ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Άρης Κορνελάκης

Ανάπτυξη αλγορίθμου για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση, χωροθέτηση και διάταξη φωτοβολταϊκών συστημάτων διασυνδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο με βάση την αποδοτικότητα της επένδυσης, χρησιμοποιώντας εξελικτικές μεθόδους και υλοποίηση αντίστοιχου λογισμικού

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Εξεταστική Επιτροπή:

Καθηγητής Κωνσταντίνος Καλαϊτζάκης (επιβλέπων)

Καθηγητής Γεώργιος Σταυρακάκης

Επίκουρος Καθηγητής Θεοχάρης Τσούτσος

Χανιά 2009

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Καλαϊτζάκη για την επίβλεψη αυτής της διατριβής και τη συνεργασία σε όλη τη διάρκεια εκπόνησής της. Επίσης τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Σταυρακάκη και τον Επίκουρο Καθηγητή του τμήματος Μηχανικών Περιβάλλοντος του Πολυτεχνείου Κρήτης κ. Θεοχάρη Τσούτσο για την ανάγνωση της διατριβής καθώς και τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και, τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως το φίλο και συνάδελφο Κώστα Παπαδάκη για τις πολύτιμες συμβουλές του κατά την ανάπτυξη του λογισμικού που προέκυψε από την παρούσα εργασία.

Περίληψη

Οι διαρκώς αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας, η μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με την πετρελαϊκή κρίση και την επιβάρυνση του περιβάλλοντος εξαιτίας των συμβατικών πηγών ενέργειας έχουν προκαλέσει έντονο ενδιαφέρον γύρω από την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τα συστήματα φωτοβολταϊκών στοιχείων διασυνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο ανήκουν σε αυτή την κατηγορία των εναλλακτικών ενεργειακών συστημάτων και χρησιμοποιούνται τόσο αυτόνομα όσο και για την παροχή της παραγόμενης ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε μια μεθοδολογία καθώς και το αντίστοιχο λογισμικό για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση, τη χωροθέτηση και το σχεδιασμό συστημάτων φωτοβολταϊκών στοιχείων διασυνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο, με σκοπό τη διάθεση σε αυτό της ενέργειας που παράγουν. Η διαδικασία βελτιστοποίησης ενσωματώνει εξελικτικές μεθόδους, όπως οι Γενετικοί Αλγόριθμοι και η Βελτιστοποίηση με Σωματίδια Σμήνους (Particle Swarm Optimization) λόγω της πολυπλοκότητας και της μη-γραμμικότητας του αντικειμενικού κριτηρίου και των περιορισμών του προβλήματος. Η βελτιστοποίηση αποσκοπεί στην μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους του συστήματος για όλη τη διάρκεια ζωής του, το οποίο αντιστοιχεί στην Καθαρή Παρούσα Αξία της επένδυσης.

Περιεχόμενα

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Τα φωτοβολταϊκά συστήματα παραγωγής ενέργειας

Οι διαρκώς αυξανόμενες ενεργειακές ανάγκες της ανθρωπότητας, η μείωση των αποθεμάτων των ορυκτών καυσίμων σε συνδυασμό με την πετρελαϊκή κρίση και την επιβάρυνση του περιβάλλοντος εξαιτίας της χρήσης των συμβατικών θερμικών πηγών ενέργειας έχουν προκαλέσει έντονο ενδιαφέρον γύρω από την αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Αυτές οι πηγές ενέργειας χαρακτηρίζονται από το στοιχείο της διαρκούς τους ανανέωσης και προσφέρονται δωρεάν. Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται η αυξανόμενη εγκατάσταση και χρήση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ΑΠΕ) τα οποία πλέον καταλαμβάνουν ένα σημαντικό και διαρκώς αυξανόμενο μερίδιο από την συνολική παγκόσμια παραγωγή ενέργειας. Τα συστήματα αυτά χρησιμοποιούνται τόσο ως αυτόνομα συστήματα όσο και σε συνεργασία με το ηλεκτρικό δίκτυο. Τέτοιου είδους συστήματα είναι και τα συστήματα φωτοβολταϊκών (Φ/Β) διατάξεων. Τις τελευταίες δύο δεκαετίες τα συστήματα Φ/Β διατάξεων έχουν εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό και, ως αρκετά υποσχόμενη πηγή ενέργειας, υπάρχει υποστήριξη σε ερευνητικό επίπεδο και σε επίπεδο εφαρμογών και χρήσεών τους. Αυτό έχει οδηγήσει αφενός σε σημαντική βελτίωση της απόδοσής τους και αφετέρου σε σημαντική μείωση του κόστους παραγωγής τους. Μέχρι τις αρχές του 1990 οι κυριότερες εφαρμογές Φ/Β στοιχείων ήταν σε αυτόνομα συστήματα τηλεπικοινωνιών και άλλων εμπορικών προϊόντων. Τα συστήματα Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο άρχισαν να αναπτύσσονται κυρίως μετά το 2000. Έτσι, από ένα μικρό μερίδιο της τάξης μόλις του 3,3 % το 1993, τα συστήματα Φ/Β στοιχείων συνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο έφτασαν να καταλαμβάνουν το 55,5 % του συνόλου των Φ/Β συστημάτων παγκοσμίως το 2003 [1]. Η ανάπτυξή τους σε συνδυασμό με το γεγονός ότι τέτοια συστήματα τυγχάνουν σημαντικής επιδότησης σε πολλές χώρες και μάλιστα η ενέργεια που παράγεται σε συστήματα συνδεδεμένα με το ηλεκτρικό δίκτυο πωλείται σε σχετικά υψηλές τιμές, έχουν δημιουργήσει, εκτός των άλλων, και επενδυτικό ενδιαφέρον για αυτά. Ο σχεδιασμός ενός τέτοιου συστήματος απαιτεί την επίλυση ενός συνόλου προβλημάτων. Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη αλγορίθμου και αντίστοιχου λογισμικού για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση, χωροθέτηση και διάταξη φωτοβολταϊκών συστημάτων διασυνδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο με αντικειμενικό κριτήριο τη μεγιστοποίηση των οικονομικών οφελών από την πώληση της ενέργειας που παράγεται.

1.2 Σχετικές προσεγγίσεις

Οι Suri et al. (2007) εκπονούν μια γεωγραφική ανάλυση του δυναμικού της ηλιακής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, υπολογίζοντας με κατάλληλους αλγορίθμους προσομοίωσης για ένα σύστημα Φ/Β διατάξεων το πηλίκο των ετησίως παραγόμενων kWh ανά kW_p εγκατεστημένης ισχύος του συστήματος. Από την ανάλυση αυτή προκύπτει έντονο ενδιαφέρον για τις χώρες της Μεσογείου κυρίως, καθώς και ενδιαφέρουσες διαφορές μεταξύ των χωρών αλλά και μεταξύ περιοχών των ίδιων χωρών. Επίσης, γίνεται ανάλυση της επίδρασης της κλίσης των Φ/Β διατάξεων, δεδομένου ότι το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής της εγκατάστασης θεωρείται ως η βέλτιστη, σταθερή κατά τη συνολική διάρκεια του έτους, κλίση για τη μεγιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας. Από την ανάλυση αυτή υπολογίζονται οι διαφορές απόδοσης που παρουσιάζονται από την εγκατάσταση των Φ/Β διατάξεων στη βέλτιστη κλίση, τόσο σε εγκατάστασή τους σε μηδενική κλίση όσο και σε εγκατάστασή τους σε κλίση 90^o, ανά περιοχή. Έτσι π.χ. η εγκατάσταση των διατάξεων σε οριζόντιο επίπεδο στον ελλαδικό χώρο επηρεάζει την απόδοσή τους σε σχέση με την απόδοση στη βέλτιστη κλίση στον ελάχιστο βαθμό, συγκριτικά με άλλες χώρες, και συγκεκριμένα οδηγεί σε μείωση 9-10 % της ενεργειακής απόδοσης.

Οι Mondol et al. (2007) μελετούν με το λογισμικό προσομοίωσης TRNSYS την επίδραση της κλίσης και του προσανατολισμού των Φ/Β διατάξεων στην ενεργειακή απόδοσή τους για διάφορες περιπτώσεις περιοχών εγκατάστασης και εποχών. Έτσι, προκύπτουν διάφορα συμπεράσματα, όπως το ότι ενώ ο προσανατολισμός στο Νότο μεγιστοποιεί την ενεργειακή απόδοση για τη συνολική διάρκεια του έτους, σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους (π.χ. κατά τη διάρκεια της Άνοιξης) και υπό συγκεκριμένες συνθήκες (π.χ. συννεφιά) είναι αποδοτικότερος, αν και με μικρή διαφορά, ο προσανατολισμός των διατάξεων σε διαφορετικές κατευθύνσεις.

Η βέλτιστη αναλογία διαστασιολόγησης (sizing ratio) ενός διασυνδεδεμένου συστήματος Φ/Β πλαισίων, το οποίο ορίζεται ως ο λόγος της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος των Φ/Β πλαισίων προς τη συνολική ονομαστική ισχύ των μετατροπέων DC/AC μελετάται από τους Mondol et al. (2006) με χρήση του λογισμικού προσομοίωσης TRNSYS για διάφορα κόστη των στοιχείων του συστήματος και για διάφορα σενάρια προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Η βέλτιστη αναλογία που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος του συστήματος, επηρεάζεται σημαντικά, σύμφωνα με τους ερευνητές, από τις συνθήκες ακτινοβολίας στην τοποθεσία εγκατάστασης του συστήματος καθώς και από το βαθμό απόδοσης των μετατροπέων DC/AC.

Η αναλογία διαστασιολόγησης που ελαχιστοποιεί το συνολικό κόστος του συστήματος έχει επίσης μελετηθεί από τους Peippo and Lund (1994) βάσει αριθμητικών προσομοιώσεων της λειτουργίας του συστήματος για διάφορες περιοχές της Φιλανδίας, της Γερμανίας, της Ιταλίας και των Η.Π.Α. Συμπεραίνεται ότι η βέλτιστη αναλογία εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά λειτουργίας των μετατροπέων DC/AC, τον προσανατολισμό των Φ/Β πλαισίων και τα κόστη των δομικών μονάδων του συστήματος. Βάσει οικονομικών αναλύσεων των ερευνητών με χρήση προσομοιώσεων για τις επιλεγμένες περιοχές, η τιμή της αναλογίας αυτής που μειώνει σημαντικά το κόστος για την πλειοψηφία των συστημάτων είναι μεταξύ των τιμών 1,2 και 1,5.

Οι Keller et al. (1995) ανέπτυξαν μια μεθοδολογία επίλυσης του προβλήματος ανεπαρκούς διαστασιολόγησης. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, σε πολλά συστήματα Φ/Β πλαισίων συχνά δε γίνεται πλήρης εκμετάλλευση της ικανότητας των μετατροπέων με αποτέλεσμα να παρατηρείται μειωμένη αποδοτικότητα του συστήματος σε συνδυασμό με σημαντική αύξηση στο κόστος εγκατάστασης.

Οι James et al. (2006) εξετάζουν τη χρήση ενός ή πολλαπλών μετατροπέων ισχύος DC/AC σε σύστημα εγκατεστημένης ισχύος μέχρι 5 kW_p. Όπως αναφέρεται σε αυτή την εργασία, είναι δυνατόν τα πραγματικά χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος ενός Φ/Β πλαισίου να διαφέρουν σε μικρό βαθμό από αυτά που δηλώνει ο κατασκευαστής του. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα πολλαπλά Φ/Β πλαίσια ίδιου τύπου συνδεδεμένα σε ένα μετατροπέα ισχύος να παρουσιάζουν μεταξύ τους μικρές διαφορές ως προς τα χαρακτηριστικά τάσης και ρεύματος, γεγονός που οδηγεί στη μείωση της συνολικής ενεργειακής απόδοσης ενός τέτοιου συστήματος. Λαμβάνοντας υπόψη το συγκεκριμένο φαινόμενο, προκύπτει ότι η χρήση ενός μοναδικού μετατροπέα ισχύος DC/AC αποτελεί τη συνολικά οικονομικότερη λύση για αυτό το σύστημα.

Οι Bernal-Agustin and Dufo-Lopez (2006) εκπονούν οικονομική και περιβαλλοντική ανάλυση για ένα σύστημα Φ/Β διατάξεων, εγκατεστημένων στη βέλτιστη κλίση και στο βέλτιστο προσανατολισμό, το οποίο είναι διασυνδεδεμένο με το ηλεκτρικό δίκτυο στην Ισπανία. Έτσι, για διατάξεις εγκατεστημένες στη βέλτιστη κλίση, με δεδομένη απόδοση ενέργειας και χωρίς να λαμβάνονται υπόψη φαινόμενα σκίασης των διατάξεων γίνεται οικονομική ανάλυση βασισμένη στη μέθοδο της καθαρής παρούσας αξίας και του χρόνου απόσβεσης για διάφορα σενάρια επιδότησης. Επίσης γίνεται υπολογισμός της μείωσης των εκλυόμενων εκπομπών ρυπογόνων ουσιών από τις αντίστοιχες συμβατικές πηγές που θα χρειάζονταν για την παραγωγή της ενέργειας του υπό μελέτη συστήματος.

Οι Nofuentes et al. (2006) προτείνουν μια μέθοδο υπολογισμού της Καθαρής Παρούσας Αξίας και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης σε διασυνδεδεμένα συστήματα Φ/Β πλαισίων λαμβάνοντας υπόψη τις οικονομικές απολαβές και τις δαπάνες λειτουργίας του συστήματος.

Οι Talavera et al. (2007) προτείνουν μια μέθοδο υπολογισμού του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης σε ένα σύστημα Φ/Β διατάξεων συνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης αποτελεί μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδο αξιολόγησης επενδύσεων. Μέσω μιας σειράς αρκετών βημάτων με μαθηματικούς υπολογισμούς που περιγράφονται και χρησιμοποιώντας παράγοντες όπως ο πληθωρισμός, η ετήσια ενεργειακή παραγωγή, η εγκατεστημένη ισχύς και η τιμή πώλησης της ενέργειας μπορεί να υπολογιστεί ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης.

Οι Fernando-Infantes et al. (2006) αναλύουν το σχεδιασμό ενός συστήματος Φ/Β διατάξεων εγκατεστημένου στην οροφή ενός σχολείου για την κάλυψη του φορτίου του, μελετώντας τον αριθμό των απαιτούμενων Φ/Β πλαισίων και τις θέσεις εγκατάστασής τους. Ο σχεδιασμός γίνεται με βάση την ενεργειακή απόδοσή του, καθώς και διαφόρων οικονομικών παραμέτρων, όπως η τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας και η ετήσια αύξησή της. Η κλίση των διατάξεων επιλέγεται ίση με τη βέλτιστη για τη μέγιστη απόδοσή τους κατά τη διάρκεια του έτους (δηλαδή ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής), ενώ επιλέγεται και ένα μοντέλο υπολογισμού των αποστάσεών τους, ώστε οι συνολικές ενεργειακές απώλειες από τη μεταξύ τους σκίαση να είναι περίπου 2%. Τέλος, γίνεται και περιβαλλοντική μελέτη με υπολογισμό των εκπομπών ρυπογόνων ουσιών που δεν εκλύονται εξαιτίας της χρήσης του εν λόγω συστήματος.

Οι Rehman et al. (2006) αναλύουν τόσο ενεργειακά όσο και οικονομικά την απόδοση διαφόρων Φ/Β συστημάτων εγκατεστημένων στη Σαουδική Αραβία με βάση μετρήσεις που ελήφθησαν από αυτά. Επίσης αναλύεται και η περιβαλλοντική επίδρασή τους με παρόμοιο τρόπο με τις προηγούμενες μεθόδους.

Οι Swider et al. (2008) αναλύουν τις παραμέτρους κόστους των Φ/Β συστημάτων συνδεδεμένων με ηλεκτρικά δίκτυα για διάφορες Ευρωπαϊκές χώρες. Από την έρευνα αυτή προκύπτει ότι οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα ενός τέτοιου συστήματος είναι το αρχικό κεφάλαιο που επενδύεται σε αυτό, η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας και το ποσοστό επιδότησης επί του αρχικού κεφαλαίου.

Από τους Gong and Kulkarni (2005) παρουσιάζεται η διαστασιολόγηση ενός συστήματος Φ/Β διατάξεων εγκατεστημένου στην οροφή ενός κτιρίου. Ειδικότερα δίνεται έμφαση στην έκταση που καταλαμβάνουν οι εγκατεστημένες Φ/Β διατάξεις και στην κλίση τους. Έτσι, επιλέγεται η καλύτερη θέση τους με οικονομικά κριτήρια, λαμβάνοντας υπόψη το ότι υπάρχουν ήδη εγκαταστάσεις βάσεων στήριξης από παλαιότερα εγκατεστημένους ηλιακούς συλλέκτες, και η κλίση τους επιλέγεται να είναι ίση με την κλίση της οροφής (42^{o}). Χρησιμοποιώντας ένα λογισμικό υπολογισμού ενέργειας για τα κλιματικά δεδομένα της περιοχής της εγκατάστασης αποδεικνύεται ότι η βέλτιστη κλίση, ώστε να υπάρχει η μέγιστη δυνατή παραγωγή ενέργειας κατά τη διάρκεια του έτους, είναι περίπου ίση με το γεωγραφικό πλάτος της περιοχής. Τέλος, υπολογίζονται τα επιμέρους κόστη για την εγκατάσταση αυτού του συστήματος.

Μια μεθοδολογία σχεδιασμού συστημάτων για το βέλτιστο μέγεθος και τη χωρική κατανομή σε δίκτυα διανομής προτείνεται από τους Hernandez et al. (2007).

Στην εργασία αυτή επιχειρείται η βέλτιστη ισορροπία μεταξύ τεχνικών και οικονομικών κριτηρίων μέσω πολυκριτήριας βελτιστοποίησης. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις σχετίζονται με τη σταθερότητα της τάσης και την ποιότητα της ισχύος με την οποία τροφοδοτούνται τα δίκτυα διανομής, εξαιτίας της στοχαστικής φύσης της παραγωγής ενέργειας από Φ/Β στοιχεία λόγω καιρικών συνθηκών. Τα οικονομικά κριτήρια σχετίζονται με τη βιωσιμότητα της επένδυσης σε αυτά τα συστήματα βάσει των οικονομικών απολαβών από την πώληση της ενέργειας, τα κόστη συντήρησης και τα κόστη των ενεργειακών απωλειών του δικτύου διανομής.

Μια μεθοδολογία επιλογής της βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης ενός συστήματος Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο παρουσιάζεται από τους Carrion et al. (2008). Η βέλτιστη επιλογή της τοποθεσίας εγκατάστασης καθορίζεται συνδυάζοντας πολυκριτήρια ανάλυση, τη μέθοδο analytic hierarchy process και γεωγραφικά συστήματα πληροφοριών (geographical information systems, GIS), βάσει κλιματικών, περιβαλλοντικών και τοπογραφικών παραγόντων.

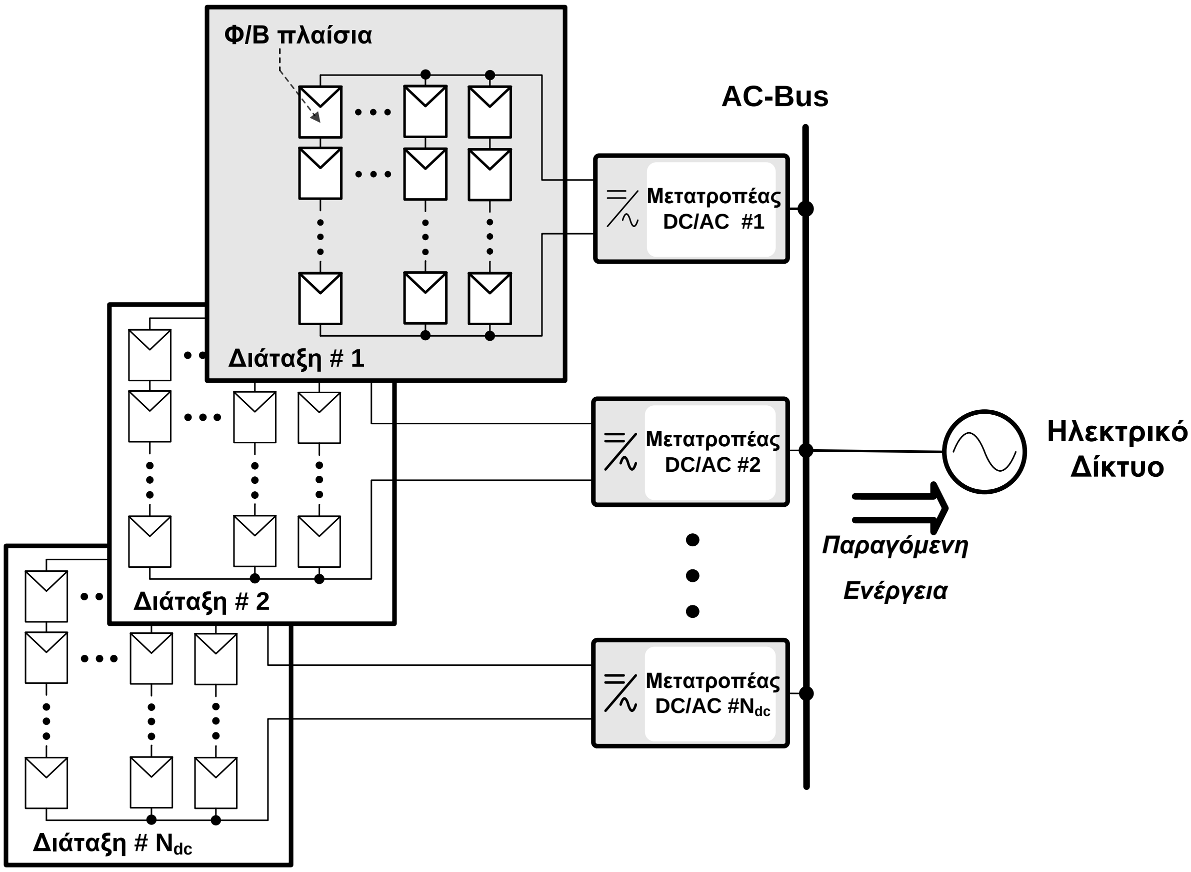
Οι Kornelakis and Koutroulis (2009) πρότειναν μια μεθοδολογία βέλτιστου σχεδιασμού και οικονομικής ανάλυσης συστημάτων Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο. Από τη συγκεκριμένη εργασία προκύπτει ότι η οικονομική βιωσιμότητα και η επιλογή των παραμέτρων σχεδιασμού των συστημάτων αυτών επηρεάζεται σημαντικά από παράγοντες όπως το κόστος της διαθέσιμης έκτασης, η τιμή πώλησης της παραγόμενης ενέργειας και το ποσοστό της επιδότησης. Η αντικειμενική συνάρτηση της συγκεκριμένης μεθοδολογίας αντιστοιχεί στην Καθαρή Παρούσα Αξία της επένδυσης, ενώ η βελτιστοποίηση γίνεται χρησιμοποιώντας Γενετικούς Αλγορίθμους.

1.3 Η παρούσα μεθοδολογία

Σε όλες τις μεθοδολογίες που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο παρατηρείται ότι δε λαμβάνονται υπόψη σημαντικές παράμετροι σχεδιασμού συστημάτων Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τέτοιες παράμετροι είναι, για παράδειγμα, διαφορές κόστους και λειτουργίας μεταξύ διαφόρων συσκευών Φ/Β πλαισίων ή μετατροπέων ισχύος DC/AC, μορφολογικά χαρακτηριστικά της διαθέσιμης προς εγκατάσταση έκτασης (σχήμα, μέγεθος, κλίση κ.λπ.), παράμετροι σκίασης των Φ/Β πλαισίων και διάφορα επιμέρους κόστη για την κατασκευή των βάσεων στήριξης του συστήματος, των καλωδιώσεών του κ.λπ. Επίσης, συνήθως, οι μεθοδολογίες αυτές δε βασίζονται σε κάποια διαδικασία αναζήτησης βέλτιστης λύσης ή όταν γίνεται βελτιστοποίηση, χρησιμοποιούνται αλγόριθμοι που είτε παρουσιάζουν αδυναμίες εντοπισμού μιας ολικά βέλτιστης λύσης είτε χαρακτηρίζονται από υψηλή υπολογιστική πολυπλοκότητα και στις περισσότερες περιπτώσεις οι προτεινόμενες τεχνικές δεν είναι εύκολα χρησιμοποιήσιμες και φιλικές προς το σχεδιαστή.

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται εξελικτικοί αλγόριθμοι, όπως οι Γενετικοί Αλγόριθμοι και η Βελτιστοποίηση με Σωματίδια Σμήνους (Particle Swarm Optimization) για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση, χωροθέτηση και σχεδιασμό ενός οποιουδήποτε συστήματος Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένου στο ηλεκτρικό δίκτυο με σκοπό την πώληση της παραγόμενης ενέργειας με το μέγιστο οικονομικό όφελος. Η συγκεκριμένη κατηγορία αλγορίθμων εγγυάται την παραγωγή των βέλτιστων λύσεων του προβλήματος σε πολύ σύντομο χρόνο.

Ένα τέτοιο σύστημα αποτελείται, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1.1, από Φ/Β πλαίσια συνδεδεμένα σε συγκεκριμένες διατάξεις (N_p παράλληλες ομάδες με N_s συνδεδεμένα σε σειρά Φ/Β πλαίσια η καθεμιά) με ένα αριθμό (N_{dc}) μετατροπέων ισχύος DC/AC (DC/AC inverters ή DC/AC converters) οι οποίοι μετατρέπουν το DC ρεύμα των Φ/Β πλαισίων σε AC ρεύμα που παρέχεται στο ηλεκτρικό δίκτυο και οι οποίοι είναι συνδεδεμένοι και συγχρονισμένοι με το ηλεκτρικό δίκτυο. Στο Σχήμα 1.1 παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα που χρησιμοποιήθηκε στη μοντελοποίηση του συστήματος παραγωγής ενέργειας που μελετάται στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 1.1: Το γενικό διάγραμμα του συστήματος παραγωγής ενέργειας από Φ/Β πλαίσια.

Η βελτιστοποίηση του συστήματος αφορά στη βέλτιστη εύρεση:

- του πλήθους των Φ/Β πλαισίων,
- του αριθμού των γραμμών Φ/Β πλαισίων ανά συστοιχία (array) Φ/Β πλαισίων κατά τη χωροθέτησή τους εντός της διαθέσιμης έκτασης
- της κλίσης των πλαισίων κατά τη διάρκεια του έτους και
- της απόστασης μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών Φ/Β πλαισίων

Το αντικειμενικό κριτήριο της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση του οικονομικού οφέλους που προκύπτει από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας για τα έτη λειτουργίας του συστήματος. Το οικονομικό όφελος περιλαμβάνει τόσο το κόστος αγοράς και εγκατάστασης των διαφόρων στοιχείων όσο και το κόστος συντήρησής τους.

Οι παράμετροι κόστους που λαμβάνονται υπόψη στην αντικειμενική συνάρτηση της μεθοδολογίας που προτείνεται είναι οι εξής:

- κόστος αγοράς και συντήρησης των συσκευών του συστήματος (Φ/Β πλαίσια και μετατροπείς DC/AC)
- κόστος της έκτασης όπου θα εγκατασταθεί το σύστημα παραγωγής ενέργειας
- κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης
- κόστος καλωδίωσης του συστήματος
- κόστος μη προβλέψιμων αρχικών δαπανών
- κόστος μη προβλέψιμων ετήσιων δαπανών

Οι δύο τελευταίες παράμετροι κόστους χρησιμοποιούνται για την ενσωμάτωση από το σχεδιαστή διαφόρων παραμέτρων κόστους που δεν είναι δυνατόν να συμπεριληφθούν στη μοντελοποίηση του προβλήματος, καθώς δεν είναι διαθέσιμες γενικότερα για την πλειοψηφία των συστημάτων. Τέτοια κόστη θα μπορούσαν να είναι κόστη μελέτης (αρχικές δαπάνες), κόστη διαμόρφωσης της έκτασης (αρχικές δαπάνες), κόστη μισθών προσωπικού (ετήσιες δαπάνες) κ.α.

Στην παρούσα εργασία έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα μοντέλα για την εκτίμηση της απαιτούμενης πρώτης ύλης για την κατασκευή των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων και των καλωδιώσεων και συνεπώς, των αντίστοιχων παραμέτρων κόστους. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα προσομοίωσης της σκίασης των Φ/Β πλαισίων των συστημάτων και υπολογισμού των ενεργειακών απωλειών είτε λόγω αλληλοσκίασης είτε λόγω σκίασης εξαιτίας πιθανών εμποδίων. Συνέπεια των παραπάνω είναι ότι οι παράμετροι βελτιστοποίησης του προβλήματος, όπως η κλίση των πλαισίων ή οι αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών, που τελικώς υπολογίζονται, προκύπτουν υπό την επίδραση όλων των παραπάνω παραμέτρων και όχι βάσει απλουστευμένων μεθόδων.

Υποψήφιες λύσεις θεωρούνται μόνο αυτές που καλύπτουν πλήρως τους περιορισμούς που τίθενται και σχετίζονται με την ορθή διασύνδεση των Φ/Β πλαισίων με τους μετατροπείς DC/AC και με την εφικτότητα της χωροθέτησης των Φ/Β πλαισίων εντός της διαθέσιμης έκταση για την εγκατάσταση. Για την αξιολόγηση μιας λύσης ως προς το αν μπορεί να είναι υποψήφια λύση του προβλήματος υλοποιείται προσομοίωση για τους παράγοντες της διαστασιολόγησης (αριθμός Φ/Β πλαισίων, αριθμός γραμμών Φ/Β πλαισίων ανά συστοιχία διάταξης στην έκταση, κλίση Φ/Β πλαισίων και απόσταση μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών) σε σχέση με τον τρόπο σύνδεσης των Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς ισχύος DC/AC και με τον τρόπο χωροθέτησης των Φ/Β πλαισίων στη διαθέσιμη έκταση της εγκατάστασης.

Ο υπολογισμός της παραγόμενης ενέργειας, καθώς και των εκτιμώμενων ενεργειακών απωλειών λόγω σκίασης, γίνεται χρησιμοποιώντας μετεωρολογικά δεδομένα που έχουν προκύψει ύστερα από τη λήψη μετρήσεων, οπότε υπολογίζεται η μέση ημερήσια ή η μέση μηνιαία τιμή τους. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται είναι η ηλιακή ακτινοβολία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Στην προτεινόμενη μέθοδο, όπως προαναφέρθηκε, η βελτιστοποίηση γίνεται βάσει της μεθόδου της Καθαρής Παρούσας Αξίας. Επίσης, η οικονομική αξιολόγηση των λύσεων που προκύπτουν συμπληρώνεται με την επιπλέον χρήση δύο ευρέως διαδεδομένων και αποδεκτών μεθόδων, αυτών του υπολογισμού του χρόνου απόσβεσης και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης.

Τέλος, από την παρούσα εργασία προέκυψε ένα ολοκληρωμένο και εύχρηστο λογισμικό για το βέλτιστο σχεδιασμό συστημάτων Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο, το οποίο ενσωματώνει τους αλγορίθμους που αναφέρθηκαν και περιγράφονται λεπτομερώς παρακάτω. Μέσω του λογισμικού αυτού, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να αναζητήσει το βέλτιστο σχεδιασμό ενός τέτοιου συστήματος εισάγοντας λεπτομερή και πραγματικά χαρακτηριστικά της μελέτης τα οποία λαμβάνονται υπόψη κατά τη βελτιστοποίηση. Επίσης, με χρήση κατάλληλων βάσεων δεδομένων, υποστηρίζεται η δυνατότητα αποθήκευσης και επεξεργασίας μελετών, συσκευών, δεδομένων κ.λπ., συμβάλλοντας με αυτό τον τρόπο σημαντικά στην ευχρηστία του λογισμικού.

Η πρωτοτυπία της προτεινόμενης μεθοδολογίας έγκειται καταρχήν στη χρήση αναλυτικών μοντέλων που αναπτύχθηκαν για την λεπτομερή περιγραφή των χαρακτηριστικών εγκατάστασης των υπό σχεδιασμό συστημάτων σε αντίθεση με τις, ούτως ή άλλως λιγοστές, υπάρχουσες τεχνικές που βασίζονται σε πολύ απλά μοντέλα παραβλέποντας σημαντικές παραμέτρους, όπως η σκίαση των Φ/Β πλαισίων ή διάφορες παράμετροι κόστους, καθώς και οι ιδιομορφίες της διαθέσιμης έκτασης κ.α. Επίσης, οι μέθοδοι που υπάρχουν στη βιβλιογραφία έχουν περισσότερο ερευνητική σημασία σε αντίθεση με την προτεινόμενη, η οποία είναι και πρακτικά εφαρμόσιμη στο σχεδιασμό πραγματικών περιπτώσεων συστημάτων γενικότερα και όχι μόνο για μια περιοχή (π.χ. Ελλάδα). Το λογισμικό που αναπτύχθηκε υποστηρίζει σημαντικά τις δυνατότητες και την ευχρηστία της προτεινόμενης μεθοδολογίας, ενώ οι τεχνικές βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται εγγυώνται την παραγωγή των βέλτιστων λύσεων σε πολύ σύντομο χρόνο, σε αντίθεση με διάφορες συμβατικές μεθόδους που χρησιμοποιούνται ευρέως.

1.4 Η δομή της εργασίας

Η παρούσα εργασίας είναι δομημένη ως εξής σε ενότητες:

Το 2^{ο} κεφάλαιο αναφέρεται στην τεχνολογία των φωτοβολταϊκών συστημάτων. Παρουσιάζονται αρχικά τα χαρακτηριστικά της ηλιακής ενέργειας, περιγράφεται η μέθοδος υπολογισμού της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο με βάση την προσπίπτουσα ακτινοβολία σε οριζόντιο επίπεδο και εν συνεχεία αναλύεται το μοντέλο ενός Φ/Β στοιχείου. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η επίδραση της ακτινοβολίας και της θερμοκρασίας στην ισχύ εξόδου του Φ/Β στοιχείου και συνεπώς στην παραγόμενη ενέργειά του. Τέλος, γίνεται περιγραφή της λειτουργίας των μετατροπέων DC/AC.

Στο 3^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζονται οι εξελικτικοί αλγόριθμοι που χρησιμοποιήθηκαν στην εργασία αυτή. Περιγράφονται οι τελεστές και τα βήματα των Γενετικών Αλγορίθμων και της τεχνικής βελτιστοποίησης με σμήνη σωματιδίων καθώς και οι μηχανισμοί που χρησιμοποιούνται για τη μοντελοποίηση και την εύρεση της λύσης ενός προβλήματος.

Στο 4^{ο} κεφάλαιο περιγράφονται και αναλύονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την οικονομική αξιολόγηση ενός συστήματος.

Στο 5^{ο} κεφάλαιο περιγράφονται τα μοντέλα που αναπτύχθηκαν και χρησιμοποιήθηκαν στη λειτουργία του αλγορίθμου της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, περιγράφεται το μοντέλο κατανομής των Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς ισχύος DC/AC, το μοντέλο χωροθέτησης των Φ/Β πλαισίων εντός της διαθέσιμης προς εγκατάσταση έκτασης, το μοντέλο υπολογισμού των ενεργειακών απωλειών λόγω των φαινομένων σκίασης, το μοντέλο υπολογισμού του απαιτούμενου υλικού για την κατασκευή των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων καθώς και το μοντέλο υπολογισμού του απαιτούμενου υλικού για τις καλωδιώσεις του συστήματος.

Στο 6^{ο} κεφάλαιο αναλύεται η μοντελοποίηση του προβλήματος βελτιστοποίησης της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα περιγράφεται η αντικειμενική συνάρτηση (κριτήριο βελτιστοποίησης) του συστήματος καθώς και οι περιορισμοί του προβλήματος και οι αλγόριθμοι χειρισμού των παραβιάσεών τους.

Στο 7^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζεται και αναλύεται το λογισμικό που αναπτύχθηκε και ενσωματώνει τους αλγορίθμους της εργασίας.

Στο 8^{ο} κεφάλαιο παρουσιάζονται διάφορα ενδεικτικά αποτελέσματα με χρήση του λογισμικού και των μεθόδων που αναπτύχθηκαν στην παρούσα εργασία.

Τέλος, στο 9^{ο} κεφάλαιο αναλύονται τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από την εργασία αυτή και προτείνονται μελλοντικές επεκτάσεις της.

2. ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

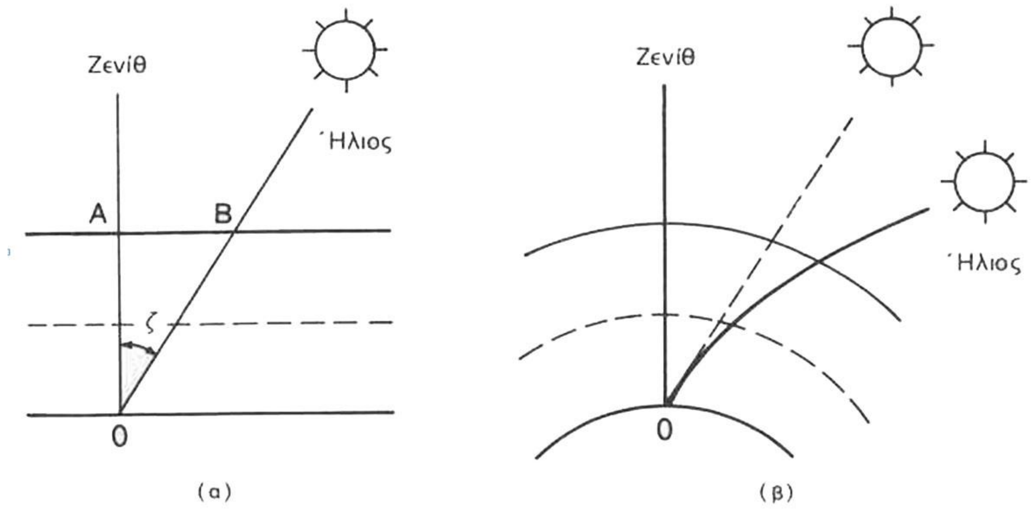
2.1 ΦΩΤΟΒΟΛΤΑΪΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

2.1.1 Εισαγωγή

Η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας (solar irradiation) προέρχεται από θερμοπυρηνικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται στο εσωτερικό του Ήλιου. Σαν αποτέλεσμα των αντιδράσεων αυτών, μεγάλες ποσότητες υδρογόνου μετατρέπονται σε ήλιο με τη σύγχρονη απελευθέρωση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας με συνέπεια την ελάττωση της μάζας του Ήλιου με ρυθμό 4.000.000 τόνων το δευτερόλεπτο. Αν μελετήσει κανείς το φάσμα της ηλιακής ακτινοβολίας θα δει ότι εκτείνεται σε όλα τα μήκη κύματος. Από το σύνολο μηκών κύματος της ηλιακής ακτινοβολίας μόνο το 75 % μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προκαλέσει ηλεκτρικό ρεύμα στα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Αυτό το ποσοστό περιλαμβάνει μικρά μήκη κύματος (μεγάλες συχνότητες) δηλαδή μεγάλες ενέργειες φωτονίων. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα μοντέλα που χρησιμοποιούνται στην παρούσα εργασία σχετικά με την παραγωγή ενέργειας από φωτοβολταϊκά στοιχεία.

2.1.2 Συμβατική ηλιακή ακτινοβολία και ακτινοβολία ενός ήλιου

Πέρα από τους παραπάνω παράγοντες που αναφέρθηκαν, η τελική μορφή και η ενέργεια της ηλιακής ακτινοβολίας που φτάνει στην επιφάνεια της Γης, διαφέρει σημαντικά ανάλογα με τη θέση του Ήλιου στον ουρανό. Συμβατικά, το μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα μέχρι τη στάθμη της θάλασσας, που είναι άμεση συνέπεια της θέσης του Ήλιου, χαρακτηρίζεται από μία κλίμακα μάζας αέρα AM (Air Mass, ονομάζεται επίσης και οπτική μάζα αέρα) βαθμονομημένης με την τέμνουσα (το αντίστροφο του συνημιτόνου) της ζενιθιακής απόστασης (ζ), δηλαδή της γωνίας ανάμεσα στη θέση του Ήλιου και στην κατακόρυφο (Σχήμα 2.1). Δηλαδή, η κλίμακα της μάζας αέρα δείχνει ουσιαστικά πόσες φορές μεγαλύτερη είναι η διαδρομή της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα, σε σύγκριση με την κατακόρυφη διαδρομή της.



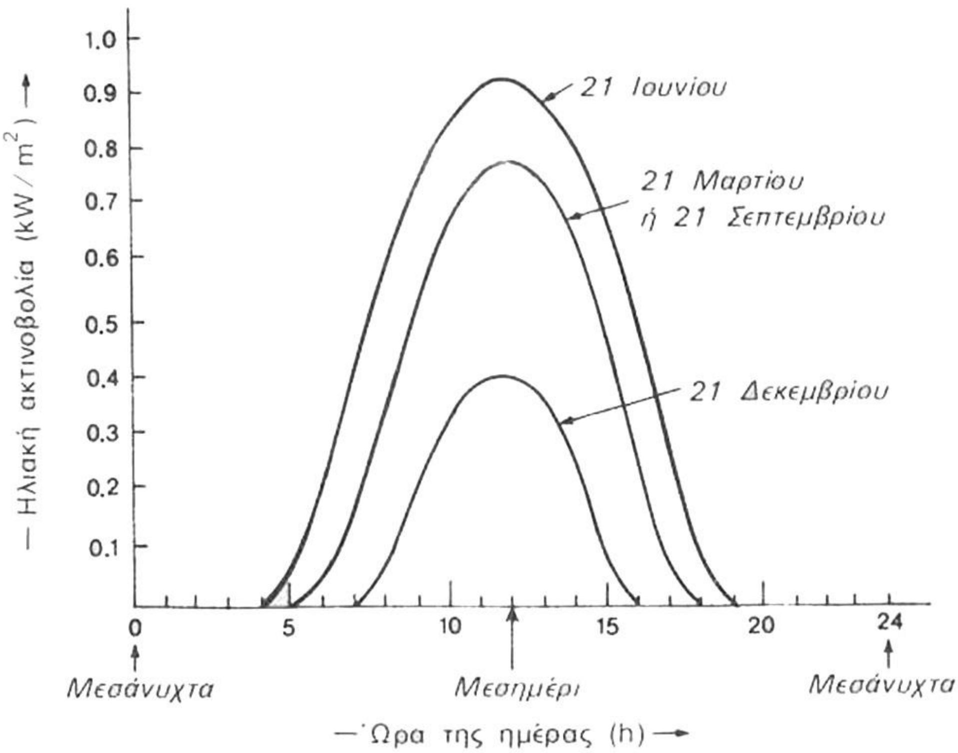
Σχήμα 2.1: Εξάρτηση AM από τη θέση του Ήλιου.

Στο Σχήμα 2.1(α) η ατμόσφαιρα θεωρείται επίπεδη και εκτείνεται έως το άπειρο. Εξ ορισμού είναι $AM = OB/OA = 1/\cos\zeta$. Στο Σχήμα 2.1(β) φαίνεται η πραγματική διαμόρφωση της ατμόσφαιρας καθώς και η ατμοσφαιρική διάθλαση. Συγκεκριμένα, ως AM1 συμβολίζεται η συνθήκη για τη θέση του Ήλιου στην κατακόρυφο (στο ζενίθ) που αντιστοιχεί στο ελάχιστο μήκος της διαδρομής της ηλιακής ακτινοβολίας στην ατμόσφαιρα. Όμοια, ως AM1.5 συμβολίζεται η διαδρομή της ακτινοβολίας με τον Ήλιο σε γωνία 45 ^{o} από το ζενίθ, ως AM2 με τον Ήλιο σε γωνία 60 ° κ.λπ. Το μηδέν της κλίμακας (AMO) συμβολίζει την πλήρη απουσία ατμοσφαιρικής παρεμβολής, δηλαδή την ηλιακή ακτινοβολία στο διάστημα, σε θέση που απέχει όση είναι η μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο.

Η ηλιακή ακτινοβολία AM1.5 έχει πυκνότητα 935W/m^2 και αποτελεί μια αρκετά αντιπροσωπευτική προσέγγιση της μέσης μέγιστης ισχύος που περίπου δέχεται μια επιφάνεια κάθετη προς τη διεύθυνση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και στις ευνοϊκότερες δυνατές συνθήκες αιχμής (καλοκαίρι, μεσημέρι, καθαρός ουρανός κ.λπ.) ένα μεγάλο μέρος από τις περισσότερο κατοικημένες και αναπτυγμένες περιοχές της Γης. Για απλοποίηση, η παραπάνω πυκνότητα ισχύος στρογγυλοποιείται στα 1000 W/m^2, ονομάζεται συμβατικά ακτινοβολία ενός ήλιου (ή ενός πλήρους ήλιου) και θεωρείται συχνά ως η βάση σύγκρισης της ακτινοβολίας που δέχονται τα φωτοβολταϊκά στοιχεία. Επίσης η ισχύς αιχμής των φωτοβολταϊκών διατάξεων καθορίζεται από τους κατασκευαστές για ακτινοβολία ενός ήλιου.

2.1.3 Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια του έτους

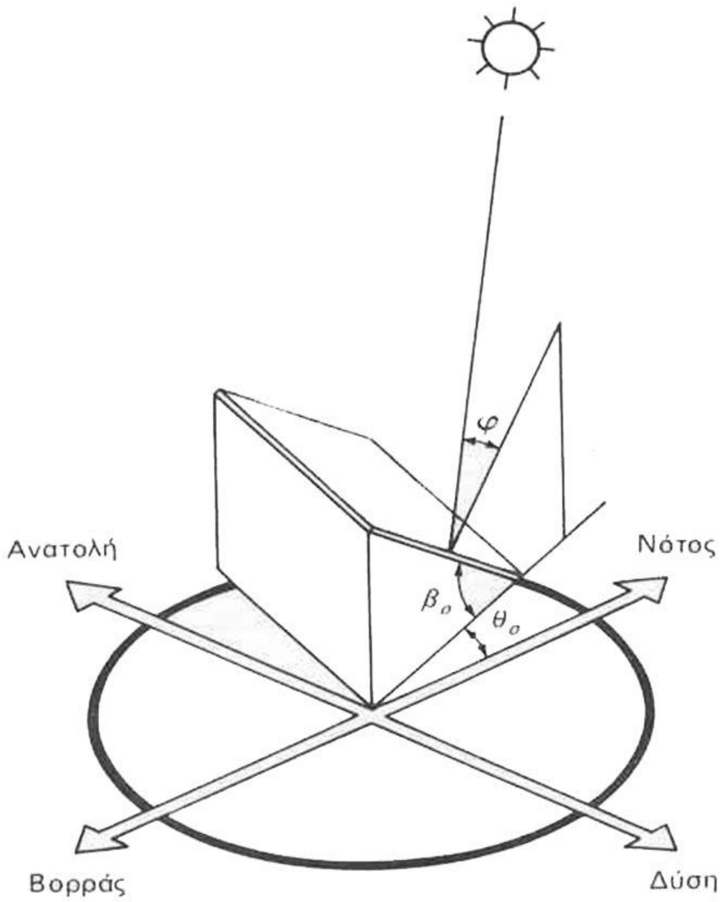
Η ηλιακή ακτινοβολία που προσπίπτει στην επιφάνεια της Γης παρουσιάζει μεγάλες διακυμάνσεις από εποχή σε εποχή λόγω της κίνησης της Γης γύρω από τον Ήλιο. Στο Σχήμα 2.2 παρουσιάζεται η μεταβολή της ηλιακής ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια μιας μέρας για τρεις διαφορετικές ημερομηνίες. Χαρακτηριστικό μέγεθος είναι η τιμή της μέγιστης έντασης της ηλιακής ακτινοβολίας (ένταση αιχμής), που μετράται στο ηλιακό μεσημέρι, δηλαδή όταν ο Ήλιος βρίσκεται στο μεγαλύτερο ύψος του ορίζοντα, το οποίο δε συμπίπτει πάντα με το ωρολογιακό μεσημέρι. Για παράδειγμα στην Αθήνα έχουμε ηλιακό μεσημέρι όταν το ρολόι δείχνει 12.25 ' τον χειμώνα, και 13.25 ' το καλοκαίρι.



Σχήμα 2.2: Η διακύμανση της ηλιακής ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο κατά τη διάρκεια των φωτεινών ωρών για τρεις διαφορετικές ημερομηνίες του έτους.

2.1.4 Προσανατολισμός και κλίση των φωτοβολταϊκών πλαισίων

Ο προσανατολισμός των Φ/Β πλαισίων καθώς και η κλίση τους ως προς το οριζόντιο επίπεδο είναι δύο πολύ κρίσιμες επιλογές για ένα σύστημα ενέργειας που εκμεταλλεύεται τη Φ/Β μετατροπή. Τα δύο μεγέθη που περιγράφουν τον προσανατολισμό και την κλίση του συλλέκτη είναι η αζιμούθια γωνία θ_σ και η γωνία κλίσης β_σ. Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται αυτά τα μεγέθη.



Σχήμα 2.3: Η κλίση β_σ και η αζιμούθια γωνία ενός επίπεδου συλλέκτη.

Η κλίση του συλλέκτη (β_σ) είναι η δίεδρη γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο επίπεδο του συλλέκτη και του οριζοντίου επιπέδου και μπορεί να πάρει τιμές από 0^o μέχρι 180^o. Για γωνίες $\beta_\sigma > 90^o$ το επίπεδο του συλλέκτη είναι στραμμένο προς το έδαφος.

Η αζιμούθια γωνία του συλλέκτη, θ_σ, είναι η γωνία που σχηματίζεται πάνω στο οριζόντιο επίπεδο ανάμεσα στην προβολή της κατακόρυφου του συλλέκτη και στον τοπικό μεσημβρινό Βορρά - Νότου. Παίρνει τιμές από -180 ° μέχρι +180 °. Η γωνία -180 ° (που συμπίπτει με τη γωνία +180 °) αντιστοιχεί σε τοποθέτηση του συλλέκτη προς τον Βορρά, η γωνία -90 ° προς την Ανατολή, η γωνία 0° προς τον Νότο και η γωνία + 90 ° προς τη Δύση.

Η πυκνότερη ισχύς μιας δέσμης ηλιακής ακτινοβολίας πάνω σε έναν επίπεδο συλλέκτη πραγματοποιείται όταν η επιφάνειά του είναι κάθετη προς την κατεύθυνση της ακτινοβολίας, δηλαδή όταν η γωνία πρόσπτωσης, φ, είναι 0 °. Η συνθήκη όμως αυτή δεν είναι εύκολο να εξασφαλιστεί καθώς ο Ήλιος συνεχώς μετακινείται στον ουρανό κατά τη διάρκεια της ημέρας. Έτσι, συχνά πρέπει να επιλεγεί μια σταθερή κλίση που να μειώνει όσο το δυνατό περισσότερο τη γωνία πρόσπτωσης της ακτινοβολίας κατά τη διάρκεια ενός έτους. Η κλίση αυτή, για σταθερή κλίση σε όλη τη διάρκεια του έτους, θεωρείται ίση με το γεωγραφικό πλάτος του τόπου. Αν, όμως, επιλέγονται παραπάνω από μία κλίσεις ανά έτος τότε η βέλτιστη κλίση επιλέγεται διαφορετικά για κάθε εποχή. Έτσι αν επιδιώκεται το σύστημα να παράγει όσο το δυνατόν περισσότερη ενέργεια επιλέγονται οι κατάλληλες κλίσεις για κάθε εποχή. Συνήθως, η μια κλίση επιλέγεται 10 ^{o} με 15 ^{o} μικρότερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και χρησιμοποιείται το καλοκαίρι και μια άλλη 10 ^{o} με 15 ^{o} μεγαλύτερη από το γεωγραφικό πλάτος του τόπου και χρησιμοποιείται τον χειμώνα. Τέλος, για το βόρειο ημισφαίριο ο βέλτιστος προσανατολισμός των Φ/Β στοιχείων είναι προς το Νότο, δηλαδή η αζιμούθια γωνία λαμβάνεται ίση με 0 ^{o}, ενώ για το νότιο ημισφαίριο ο βέλτιστος προσανατολισμός των Φ/Β στοιχείων είναι προς το Βορρά, δηλαδή η αζιμούθια γωνία λαμβάνεται ίση με 180 ^{o}.

2.1.5 Σύσταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας στη γήινη επιφάνεια

Καθώς η ηλιακή ακτινοβολία διαπερνά το στρώμα της γήινης ατμόσφαιρας υφίσταται την επίδραση ενός συνόλου στοιχείων. Κάποια από αυτά τα στοιχεία, όπως είναι οι νεφώσεις, αντανακλούν την ηλιακή ακτινοβολία, ενώ άλλα, όπως το όζον ή το οξυγόνο, την απορροφούν. Στοιχεία όπως τα σταγονίδια νερού ή μόρια σκόνης προκαλούν τη διασπορά της ακτινοβολίας, ενώ όταν τελικά η ηλιακή ακτινοβολία φτάνει στο έδαφος ένα μέρος της θα απορροφάται και το υπόλοιπο θα ανακλάται. Συνεπώς, το σύνολο των παραπάνω επιδράσεων αποσυνθέτει την ηλιακή ακτινοβολία σε τρεις συνιστώσες: (1) την απευθείας ακτινοβολία (direct radiation) που είναι η ακτινοβολία που προέρχεται απευθείας από τον Ήλιο, (2) τη διάχυτη ακτινοβολία (diffuse radiation) που είναι η ακτινοβολία που συνίσταται από ακτίνες που προέρχονται από τον ουρανό αλλά όχι απευθείας από τον Ήλιο (δεν περιλαμβάνονται δηλαδή ανακλάσεις από τη Γη) και (3) την albedo ακτινοβολία, δηλαδή η ακτινοβολία που προέρχεται από ανακλάσεις του φωτός στο έδαφος. Η συνολική ακτινοβολία (global radiation) είναι το άθροισμα των τριών παραπάνω συνιστωσών.

2.1.6 Μέθοδος υπολογισμού της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κεκλιμένο επίπεδο

Ο αλγόριθμος σχεδιασμού που υλοποιείται στην παρούσα εργασία δίνει σαν αποτέλεσμα, εκτός των άλλων, και τη βέλτιστη κλίση των Φ/Β πλαισίων. Έτσι είναι απαραίτητο να υπολογίζεται η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας σε κάθε επιθυμητή κλίση των Φ/Β πλαισίων, αφού οι μετρήσεις που συνήθως είναι διαθέσιμες αφορούν στο οριζόντιο επίπεδο.

Έστω, λοιπόν, ότι $G_d(\beta)$ είναι η συνολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία που δέχεται κεκλιμένο επίπεδο τοποθετημένο σε κλίση β^o ως προς το οριζόντιο επίπεδο μετρούμενη σε Wh/m^2. Για την $G_d(\beta)$ ισχύει:

$$G_d(\beta) = R_d(\beta) + D_d(\beta) + B_d(\beta) \tag{2.1}$$

όπου:

$B_d(\beta)$ είναι η συνολική ημερήσια απευθείας ακτινοβολία,

$D_d(\beta)$ είναι η συνολική ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία και

$R_d(\beta)$ η συνολική ημερήσια albedo ακτινοβολία.

Πριν γίνει περαιτέρω ανάλυση πρέπει να γίνει διάκριση ανάμεσα στους όρους irradiation και irradiance οι οποίοι θα χρησιμοποιούνται στη συνέχεια. Ο όρος irradiance αναφέρεται στην πυκνότητα ισχύος (ένταση) που προσπίπτει σε μια επιφάνεια και μετριέται σε W/m^2 ενώ irradiation είναι η ενέργεια που προσπίπτει σε μια επιφάνεια κατά τη διάρκεια μιας συγκεκριμένης περιόδου. Συνεπώς, το irradiation είναι η ολοκλήρωση του irradiance στη περίοδο του χρόνου και μετριέται σε Wh/m^2. Η μέθοδος που ακολουθείται για τον υπολογισμό του $G_d(\beta)$ φαίνεται στο Σχήμα 2.4.

$$G_d(0) \ (Wh/m^2)$$
$$\downarrow$$
$$B_d(0), D_d(0) \ (Wh/m^2)$$
$$\downarrow$$
$$B_h(0), D_h(0), G_h(0) \ (Wh/m^2)$$
$$\downarrow$$
$$B_h(\beta), D_h(\beta), R_h(\beta) \ (W/m^2)$$
$$\downarrow$$
$$G_h(\beta) = B_h(\beta) + D_h(\beta) + R_h(\beta) \ (W/m^2)$$
$$\downarrow$$
$$G_d(\beta) = \int_{\omega_{ss}}^{\omega_{ps}} G_h(\beta) \ (Wh/m^2)$$

Σχήμα 2.4: Τα βήματα της μεθόδου υπολογισμού της ημερήσιας ακτινοβολίας που προσπίπτει σε ένα επίπεδο κλίσης β^o.

Όπως βλέπουμε, η μέθοδος ξεκινώντας από τη συνολική ημερήσια ενέργεια ακτινοβολίας πάνω στο οριζόντιο επίπεδο καταλήγει στον υπολογισμό της μέσης συνολικής ημερήσιας ενέργειας της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε κεκλιμένο επίπεδο κλίσης β^o υπολογίζοντας ενδιάμεσα τις ωριαίες τιμές των συνιστωσών της ακτινοβολίας σε οριζόντιο επίπεδο και εν συνεχεία σε κεκλιμένο επίπεδο. Η επιλογή της κλίμακας της μιας ώρας γίνεται για λόγους απλοποίησης των υπολογισμών. Έτσι, για μια ώρα η συνολική ενέργεια (irradiation) ισούται με τη μέση τιμή της ισχύος (irradiance) για εκείνη την ώρα. Επίσης γίνεται η παραδοχή ότι είναι ίση με την ισχύ στο μέσο της συγκεκριμένης ώρας.

Όταν εξετάζονται περιοχές του βόρειου ημισφαιρίου η αζιμούθια γωνία ηλιακού συλλέκτη είναι μηδέν. Αρχικά, έχοντας τη συνολική ημερήσια ενέργεια υπολογίζονται οι ποσότητες $D_d(0)$ και $B_d(0)$ (μπορεί χωρίς σφάλματα να θεωρηθεί ότι $R_d(0)$=0, δηλαδή ότι στο οριζόντιο επίπεδο η ανακλώμενη από τη Γη ακτινοβολία είναι μηδενική). Η τιμή του $B_d(0)$ δίνεται από τη σχέση:

$$B_d(0) = \frac{24}{\pi} \cdot B_o \cdot \varepsilon_o \cdot (\cos\varphi \cos\delta) \cdot (\omega_s \cdot \cos\omega_s - \sin\omega_s) \qquad (2.2)$$

όπου B_o=1367 W/m^2 είναι η ηλιακή σταθερά (η πυκνότητα ισχύος της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε μια επιφάνεια που απέχει από τον Ήλιο τόση απόσταση όση και η μέση απόσταση Γης - Ήλιου, απουσία ατμόσφαιρας). Το ε_o είναι το τετράγωνο του λόγου της μέσης απόστασης Γης - Ήλιου προς την απόσταση Γης-Ήλιου και δίνεται από τη σχέση:

$$\varepsilon_o = 1 + 0{,}033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot d_n}{365}\right) \qquad (2.3)$$

όπου:

d_n είναι η μέρα του χρόνου (1,2,...365),

φ είναι το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (^{o}) και

δ είναι η γωνία ηλιακής απόκλισης (solar declination), δηλαδή η γωνία που σχηματίζεται ανάμεσα στο ισημερινό επίπεδο και την ευθεία γραμμή που ενώνει τη Γη με τον Ήλιο. Η τιμή του δ (^{o}) υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\delta(^o) = 23{,}45 \cdot \sin\left(\frac{360}{365}\ d_n + 284\right) \qquad (2.4)$$

Τέλος, ω_s είναι η γωνία ανατολής του Ήλιου (sunrise angle) και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\omega_s = -\arccos(-\tan\delta \cdot \tan\varphi) \qquad (2.5)$$

ενώ παράλληλα ισχύει ότι:

$$\cos\omega_s = -\tan\delta \cdot \tan\varphi \qquad (2.6)$$

Όσον αφορά στο $D_d(0)$, η τιμή του μπορεί να υπολογιστεί από το μοντέλο των Collares-Pereira και Rabl. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο προκύπτει ότι:

$$K_T = \frac{G_d(0)}{B_d(0)} \text{ και } K_D = \frac{D_d(0)}{G_d(0)} \qquad (2.7)$$

όπου:

$$K_D = 0{,}99 \text{ για } K_T \leq 0{,}17 \qquad (2.8)$$

και:

$$K_D = 1{,}188 - 2{,}272K_T + 9{,}473K_T^2 - 21{,}856K_T^3 + 14{,}648K_T^4 \quad \text{για } 0{,}17 \leq K_T \leq 0{,}8 \qquad (2.9)$$

Έχοντας υπολογίσει για κάθε ημέρα τα $G_d(0)$ και $B_d(0)$, μπορούν να υπολογιστούν και οι ωριαίες ενέργειες (hourly irradiation) $G_h(0)$ και $D_h(0)$. Το $B_h(0)$ δίνεται από τη σχέση $B_h(0) = G_h(0) - D_h(0)$. Για τα $G_h(0)$ και $D_h(0)$ ισχύουν οι σχέσεις:

$$D_h(0) = r_d D_d(0) \text{ και } G_h(0) = r_g G_d(0) \qquad (2.10)$$

όπου:

$$r_d = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\omega_s \cdot \cos\omega_s - \sin\omega_s} \qquad (2.11)$$

και:

$$r_g = r_d\,(a + b \cdot \cos\omega) \qquad (2.12)$$

Το ω_s έχει ήδη οριστεί, το ω είναι η ηλιακή ώρα της ημέρας, ενώ τα a και b υπολογίζονται με τις σχέσεις:

$$a = 0{,}409 - 0{,}5016 \cdot \sin(\omega_s + 1{,}047) \qquad (2.13)$$

και:

$$b = 0{,}6609 + 0{,}4767\sin(\omega_s + 1{,}047) \qquad (2.14)$$

Σε όλες τις παραπάνω σχέσεις τα ω και ω_s πρέπει να δίνονται σε ακτίνια.

Με χρήση των παραπάνω εξισώσεων υπολογίζονται οι ωριαίες συνολικές ενέργειες $B_h(0)$, $G_h(0)$ και $D_h(0)$ αλλά πρέπει να υπολογιστούν οι αντίστοιχες ποσότητες σε κεκλιμένο επίπεδο β^o. Οι Εξ. (2.15), (2.28) και (2.19) που σχετίζονται με αυτές τις ποσότητες εκφράζουν ισχύ. Για τον υπολογισμό, λοιπόν, της ενέργειας αρκεί να ολοκληρωθούν αυτές τις σχέσεις για μια ώρα. Έχοντας επιλέξει κλίμακα μιας ώρας και στηριζόμενοι στη θεώρηση που έγινε αρχικά ότι η συνολική ωριαία ενέργεια είναι αριθμητικά ίση με την ισχύ στο μέσο της ώρας οι παραπάνω υπολογισμοί γίνονται απλούστεροι.

Έτσι λοιπόν για την ακτινοβολία $B_h(\beta)$ ισχύει:

$$B_h(\beta) = \left(\frac{G_h(0) - D_h(0)}{\cos\theta_{zs}} \right) \cdot \max(0, \cos\theta_s) \ \ (\text{W/m}^2) \tag{2.15}$$

όπου:

$$\cos\theta_s = \sin\delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos\delta \cdot \cos(\varphi - \beta) \cdot \cos\omega \tag{2.16}$$

και:

$$\cos\theta_{zs} = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega \tag{2.17}$$

Για την ακτινοβολία από ανάκλαση από τη Γη ισχύει:

$$R_h(\beta) = G_h(\beta) \cdot (1 - \cos\beta) \cdot \rho / 2 \ \ (\text{W/m}^2) \tag{2.18}$$

όπου ρ είναι ο δείκτης ανάκλασης του εδάφους και αν η τιμή του δεν είναι γνωστή λαμβάνεται ίση με 0.2. Στον Πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τυπικές τιμές του ρ για διάφορους τύπους εδάφους.

Πίνακας 2.1 Συντελεστής ανάκλασης για διάφορους τύπους εδάφους

Έδαφος	Συντελεστής ανάκλασης (ρ)
Ξηρό-γυμνό έδαφος	0.2
Έδαφος με χορτάρι	0.3
Έρημος	0.4
Χιόνι	0.5 - 0.8

Τέλος, για τον υπολογισμό του $D_h(\beta)$ χρησιμοποιείται το ανισοτροπικό μοντέλο του Klucher σύμφωνα με το οποίο ισχύει ότι:

$$D_h\ \beta = \frac{1+\kappa_1 \cdot \cos^2\theta_s \cdot \sin^3\theta_{zs} \ \cdot \left(1+k_1 \sin^3 \cdot \dfrac{\beta}{2}\right) \cdot D_h\ 0 \ \cdot\ 1+\cos\beta}{2} \quad (\mathrm{W/m^2}) \qquad (2.19)$$

όπου:

$$\kappa_1 = 1 - \left(\frac{D_h(0)}{G_h(0)}\right)^2 \qquad (2.20)$$

Έτσι για την μέση ωριαία ισχύ (ή την συνολική ωριαία ενέργεια) ισχύει :

$$G_h(\beta) = R_h(\beta) + D_h(\beta) + B_h(\beta)\ \ (\mathrm{W/m^2}) \qquad (2.21)$$

Για την εύρεση της συνολικά ακτινοβολούμενης ενέργειας σε μια ημέρα αρκεί να ολοκληρωθεί η ποσότητα $G_h(\beta)$ για μια ημέρα σύμφωνα με τη σχέση:

$$G_d(\beta) = \int_{\omega_{ss}}^{\omega_{ps}} G_h(\beta)\, dt\ (\mathrm{Wh/m^2}) \qquad (2.22)$$

όπου:

$$\omega_{ss} = -\omega_{ps} = \max\{\omega_s, -\arccos(-\tan\delta \cdot \tan(\varphi - \beta))\} \qquad (2.23)$$

είναι η γωνία ανατολής και δύσης αντίστοιχα με το συλλέκτη σε κλίση β ^{o}, ενώ η σχέση που συνδέει τις ποσότητες ω και t είναι:

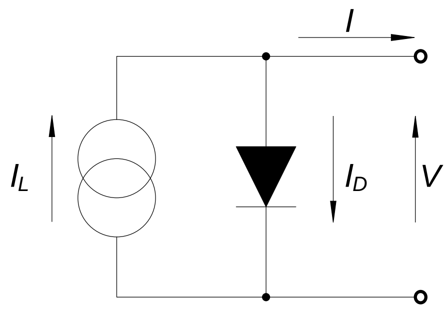
$$\omega(^o) = 15 \cdot (t - 12) \qquad (2.24)$$

2.1.7 Η φωτοβολταϊκή μετατροπή

Η μετατροπή της ενέργειας που μεταφέρεται από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από τον Ήλιο σε ηλεκτρική ενέργεια είναι ένα φυσικό φαινόμενο γνωστό ως φωτοβολταϊκή μετατροπή. Τα φωτοβολταϊκά στοιχεία (solar cells) αποτελούν τον σημαντικότερο τύπο συσκευών που χρησιμοποιούνται για αυτή τη μετατροπή. Πρόκειται για διόδους ημιαγωγών σε μορφή δίσκου που καθώς δέχονται στην επιφάνειά τους το ηλιακό φως, αναπτύσσεται στα άκρα τους μια διαφορά δυναμικού. Ανάλογα με το υλικό κατασκευής τους και την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας μπορούν να παράγουν τάση από 0.5 έως 1 Volt και πυκνότητα ρεύματος από 20 έως 40 mA/cm^2. Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια είναι υπό τη μορφή συνεχούς ρεύματος και μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε αυτή τη μορφή ή να μετατραπεί σε εναλλασσόμενο ρεύμα ή ακόμα και να αποθηκευτεί για να χρησιμοποιηθεί αργότερα.

2.1.8 Το μοντέλο του φωτοβολταϊκού στοιχείου

Το ισοδύναμο κύκλωμα ενός ιδανικού φωτοβολταϊκού στοιχείου απεικονίζεται στο Σχήμα 2.5.



Σχήμα 2.5: Το κύκλωμα του ιδανικού Φ/Β στοιχείου.

Όπως φαίνεται, αποτελείται από μια πηγή ρεύματος I_L (το ρεύμα που δημιουργείται από το ηλιακό φως) και από μια δίοδο με ρεύμα I_D παράλληλα τοποθετημένη στην πηγή ρεύματος. Το ρεύμα I που παράγεται από το στοιχείο είναι:

$$I = I_L - I_0 \cdot \left(e^{\frac{eV}{mkT}} - 1 \right) \tag{2.25}$$

όπου:

I_0 είναι το ρεύμα ανάστροφης πόλωσης,

e το φορτίο του ηλεκτρονίου,

V η τάση στα άκρα του στοιχείου,

k η σταθερά του Boltzmann,

T η θερμοκρασία του στοιχείου σε βαθμούς Kelvin και

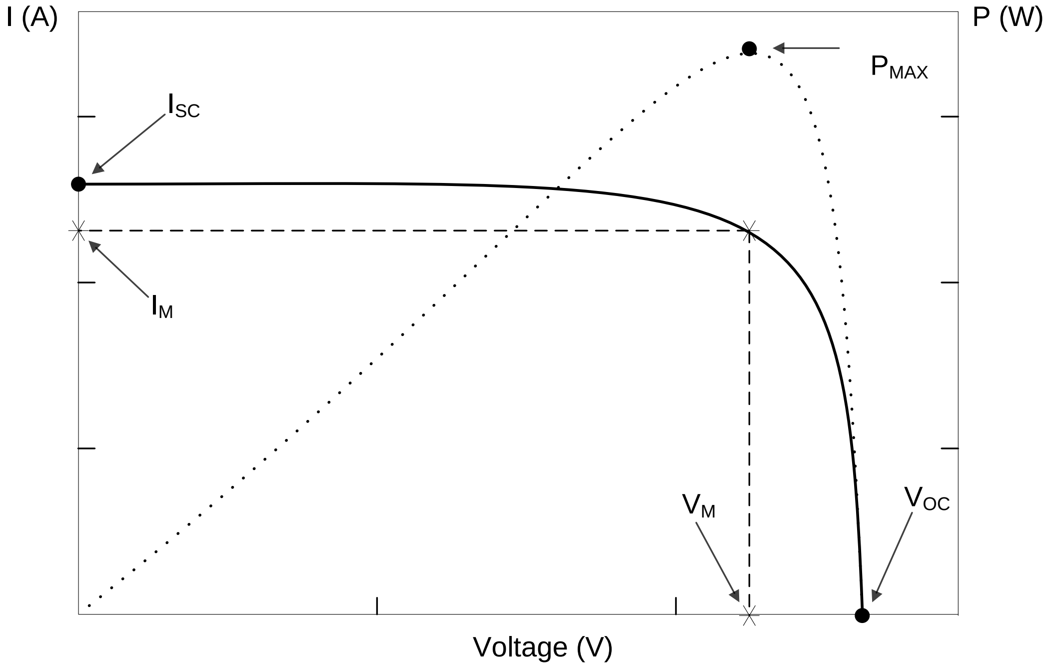
m ο συντελεστής ιδανικότητας της διόδου ($1 \le m \le 2$).

Η αντίστοιχη χαρακτηριστική καμπύλη ρεύματος-τάσης φαίνεται στο Σχήμα 2.7. Το ρεύμα για το οποίο είναι V=0 ονομάζεται ρεύμα βραχυκύκλωσης και είναι:

$$I_{sc} = I(V = 0) = I_L \tag{2.26}$$

Η τάση για την οποία ισχύει I=0 ονομάζεται τάση ανοικτοκύκλωσης και δίνεται από τη σχέση :

$$V_{oc} = m \cdot \frac{k \cdot T}{e} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \tag{2.27}$$



Σχήμα 2.6: Η χαρακτηριστική I-V του Φ/Β στοιχείου.

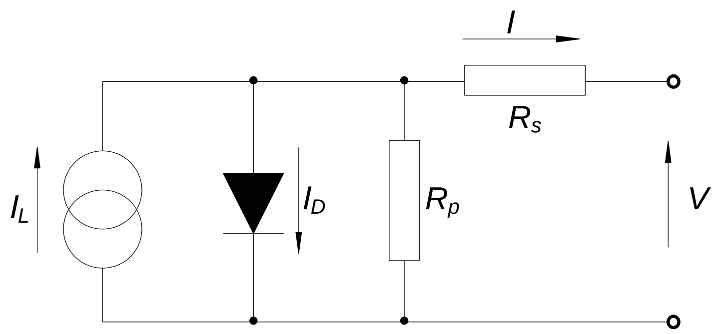
Στο Σχήμα 2.6 απεικονίζεται με διακεκομμένη γραμμή και η ισχύς του στοιχείου συναρτήσει της τάσης. Υπάρχει ένα σημείο (V_m,I_m) στο οποίο η ισχύς μεγιστοποιείται. Το σημείο αυτό ονομάζεται σημείο μέγιστης ισχύος (Maximum Power Point, MPP). Ως συντελεστής πλήρωσης (Fill Factor) ορίζεται το πηλίκο :

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_{sc} \cdot V_{oc}} \tag{2.28}$$

Όσο πιο απότομη είναι η χαρακτηριστική του στοιχείου τόσο πιο κοντά θα είναι ο FF στη μονάδα. Τότε το εμβαδόν του ορθογωνίου που ισούται με $I_m \cdot V_m$ θα είναι πιο κοντά στο εμβαδόν του ορθογωνίου $I_{sc} \cdot V_{oc}$. Ο FF είναι ένα ποιοτικό μέτρο της μορφής της χαρακτηριστικής καμπύλης. Παίρνει τιμές συνήθως από 0,7 ως 0,8. Η ενεργειακή απόδοση ενός Φ/Β στοιχείου ορίζεται ως ο λόγος της μέγιστης ισχύος που μπορεί να μεταφερθεί στο φορτίο προς την ισχύ που παράγεται από το στοιχείο (την ισχύ δηλαδή που αντιστοιχεί στο ρεύμα I_L):

$$n = \frac{I_m \cdot V_m}{P_L} \tag{2.29}$$

Στην πραγματικότητα, βέβαια, το παραπάνω ιδανικό μοντέλο δε χρησιμοποιείται. Ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο απεικονίζεται στο Σχήμα 2.7. Ουσιαστικά είναι το ίδιο με το ιδανικό μοντέλο αλλά έχουν προστεθεί δύο αντιστάσεις, μία παράλληλα με τη δίοδο (R_p) και μία σε σειρά με το υπόλοιπο μοντέλο (R_s). Η χρήση αυτών των αντιστάσεων γίνεται για να καλυφθούν διάφορα εξωτερικά φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στο στοιχείο σε επίπεδο ημιαγωγών. Συγκεκριμένα, η R_s συμβολίζει τις αντιστάσεις από την κίνηση των φορέων στον ημιαγωγό και στις επαφές στα ηλεκτρόδια και η R_p την αντίσταση διαμέσου της διόδου, η οποία δεν έχει άπειρη τιμή λόγω διαρροών που οφείλονται σε κατασκευαστικά ελαττώματα. Συνήθως στα εμπορικά διαθέσιμα Φ/Β στοιχεία η R_s είναι μικρότερη από 5 Ω και η R_p μεγαλύτερη από 500 Ω αλλά επηρεάζουν αισθητά την τάση V. Παρόλο που τα φαινόμενα αυτά είναι κατανεμημένα και δε μπορούν εν γένει να αναπαρασταθούν με αντιστάσεις σταθερής τιμής, η χρήση των σταθερών αντιστάσεων R_s και R_p είναι αποδεκτή από πρακτικής άποψης.



Σχήμα 2.7: Το κύκλωμα ενός πραγματικού Φ/Β στοιχείου.

Αν συμπεριληφθούν οι αντιστάσεις R_s και R_p στην Εξ. (2.25) τότε το ρεύμα εξόδου του στοιχείου θα δίνεται από τη σχέση :

$$I = I_L - I_0 \cdot \left(\exp^{\frac{e(V+I\cdot R_s)}{m\cdot k\cdot T}} - 1 \right) - \frac{V + I\cdot R_s}{R_p} \quad (2.30)$$

Κατά την εφαρμογή της Εξ. (2.33) γίνονται συνήθως οι παρακάτω παραδοχές: Η επίδραση της R_p είναι αμελητέα (η R_p είναι δηλαδή αρκετά μεγάλη), το ρεύμα I_L είναι ίσο με το ρεύμα βραχυκύκλωσης και πάντα ισχύει ότι $\exp(e(V + I\cdot R_s)/m\cdot k\cdot T) \gg 1$. Με αυτές τις παραδοχές το ρεύμα του στοιχείου υπολογίζεται ως εξής:

$$I = I_{sc} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{V - V_{oc} + I\cdot R_s}{V_t} \right) \right] \quad (2.31)$$

όπου:

$$V_t = \frac{m\cdot k\cdot T}{e} \quad (2.32)$$

Από την Εξ. (2.31) προκύπτει το εξής παράδοξο: αν θέσουμε V = 0 τότε δεν ισχύει $I = I_{sc}$ όπως θα ήταν αναμενόμενο. Όμως, για εμπορικά διαθέσιμα Φ/Β στοιχεία ισχύει ότι $V_{oc} \gg I\cdot R_s$ οπότε τελικά ισχύει $I = I_{sc}$, ενώ για V = 0 τελικά ισχύει $I \simeq I_{sc}$.

2.1.9 Φωτοβολταϊκά πλαίσια

2.1.9.1 Εισαγωγή

Λόγω του ότι τα Φ/Β στοιχεία παράγουν στην έξοδό τους μικρή τάση (0.5 – 1 Volt) οι κατασκευαστές παρέχουν Φ/Β στοιχεία σε διατάξεις με κοινή ηλεκτρική έξοδο. Αυτές οι διατάξεις ονομάζονται Φ/Β πλαίσια (modules) και περιλαμβάνουν κάποιο αριθμό Φ/Β στοιχείων συνδεμένων μεταξύ τους. Τα στοιχεία στερεώνονται με κολλητική ουσία επάνω σε ανθεκτικό φύλλο μετάλλου ή πλαστικού που αποτελεί την πλάτη του πλαισίου. Η εμπρός όψη καλύπτεται από ένα προστατευτικό φύλλο γυαλιού ή πλαστικού. Τα Φ/Β πλαίσια αποτελούν τα κύρια δομικά στοιχεία ενός Φ/Β συστήματος.

2.1.9.2 Χαρακτηριστικά λειτουργίας των Φ/Β πλαισίων

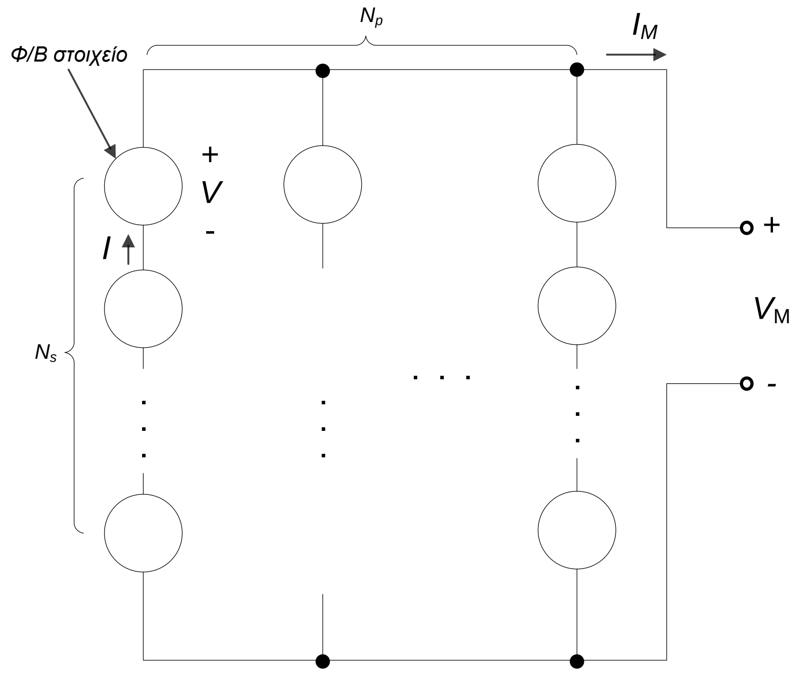
Θεωρούμε ότι ένα πλαίσιο αποτελείται από N_p ομάδες Φ/Β στοιχείων παράλληλα συνδεμένες μεταξύ τους. Έστω ότι κάθε τέτοια ομάδα αποτελείται από N_s στοιχεία τα οποία είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Η συνολική τάση και το συνολικό ρεύμα εξόδου του πλαισίου δίνεται από τις σχέσεις:

$$I_M = I \cdot N_p \tag{2.33}$$

και

$$V_M = V \cdot N_s \tag{2.34}$$

όπου I είναι το ρεύμα που διαρρέει κάθε στοιχείο και V είναι η τάση κάθε στοιχείου. Στο σχήμα 2.8 παρουσιάζεται το γενικό διάγραμμα ενός Φ/Β πλαισίου αποτελούμενου από Φ/Β στοιχεία.



Σχήμα 2.8: Το Φ/Β πλαίσιο αποτελούμενο από Φ/Β στοιχεία.

Ακόμη το ρεύμα βραχυκύκλωσης, I_{SCM}, και η τάση ανοικτοκύκλωσης V_{OCM} είναι:

$$I_{SCM} = I_{sc} \cdot N_p \tag{2.35}$$

$$V_{OCM} = V_{oc} \cdot N_s \tag{2.36}$$

όπου I_{sc} και V_{oc} είναι το ρεύμα βραχυκύκλωσης και η τάση ανοικτοκύκλωσης κάθε στοιχείου του πλαισίου αντίστοιχα. Έτσι σύμφωνα με τις Εξ. (2.33), (2.34), (2.35), (2.36) και (2.29) το ρεύμα του πλαισίου δίνεται από τη σχέση:

$$I_M = I_{SCM} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{(V_M - V_{OCM} + I_M \cdot R_{SM})}{N_s \cdot V_t} \right) \right] \tag{2.37}$$

όπου:

$$R_{SM} = \frac{R_s \cdot N_s}{N_p} \tag{2.38}$$

Τόσο η Εξ. (2.38) όσο και η Εξ. (2.31) περιλαμβάνουν το ρεύμα και στα δυο μέλη. Η επίλυση μιας τέτοιας εξίσωσης είναι δύσκολη. Κοντά στο σημείο μέγιστης ισχύος μπορεί χωρίς σφάλμα το ρεύμα του δεύτερου μέλους να αντικατασταθεί με το ρεύμα βραχυκύκλωσης. Η μορφή της χαρακτηριστικής καμπύλης I_M-V_M της Εξ.(2.37) είναι όμοια με αυτή του Σχήματος 2.6. Και εδώ υπάρχει ένα ζεύγος τιμών [V_{Mm}, I_{Mm}] για το οποίο μεγιστοποιείται η ισχύς εξόδου του πλαισίου.

Ένα σημαντικό μέγεθος που χαρακτηρίζει τα Φ/Β πλαίσια είναι η ‘‘nominal cell operating temperature’’ (NCOT). H NCOT εκφράζει τη θερμοκρασία των στοιχείων των πλαισίων υπό τις εξής συνθήκες: ακτινοβολία 800 W/m^2, AM 1.5, θερμοκρασία περιβάλλοντος 20 ^{o}C και ταχύτητα ανέμου 1 m/s. Όταν ο κατασκευαστής δε δίνει την τιμή της NCOT η τιμή που χρησιμοποιείται είναι 44 ^{o}C.

Οι κατασκευαστές Φ/Β πλαισίων παρέχουν τις τιμές των παρακάτω μεγεθών: της μέγιστης ισχύος εξόδου, του ρεύματος βραχυκύκλωσης και της τάσης ανοικτοκύκλωσης. Οι παραπάνω τιμές αντιστοιχούν σε ακτινοβολία 1000 W/m^2, AM 1.5 και θερμοκρασία στοιχείων 25 ^{o}C.

2.1.9.3 Υπολογισμός ισχύος πλαισίων σε οποιεσδήποτε συνθήκες

Πολύ συχνά είναι αναγκαίο να υπολογιστεί η ισχύς εξόδου ενός πλαισίου για συνθήκες διαφορετικές από αυτές που δίνει ο κατασκευαστής. Ειδικότερα είναι επιθυμητό να υπολογιστεί η μέγιστη ισχύς εξόδου ενός πλαισίου σε προκαθορισμένες συνθήκες ακτινοβολίας και θερμοκρασίας. Για την επίλυση ενός τέτοιου προβλήματος μπορούν να εφαρμοστούν οι παρακάτω απλοί αλλά ικανοποιητικά ακριβείς κανόνες.

Το ρεύμα βραχυκύκλωσης ενός στοιχείου στις εκάστοτε συνθήκες δίνεται από τη σχέση:

$$I_{sc} = C_1 \cdot G \tag{2.39}$$

όπου G είναι η προσπίπτουσα ακτινοβολία και η σταθερά C_1 δίνεται από τη σχέση:

$$C_1 = \frac{I_{sc} \cdot 1000W/m^2}{1000} \quad (Am^2/W) \tag{2.40}$$

Η τάση ανοικτοκύκλωσης μεταβάλλεται με τη θερμοκρασία στοιχείων με ρυθμό:

$$\frac{dV_{oc}}{dT_c} = -2{,}3\ mV/^{o}C \tag{2.41}$$

Η θερμοκρασία των στοιχείων του πλαισίου εξαρτάται από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος, T_a, σύμφωνα με τη σχέση:

$$T_c - T_a = C_2 \cdot G \tag{2.42}$$

όπου:

$$C_2 = \frac{NCOT - 20^{o}C}{800\ W/m^2} \tag{2.43}$$

Τέλος, θεωρείται ότι η αντίσταση, R_S, των στοιχείων των πλαισίων δεν επηρεάζεται από τις ατμοσφαιρικές συνθήκες και δίνεται από τη σχέση:

$$R_s = \left(1 - \frac{FF}{FF_o}\right) \cdot \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \tag{2.44}$$

Τα FF και FF_o συνδέονται με τον εξής εμπειρικό τύπο:

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = FF_o \cdot (1 - r_s) \tag{2.45}$$

Τα r_S και FF_o υπολογίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$r_s = \frac{R_s}{V_{oc}/I_{sc}} \tag{2.46}$$

και:

$$FF_o = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0{,}72)}{v_{oc} + 1} \tag{2.47}$$

Γνωρίζοντας τη μέγιστη ισχύ εξόδου), P_{Mm}, σε Standard Test Conditions (STC) συνθήκες (ακτινοβολία 1000 W/m^2, AM 1.5 και θερμοκρασία στοιχείων 25 ^oC που δίνουν οι κατασκευαστές, καθώς και τις τιμές των N_p και N_s προκύπτει εύκολα η μέγιστη ισχύς εξόδου ενός στοιχείου σε STC συνθήκες :

$$P_m = \frac{P_{Mm}}{N_s \cdot N_p} \tag{2.48}$$

Επίσης από τις Εξ. (2.38) και (2.39) μπορούν να υπολογιστούν τα I_{sc} και V_{oc} των στοιχείων καθώς και η εξής ποσότητα :

$$v_{oc} = \frac{e \cdot V_{oc}}{m \cdot k \cdot T} \tag{2.49}$$

Συνήθως χρησιμοποιείται η τιμή m=1. Πρέπει πάντα να ισχύει v_{oc}>15, διαφορετικά αυτή η μέθοδος δε μπορεί να εφαρμοστεί. Από την Εξ. (2.45) λύνουμε ως προς r_s . Το r_s πάντα πρέπει να είναι μικρότερο από 0.4 αλλιώς αυτή η μέθοδος δε μπορεί να εφαρμοστεί. Το R_s προκύπτει εύκολα από την Εξ. (2.44) και θεωρείται ότι δεν αλλάζει με τις συνθήκες. Εν συνεχεία εφαρμόζονται οι Εξ. (2.39), (2.40), (2.41), (2.42) και (2.43) από τις οποίες προκύπτουν οι νέες τιμές των I_{sc} και V_{sc} καθώς και η τιμή T_a. Το V_t υπολογίζεται εκ νέου σύμφωνα με την τιμή του T_a και κατόπιν μέσω των Εξ. (2.43), (2.44) και (2.45) προκύπτει εύκολα το γινόμενο $I_m \cdot V_m$ δηλαδή η ζητούμενη μέγιστη τιμή της ισχύος του στοιχείου, P_m, στις υπάρχουσες συνθήκες. Έχοντας υπολογίσει το P_m η μέγιστη ισχύς του πλαισίου (panel) υπολογίζεται με τη σχέση:

$$P_{Mm} = N_s \cdot N_p \cdot P_m \tag{2.50}$$

2.1.9.4 Το μοντέλο των Φ/Β πλαισίων για το σύστημα παραγωγής ενέργειας που μελετάται στην παρούσα εργασία

Για τις ανάγκες της μοντελοποίησης των δομικών στοιχείων του συστήματος που εξετάζεται στην παρούσα εργασία θεωρούμε ότι κάθε Φ/Β πλαίσιο είναι ένα σύστημα με ορισμένες εισόδους και εξόδους. Εκτός από την ημέρα του έτους για την οποία πρέπει να υπολογιστεί η παραγόμενη ενέργεια του Φ/Β πλαισίου και την κλίση θ ως προς το οριζόντιο επίπεδο, οι υπόλοιπες είσοδοι μπορούν να διακριθούν σε δυο κατηγορίες. Σε αυτές που αφορούν τα μετεωρολογικά δεδομένα του τόπου που εξετάζεται και σε αυτές που σχετίζονται με τα κατασκευαστικά χαρακτηριστικά των Φ/Β πλαισίων.

Ειδικότερα τα μετεωρολογικά δεδομένα που λαμβάνονται ως είσοδοι είναι η μέση συνολική ημερήσια ή μηνιαία ηλιακή ακτινοβολία G (Wh/m^2) σε οριζόντιο επίπεδο και η μέση ημερήσια ή μηνιαία θερμοκρασία T (^oC). Όσον αφορά στην ηλιακή ακτινοβολία αυτή είναι διαθέσιμη στο οριζόντιο επίπεδο. Ακολουθώντας όμως τη διαδικασία που ήδη έχει περιγραφεί [Σχήμα 2.4 και Εξ. (2.2) - (2.24)] μπορεί να υπολογιστεί η ακτινοβολία για όλες τις κλίσεις από 0 ^{o} ως 90 ^{o}.

Οι είσοδοι που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά κάθε φωτοβολταϊκού πλαισίου είναι ο αριθμός στοιχείων ανά πλαίσιο N_c, η μέγιστη τάση εξόδου V_m, το μέγιστο ρεύμα εξόδου I_m, η τάση ανοικτοκύκλωσης V_{oc}, το ρεύμα βραχυκύκλωσης I_{sc}, η μέγιστη ισχύς P_m και η ονομαστική θερμοκρασία λειτουργίας των στοιχείων, NCOT.

Η έξοδος του συστήματος υπολογισμού είναι η ενέργεια (σε Wh) για την επιθυμητή κλίση την ώρα και την ημέρα. Η ενέργεια υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τις Εξ. (2.33) – (2.50). Η Εξ.(2.39) λαμβάνει ως είσοδο την μέση ωριαία ακτινοβολία που προκύπτει αν διαιρεθεί η συνολικά αποδιδόμενη ημερήσια ακτινοβολία [Εξ. (2.21)] με τις ώρες διαθεσιμότητας της ακτινοβολίας αυτής. Οι ώρες διαθεσιμότητας προκύπτουν από την εφαρμογή των Εξ. (2.23) και (2.24).

2.2 ΜΕΤΑΤΡΟΠΕΙΣ ΙΣΧΥΟΣ DC/AC

2.2.1 Εισαγωγή

Τα Φ/Β στοιχεία λειτουργούν με συνεχές ρεύμα (DC) σε αντίθεση με τα ηλεκτρικά δίκτυα που λειτουργούν με εναλλασσόμενο (AC). Οι μετατροπείς ισχύος DC/AC είναι συσκευές που μετατρέπουν το συνεχές ρεύμα σε εναλλασσόμενο και είναι απαραίτητοι σε ένα σύστημα Φ/Β στοιχείων για να τροφοδοτήσουν το φορτίο. Οι μετατροπείς ισχύος DC/AC των συστημάτων ανανεώσιμων πηγών χωρίζονται σε δυο κατηγορίες: τους μετατροπείς που εγκαθίστανται σε αυτόνομα συστήματα και τους μετατροπείς που συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο. Στο σύστημα που μελετάται στην παρούσα εργασία χρησιμοποιείται ο δεύτερος τύπος μετατροπέων DC/AC.

2.2.2 Μετατροπείς DC/AC διακοπτικού τύπου

Οι μετατροπείς DC/AC διακοπτικού τύπου χρησιμοποιούνται σε AC κινητήρια συστήματα και σε AC τροφοδοτικά αδιάλειπτης λειτουργίας (UPS) όπου απαιτείται η παραγωγή ημιτονοειδούς τάσης με ελεγχόμενη συχνότητα και πλάτος. Οι αντιστροφείς διακρίνονται σε αυτούς που η είσοδος τους είναι μια DC πηγή τάσης και σε αυτούς που η είσοδος τους είναι μια DC πηγή ρεύματος. Επίσης, διακρίνονται περαιτέρω σε:

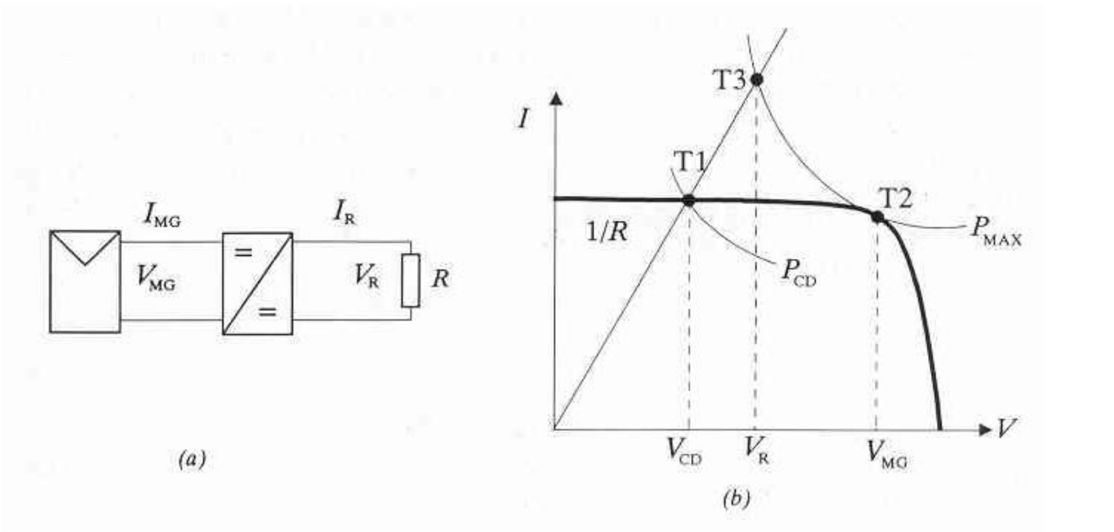
- μονοφασικούς αντιστροφείς ημιγέφυρας,
- μονοφασικούς αντιστροφείς σε συνδεσμολογία πλήρους γέφυρας και
- τριφασικούς αντιστροφείς.

Οι αντιστροφείς πηγής τάσης διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Αντιστροφείς με διαμόρφωση εύρους παλμών: σε αυτούς τους αντιστροφείς η τάση εισόδου έχει σταθερό πλάτος και επομένως ο αντιστροφέας ελέγχει το πλάτος και τη συχνότητα της εξόδου. Αυτό γίνεται με τη διαμόρφωση του εύρους των παλμών εξόδου και γι' αυτό αυτοί οι αντιστροφείς ονομάζονται αντιστροφείς με διαμόρφωση εύρους παλμών.
- Αντιστροφείς με τετραγωνική κυματομορφή: σε αυτούς τους αντιστροφείς ελέγχεται το πλάτος της εισόδου για τον έλεγχο του πλάτους της εξόδου. Συνεπώς, ο αντιστροφέας πρέπει να ελέγξει τη συχνότητα της τάσης εξόδου. Η κυματομορφή της τάσης εξόδου μοιάζει με τετραγωνική και γι' αυτό οι συγκεκριμένοι αντιστροφείς λέγονται τετραγωνικοί.
- Αντιστροφείς με απαλοιφή τάσης: σε αυτούς τους αντιστροφείς ελέγχεται το πλάτος και η συχνότητα της τάσης εξόδου. Συνεπώς, συνδυάζουν τα χαρακτηριστικά των δύο προηγούμενων κατηγοριών. Η τεχνική της απαλοιφής τάσης δε λειτουργεί στους τριφασικούς αντιστροφείς αλλά μόνο στους μονοφασικούς.

2.2.3 Μετατροπείς DC/AC με MPPT

Οι μετατροπείς ισχύος DC/AC με MPPT είναι μετατροπείς ισχύος και ηλεκτρονικές διατάξεις ισχύος που μπορούν να απορροφήσουν τη μέγιστη δυνατή ισχύ από τα Φ/Β πλαίσια. Αυτές η διαδικασία ονομάζεται Maximum Power Point Tracking (MPPT). Η αρχή της λειτουργίας των συστημάτων MPPT φαίνεται στο Σχήμα 2.9 όπου θεωρούμε μια Φ/Β γεννήτρια, ένα μετατροπέα ισχύος με δυνατότητα MPPT και ένα αντιστάτη σαν φορτίο. Η χαρακτηριστική του φορτίου τέμνει την χαρακτηριστική της Φ/Β γεννήτριας στο σημείο Τ1 το οποίο βρίσκεται πολύ μακριά από το σημείο μέγιστης ισχύος Τ2. Έτσι ένα μεγάλο ποσοστό ενέργειας από αυτό που θα μπορούσε να παραχθεί χάνεται. Χρησιμοποιώντας τον μετατροπέα ισχύος με δυνατότητα MPPT, ο οποίος έχει την χαρακτηριστική καμπύλη που περνά από τα σημεία Τ2 και Τ3, το σημείο λειτουργίας του συστήματος μετατοπίζεται στο σημείο Τ2 το οποίο είναι το σημείο μέγιστης ισχύος της Φ/Β γεννήτριας. Έτσι απορροφάται από το φορτίο το μέγιστο δυνατό ποσό ενέργειας.



Σχήμα 2.9: (α) Το γενικό διάγραμμα και (β) η αρχή λειτουργίας των συστημάτων με δυνατότητα Maximum Power Point Tracking.

2.2.4 Βαθμός απόδοσης των μετατροπέων DC/AC

Οι μετατροπείς ισχύος DC/AC έχουν βαθμό απόδοσης μετατροπής ισχύος n_1, με τιμή της τάξης του 95 % κατά τη λειτουργία στην ονομαστική τους ισχύ. Όταν λειτουργούν σε ισχύ διαφορετική από την ονομαστική τους τότε η απόδοσή τους είναι μειωμένη. Ο βαθμός απόδοσης, n_1, των μετατροπέων ισχύος DC/AC ορίζεται ως εξής:

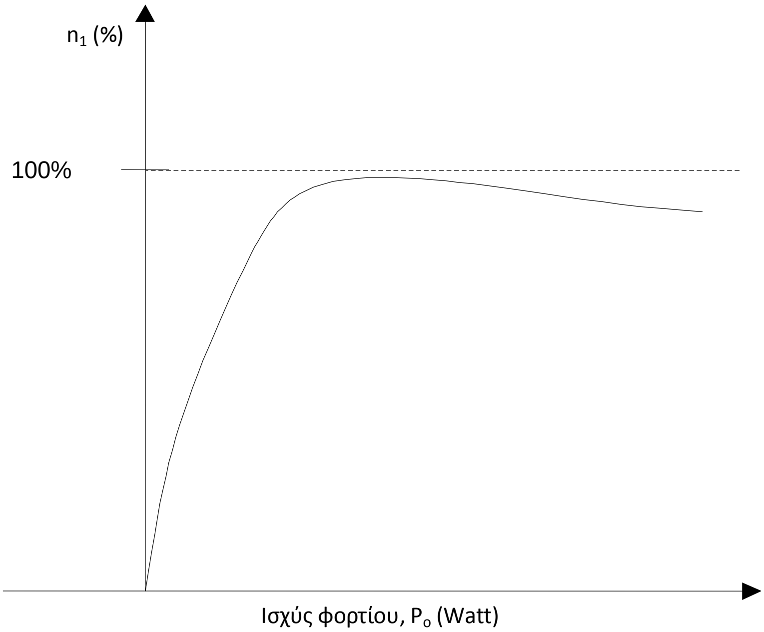
$$n_1(\%) = \frac{P_o}{P_{in}} 100\% \tag{2.51}$$

όπου:

P_o η ισχύς εξόδου του μετατροπέα ισχύος DC/AC (η ισχύς που παρέχεται στο φορτίο) και

P_{in} η ισχύς εισόδου του μετατροπέα ισχύος DC/AC.

Στο Σχήμα 2.10 φαίνεται η καμπύλη του βαθμού απόδοσης ενός μετατροπέα ισχύος DC/AC σε συνάρτηση με την ισχύ του φορτίου του.



Σχήμα 2.10: Ο βαθμός απόδοσης ενός μετατροπέα συναρτήσει της ισχύος του φορτίου του.

Στην παρούσα εργασία θεωρείται ότι το σύστημα που μελετάται περιλαμβάνει μόνο μετατροπείς ισχύος DC/AC με δυνατότητα MPPT καθώς έχει αποδειχτεί ότι παρά το γεγονός ότι έχουν υψηλότερο κόστος σε σχέση με αυτούς χωρίς τη συγκεκριμένη δυνατότητα το συνολικό κόστος του Φ/Β συστήματος μειώνεται λόγω της καλύτερης εκμετάλλευσης της διαθέσιμης ενέργειας των Φ/Β στοιχείων. Με n_{MPPT} συμβολίζεται η ακρίβεια εκτέλεσης της λειτουργίας MPPT της εκάστοτε συσκευής και βρίσκεται, όπως και ο βαθμός απόδοσης της συσκευής n_1, στα χαρακτηριστικά που δίνουν οι κατασκευαστές της συσκευής. Έτσι, ο συνολικός βαθμός απόδοσης, κατά τη μετατροπή της διαθέσιμης μέγιστης ισχύος των Φ/Β πλαισίων σε ισχύ που διοχετεύεται στο ηλεκτρικό δίκτυο, δίνεται από τη σχέση :

$$n_{inv} = n_1 \cdot n_{MPPT} \tag{2.52}$$

3. ΟΙ ΕΞΕΛΙΚΤΙΚΟΙ ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΙ

3.1 Εισαγωγή

Οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι είναι στοχαστικές μέθοδοι αναζήτησης, οι οποίες έχουν εφαρμοστεί επιτυχώς σε πολλά προβλήματα αναζήτησης, βελτιστοποίησης και μηχανικής μάθησης. Σε αντίθεση με τις περισσότερες τεχνικές βελτιστοποίησης, οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι χρησιμοποιούν έναν πληθυσμό λύσεων, τον οποίο διαχειρίζονται με ανταγωνιστικό τρόπο, εφαρμόζοντας κάποιους τελεστές διαφοροποίησης, για την εύρεση μιας αρκετά ικανοποιητικής, αν όχι ολικά βέλτιστης, λύσης. Θεωρείται ότι υπερτερούν άλλων ευρετικών μεθόδων οι οποίες εμφανίζουν περιορισμένες δυνατότητες σε προβλήματα με πολύ μεγάλο χώρο αναζήτησης και έχουν αυξημένη πιθανότητα, από τη φύση τους, εγκλωβισμού σε τοπικά βέλτιστα. Παρακάτω περιγράφονται οι βασικές αρχές των Γενετικών Αλγορίθμων και της Βελτιστοποίησης με Σμήνη Σωματιδίων.

Ως αντικειμενική συνάρτηση (objective function) ή αντικειμενικό κριτήριο ενός προβλήματος βελτιστοποίησης ορίζεται η συνάρτηση που αντιπροσωπεύει ένα πρόβλημα και την οποία επιθυμούμε να βελτιστοποιήσουμε. Αυτή μπορεί να εκφράζει, ανάλογα με το πρόβλημα, οικονομικό κόστος, χρονικό κόστος, ποσότητα κάποιου μεγέθους κ.τ.λ. Επίσης, μπορεί να είναι επιθυμητή είτε η ελαχιστοποίησή της είτε η μεγιστοποίησή της.

3.2 Χειρισμός περιορισμών

Πολύ συχνά ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πρέπει να λυθεί μέσα σε ένα σύνολο από περιορισμούς. Οι περιορισμοί αυτοί αφορούν στις μεταβλητές του προβλήματος και οι σχέσεις που τις περιγράφουν μπορεί να είναι είτε γραμμικές, είτε μη γραμμικές. Στις περιπτώσεις όπου έχουμε προβλήματα με περιορισμούς είναι συχνό το φαινόμενο να γεννιούνται κάποιες λύσεις μέσα από τη διαδικασία του αλγορίθμου που παραβιάζουν έναν ή περισσότερους από τους περιορισμούς.

Απαιτείται, λοιπόν, η ύπαρξη συγκεκριμένων μηχανισμών χειρισμού αυτών των μη εφικτών λύσεων.

Μια κατηγορία μηχανισμών για τη διαχείριση των περιορισμών είναι αυτή κατά την οποία γίνεται χρήση μιας ‘‘penalty function’’. Ειδικότερα, το πρόβλημα λύνεται αρχικά σαν να μην υπάρχουν περιορισμοί. Εν συνεχεία, αν προκύψει κάποιο χρωμόσωμα το οποίο παραβιάζει τους περιορισμούς, τότε η πιθανότητα αυτού του χρωμοσώματος να επιλεχθεί μέσα από την πράξη της επιλογής πρέπει να μειωθεί. Ο περιορισμός της πιθανότητας αυτής γίνεται προσθέτοντας στην συνάρτηση προσαρμογής μια συνάρτηση penalty που ουσιαστικά μειώνει την τιμή προσαρμογής του συγκεκριμένου χρωμοσώματος. Υπάρχουν πολλές λύσεις για την επιλογή της ‘‘penalty function’’. Μπορεί να είναι απλά μια σταθερά αλλά μπορεί και να εξαρτάται από τον βαθμό κατά τον οποίο ένα χρωμόσωμα παραβιάζει τους περιορισμούς. Όσο περισσότερο παραβιάζεται ένας περιορισμός τόσο μεγαλύτερη ποινή επιβάλλεται.

Μια παραλλαγή των μεθόδων penalty είναι οι μέθοδοι της διαγραφής των λύσεων που παραβιάζουν τους περιορισμούς. Οι μέθοδοι αυτές δηλαδή εφαρμόζουν την έσχατη ποινή (death penalty).

Για αρκετά προβλήματα η εφαρμογή των μεθόδων penalty (απλών ή death) δεν επιδρά θετικά στην απόδοση του αλγορίθμου. Τέτοια προβλήματα είναι αυτά στα οποία η γέννηση εφικτών λύσεων γίνεται με ρυθμό σχετικά μικρό σε σχέση με το ρυθμό γέννησης λύσεων που παραβιάζουν τους περιορισμούς. Έτσι ο αλγόριθμος πρέπει να δαπανά αρκετό χρόνο στην εύρεση των ανέφικτων λύσεων και στην εφαρμογή της penalty function.

Μια άλλη κατηγορία μεθόδων για τη διαχείριση των περιορισμών είναι αυτή που βασίζεται σε αλγορίθμους διόρθωσης (repair algorithms). Αυτοί οι αλγόριθμοι έχουν σκοπό να διορθώσουν τις ανέφικτες λύσεις ώστε να ικανοποιούν τους περιορισμούς. Αυτοί οι αλγόριθμοι πρέπει να προσαρμόζονται στα δεδομένα του εκάστοτε προβλήματος. Σε κάποια προβλήματα η εύρεση τέτοιων αλγορίθμων μπορεί να είναι δυσκολότερη και από την αντιμετώπιση ολόκληρου του υπόλοιπου προβλήματος.

3.3 Γενετικοί Αλγόριθμοι

3.3.1 Εισαγωγή

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι επινοήθηκαν από τον John Holland τη δεκαετία του '60 και αναπτύχθηκαν από τον ίδιο και τους φοιτητές του τις δεκαετίες του '60 και του '70. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι του Holland είναι μια μέθοδος μετακίνησης από ένα πληθυσμό "χρωμοσωμάτων" (π.χ. ακολουθίες από bits 1 και 0) σε ένα νέο πληθυσμό χρησιμοποιώντας ένα είδος "φυσικής επιλογής" μαζί με εμπνευσμένους από τη γενετική τελεστές "μετάλλαξης" (mutation) και "αντιστροφής" (inversion). Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από "γονίδια" (δηλαδή bits) και κάθε γονίδιο είναι ένα συγκεκριμένο "αλληλόμορφο" (allele) (π.χ. 0 ή 1). Ο τελεστής επιλογής διαλέγει τα χρωμοσώματα εκείνα του πληθυσμού στα οποία θα επιτραπεί να αναπαραχθούν και κατά μέσον όρο τα χρωμοσώματα που "προσαρμόζονται" παράγουν περισσότερους απογόνους από τα λιγότερο προσαρμόσιμα. Η *"διασταύρωση"* ανταλλάσσει υποτμήματα των δύο χρωμοσωμάτων, μιμούμενη χονδρικά το βιολογικό επανασυνδυασμό μεταξύ δύο οργανισμών ενός απλού χρωμοσώματος. Η *"μετάλλαξη"* αλλάζει τυχαία τις μεταβολές των τιμών των αλληλομόρφων ορισμένων θέσεων στα χρωμοσώματα και η *"αντιστροφή"* αναστρέφει τη διάταξη μιας μικρής περιοχής του χρωμοσώματος, αναδιατάσσοντας έτσι τη σειρά με την οποία τοποθετούνται τα γονίδια. Σημειώνεται ότι οι όροι "διασταύρωση" και "επανασυνδυασμός" έχουν την ίδια σημασία.

Η εισαγωγή από τον Holland ενός αλγορίθμου βασισμένου στον πληθυσμό με διασταύρωση, αντιστροφή και μετάλλαξη ήταν μια μεγάλη καινοτομία. Οι στρατηγικές εξέλιξης του Rechenberg ξεκίνησαν με έναν "πληθυσμό" δύο ατόμων, ενός γονέα και ενός απογόνου, όπου ο απόγονος είναι μια μεταλλαγμένη παραλλαγή του γονέα. Πληθυσμοί πολλών ατόμων με διασταύρωση συμπεριλήφθηκαν αργότερα. Αντίστοιχα, ο εξελικτικός προγραμματισμός του Walsh χρησιμοποιούσε μόνο μετάλλαξη για να προκαλέσει ποικιλία. Ο Holland ήταν αυτός ο οποίος προσπάθησε πρώτος να θέσει την υπολογιστική εξέλιξη σε μια σταθερή θεωρητική βάση (Holland 1975). Μέχρι πρόσφατα, η θεωρητική αυτή θεμελίωση, βασιζόμενη στη θεωρία των "σχημάτων" (schemas), ήταν το θεμέλιο όλων των μεταγενέστερων θεωρητικών μελετών επάνω στους γενετικούς αλγορίθμους.

Μόλις κατά τα τελευταία χρόνια υπήρξε ευρεία αλληλεπίδραση μεταξύ των ερευνητών οι οποίοι μελετούν τις μεθόδους του εξελικτικού υπολογισμού και έτσι τα σύνορα ανάμεσα στους γενετικούς αλγορίθμους, τις στρατηγικές εξέλιξης, του εξελικτικού προγραμματισμού και άλλες εξελικτικές μεθοδολογίες έχουν σπάσει μέχρι κάποιο βαθμό. Σήμερα ο όρος "Γενετικός Αλγόριθμος" χρησιμοποιείται για να περιγράψει κάτι πολύ διαφορετικό από την αρχική ιδέα του Holland.

3.3.2 Ο βασικός Γενετικός Αλγόριθμος

Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι προσπαθούν να επιλύσουν ένα πρόβλημα όχι με μαθηματικό αλλά με βιολογικό τρόπο, γεγονός που τους δίνει μεγάλη ενδογενή ευελιξία. Φτάνουν στη βέλτιστη (ή σχεδόν στη βέλτιστη) λύση ανεξάρτητα από το αν οι προδιαγραφές είναι γραμμικές ή μη γραμμικές, διακριτού ή συνεχούς χρόνου, πολλών ή λίγων ακρότατων, υποκείμενες σε ανισοτικούς ή μη περιορισμούς, NP ή non-NP complete.

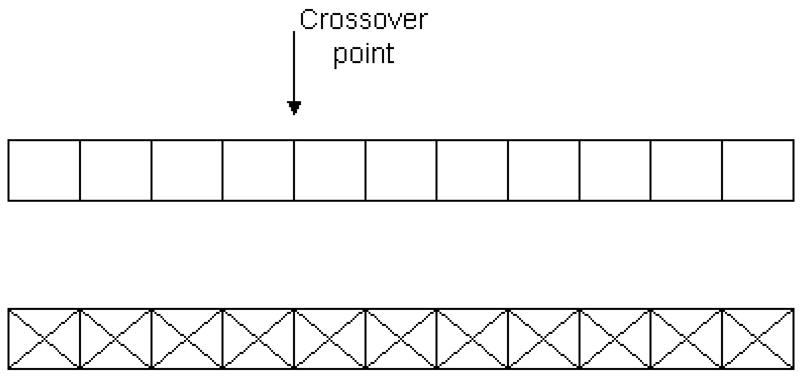
Έστω ότι πρέπει να επιλυθεί το πρόβλημα της μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης μιας ή πολλών μεταβλητών. Πρέπει να βρεθεί ο βέλτιστος συνδυασμός τιμών των μεταβλητών της συνάρτησης ώστε να αποκτήσει τη μέγιστη τιμή της. Στους Γενετικούς Αλγορίθμους μια οποιαδήποτε υποψήφια λύση ονομάζεται χρωμόσωμα. Κάθε χρωμόσωμα αποτελείται από ένα σύνολο γονιδίων. Κάθε γονίδιο αντιπροσωπεύει και μια μεταβλητή της συνάρτησης και μπορεί να παρασταθεί από μια ακολουθία δυαδικών ψηφίων (0 ή 1). Υποθέτοντας τη συνάρτηση f(x,y,z) τότε κάθε πιθανή λύση αυτής θα έχει τη μορφή [x y z] ή αν παρασταθεί με δυαδικά ψηφία θα έχει τη μορφή [0 0 1 | 1 0 0 | 0 0 1] όπου παρατηρείται ότι κάθε γονίδιο αναπαριστάται με τρία ψηφία (θα μπορούσε να αναπαρασταθεί με οσαδήποτε).

Ένα σύνολο χρωμοσωμάτων συγκεκριμένου πλήθους ονομάζεται γενεά. Ο Γενετικός Αλγόριθμος με ένα σύνολο από πράξεις παράγει νέες γενεές με την προοπτική τα νέα χρωμοσώματα να είναι καλύτερα (να δίνουν δηλαδή μεγαλύτερη βέλτιστη τιμή) από αυτά των παλαιότερων γενεών. Λαμβάνει χώρα δηλαδή μια διαδικασία παρόμοια με τη φυσική διαδικασία της ‘‘επιβίωσης του ισχυρότερου’’.

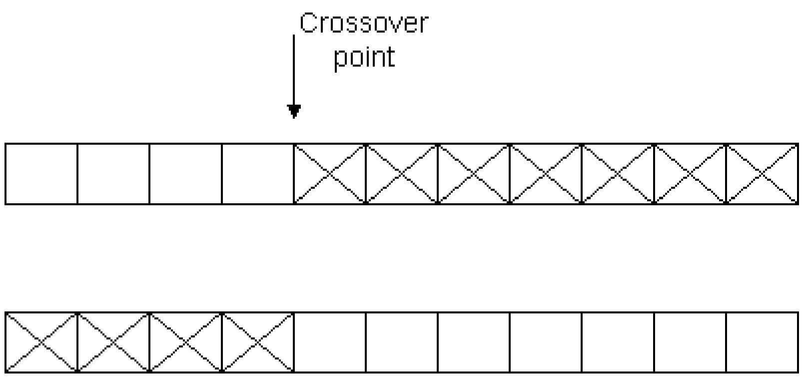
Ειδικότερα, οι τρεις πράξεις του βασικού γενετικού αλγόριθμου είναι η επιλογή, η διασταύρωση και η μετάλλαξη.

Ο μηχανισμός της επιλογής (selection), το κριτήριο δηλαδή με βάση το οποίο κάποια χρωμοσώματα θα επιλεχθούν και κάποια θα απορριφθούν από τις επόμενες γενεές είναι ένα από τα σημαντικότερα σημεία των Γενετικών Αλγορίθμων. Για τους μηχανισμούς επιλογής που χρησιμοποιούνται θα γίνει λόγος στην παράγραφο 3.3.5.

Ο τελεστής της διασταύρωσης (crossover) λαμβάνει χώρα ανάμεσα σε δυο χρωμοσώματα. Αφού επιλεχθεί ένα τυχαίο σημείο ανάμεσα στα γονίδια, οι υποακολουθίες γονιδίων ανταλλάσσονται για να δημιουργηθούν έτσι δυο νέοι απόγονοι. Η πράξη της διασταύρωσης παρουσιάζεται στα Σχήματα 3.1 – 3.3.



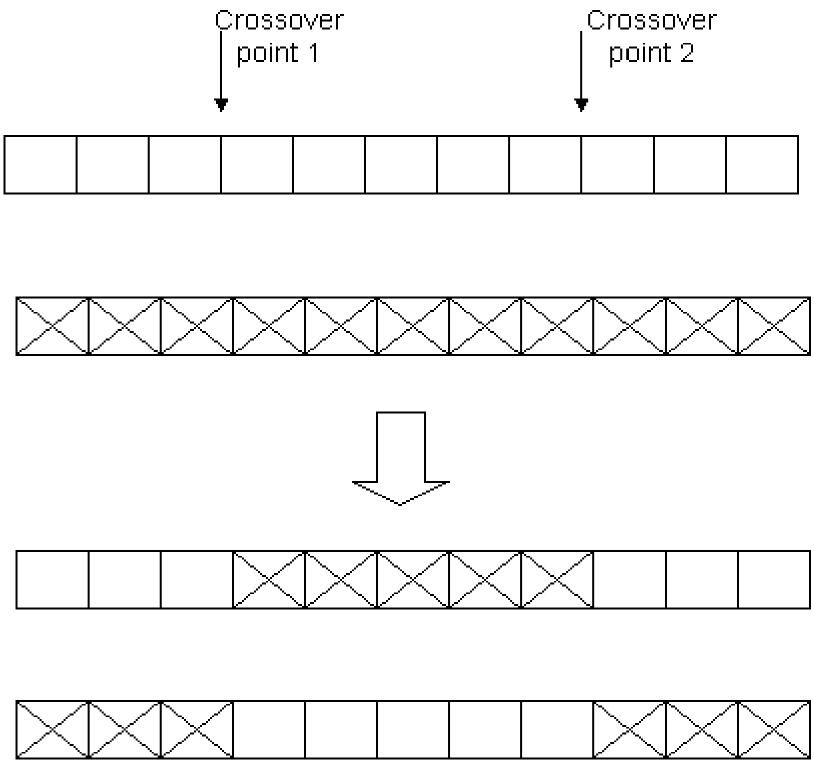
Σχήμα 3.1: Χρωμοσώματα πριν τη διασταύρωση.



Σχήμα 3.2: Χρωμοσώματα μετά τη διασταύρωση.

Στο Σχήμα 3.1 φαίνονται δυο χρωμοσώματα που είναι έτοιμα να διασταυρωθούν στο σημείο ακριβώς μετά το τέταρτο γονίδιο. Στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζονται τα δυο χρωμοσώματα μετά την διασταύρωση.

Η διασταύρωση μπορεί να λάβει χώρα και σε περισσότερα του ενός σημεία. Στο Σχήμα 3.3 παρουσιάζεται μια διασταύρωση δυο σημείων.



Σχήμα 3.3: Διασταύρωση δυο σημείων.

Ο τελεστής της μετάλλαξης που εφαρμόζεται μετά τον τελεστή της διασταύρωσης αλλάζει τυχαία κάποια από τα ψηφία ενός χρωμοσώματος. Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε την εξής ακολουθία ψηφίων (χρωμόσωμα) 0 0 1 1 1 0 0 1 0 και έστω ότι συμβαίνει μετάλλαξη στο τρίτο και το τελευταίο γονίδιο. Το νέο χρωμόσωμα θα είναι το 0 0 0 1 1 0 0 1 1. Η μετάλλαξη μπορεί να συμβεί σε οποιαδήποτε θέση του χρωμοσώματος με μια, όμως, πολύ μικρή πιθανότητα.

Ο εξελικτικός κύκλος συνεχίζεται μέχρι να ισχύσει κάποια επιθυμητή συνθήκη τερματισμού. Η συνθήκη αυτή μπορεί να είναι το πλήθος των συνολικών εκτελέσεων του αλγορίθμου (αριθμός γενεών) ή μια προκαθορισμένη τιμή της συνάρτησης του προβλήματος.

Συνοψίζοντας, το παρακάτω σχήμα παρουσιάζει την διαδικασία που ακολουθείται από μια εκτέλεση του βασικού γενετικού αλγορίθμου. Από μια γενεά “i” επιλέγονται με κάποιο μηχανισμό κάποια χρωμοσώματα. Από αυτά κάποια δε θα συμμετάσχουν σε καμιά πράξη, ενώ κάποια θα διασταυρωθούν και άλλα θα μεταλλαχθούν δημιουργώντας έτσι μια νέα γενεά.

Σχήμα 3.4: Ο βασικός Γενετικός Αλγόριθμος σε μια εκτέλεσή του.

3.3.3 Κωδικοποίηση μεταβλητών

Η κωδικοποίηση των μεταβλητών της συνάρτησης βελτιστοποίησης του εκάστοτε προβλήματος αποτελεί μια πολύ κρίσιμη απόφαση κατά την μοντελοποίηση ενός προβλήματος με γενετικούς αλγορίθμους. Ο πιο διαδεδομένος τρόπος κωδικοποίησης είναι, όπως είδαμε, με τη χρήση ακολουθιών δυαδικών ψηφίων. Μια μεταβλητή δηλαδή αναπαρίσταται με ένα ή περισσότερα δυαδικά ψηφία. Ο τρόπος αυτός έχει χρησιμοποιηθεί με επιτυχία για ένα μεγάλο σύνολο προβλημάτων, παρουσιάζει όμως ένα πολύ βασικό μειονέκτημα. Αν οι μεταβλητές του προβλήματος παίρνουν τιμές μέσα σε ένα πολύ μεγάλο εύρος τότε χρειάζονται πολλά bits κωδικοποίησης. Τα πράγματα γίνονται δυσκολότερα όταν αυξάνεται ταυτόχρονα και ο αριθμός των μεταβλητών (γονιδίων) του προβλήματος. Τότε τα χρωμοσώματα που δημιουργούνται είναι μεγάλου μήκους και το εύρος αναζήτησης (search space) μέσα στο οποίο πρέπει να ψάξει ο αλγόριθμος είναι τεράστιο. Σε τέτοιες περιπτώσεις η απόδοση των γενετικών είναι χαμηλή. Επίσης ένα άλλο πολύ σημαντικό πρόβλημα εμφανίζεται στις περιπτώσεις που έχουμε πραγματικές μεταβλητές. Η κωδικοποίηση πραγματικών αριθμών με δυαδικά ψηφία είναι εν γένει δύσκολη.

Έτσι, λοιπόν, σε ένα ευρύ σύνολο προβλημάτων χρησιμοποιείται η floating point αναπαράσταση. Σε μια τέτοια αναπαράσταση ένα χρωμόσωμα έχει τη μορφή [α_1 α_2 α_3 ..] όπου τα α_i είναι πραγματικοί αριθμοί που παίρνουν τιμές μέσα από ένα συγκεκριμένο εύρος $[\underline{\alpha}_i, \overline{\alpha}_i]$. Το $\underline{\alpha}_i$ είναι το κάτω φράγμα και το $\overline{\alpha}_i$ το άνω φράγμα αυτού του εύρους. Ενώ οι τελεστές της επιλογής και της διασταύρωσης δεν αλλάζουν, είναι σαφές ότι ο τελεστής της μετάλλαξης πρέπει να υποστεί κάποια τροποποίηση. Έτσι λοιπόν όταν ένα γονίδιο επιλεχθεί για μετάλλαξη τότε η νέα του τιμή θα επιλέγεται τυχαία μέσα από το επιτρεπτό εύρος τιμών του.

3.3.4 Η συνάρτηση προσαρμογής

Συνάρτηση προσαρμογής (fitness function) ενός γενετικού αλγορίθμου είναι η συνάρτηση εκείνη που προέρχεται από την αντικειμενική συνάρτηση μέσω κάποιας αντιστοίχισης – μετατροπής και η οποία χρησιμοποιείται από τον γενετικό αλγόριθμο για την πράξη της επιλογής. Ενώ η αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να παίρνει και αρνητικές και θετικές τιμές, η συνάρτηση προσαρμογής πρέπει να παίρνει μόνο μη-αρνητικές τιμές. Περισσότερα για τη συνάρτηση προσαρμογής και το πώς χρησιμοποιείται από τη πράξη της επιλογής παρουσιάζονται στην παράγραφο 3.3.5. Αυτό που πρέπει να διευκρινιστεί είναι με ποιο τρόπο γίνεται η αντιστοίχιση μεταξύ της αντικειμενικής συνάρτησης και της συνάρτησης προσαρμογής.

Αρχικά διακρίνονται δυο περιπτώσεις προβλημάτων. Τα προβλήματα μεγιστοποίησης και τα προβλήματα ελαχιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την εύρεση του μεγίστου μιας συνάρτησης. Έστω ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης με αντικειμενική συνάρτηση την g(X) όπου X το διάνυσμα των μεταβλητών. Για να επιλύθεί το πρόβλημα με γενετικό αλγόριθμο, θεωρείται η συνάρτηση $f(X) = -g(X)$, οπότε αυτόματα το πρόβλημα της ελαχιστοποίησης μεταβάλλεται σε πρόβλημα μεγιστοποίησης.

Έστω τώρα ένα πρόβλημα μεγιστοποίησης μιας συνάρτησης. Για να μετατραπεί η αντικειμενική συνάρτηση g(X) σε συνάρτηση προσαρμογής (για να λαμβάνει δηλαδή μόνο μη-αρνητικές τιμές) χρησιμοποιείται η εξής μετατροπή:

$$f(X) = \begin{cases} g(X) + C_{min}, & \text{αν } g(X) + C_{min} > 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \tag{3.1}$$

Η ποσότητα C_{min} μπορεί να είναι μια παράμετρος εισόδου ή η απόλυτη τιμή της ελάχιστης τιμής της g(X) για την τρέχουσα γενεά. Στην περίπτωση που έχουμε πρόβλημα ελαχιστοποίησης η αντιστοίχιση μεταξύ αντικειμενικής και συνάρτησης προσαρμογής βασίζεται στην εξής μετατροπή:

$$f(X)=\begin{cases} C_{max} - g(X), & \text{αν } C_{max} - g(X) > 0 \\ 0, & \text{αλλιώς} \end{cases} \tag{3.2}$$

Και εδώ το C_{max} μπορεί να είναι παράμετρος εισόδου αλλά το πιο ορθό είναι να επιλέγεται ως η μέγιστη τιμή της g(X) για κάθε γενεά.

3.3.5 Μηχανισμοί επιλογής (selection mechanisms)

Η επιλογή αποτελεί ίσως την κρισιμότερη πράξη των Γενετικών Αλγορίθμων γιατί από αυτή προκύπτει το σύνολο εκείνων των χρωμοσωμάτων από τα οποία κάποια θα διασταυρωθούν και θα μεταλλαχθούν δίνοντας απογόνους στην επόμενη γενεά. Πολλοί είναι οι μηχανισμοί που έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί για την πράξη της επιλογής. Όλοι αυτοί οι μηχανισμοί έχουν ένα κοινό χαρακτηριστικό. Χρησιμοποιούν τη συνάρτηση προσαρμογής για να ‘κρίνουν’ κατά πόσο ένα χρωμόσωμα θα επιβιώσει. Ένα χρωμόσωμα με μεγαλύτερη τιμή της συνάρτησης προσαρμογής έχει μεγαλύτερη πιθανότητα να επιβιώσει σε σχέση με αυτό που έχει μικρότερη τιμή.

Ο πιο διαδεδομένος μηχανισμός επιλογής χρωμοσωμάτων είναι ο μηχανισμός του τροχού της ρουλέτας. Αρχικά υπολογίζεται η συνάρτηση προσαρμογής f_i για όλα τα χρωμοσώματα μιας γενεάς (N θεωρείται το πλήθος των χρωμοσωμάτων ανά γενεά). Στη συνέχεια υπολογίζεται το άθροισμα $\sum_{i=1}^{N} f_i$ και για κάθε χρωμόσωμα υπολογίζεται η πιθανότητα επιλογής του p_i. Η πιθανότητα αυτή δίνεται από τη σχέση:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{N} f_i} \tag{3.3}$$

Αφού έχουν υπολογιστεί οι πιθανότητες p_i ακολουθεί η τυχαία γέννηση αριθμών για N φορές μέσα στο διάστημα [0,1]. Ένα χρωμόσωμα επιλέγεται αν ο τυχαίος αριθμός που γεννήθηκε είναι μικρότερος από την πιθανότητα του χρωμοσώματος αυτού και μεγαλύτερη από την αμέσως μικρότερη πιθανότητα χρωμοσώματος. Ο αναμενόμενος αριθμός ενός χρωμοσώματος δίνεται από τη σχέση:

$$n_i = \frac{f_i}{\bar{f}} = N \cdot p_i \tag{3.4}$$

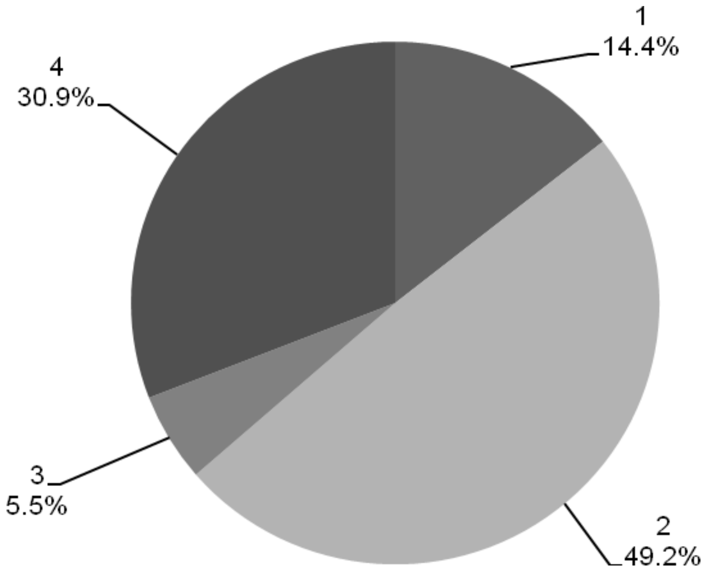
όπου $\bar{f}$ είναι η μέση τιμή της συνάρτησης προσαρμογής.

Για να γίνει πιο σαφής ο μηχανισμός αυτός ακολουθεί ένα παράδειγμα. Έστω η συνάρτηση προσαρμογής μιας μεταβλητής $f(x) = x^2$ και έστω τα εξής τέσσερα χρωμοσώματα: [13], [24], [8] και [19] (δηλαδή N = 4). Στον Πίνακα 3.1 φαίνονται οι τιμές της συνάρτησης, οι πιθανότητες επιλογής των χρωμοσωμάτων, ο αναμενόμενος αριθμός επιλογής κάθε χρωμοσώματος και ο πραγματικός αριθμός επιλογής όπως προέκυψε από τις γεννήσεις τεσσάρων τυχαίων αριθμών.

Πίνακας 3.1 Επιλογή τροχού ρουλέτας

x	$f(x)=x^2$	p_i	n_i	$n_{i,actual}$
13	169	0.14	0.58	1
24	576	0.49	1.97	2
8	64	0.06	0.22	0
19	361	0.31	1.23	1
Άθροισμα:	1170	1	4	4
Μέσος όρος:	293	0.25	1	1
Μέγιστη τιμή:	576	0.49	1.97	2

Όπως φαίνεται, το χρωμόσωμα [24] επιλέγεται 2 φορές, τα [13] και [19] 2 φορές και το [8] καμία φορά. Τα αποτελέσματα αυτά είναι πολύ κοντά στα αναμενόμενα τα οποία βρίσκονται στην τέταρτη στήλη του πίνακα. Το παρακάτω σχήμα δείχνει την κατανομή των πιθανοτήτων p_i. Επειδή η γέννηση ενός τυχαίου αριθμού για την επιλογή ενός χρωμοσώματος μοιάζει με τη ρίψη της μπίλιας στη ρουλέτα, η μέθοδος αυτή ονομάστηκε μέθοδος του τροχού της ρουλέτας.



Σχήμα 3.5: Κατανομή πιθανοτήτων επιλογής χρωμοσωμάτων για το παράδειγμα του Πίνακα 3.1.

Όσο μεγαλύτερη επιφάνεια κατέχει ένα χρωμόσωμα στη ρουλέτα τόσο μεγαλύτερη πιθανότητα έχει να επιλεχθεί για να δώσει απογόνους στην επόμενη γενεά.

Αξίζει να γίνει μια μικρή αναφορά και στους υπόλοιπους μηχανισμούς επιλογής οι οποίοι έχουν προταθεί και χρησιμοποιηθεί σε διάφορα προβλήματα μέχρι σήμερα. Μια παραλλαγή της μεθόδου της ρουλέτας αποτελεί το ελιτιστικό μοντέλο (elitist model). Στο μοντέλο αυτό εφαρμόζεται η μέθοδος της ρουλέτας με τη διαφορά ότι ταυτόχρονα διατηρείται το καλύτερο (fittest) χρωμόσωμα από την προηγούμενη γενεά. Το μοντέλο της αναμενόμενης τιμής (expected value model) αντιστοιχεί σε κάθε χρωμόσωμα ένα αριθμό σύμφωνα με την Εξ. (3.4) ο οποίος μειώνεται κάθε φορά που το χρωμόσωμα επιλέγεται από τη μέθοδο της ρουλέτας. Αν αυτός ο αριθμός πάρει αρνητική τιμή τότε το συγκεκριμένο χρωμόσωμα δε μπορεί πλέον να συμμετάσχει στην διαδικασία της επιλογής. Το ελιτιστικό μοντέλο αναμενόμενης τιμής είναι ο συνδυασμός των δυο προηγούμενων μοντέλων. Όλα τα παραπάνω μοντέλα προτάθηκαν από τον De Jong το 1975. Το 1985 ο Baker πρότεινε μια μέθοδο επιλογής γνωστή ως sorted selection method. Σε αυτή τη μέθοδο γίνεται αρχικά μια ταξινόμηση των χρωμοσωμάτων σύμφωνα με την τιμή της συνάρτησης προσαρμογής. Κατόπιν αντιστοιχίζεται αυθαίρετα στο καλύτερο χρωμόσωμα ο αριθμός συμμετοχής του στην επόμενη γενεά. Για τα υπόλοιπα χρωμοσώματα ο αριθμός συμμετοχής τους στην επόμενη γενεά προκύπτει γραμμικά. Τέλος, εκτός από τις μεθόδους που έχουν αναφερθεί μέχρι τώρα υπάρχουν και αρκετές άλλες, επειδή όμως ο σκοπός της παρούσας εργασίας δεν είναι η ανάλυση σε βάθος των Γενετικών Αλγορίθμων δε θα αναφερθούν.

3.3.6 Πιθανότητες διασταύρωσης και μετάλλαξης

Οι πιθανότητες διασταύρωσης p_c και μετάλλαξης p_m σχετίζονται με το πλήθος των χρωμοσωμάτων μιας γενεάς που εμπλέκονται στις διαδικασίες της διασταύρωσης και της μετάλλαξης. Παραδειγματικά, για ένα πληθυσμό 20 χρωμοσωμάτων με πιθανότητα διασταύρωσης 50% αναμένονται 10 χρωμοσώματα να συμμετάσχουν σε πράξεις διασταύρωσης για να δώσουν απογόνους.

Η επιλογή των πιθανοτήτων διασταύρωσης και μετάλλαξης έχει να κάνει με το εκάστοτε πρόβλημα. Πάντως, στη βιβλιογραφία υπάρχουν ενδεικτικές τιμές οι οποίες είναι οι εξής:

Για μεγάλους πληθυσμούς (50~100): p_c= 60% και p_m=0.1%

Για μικρούς πληθυσμούς (10~50): p_c= 90% και p_m=1%

3.3.7 Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι στην παρούσα εργασία

Οι τελεστές της διασταύρωσης και της μετάλλαξης που χρησιμοποιούνται στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας είναι λίγο διαφορετικοί από αυτούς που περιγράφηκαν στις προηγούμενες παραγράφους λόγω της αποτελεσματικότητας που απαιτείται στην παρούσα βελτιστοποίηση, δηλαδή στη βέβαιη σύγκλιση στο ολικά βέλτιστο σημείο. Κάποιοι από αυτούς είναι ομοιόμορφοι με την έννοια ότι η δράση τους δεν αλλάζει κατά την εξέλιξη των γενεών και κάποιοι άλλοι είναι μη ομοιόμορφοι καθώς αλλάζει ο τρόπος δράσης τους όσο εξελίσσεται ο αλγόριθμος. Όλοι αυτοί οι τελεστές που χρησιμοποιούνται ενδείκνυνται για προβλήματα με αναπαράσταση κινητής υποδιαστολής (floating point) και έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικοί στην αναζήτηση των βέλτιστων λύσεων.

Για τη διασταύρωση των χρωμοσωμάτων χρησιμοποιούνται οι εξής τρεις τελεστές:

- Απλή διασταύρωση (Simple Crossover, SC): εφαρμόζεται η μέθοδος που έχει αναφερθεί στο κεφάλαιο 4. Για το παρόν πρόβλημα θεωρούμε ότι η SC συμβαίνει μόνο σε ένα σημείο του χρωμοσώματος. Η πιθανότητα p_{sc}, κάποιο χρωμόσωμα από αυτά που έχουν προκύψει από την πράξη της επιλογής να συμμετάσχει σε απλή διασταύρωση, λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου. Η προεπιλεγμένη τιμή για πληθυσμό γενεών ίσο με 30 χρωμοσώματα είναι p_{sc}=10% (τιμή που προτείνεται από τη βιβλιογραφία). Η επιλογή των χρωμοσωμάτων που θα διασταυρωθούν γίνεται με τη γέννηση ενός τυχαίου αριθμού r ($0 \leq r \leq 1$) για κάθε χρωμόσωμα. Αν για κάποιο χρωμόσωμα ισχύει $r \leq p_{sc}$ τότε αυτό το χρωμόσωμα επιλέγεται για διασταύρωση. Αν ο συνολικός αριθμός χρωμοσωμάτων που έχουν επιλεχθεί για SC δεν είναι άρτιος τότε επιλέγεται ένα ακόμα χρωμόσωμα. Αν θεωρήσουμε ότι τα χρωμοσώματα έχουν ένα αύξοντα αριθμό ανά γενεά, ο αλγόριθμος, ξεκινώντας από το χρωμόσωμα με αριθμό 1, επιλέγει το πρώτο χρωμόσωμα που δεν έχει επιλεγεί για διασταύρωση. Η διασταύρωση εν συνεχεία λαμβάνει χώρα ανάμεσα στα χρωμοσώματα με αύξουσα σειρά, δηλαδή θα διασταυρωθούν το πρώτο χρωμόσωμα που έχει επιλεγεί με το δεύτερο που έχει επιλεγεί, το τρίτο με το τέταρτο κ.ο.κ.

- Απλή αριθμητική διασταύρωση (Simple Arithmetical Crossover, SAC): αν τα χρωμοσώματα $c_1=[u_1 \ldots u_m]$ και $c_2=[w_1 \ldots w_m]$ πρόκειται να πάρουν μέρος σε πράξη S.A.C τότε οι απόγονοί τους θα είναι $c'_1=[u_1 \ldots u_k' \ldots u_m]$ και $c'_2=[w_1 \ldots w_k' \ldots w_m]$, όπου $k \in [1,m]$, $u_k' = aw_k + (1-a)\cdot u_k$ και $w_k' = au_k + (1-a)\cdot w_k$. Η τιμή του k επιλέγεται τυχαία, ενώ το a είναι μια τυχαία επιλογή με τέτοιο τρόπο ώστε οι απόγονοι να βρίσκονται μέσα στο πεδίο εφικτών λύσεων (λύσεων δηλαδή που δεν παραβιάζουν τους περιορισμούς):

$$a \in \begin{cases} [\max(\alpha,\beta),\min(\gamma,\delta)], & \text{αν } u_k > w_k \\ [0,0], & \text{αν } u_k = w_k \\ [\max(\gamma,\delta),\min(\alpha,\beta)], & \text{αν } u_k < w_k \end{cases} \tag{3.5}$$

όπου:

$$α=(l_k^{c_2}-w_k)/(u_k-w_k) \quad (3.6)$$

$$β=(u_k^{c_1}-u_k)/(w_k-u_k) \quad (3.7)$$

$$γ=(l_k^{c_1}-u_k)/(w_k-u_k) \quad (3.8)$$

$$δ=(u_k^{c_2}-w_k)/(u_k-w_k) \quad (3.9)$$

Οι ποσότητες $l_k^{c_i}$ και $u_k^{c_i}$ συμβολίζουν το κάτω και άνω φράγμα του γονιδίου k του χρωμοσώματος i. Τα $l_k^{c_i}$ και $u_k^{c_i}$ δεν λαμβάνονται σταθερά κατά τη διάρκεια της προσομοίωσης αλλά υπολογίζονται με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου εύρεσης του πεδίου τιμών κάθε φορά που γίνεται απλή αριθμητική διασταύρωση. Ο αλγόριθμος ενός αλγορίθμου εύρεσης του πεδίου τιμών περιγράφεται στην παράγραφο 3.3.7.3. Η πιθανότητα για SAC, p_{sac}, λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή είναι 10% (τιμή που προτείνεται στη βιβλιογραφία). Η επιλογή και ο τρόπος για SAC γίνεται ακριβώς όπως και στην απλή διασταύρωση. Για κάθε χρωμόσωμα γεννιέται ένας αριθμός r $(0 \le r \le 1)$. Αν $p_{sc} \le r \le p_{sac}$ τότε το χρωμόσωμα συμμετέχει σε SAC.

- Ολική αριθμητική διασταύρωση (Whole Arithmetical Crossover, WAC): αν τα χρωμοσώματα $c_1=[u_1 \ldots u_m]$ και $c_2=[w_1 \ldots w_m]$ πρόκειται να πάρουν μέρος σε πράξη WAC τότε οι απόγονοί τους θα είναι $c_1^{'} = a \cdot c_2 + (1-a) \cdot c_2$ και $c_2^{'} = a \cdot c_1 + (1-a) \cdot c_2$. Το a έχει σταθερή τιμή καθ' όλη τη διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου και επιλέγεται μέσα από το διάστημα [0,1]. Η επιλογή του a μέσα από αυτό το διάστημα τιμών εγγυάται ότι οι απόγονοι θα βρίσκονται μέσα στο πεδίο των εφικτών λύσεων. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκε η τιμή a = 0,75. Η πιθανότητα για WAC p_{wac} λαμβάνεται ως παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή της είναι 10%. Η επιλογή και ο τρόπος ολικής αριθμητικής διασταύρωσης γίνεται ακριβώς όπως και στην απλή διασταύρωση μόνο που εδώ ισχύει $p_{sac} \le r \le p_{wac}$.

Οι τρεις παραπάνω τελεστές διασταύρωσης εφαρμόζονται με τη σειρά που παρουσιάστηκαν αμέσως μετά την πράξη της επιλογής. Τα χρωμοσώματα που επιλέγονται για κάποιο είδος διασταύρωσης δε μπορούν να συμμετέχουν σε άλλο είδος διασταύρωσης. Από τους τρεις τελεστές που αναφέρθηκαν μόνο ο δεύτερος και ο τρίτος εγγυώνται ότι οι απόγονοι που θα προκύψουν με την εφαρμογή τους δε θα παραβιάζουν το σύνολο των περιορισμών. Ο πρώτος τελεστής μπορεί να δώσει λύσεις που να βρίσκονται εκτός του συνόλου των επιτρεπτών λύσεων. Για την εξάλειψη αυτών των λύσεων απαιτείται η χρήση αλγορίθμου διόρθωσης.

Κατά τη διαδικασία της μετάλλαξης θεωρούμε ότι πάντα σε ένα χρωμόσωμα μόνο ένα γονίδιο μεταλλάσσεται. Για τη μετάλλαξη χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τελεστές:

- Ομοιόμορφη μετάλλαξη (Uniform Mutation, UM): στην ομοιόμορφη μετάλλαξη επιλέγεται τυχαία ένα γονίδιο του χρωμοσώματος. Η νέα τιμή του γονιδίου λαμβάνεται τυχαία μέσα από το επιτρεπτό εύρος τιμών του το οποίο υπολογίζεται με τη βοήθεια ενός αλγορίθμου εύρεσης του πεδίου τιμών. Η πιθανότητα μετάλλαξης είναι παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή της είναι ίση με 10 %. Η επιλογή των χρωμοσωμάτων τα οποία θα δώσουν κάποιο γονίδιο για UM γίνεται με τον ίδιο τρόπο που επιλέγεται κάποιο χρωμόσωμα προς διασταύρωση (με γέννηση τυχαίου αριθμού r για κάθε χρωμόσωμα). Πρέπει να ισχύει $r \le p_{um}$.
- Boundary μετάλλαξη (Boundary Mutation, BM): το γονίδιο του χρωμοσώματος επιλέγεται τυχαία και λαμβάνει με ίση πιθανότητα τη μέγιστη ή την ελάχιστη τιμή από το επιτρεπτό εύρος τιμών που μπορεί να λάβει και το οποίο προκύπτει από τον εύρεσης του πεδίου τιμών. Και εδώ η πιθανότητα μετάλλαξης είναι παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή της είναι 3 %. Η επιλογή κάποιου χρωμοσώματος προς BM γίνεται όπως και στις προηγούμενες πράξεις. Εδώ πρέπει να ισχύει $p_{um} \le r \le p_{bm}$.
- Μη-ομοιόμορφη μετάλλαξη (Non-Uniform Mutation, NUM): όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο χαρακτηρισμός ‘‘μη-ομοιόμορφη’’ σχετίζεται με το γεγονός ότι η δράση ενός τελεστή δεν παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου. Οι Γενετικοί Αλγόριθμοι σε προβλήματα με μεταβλητές πραγματικών αριθμών και με μεγάλα πεδία επιτρεπτών τιμών αυτών των μεταβλητών αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην τοπική αναζήτηση. Τοπική αναζήτηση είναι η αναζήτηση κοντά στη βέλτιστη λύση του

προβλήματος. Ενώ, δηλαδή, μπορούν να φτάσουν εύκολα στην περιοχή της βέλτιστης λύσης παρουσιάζουν δυσκολίες στην τοπική αναζήτηση. Η δυνατότητα του αλγορίθμου να εκτελεί επιτυχώς και τοπική αναζήτηση ονομάζεται ‘‘fine local tuning’’. Η NUM, λοιπόν, χρησιμοποιείται για την ενίσχυση της ικανότητας του συστήματος για ‘‘fine local tuning’’. Αν σε ένα χρωμόσωμα έχει επιλεγεί (όπως πάντα με τυχαίο τρόπο) για μετάλλαξη το γονίδιο g_k τότε το νέο γονίδιο $g_k^{'}$ δίνεται από τη σχέση:

$$g_k^{'} = \begin{cases} g_k + \rho(\overline{g_k} - g_k), & \text{με πιθανότητα ίση με 1/2} \\ g_k - \rho(g_k - \underline{g_k}), & \text{με πιθανότητα ίση με 1/2} \end{cases} \tag{3.10}$$

όπου $[\underline{g_k}, \overline{g_k}]$ είναι το επιτρεπτό εύρος τιμών του γονιδίου g_k (υπολογίζεται από τον αλγόριθμο εύρεσης του πεδίου τιμών) και ρ είναι η συνάρτηση:

$$\rho = u \cdot (1 - \frac{t}{T})^{B} \tag{3.11}$$

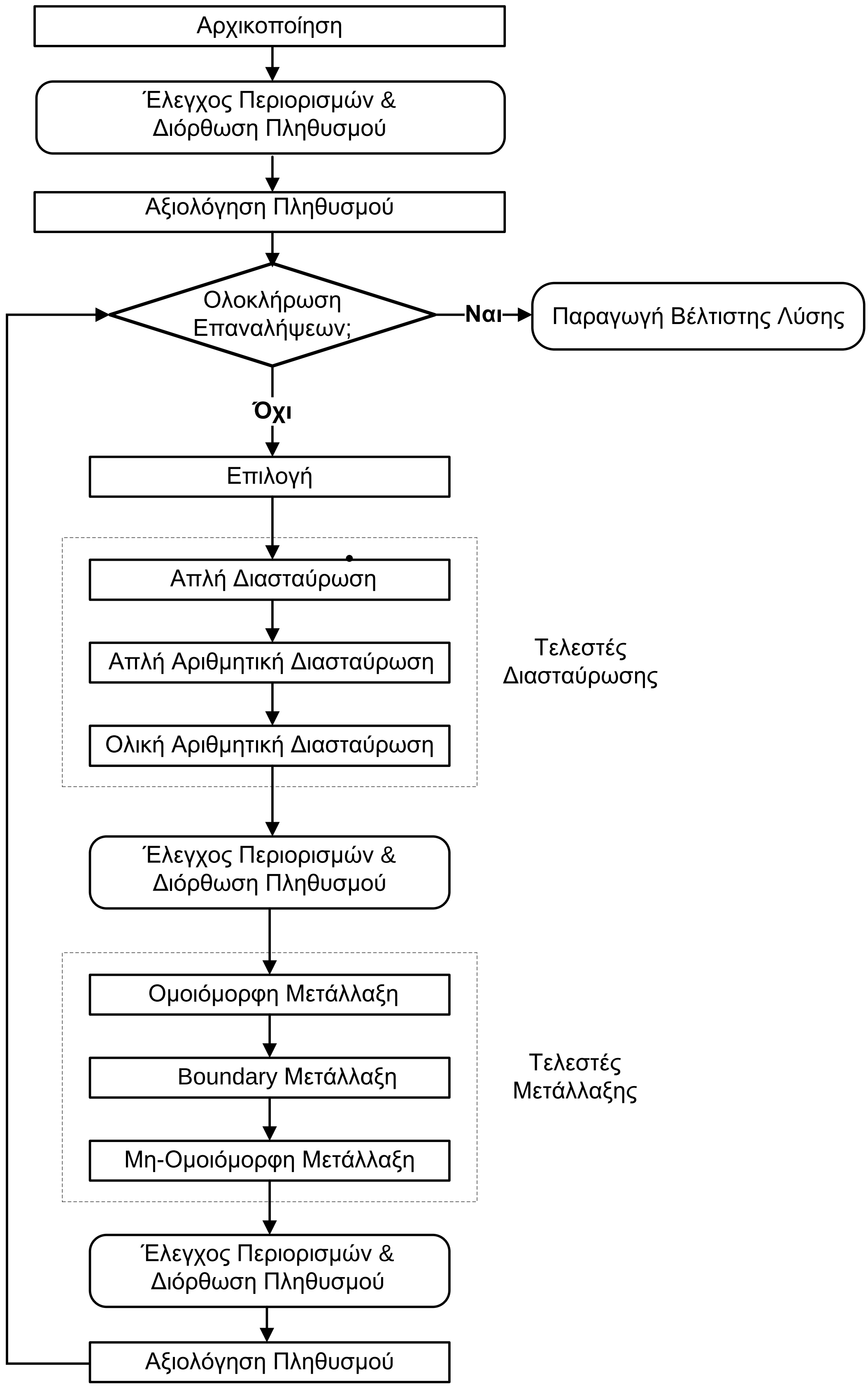
όπου u είναι ένας τυχαίος αριθμός από το διάστημα [0,1] (γεννιέται για κάθε γενεά), t είναι ο αριθμός της τρέχουσας γενεάς, T είναι ο συνολικός αριθμός γενεών και B είναι ένας συντελεστής ανομοιομορφίας που είναι σταθερός κατά τη διάρκεια του αλγορίθμου και παίρνει τιμές στο διάστημα [2,5].

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε B=3.5. Όταν η τιμή του t είναι μικρή τότε ο τελεστής ψάχνει ομοιόμορφα όλο το πεδίο των λύσεων ($\rho \to u$), ενώ όσο μεγαλώνει ($\rho \to 0$) ψάχνει πιο τοπικά. Όσο πιο μεγάλο είναι το B τόσο πιο γρήγορα θα αρχίσει η τοπική αναζήτηση. Η πιθανότητα για NUM, p_{num}, είναι παράμετρος εισόδου και η προεπιλεγμένη τιμή της είναι 35 %. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε αρκετά μεγάλη ώστε να ενισχύεται η δυνατότητα ‘‘fine local tuning’’ του παρόντος αλγορίθμου. Η επιλογή χρωμοσώματος προς μη ομοιόμορφη μετάλλαξη γίνεται όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις αλλά με $p_{bm} \leq r \leq p_{num}$.

Οι τελεστές της μετάλλαξης εφαρμόζονται αμέσως μετά τις πράξεις της διασταύρωσης με τη σειρά που παρουσιάστηκαν. Τα χρωμοσώματα των οποίων κάποιο γονίδιο μεταλλάσσεται με κάποιον από τους τρεις τρόπους δε μπορούν να συμμετέχουν σε άλλου είδους μετάλλαξη. Τέλος και οι τρεις τελεστές που αναλύθηκαν εγγυώνται ότι τα χρωμοσώματα που παράγουν ανήκουν στο σύνολο των επιτρεπτών λύσεων.

Ο αλγόριθμος εύρεσης του πεδίου τιμών χρησιμοποιείται από κάποιους από τους γενετικούς τελεστές (SAC, UM και BM) που περιγράφηκαν για την εύρεση του πεδίου επιτρεπτών τιμών μιας μεταβλητής σε ένα συγκεκριμένο χρωμόσωμα. Ένα τέτοιο πεδίο δεν παραμένει σταθερό κατά την διάρκεια εκτέλεσης του αλγορίθμου αλλά είναι συνάρτηση των τιμών των υπόλοιπων μεταβλητών του εξεταζόμενου χρωμοσώματος.

Στο Σχήμα 3.6 φαίνεται η ροή των τελεστών των Γενετικών Αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία. Όπως φαίνεται, αρχικά δημιουργείται με τυχαίο τρόπο η πρώτη γενεά και ο πληθυσμός διορθώνεται ώστε να μην παραβιάζονται οι περιορισμοί του προβλήματος. Αμέσως μετά αξιολογούνται τα χρωμοσώματα του πληθυσμού με χρήση της συνάρτησης προσαρμογής και στη συνέχεια μέχρι να ολοκληρωθούν οι προκαθορισμένες επαναλήψεις εφαρμόζονται οι τελεστές που περιγράφηκαν παραπάνω. Έτσι, σε κάθε επανάληψη εφαρμόζεται η μέθοδος επιλογής του τροχού της ρουλέτας, οι τελεστές διασταύρωσης και μετάλλαξης με τον αλγόριθμο διόρθωσης του πληθυσμού να χρησιμοποιείται ενδιάμεσα και στο τέλος της εφαρμογής τους και, τέλος, η αξιολόγηση των χρωμοσωμάτων με χρήση της συνάρτησης προσαρμογής.



Σχήμα 3.6: Ροή των τελεστών των Γενετικών Αλγορίθμων που χρησιμοποιήθηκαν.

3.4 Τεχνική Βελτιστοποίησης με Σμήνη Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization)

3.4.1 Εισαγωγή

Μια νέα εξελικτική μέθοδος βελτιστοποίησης είναι η Τεχνική Βελτιστοποίησης με Σμήνη Σωματιδίων (Particle Swarm Optimization, PSO). Η PSO είναι μια στοχαστική τεχνική βελτιστοποίησης βασισμένη σε πληθυσμό που αναπτύχθηκε από τους Eberhart and Kennedy (1995), σαν ένα εναλλακτικό εργαλείο στους γενετικούς αλγορίθμους, εμπνευσμένη από την κοινωνική συμπεριφορά που έχουν τα σμήνη πουλιών.

Η PSO έχει πολλές ομοιότητες με εξελικτικές υπολογιστικές τεχνικές όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι. Το σύστημα αρχικοποιείται με ένα πληθυσμό τυχαίων λύσεων και αναζητά βέλτιστα ενημερώνοντας (updating) γενιές. Σε αντίθεση με τους γενετικούς αλγορίθμους, η PSO δεν έχει εξελικτικές διαδικασίες όπως η διασταύρωση και η μετάλλαξη. Στην PSO, οι ενδεχόμενες λύσεις, που λέγονται σωματίδια (particles), κινούνται στο χώρο των λύσεων ακολουθώντας το ρεύμα των βέλτιστων σωματιδίων. Το πλεονέκτημα της PSO συγκρινόμενη με τους Γενετικούς Αλγορίθμους είναι ότι είναι εύκολο να υλοποιηθεί και υπάρχουν λίγες παράμετροι προς ρύθμιση ενώ θεωρείται ιδιαιτέρως αποδοτική σε προβλήματα πραγματικών μεταβλητών.

3.4.2 Ο αλγόριθμος

Η μέθοδος PSO προσομοιώνει τη συμπεριφορά ενός σμήνους πτηνών ή ψαριών. Η πιο αποτελεσματική τακτική αναζήτησης τροφής από τα μέλη του σμήνους είναι να ακολουθούν το μέλος εκείνο που είναι πιο κοντά στην τροφή. Στην PSO κάθε λύση είναι ένα μέλος στο χώρο αναζήτησης, που το καλούμε σωματίδιο. Όλα τα σωματίδια έχουν τιμές καταλληλότητας (fitness values) με τις οποίες αξιολογούνται από την αντικειμενική συνάρτηση που πρέπει να βελτιστοποιηθεί και έχουν ταχύτητες που κατευθύνουν την κίνησή τους. Τα σωματίδια κινούνται στο χώρο των λύσεων ακολουθώντας το ρεύμα των καλύτερων σωματιδίων.

Η PSO αρχικοποιείται με μια ομάδα τυχαίων σωματιδίων (λύσεων) και μετά αναζητά βέλτιστα ενημερώνοντας τις γενιές. Σε κάθε επανάληψη, κάθε σωματίδιο ενημερώνεται ακολουθώντας δύο τιμές. Η μία είναι η καλύτερη λύση (fitness) που έχει επιτύχει ως τώρα το ίδιο το σωματίδιο (η τιμή καταλληλότητας είναι αποθηκευμένη επίσης) και καλείται ατομικό βέλτιστο (personal best, pbest). Η άλλη τιμή είναι η καλύτερη που έχει επιτευχθεί από οποιοδήποτε σωματίδιο στον πληθυσμό μέχρι εκείνη τη στιγμή (επανάληψη) και καλείται ολικό βέλτιστο (global best, gbest).

Ο βασικός αλγόριθμος PSO για την ενημέρωση της θέσης του κάθε σωματιδίου περιγράφεται από τις επόμενες σχέσεις:

$$v_{i+1}(j) = v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \;\; pbest(j) - x_i(j) \;\; + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot \;\; gbest(j) - x_i(j) \qquad (3.12)$$

$$x_{i+1}(j) = v_{i+1}(j) + x_i(j) \qquad (3.13)$$

όπου:

i είναι ο αριθμός της τρέχουσας επανάληψης,

j είναι ο αριθμός της μεταβλητής του διανύσματος βελτιστοποίησης ($1^η$, $2^η$ κ.ο.κ),

$r_{1,i}$ και $r_{2,i}$ είναι μεταβλητές που δημιουργούνται τυχαία στο διάστημα [0,1] σε κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου PSO,

$x_i(j)$ είναι η τιμή της μεταβλητής j κατά την επανάληψη i,

$v_i(j)$ είναι η ταχύτητα της μεταβλητής j κατά την επανάληψη i,

c_1 και c_2 σταθερές μεταβλητές με τιμή, συνήθως, ίση με 2,

$r_{1,i}$ και $r_{2,i}$ είναι μεταβλητές που δημιουργούνται τυχαία στο διάστημα [0,1] σε κάθε εφαρμογή του αλγορίθμου PSO,

pbest(j) είναι η τιμή της μεταβλητής j της καλύτερης λύσης που έχει επιτύχει το συγκεκριμένο σωματίδιο μέχρι την επανάληψη i και gbest(j) είναι η τιμή της μεταβλητής j της καλύτερης λύσης που έχει εντοπιστεί από ολόκληρο τον πληθυσμό μέχρι την επανάληψη i

Οι Eberhart et al. (1996) πρότειναν τον περιορισμό της ταχύτητας σε ένα εύρος $-v_{max}, v_{max}$ ώστε να μειωθεί η πιθανότητα κινήσεων εκτός του επιτρεπτού χώρου αναζήτησης. Οι Shi και Eberhart [1998] παρατήρησαν ότι η έλλειψη της συνιστώσας μνήμης της προηγούμενης ταχύτητας [όρος $v_i(j)$ στην Εξ. (3.12)] έχει ως αποτέλεσμα την παγίδευση του σμήνους στην καλύτερη λύση που έχει βρεθεί από τον αρχικό, τυχαία ορισμένο, πληθυσμό. Αντιθέτως, ο μηχανισμός «μνήμης» της ταχύτητας συμβάλλει σε μια διευρυμένη κίνηση στο χώρο αναζήτησης. Προκειμένου να επιτευχθεί μια καλύτερη ισορροπία μεταξύ εξερεύνησης και εκμετάλλευσης των αποτελεσμάτων της, προτείνεται η χρήση ενός συντελεστή αδράνειας (inertia weight), w, ώστε η βασική εξίσωση του αλγορίθμου PSO να διαμορφώνεται ως εξής:

$$v_{i+1}(j) = w \cdot v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \left(pbest(j) - x_i(j)\right) + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot \left(gbest(j) - x_i(j)\right) \quad (3.14)$$

Ο συντελεστής αδράνειας παίζει σημαντικό ρόλο στη σύγκλιση της βέλτιστης λύσης σε μια βέλτιστη τιμή καθώς και στη διάρκεια εκτέλεσης της προσομοίωσης. Ελέγχει την επίδραση των προηγούμενων ταχυτήτων στην παρούσα, όπως και τις τοπικές και ολικές ικανότητες αναζήτησης της PSO. Γενικά, σε μεθόδους βελτιστοποίησης που βασίζονται σε πληθυσμούς, είναι επιθυμητό να «ενθαρρύνονται» τα άτομα να περιπλανιόνται σε όλο το χώρο αναζήτησης, χωρίς να εγκλωβίζονται γύρω από τοπικά βέλτιστα κατά τη διάρκεια των πρώτων σταδίων βελτιστοποίησης. Από την άλλη μεριά, κατά τα τελευταία στάδια είναι πολύ σημαντικό να ευνοείται η σύγκλιση προς το ολικό βέλτιστο, για να βρεθεί η βέλτιστη λύση αποδοτικά. Μεγάλοι συντελεστές αδράνειας βοηθάνε την PSO να εξερευνά ολικά και μικροί συντελεστές αδράνειας τοπικά.

Στο [33] προτείνεται η γραμμική μείωση του βάρους αυτού ανάλογα με τις επαναλήψεις της διαδικασίας βελτιστοποίησης από 0.9 ($1^{η}$ επανάληψη) σε 0.4 (τελευταία επανάληψη).

Ένας τρόπος ελέγχου της συμπεριφοράς του σμήνους, εναλλακτικός στη χρήση inertia weight, είναι η Constriction PSO (CPSO) που προτείνεται στο [34]. Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή ένας συντελεστής περιορισμού (constriction factor), χ, εφαρμόζεται ως εξής:

$$v_{i+1}(j) = \chi \cdot \left[v_i(j) + c_1 \cdot r_{1,i}(j) \cdot \ \ pbest(j) - x_i(j) \ \ + c_2 \cdot r_{2,i}(j) \cdot \ \ gbest(j) - x_i(j) \ \ \right] \tag{3.15}$$

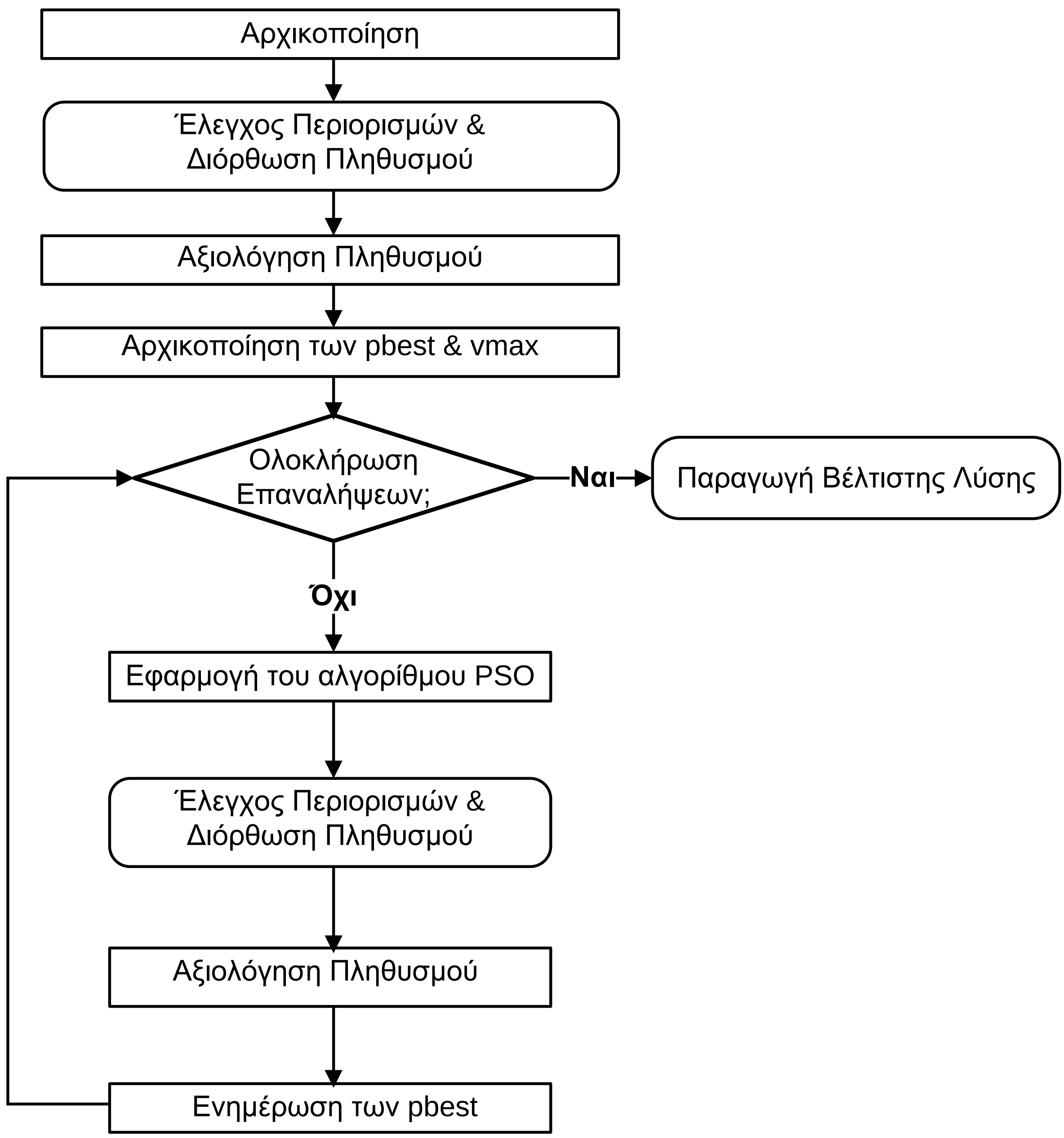
όπου:

$$\chi = \frac{2}{\left| 2 - c - \sqrt{c^2 - 4 \cdot c} \right|} \tag{3.16}$$

και το c είναι ίσο με $c = c_1 + c_2, c > 4$.

Στην περίπτωση της μεθόδου CPSO τα c_1 και c_2 συνήθως τίθενται ίσα με 2,05.

Στο Σχήμα 3.7 παρουσιάζεται το διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO. Κατά την έναρξη του αλγορίθμου δημιουργείται ο αρχικός πληθυσμός με τυχαίο τρόπο και στη συνέχεια ελέγχεται για τυχόν παραβιάσεις των περιορισμών και διορθώνεται. Στη συνέχεια όλα τα μέλη του πληθυσμού αξιολογούνται με την αντικειμενική συνάρτηση και αρχικοποιούνται τα διανύσματα pbest και vmax. Αμέσως μετά ακολουθεί η επαναληπτική διαδικασία του αλγορίθμου όπου σε κάθε επανάληψη εφαρμόζεται ο αλγόριθμος PSO σε κάθε μέλος του πληθυσμού, διορθώνονται οι προκύπτουσες λύσεις ώστε να μην παραβιάζονται οι περιορισμοί, αξιολογείται ο πληθυσμός με χρήση της αντικειμενικής συνάρτησης και ενημερώνονται τα διανύσματα pbest.



Σχήμα 3.7: Διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO.

4. ΜΕΘΟΔΟΙ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

4.1 Εισαγωγή

Η οικονομική ανάλυση της βιωσιμότητας της επένδυσης που μελετάται βασίζεται σε τρεις από τις πλέον καθιερωμένες διεθνώς μεθόδους. Συγκεκριμένα βασίζεται στον προσδιορισμό της καθαρής παρούσας αξίας (Net Present Value, NPV), του σύνθετου χρόνου απόσβεσης (Pay-Back Time, PBT) και του εσωτερικού βαθμού απόδοσης (Internal Rate of Return, IRR) της επένδυσης. Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο τρόπος υπολογισμού των παραπάνω μεγεθών, αφού πρώτα οριστούν κάποιες οικονομικές παράμετροι και ο τρόπος που επηρεάζουν τους διάφορους υπολογισμούς.

4.2 Ορισμοί οικονομικών παραμέτρων

Για την περιγραφή των μεθόδων οικονομικής αξιολόγησης μιας επένδυσης απαιτείται η ανάλυση κάποιων σημαντικών παραμέτρων:

Χρονικός ορίζοντας επένδυσης: Ο χρόνος ζωής των Φ/Β πλαισίων είναι συνήθως από 20 έως 30 χρόνια, ενώ πέρα από αυτόν οι κατασκευαστές δεν εγγυώνται την ορθή λειτουργία των συσκευών. Αντιθέτως, για τους μετατροπείς ισχύος ορίζεται ένας μέσος χρόνος μεταξύ επιδιορθώσιμων βλαβών που κυμαίνεται γύρω στα 25 χρόνια (219000 ώρες λειτουργίας). Συνεπώς ο χρονικός ορίζοντας της αξιολόγησης της επένδυσης δε μπορεί να υπερβαίνει το όριο ζωής των συσκευών του συστήματος.

Παράμετροι εγχώριας οικονομίας: Ένα μέγεθος που επηρεάζει σημαντικά την παρούσα ανάλυση είναι ο **πληθωρισμός** g (%). Πληθωρισμός ονομάζεται η αύξηση του κόστους των αγαθών και υπηρεσιών ανά μονάδα χρόνου. Για λόγους ευκολίας, συνηθίζεται ο πληθωρισμός να αναφέρεται σε ένα έτος. Εξίσου σημαντική παράμετρος είναι και το ετήσιο **προεξοφλητικό επιτόκιο** (ή επιτόκιο αναγωγής ή το κόστος ευκαιρίας), i. Χρησιμοποιώντας το επιτόκιο αυτό, ανάγουμε τις μελλοντικές καθαρές ταμειακές ροές σε σημερινές αξίες ώστε να είναι συγκρίσιμες με το κόστος εγκατάστασης που εκφράζεται σε σημερινές τιμές και αντίστροφα. Ο υπολογισμός του επιτοκίου προεξόφλησης είναι απαραίτητος για τον υπολογισμό της καθαρής παρούσας αξίας. Ο υπολογισμός αυτής της παραμέτρου είναι σχετικά σύνθετος λόγω της ιδιότητας του χρήματος να μην διατηρεί σταθερή την αξία του. Για αυτό το λόγο η παρούσα αξία μίας καθυστερημένης απολαβής μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας την απολαβή με έναν προεξοφλητικό παράγοντα ο οποίος είναι μικρότερος του 1. Όμοια η παρούσα αξία μίας μελλοντικής απολαβής μπορεί να βρεθεί πολλαπλασιάζοντας την απολαβή με τον ίδιο προεξοφλητικό παράγοντα προσθέτοντας επιπλέον την αξία της απολαβής. Για να υπολογίσουμε την καθαρά παρούσα αξία, προεξοφλούμε τις προσδοκώμενες απολαβές στην αναλογία της προσφερόμενης επιστροφής από ισοδύναμες εναλλακτικές δυνατότητες της επένδυσης στην κεφαλαιαγορά. Αυτή η αναλογία επιστροφής συχνά αναφέρεται ως προεξοφλητικό επιτόκιο ή κόστος ευκαιρίας του κεφαλαίου και υπολογίζεται ως ο αριθμητικός μέσος όρος των σταθερών επιτοκίων που μπορεί να δώσει το σύνολο των τραπεζών. Χρησιμοποιώντας το κόστος ευκαιρίας, ανάγουμε τις μελλοντικές καθαρές ταμειακές ροές σε σημερινές αξίες ώστε να είναι συγκρίσιμες με το κόστος εγκατάστασης που εκφράζεται σε σημερινές τιμές και αντίστροφα. Επίσης για ένα σύστημα, είναι πιθανόν να υπάρχει μία μέση **ετήσια ανατίμηση ενέργειας**, e.

Επιδότηση εγκατάστασης: Τα συστήματα παραγωγής ενέργειας που μελετώνται αποτελούν εφαρμογές ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Τέτοιου είδους εφαρμογές, λόγω της ωφελιμότητάς τους ως προς το περιβάλλον, τυγχάνουν επιδότησης όπως ορίζεται στο ισχύον νομικό πλαίσιο.

Φορολογία της επένδυσης: Βάσει των θεσμικών πλαισίων των περισσότερων χωρών τα καθαρά κέρδη των ανανεώσιμων συστημάτων από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο φορολογούνται.

Η μέθοδος της παρούσας αξίας μετατρέπει το σύνολο των χρηματορροών που αναμένεται να εμφανιστούν σε ένα χρονικό ορίζοντα σε μια μοναδική παρούσα αξία σε σταθερό χρόνο μηδέν. Αυτό το χρηματικό ποσό αναφέρεται ως παρούσα αξία. Φυσικά, αυτό μπορεί να γίνει μόνο βάσει κάποιας υπόθεσης εργασίας για το προεξοφλητικό επιτόκιο i. Με αυτήν την προσέγγιση εάν σήμερα επενδυθεί ποσό P, το άθροισμα κεφαλαίου και τόκων (γενικότερα, απόδοσης κεφαλαίου) μετά από n έτη θα είναι:

$$F = P \cdot (1+i)^n \tag{4.1}$$

Αντίστροφα, για να αποκτηθεί ποσό F μετά από N περιόδους, πρέπει σήμερα να επενδυθεί ποσό:

$$P = \frac{F}{(1+i)^n} \tag{4.2}$$

Εάν μια πληρωμή επαναλαμβάνεται κάθε χρονική περίοδο επί n περιόδους και δε μεταβάλλεται παρά μόνον εξαιτίας του πληθωρισμού g, τότε η παρούσα αξία των n ποσών υπολογίζεται με τη σχέση:

$$P = \sum_{t=1}^{n} P_t = A \cdot PWF \tag{4.3}$$

όπου:

A τo ποσό της πρώτης πληρωμής και

PWF ο συντελεστής παρούσας αξίας (present worth factor) που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$PWF = \sum_{t=1}^{n} \frac{(1+g)^{t-1}}{(1+i)^t} = \frac{1-\left(\frac{1+g}{1+i}\right)^n}{i-g} \tag{4.4}$$

Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value, NPV) είναι το συνολικό καθαρό όφελος μιας επένδυσης, που προκύπτει ως η διαφορά μεταξύ του λειτουργικού οφέλους και του συνόλου των δαπανών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής της επένδυσης. Όλα τα ποσά εκφράζονται σε παρούσα αξία, ανηγμένη συνήθως στην αρχή του πρώτου έτους λειτουργίας του συστήματος. Η καθαρή παρούσα αξία στην περίπτωσή μας προσδιορίζεται από τη σχέση:

$$NPV = \frac{R_n - IC_n + FC_n}{(1+i)^n} \tag{4.5}$$

όπου:

IC_0 το αρχικά επενδεδυμένο κεφάλαιο,

FC_n το συνολικό κόστος εγκατάστασης ανηγμένο στο n-οστό έτος και

R_n τα κέρδη από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας ανηγμένα στο n-οστό έτος.

Ο αναλυτικός τρόπος υπολογισμού των παραμέτρων IC_0, FC_n και R_n περιγράφεται στο 6^o κεφάλαιο.

4.3 Μέθοδος προσδιορισμού χρόνου απόσβεσης

Ο χρόνος απόσβεσης (payback period), PBT, ορίζεται ως το χρονικό σημείο κατά το οποίο η διαφορά των συνολικών εσόδων από το άθροισμα του αρχικού κεφαλαίου που επενδύθηκε και των συνολικών εξόδων συντήρησης είναι μηδενική. Επομένως, ισχύει η σχέση:

$$NPV = 0,\ \text{για } n = PBT \tag{4.6}$$

Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία επιλέγεται το μεγαλύτερο δυνατό PBT, δηλαδή η τελευταία φορά στα n χρόνια της μελέτης που ισχύει η Εξ. (5.6). Αυτό γίνεται επειδή είναι δυνατόν, π.χ. λόγω επισκευής των συσκευών και συνεπώς λόγω μεγάλης αύξησης των συνολικών εξόδων σε μια συγκεκριμένη χρονική στιγμή μεταγενέστερη ενός χρονικού σημείου PBT, να προκύπτουν περισσότερα του ενός σημεία PBT για τα οποία ισχύει η Εξ. (4.6). Επίσης, στην παρούσα εργασία ο χρόνος απόσβεσης υπολογίζεται με ακρίβεια ενός δεκάτου του έτους.

4.4 Μέθοδος προσδιορισμού εσωτερικού βαθμού απόδοσης

Η δεύτερη μέθοδος που χρησιμοποιείται για την οικονομική αξιολόγηση της επένδυσης σε συνδυασμό με τη μέθοδο προσδιορισμού του χρόνου απόσβεσης είναι η μέθοδος προσδιορισμού του εσωτερικού βαθμού απόδοσης της επένδυσης (IRR). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης ορίζεται ίσος με εκείνο το κόστος χρήματος για το οποίο η καθαρά παρούσα αξία της επένδυσης είναι μηδενική στα n χρόνια της αξιολόγησης. Ισχύει, δηλαδή, η εξής σχέση:

$$NPV = 0,\ \text{για } i = IRR \tag{4.7}$$

Για την αξιολόγηση της επένδυσης βάσει του εσωτερικού βαθμού απόδοσης που προκύπτει υπάρχουν οι παρακάτω περιπτώσεις:

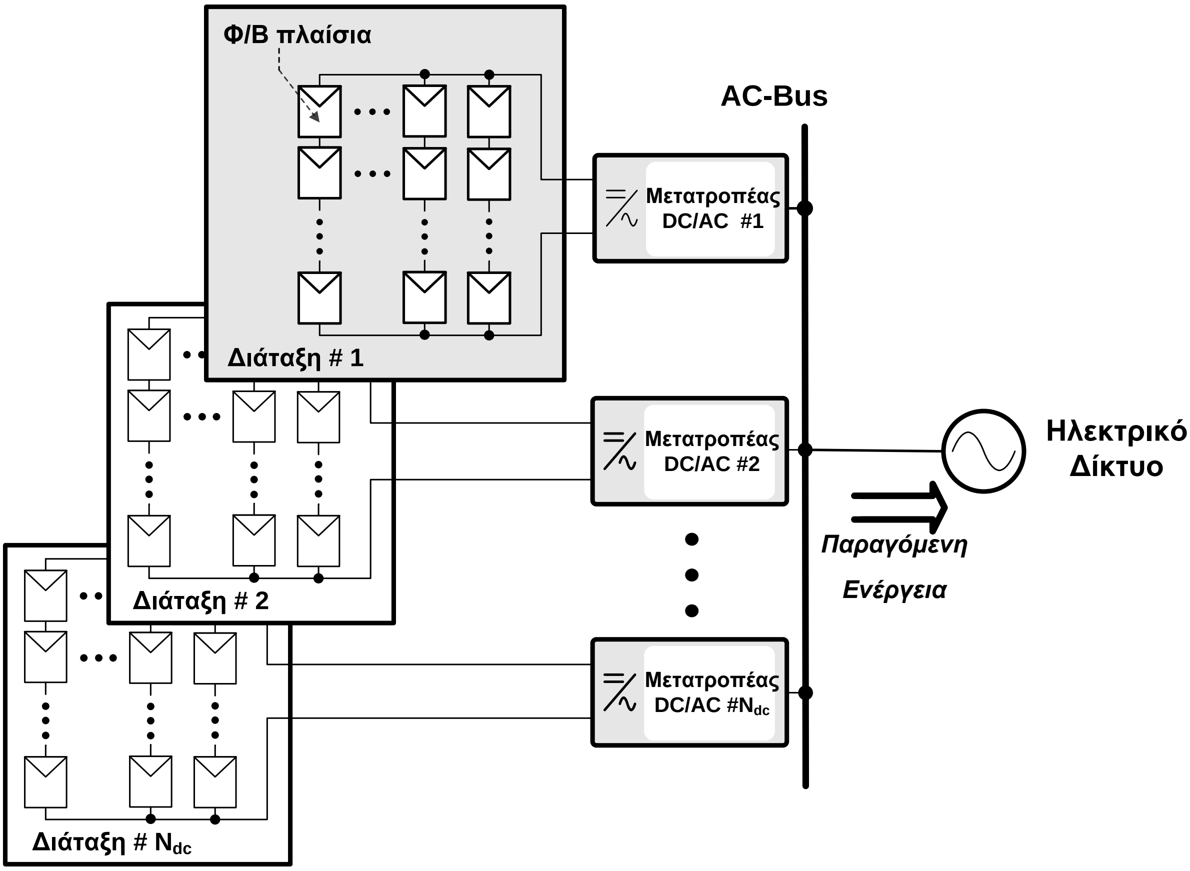
- Όταν ισχύει IRR > i, η επένδυση είναι αποδεκτή.
- Όταν ισχύει IRR = i, η επένδυση είναι οριακή οπότε δεν έχει ενδιαφέρον ή αξιολογείται κατά περίπτωση.
- Όταν ισχύει IRR < i, η επένδυση απορρίπτεται.

Να σημειωθεί, όμως, ότι ο IRR δεν αρκεί από μόνος του ως κριτήριο και η αξιολόγηση της επένδυσης πρέπει να συνδυάζεται με την τιμή της NPV.

5. ΤΑ ΜΟΝΤΕΛΑ ΠΟΥ ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΑΝ ΣΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΡΓΑΣΙΑ

5.1 Εισαγωγή

Στην παρούσα εργασία μελετώνται συστήματα φωτοβολταϊκών πλαισίων με σκοπό την παραγωγή ενέργειας και την προμήθειά της στο ηλεκτρικό δίκτυο. Τα δομικά στοιχεία του συστήματος που έχουν περιγραφεί στα προηγούμενα κεφάλαια είναι τα Φ/Β πλαίσια και οι μετατροπείς ισχύος DC/AC. Το δομικό μοντέλο των συστημάτων που μελετώνται παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.1.



Σχήμα 5.1: Το γενικό διάγραμμα του συστήματος παραγωγής ενέργειας από Φ/Β πλαίσια.

Τα εν λόγω συστήματα αποτελούνται από μετατροπείς ισχύος DC/AC (DC/AC inverters ή DC/AC converters) οι οποίοι συνδέονται με το ηλεκτρικό δίκτυο και σε κάθε έναν από αυτούς συνδέονται Φ/Β πλαίσια σε συγκεκριμένες διατάξεις, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.1 και περιγράφεται στην παράγραφο 5.2.

5.2 Το μοντέλο διασύνδεσης των Φ/Β πλαισίων με τους μετατροπείς DC/AC

Όπως προαναφέρθηκε, το σύστημα που σχεδιάζεται αποτελείται από ένα πλήθος N_{dc} μετατροπέων DC/AC διασυνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο, σε κάθε έναν από τους οποίους συνδέεται ένας αριθμός από Φ/Β πλαίσια. Συγκεκριμένα, τα πλαίσια αυτά συνδέονται σε σειρά και παράλληλα στους μετατροπείς DC/AC. Συμβολίζουμε με N_s τον αριθμό των πλαισίων που συνδέονται σε σειρά σε ένα μετατροπέα DC/AC και με N_p τον αριθμό των παράλληλων τέτοιων κλάδων με N_s συνδεδεμένα σε σειρά στοιχεία. Με N_{smin} συμβολίζουμε τον ελάχιστο αριθμό πλαισίων που μπορούν να συνδεθούν σε ένα μετατροπέα σε σειρά και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{smin} = \text{round\_up}\left(\frac{V_{imin}}{V_M}\right) \tag{5.1}$$

όπου:

round_up η συνάρτηση στρογγυλοποίησης στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό προς τα πάνω,

V_{imin} η ελάχιστη τάση εισόδου του μετατροπέα και

V_M η τάση του Φ/Β πλαισίου στο σημείο μέγιστης ισχύος του (σημείο λειτουργίας Φ/Β πλαισίου).

Με N_{smax} συμβολίζουμε το μέγιστο αριθμό πλαισίων που μπορούν να συνδεθούν σε ένα μετατροπέα σε σειρά και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{smax} = \text{round\_down}\left(\frac{V_{imax}}{V_{oc}}\right) \tag{5.2}$$

όπου:

round_down η συνάρτηση στρογγυλοποίησης στον πλησιέστερο ακέραιο αριθμό προς τα κάτω,

V_{imax} η μέγιστη τάση εισόδου του μετατροπέα (δίνεται από τον κατασκευαστή) και

V_{oc} η τάση ανοικτοκύκλωσης του Φ/Β πλαισίου.

Εδώ χρησιμοποιείται η V_{oc} επειδή είναι η μέγιστη δυνατή τάση εξόδου του πλαισίου (ισχύει η σχέση $V_{oc} > V_M$) και πρέπει να εξασφαλιστεί ότι για οποιεσδήποτε συνθήκες θα ισχύουν οι περιορισμοί λειτουργίας του μετατροπέα σε σχέση με το εύρος της τάσης εισόδου του.

Με N_{pmax} συμβολίζουμε το μέγιστο αριθμό κλάδων που μπορούν να συνδεθούν παράλληλα στην είσοδο ενός μετατροπέα και δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$N_{pmax} = \text{round\_down}\left(\frac{P_{max}}{P_M}\right) \tag{5.3}$$

όπου:

P_{max} η μέγιστη ισχύς εισόδου του μετατροπέα (δίνεται από τον κατασκευαστή) και

P_M η μέγιστη ισχύς του Φ/Β πλαισίου σε STC.

Οι στρογγυλοποιήσεις στις Εξ. (5.1) - (5.3) γίνονται ώστε τα αντίστοιχα μεγέθη που προκύπτουν να είναι ακέραιοι αριθμοί καθώς αναφέρονται σε πλήθος Φ/Β πλαισίων.

Αρχικά, σε κάθε μετατροπέα συνδέεται ο μέγιστος δυνατός αριθμός Φ/Β πλαισίων σε σειρά και ο μέγιστος αριθμός παράλληλων κλάδων. Με αυτό τον τρόπο σε κάθε μετατροπέα συνδέονται όσο το δυνατόν περισσότερα Φ/Β πλαίσια με στόχο ελαχιστοποίηση του συνολικού αριθμού των απαιτούμενων μετατροπέων DC/AC και τελικά την ελαχιστοποίηση του κόστους αγοράς τους. Έτσι, θεωρείται ότι σε κάθε μετατροπέα συνδέονται $N_p = N_{pmax}$ κλάδοι με $N_s = N_{smax}$ Φ/Β πλαίσια στον καθένα. Ωστόσο, είναι πιθανό, στην περίπτωση που προκύπτει μόνο ένας κλάδος, η συνολική ισχύς εξόδου του πλήθους των N_{smax} συνδεδεμένων πλαισίων, όπως αυτό προκύπτει από την Εξ. (5.2), να είναι μεγαλύτερη από την ισχύ εισόδου του μετατροπέα, κάτι το οποίο παραβαίνει τους περιορισμούς λειτουργίας του μετατροπέα και είναι ανεπιθύμητο. Τότε το N_{smax} μειώνεται με βήμα μιας μονάδας μέχρι να ισχύει ο παρακάτω περιορισμός:

$$N_{smin} \leq N_s \leq \frac{P_{max}}{P_M} \tag{5.4}$$

Συνεπώς, ο μέγιστος συνολικός αριθμός Φ/Β πλαισίων που μπορούν να συνδεθούν σε ένα μετατροπέα συμβολίζεται με N_{block} και ισχύει:

$$N_{block} = N_p \cdot N_s = N_{pmax} \cdot N_s \tag{5.5}$$

Έστω ότι ο συνολικός αριθμός των εγκατεστημένων Φ/Β πλαισίων συμβολίζεται με $N_{1.}$ Τότε, θα ισχύει:

$$N_1 = x \cdot N_{block} + y \tag{5.6}$$

όπου:

x ο αριθμός των μετατροπέων DC/AC, στους οποίους συνδέονται N_{block} Φ/Β πλαίσια στον καθένα, και

y ο αριθμός των πλαισίων που περισσεύουν από το σύνολο N_1 των πλαισίων αφαιρούμενων αυτών που συνδέονται στους x μετατροπείς (αν σε κάποια εγκατάσταση προκύπτει κάτι τέτοιο) και τα οποία συνδέονται σε ένα μόνο μετατροπέα DC/AC. Σε αυτή την περίπτωση ισχύει η σχέση $0 \leq y < N_{block}$.

Στο μετατροπέα αυτό, αν υπάρχει (δηλαδή αν $y > 0$), συνδέονται N_{p1} παράλληλοι κλάδοι με N_{s1} πλαίσια σε σειρά και με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδέονται όσο το δυνατόν περισσότερα σε σειρά. Με αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται η μέγιστη δυνατή τάση εισόδου για αυτή τη διάταξη και συνεπώς το ελάχιστο ρεύμα εισόδου με σκοπό τη μείωση των ωμικών απωλειών. Για τα N_{p1}, N_{s1} θα ισχύει:

$$y = N_{p1} \cdot N_{s1} \tag{5.7}$$

ενώ θα πρέπει πάντοτε να τηρούνται οι εξής περιορισμοί:

$$N_{smin} \leq N_{s1} \leq N_{smax} \tag{5.8}$$

$$1 \leq N_{p1} \leq N_{pmax} \tag{5.9}$$

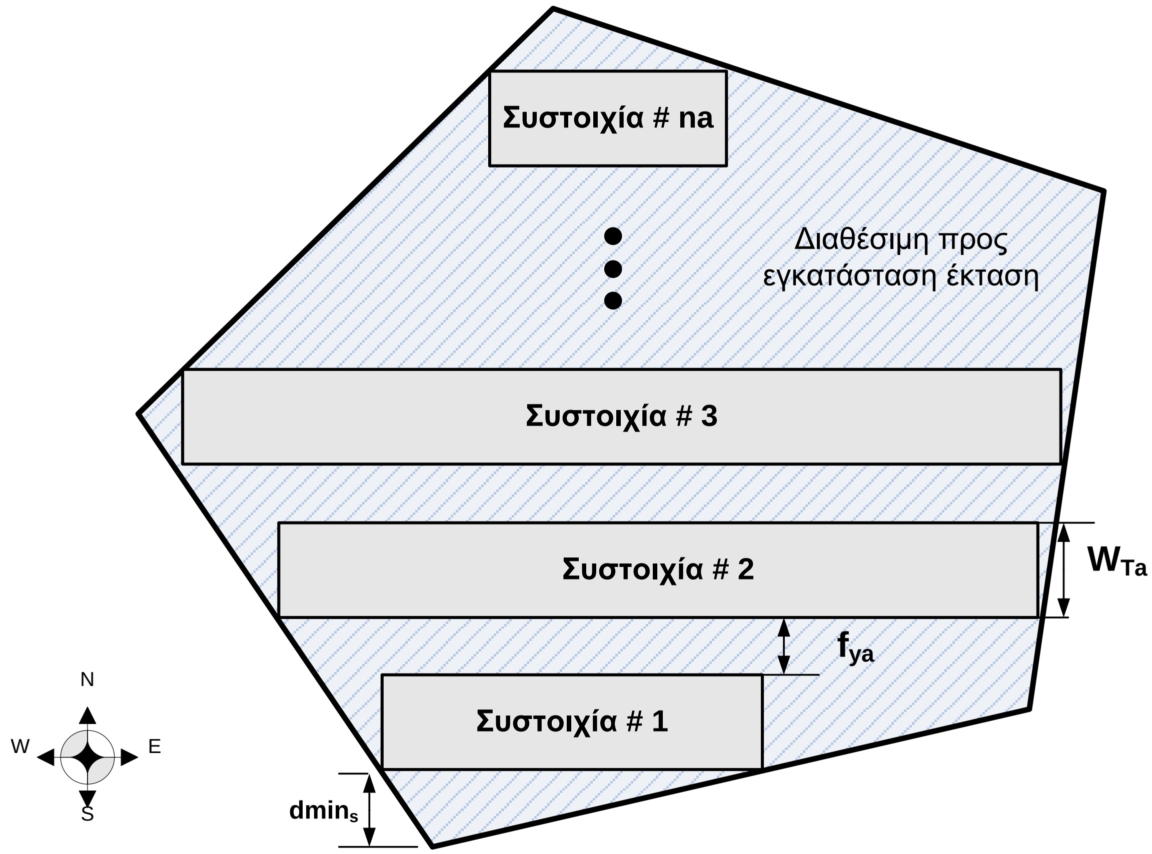
$$N_{smin} \le y < N_{block} \tag{5.10}$$

Ο τελικός αριθμός των μετατροπέων DC/AC, N_{dc}, που απαιτούνται για την εγκατάσταση του συστήματος θα είναι:

$$N_{dc} = \begin{cases} x+1, & \text{για} \quad y>0 \\ x, & \text{για} \quad y=0 \end{cases} \tag{5.11}$$

5.3 Το μοντέλο χωροθέτησης και διάταξης των Φ/Β πλαισίων στη διαθέσιμη έκταση

Η παρούσα μεθοδολογία έχει σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εφαρμόσιμη σε πραγματικές περιπτώσεις διαθέσιμων εκτάσεων ανεξάρτητα από το σχήμα τους, το μέγεθος ή την πιθανή κλίση τους. Η δεδομένη έκταση για την οποία γίνεται η μελέτη έχει ιδιαίτερη σημασία καθώς δημιουργεί σύνθετες απαιτήσεις και περιορισμούς σχετικά με την τοποθέτηση των Φ/Β πλαισίων εντός αυτής. Γι' αυτό το λόγο στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκαν κατάλληλα μοντέλα περιγραφής του τρόπου χωροθέτησης. Όπως είναι εμφανές στο Σχήμα 5.2, τα Φ/Β πλαίσια διατάσσονται σε συστοιχίες (arrays) με πολλαπλά Φ/Β πλαίσια στην κάθε μια και προσανατολισμό προς το Νότο. Ένα γενικό περισσότερο λεπτομερές διάγραμμα μιας τέτοιας συστοιχίας φαίνεται στο Σχήμα 5.3. Με W_T συμβολίζεται το πλάτος της έκτασης που καταλαμβάνει η κάθε συστοιχία στο οριζόντιο επίπεδο. Με f_{ya} συμβολίζεται η απόσταση μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών, με $dmin_s$ η απόσταση της πρώτης συστοιχίας από το νοτιότερο άκρο της έκτασης, ενώ με na συμβολίζεται το πλήθος των συστοιχιών στην εγκατάσταση του συστήματος.



Σχήμα 5.2: Διάταξη των Φ/Β πλαισίων σε συστοιχίες εντός της έκτασης.

Το Σχήμα 5.3 απεικονίζει ένα παράδειγμα συστοιχίας με τρεις γραμμές πλαισίων τα οποία τοποθετούνται σε κλίση θ ^{o}. Όπως φαίνεται, σε μια συστοιχία μπορούν να τοποθετηθούν πολλαπλές γραμμές Φ/Β πλαισίων. Το πλάτος της έκτασης της συστοιχίας, W_T, στο οριζόντιο επίπεδο δίνεται από τη σχέση:

$$W_T = W_1 \cdot N_2 \tag{5.11}$$

όπου:

N_2 ο συνολικός αριθμός γραμμών που υπάρχουν σε μια συστοιχία και

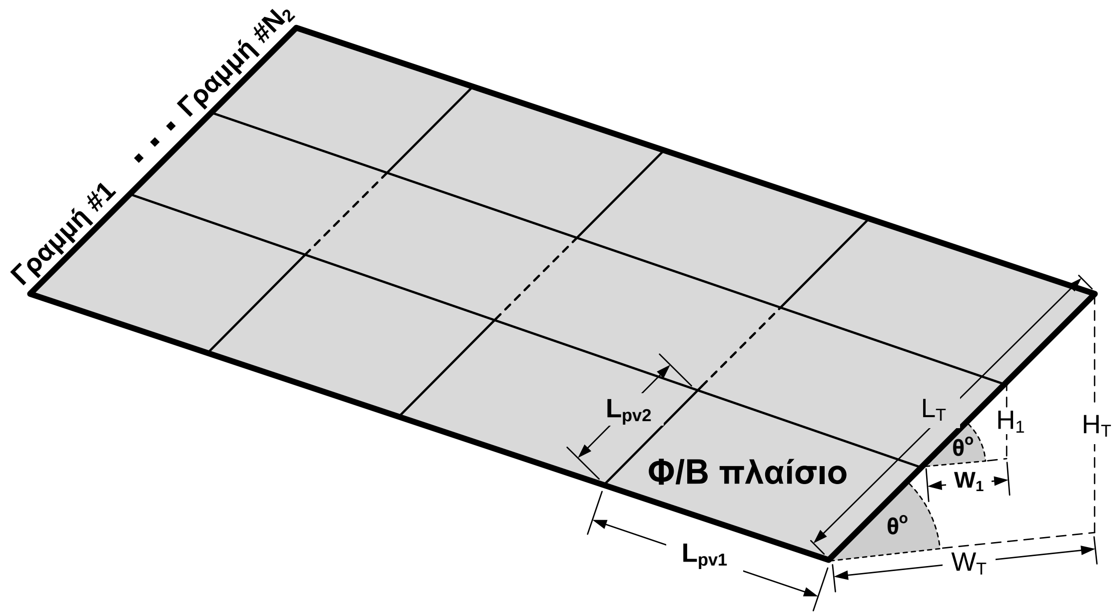
W_1 το πλάτος της έκτασης στο οριζόντιο επίπεδο που καταλαμβάνει ένα πλαίσιο υπό κλίση θ ^{o} και δίνεται από τη σχέση:

$$W_1 = L_{pv2} \cdot \cos\theta \tag{5.12}$$

όπου:

L_{pv2} η μία διάσταση του Φ/Β πλαισίου.

Με L_{pv1} συμβολίζεται η διάσταση της πλευράς του εγκατεστημένου πλαισίου που είναι στραμμένη προς το Νότο και με L_{pv2} συμβολίζεται η διάσταση της άλλης πλευράς. Οι τιμές των δύο διαστάσεων των Φ/Β πλαισίων δίνονται από τους κατασκευαστές τους.



Σχήμα 5.3: Η διάταξη των Φ/Β πλαισίων σε μία συστοιχία.

Με H_T συμβολίζεται το συνολικό ύψος της συστοιχίας από το οριζόντιο επίπεδο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, και δίνεται από τη σχέση:

$$H_T = H_1 \cdot N_2 \tag{5.13}$$

όπου:

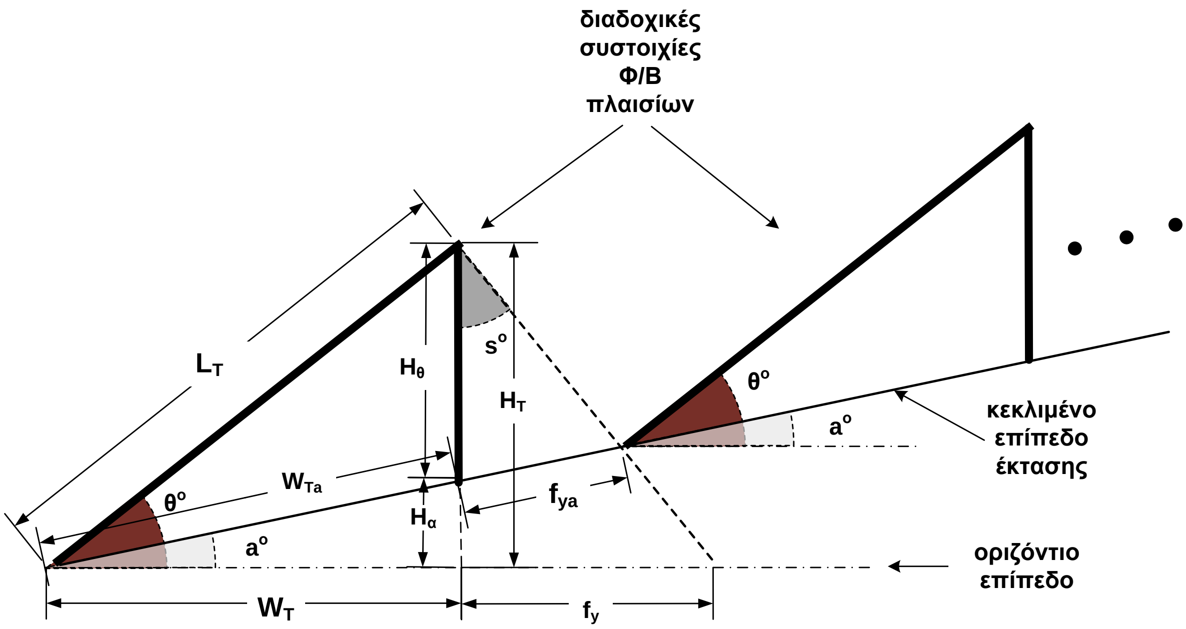
H_1 το ύψος από το οριζόντιο επίπεδο ενός Φ/Β πλαισίου εγκατεστημένου υπό κλίση θ ^{o}, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.3, το οποίο υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$H_1 = L_{pv2} \cdot \sin\theta \tag{5.14}$$

Με L_T συμβολίζεται το πλάτος της επιφάνειας μιας συστοιχίας, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.4, για το οποίο ισχύει η σχέση:

$$L_T = L_{pv2} \cdot N_2 \tag{5.15}$$

Στο Σχήμα 5.4 φαίνεται η τομή δύο διαδοχικών συστοιχιών Φ/Β πλαισίων εγκατεστημένων σε έκταση κλίσης a ^{o} υπό κλίση πλαισίων θ ^{o} και με απόσταση f_{ya} μεταξύ τους.



Σχήμα 5.4: Η τομή δύο διαδοχικών συστοιχιών Φ/Β πλαισίων εγκατεστημένων σε έκταση κλίσης a ^{o} και υπό κλίση πλαισίων θ^o.

Το πλάτος της έκτασης της συστοιχίας, W_{Ta}, στο κεκλιμένο επίπεδο της έκτασης δίνεται από τη σχέση:

$$W_{Ta} = W_T / \cos a \tag{5.16}$$

Με H_θ συμβολίζεται το συνολικό ύψος της συστοιχίας από το κεκλιμένο επίπεδο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.4, και δίνεται από τη σχέση:

$$H_\theta = H_T - H_a \tag{5.17}$$

όπου:

$$H_a = W_T \cdot \tan a \tag{5.18}$$

Η απόσταση πάνω στο κεκλιμένο επίπεδο μεταξύ των διαδοχικών συστοιχιών, f_{ya}, συνδέεται με τη γωνία s, η οποία στο εξής θα καλείται ως γωνία απόστασης, σύμφωνα με την εξής σχέση:

$$f_{ya} = \frac{H_\theta \cdot \tan s}{\cos a + \sin a \cdot \tan s} \tag{5.19}$$

Τα χαρακτηριστικά της διαθέσιμης έκτασης πρέπει να δίνονται με τη μορφή συντεταγμένων των κορυφών της. Έτσι, για κάθε έκταση υπάρχει ένα σύνολο σημείων c* με συντεταγμένες x(c*) και y(c*) όπου ο άξονας x αντιστοιχεί στον άξονα Δύσης – Ανατολής και ο άξονας y στον άξονα Νότου – Βορρά και με αυτές τις αύξουσες κατευθύνσεις, αντίστοιχα (π.χ. αν $x(c_1) > x(c_2)$ τότε το c_1 βρίσκεται ανατολικότερα του c_2 κ.ο.κ.). Μετά την εισαγωγή των κορυφών της έκτασης και με βάσει τις συντεταγμένες τους ακολουθεί ο εντοπισμός των ακραίων σημείων της τα οποία συμβολίζονται με west, east, south και north και αντιστοιχούν στο δυτικό, ανατολικό, νότιο και βόρειο άκρο της. Στη συνέχεια, δεδομένης της κλίσης a^o της έκτασης στον άξονα Νότου – Βορρά, οι συντεταγμένες των σημείων μετατίθενται από το οριζόντιο επίπεδο στο επίπεδο της συγκεκριμένης κλίσης. Θεωρώντας ότι οι δοθείσες συντεταγμένες είναι ουσιαστικά οι προβολές των συντεταγμένων του κεκλιμένου επιπέδου στο οριζόντιο επίπεδο, όπως ισχύει στα τοπογραφικά σχέδια, οι συντεταγμένες στο επίπεδο κλίσης a^o των σημείων, $x_a(c^*)$ και $y_a(c^*)$, κάνοντας την παραδοχή ότι το οριζόντιο επίπεδο αναφοράς είναι αυτό το οποίο τέμνεται με το κεκλιμένο επίπεδο της έκτασης στο σημείο south, δίνονται από τις εξής σχέσεις:

$$x_a(c^*) = x(c^*) \tag{5.20}$$

$$y_a(c^*) = y(c^*) / \cos a \tag{5.21}$$

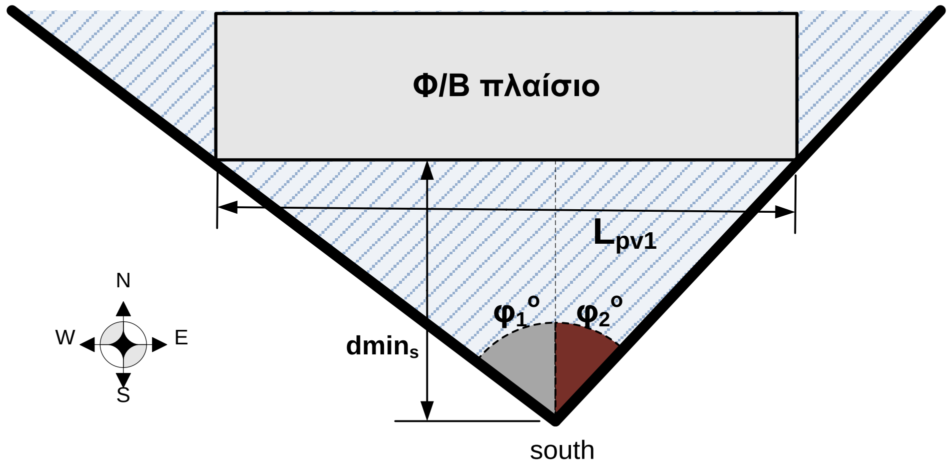
Το επόμενο βήμα είναι η εύρεση των χαρακτηριστικών των ευθύγραμμων τμημάτων των ορίων της έκτασης, δηλαδή των ευθύγραμμων τμημάτων που ενώνουν τις κορυφές της έκτασης. Συμβολίζοντας με nacme το πλήθος των κορυφών της έκτασης, θεωρούμε ότι η κάθε πλευρά της είναι ένα ευθύγραμμο τμήμα που ενώνει δύο διαδοχικές κορυφές, c_i και c_{i+1}, όπου το i ανήκει στο διάστημα [1, nacme] και περιγράφεται από την εξίσωση $y = k \cdot x + b$ ή από την εξίσωση $x = b$ μόνο στην περίπτωση όπου η συγκεκριμένη πλευρά είναι κάθετη στον άξονα Δύσης – Ανατολής, δηλαδή αν ισχύει $x_a(c_{i+1}) = x_a(c_i)$. Έτσι, για κάθε πλευρά, s_i, θα ισχύουν οι σχέσεις:

$$k(s_i) = \frac{y_a(c_{i+1}) - y_a(c_i)}{x_a(c_{i+1}) - x_a(c_i)}, \text{αν } x_a(c_{i+1}) \neq x_a(c_i) \tag{5.22}$$

$$b(s_i) = \begin{cases} y_a(c_i) - k(s_i) \cdot x_a(c_i), \text{αν } x_a(c_{i+1}) \neq x_a(c_i) \\ x_a(c_i) \quad \text{αλλιώς} \end{cases} \tag{5.23}$$

Αν το i ισούται με nacme, δηλαδή η κορυφή c_i είναι η τελευταία στη λίστα των κορυφών της έκτασης, τότε στις παραπάνω σχέσεις το i+1 θα πρέπει να αντικατασταθεί με το 1. Αυτό γίνεται επειδή η τελευταία πλευρά, s_{nacme}, ουσιαστικά ενώνει την τελευταία κορυφή, c_{nacme}, με την πρώτη, c_1.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2, η νοτιότερη συστοιχία της εγκατάστασης θα πρέπει να τοποθετηθεί σε μια ελάχιστη απόσταση από το νοτιότερο άκρο (south). Η απόσταση αυτή θα είναι μηδενική μόνο αν στο νότιο άκρο της έκτασης υπάρχει πλευρά παράλληλη με τον άξονα Δύσης – Ανατολής, δηλαδή μόνο στην περίπτωση που υπάρχει τέτοια κορυφή $c_i, i \neq \text{south}$, ώστε να ισχύει $y(c_i) = y(c_{south})$. Σε κάθε άλλη περίπτωση η πρώτη συστοιχία πρέπει να τοποθετηθεί σε μια απόσταση διαφορετική της μηδενικής. Η ελάχιστη απόσταση που μπορεί να τοποθετηθεί η πρώτη συστοιχία υπολογίζεται ως η ελάχιστη απόσταση που μπορεί να τοποθετηθεί ένα Φ/Β με προσανατολισμό το Νότο και συμβολίζεται ως $dmin_S$, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.5.



Σχήμα 5.5: Η ελάχιστη απόσταση, $dmin_S$, της πρώτης συστοιχίας από το νοτιότερο άκρο της έκτασης.

Για την απόσταση $dmin_s$ θα πρέπει να ισχύει η σχέση:

$$dmin_s = L_{pv1} \cdot \frac{\tan\varphi_1 \cdot \tan\varphi_2}{\tan\varphi_1 + \tan\varphi_2} \tag{5.24}$$

όπου οι γωνίες φ_1, φ_2 υπολογίζονται από τις εξισώσεις των δύο πλευρών που εφάπτονται στο σημείο south. Αντιστοίχως, υπολογίζεται και η ελάχιστη απόσταση στην οποία μπορεί να τοποθετηθεί ένα Φ/Β πλαίσιο από το βορειότερο άκρο, north, και συμβολίζεται με $dmin_n$. Η απόσταση αυτή αντιστοιχεί στην ελάχιστη απόσταση της τελευταίας συστοιχίας από το βορειότερο άκρο της έκτασης.

Ο μέγιστος αριθμός συστοιχιών που μπορεί να τοποθετηθεί στη διαθέσιμη έκταση, na_{max}, δεδομένου του πλάτους της κάθε συστοιχίας, W_{Ta}, και των αποστάσεων μεταξύ τους μπορεί να υπολογιστεί ως ακολούθως:

$$na_{max} = \frac{y_a(c_{north}) - y_a(c_{south}) + f_{ya} - dmin_s - dmin_n}{W_{Ta} + f_{ya}} \tag{5.25}$$

Η θέση της κάθε συστοιχίας μπορεί να περιγραφεί όσον αφορά στον άξονα y από δύο αριθμούς, τους $y_{ar,start}$ και $y_{ar,end}$, που αντιστοιχούν στις θέσεις του άξονα y που ξεκινάει και καταλήγει η συστοιχία και αναφέρονται στο επίπεδο κλίσης a^o της έκτασης, όπως και όλοι οι υπολογισμοί στο εξής που αναφέρονται στη μοντελοποίηση της χωροθέτησης των Φ/Β πλαισίων. Για τα $y_{ar,start}$ και $y_{ar,end}$ ισχύουν οι ακόλουθες σχέσεις:

$$y_{ar,start} = \frac{y_a(c_{south}) + dmin_s + ar \cdot W_{Ta} + f_{ya}}{W_{Ta} + f_{ya}} \tag{5.26}$$

$$y_{ar,end} = y_{ar,start} + W_{Ta} \tag{5.27}$$

όπου ar είναι ο αριθμός της αντίστοιχης συστοιχίας.

Κάθε συστοιχία είναι πιθανόν, λόγω μη κυρτότητας της έκτασης σε διάφορα σημεία, να διακόπτεται ως προς τον άξονα x και να υποδιαιρείται σε δύο ή και περισσότερες υπο-συστοιχίες (sub-arrays). Η εύρεση του αριθμού των δυνατών υπο-συστοιχιών, nsa_{ar}, γίνεται βρίσκοντας το πλήθος των σημείων τομής, ks_{ar}, kn_{ar}, των πλευρών της έκτασης με τις ευθείες $y = y_{ar,start}$ και $y = y_{ar,end}$ αντίστοιχα. Τότε το nsa_{ar} θα ισούται με:

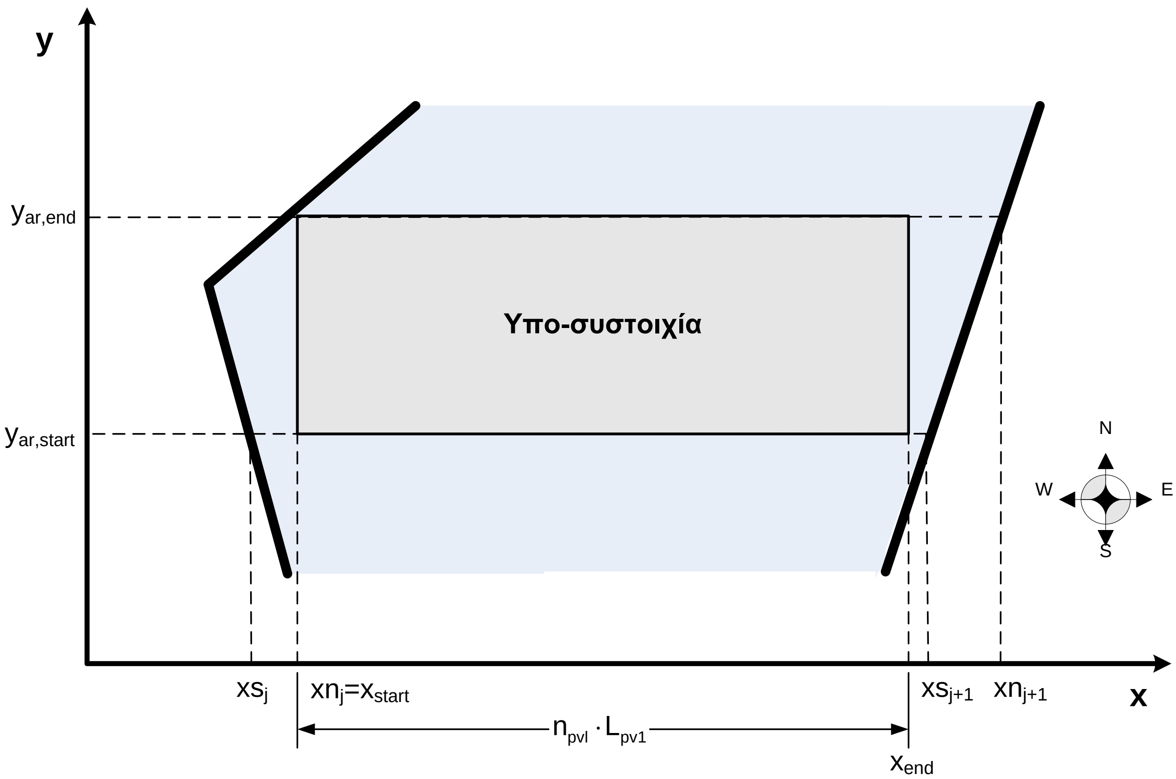
$$nsa_{ar} = \max(ks_{ar}/2, kn_{ar}/2) \tag{5.28}$$

Στη συνέχεια ακολουθεί η διαδικασία εύρεσης των συντεταγμένων αυτών των σημείων τομής με σκοπό τον πλήρη ορισμό της θέσης όλων των πιθανών υπο-συστοιχιών στην κάθε συστοιχία, σε σχέση με τον άξονα x. Έτσι, εντοπίζονται τα σημεία τομής, xs, της νότιας πλευράς της συστοιχίας, δηλαδή της ευθείας $y = y_{ar,start}$ με τις πλευρές της έκτασης και, αντιστοίχως, τα σημεία τομής, xn, της βόρειας πλευράς της συστοιχίας, δηλαδή της ευθείας $y = y_{ar,end}$ με τις πλευρές της έκτασης. Κάθε υπο-συστοιχία θα ξεκινάει από ένα σημείο x_{start} και θα εκτείνεται μέχρι ένα σημείο x_{end} κατά μήκος του άξονα x. Το x_{start} θα είναι ίσο με το μέγιστο από δύο σημεία xs_j , xn_j, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.6, όπου το j είναι περιττός αριθμός. Για την εύρεση του x_{end} επιλέγεται το μικρότερο από τα xs_{j+1}, xn_{j+1}. Ωστόσο, αυτό αποτελεί απλά τη μέγιστη δυνατή τιμή του x_{end}. Στη συγκεκριμένη υπο-συστοιχία, το πλήθος των Φ/Β πλαισίων που μπορούν να τοποθετηθούν σε μια γραμμή, n_{pvl}, ισούται με:

$$n_{pvl} = \text{round\_down}\left(\frac{\min(xs_{j+1}, xn_{j+1}) - x_{start}}{L_{pv1}}\right) \tag{5.29}$$

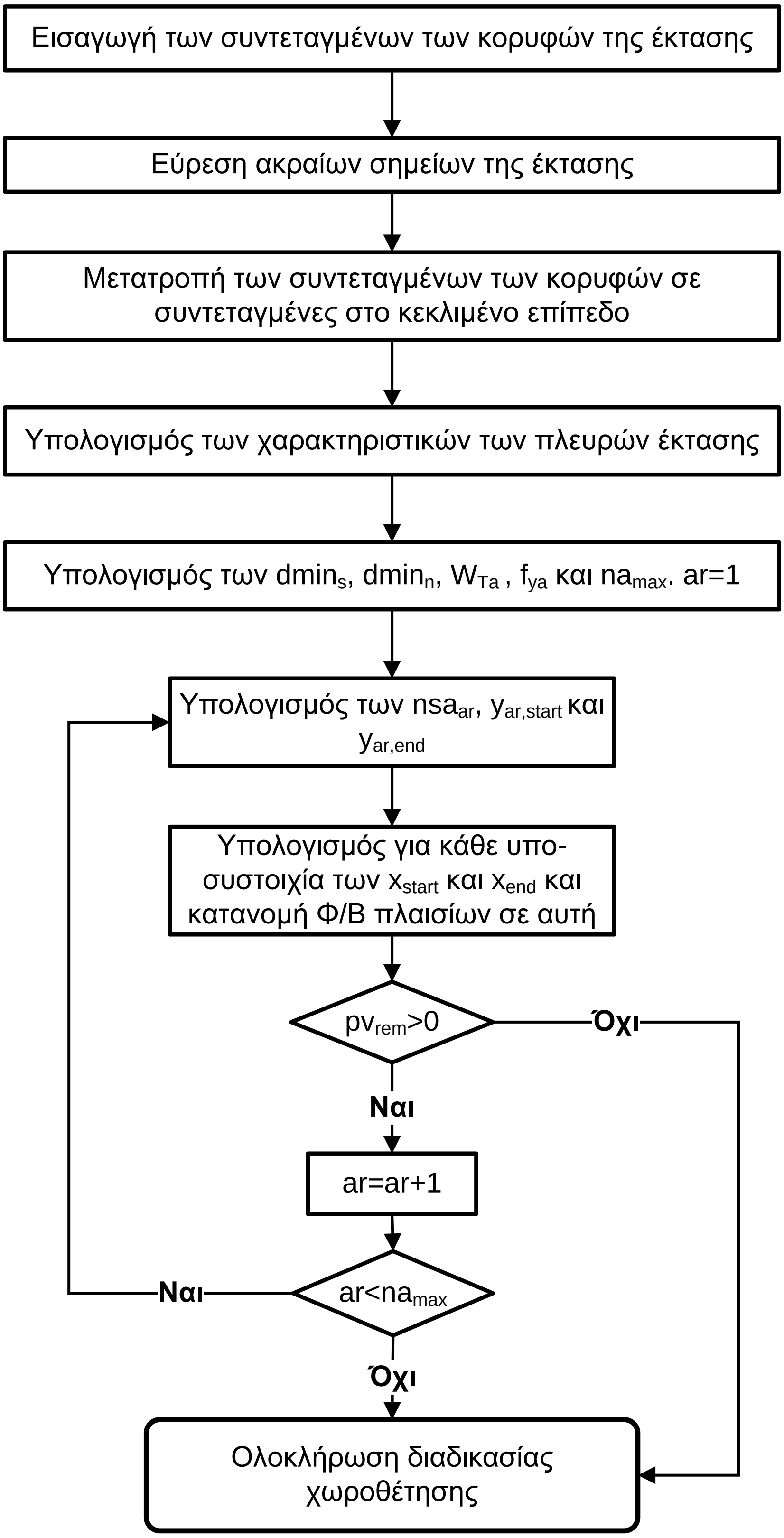
Συνεπώς, το σημείο τερματισμού της υπο-συστοιχίας, στον άξονα x, δίνεται από τη σχέση:

$$x_{end} = n_{pvl} \cdot L_{pv1} + x_{start} \tag{5.30}$$



Σχήμα 5.6: Τα σημεία έναρξης και τερματισμού μιας υπο-συστοιχίας, ως προς τους άξονες x,y.

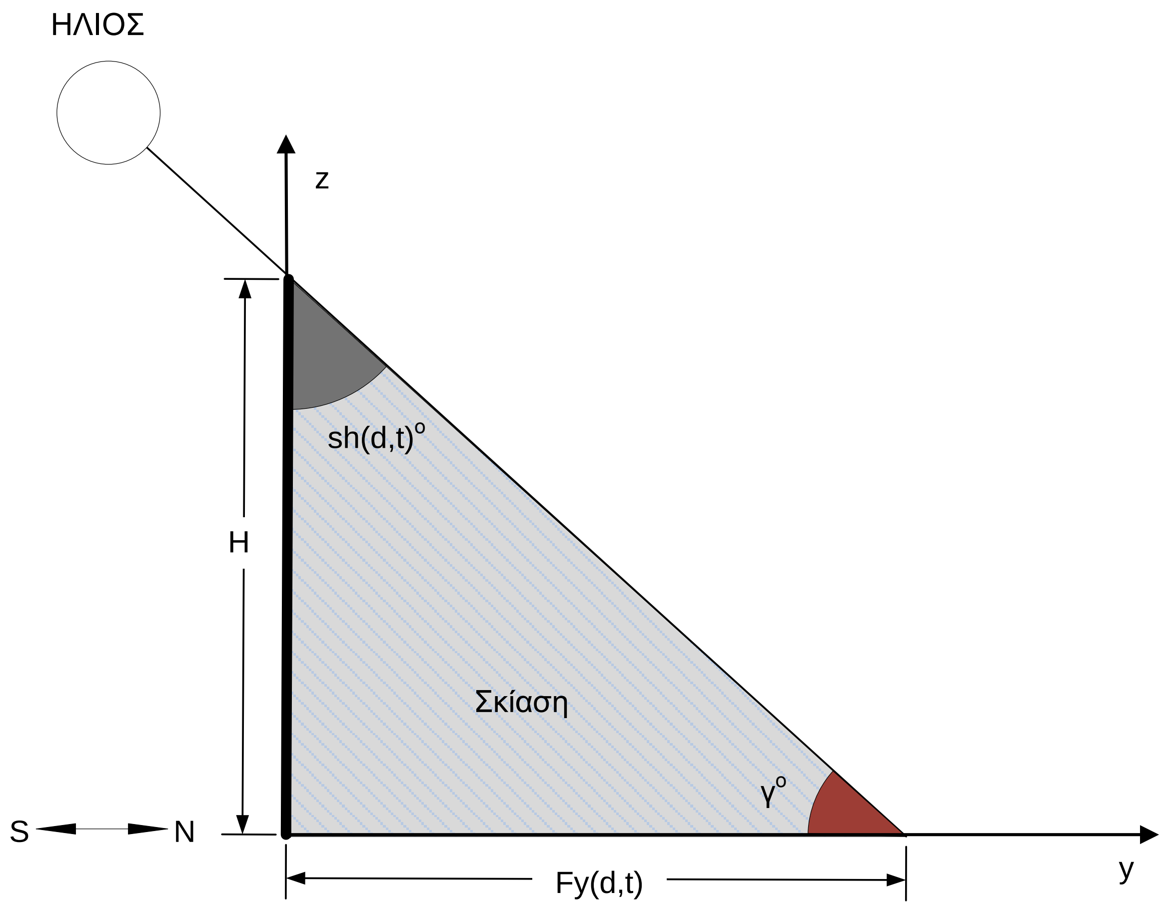
Αρχικά το σύνολο των Φ/Β πλαισίων που πρέπει να χωροθετηθούν, pv_{rem}, ισούται με το σύνολο των πλαισίων προς εγκατάσταση, δηλαδή $pv_{rem} = N_1$. Μετά από κάθε κατανομή Φ/Β πλαισίων σε μια υπο-συστοιχία ή σε μια συστοιχία αφαιρείται το σύνολο των κατανεμηθέντων πλαισίων από το πλήθος pv_{rem}. Η διαδικασία χωροθέτησης ολοκληρώνεται μόνο όταν το ποσό αυτό μηδενιστεί ή όταν ολοκληρωθεί η διαδικασία κατανομής και στην τελευταία δυνατή συστοιχία της εγκατάστασης. Στο Σχήμα 5.7 παρουσιάζεται ένα γενικό διάγραμμα ροής του μοντέλου χωροθέτησης των Φ/Β πλαισίων εντός της διαθέσιμης έκτασης.



Σχήμα 5.7: Γενικό διάγραμμα ροής του μοντέλου χωροθέτησης των Φ/Β πλαισίων εντός της διαθέσιμης έκτασης.

5.4 Το μοντέλο υπολογισμού των απωλειών εξαιτίας της σκίασης των Φ/Β πλαισίων

Η εγκατάσταση μεγάλου αριθμού Φ/Β πλαισίων σε Φ/Β πάρκα δημιουργεί το φαινόμενο της αλληλοσκίασης μεταξύ γειτονικών πλαισίων. Επίσης, συχνά παρατηρούνται φαινόμενα σκίασης εξαιτίας διαφόρων εμποδίων κοντά στην έκταση της εγκατάστασης. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μειωμένη απόδοση των Φ/Β πλαισίων που σκιάζονται. Συνεπώς, ο συγκεκριμένος παράγοντας πρέπει να λαμβάνεται σοβαρά υπόψη όταν σχεδιάζονται και εγκαθίστανται συστήματα παραγωγής ενέργειας από Φ/Β πλαίσια, όπως αυτά που εξετάζονται στην παρούσα εργασία. Για το λόγο αυτό αναπτύχθηκαν κατάλληλα μοντέλα προσομοίωσης της αλληλοσκίασης και της σκίασης λόγω εμποδίων καθώς και εκτίμησης των ενεργειακών απωλειών εξαιτίας των φαινομένων αυτών.



Σχήμα 5.8: Παράμετροι σκίασης εξαιτίας ενός εμποδίου ύψους H.

Στο Σχήμα 5.8 απεικονίζονται διάφορες παράμετροι της σκίασης εξαιτίας ενός εμποδίου με ύψος ίσο με Η. Με γ συμβολίζεται η γωνία ηλιακού ύψους (altitude) για την οποία ισχύει η σχέση [38]:

$$\sin\gamma = \sin\delta \cdot \sin\varphi + \cos\delta \cdot \cos\varphi \cdot \cos\omega \tag{5.31}$$

όπου:

φ το γεωγραφικό πλάτος του τόπου (^{o}),

δ η γωνία ηλιακής απόκλισης (^{o}) η οποία υπολογίζεται από την Εξ. (2.4) και εξαρτάται από την ήμερα, d, και

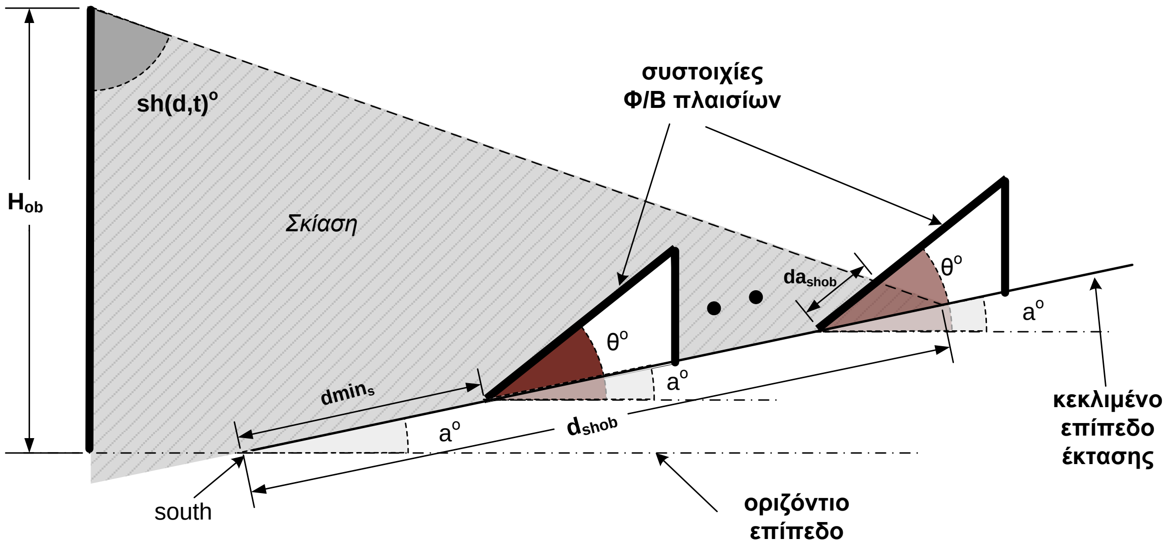
ω η γωνία ηλιακού χρόνου (^{o}) η οποία υπολογίζεται από την Εξ. (2.24) και εξαρτάται από την ώρα, t.

Στο Σχήμα 5.8 με $F_y(d,t)$ είναι σημειωμένο το μήκος της σκίασης στο οριζόντιο επίπεδο κατά μήκος του άξονα y, δηλαδή η απόσταση της σκίασης από το εμπόδιο ύψους Η για μια συγκεκριμένη ώρα και μέρα του έτους. Για το μήκος $F_y(d,t)$ ισχύει η σχέση [38]:

$$F_y(d,t) = H \cdot \frac{\sin\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega - \cos\varphi \cdot \sin\delta}{\sin\varphi \cdot \sin\delta + \cos\varphi \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega} \tag{5.32}$$

Για τη γωνία sh(d,t) θα ισχύει η σχέση:

$$sh(d,t) = 90 - \gamma = \arctan\left(F_y(d,t)/H\right) \tag{5.33}$$



Σχήμα 5.9: Σκίαση συστοιχιών εξαιτίας εμποδίων.

Έστω η ύπαρξη ενός εμποδίου, με διαφορά ύψους H_{ob} από το σημείο south, κοντά στην έκταση της εγκατάστασης. Τότε είναι πιθανόν να προκαλεί τη σκίαση ορισμένων συστοιχιών Φ/Β πλαισίων όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.9. Η απόσταση του ορίου της σκίασης από την κορυφή south της έκτασης, d_{shob}, για την ημέρα d και την ώρα t θα δίνεται από τη σχέση:

$$d_{shob}(d,t) = \frac{\left(H_{ob}\cdot\tan(sh(d,t)) - y(c_{south}) + y_{obst}\right)\cdot\cos a\cdot\cos(90 - sh(d,t))}{\sin a\cdot\left(\cos a + \cos(90 - sh(d,t))\right)} \tag{5.34}$$

όπου:

$y(c_{south})$ η θέση του νοτιότερου άκρου (κορυφή south) σε σχέση με τον άξονα y και

y_{obst} θέση του εμποδίου σε σχέση με τον άξονα y.

Τη συγκεκριμένη ημέρα και ώρα το πλήθος των συστοιχιών που θα σκιάζονται, $nsar_{ob}$, υπολογίζεται ως εξής:

$$nsar_{ob} = \frac{d_{shob}(d,t) - dmin_s}{W_{Ta} + f_{ya}} \tag{5.35}$$

Θεωρείται ότι οι πρώτες $nsar_{ob}$-1 συστοιχίες σκιάζονται πλήρως από το εμπόδιο, ενώ η τελευταία σκιάζεται μερικώς. Συγκεκριμένα, από το πλάτος, L_T, της επιφάνειας της συστοιχίας, σκιάζεται ένα μέρος πλάτους da_{shob} το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$da_{shob}(d,t) = \frac{ff \cdot \cos\theta \cdot \cos(90 - sh(d,t))}{\sin\theta \cdot (\cos\theta + \cos(90 - sh(d,t)))} \tag{5.36}$$

όπου:

$$ff = (d_{shob}(d,t) - y_{nsar_{ob},start}) \cdot (\cos a + \sin a \cdot \tan(sh(d,t))) \tag{5.37}$$

όπου:

$y_{nsar_{ob},start}$ είναι η θέση έναρξης της τελευταίας σκιαζόμενης συστοιχίας από το εμπόδιο ως προς τον άξονα y.

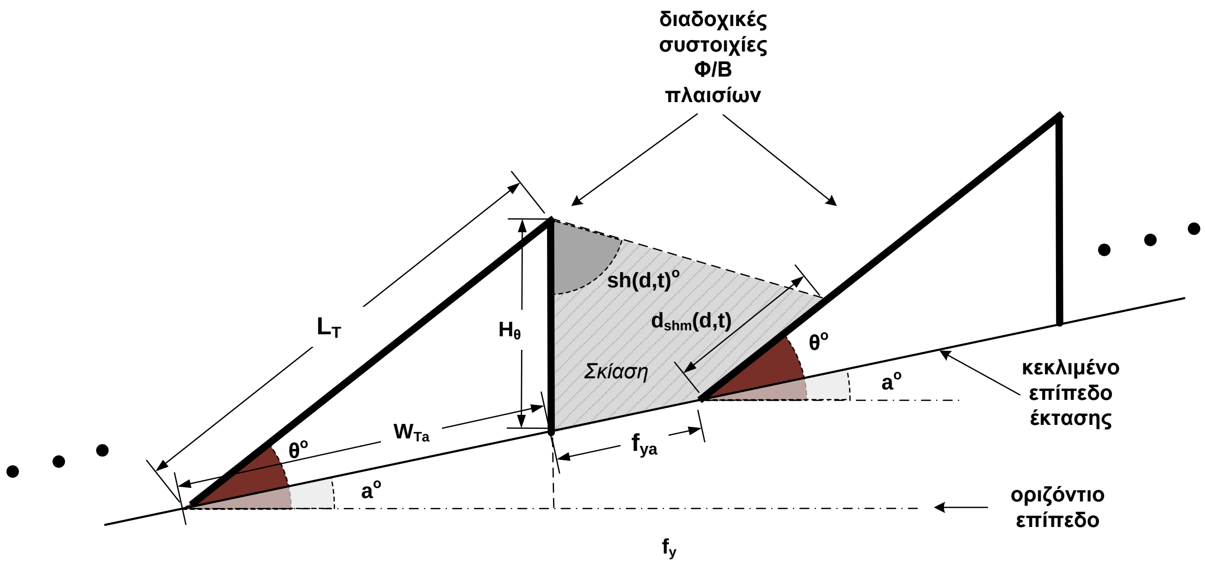
Συνεπώς, ο αριθμός των πλαισίων που σκιάζονται από το εμπόδιο τη συγκεκριμένη ημέρα και ώρα, $nspv_{ob}(d,t)$, ισούται με το παρακάτω άθροισμα:

$$nspv_{ob}(d,t) = \sum_{ar=1}^{nsar_{ob}-1} nopv(ar) + \frac{da_{shob}(d,t)}{L_T} \cdot nopv(nsar_{ob}) \tag{5.38}$$

όπου:

$nopv(ar)$ είναι το πλήθος των Φ/Β πλαισίων που κατανέμεται στη συστοιχία ar.

Αν υπάρχουν περισσότερα του ενός εμπόδια, τότε μετατρέπονται σε ένα κοινό εμπόδιο με θέση ως προς τον άξονα y την κοντινότερη από τις θέσεις τους σε σχέση με το σημείο south και με κοινό ύψος H_{ob} το μέγιστο από τα ύψη τους.



Σχήμα 5.10: Αλληλοσκίαση μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών.

Όπως είναι εμφανές στο Σχήμα 5.10, μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών Φ/Β πλαισίων είναι δυνατόν να εμφανίζονται φαινόμενα αλληλοσκίασης κατά τη διάρκεια της μέρας. Με $d_{shm}(d,t)$ συμβολίζουμε το πλάτος της επιφάνειας μιας συστοιχίας που σκιάζεται από την αμέσως προηγούμενή της την ημέρα d και την ώρα t. Το πλάτος αυτό υπολογίζεται από τη σχέση:

$$d_{shm}(d,t) = \frac{\left[\tan(sh(d,t))\cdot(H_\theta - f_{ya}\cdot\sin a) - f_{ya}\cdot\cos a\right]\cdot\cos\theta\cdot\cos(90 - sh(d,t))}{\sin\theta\cdot\left(\cos\theta + \cos(90 - sh(d,t))\right)} \tag{5.39}$$

Το συνολικό πλήθος των Φ/Β πλαισίων που σκιάζονται, $nspv_m(d,t)$, κατά την ημέρα d και την ώρα t λόγω αλληλοσκίασης υπολογίζεται ως εξής:

$$nspv_m(d,t) = \frac{d_{shm}(d,t)}{L_T}\cdot\sum_{ar=ar_s}^{na} nopv(ar) \tag{5.40}$$

όπου:

na ο συνολικός αριθμός συστοιχιών στην εγκατάσταση και

ar_S ο αριθμός της πρώτης συστοιχίας που σκιάζεται λόγω αλληλοσκίασης και ισούται με 2 αν δεν υπάρχουν καθόλου εμπόδια και επομένως σκίαση εξαιτίας τους ή με $nsar_{ob}$+1 διαφορετικά.

Το συνολικό πλήθος Φ/Β πλαισίων που σκιάζεται σε μία εγκατάσταση, $nspv(d,t)$, σε μια συγκεκριμένη ημέρα και ώρα θα ισούται με το άθροισμα του πλήθους των σκιαζόμενων Φ/Β πλαισίων εξαιτίας φαινομένων αλληλοσκίασης, $nspv_m(d,t)$, και του πλήθους των σκιαζόμενων Φ/Β πλαισίων εξαιτίας της ύπαρξης εμποδίων, $nspv_{ob}(d,t)$:

$$nspv(d,t) = nspv_m(d,t) + nspv_{ob}(d,t) \tag{5.41}$$

Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν εμπόδια κοντά στην έκταση της εγκατάστασης ο παράγοντας $nspv_{ob}(d,t)$ θα μηδενίζεται.

Η σκίαση των Φ/Β πλαισίων και οι απώλειες εξαιτίας της είναι ένα εξαιρετικά σύνθετο φαινόμενο αρκετά δύσκολο να μοντελοποιηθεί πλήρως καθώς εξαρτάται από τις συνδεσμολογίες του συστήματος και επηρεάζει πάρα πολλές παραμέτρους όπως για παράδειγμα η καμπύλη ισχύος του Φ/Β πλαισίου, όπου είναι πιθανόν να μην υπάρχει μόνο ένα μέγιστο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.6, αλλά πολλαπλά μέγιστα ή σαγματικά σημεία με αποτέλεσμα να μη λειτουργούν σωστά οι μέθοδοι MPPT των μετατροπέων ισχύος DC/AC και να προκύπτουν ενεργειακές απώλειες. Όπως έχει περιγραφεί στο 2^{o} Κεφάλαιο, η ακτινοβολία που δέχεται ένα Φ/Β πλαίσιο αναλύεται σε τρεις επιμέρους συνιστώσες, τη συνολική ημερήσια απευθείας ακτινοβολία, $B_d(\beta)$, τη συνολική ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία, $D_d(\beta)$, καθώς και τη συνολική ημερήσια albedo ακτινοβολία, $R_d(\beta)$, η οποία δημιουργείται λόγω ανακλάσεων στο έδαφος. Σύμφωνα με τα άρθρα [39-40] μπορεί να θεωρηθεί ότι ένα πλαίσιο που σκιάζεται απορροφά μόνο τις δύο τελευταίες συνιστώσες της ακτινοβολίας $D_{d,t}(\theta)$, $R_{d,t}(\theta)$ και όχι την $B_{d,t}(\theta)$. Αν τώρα ένα πλαίσιο σκιάζεται μερικώς κατά ένα ποσοστό f, τότε μπορεί να θεωρηθεί ότι κατά ένα ποσοστό 1 - f απορροφά πλήρως τις τρεις συνιστώσες ακτινοβολίας, ενώ κατά ένα ποσοστό f απορροφά μόνο τις δύο τελευταίες. Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση, λοιπόν, είναι δυνατόν να υπολογίσουμε τις ενεργειακές απώλειες ενός Φ/Β πλαισίου που σκιάζεται σε όλη τη διάρκεια του έτους.

Έτσι, η μέση ωριαία ισχύ (ή η συνολική ωριαία ενέργεια), $Gs_{d,t}(\theta)$ (W/m^2), ενός σκιαζόμενου πλαισίου κατά ποσοστό f με βάση την Εξ (2.21) θα διαμορφώνεται ως εξής:

$$Gs_{d,t}(\theta) = (1-f)\cdot G_t + f\cdot G_s \tag{5.42}$$

όπου:

G_t η μέση ωριαία ισχύς ενός πλαισίου που δε σκιάζεται και δίνεται από την Εξ. (2.21) και

G_s η μέση ωριαία ισχύς ενός πλαισίου που σκιάζεται πλήρως και είναι το άθροισμα των $D_{d,t}(\theta)$, $R_{d,t}(\theta)$, δηλαδή $G_s = R_{d,t}(\theta) + D_{d,t}(\theta)$.

Έτσι, με εφαρμογή των μοντέλων που περιγράφονται από τις Εξ. (2.33) – (2.50) και με χρήση της $Gs_{d,t}(\theta)$ προκύπτει η μέση ωριαία απώλεια ισχύος, $P^s_{d,t}(\theta)$(W), για δεδομένη κλίση πλαισίων θ ^{o}, κατά την ημέρα d και την ώρα t. Η συνολική ενεργειακή απώλεια, $E_{loss}(\theta)$ (Wh), ενός συστήματος Φ/Β πλαισίων υπό κλίση θ ^{o} κατά τη διάρκεια ενός έτους ισούται με:

$$E_{loss}(\theta) = \sum_{d=1}^{365}\sum_{t=tr}^{ts} P^s_{d,t}(\theta)\cdot nspv(d,t) \tag{5.43}$$

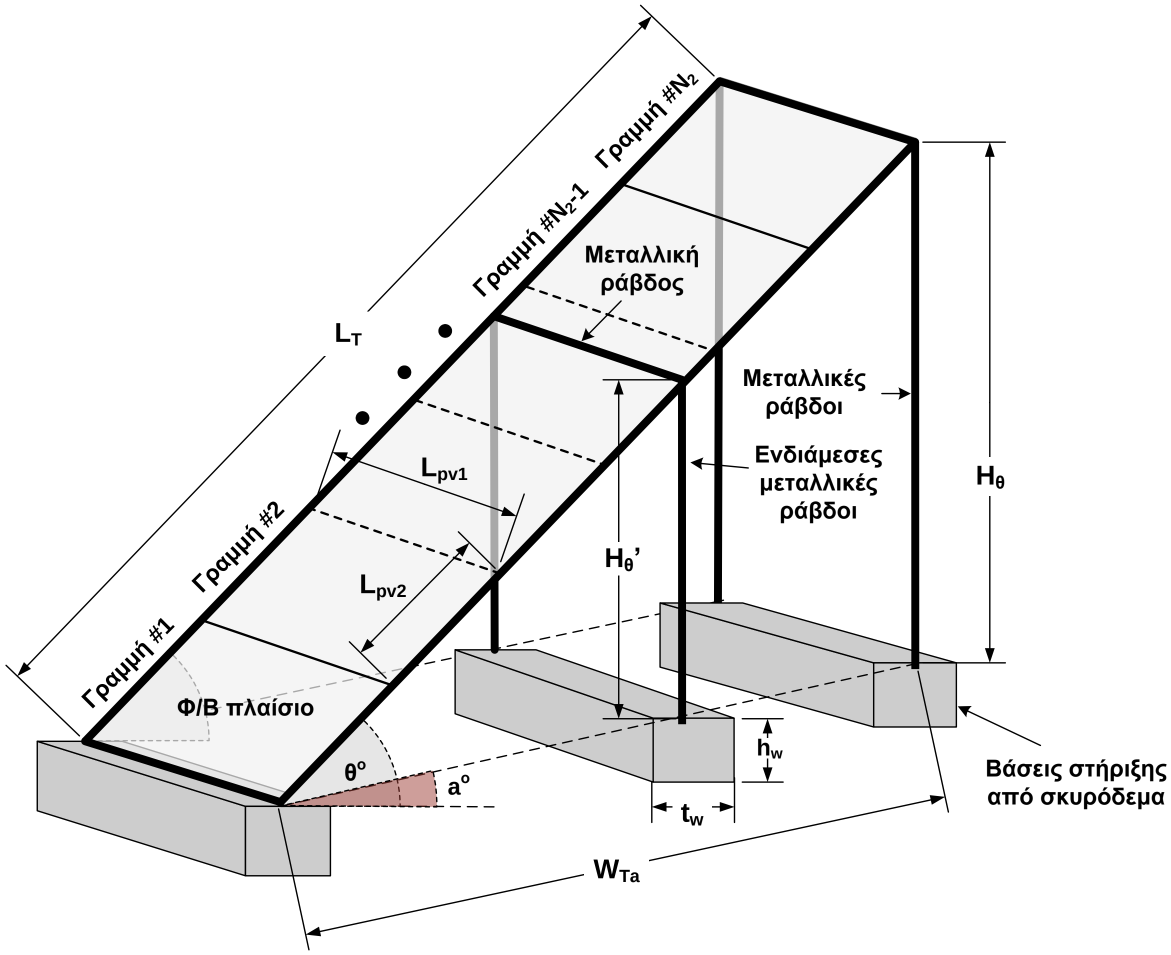
όπου:

tr η ώρα ανατολής κατά την ημέρα d και

ts η ώρα δύσης κατά την ημέρα d και υπολογίζονται μέσω των Εξ. (2.23) – (2.24).

5.5 Το μοντέλο των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων

Για τη στήριξη των Φ/Β πλαισίων χρησιμοποιούνται δομές στήριξης κατασκευασμένες από μεταλλικές ράβδους (συνήθως από αλουμίνιο ή γαλβανισμένο σίδηρο) καθώς και βάσεις από σκυρόδεμα. Η μοντελοποίησή τους είναι μια σημαντική διαδικασία στην παρούσα εργασία καθώς οδηγεί στον υπολογισμό της απαιτούμενης πρώτης ύλης για την κατασκευή τους και συνεπώς στην εκτίμηση του κόστους το οποίο αποτελεί μια σημαντική παράμετρο του αρχικού κόστους εγκατάστασης (Kornelakis and Koutroulis). Η μοντελοποίηση που παρουσιάζεται εδώ βασίζεται στον υπολογισμό του συνολικού μήκους των ράβδων που απαιτούνται για τη στήριξη των Φ/Β πλαισίων της διάταξης στην έκταση της εγκατάστασης όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 5.3 καθώς και του συνολικού όγκου των βάσεων από σκυρόδεμα. Αυτές οι ποσότητες πρώτης ύλης πολλαπλασιάζονται στη συνέχεια με τα αντίστοιχα κόστη ώστε να υπολογιστεί το ζητούμενο συνολικό κόστος των βάσεων στήριξης. Στο Σχήμα 5.11 απεικονίζεται το γενικό διάγραμμα των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων και στη συνέχεια αναλύεται το μοντέλο που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία.



Σχήμα 5.11 Γενικό διάγραμμα των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων.

Στο Σχήμα 5.11 παρουσιάζονται με έντονες γραμμές οι μεταλλικές ράβδοι που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή των βάσεων στήριξης σε μια στήλη Φ/Β πλαισίων εντός μιας συστοιχίας. Αρχικά, υπολογίζεται το μήκος των ράβδων για μία στήλη και στη συνέχεια το συνολικό μήκος για n_b στήλες, όπου:

$$n_b = \text{round\_up}(N_1 / N_2) \tag{5.44}$$

Η στρογγυλοποίηση στην Εξ. (5.44) γίνεται ώστε να προκύψει ακέραιος αριθμός. Οι ενδιάμεσες μεταλλικές ράβδοι στο Σχήμα 5.11 απεικονίζουν ενδιάμεσα υποστυλώματα που απαιτούνται για τη στήριξη μιας στήλης. Θεωρούμε ότι απαιτούνται τέτοιοι ενδιάμεσοι στύλοι για κάθε 2 μέτρα αυξανόμενου συνολικού ύψους H_θ της συστοιχίας αν $H_\theta > W_{Ta}$, αλλιώς για κάθε 2 μέτρα αυξανόμενου πλάτους W_{Ta}. και συνεπώς μόνο για $H_\theta > 2$ ή $W_{Ta} > 2$, αντίστοιχα. Ο αριθμός τέτοιων υποστυλωμάτων για κάθε πλευρά της κάθετης γραμμής συμβολίζεται με B_2 και θα είναι ίσος με:

$$B_2 = \begin{cases} \text{round\_down}(H_T / 2)\ \textit{αν}\ H_\theta > W_{Ta} \\ \text{round\_down}(W_{Ta} / 2)\ \textit{αλλιώς} \end{cases} \tag{5.45}$$

Η στρογγυλοποίηση στην Εξ. (5.45) γίνεται ώστε να προκύψει ακέραιος αριθμός. Το συνολικό μήκος B_{tot} των υποστυλωμάτων αυτών για κάθε πλευρά της στήλης υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B_{tot} = \begin{cases} \sum_{i=1}^{B_2} 2 \cdot i\ \textit{αν}\ H_\theta > W_{Ta} \\ \sum_{i=1}^{B_2} H'_\theta \cdot i\ \ \textit{αλλιώς} \end{cases} \tag{5.46}$$

όπου:

$$H'_\theta = 2 \cdot \cos a \cdot \tan\theta - 2 \cdot \sin a \tag{5.47}$$

Το μήκος των ράβδων για κάθε στήλη θα ισούται με το άθροισμα των κάθετων υποστυλωμάτων, $2 \cdot H_\theta + B_{tot}$, επιπλέον του μήκους των δύο πλευρών μήκους L_T και των μεταξύ τους ενώσεων μήκους L_{pv1} η κάθε μια. Το πλήθος αυτών των ενώσεων θα ισούται με το άθροισμα του πλήθους των ενδιάμεσων υποστυλωμάτων και των δύο ενώσεων που υπάρχουν στα δύο άκρα της κάθε στήλης, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 5.11, δηλαδή θα ισούται με B_2+2.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι οι ράβδοι που χρησιμοποιούνται υπάρχουν ως πρώτη ύλη σε συγκεκριμένες διαστάσεις μήκους. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι για να γίνουν οι βάσεις στήριξης σύμφωνα με τις προδιαγραφές του μοντέλου που έχει περιγραφεί παραπάνω θα υπάρχει πάντα ένα ποσό υλικού που περισσεύει αλλά επιβαρύνει το συνολικό κόστος, οπότε πρέπει να ληφθεί υπόψη. Συνήθως αυτό το επιπλέον ποσό είναι γύρω στο 10 % επί του απαιτούμενου μήκους του υλικού επιπλέον, οπότε αυτή η τιμή επιλέγεται και στην παρούσα εργασία. Άρα, το μήκος B_1 των ράβδων που απαιτείται σε μια στήλη συμπεριλαμβανομένου του παραπάνω ποσοστού περίσσειας πρώτης ύλης δίνεται από τη σχέση:

$$B_1 = (2 \cdot (B_{tot} + H_\theta + L_T) + (B_2 + 2) \cdot L_{pv2}) \cdot 110\% \tag{5.48}$$

Έτσι, το συνολικό μήκος των ράβδων, B, για ολόκληρη την εγκατάσταση υπολογίζεται από τη σχέση:

$$B = B_1 \cdot n_b \tag{5.49}$$

Πρέπει να σημειωθεί ότι το είδος των ράβδων που θα χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των βάσεων στήριξης θα πρέπει να είναι τέτοιο ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν το βάρος των Φ/Β πλαισίων. Έτσι, ο σχεδιαστής θα πρέπει να εκτιμήσει την αντοχή των ράβδων στο βάρος των χρησιμοποιούμενων Φ/Β πλαισίων και να επιλέξει τέτοιες διαστάσεις και πάχος ράβδων ώστε να εξασφαλίζεται σε κάθε περίπτωση η καταλληλότητα των βάσεων στήριξης. Στη συνέχεια, θα πρέπει να εκτιμηθεί το εγκατεστημένο κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων ανά μέτρο μήκους, για τον επιλεγμένο τύπο ράβδων, ώστε να υπολογιστεί το συνολικό κόστος κατασκευής των βάσεων όπως θα περιγραφεί στο 6^o κεφάλαιο.

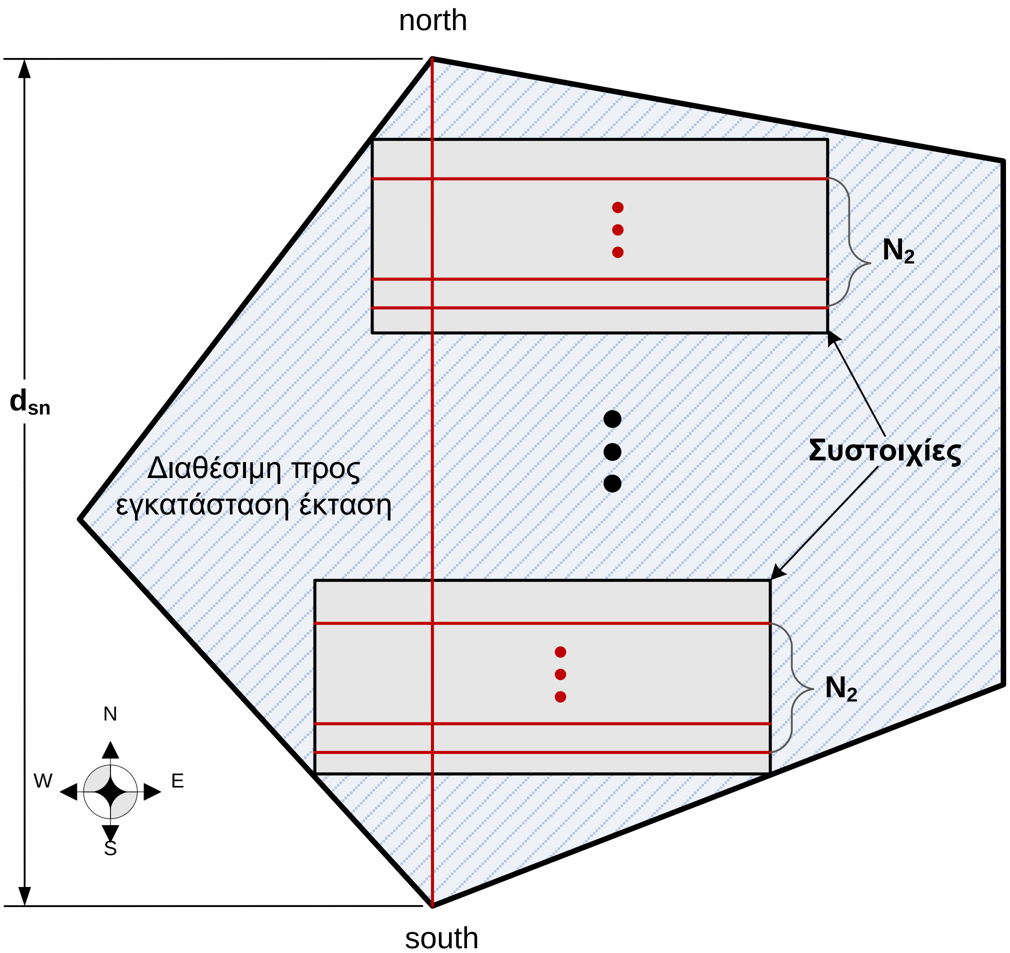
Τα υποστυλώματα της κάθε στήλης, όπως προαναφέρθηκε, θεωρούμε ότι τοποθετούνται πάνω σε βάσεις στήριξης στο έδαφος κατασκευασμένες από σκυρόδεμα ύψους h_w = 0.25 m, πλάτους t_w = 0.3 m και μήκους όσο και το μήκος L_{pv1} του κάθε Φ/Β πλαισίου. Το κόστος κατασκευής των τοιχίων αυτών συμπεριλαμβάνεται στο κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης και ο υπολογισμός του κόστους τέτοιου είδους κατασκευών γίνεται βάσει του όγκου τους. Έτσι, για να υπολογιστεί το κόστος αυτών πρέπει να υπολογιστεί ο συνολικός όγκος τους, B_B, που ισούται με τον όγκο σκυροδέματος που απαιτείται για κάθε τέτοια στήλη επί τον αριθμό αυτών των στηλών (n_b) και δίνεται από τη σχέση:

$$B_B = (2 + B_2) \cdot h_w \cdot t_w \cdot L_{pv1} \cdot n_b \tag{5.50}$$

Το τελικό κόστος κατασκευής των βάσεων υπολογίζεται από το άθροισμα του κόστους των μεταλλικών βάσεων και του κόστους των στηριγμάτων από σκυρόδεμα.

5.6 Το μοντέλο της καλωδίωσης

Το κόστος των καλωδιώσεων του συστήματος είναι μία ακόμα παράμετρος που μπορεί να επηρεάσει το αρχικό κόστος εγκατάστασης και λαμβάνεται υπόψη από τη μοντελοποίηση της παρούσας εργασίας. Για την εκτίμηση αυτής της παραμέτρου κόστους αναπτύχθηκε κατάλληλο μοντέλο το οποίο βασίζεται στην εκτίμηση του μήκους καλωδίων που απαιτείται συνολικά για την εγκατάσταση του συστήματος.



Σχήμα 5.12: Το γενικό διάγραμμα καλωδίωσης μιας εγκατάστασης.

Στο Σχήμα 5.12 παρουσιάζεται ένα γενικό διάγραμμα περιγραφής της μοντελοποίησης της καλωδίωσης όπου με κόκκινες γραμμές είναι σημειωμένες οι καλωδιώσεις που απαιτούνται. Θεωρείται ότι για κάθε συστοιχία απαιτούνται N_2 καλωδιώσεις, δηλαδή όσες και οι γραμμές Φ/Β πλαισίων εντός της κάθε συστοιχίας, με μήκος κάθε μιας από αυτές τις καλωδιώσεις ίσο με το μήκος της συστοιχίας, δηλαδή ίσο με το πλήθος των Φ/Β πλαισίων σε κάθε γραμμή επί το μήκος τους, L_{pv1}. Συνεπώς, το συνολικό μήκος των καλωδιώσεων αυτών για όλες της συστοιχίες του συστήματος ισούται με το συνολικό πλήθος των Φ/Β πλαισίων, N_1, επί το μήκος τους, L_{pv1}. Επίσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.12 θεωρείται ότι εκτός αυτών των καλωδιώσεων υπάρχει ένας κοινός δίαυλος, με πλήθος καλωδίων όσοι και οι μετατροπείς ισχύος DC/AC, N_{dc}, και μήκος d_{sn} που ενώνει τα Φ/Β πλαίσια με τους μετατροπείς. Άρα το συνολικό μήκος καλωδίων που απαιτείται για την εγκατάσταση ενός συστήματος, L_{cb}, μπορεί να υπολογιστεί από τη σχέση:

$$L_{cb} = N_1 \cdot L_{pv1} + d_{sn} \cdot N_{dc} \tag{5.51}$$

όπου d_{sn} είναι η συνιστώσα στον άξονα y της απόστασης της βορειότερης κορυφής της διαθέσιμης έκτασης (north) από τη νοτιότερη (south) και δίνεται από τη σχέση:

$$d_{sn} = y_a(c_{north}) - y_a(c_{south}) \tag{5.52}$$

6. Η ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

6.1 Εισαγωγή

Το πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι η βέλτιστη διαστασιολόγηση, χωροθέτηση και σχεδιασμός ενός συστήματος Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένου με το ηλεκτρικό δίκτυο με σκοπό την πώληση της παραγόμενης ενέργειας. Στόχος της βελτιστοποίησης είναι η μεγιστοποίηση του καθαρού οικονομικού οφέλους της επένδυσης στο σύστημα και αντιστοιχεί στη μεγιστοποίηση της Καθαρής Παρούσας Αξίας της. Το πρόβλημα της παρούσας εργασίας πρέπει να επιλυθεί εντός ενός συνόλου περιορισμών οι οποίοι αφορούν στην εφικτότητα των λύσεων σχετικά με την ορθή διασύνδεση των Φ/Β πλαισίων με τους μετατροπείς ισχύος DC/AC και την ορθή χωροθέτησή τους στη διαθέσιμη προς εγκατάσταση έκταση, όπως έχουν μοντελοποιηθεί και περιγραφεί στις παραγράφους 5.2 και 5.3.

Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφονται αναλυτικά η μοντελοποίηση των λύσεων του προβλήματος, η αντικειμενική συνάρτηση που βελτιστοποιείται καθώς και η μέθοδος που επιλέχθηκε για την διαχείριση των διαφόρων περιορισμών που υπάρχουν.

6.2 Η μεταβλητές απόφασης του προβλήματος

Μια οποιαδήποτε λύση του προβλήματος μπορεί να περιγραφεί χρησιμοποιώντας τέσσερις παραμέτρους, το συνολικό αριθμό των Φ/Β πλαισίων, των γραμμών σε κάθε συστοιχία Φ/Β πλαισίων, της κλίσης των Φ/Β πλαισίων και της απόστασης μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών. Έτσι, μια πιθανή λύση ενός συστήματος μπορεί να μοντελοποιηθεί χρησιμοποιώντας το διάνυσμα $c_1 = [N_1|N_2|\theta|s]$, όπου N_1 είναι ο συνολικός αριθμός των Φ/Β πλαισίων, N_2 ο αριθμός των γραμμών ανά συστοιχία διάταξης (array), θ η κλίση των πλαισίων και s η γωνία απόστασης βάσει της οποίας προκύπτει η απόσταση μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών, f_{ya}, σύμφωνα με την Εξ. (5.19). Το διάνυσμα αυτό αποτελεί το διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης του προβλήματος βελτιστοποίησης της παρούσας εργασίας. Η εισαγωγή της γωνίας s και όχι άμεσα της απόστασης f_{ya} στο διάνυσμα των μεταβλητών απόφασης του προβλήματος γίνεται για την επιτάχυνση εντοπισμού της λύσης καθώς η γωνία s μπορεί να πάρει μόλις 91 διαφορετικές τιμές αφού ορίζεται ως ακέραιος αριθμός στο διάστημα [0,90] σε αντίθεση με την απόσταση f_{ya} που μπορεί να έχει οποιαδήποτε τιμή θετικού πραγματικού αριθμού και, συνεπώς, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές χρονικές απαιτήσεις της διαδικασίας βελτιστοποίησης, ειδικά για συστήματα μεγάλης κλίμακας.

6.3 Η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος της παρούσας εργασίας

Η αντικειμενική συνάρτηση για τη διαστασιολόγηση του συστήματος είναι της μορφής:

$$g(N_1,N_2,\theta,s) = \frac{R_n - IC_n + FC_n}{(1+i)^n} \tag{6.1}$$

όπου:

i είναι το ετήσιο προεξοφλητικό επιτόκιο,

n ο χρονικός ορίζοντας λειτουργίας του συστήματος σε έτη,

R_n είναι τα συνολικά έσοδα (€) της επένδυσης από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας κατά τη διάρκεια του συνολικού χρόνου λειτουργίας του συστήματος, ανηγμένα στο n-οστό έτος

IC_n είναι το αρχικά επενδυμένο κεφάλαιο (€) ανηγμένο στο n-οστό έτος και

FC_n είναι οι συνολικές δαπάνες συντήρησης (€) ανηγμένες στο n-οστό έτος.

Στη συνέχεια περιγράφονται οι επιμέρους παράγοντες της αντικειμενικής συνάρτησης. Το συνολικό κόστος εγκατάστασης ανηγμένο στο n-οστό έτος είναι:

$$IC_n = IC_0 \cdot (1+i)^n \tag{6.2}$$

όπου:

IC_0 είναι το αρχικά επενδυμένο κεφάλαιο (€),

Το IC_0 δίνεται από τη σχέση:

$$IC_0 = 1-\gamma \cdot N_1 \cdot C_1 + N_{dc} \cdot C_2 + C_L + C_B + C_{cb} + C_{init} \tag{6.3}$$

όπου:

γ είναι το ύψος της επιδότησης,

N_1 είναι ο συνολικός αριθμός των εγκατεστημένων Φ/Β πλαισίων,

C_1 το κόστος αγοράς και εγκατάστασης κάθε Φ/Β πλαισίου (€),

N_{dc} είναι ο αριθμός των εγκατεστημένων μετατροπέων DC/AC,

C_2 είναι το κόστος αγοράς και εγκατάστασης του μετατροπέα (€),

C_L είναι το κόστος της έκτασης (€),

C_B το κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων (€),

C_{cb} είναι το κόστος καλωδίωσης της εγκατάστασης (€) και

C_{init} μια παράμετρος κόστους (€) στην οποία ο σχεδιαστής μπορεί να ενσωματώσει διάφορα άλλα κόστη που δε μπορούν να μοντελοποιηθούν γενικά για την πλειοψηφία των συστημάτων, όπως είναι κόστη μελέτης, δαπάνες διαμόρφωσης της έκτασης κ.λπ.

Για το κόστος αγοράς της έκτασης ισχύει η σχέση:

$$C_L = area \cdot C_3 \tag{6.4}$$

όπου:

area είναι το συνολικό εμβαδόν της διαθέσιμης προς εγκατάσταση έκτασης (m^2) και

C_3 είναι το κόστος αγοράς της έκτασης ανά m^2 (€).

Για τον υπολογισμό του εμβαδού μιας έκτασης ενός οποιοδήποτε πολυγώνου χρησιμοποιείται το παρακάτω μοντέλο υπολογισμού εμβαδού ακανόνιστων πολυγώνων [41]:

$$\text{area} = \left| \left(\sum_{j=1}^{nacme} \frac{1}{2} \cdot \; x_a(c_j) \cdot y_a(c_{j+1}) - x_a(c_{j+1}) \cdot y_a(c_j) \right) \right| \tag{6.5}$$

όπου:

nacme είναι το συνολικό πλήθος των κορυφών της έκτασης,

j είναι ο αριθμός της κάθε κορυφής,

$x_a(c_j)$ είναι η συντεταγμένη μιας κορυφής c_j ως προς τον άξονα x και δίνεται από την Εξ. (5.20) και

$y_a(c_j)$ είναι η συντεταγμένη μιας κορυφής c_j ως προς τον άξονα y και δίνεται από την Εξ. (5.21).

Για το κόστος κατασκευής των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων ισχύει η σχέση:

$$C_B = B \cdot C_4 + B_B \cdot C_5 \tag{6.6}$$

όπου:

B είναι το συνολικό μήκος (m) των ράβδων που απαιτούνται για την κατασκευή των βάσεων και δίνεται από την Εξ. (5.49),

C_4 είναι το εγκατεστημένο κόστος (€) των παραπάνω ράβδων ανά μέτρο,

B_B είναι ο συνολικός όγκος του σκυροδέματος που απαιτείται για την κατασκευή των βάσεων σε m^3 και υπολογίζεται από την Εξ. (5. 50) και

C_5 είναι το εγκατεστημένο κόστος (€) του σκυροδέματος ανά m^3.

Για το κόστος των καλωδιώσεων του συστήματος, C_{cb}, ισχύει η σχέση:

$$C_{cb} = L_{cb} \cdot C_{cbm} \tag{6.7}$$

όπου:

L_{cb} είναι το συνολικό μήκος (m) των καλωδιώσεων που απαιτούνται και δίνεται από την Εξ. (5.51) και

C_{cbm} είναι το εγκατεστημένο κόστος των καλωδιώσεων ανά μέτρο (€/m).

Το κόστος συντήρησης της εγκατάστασης για τα n χρόνια μελέτης υπολογίζεται για το n-οστό έτος από την παρακάτω εξίσωση:

$$FC_n = (N_1 \cdot C_{m1} + N_{dc} \cdot C_{m2} + C_{annual}) \cdot (1+g) \cdot (1+i)^n \cdot \left[\frac{1-\left(\frac{1+g}{1+i}\right)^n}{i\text{-}g} \right] + IN_C \tag{6.8}$$

όπου:

C_{m1} είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης των Φ/Β πλαισίων (€/Φ/Β πλαίσιο),

C_{m2} είναι το ετήσιο κόστος συντήρησης των μετατροπέων (€/μετατροπέα),

C_{annual} είναι μια ετήσια δαπάνη (€) στην οποία ο σχεδιαστής μπορεί να ενσωματώσει διάφορες δαπάνες μη προβλέψιμες για την πλειοψηφία των συστημάτων (π.χ. μισθοί προσωπικού κ.λπ.),

g είναι ο ετήσιος πληθωρισμός και

IN_C είναι το κόστος επισκευής (€) των μετατροπέων DC/AC.

Η παραπάνω σχέση προκύπτει χρησιμοποιώντας τις Εξ. (4.3) και Εξ. (4.4) για τον υπολογισμό του συνολικού κόστους των ετήσιων δαπανών που επηρεάζονται από τον ετήσιο πληθωρισμό.

Το IN_C δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$IN_C = N_{dc} \cdot R_{cost} \cdot \left[\sum_{j=k^*} \frac{1+g^{\,j}}{1+i^{\,j}} \right] \cdot (1+i)^n \tag{6.9}$$

όπου:

R_{cost} είναι το κόστος επισκευής των μετατροπέων (€/επισκευή μετατροπέα) και

k^* είναι οι χρονιές που απαιτείται επισκευή.

Για τον υπολογισμό του IN_C χρειάζεται να υπολογιστεί το άθροισμα των επισκευών μόνο για εκείνες τις χρονιές που χρειάζεται να γίνει επισκευή. Έτσι αν για παράδειγμα ο χρόνος MTBF είναι 4 έτη και η μελέτη γίνεται για 15 χρόνια τότε το k* θα είναι 4, 8 και 12. Το k* υπολογίζεται βάσει του χρόνου MTBF που δίνει ο κατασκευαστής του επιλεγμένου μετατροπέα.

Για τον υπολογισμό των εντόκων κερδών από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στο n-οστό έτος χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$R_n = 1 - tax \cdot C_0 \cdot N_1 \cdot \left(E_{tot} - \frac{E_{loss}}{1000 \frac{W}{kW}} \right) \cdot (1+e) \cdot (1+i)^n \cdot \left[\frac{1 - \left(\frac{1+e}{1+i} \right)^n}{i-e} \right] \tag{6.10}$$

όπου:

e είναι το ετήσιο ποσοστό ανατίμησης της ενέργειας,

tax είναι η ετήσιο ποσοστό φορολογίας επί των ακαθάριστων κερδών,

C_0 είναι τιμή πώλησης της ενέργειας (€) ανά kWh,

E_{tot} είναι η συνολική ενέργεια (kWh) που παράγει ένα Φ/Β πλαίσιο σε ένα χρόνο και

E_{loss} είναι οι συνολικές ενεργειακές απώλειες (Wh) λόγω σκίασης, όπως υπολογίζονται από την Εξ (5.43).

Η παραπάνω σχέση προκύπτει από τις Εξ. (4.3) και Εξ. (4.4) κατ' αντιστοιχία με τη σχέση για τον υπολογισμό του κόστους συντήρησης της εγκατάστασης με τη διαφορά ότι η ετήσια ανατίμηση της ενέργειας αντιστοιχεί στον πληθωρισμό της Εξ. (6.8). Σύμφωνα με το νομοθετικό πλαίσιο διαφόρων χωρών, μεταξύ των οποίων και η Ελλάδα κατά την εκπόνηση της παρούσας εργασίας, σχετικά με τη λειτουργία συστημάτων εκμετάλλευσης της ενέργειας από Φ/Β πλαίσια, η τιμή πώλησης της ενέργειας είναι σταθερή για όλα τα χρόνια της μελέτης. Σε τέτοιες περιπτώσεις η παράμετρος e θα τίθεται ίση με το μηδέν. Επίσης, σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία στην Ελλάδα η τιμή πώλησης C_0 της παραγόμενης ενέργειας από Φ/Β στοιχεία ορίζεται στα 0,45 €/kWh (η 0,50 €/kWh για μη-διασυνδεδεμένα νησιά) για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ έως 100 kW_p και στα 0,40 €/kWh (η 0,45 €/kWh για μη-διασυνδεδεμένα νησιά) για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ μεγαλύτερη από 100 kW_p. Για το λόγο αυτό πρέπει να δίνεται η δυνατότητα στο σχεδιαστή να εισάγει κυλιόμενη τιμή πώλησης της ενέργειας καθώς και αντίστοιχο κατώφλι αλλαγής της τιμής C_0. Η εγκατεστημένη ισχύς υπολογίζεται ως το γινόμενο του πλήθους των εγκατεστημένων πλαισίων N_1 επί τη μέγιστη ισχύ του κάθε πλαισίου.

Η παραγόμενη ενέργεια E_{tot} του Φ/Β πλαισίου σε kWh προκύπτει από την παρακάτω σχέση:

$$E_{tot} = n_{INV} \cdot n_{MPPT} \cdot \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} \frac{P\ d,t}{1000 \frac{W}{kW}} \cdot \Delta t \qquad (6.11)$$

όπου:

n_{INV} είναι ο βαθμός απόδοσης του μετατροπέα DC/AC,

n_{MPPT} είναι η ο βαθμός ακρίβειας της λειτουργίας MPPT του μετατροπέα,

$P\ d,t$ η μέγιστη ισχύς ενός Φ/Β πλαισίου κατά την ημέρα d και την ώρα t (ο τρόπος υπολογισμού της περιγράφεται στο 2^{o} κεφάλαιο) για δεδομένη κλίση του και δίνεται σε Wh και

Δt το βήμα προσομοίωσης το οποίο ορίζεται ίσο με $\Delta t = 1$ ώρα.

Η διαίρεση με 1000 γίνεται για την αναγωγή της ενέργειας σε kWh.

6.4 Ο αλγόριθμος διόρθωσης των εσφαλμένων λύσεων

Οι περιορισμοί του προβλήματος συνοψίζονται στις παρακάτω σχέσεις:

$$0 \le N_1 \le BND_1 \tag{6.12}$$

$$0 \le N_2 \le BND_2 \tag{6.13}$$

$$0 \le \theta \le 90 \tag{6.14}$$

$$0 \le s \le 90 \tag{6.15}$$

και

$$\text{Προσομοίωση } (N_1, N_2, \theta, s) = \text{επιτυχής} \tag{6.16}$$

Η διαδικασία προσομοίωσης λαμβάνει ως εισόδους τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος και ελέγχει για το κατά πόσο περιγράφουν ένα εφικτό σύστημα βάσει των περιορισμών που τίθενται από το μοντέλο διασύνδεσης των Φ/Β πλαισίων με τους μετατροπείς ισχύος DC/AC και από το μοντέλο χωροθέτησης των Φ/Β πλαισίων στη διαθέσιμη έκταση, τα οποία περιγράφηκαν στις παραγράφους 5.2 και 5.3, αντίστοιχα. Τα BND_1 & BND_2 είναι τα άνω όρια των μεταβλητών N_1 και N_2, αντίστοιχα, και οι τιμές τους ορίζονται από τις απαιτήσεις του εκάστοτε προβλήματος.

Ο σχεδιασμός ενός αλγορίθμου διόρθωσης εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα και απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή καθώς επηρεάζει άμεσα τη σύγκλιση του αλγορίθμου στη βέλτιστη τιμή. Σε περίπτωση παραβίασης των περιορισμών που περιγράφονται από τις Εξ (6.12) – (6.15) ο αλγόριθμος που υλοποιήθηκε στην παρούσα εργασία διορθώνει την τιμή της αντίστοιχης μεταβλητής κάνοντας την ίση με το αντίστοιχο όριο το οποίο παραβιάζεται (το κάτω ή το άνω φράγμα της κάθε μεταβλητής). Σε περίπτωση που η προσομοίωση είναι ανεπιτυχής και, συνεπώς, παραβιάζεται ο περιορισμός που περιγράφεται από την Εξ. (6.16) τότε ο χειρισμός του αλγορίθμου είναι περισσότερο πολύπλοκος. Ο αλγόριθμος ελέγχει καταρχήν αν ισχύει $N_1 < N_2$, κάτι το οποίο είναι άτοπο. Σε αυτή την περίπτωση μειώνει την τιμή του N_2 τόσο ώστε να ισχύει $N_1 \ge N_2$. Στη συνέχεια, αν ο αλγόριθμος προσομοίωσης ολοκληρώνεται ανεπιτυχώς μειώνεται ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων (N_1) κάνοντας παράλληλα και τον προηγούμενο έλεγχο ($N_1 \geq N_2$), μέχρι ο αλγόριθμος προσομοίωσης να τερματίσει επιτυχώς. Με αυτόν τον τρόπο είναι βέβαιο ότι ο αλγόριθμος διόρθωσης θα βρει μια λύση με αριθμό Φ/Β πλαισίων για τα οποία να αρκεί η διαθέσιμη έκταση και να μπορούν να εγκατασταθούν σε αυτή με τον τρόπο που έχει περιγραφεί στην παράγραφο 5.3 αλλά και να μπορούν να συνδεθούν με ορθό στους μετατροπείς DC/AC της εγκατάστασης, όπως επίσης έχει περιγραφεί στο παράγραφο 5.2.

6.5 Σύγκλιση του αλγορίθμου

Ένα σημαντικό πρόβλημα που προκύπτει κατά την εφαρμογή εξελικτικών αλγορίθμων είναι το κριτήριο λήξης της εκτέλεσής τους ή διαφορετικά το πώς μπορεί να διαπιστωθεί αν η λύση που έχει προκύψει από την εφαρμογή τους μετά από κάποιο αριθμό επαναλήψεων είναι η βέλτιστη. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι εξελικτικοί αλγόριθμοι όπως αυτοί που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία προσεγγίζουν την περιοχή της βέλτιστης λύσης και δεν παγιδεύονται σε τοπικά μέγιστα. Το πιο απλό κριτήριο σύγκλισης που χρησιμοποιείται στις περισσότερες των περιπτώσεων καθώς και στην παρούσα εργασία είναι η εκτέλεση του αλγορίθμου για ένα συγκεκριμένο πλήθος γενεών. Το πλήθος γενεών πέρα από το οποίο είναι βέβαιο ότι ο αλγόριθμος συγκλίνει στη βέλτιστη λύση προκύπτει μόνο μετά από την εξέταση ενός μεγάλου εύρους περιπτώσεων του προβλήματος.

7. ΤΟ ΛΟΓΙΣΜΙΚΟ ΤΗΣ ΠΑΡΟΥΣΑΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

7.1 Εισαγωγή

Από την παρούσα εργασία προέκυψε το λογισμικό PVSYSopt το οποίο ενσωματώνει όλους τους αλγορίθμους και τα μοντέλα που περιγράφηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια. Το συγκεκριμένο λογισμικό δίνει τη δυνατότητα στο σχεδιαστή να εντοπίσει τη βέλτιστη λύση για οποιοδήποτε πραγματικό σύστημα Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένο στο ηλεκτρικό δίκτυο με σκοπό την πώληση της παραγόμενης ενέργειας με το μέγιστο οικονομικό όφελος.

Μετά από πολλές δοκιμές διαπιστώθηκε ότι η τεχνική Βελτιστοποίησης με Σωματίδια Σμήνους (Particle Swarm Optimization) επιτυγχάνει εν γένει καλύτερη σύγκλιση σε σχέση με τους Γενετικούς Αλγορίθμους και με σημαντικά λιγότερες απαιτήσεις χρόνου. Για το λόγο αυτό, στο λογισμικό που αναπτύχθηκε, η βελτιστοποίηση γίνεται με τη μέθοδο PSO.

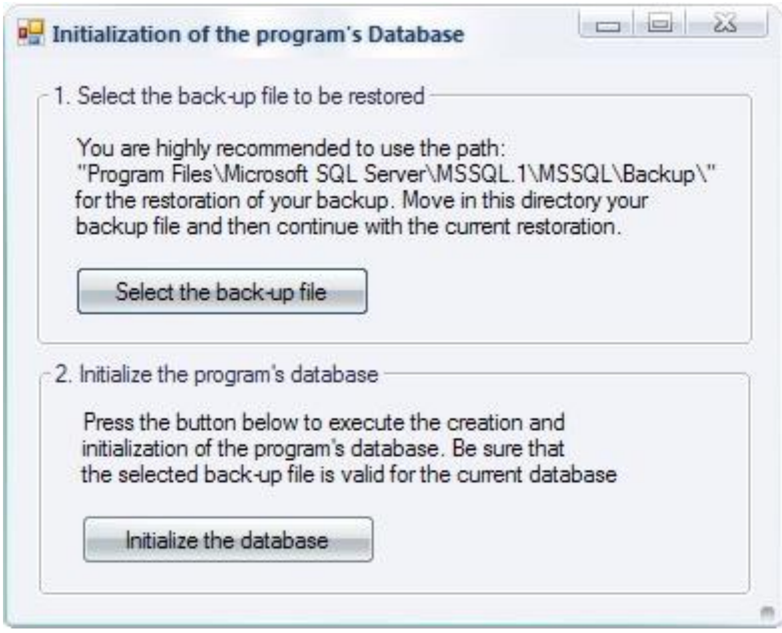
Οι αλγόριθμοι της παρούσας εργασίας υλοποιήθηκαν σε γλώσσα C++, ενώ η διεπαφή χρήστη του λογισμικού υλοποιήθηκε σε γλώσσα Visual C++ και σε περιβάλλον Microsoft Visual Studio 2005 (.NET 2.0). Η βάση δεδομένων (database) που χρησιμοποιείται υλοποιήθηκε σε περιβάλλον Microsoft SQL Server Express 2005, το οποίο απαιτείται για την εκτέλεση του λογισμικού. Η εγκατάσταση του λογισμικού PVSYSopt γίνεται μέσω ενός απλού και εύχρηστου προγράμματος εγκατάστασης και απαιτεί 5 - 10 MB στο σκληρό δίσκο του Η/Υ υπολογιστή που εγκαθίσταται, ενώ για την εκτέλεσή του απαιτούνται τουλάχιστον 23 MB μνήμης RAM. Το λογισμικό έχει δοκιμαστεί επιτυχώς τόσο σε περιβάλλον Windows XP Professional όσο και σε Windows 7 και με χρήση τόσο του SQL Server Express 2005 όσο και του SQL Server Express 2008. Στις επόμενες παραγράφους περιγράφονται οι δυνατότητες και ο τρόπος χρήσης του λογισμικού που αναπτύχθηκε.

7.2 Έναρξη εκτέλεσης του λογισμικού

Κατά την έναρξή εκτέλεσης του λογισμικού PVSYSopt γίνεται πάντοτε ένας έλεγχος για το αν έχει δημιουργηθεί η βάση δεδομένων και αν υπάρχουν ελλιπή στοιχεία. Στην περίπτωση που εντοπιστούν προβλήματα στη βάση των δεδομένων εμφανίζεται η φόρμα που φαίνεται στο Σχήμα 7.1

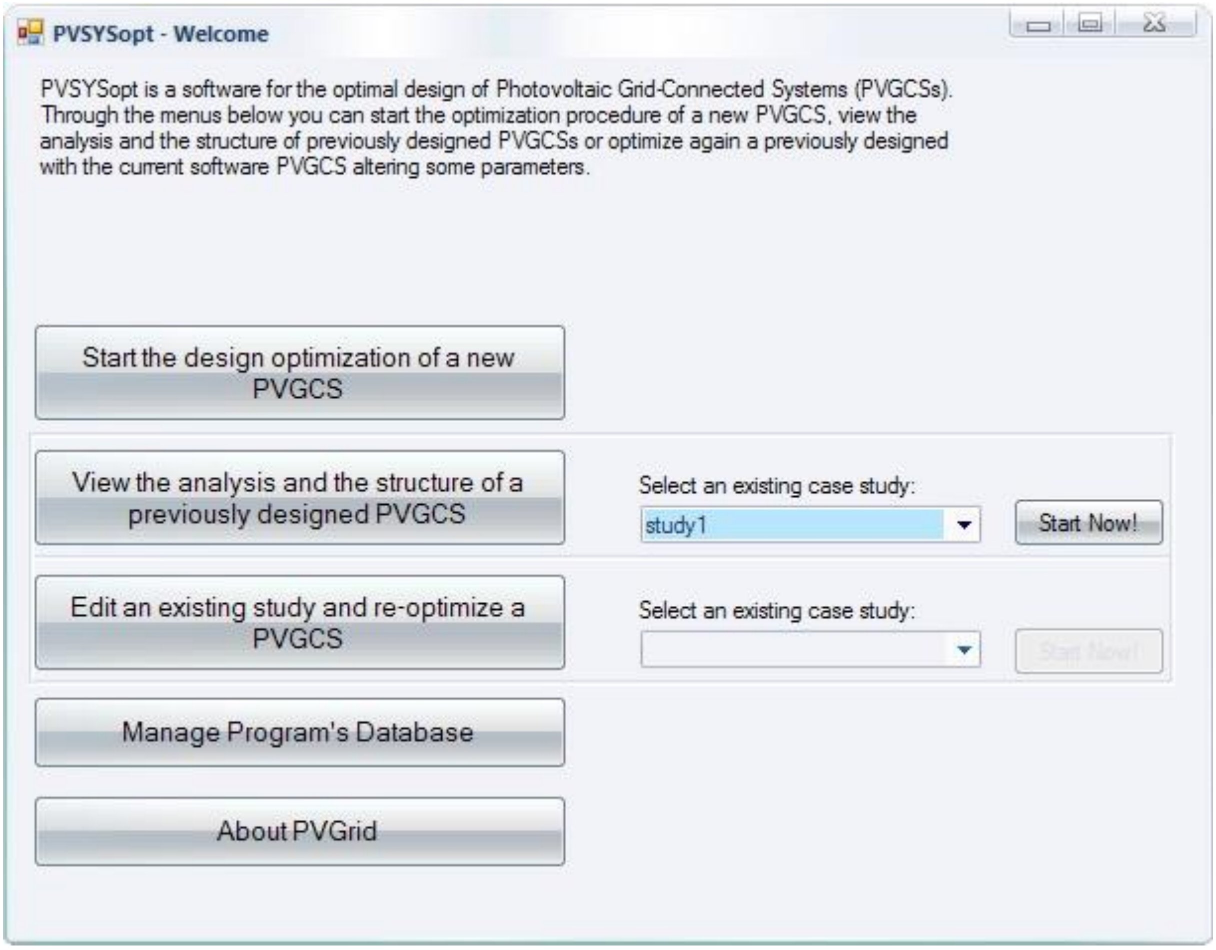
Σχήμα 7.1: Η αρχική φόρμα στην περίπτωση εντοπισμού έλλειψης της βάσης δεδομένων ή προβλημάτων σε αυτή.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.1 σε αυτή την περίπτωση η μόνη επιλογή που δίνεται στο χρήστη είναι να προχωρήσει στην αρχικοποίηση της βάσης δεδομένων του λογισμικού. Αν ο χρήστης επιλέξει αυτή τη διαδικασία, τότε εμφανίζεται η φόρμα που φαίνεται στο Σχήμα 7.2.



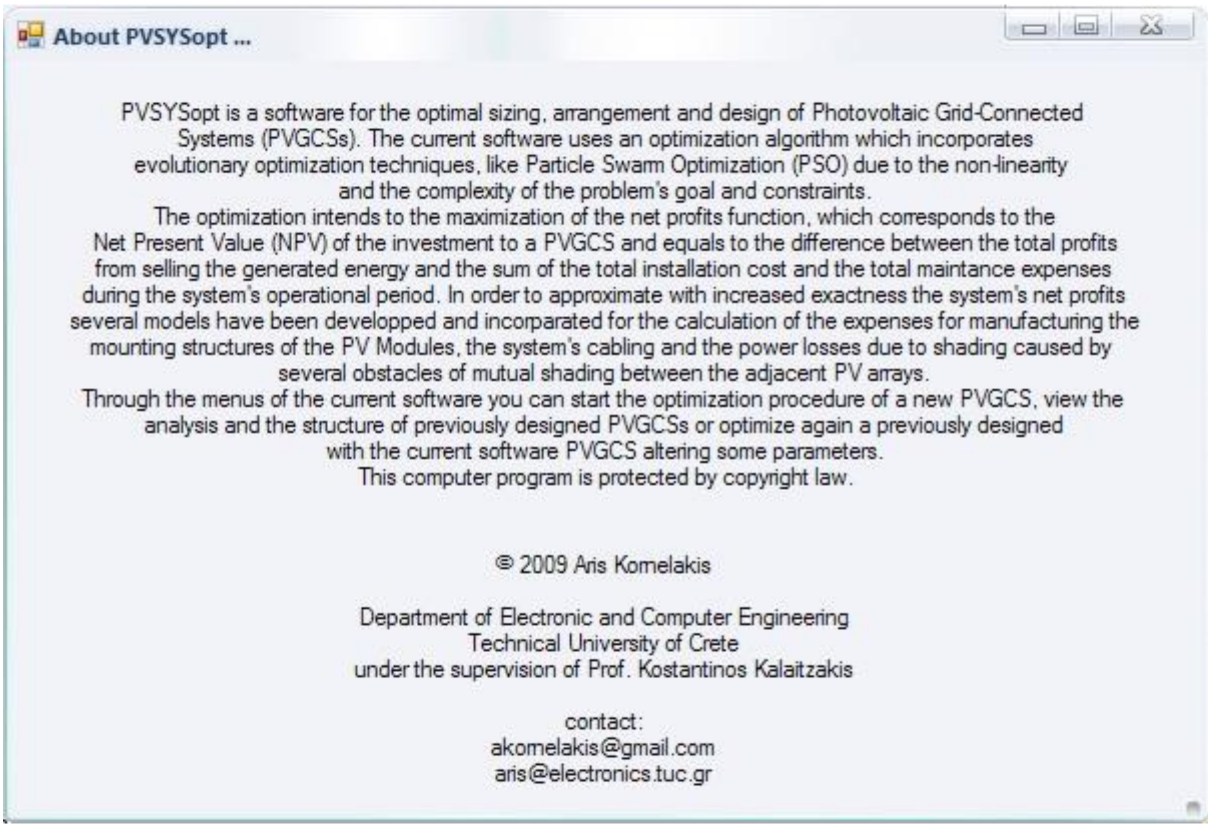
Σχήμα 7.2: Η φόρμα εγκατάστασης της βάσης δεδομένων.

Στη φόρμα εγκατάστασης της βάσης δεδομένων που φαίνεται στο Σχήμα 7.2 ο χρήστης καλείται να επιλέξει ένα έγκυρο αρχείο βάσης δεδομένων και να εκκινήσει τη διαδικασία αρχικοποίησης. Επίσης συνίσταται η μεταφορά του αρχείου σε ένα συγκεκριμένο directory λόγω περιορισμών πρόσβασης αρχείων που τίθενται από τον SQL Server. Όταν ολοκληρωθεί επιτυχώς η παραπάνω διαδικασία, εμφανίζονται στην αρχική φόρμα όλες οι διαθέσιμες επιλογές χρήσης. Η συγκεκριμένη φόρμα, η οποία φαίνεται στο Σχήμα 7.3, εμφανίζεται, πλέον, κάθε φορά που εκτελείται η εφαρμογή χωρίς να εντοπιστούν προβλήματα σχετικά με τη βάση δεδομένων.



Σχήμα 7.3: Η αρχική φόρμα της εφαρμογής.

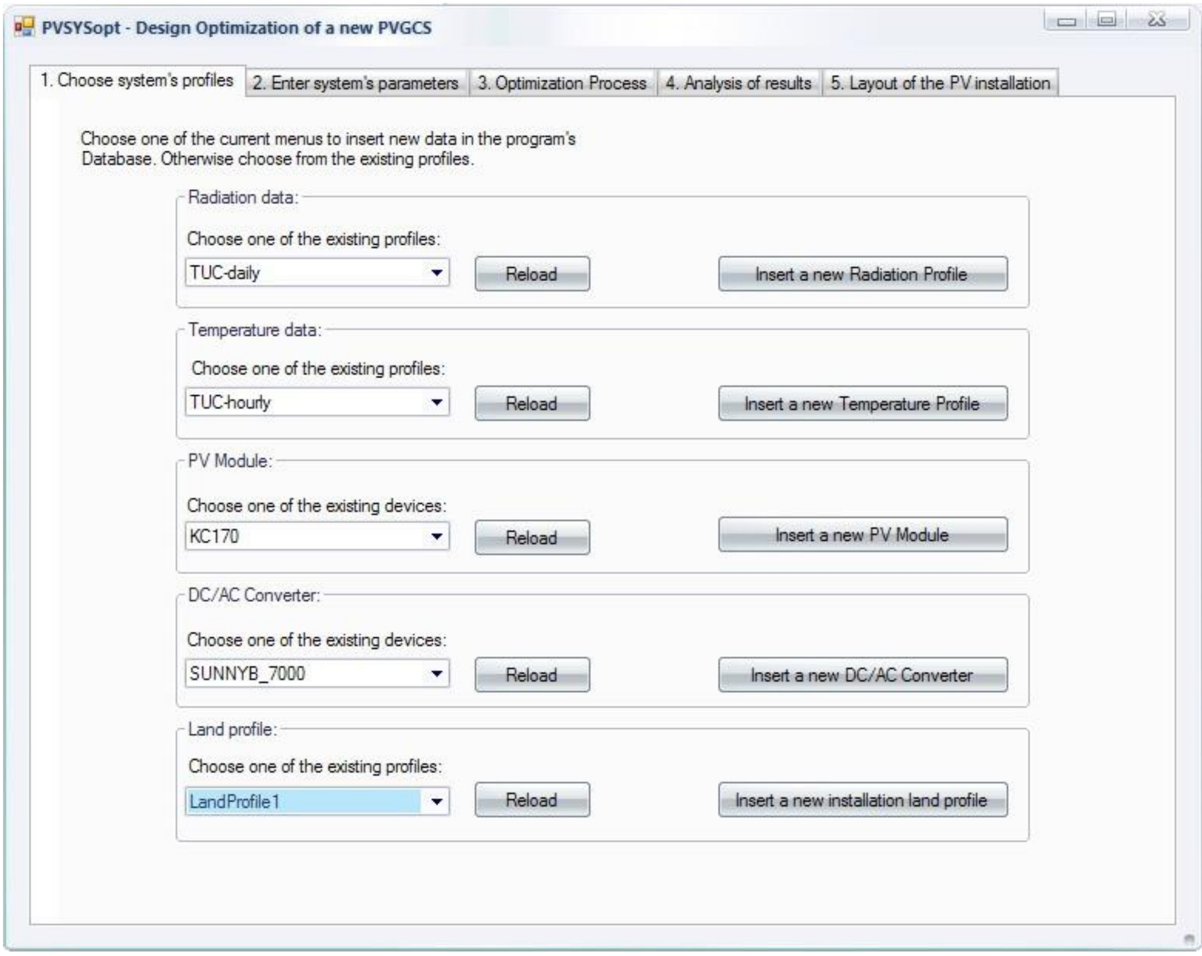
Η πρώτη επιλογή που δίνεται στο χρήστη στην αρχική φόρμα είναι να ξεκινήσει τη διαδικασία δημιουργίας μιας νέας μελέτης συστήματος, εισάγοντας όλες τις παραμέτρους που απαιτούνται για το βέλτιστο σχεδιασμό. Η διαδικασία αυτή περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 7.3. Οι επόμενες δύο επιλογές σχετίζονται με μελέτες που έχουν δημιουργηθεί στο παρελθόν με χρήση του παρόντος λογισμικού. Συγκεκριμένα, δίνεται η δυνατότητα προεπισκόπησης των στοιχείων και των αποτελεσμάτων μιας προηγούμενης μελέτης, καθώς και η δυνατότητα επεξεργασίας των εισόδων μιας μελέτης και επανάληψης της διαδικασίας βελτιστοποίησης του αντίστοιχου συστήματος. Οι δύο αυτές διαδικασίες περιγράφονται στην παράγραφο 7.4. Η επόμενη επιλογή του χρήστη εκκινεί μια φόρμα διαχείρισης της βάσης δεδομένων του λογισμικού όπου ο χρήστης μπορεί να εισάγει ή να αφαιρέσει δεδομένα, να κρατήσει αρχεία ασφαλείας της βάσης δεδομένων και να επαναφορτώσει τη βάση δεδομένων από κάποιο αρχείο (back-up). Η διαδικασία αυτή περιγράφεται αναλυτικά στην παράγραφο 7.5. Η τελευταία επιλογή εμφανίζει μια φόρμα με πληροφορίες σχετικές με το λογισμικό PVSYSopt. Η φόρμα αυτή φαίνεται στο Σχήμα 7.4



Σχήμα 7.4: Η φόρμα περιγραφής πληροφοριών σχετικά με το λογισμικό PVSYSopt.

7.3 Η διαδικασία δημιουργίας μιας νέας μελέτης ενός συστήματος

Η διαδικασία δημιουργίας μιας νέας μελέτης για ένα σύστημα Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων με το ηλεκτρικό δίκτυο και περιγραφής των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης γίνεται σε πέντε βήματα και ισάριθμες φόρμες με τη μορφή καρτελών. Στο πρώτο βήμα της διαδικασίας αυτής εμφανίζεται η αρχική φόρμα που φαίνεται στο Σχήμα 7.5. Σε αυτή τη φόρμα ο χρήστης καλείται να επιλέξει προφίλ ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος για την τοποθεσία που θα εγκατασταθεί το σύστημα που σχεδιάζεται. Επίσης καλείται να επιλέξει τους τύπους των συσκευών του συστήματος (Φ/Β πλαίσια και μετατροπείς ισχύος DC/AC) καθώς και το προφίλ της διαθέσιμης προς εγκατάσταση έκτασης. Επίσης, για όλα αυτά τα παραπάνω δεδομένα, εκτός από τη δυνατότητα επιλογής από τα διαθέσιμα δεδομένα της βάσης, δίνεται και η δυνατότητα εισαγωγής νέων σε αυτή, το οποίο μπορεί να γίνει και μέσω της φόρμας διαχείρισης της βάσης.



Σχήμα 7.5: Το πρώτο βήμα δημιουργίας μιας νέας μελέτης.

Το επόμενο βήμα σχετίζεται με την εισαγωγή διαφόρων παραμέτρων του συστήματος. Η φόρμα του βήματος αυτού φαίνεται στο Σχήμα 7.6 με συμπληρωμένες τιμές στα διάφορα πεδία της. Αναλυτικότερα, στη φόρμα αυτή ο χρήστης καλείται να συμπληρώσει καταρχήν ένα τίτλο μοναδικό για τη συγκεκριμένη μελέτη, το γεωγραφικό πλάτος της τοποθεσίας που θα εγκατασταθεί το σύστημα, το χρονικό ορίζοντα λειτουργίας του καθώς και παραμέτρους της τοπικής οικονομίας που είναι το ποσοστό επιδότησης του αρχικού απαιτούμενου κεφαλαίου, το ποσοστό φορολογίας επί των εσόδων από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας, το ετήσιο προεξοφλητικό επιτόκιο, τον ετήσιο πληθωρισμό και την ποσοστό ετήσιας ανατίμησης της ενέργειας. Στη συνέχεια πρέπει να συμπληρωθούν παράμετροι σχετικές με την πώληση της ενέργειας. Συγκεκριμένα, επιλέγεται καταρχήν αν υπάρχει μοναδική τιμή πώλησης ή αν υπάρχουν δύο τιμές ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ του συστήματος και στη συνέχεια συμπληρώνονται οι αντίστοιχες τιμές. Στην πρώτη περίπτωση απαιτείται μόνο μια τιμή πώλησης της ενέργειας (€/KWh) ενώ στη δεύτερη δύο τιμές και το ενδιάμεσο κατώφλι εγκατεστημένης ισχύος (kW_p). Οι επόμενη παράμετρος είναι το κόστος της έκτασης. Ο χρήστης πρώτα επιλέγει τον τρόπο υπολογισμού του. Έτσι, δίνεται η δυνατότητα προσδιορισμού του κόστους αυτού είτε εισάγοντάς το άμεσα είτε εισάγοντας μια τιμή ανά μονάδα έκτασης (€/m^2) οπότε το κόστος αυτό υπολογίζεται βάσει του μοντέλου που περιγράφεται από την Εξ. (6.4). Οι επόμενες δύο παράμετροι σχετίζονται με δαπάνες μη προβλέψιμες από το λογισμικό PVSYSopt τόσο σε επίπεδο αρχικού κεφαλαίου όσο και σε επίπεδο ετησίων δαπανών. Στο συνέχεια εισάγεται το κόστος καλωδίωσης ανά τρέχον μέτρο (€/m) ώστε να υπολογιστεί το συνολικό κόστος των καλωδιώσεων του συστήματος σύμφωνα με το μοντέλο που περιγράφεται από την Εξ. (6.7) και στη συνέχεια τα κόστη για τον υπολογισμό των δαπανών για την κατασκευή των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων. Συγκεκριμένα, εισάγεται το κόστος των μεταλλικών ράβδων (€/m) και το κόστος των βάσεων από σκυρόδεμα (€/m^3) ώστε να υπολογιστεί το συνολικό κόστος σύμφωνα με την Εξ. (6.6). Οι επόμενες επιλογές σχετίζονται με τις ρυθμίσεις της PSO και το μέγεθος του χώρου αναζήτησης. Για ευκολία είναι προεπιλεγμένα συγκεκριμένα προφίλ που έχουν δοκιμαστεί και οδηγούν σε εύρεση της βέλτιστης λύσης. Έτσι, σχετικά με τις ρυθμίσεις του αλγορίθμου PSO έχει επιλεγεί η χρήση της μεθόδου Inertia PSO, η οποία περιγράφεται από την Εξ. (3.14) με συντελεστή αδράνειας (inertia weight) που μειώνεται γραμμική από την αρχική τιμή του ίση με 0,9, ως την τελική τιμή του ίση με 0,6, μέγιστη επιτρεπτή ταχύτητας 15 % επί του εύρους τιμών της αντίστοιχης μεταβλητής απόφασης και για αριθμό επαναλήψεων ίσο με 100. Επίσης, οι σταθεροί συντελεστές της μεθόδου τίθενται ίσοι με c_1=4 και c_2=1. Με αυτό τον τρόπο η PSO δίνει μεγαλύτερη βαρύτητα στις καλύτερες τιμές του κάθε μέλους του πληθυσμού και λιγότερη στη συνολικά καλύτερη λύση, με αποτέλεσμα να γίνεται καλύτερη αναζήτηση του χώρου και να αποφεύγονται περιπτώσεις εγκλωβισμού σε τοπικά μέγιστα στο πρόβλημα της παρούσας εργασίας. Επίσης, η προεπιλεγμένη μέθοδος είναι η Inertia PSO έναντι της απλής PSO ή της CPSO (Εξ. 3.14) καθώς οι συγκεκριμένες μέθοδοι εμφανίζουν αδυναμίες εντοπισμού των βέλτιστων λύσεων ή συγκλίνουν πρόωρα σε ένα τοπικό βέλτιστο (CPSO). Σχετικά με το χώρο αναζήτησης οι προεπιλεγμένες τιμές για τα κάτω όρια των μεταβλητών απόφασης τίθενται ίσες με 0, όπως περιγράφεται από τις Εξ. (6.12) – (6.15). Επίσης τα άνω όρια της τρίτης και της τέταρτης μεταβλητής (κλίση Φ/Β πλαισίων και γωνία απόστασης) τίθενται ίσα με 90, όπως περιγράφεται από τις Εξ. (6.14) – (6.15). Για το άνω όριο της πρώτης μεταβλητής, BND_1, που περιγράφει το πλήθος των Φ/Β πλαισίων (Εξ. (6.12)) χρησιμοποιείται ο παρακάτω εμπειρικός τύπος:

$$BND_1 = 3 \cdot \text{area} / L_{pv1} \cdot L_{pv2} \tag{7.1}$$

όπου:

area είναι το συνολικό εμβαδόν της διαθέσιμης έκτασης,

L_{pv1} είναι το μήκος της νότιας πλευράς του Φ/Β πλαισίου και

L_{pv2} είναι το μήκος της άλλης πλευράς του Φ/Β πλαισίου.

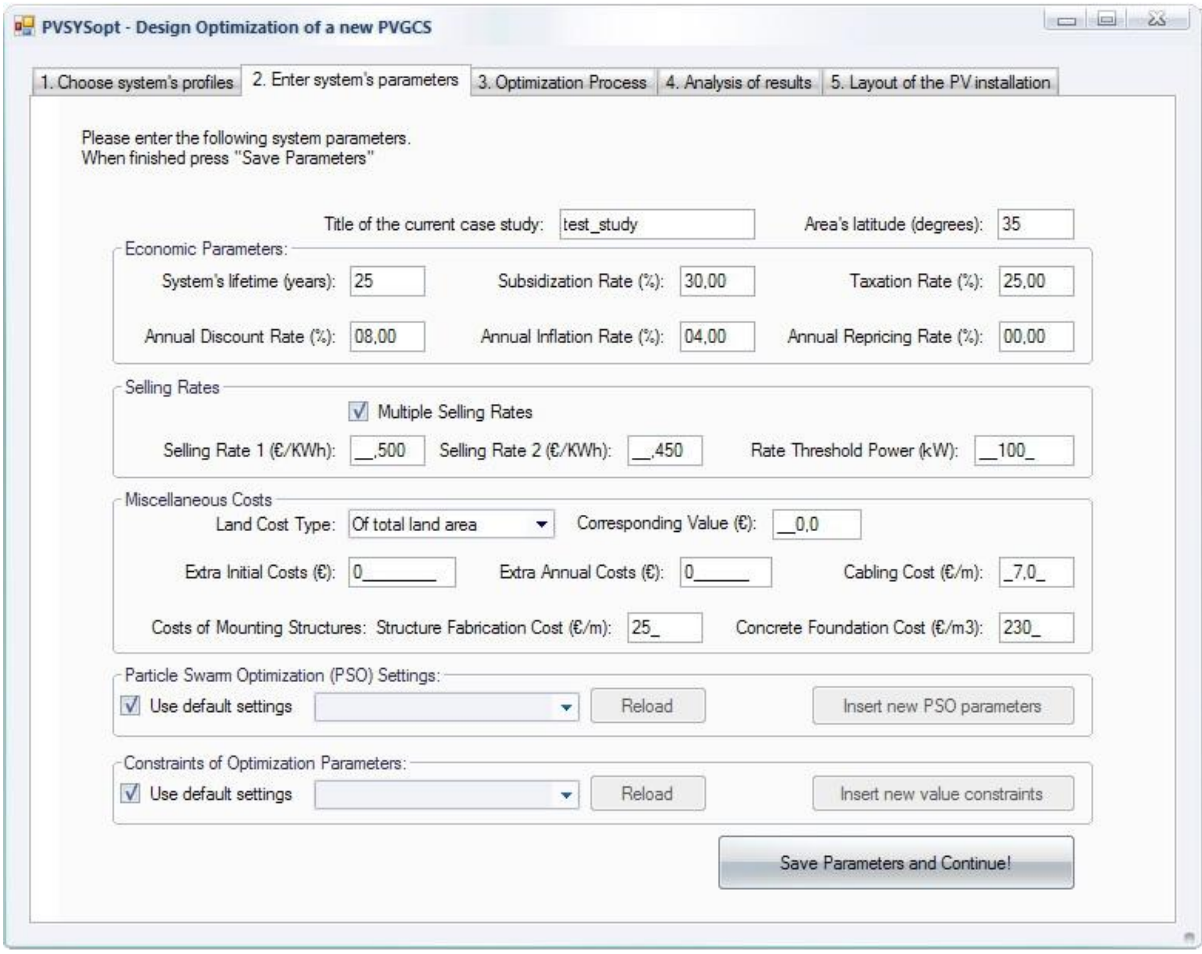
Για το άνω όριο της δεύτερης μεταβλητής, BND_2, που περιγράφεται από την Εξ. (6.13) χρησιμοποιείται ο εξής, επίσης εμπειρικός τύπος:

$$BND_2 = 0,2 \cdot BND_1 \tag{7.2}$$

Μέσω δοκιμών έχει βρεθεί ότι η χρήση αυτού του τρόπου ορισμού των άνω ορίων με βάση τις παραμέτρους του προβλήματος οδηγεί στον περιορισμό του χώρου αναζήτησης σε διαστάσεις ανάλογες με το μέγεθος του προβλήματος χωρίς να αποκλείει πιθανές λύσεις και να οδηγεί σε λύσεις υποδεέστερες της βέλτιστης και έχει ως αποτέλεσμα τον ταχύτερο εντοπισμό του βέλτιστου συστήματος. Επίσης, με χρήση αυτού του τρόπου ο χρήστης δε χρειάζεται να κάνει κάποια διαδικασία ώστε να δώσει συγκεκριμένες τιμές σε αυτά τα άνω όρια.

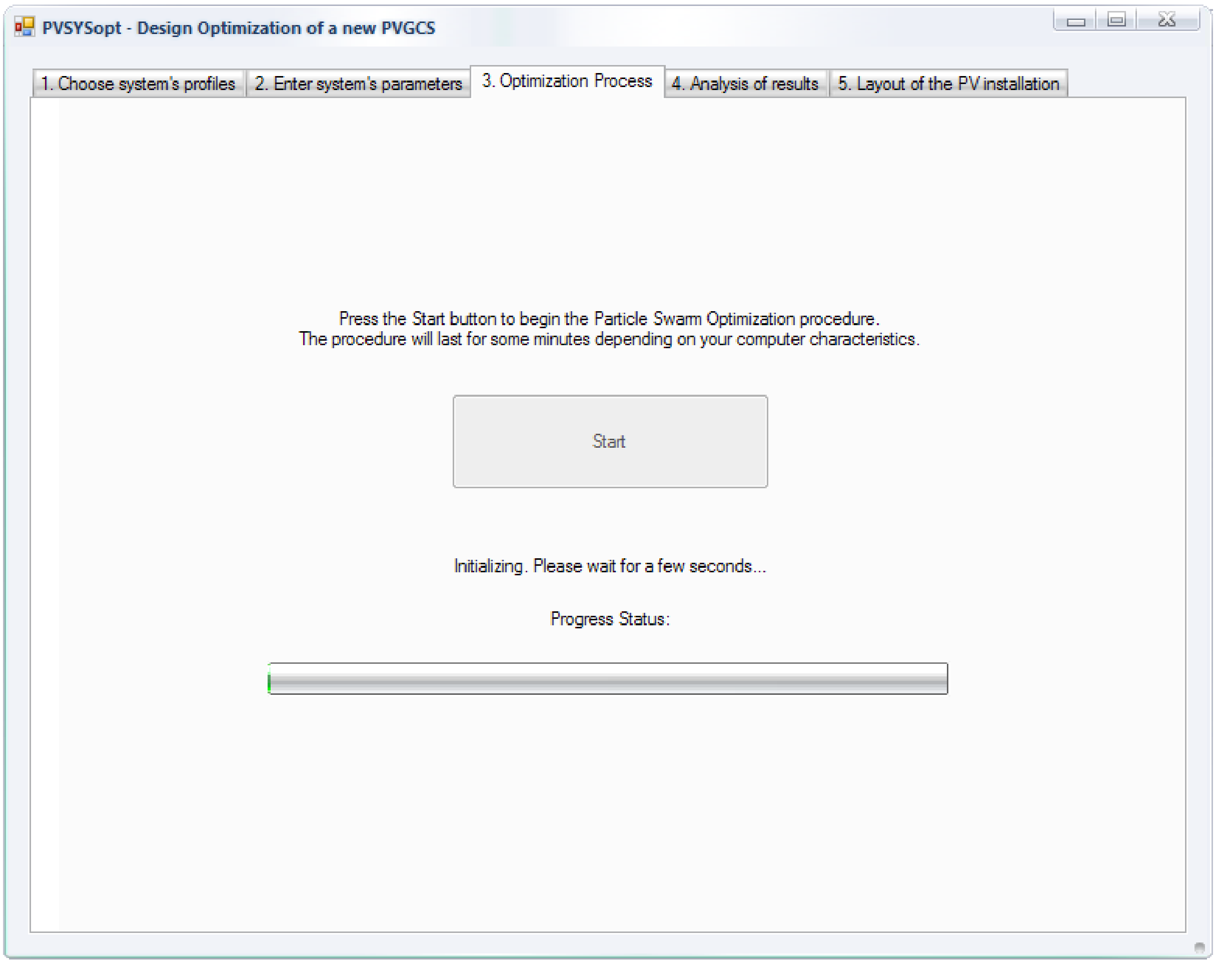
Παρ' όλα αυτά, αν ο χρήστης του λογισμικού επιθυμεί να ορίσει ο ίδιος τις ρυθμίσεις της PSO ή όλα τα όρια του χώρου αναζήτησης, η να διαλέξει κάποια άλλη ήδη ορισμένη μέθοδο, έχει αυτή τη δυνατότητα μέσω των μενού που βρίσκονται στα δεξιά. Η ολοκλήρωση και του δεύτερου βήματος της διαδικασίας σχεδιασμού ενός νέου συστήματος γίνεται πατώντας το πλήκτρο «Save Parameters and Continue!»

στο κάτω δεξιό άκρο της φόρμας. Τότε, γίνεται έλεγχος αν έχουν επιλεγεί όλα τα προφίλ στο πρώτο βήμα, αν έχει δοθεί μοναδικός τίτλος στην τρέχουσα μελέτη και αν οι μεταβλητές εισόδου έχουν οριστεί ορθά. Ανάλογα με το αποτέλεσμα αυτών των ελέγχων εμφανίζεται και ένα αντίστοιχο μήνυμα.



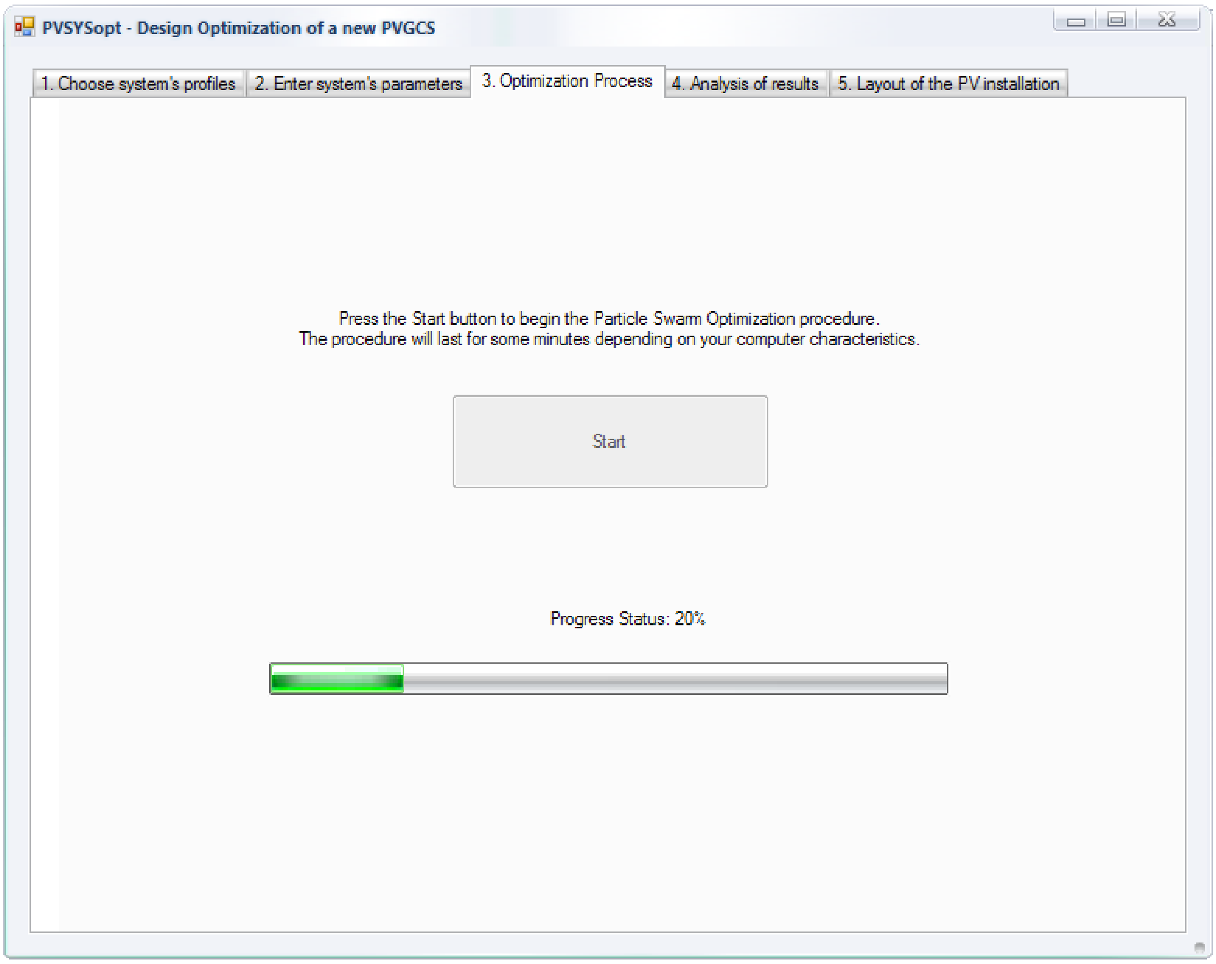
Σχήμα 7.6: Το δεύτερο βήμα δημιουργίας μιας νέας μελέτης.

Το τρίτο βήμα, αφού έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία εισαγωγής των εισόδων που απαιτούνται, είναι η έναρξη της ρουτίνας βελτιστοποίησης



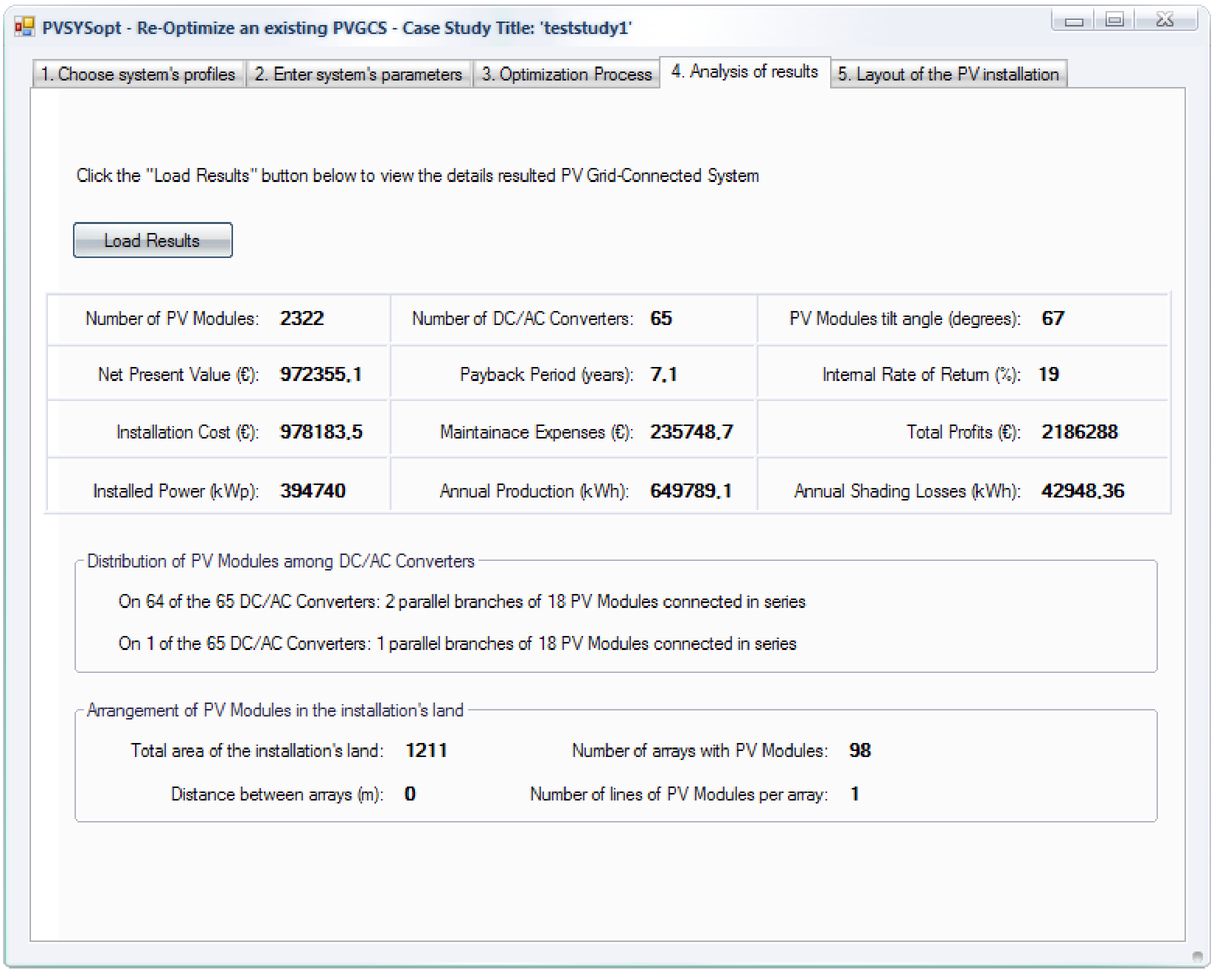
Σχήμα 7.7: Έναρξη τρίτου βήματος δημιουργίας μιας νέας μελέτης.

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.7, όταν ο χρήστης επιλέξει την έναρξη της διαδικασίας βελτιστοποίησης μέσω του πλήκτρου «Start» τότε εμφανίζεται για μερικά δευτερόλεπτα η επιγραφή «Initializing. Please wait for a few seconds…». Σε αυτό το χρονικό διάστημα γίνεται μια σειρά αρχικών υπολογισμών με χρήση των μοντέλων που περιγράφηκαν στο 2^o Κεφάλαιο. Όταν ολοκληρωθούν οι αρχικοί υπολογισμοί η συγκεκριμένη φόρμα έχει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 7.7, προβάλλοντας την κατάσταση προόδου της βελτιστοποίησης.



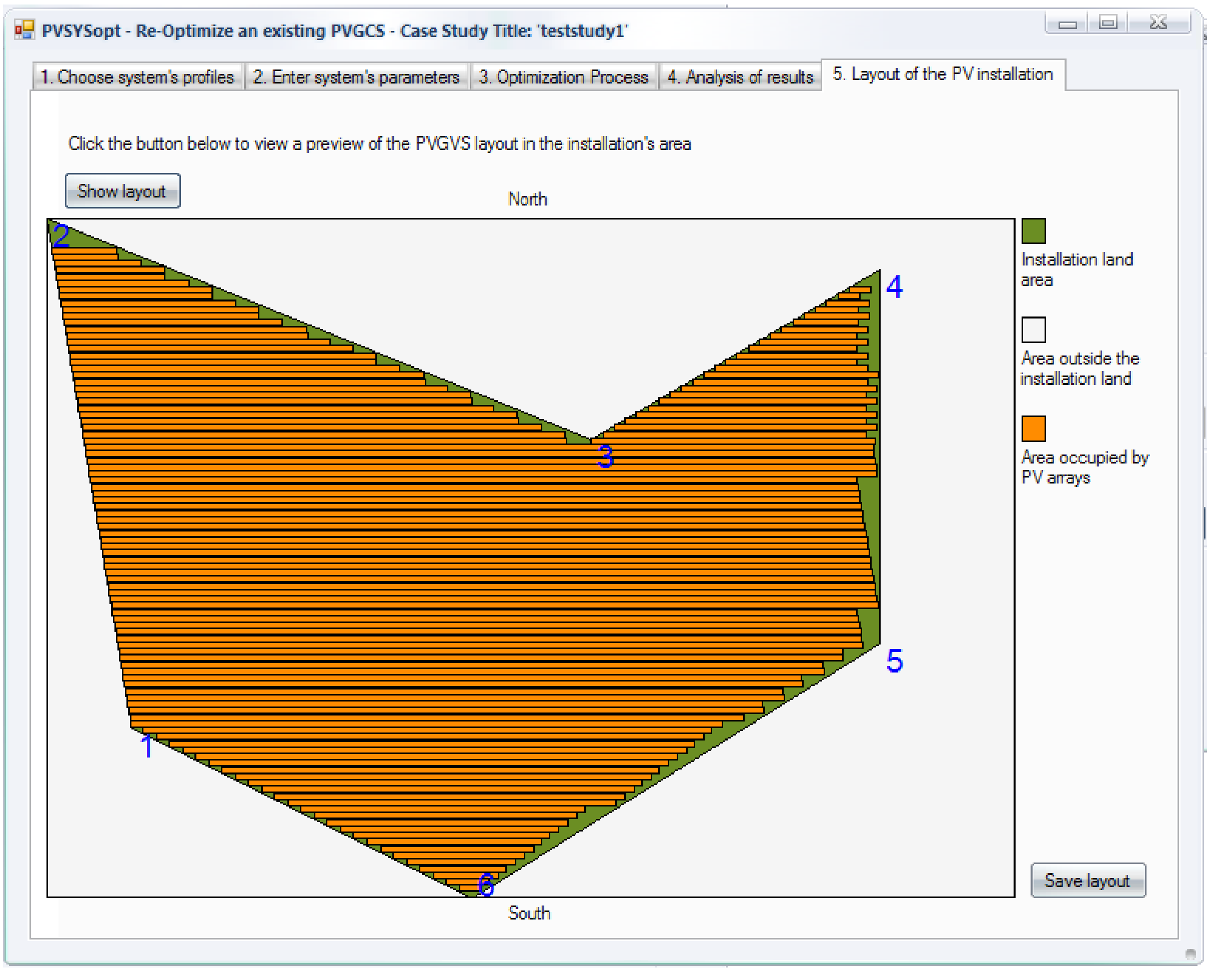
Σχήμα 7.8: Προεπισκόπηση της κατάστασης προόδου στο τρίτο βήμα δημιουργίας μιας νέας μελέτης.

Μετά την ολοκλήρωση και του τρίτου βήματος, ο χρήστης πλέον μπορεί να προχωρήσει στην τέταρτη καρτέλα όπου περιγράφεται το βέλτιστο σύστημα που προέκυψε από την παραπάνω διαδικασία. Συγκεκριμένα, προβάλλεται ο αριθμός των Φ/Β πλαισίων, ο αριθμός των μετατροπέων DC/AC, η βέλτιστη κλίση των Φ/Β πλαισίων, η εκτιμώμενη βέλτιστη Καθαρή Παρούσα Αξία, ο χρόνος απόσβεσης και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης, τα εκτιμώμενα κόστη εγκατάστασης και συντήρησης, τα συνολικά ακαθάριστα έσοδα μετά φόρων, η εγκατεστημένη ισχύς του συστήματος, η ετήσια ενεργειακή παραγωγή καθώς και οι ετήσιες ενεργειακές απώλειες λόγω σκίασης. Επίσης, εμφανίζεται ο τρόπος διασύνδεσης των Φ/Β πλαισίων με τους μετατροπείς ισχύος και ο τρόπος χωροθέτησής τους, περιλαμβάνοντας το συνολικό εμβαδόν της διαθέσιμης έκτασης, το πλήθος των συστοιχιών, το πλήθος των γραμμών ανά συστοιχία και την απόσταση μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών.



Σχήμα 7.9: Προβολή των αποτελεσμάτων που περιγράφουν το βέλτιστο σύστημα που προέκυψε.

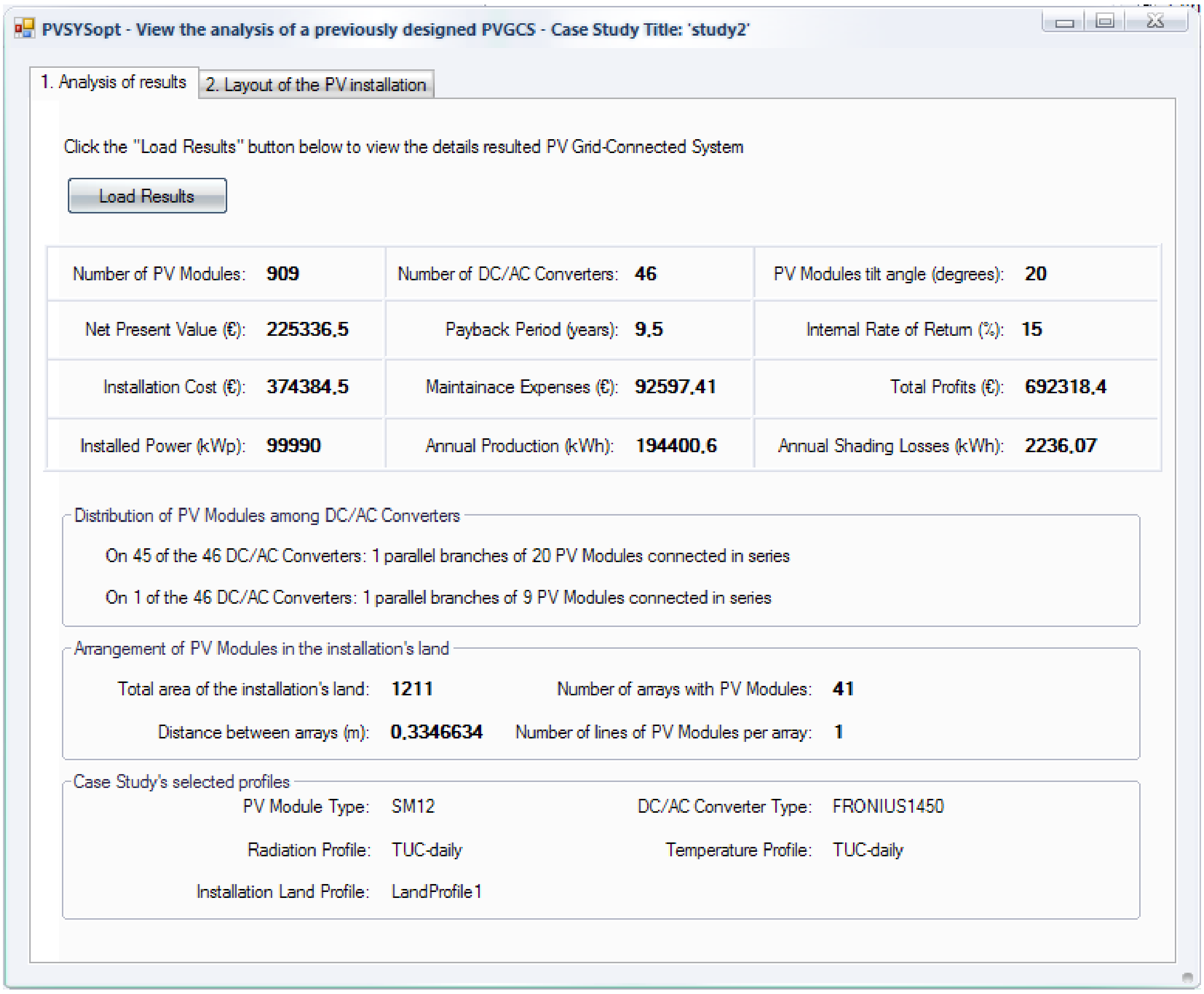
Το πέμπτο και τελευταίο βήμα περιλαμβάνει την σχηματική προεπισκόπηση της χωροθέτησης των Φ/Β πλαισίων εντός της έκτασης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.10. Σε αυτή τη φόρμα δίνεται και η δυνατότητα στο χρήστη να αποθηκεύσει σε ένα αρχείο κειμένου (.txt) την λεπτομερή περιγραφή του τρόπου χωροθέτησης με τις αναλυτικές συντεταγμένες της κάθε συστοιχίας Φ/Β πλαισίων μέσω του πλήκτρου «Save layout» στην κάτω δεξιά γωνία.



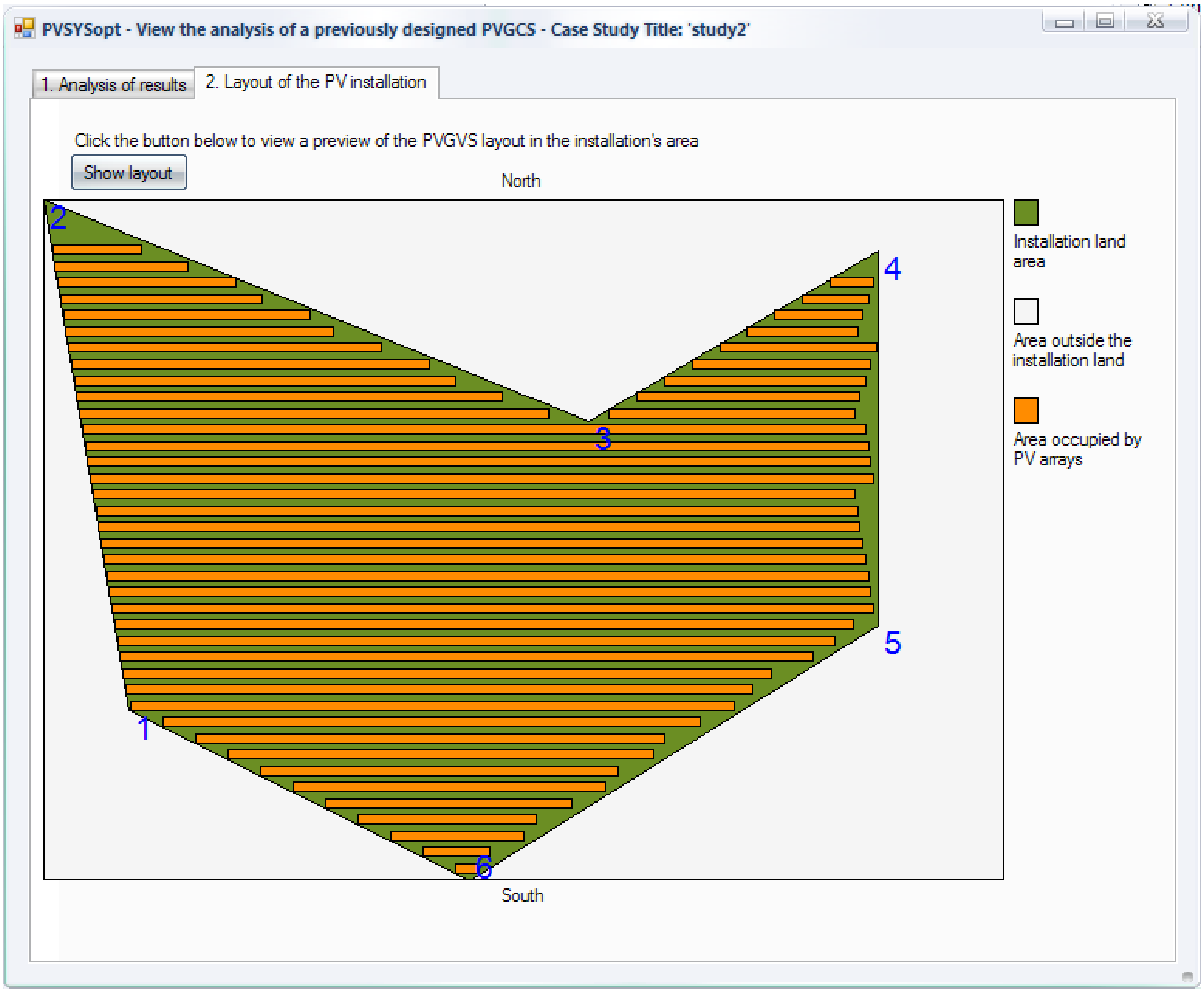
Σχήμα 7.10: Προεπισκόπηση της χωροθέτησης των Φ/Β πλαισίων στη διαθέσιμη έκταση για το βέλτιστο σύστημα που προέκυψε.

7.4 Οι διαδικασίες προεπισκόπησης και επεξεργασίας μιας προηγούμενης μελέτης

Η διαδικασία προεπισκόπησης μιας προηγούμενης μελέτης μέσω της αρχικής φόρμας περιλαμβάνει την προβολή των καρτελών εμφάνισης των αποτελεσμάτων που φαίνονται στο Σχήμα 7.11 και στο Σχήμα 7.12. Η μόνη διαφορά της καρτέλας που φαίνεται στο Σχήμα 7.11 έναντι της αντίστοιχης καρτέλας στο Σχήμα 7.9 στην περίπτωση εκπόνησης μιας νέας μελέτης, είναι ότι κατά την προεπισκόπηση μιας προηγούμενης μελέτης εμφανίζονται επιπλέον, οι τύποι των συσκευών του συστήματος, τα προφίλ ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος που έχουν επιλεχθεί για τη μελέτη αυτή καθώς και το προφίλ της διαθέσιμης έκτασης.



Σχήμα 7.11: Προβολή των αποτελεσμάτων που περιγράφουν το βέλτιστο σύστημα που προέκυψε από μια προηγούμενη μελέτη.

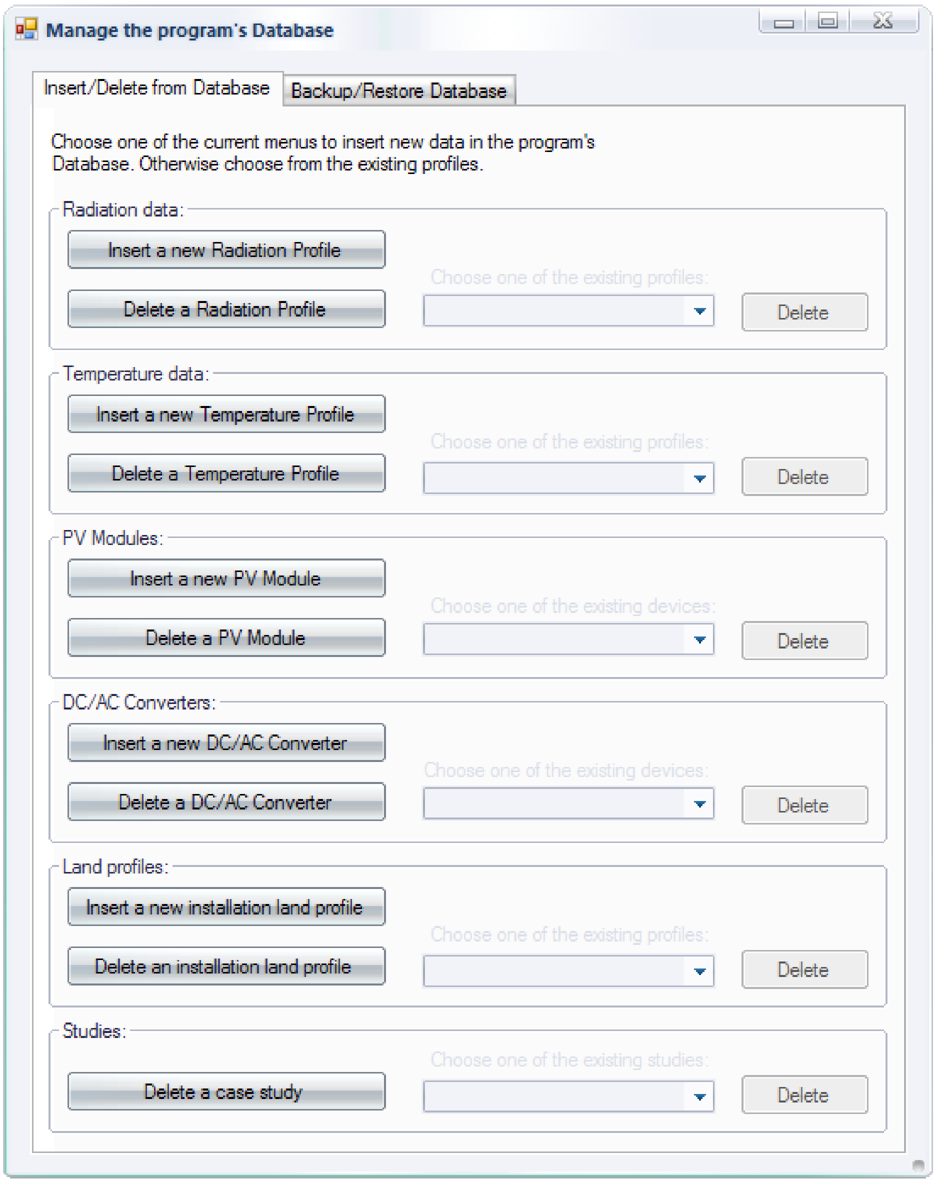


Σχήμα 7.12: Προεπισκόπηση της χωροθέτησης των Φ/Β πλαισίων για το βέλτιστο σύστημα που προέκυψε από μια προηγούμενη μελέτη.

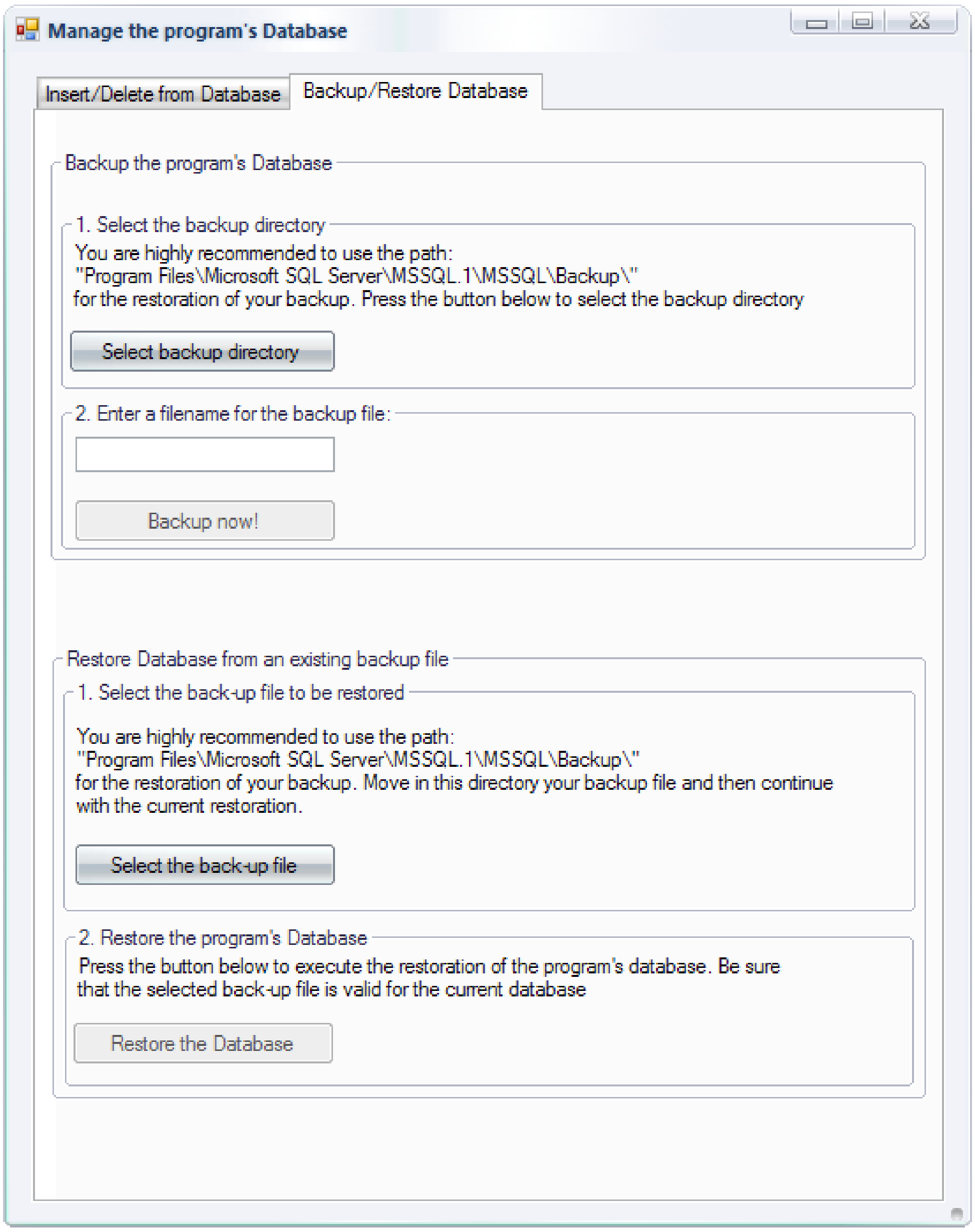
Η διαδικασία επεξεργασίας μιας προηγούμενης μελέτης περιλαμβάνει τα πέντε βήματα που περιγράφονται στην παράγραφο 7.3 και τις αντίστοιχες καρτέλες που εμφανίζονται στα Σχήματα 7.5 – 7.10 με τη διαφορά ότι στις καρτέλες των δύο πρώτων βημάτων όλες οι είσοδοι είναι συμπληρωμένες σύμφωνα με τα στοιχεία της μελέτης. Σε αυτές τις καρτέλες ο χρήστης μπορεί να αλλάξει όποιες από τις παραμέτρους επιθυμεί και να προχωρήσει εκ νέου στη διαδικασία βελτιστοποίησης βάσει των νέων αυτών παραμέτρων.

7.5 Οι διαδικασίες διαχείρισης της βάσης δεδομένων

Η τέταρτη επιλογή της αρχικής φόρμας αφορά στη διαχείριση της βάσης δεδομένων. Μέσω αυτού του μενού είναι δυνατή η εισαγωγή ή η διαγραφή δεδομένων στη βάση, να δημιουργία αρχείων ασφαλείας της βάσης δεδομένων και η επαναφόρτωση της βάσης δεδομένων από κάποιο αρχείο (back-up). Το μενού διαχείρισης της βάσης διαχωρίζεται σε δύο καρτέλες. Η πρώτη σχετίζεται με τις επιλογές εισαγωγής και διαγραφής και φαίνεται στο Σχήμα 7.13 και η δεύτερη με τη χρήση αρχείων ασφαλείας και φαίνεται στο Σχήμα 7.14.



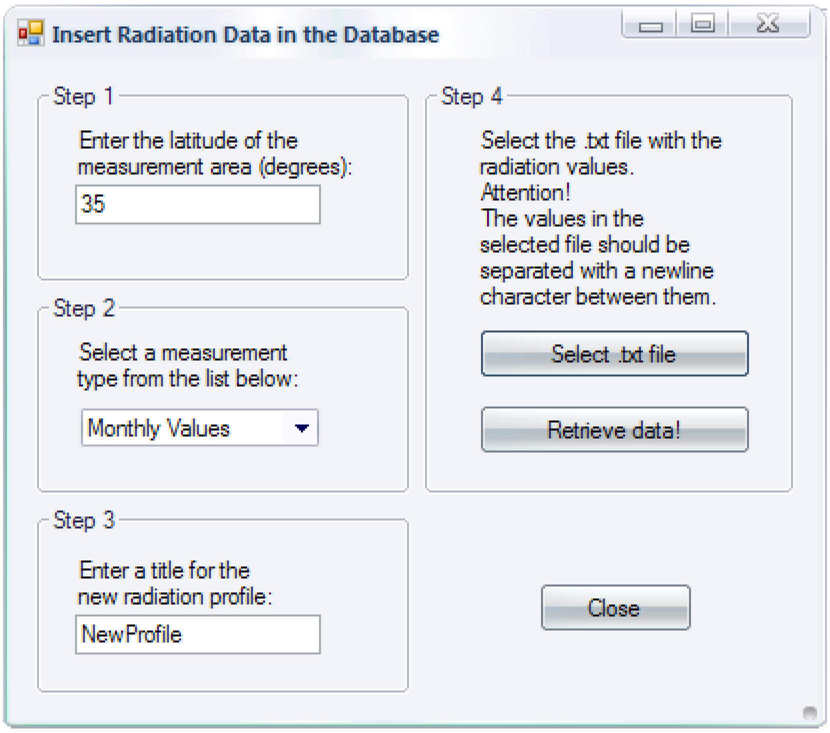
Σχήμα 7.13: Η πρώτη καρτέλα του μενού διαχείρισης της βάσης δεδομένων



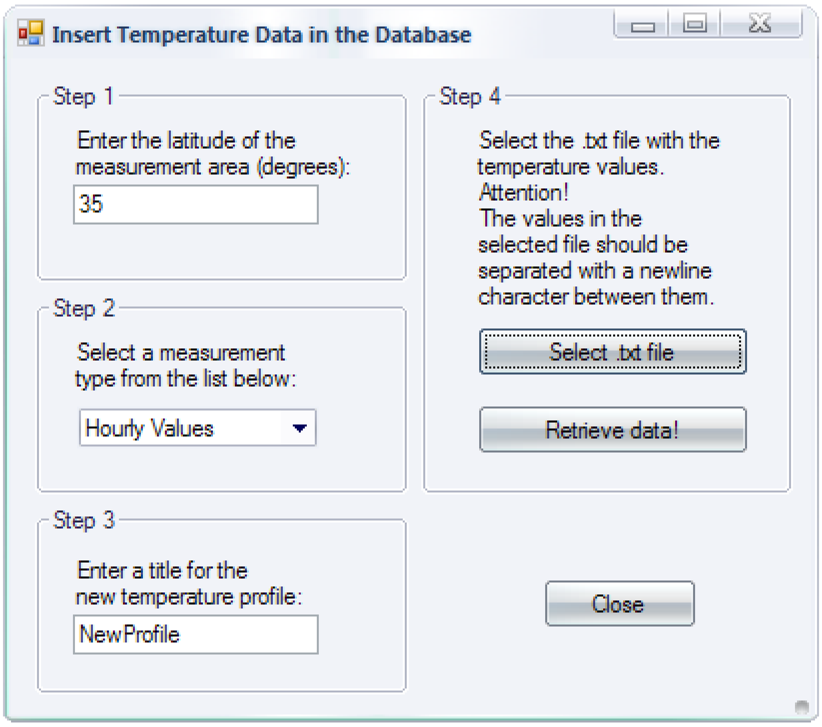
Σχήμα 7.14: Η δεύτερη καρτέλα του μενού διαχείρισης της βάσης δεδομένων

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 7.14 ο χρήστης μπορεί να κρατήσει αρχείο ασφαλείας της τρέχουσας κατάστασης της βάσης δεδομένων επιλέγοντας απλά το directory που θα αποθηκευτεί και το όνομα του αρχείου αυτού. Αντίστοιχα, μπορεί να γίνει επανάκτηση της βάσης δεδομένων από ένα αρχείο ασφαλείας με εξίσου απλό τρόπο.

Παρακάτω περιγράφονται οι διαδικασίες εισαγωγής δεδομένων στη βάση. Στα Σχήματα 7.15 και 7.16 φαίνονται οι φόρμες εισαγωγής προφίλ ακτινοβολίας και θερμοκρασίας περιβάλλοντος.



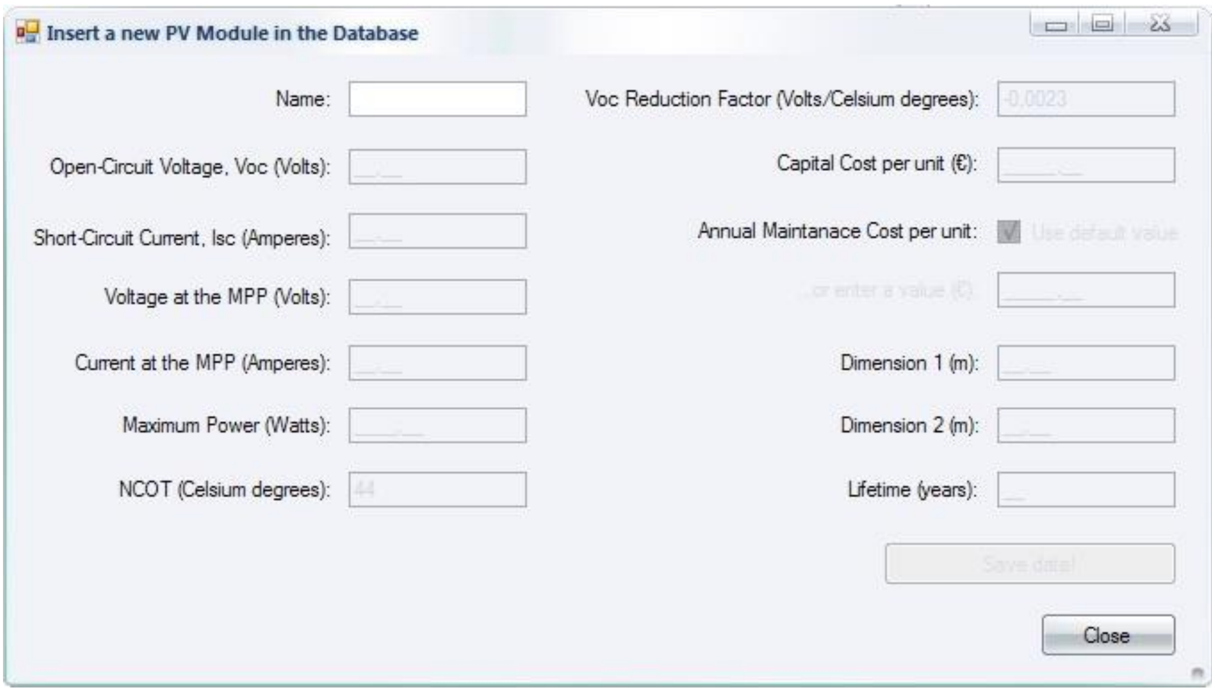
Σχήμα 7.15: Το μενού εισαγωγής προφίλ ακτινοβολίας στη βάση δεδομένων



Σχήμα 7.16: Το μενού εισαγωγής προφίλ θερμοκρασίας στη βάση δεδομένων

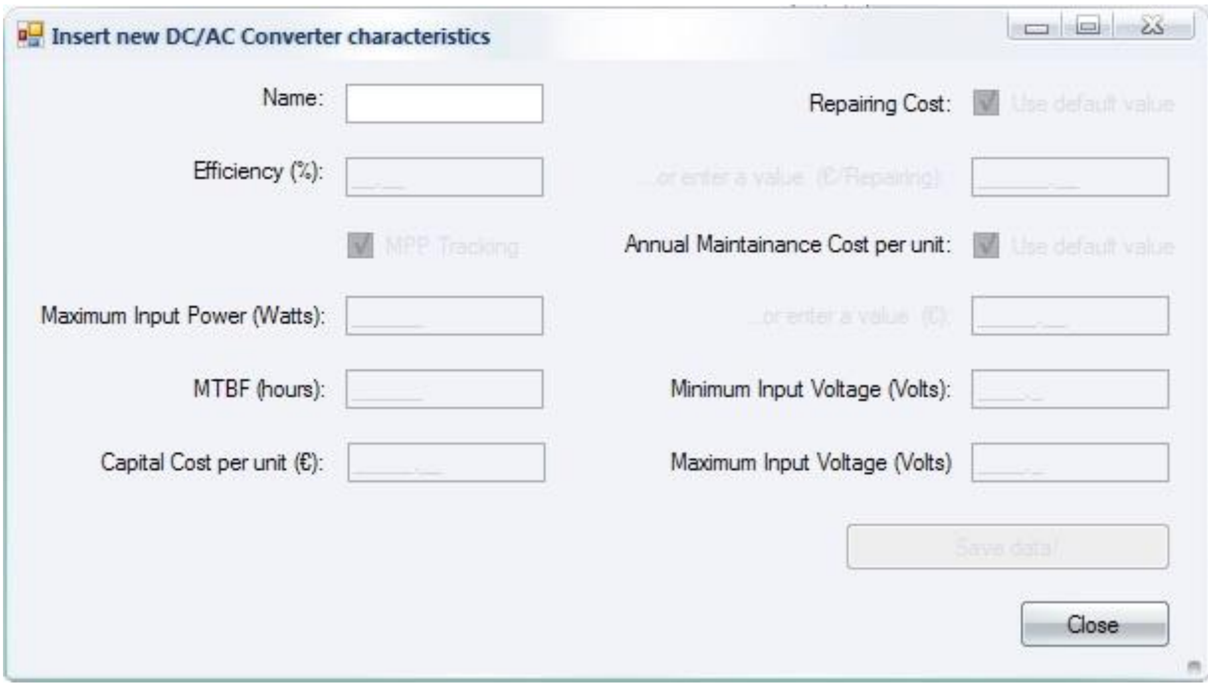
Κατά την εισαγωγή δεδομένων απαιτείται ο ορισμός του γεωγραφικού πλάτους της τοποθεσίας, του τύπου των μετρήσεων (μηνιαίο, ημερήσιο κ.τ.λ.), ενός μοναδικού τίτλου καθώς και η επιλογή ενός αρχείου κειμένου (.txt) με τις αντίστοιχες μετρήσεις όπου σε κάθε γραμμή υπάρχει και μια μέτρηση. Το πλήθος των μετρήσεων πρέπει να ισούται με το πλήθος που ορίζεται από τον τύπο μέτρησης (π.χ. για μηνιαίες τιμές απαιτούνται 12 τιμές, για ημερήσιες 365 τιμές κ.λπ.). Σε διαφορετική περίπτωση εμφανίζεται σχετικό μήνυμα.

Στο Σχήμα 7.17 εμφανίζεται η φόρμα εισαγωγής μιας συσκευής Φ/Β πλαισίου στη βάση δεδομένων. Οι είσοδοι που απαιτούνται είναι, κατά σειρά εισαγωγής, ο τίτλος της συσκευής, η τάση ανοικτοκύκλωσης, το ρεύμα βραχυκύκλωσης, η τάση και το ρεύμα στο σημείο μέγιστης ισχύος, η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς, η θερμοκρασία NCOT, ο ρυθμός μείωσης της τάσης ανοικτοκύκλωσης πάνω από τους 25 ^{o}C, το κόστος αγοράς και εγκατάστασης, το ετήσιο κόστος συντήρησής του, οι δύο διαστάσεις του και ο χρονικός ορίζοντας στον οποίο εγγυάται την απόδοσή του ο κατασκευαστής. Σχετικά με τη θερμοκρασία NCOT η προεπιλεγμένη τιμή είναι η συνήθης τιμή των 44 ^{o}C, ενώ σχετικά με το ρυθμό μείωσης της τάσης ανοικτοκύκλωσης η τιμή του πρέπει να είναι πάντοτε αρνητική. Όσον αφορά στο κόστος συντήρησης ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον προεπιλεγμένο τρόπο ορισμού του, οπότε αυτό τίθεται ετησίως ίσο με το 1 % επί του κόστους αγοράς και εγκατάστασης.



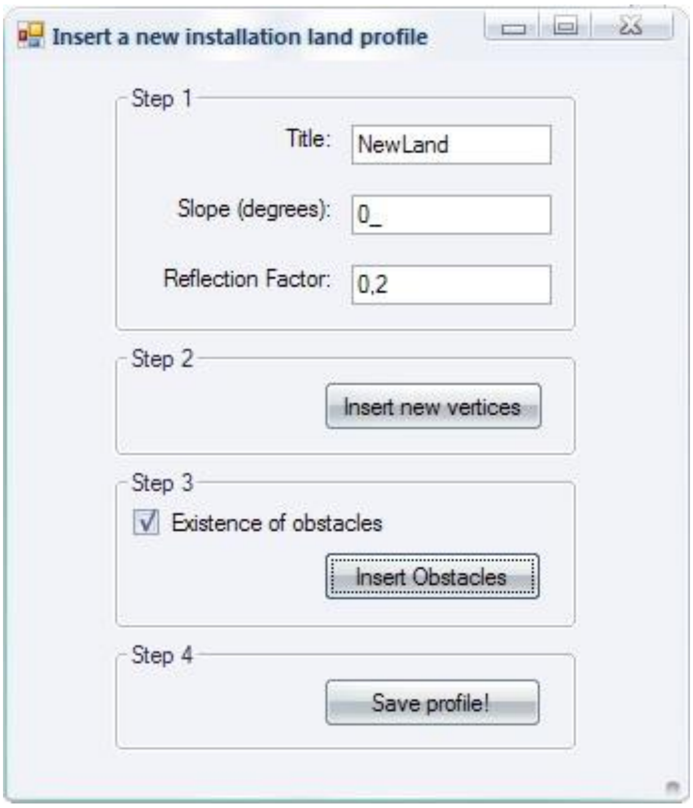
Σχήμα 7.17: Η φόρμα εισαγωγής μιας συσκευής Φ/Β πλαισίου στη βάση δεδομένων

Στο Σχήμα 7.18 εμφανίζεται η φόρμα εισαγωγής μιας συσκευής μετατροπέα DC/AC στη βάση δεδομένων. Οι είσοδοι που απαιτούνται είναι, κατά σειρά εισαγωγής, ο τίτλος της συσκευής, η απόδοση μετατροπής του, η ύπαρξη λειτουργίας MPPT, η μέγιστη ισχύς εισόδου, ο μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών, MTBF, το κόστος αγοράς και εγκατάστασης, το ετήσιο κόστος συντήρησής του, το κόστος επισκευής του, η ελάχιστη τάση εισόδου του και η μέγιστη τάση εισόδου του. Όσον αφορά στο κόστος συντήρησης ο χρήστης μπορεί να επιλέξει τον προεπιλεγμένο τρόπο ορισμού του, οπότε αυτό τίθεται ετησίως ίσο με το 1 % επί του κόστους αγοράς και εγκατάστασης. Αντίστοιχα, για το κόστος επισκευής, σύμφωνα με τον προεπιλεγμένο τρόπο ορισμού του, αυτό τίθεται ίσο με το 1,5 % επί του κόστους αγοράς και εγκατάστασης. Σχετικά με τη λειτουργία MPPT αν επιλεγεί η ύπαρξη της λειτουργίας αυτής στο μετατροπέα, τότε η αντίστοιχη ακρίβεια τίθεται ίση με 100 %, ενώ σε διαφορετική περίπτωση τίθεται ίση με 70 %, όπως προέκυψε από μετρήσεις που έγιναν στο εργαστήριο Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας του Πολυτεχνείου Κρήτης με χρήση ενός απλού εμπορικά διαθέσιμου μετατροπέα χωρίς δυνατότητα MPPT [42].

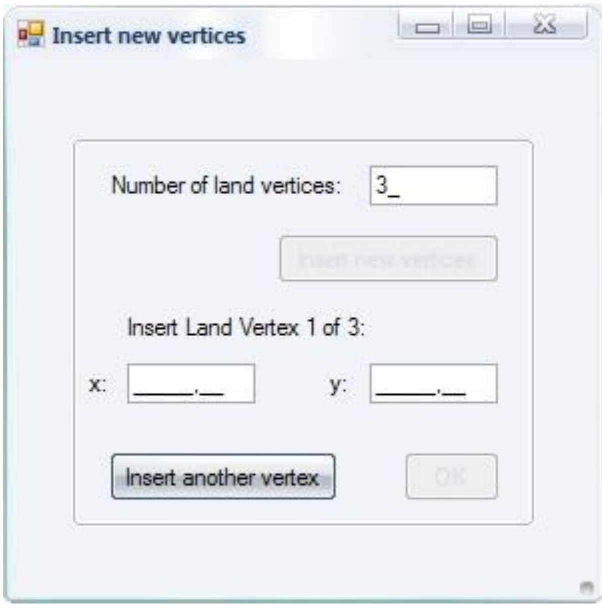


Σχήμα 7.18: Η φόρμα εισαγωγής μιας συσκευής μετατροπέα DC/AC στη βάση δεδομένων

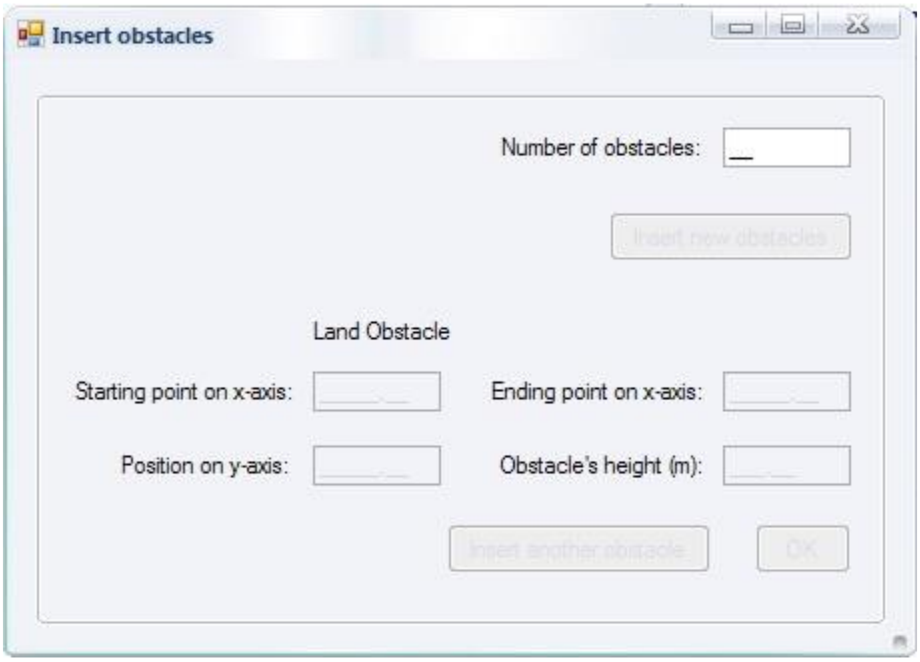
Στο Σχήμα 7.19 φαίνεται η βασική φόρμα εισαγωγής ενός νέου προφίλ διαθέσιμης έκτασης προς εγκατάσταση. Οι απαιτούμενες είσοδοι αρχικά είναι ο τίτλος του προφίλ, η κλίση της έκτασης και ο συντελεστής ανάκλασης της γης στην έκταση αυτή, ρ. Η προεπιλεγμένη τιμή που ισχύει για την πλειοψηφία των εκτάσεων είναι ίση με 0,2. Στη συνέχεια ακολουθεί η εισαγωγή των κορυφών της έκτασης, μέσω της φόρμας που φαίνεται στο Σχήμα 7.20. Σε αυτή τη φόρμα, ο χρήστης εισάγει το πλήθος των κορυφών και στη συνέχεια για κάθε μια κορυφή εισάγει τις συντεταγμένες της x, y όπου ο άξονας x είναι ο άξονας Δύσης – Ανατολής και ο άξονας y είναι ο άξονας Νότου – Βορρά. Όταν ολοκληρωθεί και η διαδικασία εισαγωγής των κορυφών, ο χρήστης καλείται να επιλέξει την ύπαρξη εμποδίων. Αν επιλέξει να εισάγει εμπόδια, τότε μέσω της φόρμας που φαίνεται στο Σχήμα 7.21 εισάγει το πλήθος τους και για κάθε ένα εισάγει τα σημεία έναρξης και τερματισμού τους ως προς τον άξονα x, τη θέση τους ως προς τον άξονα y και το ύψος τους με επίπεδο αναφοράς το οριζόντιο επίπεδο στο οποίο εφάπτεται το νοτιότερο άκρο της έκτασης. Το ύψος του κάθε εμποδίου είναι, ουσιαστικά, η διαφορά ύψους του από το νοτιότερο άκρο της έκτασης.



Σχήμα 7.19: Η φόρμα εισαγωγής του προφίλ μιας διαθέσιμης έκτασης στη βάση δεδομένων



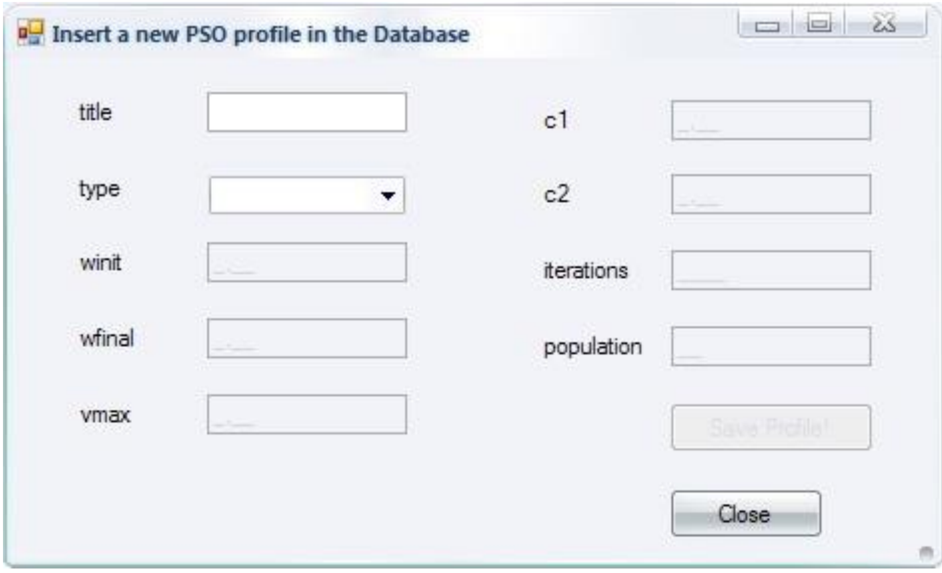
Σχήμα 7.20: Η φόρμα εισαγωγής των κορυφών μιας έκτασης στη βάση δεδομένων



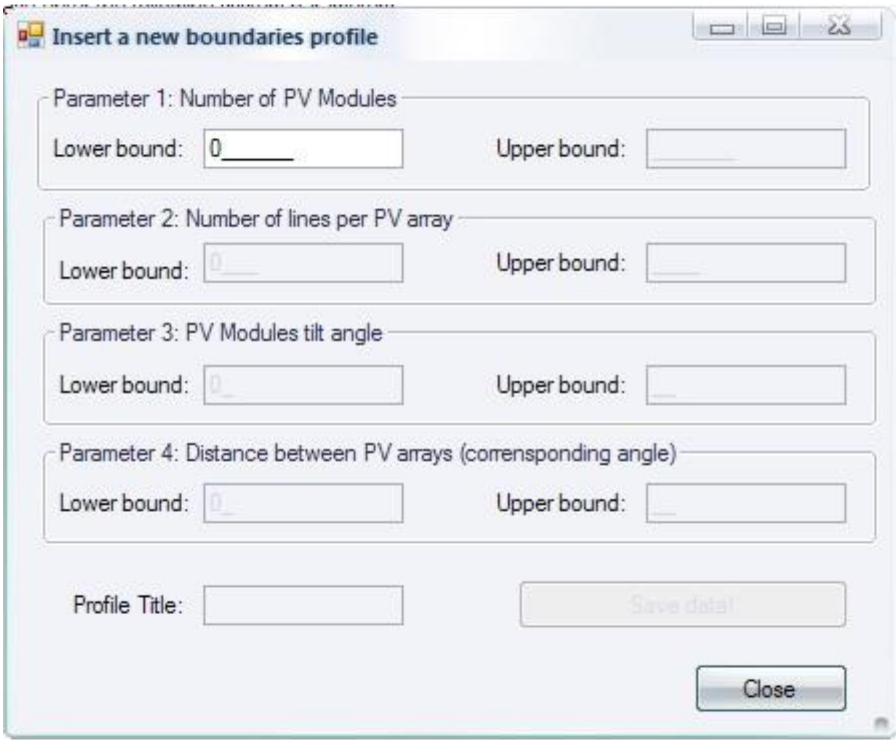
Σχήμα 7.21: Η φόρμα εισαγωγής εμποδίων μιας έκτασης στη βάση δεδομένων

Στο Σχήμα 7.22 φαίνεται η φόρμα εισαγωγής ενός νέου προφίλ για τον αλγόριθμο PSO. Ο χρήστης καλείται αρχικά να εισάγει ένα τίτλο για το προφίλ και να επιλέξει ένα τύπο PSO μεταξύ των Inertia PSO και CPSO. Στη συνέχεια καλείται να εισάγει την αρχική τιμή και την τελική τιμή του συντελεστή αδράνειας (μόνο στην περίπτωση που επιλεγεί ο τύπος Inertia PSO), τη μέγιστη επιτρεπτή τιμή ταχύτητας των σωματιδίων υπό τη μορφή ποσοστού επί του εύρους της κάθε μεταβλητής, τους σταθερούς συντελεστές c_1 και c_2, το πλήθος των επαναλήψεων και, τέλος, το μέγεθος του πληθυσμού.

Στο Σχήμα 7.23 φαίνεται η φόρμα εισαγωγής ενός νέου προφίλ ορίων του χώρου αναζήτησης της βελτιστοποίησης. Μέσω αυτής της φόρμας, ο χρήστης εισάγει ένα τίτλο για το προφίλ αυτό και τα άνω και κάτω όρια για τις τέσσερις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος. Οι προεπιλεγμένες τιμές για τα κάτω όρια έχουν τεθεί ίσες με μηδέν.



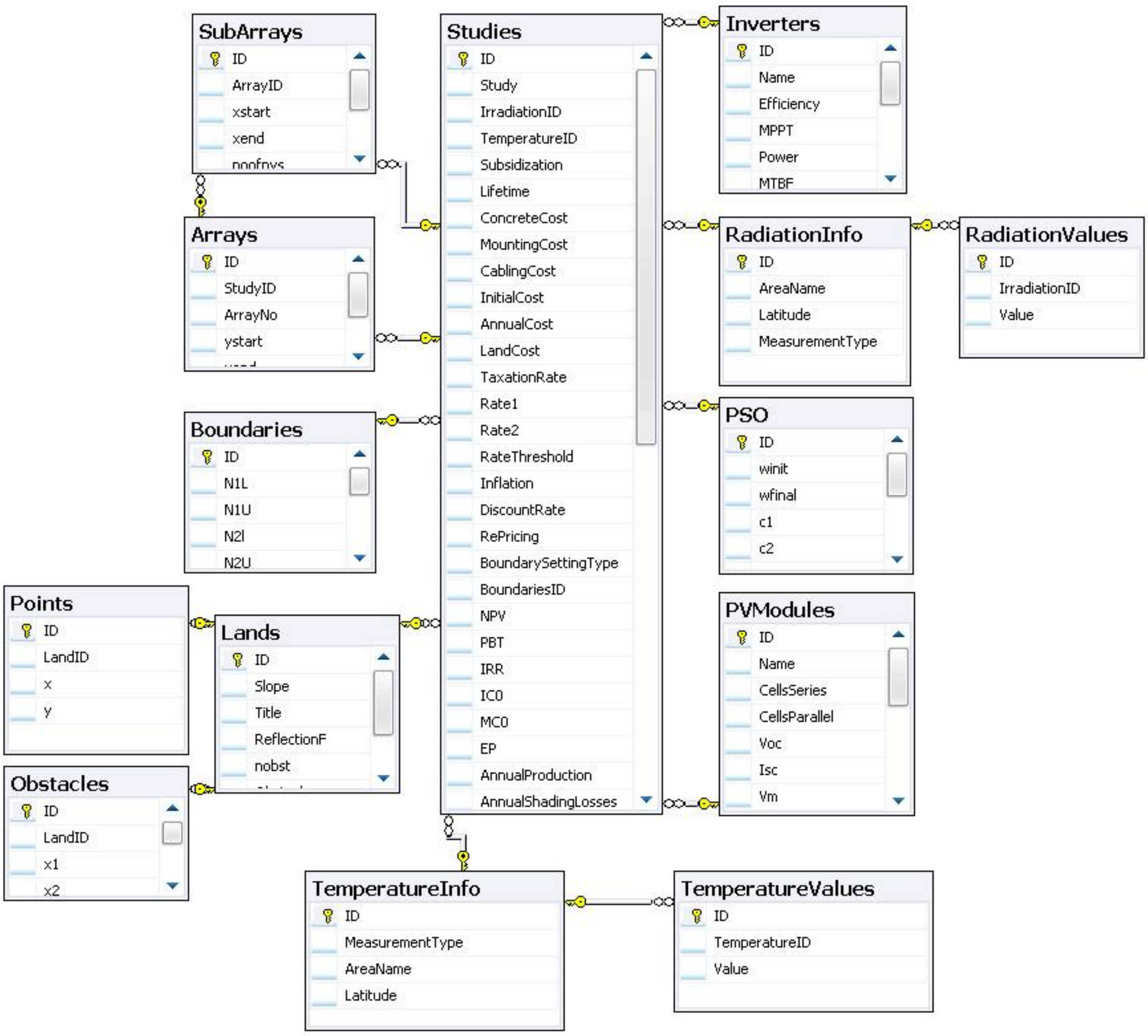
Σχήμα 7.22: Η φόρμα εισαγωγής προφίλ ρυθμίσεων του αλγορίθμου PSO στη βάση δεδομένων



Σχήμα 7.23: Η φόρμα εισαγωγής προφίλ άνω και κάτω ορίων των μεταβλητών απόφασης του προβλήματος στη βάση δεδομένων

7.6 Η δομή της βάσης δεδομένων του λογισμικού

Στο Σχήμα 7.24 φαίνεται το Σχεσιακό Διάγραμμα (Entity Relationship Model, ERM) της βάσης δεδομένων που αναπτύχθηκε για το λογισμικό της παρούσας εργασίας. Στο διάγραμμα αυτό φαίνονται οι οντότητες (entities) που χρησιμοποιούνται με μερικά από τα χαρακτηριστικά τους (attributes) καθώς και οι σχέσεις που συνδέουν τις οντότητες αυτές.



Σχήμα 7.24: Το Σχεσιακό Διάγραμμα της βάσης δεδομένων του λογισμικού.

8. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

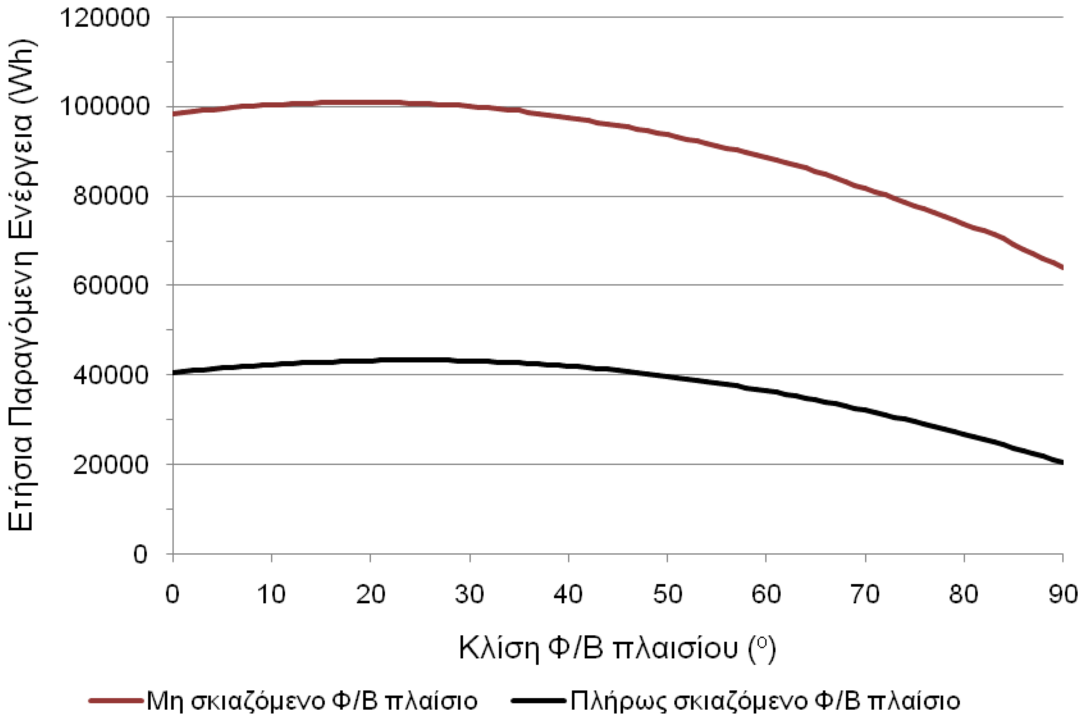
8.1 Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται διάφορα αποτελέσματα που προέκυψαν με χρήση του λογισμικού PVSYSopt της παρούσας εργασίας και για διάφορα υποθετικά σενάρια συστημάτων. Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παρακάτω ο ετήσιος πληθωρισμός τίθεται ίσος με 4 % βάσει προβλέψεων που αφορούν στη συμπεριφορά των οικονομικών δεικτών κατά τη διάρκεια της παρούσας ανάλυσης. Επίσης, το ετήσιο προεξοφλητικό επιτόκιο, αντιστοίχως, υπολογίζεται ίσο με 8 %. Στην παράγραφο 8.2 παρουσιάζονται διάφορα αποτελέσματα προσομοιώσεων της συνολικής ετήσιας ενεργειακής παραγωγής ενός Φ/Β πλαισίου που δε σκιάζεται ποτέ κατά τη διάρκεια του έτους και ενός Φ/Β πλαισίου που σκιάζεται πλήρως και διαρκώς για διάφορους τύπους συσκευών, διάφορες τοποθεσίες εγκατάστασης και διάφορες κλίσεις του Φ/Β πλαισίου. Στην παράγραφο 8.3 παρουσιάζονται διάφορα ενδεικτικά αποτελέσματα υποθετικών μελετών που εκπονήθηκαν με χρήση του λογισμικού PVSYSopt και στην παράγραφο 8.4 αναλύεται η επίδραση των παραμέτρων της επιδότησης του κόστους της αρχικής εγκατάστασης και της φορολογίας των ακαθάριστων εσόδων.

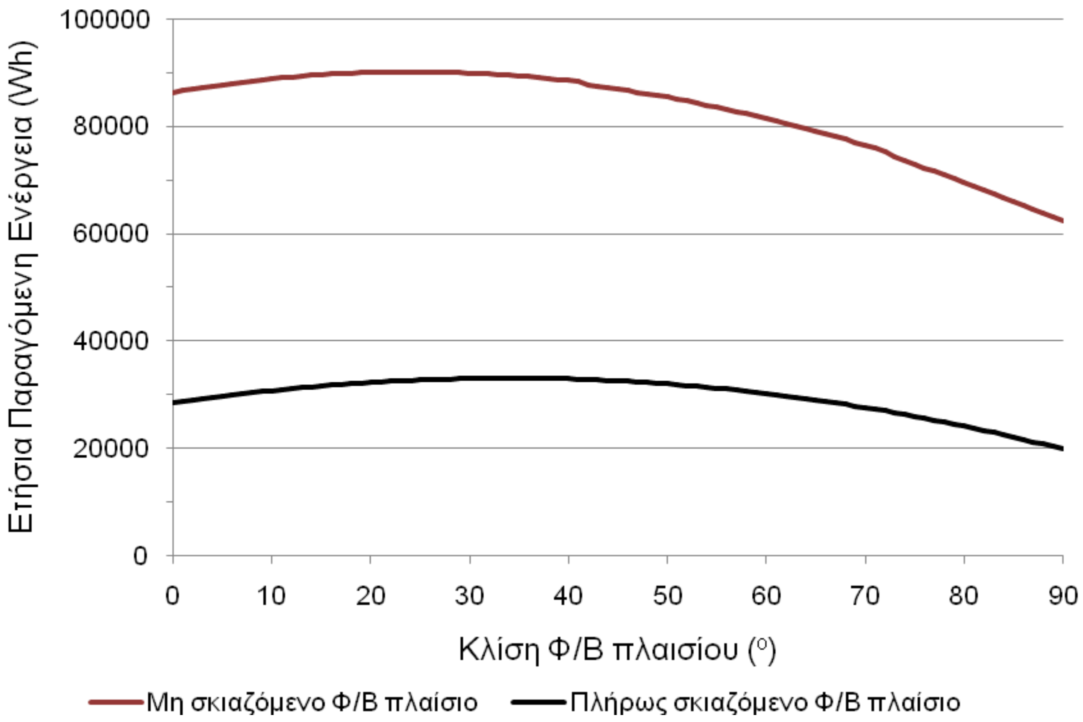
.

8.2 Ενεργειακή παραγωγή και απώλειες λόγω σκίασης

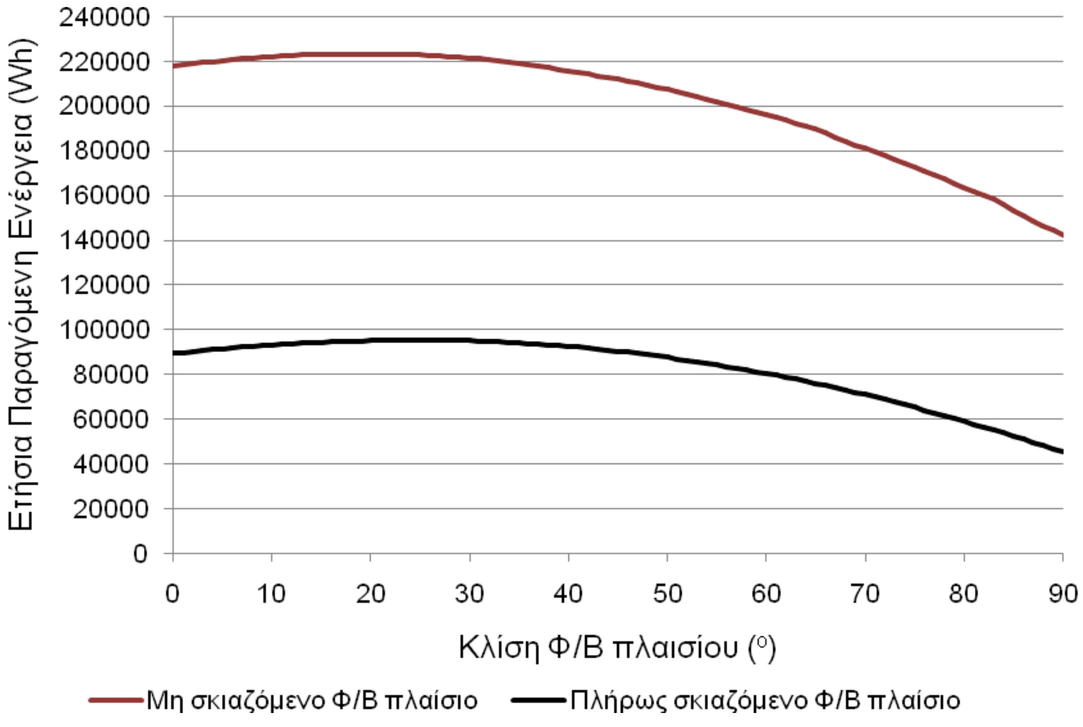
Προκειμένου να μελετηθεί η επιρροή της σκίασης, προσομοιώθηκε η ενεργειακή παραγωγή δύο διαφορετικών τύπων Φ/Β πλαισίων για δύο διαφορετικές τοποθεσίες της Ελλάδας και για όλες τις κλίσεις από 0 – 90 μοίρες. Για κάθε συνδυασμό συσκευής και τοποθεσίας μελετήθηκε η ετήσια ενεργειακή παραγωγή στην περίπτωση που το Φ/Β πλαίσιο δε σκιάζεται ποτέ κατά τη διάρκεια του έτους καθώς και στην περίπτωση που το Φ/Β πλαίσιο σκιάζεται πλήρως καθ’ όλη τη διάρκεια του έτους. Η προσομοίωση έγινε για τις συσκευές Shell SM-50 και Shell SM-110 με μέγιστη ονομαστική ισχύ 50 W και 110 W αντίστοιχα. Οι περιοχές για τις οποίες έγιναν οι προσομοιώσεις είναι τα Χανιά και η Κομοτηνή, με γεωγραφικό πλάτος 35 ^{o} και 41 ^{o} αντίστοιχα. Τα μετεωρολογικά δεδομένα για τα Χανιά προέκυψαν από μετρήσεις που έγιναν στο Πολυτεχνείο Κρήτης και πρόκειται για ωριαίες τιμές θερμοκρασίας και μέσες ημερήσιες τιμές ακτινοβολίας, ενώ για την Κομοτηνή πρόκειται για μέσες μηνιαίες τιμές θερμοκρασίας και ακτινοβολίας [22]. Στα Σχήματα 8.1, 8.2, 8.3 και 8.4 παρουσιάζεται η συνολική ετησίως παραγόμενη ενέργεια (Wh) για διάφορες κλίσεις Φ/Β πλαισίου για τον τύπο συσκευής Shell SM-50 εγκατεστημένο στα Χανιά, τον τύπο συσκευής Shell SM-50 εγκατεστημένο στην Κομοτηνή, τον τύπο συσκευής Shell SM-110 εγκατεστημένο στα Χανιά και τον τύπο συσκευής Shell SM-110 εγκατεστημένο στην Κομοτηνή, αντίστοιχα.



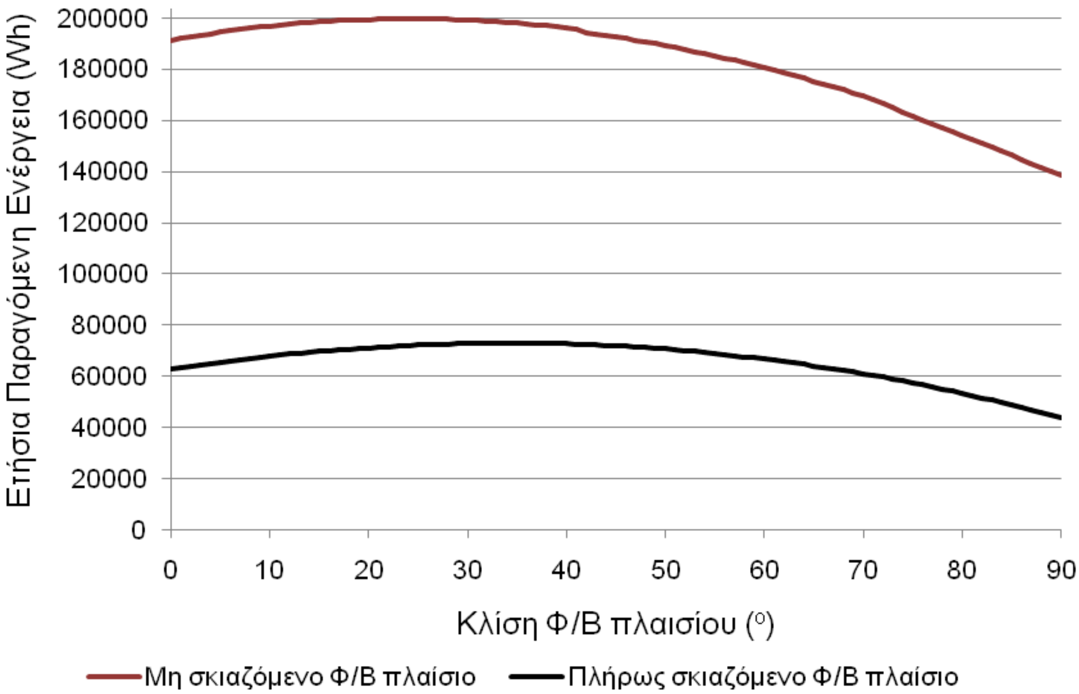
Σχήμα 8.1: Η ετήσια ενεργειακή παραγωγή ενός μη σκιαζόμενου και ενός πλήρως σκιαζόμενου Φ/Β πλαισίου, τύπου Shell SM-50, στα Χανιά.



Σχήμα 8.2: Η ετήσια ενεργειακή παραγωγή ενός μη σκιαζόμενου και ενός πλήρως σκιαζόμενου Φ/Β πλαισίου, τύπου Shell SM-50, στην Κομοτηνή.



Σχήμα 8.3: Η ετήσια ενεργειακή παραγωγή ενός μη σκιαζόμενου και ενός πλήρως σκιαζόμενου Φ/Β πλαισίου, τύπου Shell SM-110, στα Χανιά.

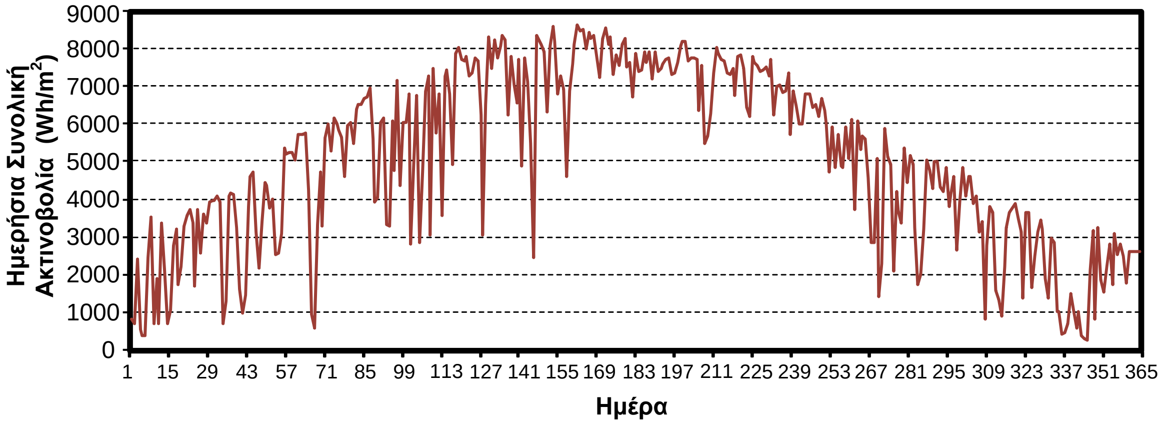


Σχήμα 8.4: Η ετήσια ενεργειακή παραγωγή ενός μη σκιαζόμενου και ενός πλήρως σκιαζόμενου Φ/Β πλαισίου, τύπου Shell SM-110, στην Κομοτηνή.

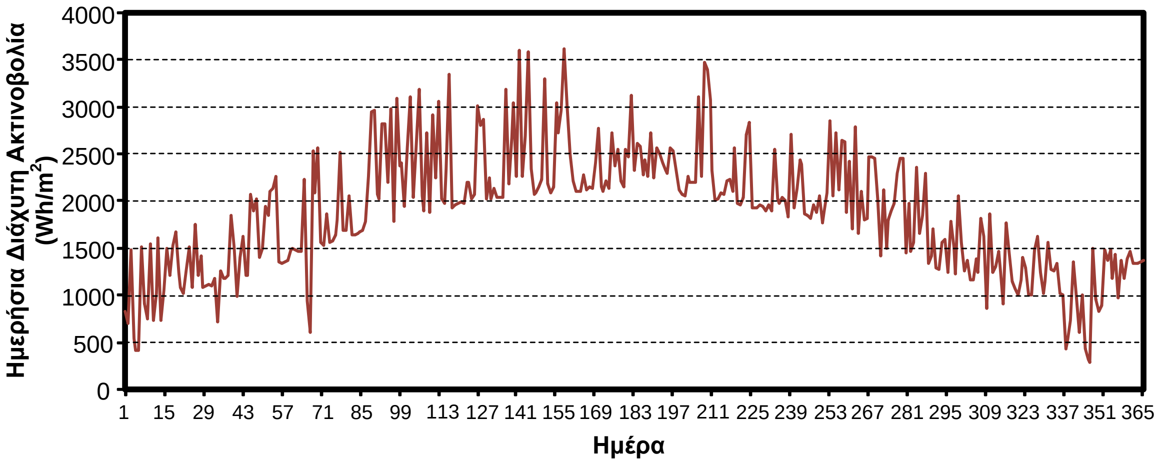
Στα Σχήματα 8.1 – 8.4 παρατηρείται καταρχήν ότι η μέγιστη ενεργειακή παραγωγή είναι για κλίση πλαισίων κοντά στην τιμή του γεωγραφικού πλάτους αλλά σε λίγο χαμηλότερες κλίσεις. Παρόλα αυτά οι διακυμάνσεις της ενεργειακής παραγωγής είναι σχετικά μικρές και στις τέσσερις περιπτώσεις και μόνο για μεγάλες κλίσεις (> 70 ^{o}) η μείωση της παραγόμενης ενέργειας σε σχέση με τη μέγιστη δυνατή είναι σημαντική. Επίσης, παρατηρείται ότι ένα Φ/Β πλαίσιο που σκιάζεται πλήρως καθ' όλη τη διάρκεια του έτους έχει μειωμένη ενεργειακή παραγωγή αλλά όχι υπερβολικά χαμηλή. Επίσης, από τις καμπύλες των Σχημάτων 8.1 – 8.4 προκύπτει ότι η μείωση αυτή εξαρτάται τόσο από τον τύπο της συσκευής όσο και από τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας που εγκαθίσταται, καθώς για την πρώτη συσκευή η μέση παραγωγή ενός σκιαζόμενου Φ/Β πλαισίου είναι το 40,7 % και το 40,5 % της μέσης παραγωγής ενός μη-σκιαζόμενου Φ/Β πλαισίου για την πρώτη και τη δεύτερη τοποθεσία, αντίστοιχα, ενώ για τη δεύτερη συσκευή τα αντίστοιχα ποσοστά είναι ίσα με 35,7 % και 35,6 %.

8.3 Ενδεικτικά αποτελέσματα

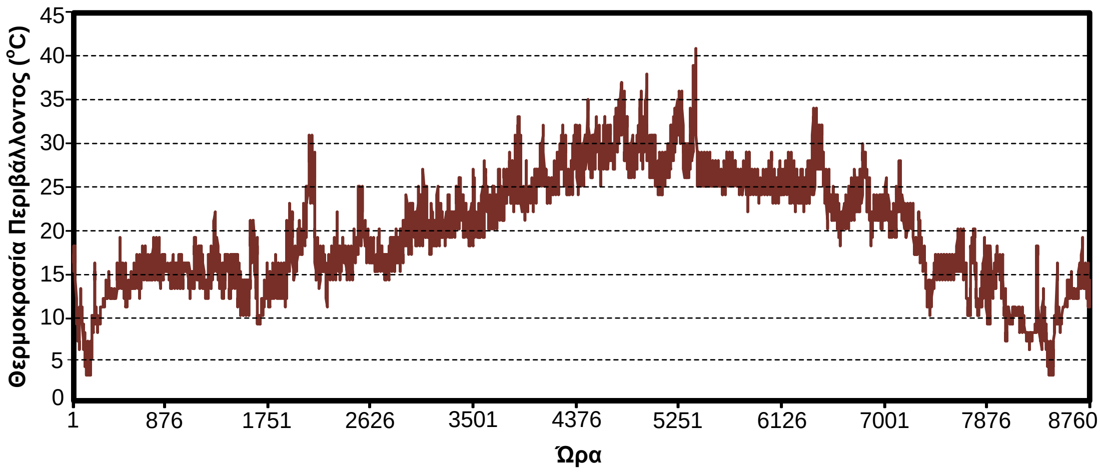
Στην παράγραφο αυτή παρουσιάζονται ορισμένες ενδεικτικές μελέτες για συστήματα Φ/Β πλαισίων, εγκατεστημένων στα Χανιά. Τα μετεωρολογικά δεδομένα που χρησιμοποιούνται προέκυψαν στο Πολυτεχνείο Κρήτης στα Χανιά (γεωγραφικό πλάτος: 35 ^{o}) κατά το έτος 2003 με κατάλληλα συστήματα μέτρησης. Στα Σχήματα 8.5, 8.6 και 8.7 παρουσιάζονται η συνολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο, η ημερήσια διάχυτη ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο και η μέση ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος, αντίστοιχα.



Σχήμα 8.5: Η συνολική ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο.



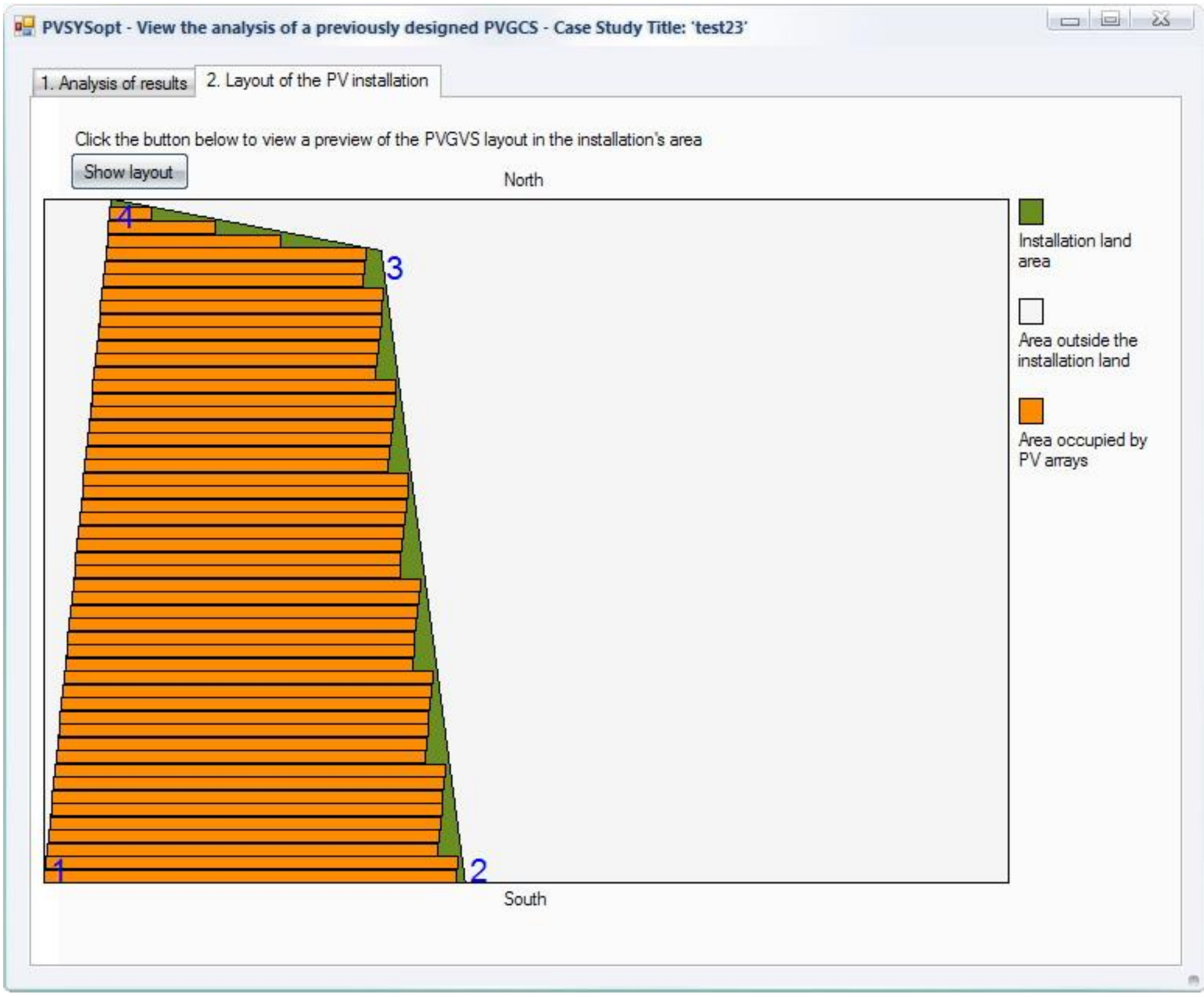
Σχήμα 8.6: Η διάχυτη ημερήσια ηλιακή ακτινοβολία στο οριζόντιο επίπεδο



Σχήμα 8.7: Η μέση ωριαία θερμοκρασία περιβάλλοντος

Στον Πίνακα 8.1 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης για μια έκταση 4 κορυφών, με κλίση 10 ^{o} και συνολικό εμβαδόν 800,66 m^2. Για τη μελέτη αυτή επιλέχθηκε ο τύπος Φ/Β Πλαισίου Kyocera KC-170 (με μέγιστη ισχύ ίση με 170 W) και ο τύπος μετατροπέα DC/AC Sunny Boy 7000 (με μέγιστη ισχύ εισόδου ίση με 7000 W). Ο χρονικός ορίζοντας του συστήματος τέθηκε ίσος με 25 χρόνια, όσος είναι ο χρόνος εγγυημένης λειτουργίας του Φ/Β πλαισίου που δίνεται από τον κατασκευαστή του, το ύψος της επιδότησης επί του αρχικού κεφαλαίου τέθηκε ίσο με 30 %, το ύψος της φορολογίας ίσο με 25 %, το ποσοστό της ετήσιας ανατίμησης της ενέργειας που πωλείται ίσο με 0 %, όπως ορίζεται από την ισχύουσα Ελληνική Νομοθεσία για τα συστήματα ΑΠΕ και τέλος, η τιμή πώλησης της ενέργειας τέθηκε ίση με 0,4 €/KWh. Επίσης, το κόστος της έκτασης της εγκατάστασης θεωρείται μηδενικό, το κόστος της καλωδίωσης τέθηκε ίσο με 5 €/m, το κόστος κατασκευής των μεταλλικών δομών των βάσεων στήριξης ίσο με 25 €/m και το κόστος κατασκευής των βάσεων από σκυρόδεμα ίσο με 230 €/m^3. Για τη βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες παράμετροι της μεθόδου PSO και του χώρου αναζήτησης του προβλήματος (Παράγραφος 7.3). Στο Σχήμα 8.8 φαίνεται η διάταξη των Φ/Β πλαισίων στη διαθέσιμη έκταση, όπως προκύπτει από τη βελτιστοποίηση με το λογισμικό PVSYSopt.

Πίνακας 8.1 Αποτελέσματα μελέτης για ένα σύστημα εγκατεστημένο σε έκταση 4 κορυφών, κλίσης 10 ^{o} και με συνολικό εμβαδόν 800,66 m^2	
Πλήθος Φ/Β πλαισίων	1.510
Πλήθος μετατροπέων DC/AC	42
Κλίση Φ/Β πλαισίων (^{o})	67
Καθαρή Παρούσα Αξία (€)	305.729,2
Χρόνος Απόσβεσης (έτη)	12,2
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (%)	13
Αρχικό Κεφάλαιο (€)	813.163,4
Δαπάνες Συντήρησης (€)	153.496,672
Συνολικά Έσοδα (€)	1.272.389,25
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW_p)	256,7
Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (KWh)	422.558,781
Ετήσιες Ενεργειακές Απώλειες λόγω σκίασης (KWh)	25.239,21
Πλήθος Συστοιχιών	51
Πλήθος Γραμμών ανά Συστοιχία	1
Απόσταση μεταξύ Συστοιχιών (m)	0
Διάταξη Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς ισχύος DC/AC	Σε 41 μετατροπείς 2 παράλληλοι κλάδοι με 18 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.
	Σε 1 μετατροπέα 1 παράλληλος κλάδος με 17 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.

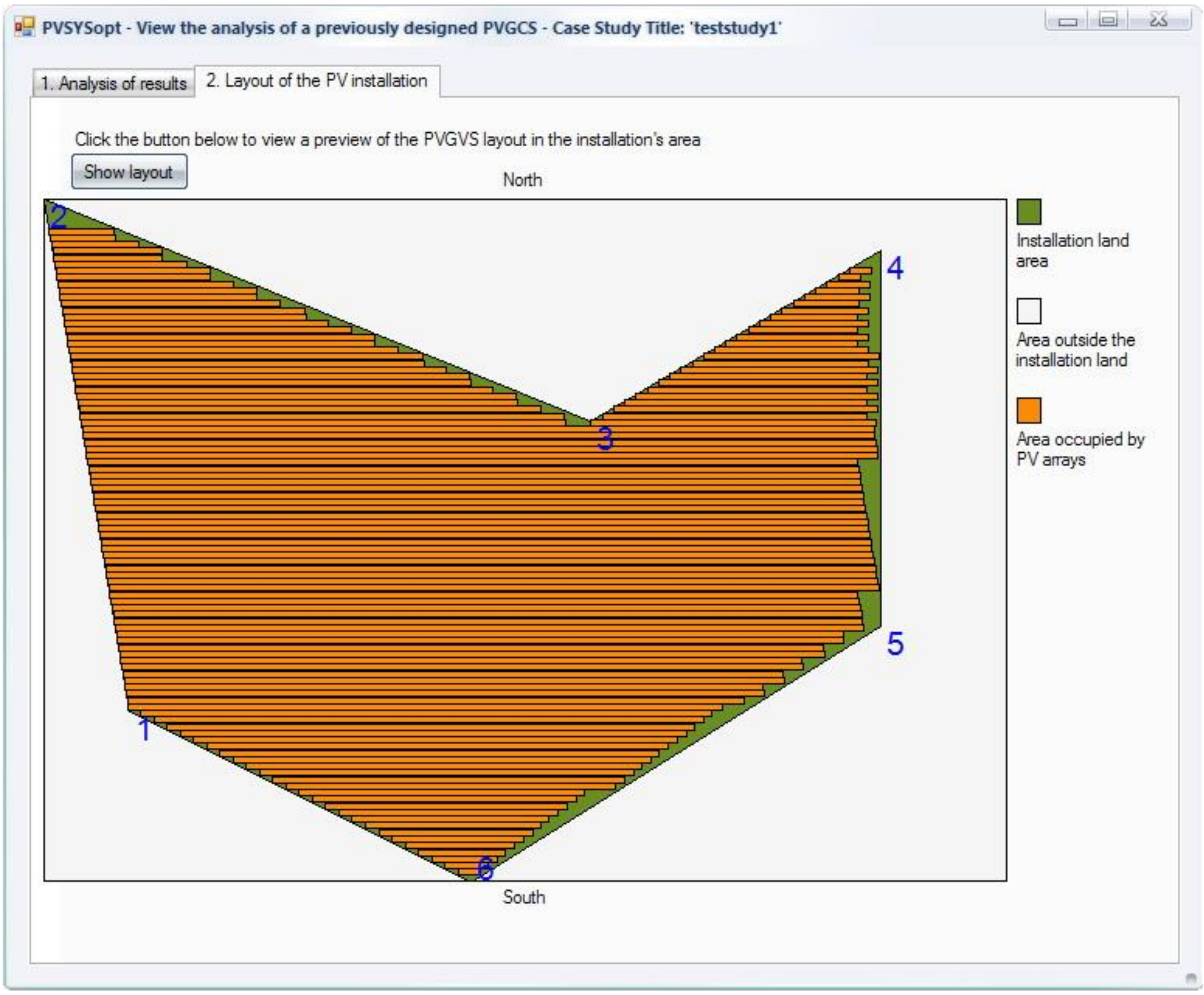


Σχήμα 8.8: Προεπισκόπηση της διάταξης των Φ/Β πλαισίων του συστήματος που περιγράφεται στον Πίνακα 8.1.

Στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης για μια έκταση 6 κορυφών μη κυρτού σχήματος, με κλίση 0 ^{o} και συνολικό εμβαδόν 1211 m^2. Για τη μελέτη αυτή επιλέχθηκε ο τύπος Φ/Β Πλαισίου Kyocera KC-170 (με μέγιστη ισχύ ίση με 170 W) και ο τύπος μετατροπέα DC/AC Sunny Boy 7000 (με μέγιστη ισχύ εισόδου ίση με 7000 W). Ο χρονικός ορίζοντας του συστήματος τέθηκε ίσος με 25 χρόνια, το ύψος της επιδότησης επί του αρχικού κεφαλαίου τέθηκε ίσο με 30 %, το ύψος της φορολογίας ίσο με 25 %, το ποσοστό της ετήσιας ανατίμησης της ενέργειας που πωλείται ίσο με 0 %, όπως ορίζεται από την ισχύουσα Ελληνική Νομοθεσία για τα συστήματα ΑΠΕ και τέλος, όπως επίσης ορίζεται από το ισχύον νομικό πλαίσιο για τα μη διασυνδεδεμένα νησιά, όπως η Κρήτη, η τιμή πώλησης της ενέργειας για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ μέχρι 100 kW$_p$ τέθηκε ίση με 0,5 €/KWh και

0,45 €/KWh για τα υπόλοιπα. Επίσης, το κόστος της έκτασης της εγκατάστασης θεωρείται ίσο με 5 €/m^2, ενώ τα κόστη της καλωδίωσης της κατασκευής των μεταλλικών δομών των βάσεων στήριξης και της κατασκευής των βάσεων από σκυρόδεμα θεωρούνται μηδενικά. Για τη βελτιστοποίηση χρησιμοποιήθηκαν οι προεπιλεγμένες παράμετροι της μεθόδου PSO και του χώρου αναζήτησης του προβλήματος (Παράγραφος 7.3). Στο Σχήμα 8.9 φαίνεται η διάταξη των Φ/Β πλαισίων στη διαθέσιμη έκταση, όπως προκύπτει από τη βελτιστοποίηση με το λογισμικό PVSYSopt.

Πίνακας 8.2 Αποτελέσματα μελέτης για ένα σύστημα εγκατεστημένο σε μη κυρτή έκταση 6 κορυφών, κλίσης 0 ^{o} και με συνολικό εμβαδόν 1211 m^2	
Πλήθος Φ/Β πλαισίων	2.322
Πλήθος μετατροπέων DC/AC	65
Κλίση Φ/Β πλαισίων (^{o})	67
Καθαρή Παρούσα Αξία (€)	972.355,1
Χρόνος Απόσβεσης (έτη)	7,1
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (%)	19
Αρχικό Κεφάλαιο (€)	978.183,5
Δαπάνες Συντήρησης (€)	235.748,734
Συνολικά Έσοδα (€)	2.186.287,5
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW_p)	394,74
Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (KWh)	649.789,063
Ετήσιες Ενεργειακές Απώλειες λόγω σκίασης (KWh)	42.948,3555
Πλήθος Συστοιχιών	98
Πλήθος Γραμμών ανά Συστοιχία	1
Απόσταση μεταξύ Συστοιχιών (m)	0
Διάταξη Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς ισχύος DC/AC	Σε 64 μετατροπείς 2 παράλληλοι κλάδοι με 18 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.
	Σε 1 μετατροπέα 1 παράλληλος κλάδος με 18 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.

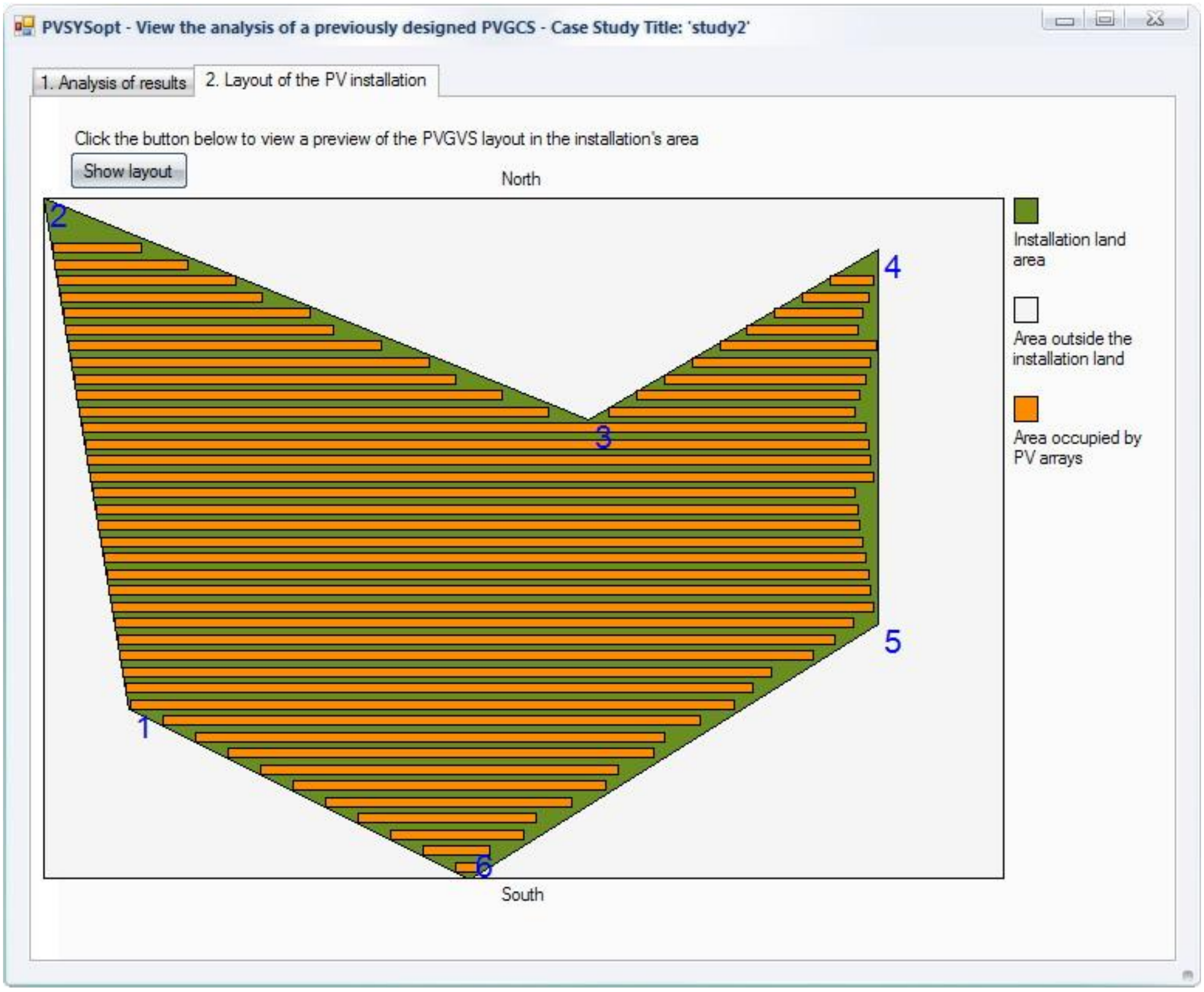


Σχήμα 8.9: Προεπισκόπηση της διάταξης των Φ/Β πλαισίων του συστήματος που περιγράφεται στον Πίνακα 8.2.

Στα αποτελέσματα που παρουσιάζονται παραπάνω παρατηρείται ότι η διαθέσιμη έκταση εκμεταλλεύεται κατά το μέγιστο δυνατόν, δεδομένων και των περιορισμών σχετικά με το πλήθος των Φ/Β πλαισίων που τίθενται από τις προδιαγραφές των μετατροπέων ισχύος DC/AC. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η κλίση των Φ/Β πλαισίων που επιλέγεται καθώς και η απόσταση μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι επιλέγονται και στις δύο περιπτώσεις μεγάλες κλίσεις ($67\ ^{o}$) και μηδενικές αποστάσεις μεταξύ συστοιχιών. Με αυτό τον τρόπο, εγκαθίσταται μεγάλος αριθμός Φ/Β πλαισίων, αναλογικά με το μέγεθος της έκτασης και, έτσι, οι απολαβές από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας είναι αυξημένες, ενώ αυξημένο είναι και το αρχικό κεφάλαιο που απαιτείται. Σχετικά με τις ενεργειακές απώλειες λόγω σκίασης εξαιτίας των μηδενικών αποστάσεων μεταξύ συστοιχιών, παρατηρείται ότι και στις δύο περιπτώσεις είναι αρκετά περιορισμένες και συγκεκριμένα είναι της τάξης του 6 %. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι η σκίαση επικρατεί κυρίως τις ώρες που ανατέλλει και δύει ο Ήλιος, κατά τις οποίες, όμως, η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι αρκετά χαμηλή και, συνεπώς, η παραγόμενη ενέργεια για αυτές είναι επίσης σχετικά μικρή. Ακόμα, παρατηρείται ότι οι οικονομικοί δείκτες της επένδυσης στα συστήματα αυτά επηρεάζονται σημαντικά από την τιμή πώλησης της ενέργειας και τα κόστη για τις καλωδιώσεις και τις βάσεις στήριξης των Φ/Β πλαισίων.

Στον Πίνακα 8.3 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης για την ίδια έκταση που παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.2 με χρήση διαφορετικού Φ/Β πλαισίου και επιλογή χαμηλότερων τιμών πώλησης της ενέργειας. Έτσι, χρησιμοποιείται ο τύπος συσκευής Shell SM-110 με μέγιστη ονομαστική ισχύ 110 W. Ο συγκεκριμένος τύπος συσκευής έχει το ίδιο κόστος (515 €) με τη συσκευή Kyocera KC-170, η οποία όμως έχει αρκετά υψηλότερη ισχύ (170 W). Συνεπώς για τη συσκευή Shell SM-110 το κόστος της ανά ισχύ είναι περίπου ίσο με 4,7 €/W, ενώ για τη συσκευή Kyocera KC-170 το αντίστοιχο κόστος είναι περίπου ίσο με 3 €/W. Επίσης, η τιμή πώλησης της ενέργειας για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ μέχρι 100 kW_p τέθηκε ίση με 0,45 €/KWh και 0,4 €/KWh για τα υπόλοιπα, δηλαδή 0,05 €/KWh χαμηλότερη από αυτή της προηγούμενης μελέτης. Οι υπόλοιπες παράμετροι της μελέτης παραμένουν οι ίδιες με αυτές που χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή των αποτελεσμάτων που παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.2. Στο Σχήμα 8.10 παρουσιάζεται η διάταξη των Φ/Β πλαισίων στη διαθέσιμη έκταση, όπως προκύπτει από τη βελτιστοποίηση με το λογισμικό PVSYSopt.

Πίνακας 8.3 Αποτελέσματα μελέτης για την έκταση της μελέτης του Πίνακα 8.2 με χρήση διαφορετικού τύπου Φ/Β πλαισίου	
Πλήθος Φ/Β πλαισίων	909
Πλήθος μετατροπέων DC/AC	46
Κλίση Φ/Β πλαισίων (^{o})	20
Καθαρή Παρούσα Αξία (€)	225.336,484
Χρόνος Απόσβεσης (έτη)	9,5
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (%)	15
Αρχικό Κεφάλαιο (€)	374.384,5
Δαπάνες Συντήρησης (€)	92.597,41
Συνολικά Έσοδα (€)	692.318,4
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW_p)	99,99
Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (KWh)	194.400,641
Ετήσιες Ενεργειακές Απώλειες λόγω σκίασης (KWh)	2.236,07031
Πλήθος Συστοιχιών	41
Πλήθος Γραμμών ανά Συστοιχία	1
Απόσταση μεταξύ Συστοιχιών (m)	0,3347
Διάταξη Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς ισχύος DC/AC	Σε 45 μετατροπείς 1 παράλληλος κλάδος με 20 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.
	Σε 1 μετατροπέα 1 παράλληλος κλάδος με 9 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.



Σχήμα 8.10: Προεπισκόπηση της διάταξης των Φ/Β πλαισίων του συστήματος που περιγράφεται στον Πίνακα 8.3.

Όπως φαίνεται από τα αποτελέσματα στον Πίνακα 8.3, για την ίδια έκταση που χρησιμοποιείται για τη μελέτη που παρουσιάστηκε στον Πίνακα 8.2 αλλά για διαφορετικές συσκευές και τιμές πώλησης της ενέργειας, προκύπτει αρκετά διαφορετική δομή συστήματος. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι η βέλτιστη λύση προκύπτει για εγκατεστημένη ισχύ ακριβώς κάτω από το κατώφλι αλλαγής της τιμής πώλησης της παραγόμενης ενέργειας. Μετά το κατώφλι αυτό (100 kW_p) η τιμή πώλησης πέφτει κατά 0,05 €/KWh. Συνέπεια αυτού είναι να αλλάζει σημαντικά και ο τρόπος διάταξης των Φ/Β πλαισίων εντός της διαθέσιμης έκτασης. Συγκεκριμένα, παρατηρείται ότι επιλέγεται μια μικρή κλίση και μια απόσταση περίπου 0,33 m μεταξύ των συστοιχιών. Αυτό οδηγεί σε ενεργειακές απώλειες λόγω σκίασης της τάξης του 1 %.

8.4 Επίδραση της επιδότησης και της φορολογίας

Στην παράγραφο αυτή μελετάται η επίδραση της επιδότησης και της φορολογίας στην περίπτωση του συστήματος που παρουσιάζεται στον Πίνακα 8.2. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 8.2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μελέτης για μια έκταση 6 κορυφών μη κυρτού σχήματος, με μηδενική κλίση. Για τη μελέτη αυτή έχει επιλεγεί ο τύπος Φ/Β Πλαισίου Kyocera KC-170 και ο τύπος μετατροπέα DC/AC Sunny Boy 7000. Ο χρονικός ορίζοντας του συστήματος τέθηκε ίσος με 25 χρόνια, το ποσοστό της ετήσιας ανατίμησης της ενέργειας που πωλείται ίσο με 0 %, όπως ορίζεται από την ισχύουσα Ελληνική Νομοθεσία για τα συστήματα ΑΠΕ και τέλος, όπως επίσης ορίζεται από το ισχύον νομικό πλαίσιο, η τιμή πώλησης της ενέργειας για συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ μέχρι 100 kW_p τέθηκε ίση με 0,5 €/KWh και 0,45 €/KWh για τα υπόλοιπα. Επίσης, το κόστος της έκτασης της εγκατάστασης θεωρείται ίσο με 5 €/m^2, ενώ τα κόστη της καλωδίωσης της κατασκευής των μεταλλικών δομών των βάσεων στήριξης και της κατασκευής των βάσεων από σκυρόδεμα θεωρούνται μηδενικά. Στην περίπτωση αυτή το ύψος της επιδότησης επί του αρχικού κεφαλαίου είχε τεθεί ίσο με 30 %, και το ύψος της φορολογίας ίσο με 25 %. Στον Πίνακα 8.4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για το ίδιο σύστημα με ύψος επιδότησης ίσο με 30 % και μηδενική φορολογία, στον Πίνακα 8.5 για μηδενική επιδότηση και ποσοστό φορολογίας ίσο με 25 % και στον Πίνακα 8.6 τα αποτελέσματα για μηδενική επιδότηση και μηδενική φορολογία.

Πίνακας 8.4 Αποτελέσματα μελέτης για το σύστημα του Πίνακα 8.2 και μηδενική φορολογία	
Πλήθος Φ/Β πλαισίων	2.358
Πλήθος μετατροπέων DC/AC	66
Κλίση Φ/Β πλαισίων (^{o})	68
Καθαρή Παρούσα Αξία (€)	1.792.531,38
Χρόνος Απόσβεσης (έτη)	4,6
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (%)	27
Αρχικό Κεφάλαιο (€)	993.267,1
Δαπάνες Συντήρησης (€)	239.994,063
Συνολικά Έσοδα (€)	3.025.792,5
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW_p)	400,86
Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (KWh)	680.666,063
Ετήσιες Ενεργειακές Απώλειες λόγω σκίασης (KWh)	50.771,4961
Πλήθος Συστοιχιών	92
Πλήθος Γραμμών ανά Συστοιχία	1
Απόσταση μεταξύ Συστοιχιών (m)	0
Διάταξη Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς ισχύος DC/AC	Σε 65 μετατροπείς 2 παράλληλοι κλάδοι με 18 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.
	Σε 1 μετατροπέα 1 παράλληλος κλάδος με 18 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.

Πίνακας 8.5 Αποτελέσματα μελέτης για το σύστημα του Πίνακα 8.2 και μηδενική επιδότηση	
Πλήθος Φ/Β πλαισίων	2.322
Πλήθος μετατροπέων DC/AC	65
Κλίση Φ/Β πλαισίων (^{o})	67
Καθαρή Παρούσα Αξία (€)	559.188,6
Χρόνος Απόσβεσης (έτη)	11,9
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (%)	13
Αρχικό Κεφάλαιο (€)	1.391.350
Δαπάνες Συντήρησης (€)	235.748,734
Συνολικά Έσοδα (€)	2.186.287,5
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW_p)	394,74
Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (KWh)	649.789,063
Ετήσιες Ενεργειακές Απώλειες λόγω σκίασης (KWh)	42.948,3555
Πλήθος Συστοιχιών	98
Πλήθος Γραμμών ανά Συστοιχία	1
Απόσταση μεταξύ Συστοιχιών (m)	0
Διάταξη Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς ισχύος DC/AC	Σε 64 μετατροπείς 2 παράλληλοι κλάδοι με 18 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.
	Σε 1 μετατροπέα 1 παράλληλος κλάδος με 18 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.

Πίνακας 8.6 Αποτελέσματα μελέτης για το σύστημα του Πίνακα 8.2 και μηδενική επιδότηση και μηδενική φορολογία	
Πλήθος Φ/Β πλαισίων	2.322
Πλήθος μετατροπέων DC/AC	65
Κλίση Φ/Β πλαισίων (^{o})	67
Καθαρή Παρούσα Αξία (€)	1.287.951,016
Χρόνος Απόσβεσης (έτη)	7,5
Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης (%)	18
Αρχικό Κεφάλαιο (€)	1.391.350
Δαπάνες Συντήρησης (€)	235.748,734
Συνολικά Έσοδα (€)	2.915.049,75
Εγκατεστημένη Ισχύς (kW_p)	394,74
Ετήσια Παραγόμενη Ενέργεια (KWh)	649.789,063
Ετήσιες Ενεργειακές Απώλειες λόγω σκίασης (KWh)	42.948,3555
Πλήθος Συστοιχιών	98
Πλήθος Γραμμών ανά Συστοιχία	1
Απόσταση μεταξύ Συστοιχιών (m)	0
Διάταξη Φ/Β πλαισίων στους μετατροπείς ισχύος DC/AC	Σε 64 μετατροπείς 2 παράλληλοι κλάδοι με 18 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.
	Σε 1 μετατροπέα 1 παράλληλος κλάδος με 18 Φ/Β πλαίσια σε σειρά.

Από τα αποτελέσματα των Πινάκων 8.2 και 8.4 – 8.6 προκύπτει ότι οι παράγοντες της επιδότησης και της φορολογίας επηρεάζουν σημαντικά τους οικονομικούς δείκτες της επένδυσης στα αντίστοιχα συστήματα. Συγκεκριμένα, για μηδενική φορολογία παρατηρείται ότι ο χρόνος απόσβεσης μειώνεται σε μεγάλο βαθμό, ενώ παράλληλα αυξάνεται σημαντικά ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης της επένδυσης καθώς και η Καθαρή Παρούσα Αξία της. Επίσης, η έλλειψη φορολογίας παρατηρείται ότι επηρεάζει και τη βέλτιστη δομή του συστήματος, καθώς παρατηρούνται μικρές διαφορές στη διάταξη των Φ/Β πλαισίων (πλήθος και κλίση Φ/Β πλαισίων). Αντίθετα, η έλλειψη επιδότησης δε φαίνεται να επηρεάζει τη βέλτιστη δομή του συστήματος αλλά συμβάλλει σε σημαντική υποβάθμιση όλων των δεικτών της οικονομικής αξιολόγησης. Η ταυτόχρονη απουσία επιδότησης και φορολογίας, όπως προκύπτει από τον Πίνακα 8.6, επηρεάζει ελάχιστα τον χρόνο απόσβεσης και τον εσωτερικό βαθμό απόδοσης, χωρίς να ισχύει το ίδιο για την Καθαρή Παρούσα Αξία, η οποία αυξάνεται σημαντικά.

9. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ – ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΕΚΤΑΣΕΙΣ

Το έντονο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, λόγω των περιβαλλοντικών και ενεργειακών αδιεξόδων που προκαλούνται από τις συμβατικές πηγές ενέργειας, ανάγει σε ζήτημα ιδιαίτερης σημασίας το σχεδιασμό αυτών των συστημάτων. Στην παρούσα εργασία αναπτύχθηκε ένας ολοκληρωμένος και αξιόπιστος αλγόριθμος βασισμένος σε νέες τεχνικές βελτιστοποίησης για το βέλτιστο σχεδιασμό συστημάτων Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο. Ο αλγόριθμος αυτός υλοποιήθηκε με εύχρηστο λογισμικό, μέσω του οποίου δίνεται η δυνατότητα αναζήτησης του βέλτιστου σχεδιασμού τέτοιων συστημάτων εισάγοντας λεπτομερή και πραγματικά χαρακτηριστικά της μελέτης τα οποία λαμβάνονται υπόψη κατά τη βελτιστοποίηση. Στον αλγόριθμο που αναπτύχθηκε χρησιμοποιούνται εξελικτικές τεχνικές για τη βέλτιστη διαστασιολόγηση, χωροθέτηση και το σχεδιασμό ενός οποιουδήποτε συστήματος Φ/Β πλαισίων συνδεδεμένου στο ηλεκτρικό δίκτυο με σκοπό την πώληση της παραγόμενης ενέργειας με το μέγιστο οικονομικό όφελος. Η συγκεκριμένη κατηγορία αλγορίθμων εγγυάται την παραγωγή των βέλτιστων λύσεων του προβλήματος σε πολύ σύντομο χρόνο, σε αντίθεση με διάφορες συμβατικές μεθόδους βελτιστοποίησης που χρησιμοποιούνται συχνά στη βιβλιογραφία. Στην παρούσα εργασία έχουν αναπτυχθεί κατάλληλα μοντέλα εκτίμησης της απαιτούμενης πρώτης ύλης για την κατασκευή των βάσεων στήριξης των Φ/Β πλαισίων και των καλωδιώσεων και συνεπώς, των αντίστοιχων παραμέτρων κόστους. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί μοντέλα προσομοίωσης της σκίασης των Φ/Β πλαισίων των συστημάτων και υπολογισμού των ενεργειακών απωλειών είτε λόγω αλληλοσκίασης είτε λόγω σκίασης εξαιτίας πιθανών εμποδίων. Συνέπεια των παραπάνω είναι οι παράμετροι βελτιστοποίησης του προβλήματος όπως η κλίση των πλαισίων ή οι αποστάσεις μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών που τελικώς υπολογίζονται να προκύπτουν υπό την επίδραση όλων των παραπάνω παραμέτρων και όχι βάσει απλουστευμένων μεθόδων. Επίσης, με χρήση βάσεων δεδομένων υποστηρίζεται σημαντικά η ευχρηστία του λογισμικού που υλοποιήθηκε.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία υπερτερεί σε σχέση με τις ήδη υπάρχουσες όσον αφορά στη χρήση των αναλυτικών μοντέλων που αναφέρθηκαν παραπάνω και περιγράφουν παραμέτρους των συστημάτων οι οποίες, στις μεθόδους που υπάρχουν στη βιβλιογραφία, είτε παραβλέπονται τελείως είτε περιγράφονται με χρήση πολύ απλών μοντέλων. Συνεπώς, στην προτεινόμενη μεθοδολογία λαμβάνονται υπόψη οι ιδιομορφίες του εκάστοτε συστήματος δίνοντας στο σχεδιαστή τη δυνατότητα να μελετήσει πραγματικές περιπτώσεις εγκατάστασης τέτοιων συστημάτων, παρέχοντας όλες τις απαιτούμενες λεπτομέρειες για την εγκατάσταση. Επίσης, το λογισμικό που αναπτύχθηκε με βάση τους αλγορίθμους που παρουσιάστηκαν, επιτυγχάνει προσδιορισμό την βέλτιστης λύσης σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα σε σχέση με τις υπάρχουσες προσεγγίσεις, είναι εύχρηστο, διαθέτοντας όμως πολλές δυνατότητες αντιμετώπισης και επεξεργασίας κάθε συγκεκριμένης μελέτης, αποτελώντας ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο σχεδιασμού συστημάτων Φ/Β πλαισίων συνδεμένων στο ηλεκτρικό δίκτυο.

Στα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο 8^{ο} κεφάλαιο χρησιμοποιήθηκαν εμπορικά διαθέσιμα επιμέρους δομικά στοιχεία με τιμές κόστους που βρέθηκαν στην αγορά κατά τη διεξαγωγή αυτής της εργασίας. Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει ότι, βάσει αυτών των τιμών κόστους, τέτοιου είδους συστήματα έχουν σημαντικό επενδυτικό ενδιαφέρον.

Βάσει ενδεικτικών αποτελεσμάτων που προέκυψαν, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι παράμετροι της κλίσης των Φ/Β πλαισίων και της απόστασης μεταξύ συστοιχιών. Έτσι, προκύπτει ότι η κλίση σχετίζεται με πολλές παραμέτρους του συστήματος, όπως είναι οι τύποι συσκευών που χρησιμοποιούνται, οι τιμές πώλησης της παραγόμενης ενέργειας κ.λπ. και, συνεπώς, η βέλτιστη επιλογή της πρέπει να γίνεται υπό το πρίσμα ενός μεγάλου πλήθους παραμέτρων, όπως γίνεται στην παρούσα εργασία και όχι βάσει μόνο του γεωγραφικού πλάτους της περιοχής ή άλλων απλουστευμένων μεθόδων που χρησιμοποιούνται από τις υπάρχουσες μεθοδολογίες. Ενδιαφέρον, επίσης, έχει ο τρόπος διάταξης των πλαισίων στην έκταση της εγκατάστασης σε συνδυασμό με την απόσταση μεταξύ διαδοχικών συστοιχιών καθώς και με την κλίση των πλαισίων. Επίσης, παράμετροι όπως η φορολογία των εσόδων από την πώληση της παραγόμενης ενέργειας και η επιδότηση του αρχικού κεφαλαίου, επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την οικονομική βιωσιμότητα του συστήματος, καθώς και τη βέλτιστη δομή που προκύπτει. Ο χρόνος απόσβεσης για διάφορα συστήματα κυμαίνεται κυρίως από 7 – 12 χρόνια ενώ ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης από 13 % - 19 % κυρίως. Επίσης, όπως προκύπτει και από τα ενδεικτικά αποτελέσματα του 8^{ου} κεφαλαίου, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μπορεί να εφαρμοστεί σε πραγματικές εκτάσεις, οποιασδήποτε κλίσης και οποιουδήποτε σχήματος.

Μελλοντικές κατευθύνσεις σχετικές με την παρούσα εργασία θα μπορούσαν να αφορούν στην ενσωμάτωση των μοντέλων και των αλγορίθμων που αναπτύχθηκαν για περιπτώσεις σχεδιασμού άλλων τύπων Φ/Β συστημάτων με διαφορετικές απαιτήσεις (π.χ. Φ/Β συστήματα διασυνδεδεμένα με κτίρια κ.λπ.) ή ακόμα και την ενσωμάτωσή τους σε άλλα συστήματα ΑΠΕ (π.χ. συστήματα παραβολικών συλλεκτών κ.λπ.).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

[1] M. Asif, T. Muneer, Energy supply, its demands and security issues for developed and emerging economies, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 1388-1413, 2007.

[2] M. Suri, T. Huld, E. Dunlop, H. Ossenbrink, Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries, Solar Energy, 81, 1295-1305, 2007.

[3] J. Mondol, Y. Yohanis, B. Norton, The impact of array inclination and orientation on the performance of a grid-connected photovoltaic system, Renewable Energy, 32, 118-140, 2007.

[4] J. Mondol, Y. Yohanis, B. Norton, Optimal sizing of array and converter for grid-connected photovoltaic systems, Solar Energy, 80, 1517–1539, 2006.

[5] K. Peippo and P.D. Lund, Optimal sizing of grid-connected PV-systems for different climates and array orientations: a simulation study, Solar Energy Materials and Solar Cells, 35, 445-451, 1994.

[6] L. Keller, P. Affolter, Optimizing the panel area of a photovoltaic system in relation to the static inverter-practical results, Solar Energy, 55, 1995.

[7] P.A.B. James, A.S. Bahaj, R.M. Braid, PV array < 5 kWp + single inverter = grid connected PV system: Are multiple inverter alternatives economic? , Solar Energy, 80, 1179-1188, 2006.

[8] J. Bernal-Agustin and R. Dufo-Lopez, Economic and environmental analysis of grid-connected photovoltaic systems in Spain, Renewable Energy, 31, 1107-1128, 2006.

[9] G. Nofuentes, J. Aguilera, C. Rus, R.L. Santiago, A short assessment on the profitability of PV grid-connected systems using classical investment project analysis, 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, 2632-2635, May 2003.

[10] D. Talavera, G. Nofuentes, J. Aguilera, M. Fuentes, Tables for the estimation of the internal rate of return of photovoltaic grid-connected systems, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 447-466, 2007.

[11] A. Fernando-Infantes, J. Contreras, J. Bernal-Agustin, Design of grid-connected PV systems considering electrical, economical and environmental aspects: A practical case, Renewable Energy, 31, 2042-2062, 2006.

[12] S. Rehman, M. Bader, S. Al-Moallem, Cost of solar energy generated using PV panels, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11, 1843-1857, 2007.

[13] D.J. Swider, L. Beurskens, S. Davidson, J. Twidell, J. Pyrko, W. Pruggler, H. Auer, K. Vertin, R. Skema, Conditions and costs for renewable electricity grid connection: Examples in Europe, Renewable Energy, 33, 1832-1842, 2008.

[14] X. Gong, M. Kulkarni, Design optimization of a large scale rooftop photovoltaic system, Solar Energy, 78, 362-374, 2005.

[15] J.C. Hernandez, A. Medina, F. Jurado, Optimal placement and sizing procedure for PV systems on radial distribution feeders, IEEE International Conference on Power System Technology, 2006.

[16] J.A. Carrion, A.E. Estrella, F.A. Dols, M.Z. Toro, M. Rodrıguez, A.R. Ridao, Environmental decision-support systems for evaluating the carrying capacity of land areas: Optimal site selection for grid-connected photovoltaic power plants, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12, 2358-2380, 2008.

[17] A. Kornelakis, E. Koutroulis, Methodology for design optimization and economic analysis of grid-connected photovoltaic systems using genetic algorithms, IET Renewable Power Generation, in press.

[18] Α. Κορνελάκης, Βελτιστοποίηση σχεδιασμού και αξιολόγηση συστήματος φωτοβολταϊκών στοιχείων για την παραγωγή ενέργειας σε ηλεκτρικά δίκτυα, Πολυτεχνείο Κρήτης, Διπλωματική Εργασία, 2008.

[19] A. Mellit, Sizing of photovoltaic systems: a review, Revue des Energies Renouvables, 10, 463-472, 2007.

[20] A. Mellit, S. A. Kalogirou, Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review, Progress in Energy and Combustion Science, 34, 574-632, 2008.

[21] E. Lorenzo, Solar Electricity - Engineering of photovoltaic Systems, 1st edn., Progensa, 1994.

[22] Κ. Καγκαράκης, Φωτοβολταϊκή Τεχνολογία, Εκδόσεις Συμμετρία, 1992.

[23] T. Markvart,: Solar Electricity, 1st edn., Wiley, 1994,.

[24] Z. Michalewicz, Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution programs, 3rd edn., Springer Verlag, 1992.

[25] D. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, Addison Wesley, 1989.

[26] Σ. Τζαφέστας, Υπολογιστική Νοημοσύνη, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, 2002.

[27] J. Kennedy, R.C. Eberhart, Particle swarm optimization, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1942–1948, 1995.

[28] J. Kennedy, R.C. Eberhart, Swarm Intelligence, Academic Press, 2001.

[29] M. Clerc, Particle Swarm Optimization, ISTE Ltd, 2006.

[30] J. Kennedy, R.C. Eberhart, Particle swarm optimization, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1942–1948, 1995.

[31] R.C. Eberhart, P. Simpson, R. Dobbins, Computational intelligence PC tools, AP Professional, 212–226, 1996.

[32] Y. Shi, R.C Eberhart, A modified particle swarm optimizer, Proceedings of the IEEE international conference on evolutionary computation, 69–73, 1998.

[33] R.C Eberhart, Y. Shi, Comparing Inertia Weights and Constriction Factors in Particle Swarm Optimization, Proceedings of IEEE congress evolutionary computation, 84–88, 2000.

[34] M. Clerc, J. Kennedy, The particle swarm: explosion, stability and convergence in a multi-dimensional complex space, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 58–73, 2002.

[35] Δ. Λαμπρίδης, Π. Ντοκόπουλος, Γ. Παπαγιάννης, Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας, Εκδόσεις Ζήτη, 2007.

[36] Α. Παπαδόπουλος, Σημειώσεις του μαθήματος ‘‘Οικονομική Ανάλυση Ενεργειακών Συστημάτων’’, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, 2002.

[37] Κ. Κυρηττόπουλος, Σημειώσεις του μαθήματος ‘‘Παίγνιο Επιχειρήσεων - Επιχειρηματικά Σχέδια’’, Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο, 2007.

[38] J. Appelbaum, J. Bany, Shadow Effect of Adjacent Solar Collectors in Large Scale Systems, Solar Energy, 23, 497-507, 1979.

[39] M. Drif, P.J. Perez, J. Aguilera, J.D. Aguilar, A new estimation method of irradiance on a partially shaded PV generator in grid-connected photovoltaic systems, Renewable Energy, 33, 2048-2056, 2008.

[40] T. Tomori, K. Otani, K. Sakuta, K. Kurokawa, On-site BIPV array shading evaluation tool using stereo-fisheye photographs, Photovoltaic Specialists Conference. Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE, 2000.

[41] W. H. Beyer, CRC Standard Mathematical Tables, 28th edn., CRC Press, 123-124, 1987.

[42] Α. Ποτηράκης, Ανάπτυξη Λογισμικού Διαστασιολόγησης Υβριδικού Συστήματος Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας, Διπλωματική Εργασία, Πολυτεχνείο Κρήτης, 2003.