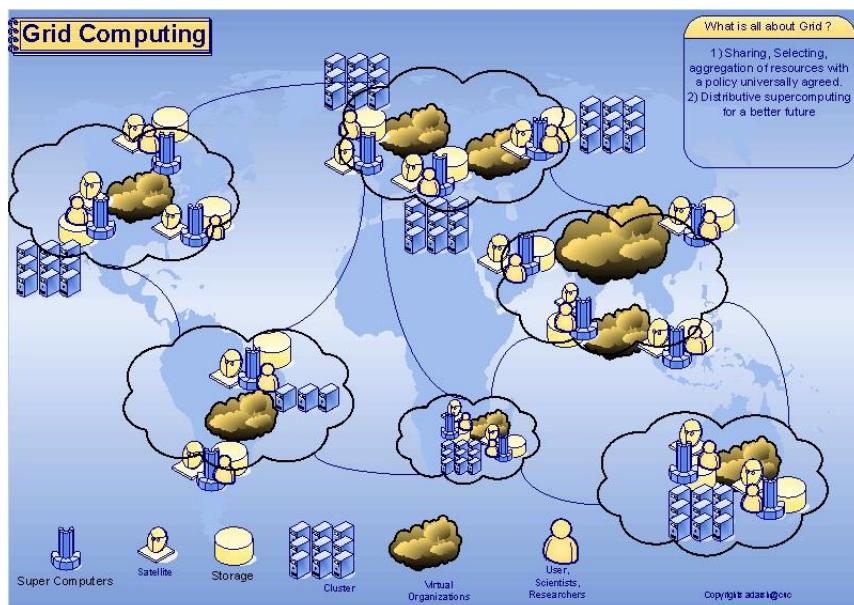
### 3.1 Υπολογιστές Πλέγματος (Grid Computing)

Η επεξεργασία με υπολογιστή πλέγματος είναι μια μέθοδος για επεξεργασία δεδομένων κατά την οποία μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ταυτόχρονα υπολογιστικούς πόρους (CPU, μνήμη, αποθηκευτικούς χώρους κλπ.) από πολλά μηχανήματα, είτε σε τοπικό επίπεδο (super-computers) είτε αυτοί οι πόροι είναι κατανεμημένοι σε μηχανήματα σε διαφορετικά γεωγραφικά μέρη. Το πλεονέκτημα της χρήσης υπολογιστή πλέγματος για επεξεργασία δεδομένων είναι ότι μπορούμε να επιταχύνουμε την εκτέλεση πολύπλοκων προγραμμάτων (επιστημονικών, τεχνικών κλπ.) χρησιμοποιώντας όλους τους διαθέσιμους πόρους για την παράλληλη (ταυτόχρονη) εκτέλεση πολλών λειτουργιών ενός προγράμματος. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να επεξεργαστούμε δεδομένα τα οποία είναι αδύνατο να εκτελεστούν σε λογικό χρόνο από έναν συμβατικό υπολογιστή. Για παράδειγμα, το πρόγραμμα SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence) χρησιμοποιεί πόρους από απλούς συμβατικούς υπολογιστές χρηστών σε όλο τον κόσμο για την επεξεργασία των δεδομένων που λαμβάνει από τους δορυφόρους. Επίσης, στον Μεγάλο Επιταχυντή Σωματιδίων του CERN χρησιμοποιούνται συστήματα κατανεμημένης επεξεργασίας για την ανάλυση των (τεράστιων σε όγκο) δεδομένων που λαμβάνονται από τις συγκρούσεις σωματιδίων στον επιταχυντή. Η εφαρμογές ποικίλουν, και με την πάροδο του χρόνου ολοένα και αυξάνεται η χρήση grid συστημάτων.

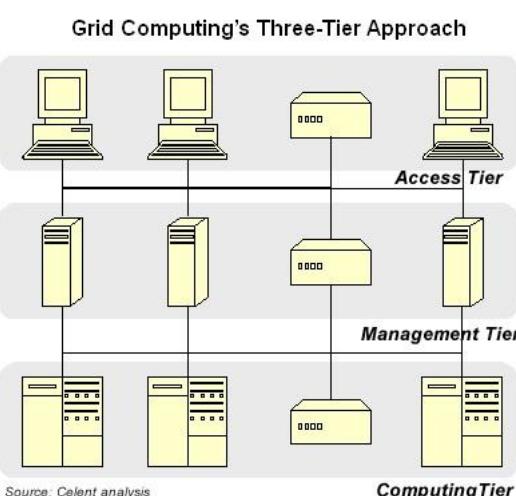
Για την χρήση των διαθέσιμων υπολογιστικών πόρων σε έναν υπολογιστή πλέγματος συνήθως εγκαθίσταται από τον διαχειριστή του υπολογιστή το απαραίτητο middleware, το οποίο αναθέτει διεργασίες χρηστών στους διαθέσιμους υπολογιστικούς πόρους. Με αυτόν τον τρόπο ο χρήστης δεν χρειάζεται να γνωρίζει ποιοις πόρους θα χρησιμοποιήσει και πώς, ούτε να κάνει οποιεσδήποτε ρυθμίσεις στο υλικό του υπολογιστή πλέγματος. Με άλλα λόγια, το middleware αναλαμβάνει την διαχείριση των πόρων του δικτύου πλέγματος με τρόπο αδιαφανή προς τον χρήστη. Οι χρήστες έχουν στην διάθεσή τους ορισμένο αριθμό υπολογιστικών πόρων και με τα κατάλληλα batch scripts αναθέτουν εργασίες προς εκτέλεση στους διαθέσιμους πόρους. Η σύνδεση των διαθέσιμων πόρων γίνεται δυναμικά από το σύστημα, με το οποίο μπορούμε να εκτελέσουμε μεγάλης κλίμακας κατανεμημένες εφαρμογές. Στο [15] περιγράφονται αναλυτικά όλες οι ιδιότητες ενός υπολογιστή

πλέγματος και οι δυνατότητες που αποκτούμε με την χρήση του.

Το μεγάλο στοίχημα, και σημαντικό πεδίο έρευνας, είναι η διασύνδεση σε ένα ενιαίο grid σύστημα πολλών διαφορετικών τύπων συσκευών (home pc's, tablets, PDAs, κινητά τηλέφωνα κλπ.) που βρίσκονται σε οποιαδήποτε γεωγραφική περιοχή με σκοπό την πλήρη αξιοποίηση τους από οποιονδήποτε χρήστη σε οποιοδήποτε τόπο, με αδιαφανή τρόπο. Ένα τέτοιο μελλοντικό διαδίκτυο για να είναι εφικτό χρειάζεται να καθιερωθούν τα κατάλληλα πρότυπα για κάθε δυνατή υπηρεσία του grid, έτσι ώστε το σύστημα να μπορεί να αξιοποιήσει τους πόρους κάθε διαφορετικής συσκευής που εμπεριέχεται σε αυτό, με τρόπο αδιαφανή από τον χρήστη.



Σχήμα 3.1: Γενική μορφή συστήματος υπολογιστή πλέγματος (πηγή εικόνας: <http://www.adarshpatil.com/newsite/images/grid-computing.gif>).



Σχήμα 3.2: Επίπεδα λειτουργιών ενός υπολογιστή πλέγματος (πηγή εικόνας: <http://reports2.celent.com/PressReleases/20060224/GridComputing.asp>).

### 3.2 Αρχιτεκτονικές συστημάτων παράλληλης επεξεργασίας

Ο πιο δημοφιλής τρόπος κατάταξης των υπολογιστικών συστημάτων με βάση την αρχιτεκτονική τους, προτάθηκε από τον Flynn το 1966. Κατηγοριοποιεί τα συστήματα υπολογιστών με βάση τον τρόπο που οι εντολές (instructions) και τα δεδομένα (data) διοχετεύονται στο σύστημα. Συγκεκριμένα, ο Flynn πρότεινε τα εξής είδη συστημάτων [16]:

- SISD (Single Instruction - Single Data)
- SIMD (Single Instruction - Multiple Data)
- MISD (Multiple Instruction - Single Data)
- MIMD (Multiple Instruction - Multiple Data)

όπου:

**SISD (Single Instruction - Single Data):** Τα SISD μηχανήματα είναι συμβατικοί ακολουθιακοί Η/Υ που επεξεργάζονται μία ροή εντολών και ένα σετ δεδομένων. Καλείται επίσης αρχιτεκτονική von Neumann.

**SIMD (Single Instruction - Multiple Data):** Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν μηχανήματα με πολλούς επεξεργαστές στους οποίους μια μονάδα ελέγχου διοχετεύει την ίδια εντολή σε όλους τους επεξεργαστές, αλλά κάθε επεξεργαστής χρησιμοποιεί δεδομένα από την δική του μνήμη, συνεπώς μπορούμε να έχουμε διαφορετικές ροές δεδομένων σε κάθε επεξεργαστή.

**MISD (Multiple Instruction - Single Data):** Εδώ έχουμε διαφορετικά σετ εντολών να αντίθενται στους διαθέσιμους επεξεργαστές, αλλά οι διαθέσιμοι επεξεργαστές αντλούν δεδομένα από μια κοινή μνήμη, δηλαδή επεξεργάζονται την ίδια ροή δεδομένων.

**MIMD (Multiple Instruction - Multiple Data):** Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν τα περισσότερα συστήματα παράλληλης επεξεργασίας. Διαθέτουμε πολλούς επεξεργαστές, κάθε ένας εκτελεί διαφορετικές εντολές και διαθέτει δική του ροή δεδομένων (είτε δική του μνήμη, είτε διαμοιραζόμενη).

Μια ειδική περίπτωση του MIMD μοντέλου, είναι το SPMD (Single Program - Multiple Data) μοντέλο. Σε αυτό το σύστημα διαθέτουμε πολλούς επεξεργαστές οι οποίοι εκτελούν το ίδιο πρόγραμμα, αλλά διαχωρίζουμε το τμήμα κώδικα που θα επεξεργαστεί κάθε διαθέσιμη μονάδα με διακλαδώσεις. Η μνήμη μπορεί να είναι είτε διαμοιραζόμενη, είτε κατανεμημένη σε κάθε διαθέσιμο πόρο του συστήματος. Το σύστημα παράλληλης επεξεργασίας του Πολυτεχνείου Κρήτης ανήκει σε αυτήν την κατηγορία.

### 3.3 Ο υπολογιστής πλέγματος του Πολυτεχνείου Κρήτης

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούμε τον υπολογιστή πλέγματος του Πολυτεχνείου Κρήτης για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του Φ/Β πάρκου που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Οι πόροι και το λογισμικό που διαθέτει ο υπολογιστής πλέγματος είναι οι εξής:

- 1 server HP PROLIANT DL320R05 Generation 5 (2xIntel Xeon 3070, 4GB memory, 2x72GB HDD 15000rpm SAS 3.5 Hot Plug ).
- 14 σκληροί δίσκοι με συνολική χωρητικότητα 1152GB (15000rpm, SAS 3.5 Hot Plug supported).
- 44 υπολογιστικοί κόμβοι όπου ο καθένας διαθέτει:
  - 2 επεξεργαστές AMD Opteron Model 2218 (2.6GHz, 2MB, 95W).
  - 4GB μνήμη.
  - 2 σκληρούς δίσκους με χωρητικότητα 250GB.
  - Hard Disk Controller Cache 64MB
- C/C++, Java, Python, FORTRAN compilers.
- MySql database.
- Matlab, Octave συστήματα υπολογισμών.
- TORQUE, OpenMPI, maui middleware για διαχείρηση εργασιών στο πλέγμα.

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε σε γλώσσα C και για την υποβολή εργασιών στο πλέγμα χρησιμοποιούμε το TORQUE, ενώ για την διαδιεργασιακή επικοινωνία μεταξύ των εργασιών που κατανέμουμε στους υπολογιστικούς κόμβους χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη MPI.

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν αναφορές για διάφορα μοντέλα παράλληλης επεξεργασίας και εργαλεία που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για να φτιάξουμε παράλληλα προγράμματα [17], [18].

# Κεφάλαιο 4

## Γενετικοί Αλγόριθμοι

---

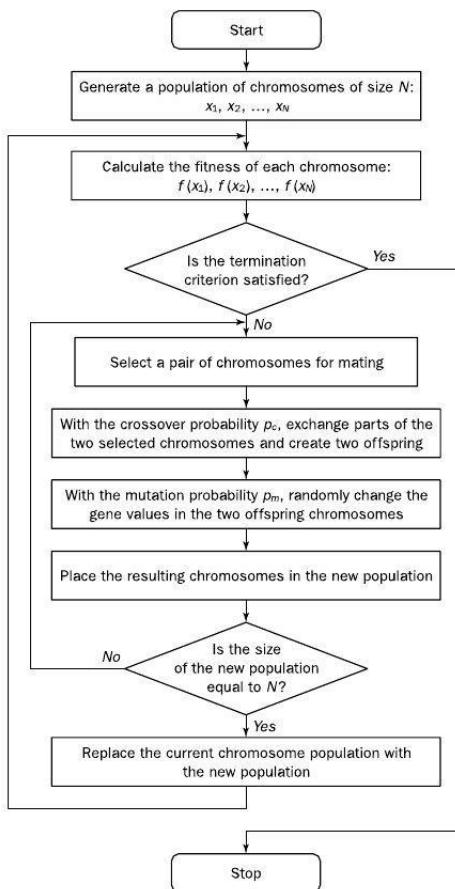
### 4.1 Γενικά

Είναι μια διαδικασία βασισμένη στη βιολογική εξέλιξη και χρησιμοποιείται για να βρει λύσεις σε προβλήματα που μπορούν να περιγραφούν ως μαθηματικό πρόβλημα και είναι δύσκολο να λυθούν με κλασικούς αλγορίθμους αναζήτησης. Αυτά είναι προβλήματα με πολλές μεταβλητές, το οποίο συνεπάγεται μεγάλο χώρο λύσεων και επομένως δεν υπάρχει εφικτός τρόπος να βρούμε μια βέλτιστη λύση σε λογικό χρόνο χρησιμοποιώντας κλασικές μεθόδους επίλυσης. Επινοήθηκε από τον καθηγητή John Holland και αναπτύχθηκε από αυτόν και τους φοιτητές του την δεκαετία του 1960 και του 1970.

Η βασική ιδέα είναι ίδια με την βιολογική εξέλιξη. Στη βιολογική εξέλιξη, υπάρχουν τα γονίδια ενός οργανισμού, τα οποία ομαδοποιημένα περιγράφουν ένα χρωμόσωμα του οργανισμού. Όταν προκύπτει ένας απόγονος, κληρονομεί γονίδια από τους γονείς του. Στους γενετικούς αλγορίθμους κωδικοποιούμε το σύνολο των μεταβλητών που περιγράφουν μια λύση. Η κάθε μεταβλητή αντιπροσωπεύει ένα γονίδιο, και όλες οι μεταβλητές αντιπροσωπεύουν ένα χρωμόσωμα. Υπάρχει μια συνάρτηση (αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση κόστους ή συνάρτηση αξιολόγησης) η οποία εκτελείται για συγκεκριμένες μεταβλητές (χρωμόσωμα) και μας επιστρέφει μια τιμή, την οποία χρησιμοποιεί ο αλγόριθμος για να κρίνει πόσο “καλό” ή “κακό” είναι το γονίδιο αυτό. Ένας γενετικός αλγόριθμος διαθέτει έναν πληθυσμό χρωμοσωμάτων αρχικοποιημένο τυχαία και σε κάθε επανάληψη αξιολογεί τα χρωμοσώματα, έπειτα επιλέγει τα χρωμοσώματα που θα προχωρήσουν στην επόμενη γενιά και εκτελεί λειτουργίες διασταύρωσης και μετάλλαξης. Όταν σχηματιστεί ο νέος πληθυσμός, επαναλαμβάνει την διαδικασία αυτή μέχρι να εκτελεστεί ένας προκαθορισμένος αριθμός επαναλήψεων. Κατά τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου, χρωμοσώματα από ένα σύνολο χρωμοσωμάτων (πληθυσμός), ανταλλάσουν γενετικό κώδικα για να δημιουργήσουν νέα γονίδια και υπολογίζουν μια τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση. Στόχος είναι η εύρεση μιας βέλτιστης λύσης, δηλαδή η εύρεση του χρωμοσώματος (τιμές μεταβλητών) που δίνει την βέλτιστη τιμή για την αντικειμενική μας συνάρτηση.

Όπως στη βιολογία υπάρχουν διαδικασίες συνδιασμών γονιδίων και γονιδιωκής μετάλλαξης,

έτσι και στους γενετικούς αλγόριθμους ορίζονται τέτοιες διαδικασίες. Με βάση κάποιο χριτήριο επιλέγονται χρωμοσώματα από ένα σύνολο χρωμοσωμάτων, το οποίο ονομάζεται πληθυσμός (στην αρχή της εκτέλεσης του αλγορίθμου το αρχικοποιούμε τυχαία), και ανταλλάσσουν μέρος του γονιδιόματός τους, με συνέπεια να δημιουργούνται καινούρια χρωμοσώματα. Μετάλλαξη ενός χρωμοσώματος σημαίνει ότι με κάποιο τρόπο το χρωμόσωμα αυτό υφίσταται τροποποίηση σε ένα ή περισσότερα γονίδια. Θα αναλύσουμε παρακάτω μεθόδους επιλογής γονέων, διασταύρωσης και μετάλλαξης.



Σχήμα 4.1: Διάγραμμα ροής ενός Γενετικού Αλγόριθμου (πηγή εικόνας: <http://my.opera.com/blu3c4t/blog/show.dml/2636486>)

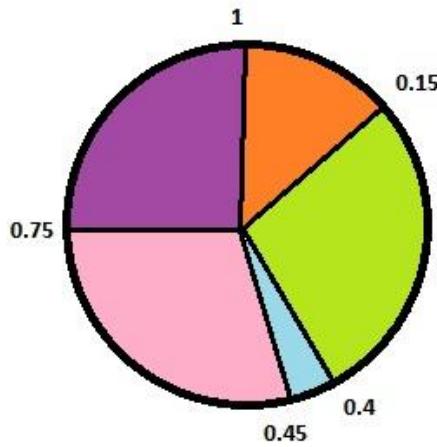
Οι γενετικοί αλγόριθμοι μπορούν να βρουν λύση σε προβλήματα που έχουν πολυδιάστατο χώρο λύσεων σε πολύ γρήγορο χρόνο, αλλά δεν εγγυώνται βέλτιστη λύση πάντα διότι είναι στοχαστική μέθοδος αναζήτησης (περιέχει τυχαιότητα). Η απόδοση ενός γενετικού αλγορίθμου εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως η επιλογή της συνάρτησης αξιολόγησης (πολύ σημαντικό), η δομή του χώρου λύσεων (χώρος λύσεων με ασυνέχειες πιθανόν να οδηγήσει σε τοπικά βέλτιστα), η επιλογή κατάλληλων μεθόδων για επιλογή γονέων, διασταύρωση και μετάλλαξη, καθώς και ο ρυθμός με τον οποίον θα πραγματοποιούνται αυτές οι διαδικασίες, το σύνολο γονιδίων στον πληθυσμό κλπ. Στο Σχήμα 4.1 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής ενός γενετικού αλγορίθμου.

## 4.2 Διαδικασία Επιλογής (Selection)

Σε κάθε επανάληψη του αλγορίθμου, αφού υπολογιστούν οι τιμές της αντικειμενικής συνάρτησης, επιλέγονται δυο χρωμοσώματα από τον πληθυσμό για να δημιουργήσουν δυο καινούρια. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για την πράξη της επιλογής. Η πιο διαδεδομένη, την οποία χρησιμοποιούμε και στην υλοποίησή μας, είναι η μέθοδος του τροχού της ρουλέτας. Τα χρωμοσώματα λαμβάνουν μια τιμή πιθανότητας να επιλεγούν. Η πιθανότητα αυτή για το κάθε χρωμόσωμα εξαρτάται από την τιμή που επέστρεψε η συνάρτηση αξιολόγησης για το χρωμόσωμα αυτό. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της συνάρτησης αξιολόγησης, τόσο αυξάνεται η πιθανότητα να επιλεγεί το χρωμόσωμα αυτό. Αφού επιλεγούν δυο χρωμοσώματα, προχωράμε στη διαδικασία της διασταύρωσης.

Πίνακας 4.1: Παράδειγμα επιλογής με την μέθοδο του τροχού της ρουλέτας

Χρωμόσωμα	$\Sigma_{\text{κορ}}$	$p_{\text{selected}}$
chrome1	3	0.15
chrome2	5	0.4
chrome3	1	0.45
chrome4	6	0.75
chrome5	5	1



Σχήμα 4.2: Ο τροχός της ρουλέτας σύμφωνα με τον οποίον γίνεται η επιλογή.

Στο παράδειγμα που φαίνεται στον Πίνακα 4.1 και στο Σχήμα 4.2, βλέπουμε πως αντιστοιχούν οι πιθανότητες επιλογής για κάθε χρωμόσωμα στον τροχό της ρουλέτας. Η τιμή της πιθανότητας για το κάθε χρωμόσωμα δίνεται από την σχέση:

$$p(i) = p(i - 1) + \frac{\text{fitness}(i)}{\text{sum\_of\_fitnesses}}, 1 \leq i \leq \text{POP\_SIZE} \quad (4.1)$$

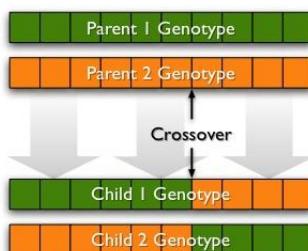
όπου  $p(0) = 0$ . Έπειτα, λαμβάνουμε μια τυχαία τιμή στο  $[0, \text{sum\_of\_probs}]$ , και επιλέγουμε το χρωμόσωμα στου οποίου το εύρος υπάγεται η τυχαία τιμή. Για παράδειγμα, αν  $p_{\text{select}} = 0.5$ , τότε επιλέγεται το χρωμόσωμα 4, αν  $p_{\text{select}} = 0.2$ , τότε επιλέγεται το χρωμόσωμα 2 κοντά.

### 4.3 Διαδικασία Διασταύρωσης (Crossover)

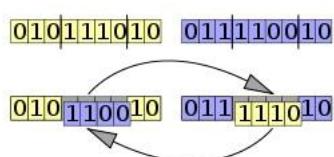
Στη διαδικασία διασταύρωσης, επιλέγονται 2 χρωμοσώματα τα οποία θα ανταλλάξουν έναν αριθμό από γονίδια με σκοπό την δημιουργία 2 νέων χρωμοσωμάτων τα οποία προστίθενται στον νέο πληθυσμό. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται εώς ο νέος πληθυσμός να έχει ίδιο πλήθος χρωμοσωμάτων με τον αρχικό πληθυσμό. Με την διαδικασία της μετάλλαξης ο αλγόριθμος κάνει μεγάλα άλματα στον χώρο αναζήτησης, συνεπώς μπορεί να εξερευνήσει για το ολικό βέλτιστο σε πολλές περιοχές του χώρου αναζήτησης. Υπάρχουν αρκετές μέθοδοι για διασταύρωση, μερικές από τις πλέον διαδεδομένες είναι:

- One-Point crossover: Επιλέγεται τυχαία ένα σημείο του χρωμοσώματος. Τα νέα χρωμοσώματα αποτελούνται από τα διαφορετικά μέρη (που ορίζει το σημείο) των 2 γονέων (Σχήμα 4.3).
- Two-Point crossover: Όμοια με το one-point crossover, με τη διαφορά ότι επιλέγονται τυχαία 2 σημεία και ανταλλάσσεται το ένα μέρος που ορίζουν τα 2 αυτά σημεία (Σχήμα 4.4).
- Uniform crossover: Τα γονίδια του νέου χρωμοσώματος μπορεί να είναι από οποιονδήποτε γονέα με πιθανότητα 50% (Σχήμα 4.5.)

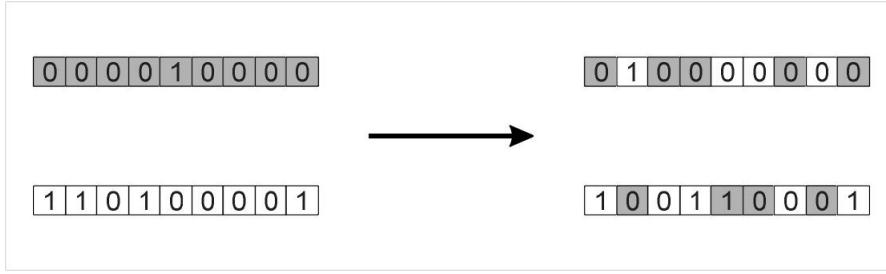
Δυο χρωμοσώματα δεν είναι απαραίτητο ότι θα διασταυρώνονται κάθε φορά. Η διαδικασία της διασταύρωσης πραγματοποιείται με πιθανότητα  $p_{cross}$ , η οποία αποτελεί παράμετρο εισόδου του αλγορίθμου ( $0 \leq p_{cross} \leq 1$ ).



Σχήμα 4.3: One-Point crossover



Σχήμα 4.4: Two-Point crossover

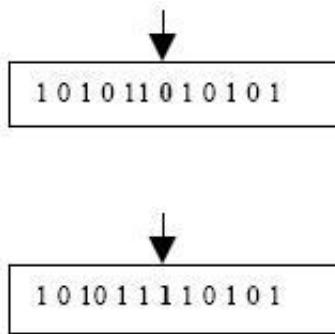


Σχήμα 4.5: Uniform crossover

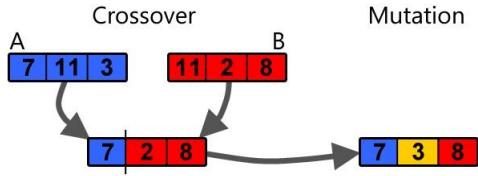
## 4.4 Διαδικασία Μετάλλαξης (Mutation)

Στη διαδικασία της μετάλλαξης αλλάζει ένα ή περισσότερα γονίδια του χρωμοσώματος. Ο λόγος που έχουμε αυτή την διαδικασία στους Γενετικούς Αλγορίθμους είναι ότι έτσι αποφεύγουμε την σύγκλιση σε τοπικά βέλτιστα. Η διαδικασία της μετάλλαξης πραγματοποιείται με πιθανότητα  $p_{mut}$  ( $0 \leq p_{mut} \leq 1$ ). Συνήθως θέτουμε μικρές τιμές στην  $p_{mut}$  ( $< 20\%$ ), γιατί αν θέσουμε μεγάλη τιμή ο αλγόριθμος τείνει να συμπεριφέρεται σαν τυχαία αναζήτηση. Οι πιο συνηθισμένοι τύποι μετάλλαξης στους γενετικούς αλγορίθμους είναι:

- Flip-bit mutation: Αλλάζει 1 bit (1 γονίδιο) του χρωμοσώματος αντιστρέφοντας την τιμή του. Πραγματοποιείται μόνο σε χρωμοσώματα κωδικοποιημένα σε bit-string μορφή (Σχήμα 4.6).
- Gaussian mutation: Προσθέτει μια τυχαία Gaussian μεταβλητή είτε σε ένα, είτε σε όλα τα γονίδια του χρωμοσώματος. Πραγματοποιείται μόνο σε χρωμοσώματα ακέραιων ή πραγματικών αριθμών.
- Uniform mutation: Δίνει σε ένα τυχαία επιλεγμένο γονίδιο του χρωμοσώματος μια τυχαία τιμή, η οποία όμως πρέπει να βρίσκεται εντός των άνω και κάτω περιορισμών του γονιδίου (Σχήμα 4.7). Πραγματοποιείται μόνο σε χρωμοσώματα ακέραιων ή πραγματικών αριθμών.



Σχήμα 4.6: Flip-bit mutation



Σχήμα 4.7: Uniform mutation

## 4.5 Προαγωγή του καλύτερου (Elitism)

Ανάλογα με το είδος του γενετικού αλγορίθμου, μπορούμε να ορίσουμε την προαγωγή του καλύτερου, κατά την οποία τα  $N$  καλύτερα χρωμοσώματα ( $1 \leq N \leq pop_{size}$ ) προχωράνε στην επόμενη γενιά χωρίς να πραγματοποιήσουν διαδικασίες διασταύρωσης και μετάλλαξης. Αυτό γίνεται έτσι ώστε να κρατήσουμε το γονιδίωμα του καλύτερου χρωμοσώματος μέχρι το τέλος της αναζήτησης του αλγορίθμου. Συνήθως επιλέγεται να προάγονται 1 ή 2 καλύτερα γονίδια.

Περισσότερες τεχνικές που αφορούν γενετικούς αλγορίθμους περιγράφονται στα [19], [20].

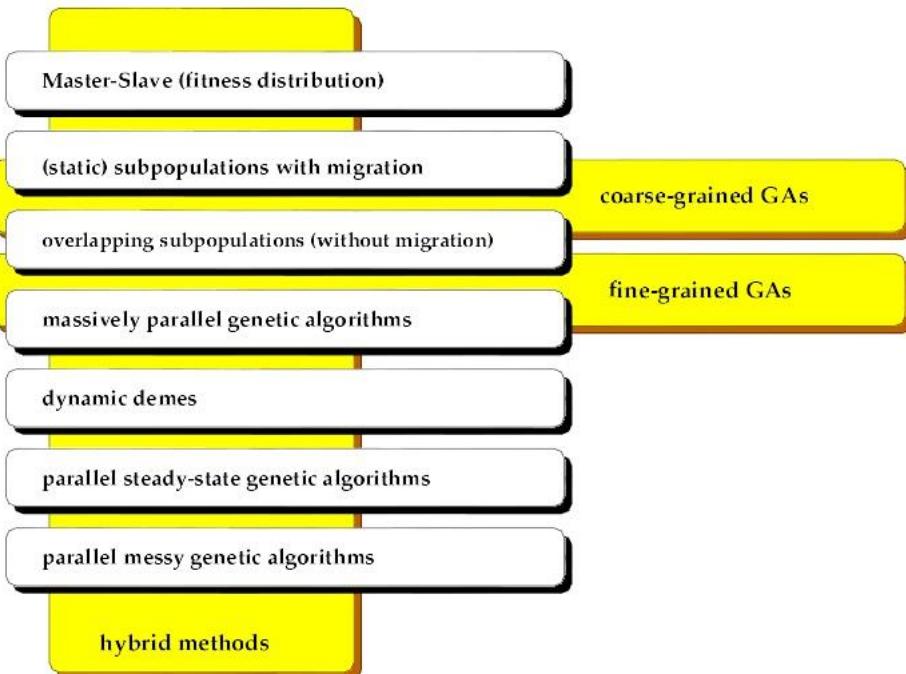
## 4.6 Παράλληλοι Γενετικοί Αλγόριθμοι

### 4.6.1 Γενικά

Οι παράλληλοι γενετικοί αλγόριθμοι είναι υλοποιήσεις των γενετικών αλγορίθμων σε συστήματα παράλληλης επεξεργασίας. Μπορούμε να κερδίσουμε σημαντικά σε χρόνο εκτέλεσης και ποιότητα λύσης σε σύγκριση με τους ακολουθιακούς (όχι παράλληλους) γενετικούς αλγορίθμους λόγω των πολλών επεξεργαστών που διαθέτουμε. Ειδικότερα, σε προβλήματα με μεγάλη πολυπλοκότητα της αντικειμενικής συνάρτησης και μεγάλου χώρου λύσεων (όπως το πρόβλημα βελτιστοποίησης της παρούσας εργασίας), δεν είναι εύκολα εφικτό να εντοπίσουμε την βέλτιστη λύση σε λογικό χρόνο με τους ακολουθιακούς γενετικούς αλγορίθμους. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι για αναζήτηση με παράλληλους γενετικούς αλγορίθμους, ο καθένας με τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Στο Σχήμα 4.8 παρουσιάζεται μια κατηγοριοποίηση των παράλληλων γενετικών αλγορίθμων. Στις επόμενες ενότητες θα περιγράψουμε συνοπτικά ορισμένα είδη παράλληλων γενετικών αλγορίθμων.

### 4.6.2 Master-Slave παραλληλοποίηση

Αυτή η μέθοδος είναι από τις πιο διαδεδομένες εφαρμογές παράλληλων γενετικών αλγόριθμων. Σε αυτή την μέθοδο, χρησιμοποιείται ένας σταθερός αριθμός από χρωμοσώματα στον πληθυσμό και η αξιολόγηση κάθε χρωμοσώματος γίνεται παράλληλα (1 χρωμόσωμα ανατίθεται σε κάθε διαθέσιμη επεξεργαστική μονάδα). Οι διαδικασίες επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης γίνονται συνολικά από μια διεργασία master η οποία αναθέτει χρωμοσώματα σε επεξεργαστικές μονάδες, λαμβάνει τα αποτελέσματα της εκτέλεσης της αντικειμενικής συνάρτησης, εκτελεί τις πράξεις επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης κι επαναλαμβάνει αυτή την διαδικασία έως ότου ολοκληρωθεί ο μέγιστος αριθμός επαναλήψεων που έχουμε θέσει. Στην ουσία, είναι ίδιος με τους ακολουθιακούς γενετικούς



Σχήμα 4.8: Κατηγορίες παράλληλων γενετικών αλγορίθμων.

αλγόριθμους. Αν ο master περιμένει να ολοκληρώθει η αξιολόγηση των χρωμοσωμάτων, τότε ο αλγόριθμος καλείται σύγχρονος. Διαφορετικά, καλείται ασύγχρονος.

#### 4.6.3 Στατικοί Υποπληθυσμοί με μετανάστευση

Σε αυτό το είδος παράλληλου γενετικού αλγορίθμου χωρίζουμε τον αρχικό πληθυσμό σε υποπληθυσμούς και κάθε χρωμόσωμα ανταγωνίζεται άλλα χρωμοσώματα μόνο από τον υποπληθυσμό όπου ανήκει. Αλλά, ανά τακτά χρονικά διαστήματα οι υποπληθυσμοί μπορούν να ανταλλάξουν χρωμοσώματα μεταξύ τους. Αυτή η διαδικασία καλείται μετανάστευση, και αν ένα χρωμόσωμα μπορεί να μεταναστεύσει σε οποιοδήποτε υποπληθυσμό ο αλγόριθμος λέγεται ότι ακολουθεί μοντέλο νησιού (island model). Αν η ανταλλαγή μπορεί να γίνει μόνο στους γειτονικούς υποπληθυσμούς, τότε λέμε ότι ακολουθεί stepping-stone μοντέλο. Αυτό το είδος παράλληλου γενετικού αλγόριθμου είναι σχετικά αποδοτικό σε χρόνο και ποιότητα λύσης, αλλά παρουσιάζει πρόβλημα επεκτασιμότητας (παύει να είναι αποδοτικό όσο μεγαλώνει ο αριθμός των διαθέσιμων επεξεργαστικών μονάδων).

#### 4.6.4 Στατικοί υπερκαλυπτόμενοι υποπληθυσμοί χωρίς μετανάστευση

Αυτό το μοντέλο είναι παρόμοιο με το προηγούμενο, αλλά δεν υπάρχει μετανάστευση μεταξύ των υποπληθυσμών. Αντίθετα, μερικά χρωμοσώματα μπορούν να ανήκουν σε παραπάνω από έναν υποπληθυσμούς. Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται κυρίως σε συστήματα με διαμοιραζόμενη (κοινή) μνήμη.

#### 4.6.5 Μαζικά παράλληλοι γενετικοί αλγόριθμοι

Σε αυτήν την μέθοδο διαθέτουμε ένα πληθυσμό από χρωμοσώματα, αλλά τα χρωμοσώματα περιορίζουν την αλληλεπίδρασή τους στα γειτονικά τους χρωμοσώματα. Η τοπολογία του πληθυσμού μπορεί να λάβει διάφορες μορφές (cube, hypercube, ring, torus klp.). Το κύριο μειονέκτημα αυτού του αλγορίθμου είναι το υψηλό κόστος επικοινωνίας μεταξύ των χρωμοσωμάτων.

#### 4.6.6 Δυναμικοί υποπληθυσμοί

Σε αυτή την μέθοδο δεν υπάρχει πληθυσμός, αλλά όλα τα χρωμοσώματα αντιμετωπίζονται ξεχωριστά το καθένα και οργανώνονται σε υποπληθυσμούς οι οποίοι αλλάζουν δυναμικά κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου. Η κύρια ιδέα σε αυτή την μέθοδο είναι να αποφύγουμε το να περιμένουμε τα πιο χρονοβόρα σε εκτέλεση χρωμοσώματα να ολοκληρώσουν την εκτέλεση της αντικειμενικής συνάρτησης. Με αυτόν τον τρόπο βελτιώνεται σημαντικά το ποσοστό χρησιμοποίησης των διαθέσιμων πόρων του συστήματος, μιας και οι πράξεις επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης γίνονται αφού έχει ολοκληρωθεί ένας σταθερός αριθμός από χρωμοσώματα. Όσο πιο μικρό το μέγεθος των υποπληθυσμών, τόσο πιο υψηλό το ποσοστό χρησιμοποίησης των πόρων. Επίσης δεν παρουσιάζει προβλήματα επεκτασιμότητας όσο αυξάνεται το πλήθος των υπολογιστικών πόρων. Το μοντέλο αυτό περιγράφεται αναλυτικά στα [21], [22].

#### 4.6.7 Άλλα είδη παράλληλων γενετικών αλγορίθμων

Άλλα είδη παράλληλων γενετικών αλγορίθμων αποτελούν οι παράλληλοι αλγόριθμοι σταθερής κατάστασης, οι ακατάστατοι παράλληλοι γενετικοί αλγόριθμοι, καθώς και υβριδικές υλοποιήσεις, δηλαδή συνδυασμοί των προηγούμενων μεθόδων. Περισσότερες πληροφορίες παρουσιάζονται στο [23].

## Κεφάλαιο 5

# Εφαρμογή παράλληλης επεξεργασίας και εξελικτικών αλγορίθμων στο σχεδιασμό Φ/Β συστημάτων μεγάλης κλίμακας

---

Η βελτιστοποίηση της διάταξης των Φ/Β στοιχείων σε Φ/Β σύστημα μεγάλης κλίμακας δεν είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί σε σύντομο χρόνο χρησιμοποιώντας συμβατικούς υπολογιστές με σειριακούς αλγορίθμους. Αυτό οφείλεται στην πολυπλοκότητα της αναζήτησης (μεγάλος και ασυνεχής χώρος λύσεων) καθώς και στην υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα της αντικειμενικής συνάρτησης. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναλύσουμε τις τεχνικές που χρησιμοποιήθηκαν, οι οποίες υλοποιήθηκαν σε σύστημα παράλληλης επεξεργασίας με σκοπό να επιταχύνουμε την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Αρχικά υλοποιήθηκε σύγχρονος Master-Slave παράλληλος γενετικός αλγόριθμος. Όπως θα δούμε και στα αποτελέσματα, με αυτόν τον τρόπο επιταχύνουμε συνολικά τον χρόνο εκτέλεσης της διαδικασίας εξέλιξης του γενετικού αλγορίθμου, αλλά με αυτό το μοντέλο δεν αξιοποιούμε αποτελεσματικά τους κόμβους του συστήματος. Με άλλα λόγια, δεν εκμεταλλεύμαστε στο έπακρο την υπολογιστική ισχύ των επεξεργαστικών μονάδων που διαθέτουμε, μιας και στο Master-Slave μοντέλο όλοι οι επεξεργαστές περιμένουν και το τελευταίο χρωμόσωμα του πληθυσμού να αξιολογηθεί πριν συνεχίσουν να εκτελούν αξιολογήσεις, με συνέπεια να οδηγούμαστε σε αρκετά χαμηλό ποσοστό χρησιμοποίησης του υπολογιστή πλέγματος. Στην συνέχεια, για να υπερκεράσουμε αυτό το εμπόδιο, χρησιμοποιούμε το μοντέλο Δυναμικών Πληθυσμών, το οποίο εγγυάται υψηλό ποσοστό χρησιμοποίησης των πόρων με καλή ποιότητα στην λύση του αλγορίθμου. Με αυτήν την μέθοδο ο αλγόριθμος αναζήτησης συγκλίνει στην βέλτιστη τιμή τις περισσότερες φορές της εκτέλεσής του. Όμως, η ποιότητα λύσης του είναι λίγο κατώτερη (όπως θα δούμε και στα αποτελέσματα), δηλαδή δεν εντοπίζει πάντα την ολικά βέλτιστη λύση παρά κάποια κοντινό σε αυτήν σημείο. Αυτό συμβαίνει διότι ο αριθμός των χρωμοσωμάτων στον πληθυσμό όπου πραγματοποιούμε την διαδικασία της επιλογής και διασταύρωσης ειναι αρκετά μικρότερος στον αλγόριθμο δυναμικών πληθυσμών από τον αντίστοιχο του Master-Slave αλγόριθμου. Επίσης, οι γενετικοί αλ-

γόριθμοι περιέχουν τυχαιότητα, το οποίο σε συνδυασμό με τον ανομοιόμορφο χώρο λύσης του προβλήματος, δεν εγγυάται πάντα την σύγκλιση στο ολικό βέλτιστο. Παρόλα αυτά, η απόκλιση είναι πολύ μικρή και μπορεί να θεωρηθεί βέλτιστη, όπως θα δούμε και στα αποτελέσματα από την εξαντλητική αναζήτηση στο επόμενο κεφάλαιο.

## 5.1 Περιγραφή του προβλήματος προς βελτιστοποίηση

Το μέγεθος που πρέπει να ελαχιστοποιηθεί είναι το κόστος της ενέργειας που παράγεται (Levelized Cost Of Electricity - LCOE), όπως αναφέραμε και στο Κεφάλαιο 2. Δηλαδή:

$$\text{minimize}_{\vec{x}} \{LCOE\} = \text{minimize}_{\vec{x}} \left\{ \frac{C_c(\vec{x}) + C_m(\vec{x})}{E_{tot}} \right\} \quad (5.1)$$

Οι παράμετροι των οποίων πρέπει να υπολογιστούν οι βέλτιστες τιμές είναι οι εξής:

- αριθμός Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά:  $N_s$
- αριθμός σειρών Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων παράλληλα:  $N_p$
- αριθμός γραμμών από συνδεδεμένα Φ/Β πλαισια σε κάθε Φ/Β μπλοκ:  $N_r$
- απόσταση μεταξύ των προσκείμενων block:  $F_y$
- γωνία κλίσης Φ/Β πλαισίων:  $\beta^\circ$
- μήκος που καταλαμβάνουν τα Φ/Β πλαισια στην νότια πλευρά της επιφάνειας εγκατάστασης:  $DIM_1$

Οι περιορισμοί για τις παραπάνω μεταβλητές είναι:

- $1 \leq N_s \leq N_{s,max}$
- $1 \leq N_p \leq N_{s,mpp}$
- $1 \leq N_r \leq 10$
- $0 \leq F_y \leq 50$
- $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$
- $0 \leq DIM_1 \leq DIM_{1,max}$

Στην περίπτωση που δεν έχουμε central inverters, τότε ο περιορισμός για την μεταβλητή  $N_p$  δεν υφίσταται, και θα ισχύει  $N_p = N_{i,mpp} * N_{s,mpp}$ . Οι μεταβλητές αυτές ομαδοποιημένες σε διάνυσμα, αποτελούν το χρωμόσωμα προς αξιολόγηση. Η αντικειμενική συνάρτηση δέχεται το κάθε χρωμόσωμα και επιστρέφει μια τιμή. Η συνάρτηση αξιολόγησης τίθεται να επιστρέψει σαν αποτέλεσμα το άπειρο όταν ισχύει ένα από τα παρακάτω:

- $\lfloor \frac{DIM_1}{N_s * L_{pv,1}} \rfloor = 0$
- $\frac{C_c + C_m}{N_I * \frac{P_{m,STC}}{1000}} > C_{p,max}$
- $E_{tot} = 0$

Επειδή ο υπολογισμός του  $N_{s,max}$  συμβαίνει μέσα στην αντικειμενική συνάρτηση, συνεπώς δεν μπορούμε να ξέρουμε εκ των προτέρων την τιμή του, υπολογίζουμε την μεταβλητή αυτή στην αρχή του προβλήματος, υπολογίζοντας την προσπίπτουσα ακτινοβολία και την ενέργεια που παράγουν τα Φ/Β στοιχεία για κάθε  $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$  με  $\beta_{step} = 0.1$ . Η μέγιστη επιτρεπτή τιμή που επιστρέφει η προσομοίωση αυτή για την μεταβλητή  $N_{s,max}$ , θεωρείται ως το άνω όριο της σχεδιαστικής παραμέτρου  $N_s$ . Έτσι, κερδίζουμε περισσότερα χρήσιμα χρωμοσώματα (με όχι άπειρη τιμή) εφόσον δεν χρειάζεται να θέσουμε το άνω όριο σε μεγαλύτερες τιμές, με συνέπεια ο αλγόριθμος να συγκλίνει γρηγορότερα στην βέλτιστη περιοχή.

Τέλος, το χρωμόσωμα που αξιολογεί η αντικειμενική συνάρτηση θα έχει την μορφή που περιγράφεται στον Πίνακα 5.1:

Πίνακας 5.1: Κωδικοποίηση χρωμοσώματος.

$N_s$	$N_p$	$N_r$	$F_y$	$\beta$	$DIM_1$
integer	integer	integer	double	double	double

## 5.2 Master-Slave Παράλληλος Γενετικός Αλγόριθμος

Η υλοποίηση είναι ίδια με αυτήν που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, δηλαδή διαμέτουμε σταθερό αριθμό από χρωμοσώματα, υπάρχει μια διεργασία Master που εκτελεί όλες τις απαραίτητες λειτουργίες (επιλογή, διασταύρωση, μετάλλαξη, ελιτισμό) και αναθέτει σε κάθε διαμέσιμο υπολογιστικό κόμβο ένα χρωμόσωμα προς αξιολόγηση.

Στα Σχήματα (5.1 - 5.2) παρουσιάζονται οι ψευδοκώδικες που υλοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία για τις διεργασίες που περιγράψαμε:

```

iters_done = 0
while iters_done != MAX_GENERATIONS:
    genotype = receive_from_master()
    LCOE = evaluate(genotype)
    send_to_master(LCOE)
    iters_done++

```

Σχήμα 5.1: Ψευδοκώδικας Slave διεργασίας.

```

for i=1 to MAX_GENERATIONS:
    for j=1 to POP_SIZE:
        send_to_slave(genotype(j))
        tot_receives = 0
        while tot_receives != POP_SIZE:
            receive_from_slave()
            tot_receives++
        NEW_POP_SIZE = 0
        while NEW_POP_SIZE != POP_SIZE:
            select()
            crossover()
            add_to_new_pop()
            mutation()
            elitism()
        return best_genotype

```

Σχήμα 5.2: Ψευδοκώδικας Master διεργασίας.

Οι τιμές των παραμέτρων ρυθμίστηκαν με συνεχείς εκτελέσεις έτσι ώστε να εντοπίσουμε ποιες είναι οι κατάλληλες τιμές ώστε ο αλγόριθμος να είναι αποδοτικός τόσο ως προς την ποιότητα της λύσης, όσο και ως προς τον χρόνο εκτέλεσης. Ειδικότερα:

**Πιθανότητα για crossover:**  $p_{cross} = 0.5$

**Πιθανότητα για mutation:**  $p_{mut} = 0.3$

**Αριθμός elite χρωμοσωμάτων:**  $elite_{count} = 1$

**Χρωμοσώματα στον πληθυσμό:**  $pop_{size} = 26$

**Αριθμός slave διεργασιών:**  $n_{slave} = 26$

**Μέγιστος αριθμός γενεών:** MAX\_GENERATIONS = 150

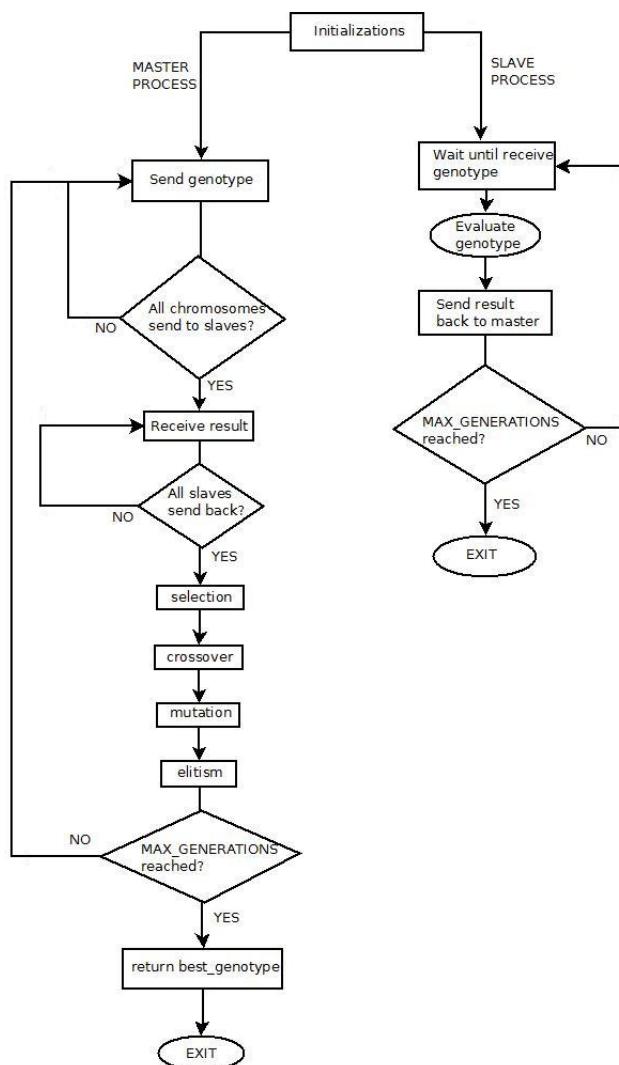
Οι διαδικασίες για selection, crossover, mutation και elitism υλοποιούνται σύμφωνα με όσα είπαμε στο Κεφάλαιο 4. Αναλυτικότερα:

selection: Roulette-wheel μέθοδος. Η διαδικασία επιλογής του τροχού της ρουλέτας είναι ίδια με την περιγραφή στο Κεφάλαιο 4.

crossover: Uniform crossover. Φαίνεται να αποδίδει καλύτερα από άλλες μεθόδους (One-point, two-point) για το πρόβλημά μας. Κάθε γονίδιο του νέου χρωμοσώματος επιλέγεται από τον γονέα 1 ή τον γονέα 2 με πιθανότητα 50%.

mutation: Uniform mutation. Επιλέγεται ένα γονίδιο του χρωμοσώματος τυχαία, και σε αυτό ανατίθεται μια τυχαία τιμή από το επιτρεπτό εύρος τιμών αυτής της μεταβλητής.

Στο Σχήμα 5.3 παραθέτουμε το flowchart των διεργασιών master και slave που υλοποιήθηκαν. Ο master ξεκινά στέλνοντας όλα τα (αρχικοποιημένα τυχαία) χρωμοσώματα προς αξιολόγηση στους slaves (ένα χρωμόσωμα ανά slave). Όταν τα στείλει όλα, περιμένει και δέχεται τα αποτελέσματα της αξιολόγησης, μέχρι όλοι οι slave να ολοκληρώσουν την εκτέλεση της αντικειμενικής συνάρτησης και να τον ενημερώσουν στέλνοντάς του τα αποτελέσματα. Έπειτα, πραγματοποιεί selection - crossover - mutation και σχηματίζει τον νέο πληθυσμό. Αυτή η διαδικασία επαναλαμβάνεται μέχρι να συμπληρωθεί ο μέγιστος αριθμός γενεών προς αξιολόγηση που έχουμε ορίσει. Η διεργασία slave ξεκινά την εκτέλεσή της και περιμένει να λάβει ένα χρωμόσωμα προς αξιολόγηση. Έπειτα εκτελεί την συνάρτηση αξιολόγησης για το χρωμόσωμα που έλαβε και μόλις ολοκληρώσει την εκτέλεση επιστρέφει τα αποτελέσματα στον master. Έπειτα περιμένει τον master να στείλει νέο χρωμόσωμα προς αξιολόγηση. Ο slave σταματά την λειτουργία του μόλις συμπληρωθεί ο μέγιστος αριθμός γενεών προς αξιολόγηση που ορίσαμε.



Σχήμα 5.3: Διάγραμμα ροής του Master-Slave παράλληλου γενετικού αλγορίθμου.

### 5.3 Αλγόριθμος Δυναμικών Πληθυσμών

Ο κύριος λόγος που χρησιμοποιούμε το μοντέλο Δυναμικών Πληθυσμών στην διαδικασία βελτιστοποίησης του προβλήματος μας είναι για να βελτιώσουμε το ποσοστό χρησιμοποίησης των διαθέσιμων επεξεργαστικών μονάδων, και κατά συνέπεια την αξιολόγηση περισσότερων χρωμοσωμάτων σε σχέση με το Master-Slave μοντέλο. Σε αντίθεση με το Master-Slave μοντέλο, τα χρωμοσώματα δεν αποτελούν έναν ενιαίο πληθυσμό, αλλά το καθένα χειρίζεται ατομικά και εισάγεται σε κάποιον υποπληθυσμό δυναμικά κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου. Όταν ένας συγκεκριμένος αριθμός από χρωμοσώματα αξιολογηθεί, αυτά αποτελούν έναν υποπληθυσμό στον οποίο θα εκτελέσουμε τις διαδικασίες επιλογής -διασταύρωσης -μετάλλαξης. Για την υλοποίηση του μοντέλου δυναμικών πληθυσμών ορίζουμε τις εξής διεργασίες:

**Slave:** Είναι υπεύθυνος για την εκτέλεση της συνάρτησης αξιολόγησης, ανταλλάσσει γενετικό κώδικα με άλλες slave διεργασίες και εκτελεί μετάλλαξη στο χρωμόσωμα που αξιολόγησε. Σε κάθε slave διεργασία διαθέτουμε έναν επεξεργαστικό πόρο και ένα χρωμόσωμα προς αξιολόγηση.

**Master:** Συγκεντρώνει τα χρωμοσώματα που ολοκλήρωσαν την εκτέλεσή τους, τα οποία αποτελούν τον υποπληθυσμό (deme). Αφού ο υποπληθυσμός γεμίσει με έναν προκαθορισμένο αριθμό από χρωμοσώματα, ο master επιλέγει τα χρωμοσώματα προς αναπαραγωγή και στέλνει μηνύματα στους slaves με περιεχόμενο τα αναγνωριστικά των slaves που πρέπει να ανταλλάξουν μεταξύ τους γονίδια, καθώς και μια μάσκα διασταύρωσης. Η μάσκα στέλνεται από κοινού στους slaves που πρέπει να πραγματοποιήσουν διασταύρωση και στην ουσία υποδεικνύει στους slaves ποια γονίδια να κρατήσουν και ποια να λάβουν από άλλους slaves.

**Counter:** Ο counter λαμβάνει το αποτέλεσμα της αξιολόγησης ενός slave και αναθέτει τον slave αυτόν σε κάποιον υποπληθυσμό (master), γνωρίζοντας ποιος master περιμένει να γεμίσει τον υποπληθυσμό του. Επίσης αρχικοποιεί τα χρωμοσώματα στην αρχή της εκτέλεσης της βελτιστοποίησης και τα αναθέτει σε slave διεργασίες προς επεξεργασία. Ακόμη, ελέγχει αν συμπληρώθηκε ο μέγιστος αριθμός χρωμοσωμάτων που αξιολογήθηκαν, τον οποίο ορίζουμε στην αρχή της εκτέλεσης. Όταν γίνει αυτό, ο counter ειδοποιεί όλους τους masters και όλους τους slaves να τερματίσουν την λειτουργία τους.

**Sorter:** Ο κύριος λόγος για την ύπαρξη αυτής της διεργασίας είναι για να βελτιώσουμε το ποσοστό αξιοποίησης των πόρων (utilization) του αλγορίθμου. Αυτή η διεργασία ειδοποιείται από κάθε slave που ολοκληρώνει την αξιολόγηση του χρωμοσώματός του, λαμβάνοντας τις τιμές των γονιδίων του και το αποτέλεσμα της αντικειμενικής συνάρτησης. Είναι υπεύθυνος για την παρακολούθηση της βελτιστοποίησης σώζοντας σε αρχεία καταγραφής (αν είναι απαραίτητο) κάθε χρωμόσωμα με την αξιολόγησή του, και αποθηκεύει τα καλύτερα χρωμοσώματα της βελτιστοποίησης σε αρχείο. Με αυτήν την διεργασία μπορούμε να αποσυμφορήσουμε τον counter από λειτουργίες που θα καθυστερήσουν τον κύκλο εργασιών που έχει αναλάβει, με συνέπεια να μειώνεται η αποδοτικότητα του μοντέλου σε χρησιμοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

Στα Σχήματα (5.4 - 5.7) παρουσιάζονται οι ψευδοκώδικες που υλοποιήθηκαν σε αυτήν την εργασία για τις διεργασίες που περιγράφαμε:

```

done = 0

while done == 0:
    tot_slaves = 0
    while tot_slaves != n_ind:
        [lcoe, rank, flag] = receive_from_counter()
        check_for_elite()
        if flag == -1 then:
            done = 1
            empty_from_slaves()
            break
        else:
            tot_slaves++
    while [(new_pop_size != n_ind) & (done == 0)]:
        selection()
        mask = make_crossover_mask()
        inform_sender_slaves()
        inform_receiver_slaves(mask)
        empty_from_slaves()

```

Σχήμα 5.4: Ψευδοκώδικας Master διεργασίας.

```

gene = receive_initial_genotype()

while (1):
    LCOE = calculate_fitness(gene)
    inform_sorter(lcoe, rank, gene)
    inform_counter(lcoe, rank)
    [deme, flag] = receive_from_counter()
    if flag == -1 then:
        break
    receive_from_master(deme)
    crossover()
    mutation()
return gene

```

Σχήμα 5.5: Ψευδοκώδικας Slave διεργασίας.

```

genes_completed = 0
best_lcoe = 999999
best_rank = -1
while genes_completed != MAX_GENES:
    [LCOE, rank, gene] = receive_from_slave()
    write_to_file(gene)
    if LCOE < best_lcoe then:
        best_lcoe = LCOE
        best_rank = rank
        genes_completed++
    export_best_genes()

```

Σχήμα 5.6: Ψευδοκώδικας Sorter διεργασίας.

```

tot_receives = 0
initialize_genotypes()
while (1):
    [lcoe, rank] = receive_from_slave()
    tot_receives++
    if tot_receives >= MAX_GENES then:
        inform_slave_to_stop()
        break
    else:
        check_if_elite()
        to_deme = find_deme()
        send_to_master([lcoe, rank])
        inform_slave_to_continue(to_deme)
        inform_masters_to_exit()
        inform_slaves_to_exit()

```

Σχήμα 5.7: Ψευδοκώδικας Counter διεργασίας.

Στην υλοποίησή μας, διαθέτουμε 2 master διεργασίες και σε κάθε master αναθέτουμε 6 χρωμοσώματα που αποτελούν τον υποπληθυσμό. Ο αριθμός των master επιλέχθηκε μικρός διότι η αντικειμενική συνάρτηση δεν έχει σταθερό χρόνο εκτέλεσης και ο χρόνος που χρειάζεται ο master για να ολοκληρώσει έναν κύκλο λειτουργίας είναι μικρός. Αυτό σημαίνει ότι αν είχαμε παραπάνω masters, οι περισσότεροι δεν θα εκτελούσαν καμία λειτουργία κατά τη διάρκεια της εκτέλεσης, συνεπώς θα σπαταλούσαμε πόρους χωρίς να τους αξιοποιήσουμε. Αν η αντικειμενική συνάρτηση είχε σταθερό χρόνο εκτέλεσης, θα έπρεπε να διαθέταμε παραπάνω masters ώστε να αποφύγουμε την περίπτωση όπου χρωμοσώματα που ολοκληρώθηκαν να περιμένουν να ανατεθούν σε κάποιο υποπληθυσμό (εφόσον είναι σταθερός ο χρόνος εκτέλεσης της αντικειμενικής, όλα τα χρωμοσώματα θα τελείωναν ταυτόχρονα ή με πολύ μικρή χρονική διαφορά). Συγκεκριμένα, ο αριθμός των

υποπληθυσμών του μοντέλου που θα έπρεπε να διατεθούν,  $n_{master}$ , είναι:

$$n_{master} = \frac{N_{ind}}{n_{ind}} \quad (5.2)$$

όπου  $N_{ind}$  ο συνολικός αριθμός χρωμοσωμάτων που διαθέτουμε και  $n_{ind}$  ο αριθμός από χρωμοσώματα σε κάθε υποπληθυσμό. Ο αριθμός των χρωμοσωμάτων σε κάθε υποπληθυσμό,  $n_{ind}$ , ορίστηκε με βάση την καλύτερη απόδοση τόσο σε ποσοστό χρησιμοποίησης των πόρων, όσο και στην ποιότητα της λύσης που δίνει η βελτιστοποίηση. Οι διαδικασίες επιλογής, διασταύρωσης και μετάλλαξης είναι ίδιες με αυτές του Master-Slave αλγορίθμου που περιγράψαμε, και οι παράμετροι στην παρούσα υλοποίηση (τις οποίες ορίσαμε έπειτα από πολλές δοκιμές για κάθε τιμή των παραμέτρων, με σκοπό την εύρεση των καλύτερων δυνατών) είναι:

- πιθανότητα για crossover:  $p_{cross} = 0.5$
- πιθανότητα για mutation:  $p_{mut} = 0.3$
- αριθμός elite χρωμοσωμάτων:  $elite_{count} = 1$
- αριθμός master διεργασιών:  $n_{master} = 2$
- χρωμοσώματα στους υποπληθυσμούς:  $n_{ind} = 6$
- αριθμός slave διεργασιών:  $n_{slave} = 28$
- selection method: Roullete-wheel.
- crossover type: Uniform crossover.
- mutation type: Uniform mutation.
- μέγιστος αριθμός αξιολογημένων χρωμοσωμάτων: MAX\_ITERS = 4500

Ο συνολικός αριθμός επεξεργαστικών πόρων που χρησιμοποιούμε στην διαδικασία βελτιστοποίησης, από τις παραπάνω μεταβλητές προκύπτει ως εξής:

$$N_{ind} = n_{master} + n_{slave} + 2 = 32 \quad (5.3)$$

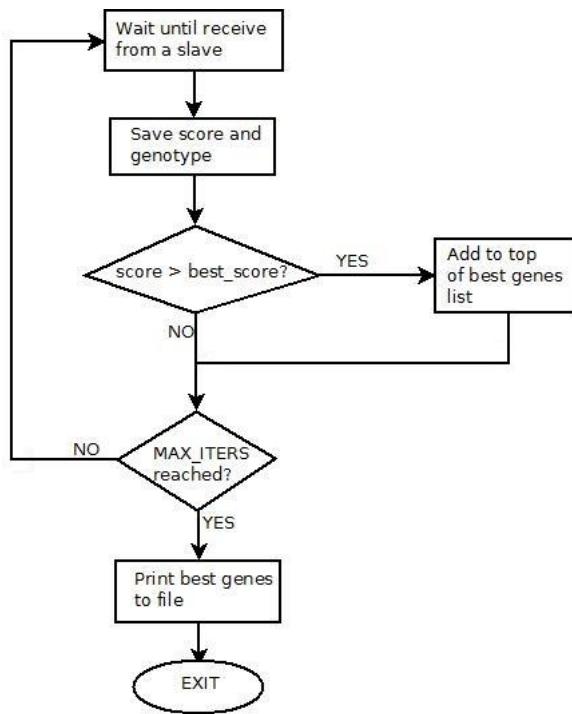
Οι επιπλέον 2 επεξεργαστές χρησιμοποιούνται για τις διεργασίες counter και sorter. Στα Σχήματα (5.8 - 5.11) παραθέτουμε τα flowcharts των διεργασιών που υλοποιήθηκαν για τον αλγόριθμο δυναμικών πληθυσμών.

Ο sorter λειτουργεί ως εξής: Στην αρχή της εκτέλεσης περιμένει μέχρι να λάβει ένα χρωμόσωμα και την τιμή που επιστρέφει η αντικειμενική συνάρτηση γι' αυτό το χρωμόσωμα. Έπειτα καταγράφει το χρωμόσωμα και την τιμή αξιολόγησης που έλαβε. Αν βρέθηκε καλύτερη λύση από την (ως τότε) βέλτιστη, προστίθεται στον πίνακα που διατηρεί ο sorter με τα καλύτερα χρωμοσώματα. Όταν συμπληρωθεί ο μέγιστος αριθμός αξιολογημένων χρωμοσωμάτων, ο sorter ολοκληρώνει την λειτουργία του και τερματίζει.

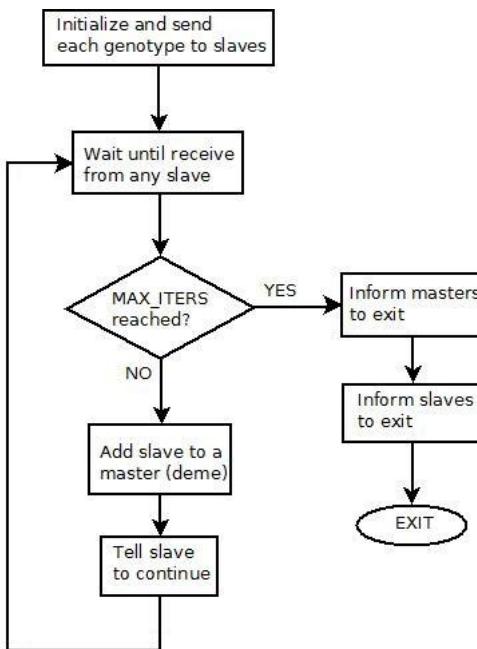
Ο counter ξεκινά αρχικοποιώντας τυχαία τα χρωμοσώματα του συνολικού πληθυσμού και αναθέτει σε κάθε slave ένα από αυτά. Έπειτα, περιμένει μέχρι να ειδοποιηθεί από κάποιον slave. Μόλις συμβεί αυτό αυξάνει τον αριθμό χρωμοσωμάτων που αξιολογήθηκαν και ελέγχει αν συμπληρώθηκε ο μέγιστος αριθμός αξιολογημένων χρωμοσωμάτων. Αν συμπληρώθηκε, ειδοποιεί όλους τους masters και slaves να τερματίσουν. Αν όχι, αναθέτει τον slave που μόλις τον ειδοποίησε σε κάποιον υποπληθυσμό (deme) και ειδοποιεί τον slave πως μπορεί να συνεχίσει. Αυτό επαναλαμβάνεται μέχρι την συμπλήρωση του μέγιστου αριθμού αξιολογημένων χρωμοσωμάτων που έχουμε ορίσει.

Ο master ξεκινά και περιμένει μέχρι ο counter να του στείλει ένα χρωμόσωμα που ολοκλήρωσε την αξιολόγηση και πρέπει να προχωρήσει σε διαδικασίες επιλογής - διασταύρωσης - μετάλλαξης. Σε αυτό το σημείο ελέγχει αν συμπληρώθηκε ο μέγιστος αριθμός χρωμοσωμάτων που αξιολογήθηκαν. Ο counter είναι υπεύθυνος να ενημερώσει τον master γι' αυτό το γεγονός. Αν συμπληρωθεί ο παραπάνω αριθμός, τότε ο master ειδοποιεί τους slaves που βρίσκονται ήδη στον υποπληθυσμό (αν υπάρχουν) και περιμένουν τον master να τους υποδείξει με ποιόν slave να ανταλλάξουν γονίδια να τερματίσουν. Άλλιώς, ο master περιμένει μέχρι να του στείλει ο counter κι άλλους slaves, ώσπου να συμπληρωθεί ο μέγιστος αριθμός χρωμοσωμάτων,  $n_{ind}$ , στον υποπληθυσμό. Μόλις συμβεί αυτό, ο master υπολογίζει τις πιθανότητες που θα χρησιμοποιηθούν στον τροχό της ρουλέτας για την διαδικασία επιλογής. Έπειτα, προχωρά αμετάβλητα στην επόμενη γενιά τα elite χρωμοσώματα (αν υπάρχουν), στέλνοντας τα κατάλληλα μηνύματα στον αντίστοιχο slave. Στη συνέχεια, πραγματοποιεί την επιλογή και στέλνει τις αντίστοιχες πληροφορίες στους επιλεγμένους slaves. Όταν ο αριθμός των νέων χρωμοσωμάτων που δημιουργήθηκαν είναι ίσος με  $n_{ind}$ , ο master ολοκληρώνει τον κύκλο λειτουργίας του και επιστρέφει στην αρχή της εκτέλεσης, περιμένοντας τον counter να του στείλει ξανά νέα χρωμοσώματα.

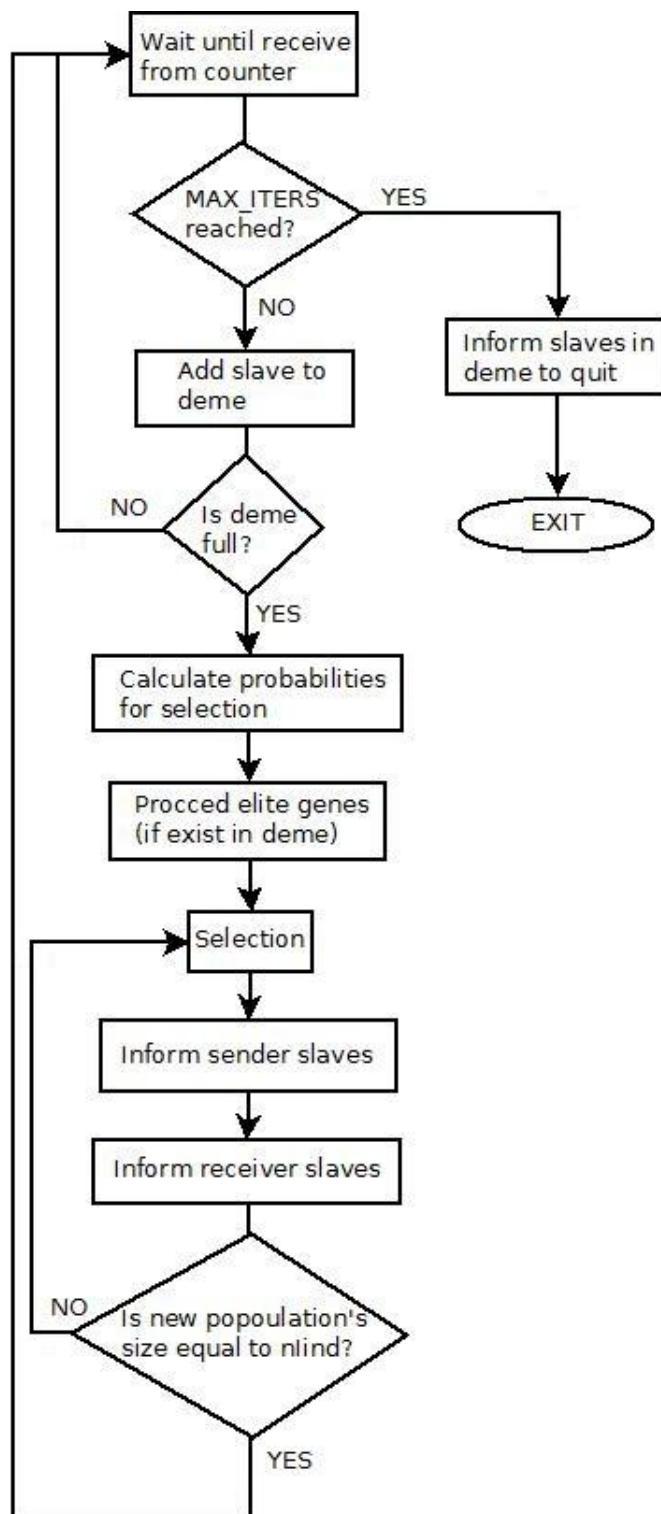
Η κάθε slave διεργασία ξεκινά την εκτέλεσή της λαμβάνοντας από τον counter ένα τυχαία αρχικοποιημένο χρωμόσωμα. Έπειτα, υπολογίζει την τιμή της συνάρτησης αξιολόγησης γι' αυτό το χρωμόσωμα και στέλνει τα αποτελέσματα σε counter και sorter. Αν ο counter τον ειδοποιήσει συμπληρώθηκε ο μέγιστος αριθμός χρωμοσωμάτων προς αξιολόγηση, τερματίζει την λειτουργία του. Διαφορετικά, περιμένει μέχρι να ειδοποιηθεί από τον master για να ανταλλάξει γονίδια με κάποιον άλλον (αν πραγματοποιήσει διασταύρωση). Όταν όλοι οι slaves του υποπληθυσμού πραγματοποιήσουν διασταύρωση (επιτυχής ή όχι) ειδοποιούνται από τον master για να προχωρήσουν σε διαδικασία μετάλλαξης. Όταν ο slave πραγματοποιήσει την μετάλλαξη στο χρωμόσωμά του, ξεκινά τον κύκλο λειτουργίας του και πάλι, εκτελώντας την αντικειμενική συνάρτηση για το νέο χρωμόσωμα κλπ.



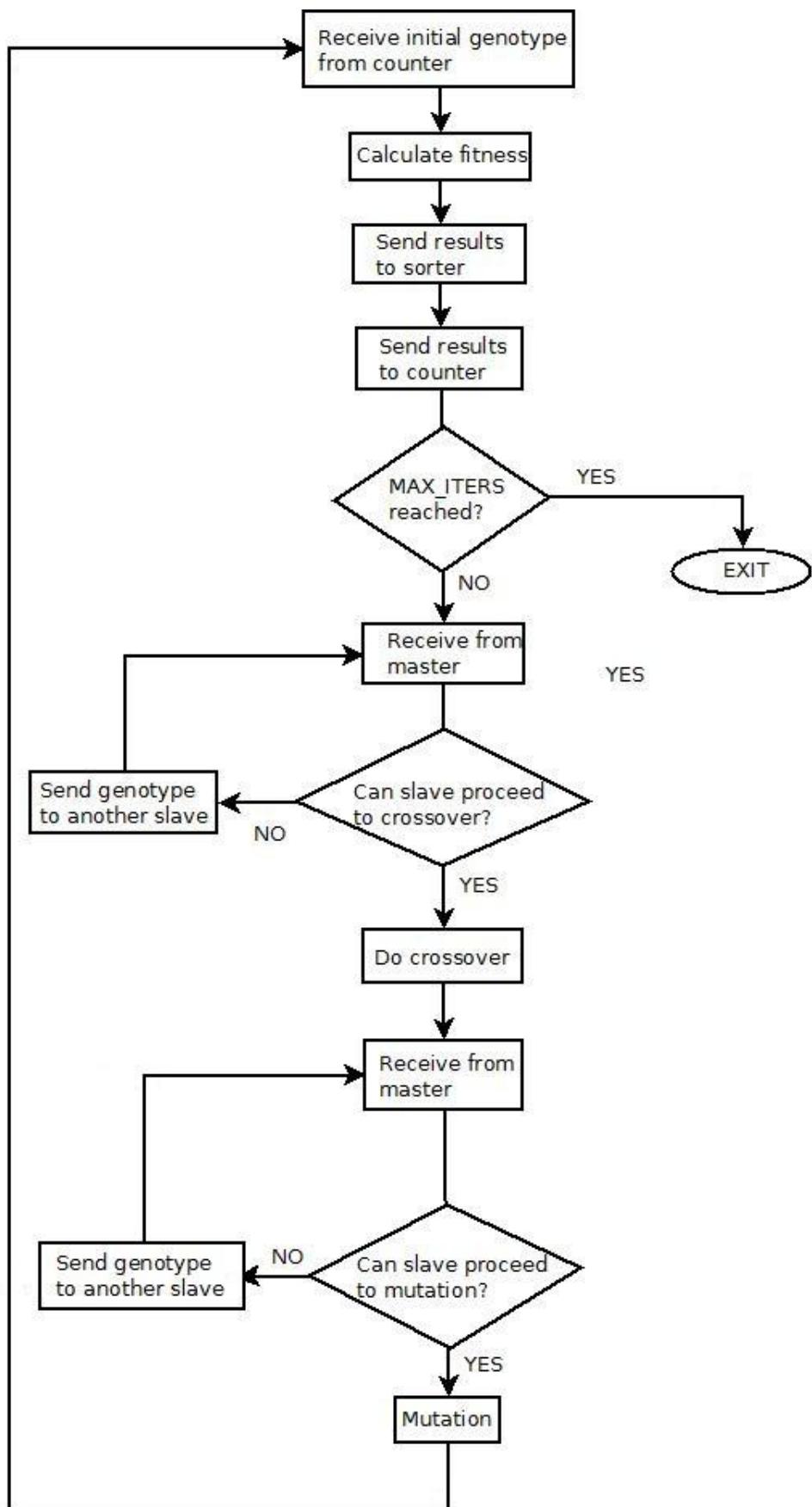
Σχήμα 5.8: Διάγραμμα ροής της διεργασίας sorter.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα ροής της διεργασίας counter.



Σχήμα 5.10: Διάγραμμα ροής της διεργασίας master.



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα ροής της διεργασίας slave.



# Κεφάλαιο 6

## Αποτελέσματα-Παρατηρήσεις

---

Τα παρακάτω αποτελέσματα προκύπτουν από την προσομοίωση της λειτουργίας ενός Φ/Β συστήματος προς μελέτη, με δεδομένα εισόδου θερμοκρασίας και ηλιακής ακτινοβολίας για την περιοχή του Πολυτεχνείου Κρήτης. Στην παρούσα μεθοδολογία, ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας υπολογίζεται προσομοιώνοντας την λειτουργία του Φ/Β συστήματος αρχικά με χρονικό βήμα  $t_{step} = 1\text{ hour}$  κι έπειτα με χρονικό βήμα  $t_{step} = 1\text{ min} = \frac{1}{60}\text{ hours}$ .

### 6.1 Δεδομένα εισόδου

Τα δεδομένα εισόδου είναι:

ονομαστική ισχύς Φ/Β Συστήματος:  $P_{plant,nom}(MW) = 0.1$

υψόμετρο πεδίου εγκατάστασης:  $h(km) = 0.015$

κόστος περιοχής εγκατάστασης:  $c_l(\text{Euro}/m^2) = 1.97$

γεωγραφικό πλάτος περιοχής εγκατάστασης:  $\phi(^{\circ}) = 35.53$

συντελεστής ανακλαστικότητας εδάφους:  $\rho = 0.2$

χρονική ζώνη με βάση το Greenwich:  $GMT = 2$

γεωγραφικό μήκος του τοπικού μεσημβρινού:  $\lambda(^{\circ}) = 24.06$

συντελεστής ετήσιας αύξησης μέγιστης ενέργειας που μπορεί να προσφέρει το σύστημα στο δίκτυο:  $S_g(\%) = 0$

συντελεστής διαθεσιμότητας ενέργειας του Φ/Β συστήματος:  $EAF(\%) = 100$

το μέγιστο επιτρεπτό κόστος ανά μονάδα εγκατεστημένης ισχύος:  $C_{p,max}(\text{Euro}) = 1000000$

ισχύς εξόδου Φ/Β πλαισίων με MPP λειτουργία, υπό STC:  $P_{M,STC}(W) = 127$

τάση ανοιχτοκυλώματος των Φ/Β πλαισίων υπό STC:  $V_{oc,STC}(V) = 33.7$

ρεύμα βραχυκυλώματος των Φ/Β πλαισίων υπό STC:  $I_{sc,STC}(A) = 5.26$

αριθμός Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένες σε σειρά στο Φ/Β πλαισιο:  $n_{cs} = 54$

αριθμός σειρών από Φ/Β στοιχεία συνδεδεμένες παράλληλα στο Φ/Β πλαισιο:  $n_{cp} = 1$

αερικός συντελεστής τάσης ανοιχτοκυλώματος του Φ/Β πλαισίου:  $K_v(V^o) = -0.13$

θερμικός συντελεστής ρεύματος βραχυκυλώματος του Φ/Β πλαισίου:  $K_i(A^o) = 0.00456$

ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας κυψέλης:  $NOCT(^o) = 47.5$

συντελεστής μείωσης παραγόμενης ενέργειας λόγω ακαθαρσιών στα Φ/Β στοιχεία:  $d_f(\%) = 0$

μήκος κάθε Φ/Β πλαισίου:  $L_{pv1}(m) = 1.2$

πλάτος κάθε Φ/Β πλαισίου:  $L_{pv2}(m) = 0.8$

Κόστος καθενός Φ/Β πλαισίου:  $C_{pv}(Euro/kW) = 3295.84$

ετήσιο κόστος συντήρησης καθενός Φ/Β πλαισίου:  $M_{pv}(Euro/kW) = 32.95$

διάρκεια ζωής Φ/Β πλαισίων:  $n_{pv}(years) = 25$

συντελεστής ετήσιας μείωσης παραγόμενης ενέργειας σε κάθε Φ/Β πλαισιο:  $r_{pv}(\%) = 0.0$

συντελεστής διόρθωσης για την ηλιακή ακτινοβολία:  $\delta_i(\%) = 0$

ελάχιστη ποσότητα ενέργειας που εγγυάται το δίκτυο ότι μπορεί να λάβει:  $E_{grid,min}(MWh/year) = 1000$

κόστος μετασχηματιστή διασύνδεσης:  $c_{i,t}(Euro/MW) = 0$

ετήσιο κόστος συντήρησης μετασχηματιστή διασύνδεσης:  $m_{i,t}(Euro/MW) = 0$

συντελεστής απόδοσης μετασχηματιστή διασύνδεσης:  $\eta_t(\%) = 100$

παράγοντας υπερδιαστασιολόγησης του καλωδίου διασύνδεσης:  $SF_3(\%) = 0$

απόσταση του μετασχηματιστή διασύνδεσης με το MV PCC:  $D_{PCC}(m) = 0$

κόστος καλωδίου διασύνδεσης:  $c_{ic}(Euro/MW/m) = 0$

συντελεστής απωλειών του καλωδίου διασύνδεσης:  $n_{l,ic}(Euro/MW/m) = 0$

ετήσιο κόστος συντήρησης καλωδίου διασύνδεσης:  $m_{ic}(Euro/MW/m) = 0$

ονομαστική τάση MV:  $U_n(V) = 40500$

μέγιστη επιτρεπτή απόκλιση της ονομαστικής τάσης του MV:  $k_{Un}(\%) = 10$

αντίσταση του ηλεκτρικού δικτύου:  $R(ohm) = 0$

επιφάνεια γης που καταλαμβάνει ο μετασχηματιστής διασύνδεσης:  $A_{i,ct}(m^2/MW) = 0$

συντελεστής μείωσης ενέργειας AC καλωδίων:  $n_{l,ac}(\%/kW/m) = 0$

συντελεστής μείωσης ενέργειας DC καλωδίων:  $n_{l,dc}(\%/kW/m) = 0$

**κόστος AC καλωδίων:**  $c_{ac}(\text{Euro}/\text{kW}/\text{m}) = 0$

**κόστος DC καλωδίων:**  $c_{dc}(\text{Euro}/\text{kW}/\text{m}) = 0$

**ετήσιο κόστος συντήρησης AC καλωδίων:**  $m_{ac}(\text{Euro}/\text{kW}/\text{m}) = 0$

**ετήσιο κόστος συντήρησης DC καλωδίων:**  $m_{dc}(\text{Euro}/\text{kW}/\text{m}) = 0$

**συντελεστής υπερδιαστασιολόγησης AC καλωδίων:**  $SF_1(\%) = 0$

**συντελεστής υπερδιαστασιολόγησης DC καλωδίων:**  $SF_2(\%) = 0$

**βάθος που εγκαθίστανται τα καλώδια:**  $h_d(\text{m}) = 0$

**το κόστος των στηριγμάτων των Φ/B πλαισίων:**  $c_b(\text{Euro}/\text{m}^2) = 101$

**συντελεστής αύξησης του κόστους λόγω λοιπών εξαρτημάτων:**  $BOS(\%) = 0$

**συντελεστής επιδότησης:**  $s(\%) = 0$

**ετήσιος ρυθμός πληθωρισμού:**  $g(\%) = 3$

**αξιμούθια γωνία:**  $\gamma_c(^{\circ}) = 0$

**παράγοντας επίδρασης σκιών:**  $SIF = 2$

**μέγιστο μήκος που διαθέτουμε στη νότια πλευρά του πάρκου:**  $DIM_{1,max}(\text{m}) = 250$

**ονομαστικό ετήσιο προεξοφλητικό επιτόκιο:**  $\delta_i(\%) = 0.05$

**χρονική διάρκεια λειτουργίας του Φ/B πάρκου:**  $years_{pv}(year) = 25$

Στην παρούσα μεθοδολογία, χρησιμοποιούμε διαφορετικούς τύπους μετατροπέων DC/AC, με διαφορετικές παραμέτρους. Με σειρά εμφάνισης στον πίνακα 6.1, οι μετατροπείς είναι οι εξής: Danfoss DLX 4.6kW (type1), Sunways NT5000 (type2), SunnyBoy 5000TL (multi-string) (type3), SunnyBoy 6000TL (type4), SunnyBoy 10000TL (type5). Όλοι εκτός από τον SunnyBoy 5000TL είναι central inverters.

Πίνακας 6.1: Μετατροπείς που δοκιμάστηκαν στην βελτιστοποίηση του προβλήματος.

DC/AC	$V_{i,min}$ (Volt)	$V_{i,max}$ (Volt)	$V_{dc,max}$ (Volt)	$P_{i,n}$ (kW)	$P_{i,n,ac}$ (kW)	$C_{inv}$ (Euro)	$N_{i,mppt}$	$N_{s,mppt}$	<i>central</i>
type1	250	480	600	4.8	4.6	1088.9	1	3	yes
type2	340	750	900	5.25	4.6	1508.9	1	2	yes
type3	175	500	750	5.25	4.6	2365.0	2	2	no
type4	333	500	700	6.2	6	1380.0	1	4	yes
type5	333	500	700	10.35	10	2395.9	1	5	yes

## 6.2 Ανάλυση βέλτιστων λύσεων

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα που προκύπτουν από την βελτιστοποίηση του Φ/B πάρκου για κάθε τύπο μετατροπέα που δοκιμάζουμε.

### 6.2.1 Αποτελέσματα προσομοίωσης ανά ώρα

Όπως περιγράφηκε στην ενότητα 5.1, ο υπολογισμός του μέγιστου επιτρεπτού αριθμού  $\Phi/B$  πλαισίων συνδεδεμένα σε σειρά,  $N_{s,max}$ , υπολογίζεται στην αρχή της διαδικασίας της βελτιστοποίησης. Ο αριθμός αυτός εξαρτάται από την γωνία κλίσης των συλλεκτών καθώς και από τον τύπο μετατροπέα DC/AC. Στον πίνακα 6.2 παρουσιάζουμε τις τιμές του  $N_{s,max}$  για κάθε τύπο μετατροπέα DC/AC που χρησιμοποιούμε, για την βελτιστοποίηση με ωριαίο χρονικό βήμα.

Πίνακας 6.2: Μέγιστος αριθμός  $\Phi/B$  πλαισίων συνδεδεμένα σε σειρά για κάθε τύπο μετατροπέα DC/AC.

DC/AC type	$N_{s,max}$
1	14
2	23
3	15
4	15
5	15

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων για κάθε τύπο μετατροπέα DC/AC για χρονικό βήμα προσομοίωσης  $\delta_t = 1hour$ .

Πίνακας 6.3: Βέλτιστες λύσεις για κάθε μετατροπέα DC/AC (Master-Slave model).

DC/AC type	$N_s$	$N_p$	$N_r$	$F_y$ (m)	$\beta$ ( $^{\circ}$ )	$DIM_1$ (m)	$LCOE$ (% απόκλιση) ( $Euro/MWh$ )	$E_{tot}$ ( $MWh$ )	Cost (Euro)
1	14	3	2	28.85	25.4	201.40	120.55 (+0.0)	3990.48	481066.05
2	23	2	3	25.66	25.65	210.34	129.33 (+7.3)	3651.30	472223.49
3	14	4	2	38.91	26.14	201.17	141.60 (+17.5)	4056.07	574336.32
4	15	4	2	37.64	61.79	209.01	168.66 (+39.9)	2788.30	470286.57
5	15	5	1	26.26	61.73	205.02	219.39 (+82.0)	2882.83	632456.53

Πίνακας 6.4: Βέλτιστες λύσεις για κάθε μετατροπέα DC/AC (Dynamic Demes model).

DC/AC type	$N_s$	$N_p$	$N_r$	$F_y$ (m)	$\beta$ ( $^{\circ}$ )	$DIM_1$ (m)	$LCOE$ (% απόκλιση) ( $Euro/MWh$ )	$E_{tot}$ ( $MWh$ )	Cost (Euro)
1	14	3	3	41.86	24.72	217.82	120.84 (+0.2)	3989.61	482084.96
2	23	2	3	13.28	26.42	227.82	129.38 (+7.3)	3651.67	472446.44
3	14	4	2	28.8	29.00	213.98	141.81 (+17.6)	4051.01	574467.76
4	15	4	2	21.18	61.38	237.14	168.73 (+40.0)	2788.62	470519.69
5	15	5	1	18.37	61.28	242.11	219.48 (+82.1)	2882.34	632603.61

Τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ληφθεί με τις εξής παραμέτρους:

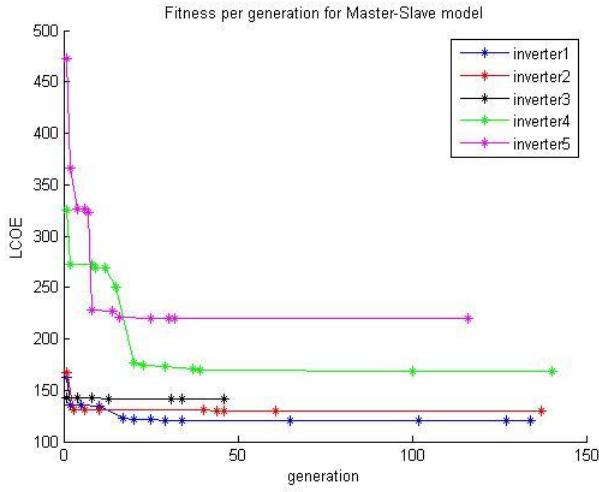
- Master-Slave model:  $cores = 27$ ,  $popsize = 26$ ,  $GENERATIONS = 150$
- Dynamic Demes model:  $cores = 32$ ,  $slaves = 28$ ,  $n_{ind} = 6$ ,  $GENOTYPES = 4500$

Στα παραπάνω αποτελέσματα, φαίνονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης τόσο για το Master-Slave μοντέλο όσο και για το Dynamic Demes. Παρατηρούμε πως για κάθε περίπτωση μετατροπέα την βέλτιστη λύση την δίνει ο Master-Slave αλγόριθμος. Η ποιότητα λύσης του δηλαδή είναι καλύτερη από αυτήν του Dynamic Demes. Ο σκοπός όμως όπως είπαμε με την υλοποίηση του Dynamic Demes, είναι να βελτιώσουμε τον χρόνο εκτέλεσης (στην παράγραφο 6.4 παρουσιάζονται και αναλύονται οι χρόνοι εκτέλεσης των δυο αλγορίθμων) βελτιώνοντας το ποσοστό χρησιμοποίησης των επεξεργαστικών πόρων. Φαίνεται πως για να κερδίσουμε χρόνο εκτέλεσης, χάνουμε σε ποιότητα λύσης. Πάντως, η απόκλιση των δυο αλγορίθμων στο LCOE είναι πολύ μικρή.

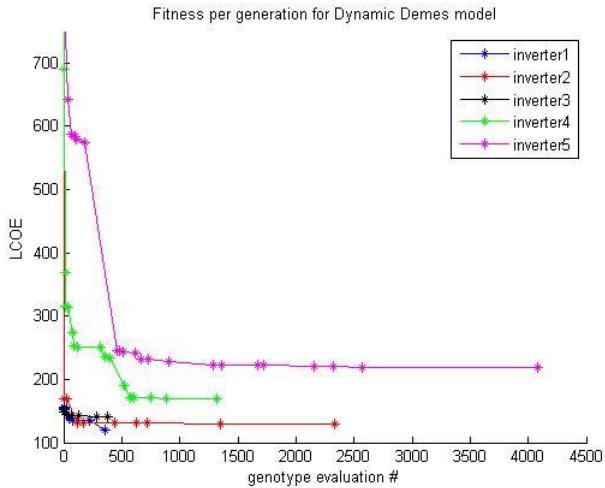
Παρατηρούμε πως για κάθε τύπο μετατροπέα DC/AC και αλγορίθμου που χρησιμοποιήθηκε, ο βέλτιστος αριθμός από Φ/Β στοιχεία σε σειρά ( $N_s$ ) καθώς και ο βέλτιστος αριθμός παράλληλων σειρών από Φ/Β στοιχεία ( $N_p$ ) είναι σε κάθε περίπτωση ίσος με τον μέγιστο επιτρεπτό αριθμό Φ/Β στοιχείων σε σειρά ( $N_{s,max}$ ) και τον μέγιστο αριθμό σειρών που μπορούν να συνδεθούν στον μετατροπέα ( $N_{i,mppt}N_{s,mppt}$ ), αντίστοιχα. Εξαίρεση αποτελεί ο μετατροπέας τύπου 3, όπου η βέλτιστη τιμή της μεταβλητής  $N_s$  δεν ισούται με την τιμή του  $N_{s,max}$ .

Επίσης, φαίνεται ξεκάθαρα η επιλογή του τύπου του DC/AC μετατροπέα παίζει πολύ σημαντικό ρόλο, τόσο στην ποσότητα της παραγόμενης ενέργειας, όσο και στο οικονομικό κόστος. Ο τύπος μετατροπέα DC/AC που δίνει την βέλτιστη λύση είναι ο τύπος 1, ο οποίος είναι και ο πιο φθηνός σε οικονομικό κόστος, παρότι την μεγαλύτερη ποσότητα παραγόμενης ενέργειας μας την δίνει ο μετατροπέας τύπου 3. Ο μετατροπέας τύπου 3 είναι πιο ακριβός από τον 1, και γι αυτό ο συντελεστής LCOE του τύπου 3 είναι μεγάλος. Οι μετατροπείς 4 και 5 δίνουν πολύ μικρή (σε σχέση με τους άλλους, ειδικότερα ο 4 παράγει την λιγότερη) ποσότητα παραγόμενης ενέργειας, και σε σύγκριση με το υψηλό κόστος τους (ιδιαίτερα του 5), εκτοξεύουν την τιμή του βέλτιστου LCOE σε υψηλές τιμές. Τέλος, ο τύπος μετατροπέα 2 μας δίνει αρκετά ικανοποιητική ποσότητα ενέργειας (λίγο λιγότερη από τον 1), αλλά κι αυτός έχει σχετικά υψηλό κόστος σε σχέση με τον 1. Στους παραπάνω πίνακες, δίπλα από την τιμή της LCOE στην παρένθεση αναφέρεται η απόκλιση σε σχέση με την ολικά βέλτιστη λύση για οποιονδήποτε τύπο μετατροπέα, που είναι η διάταξη για τον μετατροπέα τύπου 1.

Για να καταλάβουμε την λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου και να βγάλουμε συμπεράσματα ως προς τον χρόνο και την ποιότητα σύγκλισης, στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε πως μεταβάλλεται η βέλτιστη λύση ανά επανάληψη.



Σχήμα 6.1: Διάγραμμα μεταβολής της βέλτιστης λύσης (Master-Slave model).



Σχήμα 6.2: Διάγραμμα μεταβολής της βέλτιστης λύσης (Dynamic Demes model).

Από τα παραπάνω γραφήματα βλέπουμε το πόσο γρήγορα συγκλίνει στην βέλτιστη λύση ο κάθε αλγόριθμος. Παρατηρούμε πως από ένα σημείο και μετά (50-80 επαναλήψεις για το Master-Slave, 2000-2500 για το Dynamic-Demes) στην ουσία ο αλγόριθμος δεν βελτιώνει την λύση μας παρά ελάχιστα. Οπότε, μπορούμε να πούμε πως σε αυτό το σημείο μπορούμε να το θέσουμε ως σημείο τερματισμού του αλγορίθμου, με σκοπό να κερδίσουμε σε χρόνο εκτέλεσης χάνοντας ελάχιστα σε ποιότητα λύσης.

### 6.2.2 Αποτελέσματα προσομοίωσης ανά λεπτό

Στον πίνακα 6.5 παρουσιάζουμε τις τιμές του  $N_{s,max}$  για κάθε τύπο μετατροπέα DC/AC που χρησιμοποιούμε, για την βελτιστοποίηση με ωριαίο χρονικό βήμα, οι οποίες υπολογίζονται στην αρχή της δαδικασίας βελτιστοποίησης με τον ίδιο τρόπο που υπολογίζονται στις βελτιστοποιήσεις ανά ώρα.

Πίνακας 6.5: Μέγιστος αριθμός Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένα σε σειρά για κάθε τύπο μετατροπέα DC/AC.

DC/AC type	$N_{s,max}$
1	12
2	19
3	12
4	12
5	12

Στην συνέχεια, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων για κάθε τύπο μετατροπέα DC/AC για χρονικό βήμα προσομοίωσης  $\delta_t = 1min$ .

Πίνακας 6.6: Βέλτιστες λύσεις για κάθε μετατροπέα DC/AC (Master-Slave model).

DC/AC type	$N_s$	$N_p$	$N_r$	$F_y$ (m)	$\beta$ ( $^{\circ}$ )	$DIM_1$ (m)	$LCOE$ (% απόκλιση) (Euro/MWh)	$E_{tot}$ (MWh)	Cost (Euro)
1	12	3	2	17.57	41.46	200.01	135.61 (+2.1)	3495.32	473990.64
2	19	2	3	8.88	27.93	201.99	132.84 (+0.0)	3719.60	494096.01
3	12	4	2	2.33	26.41	200.70	141.89 (+6.8)	4172.17	592001.31
4	12	4	2	23.64	2.53	200.31	1056.01 (+694.9)	503.43	531673.53
5	12	5	1	41.50	2.59	215.64	1452.54 (+993.5)	499.23	725157.57

Πίνακας 6.7: Βέλτιστες λύσεις για κάθε μετατροπέα DC/AC (Dynamic Demes model).

DC/AC type	$N_s$	$N_p$	$N_r$	$F_y$ (m)	$\beta$ ( $^{\circ}$ )	$DIM_1$ (m)	$LCOE$ (% απόκλιση) (Euro/MWh)	$E_{tot}$ (MWh)	Cost (Euro)
1	12	3	2	3.27	41.81	214.61	135.64 (+2.1)	3495.19	474084.95
2	19	2	4	27.46	25.46	234.46	133.06 (+0.2)	4132.81	549897.83
3	12	4	2	24.90	29.01	209.12	142.03 (+6.9)	4169.04	592110.29
4	12	4	1	1.70	2.91	249.38	1054.83 (+694.1)	503.28	530856.84
5	12	5	1	27.99	3.51	227.07	1454.60 (+995.0)	498.60	725269.47

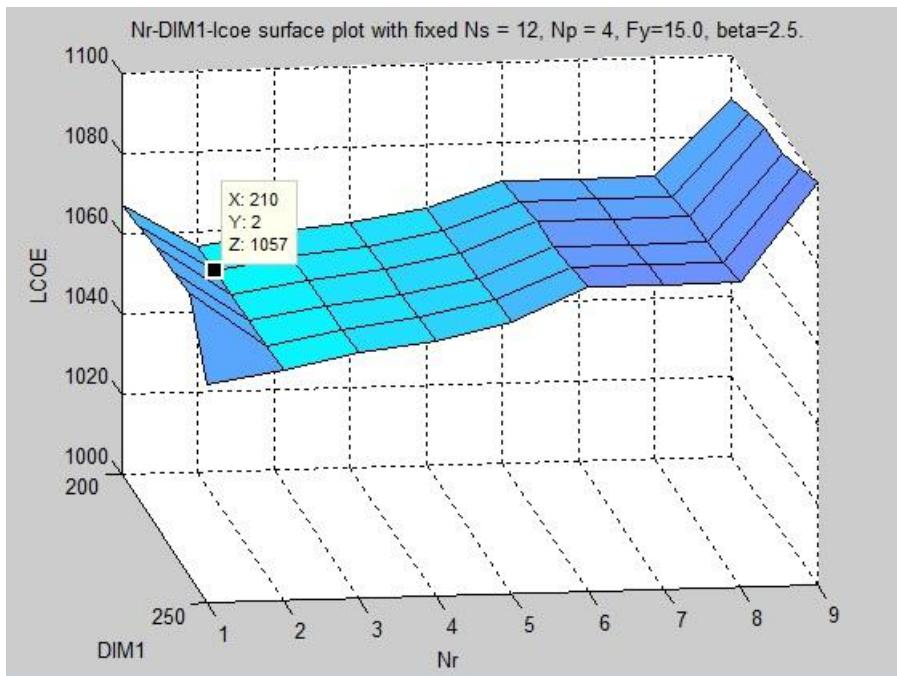
Τα παραπάνω αποτελέσματα έχουν ληφθεί με τις εξής παραμέτρους:

- Master-Slave model:  $cores = 27, popsize = 26, GENERATIONS = 150$
- Dynamic Demes model:  $cores = 32, slaves = 28, n_{ind} = 6, GENOTYPES = 4500$

Όπως και στην βελτιστοποίηση με δεδομένα ωριαίου χρονικού βήματος, έτσι κι εδώ ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός Φ/Β στοιχείων σε σειρά,  $N_{s,max}$ , είναι η βέλτιστη λύση για την μεταβλητή  $N_s$ , ενώ ο μέγιστος επιτρεπτός αριθμός από σειρές συνδεδεμένες στον μετατροπέα είναι η βέλτιστη τιμή για την μεταβλητή  $N_p$ . Ακόμη, ενώ την μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας την επιτυγχάνουμε με τον μετατροπέα 3, ο βέλτιστος οικονομικά σχεδιασμός είναι αυτός με τον τύπο μετατροπέα 2. Και σε αυτήν την περίπτωση, οι μετατροπείς τύπου 4 και 5 είναι οικονομικά αλλά και ενεργειακά ασύμφοροι, όπως είδαμε και στα δεδομένα ανά ώρα. Παρατηρούμε μεγάλη απόκλιση στις τιμές ενέργειας

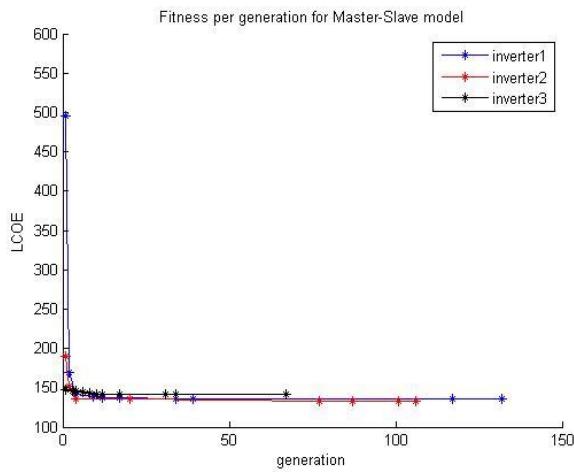
και LCOE για μετατροπές 4 και 5 σε σχέση με τα δεδομένα ανά ώρα. Αυτό συμβαίνει διότι στις προσομοιώσεις ανά λεπτό η τιμή του  $N_{s,max}$  διαφέρει σε σχέση με τις αντίστοιχες ανά ώρα. Αυτό, σε συνδυασμό με την υψηλή τιμή της μεταβλητής  $V_{i,min}$  για τους δύο αυτούς μετατροπές, έχει σαν αποτέλεσμα η τιμή της ισχύος που δέχονται οι μετατροπές να είναι ίση με μηδέν, λόγω του ότι έχουμε λιγότερα πλαίσια σε σειρά σε σχέση με τα δεδομένα ανά ώρα, με συνέπεια η τιμή τάσης που παράγεται από τα πλαίσια να είναι μικρότερη από την  $V_{i,min}$ . Αυτό δεν ισχύει για τον μετατροπέα τύπου 2, καθώς παρά το γεγονός πως έχει υψηλή τιμή  $V_{i,min}$  μπορεί να δεχτεί περισσότερα πλαίσια σε σειρά από τους άλλους 2 μετατροπές, συνεπώς παράγει μη μηδενική τιμή ισχυος σε κάθε χρονική στιγμή.

Για να επιβεβαιωθούμε πως ο αλγόριθμος συγκλίνει στην ολικά βέλτιστη (ή τουλάχιστον να προσεγγίζει την βέλτιστη λύση με πολύ μικρή απόκλιση στην τιμή της βέλτιστης λύσης) και δεν εγκλωβίζεται σε τοπικά βέλτιστα, εφαρμόσαμε εξαντλητική αναζήτηση για τον μετατροπέα τύπου 4. Στο επόμενο σχήμα βλέπουμε μια περίπτωση όπου υπάρχει τοπικό ελάχιστο. Βλέπουμε από τα παραπάνω αποτελέσματα πως η βελτιστοποίηση καταφέρνει να αποφύγει αυτά τα σημεία και να συγκλίνει στο ολικό ελάχιστο, ή σε λύση χοντά σε αυτό.

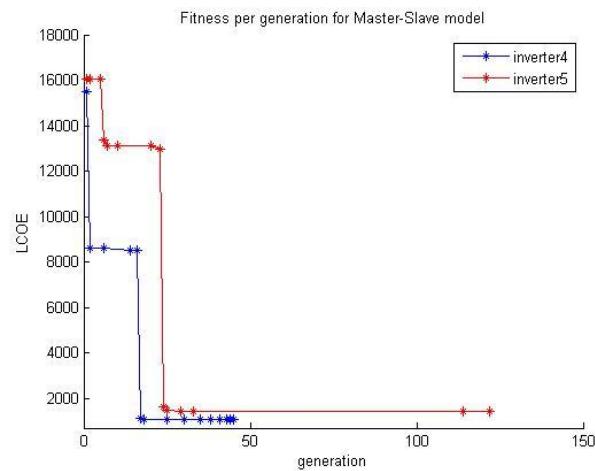


Σχήμα 6.3: Περίπτωση όπου έχουμε τοπικό ελάχιστο. Μεταβλητές είναι οι  $N_r$ ,  $DIM1$  και σταθερές  $N_s = 12$ ,  $N_p = 4$ ,  $Fy = 15m$ ,  $\beta = 2.5^\circ$ .

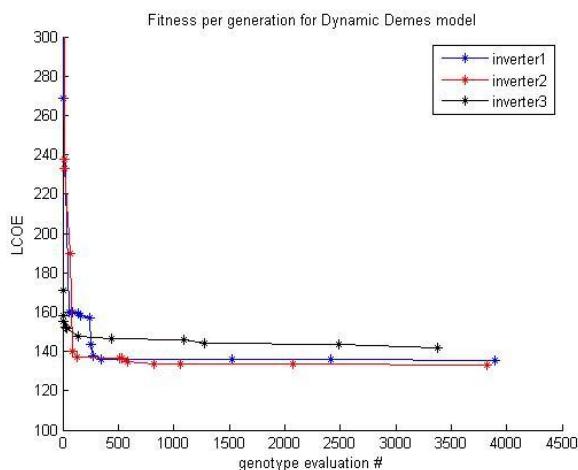
Για να καταλάβουμε την λειτουργία του γενετικού αλγορίθμου και να βγάλουμε συμπεράσματα ως προς τον χρόνο και την ποιότητα σύγκλισης, στα παρακάτω σχήματα βλέπουμε πως μεταβάλλεται η βέλτιστη λύση ανά επανάληψη. Παραθέτουμε δύο διαγράμματα για κάθε αλγόριθμο μιας και λόγω της μεγάλης απόκλισης των μετατροπέων 4 και 5 δεν είναι εμφανής η μεταβολή της βέλτιστης λύσης για τους άλλους τρεις μετατροπές.



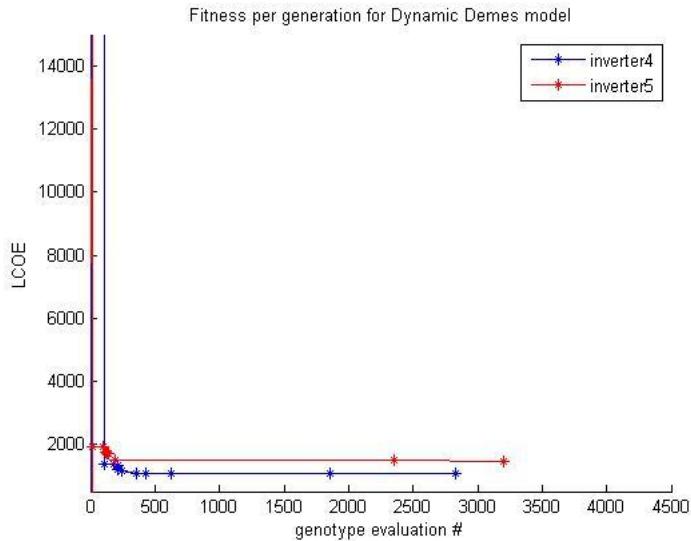
Σχήμα 6.4: Διάγραμμα μεταβολής της βέλτιστης λύσης για τους μετατροπείς 1, 2 και 3(Master-Slave model).



Σχήμα 6.5: Διάγραμμα μεταβολής της βέλτιστης λύσης για τους μετατροπείς 4 και 5(Master-Slave model).

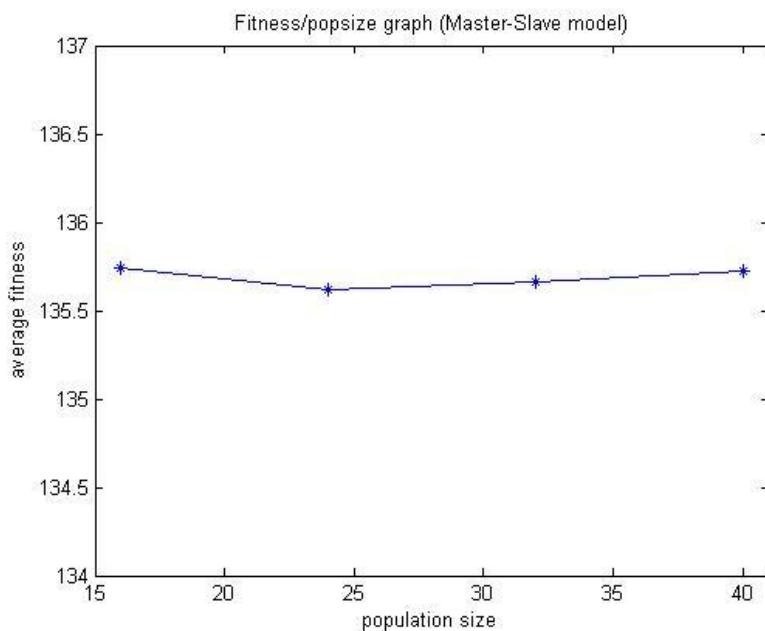


Σχήμα 6.6: Διάγραμμα μεταβολής της βέλτιστης λύσης για τους μετατροπείς 1, 2 και 3 (Dynamic Demes model).

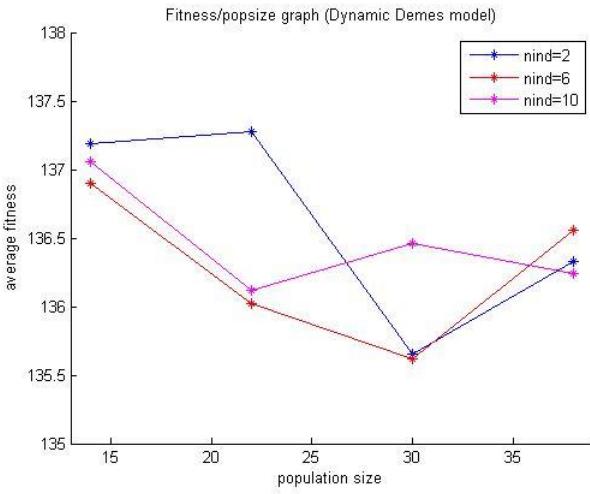


Σχήμα 6.7: Διάγραμμα μεταβολής της βέλτιστης λύσης για τους μετατροπείς 4 και 5 (Dynamic Demes model).

Όπως και στα δεδομένα ανά ώρα, έτσι κι εδώ ο αλγόριθμος βλέπουμε να συγκλίνει νωρίς σε σχεδόν βέλτιστη λύση. Και πάλι μπορούμε, αν είναι απαραίτητο, να αποφύγουμε περιττές επαναλήψεις ώστε να κερδίσουμε σε χρόνο εκτέλεσης. Για να δούμε εάν και κατά πόσο ο αριθμός χρωμοσωμάτων στον συνολικό πληθυσμό, αλλά και ο αριθμός των χρωμοσωμάτων στους υποπληθυσμούς επηρεάζουν την ποιότητα της λύσης μας, παραθέτουμε τα παρακάτω γραφήματα, που προκύπτουν από μέσους όρους στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης από πολλές βελτιστοποιήσεις, με διαφορετικό αριθμό χρωμοσωμάτων στους πληθυσμούς σε κάθε βελτιστοποίηση. Οι βελτιστοποιήσεις έγιναν για τον μετατρόπεια DC/AC τύπου 1.



Σχήμα 6.8: Μέση τιμή βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το μέγεθος του πληθυσμού (Master-Slave model).

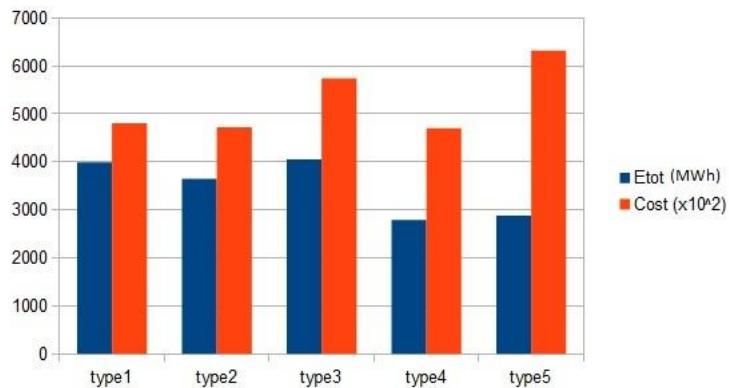


Σχήμα 6.9: Μέση τιμή βέλτιστης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε σχέση με το μέγεθος του πληθυσμού (Dynamic Demes model).

Ενώ για το Master-Slave μοντέλο συγκλίνει με ακρίβεια στην ολικά βέλτιστη λύση για οποιονδήποτε αριθμό χρωμοσωμάτων στον πληθυσμό, δεν ισχύει το ίδιο και για το Dynamic-Demes μοντέλο, στο οποίο βλέπουμε πως για να πάρουμε μια καλή λύση, που να θεωρείται βέλτιστη, πρέπει να επιλέξουμε προσεκτικά των αριθμό χρωμοσωμάτων στον πληθυσμό και στους υποπληθυσμούς. Τιμές για μέγεθος πληθυσμού,  $pop_{size} = 25 - 35$ , και μέγεθος υποπληθυσμού,  $n_{ind} = 2 - 6$ , βλέπουμε να αποδίδουν καλύτερα σε ποιότητα λύσης σε σχέση με άλλες, όπου η βέλτιστη λύση που παίρνουμε μπορεί να αποκλίνει αρκετά από την ολική βέλτιστη λύση.

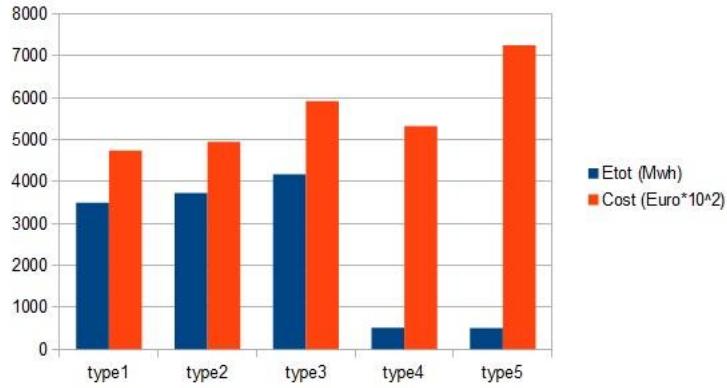
### 6.2.3 Σύγχριση αποτελεσμάτων με δεδομένα ωριαίου χρονικού βήματος και δεδομένα ανά λεπτό

Στο διάγραμμα του Σχήματος 6.11 βλέπουμε τις τιμές ενέργειας και κόστους της βέλτιστης διάταξης του Φ/Β πάρκου που μας δίνει η βέλτιστοποίηση για κάθε τύπο μετατροπέα DC/AC με τα δεδομένα ανά ώρα.



Σχήμα 6.10: Κόστος - παραγόμενη ενέργεια για κάθεμια από τις βέλτιστες λύσεις (δεδομένα ανά ώρα).

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τα δεδομένα ανά λεπτό παρουσιάζονται στο Σχήμα 6.12.



Σχήμα 6.11: Κόστος - παραγόμενη ενέργεια για κάθεμια από τις βέλτιστες λύσης (δεδομένα ανά λεπτό).

Στον επόμενο πίνακα, παρουσιάζουμε τις αποκλίσεις των LCOE, ενέργειας και κόστους των βέλτιστων λύσεων των δεδομένων ανά λεπτό από τις αντίστοιχες των δεδομένων ανά ώρα, για κάθε τύπο μετατροπέα (δηλαδή, πόσο % διαφέρει η ενέργεια και το κόστος που εκτιμάμε με τα δεδομένα ανά λεπτό, από τις αντίστοιχες τιμές κόστους και ενέργειας για τα δεδομένα ανά ώρα).

Πίνακας 6.8: Απόκλιση στις τιμές LCOE, ενέργειας και κόστους για τα δεδομένα ανά λεπτό από αυτές των δεδομένων ανά ώρα.

DC/AC type	Απόκλιση % (LCOE)	Απόκλιση % ( $E_{tot}$ )	Απόκλιση % (Cost)
type1	+12.5	-12.4	-1.5
type2	+2.7	+1.9	+4.6
type3	+0.2	+2.9	+3.1
type4	+525.4	-81.9	+12.9
type5	+562.1	-82.7	+14.7

Από τα αποτελέσματα με τα δεδομένα ανά λεπτό, φαίνεται ότι με τα δεδομένα ανά ώρα δεν κάνουμε ακριβή εκτίμηση της ποσότητας ενέργειας που παράγεται αλλά και του κόστους, μιας και έχουμε ένα σημαντικό ποσοστό απόκλισης στα αποτελέσματα. Σχετικά με τις βέλτιστες τιμές των μεταβλητών, οι περισσότερες κινούνται στο ίδιο εύρος και στις δύο περιπτώσεις, και στην ουσία μόνο η γωνία κλίσης στους μετατροπές τύπου 1, 4 και 5 είναι διαφορετική μεταξύ αυτών των δύο εκτελέσεων. Η απόσταση  $F_y$  λαμβάνει διάφορες τιμές μιας και δεν επηρεάζει την σχεδίαση. Αυτό συμβαίνει διότι η ισχύς αιχμής που θέλουμε να επιτύχουμε είναι σχετικά μικρή, και για την επίτευξή της απαιτείται μόνο ένα μπλοκ από Φ/Β στοιχεία. Συνεπώς, για το παρόν πρόβλημα, η μεταβλητή  $F_y$  δεν θα επηρεάσει το LCOE (αυτό φαίνεται στην εξίσωση 2.68 για  $N_{row} = 1$ ). Η  $DIM_{1,max}$  δίνει λίγο καλύτερο LCOE όταν λαμβάνει τιμή κοντά στο κάτω όριό της για τους περισσότερους μετατροπές σε κάθε αλγόριθμο. Η συνολική ποσότητα παραγόμενης ενέργειας είναι λιγότερη στις βελτιστοποιήσεις ανά λεπτό για τους τύπους μετατροπέων 1, 4 και 5, ενώ το οικονομικό κόστος είναι μεγαλύτερο για όλους τους μετατροπές πλην του μετατροπέα τύπου 1, όπου είναι λίγο μικρότερο. Ως συνέπεια τούτου, το προβλεπόμενο LCOE είναι μεγαλύτερο στις βελτιστοποιήσεις ανά λεπτό από τις αντίστοιχες τιμές του LCOE για τα δεδομένα ανά ώρα, πράγμα που σημαίνει ότι η

παραγωγή κάθε MWh ωστε μας κοστίσει λίγο παραπάνω στην πραγματικότητα από ότι υπολογίζαμε εξ αρχής με τα δεδομένα ανά λεπτό.

Τέλος, αν δοκιμάσουμε να εκτελέσουμε τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης των δεδομένων ανά λεπτό στο μοντέλο υπολογισμού της LCOE ανά ώρα, προκύπτουν τα παρακάτω:

Πίνακας 6.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης ανά ώρα με είσοδο τις βέλτιστες σχεδιαστικές παραμέτρους που λάβαμε από τα δεδομένα ανά λεπτό. Στην παρένθεση αναγράφεται η απόκλιση των τιμών που δίνουν οι προσομοιώσεις αυτές, από τις βέλτιστες τιμές που λάβαμε στην βελτιστοποίηση με ωριαίο χρονικό βήμα.

DC/AC type	$N_s$	$N_p$	$N_r$	$F_y$ (m)	$\beta$ (°)	$DIM_1$ (m)	$LCOE$ (Euro/MWh)	$E_{tot}$ (MWh)	Cost (Euro)
1	12	3	2	17.57	41.46	200.01	136.17(+12.9)	3479.85(-12.8)	473860.86(-1.5)
2	19	2	3	8.88	27.93	201.99	136.56(+5.6)	3618.06(-0.9)	494096.01(+4.6)
3	12	4	2	2.33	26.41	200.70	145.6(+2.8)	4065.98(+0.2)	592001.31(+3.1)
4	12	4	1	1.70	2.91	249.38	1095.07(+549.3)	484.77(-82.6)	530856.84(+12.9)
5	12	5	1	41.50	2.59	215.64	1501.39(+584.3)	482.99(-83.2)	725157.57(+14.7)

Βλέπουμε πως για όλους τους μετατροπείς DC/AC πλην του μετατροπέα τύπου 3, η απόκλιση στις τιμές ενέργειας, κόστους και LCOE είναι μεγάλη. Αυτό σημαίνει πως η προσομοίωση με δεδομένα ανά λεπτό διαφέρει αρκετά εώς πολύ από αυτήν με δεδομένα ανά ώρα. Η χρήση των δεδομένων ανά λεπτό μας βοηθά στο να κάνουμε μια ακριβέστερη εκτίμηση του LCOE, καθώς και στο να βρούμε καλύτερες τιμές στις σχεδιαστικές παραμέτρους. Με βάση τα παραπάνω, μπορούμε να πούμε πως είναι σημαντική η διαφορά της προσομοίωσης με δεδομένα ανά λεπτό, από αντίστοιχη προσομοίωση με δεδομένα ανά ώρα. Άρα, για να βελτιστοποιήσουμε τον σχεδιασμό ενός Φ/Β συστήματος μεγάλης κλίμακας, χρίνεται απαραίτητη η χρήση δεδομένων με χρονικό βήμα ενός λεπτού.

### 6.3 Χρόνοι εκτέλεσης - Επιτάχυνση

Θεωρητικά, η επιτάχυνση,  $speed_{up}$ , λόγω της χρήσης παράλληλης επεξεργασίας για το πρόβλημα αυτό είναι:

$$speed_{up} = \frac{T_{ser}}{T_{par}} \quad (6.1)$$

όπου  $T_{ser}$ ,  $T_{par}$  είναι ο χρόνος που χρειάζεται η βελτιστοποίηση χρησιμοποιώντας σειριακό και παράλληλο αντίστοιχα γενετικό αλγόριθμο. Επειδή αναμένουμε πολύ μεγάλο χρόνο εκτέλεσης για την σειριακή εκδοχή, υπολογίζουμε το  $T_{ser}$  ανθροίζοντας τον χρόνο εκτέλεσης κάθε χρωμοσώματος σε κάθε γενιά της παράλληλης εκτέλεσης του αλγορίθμου για το Master-Slave μοντέλο.

Πίνακας 6.10: Επιτάχυνση για κάθε μετατροπέα (ενδεικτικά) σε δευτερόλεπτα για το Master-Slave (MS) και το Dynamic Demes (DD) μοντέλο (time step: 1 hour).

Μετατροπέας DC/AC	$T_{par}(MS)$	$T_{par}(DD)$	$T_{ser}$	$speed_{up}(MS)$	$speed_{up}(DD)$
inverter 1	523	365	5053.5	9.66	13.85
inverter 2	479	358	3868.3	8.08	10.81
inverter 3	267	196	2261.4	8.45	11.54
inverter 4	435	188	2824.9	6.49	15.03
inverter 5	387	153	1485.4	3.84	9.71
averages	418.2	252	3098.7	7.3	12.19

Πίνακας 6.11: Επιτάχυνση για κάθε μετατροπέα (ενδεικτικά) σε δευτερόλεπτα για το Master-Slave (MS) και το Dynamic Demes (DD) μοντέλο (time step: 1 min).

Μετατροπέας DC/AC	$T_{par}(MS)$	$T_{par}(DD)$	$T_{ser}$	$speed_{up}(MS)$	$speed_{up}(DD)$
inverter 1	32313	24173	398939	12.3	16.5
inverter 2	28558	19196	376081	13.2	19.6
inverter 3	16700	13745	274610	16.4	20
inverter 4	20080	12069	222988	11.1	18.5
inverter 5	15787	9287	176937	11.2	19.1
averages	22687.6	15694.8	289911	12.84	18.74

Παρατηρούμε πώς με τον αλγόριθμο δυναμικών πληθυσμών επιτυγχάνουμε μεγαλύτερη επιτάχυνση απ' ότι με τον Master-Slave αλγόριθμο. Επίσης, είναι προφανές το πλεονέκτημα που διαθέτουμε με την χρήση του υπολογιστή πλέγματος στην παρούσα μεθοδολογία. Μια βελτιστοποίηση που σε έναν συμβατικό υπολογιστή θα διαρκούσε 4 ημέρες, εκτελείται σε 6 μόλις ώρες στον υπολογιστή πλέγματος.

## 6.4 Αξιοποίηση διαθέσιμων πόρων

Η πολυπλοκότητα της συνάρτησης αξιολόγησης είναι μεγάλη, και αναμένουμε μεγάλους χρόνους εκτέλεσης της αντικειμενικής συνάρτησης. Στους Πίνακες 6.9 και 6.10 παρουσιάζουμε τους χρόνους εκτέλεσης της αντικειμενικής συνάρτησης για την βέλτιστη λύση του κάθε μετατροπέα DC/AC.

Πίνακας 6.12: Χρόνοι εκτέλεσης (σε δευτερόλεπτα) της αντικειμενικής συνάρτησης για χρονικό βήμα  $\delta_t = 1\text{hour}$ .

Μετατροπέας DC/AC	Μικρότερος	Μέσος χρόνος	Μεγαλύτερος
type 1	0	1.175	8
type 2	0	0.992	15
type 3	0	0.549	5
type 4	0	0.654	15
type 5	0	0.330	15

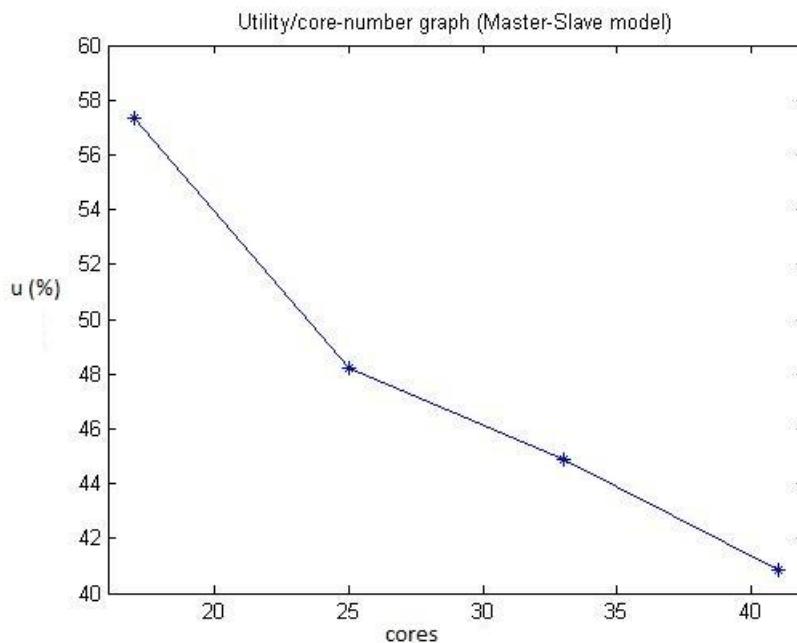
Πίνακας 6.13: Χρόνοι εκτέλεσης (σε δευτερόλεπτα) της αντικειμενικής συνάρτησης για χρονικό βήμα  $\delta_t = 1min$ .

Μετατροπέας DC/AC	Μικρότερος	Μέσος χρόνος	Μεγαλύτερος
type 1	44	102.29	939
type 2	44	96.43	934
type 3	43	70.41	280
type 4	24	57.18	489
type 5	19	45.37	509

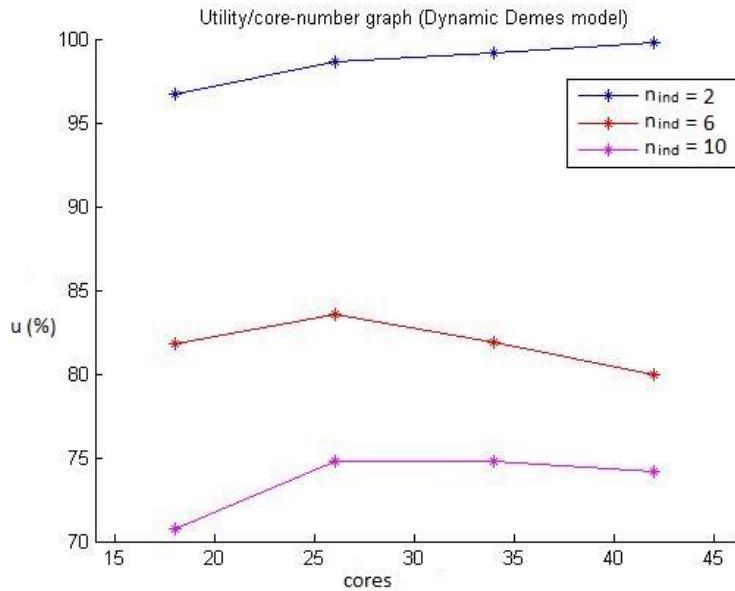
Ένα κριτήριο απόδοσης, εκτός από την ποιότητα σύγκλισης, είναι το ποσοστό των επεξεργαστικών μονάδων που χρησιμοποιούμε, και ορίζεται ως εξής:

$$u = \frac{T_{slaves}}{T_{tot}} \quad (6.2)$$

όπου  $T_{slaves}$  είναι ο συνολικός χρόνος κατά τον οποίο χρησιμοποιούμε τους slaves για υπολογισμούς (χωρίς τις αναμονές λόγω ανταλλαγής μηνυμάτων) και  $T_{tot}$  ο συνολικός χρόνος που διαρκεί η βελτιστοποίηση. Για τον Master-Slave αλγόριθμο αναμένουμε σχετικά χαμηλά ποσοστά χρησιμοποίησης, τα οποία θα ελατώνονται όσο αυξάνουμε τον αριθμό των διαθέσιμων επεξεργαστικών πόρων (άρα και τον αριθμό χρωμοσωμάτων στον πληθυσμό). Για τον αλγόριθμο δυναμικών πληθυσμών, η διακύμανση στην τιμή του ποσοστού χρησιμοποίησης θα εξαρτάται και από τον μέγιστο αριθμό χρωμοσωμάτων στους υποπληθυσμούς ( $n_{ind}$ ). Τα αποτελέσματα στα σχήματα 6.13 και 6.14, που αφορούν το ποσοστό αξιοποίησης πόρων, είναι για τον μετατροπέα DC/AC τύπου 1 (του οποίου η διαδικασία βελτιστοποίησης είναι η πιο χρονοβόρα σε σχέση με τους υπολοίπους) και με χρονικό βήμα προσομοίωσης  $\delta_t = 1min$ .



Σχήμα 6.12: Ποσοστό αξιοποίησης επεξεργαστικών μονάδων για διαφορετικούς αριθμούς διαθέσιμων πόρων (Master-Slave).



Σχήμα 6.13: Ποσοστό αξιοποίησης επεξεργαστικών μονάδων για διαφορετικούς αριθμούς διαθέσιμων πόρων (Dynamic Demes model).

Πράγματι, όσο αυξάνεται ο αριθμός των διαθέσιμων πόρων (άρα και των slave διεργασιών, ή αλλιώς, το μέγεθος του πληθυσμού) στο Master-Slave μοντέλο, το ποσοστό αξιοποίησης μειώνεται δραματικά. Για τον αλγόριθμο δυναμικών πληθυσμών, για μικρό  $n_{ind}$  το ποσοστό αυτό αυξάνει όσο αυξάνουν οι διαθέσιμοι πόροι, ενώ για μεγαλύτερα  $n_{ind}$  βλέπουμε μια αύξηση έως κάποιον συγκεκριμένο αριθμό επεξεργαστών, και πέρα από αυτό μια μικρή, σταδιακή μείωση. Με αυτόν τον αλγόριθμο εξασφαλίζουμε πως τουλάχιστον το 80% των πόρων αξιοποιείται, σε αντίθεση με τον Master-Slave όπου το ποσοστό αξιοποίησης είναι κατά πολύ μικρότερο. Ο αλγόριθμος δυναμικών πληθυσμών έχει την ιδιότητα της κλιμάκωσης, δηλαδή λειτουργεί το ίδιο αποδοτικά (ή σχεδόν το ίδιο) όσο κι αν αυξήσουμε τον αριθμό των διαθέσιμων επεξεργαστικών κόμβων. Αντίθετα, ο Master-Slave αλγόριθμος δεν έχει αυτήν την ιδιότητα, μιας και αν συνεχίσουμε να αυξάνουμε τους διαθέσιμους επεξεργαστές το ποσοστό χρησιμοποίησης θα συνεχίζει να ελατώνεται.

## 6.5 Βελτιστοποίηση για διαφορετικές τιμές στην ισχύ αιχμής του Φ/Β πάρκου

Στις προηγούμενες παραγγάφους παρουσιάστηκαν τα αποτελέσματα των βελτιστοποιήσεων με δεδομένα ανά ώρα και ανά λεπτό, για τους δύο αλγορίθμους που υλοποιήθηκαν. Η ισχύς αιχμής,  $P_{plant,nom}$ , στα παραπάνω αποτελέσματα είναι ορισμένη στα  $100kW$ . Όμως, στα πραγματικά μεγάλης κλίμακας Φ/Β συστήματα η επιθυμητή ισχύς αιχμής μπορεί να φτάσει τα πολλά  $MW$ . Σε αυτήν την παράγραφο παρουσιάζουμε αποτελέσματα για διάφορες τιμές της  $P_{plant,nom}$ . Οι δοκιμές έγιναν για τον μετατροπέα DC/AC τύπου 2, μιας και είναι ο βέλτιστος μετατροπέας για την περίπτωσή μας (δίνει το μικρότερο LCOE από όλους τους υπόλοιπους μετατροπείς DC/AC).

Για τα δεδομένα αυτά, αναμένουμε σημαντική αύξηση στον χρόνο εκτέλεσης της διαδικασίας

βελτιστοποίησης, διότι εφόσον αυξάνουμε την ονομαστική ισχύ, αυξάνεται και ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων,  $N_{I,O}$ , που πρέπει να τοποθετήσουμε (Εξίσωση 2.81), συνεπώς αυξάνεται και το μέγεθος της προσομοίωσης στην αντικειμενική συνάρτηση του αλγορίθμου.

Στον πίνακα 6.14 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης για τον μετατροπέα τύπου 2 με δεδομένα ωριαίου χρονικού βήματος, ενώ στον πίνακα 6.15 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για δεδομένα χρονικού βήματος ανά λεπτό, για διάφορες τιμές ονομαστικής ισχύος και στις δύο περιπτώσεις, για τον Master-Slave αλγόριθμο.

Στους πίνακες 6.16 και 6.17 παρουσιάζονται τα αντίστοιχα αποτελέσματα για τον αλγόριθμο δυναμικών πληθυσμών (Dynamic Demes).

Πίνακας 6.14: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για διάφορες τιμές της ονομαστικής ισχύος, με χρονικό βήμα  $\delta_t = 1hour$  (Master-Slave αλγόριθμος).

Ονομαστική Ισχύς (MW)	$N_s$	$N_p$	$N_r$	$F_y$ (m)	$\beta$ (°)	$DIM_1$ (m)	$LCOE$ (Euro/MWh)	$E_{tot}$ (MWh)	Cost (Euro)
0.1	23	2	3	25.66	25.65	210.34	129.33	3651.30	472223.49
0.5	23	2	7	15.21	25.18	200.31	129.84	20400.42	2648733.45
1	23	2	9	21.73	26.05	202.29	129.97	41514.89	5395886.26

Πίνακας 6.15: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για διάφορες τιμές της ονομαστικής ισχύος, με χρονικό βήμα  $\delta_t = 1min$  (Master-Slave αλγόριθμος).

Ονομαστική Ισχύς (MW)	$N_s$	$N_p$	$N_r$	$F_y$ (m)	$\beta$ (°)	$DIM_1$ (m)	$LCOE$ (Euro/MWh)	$E_{tot}$ (MWh)	Cost (Euro)
0.1	19	2	3	8.88	27.93	201.99	132.84	3719.60	494096.01
0.5	19	2	6	19.40	26.51	205.29	133.40	21035.12	2806029.86
1	19	2	9	28.31	24.84	200.73	133.58	42664.85	5699011.57

Πίνακας 6.16: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για διάφορες τιμές της ονομαστικής ισχύος, με χρονικό βήμα  $\delta_t = 1hour$  (αλγόριθμος δυναμικών πληθυσμών).

Ονομαστική Ισχύς (MW)	$N_s$	$N_p$	$N_r$	$F_y$ (m)	$\beta$ (°)	$DIM_1$ (m)	$LCOE$ (Euro/MWh)	$E_{tot}$ (MWh)	Cost (Euro)
0.1	23	2	3	13.28	26.42	227.82	129.38	3651.67	472446.44
0.5	23	2	8	15.31	21.84	242.98	130.16	19413.06	2526737.61
1	23	2	9	36.11	23.55	236.76	130.34	41532.64	5413213.32

Πίνακας 6.17: Αποτελέσματα βελτιστοποίησης για διάφορες τιμές της ονομαστικής ισχύος, με χρονικό βήμα  $\delta_t = 1min$  (αλγόριθμος δυναμικών πληθυσμών).

Ονομαστική Ισχύς (MW)	$N_s$	$N_p$	$N_r$	$F_y$ (m)	$\beta$ (°)	$DIM_1$ (m)	$LCOE$ (Euro/MWh)	$E_{tot}$ (MWh)	Cost (Euro)
0.1	19	2	4	27.46	25.46	234.46	133.06	4132.81	549897.83
0.5	19	2	9	11.83	25.75	240.23	133.46	20426.80	2726111.57
1	19	2	6	24.54	27.17	236.48	133.98	42027.78	5630895.92

Σε κάθε περίπτωση, ο βέλτιστος αριθμός πλαισίων συνδεδεμένων σε σειρά ( $N_s$ ) και ο βέλτιστος αριθμός παράλληλα συνδεδεμένων σειρών από Φ/B πλαισία ( $N_p$ ) που συνδέονται στους μετατροπείς DC/AC είναι η μέγιστη τιμή που μπορούν να λάβουν αυτές οι μεταβλητές. Ο αριθμός από γραμμές συστοιχιών σε κάθε block ( $N_r$ ) διαφοροποιείται ανάλογα με την περίπτωση. Για την επίτευξη μεγάλης ονομαστικής ισχύος απαιτούνται πολλές γραμμές Φ/B πλαισίων σε κάθε block. Η συνολική παραγόμενη ενέργεια επηρεάζεται τόσο από την απόσταση των προσκείμενων block ( $F_y$ ) όσο και από το μήκος που διαθέτουμε στην νότια πλευρά της περιοχής εγκατάστασης ( $DIM_1$ ). Από τα παραπάνω αποτελέσματα βλέπουμε πως με λιγότερες γραμμές σε κάθε block και μεγαλύτερη έκταση στη νότια πλευρά, ο οικονομικός συντελεστής είναι ίδιος με διάταξη όπου υπάρχουν περισσότερες γραμμές στο κάθε block και μικρότερο μήκος στη νότια πλευρά του οικοπέδου (περίπτωση στα δεδομένα ανά λεπτό για 0.5 MW). Η τιμή της απόστασης  $F_y$  λαμβάνει διάφορες τιμές, καθώς επηρεάζει τόσο το οικονομικό κόστος (μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ των block συνεπάγεται μεγαλύτερη έκταση γης που απαιτείται) τόσο και στην ποσότητα της ενέργειας που παράγεται (πιθανή σκιά οδηγεί σε μικρότερα επίπεδα ενέργειας). Παρατηρούμε πώς για μεγαλύτερες τιμές ονομαστικής ισχύος έχουμε μεγαλύτερη απόσταση  $F_y$  μεταξύ των προσκείμενων block (εκτός από την περίπτωση για  $P_{plant,nom} = 100kW$ , όπου η απόσταση δεν επηρεάζει την τιμή της LCOE, όπως αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα). Αυτό συμβαίνει διότι για μεγαλύτερες τιμές ονομαστικής ισχύος χρειαζόμαστε περισσότερες γραμμές σε κάθε block, πράγμα που σημαίνει πως αν η απόσταση παραμείνει ίδια θα έχουμε σκιά σε τμήματα των Φ/B πλαισίων με συνέπεια να παράγεται λιγότερη ενέργεια. Εξαίρεση αποτελεί το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης για 1 MW του αλγόριθμου δυναμικού πληθυσμών, όπου έχουμε λιγότερες σειρές στο κάθε block σε σχέση με τα αποτελέσματα για 0,5 MW. Σε αυτήν την περίπτωση, χρειάζονται περισσότερα block από Φ/B πλαισία στην περιοχή εγκατάστασης, παρά περισσότερες γραμμές πλαισίων σε κάθε block.

Στους πίνακες (6.18 - 6.19) παρουσιάζεται ο χρόνος εκτέλεσης των παραπάνω βελτιστοποιήσεων, καθώς και η επιτάχυνση που επιτυγχάνουμε με κάθε μέθοδο και για κάθε χρονικό βήμα (λεπτό - ώρα) που δοκιμάζουμε.

Πίνακας 6.18: Επιτάχυνση για κάθε μετατροπέα (ενδεικτικά) και χρόνοι εκτέλεσης (σε δευτερόλεπτα) για το Master-Slave (MS) και το Dynamic Demes (DD) μοντέλο (time step: 1 hour).

Ονομαστική Ισχύς (MW)	$T_{par}(MS)$	$T_{par}(DD)$	$T_{ser}$	$speed_{up}(MS)$	$speed_{up}(DD)$
0.1	479	358	3868	8.08	10.81
0.5	2067	1528	25959	12.56	16.99
1	4333	3063	55231	12.75	18.03

Πίνακας 6.19: Επιτάχυνση για κάθε μετατροπέα (ενδεικτικά) και χρόνοι εκτέλεσης (σε δευτερόλεπτα) για το Master-Slave (MS) και το Dynamic Demes (DD) μοντέλο (time step: 1 min).

Ονομαστική Ισχύς (MW)	$T_{par}(MS)$	$T_{par}(DD)$	$T_{ser}$	$speed_{up}(MS)$	$speed_{up}(DD)$
0.1	28558	19196	376081	13.2	19.6
0.5	144971	102357	2024613	13.97	19.78
1	576628	396635	7738358	13.42	19.51

Παρατηρούμε πως όσο αυξάνεται η ονομαστική ισχύς, αυξάνεται και η επιτάχυνση για τα δεδομένα ανά ώρα, ενώ για τα δεδομένα ανά λεπτό είναι περιπου η ίδια για οποιαδήποτε τιμή στην ονομαστική ισχύ. Επίσης, για τα δεδομένα ανά λεπτό η επιτάχυνση είναι μεγαλύτερη από αυτήν στα δεδομένα ανά ώρα. Βλέπουμε πως σε όλες τις περιπτώσεις, ο αλγόριθμος δυναμικών πληθυσμών μας δίνει μεγαλύτερο  $speed_{up}$  σε σχέση με τον Master-Slave αλγόριθμο, το οποίο ήταν και αυτό που επιθυμούσαμε εξ αρχής με την υλοποίησή του.

Τέλος, στους πίνακες (6.20 - 6.21) παρουσιάζουμε τους χρόνους εκτέλεσης της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε χρονικό βήμα.

Πίνακας 6.20: Χρόνοι εκτέλεσης (σε δευτερόλεπτα) της αντικειμενικής συνάρτησης για χρονικό βήμα  $\delta_t = 1hour$ .

Ονομαστική Ισχύς (MW)	Μικρότερος	Μέσος χρόνος	Μεγαλύτερος
0.1	0	0.992	15
0.5	3	6.656	73
1	7	14.162	149

Πίνακας 6.21: Χρόνοι εκτέλεσης (σε δευτερόλεπτα) της αντικειμενικής συνάρτησης για χρονικό βήμα  $\delta_t = 1min$ .

Ονομαστική Ισχύς (MW)	Μικρότερος	Μέσος χρόνος	Μεγαλύτερος
0.1	44	96.43	934
0.5	222	519.13	2919
1	447	1946.73	8934



# Κεφάλαιο 7

## Συμπεράσματα - μελλοντική δουλειά

---

Σε αυτή την εργασία παρουσιάσαμε μια μέθοδο για την βελτιστοποίηση του σχεδιασμού Φ/Β συστημάτων μεγάλης κλίμακας με σκοπό την ελαχιστοποίηση του κόστους ανά μονάδα παραγόμενης ενέργειας. Η διαδικασία βελτιστοποίησης είναι μεγάλη σε πολυπλοκότητα και απαιτητική σε πόρους και σίγουρα μπορεί να βελτιωθεί και να δίνει ακόμη ακριβέστερα αποτελέσματα, ίσως και με περισσότερες σχεδιαστικές παραμέτρους προς βελτιστοποίηση. Αυτό θα αύξανε αρκετά την πολυπλοκότητα και τον χρόνο σύγχλισης, όμως η έρευνα πάνω σε αλγορίθμους βελτιστοποίησης συνεχίζεται και συνέχεια βρίσκονται νέες μέθοδοι βελτιστοποίησης (είτε τελείως πρωτοποριακές, είτε υβριδικές υλοποιήσεις γνωστών μενόδων αναζήτησης).

Στην παρούσα μεθοδολογία, αρχικά εφαρμόσαμε το μαθηματικό μοντέλο με  $\delta_t = 1\text{hour}$ . Η διαδικασία βελτιστοποίησης στον υπολογιστή πλέγματος (grid computer) μπορεί να εκτελεστεί σε ικανοποιητικό χρόνο, και όπως είδαμε τα αποτελέσματα είναι αρκετά ακριβή. Παρόλα αυτά, συνεχίσαμε και εφαρμόσαμε το μαθηματικό μοντέλο με  $\delta_t = 1\text{min}$ . Αυτή η αλλαγή αυξάνει δραματικά την πολυπλοκότητα τόσο σε χρόνο εκτέλεσης όσο και σε απαιτήσεις μνήμης. Όμως, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης είναι πολύ πιο ακριβή από αυτά με  $\delta_t = 1\text{hour}$ .

Με την παρούσα εργασία μπορούμε να εκτιμήσουμε την παραγόμενη ενέργεια ενός Φ/Β συστήματος και να βρούμε τον βέλτιστο τρόπο τοποθέτησης των δομικών του στοιχείων σε εφικτό χρονικό διάστημα. Η παρούσα δουλειά μπορεί να εγκατασταθεί σε κάποιο σύστημα παράλληλης επεξεργασίας που υποστηρίζει την βιβλιοθήκη MPI και να αποκτάται απομακρυσμένη πρόσβαση στο πρόγραμμα μέσω διαδικτύου, ώστε να το χρησιμοποιήσουμε σε πραγματικά προβλήματα σε κατασκευές Φ/Β συστημάτων μεγάλης κλίμακας. Επίσης, μπορεί να συνδυαστεί με άλλες έρευνες σχετικά με τα Φ/Β συστήματα, με στόχο την υλοποίηση ενός παγκοσμίου δικτύου από Φ/Β συστήματα εγκατεστημένα σε διάφορα ηλεκτρικά δίκτυα με σκοπό την ακριβή παρακολούθηση των συστημάτων, την βελτιστοποίηση παραγωγής ενέργειας κλπ.

Η στροφή σε εναλλακτικές πηγές ενέργειας, αειφόρες και αβλαβείς για το περιβάλλον θα πρέπει να αποτελεί πρωτεύοντα στόχο για τις σύγχρονες κοινωνίες. Η καταστροφή του περιβάλλοντος λόγω των εκπομπών  $CO_2$  είναι μη αναστρέψιμη και ολέθρια για το μέλλον του πλανήτη, κάτι το οποίο θα πρέπει να προβληματίζει όλη την ανθρωπότητα, μιας και κάποτε θα αντιμετωπίσει τις συνέπειες

αυτής της αλόγιστης σπατάλης ενέργειας και καταστροφής λόγω της συνεχούς υπερκατανάλωσης των πόρων της γης.

# Βιβλιογραφία

- [1] T. Kerekes, E. Koutroulis, S. Eyigun, R. Teodorescu, M. Katsanevakis, and D. Sera, “A practical optimization method for designing large pv plants,” in *2011 IEEE International Symposium, on Industrial Electronics (ISIE)*, pp. 2051 –2056, 2011.
- [2] J. Bany and J. Appelbaum, “The effect of shading on the design of a field of solar collectors,” *Solar Cells*, vol. 20, no. 3, pp. 201–228, 1987.
- [3] D. Erbs, S. Klein, and J. Duffie, “Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation,” *Solar Energy*, vol. 28, no. 4, pp. 293–302, 1982.
- [4] P. Groumpos and K. Khouzam, “A generic approach to the shadow effect of large solar power systems,” *Solar Cells*, vol. 22, no. 1, pp. 29–46, 1987.
- [5] E. Lorenzo, G. Araujo, A. Cuevas, M. Egido, J. Minano, and R. Zilles, *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*. Earthscan Publications Ltd., 1st ed., 1994.
- [6] E. Skoplaki and J. Palyvos, “On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations,” *Solar Energy*, vol. 83, pp. 614–624, 2009.
- [7] S. Vasconcelos, P. Zacharias, and R. Mallwitz, “Highly efficient single-phase transformerless inverters for grid-connected photovoltaic systems,” In press.
- [8] A. Pavan, S. Castellan, S. Quaia, S. Roitti, and G. Sulligoi, “Power electronic conditioning systems for industrial photovoltaic fields: Centralized or string inverters?,” *International Conference on Clean Electrical Power*, pp. 208–214, 2007.
- [9] D. Weinstock and J. Appelbaum, “Optimal design of solar fields,” *22nd Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, pp. 163–165, 2002.
- [10] C. Deline, “Partially shaded operation of a grid-tied pv system,” *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, pp. 1268–1273, 2009.
- [11] L. Gao, R. Dougal, S. Liu, and A. Iotova, “Parallel-connected solar pv system to address partial and rapidly fluctuating shadow conditions,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 5, pp. 1548–1556, 2009.

- [12] P. Tsao, R. Muenster, S. Mah, M. Eaglin, and S. Sarhan, “Increasing pv system performance with active power management,” *ASES National Solar Conference*, 2010.
- [13] B. Pennington, S. Gupta, P. Saxton, D. Eden, L. Green, and J. Fleshman, *2010 Guidelines For California’s Solar Electric Incentive Programs (Senate Bill 1)*. California Energy Commission, 3rd ed., 2010.
- [14] U. Schwabe and P. Jansson, “Streamlining large scale photovoltaic arrays for utility interconnection,” *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, pp. 1–5, 2009.
- [15] B. Jacob, M. Brown, K. Fukui, and N. Trivedi, *Intoduction to grid computing*. IBM read-book, 2005.
- [16] D. Laforenza, “Parallel computer architectures: state of the art and trends,” *Theoretical Chemistry Accounts: Theory, Computation, and Modeling (Theoretica Chimica Acta)*, vol. 79, pp. 155–167, 1991.
- [17] C. Lee and D. Talia, *Grid Programming Models: Current Tools, Issues and Directions*. Wiley, 2003.
- [18] Xu, H. and Wu, G., “Parallel programming in grid: Using mpi,” *Proceedings of the Third International Symposium on Electronic Commerce and Security Workshops(ISECS ’10)*, pp. 136 – 138, 2010.
- [19] A. H. Wright, “Genetic algorithms for real parameter optimization,” in *Foundations of Genetic Algorithms*, pp. 205–218, Morgan Kaufmann, 1991.
- [20] M. Mitchell, *An Intoduction to Genetic Algorithms*. The MIT Press, 5 ed., 1998.
- [21] M. Nowostawski and R. Poli, “Dynamic demes parallel genetic algorithm,” in *Third International Conference, on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems*, pp. 93 –98, 1999.
- [22] M. Nowostawski, *Parallel Genetic Algorithms and Sequencing Optimisation*. Mini-project report, University of Birmingham UK, 1998.
- [23] M. Nowostawski and R. Poli, “Parallel genetic algorithm taxonomy,” in *Third International Conference, on Knowledge-Based Intelligent Information Engineering Systems*, pp. 88 –92, 1999.