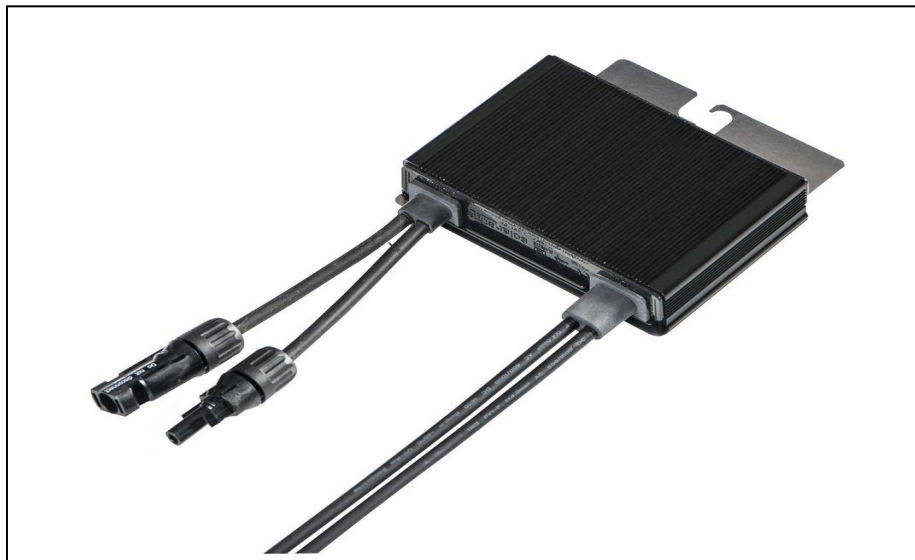


## ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

---

Τίτλος:

Βελτιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας από φωτοβολταϊκά με την χρήση τεχνολογιών ενσωματωμένων συστημάτων και IoT



Μεταπτυχιακός Φοιτητής : Χριστόφορος Σπύρου, ΑΜ 17

Επιβλέπων καθηγητής : Δρ. Παναγιώτης Παπαγέωργας

ΑΘΗΝΑ-ΑΙΓΑΛΕΩ, 29/11/2020

---

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ  
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ  
Τμήμα Ηλεκτρολόγων & Ηλεκτρονικών Μηχανικών  
[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

Θηβών 250, Αθήνα-Αιγάλεω 12244  
Τηλ. +30 210 538-1225, Fax. +30 210 538-1226



UNIVERSITY of WEST ATTICA  
FACULTY OF ENGINEERING  
Department of Electrical & Electronics Engineering  
[www.eee.uniwa.gr](http://www.eee.uniwa.gr)

250, Thivon Str., Athens, GR-12244, Greece  
Tel:+30 210 538-1225, Fax:+30 210 538-1226

Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
Ηλεκτρικές & Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας

Master of Science By Research in  
*Electrical & Electronics Engineering*

## DISSERTATION

---

*Title :*

Optimization of photovoltaic energy production using embedded systems and IoT technologies



Student: Spyrou Christoforos, Registration Number 17

Supervisor: Dr. Papageorgas, Panagiotis

ATHENS-EGALEO, 29/11/2020

---

Η Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία έγινε αποδεκτή, εξετάστηκε και βαθμολογήθηκε από την εξής τριμελή εξεταστική επιτροπή:

Επιβλέπων	Μέλος	Μέλος
Παναγιώτης Παπαγέωργας	Αντώνιος Μορώνης	Γεώργιος Βόκας
Καθηγητής	Καθηγητής	Καθηγητής

## 1.2 ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Ο κάτωθι υπογεγραμμένος Χριστόφορος Σπύρου του Νικολάου, με αριθμό μητρώου MSCRES-17 φοιτητής του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας» του Τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της μεταπτυχιακής διπλωματικής εργασίας και κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος. Τέλος, βεβαιώνω ότι η εργασία αυτή δεν έχει κατατεθεί στο πλαίσιο των απαιτήσεων για τη λήψη άλλου τίτλου σπουδών ή επαγγελματικής πιστοποίησης πλην του παρόντος. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Ο Δηλών



Χριστόφορος Σπύρου

**Copyright ©** Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ και Χριστόφορος Σπύρου,**

**Νοέμβριος, 2020**

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον/την συγγραφέα.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον/την συγγραφέα του και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις θέσεις του επιβλέποντος μέλους ΔΕΠ, της επιτροπής εξέτασης ή τις επίσημες θέσεις του Τμήματος και του Ιδρύματος.

# Πίνακας περιεχομένων

Σελίδα

Περιεχόμενα.....	6
Περίληψη .....	9
Abstract .....	11
Ονοματολογία .....	13

## **Κεφάλαιο 1** **14**

1. Εισαγωγή.....	14
1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση .....	15
1.2 Μέθοδοι αξιολόγησης ενεργειακών επενδύσεων .....	20
1.3 Ηλιακό δυναμικό και εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα...22	
1.4 Απώλειες παραγωγής ενέργειας στα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα.....	25
1.5 Σκοποί και στόχοι .....	27

## **Κεφάλαιο 2** **28**

2. Λογισμικά προγράμματα, προσομοιώσεις και αποτελέσματα.....	28
2.1 Πρώτη μελέτη περίπτωσης – Βελτιστοποίηση διασυνδεδεμένου βασικού Φ/Β συστήματος .....	29
2.1.1 Προσομοίωση συστήματος με τοπολογία string inverter .....	32
2.1.2 Προσομοίωση συστήματος με τοπολογία DC power optimizers .....	33
2.1.3 Προσομοίωση συστήματος με τοπολογία microinverters .....	35
2.1.4 Προσομοίωση συστήματος με τοπολογία cell string optimizers.....	36
2.2 Δεύτερη μελέτη περίπτωσης προσομοίωση διαφόρων ειδών σκίασης.....	39
2.3 Προσομοίωση Demand-Response προγράμματος.....	43
2.4 Παράθεση και σύγκριση δεδομένων πραγματικής Φ/Β εγκατάστασης με DC power optimizers και string inverter .....	45
2.4.1 Προσομοίωση της πραγματικής Φ/Β εγκατάστασης με DC power optimizers και string inverter.....	51

## **Κεφάλαιο 3** **55**

3. Συμπεράσματα .....	55
3.1 Συμπεράσματα πρώτης μελέτης περίπτωσης βασικού Φ/Β συστήματος .....	55
3.2 Συμπεράσματα προσομοίωσης διαφόρων ειδών σκίασης .....	56
3.3 Συμπεράσματα Demand-response προγράμματος.....	56
3.4 Συμπεράσματα σύγκρισης δεδομένων και προσομοίωσης πραγματικής Φ/Β εγκατάστασης με DC power optimizers & string inverter.....	57

ΑΝΑΦΟΡΕΣ .....	58
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ .....	62

## ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας	Σελίδα
1. Επίδραση σκίασης σε Φ/Β πλαίσιο [1] .....	25
2. Επίδραση της κλίσης και του προσανατολισμού στην παραγωγή ενός Φ/Β πλαισίου [1].....	26
3. Δεδομένα προσομοίωσης τοπολογίας string inverter .....	33
4. Δεδομένα προσομοίωσης τοπολογίας DC power optimizers .....	34
5. Δεδομένα προσομοίωσης τοπολογίας microinverters .....	35
6. Δεδομένα τοπολογίας cell string optimizers.....	36
7. Αποτελέσματα προσομοίωσης βασικού Φ/Β συστήματος .....	38
8. Αποτελέσματα προσομοίωσης σκίασης των δέντρων .....	39
9. Αποτελέσματα προσομοίωσης σκίασης από γειτονικό κτίριο.....	40
10. Αποτελέσματα προσομοίωσης σκίασης όλων των εμποδίων μαζί.....	41
11. Αποτελέσματα προσομοίωσης διαφορετικών κλίσεων και προσανατολισμών των Φ/Β πάνελ .....	42
12. Αποτελέσματα προσομοίωσης DLRP προγράμματος.....	45
13. Καταγεγραμμένη παραγωγή του Φ/Β συστήματος .....	48
14. Ανάλυση και σύγκριση δεδομένων της παραγωγής του Φ/Β συστήματος.....	49
15. Αποτελέσματα προσομοίωσης του Φ/Β συστήματος .....	52
16. Σύγκριση αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με τα πραγματικά δεδομένα του Φ/Β συστήματος .....	53

## ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα	Σελίδα
1. IoT εφαρμογή σε Φ/Β εγκατάσταση [21] .....	19
2. Ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα [23] .....	22
3. Εγκαταστημένη ισχύ Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα [1] .....	24
4. Διαδικασία προσομοίωσης μοντέλων .....	29
5. Φ/Β εγκατάσταση [24] .....	30
6. Απεικόνιση βασικού Φ/Β συστήματος .....	31
7. Χαρακτηριστική καμπύλη βαθμού απόδοσης inverter Kostal Piko 10.1 .....	32
8. Ετήσια αποτελέσματα προσομοίωσης σκίασης και 21/12 ημέρας .....	37
9. Σενάριο σκίασης από δέντρα .....	39
10. Σενάριο σκίασης από γειτονικό κτίριο .....	40
11. Σενάριο σκίασης με όλα τα εμπόδια μαζί .....	41
12. Σύγκριση κερδών μεταξύ string inverter και power optimizers .....	42
13. Ημερήσιο και ετήσιο προφίλ φορτίου .....	43
14. DLRP σύστημα προσομοίωσης .....	44
15. Χωροθέτηση Φ/Β συστήματος πριν και μετά την ανακατασκευή της στέγης[26]	48
16. Συνολική μηνιαία παραγωγή του Φ/Β συστήματος 7.35kWp για το έτος 2015...	50
17. Επιμέρους μηνιαία παραγωγή του Φ/Β συστήματος 2.94kWp για το έτος 2015.	50

## ΛΙΣΤΑ ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΩΝ

Παράρτημα	Σελίδα
1. Paper « Optimization of photovoltaic energy production using embedded systems and techno-economic analysis of participating in demand response programs through IoT and IoE technologies».....	62
2. Φωτογραφικό υλικό της εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος .....	73
3. Συνολική μηνιαία παραγωγή για τα έτη 2014, 2016 και 2019 .....	75



## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η Διπλωματική εργασία γράφτηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Ηλεκτρικές και Ηλεκτρονικές Επιστήμες μέσω Έρευνας» του τμήματος Ηλεκτρολόγων και Ηλεκτρονικών Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής. Το αντικείμενο της εργασίας αφορά την αξιολόγηση των ενσωματωμένων συστημάτων και συμπληρωματικά των IoT τεχνολογιών που χρησιμοποιούνται για την βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από Φ/Β συστήματα. Οι τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή βελτιστοποίηση του Φ/Β συστήματος είναι η τοπολογία string inverter, οι DC-DC power optimizers, οι microinverters και τα cell string optimizers. Για την αξιολόγηση αυτών των τεχνικών χρησιμοποιούνται δύο λογισμικά προγράμματα το PVSYST και το HOMER Grid. Η πρώτη μελέτη περίπτωσης αφορά την προσομοίωση πραγματικού διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος ισχύος 9,84kWp. Η δεύτερη μελέτη περίπτωσης αφορά την προσομοίωση διαφόρων ειδών σκίασης για το Φ/Β σύστημα αναφοράς καθώς επίσης και την προσομοίωση ενός Demand-Response προγράμματος για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτιρίου επί του οποίου υφίσταται το Φ/Β σύστημα. Το συγκεκριμένο τμήμα αυτής της εργασίας παρουσιάστηκε στο συνέδριο TMREES Conference Series : Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, τον Σεπτέμβριο του 2019, ενώ δημοσιεύτηκε στο AIP Conference Proceedings στις 11 Δεκεμβρίου 2019 (AIP Conference Proceedings **2190**, 020053 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5138539>). Ολόκληρο το άρθρο παρατίθεται στο **Παράρτημα 1**. Η τρίτη μελέτη περίπτωσης αφορά ένα οικιακό Φ/Β σύστημα το οποίο κατά καιρούς λειτούργησε με power optimizers αλλά και με string inverter μόνο και για το οποίο υπάρχουν καταγεγραμμένα στοιχεία και πληροφορίες τεσσάρων ετών για την παραγόμενη ενέργεια του. Ακολουθεί παράθεση και σύγκριση των δεδομένων του συστήματος, ενώ τέλος αναπτύσσεται μοντέλο προσομοίωση στο PV Syst με σκοπό να συγκριθούν τα πραγματικά δεδομένα με τα αποτελέσματα της προσομοίωσης.

Ο κύριος στόχος της εργασίας είναι η ανάδειξη της καλύτερης τοπολογίας για την βελτιστοποίηση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β συστήματα που παρουσιάζουν ανομοιομορφία στην παραγωγή των επιμέρους πλαισίων της λόγω πιθανών σκιάσεων από διπλανά εμπόδια. Να συγκρίνει σε τεχνοοικονομικό επίπεδο τις νέες πολλά υποσχόμενες τεχνολογίες και να αξιολογήσει τα περιβαλλοντολογικά οφέλη σε σχέση με τις

συμβατικές τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται σε εγκαταστάσεις Φ/Β συστημάτων. Να επισημάνει τα πολλαπλά οφέλη της επιλογής ενός Demand Response προγράμματος με διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα και τέλος να παραθέσει και να συγκρίνει στοιχεία μιας πραγματικής εγκατάστασης με τοπολογία power optimizers και string inverter.

Η έρευνα για την ολοκλήρωση της συγκεκριμένης εργασίας βασίζεται στην βιβλιογραφική ανασκόπηση στο ευρύτερο πεδίο, στην παράθεση πραγματικών μεγεθών που αφορούν υφιστάμενο Φ/Β σύστημα και τις προσομοιώσεις των διαφόρων συστημάτων και καταστάσεων λειτουργίας τους, με τα αναφερθέντα λογισμικά πακέτα.

Το πρώτο κεφάλαιο αναφέρεται στην έρευνα που έχει γίνει στον τομέα και δίνονται πληροφορίες για την επικρατούσα κατάσταση στον Ελλαδικό χώρο. Στο 2<sup>ο</sup> κεφάλαιο δίνονται τεχνικές πληροφορίες αλλά και όλα τα αποτελέσματα των επι μέρους τμημάτων της έρευνας. Αρχικά για την εγκατάσταση του Φ/Β συστήματος της πρώτης μελέτης περίπτωσης γίνεται προσομοίωση με την χρήση του PVSYST όλων των διαθέσιμων τοπολογιών. Στην συνέχεια γίνεται προσομοίωση διαφόρων ειδών σκίασης και ενσωμάτωση ενός Demand Response προγράμματος με το διασυνδεδεμένο Φ/Β σύστημα αναφοράς. Τέλος στο ίδιο κεφάλαιο παρατίθενται και συγκρίνονται δεδομένα και πληροφορίες από εν λειτουργία Φ/Β σύστημα με σύνθεση string inverter αλλά και τεχνολογίας maximizers. Στο 3<sup>ο</sup> κεφάλαιο συζητούνται τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων αλλά και η σύγκριση των πραγματικών δεδομένων και εξάγονται τα τελικά συμπεράσματα πάνω στα αποτελέσματα των σεναρίων της κάθε μελέτης περίπτωσης ξεχωριστά.

## ABSTRACT

This Diploma Thesis was written in the framework of the Master Program "Electrical and Electronic Sciences through Research" of the Department of Electrical and Electronic Engineering of the University of West Attica. The object of the work concerns the evaluation of the integrated systems and in addition the IoT technologies which are used for the optimization of the energy produced by PV systems. The technologies which are used for the energy optimization of the PV system are the string inverter topology, the DC-DC power optimizers, the microinverters and the cell string optimizers. Two software programs, the PVSYST and the HOMER Grid, are used to evaluate these techniques. The first case study concerns the simulation of a real grid connected PV system with a power of 9.84 kWp. The second case study concerns the simulation of different types of shading for the aforementioned PV system as well as the simulation of a Demand-Response program to meet the energy needs of the building on which the PV system operates. This part of the Dissertation was presented at the TMREES Conference Series: Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, in September 2019, and published in the AIP Conference Proceedings on December 11, 2019 (AIP Conference Proceedings 2190, 020053 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5138539>). The whole article is listed in [Appendix 1](#). The third case study concerns also a residential PV system which from time to time operated with power optimizers as well as with string inverter topology and for which there are recorded data and information for four years about the produced energy. Then follows the representation and the comparison of the system data, and finally a simulation model is developed in PV Syst in order to compare the actual data with results of the simulation.

The main objective of the Dissertation is to highlight the best topology for the electricity optimization produced by PV systems that show non-uniformity in the production of its individual PV panels due to possible shading from adjacent obstacles. To compare at a techno-economic level the new promising technologies and to evaluate the environmental benefits in relation to the conventional technologies which were used in PV system installations at the past. To point out the multiple benefits of choosing a Demand Response program along with grid connected PV system and finally to list and compare the data of a PV installation which operated both with power optimizers and string inverter topology.

The research for the completion of this Dissertation is based on the literature review in the wider field, the representation of real data from an existing PV system and the simulation results of the aforementioned software packages.

The first chapter refers to the research that has been done in the field and gives information about the prevailing situation in Greece. In the 2nd chapter are given technical information as well as the results of each part of the research. Initially, for the installation of the PV system of the first case study, a simulation is performed using the PVSYST of all available topologies. Then various types of shading are simulated and a Demand Response program is integrated with the grid connected PV system. Finally, in the same chapter, data and information from an operating PV system with mixed topologies of string inverter and maximizers technology are presented and compared. Chapter 3 discusses the results of the simulations as well as the comparison of the real data and draws the final conclusions on the results of each case study separately

# ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

## Ακρωνύμιο

AC	alternative current (εξαλλασσόμενο ρεύμα)
CAPEX	capital expenditures (κεφαλαιουχικές δαπάνες)
COE	cost of energy (κόστος της ενέργειας)
DC	direct current (συνεχές ρεύμα)
OPEX	operational expenditures (δαπάνες λειτουργίας)
PV	photovoltaic (φωτοβολταϊκό)
NPC	net present cost (καθαρή παρούσα αξία)
ΑΠΕ	ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
TCO	total cost of ownership (συνολικό κόστος κτήσης)
IRR	internal rate of return (εσωτερικός βαθμός απόδοσης)
MPPT	maximum power point tracking (παρακολούθηση σημείου μέγιστης ισχύος)

## Σύμβολα

E	ενέργεια, J
t	χρόνος, sec
A	αμπέρ
n	απόδοση
W	ισχύς, watt
Wh	ηλεκτρική ενέργεια
°C	θερμοκρασία, Celsius
CO <sub>2</sub>	διοξείδιο του άνθρακα

# ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το 2016 η συνολική εγκαταστημένη ισχύ των διασυνδεμένων Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα έφτασε τα 2.611MW. Ενώ στα τέλη του 2018 ανέβηκε μόλις 54MW εκ των οποίων λιγότερο των 7.2MW αφορούσε των κτιριακό τομέα, φτάνοντας έτσι συνολικά στα 2665MW [1]. Η πτώση των εγκαταστάσεων στον κτιριακό τομέα μπορεί να εξηγηθεί πολύ εύκολα αν κανείς λάβει υπόψη του ότι το μόνο ενεργό πρόγραμμα διασύνδεσης Φ/Β συστήματος με το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας είναι η αυτοπαραγωγή με ενεργειακό συμψηφισμό (PV net metering). Τα προηγούμενα χρόνια τόσο στην Ελλάδα όσο και στο εξωτερικό οι επενδυτές είχαν συνηθίσει σε άλλα σχήματα όπως αυτό των σταθερών τιμών πώλησης ανά παραγόμενη kWh (feed in tariff scheme) ή και σχημάτων άτοκου δανεισμού για εγκαταστάσεις Φ/Β συστημάτων. Με την πτώση αυτών των παροχών η αγορά του κλάδου έπεσε δραματικά την τελευταία εξαετία [1] παρασύροντας έτσι πολλά επαγγέλματα και ειδικότητες του κλάδου και βύθισε την οικονομία της χώρας σε μεγαλύτερη ύφεση.

Ένας παγκόσμιος στόχος είναι αυτός της μείωσης των εκπομπών του διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>). Πιο συγκεκριμένα η Ευρωπαϊκή Ένωση έχει θέσει ως στόχο την μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 20% μέχρι το 2020. Για να πραγματοποιηθεί ο παραπάνω στόχος έχουν δοθεί ισχυρά κίνητρα μέσω κοινοτικών ή άλλων ενδοχώριων πολιτικών σε οικιακούς και άλλους καταναλωτές με σκοπό να παράγουν την δική τους πράσινη ενέργεια από Φ/Β συστήματα, περιορίζοντας έτσι τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου. Η στροφή αυτή προς την κατασκευή Φ/Β έργων ιδίως αυτών που αφορούσαν τον κτιριακό τομέα οδήγησε την έρευνα [2-3] να στραφεί στην βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας από Φ/Β συστήματα. Η τάση προς την ενεργειακή βελτιστοποίηση μπορεί να γίνει εύκολα αντιληπτή απ το γεγονός ότι η εγκαταστημένης βάση Φ/Β συστημάτων επί κτιριακών εγκαταστάσεων συνεχώς μεγαλώνει. Τα Φ/Β συστήματα σε κτίρια που βρίσκονται εντός του αστικού κλοιού αντιμετωπίζουν πολύ συχνά προβλήματα σκίασης. Πιθανές αιτίες σκίασης μπορεί να είναι διπλανά παρακείμενα κτίρια, τα καλώδια της ΔΕΗ, δέντρα και οποιοδήποτε άλλο εμπόδιο. Όλοι αυτοί οι παράγοντες μπορεί να προκαλέσουν δραστική μείωση στην παραγόμενη ενέργεια ενώ παράλληλα αν η σκίαση γίνεται μόνιμη τότε μπορεί να αποδυθεί καταστροφική

για τα ίδια τα Φ/Β πλαίσια όσο και για ολόκληρη την εγκατάσταση (φαινόμενο hot spot). Όλοι οι προαναφερθέντες παράγοντες και άλλοι πολλοί, όπως για παράδειγμα μια κουτσουλιά ενός πουλιού πάνω σε ένα πάνελ, μπορεί να προκαλέσουν πολύ μεγάλη μείωση στην παραγόμενη ενέργεια που μπορεί να φτάσει το 15% με 20% στην κλασσική περίπτωση εγκατάστασης με τοπολογία string inverter. Η λύση στο παραπάνω πρόβλημα μπορεί να δοθεί με την εισαγωγή ενσωματωμένων συστημάτων βελτιστοποίησης της παραγωγής ενέργειας. Δύο κύριες τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί για χρήση σε ενσωματωμένα συστήματα, οι DC/DC power optimizers και οι microinverters. Παράλληλα πολλοί κατασκευαστές ηλεκτρονικών ισχύος αλλά και Φ/Β πλαισίων κάνουν χρήση αυτών των δύο τεχνολογιών ενσωματώνοντας απευθείας αυτούς του μετατροπείς στον junction box του κάθε πλαισίου, επεμβαίνοντας έτσι στο κάθε cell string του ίδιου του πλαισίου, μεγιστοποιώντας κατ'αυτόν τον τρόπο την παραγόμενη ενέργεια.

Για να μπορέσει κάποιος να συλλέξει τα δεδομένα της Φ/Β εγκατάστασης σε πραγματικό χρόνο, απαιτείται η χρήση υψηλής ακρίβειας συστημάτων παρακολούθησης. Αυτές οι έξυπνες συσκευές συλλογής δεδομένων συνδέονται απευθείας στο internet μέσω τοπικών δικτύων, LTE ή 5G δικτύων, μεγαλώνοντας κατ'αυτόν τον τρόπο αυτό που σήμερα αποκαλούμε internet of things (IoT).

## 1.1 Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Τα Φ/Β συστήματα πέραν των κλασσικών αιτιών που αναφέρθηκαν και πιο πάνω στην εισαγωγή, υποφέρουν και από πολλές παραμέτρους που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την παραγωγή τους, όπως για παράδειγμα από μεταβολές της ηλιακής ακτινοβολίας, συσσώρευση σκόνης στην επιφάνεια τους, εγγενείς ανοχές από το στάδιο της κατασκευής τους, από διαφοροποιήσεις στον προσανατολισμό τους καθώς επίσης και από σταδιακή γήρανση του ίδιου του υλικού κατασκευής τους [4-7]. Ακόμα και ένα μόνο πάνελ με μικρή παραγωγή που μπορεί να οφείλεται σε οποιοδήποτε από τους παραπάνω παράγοντες μπορεί να επηρεάσει την παραγωγή όλων των πάνελ που είναι συνδεδεμένα σε σειρά. Η ενσωμάτωση των optimizers η και των microinverters σε τέτοιου είδους σχήματα μπορεί να μεγιστοποιήσουν την παραγωγή ενέργειας, εκ τούτου μπορούν να βοηθήσουν μια χώρα να ελαχιστοποιήσει το συνολικό ενεργειακό της αποτύπωμα.

Ο DC-DC solar power optimizer είναι μια μονάδα η οποία ενσωματώνεται πάνω στο κάθε Φ/Β πλαίσιο και μετατρέπει την χαμηλή DC τάση του πάνελ (20-40VDC) σε μια

μεταβαλλόμενη τάση στην έξοδο ( $\max \sim 80\text{VDC}$ ), προσπαθώντας συνεχώς να κρατήσει σταθερά υψηλά το ρεύμα ολόκληρου της εν σειράς συστοιχίας πάνελ [8]. Το power optimizer μπορεί να λειτουργήσει με οποιασδήποτε μορφής Φ/Β πλαισίου, λεπτού υμενίου, μονοκρυσταλλικά, πολυκρυσταλλικά, υβριδικά κ.α. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων αυτής της τεχνολογίας συμπεριλαμβάνονται, ο εργονομικός τους σχεδιασμός, η δυνατότητα τους να λειτουργούν σε ακραίες εξωτερικές συνθήκες με ιδιαίτερα υψηλό βαθμό απόδοσης, την ευκολία της κάθε μονάδας να εγκαθίσταται στο πίσω μέρος του κάθε Φ/Β πάνελ, ενώ τέλος μικρής διαμέτρου καλώδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν επειδή η υψηλή τάση εξόδου τους ελαχιστοποιεί τις απώλειες ενέργειας λόγω πτώσης τάσης στις ηλεκτρικές DC διασυνδέσεις. Τα power optimizers επικοινωνούν με τον inverter και τον κεντρικό controller του συστήματος μέσω bus πάνω από καλώδια ισχύος [9]. Από την άλλη πλευρά, το κύριο μειονέκτημα τους είναι η ανάγκη ύπαρξης ενός κεντρικού string inverter, γεγονός το οποίο μικραίνει την συνολική απόδοση στην έκδοση του συστήματος.

Όλοι οι εμπορικοί τύποι αυτών των DC-DC μετατροπέων υποφέρουν από συγκεκριμένες απώλειες. Αυτές οι απώλειες εντοπίζονται στην λειτουργία των MOSFET, στον inductor και την δίοδο ανάκτησης [8-10-11]. Είναι γνωστό [2] ότι όταν τα MOSFET λειτουργεί ως διακόπτης, οι απώλειες του αυξάνονται τρομαχτικά ανάλογα με την τάση που διαχειρίζεται. Ο inductor επίσης προκαλεί υψηλά ποσοστά απωλειών, οι εκτιμήσεις για αυτές τις απώλειες μας είναι ήδη γνωστές [12-14]. Η δίοδος ανάκτησης βρίσκεται στο τελευταίο στάδιο εξόδου του κυκλώματος, απ όπου όλη η ισχύς περνά στο φορτίο, προκαλώντας τις αντίστοιχες απώλειες ισχύος. Όλες οι παραπάνω απώλειες περιορίζονται στην σημερινή εποχή με την χρήση πιο αποδοτικών υλικών και νέων τεχνολογιών ελέγχου, για παράδειγμα πλέον γίνεται χρήση διόδων γρήγορης ανάκτησης πολύ μικρού διακοπόμενου χρόνου, που μπορούν να δουλέψουν και σε υψηλότερο δυναμικό [8]. Μαγνητικά συζευγμένα πηνία και SEPIC μετατροπείς αντικαθιστούν τον παλαιό εξοπλισμό [15]. Αξίζει να σημειωθεί πως η μετατροπή της χαμηλής τάσης των πάνελ σε μια υψηλότερη τάση μέσω της τροφοδοσίας ενός κοινού DC bus bar δικτύου, υποδηλώνει χρήση απλού, αξιόπιστου, φθηνού αλλά και πολύ αποδοτικού μετατροπέα. Όσο η εγκαταστημένη ισχύ των Φ/Β συστημάτων και ιδίως αυτή του κτιριακού τομέα θα μεγαλώνει τόσο θα αυξάνεται και ο αριθμός των DC-DC μετατροπέων μαζί.

Ο microinverter είναι επίσης μια μονάδα που ενσωματώνεται πάνω στα Φ/Β πλαίσια και η οποία μετατρέπει απευθείας την DC τάση από το πάνελ σε AC τάση (230VAC-50HZ) [16] και τροφοδοτεί την παραγόμενη ενέργεια πρώτα στο κοινό AC bus

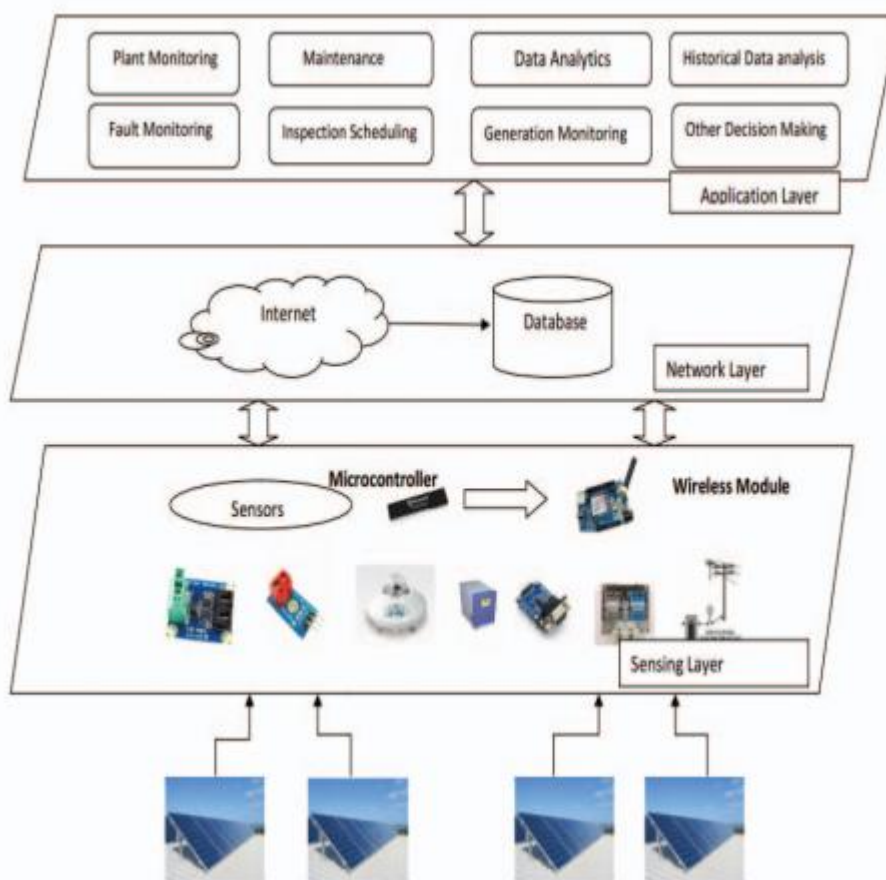


bar και έπειτα την διαχέει στο ηλεκτρικό δίκτυο. Οι microinverters μπορούν επίσης να συνεργαστούν με οποιοδήποτε τύπο Φ/Β πλαισίου [16]. Οι microinverters έχουν όλα τα πλεονεκτήματα που έχουν και οι DC-DC μετατροπείς αλλά αυτό που ξεχωρίζει την συγκεκριμένη τεχνολογία είναι η εύκολη επεκτασιμότητα της Φ/Β εγκατάστασης προσθέτοντας απλά νέα πάνελ οποιαδήποτε στιγμή κανείς το επιθυμήσει. Σε αυτήν την περίπτωση δεν υπάρχει ο περιορισμός της ύπαρξης ενός κεντρικού string inverter, το οποίο σημαίνει ότι η απόδοση του συστήματος ανεβαίνει κι άλλο. Όπως στην περίπτωση των DC-DC optimizers έτσι και στην περίπτωση των microinverters το πρόβλημα των απωλειών ενέργειας είναι υπαρκτό. Οι απώλειες αυτές αφορούν κυρίως τις απώλειες στους ημιαγωγούς, της αγωγιμότητας και των επιμέρους υλικών. Οι απώλειες είναι κατά αναλογία σταθερές και στις δύο επικρατούσες τεχνολογίες [17]. Στην τεχνολογία των microinverters αναπτύσσονται επίσης τεχνολογίες για την ελαχιστοποίηση των ενεργειακών τους απωλειών, ένα καλό παράδειγμα είναι αυτό της κατασκευής μονάδων βασισμένες σε coupled DC-DC inductors [17]. Νέες τεχνικές ελέγχου υπόσχονται σχεδιασμό πιο αποδοτικών microinverters. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι η BCM και η DCM τεχνικές ελέγχου. Ο συνδυασμός αυτών των δύο τεχνικών δημιουργούν μια νέα υβριδική στρατηγική [18], η οποία βελτιώνει την απόδοση σε ένα εύρος φορτίου ελαττώνοντας τις κύριες απώλειες που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι microinverters, μειονεκτούν στην αποσύνδεση τους με το δίκτυο. Σε περίπτωση απώλειας του δικτύου το Φ/Β σύστημα θα πρέπει να σταματήσει αμέσως την λειτουργία για λόγους ασφαλείας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Όταν το Φ/Β σύστημα αποτελείται από πολλά microinverters τότε αυξάνονται οι πιθανότητες αστοχίας ή δυσλειτουργίας κάποιας μονάδας, γεγονός που μπορεί να προκαλέσει την διάχυση επικίνδυνων ρευμάτων στο ηλεκτρικό δίκτυο που μπορεί να φανούν επικίνδυνα για την ασφάλεια του προσωπικού συντήρησης του δικτύου. Εν αντίθεση με τους microinverters αυτοί οι κίνδυνοι περιορίζονται στην περίπτωση χρησιμοποίησης των DC-DC optimizers καθώς υπάρχει μόνος ένας κεντρικός inverter στο σύστημα.

Οι microinverters είναι η τελευταία ‘‘μόδα’’ στα οικιακά διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα, αντικαθιστώντας έτσι του string inverters για πολλούς λόγους, όπως είναι ο υψηλότερος βαθμός απόδοσης, η μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας η ευελιξία και η δυναμική επέκτασης που προσφέρουν. Από την άλλη πλευρά, ο σκληρός ανταγωνιστής που είναι οι DC-DC converters φαίνεται να έχουν πολλές ομοιότητες αλλά χρησιμοποιούν διαφορετική αρχιτεκτονική για να βελτιστοποιήσουν την ενέργεια από μερικώς σκιασμένα Φ/Β πλαίσια.

Ο όρος Internet of things (IoT) χρησιμοποιείται για να περιγράψει έναν ενσωματωμένο εξοπλισμό (πράγμα) ο οποίος είναι διασυνδεδεμένος στο internet και αλληλεπιδρά με κάποιον άλλο εξοπλισμό ή με τον άνθρωπο και άλλες λογισμικές εφαρμογές οπουδήποτε και οποιαδήποτε ώρα πάνω στον κόσμο [19]. Μια IoT διασυνδεδεμένη συσκευή αυξάνει την αξιοπιστία και την σταθερότητα του συστήματος καθώς επιτρέπει την on line πρόσβαση σε δεδομένα και πληροφορίες του συστήματος. Μετρήσεις περιβαλλοντικών δεδομένων όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, η οικιακή ή η επαγγελματική είτε η βιομηχανική παρακολούθηση κτιρίων και οι έξυπνοι αυτοματισμοί ηλεκτρικών δικτύων, μπορούν να είναι διασυνδεδεμένοι επιτρέποντας έτσι την ροή πληροφοριών από την μία στην άλλη πλατφόρμα με σκοπό την βελτίωση των λειτουργιών τους. Η ηλιακή ενέργεια από Φ/Β κερδίζει συνεχώς έδαφος και αποτελεί ισχυρό δυναμικό προς μια βιώσιμη και πράσινη μορφή ενέργειας για το μέλλον. Όσο θα αυξάνεται η εγκαταστημένη ισχύς των Φ/Β συστημάτων, τόσο θα αυξάνεται και η ανάγκη για παρακολούθηση των συστημάτων σε πραγματικό χρόνο [20], ώστε με αυτόν τον τρόπο να βελτιστοποιείται η συμπεριφορά του συστήματος και να διασφαλίζεται η ομαλή λειτουργία του δικτύου. Με την εξέλιξη των Φ/Β έργων γεννήθηκε η ανάγκη για απομακρυσμένο έλεγχο των εγκαταστάσεων. Ο controller του Φ/Β συστήματος είναι συνήθως εξοπλισμένος με τις πιο εξελιγμένες τεχνολογικά υποδομές επικοινωνίας, ώστε να μπορεί να συλλέγει, να μεταδίδει και να ανατροφοδοτεί απομακρυσμένα οποιαδήποτε πληροφορία του συστήματος. Στην Φ/Β εγκατάσταση οι πληροφορίες μεταξύ των επιμέρους συσκευών ελέγχου και ισχύος μπορούν να μοιράζονται μέσω της τεχνολογία Zigbee, μέθοδος η οποία είναι αρκετά καλή ως τεχνική σε μικρής κλίμακας συστήματα, αλλά αποδεικνύεται ανεπαρκής στα μεγαλύτερης κλίμακας συστήματα λόγω των μεγάλων αποστάσεων που υπάρχουν [20]. Η χρήση της τεχνολογίας Bluetooth σε τέτοιου είδους εφαρμογές παρότι στο παρελθόν χρησιμοποιήθηκε πλέον δείχνει αρκετά απαρχαιωμένη. Η σειριακή σύνδεση των συσκευών δεν είναι ιδιαίτερα εύκολη να χρησιμοποιηθεί σε εξωτερικού τύπου εγκαταστάσεις. Η bus επικοινωνία πάνω από τα ηλεκτρικά καλώδια ισχύος είναι μια αρκετά έξυπνη τεχνική, αλλά μπορεί να υπάρχουν διακοπές στην επικοινωνία λόγω πτώσης κάποιας ασφάλεια μιας επιμέρους ηλεκτρικής γραμμής. Η τεχνολογία Wi-Fi έρχεται να καλύψει όλα τα ενδιάμεσα κενά των προηγούμενων τεχνολογιών και είναι η μέθοδος επικοινωνίας που χρησιμοποιείται κατά κόρον στα νέα Φ/Β έργα που κατασκευάζονται [21]. Οι συσκευές Wi-Fi μεταδίδουν τα δεδομένα και τις πληροφορίες μέσω GSM, 3G, LTE ή 5G δικτύων και κατ' αυτόν τον τρόπο οι τοπικά ενσωματωμένες μονάδες συνδέονται με το internet, επιτρέποντας έτσι την αμφίδρομη

επικοινωνία. Στην [Εικ.1](#) παρακάτω φαίνεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής IoT σε ένα Φ/Β έργο.



[Εικ.1.](#) IoT εφαρμογή σε Φ/Β εγκατάσταση [21].

Στην παραπάνω εικόνα μπορεί κανείς να παρατηρήσει την αρχιτεκτονική μιας web based συσκευής, η οποία μπορεί να βοηθήσει τον διαχειριστή του Φ/Β έργου να μειώσει τον χρόνο που σπαταλά επιτηρώντας ώρες ατέλειωτες την εγκατάσταση του για τυχόν δυσλειτουργίες. Αφού με τις νέες δυνατότητες που προαφαίρει αυτός ο εξοπλισμός, λειτουργίες όπως αυτή του αυτοματοποιημένου ελέγχου, της αυτοδιάγνωσης πιθανών αστοχιών καθώς επίσης και η διαχείριση διαδικασιών ρουτίνας όπως η συντήρηση, η ανάκαμψη από σφάλμα, το απομακρυσμένο start/stop και η απομακρυσμένη διαχείριση ενέργειας παρέχονται πλέον στο βασικό πακέτο αυτών των συσκευών.

## 1.2 Μέθοδοι αξιολόγησης ενεργειακών επενδύσεων

Η λύση για την ενεργειακή βελτιστοποίηση σε περιπτώσεις σκιασμένων Φ/Β πάνελ η πάνελ που παρουσιάζουν ανομοιομορφία μεταξύ τους στην συνεισφορά παραγωγής ενέργειας είναι ξεκάθαρα οι επιλογές των DC-DC power optimizers ή η επιλογή των microinverters. Αλλά ποια από τις δύο εναλλακτικές είναι η πιο συμφέρουσα, μήπως η συμβατική περίπτωση του string inverter είναι οικονομικά πιο αποτελεσματική? Για να μπορέσει κανείς να απαντήσει στο παραπάνω ερώτημα θα πρέπει σε τεχνοοικονομικό επίπεδο να συγκρίνει την βιωσιμότητα των τριών παραπάνω εναλλακτικών. Υπάρχουν πάρα πολλοί μέθοδοι εκτίμησης τέτοιων ενεργειακών επενδύσεων αλλά εκείνοι που θα χρησιμοποιηθούν στην συγκεκριμένη εργασία παρουσιάζονται παρακάτω.

1. Η απλή περίοδος αποπληρωμής (**simple payback period**) είναι μια μέθοδος γρήγορης αποτίμησης της επένδυσης, αλλά δεν λαμβάνει υπόψη της πολλές σημαντικές μεταβλητές όπως είναι το κόστος σε έναν συγκεκριμένο χρόνο.

$$\text{Payback Period} = \frac{\text{Investment Cost}}{\text{Annual Savings}}$$

Ο παραπάνω τύπος δείχνει ότι η περίοδος αποπληρωμής ισούται με το κόστος της επένδυσης διαιρούμενο με την ετήσια εξοικονόμηση. Ένας μεγάλος χρόνος αποπληρωμής συνήθως υποδηλώνει μια μη βιώσιμη επένδυση.

2. Μια άλλη μέθοδος είναι αυτή των προ εξοφλημένων ταμειακών ροών (discounted cash flow-DCF), η οποία διαιρείται στην καθαρή παρούσα αξία ή καθαρό παρόν κόστος (NPV-NPC) και στον εσωτερικό βαθμό απόδοσης (IRR).

Η συνολική καθαρή παρούσα αξία ενός συστήματος είναι η παρούσα αξία όλων των κοστών που οφείλονται σε όλη την διάρκεια ζωής του έργου, μείον την παρούσα αξία του συνόλου των εσόδων καθόλη την διάρκεια ζωής του έργου. Στις δαπάνες περιλαμβάνονται οι δαπάνες κτήσεως (CAPEX), τα έξοδα αντικατάστασης εξοπλισμού, ποινές λόγω περιορισμών καθώς επίσης και το κόστος αγοράς ενέργειας από το δίκτυο.

Ο τύπος υπολογισμού της καθαρής παρούσας αξίας φαίνεται παρακάτω.

$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, R_{proj})}$$

Όπου:

$C_{ann,tot}$  = συνολικό ετήσιο κόστος (€/yr)

CRF = συντελεστής ανάκτησης κεφαλαίου

$i$  = βαθμός απόδοσης (%)

$R_{proj}$  = διάρκεια ζωής έργου (yr)

Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης από την άλλη πλευρά είναι το ποσοστό έκπτωσης που καθιστά την καθαρή παρούσα αξία των μελλοντικών ταμειακών ροών από μια επένδυση ίση με το μηδέν. Ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης αντιπροσωπεύει το ρυθμό απόδοσης της επένδυσης λαμβάνοντας υπόψη το ποσό και το χρόνο της αντίστοιχης ταμειακής ροής και μπορεί να υπολογιστεί από τον ακόλουθο τύπο.

$$IRR = R1 + \frac{NPV1 \cdot (R2 - R1)}{(NPV1 - NPV2)}$$

Όπου :

R1 = υψηλότερο ποσοστό προεξόφλησης

R2 = χαμηλότερο ποσοστό προεξόφλησης

NPV1 = υψηλότερη καθαρή παρούσα αξία

NPV2 = χαμηλότερη καθαρή παρούσα αξία

3. Το κόστος της ενέργειας (**levelized cost of energy COE**) είναι η μέθοδος που υπολογίζει το μέσο κόστος της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας (kWh) από το σύστημα. Το κόστος της ενέργειας υπολογίζεται από τον παρακάτω τύπο.

$$COE = \frac{C_{ann,tot} - C_{boiler} \cdot E_{thermal}}{E_{prim, AC} + E_{prim, DC} + E_{def} + E_{grid, sales}}$$

Όπου:

$C_{ann,tot}$  = συνολικό ετήσιο κόστος του συστήματος (€/yr)

$C_{boiler}$  = οριακό κόστος του λέβητα (€/kWh)

$E_{\text{thermal}}$  = συνολικό θερμικό φορτίο που εξυπηρετείται (kWh/yr) = 0 όταν δεν υπάρχει θερμικό φορτίο

$E_{\text{primary,AC}}$  = το κύριο φορτίο AC που εξυπηρετείται (kWh/yr)

$E_{\text{primary,DC}}$  = το κύριο φορτίο DC που εξυπηρετείται (kWh/yr)

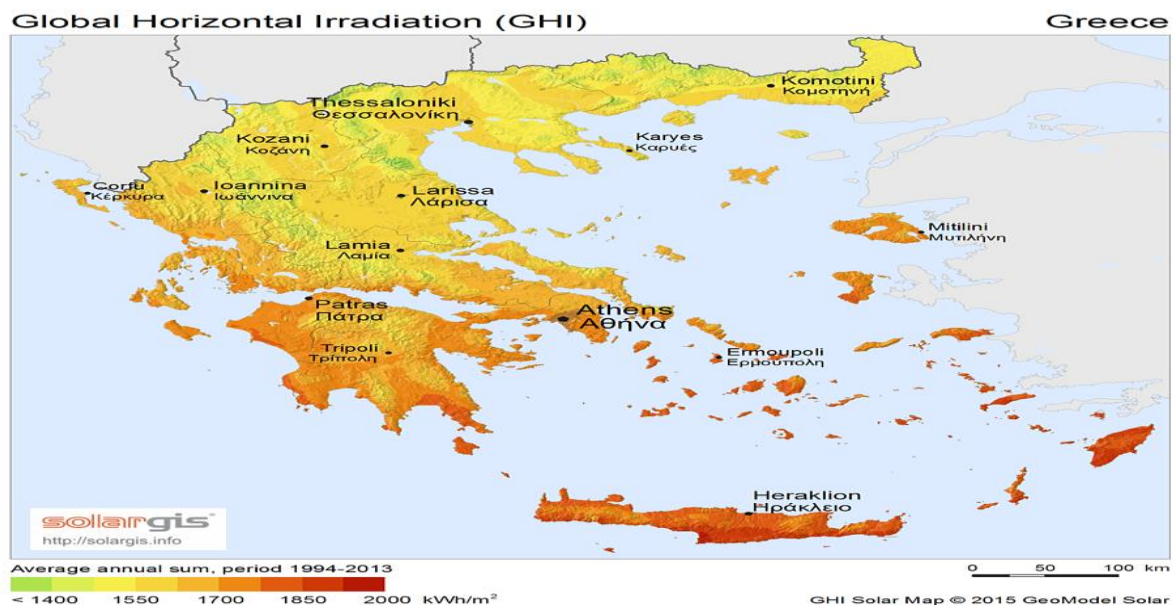
$E_{\text{def}}$  = αναβαλλόμενο φορτίο που εξυπηρετείται (kWh/yr)

$E_{\text{grid,sales}}$  = συνολικές πωλήσεις στο δίκτυο(kWh/yr)

Το κόστος της ενέργειας (COE) είναι μια απλή και βολική μετρική μέθοδος για τη γρήγορη σύγκριση των ενεργειακών συστημάτων.

### 1.3 Ηλιακό δυναμικό και εγκατεστημένη ισχύ Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα

Η μέση ετήσια ηλιακή ακτινοβολία στην Ελλάδα είναι πολύ υψηλή (1800 kWh/m<sup>2</sup>) και είναι περίπου ~ 50% μεγαλύτερη από εκείνη της Γερμανίας. Η Ελλάδα κατέχει την 6<sup>η</sup> θέση μεταξύ 35 χωρών παγκοσμίως όσον αφορά το δείκτη ηλιακής ακτινοβολίας. Το δυναμικό της Ελλάδας όσον αφορά την παραγωγή ενέργειας από τον ήλιο είναι πολύ μεγαλύτερο από τους στόχους που έχει θέσει η NREAP για το 2020 [22]. Το “ηλιακό πλεόνασμα” μπορεί να αξιοποιηθεί όχι μόνο για την Ελλάδα αλλά και από άλλα κράτη μέλη της ΕΕ για την επίτευξη των στόχων τους όσον αφορά το ενεργειακό τους αποτύπωμα με πολύ αποδοτικό τρόπο. Στην [Εικ.2](#) παρουσιάζεται η οριζόντια ακτινοβολία σε διάφορες περιοχές της Ελλάδας.

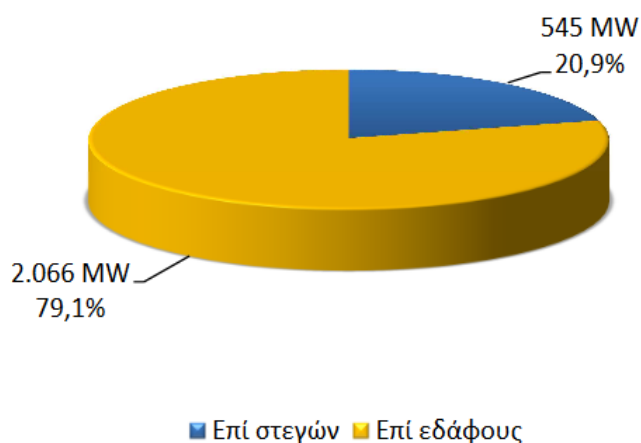


Εικ.2. Ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα [23]

Είναι ξεκάθαρο από τον παραπάνω χάρτη ότι η ηλιακή ακτινοβολία της Ελλάδας μπορεί να εξασφαλίσει όχι μόνο τη συμμόρφωσή της με τους στόχους της NREAP για το 2020 αλλά μπορεί επίσης να συμβάλει σημαντικά στη μείωση του ενεργειακού αποτυπώματος της Ελληνικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Τα Φ/Β πάνελ μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να μετατραπεί αυτή η μεγάλη ηλιακή ακτινοβολία της χώρας σε χρήσιμη ηλεκτρική ενέργεια στην έξοδο. Σύμφωνα με το [24], η τρέχουσα μέση απόδοση των Φ/Β πλαισίων άμορφου πυριτίου είναι 8-10%, 11-15% για τα πολυκρυσταλλικά πάνελ, 13-17%, για τα μονοκρυσταλλικά πάνελ και 19-22% για τις τεχνολογίες υβριδικών Φ/Β πλαισίων. Λόγω της μαζικής παραγωγής των τελευταίων ετών, οι τιμές των Φ/Β πλαισίων πυριτίου είναι ιστορικά χαμηλές. Μεταξύ των πλεονεκτημάτων της τεχνολογίας των Φ/Β είναι το γεγονός ότι η εγκατάσταση φωτοβολταϊκών συστημάτων δεν απαιτεί καμία ιδιαίτερη επεξεργασία του χώρου εγκατάστασης αναφερόμενοι στον κτιριακό κυρίως τομέα, παράγουν καθαρή πράσινη ενέργεια και το προσδόκιμο ζωής τους είναι άνω των 25χρόνων. Όλοι αυτοί οι παράγοντες καθιστούν την τεχνολογία Φ/Β την ιδανική επιλογή για τον οικιακό, εμπορικό και βιομηχανικό καταναλωτή.

Εκμεταλλεούμενοι οι επενδυτές των πλεονεκτημάτων αλλά και των κινήτρων που δόθηκαν από την πολιτεία επένδυσαν στην κατασκευή παντός είδους Φ/Β συστημάτων την τελευταία δεκαετία στην χώρα μας. Έτσι δημιουργήθηκαν δυο μεγάλες κατηγορίες εγκαταστημένων συστημάτων, οι εγκαταστάσεις επί στεγών και επί εδάφους. Όσον αφορά τις εγκαταστάσεις επί εδάφους είναι γεγονός ότι όσο το design για την χωροθέτηση και διαστασιολόγηση των συστημάτων έχει γίνει σωστά τότε θεωρητικά ελαχιστοποιούνται οι πιθανότητες ανομοιομορφίας στην παραγωγή καθώς επίσης και η χρήση μεθόδων βελτιστοποίησης της παραγωγής ενέργειας αυτών των συστημάτων. Όσο όμως αφορά τις οικιακές εγκαταστάσεις τα πράγματα διαφέρουν, καθότι τα συστήματα αυτά υποφέρουν τις περισσότερες φορές από μερική σκίαση από την οποία δεν μπορεί κανείς να απαλλαγεί εύκολα. Αν αναλογιστεί κανείς ότι η συνολική εγκαταστημένη βάση των Φ/Β συστημάτων αγγίζει πλέον τα 2665MW [1] με πάνω από 550MW από αυτά να αφορούν τον κτιριακό τομέα, καταλαβαίνει κανείς την διείσδυση που μπορούν να έχουν οι τεχνολογίες βελτιστοποίησης παραγωγής ακόμα και σε ήδη υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Ο επενδυτής θα πρέπει να επιλέξει εάν τον συμφέρει να κάνει retrofit στο Φ/Β του σύστημα και να αποκομίσει τα οφέλη της μεγαλύτερης παραγωγής ενέργειας από την ενσωμάτωση των

τεχνολογιών αυτών. Η [Εικ.3.](#) παρακάτω παρουσιάζει την εγκαταστημένη ισχύ Φ/Β συστημάτων ανά κατηγορία σταθμών για την χρονική περίοδο μέχρι τα τέλη του έτους 2016.








[Εικ.3.](#) Εγκαταστημένη ισχύ Φ/Β συστημάτων στην Ελλάδα [1]

#### 1.4 Απώλειες παραγωγής ενέργειας στα διασυνδεδεμένα Φ/Β συστήματα

Όπως ήδη έχει αναφερθεί στην βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τις απώλειες στα Φ/Β συστήματα αυτές ποικίλουν ανάλογα με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Ακόμα και το πιο καλοσχεδιασμένο σύστημα συνεχίζει να έχει κάποιες μικρές απώλειες ισχύος. Οι κυριότερες απώλειες εντοπίζονται κυρίως στην ανομοιομορφία των Φ/Β πλαισίων (δεν παράγουν όλα τα πάνελ την ίδια ακριβώς ισχύ), στην απόδοση του inverter, στις απώλειες κατά την μεταφορά της ισχύος κ.α. Οι πιο κρίσιμες όμως απώλειες οι οποίες μπορούν να φανούν και επιβλαβείς για την ίδια την εγκατάσταση είναι αυτές που οφείλονται στην σκίαση και στον διαφορετικό προσανατολισμό των επιμέρους στοιχειοσειρών. Στον [Πίνακα 1.](#) παρακάτω φαίνεται η επίδραση ενός συγκεκριμένου τρόπου σκίασης σε ένα πάνελ ενός string πάνω στην παραγόμενη ενέργεια ολόκληρης της στοιχειοσειράς των πάνελ.



Πίνακας 1. Επίδραση σκίασης σε Φ/Β πλαίσιο [1]

Τρόπος σκίασης	Σκίαση (%)	Ενδεικτική απώλεια ισχύος (1 string x 9 modules)	Ενδεικτική απώλεια ισχύος (3 string x 3 modules)
	0,15%	-3,7%	-1,7%
	2,6%	-16,7%	-7%
	13,9%	-22,2%	-36,8%
	11,1%	-36,5%	-30,5%
	12,5%	-18,3%	-17%

Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα ακόμα και μια πάρα πολύ μικρή τοπική σκίαση σε ένα και μόνο πάνελ μπορεί να μειώσει την παραγωγή κατά 3,7% ολόκληρης της εν σειράς συστοιχίας. Ανάλογα με την σκίαση το ποσοστό απωλειών μπορεί να φτάσει σε πολύ υψηλά νούμερα πλησιάζοντας το 37%. Η μείωση της παραγωγής σημαίνει και μείωση των εσόδων του επενδυτή-ιδιοκτήτη του Φ/Β συστήματος. Ταυτόχρονα το γεγονός αυτό επιμηκύνει το χρόνο απόσβεσης της επένδυσης και την αναμενόμενη χρηματορροή. Η χρήση μονάδων βελτιστοποίησης ενέργειας αποτελεί μονόδρομο σε τέτοιου είδους εγκαταστάσεις αλλά θα πρέπει παράλληλα να αξιολογηθεί η βιωσιμότητα αλλά και το ρίσκο της συγκεκριμένης επένδυσης.

Ένας ακόμα παράγοντας που δημιουργεί ανομοιομορφία στην παραγωγή του συστήματος είναι ο προσανατολισμός. Το πρόβλημα εμφανίζεται συχνότερα στις σκεπές, οι περισσότερες σκεπές έχουν πάνω από δύο προσανατολισμούς, που σημαίνει ότι υποχρεωτικά και τα πάνελ θα ακολουθούν την ίδια κλίση και προσανατολισμό με αυτόν της σκεπής του κτιρίου. Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι θα υπάρχει ανομοιομορφία στην παραγωγή των πλαισίων του συστήματος, κάτι το οποίο σημαίνει ότι η απόδοση του πάνελ με το μικρότερο ρεύμα θα επικρατεί σε ολόκληρο το string. Στον Πίνακα 2. παρακάτω φαίνεται η επίδραση της κλίσης και του προσανατολισμού στην παραγωγή ενός Φ/Β πλαισίου.

Πίνακας 2. Επίδραση της κλίσης και του προσανατολισμού στην παραγωγή ενός Φ/Β πλαισίου [1]

Προσανατολισμός	Κλίση ως προς το οριζόντιο επίπεδο		
	30°	0°	90°
Ανατολικός - Δυτικός	85%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	50%kWh <sub>(max)</sub>
Νότιοανατολικός - Δυτικός	95%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	60%kWh <sub>(max)</sub>
Νότιος	<b>kWh<sub>(max)</sub></b>	90%kWh <sub>(max)</sub>	60%kWh <sub>(max)</sub>
Βόρειοανατολικός - Δυτικός	95%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	30%kWh <sub>(max)</sub>
Βόρειος	60%kWh <sub>(max)</sub>	90%kWh <sub>(max)</sub>	20%kWh <sub>(max)</sub>

Όπως επίσης μπορεί κανείς να διαπιστώσει από τον παραπάνω πίνακα ο βέλτιστος προσανατολισμός και κλίση των Φ/Β πλαισίων για τον Ελλαδικό χώρο είναι ο Νότιος προσανατολισμός και οι 30° κλίση. Προφανώς οι βέλτιστες συνθήκες προσανατολισμού και κλίσης δεν συναντώνται στις περισσότερες κτιριακές εγκαταστάσεις. Η λύση εδώ μπορεί επίσης να δοθεί με την χρήση των power optimizers ή και των microinverters.

### 1.5 Στόχοι και σκοποί

Ο κύριος στόχος του έργου είναι η εξέταση των σύγχρονων τεχνολογιών ενσωματωμένων συστημάτων που χρησιμοποιούνται για την ενεργειακή βελτιστοποίηση Φ/Β συστημάτων και η προώθηση της υιοθέτησης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Για το λόγο αυτό αναπτύσσονται διαφορετικά μοντέλα προσομοίωσης με τα λογισμικά προγράμματα PVSYS & HOMER Grid προκειμένου να αναλυθούν οι τεχνικές και οικονομικές επιπτώσεις των ενσωματωμένων συστημάτων σε μεγαλύτερο αλλά και

μικρότερου μεγέθους Φ/Β έργων. Ενδεικτικά παρατίθεται παρακάτω η λίστα με τους κύριους στόχους της συγκεκριμένης εργασίας.

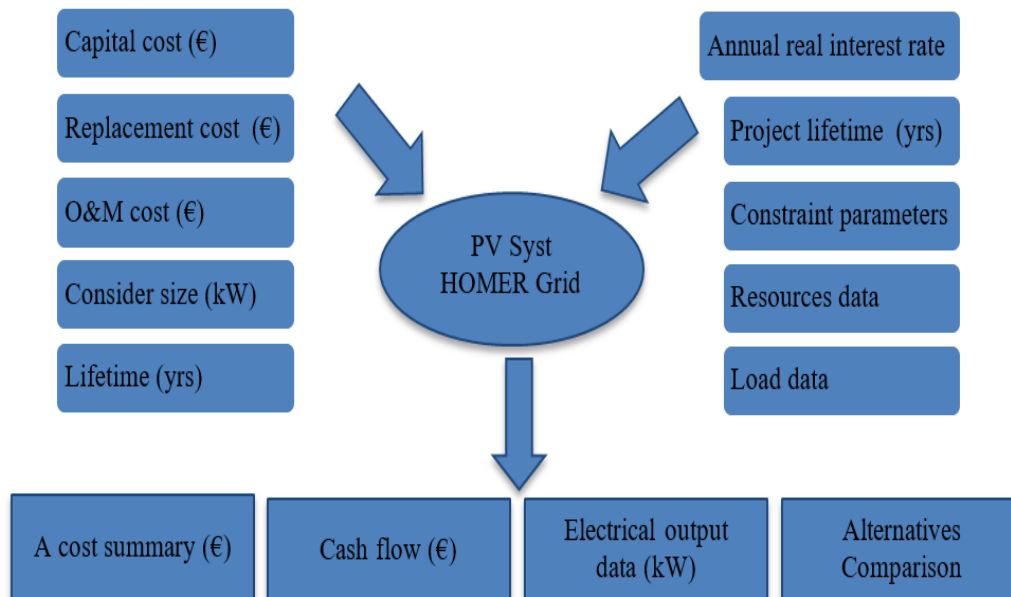
- Να μελετήσει και να αξιολογήσει σε τεχνικό και οικονομικό επίπεδο, τις τρεις κύριες κατηγορίες ενσωματωμένων συστημάτων (DC-DC power optimizer, microinverters, cell string optimizer )
- Να διακρίνει σε κάθε περίπτωση την καταλληλότερη επιλογή
- Να συγκρίνει (τεχνοοικονομικά) τις τρεις επικρατούσες τεχνολογίες με τους συμβατικούς string inverters
- Να αξιολογήσει τα δεδομένα στην έξοδο του συστήματος (κόστος, βιωσιμότητα, ευκαιρίες και προκλήσεις κλπ)
- Να προτείνει μέτρα αύξησης της αποδοτικότητας ενός Φ/Β συστήματος
- Να σχολιάσει και να αναδείξει την σπουδαιότητα των IoT συστημάτων
- Να τονίσει τα πολλαπλά οφέλη της επιλογής ενός Demand Response προγράμματος
- Να παραθέσει και να συγκρίνει στοιχεία μιας πραγματικής εγκατάστασης με τοπολογία microinverters και string inverter

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

### 2. Λογισμικά προγράμματα, προσομοιώσεις και αποτελέσματα

Αρχικά η 1<sup>η</sup> μελέτη περίπτωσης της βελτιστοποίησης διασυνδεδεμένου μερικώς σκιασμένου Φ/Β συστήματος θα προσομοιωθεί με την βοήθεια του PVSYST. Τα δεδομένα για την μοντελοποίηση του συστήματος είναι πραγματικά και αφορούν εγκατάσταση διασυνδεδεμένου Φ/Β συστήματος 9,84kWp εγκατεστημένης ισχύος στην περιοχή Μαγούλα Αθηνών. Το γεωγραφικό πλάτος και μήκος της εγκατάστασης είναι Latitude 38.073802 / Longitude 23.524423. Πραγματικά δεδομένα όπως ο χώρος εγκατάστασης μαζί με τα εμπόδια (σκιάσεις) της ταράτσας, καθώς επίσης και ο τύπος του εξοπλισμού (πάνελ, inverter, βάσεις στήριξης) , το κόστος του εξοπλισμού, οι αποστάσεις των ηλεκτρικών καλωδιώσεων του έργου, τα λειτουργικά κόστη του έργου όπως η συντήρηση του εξοπλισμού κλπ, θα δοθούν ως είσοδοι στο PVSYST και τα άλλα δύο λογισμικά προγράμματα ώστε να γίνει καταγραφή των αποτελεσμάτων του 1<sup>ου</sup> μοντέλου και σύγκριση αυτών των αποτελεσμάτων με τις πραγματικές τιμές του Φ/Β συστήματος οι οποίες είναι καταγεγραμμένες στο log file του inverter. Έπειτα θα ακολουθήσει η προσομοίωση του ίδιου ακριβώς συστήματος αλλά αυτή την φορά θα χρησιμοποιηθεί η τοπολογία των DC-DC power optimizers. Τέλος η τρίτη προσομοίωση θα γίνει για ακριβώς το ίδιο σύστημα με την χρήση τοπολογίας microinverters. Όλα τα αποτελέσματα θα συγκεντρωθούν σε πίνακες θα αναλυθούν και συγκριθούν μεταξύ τους ώστε να διακριθεί ποιο σχήμα είναι αυτό που προαφάιρει την μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας και σε ποιο κόστος ακριβώς.

Για την προσομοίωση των συγκεκριμένων συστημάτων θα χρησιμοποιηθούν δύο λογισμικά πακέτα το PVYSTS και το Homer Grid. Τα συγκεκριμένα πακέτα θα δέχονται στην είσοδο τους τα πραγματικά δεδομένα της εγκατάστασης, θα τα επεξεργάζονται και θα μας δίνουν την έξοδο τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα της προσομοίωσης του κάθε μοντέλου ξεχωριστά. Στην [Εικ.4.](#) παρακάτω φαίνεται το block διάγραμμα της αρχιτεκτονικής της μοντελοποίησης που ακολουθούν τα δύο λογισμικά πακέτα, βάση των οποίων θα μοντελοποιηθούν τα πρώτα τέσσερα συστήματα αναφοράς.



Εικ.4. Διαδικασία προσομοίωσης μοντέλων

## 2.1 Πρώτη μελέτη περίπτωσης – Βελτιστοποίηση διασυνδεδεμένου βασικού Φ/Β συστήματος

Το φωτοβολταϊκό σύστημα το οποίο αξιολογείται βρίσκεται εγκαταστημένο σε ένα προάστιο της Αθήνας με γεωγραφικές συντεταγμένες Πλάτος 38.073931 / Μήκος 23.524889. Ο προσανατολισμός της στέγης είναι Νότιος. Η εγκατεστημένη ισχύς είναι 9,84 kWp και το σύστημα αποτελείται από 41 πολυκρυσταλλικά πάνελ Renesola μοντέλου JC240M-24 / Bb. Η κλίση των πάνελ είναι 20°. Ο string inverter είναι της εταιρείας Kostal Piko 10kW, ο οποίος τροφοδοτείται με 20 και 21 πάνελ σε σειρά στους δύο ιχνηλάτες MPPT αντίστοιχα. Το σύστημα συνδέεται με το ηλεκτρικό δίκτυο μέσω προγράμματος Net Metering με τιμή αντιστάθμισης 0,14 € / kWh, καθώς το κτίριο εξυπηρετεί τις απαιτήσεις μιας εμπορικής επιχείρησης [25]. Μεταξύ του παραγωγού και του διαχειριστή του δικτύου υπάρχει μια σύμβαση για 25 χρόνια για την αντιστάθμιση της ενέργειας. Το κτίριο είναι 4 μέτρα σε ύψος και η ταράτσα είναι περίπου 170m<sup>2</sup>. Στην περίμετρο της βεράντας στην Ανατολική και τη Δυτική πλευρά υπάρχει στηθαίο ύψους 1,4 μ. Ενώ στη Νότια και Βόρεια πλευρά υπάρχει ένα μαρμάρινο στηθαίο 0,80 μ. Η Εικ.5 παρακάτω δείχνει μια επισκόπηση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

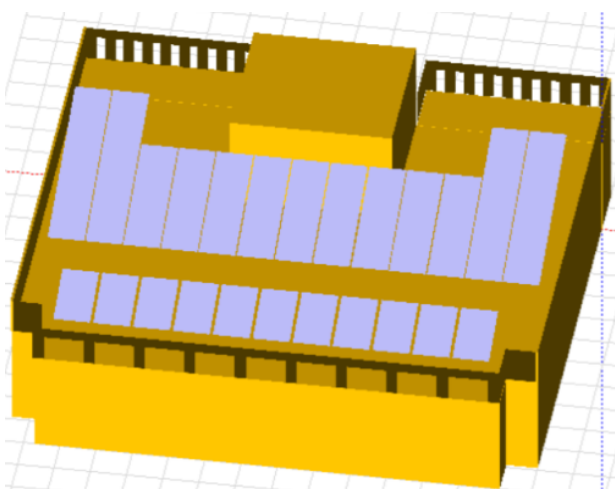


Εικ.5. Φ/Β εγκατάσταση [26]

Το προαναφερθέν φωτοβολταϊκό σύστημα που βασίζεται στην τεχνολογία string inverter θα είναι το βασικό σύστημα των προσομοιώσεων που θα ακολουθήσουν. Στη συνέχεια για το ίδιο σύστημα προσομοιώνεται η επίδραση σκίασης στην παραγωγή ενέργειας 5 διαφορετικών σεναρίων μελέτης περίπτωσης. Η πρώτη μελέτη περίπτωσης αφορά την επίδραση σκίασης μιας καμινάδας ύψους 3 μέτρων στα δυτικά του κτιρίου. Η δεύτερη περίπτωση αφορά προσομοίωση σκίασης καλωδίου που περνά στη Νότια πλευρά του κτιρίου σε ύψος 5 μέτρα πάνω από τα Φ/Β πλαίσια. Στο τρίτο σενάριο προσομοιώνεται η σκίαση δύο δέντρων που τοποθετούνται στη Νότια πλευρά του κτιρίου με συνολικό ύψος 9 και 11 μέτρων αντίστοιχα. Στην συνέχεια ακολουθεί η προσομοίωση σκίασης του κτιρίου του γείτονα που κατασκευάζει ένα νέο επίπεδο ορόφου 4 μέτρα ψηλότερο από το ύψος της εγκατάστασης του φωτοβολταϊκού συστήματος στην Δυτική πλευρά του κτιρίου. Η τελευταία προσομοίωση αφορά το χειρότερο σενάριο δηλαδή την ύπαρξη όλων των εμποδίων που υπάρχουν μαζί. Για οποιαδήποτε από αυτά τα σενάρια αξιολογείται σε τεχνοοικονομική βάση η απόδοση του string inverter, των DC/DC power optimizers, των microinverters και των cell string optimizers. Τέλος δημιουργούνται άλλα τρία σενάρια προσομοίωσης, τα οποία αντανακλούν τις απώλειες ενέργειας λόγω σκίασης και πιθανών διαφορών στον προσανατολισμό και την κλίση μεταξύ των πάνελ. Για τις συγκεκριμένες τρεις προσομοιώσεις αλλάζουμε την κλίση των 11 πάνελ στην πρώτη σειρά σε 5° και στη

συνέχεια αλλάζουμε τον προσανατολισμό τους από το Νότιο σε  $-20^\circ$  και τέλος ένας συνδυασμός αυτών των δύο σεναρίων δίνεται ως είσοδος στο PV Syst για να εξετάσει την απόδοση των τεσσάρων τοπολογιών που χρησιμοποιούνται σε Φ/Β εγκαταστάσεις όχι μόνο σε φαινόμενα σκίασης αλλά και σε συνθήκες αναντιστοιχίας μεταξύ των διαφόρων στοιχειοσειρών πάνελ του συστήματος.

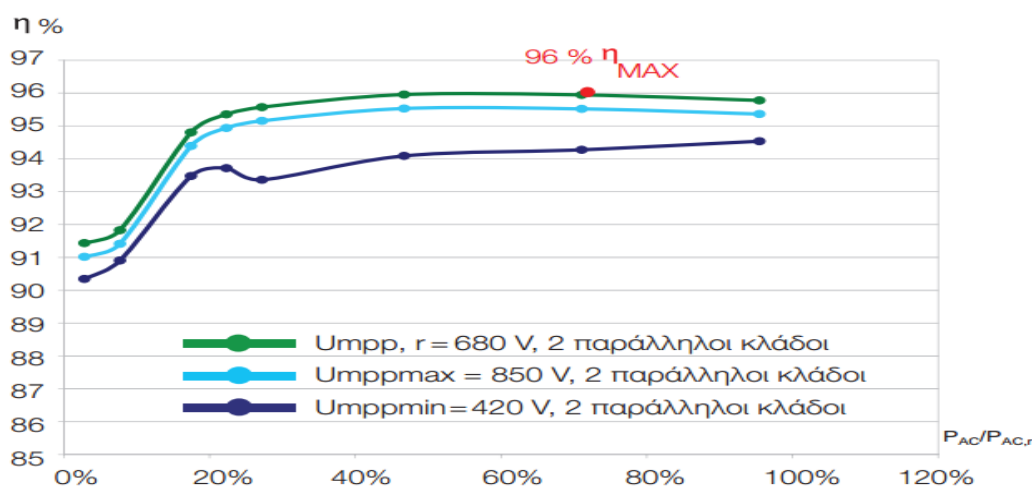
Το πρώτο σενάριο μελέτης περίπτωσης που αναπτύσσεται αφορά το βασικό σύστημα. Το αρχικό κόστος για το εγκατεστημένο σύστημα είναι 14.312 € το οποίο καλύπτει τα συνολικά έξοδα ολόκληρου του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των δαπανών όπως τα φωτοβολταϊκά πλαίσια, ο μετατροπέας, οι βάσεις στήριξης και οι χρεώσεις εγκατάστασης και σύνδεσης με το δίκτυο. Η πρώτη εναλλακτική λύση έναντι του string inverter είναι η χρήση των DC/DC power optimizers, για το λόγο αυτό ο μετατροπέας Solar Edge SE10kW έχει επιλεγεί μαζί με 41τμχ power optimizers του μοντέλου P300, με συνολικό κόστος 15.112 €. Για την εναλλακτική των microinverters χρησιμοποιούνται 41τμχ μονάδων της Ephase του μοντέλου S270-72-LN-x-230 με συνολική ισχύ 10,7kW. Το συνολικό κόστος κτήσης αυτού του συστήματος ανέρχεται σε 16.822 €. Για την τελευταία επιλογή των cell string optimizers επιλέγεται το μοντέλο Maxim VT8020 με ονομαστική ισχύ 3x93Watt ανά φωτοβολταϊκή μονάδα μαζί με τον μετατροπέα Kostal Piko 10kW ο οποίος είναι ο βασικός μετατροπέας στοιχειοσειρών του βασικού συστήματος αναφοράς. Το τελικό κόστος για αυτήν την εναλλακτική είναι 15.296 €. Όλες τις πληροφορίες που αφορούν τα κοστολογικά στοιχεία του έργου έχουν αντληθεί από EPC εταιρεία που δραστηριοποιείται στον ευρύτερο χώρο [27] και που έχει πραγματοποιήσει και την εγκατάσταση του συστήματος. Στην [Εικ.6](#) παρακάτω απεικονίζεται μια τρισδιάστατη εικόνα του βασικού συστήματος με την τεχνολογία string inverter που αρχικά εξετάζεται.



[Εικ.6](#). Απεικόνιση βασικού Φ/Β συστήματος

### 2.1.1 Προσομοίωση συστήματος με τοπολογία string inverter

Πρέπει να αναφερθεί ότι το εν λόγω Φ/Β σύστημα είναι εγκατεστημένο από τα μέσα του 2012. Ο inverter που έχει χρησιμοποιηθεί στο συγκεκριμένο έργο είναι ο PIKO 10.1 της εταιρείας KOSTAL. Ο inverter διαθέτει ενσωματωμένο web-interface και ενσωματωμένη μνήμη αποθήκευσης για την καταγραφή log files. Το συγκεκριμένο μοντέλο διαθέτει 3 εισόδους DC (MPPT) ενώ ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του είναι 96%. Έχουν χρησιμοποιηθεί δύο από τις τρεις εισόδους του με συνδεδεμένα 20 και 21 πολυκρυσταλλικά Φ/Β πλαίσια σε σειρά, τύπου JC240M-24/Bd της εταιρείας RENESOLA. Οι βάσεις στήριξης που έχουν χρησιμοποιηθεί είναι κατασκευασμένες από αλουμίνιο και έχουν 20° κλίση. Στην [Εικ.7.](#) που ακολουθεί φαίνεται η χαρακτηριστική καμπύλη βαθμού απόδοσης του inverter.



Εικ.7. Χαρακτηριστική καμπύλη βαθμού απόδοσης inverter Kostal Piko 10.1

Από την παραπάνω καμπύλη παρατηρούμε ότι ο μέγιστος βαθμός απόδοσης του inverter επιτυγχάνεται όταν υπάρχουν συνδεδεμένοι δυο παράλληλοι κλάδοι και η τάση των πάνελ είναι 680V. Στο [Παράρτημα 2](#) φαίνονται οι φωτογραφίες από την εγκατάσταση του Φ/Β συστήματος καθώς επίσης και η κάτοψη του συστήματος.

Η 1<sup>η</sup> προσομοίωση της συμπεριφοράς του Φ/Β συστήματος αφορά την τοπολογία string inverter με τον εξοπλισμό που περιεγράφηκε παραπάνω. Στον [Πίνακα 3](#) παρακάτω φαίνονται συγκεντρωτικά όλα τα στοιχεία της προσομοίωσης. Αυτό που θα αξιολογηθεί με την χρήση του PV Syst είναι η επίδραση της σκίασης από τα εμπόδια που υπάρχουν στην ταράτσα του κτιρίου στην παραγομένη ενέργεια στην έξοδο του συστήματος. Εν συνέχεια το αποτέλεσμα αυτό θα συγκριθεί με τα αποτελέσματα των άλλων δύο προσομοιώσεων.



**Πίνακας 3.** Δεδομένα προσομοίωσης τοπολογίας string inverter

Εξοπλισμός	Σχηματισμός	Τιμή
Παράμετροι συστήματος	Ετήσιο πραγματικό επιτόκιο	0%
	Διάρκεια ζωής έργου	25 years
Δίκτυο	Ισχύς	30kW
	Τιμή αγοράς	0,09€/kWh
	Τιμή πώλησης	0,40€/kWh
Φ/Β πλαίσια	Ποσότητα	41pcs
	Απόδοση	15%
	Ποσοστό σκίασης	3%
	Κόστος κτήσης	132€/πάνελ
	Κόστος αντικατάστασης	132€/πάνελ
	Λειτουργικό κόστος	100€/χρόνο
Inverter	Ισχύς	10kW
	Απόδοση	96%
	MTBF	-
	Κόστος κτήσης	2.000 €
	Κόστος αντικατάστασης	2.000 €
	Λειτουργικό κόστος	50€/χρόνο
Βάσεις στήριξης	Κόστος κτήσης	2.400 €
Εγκατάσταση, Σύνδεση, Μεταφορά, Μικρουλικά	Κόστη	4.500 €
<b>Συνολικό κόστος Φ/Β συστήματος</b>		<b>14.312 €</b>

### 2.1.2 Προσομοίωση συστήματος με τοπολογία DC power optimizers

Όσο αφορά την προσομοίωση της δεύτερης εναλλακτικής επιλογής, ο εξοπλισμός των Φ/Β πλαισίων και των βάσεων στήριξης καθώς επίσης και ολόκληρου του σχεδιασμού της Φ/Β εγκατάστασης παραμένει ο ίδιος. Η μόνη εξαίρεση στο set up είναι η αντικατάσταση του string inverter με τους DC-DC power optimizers της Solar Edge και τον κεντρικό inverter τους. Τα power optimizer που θα χρησιμοποιηθούν είναι ένα module/πάνελ τύπου P300 των 300W έκαστο, άρα συνολικά 41 τέτοιες μονάδες θα εγκατασταθούν πίσω από την βάση στήριξης του κάθε πάνελ ξεχωριστά. Ο βαθμός απόδοσης της κάθε ενσωματωμένης μονάδας βελτιστοποίησης είναι 99,5%. Ο inverter που θα χρησιμοποιηθεί είναι ο SE10K, ισχύος 10kW με μέγιστο βαθμό απόδοσης 97,6%. Το συγκεκριμένο μοντέλο inverter διαθέτει επίσης ενσωματωμένο web-interface και extra

μνήμη για τα log files. Οι optimizers της συγκεκριμένης εταιρείας συνεργάζονται μόνο με μοντέλα inverter της ίδιας εταιρείας. Στην αντίπερα όχθη πολλοί κατασκευαστές optimizers συνεργάζονται σχεδόν με όλα τα διαθέσιμα μοντέλα string inverters και άλλων κατασκευαστών. Το πλεονέκτημα που σου δίνει αυτός ο σχεδιασμός είναι ότι μπορείς να έχεις πληροφορίες και δεδομένα για το κάθε Φ/Β πλαίσιο ξεχωριστά μέσω της πλατφόρμας παρακολούθησης και ελέγχου που σου προσφέρει η κατασκευάστρια εταιρεία.

Στον Πίνακα 4. παρουσιάζονται τα δεδομένα προσομοίωσης της συγκεκριμένης τοπολογίας.

**Πίνακας 4.** Δεδομένα προσομοίωσης τοπολογίας DC power optimizers

Εξοπλισμός	Σχηματισμός	Τιμή
Παράμετροι συστήματος	Ετήσιο πραγματικό επιτόκιο	0%
	Διάρκεια ζωής έργου	25 years
Δίκτυο	Ισχύς	30kW
	Τιμή αγοράς	0,09€/kWh
	Τιμή πώλησης	0,40€/kWh
Φ/Β πλαίσια	Ποσότητα	41pcs
	Απόδοση	14.75%
	Ποσοστό σκίασης	3%
	Κόστος κτήσης	132€/πάνελ
	Κόστος αντικατάστασης	132€/πάνελ
	Λειτουργικό κόστος	100€/χρόνο
DC power optimizer	Ισχύς	300W
	Απόδοση	99.5%
	MTBF	-
	Κόστος κτήσης	36€/τμχ
	Κόστος αντικατάστασης	36€/τμχ
	Λειτουργικό κόστος	-
Inverter	Ισχύς	10kW
	Απόδοση	97.6%
	MTBF	-
	Κόστος κτήσης	1.330 €
	Κόστος αντικατάστασης	1.330 €
	Λειτουργικό κόστος	50€/χρόνο
Βάσεις στήριξης	Κόστος κτήσης	2.400 €
Εγκατάσταση, Σύνδεση, Μεταφορά, Μικρουλικά	Κόστη	4.500 €
<b>Συνολικό κόστος Φ/Β συστήματος</b>		<b>15.118 €</b>

### 2.1.3 Προσομοίωση συστήματος με τοπολογία microinverters

Η προσομοίωση της τρίτης εναλλακτικής επιλογής αφορά επίσης το ίδιο σύστημα αναφοράς μόνο που τώρα γίνεται χρήση των microinverters ως μετατροπείς ενέργειας. Οι μονάδες αυτές είναι της κατασκευάστριας εταιρείας Ephase, έχουν ονομαστική ισχύ 350W max έκαστο module, και βαθμό απόδοσης που φτάνει το 96.9%. Μια τέτοια μονάδα ενσωματώνεται στο πίσω μέρος του κάθε πάνελ. Με την χρήση της συγκεκριμένης τοπολογίας δεν απαιτείται η ύπαρξη ενός κεντρικού solar inverter. Τα δεδομένα και οι πληροφορίες προσομοίωσης για την συγκεκριμένη εναλλακτική φαίνονται στον Πίνακα 5. που ακολουθεί.

Πίνακας 5. Δεδομένα προσομοίωσης τοπολογίας microinverters

Εξοπλισμός	Σχηματισμός	Τιμή
Παράμετροι συστήματος	Ετήσιο πραγματικό επιτόκιο	0%
	Διάρκεια ζωής έργου	25 years
Δίκτυο	Ισχύς	30kW
	Τιμή αγοράς	0,09€/kWh
	Τιμή πώλησης	0,40€/kWh
Φ/Β πλαίσια	Ποσότητα	41pcs
	Απόδοση	14.75%
	Ποσοστό σκίασης	3%
	Κόστος κτήσης	132€/πάνελ
	Κόστος αντικατάστασης	132€/πάνελ
	Λειτουργικό κόστος	100€/χρόνο
Microinverters	Ισχύς	350W max
	Απόδοση	96.9%
	MTBF	-
	Κόστος κτήσης	110€/τμχ
	Κόστος αντικατάστασης	110€/τμχ
	Λειτουργικό κόστος	-
Βάσεις στήριξης	Κόστος κτήσης	2.400 €
Εγκατάσταση, Σύνδεση, Μεταφορά, Μικρουλικά	Κόστη	4.500 €
<b>Συνολικό κόστος Φ/Β συστήματος</b>		<b>16.822 €</b>

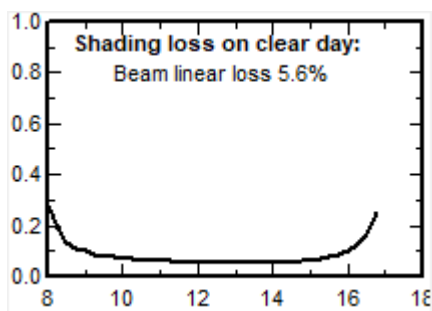
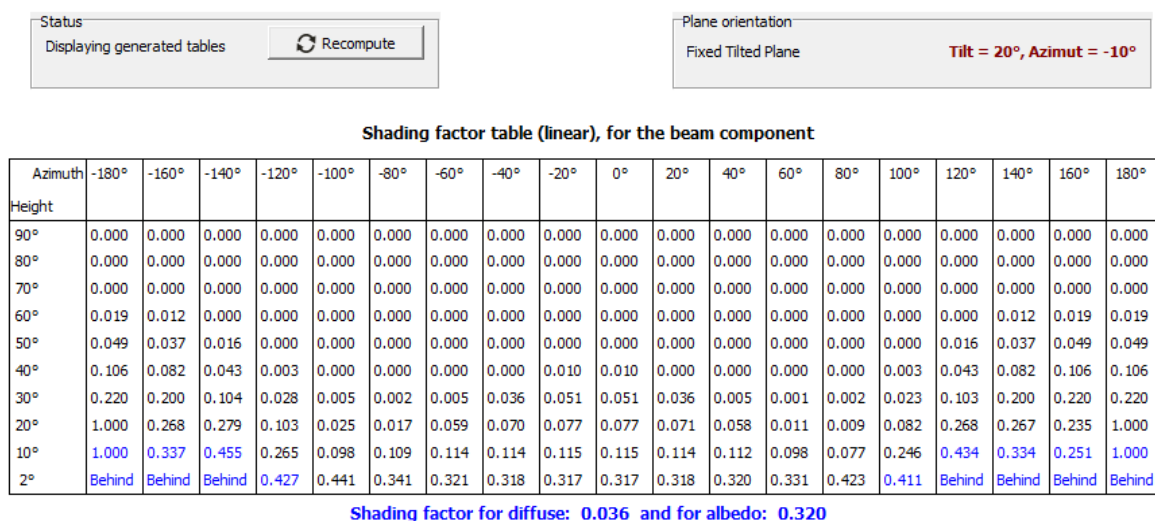
## 2.1.4 Προσομοίωση συστήματος με τοπολογία cell string optimizers

Όσον αφορά την τρίτη εναλλακτική επιλογή για την βελτιστοποίηση της παραγόμενης ενέργειας ενός Φ/Β συστήματος αυτή δεν είναι άλλη από την τεχνολογία των cell string optimizers. Έτσι για την συγκεκριμένη προσομοίωση επιλέγεται το μοντέλο Maxim VT8020 με ονομαστική ισχύ 3x93Watt ανά φωτοβολταϊκή μονάδα μαζί με τον αντιστροφέα Kostal Piko 10kW. Επί της ουσίας τα συγκεκριμένα chips είναι ενσωματωμένα στο connection box του κάθε Φ/Β πλαισίου ξεχωριστά, έτσι λοιπόν η μόνη διαφοροποίηση στην κοστολόγηση του συγκεκριμένης τοπολογίας είναι το γεγονός ότι τα Φ/Β πάνελ είναι πιο ακριβά από τις προηγούμενες κοστολογήσεις. Το τελικό κόστος κτήσης για αυτήν την εναλλακτική είναι 15.296€ και είναι η δεύτερη πιο ακριβή λύση μετά την επιλογή των microinverters. Τα δεδομένα και οι πληροφορίες προσομοίωσης για την συγκεκριμένη εναλλακτική φαίνονται στον [Πίνακα 6](#). που ακολουθεί.

**Πίνακας 6.** Δεδομένα προσομοίωσης τοπολογίας cell string optimizers

<b>Εξοπλισμός</b>	<b>Σχηματισμός</b>	<b>Τιμή</b>
Παράμετροι συστήματος	Ετήσιο πραγματικό επιτόκιο	0%
	Διάρκεια ζωής έργου	25 years
Δίκτυο	Ισχύς	30kW
	Τιμή αγοράς	0,09€/kWh
	Τιμή πώλησης	0,40€/kWh
Φ/Β πλαίσια	Ποσότητα	41pcs
	Απόδοση	15%
	Ποσοστό σκίασης	3%
	Κόστος κτήσης	156€/πάνελ
	Κόστος αντικατάστασης	156€/πάνελ
	Λειτουργικό κόστος	100€/χρόνο
Inverter	Ισχύς	10kW
	Απόδοση	96%
	MTBF	-
	Κόστος κτήσης	2.000 €
	Κόστος αντικατάστασης	2.000 €
Βάσεις στήριξης	Λειτουργικό κόστος	50€/χρόνο
	Κόστος κτήσης	2.400 €
Εγκατάσταση, Σύνδεση, Μεταφορά, Μικρουλικά	Κόστη	4.500 €
<b>Συνολικό κόστος Φ/Β συστήματος</b>		<b>15.296 €</b>

Όσον αφορά τα αποτελέσματα για το ποσοστό σκίασης του βασικού Φ/Β συστήματος αυτά φαίνονται στην [Εικ.8.](#) και διακρίνονται στα αποτελέσματα του ποσοστού σκίασης του συστήματος ανά ύψος και αζιμούθιο αντίστοιχα. Στην ίδια εικόνα φαίνεται επίσης η χαρακτηριστική καμπύλη σκίασης για την 21/12 του κάθε χρόνου που θεωρητικά είναι η χειρότερη μέρα από άποψη επίδρασης σκιάσεων πάνω στο σύστημα, λόγω του ότι ο ήλιος βρίσκεται στο πιο χαμηλό ύψος που μπορεί να βρεθεί μέσα στο έτος.



**Εικ.8.** Ετήσια αποτελέσματα προσομοίωσης σκίασης και 21/12 ημέρας

Από την παραπάνω εικόνα συμπεραίνουμε ότι η σκίαση των Φ/Β πλαισίων για το βασικό σύστημα αναφοράς μας είναι μικρή, σχεδόν μηδαμινή τους καλοκαιρινούς μήνες, ενώ φαίνεται να έχει μια μικρή επίδραση πάνω στα πάνελ τους χειμερινούς μήνες.

Ποια είναι όμως τα αποτελέσματα ανά τοπολογία που χρησιμοποιήθηκε, πόσο και τι επιρροή είχε η κάθε τοπολογία στην έξοδο του συστήματος? Ποια από τις τέσσερις εναλλακτικές δείχνει συνολικά ποιο επικερδής επιλογή? Ο [Πίνακας 7.](#) που ακολουθεί δίνει

απαντήσεις σε όλα τα παραπάνω ερωτήματα, αφού παρουσιάζει τα αποτελέσματα της προσομοίωσης του PV Syst για το βασικό φωτοβολταϊκό σύστημα. Όλα τα οικονομικά δεδομένα ταξινομούνται για 25 χρόνια ζωής του έργου.

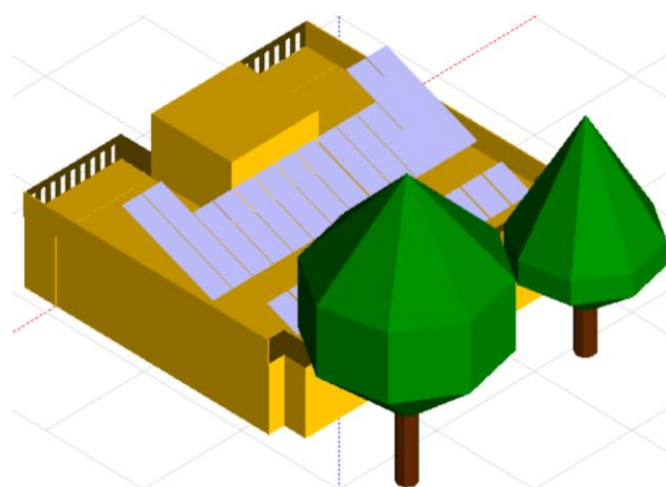
**Πίνακας 7.** Αποτελέσματα προσομοίωσης σκίασης βασικού Φ/Β συστήματος

Shadings Scenario	System Topology	Electrical loss due to shadings (%)	Initial Produced Energy (kWh)	Capital Cost (€)	Annual Profit (€)	25 Years Profit (€)	Payback Period (yrs)	IRR (%)
Baseline PV system	String Inverter	0,5	14.540	14.312	2.036	46.321	7,2	10,7
	Power Optimizers	0,2	16.240	15.118	2.274	51.737	6,8	11,8
	Microinverters	0,2	15.870	16.822	2.222	50.558	7,7	9,2
	Cell string optimizers	0,2	16.030	15.296	2.244	51.068	7	11,3

Από τον Πίνακα 7 μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι ο πελάτης παρόλο που το βασικό σύστημα αναφοράς δεν υποφέρει από μεγάλα ποσοστά σκίασης δεν έκανε τη σωστή επιλογή επιλέγοντας τον string inverter για την εγκατάστασή του, καθώς η εναλλακτική λύση των power optimizers έχει συντομότερη περίοδο αποπληρωμής 6,8 χρόνια και υψηλότερο βαθμό εσωτερικής απόδοσης (IRR) 11,8%. Τα κριτήρια για την συγκεκριμένη επιλογή του πελάτη είχαν να κάνουν αποκλειστικά με την χαμηλότερη τιμή κτήσης του συστήματος ενώ όπως όλα δείχνουν η περίοδος αποπληρωμής και το IRR μπήκαν σε δεύτερη ‘μοίρα’.

## 2.2 Δεύτερη μελέτη περίπτωσης προσομοίωση διαφόρων ειδών σκίασης

Εδώ πριν ξεκινήσει η ανάλυση της προσομοίωσης των επιμέρους ειδών σκίασης που μπορεί να προκύψουν σε ένα οικιακό Φ/Β σύστημα θα πρέπει να αναφερθεί για τα δικά μας μοντέλα προσομοίωσης πως η επίδραση της σκίασης της καμινάδας και των ηλεκτρικών καλωδίων της ΔΕΗ ήταν πολύ μικρή στην παραγωγή του συστήματος και γι' αυτό τον λόγο δεν παρουσιάζονται. Το επόμενο σενάριο σκίασης λοιπόν που φαίνεται στην [Εικ.9.](#) και τα αποτελέσματά του στον [Πίνακα 8](#) αφορά την ύπαρξη δύο υψηλών δέντρων στην Νότια πλευρά του κτιρίου ακριβώς μπροστά από τα πάνελ.



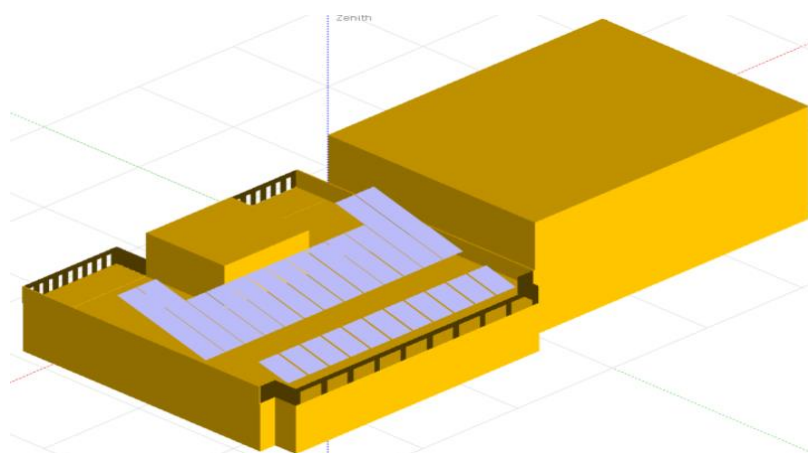
[Εικ.9.](#) Σενάριο σκίασης από δέντρα

[Πίνακας 8.](#) Αποτελέσματα προσομοίωσης σκίασης των δέντρων

Shading Scenario	System Topology	Electrical loss due to shadings (%)	Initial Produced Energy (kWh)	Annual Profit (€)	25 Years Profit (€)	Payback Period (yrs)	IRR (%)
Trees	String Inverter	9,2	13.090	1.833	41.702	8	8,5
	Power Optimizers	4,4	14.060	1.968	44.792	7,8	8,9
	Microinverters	5,2	13.610	1.905	43.359	9,1	6,1
	Cell string optimizers	4,4	13.478	1.887	42.938	8,3	7,8

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι για την σκίαση που προκαλείται από τα συγκεκριμένα δέντρα η καλύτερη επιλογή εξακολουθεί να είναι αυτή των DC/DC power optimizers ενώ στην δεύτερη θέση βρίσκεται η λύση του string inverter και έπονται οι εναλλακτικές των cell string optimizers και των microinverters αντίστοιχα.

Το σενάριο της μελέτης περιπτώσεων της κατασκευής νέου ορόφου στο κτίριο του γείτονα έχει μικρότερο αντίκτυπο όσον αφορά τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας από το φαινόμενο των δέντρων. Η απεικόνιση και τα αποτελέσματα αυτής της προσομοίωσης παρουσιάζονται στην [Εικ.10](#). και στον [Πίνακα 9](#) παρακάτω αντίστοιχα.



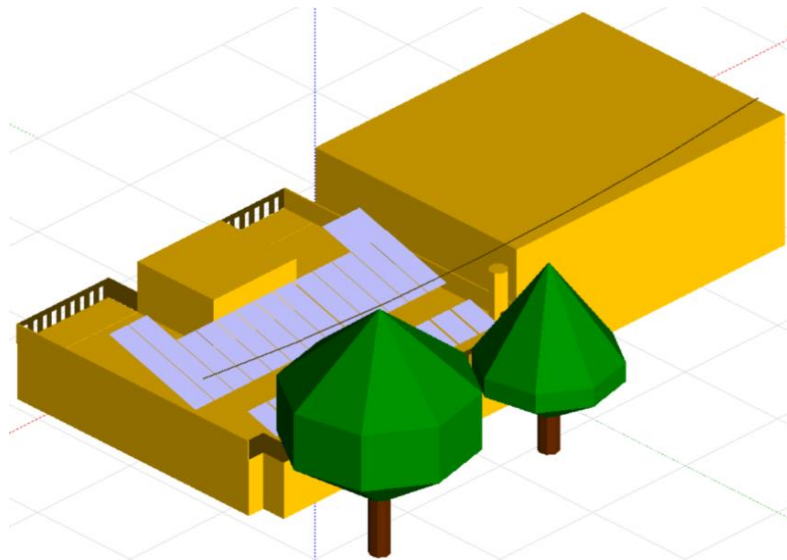
[Εικ.10](#). Σενάριο σκίασης από γειτονικό κτίριο

[Πίνακας 9](#). Αποτελέσματα προσομοίωσης σκίασης από γειτονικό κτίριο

Shading Scenario	System Topology	Electrical loss due to shadings (%)	Initial Produced Energy (kWh)	Annual Profit (€)	25 Years Profit (€)	Payback Period (yrs)	IRR (%)
Building	String Inverter	4,1	14.540	2.036	46.321	7,2	10,7
	Power Optimizers	1,5	15.200	2.128	48.424	7,3	10,5
	Microinverters	2,2	14.740	2.064	46.958	7,8	8,9
	Cell string optimizers	1,4	14.779	2.069	47.083	7,6	9,6

Τέλος, το τελευταίο σενάριο που αφορά την ταυτόχρονη παρουσία όλων των εμποδίων παρουσιάζεται στην [Εικ.11](#). και τα αντίστοιχα αποτελέσματα στον [Πίνακα 10](#).



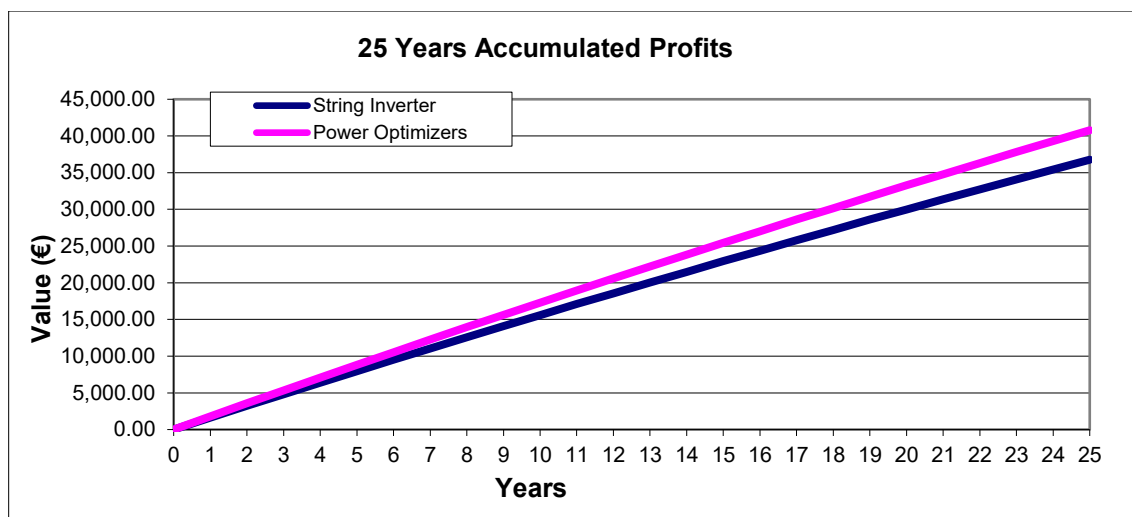


Εικ.11. Σενάριο σκίασης με όλα τα εμπόδια μαζί

Πίνακας 10. Αποτελέσματα προσομοίωσης σκίασης όλων των εμποδίων μαζί

Shading Scenario	System Topology	Electrical loss due to shadings (%)	Initial Produced Energy (kWh)	Annual Profit (€)	25 Years Profit (€)	Payback Period (yrs)	IRR (%)
All obstacles together	String Inverter	14,1	11.540	1.616	36,764	9,1	6
	Power Optimizers	7	12.800	1.792	40.778	8,6	7
	Microinverters	8,3	12.290	1.721	39.153	10,1	4
	Cell string optimizers	6,9	12.067	1.689	38.443	9,3	5,5

Ήταν αρκετά αναμενόμενο ότι οι μεγαλύτερες απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας θα εμφανίζονταν σε αυτό το σενάριο με όλα τα εμπόδια παρόντα, αξίζει να σημειωθεί ότι η οικονομική αξιολόγηση της τοπολογίας inverter string είναι αρκετά ανταγωνιστική έναντι της επιλογής των power optimizers που συνεχίζει όμως να είναι η καλύτερη επιλογή. Στην Εικ.12. παρακάτω παρουσιάζονται τα σωρευτικά κέρδη για το συγκεκριμένο σενάριο ολόκληρης της διάρκειας ζωής του έργου, προκειμένου να παρατηρηθεί η μικρή διαφορά μεταξύ των δύο εναλλακτικών λύσεων.



Εικ.12. Σύγκριση κερδών μεταξύ string inverter και power optimizers

Πέραν της οικονομικής αξιολόγησης, πρέπει να εξετάσουμε τα προβλήματα που μπορεί να προκαλέσει η μερική ή η μόνιμη σκίαση στο κάθε πάνελ ξεχωριστά και ταυτόχρονα σε ολόκληρο το σύστημα. Φαινόμενα όπως αυτά της θερμής κλήδας ή της ανάφλεξη φωτιάς μπορεί να είναι καταστροφικά για το έργο.

Όπως και στην περίπτωση της προσομοίωσης σκίασης της καμινάδας και του καλωδίου, οι σκιάσεις κλίσης και προσανατολισμού και οι αντίστοιχες απώλειες φαίνεται να έχουν πολύ μικρές επιπτώσεις στην απόδοση της φωτοβολταϊκής εγκατάστασης.

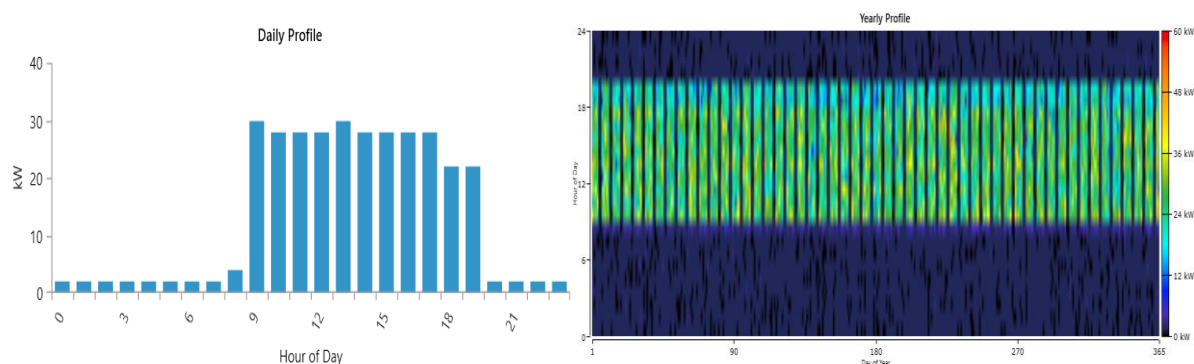
Πίνακας 11. Αποτελέσματα προσομοίωσης διαφορετικών κλίσεων και προσανατολισμών των Φ/Β πάνελ

Inclination & Orientation scenarios	System Topology	Electrical loss due to shadings (%) & Mismatch	Initial Produced Energy (kWh)	Annual Profit (€)	25 Years Profit (€)	Payback Period (yrs)	IRR (%)
5° Inclination	String Inverter	0,4	15.560	2.178	49.571	6,7	12,1
	Power Optimizers	0,1	15.830	2.216	50.431	7	11,3
	Microinverters	0,2	15.460	2.164	49.252	8	8,9
	Cell string optimizers	0,2	15.633	2.189	49.803	7,2	10,8
-20° Orientation	String Inverter	2	15.600	2.184	49.698	6,7	12,1
	Power Optimizers	1,5	15.910	2.227	50.686	6,9	11,4
	Microinverters	1,8	15.510	2.171	49.412	8	8,7
	Cell string optimizers	1,1	15.690	2.197	49.985	7,1	10,9
5° Inclination & -20° Orientation	String Inverter	0,7	15.480	2.167	49.316	6,8	12
	Power Optimizers	0,3	15.750	2.205	50.176	7	11,2
	Microinverters	0,4	15.380	2.153	48.997	8	8,5
	Cell string optimizers	0,3	15.563	2.179	49.580	7,2	10,7

Λόγω της μικρής επίδρασης στις ηλεκτρικές απώλειες, η τοπολογία του inverter στοιχειοσειράς κατατάσσεται στην πρώτη θέση στον παραπάνω πίνακα καθώς έχει τις μικρότερες δαπάνες κτήσης εξοπλισμού σε σχέση με όλες τις υπόλοιπες εναλλακτικές.

### 2.3 Προσομοίωση Demand-Response προγράμματος

Όσον αφορά την προσομοίωση του Demand-response προγράμματος τα δεδομένα για την εγκατάσταση του συστήματος αφορούν εταιρεία που ανήκει στο εμπορικό τιμολόγιο της ΔΕΗ και που διαθέτει ήδη εγκαταστημένο το βασικό φωτοβολταϊκό σύστημα αναφοράς μας των 9,84kWp. Η μέση ετήσια παραγωγή του Φ/Β συστήματος θεωρείται 49kWh / kWp / ημέρα. Το κόστος κτήσης του φωτοβολταϊκού συστήματος είναι 0 € καθώς η εταιρεία το έχει ήδη εγκαταστημένο στην ταράτσα της. Η τιμή διαμορφώνεται σε 0,14 € / kWh ανά καταναλωμένη ή παραγόμενη ενέργεια [25]. Πριν εξετάσουμε το μέγεθος, το κόστος αποθήκευσης και το σύστημα μετατροπής, πρέπει πρώτα να καταγράψουμε τη φύση του φορτίου αυτού του κτιρίου. Η μέση ετήσια κατανάλωση του πελάτη είναι 245kWh / ημέρα με μέση μέγιστη ισχύ 10,34kW και μέγιστη ισχύ 50,87kW. Πιο συγκεκριμένα στην [Εικ.13](#) παρουσιάζεται το ημερήσιο και το ετήσιο προφίλ φορτίου των απαιτήσεων του κτιρίου.

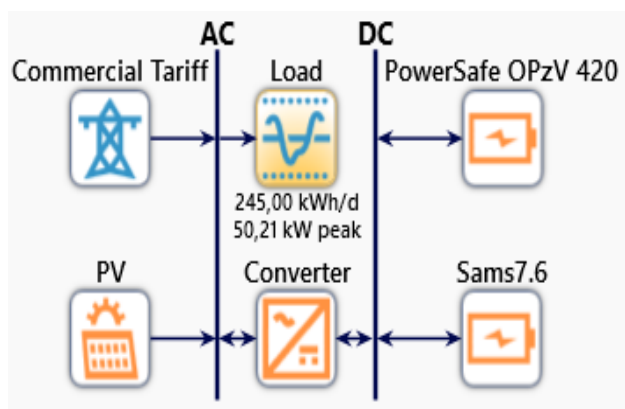


Εικ.13. Ημερήσιο και ετήσιο προφίλ φορτίου

Για την αποθήκευση επιλέγονται δύο διαφορετικοί τύποι μπαταριών. Η πρώτη επιλογή αφορά έναν τύπο μόλυβδου οξέως OPzV τύπου των 6τμχ της εταιρείας Enersys PowerSafe 420Ah με κόστος κτήσης και λειτουργίας και συντήρησης 1.380 € και 50 € / έτος αντίστοιχα. Η δεύτερη επιλογή αφορά ένα pack Li-Ion μπαταρίας της εταιρείας Samsung του τύπου M8194 E2 (7.6kWh) με υψηλότερο κόστος κεφαλαίου 5.000 € και το ίδιο κόστος

λειτουργίας και συντήρησης 50 € / έτος. Το κόστος για τον μετατροπέα υπολογίζεται σε 300€/kW και το αφήνεται στο Homer Grid να βελτιστοποιήσει το επιλεγμένο μέγεθος.




Το Demand-Response πρόγραμμα το οποίο επιλέγεται είναι το πρόγραμμα ανακούφισης φορτίου διανομής (DLRP) με 2 ώρες πρότερης ενημέρωσης του πελάτη. Η ConEdison επιβραβεύει τον πελάτη για συμμετοχή στο DLRP με ένα ποσό της τάξης από 18 έως 25 \$/kW ανάλογα με περιοχή και τις απαιτήσεις του δικτύου που ανήκει. Για την προσομοίωση του συστήματος στον Ελληνικό χώρο θα χρησιμοποιήσουμε μια μέση τιμή 10 €/kW καθώς στην Ελλάδα δεν υπάρχει κάποια ειδική νομοθεσία που να προβλέπει τα οφέλη τέτοιου είδους προγραμμάτων αυτή τη στιγμή πέρα μόνο της πρόσφατης νομοθεσίας για την εγκατάσταση ενός συστήματος αποθήκευσης με μπαταρίες μέχρι 30kW στην εγκατάσταση του πελάτη [28]. Τέλος ο πελάτης θα πρέπει να πληρώσει ένα κόστος για τον νέο έξυπνο μετρητή το οποίο υπολογίζεται σε ένα ποσό της τάξης των 2.200 €. Το σύστημα που θα προσομοιωθεί στο Homer Grid απεικονίζεται στην [Εικ.14](#). παρακάτω.



Εικ.14. DLRP σύστημα προσομοίωσης

Τα αποτελέσματα της προσομοίωσης παρουσιάζονται στον πίνακα 6. Τα αποτελέσματα ταξινομούνται με βάση τη χαμηλότερη καθαρή παρούσα αξία για κάθε σύστημα ξεχωριστά. Η καλύτερη εναλλακτική είναι αυτή του PV-Utility. Η επιλογή της μπαταρίας μολύβδου οξέος φαίνεται να είναι καλύτερη έναντι της εναλλακτική λύσης του Li-Ion packet λόγω του χαμηλότερου κόστους κτήσης.

Πίνακας 12. Αποτελέσματα προσομοίωσης DLRP προγράμματος

Config.	PV (Kw)	PowerSafe OPzV 420	Sams 7.6	Commercial Tariff	Converter (Kw)	Operating cost (€/yr)	Initial Capital (€)	NPC (€)	COE (€/kWh)	DR (€/yr)
	9,84			1		10.315	2.200	135.554	0,114	
	9,84	6		1	1,58	10.340	4.055	137.728	0,116	416
	9,84		1	1	3,17	10.190	8.117	139.198	0,118	565

Η περίοδος αποπληρωμής για το σύστημα αποθήκευσης μπαταριών μολύβδου οξέος είναι 9,74 έτη και 14,3 έτη για την επιλογή Li-Ion. Αυτές οι τιμές μπορεί να φαίνονται αρκετά υψηλές, αλλά το σενάριο αφορούσε 10 τυχαία συμβάντα 4 ωρών κάθε φορά. Αν αυξηθεί ο αριθμός των ετήσιων γεγονότων, θα μειωθεί και η περίοδος απόσβεσης για κάθε σύστημα αποθήκευσης αντίστοιχα. Επίσης αξίζει να σημειωθεί πώς μελλοντικά το κόστος των συσσωρευτών Li-Ion φαίνεται πως θα μειωθεί αρκετά λόγω της προώθησης των ηλεκτρικών αυτοκινήτων και των οικιακών πακέτων αποθήκευσης ενέργειας που θα μεγαλώσει την διείσδυση αυτής της τεχνολογίας συσσωρευτών και θα χαμηλώσει περαιτέρω το κόστος κατασκευής τους.

## 2.4 Παράθεση και σύγκριση δεδομένων πραγματικής Φ/Β εγκατάστασης με DC power optimizers και string inverter

Στο συγκεκριμένο κομμάτι της διπλωματικής εργασίας αυτό που θα δείξουμε, αφορά μια 2<sup>η</sup> πραγματική εγκατάσταση φωτοβολταϊκού συστήματος που είναι εγκατεστημένο στην περιοχή Γαβαλού Αιτωλοακαρνανίας με γεωγραφικές συντεταγμένες Πλάτος 38.526810 και Μήκος 21.538337. Η συγκεκριμένη εγκατάσταση αποτελεί ένα εξαιρετικό δείγμα για την εξαγωγή συμπερασμάτων πάνω στο κατά πόσο μια εγκατάσταση με power optimizers σε σύγκριση με την ίδια εγκατάσταση με string inverter μπορεί να αποδώσει μεγαλύτερη παραγωγή ενέργειας υπο συνθήκες διαφορετικής κλίσης και προσανατολισμού των φωτοβολταϊκών πλαισίων. Ταυτόχρονα για το ίδιο σύστημα θα αναπτυχθεί μοντέλο προσομοίωσης στο PV Syst με σκοπό να γίνει επίσης σύγκριση μεταξύ των αποτελεσμάτων του λογισμικού πακέτου με τα πραγματικά δεδομένα για την παραγωγή και απόδοση του φωτοβολταϊκού συστήματος στην περιοχή Γαβαλού.

Η εγκατάσταση περιλαμβάνει 30 φωτοβολταϊκά πλαίσια της κατασκευάστριας εταιρείας Solarwatt πολυκρυσταλλικού τύπου των 245W έκαστο με την επωνυμία BLUE

60P 245W και έναν string inverter της εταιρείας Kostal των 8kW, με την επωνυμία Piko 8.1. Στο συγκεκριμένο Φ/Β σύστημα έγιναν κάποιες τροποποιήσεις σε σχέση με την αρχική του χωροθέτηση και σχεδιασμό. Τα πλήρη δεδομένα που διαθέτουμε από το αρχείο (event log και data log) των controllers του συστήματος αφορούν την τριετία 2014 ως και το 2016 και το έτος 2019. Όσον αφορά την τριετία η χωροθέτηση του συστήματος είχε ως εξής, τα 18 πάνελ είναι εγκαταστημένα στην ταράτσα με νότιο προσανατολισμό χωρίς σκιάσεις σε κλίση 25° και συνδέονται στο πρώτο MPP tracker του inverter. Στο δεύτερο tracker του inverter συνδέονται τα υπόλοιπα 12 πάνελ μέσω των optimizers της εταιρείας Tigo του τύπου MM-2ES50. Τα πέντε πάνελ είναι εγκαταστημένα επί στέγης με κλίση 20° και Ανατολικό προσανατολισμό, τα άλλα πέντε πάνελ είναι επίσης εγκαταστημένα επί της ίδιας στέγης με κλίση 20° και Δυτικό προσανατολισμό, ενώ τέλος το string συμπληρώνεται από άλλα δύο πάνελ που έχουν Νότιο προσανατολισμό. Συνολικά χρησιμοποιούνται επτά maximizers, τα τρία maximizers συνδέονται με τα πέντε πάνελ που έχουν Δυτικό προσανατολισμό, τα αλλά τρία maximizers με τα πέντε πάνελ με τον Ανατολικό προσανατολισμό και το έβδομο maximizer με τα δύο πάνελ με τον Νότιο προσανατολισμό. Τον Απρίλιο του 2018 έγινε ανακατασκευή της στέγης και όλα τα πάνελ τοποθετήθηκαν επί της σκεπής με Νότιο προσανατολισμό και κλίση 20°. Από τότε και έκτοτε το σύστημα λειτουργεί με δύο όμοια string των 15 πάνελ έκαστο και χωρίς optimizers. Στην [Εικ.15](#) παρακάτω φαίνονται η όψη του Συστήματος πριν και μετά την ανακατασκευή της σκεπής.





Εικ.15. Χωροθέτηση Φ/Β συστήματος πριν και μετά την ανακατασκευή της στέγης [26]

Οι δύο πάνω εικόνες αφορούν το την αρχική χωροθέτηση του Φ/Β συστήματος με τα 18 πάνελ που έχουν Νότιο προσανατολισμό και τα αλλά 12 εκ των οποίων τα πέντε που έχουν Ανατολικό προσανατολισμό, τα πέντε με τον Δυτικό και τα δύο με τον Νότιο προσανατολισμό. Η κάτω φωτογραφία απεικονίζει την τωρινή κατάσταση του συστήματος με τα 30 πάνελ εγκαταστημένα στην Νότια πλευρά της στέγης.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ολοκληρωμένο αρχείο καταγραφής δεδομένων που αφορούν την παραγωγή του Φ/Β συστήματος έχουμε για τέσσερα έτη. Για τα έτη 2014-2016 έχουμε στην διάθεση μας δεδομένα τόσο από το data log του κεντρικού inverter όσο και από τα 7 maximizers της Tigo. Έτσι λοιπόν ο controller του string inverter καταγραφεί στο data log την συνολική παραγωγή του συστήματος των 7,35kWp, εκ των οποίων τα 4,41kWp αφορούν τα 18 πάνελ με τον Νότιο προσανατολισμό που συνδέονται στο πρώτο MPP Tracker του inverter, ενώ τα 2,94kWp αφορούν τα πέντε πάνελ με τον Ανατολικό προσανατολισμό, τα πέντε πάνελ με τον δυτικό και τα δύο πάνελ με το Νότιο προσανατολισμό που συνδέονται στο δεύτερο MPP Tracker του inverter. Όσον λοιπόν αφορά τα πάνελ της δεύτερης εισόδου του inverter για την τριετία 2014-2016 έχουμε ξεχωριστά καταγεγραμμένα στοιχεία και πληροφορίες μέσω του controller των maximizers της Tigo. Από το έτος 2019 και έπειτα λόγω της ανακατασκευής της σκεπής και της τοποθέτησης και των 30 πλαισίων σε Νότιο προσανατολισμό τα στοιχεία αφορούν το σύστημα χωρίς την ύπαρξη των power optimizers της Tigo. Όλα τα πλήρη και

καταγεγραμμένα στοιχεία που αφορούν την παραγωγή του συστήματος απεικονίζονται στον [Πίνακα 13](#) παρακάτω.

**Πίνακας 13.** Καταγεγραμμένη παραγωγή του Φ/Β συστήματος

	2019 - Φ/Β 7,35kWp String Inverter (kWh)	2014 - Φ/Β 7,35kWp String Inverter + Optimizers (kWh)	2015 - Φ/Β 7,35kWp String Inverter + Optimizers (kWh)	2016 - Φ/Β 7,35kWp String Inverter + Optimizers (kWh)	2014 - Φ/Β 2,94 kWp Optimizers Only (kWh)	2015 - Φ/Β 2,94 kWp Optimizers Only (kWh)	2016 - Φ/Β 2,94 kWp Optimizers Only (kWh)
Ιανουάριος	355	405	457	443	132	144	141
Φεβρουάριος	630	539	561	477	187	188	163
Μάρτιος	1026	847	695	699	317	254	257
Απρίλιος	832	824	987	1013	325	388	397
Μαίος	1008	1073	1102	1068	443	452	431
Ιούνιος	1067	1145	1078	1114	485	451	464
Ιούλιος	1081	1262	1206	1180	533	507	489
Αυγουστος	1166	1223	1127	1087	503	458	436
Σεπτέμβριος	957	944	851	799	359	324	290
Οκτώβριος	758	713	678	606	250	237	186
Νοέμβριος	427	509	557	424	168	177	105
Δεκέμβριος	395	386	556	446	122	164	95
<b>Ετήσιο σύνολο</b>	<b>9702</b>	<b>9870</b>	<b>9855</b>	<b>9356</b>	<b>3824</b>	<b>3744</b>	<b>3454</b>

Αυτό που παρατηρούμε με την πρώτη ματιά είναι το γεγονός ότι η συνολική ετήσια παραγωγή με ή χωρίς τα maximizers είναι σε γενικές γραμμές πολύ κοντινή για όλα τα χρόνια. Πιο συγκεκριμένα η συνολική παραγωγή για το 2019 που το σύστημα λειτούργησε με όλα τα πάνελ να έχουν Νότιο προσανατολισμό ανήλθε στις 9702kWh, ενώ για το 2014 και το 2015 η παραγωγή ήταν μεγαλύτερη στις 9870kWh και 9855kWh αντίστοιχα. Η χρονιά με την μικρότερη παραγωγή ήταν το 2016 με την παραγόμενη ενέργεια να ανέρχεται στις 9356kWh.

Σε αυτό το σημείο επιλέγουμε να εμβαθύνουμε περισσότερο στην ανάλυση και σύγκριση των καταγεγραμμένων δεδομένων του παραπάνω πίνακα, με σκοπό να οδηγηθούμε στην διεξαγωγή ποιο ποιοτικών συμπερασμάτων για το κατά πόσο είναι σημαντική η παρουσία των maximizers στο σύστημα μας. Όπως είδαμε στο κεφάλαιο 1 της παρούσας εργασίας στον [Πίνακα 2](#) η επίδραση του προσανατολισμού στην παραγωγή ενός Φ/Β πλαισίου μπορεί να φτάσει σε ποσοστά της τάξης του -15% όταν αυτός είναι Ανατολικός ή Δυτικός σε σχέση με το βέλτιστο του να είναι Νότιος. Για να δούμε στην πράξη αν επαληθεύονται αυτά τα ποσοστά παίρνουμε δυο σημαντικές χρονιές για το σύστημα μας, αφενός το 2019 που το σύστημα λειτούργησε χωρίς τα maximizers, αφετέρου δε το 2015 που είναι μια μέση κατάσταση όσον αφορά το κομμάτι της συνεισφοράς στην



συνολική παραγωγή των power optimizers σε σχέση με τα έτη 2014 και 2016 αντίστοιχα. Έτσι λοιπόν με βάση αυτήν την ανάλυση προκύπτει ο παρακάτω πίνακας.

**Πίνακας 14.** Ανάλυση και σύγκριση δεδομένων της παραγωγής Φ/Β συστήματος

	Παραγωγή 2019 - Φ/Β 7,35kWp String Inverter (kWh)	Παραγωγή 2015 - Φ/Β 7,35kWp String Inverter + Optimizers (kWh)	Παραγωγή 2015 - Φ/Β 2,94 kWp Optimizers Only (kWh)	Παραγωγή 2015 - Φ/Β 4,41 kWp Only (kWh)
Ιανουάριος	355	457	144	313
Φεβρουάριος	630	561	188	373
Μάρτιος	1026	695	254	441
Απρίλιος	832	987	388	599
Μαΐος	1008	1102	452	650
Ιούνιος	1067	1078	451	627
Ιούλιος	1081	1206	507	699
Αυγустος	1166	1127	458	669
Σεπτέμβριος	957	851	324	527
Οκτώβριος	758	678	237	441
Νοέμβριος	427	557	177	380
Δεκέμβριος	395	556	164	392
<b>Ετήσιο σύνολο</b>	<b>9702</b>	<b>9855</b>	<b>3744</b>	<b>6111</b>

Αυτό που παρατηρούμε με την πρώτη ματιά είναι ότι οι 9855kWh που παρήχθησαν το 2015 είναι η σύνθεση των 12 πάνελ με τα maximizers που συνέφεραν 3744kWh και των υπόλοιπων 18 πάνελ με τον Νότιο προσανατολισμό που συνέφεραν 6111kWh. Αν κάνουμε την αναγωγή σε εγκατεστημένη ισχύ και την παραγόμενη ενέργεια ανά υποσύστημα τότε προκύπτουν οι παρακάτω αριθμοί.

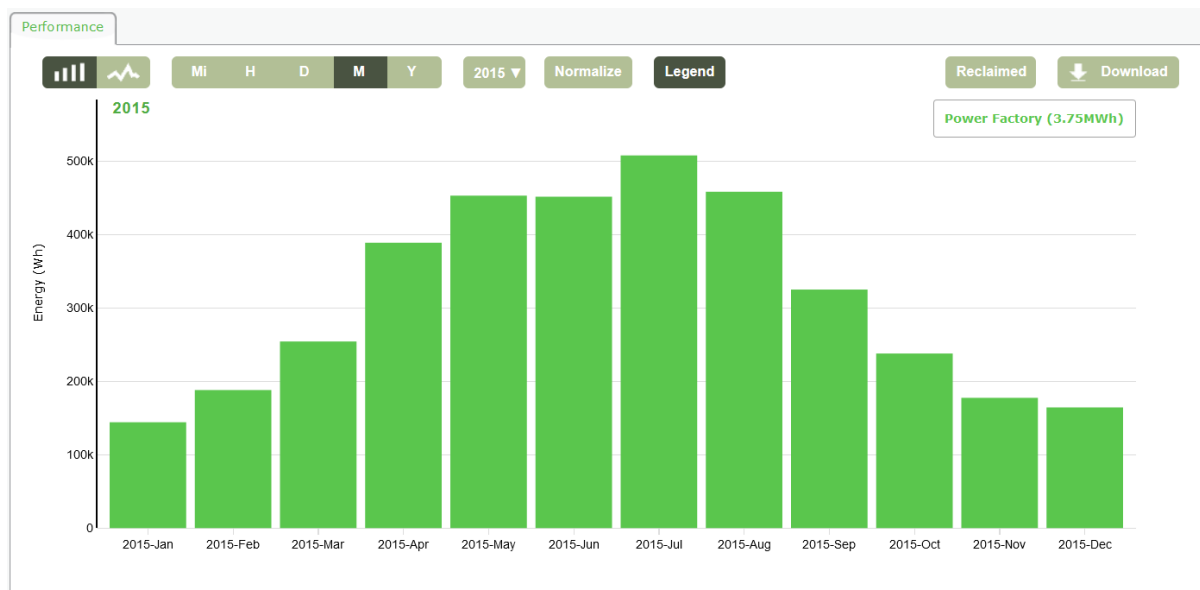
- a.  $3.744\text{kWh}/2,94\text{kWp} = 1.273\text{kWh}$  ανά kWp
- b.  $6.111\text{kWh}/4,41\text{Wp} = 1.385\text{kWh}$  ανά kWp

Βλέπουμε όντως αυτό που αναμένονταν, ότι τα πάνελ με τον Νότιο προσανατολισμό παράγουν 1.385kWh ανά εγκατεστημένο kWp Φ/Β συστήματος σε σχέση με την mix επιλογή των προσανατολισμών των υπόλοιπων πάνελ που αποδίδουν 1.273kWh ανά εγκατεστημένου kWp. Ποια είναι όμως η διαφορά σε σχέση με το ποσοστό του -15% που προκύπτει από τον mixed προσανατολισμό αυτού του string. Η διαφορά που προκύπτει είναι της τάξης του 8% κάτι που δείχνει καταφανέστατα ότι η προσθήκη των maximizers ήταν επιτακτική για την αρχική χωροθέτηση των πάνελ. Οι δύο εικόνες που ακολουθούν

απεικονίζουν την μηνιαία παραγωγή για το έτος 2015 και αφορούν την συνολική παραγωγή του συστήματος αλλά και την επι μέρους των 12 πάνελ με τα maximizers.



Εικ.16. Συνολική μηνιαία παραγωγή του Φ/Β συστήματος 7.35kWp για το έτος 2015



Εικ.17. Επιμέρους μηνιαία παραγωγή του Φ/Β συστήματος 2.94kWp για το έτος 2015

Η παραπάνω εικόνα αναφέρεται στο 2<sup>ο</sup> string με τους mixed προσανατολισμούς και την ύπαρξη των maximizers. Στο [Παράρτημα 3](#) φαίνονται οι φωτογραφίες για την παραγωγή του Φ/Β συστήματος για τα υπόλοιπα έτη, έτσι όπως αυτές έγιναν εξαγωγή από τις πλατφόρμες καταγραφής δεδομένων του συστήματος.

#### **2.4.1 Προσομοίωση της πραγματικής Φ/Β εγκατάστασης με DC power optimizers και string inverter**

Τα δεδομένα που διαθέτουμε από το φωτοβολταϊκό σύστημα που είναι εγκατεστημένο στην περιοχή Γαβαλού Αιτωλοακαρνανίας είναι εξαιρετικά σημαντικά για περαιτέρω αναλύσεις. Η ανάλυση που έγινε παραπάνω ανέδειξε σπουδαία πράγματα όσον αφορά την δυναμική της ενσωμάτωσης των maximizers στην εγκατάσταση. Το επόμενο βήμα είναι η προσομοίωση του Φ/Β συστήματος με την βοήθεια του PV Syst για να εξετάσουμε και να αξιολογήσουμε τις πιθανές αποκλίσεις που αφορούν την παραγωγή ενέργειας με την χρήση του software αλλά και των πραγματικών δεδομένων που έχουμε στην διάθεση μας.

Ο τρόπος εργασίας για την προσομοίωση έχει ως εξής, αρχικά γίνεται συγκέντρωση των κλιματολογικών δεδομένων της περιοχής που είναι εγκαταστημένο το Φ/Β σύστημα μέσω του PVGIS [23]. Τα δεδομένα αυτά γίνονται εισαγωγή στο PV Syst, όπως επίσης και όλα τα δεδομένα που αφορούν την εγκατάσταση, Φ/Β πλαίσια, inverter, maximizers, προσανατολισμοί κλπ. Στη συνέχεια αναπτύσσονται δύο μοντέλα, το πρώτο αφορά την τωρινή κατάσταση του Φ/Β συστήματος με τα 30 πάνελ να έχουν όλα τον ίδιο προσανατολισμό και το δεύτερο μοντέλο αφορά την πρότερη κατάσταση του συστήματος με τους mixed προσανατολισμούς. Ο σκοπός αυτού του εγχειρήματος είναι να συγκρίνουμε καθολικά και τις δύο περιόδους της λειτουργίας της εγκατάστασης. Η πρώτη στήλη του [Πίνακα 15](#) παρακάτω αφορά την πραγματική παραγωγή του συστήματος για το έτος 2019 ενώ οι υπόλοιπες στήλες συνοψίζουν τα αποτελέσματα της προσομοίωσης που έγινε με το PV Syst.

**Πίνακας 15.** Αποτελέσματα προσομοίωσης Φ/Β συστήματος

	Παραγωγή 2019 - Φ/Β 7,35kWp String Inverter (kWh)	Προσομοίωση - Φ/Β 7,35kWp String Inverter (kWh)	Προσομοίωση - Φ/Β 2,94 kWp Optimizers Only (kWh)	Προσομοίωση - Φ/Β 4,41 kWp Only (kWh)
Ιανουάριος	355	568	160	341
Φεβρουάριος	630	470	147	281
Μάρτιος	1026	909	305	545
Απρίλιος	832	1123	412	673
Μαΐος	1008	1162	463	697
Ιούνιος	1067	1310	524	785
Ιούλιος	1081	1414	559	848
Αυγουστος	1166	1323	495	793
Σεπτέμβριος	957	956	333	573
Οκτώβριος	758	916	292	549
Νοέμβριος	427	584	158	350
Δεκέμβριος	395	477	128	286
<b>Ετήσιο σύνολο</b>	<b>9702</b>	<b>11212</b>	<b>3976</b>	<b>6721</b>

Με την πρώτη ματιά παρατηρούμε μια διαφορά της τάξης των 1510kWh μεταξύ της συνολικής παραγωγής του έτους 2019 και της προσομοίωσης του ίδιου συστήματος με το PV Syst. Το γεγονός αυτό δεν πρέπει να μας εκπλήξει καθόλου, αφού το PV Syst υπολόγισε την παραγωγή του συστήματος για τον πρώτο χρόνο λειτουργίας του. Στην πράξη όμως το σύστημα μας λειτουργεί ήδη 7 χρόνια και αν αναλογιστεί κανείς ένα ποσοστό της τάξης περίπου του 1%/έτος μείωση της παραγωγής λόγω γήρανσης των Φ/Β πλαισίων τότε αυτή η διαφορά μεταφράζεται σε μια διαφορά της τάξης των 725kWh το χρόνο. Το οποίο με την σειρά του σημαίνει μια διαφορά της τάξης του 7% μεγαλύτερη παραγωγή υπολογίζει το PV Syst για το έτος 2019. Αν και αυτή η διαφορά είναι όντως σημαντική μπορεί να αιτιολογηθεί με την διακύμανση των καιρικών συνθηκών, δηλαδή της ηλιοφάνειας για το συγκεκριμένο χρόνο. Όπως παρατηρήσαμε και νωρίτερα στα πραγματικά δεδομένα του συστήματος η διασπορά στην παραγωγή ανά έτος ήταν εξίσου μεγάλη, το 2019 ήταν στις 9702kWh, το 2014 στις 9702kWh, το 2015 ήταν στις 9855kWh και το 2016 στις 9702kWh.

Στον Πίνακα 16 έχει γίνει αναγωγή της παραγωγής ενέργειας των προσομοιώσεων όπως την δείξαμε αρχικά στον Πίνακα 14, έχει δηλαδή υπολογιστεί μια μείωση στην παραγωγή του 3% με σκοπό να συγκρίνουμε άμεσα και γρήγορα το mixed σύστημα αναφοράς μας του 2015 με τους αντίστοιχους υπολογισμούς του PV Syst.

**Πίνακας 16.** Σύγκριση αποτελεσμάτων της προσομοίωσης με πραγματικά τα δεδομένα Φ/Β συστήματος

	Παραγωγή 2015 - Φ/Β 7,35kWp String Inverter + Optimizers (kWh)	Παραγωγή 2015 - Φ/Β 2,94 kWp Optimizers Only (kWh)	Παραγωγή 2015 - Φ/Β 4,41 kWp Only (kWh)	Προσομοίωση - Φ/Β 7,35kWp String Inverter (kWh)	Προσομοίωση - Φ/Β 2,94 kWp Optimizers Only (kWh)	Προσομοίωση - Φ/Β 4,41 kWp Only (kWh)
Ιανουάριος	457	144	313	486	155	331
Φεβρουάριος	561	188	373	416	143	273
Μάρτιος	695	254	441	825	296	529
Απρίλιος	987	388	599	1053	400	653
Μαίος	1102	452	650	1125	449	676
Ιούνιος	1078	451	627	1269	508	761
Ιούλιος	1206	507	699	1365	542	823
Αυγούστος	1127	458	669	1249	480	769
Σεπτέμβριος	851	324	527	879	323	556
Οκτώβριος	678	237	441	816	283	533
Νοέμβριος	557	177	380	493	153	340
Δεκέμβριος	556	164	392	401	124	277
<b>Ετήσιο σύνολο</b>	<b>9855</b>	<b>3744</b>	<b>6111</b>	<b>10376</b>	<b>3857</b>	<b>6519</b>

Στον παραπάνω πίνακα παρατηρούμε ότι η διαφορά στην συνολική ετήσια παραγωγή ενέργειας το 2015 είναι 521kWh ήτοι 5% διαφορά. Όσον αφορά το πρώτο string με τα 18 πάνελ των 4,41kWp η διαφορά μεταξύ της πραγματικής παραχθείσας ενέργειας και της υπολογιζόμενης μέσω της προσομοίωσης είναι 408kWh που ποσοστιαία σημαίνει 6% διαφορά. Τέλος η συνολική ετήσια διαφορά για το mixed σύστημα των δύο προσανατολισμών των 2,94kWp είναι 113kWh που μεταφράζεται με την σειρά του σε μια διαφορά της τάξης του μόλις 3%.

Αν κάνουμε την αναγωγή σε εγκατεστημένη ισχύ και την παραγόμενη ενέργεια ανα υποσύστημα, αυτήν την φορά για τα αποτελέσματα της προσομοίωσης, τότε προκύπτουν οι παρακάτω αριθμοί.

c.  $3.857\text{kWh}/2,94\text{kWp} = 1.311\text{kWh}$  ανά kWp

d.  $6.519\text{kWh}/4,41\text{Wp} = 1.478\text{kWh}$  ανά kWp

Παρατηρούμε ξανά ότι τα πάνελ με τον Νότιο προσανατολισμό παράγουν 1.478kWh ανά εγκαταστημένο kWp Φ/Β συστήματος σε σχέση με την mix επιλογή των προσανατολισμών

των υπόλοιπων πάνελ που αποδίδουν 1.311kWh ανά εγκαταστημένου kWp. Η διαφορά που προκύπτει είναι της τάξης του 11% περίπου ενώ την χωρίζουν 3 ποσοστιαίες μονάδες σε σχέση με την αντίστοιχη διαφορά που προέκυψε συγκρίνοντας τα νούμερα από τα πραγματικά δεδομένα παραγωγής της εγκατάστασης.

Ξεκάθαρα από τα παραπάνω δεδομένα φαίνεται ότι κανείς θα περίμενε λίγο μεγαλύτερη παραγωγή από το Φ/Β σύστημα, βάση των αποτελεσμάτων της προσομοίωσης της εγκατάστασης, χωρίς όμως αυτό να αποτελεί θέσφατο καθότι οι καιρικές συνθήκες είναι μια ασταθής μεταβλητή που μπορεί να επηρεάσει άμεσα την παραγωγή του συστήματος. Επίσης πρέπει να αναγνωρίσουμε ότι το πακέτο λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση έχει μεγάλα ποσοστά ακρίβειας ειδικά δε όσο του εισάγει κανείς πληρέστερα δεδομένα και πληροφορίες.

## ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

### 3. Συμπεράσματα

Τα συμπεράσματα της συγκεκριμένης εργασίας χωρίζονται σε τέσσερα τμήματα, το κάθε τμήμα αναφέρεται στην κάθε μελέτη περίπτωσης ξεχωριστά. Ο στόχος του συγκεκριμένου κεφαλαίου είναι συζητηθούν τα αποτελέσματα της μελέτης, να εξαχθούν τα τελικά συμπεράσματα και να αξιολογηθεί το γεγονός του κατά πόσο επετεύθησαν οι στόχοι και οι σκοποί που τέθηκαν αρχικά.

#### 3.1 Συμπεράσματα πρώτης μελέτης περίπτωσης βασικού Φ/Β συστήματος

Οι DC-DC power converters, οι microinverters και τα cell string chips, είναι μονάδες που μπορούν να ενσωματωθούν πάνω στα Φ/Β πλαίσια και να εξαλείψουν πιθανές ανομοιομορφίες και να ελαχιστοποιήσουν τις απώλειες ενέργειας που αυτές προκαλούν. Είναι αρκετά δύσκολο να ξεχωρίσει κανείς ποια τεχνολογία είναι καλύτερη καθότι κάθε μια από αυτές έχει τα δικά της πλεονεκτήματα αλλά και τα δικά της μειονεκτήματα.

Στην πρώτη μελέτη περίπτωσης λόγω του ότι η επίπτωση της σκίασης ήταν πολύ μικρή πάνω στην έξοδο δεν μπορεί κανείς να ξεχωρίσει πολύ εύκολα ποια από τις τρεις τοπολογίες είναι η πιο συμφέρουσα. Κοστολογικά η επιλογή του string inverter φαίνεται ξεκάθαρα να είναι η καλύτερη επιλογή αλλά αν κάποιος κάνει αναγωγή των μεγεθών στα 25 έτη της διάρκειας ζωής του συστήματος, τότε ξεκάθαρα η πιο συμφέρουσα επιλογή είναι η χρήση των power optimizers. Από την άλλη πλευρά η διαφορά που έχουν οι microinverters με τις άλλες δύο εναλλακτικές δεν είναι τόσο μεγάλη και η 3<sup>η</sup> τους θέση στην συνολική κατάταξη, οφείλεται στο γεγονός ότι η το ποσοστό της σκίασης δεν είναι τόσο μεγάλο και στο ότι έχουν λίγο μικρότερο βαθμό απόδοσης από τους optimizers και τον string inverter, όταν η τάση που δέχονται από τα Φ/Β πλαίσια είναι μικρή. Από την άλλη πλευρά το ισχυρό πλεονέκτημα αυτής της επιλογής είναι η δυνατότητα επεκτασιμότητας που προσφέρουν, έτσι οποιαδήποτε στιγμή στο μέλλον μπορείς να προσθέσεις άλλης ισχύος πάνελ για να αντικαταστήσεις κάποιο ελαττωματικό, χωρίς να σε προβληματίζουν θέματα σχεδίασης του συστήματος. Όσο αφορά το monitoring και οι τρεις επιλογές διαθέτουν ενσωματωμένες

συσκευές οι οποίες μπορούν να ενταχθούν στο ευρύτερο IoT και να διασφαλίσουν καλύτερη απόδοση και διαχείριση του Φ/Β συστήματος.

### **3.2 Συμπεράσματα προσομοίωσης διαφόρων ειδών σκίασης**

Όπως αναφέραμε στην βιβλιογραφική ανασκόπηση αναφορικά με τις απώλειες στα Φ/Β συστήματα αυτές ποικίλουν ανάλογα με τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται κάθε φορά. Οι πιο κύριες όμως απώλειες οι οποίες μπορούν να φανούν και επιβλαβείς για την ίδια την εγκατάσταση είναι αυτές που οφείλονται στην σκίαση και στον διαφορετικό προσανατολισμό των επιμέρους στοιχειοσειρών. Αυτού του είδους οι απώλειες όχι μόνο μπορούν να έχουν αρνητική επίδραση στην οικονομική απόσβεση του έργου αλλά και να δημιουργήσουν τεχνικά προβλήματα στον εξοπλισμό όπως αυτό της ωχράς κηλίδας.

Από όλα τα σενάρια μελέτης περιπτώσεων που αναπτύχθηκαν για τα διάφορα σενάρια σκίασης πάνω στα Φ/Β πλαίσια, η τοπολογία του string inverter έχει τις μικρότερες δαπάνες κτήσης του εξοπλισμού, αλλά αν τη συγκρίνουμε με τα οφέλη που προκύπτουν για τα 25 χρόνια ζωής του έργου τότε τις περισσότερες φορές τα συνολικά κέρδη είναι υψηλότερα αν επιλεγεί μια εκ των τριών εναλλακτικών βελτιστοποίησης της παραγόμενης ενέργειας. Λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων, οι DC power optimizers κατατάσσονται στην πρώτη θέση ως καλύτερη λύση για την μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας σε μερικώς σκιασμένα πάνελ μιας φωτοβολταϊκής εγκατάστασης. Οι προοπτικές που μπορούν να δημιουργήσουν όμως στο σύνολο τους τα ενσωματωμένα συστήματα στην ηλεκτροπαραγωγή από φωτοβολταϊκά συστήματα αποδεικνύεται εμπράκτως σε αυτό την εργασία από τις διάφορες προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν.

### **3.3 Συμπεράσματα Demand-response προγράμματος**

Η ικανότητα των χρηστών του δικτύου από τους μεγαλύτερους παραγωγούς έως το μικρότερο νοικοκυριό να παρέχει ευελιξία στο δίκτυο είναι ιδιαίτερα κρίσιμη και εκτιμάται ιδιαίτερα από τους διαχειριστές του ηλεκτρικού δικτύου και ως αντάλλαγμα παρέχουν ισχυρά κίνητρα στους πελάτες τους μέσω προγραμμάτων Demand-Response.



### **3.4 Συμπεράσματα σύγκρισης δεδομένων και προσομοίωσης πραγματικής Φ/Β εγκατάστασης με DC power optimizers & string inverter**

Η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης έρχεται ως επίλογος αυτής της διπλωματικής εργασίας να επιβεβαιώσει εμπράκτως τα όσα αναφέραμε στην βιβλιογραφική αναφορά για την επίδραση της σκίασης και των διαφορετικών προσανατολισμών σε ένα Φ/Β σύστημα αλλά και να επιβεβαιώσει επίσης τα αποτελέσματα όλων των ενδιάμεσων προσομοιώσεων που έγιναν με το PV Syst. Η δυναμική αυτής της μελέτης περίπτωσης έγκειται στο γεγονός ότι είχαμε στα χέρια μας τα πραγματικά δεδομένα παραγωγής του Φ/Β συστήματος για διάστημα 4 ετών. Έτσι μπορούσε να γίνει άμεσα σύγκριση και περαιτέρω ανάλυση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του συστήματος.

Το πρώτο πράγμα που παρατηρήσαμε συγκρίνοντας τα πραγματικά δεδομένα ήταν ότι τα πάνελ με τον Νότιο προσανατολισμό παράγουν 1.385kWh ανά εγκαταστημένο kWp Φ/Β συστήματος σε σχέση με την mix επιλογή των προσανατολισμών των υπόλοιπων πάνελ που αποδίδουν 1.273kWh ανά εγκαταστημένου kWp. Διακρίναμε ότι η διαφορά που προκύπτει είναι της τάξης του 8% κάτι που μας επιβεβαίωσε ξανά ότι η προσθήκη των maximizers ήταν επιτακτική για την αρχική χωροθέτηση των πάνελ. Τα ίδια περίπου αποτελέσματα πήραμε και μέσα από την προσομοίωση του συστήματος που έγινε με το PV Syst. Γεγονός το οποίο μας έκανε να αναγνωρίσουμε ότι το πακέτο λογισμικού που χρησιμοποιήθηκε για την προσομοίωση έχει μεγάλα ποσοστά ακρίβειας και να επιβεβαιώση την ορθότητα των ευρημάτων αυτού του έργου.

## ΛΙΣΤΑ ΑΝΑΦΟΡΩΝ

- [1] Helapco  
<http://helapco.gr/statistika-ellhnikhs-agoras-fwtovoltaikwn/>  
[Πρόσβαση Φεβρουάριος 2018]
- [2] SMA-Mobile World Congress.  
<https://gsmaintelligence.com/>  
[Accessed April 2016]
- [3] Lambert S, Van Heddeghem W, Vereecken W, Lannoo B, Colle D, Pickavet M.  
Worldwide electricity consumption of communication networks.  
Optics Express, Volume (26), December 2014, Pages 513-524  
doi:10.1364/OE.20.00B513
- [4] M.A. Cluintana, D.L. King, T.J.C. McMahon and R. Osterwald,  
“Commonly observed degradation in field-aged photovoltaic modules”.  
IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p. 1436-1439, 2002.
- [5] Ulrich Schwabe Peter Mark Jansson,  
“Performance measurement of amorphous and monocrystalline silicon PV modules in  
Eastern U.S -Energy production versus ambient and module temperature”.  
International Instrumentation and Measurement Technology Conference, Singapore, p.  
1636-1641, 5-7 May 2009.
- [6] M. Hamdaoui, A. Rabhi, A. El Hajjaji, M. Rahmoun, M. Azizi,  
Worldwide electricity consumption of communication networks.  
“Monitoring and control of the performances for photovoltaic systems”.  
International Renewable Energy Congress, Sousse Tunisia, November 5-7, 2009.
- [7] Steve Ransome, John Wohlgemuth and Rhys Morgan.  
“Optimising PV array performance using real time measurements”.  
3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Osaka, Japan, p. 2396-2399,  
May 11-18, 2003.
- [8] Pierre Petit, Abdallah Zgaoui, Jean-Paul Sawicki, Michel Aillerie and Jean-Pierre  
Charles.  
“New architecture for high efficiency DC-DC converter dedicated to photovoltaic  
conversion”. Energy Procedia, Volume 6, p. 688-694, 2011.

- [9] A. Sanz, I. Vidaurrazaga, A. Pereda, R. Alonso, E. Roman and V. Martinez.  
 “Centralized vs distributed (power optimizer) PV system architecture field test results under mismatched operating conditions”.  
 IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2011.
- [10] Stefane Vighetti, Jean-Paul Ferriex and Yves Lembeve.  
 “Optimization and design of a cascaded DC/DC converter devoted to grid-connected photovoltaic systems”.  
 IEEE Transactions on Power Electronics Volume 27, Issue 4, April 2012.
- [11] Pierre Petit, Jean-Paul Sawicki, Michel Aillerie and Jean-Pierre Charles.  
 “High efficiency DC-DC converters including a performed recovering leakage energy switch”.  
 Energy Procedia, Volume 36, p. 642-649, 2013.
- [12] M.-H. H. Dwight.  
 “Proximity effect in wires, mutual inductance of filamentary circles, mutual inductance of two thin disk coils, magnetic field from round coil of small rectangular cross section, in electrical coils and conductors”.  
 McGraw-Hill, Inc., New York, p. 192-292, 1946.
- [13] F. T. J. Bhagwan.  
 “Mutual inductances of coils on a cylinder of infinite length”.  
 IEEE Trans. Magnetics, p.477-479, 1980.
- [14] M. SFG98.  
 “Soft Ferrites a user's guide, Magnetic Materials Producers Association”, 1998.
- [15] Mohamed Azab Martinez.  
 “DC power optimizer for PV module using SEPIC converter”.  
 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering SEGE, 2017.
- [16] Souhib Hard, Mohit Kedia, Haiyu Zhang and Roberts S. Balog.  
 “Microinverter and string inverter grid-connected photovoltaic system – A comprehensive study”.  
 IEEE Photovoltaic Specialist Conference PVSC, 2013.
- [17] P. Guerriero, M. Coppola, P. Cennamo, S. Daliento and D. Lauria.  
 “A single PV microinverter based on coupled inductor DC-DC”.  
 IEEE International Conference on Environmental and Electric Engineering, 2017.

- [18] Zhiliang Zhang, Xiao-Frei He and Yan-Frei Liu.  
 “An optimal control method for photovoltaic grid-tied-interleaved flyback microinverters to achieve high efficiency in wide load range”.  
 IEEE Interactions on Power Electronics, Volume 28, Issue 11, Nov. 2013.
- [19] Luigi Atzori, Antonio Lera and Giacomo Morabito.  
 “The internet of things: a survey”.  
 Computer Networks, Volume 54, Issue 15, p. 2787-2805, 28 October 2010.
- [20] A.R. Al-Ali, “Internet of things role in the renewable energy resources”.  
 Energy Procedia, Volume 100, p. 34-38, 2016.
- [21] Soham Adhya, Dipak Saha, Abhijit Das, Joydip Jana and Hiranmay Saha.  
 “An IoT based smart solar photovoltaic remote monitoring and control unit”.  
 International Confererence on Control, Instrumentation, Energy & Communication CIEC, 2016.
- [22] International Energy Agency  
<https://www.iea.org/policiesandmeasures/pams/greece/name-39505-en.php>  
 [Accessed January 2019]
- [23] SolarGIS  
<http://solargis.com/assets/graphic/free-map/GHI/Solargis-Greece-GHI-solar-resource-map-en.png>  
 [Accessed January 2019]
- [24] International Energy Agency  
 White paper: Cost effective-high efficiency-PV modules  
<https://www.iea.org/.../WimSinkeIEAPVRoadmapWorkshopParis04022014pdf.pdf>  
 [Accessed January 2019]
- [25] Power Public Corporation Hellas SA – Commercial Tariffs  
<https://www.dei.gr/en/epaggelmaties30802/epaggelmatiesetairies-xamilis-tasis/timologia/genika-timologia-emporikis-xrasis>  
 [Accessed August 2019]
- [26] Google Earth  
 [Accessed January 2019]
- [27] Nigico SA.  
[www.nigico.gr](http://www.nigico.gr)  
 [Accessed January 2019]

- [28] Hellenic Association of Photovoltaic Companies – Helapco  
<https://helapco.gr/nea/dimosieftikan-se-fek-i-nees-rythmisis-gia-aftoparagogi-ke-apothikefsi/>  
[Accessed August 2019]
- [29] Photovoltaic Geographical Information System – PVGIS  
<https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>  
[Accessed May 2020]

## Optimization of photovoltaic energy production using embedded systems and techno-economic analysis of participating in demand response programs through IoT and IoE technologies

Cite as: AIP Conference Proceedings 2190, 020053 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5138539>  
Published Online: 11 December 2019

Christoforos Spyrou, Panagiotis Papageorgas, and Georgios Vokas



Lock-in Amplifiers  
up to 600 MHz



Zurich  
Instruments



AIP Conference Proceedings 2190, 020053 (2019); <https://doi.org/10.1063/1.5138539>

2190, 020053

© 2019 Author(s).

# Optimization of Photovoltaic Energy Production Using Embedded Systems and Techno-Economic Analysis of Participating in Demand Response Programs Through IoT and IoE Technologies

Christoforos Spyrou<sup>1, a)</sup>, Panagiotis Papageorgas<sup>1, b)</sup>, Georgios Vokas<sup>1, c)</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical and Electronics Engineering, University of West Attica, P. Ralli & Thivon 250, 12244, Athens, Greece

<sup>a)</sup>Corresponding author: [mscres-17@uniwa.gr](mailto:mscres-17@uniwa.gr)

<sup>b)</sup>[ppapag@uniwa.gr](mailto:ppapag@uniwa.gr)

<sup>c)</sup>[gvokas@uniwa.gr](mailto:gvokas@uniwa.gr)

**Abstract.** The rapid development of residential and commercial grid connected photovoltaic power projects led the research to energy optimization under mismatched operating conditions. The energy losses from partial shading photovoltaic panels can cause significant reduction in the produced energy of a PV system based on the classic topology of string inverter. The solution to this kind of problems can be given by incorporating embedded systems in the photovoltaic plants.

This paper presents the simulation results from the comparison of the main topologies which used for power optimization of a shading PV system, the DC/DC power optimizers, cell string optimizers and microinverters, and stress their effectiveness against the conventional string inverter scheme. The financial benefits of the participation of a grid-connected PV system to a demand response program by using IoT and IoE technologies are analyzed in techno economic basis.

## INTRODUCTION

The last few decades, humans are trying to detach from hydrocarbon energy sources. The proposed alternative solution which have a lot of potential to replace the fossil fuels are the renewable energy sources (RES). The future development of the society is based on renewable sources [1-2]. Photovoltaic energy is playing an important role on the energy trilemma of security, equity and environmental sustainability. The last 12 years many European Union (EU) countries applied strong motivations to promote the PV projects [3-5]. The edge of their policy was the Feed in Tariff (FIT) scheme. The high revenue per produced kWh motivated the investors to get in the PV market. Among the results of this rush penetration of new PV plants were the allocation of the installations among the high potential and low potential regions as in case of Italy [6] and the bad designed PV plants in terms of size and technical characteristics. The building PV projects suffered more than any other type of installation. Critical parameters which can cause significant reduction in the produced energy, such as shading from a blocking obstacle, dirt accumulation, and panel inherent tolerances from the manufacturing stage as well as differences between strings orientations and inclination and module-aged degradation were ignored. Even a single panel with low performance due to any of these reasons, can affect the power generation of the whole modules which are in series connection. Gradually all these parameters were evaluated and new techniques as the incorporation of power optimizers, microinverters and cell string optimizing methods implied wherever was mandatory.

DC-DC solar power optimizers and microinverters have a lot of similarities, both can be easily fixed behind any type of solar panel, both have a compact size and can efficient operate in extremely high environmental temperatures. The power optimizer can fluctuate in its output the voltage from a shaded PV panel to keep stable the whole string current in order to stabilize in higher level the total energy production of all modules which are connected in series. On the other hand microinverters convert directly the DC voltage from a shaded PV panel to AC voltage (230VAC-50Hz) and transfers this energy firstly into the common AC bus bars and then into the grid. Cell string optimizer have the same functionality as the DC-DC optimizer but their big difference lies in the fact that

these modules are embedded into the junction box on the rear side of the panel and operates as a regular power optimizer but in cell string level this time. These three schemes are promising to maximize the energy production of the PV power plant under mismatched operating conditions. But which option can ensure less losses under specific shadings conditions or more energy production under different orientation and inclination of power plant's PV panels? Which of this technologies can be comparative in cost terms to string inverter topology? A great number of simulation results with the usage of PV Syst are presented below in this paper.

The last years the interest for maximizing the energy harvesting in PV installations is getting bigger, fact which is happening due to the replacement of FIT with Net Metering programs. More and more embedded systems are installed in building PV plants to meet the demands of the Net Metering mechanism. In a Net Metering scheme the producer offsets the consumed electric energy with the produced one. The residential, commercial and industrial client can be either consumer or a producer at the same time. The new term to describe the double nature of the client is named prosumer [7]. The prosumer can add a battery storage system in his PV installation and take advantage of smart usage rewards programs for reducing electric demand, also known as Demand Response programs (DR). A characteristic example of DR application is the conEdison program in USA [8], where the consumer can be profited by up to 25\$/kW by curbing his electric usage during high-demand periods. The only obligation of the prosumer is to install a smart energy meter in his installation, which will work together with the electric grid to respond digitally to the quickly changing electric demand. This configuration can be the precursor of the future Internet of Energy market through Internet of Things technologies working together.

### PRESENTATION OF THE PV INSTALLATION AND PROPOSED SIMULATION METHODOLOGY

The PV system is installed in a suburb of Athens at Latitude 38.073931 / Longitude 23.524889. The orientation of the roof is south. The installed power is 9.84 kWp and the system is comprised of 41 polycrystalline solar modules of Renesola JC240M-24/Bb model. The inclination of the modules is 20°. The Kostal Piko 10kW string inverter it's fed with 20 and 21 modules in series in the two MPPT trackers respectively. The system is connected to the grid under a Net Metering program with an offset price of 0.14€/kWh as the building serves the demands of a commercial enterprise [9]. Between the producer and the network operator there is a contract agreement for 25 years for offsetting the energy. The building is 4 meters high and the roof is about 170m<sup>2</sup>. On the perimeter of the terrace on east and west side there is a barrier parade of 1.4m height, while on the south and north side there is a marble parade of 0.80m height. Figure 1 below shows an overview of the PV installation.



Figure 1. Overview of the PV power plant [10]

The aforementioned PV project will be the baseline system configured as string inverter topology. Then for the same system is being simulated the shading effect on the energy production of 5 different case study scenarios. The first case study considers the shading effect of a 3 meter height chimney in the west of the building. The second case

020053-2



concerns a cable's shadings simulation which passes in the south side of the building over 5 meters of modules. In the third scenario is simulated the shadings of two trees which are placed in the south side of the building with a total height of 9 and 11 meters. Then follows the shadings effect simulation of the neighbour's building who is building a new flat at 4 meters higher than the PV installation area. The last simulation concerns the worst case scenario of all obstacles to be present together. For any of these scenarios is evaluated in a techno economic basis the performance of the string inverter, power optimizers, microinverters and the cell string optimizers scheme. Three more simulation scenarios are developed which concerns the mismatch and shadings losses due to possible differences in the orientation and inclination between the panels. For this simulation we change the inclination of the 11 panel in the first row to 5° and then is changed their orientation from south to -20° and finally a combination of these two scenarios is implied in the PV syst simulation process to examine the performance of the four power optimizing topologies not only in shadings effect but in mismatch conditions too.

The Homer Grid software is used to simulate the combination of the baseline PV power plant with an energy storage system in a DR program. Two main type of batteries and their contribution to the energy supply are being evaluated, an OPzV lead acid type and a Li-Ion battery. Figure 2 below summarize the proposed methodology for all the simulations that has been described before.

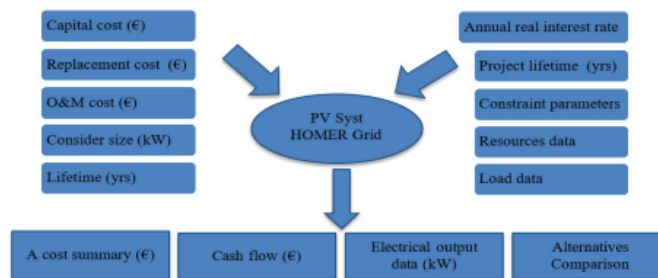
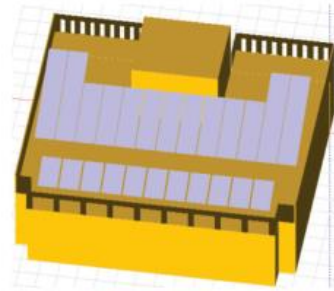


Figure 2. Proposed simulation process

### SHADINGS SIMULATIONS

The first case study scenario which is developed concerns the baseline system. The initial cost for the installed system is 14.312€ which cover the total expenses of the whole system including costs such as the PV modules, the inverter, the mounting structure and the installation and connection charges. The first alternative to the string inverter is the usage of power optimizers, for this reason the Solar Edge SE10kW inverter is chosen along with 41pcs of DC/DC power optimizers of P300 EU model, with a total cost of 16.420€. For the microinverter solution are used 41pcs of Enphase modules of S270-72-LN-x-230 model with a total power of 10.7kW. The capital expenditure for microinverters is 15.870€. For the last option of cell string optimizers is chosen the Maxim VT8020 model with nominal power of 3x93Watt per PV module along with the Kostal Piko 10kW inverter which is the base string inverter of the initial scheme. The final cost for this configuration is 16.030€ which is the second higher cost after the SE power optimizers option. All prices for the cost analysis of all systems were found by an expert Greek company in the RES applications [11]. In figure 3 is depicted a 3D image of the baseline system which is firstly under consideration.

020053-3



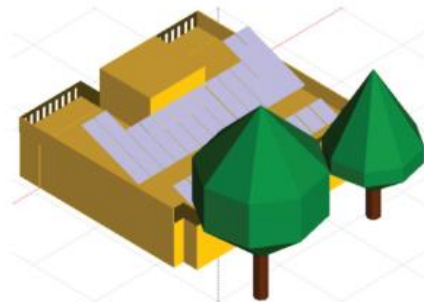
**Figure 3.** Baseline system

Table 1 presents a summary of the PV Syst simulation for the baseline PV system. All economics data are sorting for a 25 years project lifetime.

**Table 1.** Baseline PV system simulation results

Shadings Scenario	System Topology	Electrical loss due to shadings (%)	Initial Produced Energy (kWh)	Capital Cost (€)	Annual Profit (€)	25 Years Profit (€)	Payback Period (yrs)	IRR (%)
Baseline PV system	String Inverter	0,5	14.540	14.312	2.036	46.321	7,2	10,7
	Power Optimizers	0,2	16.240	15.118	2.274	51.737	6,8	11,8
	Microinverters	0,2	15.870	16.822	2.222	50.558	7,7	9,2
	Cell string optimizers	0,2	16.030	15.296	2.244	51.068	7	11,3

From the Table 1 we can observe that the client hadn't made the right choice choosing the string inverter for his installation, as the alternative of power optimizers has a shorter payback period of 6,8yrs and higher IRR of 11,8%. The chimney and electric cable shadings simulation effect were too small on the production of the system and we avoid to present them. The next shadings scenario which is shown in figure 4 and its results in table 2 concerns the existence of two high trees above the building.



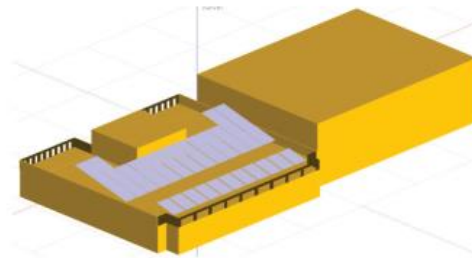
**Figure 4.** Trees shadings scenario

020053-4

**Table 2.** Trees shadings simulation results

Shading Scenario	System Topology	Electrical loss due to shadings (%)	Initial Produced Energy (kWh)	Annual Profit (€)	25 Years Profit (€)	Payback Period (yrs)	IRR (%)
Trees	String Inverter	9,2	13.090	1.833	41.702	8	8,5
	Power Optimizers	4,4	14.060	1.968	44,792	7,8	8,9
	Microinverters	5,2	13.610	1.905	43,359	9,1	6,1
	Cell string optimizers	4,4	13.478	1.887	42,938	8,3	7,8

The neighbor's building case study scenario has a smaller effect in terms of electrical losses than the trees effect. The system configuration and the results of this simulation are presented in figure 5 and table 3 respectively.



**Figure 5.** Neighbor's building shadings scenario

**Table 3.** Neighbor's building simulation results

Shading Scenario	System Topology	Electrical loss due to shadings (%)	Initial Produced Energy (kWh)	Annual Profit (€)	25 Years Profit (€)	Payback Period (yrs)	IRR (%)
Building	String Inverter	4,1	14.540	2.036	46.321	7,2	10,7
	Power Optimizers	1,5	15.200	2.128	48.424	7,3	10,5
	Microinverters	2,2	14.740	2.064	46.958	7,8	8,9
	Cell string optimizers	1,4	14.779	2.069	47.083	7,6	9,6

Finally the last case scenario which concerns the simultaneously presence of all obstacles is shown in figure 6 and the corresponding results in table 4.

020053-5

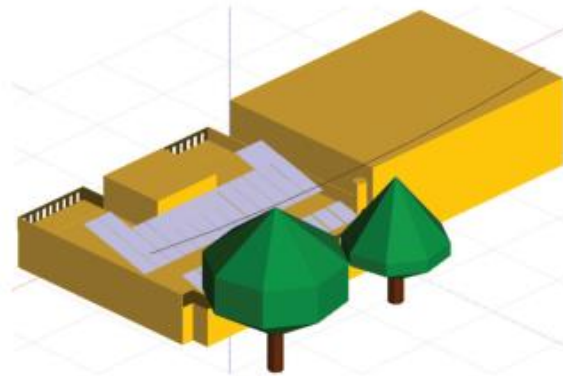


Figure 6. All obstacles together shadings scenario

Table 4. All obstacles shadings scenario simulation results

Shading Scenario	System Topology	Electrical loss due to shadings (%)	Initial Produced Energy (kWh)	Annual Profit (€)	25 Years Profit (€)	Payback Period (yrs)	IRR (%)
All obstacles together	String Inverter	14,1	11.540	1.616	36,764	9,1	6
	Power Optimizers	7	12.800	1.792	40.778	8,6	7
	Microinverters	8,3	12.290	1.721	39.153	10,1	4
	Cell string optimizers	6,9	12.067	1.689	38.443	9,3	5,5

It was quite expected that the bigger electrical losses would be in this scenario, it's worth noting that the economic evaluation of the string inverter topology is quite competitive to the power optimizer option which is the best option. In figure 7 are presented the cumulative profits for this case scenario of the whole project lifetime in order to notice the small difference between the two alternatives.

020053-6

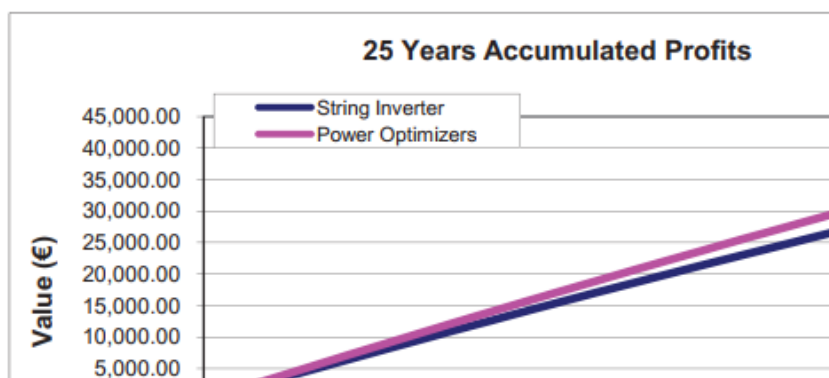


Figure 7. String inverter and power optimizers profits comparison

Beyond the economic evaluation we have to consider the problems that a partial or a permanent shading can cause to the panel and the whole system. Phenomenon such as hot spots or fire ignition can be catastrophic for the project.

### INCLINATION AND ORIENTATION SIMULATION

As in case of chimney and cable shading simulation the inclination and orientation shadings and mismatch losses seems to have very small effects on the PV energy output.

Table 5. Inclination and orientation simulation results

Inclination & Orientation scenarios	System Topology	Electrical loss due to shadings (%) & Mismatch	Initial Produced Energy (kWh)	Annual Profit (€)	25 Years Profit (€)	Payback Period (yrs)	IRR (%)
5° Inclination	String Inverter	0,4	15.560	2.178	49.571	6,7	12,1
	Power Optimizers	0,1	15.830	2.216	50.431	7	11,3
	Microinverters	0,2	15.460	2.164	49.252	8	8,9
	Cell string optimizers	0,2	15.633	2.189	49.803	7,2	10,8
-20° Orientation	String Inverter	2	15.600	2.184	49.698	6,7	12,1
	Power Optimizers	1,5	15.910	2.227	50.686	6,9	11,4
	Microinverters	1,8	15.510	2.171	49.412	8	8,7
	Cell string optimizers	1,1	15.690	2.197	49.985	7,1	10,9
5° Inclination & -20° Orientation	String Inverter	0,7	15.480	2.167	49.316	6,8	12
	Power Optimizers	0,3	15.750	2.205	50.176	7	11,2
	Microinverters	0,4	15.380	2.153	48.997	8	8,5
	Cell string optimizers	0,3	15.563	2.179	49.580	7,2	10,7

020053-7

Due to small slight effect on electrical losses the string inverter topology in ranking in the first place on the above table as it has the smallest capital expenditures.

### DEMAND RESPONSE SIMULATION

The setup of the system is referred to the same company at the same location which already hold a PV system of 9.84kWp with a scaled annual average production of 49kWh/kWp/day. The capital cost for the PV system is set to 0€ as the plant preexist. The utility tariff is formed to 0.14€/kWh per consumed or produced energy as the building belongs in the category of a commercial charge bill tariff [9]. Before we consider the size and cost of storage and the converter system, we must record first the load nature of this building. The scaled annual consumption of the client is 245kWh/day with an average peak power of 10.34kW and peak power of 50.87kW. More specific in figure 8 is presented the daily and the yearly load profile of the building demands.

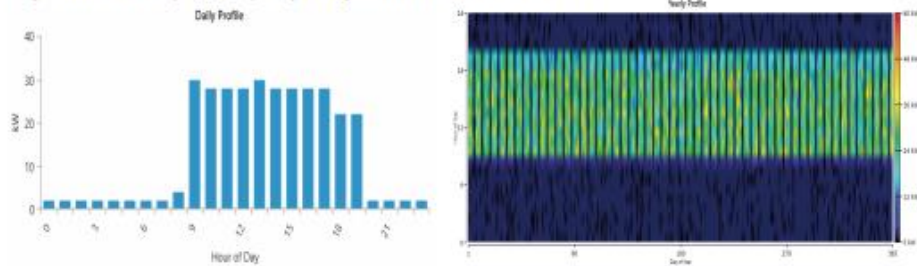


Figure 8. Daily and yearly load profile

For storage are chosen two different type of batteries. The first option concerns an OPzV lead acid type of 6pcs Energys PowerSafe 420Ah type with a capital and operation and maintenance cost of 1.380€ and 50€/yr respectively. The second option is a Li-Ion battery power pack unit of Samsung M8194 E2 (7.6kWh) model with a higher capital cost of 5.000€ and the same operation and maintenance cost of 50€/yr. The cost for the converter is calculated of 300€/kW and Homer Grid optimized the chosen size.

The Demand Response program which chosen is the Distribution Load Relief Program (DLRP) with a 2 hour or less prior notifications. ConEdison rewards the client for DLRP participation with an amount of 18 to 25\$/kW depending on the network tier which belongs. For the Greek example we will use a mean price of 10€/kW as in Greece there is no specific regulation at this time beyond the new legislation of installing a max 30kW of storage battery in your system [12]. The last cost for the investor is the new smart meter which is calculate on a fixed amount of 2.200€. The system which will be simulated in Homer Grid is depicted in figure 9.

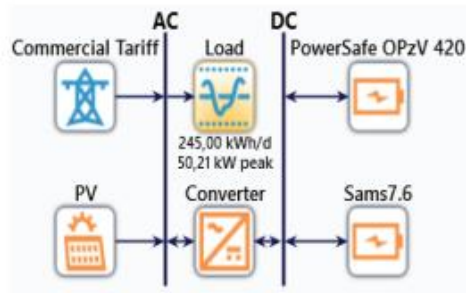








Figure 9. DLRP system configuration

020053-8

The results of the simulation are summarized in table 6. The results are sorted with the lowest net present cost value for each system. The best scheme is the PV-Utility. The lead acid battery option overcome the Li-Ion alternative due to the lowest capital cost.

**Table 6.** DLRP simulation results

Config.	PV (Kw)	PowerSafe OPzV 420	Sams 7.6	Commercial Tariff	Converter (Kw)	Operating cost (€/yr)	Initial Capital (€)	NPC (€)	COE (€/kWh)	DR (€/yr)
 	9,84			1		10.315	2.200	135.554	0,114	
 	9,84	6		1	1,58	10.340	4.055	137.728	0,116	416
 	9,84		1	1	3,17	10.190	8.117	139.198	0,118	565

The payback period for the lead acid battery storage system is 9.74 years and 14.3 years for the Li-Ion option. These values may seem enough high but the scenario concerned 10 random event of 4 hours each time. If the number of yearly events increased it will decrease the payback period for each scheme too.

## CONCLUSIONS

The DC-DC converters and the micro inverters as well as cell string optimizers are the three alternative solutions to minimize all the mismatching losses between PV modules which are installed in buildings. These technologies have a lot of similarities despite the fact that are using different architecture. Most of times is very difficult to recognize one as better option as they really have small variations as we already show in the simulation results.

From all case study scenarios that have been developed in this report the string inverter topology has the smaller capital expenditures, but if you compare it with the other configuration in terms of 25 years lifetime of the project then the most times the total profits are higher if you choose one of the three alternatives. Considering all these the power optimizer is ranking in the first place of the best solution to maximize the energy production in partial shadings PV power plant. The need and prospects that embedded systems can create in a PV's power plant production is confirmed in this paper by the various simulation that were carried out.

The ability of network users from the largest producers to the smallest household to provide flexibility to the network will be crucial and highly valued by the network operators and in exchange to this strong motivations as high revenues to DR request will be given to the clients.

## REFERENCES

- [1] Umbach, F. Global energy security and the implications for the EU. *Energy Policy* 2010, 38 (3), 1229-1240. doi: 10.1016/j.enpol.2009.01.010
- [2] Melas, V.; Lisin, E.; Tvaronaviciene, M.; Peresadko, G.; Radwanski, R. Energy security and economic development: renewables and the integration of energy system. *Journal of Security & Sustainability Issues* 2017, 7 (1), 133-139. doi: 10.9770/jssi.2017.7.1(11)
- [3] D.L. Talavera, G. Nofuentes, J. Aguilera. The internal rate of return of photovoltaic gridconnected systems: A comprehensive sensitivity analysis. *Renewable Energy*, Volume 35, Issue 1, January 2010, Pages 101-111. doi: 10.1016/j.renene.2009.07.006
- [4] S.M. Moosavian, N.A. Rahim, J. Selvaraj, K.H. Solangi. Energy policy to promote photovoltaic generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 25, September 2013, Pages 44-58. doi: 10.1016/j.rser.2013.03.030
- [5] Luigi Dusonchet, Enrico Telaretti. Economic analysis of different supporting policies for the production of electrical energy by solar photovoltaics in eastern European Union countries. *Energy Policy*, Volume 38, Issue 8, August 2010, Pages 4011-4020. doi:10.1016/j.enpol.2010.01.053

020053-9

- [6] Marco Antonelli, Umberto Desideri. Do feed-in tariffs drive PV cost or viceversa? *Applied Energy*, Volume 135, 15 December 2014, Pages 721-729. doi:10.1016/j.apenergy.2014.06.059
- [7] Luo Y, Davis P., "Autonomous Cooperative Energy Trading Between Prosumers for Microgrid Systems. 3<sup>rd</sup> IEEE International Workshop on Global Trends in Smart Cities, 2014.
- [8] Consolidated Edison  
<https://www.coned.com/en/save-money/rebates-incentives-tax-credits/rebates-incentives-tax-credits-for-commercial-industrial-buildings-customers/smart-usage-rewards/smart-usage-rewards-for-reducing-electric-demand>
- [9] Power Public Corporation Hellas SA – Commercial Tariffs  
<https://www.dei.gr/en/epaggelmaties30802/epaggelmatiesctairies-xamilis-tasis/timologia/genika-timologia-emporikis-xrasis>
- [10] Nigico SA.  
<https://www.nigico.gr/en/>
- [11] Hellenic Association of Photovoltaic Companies - HELAPCO  
<https://helapco.gr/nea/dimosieftikan-sc-fek-i-nees-rythmisis-gia-aftoparagogi-ke-apothikefsi/>

020053-10



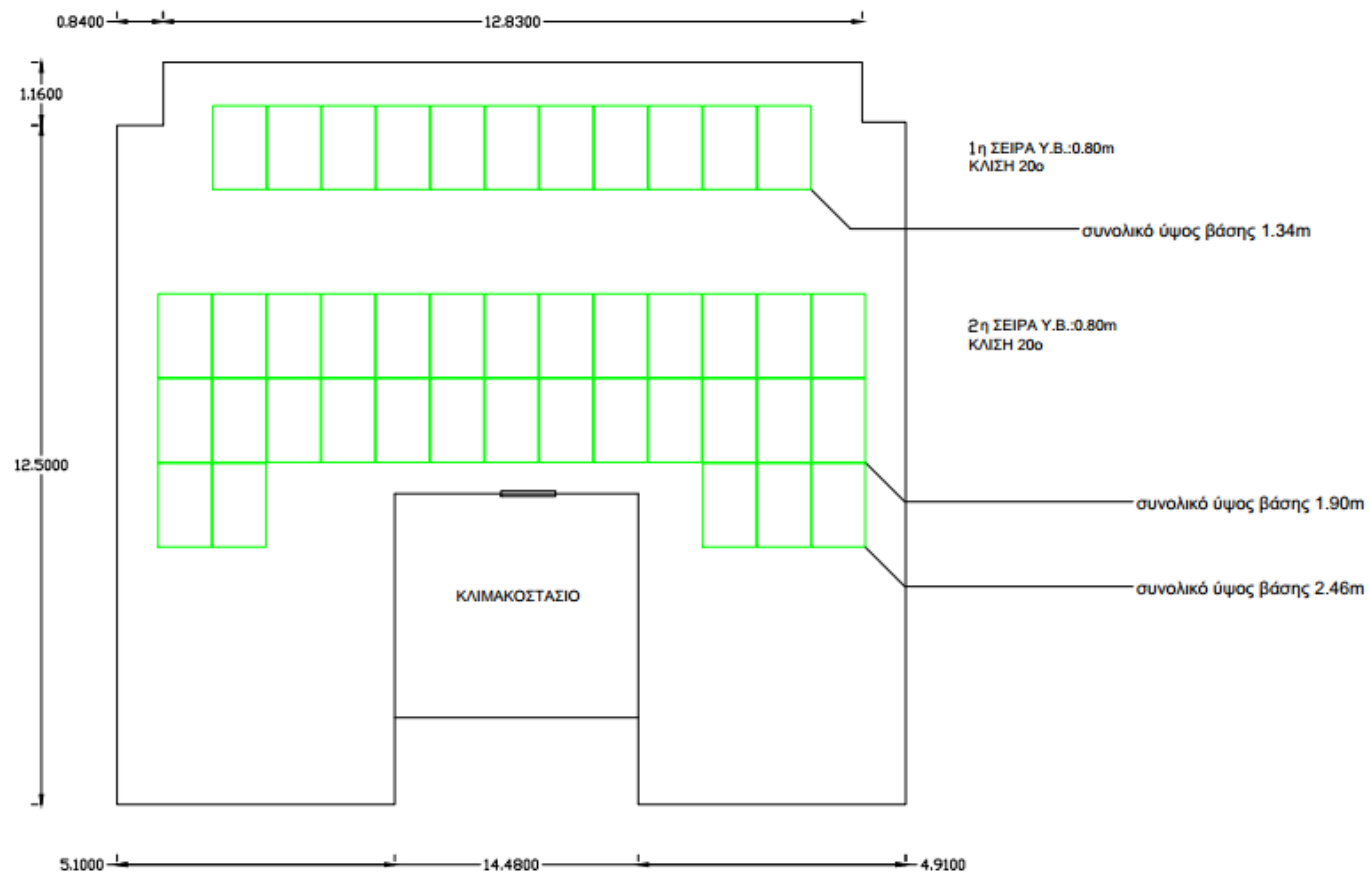
## Παράρτημα 2



Φωτογραφικό υλικό της εγκατάστασης του Φ/Β συστήματος



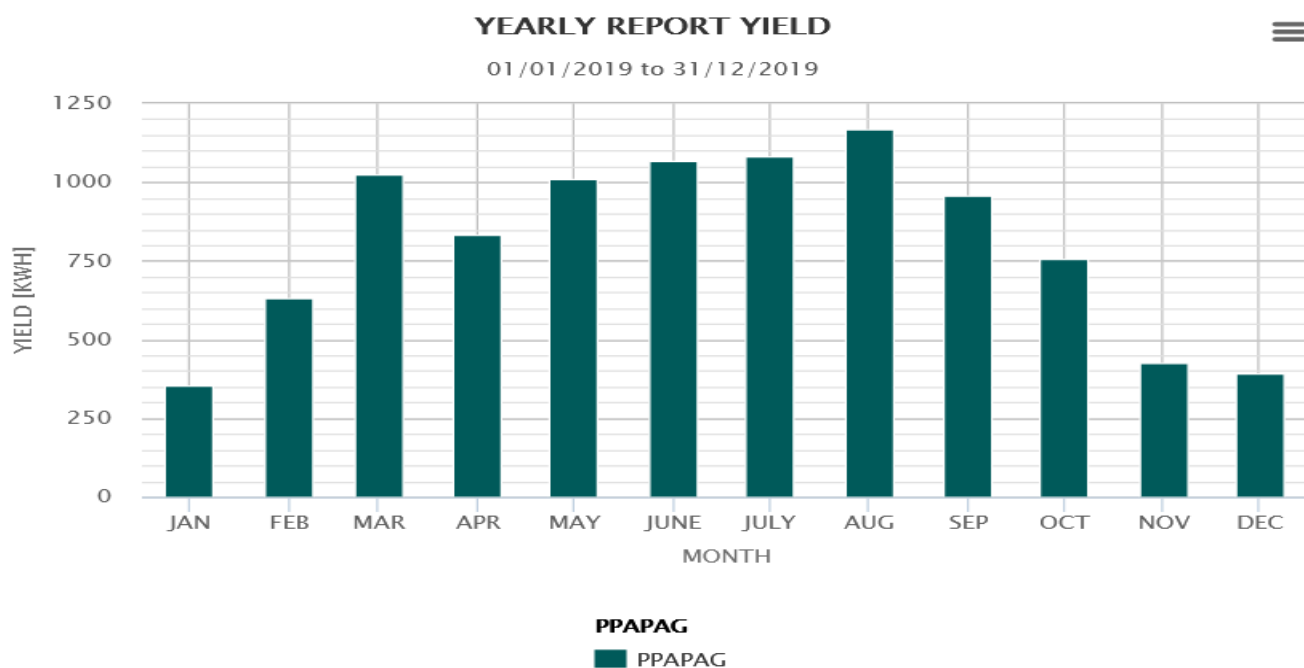
10ο απόκλιση προς ανατολή



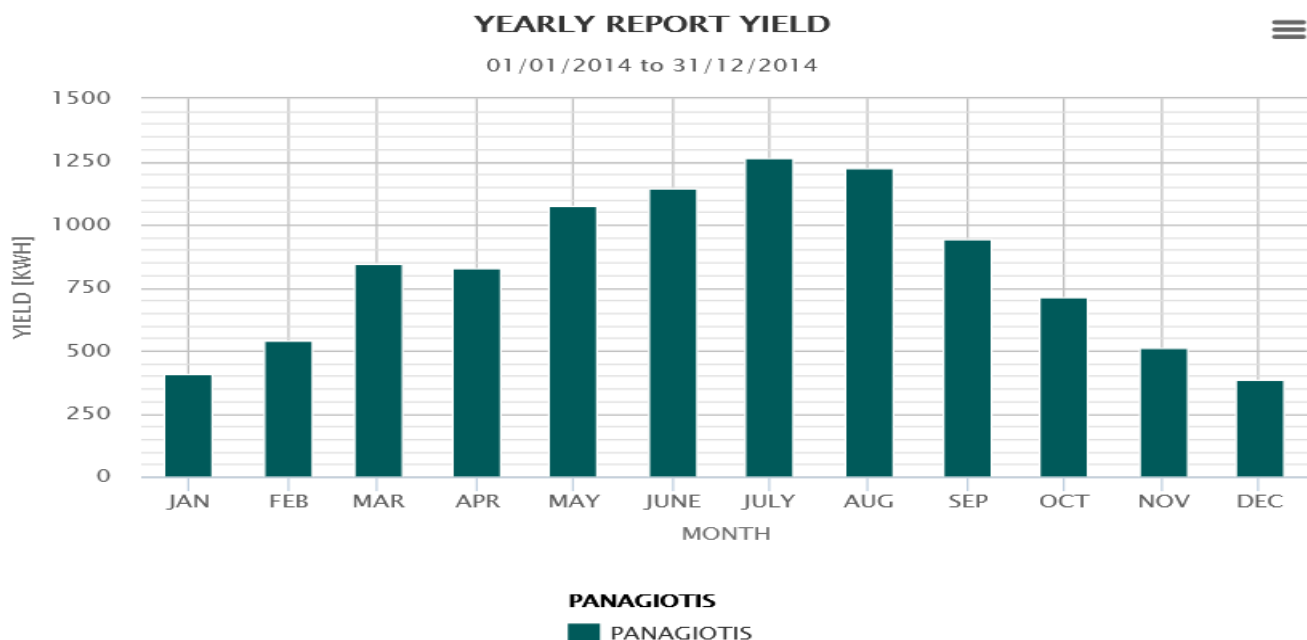
Κάτοψη Φ/Β συστήματος

74

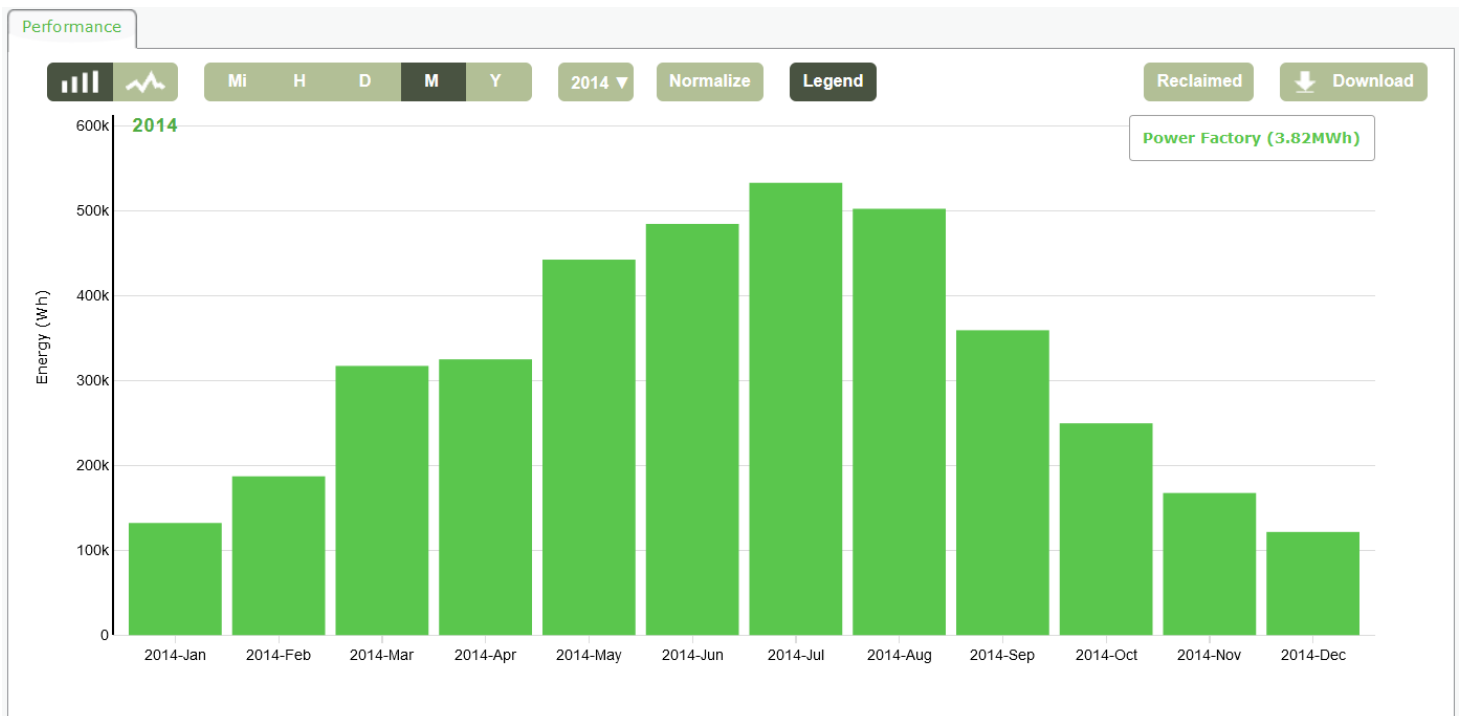
### Παράρτημα 3



Συνολική μηνιαία παραγωγή του Φ/Β συστήματος 7.35kW για το έτος 2019



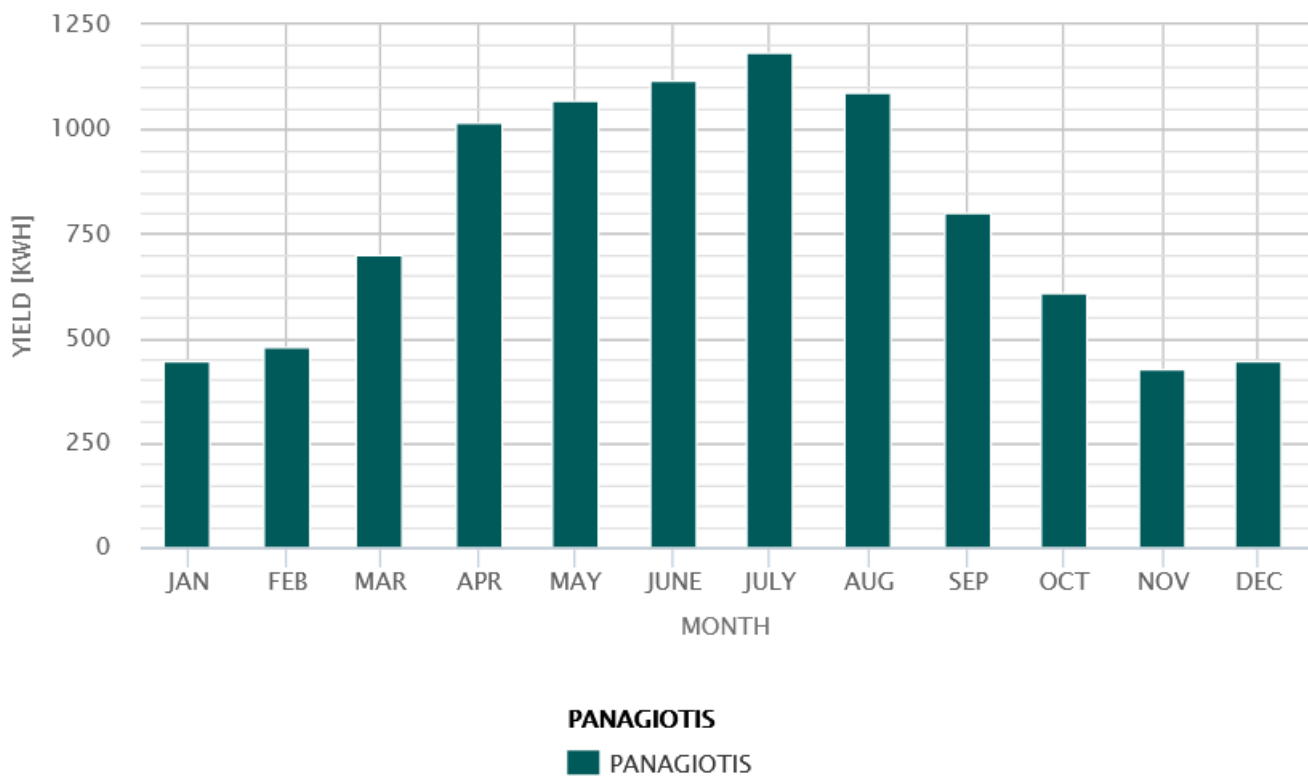
Συνολική μηνιαία παραγωγή του Φ/Β συστήματος 7.35kW για το έτος 2014



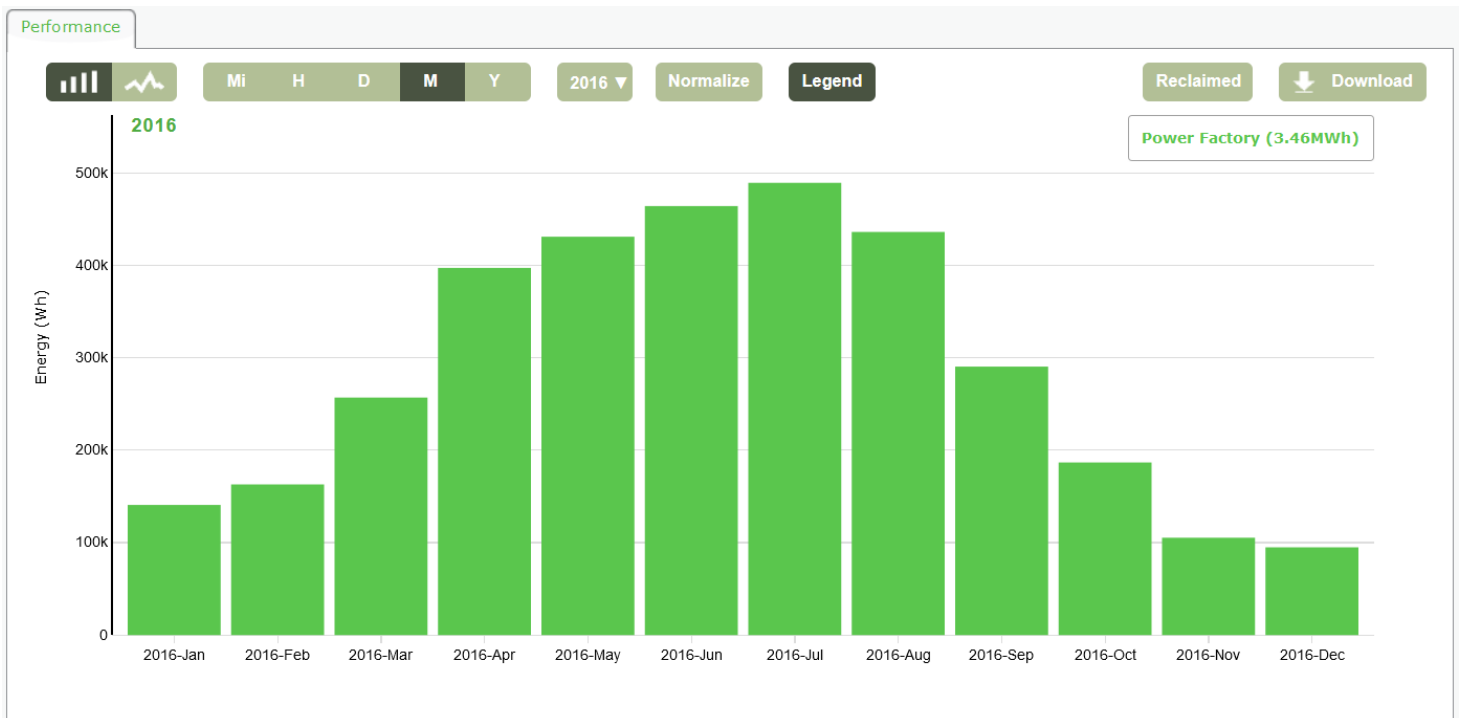
Επιμέρους μηνιαία παραγωγή του Φ/Β συστήματος 2.94kW για το έτος 2014

### YEARLY REPORT YIELD

01/01/2016 to 31/12/2016



Συνολική μηνιαία παραγωγή του Φ/Β συστήματος 7.35kW για το έτος 2016



Επιμέρους μηνιαία παραγωγή του Φ/Β συστήματος 2.94kW για το έτος 2016

**ΑΘΗΝΑ**

**ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ - 2020**