



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη υποστηρικτικού πλαισίου για την προσομοίωση
σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής
κλίμακας σε χώρες-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης**

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΒΛΑΣΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Αλέξανδρος Φλάμος
Καθηγητής ΠΑ.ΠΕΙ.

Αθήνα, Ιούνιος 2021



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑΣ ΚΑΙ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΑΣ
ΤΜΗΜΑΤΟΣ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ & ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΤΕΧΝΟ-ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ»



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Ανάπτυξη υποστηρικτικού πλαισίου για την προσομοίωση
σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής
κλίμακας σε χώρες-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης**

ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΒΛΑΣΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Αλέξανδρος Φλάμος
Καθηγητής ΠΑ.ΠΕΙ.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 18^η Ιουνίου 2021

Φλάμος Αλέξανδρος

Ψαρράς Ιωάννης

Δούκας Χρυσόστομος

Καθηγητής ΠΑ.ΠΕΙ.

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούνιος 2021

.....
Βλάσης Δημήτριος

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Βλάσης Δημήτριος, Βασίλης Σταύρακας, Ζώης Κατηφόρης, Αλέξανδρος Φλάμος, 2021

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2020-2021 υπό την επίβλεψη του κ. Α. Φλάμου, Καθηγητή ΠΑ.ΠΕΙ. στο Τμήμα Βιομηχανικής Διοίκησης & Τεχνολογίας, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της και την ευκαιρία που μου δόθηκε ώστε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Βασίλη Σταύρακα, που υπήρξε αρωγός καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας, δίνοντάς μου πολύτιμες συμβουλές και καθοδήγηση.

Τέλος, οφείλω ένα ιδιαίτερο ευχαριστώ στην οικογένειά μου καθώς και στους ανθρώπους εκείνους, εντός και εκτός σχολής, που με την αμέριστη συμπαράστασή τους και την απαραίτητη θετική σκέψη που μου μετέδωσαν, βοήθησαν τα μέγιστα στην υλοποίηση των στόχων μου.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η ηλιακή φωτοβολταϊκή ενέργεια θεωρείται εδώ και πολύ καιρό ανταγωνιστική των συμβατικών πηγών ενέργειας και έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί μία από τις βασικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές για τη μετάβαση σε ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Στο πλαίσιο αυτής της μετάβασης, η ίδιο-κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται εξαιρετικά σημαντική, ειδικά στην περίπτωση του οικιακού τομέα, ενώ οι καταναλωτές αναλαμβάνουν το ρόλο των «προμηθευτών», παράγοντας και καταναλώνοντας ενέργεια σε τοπικό επίπεδο. Τυπικά, η ίδιο-κατανάλωση περιλαμβάνει την υιοθέτηση και την περαιτέρω διάχυση ενός ευρέος φάσματος τεχνολογιών και συστημάτων που επιτρέπουν την ενσωμάτωση της ευελιξίας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά (π.χ. φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας (1-10 kWp), μπαταρίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, συσκευές έξυπνων δικτύων, κ.λπ.).

Λόγω των πολλαπλών παραγόντων που επηρεάζουν τις επενδυτικές αποφάσεις ενός νοικοκυριού, υπέρ μιας καινοτόμου ενεργειακής τεχνολογίας, όπως τα φωτοβολταϊκά συστήματα μικρής κλίμακας, οι τεχνικές μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων (Agent-based Modeling techniques) παρέχουν ένα κατάλληλο πλαίσιο για την προσομοίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων των μελών ενός ετερογενούς κοινωνικού συστήματος, με βάση τις ατομικές προτιμήσεις τους, τους κανόνες συμπεριφοράς και την επικοινωνία μέσα σε ένα κοινωνικό δίκτυο. Το εργαστήριο “Τεχνοοικονομικής Ενεργειακών Συστημάτων – (TEESlab)” έχει ήδη αναπτύξει ένα τέτοιο υπολογιστικό εργαλείο, το μοντέλο ATOM (Agent-based Technology adOption Model). Το ATOM είναι ένα υπολογιστικό μοντέλο πρακτόρων, το οποίο εκτός από τη μοντελοποίηση σεναρίων διάχυσης τεχνολογιών στα πλαίσια ενεργειακών πολιτικών ενδιαφέροντος, επιτρέπει τη ρητή ποσοτικοποίηση αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις προτιμήσεις των καταναλωτών και τα κριτήρια λήψης αποφάσεων. Η εφαρμοσιμότητα και η αποδοτικότητα του μοντέλου έχει ήδη διερευνηθεί για την περίπτωση των φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας στην Ελλάδα, για την περίοδο 2018-2025, υπό το ισχύον πρόγραμμα αυτοπαραγωγής με ενεργειακό συμψηφισμό (Net-Metering) και ένα δυνητικό πρόγραμμα ιδιοκατανάλωσης (Self-Consumption), το οποίο προβλέπει τη μερική επιδότηση μπαταρίας αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας, σε οικιακό επίπεδο.

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύχθηκε ένα υποστηρικτικό πλαίσιο μοντελοποίησης το οποίο συμβάλλει στην περαιτέρω ανάπτυξη του υπολογιστικού εργαλείου ATOM και στην εφαρμογή του σε άλλες χώρες-μέλη της Ευρωπαϊκής Ένωσης, πλην της Ελλάδας, για τη διερεύνηση σεναρίων διάχυσης οικιακών φωτοβολταϊκών συστημάτων, υπό προγράμματα αυτοπαραγωγής με δυνατότητα ιδιοκατανάλωσης μελετώντας διαφορετικά σενάρια επιδότησης συστημάτων μπαταριών. Η υπό μελέτη περίοδος διαρκεί από το 2020 έως και το έτος 2030, σύμφωνα με το ενδιάμεσο ορόσημο για την επίτευξη μερικής απανθρακοποίησης, όπως ορίζεται στα διάφορα Εθνικά Σχέδια για την Ενέργεια και το Κλίμα των εξεταζόμενων κρατών. Η προτεινόμενη μέθοδος στηρίζεται στη συλλογή των απαραίτητων δεδομένων και την περαιτέρω επεξεργασία τους για τη βαθμονόμηση του μοντέλου ATOM και την τελική εξαγωγή σεναρίων διάχυσης φωτοβολταϊκών συστημάτων μικρής κλίμακας για το γεωγραφικό και κοινωνικο-οικονομικό πλαίσιο υπό εξέταση.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

Κλιματική αλλαγή, Διεσπαρμένη παραγωγή, Ηλιακά Φ/Β μικρής κλίμακας, Συστήματα αποθήκευσης, Ποσοτικοποίηση αβεβαιοτήτων, Παράμετροι οντοτήτων, Ανάλυση ευαισθησίας, Υιοθέτηση τεχνολογίας

ABSTRACT

Solar photovoltaics have long been considered competitive with conventional energy sources and have proven to be one of the key technologies for generating electricity from renewable sources for the transition to a low carbon energy system. As part of this transition, self-consumption of electricity has become extremely important, especially in the case of the residential sector, where consumers take on the role of "suppliers", producing and consuming energy locally. Typically, self-consumption involves the adoption and further dissemination of a wide range of technologies and systems that allow the integration of electricity demand flexibility into the market (e.g. small-scale photovoltaic systems (1-10 kWp), electricity storage batteries, smart grid devices, etc.).

Due to the multitude of factors that influence a household's investment decisions in favor of an innovative energy technology, such as small-scale photovoltaic systems, Agent-based Modeling techniques provide an appropriate framework for simulating the process of the decision making of the members of a heterogeneous social system, based on their individual preferences, rules of conduct and communication within a social network.

The "The Technoeconomics of Energy Systems laboratory (TEESlab)" lab has already developed one such computing tool, the ATOM (Agent-based Technology adOption Model). ATOM is a computational model of agents, which, in addition to modeling technology diffusion scenarios in the context of energy policy interests, it allows the explicit quantification of uncertainties related to consumer preferences and decision making criteria. The applicability and efficiency of the model has already been investigated for the case of small-scale photovoltaic systems in Greece, for the period 2018-2025, under the current Self-Production Program with energy compensation (Net-Metering) and a potential Self-consumption Program (Self -Consumption), which provides for the partial subsidy of electricity storage battery, at home level.

Within the context of this thesis, a supportive modeling framework was developed which contributes to the further development of the ATOM computational toolbox and its application in other Member States of the European Union, except Greece, for the investigation of residential photovoltaic systems diffusion scenarios under multiple levels of battery energy storage systems self-consumption subsidy schemes. The period under study spans from 2020 to 2030, in accordance with the interim milestone for achieving partial decarbonisation as set in the National Energy and Climate Plans of each examined EU member state. The proposed method is based on the collection of all the necessary data and their further processing for the calibration of the ATOM model and the final export of diffusion scenarios of small-scale photovoltaic systems for the geographical and socio-economic context under consideration.

KEY WORDS

Climate change, Distributed generation, Small-scale solar PV, Storage systems, Uncertainty quantification, Agent-related parameters, Sensitivity Analysis, Technology adoption

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Συντομογραφίες-Συντμήσεις	15
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	17
Εισαγωγή.....	17
1.1 Αντικείμενο και σκοπός	17
1.2 Φάσεις υλοποίησης.....	19
1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας.....	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	21
Κλιματική Αλλαγή – Ορισμοί και εργαλεία μετριασμού.....	21
2.1 Ορισμός φαινομένου.....	21
2.2 Μετριασμός δυσμενών επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής	24
2.3 Ευρωπαϊκή απανθρακοποίηση – Πρωτοβουλίες και τροχιές υλοποίησης	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3.....	35
Συντελεστές αποκεντρωμένης παραγωγής – Ρυθμιστικό πλαίσιο και υποστηρικτικές πρωτοβουλίες	35
3.1 Αποκεντρωμένη παραγωγή – Ορισμός.....	35
3.2 Συστήματα οικιακής αυτοπαραγωγής και ιδιοκατανάλωσης	38
3.3 Ρυθμιστικά πλαίσια στήριξης αποκεντρωμένης παραγωγής στην ΕΕ	46
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	54
Εφαρμογή βαθμονόμησης του μοντέλου ATOM.....	54
4.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο τεχνικών μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων (ABM) προς εφαρμογή βαθμονόμησης.....	54
4.2 Μαθηματική διατύπωση μοντέλων βαθμονόμησης και ανάλυσης ευαισθησίας ...	60
4.3 Εφαρμογή βαθμονόμησης Agent related παραμέτρων ~ Μελέτη περίπτωσης: Ελλάδα.....	68
4.4 Εφαρμογή βαθμονόμησης Agent related παραμέτρων ~ Μελέτη περίπτωσης: Γερμανία.....	75
4.5 Εφαρμογή βαθμονόμησης Agent related παραμέτρων ~ Μελέτη περίπτωσης: Ιταλία	80
4.6 Παρατηρήσεις επί της διαδικασίας βαθμονόμησης	85
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	87
Εφαρμογή μελλοντικών προσομοιώσεων	87
5.1 Περιγραφή μεθοδολογικού πλαισίου	87
5.2 Εφαρμογή μελλοντικής προσομοίωσης: Μελέτη περίπτωσης: Ελλάδα.....	94
5.3 Εφαρμογή μελλοντικής προσομοίωσης: Μελέτη περίπτωσης: Γερμανία.....	106
5.4 Συγκριτική ανάλυση μελετών περίπτωσης	116

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6.....	120
Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προεκτάσεις.....	120
Βιβλιογραφικές Αναφορές	124
Παράρτημα Α – Κώδικας βαθμονόμησης και Ανάλυσης Ευαισθησίας.....	130
Παράρτημα Β – Μοντέλο βέλτιστης κατανομής οικιακής μονάδας αποθήκευσης.....	142

Συντομογραφίες-Συντμήσεις

ABM	Agent – Based Modeling
ATOM	Agent-based Technology adOption Model
BEMS	Building Energy Management Systems
BESS	Battery Energy Storage System
CAMS	Copernicus atmosphere monitoring service
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz / Renewable Energy Sources Act
FIT	Feed-in Tariff
FIP	Feed-in Premium
GHG	Green House Gas
GHI	Global Horizontal Irradiance
GP	Gaussian Process
JTM	Just Transition Mechanism
LCOE	Levelized Cost of Energy
Li-ion	Lithium-ion battery
LHS	Latin hypercube sampling
NDC	Nationally determined contributions
NECP	National Energy and Climate Plans
NEM	Net - Metering
NRA	National Regulatory Authority
PRIM	Patient Rule Induction Method
PTC	Photovoltaics for Utility Scale Applications Test Condition
PV	Photovoltaic system
SA	Sensitivity Analysis
SC-ST	Self-consumption with storage
SMES	Superconducting Magnetic Energy storage
SWN	Small-World Network
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change
WACC	Weighted Average Cost of Capital
ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΔΑΠΕΕΠ	Διαχειριστής ΑΠΕ και Εγγυήσεων Προέλευσης
ΔΔ	Δίκτυα Διανομής
ΔΕΔΔΗΕ	Διαχειριστής Ελληνικού Δικτύου Διανομής Ηλεκτρικής Ενέργειας
ΕΛΑΠΕ	Ειδικός Λογαριασμός ΑΠΕ
ΕΣΕΚ	Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα
ΔΠ	Διεσπαρμένη Παραγωγή
ΜΤ	Μέση Τάση
ΣΕΦ	Σύνδεσμος Εταιρειών Φωτοβολταϊκών
ΥΚΟ	Υπηρεσίες Κοινής Ωφέλειας
Υ/Σ	Υποσταθμός
ΥΤ	Υψηλή Τάση
Φ/Β	Φωτοβολταϊκά συστήματα
ΧΤ	Χαμηλή Τάση

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

1.1 Αντικείμενο και σκοπός

Η ΕΕ, σύμφωνα και με τις τελευταίες νομοθετικές διατάξεις που προτάθηκαν από την Ευρωπαϊκή επιτροπή (*Δελτίο τύπου / 4/3/2020*) στοχεύει στη μείωση των συνολικών εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 80-95% έως το 2050 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 1990 καθώς και στην επίτευξη της πλήρους απαλλαγής (κλιματική ουδετερότητα) από τη χρήση ορυκτών καυσίμων στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής του συστήματος. Οι προκλήσεις σε αυτά τα κλιματικά ορόσημα συνίστανται ως ακολούθως:

- i. *Διατήρηση της ασφάλειας ενεργειακού εφοδιασμού σε επίπεδο μεταφοράς & διανομής των εθνικών συστημάτων ενέργειας (πρωτεύουσα ρύθμιση συχνότητας, εφεδρείες ισχύος κ.τ.λ.).*
- ii. *Σταθεροποίηση των τιμών ενέργειας σε προσιτά επίπεδα για νοικοκυριά και επιχειρήσεις.*
- iii. *Προώθηση της αποκεντρωμένης παραγωγής σε συνδυασμό με τη δημιουργία και διάχυση αποτελεσματικών και βιώσιμων σχημάτων ιδιοκατανάλωσης.*

Ένας μεγάλος όγκος της επιστημονικής βιβλιογραφίας έχει αφιερωθεί στην αξιολόγηση των τεχνολογιών και πρακτικών μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψιν τις παραμέτρους καθώς και τις επιπτώσεις των επιλογών μετριασμού από μια ολιστική σκοπιά συχνά αλληλοσυγκρουόμενων διαστάσεων (οικονομική, κοινωνική, περιβαλλοντική, τεχνολογική). Σε αυτή την κατεύθυνση, κατά τα προηγούμενα έτη υλοποιήθηκαν φιλόδοξες στρατηγικές για την ένταξη στο παραγωγικό σύστημα τεχνολογιών με βιώσιμο προφίλ. Τα οικονομικά εμπόδια που αντιμετώπιζαν οι συνεχώς βελτιούμενες από άποψη απόδοσης και μοναδιαίου κόστους εγκατάστασης τεχνολογίες ΑΠΕ απαίτησαν επίμονη κανονιστική δράση για την απόδοση κινήτρων σε υποψήφιους επενδυτές, με τη μορφή οικονομικής ενίσχυσης με σταθερή ταρίφα (Feed-in-Tariff ή FIT), ασφάλιστρα αγοράς (Feed-in-Premium ή FIP) καθώς και στον ορισμό ελάχιστων μεριδίων ΑΠΕ στο ενεργειακό μείγμα της χονδρεμπορικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Σε συνέχεια των παραπάνω και δεδομένου του γεγονότος ότι η ηλιακή Φ/Β ενέργεια θεωρείται εδώ και καιρό ανταγωνιστική σε όρους σταθμισμένου κόστους ενέργειας (LCOE) των συμβατικών πηγών ενέργειας έχοντας ενσωματωθεί ως μια εκ των βασικών τεχνολογιών μετάβασης σε ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα, η ίδιο-κατανάλωση

ηλεκτρικής ενέργειας δύναται να διαδραματίσει κεντρικό ρόλο, ειδικά στην περίπτωση του οικιακού τομέα, δίνοντας στους καταναλωτές τη δυνατότητα να αναλάβουν το ρόλο των προμηθευτών, παράγοντας και καταναλώνοντας ενέργεια σε τοπικό επίπεδο. Τυπικά, η ίδιο-κατανάλωση περιλαμβάνει την υιοθέτηση και την περαιτέρω διάχυση ενός ευρέος φάσματος τεχνολογιών και συστημάτων που επιτρέπουν την ενσωμάτωση της ευελιξίας ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην αγορά, όπως για παράδειγμα ένας συνδυασμός Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας (1-10 kWp ή 1-20 kWp ανάλογα τη χώρα) με μπαταρίες αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας και συσκευές έξυπνων δικτύων για χρήση των κατανεμόμενων δυνατοτήτων των μπαταριών (dispatchable unit) σε πραγματικό χρόνο.

Ιδιαίτερη έμφαση οφείλεται να δοθεί στα πρότυπα συμπεριφοράς των καταναλωτών, αναφορικά με την υιοθέτηση Φ/Β συστημάτων ώστε να διασφαλίζεται η ακρίβεια των μελλοντικών ενεργειακών πολιτικών. Λόγω των πολλαπλών παραγόντων που επηρεάζουν τις επενδυτικές αποφάσεις ενός νοικοκυριού, υπέρ μιας καινοτόμου ενεργειακής τεχνολογίας, όπως τα Φ/Β συστήματα μικρής κλίμακας, οι τεχνικές μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων (Agent-based Modeling (ABM) techniques) παρέχουν ένα κατάλληλο πλαίσιο για την προσομοίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων των μελών ενός ετερογενούς κοινωνικού συστήματος, με βάση τις ατομικές προτιμήσεις τους, τους κανόνες συμπεριφοράς και την επικοινωνία μέσα σε ένα κοινωνικό δίκτυο. Τα υπολογιστικά μοντέλα αυτού του τύπου αντιλαμβάνονται ένα σύστημα ως μια συλλογή από αυτόνομες οντότητες λήψης αποφάσεων και αποτελούν ένα ιδιαίτερα ευέλικτο εργαλείο μοντελοποίησης, καθώς περιγράφουν σε χαμηλό επίπεδο τη συμπεριφορά των πρακτόρων, επιτρέποντας τη συμπερίληψη σημαντικών λεπτομερειών για τις αποφάσεις τους και τη (δια-) δράση τους. Επομένως, οι τεχνικές των παραπάνω μοντέλων παρέχουν ένα διαισθητικό πλαίσιο για να εξετάσουν τα ρητά χαρακτηριστικά της εκάστοτε τεχνολογίας υπό μελέτη και της ανθρώπινης συμπεριφοράς, και θεωρούνται μέρος μιας νέας γενιάς μοντέλων που περιγράφουν με πιο πλούσιο και πιο λεπτό τρόπο προβλήματα αειφορίας και θέματα ενεργειακής πολιτικής.

Με τη συμβολή του υπολογιστικού εργαλείου μοντέλων πρακτόρων του εργαστηρίου “Τεχνοοικονομικής Ενεργειακών Συστημάτων – (TEESlab¹)” ATOM (*Agent-based Technology adOption Model*) πραγματοποιείται μοντελοποίηση πολλαπλών σεναρίων διάχυσης τεχνολογιών στα πλαίσια ενεργειακών πολιτικών ενδιαφέροντος καθώς και ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις προτιμήσεις των καταναλωτών και τα κριτήρια λήψης αποφάσεων. Ως εκ τούτου, σκοπός της παρούσας εργασίας αποτελεί η ανάπτυξη ενός μεθοδολογικού πλαισίου για την υποστήριξη της περαιτέρω ανάπτυξης του ATOM που θα επιτρέψει την εφαρμογή του και σε άλλες χώρες-μέλη της ΕΕ, για τη διερεύνηση

¹ Επίσημη ιστοσελίδα εργαστηρίου: <https://teeslab.unipi.gr/>

σεναρίων διάχυσης Φ/Β συστημάτων, υπό προγράμματα αυτοπαραγωγής με δυνατότητα ιδιοκατανάλωσης. Πιο συγκεκριμένα, η παρούσα εργασία θα προβεί:

- i. Στην επιλογή ενός αντιπροσωπευτικού δείγματος κρατών-μελών της ΕΕ (*συγκεκριμένα επιλέχθηκαν η Γερμανία και η Ελλάδα*), ως ικανά πρότυπα χωρών στο γεωγραφικό και κοινωνικοοικονομικό πλαίσιο Βόρειας και Νότιας Ευρώπης αντίστοιχα, για τις οποίες θα μελετηθεί η διάχυση Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας, για την περίοδο **2020-2030**,
- ii. Στην καταγραφή και ανάλυση των απαραίτητων χαρακτηριστικών των ρυθμιστικών πλαισίων που ισχύουν για τις περιπτώσεις υπό μελέτη,
- iii. Στη συλλογή των απαραίτητων ιστορικών δεδομένων και την περαιτέρω επεξεργασία τους για τη βαθμονόμηση του μοντέλου ATOM,
- iv. Στην εφαρμογή του μοντέλου ATOM για την εξαγωγή σεναρίων διάχυσης Φ/Β συστημάτων μικρής κλίμακας για το γεωγραφικό και κοινωνικό-οικονομικό πλαίσιο υπό εξέταση.

1.2 Φάσεις υλοποίησης

Στο παρόν υποκεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί μια επιγραμματική παρουσίαση των θεματικών εννοιών που θα αναπτυχθούν στα πλαίσια του σκοπού εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας.

- ❖ **Φάση 1^η** : Στη φάση αυτή εξηγούνται οι όροι της κλιματικής αλλαγής και της αναγκαιότητας της απανθρακοποίησης της οικονομικής δραστηριότητας (*μετριασμός επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής*). Ειδική αναφορά θα πραγματοποιηθεί σε επίπεδο συμφωνιών, συμβάσεων και εθνικών – κοινοτικών νομοσχεδίων και της εξέλιξής τους στην πάροδο των τελευταίων 5 ετών μετά και την ημερομηνία ορόσημο της σύναψης της συνθήκης του Παρισιού (*ενεργή από 4/11/2016*) μεταξύ της πλειοψηφίας των κρατών που απαρτίζουν τον ΟΗΕ.
- ❖ **Φάση 2^η** : Στη συγκεκριμένη φάση επεξηγούνται οι όροι της αποκεντρωμένης παραγωγής και της ιδιοκατανάλωσης σε οικιακό επίπεδο, καθώς και των εγκεκριμένων (ή προς ανάπτυξη / διαβούλευση) ρυθμιστικών πλαισίων από τους αρμόδιους κρατικούς και κοινοτικούς φορείς προς απόδοση κινήτρων σε ανάλογα επενδυτικά σχήματα. Στα πλαίσια αυτά, πραγματοποιείται μια ιστορική ανασκόπηση των σχημάτων σε βάθος 15-ετίας και γίνεται κριτική ανάλυση της επιτυχίας τους ως προς στην επίτευξη του πρωτογενούς τους στόχου (*διείσδυση ΑΠΕ*) καθώς και του οικονομικού αντικτύπου των μέτρων στήριξης στις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας.
- ❖ **Φάση 3^η** : Στην παρούσα φάση υλοποιείται η επεξηγηματική ανάλυση των παραμέτρων για την εφαρμογή της βαθμονόμησης του μοντέλου ATOM καθώς και του επιστημονικού

υποβάθρου που υπαγορεύει την ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τα κριτήρια λήψης αποφάσεων των προσομοιωμένων πρακτόρων. Στη συνέχεια γίνεται εφαρμογή του μοντέλου στο αντιπροσωπευτικό δείγμα χωρών, λαμβάνοντας υπόψη τα φυσικά καθώς και τα τεχνοοικονομικά δεδομένα, απαραίτητα για τη διεξαγωγή της βαθμονόμησης των παραμέτρων του μοντέλου που βασίζεται σε οντότητες.

- ❖ **Φάση 4^η** : Στην τελευταία φάση της εργασίας υλοποιούνται οι προγνωστικές αναλύσεις (*Forward looking simulations*) για την παροχή των πληροφοριών αναφορικά με τη διάχυση οικιακών Φ/Β συστημάτων υπό δύο διαφορετικά προγράμματα επιδότησης συστημάτων μπαταριών τεχνολογίας Li-ion για την αποθήκευση ανανεώσιμης ενέργειας καθώς και συγκριτική ανάλυση επί των αποτελεσμάτων μεταξύ τους καθώς και με την απαιτούμενη διεύθυνση βάσει των δεκαετών ΕΣΕΚ των αντιπροσωπευτικών κρατών υπό εξέταση.

1.3 Δομή διπλωματικής εργασίας

Το περιεχόμενο της παρούσας διπλωματικής διακρίνεται στα ακόλουθα κύρια μέρη:

Αρχικά, παρατίθεται ο πρόλογος, η περίληψη της εργασίας και στη συνέχεια ο αναλυτικός πίνακας περιεχομένων. Το παρόν *Κεφάλαιο 1* αποτελεί την εισαγωγή της εργασίας. Παρουσιάζονται ο σκοπός, το αντικείμενο της διπλωματικής εργασίας, τα στάδια υλοποίησής της και η οργάνωση του τόμου.

Στο *Κεφάλαιο 2* καταδεικνύεται η αναγκαιότητα της στροφής σε ένα πιο βιώσιμο μοντέλο ανάπτυξης και επισημαίνονται οι τελευταίες προσπάθειες μετριασμού των κλιματικών επιπτώσεων με μια σειρά από συνθήκες και συμφωνίες, οι οποίες ευθυγραμμίζονται και με της δεσμεύσεις των κρατών για τη μετάβαση προς την κλιματική ουδετερότητα.

Στο *Κεφάλαιο 3* επεξηγούνται οι όροι της αποκεντρωμένης παραγωγής και της ιδιοκατανάλωσης σε οικιακό επίπεδο, καθώς και των ρυθμιστικών πλαισίων από τους αρμόδιους φορείς προς απόδοση κινήτρων σε ανάλογα επενδυτικά σχήματα σε ιστορικό βάθος 15-ετίας για χώρες-μέλη της ΕΕ.

Στο *Κεφάλαιο 4* παρουσιάζεται επιγραμματικά το επιστημονικό υπόβαθρο που διέπει το ATOM ως υπολογιστικό εργαλείο τεχνικών μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων καθώς επίσης και διεξάγεται η διαδικασία βαθμονόμησης και ανάλυσης ευαισθησίας των παραμέτρων ως προς τη συμπεριφορά και τη διαδικασία λήψης αποφάσεων των οντοτήτων του αντιπροσωπευτικού δείγματος κρατών.

Τέλος, στο *Κεφάλαιο 5* πραγματοποιούνται οι μελλοντικές προσομοιώσεις με βάσει τα αποτελέσματα βαθμονόμησης του Κεφαλαίου 4 και διεξάγονται συμπεράσματα επί των μελετώμενων σεναρίων πρόωθησης – επιδότησης των συστημάτων ιδιοκατανάλωσης.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Κλιματική Αλλαγή – Ορισμοί και εργαλεία μετριάσμού

2.1 Ορισμός φαινομένου

Ο όρος «κλιματική αλλαγή» αποτελεί αναμφίβολα ένα από τα πλέον φλέγοντα και αμφιλεγόμενα ζητήματα που απασχολούν την επιστημονική κοινότητα ήδη από τα τέλη του 20^{ου} αιώνα και χρησιμοποιείται ως αναφορά στην τρέχουσα τάση της υπερθέρμανσης του πλανήτη, η οποία κατά πάσα πιθανότητα (άνω του 95%) είναι αποτέλεσμα της ανθρωπογενούς δραστηριότητας με αφετηρία της Βιομηχανικής Επανάστασης ως τις μέρες μας.

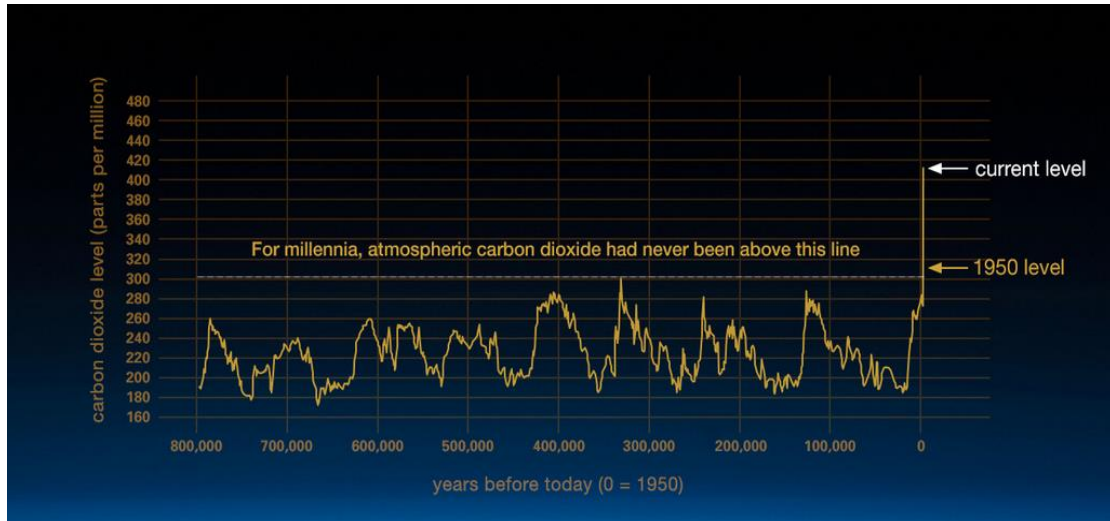
Η κλιματική αλλαγή ορίζεται ως η μακροπρόθεσμη αλλαγή στη στατιστική κατανομή των μετεωρολογικών μοτίβων (π.χ. μέση θερμοκρασία, βροχόπτωση) με χρονικό ορίζοντα δεκαετίες έως και χιλιάδες έτη. Στην πραγματικότητα, το κλίμα στη Γη έχει μεταβληθεί ιστορικά, ακόμη και πολύ πριν την εμφάνιση οποιασδήποτε μορφής ανθρώπινης δραστηριότητας. Η Επιτροπή του ΟΗΕ για την Κλιματική Αλλαγή (UNFCCC) όρισε την Κλιματική Αλλαγή ως την αλλαγή του κλίματος που αποδίδεται άμεσα ή έμμεσα στην ανθρώπινη δραστηριότητα μεταβάλλοντας τη σύνθεση της παγκόσμιας ατμόσφαιρας και η οποία προστίθεται στη φυσική μεταβλητότητα του κλίματος που μελετάται κατά συγκρίσιμες χρονικές περιόδους (UNFCCC, 1992).

Ορισμένες πτυχές που θα διευκολύνουν στην περαιτέρω κατανόηση του φαινομένου και το πώς αυτές συνδέονται με την ανθρωπογενή δραστηριότητα, παρουσιάζονται αναλυτικά ως ακολούθως:

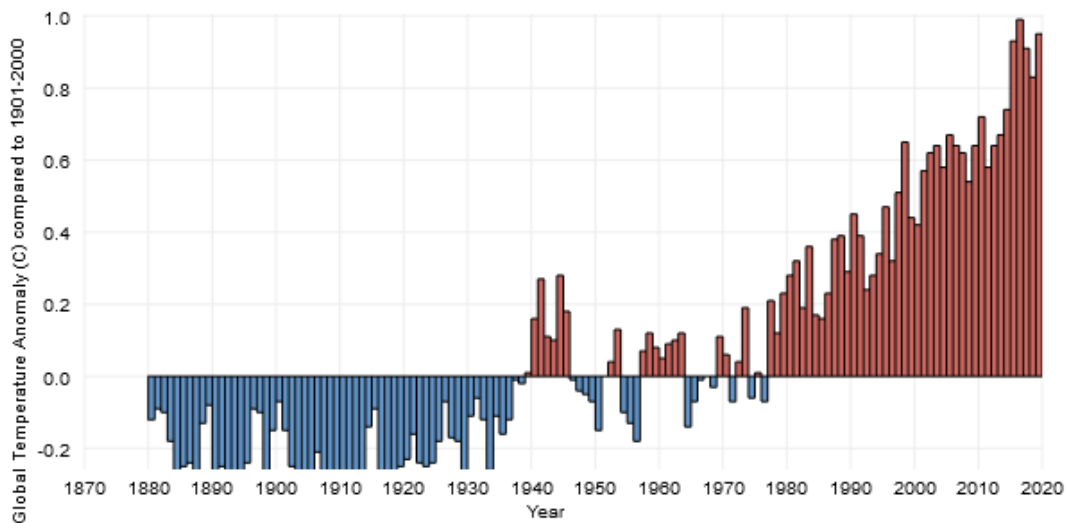
Πτυχές της κλιματικής αλλαγής και αντιληπτές επιπτώσεις (NASA's Jet Propulsion Laboratory, 2021).

Κλιματικά χαρακτηριστικά	Επιπτώσεις
Υπερσυσσώρευση GHG - Μεταβολή στην παγκόσμια θερμοκρασία	Η εκπομπή αερίων του θερμοκηπίου μέσω της εκ βιομηχανοποίησης και του αστικού τρόπου ζωής έχει προσαυξήσει τις συγκεντρώσεις των συγκεκριμένων αερίων στην ατμόσφαιρα σε ιστορικό υψηλό, στα 393 ppm. Η υπερσυσσώρευση GHG αποτελεί τον κυρίαρχο παράγοντα της πλανητικής υπερθέρμανσης. Η μεγαλύτερη αύξηση στη θερμοκρασία έχει παρατηρηθεί από το 1970 και έπειτα, με τα 20 θερμότερα έτη να έχουν επισυμβεί από το 1981 με τα 10 εξ' αυτών τα τελευταία 12 χρόνια.

Εξασθένηση της στιβάδας του όζοντος	<p>Παρατηρείται μια σταθερή μείωση κατά 4% ανά δεκαετία στο σύνολο της στρώσης του όζοντος στη στρατόσφαιρα της Γης από τα τέλη της δεκαετίας του 1970, η οποία εκτιμάται ότι επιφέρει τα εξής: αρνητικές υγειονομικές επιπτώσεις, αύξηση συχνότητας ακραίων καιρικών φαινομένων (ερημοποίηση, ξηρασία) εξαιτίας της μειούμενης απορρόφησης υπεριώδους ακτινοβολίας.</p>
Συρρίκνωση των παγετώνων στους πολικούς κύκλους	<p>Αναφορικά, η Γροιλανδία απώλεσε 150 τετραγωνικά χιλιόμετρα παγετώνων στο χρονικό διάστημα από το 2002 έως και το 2006. Αντίστοιχα, στην Ανταρκτική χάθηκαν 152 τετραγωνικά χιλιόμετρα παγετώνων μεταξύ του 2002 και του 2005.</p>
Αύξηση της στάθμης της θάλασσας	<p>Εκτιμάται πως η παγκόσμια στάθμη των ωκεανών έχει αυξηθεί κατά 17 cm τον τελευταίο αιώνα. Η διατήρηση αυτής της τάσης είναι πολύ πιθανό να κατακλύσει έναν μεγάλο αριθμό νησιωτικών κρατών καθώς και σε περιοχές με χαμηλό ανάγλυφο (π.χ. Δέλτα ποταμών, Κάτω Χώρες)</p>
Αύξηση ανθρακικού αποτυπώματος και θερμοκρασίας στους ωκεανούς	<p>Η ετήσια αύξηση στο περιεχόμενο CO₂ που διαχέεται στους ωκεανούς είναι της τάξης των 2 δισεκατομμυρίων τόνων ανά έτος, με τη συνολική οξύτητα αυξημένη κατά 30% συγκριτικά με τα προβιομηχανικά επίπεδα. Επίσης η καταγεγραμμένη θερμοκρασία κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας είναι αυξημένη κατά 0.16 °C από το 1969. Οι επιπτώσεις αυτές δύνανται να επηρεάσουν σημαντικά τη βιοποικιλότητα του ωκεάνιου οικοσυστήματος.</p>
Ακραία καιρικά φαινόμενα	<p>Κατά τα τελευταία 15 έτη υπάρχουν άνω των 300 επιστημονικών δημοσιεύσεων (<i>peer reviewed</i>) που εξετάζουν ακραίες καιρικές συνθήκες σε όλο τον κόσμο, περιλαμβάνοντας πυρκαγιές σε Αλάσκα, Καλιφόρνια και Αυστραλία, τυφόνες στην Καραϊβική, παρατεταμένα κύματα καύσωνα στην Ευρώπη και έντονες βροχοπτώσεις στη Μέση Ανατολή.</p>



Εικόνα 2.1: Μετρήσεις CO₂ δειγμάτων παγετόνων με σημείο αναφοράς σύγκρισης το έτος 1950.



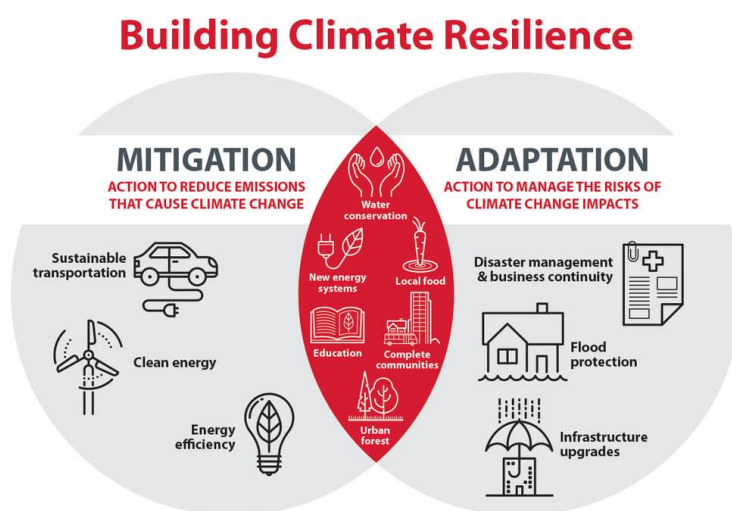
Εικόνα 2.2: Διάγραμμα της παγκόσμιας επιφανειακής θερμοκρασίας με αφετηρία μέτρησης το έτος 1880.

Οι παραπάνω μετρήσεις αποτελούν ένδειξη του μεγέθους της επίδρασης της ανθρώπινης δραστηριότητας αναφορικά με την αύξηση της συγκέντρωσης αερίων του θερμοκηπίου στην ατμόσφαιρα και την επίδρασή τους στο θεμελιώδες κλιματικό μέγεθος της θερμοκρασίας.

2.2 Μετριασμός δυσμενών επιπτώσεων κλιματικής αλλαγής

Ο μετριασμός της κλιματικής αλλαγής συνίσταται στην εύρεση οικονομικά αποδοτικών και κοινωνικά αποδεκτών μεθόδων για τον περιορισμό του απελευθερούμενου όγκου εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, με απώτερο σκοπό τη διατήρηση της υπερθέρμανσης του πλανήτη κάτω των 2 °C. Οι στρατηγικές μετριασμού περιλαμβάνουν μεταξύ άλλων:

- i. Την ανακαίνιση καθώς και την εισαγωγή εξελιγμένων συστημάτων ενεργειακής διαχείρισης (*Building energy management systems*) σε οικιακά, εμπορικά και δημόσια κτίρια μειώνοντας δραστικά τη συνολική τους ενεργειακή κατανάλωση.
- ii. Την αύξηση του μεριδίου των ΑΠΕ στο μίγμα ηλεκτροπαραγωγής μέσω ηλιακής, αιολικής, μικρής υδροηλεκτρικής ενέργειας και βιομάζας/βιοαερίου.
- iii. Την προώθηση της ηλεκτροκίνησης και της ιδιοκατανάλωσης, με την ταυτόχρονη απόδοση κινήτρων για τη συμμετοχή των ιδιωτών στην αγορά ενέργειας υπό μορφή απόκρισης ζήτησης προς βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας του συστήματος.
- iv. Τεχνολογίες δέσμευσης και αποθήκευσης CO₂ σε βιομηχανικές δραστηριότητες.
- v. Μηχανισμούς προώθησης χρήσης καθαρών τεχνολογιών σε αναπτυσσόμενες χώρες (Μηχανισμός Καθαρής Ανάπτυξης, Προγράμματα από Κοινού) (IPCC, 2011), (Fawzy et al., 2020).



Εικόνα 2.3: Συνοπτική παρουσίαση των μεθόδων κλιματικής συνείδησης.

Προς αυτή την κατεύθυνση, στις 12/12/2015, τα μέλη του UNFCCC κατέληξαν σε μια συμφωνία ορόσημο για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και για την επιτάχυνση και την εντατικοποίηση των δράσεων και των επενδύσεων που απαιτούνται για ένα βιώσιμο μέλλον χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Η Συμφωνία του Παρισιού βασίζεται στη Σύμβαση και

- για πρώτη φορά - φέρνει όλα τα έθνη σε έναν κοινό σκοπό· να καταβάλουν φιλόδοξες προσπάθειες για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και να προσαρμοστούν στις επιπτώσεις της, με ενισχυμένη υποστήριξη προς τις αναπτυσσόμενες χώρες. Ως εκ τούτου, η συμφωνία χαρτογραφεί μια νέα πορεία στην παγκόσμια προσπάθεια για το κλίμα.

Ο κεντρικός στόχος της Συμφωνίας του Παρισιού είναι η ενίσχυση της παγκόσμιας απάντησης στην απειλή της κλιματικής αλλαγής διατηρώντας την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας αυτόν τον αιώνα υποχρεωτικά κάτω από τους 2 °C συγκριτικά με τα προ-βιομηχανικά επίπεδα καθώς και να εντείνει τις προσπάθειες για τον περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας στο έως τους 1,5 °C. Επιπλέον, η συμφωνία στοχεύει στην αύξηση της ικανότητας των χωρών να αντιμετωπίζουν τις επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής διατηρώντας την παρούσα οικονομική ανάπτυξη αλλά με σημαντική μείωση των εκπομπών άνθρακα. Για να επιτευχθούν οι δεδομένα φιλόδοξοι στόχοι, απαραίτητη είναι η κατάλληλη απόδοση κινήτρων και η παροχή χρηματοοικονομικών πόρων, ώστε να τεθεί σε εφαρμογή ένα νέο τεχνολογικό και ρυθμιστικό πλαίσιο, υποστηρίζοντας έτσι το μετασχηματισμό των οικονομιών γύρω από ένα πιο βιώσιμο μοντέλο ανάπτυξης.

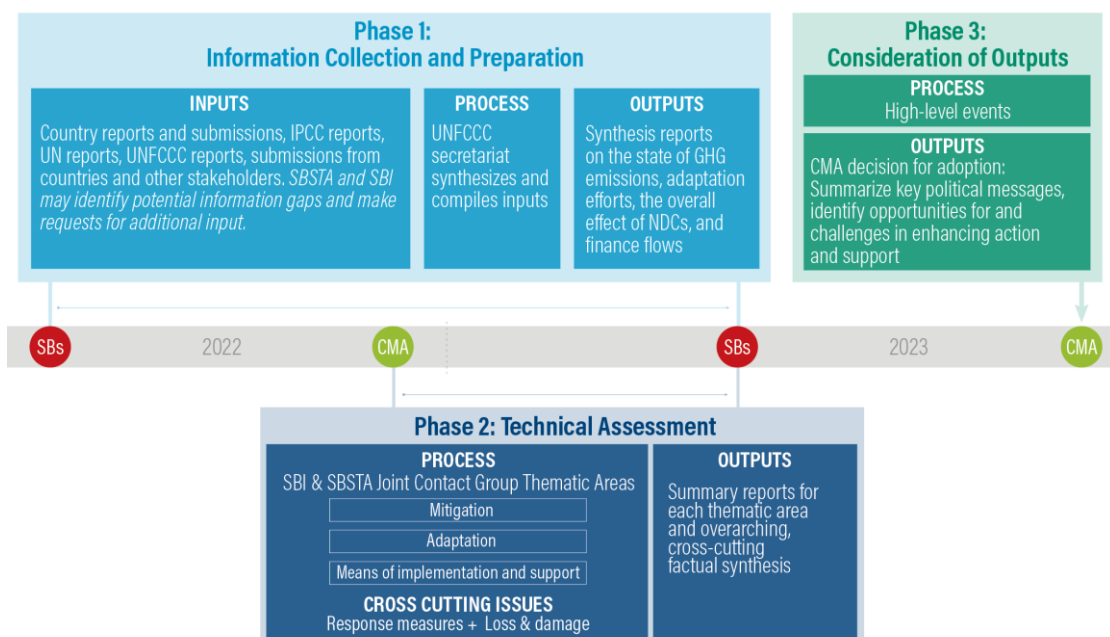
Η συμφωνία του Παρισιού απαιτεί από όλα τα συμβαλλόμενα μέρη την κατάρτιση «εθνικά καθορισμένων συνεισφορών» (*Nationally determined contributions - NDC's*) οι οποίες μεταφράζονται σε ενοποιημένα εθνικά νομοσχέδια για την ενέργεια και το κλίμα (ΕΣΕΚ). Κατά αυτό τον τρόπο, τα μέρη δεσμεύονται στην τακτική δημιουργία αναφορών επί των εκπομπών τους και των προσπαθειών ελάττωσης του ανθρακικού τους αποτυπώματος. Ένα ακόμη θεμελιώδες στοιχείο της συμφωνίας, αποτελεί η κατοχύρωση της - ανά 5 έτη - περιοδικής παγκόσμιας απογραφής (*Global Stocktake*) με κύριο πεδίο την αξιολόγηση της συλλογικής προόδου που επιτεύχθηκε προς την επίτευξη των κλιματικών οροσήμων ([Γενική Διεύθυνση Ενέργειας, 2019](#)), ([UNFCCC, 2015](#)).

Η παγκόσμια απογραφή διεξάγεται σε τρεις φάσεις:

- i. *Συλλογή και προετοιμασία πληροφοριών.* Η φάση αυτή συνίσταται στη συγκέντρωση των απαραίτητων πληροφοριών, όπως τα NDC's, επιστημονικές μελέτες (συμπεριλαμβανομένης της Διακυβερνητικής Επιτροπής για την Κλιματική Αλλαγή), εκθέσεις χωρών (συμπεριλαμβανομένων εκθέσεων διαφάνειας) και προσαρμοσμένες εθνικές υποβολές και άλλες πληροφορίες. Το UNFCCC προετοιμάζει και δημοσιεύει πολλαπλές συνθετικές αναφορές προς ενημέρωσης της τεχνικής αξιολόγησης.
- ii. *Τεχνική αξιολόγηση.* Αυτή η αξιολόγηση αποτελείται από ένα σύνολο τεχνικών διαλόγων που πραγματοποιούνται σε δύο ή τρεις συνεχόμενες διασκέψεις του ΟΗΕ για το κλίμα. Οι συνδιαλέξεις είναι οργανωμένες στα πλαίσια της αξιολόγησης της συλλογικής προόδου προς τους σκοπούς και τους μακροπρόθεσμους στόχους της

Συμφωνίας του Παρισιού, συμπεριλαμβανομένου του άρθρου 2.1 (α-γ) της Συμφωνίας, που επικεντρώνεται σε τρεις θεματικές: μετριασμός, προσαρμογή και μέσα εφαρμογής και υποστήριξης. Επιπρόσθετα, και άλλα γενικά θέματα, όπως τα μέτρα αντιμετώπισης καθώς και πιθανές απώλειες και ζημιές μπορούν να ληφθούν υπόψη μέσω των παραπάνω θεματικών. Οι συντονιστές των διαλόγων θα παράγουν συνοπτικές εκθέσεις για καθέναν από τους τρεις θεματικούς τομείς και θα παρέχουν μια περιληπτική πραγματολογική αναφορά.

- iii. *Εξέταση των αποτελεσμάτων.* Η τελική φάση πραγματοποιείται στη διάσκεψη των μερών (*Conference of Parties - COP*) κατά το ίδιο έτος που πραγματοποιείται η απογραφή (δηλαδή, για παράδειγμα, η επόμενη είναι προγραμματισμένη για το 2023 και στη συνέχεια σε πενταετή βάση). Κατά τη διάρκεια της εξέτασης, θα συζητηθούν και θα παρουσιαστούν τα ευρήματα της τεχνικής αξιολόγησης, θα συνοψιστούν τα βασικά πολιτικά μηνύματα και θα εντοπιστούν προκλήσεις και ευκαιρίες για την ενίσχυση της δράσης και της υποστήριξης ([World Resources Institute, n.d.](#))



Εικόνα 2.4: Συνοπτική απεικόνιση της διαδικασίας για την 1^η προγραμματισμένη παγκόσμια απογραφή.

2.3 Ευρωπαϊκή απανθρακοποίηση – Πρωτοβουλίες και τροχιές υλοποίησης

Συχνά στη βιβλιογραφία της ενεργειακής πολιτικής συναντώνται οι έννοιες της κλιματικής και της ανθρακικής ουδετερότητας. Η ειδοποιός διαφορά τους συνίσταται στο ότι η ανθρακική ουδετερότητα αναφέρεται στην κατάργηση μόνο των εκπομπών CO₂. Στις 12 Δεκεμβρίου 2019 το Ευρωπαϊκό Συμβούλιο, λαμβάνοντας υπόψη την ανακοίνωση της Ευρωπαϊκής Επιτροπής

για την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία (*European Green Deal*), ενέκρινε τον στόχο της επίτευξης μιας κλιματικά ουδέτερης ΕΕ έως το 2050, σύμφωνα με τους στόχους της Συμφωνίας του Παρισιού και υπό την ανάγκη ενίσχυσης της παγκόσμιας δράσης για το κλίμα. Η επικύρωση του στόχου κλιματικής ουδετερότητας επιτεύχθηκε μέσω θεσμικών και κοινωνικών διαβουλεύσεων βασισμένων στο στρατηγικό μακροπρόθεσμο όραμα που πρότεινε η Ευρωπαϊκή Επιτροπή, το οποίο περιλαμβάνει μια λεπτομερή ανάλυση λύσεων που θα μπορούσαν να εφαρμοστούν για τη μετάβαση σε οικονομίες μηδενικών εκπομπών ρύπων, γνωμοδοτήσεις σχετικά με τις αντίστοιχες στρατηγικές προτεραιότητες καθώς και ένα ρυθμιστικό πλαίσιο που θα επέτρεπε την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας έως το 2050 ([European Commission, 2020a](#)).

Αναφορικά με το παρόν, η ΕΕ βρίσκεται σε τροχιά επίτευξης του στόχου της μείωσης των εκπομπών για το 2020, ο οποίος είχε τεθεί σε νομοθετική ισχύ το έτος 2009. Οι τρεις πυλώνες του σχεδίου ήταν οι ακόλουθοι ([European Commission, n.d.](#)):

- i. 20 % μείωση των αερίων του θερμοκηπίου, με σημείο αναφοράς τα επίπεδα του 1990.
- ii. 20 % διείσδυση του Ευρωπαϊκού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ.
- iii. 20 % βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης.

Τα εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν, ήταν κατά κύριο λόγο το επιτυχημένο Σύστημα Εμπορίας Εκπομπών, στο οποίο καθορίζεται ένα άνω όριο στη συνολική ποσότητα αερίων του θερμοκηπίου που είναι ανεκτό να εκπέμπονται από τους συμμετέχοντες του συστήματος (βιομηχανικός και τομέας αερομεταφορών). Εντός των θεσπισμένων ορίων, οι εταιρείες προβαίνουν σε συναλλαγές δικαιωμάτων και στην εξασφάλιση διεθνών πιστώσεων από συμμετοχή σε έργα βιώσιμης ανάπτυξης ανά τον κόσμο. Αποτέλεσμα της ευελιξίας που προσφέρει το σύστημα της εμπορίας εκπομπών αποτελεί το γεγονός της μείωσης των εκπομπών των συμμετεχόντων κατά 35% στο διάστημα μεταξύ 2005 – 2019 ([European Commission, n.d.](#)). Άλλες πρωτοβουλίες περιλάμβαναν τη θέσπιση *δεσμευτικών* στόχων σε εθνικό επίπεδο και αναλογικά με το ΑΕΠ της κάθε χώρας μέλους, σε τομείς εκτός του Συστήματος Εμπορίας, όπως τον οικιακό, τον αγροτικό και το μεταφορικό, τη δέσμευση για επιδότηση των ΑΠΕ ώστε να αυξηθεί το μερίδιό τους στην ηλεκτροπαραγωγή και τέλος την υποστήριξη προγραμμάτων έρευνας και καινοτομίας στο επιστημονικό πεδίο της αειφόρου ανάπτυξης (π.χ. Horizon 2020).

Σε συνέχεια των παραπάνω επιτευγμάτων και σε απόλυτο εναρμονισμό με τη συμφωνία του Παρισιού, η ΕΕ ανανέωσε τη δέσμευση της Επιτροπής για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής και των προκλήσεων που σχετίζονται με το περιβάλλον μέσω της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας (*Green Deal*) η οποία παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή στις 11/12/2019. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία παρέχει ένα σχέδιο

δράσης για την ενίσχυση της αποτελεσματικής χρήσης των φυσικών πόρων μεταβαίνοντας σε μια καθαρή, κυκλική οικονομία, την αποκατάσταση της βιοποικιλότητας και τη μείωση της ατμοσφαιρικής ρύπανσης. Η επίτευξη αυτού του στόχου θα απαιτήσει συντονισμένη δράση από όλους τους τομείς της οικονομίας μας, συμπεριλαμβανομένων των ακόλουθων:

- i. Επένδυση σε φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες.
- ii. Υποστήριξη της βιομηχανίας για καινοτομία στον τομέα της βιώσιμης ανάπτυξης.
- iii. Καθιέρωση καθαρών και οικονομικά αποδοτικών μέσων μεταφοράς (ιδιωτικών και δημόσιων).
- iv. Απεξάρτηση από τεχνολογίες εκμετάλλευσης άνθρακα στον ενεργειακό τομέα.
- v. Βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας των κτιρίων.
- vi. Συνέργεια με διεθνείς εταίρους για τη βελτίωση των παγκόσμιων περιβαλλοντικών προτύπων.

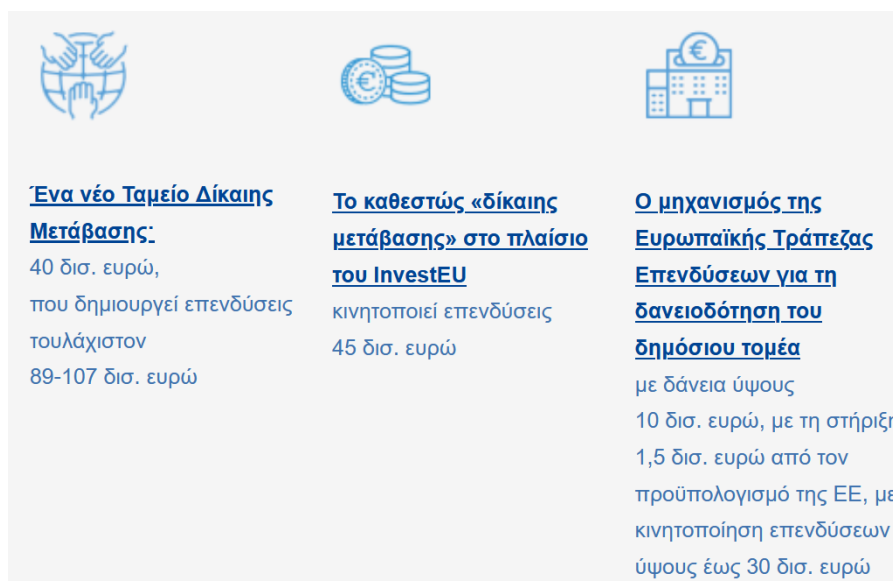
**Παράρτημα της ανακοίνωσης για την Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία
Χάρτης πορείας — Βασικές δράσεις**

Δράσεις	Κεντρικά σημεία
Κλιματική φιλοδοξία	<ol style="list-style-type: none"> 1. Αναπροσαρμογή κλιματικού στόχου 2. Αναθεώρηση οδηγίας για τη φορολογία της Ενέργειας 3. Μηχανισμός συνοριακής προσαρμογής άνθρακα
Καθαρή, οικονομικά προσιτή και ασφαλής ενέργεια	<ol style="list-style-type: none"> 1. Αξιολόγηση τελικών ΕΣΕΚ 2. Στρατηγική για την έξυπνη ενοποίηση τομέων 3. Πρωτοβουλία «Κύμα ανακαινίσεων» για τον οικοδομικό τομέα 4. Αξιολόγηση και επανεξέταση του κανονισμού για τα διευρωπαϊκά δίκτυα στον τομέα της ενέργειας
Βιομηχανική στρατηγική για μια καθαρή και κυκλική οικονομία	<ol style="list-style-type: none"> 1. Βιομηχανική στρατηγική της ΕΕ 2. Πρωτοβουλίες για την τόνωση πρωτοπόρων αγορών για κλιματικά ουδέτερα και κυκλικά προϊόντα 3. Νομοθεσία για τους συσσωρευτές
Βιώσιμη και έξυπνη κινητικότητα	<ol style="list-style-type: none"> 1. Πρόσκληση χρηματοδότησης για τη στήριξη της ανάπτυξης δημόσιων σημείων επαναφόρτισης 2. Ενίσχυση της παραγωγής και της προσφοράς βιώσιμων εναλλακτικών καυσίμων 3. Πρόταση για αυστηρότερα πρότυπα εκπομπών ατμοσφαιρικών ρύπων για οχήματα με κινητήρα εσωτερικής καύσης

Οικολογικός προσανατολισμός της κοινής γεωργικής πολιτικής	Μέτρα, συμπεριλαμβανομένων νομοθετικών, για τη σημαντική μείωση της χρήσης και των κινδύνων που συνδέονται με χημικά φυτοφάρμακα, λιπάσματα και αντιβιοτικά.
Διαφύλαξη και προστασία της βιοποικιλότητας	1. Νέα δασική στρατηγική της ΕΕ 2. Μέτρα για την αντιμετώπιση των βασικών παραγόντων απώλειας της βιοποικιλότητας
Προς έναν φιλόδοξο στόχο μηδενικής ρύπανσης για ένα περιβάλλον απαλλαγμένο από τοξικές ουσίες	1. Σχέδιο δράσης μηδενικής ρύπανσης για το νερό, τον αέρα και το έδαφος 2. Αναθεώρηση των μέτρων για την αντιμετώπιση της ρύπανσης από μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις
Ενσωμάτωση της διάστασης της βιωσιμότητας σε όλες τις πολιτικές της ΕΕ	1. Πρόταση για τη θέσπιση μηχανισμού δίκαιης μετάβασης 2. Πρωτοβουλίες για τον έλεγχο και τη συγκριτική αξιολόγηση των πρακτικών θέσπισης πράσινων προϋπολογισμών των κρατών μελών της ΕΕ
Η ΕΕ ως παγκόσμιος ηγετικός παράγων	1. Διμερείς προσπάθειες παρότρυνσης των εταίρων να ενεργήσουν και να διασφαλίσουν τη συγκρισιμότητα των δράσεων και των πολιτικών 2. Πράσινη ατζέντα για τα Δυτικά Βαλκάνια
Συνεργασία για ένα ευρωπαϊκό σύμφωνο για το κλίμα	1. Δρομολόγηση του ευρωπαϊκού συμφώνου για το κλίμα 2. Πρόταση για το 8ο πρόγραμμα δράσης για το περιβάλλον

Η ΕΕ θα παράσχει προς τις παραπάνω κατευθύνσεις οικονομική και τεχνική υποστήριξη ώστε να βοηθήσει τους τομείς που πλήττονται περισσότερο από την πορεία προς την πράσινη οικονομία, στα πλαίσια του προτεινόμενου από τις 14/1/2020 Μηχανισμού Δίκαιης Μετάβασης (*Just Transition Mechanism – JTM*). Ο μηχανισμός παρέχει στοχευμένη στήριξη, ώστε να κινητοποιηθούν τουλάχιστον 100 δισ. ευρώ κατά την περίοδο 2021-2027 στις περιφέρειες που πλήττονται περισσότερο, για την άμβλυση των κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων της μετάβασης. Τα κράτη μέλη με υψηλή εξάρτηση από ορυκτά καύσιμα και βιομηχανίες υψηλής έντασης άνθρακα μπορούν να αποκτήσουν πρόσβαση στο Μηχανισμό μέσω της κατάρτισης σχεδίων εδαφικής δίκαιης μετάβασης που καλύπτουν την περίοδο έως και το 2030, προσδιορίζοντας τα εδάφη που θα πρέπει να λάβουν τη μεγαλύτερη στήριξη. Ενδεικτικές ωφέλειες που πρόκειται να αποκομίσουν οι δικαιούχοι του εργαλείου JTM αποτελούν τα εξής:

- Στήριξη της μετάβασης σε δραστηριότητες χαμηλών ανθρακούχων εκπομπών και ανθεκτικές στην κλιματική αλλαγή με τη δημιουργία νέων θέσεων εργασίας στην πράσινη οικονομία.
- Επενδύσεις στις δημόσιες και βιώσιμες μεταφορές.
- Παροχή τεχνικής βοήθειας.
- Επενδύσεις σε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.
- Βελτίωση της ψηφιακής συνδεσιμότητας με την παροχή οικονομικά προσιτών δανείων στις τοπικές δημόσιες αρχές
- με τη βελτίωση των ενεργειακών υποδομών, των δικτύων τηλεθέρμανσης και των δικτύων μεταφοράς (European Commission, 2019).



Εικόνα 2.5: Μηχανισμός Δίκαιης Μετάβασης – Κεντρικά χαρακτηριστικά.

Με σημείο αναφοράς την Ευρωπαϊκή Πράσινη συμφωνία, καθίσταται σαφές πως κατά την ερχόμενη δεκαετία η ΕΕ θα συνεχίσει να πρωταγωνιστεί στην προσπάθεια για μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα έως το έτος 2050. Με την εφαρμογή όμως του τρέχοντος πολιτικού πλαισίου και μόνο δεν θα ήταν εφικτή η επίτευξη των δεσμεύσεων έως το συγκεκριμένο χρονικό ορίζοντα βάσει της Συμφωνίας του Παρισιού. Προς αυτή την κατεύθυνση, έχει αποδειχτεί ότι η προβολή της παρούσας κατάστασης στο μέλλον θα επέτρεπε στην ΕΕ να επιτύχει το πολύ 60% μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου έως το 2050. Συνεπώς, η ΕΕ οφείλει να προβεί σε σημαντική αύξηση των φιλοδοξιών της για την επόμενη δεκαετία, αποφεύγοντας με αυτόν τον τρόπο να κληροδοτήσει στις μελλοντικές γενιές την υποχρέωση για επιβολή ραγδαίων μεταρρυθμίσεων, οι οποίες αναπόφευκτα έχουν σοβαρό αντίκτυπο στην οικονομική δραστηριότητα. Ως εκ τούτου, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει προτείνει την αλλαγή στην τρέχουσα πορεία μείωσης των εκπομπών ώστε να επιτευχθεί η ουδετερότητα του

κλίματος έως το 2050, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στην πρόταση του ευρωπαϊκού νόμου για το κλίμα.

Με το «Κλιματικό Σχέδιο 2030» η φιλοδοξία για μείωση εκπομπών του θερμοκηπίου αναπροσαρμόζεται στο κατώτατο όριο του 55% συγκριτικά με τα επίπεδα του 1990, έως το έτος 2030. Πρόκειται για δεδομένα σημαντική αύξηση σε αντιπαραβολή με τον υπάρχοντα στόχο, ο οποίος έθετε το όριο αυτό στο 40%. Οι κυριότερες προβλέψεις αποτελούν η αύξηση της συνολικής διείσδυσης ΑΠΕ πανευρωπαϊκά, κατ' ελάχιστο στο 32% της συνολικής ζήτησης, η βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας κατά 32,5% και η ενίσχυση της ασφάλειας ενεργειακού εφοδιασμού θέτοντας το κατώτατο όριο ηλεκτρικών διασυνδέσεων μεταξύ των γειτονικών κρατών μελών στο 15%. Η πρωτοβουλία του σχεδίου βασίστηκε στις ακόλουθες εκτιμήσεις:

- i. Πρώτον, οι μεγάλες μειώσεις εκπομπών προήλθαν από τον τερματισμό λειτουργίας σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας καύσεως άνθρακα και την επιβολή όρων βιωσιμότερης λειτουργίας σε βιομηχανίες μεγάλης έντασης ενέργειας. Αντιθέτως, αποδείχθηκε δυσκολότερο να μειωθούν οι εκπομπές στον τομέα των μεταφορών και στο γεωργικό και στον κτιριακό τομέα, όπου υπάρχουν ιδιαίτερες προκλήσεις. Όμως, για την επίτευξη της κλιματικής ουδετερότητας απαιτείται η σημαντική ενίσχυση της δράσης της ΕΕ στο σύνολο της δραστηριότητας. Οι μακρές προθεσμίες σε κρίσιμους τομείς, όπως η χρήση γης και οι μεταφορές, απαιτούν την ενίσχυση της δράσης ήδη κατά την επόμενη δεκαετία, διαφορετικά οι αλλαγές που θα απαιτούνταν μετά το 2030 θα έπρεπε να επισυμβούν κατά μη ρεαλιστικό τρόπο.
- ii. Δεύτερον, υπάρχει δεδομένα υψηλός κίνδυνος η μείωση εκπομπών άνθρακα να περιέλθει σε τέλμα κατά την επόμενη δεκαετία. Αυτό οφείλεται τόσο στο παρών νομοθετικό πλαίσιο όσο και στο βραχυπρόθεσμο χαρακτήρα των οικονομικών αποφάσεων που λαμβάνονται εν μέσω της υγειονομικής κρίσης COVID-19. Επομένως, υπάρχει επείγουσα ανάγκη για ισχυρά επενδυτικά σήματα, έτσι ώστε ο σημερινός επενδυτικός σχεδιασμός και οι αποφάσεις να είναι συνεπείς με τη μετάβαση στην κλιματική ουδετερότητα.
- iii. Τέλος, η επιστημονική κοινότητα έχει καταδείξει ότι με την πάροδο του χρόνου οι κλιματικοί κίνδυνοι καθίστανται εντονότεροι. Οι πρόσφατες ειδικές εκθέσεις του φορέα IPCC διαπίστωσαν κλιματικά ασταθή φαινόμενα, όπως για παράδειγμα την επιβράδυνση του Ρεύματος του Κόλπου του Μεξικού (*Gulf Stream*) ή την αυξημένη κινητικότητα των παγετώνων της Γροιλανδίας και της Δυτικής Ανταρκτικής. Η κλιματική κρίση συνδέεται επίσης εγγενώς με την παγκόσμια απώλεια βιοποικιλότητας. Ως κατά συνέπεια, η λήψη άμεσων δραστικών μέτρων αποτελεί

μονόδρομο ως μέσο για την αποτροπή δυσμενών και δύσκολα αναστρέψιμων φαινομένων (European Commission, 2020b).

Εικόνα 2.6: Κεντρική θεματική ευαισθητοποίησης προς την Πράσινη Συμφωνία (Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος, 2019)



Όσον αφορά την εθνική διάσταση, η Ελλάδα υπέγραψε τη συμφωνία του Παρισιού στις 22 Απριλίου 2016 και την επικύρωσε στις 11 Νοεμβρίου 2016. Υπό το πρίσμα αυτής της κατάστασης, και ενόψει του Κλιματικού Σχεδίου 2030, η χώρα καταβάλλει προσπάθειες για τη δημιουργία μέσων σχεδιασμού για τον προσδιορισμό των στόχων, των πολιτικών και των μέτρων που συνάδουν με το ευρωπαϊκό πλαίσιο και συμβατά με τον στόχο της βελτίωσης της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, της ασφάλειας και της προσιτή ενέργεια. Η πορεία της χώρας προς την αειφορία μετά το 2020 θα ακολουθήσει τα ίχνη της στρατηγικής της Ενεργειακής Ένωσης βασισμένη σε πέντε διαστάσεις: *απολιγνιτοποίηση* (δηλαδή την πλήρη απένταξη του μεριδίου λιγνίτη από την ηλεκτροπαραγωγή), *ενεργειακή απόδοση*, *ενεργειακή ασφάλεια*, μια πλήρως *ολοκληρωμένη αγορά ενέργειας*, *έρευνα*, *καινοτομία* και *ανταγωνιστικότητα*. Για διασφαλιστεί η επίτευξη των κλιματικών στόχων, υπήρξε η υποχρέωση κατάρτισης (καταληκτική προθεσμία έως το τέλος του 2019) και συμμόρφωσης από κάθε κράτος μέλος ενός δεκαετούς Ετήσιου Εθνικού Σχεδίου Ενέργειας και Κλίματος (ΕΣΕΚ), που καθορίζει τον τρόπο επίτευξης των εθνικών του στόχων, συμπεριλαμβανομένου του δεσμευτικού στόχου για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου που δεν καλύπτονται από το Ευρωπαϊκό Σύστημα Συναλλαγών (ETS). Το ΕΣΕΚ παρουσιάζει και αναλύει προτεραιότητες και μέτρα Πολιτικής σε ένα ευρύ φάσμα αναπτυξιακών και οικονομικών δραστηριοτήτων προς όφελος της Ελληνικής κοινωνίας, καθιστώντας το ως ένα κείμενο αναφοράς για την επόμενη δεκαετία.

Εμβληματικός στόχος στο πλαίσιο της νέας αναθεωρημένης εθνικής στρατηγικής για το ΕΣΕΚ, αποτελεί το ιδιαίτερα φιλόδοξο αλλά και παράλληλα ρεαλιστικό πρόγραμμα για τη δραστική και οριστική μείωση του μεριδίου λιγνίτη στην ηλεκτροπαραγωγή, με εμπροσθοβαρές χρονικό πρόσημο κατά την επόμενη δεκαετία και την πλήρη απένταξή του από το εγχώριο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής μέχρι το έτος 2028. Η απόφαση αυτή ενισχύθηκε και από τη φθίνουσα ανταγωνιστικότητα των λιγνιτικών μονάδων που επηρεάστηκε από την αύξηση του μέσου κόστους καυσίμου, αλλά κυρίως από την κατακόρυφη άνοδο των τιμών δικαιωμάτων εκπομπών CO₂, οι οποίες την περίοδο 2013-2019 τετραπλασιάστηκαν (IOBE, 2020). Στο πλαίσιο του Εθνικού Ενεργειακού Σχεδιασμού και σε εναρμονισμό με την απόφαση απένταξης

των εγχώριων ατμοηλεκτρικών σταθμών, έχει καταρτιστεί και τεθεί υπό δημόσια διαβούλευση το αναπτυξιακό Σχέδιο Δίκαιης Μετάβασης (*Master Plan*) για τη χρηματοδότηση ύψους 5,05 δισ. ευρώ από κοινοτικούς και εθνικούς πόρους που θα διοχετευθεί στις λιγνιτικές περιοχές (Περιφέρειες Δυτικής Μακεδονίας και Μεγαλόπολης). Το Master Plan θα περιλαμβάνει ένα πλέγμα μέτρων και προβλέψεων που θα αφορούν, μεταξύ άλλων: επενδυτικά και φορολογικά κίνητρα, νέες υποδομές (π.χ. κατασκευή νέων Φ/Β σταθμών), αξιοποίηση των τοπικών φυσικών πόρων, την στήριξη της αγροτικής παραγωγής και του τουρισμού μέσω της αποκατάστασης των ορυχείων, τη μετεκπαίδευση των εργαζομένων, την εξασφάλιση των θέσεων εργασίας και την δημιουργία νέων μέσω ενός ευέλικτου αναπτυξιακού μετασχηματισμού και της ανάπτυξης όλων των τομέων της παραγωγής.

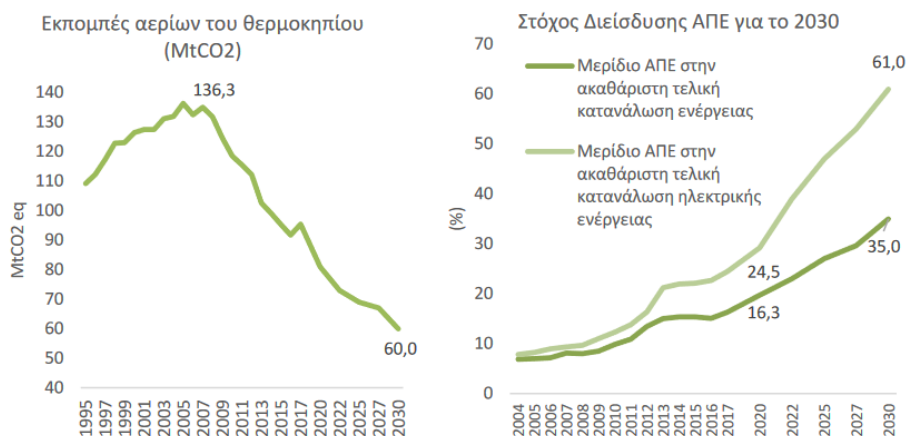
Οι κύριοι ενεργειακοί και κλιματικοί στόχοι και προτεραιότητες, που ελήφθησαν υπόψη κατά την εκπόνηση και την υλοποίηση του ΕΣΕΚ είναι οι εξής:

- i. Η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου μοντέλου βιώσιμης ανάπτυξης σε όλους τους κλάδους της οικονομίας με συνδυασμό της ανάπτυξης του ενεργειακού τομέα με την περιβαλλοντική προστασία. Λήψη αποφασιστικών μέτρων για την καταπολέμηση της κλιματικής αλλαγής και η επιλογή πολιτικών με τη βέλτιστη σχέση κόστους-οφέλους για την ενεργειακή μετάβαση.
- ii. Η επίτευξη μεριδίου συμμετοχής των ΑΠΕ τουλάχιστον στο 35% στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας καθώς και βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης κατά 38%.
- iii. Δημιουργία αποτελεσματικού πλαισίου για απελευθερωμένες και ανταγωνιστικές αγορές ενέργειας, στις οποίες οι ΑΠΕ θα κατέχουν κεντρικό ρόλο προς όφελος του τελικού καταναλωτή. Συμμετοχή στην ακόμη υπό διαμόρφωση συζευγμένη Ευρωπαϊκή ενεργειακή αγορά.
- iv. Η μετατροπή της Ελλάδας σε ενεργειακό κόμβο με ισχυρή συμβολή στην ενεργειακή ασφάλεια και ασφάλεια εφοδιασμού της ΕΕ. Εφαρμογή στρατηγικής διαφοροποίησης των εισαγωγών ενέργειας, παράλληλα με τον εκσυγχρονισμό και την ανάπτυξη ενεργειακών υποδομών και την άρση της ενεργειακής απομόνωσης των νησιών το αργότερο έως το 2029, ενώ στα νησιά που είτε δεν θα διασυνδεθούν, είτε θα διασυνδεθούν σε επόμενη φάση, στόχος είναι να λειτουργούν καινοτόμα υβριδικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ.
- v. Η διεύρυνση της χρήσης φυσικού αερίου ως ενδιάμεσο καύσιμο για τη μετάβαση σε ένα μοντέλο χαμηλών εκπομπών αερίων στην τελική κατανάλωση με την ανάπτυξη των αναγκαίων υποδομών μεταφοράς και διανομής, ώστε να δοθεί η δυνατότητα πρόσβασης στη χρήση του σε μεγαλύτερα ποσοστά τελικών καταναλωτών στον κτιριακό τομέα.

- vi. Η δημιουργία ελκυστικού επενδυτικού περιβάλλοντος για την υποστήριξη στην ενεργειακή μετάβαση, με έμφαση στην καινοτομία και τις νέες τεχνολογίες. Οι κυριότεροι άξονες αποτελούν η ψηφιοποίηση του ενεργειακού συστήματος (ενίσχυση υποδομών έξυπνων δικτύων μέσω της ευρείας εγκατάστασης έξυπνων μετρητών), η ενίσχυση και επέκταση των ενεργειακών υποδομών που θα επιτρέπουν τη μέγιστη διείσδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή και η εισαγωγή συστημάτων αποθήκευσης προς καταπολέμηση του μεγαλύτερου δομικού προβλήματος των ΑΠΕ, δηλαδή τη στοχαστική τους παραγωγή.
- vii. Η μέγιστη αξιοποίηση κοινοτικών πόρων και μηχανισμών. Εκτιμάται ότι μόνο από την υλοποίηση των μέτρων και πολιτικών για τις ΑΠΕ και την ενεργειακή αναβάθμιση κτιρίων μπορούν να δημιουργηθούν και να διατηρηθούν πάνω από 60.000 θέσεις εργασίας έως το 2030. Κινητοποίηση επενδύσεων, εκτιμώμενου ύψους 44 δις. ευρώ για την επόμενη δεκαετία (Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος, 2019a), (Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος, 2019b).



Εικόνα 2.7: Χρονοδιάγραμμα απόσυρσης λιγνιτικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής.



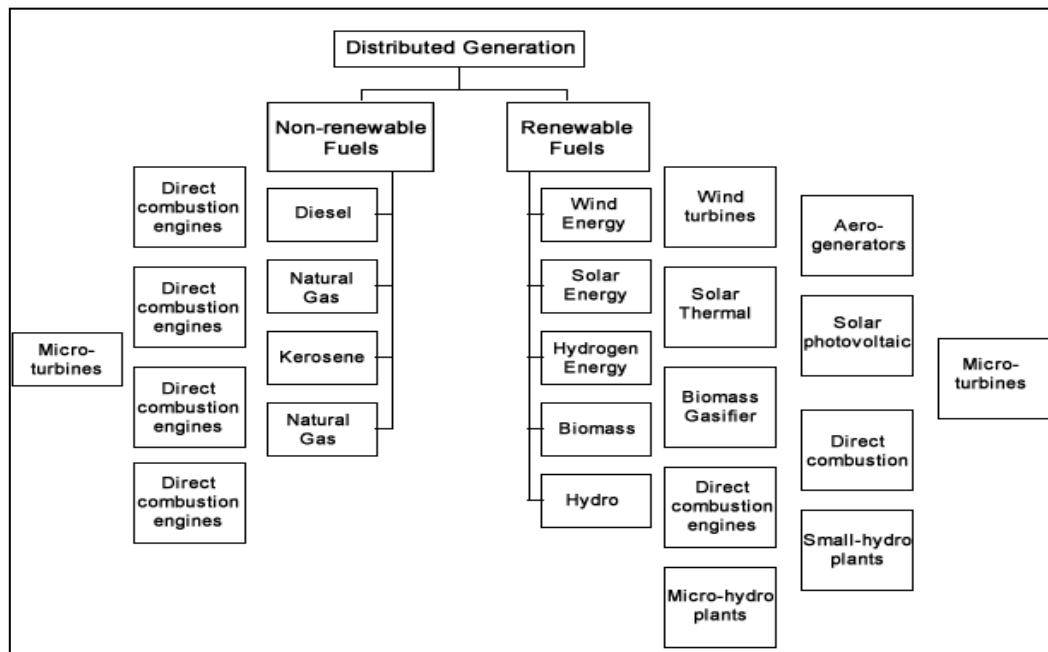
Εικόνα 2.8: Χρονοδιάγραμμα απομείωσης εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και διείσδυσης μονάδων ΑΠΕ στα πλαίσια του εγκεκριμένου Ελληνικού ΕΣΕΚ.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Συντελεστές αποκεντρωμένης παραγωγής – Ρυθμιστικό πλαίσιο και υποστηρικτικές πρωτοβουλίες

3.1 Αποκεντρωμένη παραγωγή – Ορισμός

Η τελευταία δεκαετία χαρακτηρίστηκε από την ολοένα αυξανόμενη παραγωγή ενέργειας και τη διεύρυνση μονάδων μικρής κλίμακας παραγωγής που κατά κανόνα κυμαίνονται από 1 kW έως και 10 MW, απευθείας στο δίκτυο διανομής και κοντά στο σημείο κατανάλωσης. Η ενέργεια αυτή έχει ονομαστεί Διεσπαρμένη Παραγωγή (*Distributed Generation*) και λαμβάνει ολοένα αυξανόμενη προσοχή από τους συμμετέχοντες της ενεργειακής αγοράς (εταιρείες & απλοί ιδιώτες) ανά τον κόσμο. Οι τεχνολογίες των μονάδων ΔΠ φαίνονται στην Εικόνα 1.5. Μια από τις σημαντικότερες προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι Διαχειριστές των Συστημάτων Μεταφοράς και Διανομής είναι η ανάγκη για ενσωμάτωση περισσότερων ΑΠΕ, ως απάντηση στις απαιτήσεις των εθνικών, κοινοτικών και διεθνών ενεργειακών πολιτικών. Η πλειονότητα αυτής της ανανεώσιμης παραγωγής βασίζεται είτε σε ηλιακή είτε σε αιολική ισχύ και χαρακτηριστικό γνώρισμα της παραγόμενης ενέργειας είναι η μεταβλητότητά της στη διάρκεια του χρόνου και η δυσκολία διεξαγωγής ακριβών προβλέψεων. Ως αποτέλεσμα, οι χρονοσειρές παραγωγής εμπεριέχουν μεγάλο βαθμό στοχαστικότητας, δυσκολεύοντας τους Διαχειριστές να εξισορροπούν κάθε χρονική στιγμή την παραγωγή με το φορτίο (Γεωργιάκης, 2016).



Εικόνα 3.1: Συγκεντρωτικό πλαίσιο με τις τεχνολογίες μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής.

Η παρουσία αποκεντρωμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στο ΔΔ επηρεάζει το υπάρχον δίκτυο. Πιο συγκεκριμένα, οι ροές ισχύος του δικτύου μεταβάλλονται όταν η παραγωγή υπερβαίνει την κατανάλωση, με αποτέλεσμα την εμφάνιση ανάστροφων ροών ισχύος. Όμως, ο σχεδιασμός των ΔΔ είχε πραγματοποιηθεί υποθέτοντας πως η ροή ισχύος θα είναι μονόδρομη από την παραγωγή προς την κατανάλωση. Συνεπώς, η παρουσία ΔΠ έχει μεγάλο αντίκτυπο στη διαχείριση και τον έλεγχο του συστήματος διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Καθίσταται αναγκαία η επαναξιολόγηση του σχεδιασμού του ΔΔ ώστε να είναι δυνατή η περαιτέρω διεύθυνση μονάδων ΔΠ, χωρίς να τίθεται σε κίνδυνο η συνολική λειτουργία του. Μερικές από τις προκλήσεις που συνεπάγεται η παρουσία ΔΠ για τους λειτουργούς του δικτύου είναι η διατήρηση της τάσης στα επιτρεπτά όρια, η αποφυγή υπερφόρτισης των γραμμών διανομής ΜΤ και ΧΤ και ο έλεγχος της ευστάθειας του συστήματος. Αντίστοιχα προβλήματα υπάρχουν και με συσκευές προστασίας στα συμβατικά ΔΔ, οι οποίες δε μπορούν να ανιχνεύσουν την ανάστροφη ροή ισχύος, αφού λειτουργούν βασισμένες στο ότι η τάση μειώνεται καθώς απομακρυνόμαστε από τους Υ/Σ στους καταναλωτές, γεγονός που λόγω της παρουσίας ΔΠ, δεν είναι πλέον αποδεκτό (Mcdonald et al., 2012).

Οι τεχνολογίες ΔΠ μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε ανανεώσιμες ή μη, ανάλογα με το καύσιμο που χρησιμοποιείται και σε αυτές που δεν είναι πηγές ηλεκτρικής ενέργειας, αλλά διευκολύνουν την αποδοτικότερη χρησιμοποίηση της παραγόμενης ενέργειας.

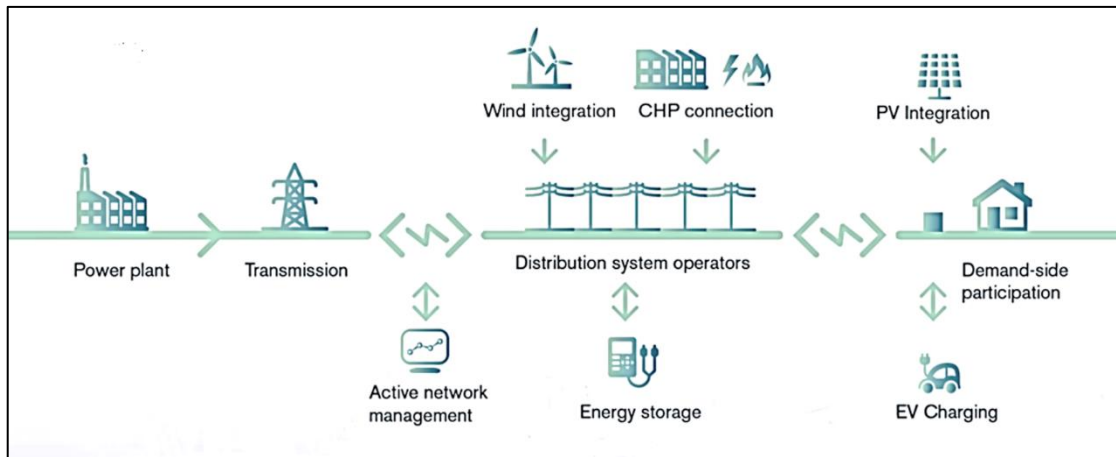
- i. Η πιο διάσημη τεχνολογία ΔΠ που βασίζεται σε μη ανανεώσιμες πηγές είναι η γεννήτρια ντίζελ, που ανήκει στην κατηγορία των παλινδρομικών μηχανών εσωτερικής καύσης. Είναι διαθέσιμη από μικρά μεγέθη (5kW) μέχρι μεγάλες γεννήτριες (7 MW). Η μικρή της αδράνεια την καθιστά ευέλικτη και αξιόπιστη επιλογή και χρησιμοποιείται σαν εφεδρεία σε πολλές περιπτώσεις. Οι τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων ετών ανέδειξαν επίσης τις μικροτουρμπίνες (Ισχύος 25-500 kW) και τις κυψέλες καυσίμου. Οι μικροτουρμπίνες χρησιμοποιούν φυσικό αέριο ως κύριο ορυκτό καύσιμο και η αποδοτικότητά τους συνεχώς βελτιώνεται με ταυτόχρονη μείωση τους κόστους. Τα συστήματα παραγωγής ενέργειας με κυψέλες καυσίμου σε αντίθεση με τις μικροτουρμπίνες, είναι φιλικά προς το περιβάλλον και αθόρυβα. Δε χρησιμοποιούν τη διεργασία της καύσης για τη μετατροπή της ενέργειας σε ηλεκτρισμό, αλλά υδρογόνο ως καύσιμο. Σύμφωνα με πρόσφατα δημοσιευμένες έρευνες έχει αποδειχθεί ότι οι κυψέλες καυσίμου παρέχουν τη δυνατότητα μείωσης του κόστους ηλεκτροδότησης 20-40%.
- ii. Οι ΑΠΕ είναι ανεξάντλητες και καθαρές μορφές ενέργειας, με τον κύριο λόγο της επικράτησής τους να αποτελεί η διαθεσιμότητά τους σε παγκόσμια κλίμακα, σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα που βρίσκονται συγκεντρωμένα μόνο σε

συγκεκριμένες περιοχές του πλανήτη. Στις τεχνολογίες αυτές συγκαταλέγονται Φ/Β και αιολικά συστήματα, υδροηλεκτρικοί σταθμοί παραγωγής, γεωθερμία, κυματική ενέργεια και πάσης μορφής βιοκαύσιμα. Τα κόστη που σχετίζονται με την παραγωγή και την αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας παραγόμενης από ΑΠΕ παρουσιάζουν φθίνουσα τάση χρόνο με το χρόνο, ανοίγοντας το δρόμο για μεγαλοσκελείς εγκαταστάσεις στο δίκτυο. Προς αυτή την κατεύθυνση, η παραδοσιακή μορφή του δικτύου τείνει να αλλάξει, με την αποδυνάμωση της κεντρικής παραγωγής και την προώθηση της αρχιτεκτονικής των διασυνδεδεμένων μικροδικτύων με ΔΠ.

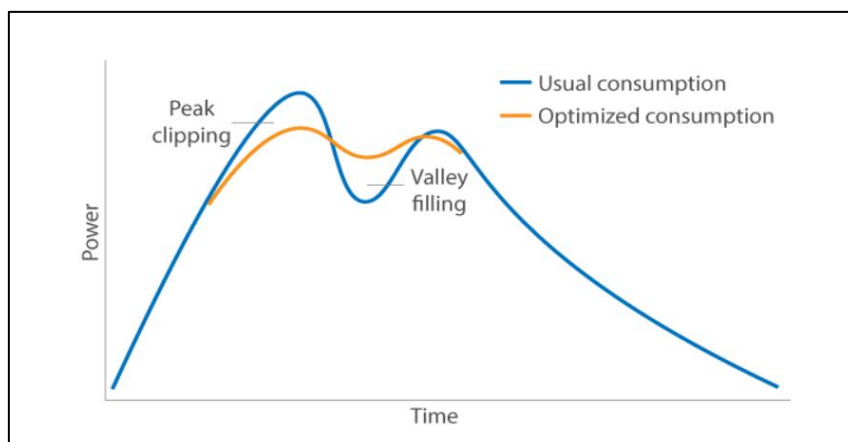
- iii. Η αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί εξίσου σημαντική τεχνολογία ΔΠ, δεδομένου ότι η παραγωγή από αιολικά ή ηλιακά πάρκα εξαρτάται από τις επικρατούσες μετεωρολογικές συνθήκες και ως εκ τούτου δεν είναι πάντα αξιοποιήσιμη τη στιγμή που παράγεται. Η χρονική διαφορά που μεσολαβεί μεταξύ των αιχμών ζήτησης και παραγωγής μπορεί να γεφυρωθεί μέσω μιας μεγάλης ποικιλίας συσκευών αποθήκευσης, όπως οι υπερπυκνωτές, τα SMES (Superconducting Magnetic Energy storage) και οι σφόνδυλοι (flywheels). Ένα από τα βασικότερα προβλήματα της αποθήκευσης αποτελεί το υψηλό κόστος των τεχνολογιών που συνδέονται με αυτή, που καθιστά προς το παρόν την εφαρμογή τους σε μεγαλοσκελείς εφαρμογές οικονομικά ασύμφορη χωρίς την στήριξη από επιδοτούμενα κατά ένα ικανό ποσοστό κεφάλαια ([University of Cyprus, n.d.](#)).

Τα δίκτυα διεσπαρμένης παραγωγής πρόκειται να προσδώσουν έναν νέο λειτουργικό ρόλο στους λειτουργούς των δικτύων διανομής σε τεχνικό επίπεδο, σε ό,τι αφορά την παροχή υπηρεσιών ευελιξίας, ενισχύοντας τη συνολική αξιοπιστία στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας. Οι απαιτήσεις αυτές συνοψίζονται αρχικά στη διαχείριση των διασυνδεδεμένων συστημάτων αποθήκευσης και στην εύρεση της βέλτιστης μοντελοποίησης της λειτουργίας τους ώστε η παροχή εφεδρικής ισχύος στο δίκτυο κατά τις περιόδους κατανομής αιχμιακών φορτίων να συμπίπτει με τον κύκλο εκφόρτισής τους. Επίσης, με δεδομένη την εισαγωγή σύγχρονων μετρητών στο σύνολο του δικτύου χαμηλής και μέσης τάσης κατά τα επόμενα έτη, με σκοπό την παρακολούθηση της παραγωγής και της καταναλωτικής συμπεριφοράς, καθίσταται εφικτή η μετατροπή του – σε καθολικό ποσοστό παθητικού – φορτίου σε ενεργό. Οι τεχνολογίες ενεργού απόκρισης της ζήτησης (*demand response*) συνίστανται στην προσωρινή αλλαγή (από λίγα λεπτά μέχρι και μερικές ώρες) του προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές, σε περιπτώσεις συμφόρησης του συστήματος. Η αλλαγή της χρήσης αφορά συνήθως τη μείωση της κατανάλωσης, παρόλα αυτά θα μπορούσαν να υπάρξουν καταστάσεις στις οποίες η αύξηση της χρήσης θα μείωνε την καταπόνηση του συστήματος. Τέλος, οι λειτουργοί των συστημάτων διανομής καλούνται να βελτιστοποιήσουν τις προβλέψεις έγχυσης ηλεκτρικής ενέργειας από

ανανεώσιμες πηγές σε προημερήσιο και ενδοημερήσιο επίπεδο, για να βοηθήσουν τους διαχειριστές μεταφοράς στην εξισορρόπηση του συστήματος σε τοπικό επίπεδο, καθώς και για την αποδοτικότερη διαχείριση των αμφίδρομων ροών ισχύος εντός των ορίων του συστήματος (Martinet et al., 2015).



Εικόνα 3.2: Μοντελοποίηση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας με διεύθυνση διεσπαρμένων μονάδων παραγωγής.



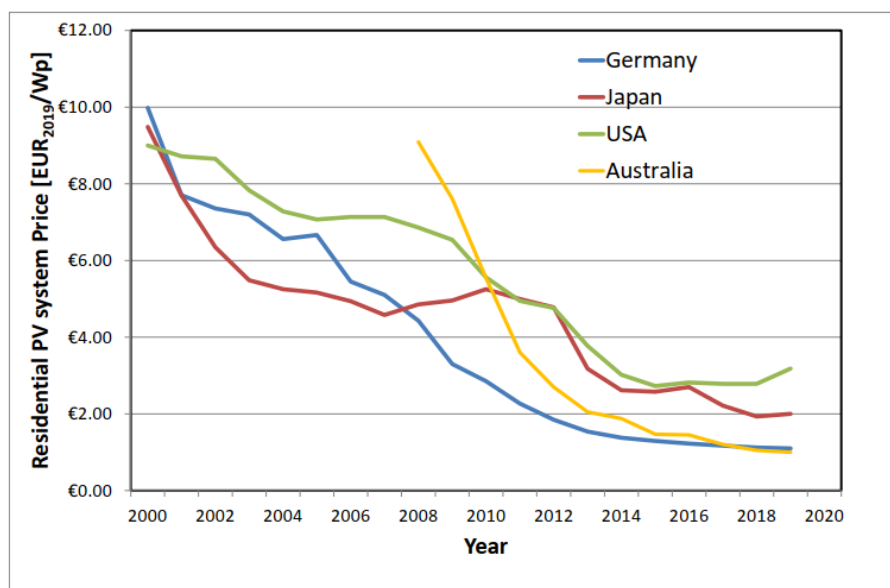
Εικόνα 3.3: Η επίδραση της υπηρεσίας DSR στην καμπύλη φορτίου του συστήματος.

3.2 Συστήματα οικιακής αυτοπαραγωγής και ιδιοκατανάλωσης

Η Φ/Β ενέργεια θεωρείται όλο και περισσότερο ως μια εκ των βασικών τεχνολογιών για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Τα ηλιακά Φ/Β έχουν σημειώσει σημαντική ανάπτυξη σε παγκόσμιο επίπεδο τα τελευταία χρόνια χάρη στο συνδυασμό μηχανισμών οικονομικής υποστήριξης, της ταχείας μείωσης του κόστους των επιμέρους εξαρτημάτων που τα απαρτίζουν (ηλιακά πάνελ, αντιστροφείς ηλεκτρικής

ενέργειας, καλωδίωση, συστήματα μηχανικής στήριξης και απομακρυσμένης παρακολούθησης). Αυτή η μείωση κόστους ήταν ιδιαίτερα αισθητή κατά τα τελευταία 10 έτη με αποτέλεσμα η εκτίμηση κόστους των μονάδων πλέον να κυμαίνεται στα επίπεδα κάτω του 1 €/ Wp.

Οι εξελίξεις αυτές στο μίγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν ουσιαστικές επιπτώσεις όσον αφορά τη δομή ιδιοκτησίας των παραγωγικών μονάδων, εισάγοντας την έννοια του “*electricity prosumer*”, δηλαδή του ιδιώτη ο οποίος είναι σε θέση όχι μόνο να καταναλώνει, αλλά και να προβαίνει σε υπηρεσίες παροχής ενέργειας στο δίκτυο ή για σκοπούς ιδιοκατανάλωσης. Παραδείγματος χάριν, περίπου το ήμισυ της ανανεώσιμης εγκατεστημένης ισχύος στη Γερμανία ανήκε σε ιδιώτες (κάτοικοι πόλεων και ιδιοκτήτες αγροκτημάτων) και σε ενεργειακές κοινότητες, ενώ παράλληλα λιγότερο από το 5% της συνολικής ισχύος ανήκε στις κυρίαρχουσες επιχειρήσεις παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, αξιοσημείωτο είναι το γεγονός πως οι επενδύσεις σε ΑΠΕ κατά το έτος 2017 αντιστοιχούσαν στο 67% των παγκόσμιων επενδύσεων σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής. Η διαδικασία διάχυσης Φ/Β συστημάτων ενεργοποιείται από την αρθρωτότητα (*modularity*) και την χαμηλότερη ένταση κεφαλαίου του ηλιακού PV. Πολλοί παράγοντες μπορούν εν γένει να επηρεάσουν την ανάπτυξη και την υιοθέτηση μιας αναδύομενης τεχνολογίας, μεταξύ των οποίων, ο σχεδιασμός μηχανισμών πολιτικής για την προώθησή της (Mateo et al., 2018).



Εικόνα 3.4: Ανάπτυξη τιμών οικιακών Φ/Β συστημάτων τις τελευταίες δύο δεκαετίες (Jäger-Waldau, 2019).

Σε τεχνικό επίπεδο, τα κυριότερα κατασκευαστικά στοιχεία ενός οικιακού Φ/Β περιγράφονται ως ακολούθως:

1. **Ηλιακά πάνελ:** Τα ηλιακά πάνελ είναι το πιο ορατό στοιχείο ενός οικιακού Φ/Β συστήματος. Εγκαθίστανται εκτός οικίας, συνήθως στην οροφή με νότιο προσανατολισμό και μετατρέπουν το ηλιακό φως σε ηλεκτρικό ρεύμα. Η βαθμονόμηση της ισχύος εξόδου των πάνελ πραγματοποιείται σε W_p και αναφέρεται στη μέγιστη ισχύ που παράγεται από το πάνελ υπό ιδανικές συνθήκες λειτουργίας (θερμοκρασία $25^{\circ}C$, οριζόντια ένταση ηλιακής ακτινοβολίας – $GHI 1000 W/m^2$). Η έξοδος ανά πάνελ κυμαίνεται μεταξύ 10 και $300 W_p$, με τα $100 W_p$ να αποτελεί την κοινότυπη διάταξη. Η τεχνολογία τους διαχωρίζεται σε δύο είδη, τα μονοκρυσταλλικά και τα πολυκρυσταλλικά πάνελ. Τα μονοκρυσταλλικά πάνελ αποτελούνται από μοναδικούς μεγάλους κρυστάλλους, έχουν πιο σκούρο χρώμα και ως αποτέλεσμα της διαδικασίας παραγωγής, συνήθως λείπουν οι γωνίες των ηλιακών κυττάρων, ενώ τα πολυκρυσταλλικά πάνελ αποτελούνται από πολλαπλούς μικρότερους κρυστάλλους, και έχουν ανοιχτό ή σκούρο μπλε χρώμα. Τα Φ/Β πλαίσια συνδέονται κατά κλάδους. Κάθε κλάδος αποτελείται από Φ/Β πλαίσια συνδεδεμένα σε σειρά και οι ισοδύναμοι κλάδοι συνδέονται παράλληλα μεταξύ τους (Φ/Β συστοιχία). Ένας προσεγγιστικός τύπος της μέσης απόδοσης του πλαισίου σε σχέση με τη θερμοκρασία είναι:

$$n = n_r * [1 - \beta_p * (T_c - T_r)]$$

όπου

n_r : η απόδοση του Φ/Β πλαισίου, 10-25% ανάλογα τη θερμοκρασία, το γεωγραφικό πλάτος εγκατάστασης και την τεχνολογία κατασκευής.

T_r : θερμοκρασία αναφοράς, ίση με $25^{\circ}C$.

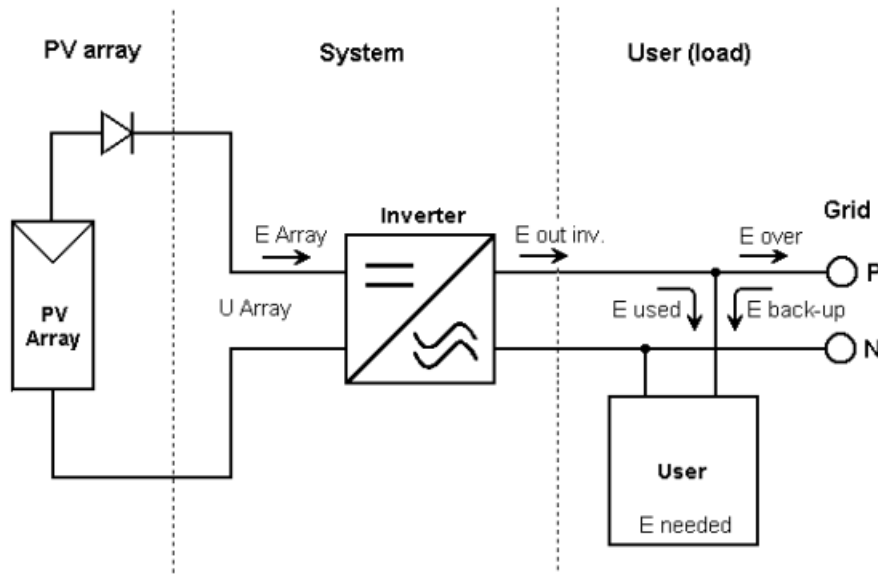
β_p : ο συντελεστής θερμοκρασίας για την απόδοση του Φ/Β πλαισίου.

T_c : μέση θερμοκρασία στην επιφάνεια του πλαισίου.

2. **Αντιστροφέας:** Κάθε Φ/Β πλαίσιο και σύστημα αποθήκευσης παράγει συνεχή τάση (DC), η οποία οδηγείται μέσω καλωδίων συνεχούς ρεύματος κατάλληλης διατομής στο μετατροπέα ισχύος για την μετατροπή του σε εναλλασσόμενο ρεύμα (230V AC), κατάλληλο για την σύνδεση με το δίκτυο καθώς και για την επίτευξη της ιδιοκατανάλωσης.
3. **Σύστημα τηλεμετρίας και ελέγχου:** Το data logger, συνδεδεμένο στην έξοδο του αντιστροφέα αποτελεί το κέντρο επικοινωνίας του Φ/Β συστήματος. Συγκεντρώνει όλα τα δεδομένα των μετατροπέων της εγκατάστασης επιτρέποντας τη γνώση της

λειτουργικής κατάστασης του συστήματός ανά πάσα στιγμή μέσω ενσωματωμένου FTP-Server για αποθήκευση και μετάδοση των δεδομένων για την απεικόνισή τους μέσω διαδικτυακής εφαρμογής (web portal).

4. **Βάση στήριξης:** Συναντώνται σε εφαρμογές σε επίπεδες επιφάνειες και αποτελούνται από πασσάλους γαλβανισμένους εν θερμώ. Η κλίση των βάσεων είναι σταθερή στις 25° και νότιο προσανατολισμό (Doyle et al., 2015).

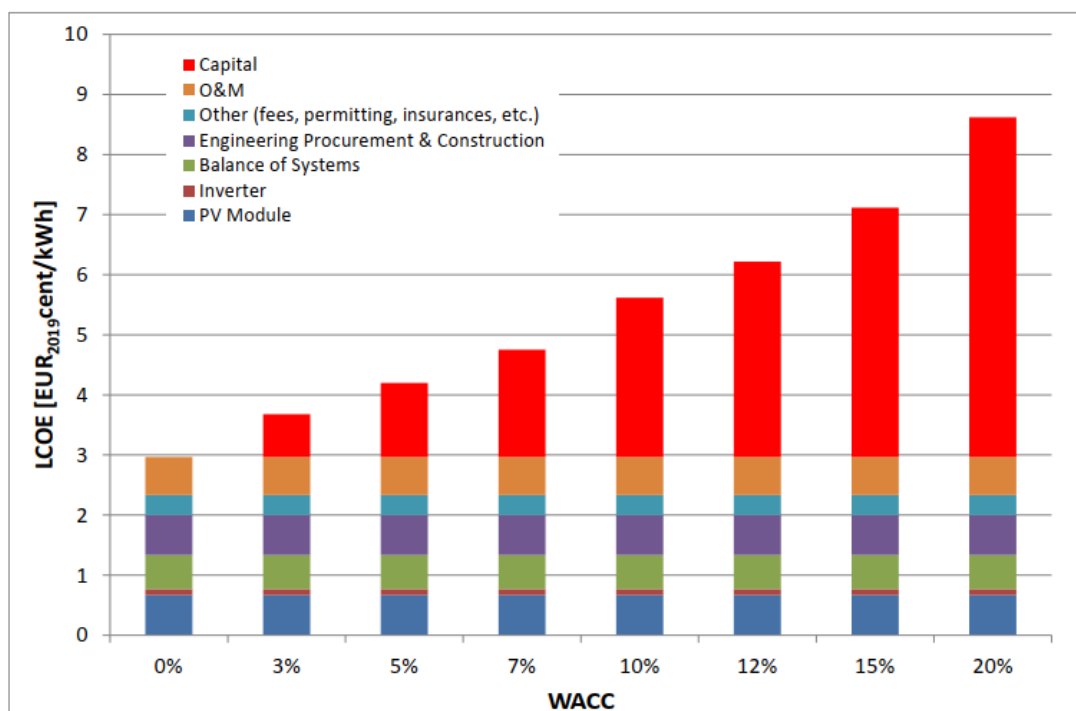


Εικόνα 3.5: Τυπική διάταξη Φ/Β σταθμού.

Renewables - regional details	Capital cost (\$2019 per kW)			Annual O&M Costs (\$2019 per kW)			Capacity factor (%)		
	2019	2030	2040	2019	2030	2040	2019	2030	2040
<i>Note: average figures at regional level</i>									
Solar photovoltaics - Buildings									
European Union	1240	840	720	18	18	16	11%	12%	12%
United States	3480	2280	1860	52	48	46	16%	17%	17%
Japan	2030	1400	1180	30	28	28	12%	12%	12%
Russia	2740	1680	1420	42	38	36	9%	11%	11%
China	900	600	500	14	12	12	13%	14%	15%
India	820	540	460	12	10	10	15%	18%	18%
Middle East	1640	960	800	24	22	22	17%	19%	19%
Africa	2200	1360	1140	32	30	28	17%	19%	19%
Brazil	1260	820	680	18	18	16	16%	17%	17%

Στον παραπάνω πίνακα αναγράφονται οι κυριότεροι οικονομικοί δείκτες για τον υπολογισμό του σταθμισμένου κόστους ενέργειας ενός οικιακού Φ/Β με διάρκεια ζωής τα 25 έτη.

Αποφεύγεται για λόγους ακρίβειας να προσδιοριστεί το συνολικό LCOE, στο οποίο καλύπτονται κόστη που περιλαμβάνουν υπηρεσίες ευελιξίας, χρεώσεις εξισορρόπησης, χρεώσεις χρησιμοποίησης δικτύου καθώς επίσης και τον πολύ σημαντικό συντελεστή του σταθμισμένου κόστους κεφαλαίου (WACC) (Jäger-Waldau, 2019), (Kato et al., 2003).

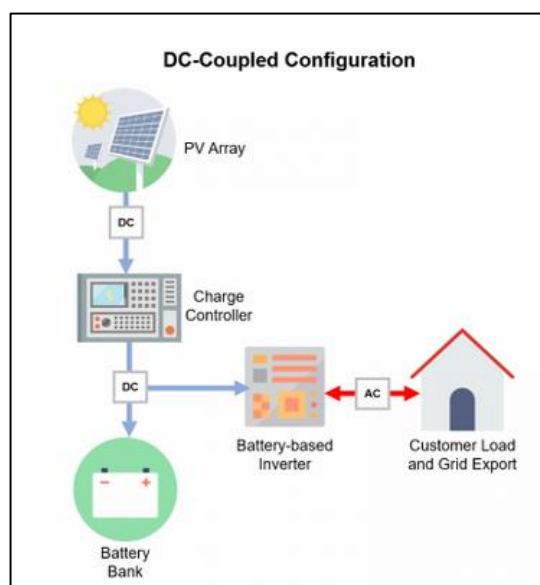


Εικόνα 3.6: Επίδραση του WACC στο LCOE.

Ανά πάσα στιγμή, η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να ταιριάζει απόλυτα με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Αυτή η ισορροπία είναι απαραίτητη σε όλα τα ηλεκτρικά δίκτυα για τη διατήρηση της σταθερής και ασφαλούς παροχής. Σε όλα τα σενάρια η ηλεκτροπαραγωγή από ΑΠΕ παρουσιάζει σημαντική αύξηση, φθάνοντας το 2050 να καλύπτει 88%-90% της ακαθάριστης ζήτησης για το έτος 2050, με τις ΑΠΕ μεταβλητής παραγωγής, κυρίως αιολικά και ηλιακά, να παράγουν το μεγαλύτερο μέρος αυτής, από 68% έως 72%. Η εξισορρόπηση της διακύμανσης των μεταβλητών ΑΠΕ επιτυγχάνεται εξαντλώντας τις δυνατότητες αντλησιοταμίευσης και αναπτύσσοντας εγκαταστάσεις μπαταριών σε αποκεντρωμένη και συγκεντρωτική κλίμακα, αλλά και αξιοποιώντας στο μέτρο του δυνατού τις μπαταρίες των αυτοκινήτων (Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος, 2019b). Επομένως, η αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί την αναγκαία και ικανή συνθήκη για την σταθεροποίηση των διακυμάνσεων της προσφοράς και της ζήτησης, επιτρέποντας την εξοικονόμηση της πλεονάζουσας ηλεκτρικής ενέργειας σε μεγάλες ποσότητες και σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Ένα εκ των βασικότερων στοιχείων της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας, είναι η δημιουργία ενός νέου πλαισίου που θα καθιστά ευκολότερη για τα άτομα να προβαίνουν στην παραγωγή, την αποθήκευση και την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας. Η κεντρική ιδέα είναι η τοποθέτηση των τελικών καταναλωτών στο κέντρο των αναπτυξιακών στρατηγικών, ώστε τους δίνεται η δυνατότητα διαδραμάτισης ενεργού ρόλου στην οδήγηση της ενεργειακής μετάβασης καθώς και να επωφεληθούν πλήρως από ένα λιγότερο συγκεντρωτικό και περισσότερο ψηφιακό και ευέλικτο σύστημα. Το κυριότερο αναπτυξιακό εργαλείο, όπως ακριβώς στην αυγή της προηγούμενης δεκαετίας αποτελούσε το ηλιακό πάνελ, τη δεδομένη χρονική στιγμή αποτελεί το ηλεκτροχημικό (Ιόντων λιθίου – Li-Ion) σύστημα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Τα κυριότερα τεχνικά χαρακτηριστικά των μπαταριών αυτού του τύπου είναι τα ακόλουθα:

- i. *Χαμηλοί χρόνοι απόκρισης* – Κατά αυτόν τον τρόπο οι μπαταρίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε εφαρμογές κάλυψης αιχμακών φορτίων, επιφέροντας εξοικονόμηση σε ώρες υψηλότερων χρεώσεων. Επίσης, μπορούν να χρησιμοποιηθούν και αντίστροφα για την παροχή ισχύος ευελιξίας πρωτεύουσας (Frequency Containment Reserve) και δευτερεύουσας ρύθμισης (Frequency Restoration Reserve), δηλαδή την παροχή ηλεκτρικής ισχύος στο διάστημα 50ms ~ 15 sec από την εντολή κατανομής του διαχειριστή του δικτύου διανομής. Τέλος, είναι κατάλληλες για την παροχή εφεδρικών υπηρεσιών σε κρίσιμα φορτία κατά περιόδους έκτακτων αναγκών.
- ii. *Υψηλή πυκνότητα ισχύος, υποστήριξη μεγάλων κύκλων φόρτισης - εκφόρτισης και μακρά διάρκεια ζωής (>10 ετών)* – Στα συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, έρχεται να προστεθεί και η υποστήριξη των μπαταριών από αλγορίθμους βελτιστοποίησης των κύκλων λειτουργίας για μεγιστοποίηση της διάρκειας ζωής τους ([SolarPower Europe, 2020b](#)).



Εικόνα 3.7 : Τυπική διάταξη σύζευξης συστήματος αποθήκευσης – Φ/Β συστήματος στέγης.

Οι διατάξεις που προβλέπονται στο ρυθμιστικό πλαίσιο Καθαρής Ενέργειας, και συγκεκριμένα στον *Κανονισμό Σχεδιασμού Αγοράς* (2019/943, 2019/944), αποτελούν ένα σταθερό σημείο αναφοράς για τα συστήματα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάπτυξη νέων αγορών, οι οποίες υποστηρίζουν τις υπηρεσίες παροχής εφεδρειών, τη μετατόπιση ενέργειας, την απόκριση συχνότητας και την παροχή ενέργειας εξισορρόπησης από αποθηκευτικά μέσα, έρχονται σε απόλυτο εναρμονισμό με το μετριασμό της αβεβαιότητας που προβάλλει η συγκεκριμένη επένδυση στο μέσο καταναλωτή. Εκτός από τη δημιουργία ενός ισχυρού νομοθετικού πλαισίου που επιτρέπει στις τεχνολογίες αποθήκευσης να αξιοποιήσουν το πλήρες φάσμα των δυνατοτήτων τους, απαραίτητη είναι η λήψη πρόσθετων μέτρων στήριξης από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής για την προσαύξηση της διείσδυσής τους ώστε σε ορίζοντα δεκαετίας να είναι εφικτή η ομαλή λειτουργία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας με μεγαλύτερη του 60% συμμετοχή από ΑΠΕ. Η ακόλουθη λίστα περιγράφει διάφορους μηχανισμούς υποστήριξης οι οποίοι έχουν προταθεί για την ενσωμάτωση των μπαταριών:

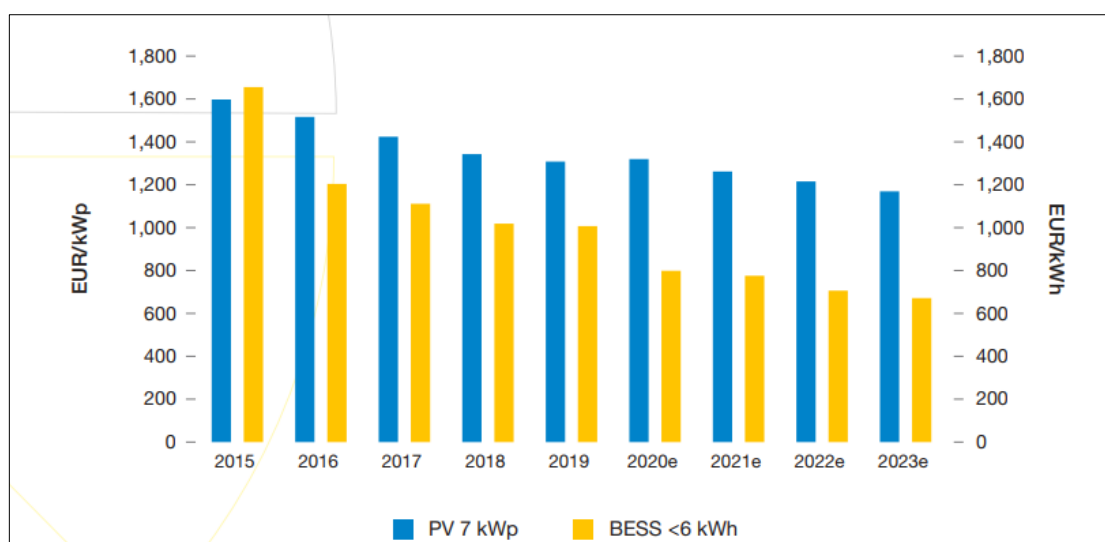
- i. **Άμεσα οικονομικά κίνητρα για τους τελικούς καταναλωτές:** Ο πιο άμεσος τρόπος για την υποστήριξη της ανάπτυξης συστημάτων αποθήκευσης στον οικιακό τομέα είναι η επιδότηση μέρους του συνολικού κόστους των συστημάτων αποθήκευσης.
- ii. **Φορολογικές αποσβέσεις:** Παροχή κινήτρων μέσω ευνοϊκών φορολογικών ρυθμίσεων, όπου οι χρήστες μπορούν να αποσβέσουν μέρος της επένδυσης σε μια μπαταρία. Παράδειγμα αυτής της πολιτικής αποτελεί η Ιταλία, η οποία προσφέρει την επιλογή της ετήσιας φορολογικής απαλλαγής ίση με το 50% του συνολικού κόστους της μπαταρίας για ορισμένο χρονικό ορίζοντα.
- iii. **Ολοκληρωμένες ανακαινίσεις κτιρίων και πρότυπα απόδοσης:** Παροχή επιχορηγήσεων για τη βελτίωση της ενεργειακής κλάσης ενός κτιρίου, όπου απαραίτητη για την λήψη ενεργειακής κλάσης ανώτερου βαθμού είναι η εισαγωγή συστήματος αποθήκευσης παράλληλα με τις βελτιώσεις ενεργειακής απόδοσης. Οι «ηλιακές εντολές» που έχουν τεθεί σε εφαρμογή στην πολιτεία της Καλιφόρνια (ΗΠΑ) στις αρχές του 2020 αποτελούν ένα ενδεικτικό μέτρο προς αυτή την κατεύθυνση, όπου για το σύνολο των κτιρίων χαμηλότερων από 3 ορόφους, απαιτείται η εγκατάσταση Φ/Β εγκατάστασης αρκετής ώστε να αντισταθμίζει τη μέση ετήσια κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Η πολιτική αυτή προσφέρει τη δυνατότητα εμπορίας υποχρεωτικών ηλιακών πιστωτικών μονάδων με αντίστοιχες μονάδες που προέρχονται από μέσα αποθήκευσης, προωθώντας έτσι τη διάχυση της τεχνολογίας ([SolarPower Europe, 2020b](#)), ([European Commission, 2020](#)).

Αναφορικά με τα οικονομικά μεγέθη της αναδυόμενης αυτής τεχνολογίας, αξίζει να αναφερθεί ότι στη Γερμανία, τη μεγαλύτερη αγορά ηλιακής ενέργειας καθώς και αποθήκευσης της Ευρώπης, στο διάστημα μεταξύ 2015 – 2019 οι τιμές έχουν μειωθεί κατά

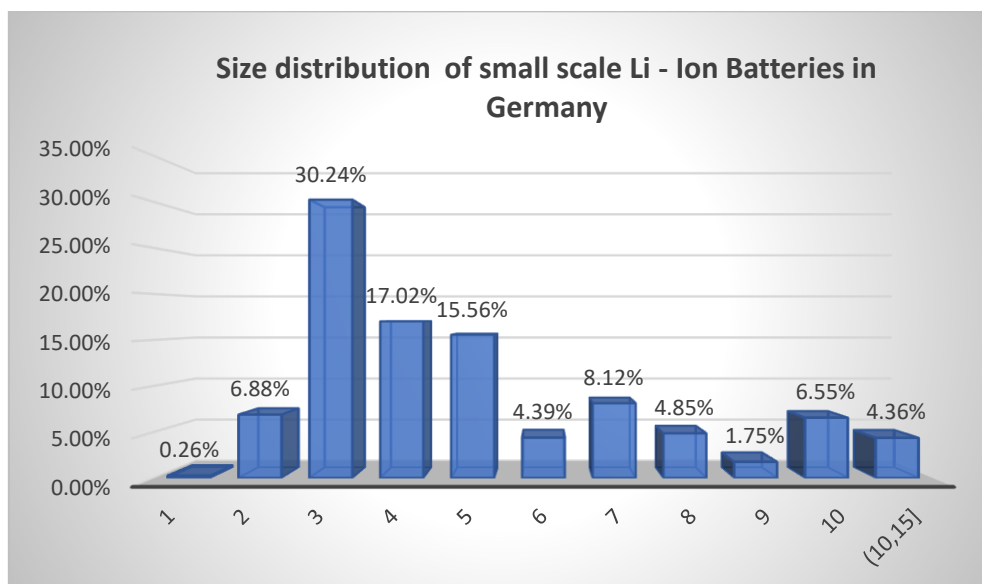
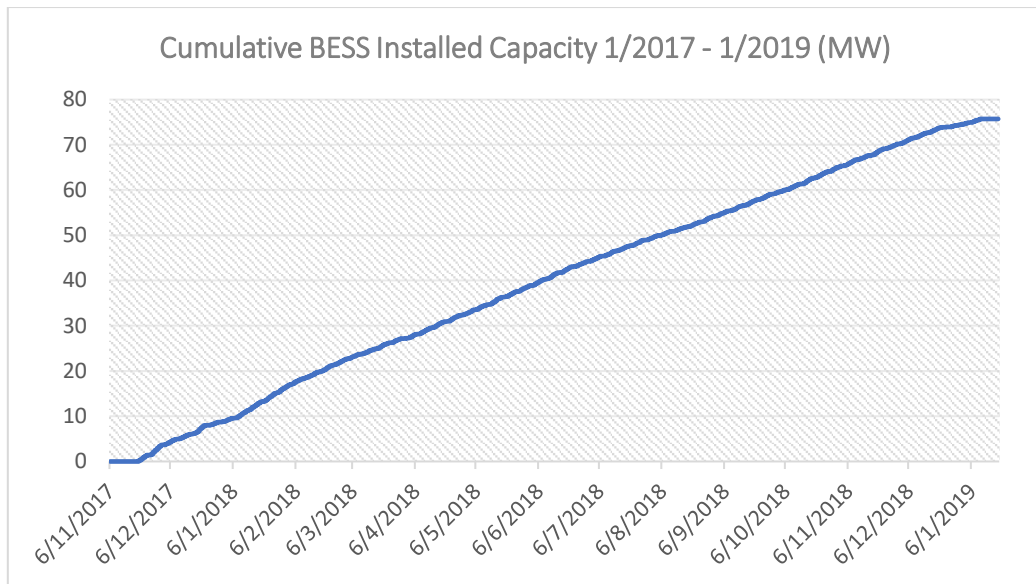
18% για οικιακά ηλιακά συστήματα (<10kWp) και κατά 40% για οικιακές λύσεις αποθήκευσης. Επίσης, για τα επόμενα έτη αναμένεται περαιτέρω μείωση κατά 10% της ήδη καλά καθιερωμένης αγοράς Φ/Β συστημάτων καθώς και μια πολύ πιο απότομη μείωση, της τάξης του 33%, για τα ηλεκτροχημικά αποθηκευτικά μέσα.

Παρακάτω παρατίθεται ένα επίπεδο αναφοράς για ένα σύστημα ιδιοκατανάλωσης Φ/Β – συστήματος αποθήκευσης με μπαταρία (battery energy storage system - BESS). Είναι εμφανές το όφελος που παρέχει ο συγκεκριμένος συνδυασμός τεχνολογιών λόγω της παροχής ισχύος σε ώρες όπου το χονδρεμπορικό κόστος ηλεκτρικής ενέργειας είναι αυξημένο. Η εφαρμογή δυναμικών χρεώσεων λιανικής με την εισαγωγή έξυπνων μετρητών, πρόκειται να καταδείξει την πλήρη δυναμική της συγκεκριμένης τεχνολογίας.

	Household
PV capacity	7.5
Electricity consumption	4.750
Self-consumption rate without storage (%)	50
Storage size (kWh)	6
Self-consumption rate with storage (%)	80
Storage full load hours	275



Εικόνα 3.8 : Πραγματικά επίπεδα και εκτιμήσεις τιμών συστημάτων ιδιοκατανάλωσης στη Γερμανία για την περίοδο 2015 - 2023.



Εικόνα 3.8 : Αναλυτικά στοιχεία διάχυσης συστημάτων αποθήκευσης σε αντιπροσωπευτική χώρα.

Στα συγκεκριμένα 2 διαγράμματα φαίνεται η γραμμικά αυξητική τάση της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος οικιακών συστημάτων αποθήκευσης στη Γερμανική επικράτεια. Το επικρατέστερο μέγεθος (sizing) των μπαταριών κυμαίνεται σε επίπεδα αντίστοιχα των εγκατεστημένων οικιακών Φ/Β συστημάτων, που δεν ξεπερνούν κατά κανόνα τα 10 kW ([Bundesnetzagentur, n.d.](#)).

3.3 Ρυθμιστικά πλαίσια στήριξης αποκεντρωμένης παραγωγής στην ΕΕ

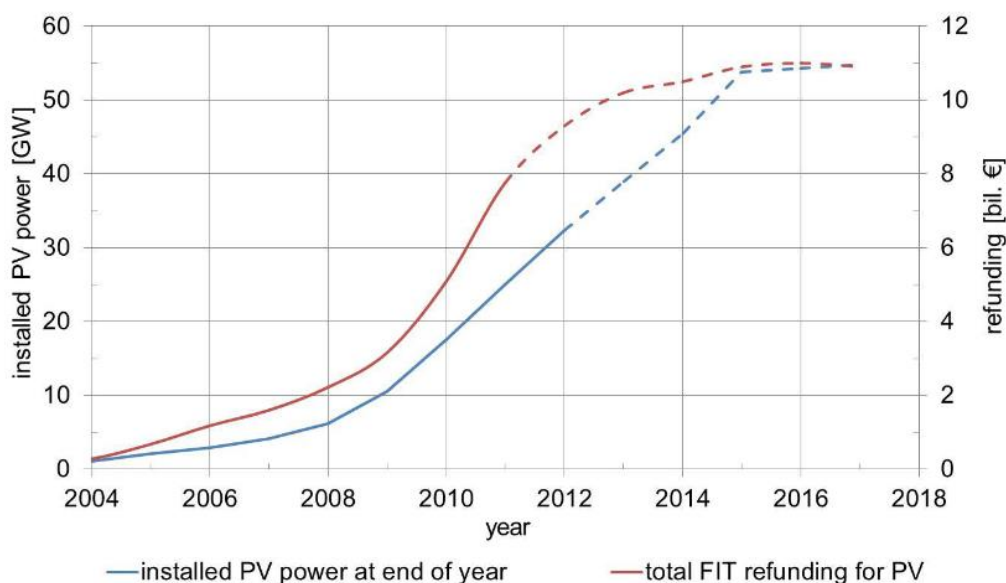
Η Ευρωπαϊκή κοινότητα αναγνώρισε από πολύ νωρίς την ανάγκη της προαγωγής των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας ως μέτρου υψηλής προτεραιότητας, δεδομένου ότι η εκμετάλλευσή τους συμβάλλει στην προστασία του περιβάλλοντος, τη βιώσιμη ανάπτυξη και τη συμβολή στην ασφάλεια ενεργειακού εφοδιασμού. Η οδηγία 2001/77/ΕΚ του Ευρωπαϊκού

Κοινοβουλίου της 27^{ης} Σεπτεμβρίου 2001 αποτέλεσε ορόσημο στην προσπάθεια θέσπισης κατευθυντήριων γραμμών για την εφαρμογή των αναγκαίων μηχανισμών κρατικής στήριξης, έτσι ώστε οι τότε μη ανταγωνιστικές ανανεώσιμες τεχνολογίες σε σχέση με τις υπάρχουσες με βάση τα ορυκτά καύσιμα να καταστούν επενδυτικά ελκυστικές. Μία εκ των σημαντικότερων μηχανισμών παροχής κινήτρων για την επίτευξη άμεσης υψηλής διείσδυσης ανανεώσιμων τεχνολογιών, ιδίως αιολικής και ηλιακής ενέργειας, είναι οι Συμβάσεις Ενίσχυσης Σταθερής Τιμής (Feed – in Tariffs), οι οποίες περιλαμβάνουν μακροπρόθεσμα συμβόλαια (συνήθως 15 – 20 έτη) με εγγυημένες τιμές άνω της μέσης τιμής εκκαθάρισης της προημερήσιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και συνυφασμένες με το LCOE της εκάστοτε τεχνολογίας. Οι μακροπρόθεσμες συμβάσεις και οι εγγυημένες τιμές προστατεύουν τους παραγωγούς από την έκθεση στον κίνδυνο που ενέχει η συμμετοχή στην αγορά ως αποδέκτες τιμών (price takers), ενθαρρύνοντας επενδύσεις που διαφορετικά θα είχαν αβέβαιο οικονομικό αποτέλεσμα (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2001).

Η Γερμανία ήταν η πρώτη ευρωπαϊκή χώρα που υιοθέτησε τη στήριξη έργων ΔΠ μέσω FITs το 1991, με τις εγγυημένες τιμές βασισμένες σε ποσοστό του ύψους της λιανικής τιμής ηλεκτρικής ενέργειας. Η Δανία και η Ισπανία ακολούθησαν, εφαρμόζοντας παραλλαγές του μηχανισμού το 1993 και το 1994, αντίστοιχα. Το επίπεδο της αποζημίωσης καθορίστηκε εν μέρει βάσει της εκτιμώμενης αξίας των διαφευγόντων αρνητικών συνεπειών, όπως της ατμοσφαιρικής ρύπανσης των εγκαταστάσεων άνθρακα. Παρόλα αυτά, οι συμβάσεις δεν προέβλεπαν πιθανές διακυμάνσεις του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα η πλειοψηφία των επενδυτών να μην είναι πρόθυμη στην ανάληψη ρίσκου, δεδομένης της προκύπτουσας αβεβαιότητας. Ως εκ τούτου, το κόστος ίδιας χρηματοδότησης των έργων παρέμεινε σχετικά υψηλό με την ανάπτυξη της αγοράς να παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Επιπλέον, η εγγυημένη τιμή δεν ήταν αρκετά υψηλή ώστε να αποσβεστεί το κόστος των Φ/Β έργων εντός ικανοποιητικού ορίζοντα.

Το 2000, η Γερμανία (EEG 2000) και η Δανία μετέβαλαν τον ανταποδοτικό μηχανισμό των FITs τους σε μοντέλα με κριτήριο το LCOE και στα οποία οι τιμές καθορίζονται με βάση το κόστος παραγωγής συν ένα λογικό ποσοστό απόδοσης. Οι συμβάσεις ενίσχυσης περιείχαν την παροχή προτεραιότητας όσον αφορά την παροχή ενέργειας στο δίκτυο, εγγυημένες πληρωμές για 20 χρόνια εξασφαλίζοντας αποδεκτά ποσοστά επιστροφής επενδυμένων κεφαλαίων (ROI) και προσέφεραν διαφοροποιημένους συντελεστές με βάση την τεχνολογία, το μέγεθος του έργου και την αποτελεσματικότητα χρήσης των πόρων. Η εφαρμογή αυτών των «προηγμένων FIT» καθιέρωσε ένα σενάριο αναφοράς όσον αφορά τον καθορισμό τιμών για την υλοποίηση αναπτυξιακών στρατηγικών διείσδυσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Έκτοτε, οι

περισσότερες χώρες, όπως η Ισπανία, η Γαλλία και η Ιταλία υιοθέτησαν το συγκεκριμένο μοντέλο.



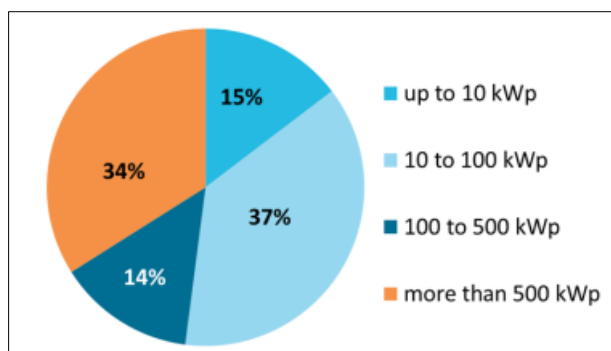
Εικόνα 3.9 : Επέκταση των Φ/Β συστημάτων ως συνάρτηση των συνολικού κόστους μηχανισμών στήριξης στη Γερμανία κατά τα έτη 2004 – 2011 (Wirth, 2017).

Στον τομέα των οικιακών Φ/Β, τα ρυθμιστικά πλαίσια που εφαρμόστηκαν στη Γερμανία και την Ιταλία, ως οι κύριοι πρωταγωνιστές της διεξόδου Φ/Β μικρής ισχύος κατά την προηγούμενη δεκαετία και είχαν καταλυτική επίδραση στη διάχυση της τεχνολογίας ήταν τα ακόλουθα:

❖ **Γερμανία ~ Νόμος για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (EEG 2000, EEG 2004, EEG 2012, EEG 2014, EEG 2017):**

Σε αντίθεση με τον προϋπάρχοντα νόμο κρατικών ενισχύσεων, οι τιμές καθορίστηκαν σε απόλυτους όρους και δεν συνδέονταν πλέον με την ισχύουσα λιανική τιμή ηλεκτρικής ενέργειας. Επίσης, τα συμβόλαια διαφοροποιούνταν μεταξύ κλίμακας (σχέση

αντιστρόφως ανάλογη μεταξύ εγκατεστημένης ισχύος και τιμής) και της απόδοσης ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εγγυημένες τιμές των συμβάσεων των οικιακών Φ/Β κινήθηκαν μεταξύ 450 – 550 € / MWh και σε



Εικόνα 3.10: Μερίδιο επί της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος ανά μέγεθος έργου.

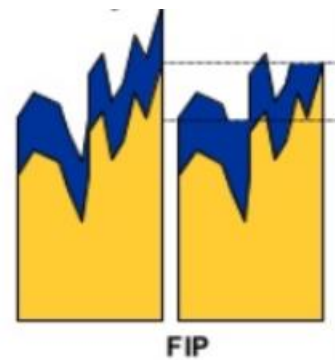
συνδυασμό με άλλα ποικίλα προγράμματα επιδοτήσεων, όπως για παράδειγμα το «100.000

roofs program», παρατηρήθηκε θεαματική ανταπόκριση του επενδυτικού κοινού. Δεδομένου ότι τα Φ/Β συστήματα καταλαμβάνουν το **15%** (βλ. Εικόνα 3.10) της συνολικής ισχύος της συγκεκριμένης τεχνολογίας, προκύπτει ότι κατά τα 10 πρώτα χρόνια εφαρμογής του νομοσχεδίου συνδέθηκαν περί τα 3,5 GW.

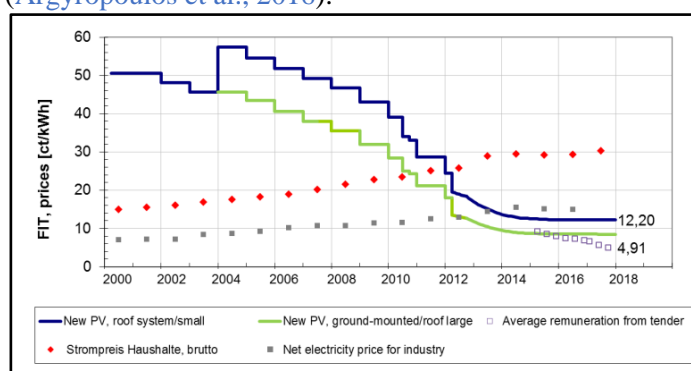
Μέχρι το έτος 2012 και την θεσμοθέτηση του νομοσχεδίου EEG 2012, δεν υπήρχε όριο όσων αφορά την ποσότητα των νέων μονάδων που λάμβαναν άδεια σύνδεσης με το δίκτυο. Όταν αυτό οδήγησε σε μια αύξηση χωρητικότητας ύψους 7,5 GW το 2011, τα Φ/Β υποβλήθηκαν στη ρύθμιση ενός κυμαινόμενου ορίου, που σημαίνει ότι - ανάλογα με τον αριθμό των προηγούμενων κατασκευασμένων εγκαταστάσεων - οι νέες προστιθέμενες συστοιχίες θα λαμβάνουν σταδιακά μειούμενη τιμή στήριξης προκειμένου να υπάρξει συγκράτηση των νέων συνδέσεων και να μην επέλθει αστάθεια στο δίκτυο.

Η τροπολογία της 1^{ης} Αυγούστου 2014 (**EEG 2014**) εισήγαγε τις εξής σημαντικές αλλαγές:

(i) Καθορίστηκε αναπτυξιακός δρόμος για τη διείσδυση έργων ΑΠΕ ανά κατηγορία έτσι ώστε να είναι ελεγχόμενη η χωρητικότητα που τίθεται σε λειτουργία ανά έτος και να ικανοποιηθούν αφετέρου οι απαιτήσεις των κλιματικών συμφωνιών. Παράλληλα, διατηρήθηκε ένα καθορισμένο επίπεδο αποδοχών ανά κατηγορία και ανά παραγόμενη kWh. (ii) Η συμμετοχή στην χονδρεμπορική αγορά ενέργειας είναι πλέον υποχρεωτική για όλες τις νέες εγκαταστάσεις με την εξαίρεση έργων μικρότερων των 500 kW που τέθηκαν σε λειτουργία πριν το 2016. Οι ιδιοκτήτες αυτών των έργων έχουν τη δυνατότητα επιλογής και εναλλαγής σε μηνιαία βάση μεταξύ καθεστώτων σταθερής τιμής (FIT) και διαφορικής προσαύξησης (FIP ή αποζημίωση που προκύπτει αφενός από την αγορά ενέργειας – οριακή τιμή συστήματος – και αφετέρου από τη διαφορά μεταξύ της τιμής αναφοράς της σύμβασης και της οριακής τιμής).



Τέλος, στις 8 Ιουλίου 2016, η Γερμανία ενέκρινε την τροποποίηση του EEG 2014 με το νομοσχέδιο **EEG 2017**, το οποίο τέθηκε σε ισχύ την 1^η Ιανουαρίου 2017. Η μεταρρύθμιση εισάγει δημόσιες δημοπρασίες για έργα ΑΠΕ πάσης τεχνολογίας στις προσπάθειες της χώρας να μετατοπιστεί από τους μηχανισμούς FIT, σε μηχανισμούς εύρεσης τιμών που αντικατοπτρίζουν τις συνθήκες της αγοράς. Τα προκριθέντα έργα υπέγραψαν συμβόλαια 20 ετούς διάρκειας, με τιμή αποζημίωσης ίση με την υποβληθείσα κατά τη δημοπρασία (Wirth, 2017), (Argyropoulos et al., 2016).



Εικόνα 3.10: Εξέλιξη του ύψους των FIT στο διάστημα εφαρμογής των νομοσχεδίων EEG 2000-EEG 2017.

❖ **Ιταλία ~ Νομοσχέδια Conto Energia I – V**

i. **Conto Energia I (6/2/2006):** Έναρξη ισχύος των νομοθετικών διατάξεων και εισαγωγή συστήματος χρηματοδότησης λειτουργικού λογαριασμού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από εγκαταστάσεις μεγαλύτερες του 1 kW. Οι ιδιοκτήτες των εγκαταστάσεων 1-20 kW απολαμβάνουν αποδοχής ύψους 0,445 € / kWh (20-ετείς συμβάσεις) από το *Gestore Servizi Energetici* (GSE) υπό την προϋπόθεση ότι μόνο στο αυτοκαταναλωθέν μέρος της παραγωγής θα παρέχεται η συγκεκριμένη στήριξη.

ii. **Conto Energia II (19/2/2007):** Το Υπουργείο Οικονομικής Ανάπτυξης θέσπισε νέα κριτήρια για την ενθάρρυνση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από Φ/Β συστήματα. Αρχικά, η στήριξη αφορά την αποζημίωση όλης της παραγόμενης ενέργειας. Η νομοθεσία καθιστά δυνατή την εξάλειψη μέρους των γραφειοκρατικών καθυστερήσεων που είχαν επιβαρύνει τον προηγούμενο ενεργειακό λογαριασμό.

Συγκεκριμένα, δεν ήταν πλέον απαραίτητη η αποδοχή από το GSE των ποσών στήριξης, αλλά αφού ζητηθούν όροι σύνδεσης από τον τοπικό διαχειριστή δικτύου, θα είναι δυνατή η απευθείας υλοποίηση της κατασκευής του συστήματος. Επίσης, το συγκεκριμένο νομοσχέδιο

1 kW ≤ P ≤ 3 kW	0,49 €
3 kW < P ≤ 20 kW	0,46 €
P > 20 kW	0,44 €

εισήγαγε τη διαφοροποίηση των ποσών στήριξης ανάλογα με την αρχιτεκτονική (επίγεια εγκατάσταση ή Φ/Β στέγης) καθώς και με την εγκατεστημένη ισχύ.

iii. **Conto Energia III (6/8/2010):** Αφορά μονάδες που τέθηκαν σε λειτουργία το διάστημα 1/1/2011 – 31/5/2011. Πριμοδότηση εγκαταστάσεων που ενσωματώνουν και αντικαθιστούν αρχιτεκτονικά στοιχεία κτιρίων. (π.χ. στέγες κτιρίων κάθετες, αδιαφανείς επιφάνειες).

iv. **Conto Energia IV (5/5/2011):** Καθορισμός μηχανισμού κινήτρων για τις εγκαταστάσεις που τέθηκαν σε λειτουργία μετά τις 31/5/2011 με στόχο την ευθυγράμμιση του επιπέδου των FIT με την εξέλιξη του κόστους της Φ/Β τεχνολογίας και παράλληλα με τη διατήρηση σταθερότητας και εμπιστοσύνης στην αγορά. Οι βασικές αλλαγές που ενσωματώνονται στο Conto Energia IV περιλαμβάνουν την ανά μήνα βαθμιαία μείωση του συστήματος αποζημίωσης (*degressions*) και ο καθορισμός ανώτατου ορίου χρηματοδότησης για τα μεγάλα συστήματα. Επιπλέον παρέχεται 5% αύξηση επί της στήριξης εάν το 60% του επενδυτικού κόστους (πάνελ και μετατροπείς) προέρχεται από εταιρείες που κατασκευάζουν τέτοια προϊόντα εντός της ΕΕ.

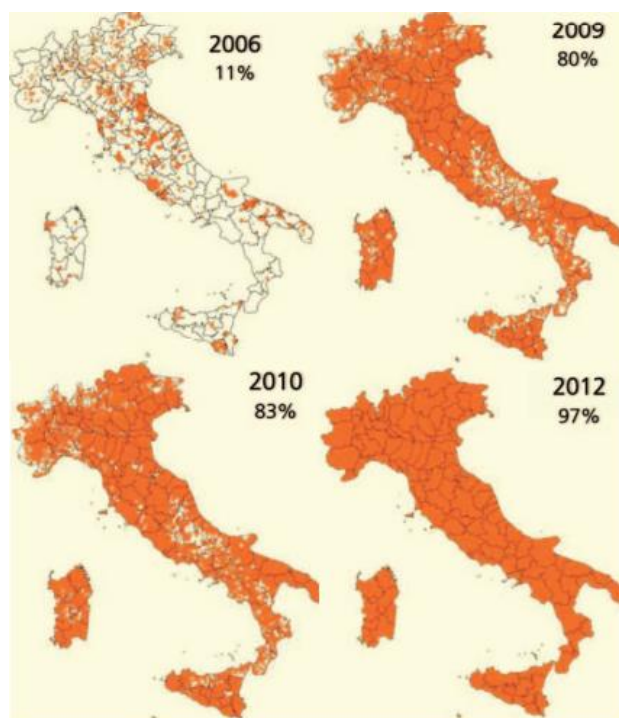
v. **Conto Energia V (5/7/2012):** Το νομοσχέδιο όρισε τις νέες εξαμηνιαίες μειώσεις των αποζημιώσεων και το ανώτατο όριο ετήσιων δαπανών για νέες εγκαταστάσεις αυξήθηκε από 500 εκατομμύρια σε 700 εκατομμύρια ευρώ. Η ισχύς του νομοσχεδίου τερματίστηκε μετά τις 6/7/2013, όταν και το άνω

χρηματοδοτικό όριο των 6,7 δις αποδόθηκε σε νέες συνδέσεις. Κατά τη διάρκεια του νομοσχεδίου, όπου δόθηκε έμφαση στη στήριξη των οικιακών PV (όχι μεγαλύτερα των 12 kW), το 87% των επιτυχών συνδέσεων αποδίδονται σε συστήματα στέγης (Antonelli & Desideri, 2014), (Di Dio et al., 2013), (Gestore Servizi Energetici, 2013).

$P_{εγκ}$ (kW)	€/kWh
$1 \leq P \leq 3$	0,182
$3 < P \leq 20$	0,171
$20 < P < 200$	0,157
$200 < P < 1000$	0,130
$1000 < P < 5000$	0,118
$P > 5000$	0,112

Ποσά στήριξης κατά το διάστημα εφαρμογής του νομοσχεδίου Conto Energia III, όταν και σημειώθηκε η μεγαλύτερη αύξηση επί της συνολικής εγκατεστημένης ισχύος (Gestore Servizi Energetici, 2013).

Διάστημα απόκτησης άδειας παραγωγής - Απόκτηση όρων σύνδεσης με δίκτυο (Ποσά στήριξης σε €/kWh) :			
$P_{εγκ}$ (kW)	31/12/2010-30/4/2011	30/4/2011-31/8/2011	30/4/2011-31/8/2011
$1 < P \leq 3$	0,402	0,391	0,380
$3 \leq P \leq 20$	0,377	0,360	0,342
$20 \leq P \leq 200$	0,358	0,341	0,323
$200 \leq P \leq 1000$	0,355	0,335	0,314
$1000 \leq P \leq 5000$	0,351	0,327	0,302
$P > 5000$	0,333	0,311	0,287



Εικόνα 3.11: Διείσδυση πριμοδοτούμενων με FIT Φ/Β συστημάτων στην ιταλική επικράτεια.

Η ιταλική κυβέρνηση αποφάσισε να προβεί σε σημαντικές μειώσεις στις εγγυημένες αποζημιώσεις μέσω FIT, λόγω των ακόλουθων:

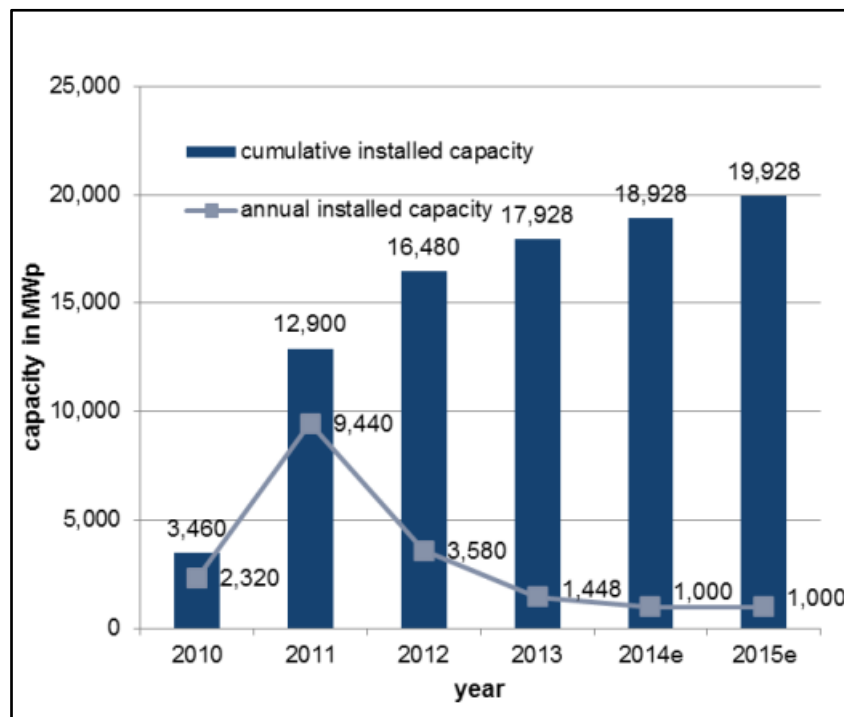
- i. τη σημαντική μείωση του κόστους αγοράς Φ/Β συστημάτων.
- ii. τη βούληση προώθησης άλλων τομέων στους οποίους η εφαρμογή νέων τεχνολογιών μπορεί να δώσει πιο αποδοτικά αποτελέσματα (τομέας μεταφορών, ενεργειακή απόδοση κτιρίων).
- iii. την επακόλουθη επίτευξη του ευρωπαϊκού στόχου παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ στην Ιταλία – 8,6 GW εγκατεστημένης Φ/Β ισχύος έως το τέλος του 2020 με το στόχο να έχει ήδη επιτευχθεί από το 2011.

Συμπερασματικά, η έλλειψη μηχανισμών ελέγχου για την παρακολούθηση των αποτελεσμάτων του μηχανισμού FIT, δηλαδή η στήριξη ενός μη αναμενόμενα υψηλού αριθμού αιτήσεων, η οποία προκάλεσε ανεξέλεγκτες επιβαρύνσεις στον ειδικό λογαριασμούς ΑΠΕ (η επιβάρυνση για τους Ιταλούς καταναλωτές ανέρχεται στα 8 € δις. τα επόμενα 20 χρόνια με τα οικονομικά αυτά κίνητρα να αντιπροσωπεύουν το 20% του κόστους ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας την Ιταλική ως μια από τις πιο ακριβές αγορές), μπορεί να θεωρηθεί ως η αιτία των προβλημάτων που έχουν απασχολήσει από το 2006 έως το 2013 την ιταλική αγορά Φ/Β συστημάτων και οδήγησαν απότομη μείωση των ποσών και στην τελική κατάργηση της συγκεκριμένης μορφής στήριξης για το σύνολο της αγοράς ΑΠΕ.

Μετά τις 6 Ιουλίου 2013 και την κατάργηση της δυνατότητας εξασφάλισης δημόσιας επιδότησης ακόμη και για οικιακές Φ/Β εγκαταστάσεις, η Ιταλική κυβέρνηση παρέχει τα εξής κίνητρα για την προώθηση της αποκεντρωμένης παραγωγής:

- i. *Net Metering (Scambio Sul posto)* ~ Πρόκειται για τον συμψηφισμό παραγωγής-κατανάλωσης, παρέχοντας οικονομική αποζημίωση στους ιδιοκτήτες Φ/Β συστημάτων για την ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που εγχέουν στο δίκτυο με βάση έναν αριθμό παραγόντων. Αυτά περιλαμβάνουν αφενός την οικονομική αξία της ηλεκτρικής ενέργειας που εγχέεται στο δίκτυο, υπολογιζόμενη σύμφωνα με την ωριαία οριακή τιμή συστήματος, την αξία της ενέργειας που απορροφάται από το δίκτυο, το καθαρό ποσό ενέργειας που ανταλλάσσεται καθώς και το κόστος παροχής υπηρεσιών. Επομένως, το δίκτυο χρησιμοποιείται ως ένα εργαλείο για την εικονική αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται, αλλά δεν καταναλώνεται τη στιγμή που παράγεται. Η διαφορά με το κλασικό net metering έγκειται στο γεγονός ότι σε περίπτωση θετικού συμψηφισμού παραγωγής – κατανάλωσης, το θετικό ισοζύγιο μπορεί να αντισταθμίσει ένα πιθανό αρνητικό ισοζύγιο επόμενης περιόδου (J. Schwarz, 2019).

- ii. *Φορολογικές απαλλαγές* ~ Η τελευταία έκδοση μέτρων φορολογικής απαλλαγής έρχεται ως αποτέλεσμα μιας συνολικής προσπάθειας τόνωσης της Ιταλικής οικονομίας με ένα πακέτο στήριξης 55 δις. € εξαιτίας της πανδημικής οικονομικής κρίσης. Τα μέτρα περιλαμβάνουν αύξηση του «οικολογικού μπόνους» για έργα ανακαίνισης κτιρίων από 65% σε 110% καθώς και την αύξηση της υποστήριξης για Φ/Β εγκαταστάσεις και συστήματα αποθήκευσης που σχετίζονται με τέτοια έργα ανακαίνισης, φορολογική μείωση από 50 % έως 110 % επί του συνολικού κόστους, ανάλογα με το ποσό της επένδυσης και τα μέτρα αναβάθμισης (μέγιστη μείωση στα 2400 € ανά kW για Φ/Β και 1000 € για μπαταρίες). Τα συστήματα ιδιοκατανάλωσης που δικαιούνται φοροαπαλλαγή ύψους 110% θα επιτρέπεται να εισάγουν πλεονασματική ενέργεια στο δίκτυο, αλλά όχι υπό το ευνοϊκό καθεστώς της ιταλικής εκδοχής net metering. Αυτό σημαίνει ότι τα πλεονάσματα θα παρέχονται στο δίκτυο δωρεάν, καθιστώντας τη διαστασιολόγηση των συστημάτων με υψηλές αποδόσεις αποθήκευσης, ως πιθανώς πιο επικερδείς επιλογές, προωθώντας με αυτόν τον τρόπο την ένταξη συστημάτων αποθήκευσης στον οικιακό τομέα ([Ministero dello sviluppo economico, 2019](#)).



Εικόνα 3.12: Επίδραση του τερματισμού των FIT μετά την ημερομηνία αναφοράς 6/7/2013.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

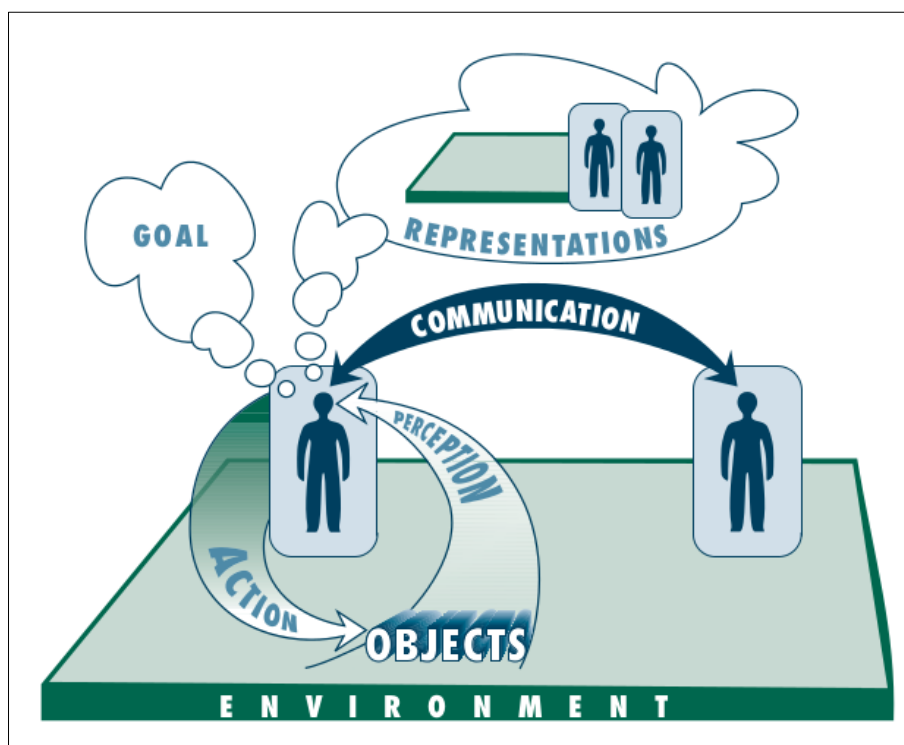
Εφαρμογή βαθμονόμησης του μοντέλου ΑΤΟΜ

4.1 Μεθοδολογικό πλαίσιο τεχνικών μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων (ABM) προς εφαρμογή βαθμονόμησης

Ο πολυδιάστατος χαρακτήρας των προβλημάτων πολιτικής αειφόρου ανάπτυξης τα καθιστά δύσκολα ως προς την επιστημονική τους θεμελίωση και αξιολόγηση. Οι προσεγγίσεις σε μικροσκοπικό και σε μακροσκοπικό επίπεδο υπονοούν διαφορές οι οποίες συμβατικά δεν είναι εύκολο να ενοποιηθούν. Επεξηγηματικά, οι επιστημονικές μελέτες οφείλουν να εξετάζουν τη μεγάλη εικόνα, λαμβάνοντας υπόψη τους δεσμούς εντός του υπό μελέτη συστήματος και μεταξύ άλλων συστημάτων. Ταυτόχρονα, είναι σημαντική η κατανόηση των κοινωνικοοικονομικών και συμπεριφορικών πτυχών ενός προβλήματος για την ποσοτικοποίηση του τι οι κοινότητες εκτιμούν περισσότερο ή ποια επιχειρηματικά κίνητρα είναι πιο αποτελεσματικά. Για την απάντηση σε τέτοιου είδους προβλήματα συχνά απαιτείται μια προσέγγιση από τη βάση προς τα πάνω (bottom-up approach). Η μοντελοποίηση βάσει πρακτόρων αποτελεί ένα δυναμικά χρήσιμο εργαλείο για τη σύνδεση αυτών των πτυχών διότι περιγράφει το σύστημα στο επίπεδο των κοινωνικών παραγόντων που επιδρούν εντός αυτού - δηλαδή, τις μεμονωμένες οντότητες, η κάθε μία με τους δικούς της στόχους, αξίες, κανόνες, πληροφορίες, γνώσεις, στρατηγικές και κοινωνικό πλαίσιο. Με αυτόν τον τρόπο, η τεχνική μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων μπορεί να βοηθήσει στην αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας των σύγχρονων προβλημάτων πολιτικής, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται παράλληλα με άλλες μεθόδους.

Σε επίπεδο μοντελοποίησης, η περιγραφή κάθε οντότητας περιλαμβάνει ένα σύνολο οδηγιών και κανόνων. Λαμβάνοντας υπόψη τους στόχους και άλλες εσωτερικές πληροφορίες, όπως για παράδειγμα τη γνώση, τις πεποιθήσεις και τις αξίες κάθε οντότητας, οι ενέργειές τους διαμορφώνονται με μοναδικό τρόπο. Αυτός ο συνδυασμός δεδομένων – κανόνων για κάθε μοναδικό πράκτορα τους επιτρέπει, στην πράξη, να κωδικοποιούνται ως αυτόνομες μονάδες που εκπροσωπούν διαφορετικές κοινωνικές οντότητες. Στη συνέχεια διενεργούνται προσομοιώσεις προς διερεύνηση των αποτελεσμάτων των αλληλεπιδράσεών τους, όπως μοτίβα ενιαίων συμπεριφορών ή μετατοπίσεις ανάλογα τις αλλαγές κοινωνικο-τεχνικές νομοθετικές ρυθμίσεις. Κατά αυτό τον τρόπο, η μοντελοποίηση κάθε πράκτορα μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο για τη δημιουργία πολλών αντιγράφων και με τον τρόπο αυτό να κατασκευαστεί ένα ολοκληρωμένο μοντέλο ανάλυσης τύπου κοινωνικού συνόλου. Η προσέγγιση προβλημάτων με αυτή την τεχνική αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο προς ρυθμιστικούς φορείς, όσων αφορά την εκτίμηση της τροχιάς υλοποίησης πολιτικών που

περιλαμβάνουν την κοινωνική αποδοχή και συμμετοχή (π.χ. ΕΣΕΚ 2030) ανάλογα με τα παρεχόμενα ανά φάση κίνητρα, τα οποία χρησιμοποιούνται ως είσοδοι στο πρόβλημα μοντελοποίησης καθώς και στη διεξαγωγή προσομοιώσεων (Taylor et al., 2016).



Εικόνα 4.1: Μια απεικόνιση της έννοιας της μοντελοποίησης που βασίζεται σε οντότητες.

Το μεθοδολογικό πλαίσιο προς εξέταση αφορά την ιστορική εξέταση της διάχυσης της Φ/Β τεχνολογίας στον οικιακό τομέα σε αντιπροσωπευτικά κράτη-μέλη της ΕΕ και τη συνεπακόλουθη εξέταση πολιτικών (ιδιοκατανάλωση με συστήματα αποθήκευσης) για την εξέταση της επίτευξης των στόχων που ορίζουν τα ΕΣΕΚ κάθε μελετώμενης χώρας και με ποιο μίγμα στήριξης υλοποιείται η βέλτιστη διείσδυση. Αυτό προσδιορίζεται με τη βοήθεια του υπολογιστικού εργαλείου ATOM, το οποίο αποτελείται από τις παρακάτω τρεις κύριες ενότητες μοντελοποίησης:

- i. **Ενότητα βαθμονόμησης** ~ Καθορισμός του συνόλου των βασικών παραμέτρων που διέπουν τη συμπεριφορά των οντοτήτων και εύρεση του κατάλληλου εύρους τιμών ανά παράμετρο βάσει ιστορικών δεδομένων και παρατηρήσεων.
- ii. **Ενότητα ανάλυσης ευαισθησίας** ~ Ποσοτικοποίηση και εξέταση των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά και τα κριτήρια λήψης αποφάσεων των οντοτήτων, βάσει των αποτελεσμάτων της βαθμονόμησης των παραμέτρων. Δίνεται έμφαση στις μη προφανείς παραμέτρους όπως το κόστος της υπό μελέτη τεχνολογίας.
- iii. **Ενότητα ανάλυσης σεναρίων** ~ Διεξαγωγή προσομοίωσης σε μελλοντικό χρονικό ορίζοντα, λαμβάνοντας υπόψη τις ιστορικές παρατηρήσεις, της αληθοφανούς

συμπεριφοράς των οντοτήτων που δυνητικά υιοθετούν ή όχι την επένδυση, στο υπό μελέτη γεωγραφικό και κοινωνικοοικονομικό πλαίσιο, για προγράμματα πολιτικής ενδιαφέροντος και εξέταση της τροχιάς των αποτελεσμάτων.

Με βάση την παραπάνω περιγραφή, ως πρώτο βήμα πρέπει να καθοριστεί σωστά το σύνολο των βασικών παραμέτρων (agent related parameters) που διέπουν τη συμπεριφορά και τη διαδικασία λήψης αποφάσεων των πρακτόρων, οι οποίοι στην προκειμένη περίπτωση είναι ιδιοκτήτες νοικοκυριών που στην προσομοιούμενη χρονική περίοδο είτε υιοθετούν είτε απορρίπτουν την υπό μελέτη τεχνολογία. Ο στόχος του μοντέλου είναι η απόκτηση μιας βαθύτερης κατανόησης σχετικά με την εσωτερική δυναμική της υιοθεσίας Φ/Β και την εξέλιξη της κοινής γνώμης, από την οποία μπορεί κανείς να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητα των οικονομικών κινήτρων ως προς την τελική διείσδυση και την επίτευξη ή όχι των επιθυμητών στόχων. Σημειώνεται ότι για την ποσοτικοποίηση του μοντέλου, οι σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών ελέγχου περιγράφονται χρησιμοποιώντας μαθηματικές εξισώσεις με ντετερμινιστικές τιμές (δεν εκφράζονται ως πιθανότητες) και σαν αποτέλεσμα τα προς εξέταση αριθμητικά εύρη τιμών είναι σαφώς καθορισμένα. Οι παράμετροι που ορίζουν την κάθε οντότητα του μοντέλου είναι οι ακόλουθες:

- i. **Αρχικές Πεποιθήσεις (*Initial beliefs*):** Κάθε οντότητα έχει μια ιδιωτική αρχική πεποίθηση σχετικά με τις αναμενόμενες ετήσιες καθарές ταμειακές ροές από την επένδυση σε ένα Φ/Β σύστημα ισχύος 300 Wp (δηλώνει τη μέση ισχύ ανά πάνελ). Αυτή η πεποίθηση εκφράζεται μαθηματικά ως μια κανονική κατανομή (Gauss) με μέση τιμή μ^{CF} και τυπική απόκλιση ρ^{CF} . Χαμηλές τιμές της παραμέτρου ρ^{CF} αντανακλούν ευελιξία στις πεποιθήσεις (δηλαδή λίγα στοιχεία επαρκούν για να μετατοπίσουν τις πεποιθήσεις της οντότητας) ενώ χαμηλές τιμές της παραμέτρου μ^{CF} αντικατοπτρίζουν την απαισιοδοξία της οντότητας σχετικά με τις ετήσιες αποδόσεις της επένδυσης. Ως αποτέλεσμα, ισχύει ότι:

High μ^{CF} , Low ρ^{CF} —————> Προθυμία στην ανάληψη επενδυτικού ρίσκου.

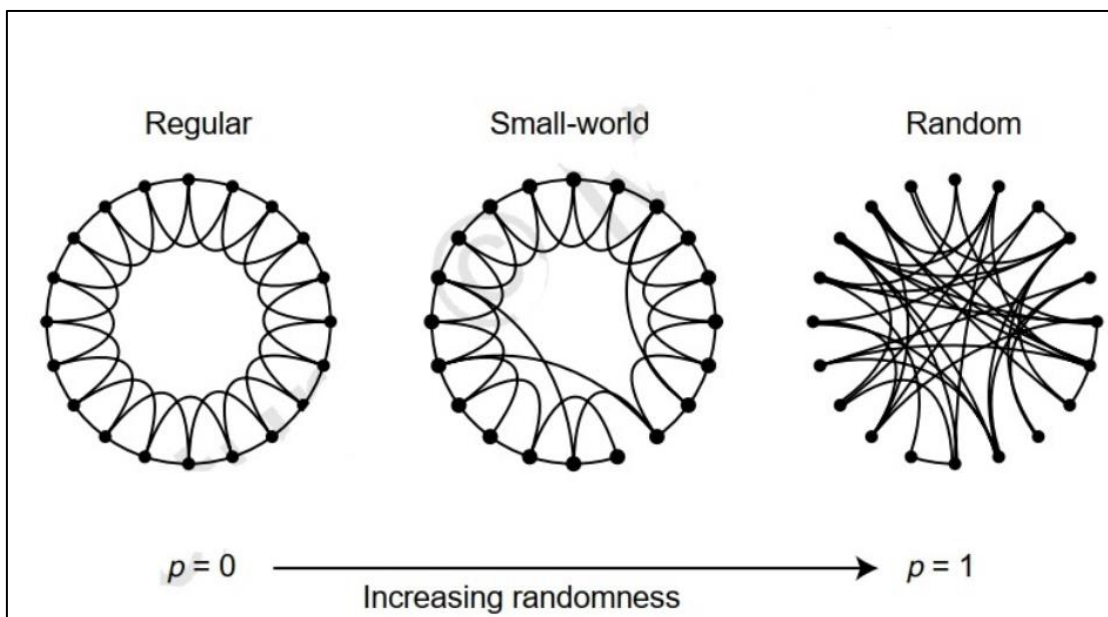
Low μ^{CF} , High ρ^{CF} —————> Αποφυγή επωμισμού επενδυτικού ρίσκου.

Στα πλαίσια της υλοποίησης του ATOM, οι αρχικές πεποιθήσεις κάθε οντότητας προσδιορίζονται κατά τυχαίο τρόπο από δύο καθολικές (με ισχύ για κάθε οντότητα) πιθανοτικές κατανομές, μία για τη μέση τιμή μ^{CF} και μία και τη τυπική απόκλιση ρ^{CF} αντίστοιχα, ενώ τα αριθμητικά εύρη των παραμέτρων καθορίζονται επακριβώς μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης (Papadelis & Flamos, 2018).

- ii. **Κοινωνική εκμάθηση (*Social learning*):** Η κοινωνική δομή του μοντέλου, που εκφράζει την επικοινωνία και την αλληλεπίδραση μεταξύ των οντοτήτων, επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τη λήψη της απόφασης της υιοθέτησης μίας τεχνολογίας. Μια ευρέως αποδεκτή μέθοδος για την αναπαράσταση τέτοιου τύπου διαύλων επικοινωνίας

είναι ο αλγόριθμος «Small-World Network» που αναπτύχθηκε από τους Watts και Strogatz το έτος 1998. Τα SWN βασίζονται στην ιδέα με την οποία κάθε άτομο συνδέεται με οποιοδήποτε άλλο εντός του κοινωνικού δικτύου μέσα από έξι βαθμούς διαχωρισμού (six degrees of separation) και χαρακτηρίζονται από την υψηλή πυκνότητα διασυνδέσεων μικρού μήκους, προσομοιάζοντας με επαρκή τρόπο τις πραγματικές κοινωνικές κοινότητες (Watts & Strogatz, 1998).

Στο υπό εξέταση μοντέλο, κάθε οντότητα λαμβάνει πληροφορίες από τις οντότητες που ανήκουν στον κοινωνικό της περίγυρο και που έχουν ήδη επενδύσει σε οικιακά Φ/Β συστήματα. Αυτές οι πληροφορίες αφορούν κατά κύριο λόγο την κερδοφορία των επενδύσεών τους σε κάθε χρονικό σημείο και χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση των πεποιθήσεων της κάθε οντότητας. Επίσης, ο αριθμός των συνδέσεων ανά κόμβο διατηρείται σταθερά χαμηλός, κατ' αναλογία της λογικής των SWN, γεγονός που οφείλεται στο ότι στην πραγματικότητα οι επενδυτικές αποφάσεις τείνουν να επηρεάζονται από έναν μικρό κύκλο ανθρώπων (π.χ. οικογένεια και στενοί φίλοι).



Εικόνα 4.2: Τυχαία διαδικασία αναδιάταξης των κόμβων για παρεμβολή μεταξύ ενός κανονικού πλέγματος και ενός τυχαίου δικτύου. Παρατηρούμε ότι τα SWN εμπεριέχουν ένα μικρό βαθμό τυχαιότητας, κρίνοντας από τις τυχαίες αναδιατάξεις (*shortcuts*) στο γράφο.

- iii. **Αντίσταση ως προς την υλοποίηση επένδυσης σε Φ/Β (Resistance towards PV investment):** Η αντίσταση των οντοτήτων μοντελοποιείται ως το σταθμισμένο άθροισμα δύο παραμέτρων: (α) Την *κερδοφορία* της επένδυσης, εκφρασμένη στο δείκτη της περιόδου αποπληρωμής. Γίνεται η υπόθεση ότι οι οντότητες μπορούν να χρησιμοποιήσουν τις πεποιθήσεις τους σχετικά με τις αναμενόμενες ταμειακές εισροές ώστε να εκτιμήσουν την κερδοφορία της επένδυσης. Κατ' αναλογία των αρχικών

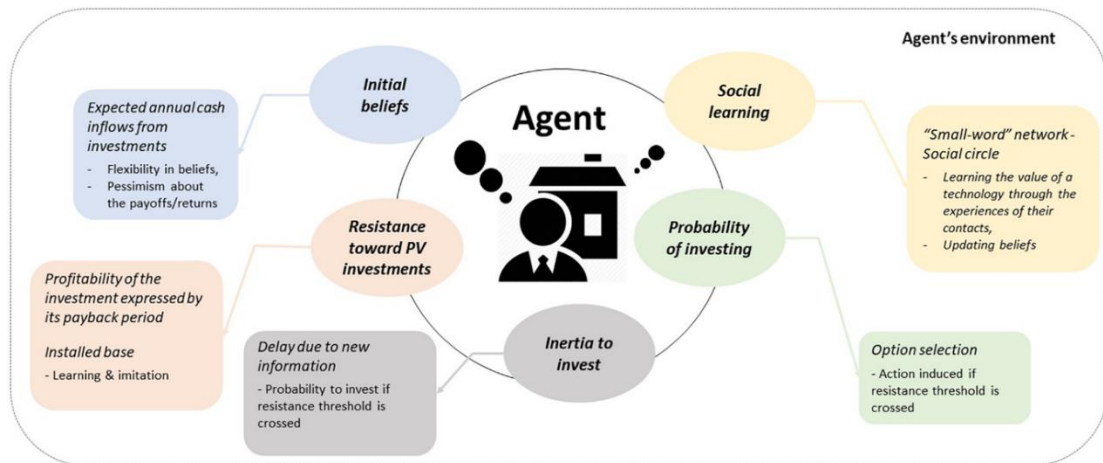
πεποιθήσεων, περιγράφονται πιθανοτικά υπό κανονική κατανομή, με την πιθανότητα η προεξοφλημένη περίοδος αποπληρωμής να είναι ίση με $i = 1, 2, \dots, n$ να ορίζεται ως ακολούθως:

$$z_i = \frac{\mu^{CF} \cdot \sum_t^i \left(\frac{1}{(1+d)^t} \right) - capex}{\frac{i}{\rho^{CF}}} \cdot N(0, 1) ,$$

όπου $capex$ προσδιορίζεται ως το αρχικό κεφάλαιο για την υλοποίηση της επένδυσης, d ο συντελεστής προεξόφλησης και z_i η πιθανότητα η προεξοφλημένη περίοδος αποπληρωμής να είναι ίση με i . Υποθέτοντας ότι η κάθε οντότητα αξιολογεί την επένδυση με βάση το χρονικό διάστημα που θα έχει αποπληρωθεί με πιθανότητα ίση με $z_i = 90\%$, ο παραπάνω τύπος υπολογίζει την αντίστοιχη περίοδο αποπληρωμής i . (β) Η διαφορά μεταξύ του συνολικού αριθμού των χρησιμοποιούμενων οντοτήτων στην προσομοίωση και του αριθμού αυτών που έχουν ήδη επενδύσει σε οικιακά Φ/Β σε μια δεδομένη χρονική περίοδο i . Ισχύει ότι όσο ελαττώνεται η διαφορά, τόσο μεγαλύτερη είναι η εγκατεστημένη βάση, η αύξηση της οποίας οδηγεί στην ελάττωση του υπό μελέτη μεγέθους της αντίστασης. Με το συγκεκριμένο όρο αναδεικνύεται η σημασία της επιρροής που ασκεί σε μια μεμονωμένη οντότητα ο κοινωνικός της περίγυρος προς την υλοποίηση ή όχι μιας επένδυσης εντάσεως κεφαλαίου. Τέλος, σημειώνεται ότι τα βάρη του σταθμισμένου αθροίσματος προέρχονται από μια καθολική κατανομή πιθανότητας, ενώ τα αριθμητικά εύρη των παραμέτρων καθορίζονται επακριβώς μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης (Papadelis & Flamos, 2018).

- iv. **Πιθανότητα υλοποίησης επένδυσης (Probability of investing):** Οι οντότητες έχουν μια τιμή κατωφλίου για την παράμετρο αντίστασής τους. Όταν η παράμετρος είναι μικρότερη από την τιμή κατωφλίου, είναι πιθανή η ανάληψη επένδυσης δράσης (αλλά όχι απαραίτητα). Για τη φάση βαθμονόμησης, έγινε η υπόθεση ότι όταν οι οντότητες αποφασίζουν να επενδύσουν σε ένα Φ/Β σύστημα, το μέγεθός του δίνεται από την εμπειρική κατανομή πιθανότητας που προέρχεται από το διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα για κάθε χώρα υπό εξέταση.
- v. **Αδράνεια ως προς την υλοποίηση επένδυσης (Inertia to invest):** Ένας βασικός παράγοντας για τον οποίο οι καινοτομίες χρειάζονται χρόνο για να διαδοθούν, είναι το γεγονός ότι οι άνθρωποι αργούν να προσαρμοστούν σε νέες πληροφορίες και να ενεργήσουν με βάση τα νέα δεδομένα. Αυτή η υπόθεση οδηγεί σε ένα ιδιαίτερα ανιχνεύσιμο μοντέλο που έχει μελετηθεί σε άλλα πλαίσια, ιδίως σε μοντέλα ετερογενούς διάρκειας (Young, 2009). Κατά συνέπεια, η παράμετρος που περιγράφει την αδράνεια έχει εισαχθεί στο μοντέλο ως μια καθολική τιμή για κάθε οντότητα της προσομοίωσης, αντιπροσωπεύοντας την πιθανότητα διεξαγωγής επένδυσης υπό την

προϋπόθεση της τήρησης της συνθήκης κατωφλίου της παραμέτρου της αντίστασης. Ωστόσο, πρέπει να διευκρινιστεί το γεγονός πως η αδράνεια διατηρείται σταθερή κατά τη διαδικασία βαθμονόμησης, καθότι μια πιθανή αλλαγή της τιμής της – χωρίς την ταυτόχρονη μεταβολή του αριθμού των υπό προσομοίωση οντοτήτων – επηρεάζει, στο τέλος της εξεταζόμενης περιόδου, το ποσοστό της υιοθέτησης της τεχνολογίας υπό εξέταση (Papadelis & Flamos, 2018)



Εικόνα 4.3: Οπτική απεικόνιση των παραμέτρων των οντοτήτων, τα εύρη των οποίων θα καθοριστούν επακριβώς μέσω της διαδικασίας βαθμονόμησης (V. Stavrakas et al., 2019).

Τα αρχικά εύρη τιμών των παραμέτρων προσδιορίστηκαν σε αρχική φάση αυθαίρετα, όπως παρουσιάζεται στον πίνακα παρακάτω:

Variables	Min	Max	Parameter Category
Initial belief_mu (shape parameter)	100	250	Initial beliefs
Initial belief_std (shape parameter)	10	50	
Precision_mu (scale parameter)	10	50	Social learning
Precision_std (scale parameter)	5	20	
Payback_mu (shape parameter)	0.5	5	Resistance toward PV investments
Payback_std (shape parameter)	0.1	1	
Installed_Base_mu (shape parameter)	0.5	5	
Installed_Base_std (scale parameter)	0.1	1	
Propensity_mu (shape parameter)	10	30	Probability of investing
Propensity_std (scale parameter)	5	10	
Inertia	0.01		Inertia to invest

Πίνακας 4.1: Αρχικά εύρη Agent-related παραμέτρων.

, όπου :

Shape parameter της καθολικής πιθανοτικής κατανομής: Παράμετροι που προσδιορίζουν τη μορφή/τροχιά της καμπύλης και είναι ανεξάρτητες της κλίμακας των προσομοιούμενων οντοτήτων.

Scale parameter της καθολικής πιθανοτικής κατανομής: Παράμετροι που καθορίζουν τη διασπορά των παραμέτρων γύρω από το μέσο όρο. Εξαρτώνται άμεσα από το πλήθος των προσομοιούμενων οντοτήτων.

Η βαθμονόμηση των παραμέτρων του μοντέλου ATOM για τις χώρες υπό εξέταση, είναι βασισμένη σε ιστορικά δεδομένα συνθηκών της αγοράς (π.χ. κόστη τεχνολογίας, τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο δίκτυο) και στις πραγματοποιηθείσες αιτήσεις ιδιωτών για όρους σύνδεσης με τους διαχειριστές δικτύων διανομής. Με δεδομένη όμως τη **διαφορά κλίμακας** ανάμεσα στην προσομοιούμενη και την πραγματική τελική εγκατεστημένη ισχύ, καθώς και τον περιορισμένο αριθμό των υπό μελέτη οντοτήτων του μοντέλου (**1000 agents**), οι αντίστοιχες τροχιές διάχυσης Φ/Β τεχνολογίας σε κάθε σενάριο οριοθετήθηκαν στην κλίμακα **[0, 1]**, επιτρέποντας την τελική σύγκριση με τις αντίστοιχες πραγματικές τροχιές, στο διάστημα εφαρμογής της βαθμονόμησης. Έτσι, η βαθμονόμηση πραγματοποιήθηκε υποθέτοντας ότι το μοντέλο αντιπροσωπεύει την πραγματικότητα ικανοποιητικά εάν μπορεί να αναπαράγει τους ιστορικούς ρυθμούς ανάπτυξης για Φ/Β εγκαταστάσεις. Με άλλα λόγια, η μέθοδος στοχεύει στην αναζήτηση παρόμοιων σχημάτων της *αθροιστικής κατανομής* της Φ/Β διείσδυσης ανά περίπτωση, με την κλίμακα αυτής να είναι αναπόφευκτα διαφορετική. Για την αποφυγή προβλημάτων μη αναγνωσιμότητας του μοντέλου (*overfitting*), τέθηκε σαν σημείο αναφοράς η διάμεσος της τελικής εγκατεστημένης ισχύος των διαφορετικών σεναρίων να είναι ίση με τη μονάδα, με τα δεδομένα εισόδου να υφίστανται κανονικοποίηση (V. Stavrakas et al., 2019).

4.2 Μαθηματική διατύπωση μοντέλων βαθμονόμησης και ανάλυσης ευαισθησίας

Η διαδικασία βαθμονόμησης των παραμέτρων προαπαιτεί αρχικά τον σαφή προσδιορισμό των χαρακτηριστικών παραμέτρων των οντοτήτων και έπειτα την αυθαίρετη αρχικοποίηση αυτών σε ικανοποιητικά εύρη τιμών, τα οποία θα χρησιμοποιηθούν ως είσοδοι στο μαθηματικό μοντέλο που θα καταδείξει τις συσχετίσεις μεταξύ αυτών, στα πλαίσια της αναζήτησης συμπεριφορικών μοτίβων ως προς την υιοθέτηση ή όχι της επενδυτικής απόφασης. Η ανάλυση των μεταβλητών ενός συστήματος τεχνικών μοντελοποίησης βάσει πρακτόρων αποτελεί μια πολύπλοκη υπολογιστική διαδικασία, καθώς οι συσχετίσεις μεταξύ των παραμέτρων εισόδου συνήθως είναι μη γραμμικές, συνεπώς κάθε μεμονωμένη εκτέλεση του μοντέλου απαιτεί σημαντικό επεξεργαστικό χρόνο και ισχύ. Επομένως, για την αντιμετώπιση τέτοιου είδους προβλημάτων, έχει αποδειχτεί πολύτιμη η τεχνική της στατιστικής εξομίωσης, στην οποία κατασκευάζεται ένα στατιστικό υπολογιστικό μοντέλο του συστήματος που επιτρέπει την εις

βάθος ανάλυση μοντέλου για την - όσο το δυνατόν - πιστότερη αναπαραγωγή της μη γραμμικής συμπεριφοράς του μοντέλου.

Η βαθμονόμηση στο ATOM πραγματοποιείται στη βάση της έννοιας των εξομοιωτών Γκαουσιανών Διαδικασιών (*Gaussian Process - GP*), καθώς είναι, μια συνήθης πιθανολογική προσέγγιση ενός συστήματος μοντελοποίησης. Η πιθανοτική φύση τέτοιου είδους εξομοιωτών τους καθιστά ιδανικούς για τον ποσοτικό προσδιορισμό της αβεβαιότητας βάσει των εκτιμήσεών τους, καθώς και για τον τρόπο που η παραμετρική αβεβαιότητα του μοντέλου αντανακλάται στα αποτελέσματά τους. Η μαθηματική περιγραφή των εξομοιωτών GP για την εφαρμογή παλινδρόμησης, συνίσταται στην ακόλουθη υπόθεση:

Έστω συνάρτηση $f(x)$ όπου πρέπει να εκτιμηθεί η αξία αυτής στα σημεία εισόδου x_1, x_2 και x_3 . Εφόσον πιστεύουμε ότι μια κατάλληλη δεσμευμένη (*prior*) τιμή κάθε μεταβλητής της $f(x)$ ακολουθεί κανονική κατανομή Gauss, η ιδιότητα περιθωριοποίησης (για συνεχείς τυχαίες μεταβλητές) της πολυμεταβλητής κατανομής μας επιτρέπει να γράψουμε την εξής συνθήκη:

$$f(x) = \begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ f(x_3) \end{bmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ f(x_3) \end{bmatrix} \mid \begin{bmatrix} m_f(x_1) \\ m_f(x_2) \\ m_f(x_3) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \sigma_f^2(x_1) & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_f^2(x_1) & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_f^2(x_1) \end{bmatrix} \right) \quad (4.1)$$

, όπου $m_f(x_i)$ είναι η μέση τιμή της $f(x_i)$ και $\sigma_f^2(x_i)$ η διακύμανσή της. Εάν επίσης γνωρίζουμε ότι οι εισοδοί της $f(x)$ εμφανίζουν μια είδους συσχέτιση μεταξύ τους, μπορούμε να υποθέσουμε ότι οι τιμές της συνάρτησης ακολουθούν μια από κοινού κατανομή Gauss, έτσι ώστε να εμφανίζουν μια συνδιακύμανση $k_f(x, x^*)$ μεταξύ τους, η οποία εκφράζεται από τη σχέση $k_f(x, x^*) = Cov[f(x), f(x^*)]$ (4.2), όπου x, x^* οι διαφορετικές εισοδοί. Συνεπώς, για την περίπτωση της τρισδιάστατης κατανομής που περιγράφεται στη σχέση (4.1), η εξίσωση αποκτάει την ακόλουθη μορφή:

$$f(x) = \begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ f(x_3) \end{bmatrix} \sim N \left(\begin{bmatrix} f(x_1) \\ f(x_2) \\ f(x_3) \end{bmatrix} \mid \begin{bmatrix} m_f(x_1) \\ m_f(x_2) \\ m_f(x_3) \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} k_f(x_1, x_1) & k_f(x_1, x_2) & k_f(x_1, x_3) \\ k_f(x_2, x_1) & k_f(x_2, x_2) & k_f(x_2, x_3) \\ k_f(x_3, x_1) & k_f(x_3, x_2) & k_f(x_3, x_3) \end{bmatrix} \right) \quad (4.3)$$

Η γενική περίπτωση της (4.3) για ένα δυνητικά άπειρο αριθμό μεταβλητών αποτελεί μια GP, η οποία κατ' αναλογία μιας τυπικής Gaussian κατανομής, προσδιορίζεται από μία συνάρτηση μέσης τιμής αντί για ένα διάνυσμα και μια συνάρτηση συνδιακύμανσης αντί για ένα πίνακα (Rasmussen et al., 2006). Χαρακτηριστικές ιδιότητες κάθε GP είναι:

- i. Η περιθώρια κατανομή τους για κάθε $\mathbf{x} = \mathbf{x}_i$ είναι κανονική και περιγράφεται από τη σχέση

$$f(x_i) \sim N[m_f(x_i), k_f(x_i, x_i)] \quad (4.4)$$

- ii. Η από κοινού κατανομή κάθε τυχαίου δείγματος $\mathbf{X} = \{x_i, i = 1, \dots, n\}$, αποτελούμενη από n ζεύγη εισόδων είναι επίσης κανονική με συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που ορίζεται από τη σχέση

$$p(f | X) = N[f | m_f(X), K_{ff}(X)] \quad (4.5).$$

Σημειώνεται ότι ο όρος k_f ορίζεται και ως ο πυρήνας της GP με τον πίνακα συνδιακύμανσης K_{ff} να σχηματίζεται από τον υπολογισμό των επιμέρους όρων k_f για κάθε τιμή του συνόλου X . Από τη στιγμή που επιλεγεί μια συνάρτηση μέσης τιμής και ένας πυρήνας, μπορεί να καθοριστεί μια δεσμευμένη τιμή επί της συνάρτησης $f(x)$, η οποία και αποτελεί μια κατανομή επί πιθανών επιμέρους συναρτήσεων, αντιπροσωπεύοντας την προηγούμενη παραδοχή για το συναρτησιακό χώρο από τον οποίο ενδέχεται να έχουν δημιουργηθεί τα δεδομένα εισόδου. Έτσι, όταν εξετάζεται ένα δείγμα πραγματικών δεδομένων $D = \{(x_i, y_i), i = 1, \dots, n\}$, η δεσμευμένη συνάρτηση κατανομής της GP δοθέντος συνόλου παρατηρήσεων D , είναι ίση με:

$$p(f_* | D) = N(f_* | m_f(X_*) + K_{*f}K_{ff}^{-1}(y - m_f(X)), K_{**} - K_{*f}K_{ff}^{-1}K_{f*}) \quad (4.6)$$

, όπου η μεταβλητή X_* εκφράζει νέα δεδομένα εκτός συνόλου παρατηρήσεων και η συνάρτηση f_* είναι συνεπής τόσο με το νέο σύνολο δεδομένων όσο και με την πολυδιάστατη κανονική κατανομή (*GP prior*). Επομένως, καθίσταται εφικτή η προσαρμογή μιας GP στα αποτελέσματα που προκύπτουν από το συνδυασμό των παραμέτρων των οντοτήτων του μοντέλου, ώστε να χρησιμοποιηθεί η σχέση 4.6 για την εκτίμηση των αποτελεσμάτων, βασισμένων σε διαφορετικούς παραμετρικούς συνδυασμούς, χωρίς να είναι αναγκαία η επανεκτέλεση του μοντέλου προς οικονομία πόρων.

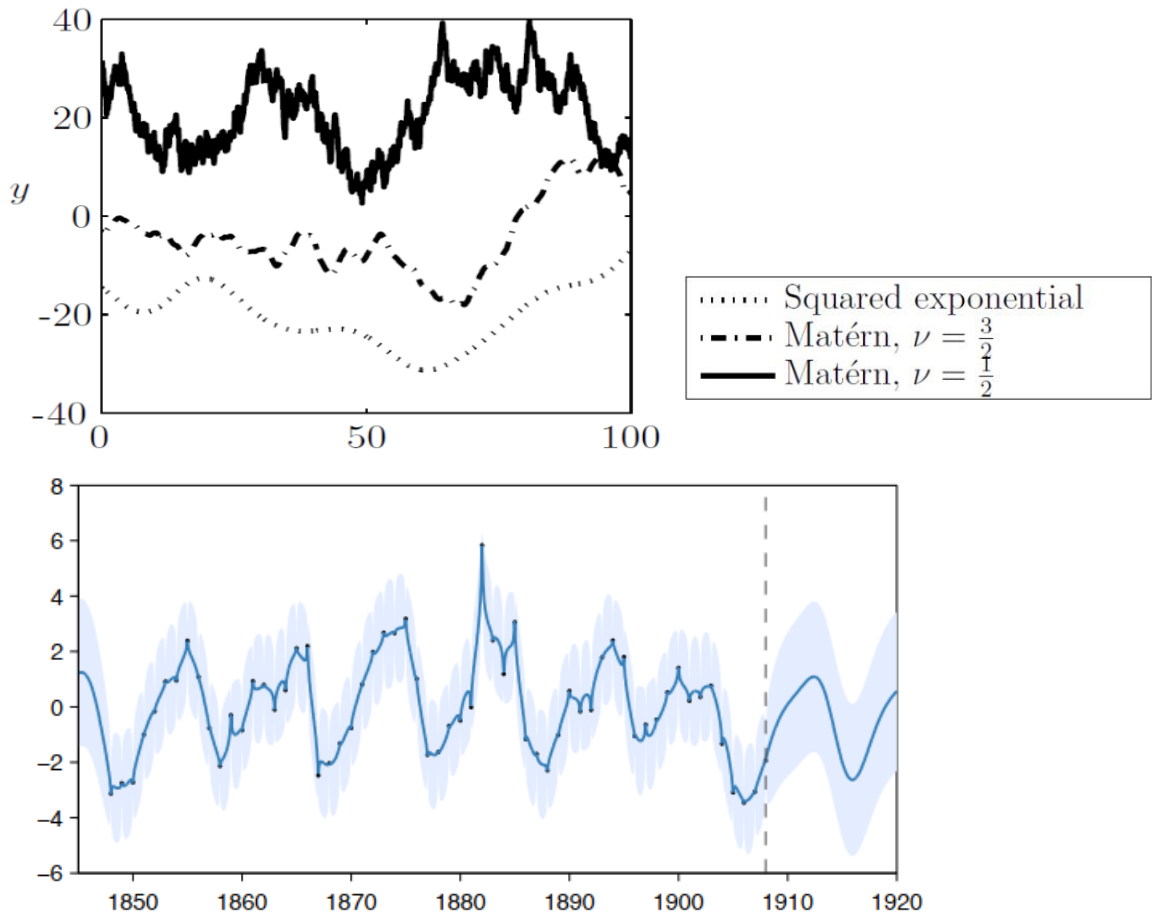
Για την προσαρμογή του εξομοιωτή στα αποτελέσματα του μοντέλου, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση κατανομής Haylock and O'Hagan ([Oakley et al., 2002](#))

$$p(g_j(x)) = N[x | \sum_{i=1}^q h_i(x)\beta_i, k_f(x, x | \theta)] \quad (4.7), \text{ όπου:}$$

$h_i(x)$: συναρτήσεις (ντετερμινιστικές) των παραμέτρων του συστήματος μοντελοποίησης βασισμένο σε οντότητες

β_i : συντελεστές παλινδρόμησης

θ : παράμετρος πυρήνα, ο οποίος μοντελοποιείται από την κλάση Matérn και που είναι κατάλληλη για συναρτήσεις μεταβλητής ομαλότητας (*variable smoothness functions*) ([Oakley et al., 2002](#)), ([Papadelis & Flamos, 2018](#)).



Εικόνα 4.4: Παραδείγματα συναρτήσεων συνδιακύμανσης κλάσης Matérn (Osborne, 2016).

Το μοντέλο στη συνέχεια βαθμονομείται χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα και παρατηρήσεις για την υπό μελέτη τεχνολογία και για το εκάστοτε γεωγραφικό και κοινωνικοοικονομικό πλαίσιο ενδιαφέροντος, με την υπόθεση ότι οι ιστορικές διακυμάνσεις είναι αντιπροσωπευτικές για την αναπαράσταση της μελλοντικής αβεβαιότητας των τιμών των παραμέτρων, ως ακολούθως:

- i. Τα αρχικά εύρη τιμών κάθε παραμέτρου επιλέχθηκαν αυθαίρετα, με στόχο την προσαρμογή ενός GP εξομοιωτή σε ένα αρκετά μεγάλο χώρο εισόδου.
- ii. Έπειτα, πραγματοποιείται προσαρμογή του εξομοιωτή στα αποτελέσματα του μοντέλου (*GP output data*) που προκύπτουν από πολλαπλούς παραμετρικούς συνδυασμούς (*GP input data*).
- iii. Για τη δημιουργία των δεδομένων εισόδου, αντλούνται τα προκαταρκτικά εύρη για την τιμή της κάθε παραμέτρου και στη συνέχεια το ATOM εκτελείται για **25 διαφορετικά σενάρια**, σε σύνολο 250 συνδυασμών. Οι αρχικοί συνδυασμοί επιλέγονται με τη χρήση της μεθόδου δειγματοληψίας *Maximin Latin Hypercube Sample* (LHS) για την κάλυψη ολόκληρου του χώρου πιθανών εισόδων,

μεγιστοποιώντας έτσι την ελάχιστη απόσταση μεταξύ των σημείων που δημιουργούνται, δεδομένου ότι οι πυρήνες κλάσης Matérn περιγράφονται από τη σχέση $k(x_i, x_j) \propto \frac{\|x_i - x_j\|}{l}$ (4.8), όπου l η απόσταση (συσχέτιση) μεταξύ των σημείων x_i, x_j .

- iv. Στο τέλος της βαθμονόμησης, εάν τα εύρη τιμών είναι πολύ στενά, τότε θα πρέπει να επανεξεταστούν από το χρήστη, ενώ εάν είναι ευρύτερα από το επιθυμητό, τότε εκτελείται ανάλυση ευαισθησίας (SA), ώστε να καθοριστεί εάν και για ποιες παραμέτρους ισχύει αυτό.

Εφόσον οι βασικές παράμετροι που περιγράφουν τις οντότητες καθώς και τα προκαταρκτικά εύρη αυτών έχουν καθοριστεί, με στόχο την προσαρμογή του GP εξομοιωτή σε ένα αρκετά μεγάλο χώρο εισόδων, είναι απαραίτητη σαν **επόμενο βήμα** η εκτέλεση SA για την παραμετροποίηση της αβεβαιότητας των δεδομένων της προσομοίωσης. Η μέθοδος της SA εξηγεί ποιες από τις παραμέτρους d του συνόλου δεδομένων εισόδου $X = \{x_j, j = 1, \dots, d\}$ είναι περισσότερο υπεύθυνες για την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων του μοντέλου. Συγκεκριμένα, η εκτέλεση της SA συνίσταται στα ακόλουθα βήματα:

- i. Περιορισμός του εύρους των παραμέτρων που έχουν μόνο μικρό αντίκτυπο στην παραμετρική αβεβαιότητα των εξόδων του μοντέλου. Έτσι, το αρχικό σύνολο δεδομένων γίνεται $X' = \{x'_j, j = 1, \dots, d'\}$.
- ii. Για κάθε στοιχείο j του συνόλου X' , διαιρούμε το αρχικό σύνολο σε δύο υποσύνολα, όπου το πρώτο περιλαμβάνει την επιλεγμένη είσοδο και το δεύτερο περιλαμβάνει τις υπόλοιπες πλην της επιλεγμένης εισόδους και εκφράζεται ως $EX' = \{x'_j, X_{-j}\}$.
- iii. Στη συνέχεια, μπορούμε να αξιολογήσουμε την ευαισθησία της εξόδου του μοντέλου στην αβεβαιότητα που αφορά την είσοδο x_j , μέσω του υπολογισμού της αναμενόμενης μείωσης της διακύμανσης της εξόδου, υποθέτοντας ότι η αληθής τιμή της εισόδου είναι γνωστή. Ο μαθηματικός τύπος που εκφράζει την αναμενόμενη μείωση είναι (Saltelli et al., 2010):

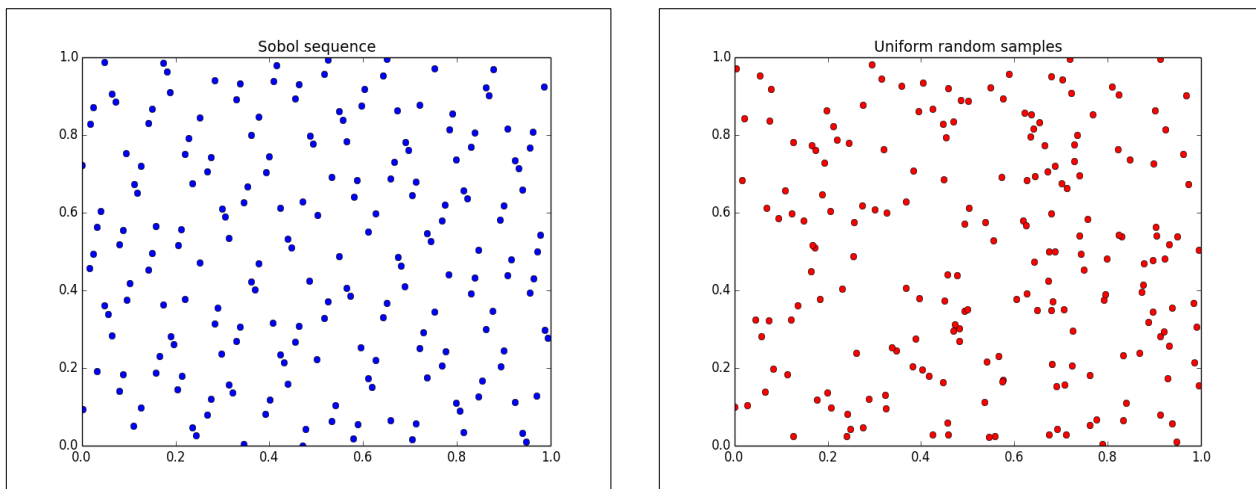
$$\text{Var}_{x_j}(E(y | x_j)) = \frac{1}{N} \sum_1^N \{f(B)_i * (f(A_B^{(j)})_i - f(A)_i)\} \quad (4.9)$$

, όπου A και B αποτελούν ανεξάρτητους $N \times d$ πίνακες οι οποίοι περιέχουν δείγματα των δεδομένων εισόδου.

- iv. Για την παραγωγή των πινάκων A και B εφαρμόζεται μια ακολουθία Sobol, η οποία μέθοδος έχει αποδειχθεί πως ξεπερνά σε αποτελεσματικότητα την απλή μέθοδο δειγματοληψίας Monte Carlo στην εκτίμηση πολυδιάστατων ολοκληρωμάτων,

καλύπτοντας τον μοναδιαίο υπερ-κύβο των δειγματοληπτούμενων σημείων (unit hypercube) με χαμηλότερες αποκλίσεις. Για τη σχέση (4.9) ισχύουν τα εξής:

- a) ο δείκτης j κυμαίνεται από 1 έως d , όπου d είναι ο αριθμός των παραμέτρων, ενώ ο δείκτης i κυμαίνεται από 1 έως N , όπου N είναι ο αριθμός των δειγμάτων εισόδου.
 - b) Ο όρος $f(A)_i$ αντιπροσωπεύει το i -οστό στοιχείο του διανύσματος, που αποτελεί έξοδο του GP εξομοιωτή όταν εκτιμάται για $X_* = A$.
 - c) Ο όρος $A_B^{(j)}$ αντιπροσωπεύει ένα πίνακα όπου η στήλη j προέρχεται από τον πίνακα B και όλες οι υπόλοιπες γραμμές προέρχονται από τον πίνακα A .
 - d) Οι πίνακες A και B δημιουργούνται από μια ακολουθία Sobol μεγέθους $N \times 2d$ με τον A να αποτελεί το πρώτο μισό της ακολουθίας και το B το υπόλοιπο.
- v. Δεδομένης της τιμής διασποράς $\text{Var}_{x_j}(E(y | x_j))$, είμαστε σε θέση να υπολογίσουμε το συντελεστή ευαισθησίας 1^{ης} τάξης S_j (first order Sobol index) που καταγράφει την κύρια επίδραση του x_j στο y ως εξής: $S_j = \frac{\text{Var}_{x_j}(E(y | x_j))}{\text{Var}(y)} \in [0,1]$ (4.10). Βάσει του συγκεκριμένου τύπου, είναι εφικτός ο εντοπισμός των πιο σημαντικών αβέβαιων παραμέτρων.



Εικόνα 4.5.1: Τα παραπάνω σχήματα καταδεικνύουν τις διαφορές μεταξύ της ακολουθίας Sobol και της ομοιόμορφης τυχαίας δειγματοληψίας στην κατανομή των σημείων στο χωρικό πλαίσιο ενός μοναδιαίου υπερ-κύβου (M. Claesens et al., 2014).

- v. Στη συνέχεια, για την αντιμετώπιση της περαιτέρω αβεβαιότητας στο μοντέλο, χρησιμοποιούμε τη μέθοδο Ιστορικής Αντιστοίχισης (*History Matching Method*), η οποία έχει εφαρμοστεί με επιτυχία σε ένα ευρύ φάσμα επιστημονικών πεδίων, συμπεριλαμβανομένης της βαθμονόμησης των συστημάτων μοντελοποίησης βασισμένων σε οντότητες. Η λειτουργία της μεθόδου βασίζεται στον αποκλεισμό

υποσυνόλων του χώρου εισόδων, τα οποία θεωρούνται λιγότερο πιθανά να προσφέρουν ικανή σύγκλιση μεταξύ των εξόδων του μοντέλου και των πραγματικών παρατηρήσεων. Καθώς ο χώρος αληθοφανών λύσεων μειώνεται σε μέγεθος, οι εξομοιωτές γίνονται ολοένα ομαλότεροι και πιο ακριβείς, επιτρέποντάς μας να εστιάσουμε βαθύτερα στον παραμετρικό χώρο εφικτών τιμών με τη δημιουργία νέων εξομοιωτών μετά από κάθε επανάληψη της διαδικασίας συρρίκνωσης του εύρους τιμών (Craig et al., 1997). Η κεντρική έννοια της μεθόδου περιστρέφεται γύρω από την ποσοτικοποίηση των αβεβαιοτήτων που επηρεάζουν τη διαδικασία βαθμονόμησης έτσι ώστε να προκύπτουν οι ακόλουθες μετρικές (αποσύνθεση διακυμάνσεων):

- a) **Μεταβλητότητα συνόλου** (V_{es}), η οποία εκφράζει τη στοχαστική φύση του μοντέλου. Για τον υπολογισμό της, επιλέχθηκε ένας μοναδικός συνδυασμός παραμετρικών τιμών υπό την υπόθεση ότι η μεταβλητότητα είναι ανεξάρτητη των εισόδων. Έπειτα από $K = 25$ εκτελέσεις του μοντέλου, εκτιμήθηκε ότι $V_{es} = 0,002$.
- b) **Αβεβαιότητα προσομοίωσης** (V_{em}), η οποία μελετάει τις διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων του μοντέλου και των αποτελεσμάτων της εξομοίωσης και υπολογίζεται από τη σχέση

$$V_{em} = \frac{1}{K-1} \sum_{k=1}^K (f_{j,k}(x) - g_j(x))^2 = 0,002 \quad (4.11)$$

, όπου $f_{j,k}(x)$ τα αποτελέσματα του μοντέλου για την χρονική περίοδο j κατά την k -οστή εκτέλεση και $g_j(x)$ το αποτέλεσμα του GP εξομοιωτή.

Κατά συνέπεια, βάσει της προσέγγισης της μεθόδου στην εύρεση αντιστοιχίσεων με ιστορικά δεδομένα, γίνεται εκτίμηση του μέτρου αληθοφάνειας για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων, όπου όταν είναι υψηλό, θα υποδηλώνει ότι η αντιστοιχία μοντέλου – πραγματικότητας υπερβαίνει το όριο ανοχής. Η σχέση δίνεται ως εξής:

$$I_j(x) = \frac{|z_j - g_j(x)|}{\sqrt{V_{es} + V_{em}}} \quad (4.12)$$

, όπου z_j οι πραγματικές παρατηρήσεις, κλιμακούμενες στο εύρος $[0,1]$ και $g_j(x)$ η προβλεπόμενη αθροιστική προσαύξηση Φ/Β ισχύος στο τέλος της περιόδου j για κάθε συνδυασμό. Η τιμή αποκοπής για κάθε παραμετρικό συνδυασμό τέθηκε ίση με $I_j(x) = 3$ (Papadelis & Flamos, 2018; Vernon et al., 2010).

- vi. Τέλος, η παραπάνω συνάρτηση χρησιμοποιήθηκε σαν δείκτης για την εφαρμογή της ευρεστικής μεθόδου PRIM, η οποία στοχεύει στην αναγνώριση ορθογώνιων υποδιαίρεσεων (*rectangle boxes*) του χώρου εισόδων, όπου η μέση ομοιογένεια εντός

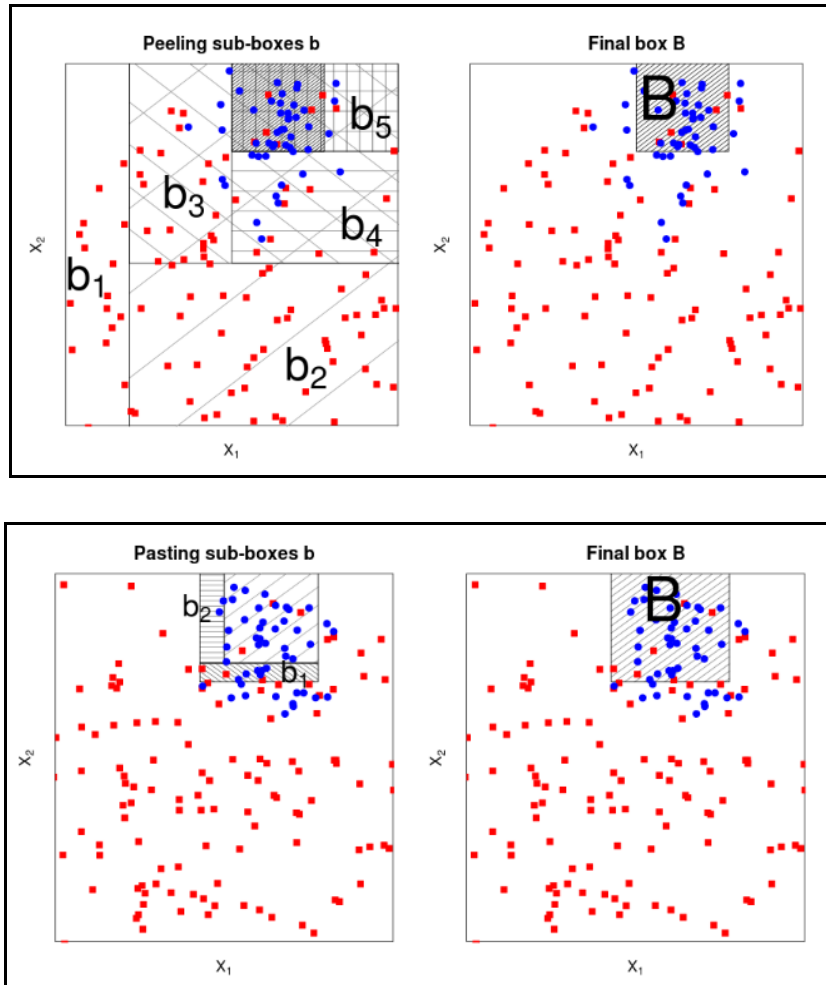
της υποδιαίρεσης υπερβαίνει κατά πολύ τη μέση του δειγματικού χώρου. Η κατηγοριοποίηση των αποκρίσεων διεξάγεται μέσω του στατιστικού συντελεστή *Gini*, που εκφράζεται από τη σχέση

$$GI = 1 - \sum_i p_i^2 \quad (4.13)$$

, όπου p_i εκφράζει την κλάση i της υποδιαίρεσης του δείγματος. Ο δείκτης αυτός καταγράφει το επίπεδο ανομοιογένειας για μια δεδομένη μεταβλητή και πληθυσμό. Διαφέρει μεταξύ 0 (τέλεια ισότητα) και 1 (ακραία ανισότητα, που στο ATOM συναντάται για τις κλάσεις όπου $I_j(x) > 3$). Έπειτα, εφαρμόζεται ένας αλγόριθμος επαγωγής, στον οποίο σε κάθε επανάληψη αφαιρούνται οι υποδιαιρέσεις με τη μέγιστη μέση απόκριση του συνολικού χώρου εισόδων (*Top-down peeling*), μέσω της μεγιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης

$$\max_j \frac{GI_{B1} - GI_{B1-j}}{\beta_{B1} - \beta_{B1-j}} \quad (4.14)$$

με το GI_{B1-j} να εκφράζει το συντελεστή *Gini* της υποδιαίρεσης που προκύπτει αν αφαιρεθούν β_{B1-j} δεδομένα από τη διαστασιακή υποδιαίρεση j (προκύπτει από την αφαίρεση ενός τμήματος δεδομένων κάτω από ένα προεπιλεγμένο ποσοστό α), έως ότου σχηματιστεί ένας χώρος με ελάχιστο αριθμό δεδομένων β , τα οποία τίθενται επίσης σαν προεπιλογή από το χρήστη. Στη συνέχεια εκτελείται μια αντίστροφη διαδικασία, για την αναπροσαρμογή των ορίων του τελικού χώρου, μέχρις ότου μια οποιαδήποτε προσαύξηση του υπο-χώρου θα προκαλούσε την αύξηση της μέσης απόκρισης (*bottom-up pasting*). Η ποιότητα της προκύπτουσας υποδιαίρεσης προσμετράται με τους δείκτες [κάλυψη, πυκνότητα] $\in [0, 1]$. Η κάλυψη είναι ο λόγος του συνολικού αριθμού των συνδυασμών που ικανοποιούν την (4.12) εντός της υποδιαίρεσης προς το συνολικό αριθμό των αποδεκτών συνδυασμών που εντοπίστηκαν σε ολόκληρο το σύνολο δεδομένων, ενώ η πυκνότητα είναι ο λόγος του αριθμού των αποδεκτών συνδυασμών προς τον αριθμό όλων των συνδυασμών εντός της υποδιαίρεσης. Εάν η κάλυψη είναι χαμηλή, τότε είναι πιθανό είτε τα δεδομένα να χαρακτηρίζονται από υψηλά επίπεδα θορύβου είτε να υπάρχουν και υποδιαιρέσεις εντός του ίδιου δειγματικού χώρου με υψηλά επίπεδα πυκνότητας (Papadelis & Flamos, 2018), (Friedman et al., 1999).

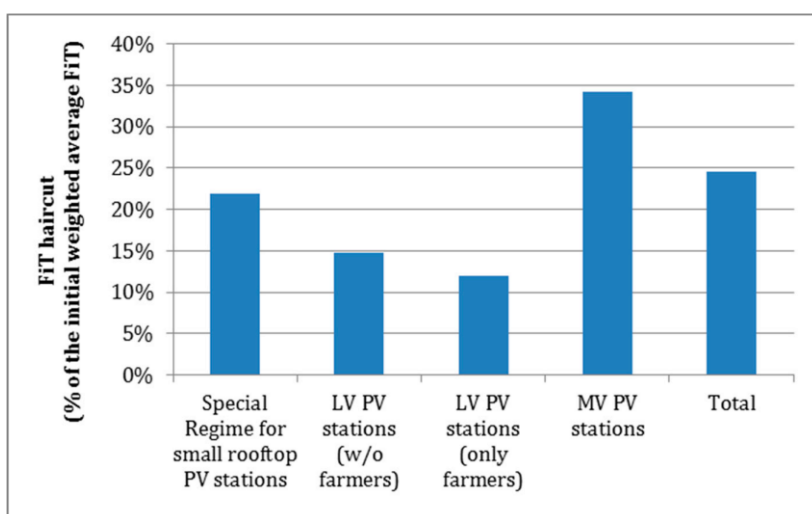


Εικόνα 4.5.2: Παράδειγμα εφαρμογής top-down peeling και bottom-up pasting σε δειγματικό χώρο με δύο ανεξάρτητες μεταβλητές.

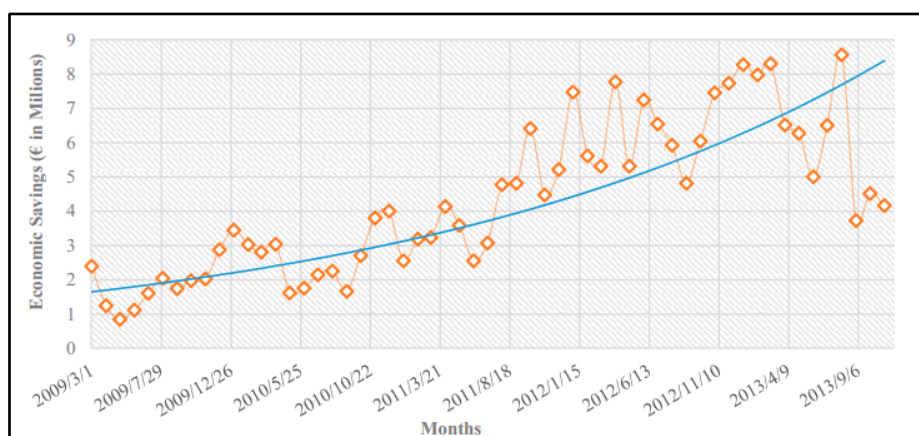
4.3 Εφαρμογή βαθμονόμησης Agent related παραμέτρων ~ Μελέτη περίπτωσης: Ελλάδα

Για το παράδειγμα της Ελλάδας, το ATOM βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα για την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος οικιακών Φ/Β, υπό το μηχανισμό στήριξης FIT, που εφαρμόστηκε κατά την περίοδο 2009 – 2013 ως μέρος της εφαρμογής του σχεδίου «Εθνικό Σχέδιο Δράσης 20-20-20» αλλά και του σχεδίου «Ηλιος», το οποίο προέβλεπε την εξαγωγή καθαρής ενέργειας από την Ελλάδα προς τις χώρες της Κεντρικής Ευρώπης. Αξίζει να επισημανθεί ότι λόγω των ιδιαίτερα ελκυστικών αποδόσεων για την προώθηση της τεχνολογίας, ο αρχικός στόχος για διείσδυση Φ/Β χωρητικότητας ίση με 2,2 GWp επιτεύχθηκε και ξεπεράστηκε κατά 220 MWp έως το τέλος της μελετώμενης περιόδου, προκαλώντας όμως σημαντικά κόστη (άνω των 5 δις. €) που οδήγησαν τον ΕΛΑΠΕ σε σημαντικά ελλείμματα. Αυτή η κατάσταση οδήγησε στη συνέχεια σε μια αρχική έμμεση μείωση ταριφών (πρόσθετη φορολόγηση) καθώς και στη μείωση των αποδόσεων των υφιστάμενων 20 - ετών συμβάσεων (γνωστή και ως «New Deal» (Christoforidis et al., 2016)), όπου υπό το Νόμο 4254/2014

παρατηρήθηκαν μειώσεις αποδόσεων στα Φ/Β χαμηλής τάσης - με εγκατεστημένη ισχύ <100 kW – έως και 30% [6. Σε αυτό το σημείο αξίζει να σημειωθεί πως παρόλα τα σημαντικά ελλείμματα που δημιουργήθηκαν στον ΕΛΑΠΕ από το δυσβάσταχτο κόστος της στήριξης σημαντικού αριθμού έργων, η συνολική συμβολή των τεχνολογιών ΑΠΕ στη μείωση των εισαγωγών φυσικού αερίου – λαμβάνοντας υπόψη τη μηνιαία σταθμισμένη μέση τιμή εισαγωγής του την περίοδο μελέτης – οδήγησε στην αποφυγή εισαγωγών αξίας 98,32 και 147,2 εκατομμυρίων € τις περιόδους 2009 – 2011 και 2012 – 2013 αντίστοιχα. Επομένως, η συνολική επίδραση των συστημάτων αποζημίωσης με σταθερή ταρίφα στα δημόσια οικονομικά κατά τη διάρκεια της εν λόγω περιόδου ήταν θετική (V. Stavrakas et al., 2020).



Εικόνα 4.6.1: Η μείωση των ταριφών (Νόμος 4254/2014) ως ποσοστό του αρχικού σταθμισμένου μέσου ποσού αποζημίωσης (Anagnostopoulos et al., 2017).



Εικόνα 4.6.2: Τα οικονομικά που επιτεύχθηκαν λόγω της υποκατάστασης εισαγωγών φυσικού αερίου για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την παραγωγή ΑΠΕ, κατά την περίοδο 2009-2013 που ίσχυαν οι εγγυημένες ταρίφες (V. Stavrakas et al., 2020).

Διευκρινίζεται ότι καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα προσαύξησης της εγκατεστημένης βάσης ήταν δημόσια διαθέσιμα σε MWp/μήνα, χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα αιτήσεων ιδιωτών για

προσφορά όρων σύνδεσης με τον τοπικό Διαχειριστή Δικτύου Διανομής (αποκλειστικά συστήματα μικρού μεγέθους ή $kWp \leq 10$), τα οποία προσφέρθηκαν κατόπιν ειδικής αίτησης στη ΡΑΕ. Ο παρακάτω πίνακας απεικονίζει τα τεχνοοικονομικά δεδομένα σχετικά με την επέκταση Φ/Β στην Ελλάδα, όπου τα σχετικά κόστη εγκατάστασης καθώς και οι αποδόσεις των συμβάσεων FIT έχουν συλλεχθεί σύμφωνα με έγκυρες πληροφορίες διαθέσιμες στην ιστοσελίδα του ΣΕΦ.

Πίνακας 4.2: Ελληνικά τεχνοοικονομικά δεδομένα.

Έτος	FIT (€/kWh)	Κόστος εγκατάστασης (€)
Ιαν-10	0,55	1200
Φεβ-10	0,55	1200
Μαρ-10	0,55	1200
Απρ-10	0,55	1200
Μαϊ-10	0,55	1200
Ιουν-10	0,55	1200
Ιουλ-10	0,55	1200
Αυγ-10	0,55	1200
Σεπ-10	0,55	1200
Οκτ-10	0,55	1200
Νοε-10	0,55	1200
Δεκ-10	0,55	1200
Ιαν-11	0,55	960
Φεβ-11	0,55	960
Μαρ-11	0,55	960
Απρ-11	0,55	960
Μαϊ-11	0,55	960
Ιουν-11	0,55	960
Ιουλ-11	0,55	960
Αυγ-11	0,55	960
Σεπ-11	0,55	960
Οκτ-11	0,55	960
Νοε-11	0,55	960
Δεκ-11	0,55	960
Ιαν-12	0,55	720
Φεβ-12	0,495	720
Μαρ-12	0,495	720
Απρ-12	0,495	720
Μαϊ-12	0,495	720
Ιουν-12	0,495	720
Ιουλ-12	0,495	720
Αυγ-12	0,25	720
Σεπ-12	0,25	720
Οκτ-12	0,25	720
Νοε-12	0,25	720
Δεκ-12	0,25	720
Ιαν-13	0,25	450
Φεβ-13	0,25	450

Ως κόστος εγκατάστασης ορίζεται το ακόλουθο άθροισμα:

$$Capex_{total} = C_{PV} + C_{INV} + C_W + C_{CW}$$

, όπου:

C_{PV} : Κόστος ηλιακού πάνελ

C_{INV} : Κόστος αντιστροφέα

C_W : Κόστη ηλεκτρικών πινάκων, καλωδίωσης, γείωσης και εργατικά κόστη

C_{CW} : Κόστη διασύνδεσης με το δίκτυο

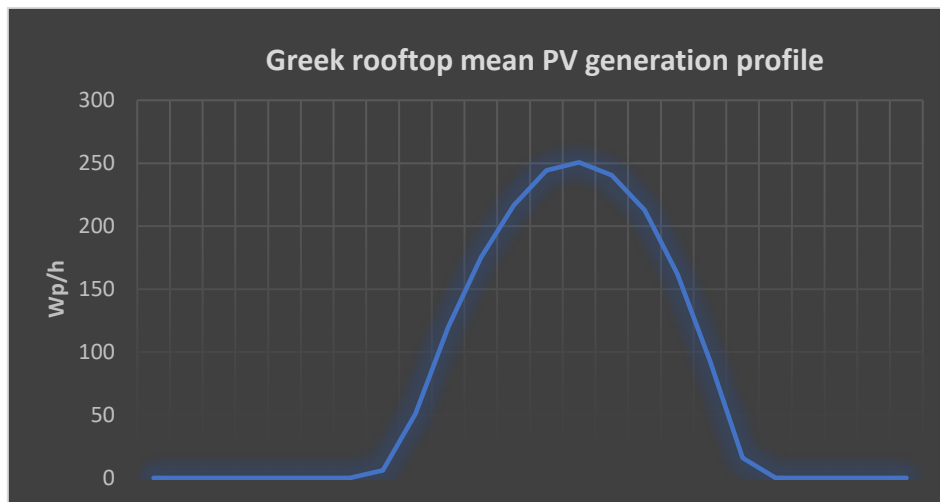
Προεξοφλητικό επιτόκιο:

4% για ολόκληρη την περίοδο μελέτης

Όσον αφορά την κατασκευή της χαρακτηριστικής καμπύλης Φ/Β παραγωγής, η οποία εισήχθη ως είσοδος στο ATOM, έγινε η υπόθεση ότι όλες οι προς προσομοίωση οντότητες θα επιλέξουν την ίδια τεχνολογία αναφοράς για τους ηλιακούς συλλέκτες τους με τα εξής χαρακτηριστικά:

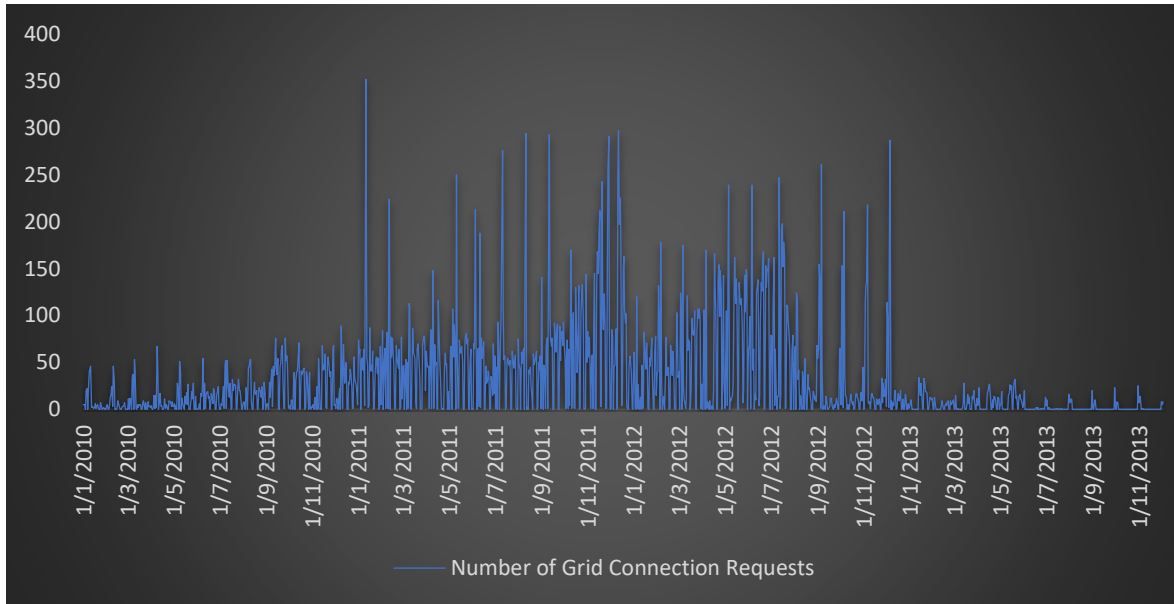
- i. Τεχνολογία αναφοράς: Φ/Β χαμηλής ισχύος ($P_{εγκ} \leq 10 \text{ kWp}$) σε σύνδεση με το δίκτυο
- ii. Εγκατεστημένη ισχύς: 300 W (PTC: 280,5W) :
- iii. Προσανατολισμός επιφάνειας: Νότιος
- iv. Κλίση επιφάνειας: 30°
- v. Συντεταγμένες αναφοράς (lat/lon): $37.98^\circ, 23.73^\circ$

Τα στοιχεία έντασης ηλιακής ακτινοβολίας (GHI) αντλήθηκαν από τη βάση δεδομένων «Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS)» για τις συγκεκριμένες συντεταγμένες αναφοράς.

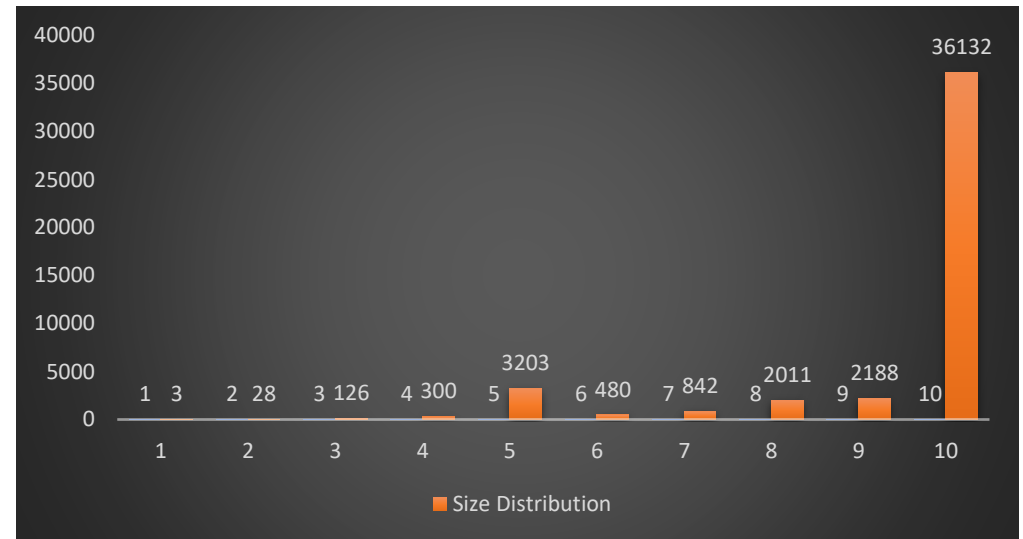
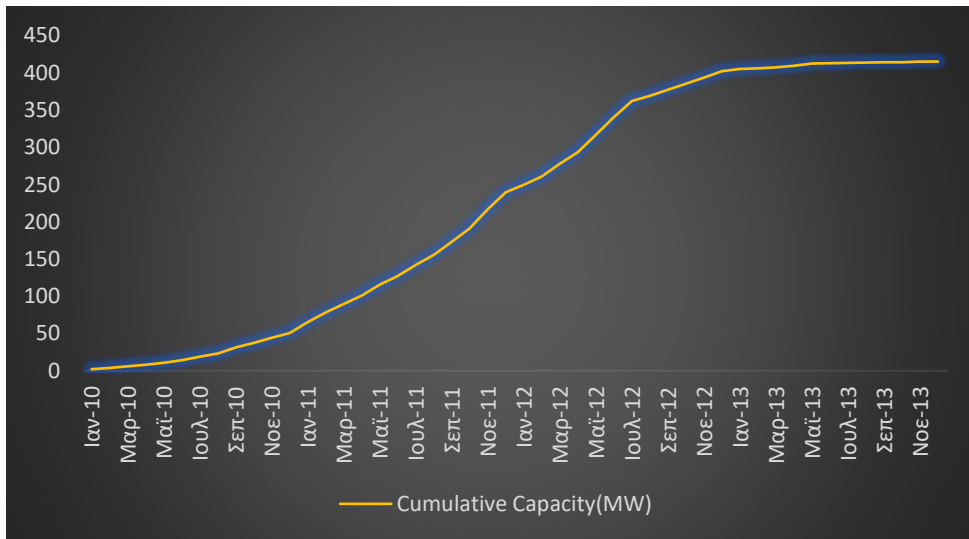


Εικόνα 4.7: Χαρακτηριστική μέση καμπύλη Φ/Β παραγωγής για την Ελλάδα (PTC 280,5W).

Παρακάτω παρατίθενται στοιχεία που αφορούν την ιστορική ανάπτυξη της εγκατεστημένης ισχύος Φ/Β χαμηλής ισχύος για το διάστημα 1/1/2010 – 31/12/2013. Επισημαίνεται ότι για τις ανάγκες της προσομοίωσης, η αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς των **αιτήσεων** για σύνδεση με το δίκτυο στο τέλος της περιόδου (**415 MW – 350 MW έλαβαν τελικά άδεια παραγωγής**) χρησιμοποιήθηκε ως σημείο αναφοράς για τις τροχιές των σεναρίων (διάμεσος των 25 σεναρίων) και αντιστοιχήθηκε με την τιμή 1 στην κανονικοποίηση.



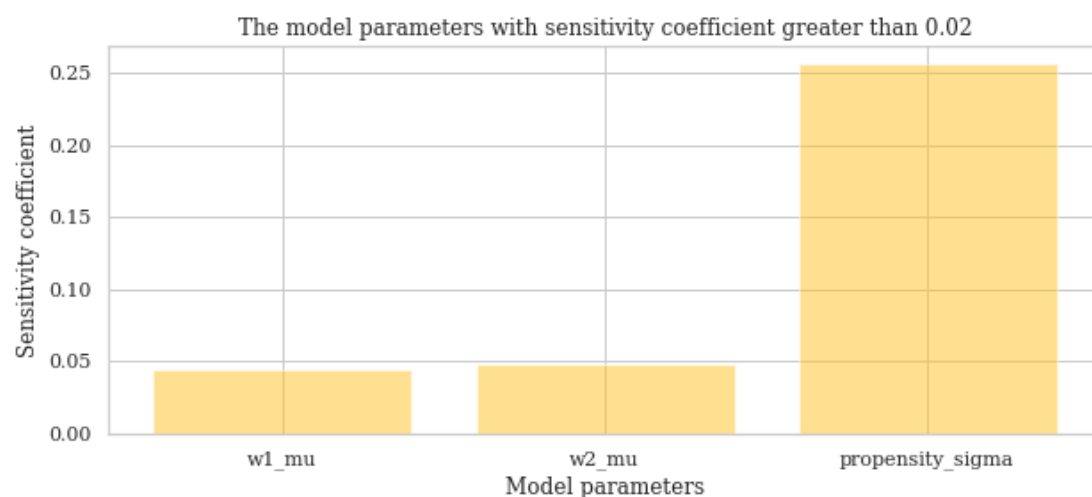
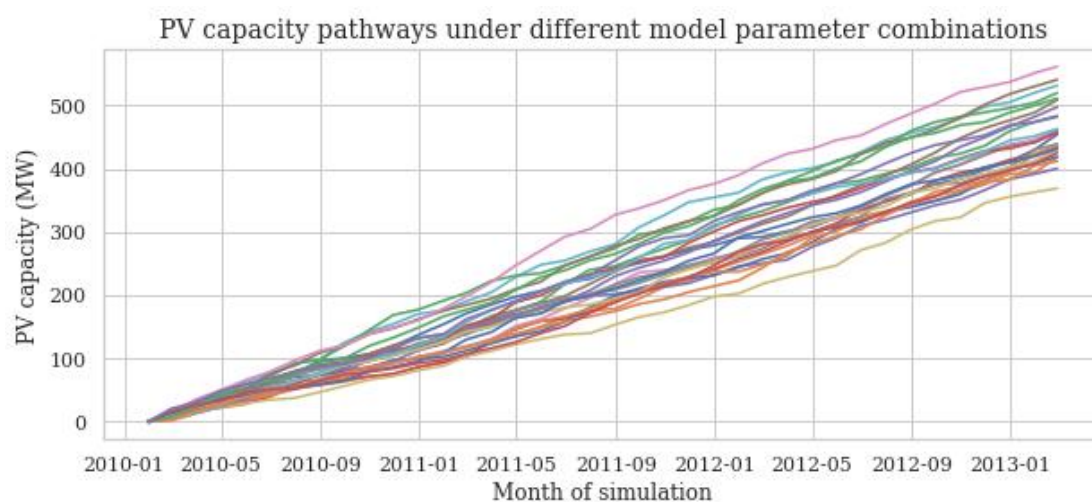
Εικόνες 4.8 -4.10: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά (αριθμός αιτημάτων σύνδεσης με ΔΔ, σωρευτική χωρητικότητα, κατανομή μεγέθους Φ/Β) για Φ/Β συστήματα μικρής κλίμακας στην Ελλάδα κατά την περίοδο 2009-2013, όταν και το σύστημα στήριξης FIT ήταν σε ισχύ.



Τα αποτελέσματα του μοντέλου χωρίστηκαν στις εξής τέσσερις περιόδους:

1. 1/1/2010 – 30/6/2010
2. 1/7/2010 – 31/12/2010
3. 1/1/2011 – 31/12/2011
4. 1/1/2012 – **1/2/2013** (όπως παρατηρούμε και στο διάγραμμα σωρευτικής ισχύος, με την έλευση του έτους 2013 και την επιβολή αναδρομικών φόρων στα FIT, διακόπτεται η ανοδική πορεία των αιτήσεων για όρους σύνδεσης και γι' αυτό επιλέχθηκε η συγκεκριμένη ημερομηνία ως το τέλος της προσομοιούμενης περιόδου).

, όπου τέσσερις GP εξομοιωτές προσαρμόστηκαν στα αντίστοιχα αποτελέσματα. Οι υπερπαράμετροι κάθε εξομοιωτή υπολογίστηκαν με τη μέθοδο της μέγιστης πιθανοφάνειας του και προς αυτό το σκοπό χρησιμοποιήθηκε η βιβλιοθήκη της γλώσσας προγραμματισμού Python GPy².



Εικόνες 4.11 -4.12: Αποτελέσματα SA που καταδεικνύουν τις παραμέτρους με τιμές πρωτοβάθμιου συντελεστή ευαισθησίας > 0.02 (τιμή κατωφλίου), υπό 25 διαφορετικά σενάρια.

² <https://github.com/SheffieldML/GPy/>

```

Box 1 [Peeling Trajectory 25]
Stats
  Coverage: 0.326556
  Density: 1.000000
  Mass: 0.277050
  Res Dim: 4.000000
  Mean: 1.000000
Limits
  min      max      qp values
5 -0.227692 1.755690 5.093665e-120
6 -0.821669 1.700653 8.011907e-37
9 -1.727960 0.978392 9.675137e-26
3 -1.717081 1.229501 2.469560e-03

```

Εικόνα 4.13: Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου PRIM.

Η εκτέλεση SA καταδεικνύει τις παραμέτρους που είναι υπεύθυνες για την αβεβαιότητα (διασπορά επί των αποτελεσμάτων του μοντέλου) ως εξής:

- i. Τυπική απόκλιση της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή κατωφλίου κάθε οντότητας για το μέγεθος της αντίστασής τους (Propensity_std).
- ii. Μέση τιμή βάρους αναμενόμενης περιόδου αποπληρωμής (Payback_mu).
- iii. Μέση τιμή βάρους αναμενόμενου μεγέθους εγκατεστημένης βάσης (Installed_Base_mu).

Πίνακας 4.3: Τελικά εύρη τιμών για την υπό μελέτη εφαρμογή.

Variables	Min	Max
Initial belief_mu	181	192
Initial belief_std	15	45
Precision_mu	10	48
Precision_std	5.8	20
Payback_mu	1.9	3
Payback_std	0.1	1
Installed_Base_mu	0.5	4.7
Installed_Base_std	0.1	0.94
Propensity_mu	11.6	19.6
Propensity_std	5	9.7
inertia	0.01	

4.4 Εφαρμογή βαθμονόμησης Agent related παραμέτρων ~ Μελέτη περίπτωσης: Γερμανία

Για το παράδειγμα της Γερμανίας, το ATOM βαθμονομήθηκε χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα για την αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος οικιακών Φ/Β, υπό τα νομοσχέδια στήριξης EEG 2014 και EEG 2017, στα οποία διατηρήθηκε ο μηχανισμός FIT σε αντίθεση με έργα μεγαλύτερης ισχύος όπου και θεσμοθετήθηκε η στήριξη μέσω FIP. Τα νομοσχέδια μεταξύ άλλων απέβλεπαν στην αύξηση της εγκατεστημένης ισχύος των Φ/Β εγκαταστάσεων (συνολικά) κατά 2,5 GWp/έτος, ή κατά 0,35 GWp/έτος (στεγών), δεδομένου ότι τα συγκεκριμένα έργα κατά μέσο όρο καταλαμβάνουν το 14% της συνολικής Φ/Β χωρητικότητας στη Γερμανία (Georg et al., 2020).

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν εντός της ανάλυσης αντλήθηκαν από την Ομοσπονδιακή Υπηρεσία Δικτύων (Bundesnetzagentur³), όπου από το έτος 2016 δημοσιεύει την ανά μήνα πρόσθετη εγκατεστημένη ισχύ με τα αντίστοιχα προσαρμοσμένα ποσά στήριξης, συμπεριλαμβανομένων παρελθοντικών αναλυτικών δεδομένων από την έναρξη του νομοσχεδίου EEG 2014 στις 1/8/2014.

Κατ' αναλογία του προηγούμενου παραδείγματος, θα παρουσιαστούν οι εισοδοί καθώς και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και της ανάλυσης ευαισθησίας, χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες παραδοχές:

- i. Τεχνολογία αναφοράς: Φ/Β χαμηλής ισχύος ($P_{εγκ} \leq 10 \text{ kWp}$) σε σύνδεση με το δίκτυο
- ii. Εγκατεστημένη ισχύς: 300 W (PTC: 280,5W)
- iii. Προσανατολισμός επιφάνειας: Νότιος
- iv. Κλίση επιφάνειας: 30°
- v. Συντεταγμένες αναφοράς (lat/lon): 47.99°, 7.84° (**Freiburg**) - 53.55°, 9.99° (**Hamburg**) και χρησιμοποίηση μέσης τιμής του παραγωγικού προφίλ αυτών.

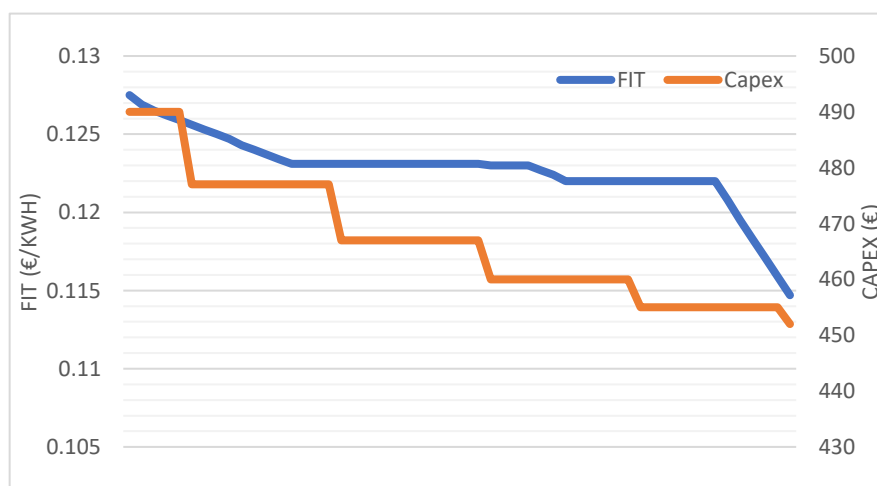
Επίσης, η προσαρμογή των GP εξομοιωτών πραγματοποιήθηκε στις εξής περιόδους:

1. **1/8/2014** - 31/8/2015
2. 1/9/2015 - 30/9/2016
3. 1/10/2016 - 31/10/2017
4. 1/11/2017 - **1/2/2019**

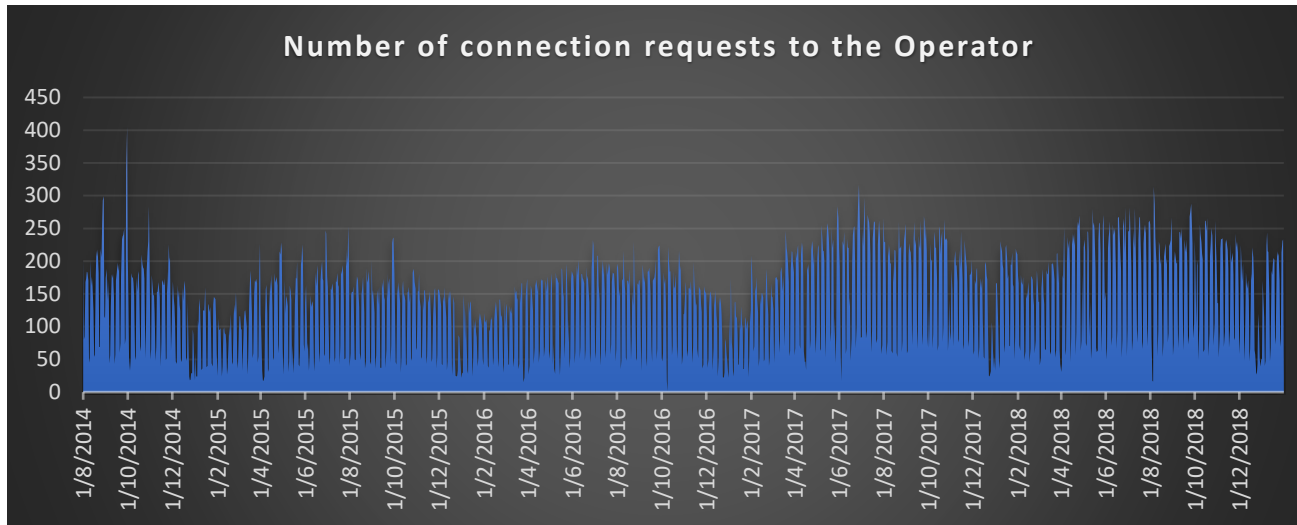
³https://www.bundesnetzagentur.de/EN/Areas/Energy/Companies/RenewableEnergy/Facts_Figures_EEG/Register_data_tariffs

Πίνακας 4.4: Γερμανικά τεχνοοικονομικά δεδομένα.

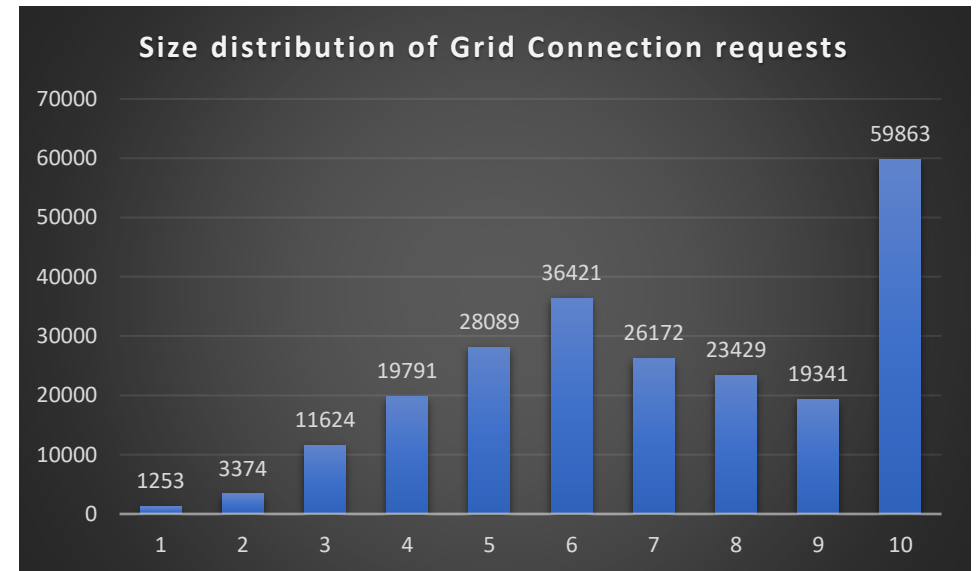
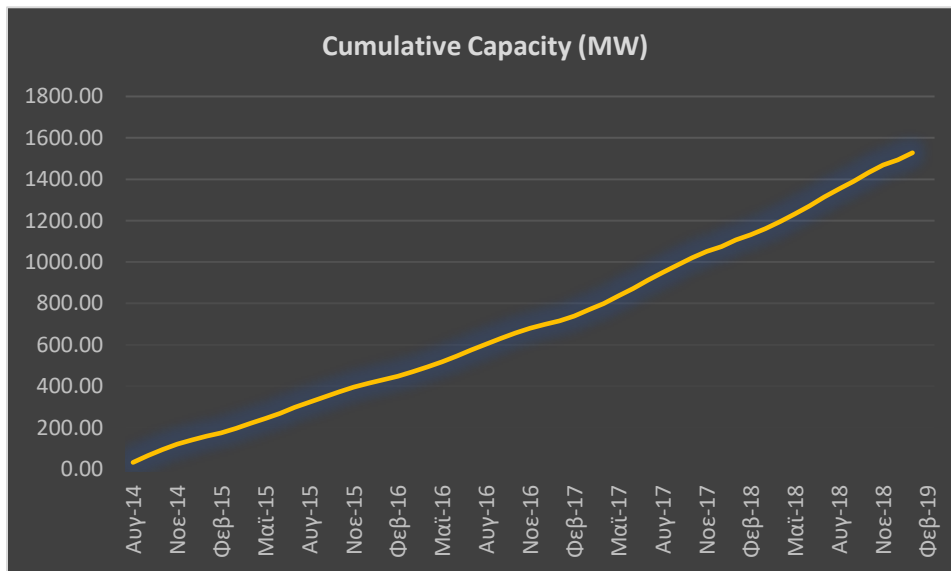
Έτος	FIT (€/kWh)	Κόστος εγκατάστασης (€)	Έτος	FIT (€/kWh)	Κόστος εγκατάστασης (€)
Αυγ-14	0,1275	490	Δεκ-16	0,1231	467
Σεπ-14	0,1269	490	Ιαν-17	0,123	460
Οκτ-14	0,1265	490	Φεβ-17	0,123	460
Νοε-14	0,1262	490	Μαρ-17	0,123	460
Δεκ-14	0,1259	490	Απρ-17	0,123	460
Ιαν-15	0,1256	477	Μαϊ-17	0,1227	460
Φεβ-15	0,1253	477	Ιουν-17	0,1224	460
Μαρ-15	0,125	477	Ιουλ-17	0,122	460
Απρ-15	0,1247	477	Αυγ-17	0,122	460
Μαϊ-15	0,1243	477	Σεπ-17	0,122	460
Ιουν-15	0,124	477	Οκτ-17	0,122	460
Ιουλ-15	0,1237	477	Νοε-17	0,122	460
Αυγ-15	0,1234	477	Δεκ-17	0,122	460
Σεπ-15	0,1231	477	Ιαν-18	0,122	455
Οκτ-15	0,1231	477	Φεβ-18	0,122	455
Νοε-15	0,1231	477	Μαρ-18	0,122	455
Δεκ-15	0,1231	477	Απρ-18	0,122	455
Ιαν-16	0,1231	467	Μαϊ-18	0,122	455
Φεβ-16	0,1231	467	Ιουν-18	0,122	455
Μαρ-16	0,1231	467	Ιουλ-18	0,122	455
Απρ-16	0,1231	467	Αυγ-18	0,1208	455
Μαϊ-16	0,1231	467	Σεπ-18	0,1195	455
Ιουν-16	0,1231	467	Οκτ-18	0,1183	455
Ιουλ-16	0,1231	467	Νοε-18	0,1171	455
Αυγ-16	0,1231	467	Δεκ-18	0,1159	455
Σεπ-16	0,1231	467	Ιαν-19	0,1147	452
Οκτ-16	0,1231	467	Προεξοφλητικό Επιτόκιο (%)	4	
Νοε-16	0,1231	467			

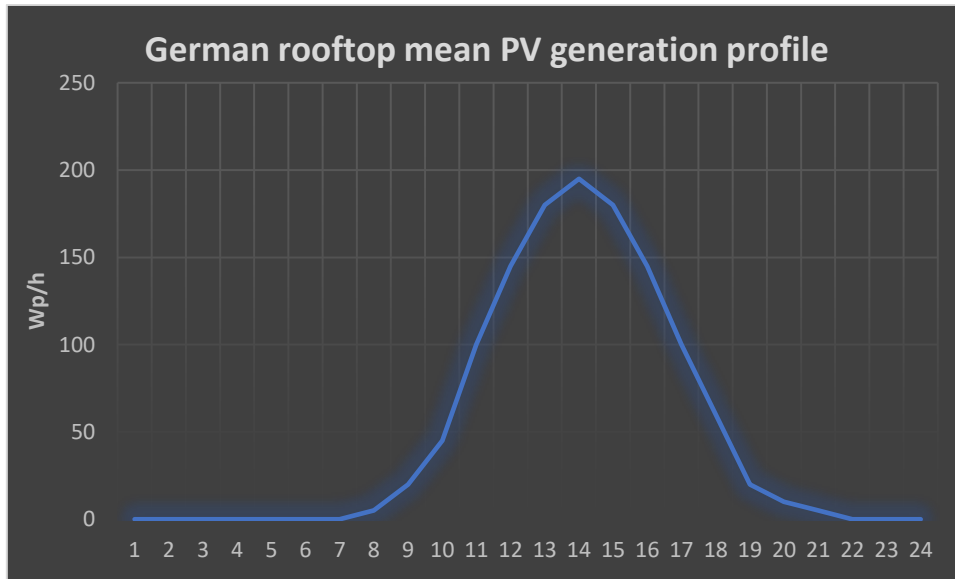


Εικόνα 4.14: Συσχετισμός στήριξης – κόστους κεφαλαίου για την υπό μελέτη περίοδο.

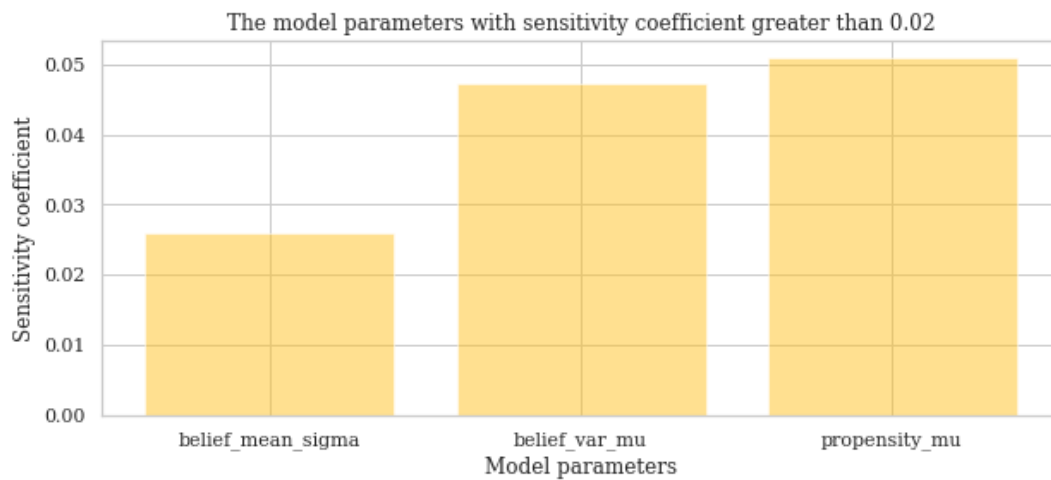
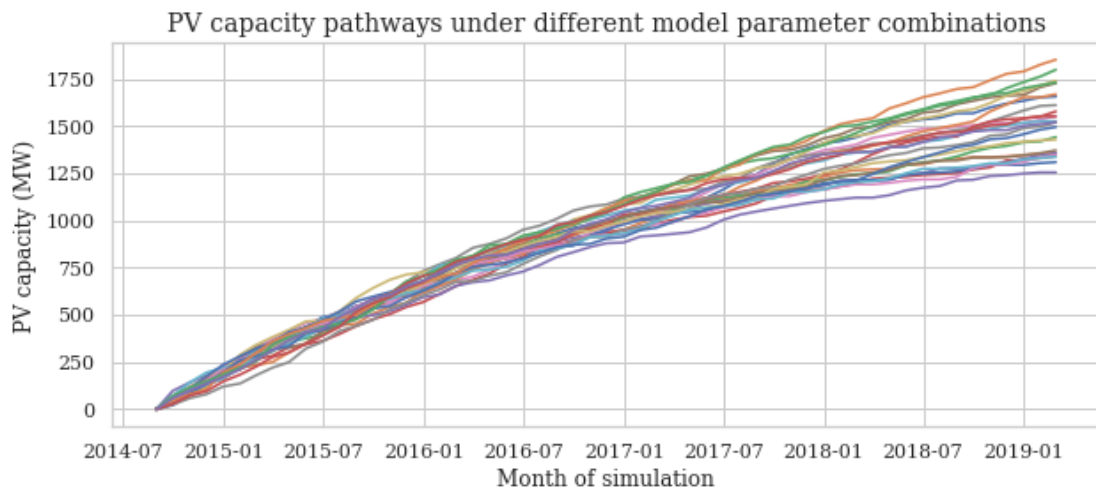


Εικόνες 4.15-4.17: Συγκεντρωτικά χαρακτηριστικά (αριθμός αιτημάτων σύνδεσης με ΔΔ, σωρευτική χωρητικότητα, κατανομή μεγέθους Φ/Β) για Φ/Β συστήματα μικρής κλίμακας στη Γερμανία κατά την περίοδο 2014-2019 (EEG 2014 & EEG 2017).





Εικόνα 4.18: Χαρακτηριστική μέση καμπύλη Φ/Β παραγωγής για τη Γερμανία (PTC 280,5W).



Εικόνες 4.19 -4.20: Αποτελέσματα SA που καταδεικνύουν τις παραμέτρους με τιμές πρωτοβάθμιου συντελεστή ευαισθησίας > 0.02 (τιμή κατωφλίου), υπό 25 διαφορετικά σενάρια.

```

Box 1 [Peeling Trajectory 4]
Stats
  Coverage: 0.815184
  Density: 1.000000
  Mass: 0.814450
  Res Dim: 2.000000
  Mean: 1.000000
Limits
  min      max      qp values
0 -1.217819 1.723328 0.001807
8  4.983873 8.973784 0.049755

```

Εικόνα 4.21: Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου PRIM.

Η εκτέλεση SA καταδεικνύει τις παραμέτρους που είναι υπεύθυνες για την αβεβαιότητα (διασπορά επί των αποτελεσμάτων του μοντέλου) ως εξής:

- i. Μέση τιμή της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή κατωφλίου κάθε οντότητας για το μέγεθος της αντίστασής τους (Propensity_mu).
- ii. Μέση τιμή της τυπικής απόκλισης της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή των αναμενόμενων ετήσιων καθαρών ταμειακών ροών ρ^{CF} (Precision_mu).
- iii. Τυπική απόκλιση της μέσης τιμής της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή των αναμενόμενων ετήσιων καθαρών ταμειακών ροών μ^{CF} (Initial belief_std).

Πίνακας 4.5: Τελικά εύρη τιμών για την υπό μελέτη εφαρμογή.

Variables	Min	Max
Initial belief_mu	162	179
Initial belief_std	12	35
Precision_mu	10	38
Precision_std	5.2	13
Payback_mu	3.3	4
Payback_std	0.32	0.79
Installed_Base_mu	0.7	4.8
Installed_Base_std	0.35	0.65
Propensity_mu	19.4	25.2
Propensity_std	6.5	8.3
inertia	0.01	

4.5 Εφαρμογή βαθμονόμησης Agent related παραμέτρων ~ Μελέτη περίπτωσης: Ιταλία

Η τελευταία δεκαετία ήταν καθοριστικής σημασίας για την αγορά Φ/Β στην Ιταλία, η οποία σημείωσε εκθετική αύξηση στις νέες εγκαταστάσεις. Αυτή η ταχεία ανάπτυξη ήταν καθοριστικής σημασίας στην επίτευξη του στόχου που τέθηκε από την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2009 / 28 / CE, που επέβαλλε συγκεκριμένα επίπεδα παραγωγής ενέργειας από ΑΠΕ. Στην πραγματικότητα, σύμφωνα με την Ευρωπαϊκή Φωτοβολταϊκή Βιομηχανική Ένωση, ο στόχος των 100 TWh πράσινης παραγωγής επιτεύχθηκε 8 χρόνια νωρίτερα, χάρη και στα 13 GW Φ/Β εγκατεστημένης ισχύος, που κατέστησαν την Ιταλία τη δεύτερη χώρα παγκοσμίως σε ποσοστό Φ/Β παραγωγής επί της συνολικής. (Antonelli & Desideri, 2014). Η ακραιφνής επιτυχία του πλάνου στηρίχτηκε σε ένα εξαιρετικά ευνοϊκό σύστημα παροχής κινήτρων για τους υποψήφιους επενδυτές (*Conto Energia I – V*), αλλά το οποίο όμως οδήγησε σε μεγάλες κοινωνικές επιβαρύνσεις, προσαυξάνοντας κατά 10 δις. €/έτος τους λογαριασμούς ενέργειας (18% του συνολικού κόστους). Κατά συνέπεια, το πρόγραμμα των επιδοτήσεων, με αρκετές τροποποιήσεις κατά τη διάρκεια της πορείας του, διακόπηκε τον Ιούλιο του 2013 όταν και τα συνολικά κόστη FIT έφθασαν το ανώτατο χρηματοδοτικό όριο των 6,7 δις. €. Αξίζει επίσης να σημειωθεί, σε σύγκριση και με την εφαρμογή της Γερμανίας, το γεγονός ότι παρά το υψηλότερο ηλιακό δυναμικό και την πιο γενναιόδωρη δομή των επιδοτήσεων (π.χ. Ρύθμιση “Salva-Alcoa”), η διάχυση της υιοθέτησης Φ/Β στον οικιακό τομέα δεν ήταν τόσο εκτεταμένη, κάτι που υποδεικνύει τη χαμηλότερη συμμετοχή των ιδιωτών στη λήψη επενδυτικών αποφάσεων. Κατ’ αναλογία του προηγούμενου παραδείγματος, θα παρουσιαστούν οι εισοδοί που εντάχθηκαν στο ATOM καθώς και τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης και της ανάλυσης ευαισθησίας, χρησιμοποιώντας τις ακόλουθες παραδοχές:

- i. Τεχνολογία αναφοράς: Φ/Β χαμηλής ισχύος ($P_{\text{εγκ}} \leq 20 \text{ kWp}$) σε σύνδεση με το δίκτυο
- ii. Εγκατεστημένη ισχύς: 300 W (PTC: 280,5W)
- iii. Προσανατολισμός επιφάνειας: Νότιος
- iv. Κλίση επιφάνειας: 30°
- v. Συντεταγμένες αναφοράς (lat/lon): 37.51°, 15.08° (Catania) - 45.735°, 7.31° (Aosta) και χρησιμοποίηση μέσης τιμής του παραγωγικού προφίλ αυτών.

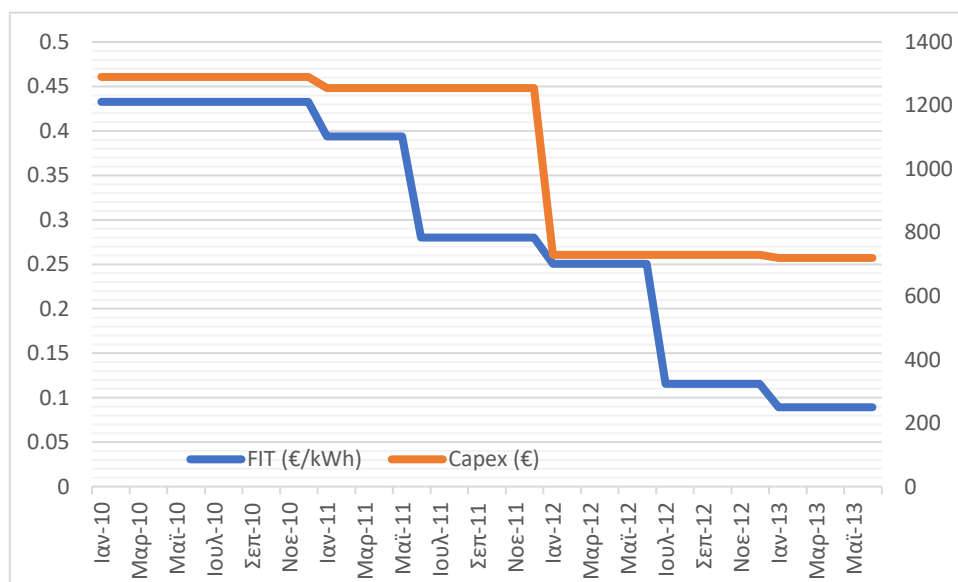
Επίσης, η προσαρμογή των GP εξομοιωτών πραγματοποιήθηκε στις εξής περιόδους:

1. 1/1/2010 – 31/12/2010
2. 1/1/2011 – 31/12/2011
3. 1/1/2012 – 31/12/2012
4. 1/1/2013 – 1/7/2013 (Τερματισμός κονδυλίου νομοσχεδίου Conto Energia V)⁴.

⁴ Ιστορικά δεδομένα διαθέσιμα στην ιστοσελίδα του Ιταλικού φορέα ΑΠΕ και ενεργειακής αποδοτικότητας GSE <https://www.gse.it/dati-e-scenari/statistiche>

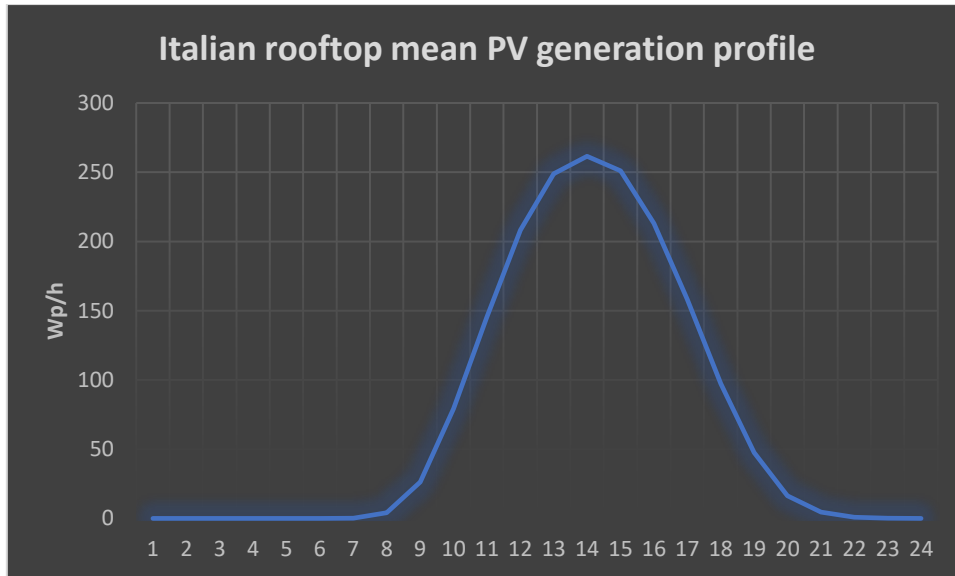
Πίνακας 4.6: Ιταλικά τεχνοοικονομικά δεδομένα.

Έτος	FIT (€/kWh)	Κόστος εγκατάστασης (€)	Έτος	FIT (€/kWh)	Κόστος εγκατάστασης (€)
Ιαν-10	0,4327	1290	Νοε-11	0,2799	1255
Φεβ-10	0,4327	1290	Δεκ-11	0,2799	1255
Μαρ-10	0,4327	1290	Ιαν-12	0,2505	730
Απρ-10	0,4327	1290	Φεβ-12	0,2505	730
Μαϊ-10	0,4327	1290	Μαρ-12	0,2505	730
Ιουν-10	0,4327	1290	Απρ-12	0,2505	730
Ιουλ-10	0,4327	1290	Μαϊ-12	0,2505	730
Αυγ-10	0,4327	1290	Ιουν-12	0,2505	730
Σεπ-10	0,4327	1290	Ιουλ-12	0,1156	730
Οκτ-10	0,4327	1290	Αυγ-12	0,1156	730
Νοε-10	0,4327	1290	Σεπ-12	0,1156	730
Δεκ-10	0,4327	1290	Οκτ-12	0,1156	730
Ιαν-11	0,3938	1255	Νοε-12	0,1156	730
Φεβ-11	0,3938	1255	Δεκ-12	0,1156	730
Μαρ-11	0,3938	1255	Ιαν-13	0,0892	720
Απρ-11	0,3938 ⁵	1255	Φεβ-13	0,0892	720
Μαϊ-11	0,3938	1255	Μαρ-13	0,0892	720
Ιουν-11	0,2799	1255	Απρ-13	0,0892	720
Ιουλ-11	0,2799	1255	Μαϊ-13	0,0892	720
Αυγ-11	0,2799	1255	Ιουν-13	0,0892	720
Σεπ-11	0,2799	1255	Προεξοφλητικό Επιτόκιο (%)		4
Οκτ-11	0,2799	1255			

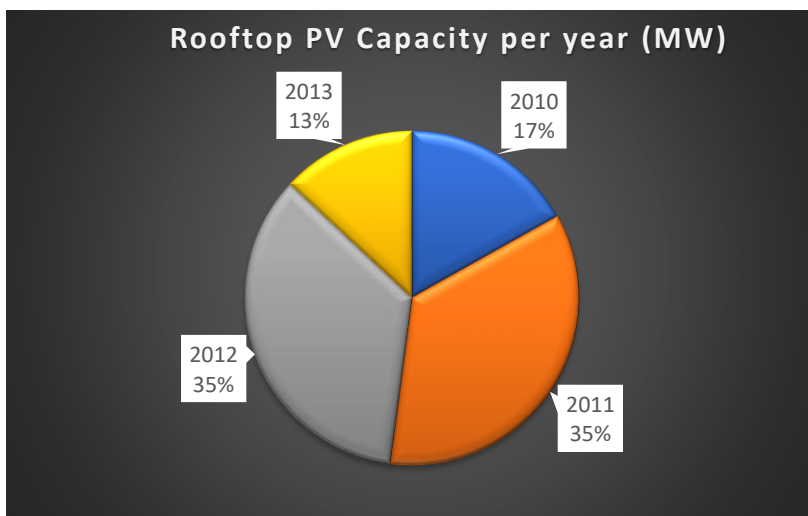
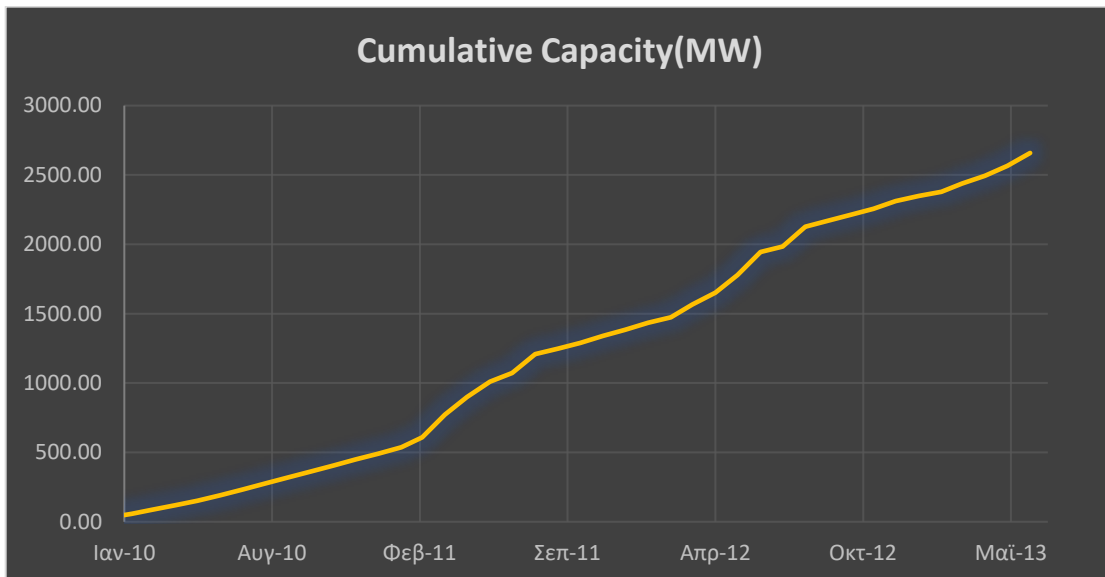


Εικόνα 4.22: Συσχετισμός στήριξης – κόστους κεφαλαίου για την υπό μελέτη περίοδο.

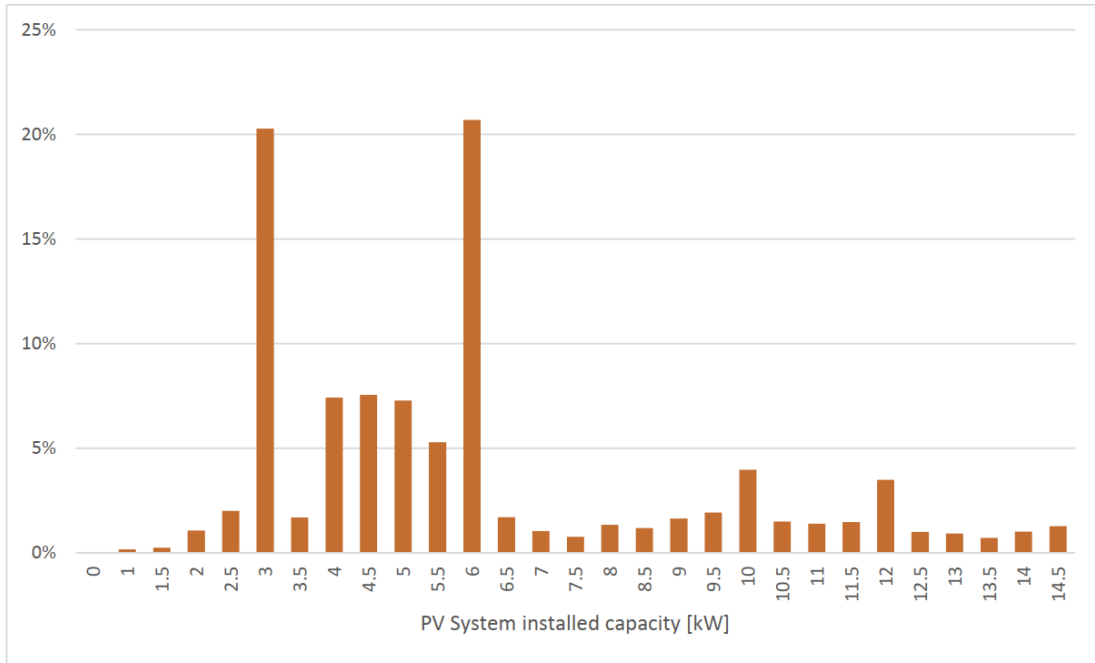
⁵ Χάρη στο ρυθμιστικό διάταγμα “Salva-Alcoa”, τα FITs διατηρήθηκαν στα επίπεδα του Conto Energia II. Σε εκείνη τη χρονική περίοδο επιτεύχθηκε ο μεγαλύτερος όγκος αιτήσεων με το δίκτυο.



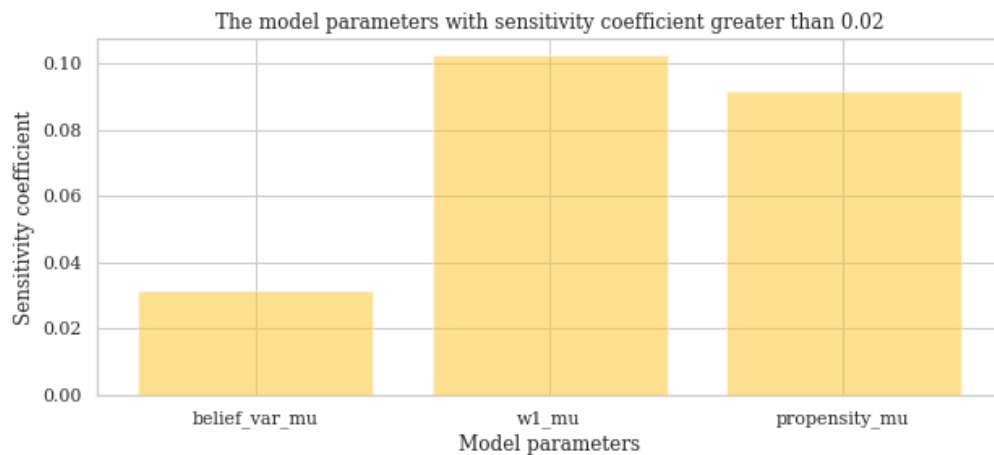
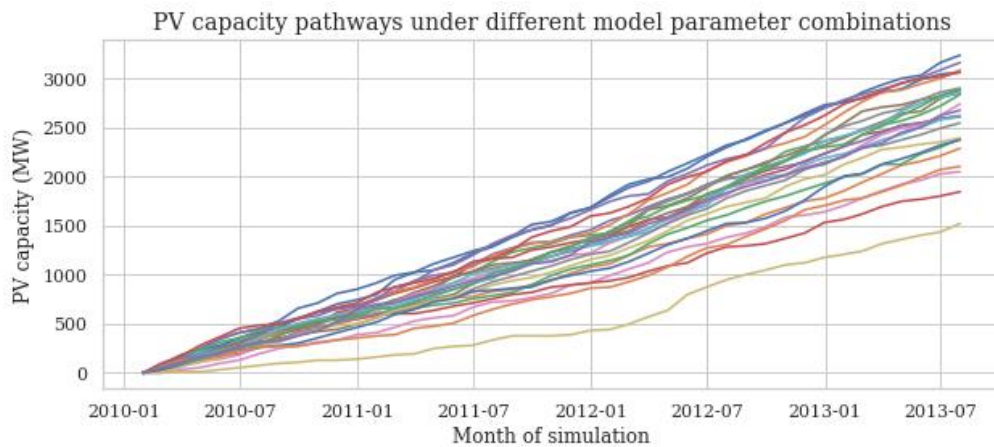
Εικόνα 4.18: Χαρακτηριστική μέση καμπύλη Φ/Β παραγωγής για την Ιταλία (PTC 280,5W).



Εικόνες 4.19-4.20: Σωρευτική καμπύλη αύξησης χωρητικότητας και ανά έτος κατανομής της κατά τη διάρκεια της ισχύος των νομοσχεδίων Conto Energia III – Conto Energia V.



Εικόνα 4.21: Κατανομή εγκατεστημένης ισχύος οικιακών Φ/Β συστημάτων (Cerino Abidin & Noussan, 2018).



Εικόνες 4.22 -4.23: Αποτελέσματα SA που καταδεικνύουν τις παραμέτρους με τιμές πρωτοβάθμιου συντελεστή ευαισθησίας > 0.02 (τιμή κατωφλίου), υπό 25 διαφορετικά σενάρια.

```

Box 1 [Peeling Trajectory 58]
Stats
Coverage: 1.000000
Density: 0.113749
Mass: 0.050550
Res Dim: 4.000000
Mean: 0.113749
Limits
      min      max      qp values
4  4.118549  4.852034  3.029982e-34
8  1.768583  2.883359  5.010047e-28
6 -2.069100  0.718010  8.475358e-04
2 -2.125230  4.121101  1.165511e-01

```

Εικόνα 4.24: Στατιστικά τελικής υποδιαίρεσης από την εφαρμογή της μεθόδου PRIM.

Η εκτέλεση SA καταδεικνύει τις παραμέτρους που είναι υπεύθυνες για την αβεβαιότητα (διασπορά επί των αποτελεσμάτων του μοντέλου) ως εξής:

- i. Μέση τιμή βάρους αναμενόμενης περιόδου αποπληρωμής (Payback_mu).
- ii. Μέση τιμή της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή κατωφλίου κάθε οντότητας για το μέγεθος της αντίστασής τους (Propensity_mu).
- iii. Μέση τιμή της τυπικής απόκλισης της καθολικής κατανομής που εκχωρεί την τιμή των αναμενόμενων ετήσιων καθαρών ταμειακών ροών ρ^{CF} (Precision_mu).

Πίνακας 4.7: Τελικά εύρη τιμών για την υπό μελέτη εφαρμογή.

Variables	Min	Max
Initial belief_mu	172	185
Initial belief_std	10	49
Precision_mu	10	46
Precision_std	5.2	20
Payback_mu	2.5	3.1
Payback_std	0.1	1
Installed_Base_mu	0.1	4.9
Installed_Base_std	0.15	0.94
Propensity_mu	18.1	22.6
Propensity_std	5	9.7
inertia	0.01	

4.6 Παρατηρήσεις επί της διαδικασίας βαθμονόμησης

Από την εκτέλεση της βαθμονόμησης και της διαδικασίας SA για τον προσδιορισμό των πιο αβέβαιων υπερπαραμέτρων για κάθε παράδειγμα, προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:



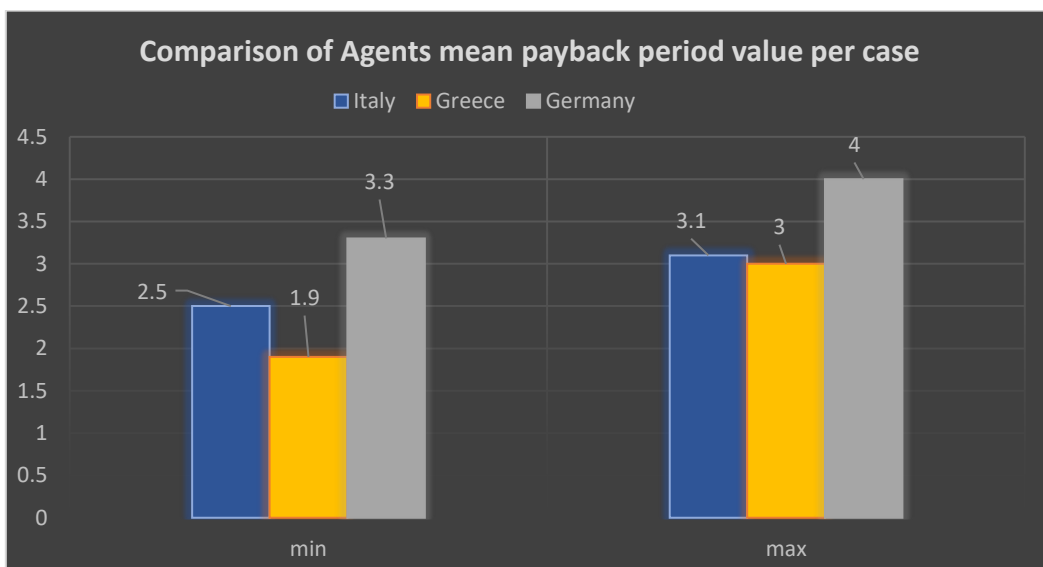
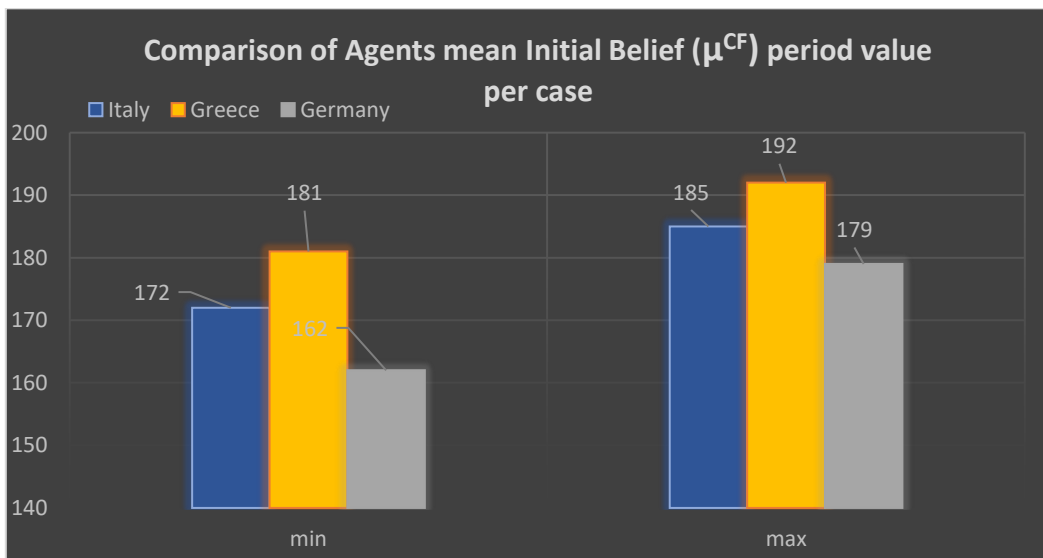
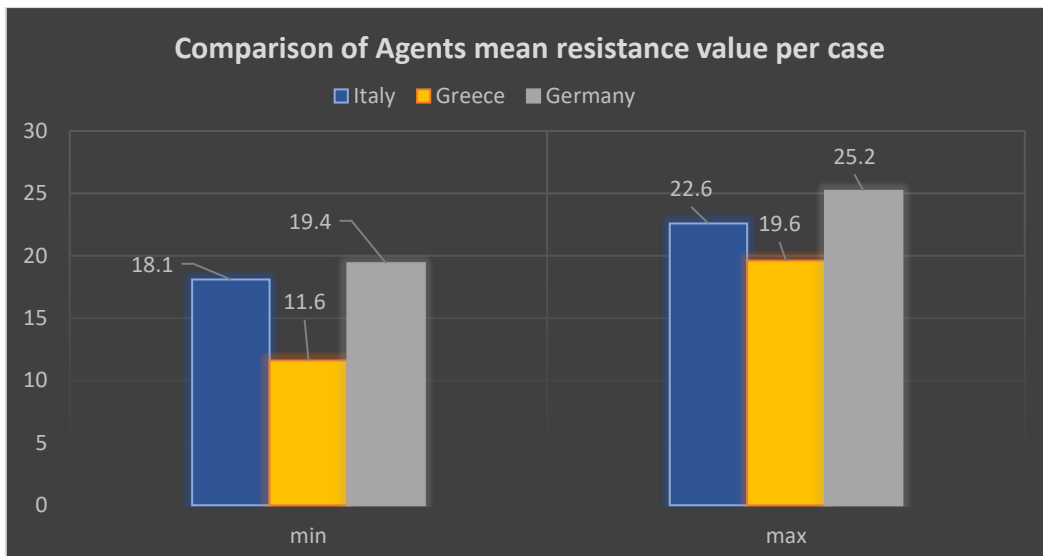
- i. Σταδιακή κάμψη και σταθεροποίηση του ρυθμού διείσδυσης Φ/Β στο δίκτυο λόγω της μειούμενης στήριξης με συμβάσεις FIT (Degressions) υπό τα ρυθμιστικά νομοσχέδια EEG 2014, EEG 2017.
- ii. Υψηλό κατώφλι παραμέτρου αντίστασης που καταδεικνύει τη διάθεση λήψης επενδυτικού ρίσκου σε συνδυασμό με το εύρος της μέσης τιμής του δείκτη ρ^{CF} , το οποίο χαρακτηρίζει τις οντότητες ως *willing to invest*, παρόλες τις χαμηλές προσδοκίες αναμενόμενων χρηματοροών περιόδου αποπληρωμής της επένδυσης.
- iii. Η σταδιακή πτώση του κόστους εγκατάστασης οδηγεί στην πεποίθηση ότι η περίοδος αποπληρωμής θα είναι σχετικά μικρή.
- iv. Μικρή διασπορά των τυπικών αποκλίσεων της ομάδας παραμέτρων “Precision_std”, “Payback_std”, επομένως και πιο ομοιογενής πληθυσμός.



- i. Έκρηξη εκθετικής μορφής του επενδυτικού ενδιαφέροντος το έτος 2011, όταν και χάρη στην ισχύ του ρυθμιστικού πλαισίου “Salva-Alcoa” οι αποδόσεις ήταν ιδιαίτερα ελκυστικές (Αμοιβή με FIT Conto Energia II).
- ii. Σχετικά υψηλά εύρη συντελεστών προσδοκώμενων χρηματοροών (μ^{CF}).
- iii. Διάθεση για γρήγορη αποπληρωμή επενδυτικών κεφαλαίων. Δυσανάλογη απόδοση κινήτρων σε σύγκριση με τα αντίστοιχα κόστη κεφαλαίου, μετά την έλευση του έτους 2012 (δυναμική είσοδος Ασιατικών κρυστάλλινων ημιαγωγών στην αγορά με κατακόρυφη πτώση του κόστους ανά πάνελ εγκατεστημένης ισχύος).
- iv. Απότομη πτώση του επενδυτικού ενδιαφέροντος μετά το 2ο εξάμηνο του 2012, που όμως εξακολούθησε να υπάρχει παρά τις χαμηλές αποδόσεις.



- i. Έκρηξη εκθετικής μορφής του επενδυτικού ενδιαφέροντος καθ’ όλη τη χρονική περίοδο 1/1/2010 – 31/7/2012, καθώς οι αποδόσεις FIT ήταν εξαιρετικά ελκυστικές, ενώ τα κόστη εγκατάστασης είχαν πτωτική τάση, ιδιαίτερα μετά το έτος 2012.
- ii. Πολύ υψηλές τιμές συντελεστών προσδοκώμενων χρηματοροών (μ^{CF}) σε συνδυασμό με πολύ χαμηλή κατώφλι αντίστασης.
- iii. Διάθεση για πολύ γρήγορη αποπληρωμή επενδυτικών κεφαλαίων.
- iv. Τελμάτωση επενδυτικού ενδιαφέροντος μετά την δραστική περικοπή στα FIT.
- v. Ανομοιογένεια πληθυσμού ως προς τις ανάληψη επενδυτικού ρίσκου (ρ^{CF}).



Εικόνα 4.25-4.27: Συγκριτική ανάλυση των κυριότερων μετρικών συμπεριφορικής αποτύπωσης των οντοτήτων.

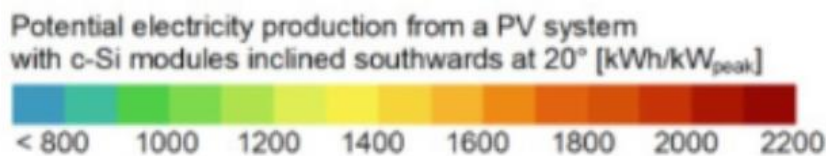
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

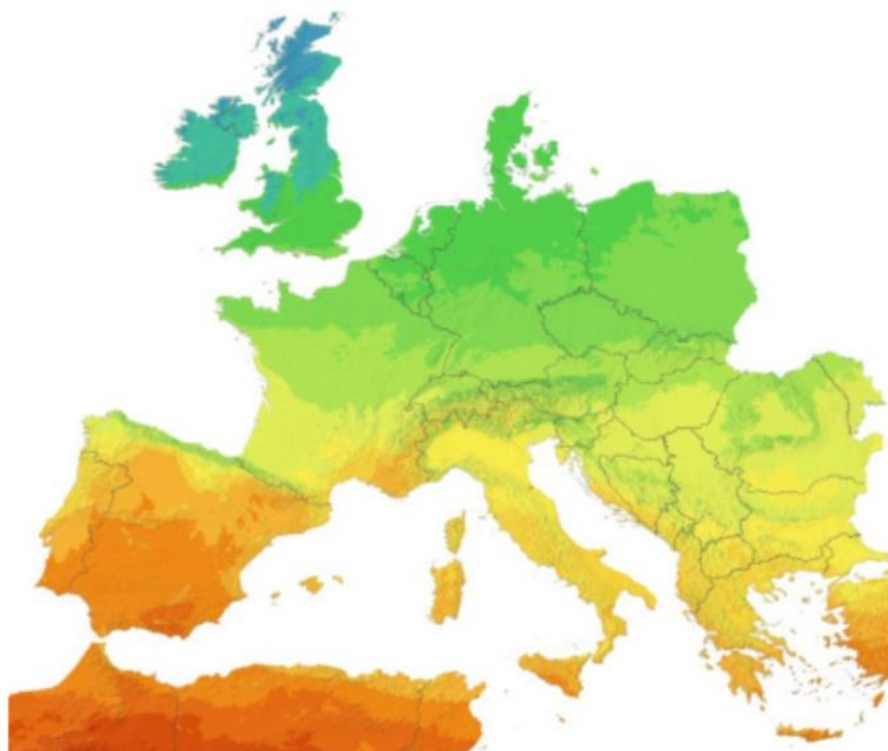
Εφαρμογή μελλοντικών προσομοιώσεων

5.1 Περιγραφή μεθοδολογικού πλαισίου

Στην παρούσα ενότητα θα παρουσιαστεί η εφαρμογή του τελευταίου σταδίου του μεθοδολογικού πλαισίου του ATOM, που συνίσταται στην υλοποίηση προγνωστικών αναλύσεων (*Forward looking simulations*) για τη διερεύνηση της διάχυσης της Φ/Β τεχνολογίας μικρής κλίμακας στις υπό μελέτη χώρες, που στην παρούσα ανάλυση επιλέχθηκαν να είναι η Ελλάδα και η Γερμανία, για το χρονικό διάστημα που βρίσκονται σε ισχύ τα αντίστοιχα ΕΣΕΚ (2020 – 2030) όπως έχουν συνταχθεί και εγκριθεί από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή. Η επιλογή των δύο προαναφερθέντων κρατών και η εξαίρεση από την ανάλυση της 3^{ης} μελετώμενης χώρας από τη διεξαγωγή μελλοντικών προσομοιώσεων κρίθηκε επαρκής καθώς όπως καταδείχθηκε, οι περιπτώσεις της Ελλάδας και της Ιταλίας παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες τόσο ως προς τα τεχνικά χαρακτηριστικά της τεχνολογίας (παρόμοια μεγέθη GHI) όσο και ως προς τις υπό προσομοίωση οντότητες, γεγονός που φάνηκε και από τα εύρη των αβέβαιων agent-related παραμέτρων, κάτι το οποίο αποδεικνύει την ευρωστία του ATOM (αρχικά αναπτύχθηκε για την περίπτωση της Ελλάδας για τη συγκριτική ανάλυση μεταξύ πολιτικών υποστήριξης NEM με SC-ST).

Επομένως, προκρίθηκε η εστίαση της έρευνας και η εξαγωγή συμπερασμάτων σε δύο κράτη με δομικές διαφορές και ως προς τις κοινωνικο-οικονομικές δομές (*Μέσο κατά κεφαλήν εισόδημα πολιτών, πληθυσμιακή πυκνότητα, πολυετής εμπειρία στην κατάσταση επενδυτικών σχεδίων βιώσιμης πολιτικής*) αλλά επίσης και ως προς το ηλιακό δυναμικό για την επέκταση με μεγάλο βαθμό απόδοσης της Φ/Β τεχνολογίας, όπου είναι σαφές πως οι χώρες του Ευρωπαϊκού Νότου έχουν μεγαλύτερες προοπτικές από τις χώρες του Βορρά.





Εικόνα 5.1: Δυναμικότητα παραγωγής ηλεκτρισμού με τυπικά Φ/Β συστήματα στην Ευρωπαϊκή ήπειρο ανά περιοχή.

Από την ανάλυση του προηγούμενου κεφαλαίου, καταδείχθηκε πως οι επενδύσεις σε οικιακά Φ/Β συστήματα την προηγούμενη δεκαετία κατέστησαν εξαιρετικά επιτυχημένες σε απόλυτα νούμερα, γνωρίζοντας μια έκρηξη νέων αιτήσεων σύνδεσης και υπερβαίνοντας τους σε ισχύ κλιματικούς στόχους κυρίως λόγω της γενναιόδωρης οικονομικής ενίσχυσης με εγγυημένες τιμές. Το βασικό μειονέκτημα της πολιτικής των FIT ήταν τα υψηλά κόστη που επιβάρυναν τους Ειδικούς Λογαριασμούς ΑΠΕ, οδηγώντας στη σταδιακή μείωση και – στην περίπτωση της Ελλάδας και της Ιταλίας – στην κατάργηση της ενίσχυσης σε νέα έργα, γεγονός που οδήγησε σε τέλμα τις τοπικές αγορές εξαιτίας της απώλειας επενδυτικής εμπιστοσύνης. Συνεπώς, κατέστη σαφές πως ο σχεδιασμός για απόδοση κινήτρων σε υποψήφιους επενδυτές, θα έπρεπε να διεξαχθεί με τέτοιο τρόπο ώστε να μην οδηγεί σε σημαντικά δημόσια ελλείμματα που ως αποτέλεσμα έχουν την επιβάρυνση των λογαριασμών του τελικού καταναλωτή, αλλά με μηχανισμούς ικανούς να αυξήσουν αφενός την ανθεκτικότητα του δικτύου σε πιθανή πλειοψηφική συμμετοχή των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα μεγιστοποιώντας τον οικονομικό δείκτη του κοινωνικού πλεονάσματος.

Ως εκ τούτου, η ΕΕ έχει διεξάγει αναλύσεις διαφορετικών μηχανισμών στήριξης για Φ/Β μικρής κλίμακας για την τόνωση της επενδυτικής εμπιστοσύνης, όπως το Net-Metering και η αποζημίωση μέσω σχημάτων αποζημίωσης με διαφορική προσαύξηση (διαγωνιστικές διαδικασίες). Επιπλέον, σημαντική προσοχή έχει προσελκύσει η δυνατότητα συνδυασμού παραγωγής – ιδιοκατανάλωσης και προσφοράς της πλεονάζουσας ενέργειας στο δίκτυο σε ώρες αιχμής (*peak load*) με συστήματα αποθήκευσης. Προς αυτή την κατεύθυνση, η ΕΕ δείχνει έτοιμη να κατευθύνει πακέτα οικονομικής στήριξης, μέσω του σχεδίου τόνωσης και ανάκαμψης των Ευρωπαϊκών οικονομιών στη μετά-πανδημική περίοδο “*Next Generation EU*” συνολικού προϋπολογισμού 672,5 δις. €. Συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή ενθαρρύνει τα κράτη-μέλη μεταξύ άλλων, να διαθέσουν τους πόρους σε προγράμματα προώθησης του συνδυασμού Φ/Β στεγών – BESS, θέτοντας ως στόχο την εκμετάλλευση του κατά 90% αναξιοποίητου δυναμικού σε στέγες αυξάνοντας κατά 480 GW τη συνολική εγκατεστημένη ισχύ ως το 2030 ([SolarPower Europe, 2020](#)). Την ελκυστικότητα της επένδυσης στις συγκεκριμένες δύο τεχνολογίες υπογραμμίζουν εξειδικευμένες τεχνοοικονομικές μελέτες βασισμένες στη μετρική του σταθμισμένου κόστους ενέργειας, οι οποίες θέτουν το δείκτη LCOE σε τέτοιες επενδύσεις ίσο με 0,0906 €/kWh, αρκετά μικρότερο ανταγωνιστικών βιώσιμων τεχνολογιών όπως τα ηλιοθερμικά πάρκα με δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας με $LCOE = 0.1327 - 0.1513$ €/kWh και τα υπεράκτια αιολικά πάρκα (χαμηλότερης συγκριτικά δυνατότητας αποθήκευσης) με $LCOE = 0.1402$ €/kWh. Τα προαναφερθέντα αποτελέσματα μας οδηγούν στο συμπέρασμα, δεδομένου ότι τα Φ/Β αποτελούν μια δίχως αμφιβολία ώριμη και οικονομικά αποδοτική τεχνολογία, ότι η συμβολή των συστημάτων αποθήκευσης αναμένεται να είναι κυρίαρχη τα προσεχή χρόνια ([Papadopoulou et al., 2020](#)).

Προς αυτή την κατεύθυνση, οι μελλοντικές προσομοιώσεις διεξόδου Φ/Β τεχνολογίας μικρής κλίμακας διεξάγονται υπό προγράμματα επιδότησης συστημάτων ιδιοκατανάλωσης, διερευνώντας αφενός τον αντίκτυπο των τιμών λιανικής ηλεκτρικού ρεύματος και αφετέρου των τιμών επένδυσης σε συστήματα αποθήκευσης στην υιοθέτηση Φ/Β συστημάτων. Η καινοτομία της παρούσας μελέτης έγκειται στη γεφύρωση των κλάδων της ανάλυσης αβεβαιότητας και της συγκριτικής αξιολόγησης πολιτικών μέσω ABM, καταδεικνύοντας το πώς η εισαγωγή αβέβαιων παραμέτρων στη μοντελοποίηση ενεργειακών συστημάτων μπορεί να επηρεάσει το σχεδιασμό πολιτικής και να καταστεί ένα χρήσιμο εργαλείο λήψης αποφάσεων.

Καθώς η μελέτη επικεντρώνεται σε 3 Ευρωπαϊκές χώρες με διαφορετικές αφετηρίες ως προς το νομοθετικό πλαίσιο για την ένταξη στο ηλεκτρικό σύστημα συστημάτων αποθήκευσης (π.χ. για την περίπτωση της Ελλάδας το σχετικό ρυθμιστικό πλαίσιο βρίσκεται ακόμη υπό ανάπτυξη), χρησιμοποιήθηκαν παραδείγματα άλλων κρατών ως οδηγός για την επιλογή κατάλληλου επιπέδου επιδότηση, όπως της Γερμανίας όπου το Ομοσπονδιακό Υπουργείο

Περιβάλλοντος και Προστασίας Φυσικών Πόρων επιδοτεί επί του παρόντος το 30% του κόστους κεφαλαίου των συστημάτων αποθήκευσης για υπάρχουσες εγκαταστάσεις Φ/Β έως και 30 kWp, με περισσότερα από 40,000 οικιακά συστήματα να έχουν εγκατασταθεί στη διάρκεια του 2018. Άλλα παραδείγματα αποτελούν αυτό της τοπικής κυβέρνησης της Νότιας Αυστραλίας ([Department of Energy and Mining, 2018](#)), όπου με την τροπολογία “Home Battery” εξασφαλίζεται ένα ύψος επιδότησης ύψους \$200 / kWh, καταργώντας όμως παράλληλα τη δυνατότητα αποζημίωσης μέσω FIT από την πώληση της πλεονάζουσας ενέργειας στο δίκτυο και της Σουηδίας όπου από την έγκριση της τροπολογίας το Νοέμβριο του 2016, επιχορηγείται το 60% του αρχικού κόστους επένδυσης με μέγιστο ποσό τα 5000 €. ([Steel, 2016](#)). Έτσι, με κριτήριο τα παραπάνω παραδείγματα, επιλέχθηκαν στα πλαίσια της μελέτης μελλοντικών προσομοιώσεων και των δύο αντιπροσωπευτικών κρατών τα ακόλουθα *επίπεδα επιχορήγησης* συστημάτων αποθήκευσης επί του αρχικού κόστους κεφαλαίου:

i. 30 % ii. 50 % iii. 65%

Επίσης, οι αβέβαιες παράμετροι που θεωρείται πως επηρεάζουν την απόδοση των υπό μελέτη πολιτικών είναι *κοινωνικού* (Αρχικές Πεποιθήσεις, Πιθανότητα υλοποίησης επένδυσης, Αντίσταση ως προς την υλοποίηση επένδυσης σε Φ/Β), *τεχνολογικού* (κόστος υλοποίησης επένδυσης σε συστήματα Φ/Β και BESS) καθώς και *σχετικών με την αγορά ενέργειας* (τιμή λιανικής ηλεκτρικού ρεύματος, επίπεδα ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας) περιεχομένου. Ως επιτυχής θεωρείται η πολιτική στα πλαίσια της οποίας η διείσδυση Φ/Β μικρής κλίμακας είναι σύμφωνη με τους στόχους που έχουν τεθεί στα αντίστοιχα ΕΣΕΚ κάθε χώρας, κάτω από *οποιαδήποτε* μελλοντική εξέλιξη των σχετικών αβέβαιων παραμέτρων.

Για την ανάλυση σεναρίων, ορίζουμε τις παραμέτρους που σχετίζονται με την αγορά με βάση αφενός την παρελθοντική τάση ανόδου / πτώσης τιμών και αφετέρου με βάση τα σημερινά επίπεδα κόστους. Επιπλέον, τα χαρακτηριστικά της υιοθετούμενης Φ/Β τεχνολογίας και τα αντίστοιχα προφίλ παραγωγής και κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζονται σύμφωνα με τα διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα. Δεδομένου όμως ότι οι τιμές ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζουν σημαντικά το οικονομικό αποτέλεσμα της χρήσης Φ/Β εφαρμογών σε συνδυασμό με ιδιοκατανάλωση λόγω της έντονης διακύμανσής τους στον κύκλο ζωής των αυτών συστημάτων και παρόλο που τέτοια σχήματα στήριξης (όπως για παράδειγμα το Net Metering) γίνονται ολοένα και πιο ελκυστικά για τους ιδιοκτήτες όλων των ομάδων εισοδήματος, η απόδοση των επενδύσεων παραμένει σε μεγάλο βαθμό εξαρτημένη από την απρόβλεπτη χρέωση λιανικής ηλεκτρικής ενέργειας, αυξάνοντας έτσι την αβεβαιότητα για τους υποψήφιους επενδυτές. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, γίνεται η υπόθεση μιας προοδευτικής *ανόδου* των τιμών λιανικής ρεύματος, η οποία στηρίζεται στις ολοένα αυξανόμενες τιμές δικαιωμάτων εκπομπών CO₂ καθώς και ως μοχλός χρηματοδότησης των φιλόδοξων πολιτικών που ενυπάρχουν σε κάθε ΕΣΕΚ και που είναι σε συμφωνία με τις εκτιμήσεις της Ευρωπαϊκής

Επιτροπής για αύξηση στις τιμές λιανικής κατά 18% έως και το έτος 2030 σε σύγκριση με τα επίπεδα του 2010, σταθεροποίηση στα αυτά επίπεδα στο διάστημα 2030 – 2040 και σταδιακή μετέπειτα αποκλιμάκωση (European Commission, 2016). Επομένως, στα πλαίσια της μελέτης για κάθε μία εκ των χωρών, η ετήσια αύξηση τίθεται σε επίπεδα που κυμαίνονται στο διάστημα [0,9% - 1%] έως το 2030.

Όσον αφορά τις υπόλοιπες αβέβαιες παραμέτρους, προβλέπονται διαφορετικής κατεύθυνσης σενάρια για την εξέλιξη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στον οικιακό τομέα, με μικρές μειώσεις όσο και μέτριες αυξήσεις την προσεχή δεκαετία. Αυτά τα σενάρια κυμαίνονται στο διάστημα -0,2 % έως και 1,2% με τα σενάρια αύξησης να βασίζονται κυρίως στις αναμενόμενες αλλαγές στα μέσα θέρμανσης που θα τροφοδοτούνται από ηλεκτρική ενέργεια (αντλίες θερμότητας), στην αύξηση των ηλεκτρικών συσκευών καθημερινής χρήσης καθώς και λόγω του εξηλεκτρισμού του τομέα μεταφορών και τη μετάβαση στην ηλεκτροκίνηση, ενώ τα αρνητικά σενάρια προϋποθέτουν μια ευρεία εφαρμογή των μέτρων ενεργειακής απόδοσης σε όλους τους κλάδους της οικονομικής δραστηριότητας. Τέλος, σε ό,τι άπτει τις τεχνολογικές παραμέτρους, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, το κόστος επένδυσης σε BESS θα μπορούσε να μειωθεί μεταξύ 30% και 66% έως το 2030 σε σχέση με τα επίπεδα του 2017-2018 (Ioannis Tsiropoulos et al., 2018). Αυτό αντιστοιχεί σε ετήσια μείωση κατά προσέγγιση -2,5% έως -5.1%. Για την περίπτωση των Φ/Β δαπανών, υπάρχουν διάφορα σενάρια που προβλέπουν τη μείωση στις τιμές των συστοιχιών από τα οποία συνήχθησαν οι ελάχιστες και οι μέγιστες ετήσιες μειώσεις τιμών και που κυμαίνονται στο διάστημα -4,53% με -1,8% (Ardani, 2010).

Πίνακας 5.1: Διαστήματα αβέβαιων παραμέτρων που χρησιμοποιήθηκαν για τη δημιουργία των σεναρίων.

	Electricity retail price (%/year)	Residential Electricity Demand (%/year)	BESS cost (%/year)	PV cost (%/per year)
Min	0.9	-0.2	-5.1	-4.53
Max	1	1.2	-2.5	-1.8

Πίνακας 5.2: Τελική διαμόρφωση σεναρίων υπό εξέταση βάσει των παραπάνω τιμών των αβέβαιων παραμέτρων για τη μελέτη της διάχυσης Φ/Β μικρής κλίμακας.

<i>a/a scenarios</i>	Storage subsidy level (% of initial investment costs)	Electricity retail price increase (%/year)	Residential Electricity Demand increase/ decrease (%/year)	Storage cost reduction (%/year)	PV cost reduction (%/per year)
Σενάριο 1	30	0.90	- 0.20	- 5.10	- 4.53
Σενάριο 2	30	1.00	+1.20	- 5.10	- 4.53
Σενάριο 3	30	0.90	- 0.20	- 2.50	- 1.80
Σενάριο 4	30	1.00	+1.20	- 2.50	- 1.80
Σενάριο 5	50	0.90	- 0.20	- 5.10	- 4.53
Σενάριο 6	50	1.00	+1.20	- 5.10	- 4.53
Σενάριο 7	50	0.90	- 0.20	- 2.50	- 1.80
Σενάριο 8	50	1.00	+1.20	- 2.50	- 1.80
Σενάριο 9	65	0.90	- 0.20	- 5.10	- 4.53
Σενάριο 10	65	1.00	+1.20	- 5.10	- 4.53
Σενάριο 11	65	0.90	- 0.20	- 2.50	- 1.80
Σενάριο 12	65	1.00	+1.20	- 2.50	- 1.80

Μετά τον προσδιορισμό των παραπάνω διαστημάτων αβεβαιότητας των παραμέτρων ενδιαφέροντος, δημιουργήθηκαν και προσομοιάστηκαν στο ATOM 25 διαφορετικά σενάρια συνδυασμών agent related parameters (τα εύρη των οποίων καθορίστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο) χρησιμοποιώντας την τεχνική LHS έτσι ώστε να αποτυπωθούν για όλα τα προφίλ οντοτήτων οι πιθανές τροχιές υιοθέτησης Φ/Β μικρής κλίμακας και να ελεγχθεί η πιθανή συμμόρφωσή τους με τους στόχους των ΕΣΕΚ των περιπτώσεων μελέτης.

Οι κύριες παραδοχές του υποστηρικτικού πλαισίου ιδιοκατανάλωσης που σχετίζονται με τη μελέτη περιγράφονται παρακάτω ως ακολούθως:

- i. Η χρέωση που πραγματοποιείται με βάση την ενδεδειγμένη τιμή λιανικής ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ της συνολικής ζήτησης της οικιακής μονάδας και της ενέργειας που απορροφάται από το δίκτυο, εάν η διαφορά αυτή είναι θετική.
- ii. Ο καταναλωτής θεωρείται ότι χρεώνεται για τη συνολική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνεται (δηλαδή, τόσο για την ηλεκτρική ενέργεια που απορροφάται από το δίκτυο όσο και για εκείνο το κλάσμα της Φ/Β ενέργειας που παράγεται και καταναλώνεται επί τόπου) καθώς για τις διάφορες ΥΚΟ ανά εξεταζόμενη χώρα. Όμως, τα τέλη μεταφοράς και διανομής λογίζονται μόνο για την ποσότητα ενέργειας που απορροφάται από το δίκτυο.
- iii. Τα συστήματα αποθήκευσης διαστασιολογήθηκαν με αναλογία **1 - προς – 1** ($W_p - W_h$) ως προς τις αντίστοιχες εγκατεστημένες Φ/Β διατάξεις. Επίσης, το αρχικό κόστος

επένδυσης σε BESS καθορίστηκε στα **800 €/kWh** και η αναμενόμενη διάρκεια ζωής ίση με **3.000** ισοδύναμους πλήρεις κύκλους φόρτισης - εκφόρτισης (Figgener et al., 2021).

- iv. Για το μοντέλο κατανομής της μονάδας αποθήκευσης, χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος βελτιστοποίησης ιδιοκατανάλωσης (Quoilin et al., 2016), ο οποίος παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Β. Συνοπτικά, η ισχύς αποθήκευσης κατανέμεται με τέτοιο τρόπο ώστε να μεγιστοποιηθεί η ιδιοκατανάλωση. Στις περιπτώσεις όπου η εγγεόμενη Φ/B ισχύς υπερβεί τη ζήτηση, η μπαταρία φορτίζεται έως το μέγιστο, με τυχόν πλεονάζουσες ποσότητες να εγγέονται στο δίκτυο χωρίς κάποια ανταμοιβή, ενώ μόλις η ζήτηση υπερβεί την αυτό-παραγόμενη ενέργεια, η μπαταρία αποφορτίζεται ως το ελάχιστο αποδεκτό επίπεδο φόρτισης. Οι απώλειες που ελήφθησαν υπόψη σχετίζονται με αυτές της μπαταρίας και του αντιστροφέα. Τέλος, το μοντέλο δεν εξετάζει την δυνατότητα ενεργού απόκρισης της ζήτησης (σταθερό προφίλ κατανάλωσης).
- v. Το μοντέλο που χρησιμοποιείται για τις μελλοντικές προσομοιώσεις διαφέρει από αυτό που χρησιμοποιήθηκε στη βαθμονόμηση με τους ακόλουθους τρόπους:
- Όταν οι οντότητες αποφασίζουν να επενδύσουν σε Φ/B, μπορούν να επιλέξουν ανάμεσα από ένα περιορισμένο σύνολο επιλογών, που είναι διαθέσιμες για κάθε οντότητα. Αυτές οι επιλογές αφορούν το μέγεθος της εγκατεστημένης ισχύος - **2,4 kWp, 4,8 kWp ή 9,6 kWp** καθώς και **12,4 kWp, 14,8 kWp, 19,6 kWp** για την περίπτωση της Γερμανίας για λόγους που θα αναλυθούν παρακάτω.
 - Εάν περισσότερες από μία επιλογές αξιολογούνται ευνοϊκά από ένα καταναλωτή, η τελική επιλογή βασίζεται στον κανόνα **SoftMax** (δηλαδή, μια κανονικοποιημένη εκθετική συνάρτηση) και έτσι η πιθανότητα επένδυσης στην επιλογή j σχετίζεται με την αντίσταση r_j της οντότητας ως προς αυτή με τη σχέση $P_j = \frac{e^{-r_j}}{\sum_k e^{-r_k}}$. (V. Stavrakas et al., 2019) (5.1)

Με βάση τα παραπάνω, το *οικονομικό όφελος* από την επένδυση στο προτεινόμενο σύστημα ιδιοκατανάλωσης - αποθήκευσης υπολογίζεται σύμφωνα με τον ακόλουθο τύπο:

$$P_{resid}^{total} = C_{grid} * (E_{resid} - E_{grid}) + C_{PV} * E_{resid_{PV}} \quad (5.2)$$

όπου:

- C_{grid} : Χρεώσεις για τη συνολική ποσότητα ενέργειας που καταναλώνεται ($\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$).
- C_{PV} : Χρεώσεις για τη συνολική ποσότητα ενέργειας που απορροφάται από τη Φ/B συστοιχία ($\frac{\text{€}}{\text{kWh}}$).
- E_{resid} : Η συνολική οικιακή ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (kWh).
- E_{grid} : Η συνολική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που απορροφήθηκε από το δίκτυο (kWh).

- $E_{resid_{pv}}$: Η συνολική ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώθηκε από το Φ/Β σύστημα (kWh).

Το κόστος επιδότησης των συστημάτων αποθήκευσης για κάθε μελετούμενο σενάριο, υπολογίστηκε ως εξής:

$$Cost_i = Cost_{i-1} + (A_i - A_{i-1}) * BC * (1 - BDR_i) * SL \quad (5.3)$$

- i : το έτος προσομοίωσης,
- $Cost_i$: το κόστος της πολιτικής έως το έτος i ,
- A_i : οι προσθήκες συνολικής Φ/Β ισχύος έως το έτος i ,
- BC : το αρχικό κόστος επένδυσης σε BESS,
- $1 - BDR_i$: το ποσοστό μείωσης του κόστους BESS κατά το έτος i σε σχέση με το έτος αναφοράς κόστους (2017),
- SL : το επίπεδο επιδότησης.

Τέλος, είναι πολύ σημαντικό να επισημανθεί πως ως έτος αναφοράς (*baseline scenarios*) και για τις δύο επόμενες μελέτες περιπτώσεων θεωρήθηκε το έτος 2019, καθώς στα πλαίσια της εργασίας ήταν πρακτικά αδύνατον να προβλεφθούν και να ποσοτικοποιηθούν οι επιπτώσεις της πανδημικής κρίσης COVID 19 στο μέγεθος και την εξέλιξη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή ήπειρο, οι οποίες επιπτώσεις προβλέπεται και να μετριαστούν από το προσεχές διάστημα (3^ο τρίμηνο 2021).

5.2 Εφαρμογή μελλοντικής προσομοίωσης: Μελέτη περίπτωσης: Ελλάδα

Η Ελλάδα είναι μια ηπειρωτική χώρα με ποικίλα γεωγραφικά χαρακτηριστικά και διαπιστωμένη μεγάλη δυναμικότητα σε παραγωγή ενέργειας από ΑΠΕ. Τα τελευταία χρόνια αποτελεί εστία ριζικών αλλαγών στο σχεδιασμό ανάπτυξης του ενεργειακού συστήματος καθώς στο 2^ο μισό του έτους 2019 η τοπική κυβέρνηση έλαβε την πολιτική απόφαση να αποσύρει τις μονάδες παραγωγής ενέργειας από άνθρακα, που έως τότε αποτελούσαν το «εθνικό καύσιμο», σε σύντομο χρονικό ορίζοντα (μέχρι το 2028). Η εξέλιξη αυτή αφήνει πρόσφορο έδαφος για εκτεταμένες εργασίες μοντελοποίησης με αφετηρία βιώσιμες στρατηγικές, διασφαλίζοντας παράλληλα την μετέπειτα ενεργειακή επάρκεια και τη δίκαιη κοινωνική μετάβαση (V. Stavrakas et al., 2021).

Η χώρα έχει επιλεγεί ως μία εκ των αντιπροσωπευτικών κρατών της διαδικασίας διεξαγωγής μελλοντικών προσομοιώσεων ως μια συνισταμένη των παρακάτω παραγόντων:

- Ευνοϊκό δυναμικό ηλιακής ακτινοβολίας, με μέσο δείκτη GHI ίσο με 1637 kWh/m² με ομοιόμορφη κατανομή του εν λόγω ηλιακού δυναμικού (σε αντίθεση με την περίπτωση

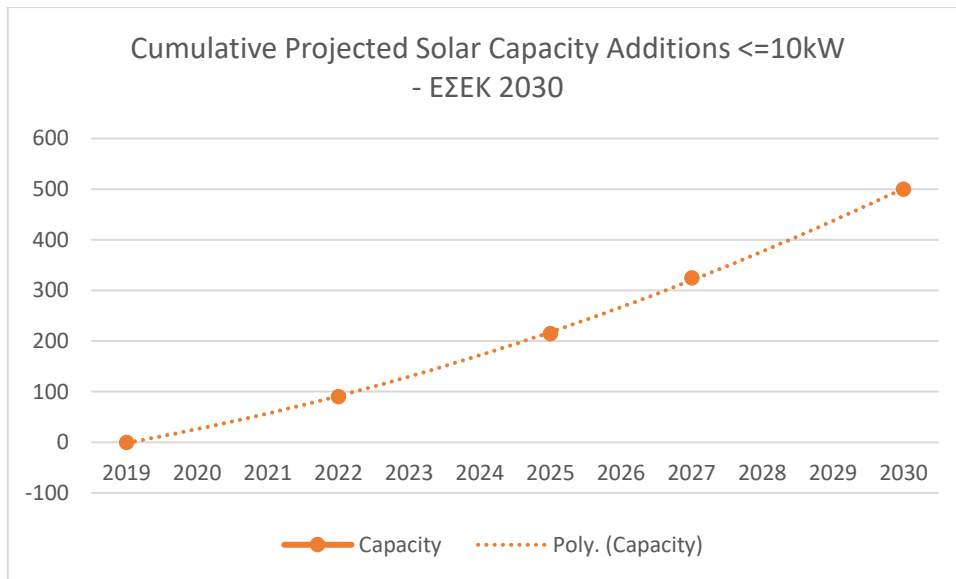
της Ιταλίας, με τις διαφορές μεταξύ Βορρά και Νότου να δυσχεραίνουν την αποτύπωση μέσου προφίλ ηλιακής παραγωγής).

- ii. Δυσμενείς κοινωνικο-οικονομικές δομές την τελευταία 10-ετία, με σημαντικές μειώσεις στην μέση αγοραστική δύναμη του μέσου νοικοκυριού.
- iii. Θεσμικό πλαίσιο που πρόκειται να εντάξει και στηρίζει ενεργά τα συστήματα BESS, ως άμεση επιταγή για την επάρκεια του ηλεκτρικού συστήματος στη μετα-λιγνιτική εποχή.
- iv. Σημαντική οικονομική ενίσχυση από Ευρωπαϊκούς πόρους (*Ταμείο Ανάκαμψης - EU's National Strategic Reference Framework (NSRF) 2021 - 2027*) που θα απευθυνθεί σε προγράμματα βιώσιμης πολιτικής.

Σημειώνεται ότι με βάση τα διαθέσιμα στατιστικά από το ΔΑΠΕΕΠ, η αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς στη χώρα στις 31/12/2019 είναι 2,828 GWp, με τα Φ/Β στεγών να ανέρχονται στα 351 MWp. Ο στόχος αυτής της μελέτης είναι η επιλογή των κατάλληλων μέτρων πολιτικής ώστε να ενθαρρυνθεί η περαιτέρω διάχυση Φ/Β μικρής κλίμακας προς την επίτευξη των εθνικών στόχων για το 2030, **χωρίς** να λαμβάνονται υπόψη οι ενδιάμεσοι δεσμευτικοί στόχοι που έχει θέσει το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο για 18%, 43% και 65% κάλυψη στόχων τα έτη 2022, 2025, 2027 αντίστοιχα. Λαμβάνοντας υπόψη τους ανανεωμένους συνολικούς στόχους αθροιστικής ισχύος Φ/Β που ελήφθησαν το 2020 για νέες προσθήκες ίσες με **3,3 GWp** ως το 2030 καθώς και ότι κατά την περίοδο από το 2016 έως το 2018 η συμβολή των Φ/Β μικρής κλίμακας στη συνολική κυμαινόταν στο 14%, όπου για κάθε εγκατάσταση μεγάλης κλίμακας ίση με 7 MWp έχει εγκατασταθεί 1 MWp Φ/Β μικρής κλίμακας⁶, με την τάση αυτή να τείνει προς ελάττωση λόγω της προγραμματισμένης ένταξης μεγάλων ηλιακών πάρκων εθνικού συμφέροντος⁷, η τιμή - στόχος της υπό εξέταση προβλεπόμενης προσθήκης ισχύος ορίστηκε ίση με **500 MWp** (όσα περίπου αδειοδοτήθηκαν την τετραετία 2009 – 2013 που ο μηχανισμός FIT ήταν σε ισχύ), η τροχιά της οποίας φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα.

⁶ ΔΑΠΕΕΠ, Μηνιαίο Δελτίο Ειδικού Λογαριασμού ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ, Δεκέμβριος 2019.

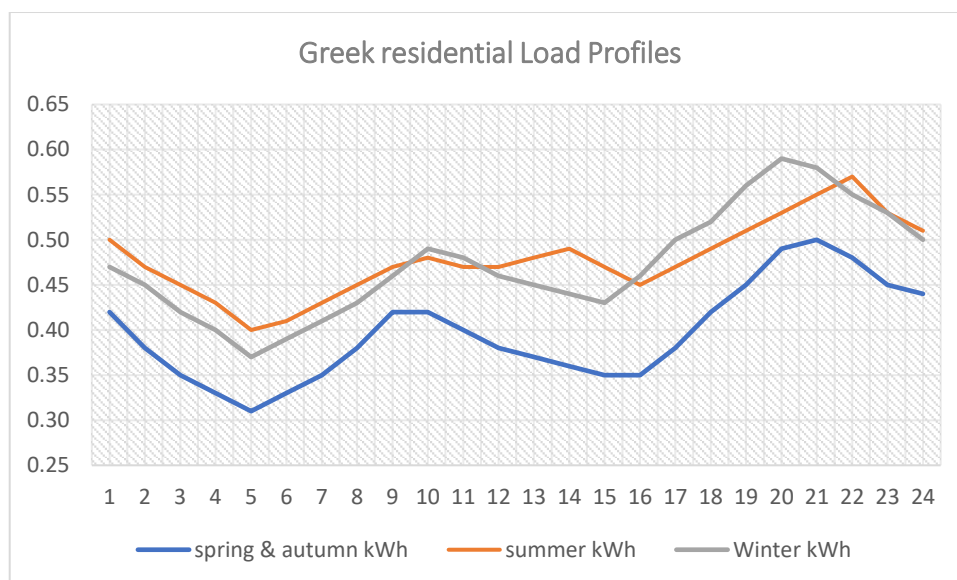
⁷ Σαν παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί το mega project 200 MW στο λιγνιτικό κέντρο Δυτικής Μακεδονίας (περιφερειακή ενότητα Κοζάνης).



Εικόνα 5.2: Τροχιά εγκατάστασης Φ/Β μικρής κλίμακας, λαμβάνοντας υπόψη την παραδοχή της τιμής – στόχου των 500 MW και την επίτευξη των επιμέρους δεσμευτικών στόχων.

Τα τεχνοοικονομικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στο μοντέλο φαίνονται ως εξής:

1. Ετήσια μέση συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ανά τυπικό Ελληνικό νοικοκυριό: **3750 kWh**, με αντίστοιχα προφίλ κατανάλωσης ανά εποχή



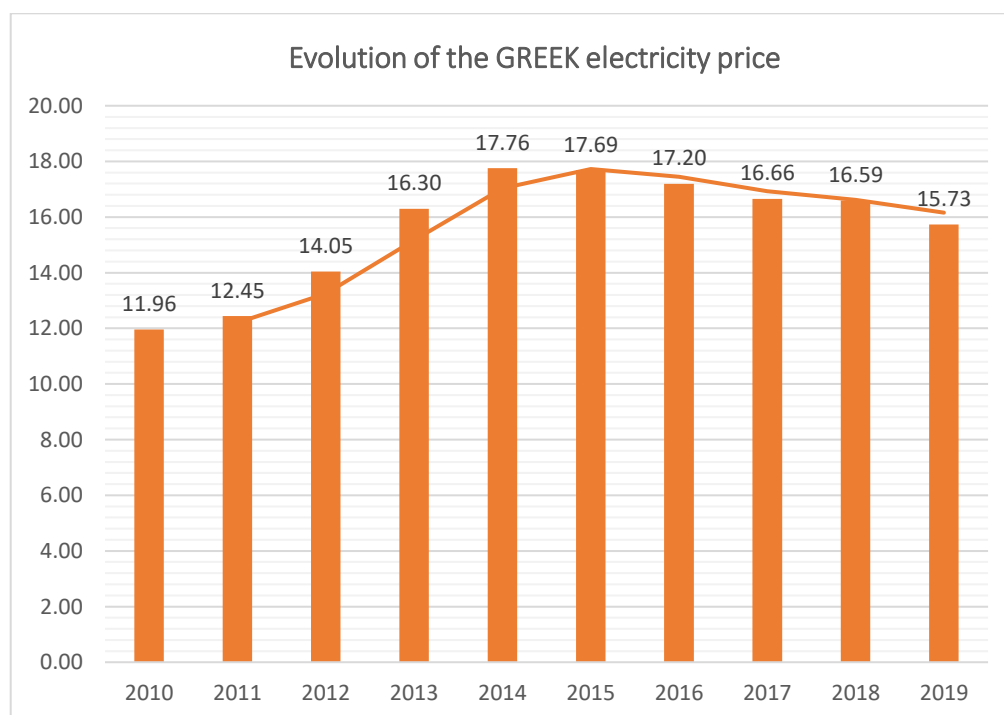
Εικόνα 5.3: Μέσα ημερήσια προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που υπολογίζονται για το «μέσο» νοικοκυριό στην Ελλάδα.

Σημειώνεται ότι το καθημερινό προφίλ χωρίζεται στα τρία ακόλουθα εποχιακά προφίλ, να ληφθούν υπόψη οι επιπτώσεις του καιρού και της θερμοκρασίας στη ζήτηση

ηλεκτρικής ενέργειας: **Περίοδος 1** (ήπιος καιρός): Απρίλιος, Μάιος, Οκτώβριος και Νοέμβριος, **Περίοδος 2** (ζεστός καιρός): Ιούνιος έως Σεπτέμβριος και **Περίοδος 3** (κρύος καιρός): Δεκέμβριος έως Μάρτιος.

2. Μεταβλητό κόστος προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας δεσπόζοντος προμηθευτή ρεύματος Χαμηλής Τάσης (ΔΕΗ ΑΕ):

Κόστη προμήθειας	10.68	67.91%
Χρεώσεις ΑΔΜΗΕ	0.527	3.35%
Χρεώσεις ΔΕΔΔΗΕ	2.13	13.54%
Υπηρεσίες Κοινής Ωφέλειας	0.69	4.39%
Ειδικό Τέλος Μείωσης Αέριων Ρύπων (ΕΤΜΕΑΡ)	1.7	10.81%
Greek average electricity price of 2019 (ct/kWh)	15.73	

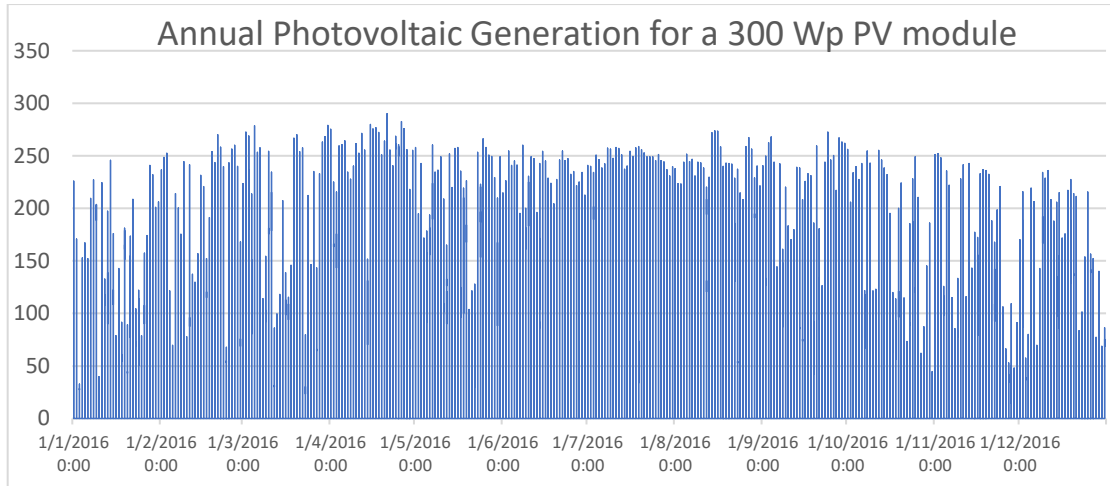


Εικόνα 5.4: Εξέλιξη της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακούς καταναλωτές στην Ελλάδα από το 2010 έως το 2019 [60].

3. Κόστος κεφαλαίου ανάπτυξης μονάδων Φ/Β στέγης: **450 € / 300Wp ή 1485 €/kW⁸.**

Τα τεχνολογικά στοιχεία αναφοράς παραμένουν αμετάβλητα σε σχέση με τη διαδικασία βαθμονόμησης ενώ το ετήσιο ανά ημέρα προφίλ αποτυπώνεται παρακάτω

⁸ Πανελλήνιος Σύλλογος Φωτοβολταϊκών Στέγης – Προβλέψεις για την εξέλιξη του πλήρους τυπικού κόστους ανάπτυξης μονάδων ηλεκτροπαραγωγής από ΑΠΕ.



Εικόνα 5.5: Ισχύς στην έξοδο τυπικού Φ/Β στέγης για την περίπτωση της Ελλάδας.

4. Προϋπολογισμός μέσου νοικοκυριού για υλοποίηση επένδυσης: 5000 €.

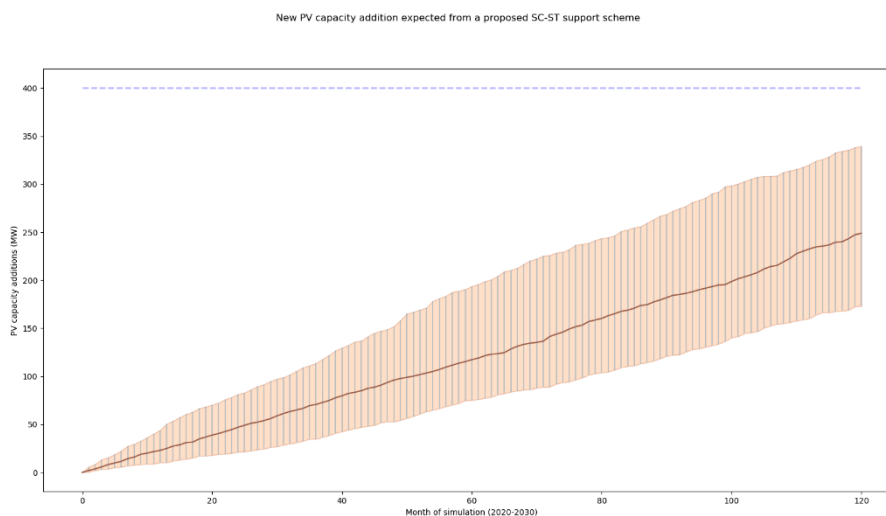
Τέλος, λόγω της εγγενούς στοχαστικότητας των μοντέλων που βασίζονται σε οντότητες, εξερευνάται η αναμενόμενη αποτελεσματικότητα των σχημάτων επιδότησης με τις ίδιες τιμές agent – related παραμέτρων ανά σενάριο. Όλες οι προσομοιώσεις πραγματοποιήθηκαν για 25 διαφορετικά σύνολα τιμών των παραμέτρων σύμφωνα με τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης, αντιπροσωπεύοντας 25 ρεαλιστικά προφίλ συμπεριφοράς κάθε συνδυασμού. Οι προβολές για τη νέα προσθήκη Φ/Β ισχύος κατά τη διάρκεια 2020 – 2030 κλιμακώθηκε (*upscaling*) από το επίπεδο των 1000 agents σε εθνικό επίπεδο χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα και παρατηρήσεις από το μοντέλο του προηγούμενου κεφαλαίου.

Επισημαίνεται ότι σε όλα τα παρακάτω σχηματικά διαγράμματα:

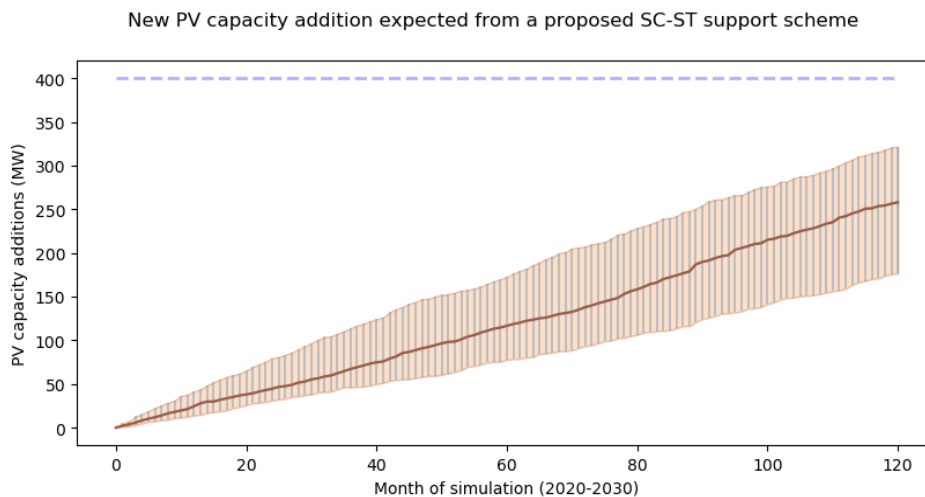
- i. η **μπλε διακεκομμένη γραμμή** αντιστοιχεί στην κατά προσέγγιση αθροιστική χωρητικότητα των αιτήσεων για σύνδεση με το δίκτυο που επιτεύχθηκε με το μηχανισμό FIT της περιόδου που μελετήθηκε στη διαδικασία βαθμονόμησης (2010 – 2013) ως κατώφλι σεναρίου αναφοράς,
- ii. η **καφέ καμπύλη** αντιπροσωπεύει τη μέση αναμενόμενη υιοθέτηση της τεχνολογίας,
- iii. τα **άνω και κάτω γραμμοσκιασμένα όρια** που ενυπάρχουν στο διάγραμμα σηματοδοτούν τα αντίστοιχα *best case* (High μ^{CF} , Low ρ^{CF}) και *worst case* (Low μ^{CF} , High ρ^{CF}) σενάρια,
- iv. Για το λόγο ότι μελετώνται προσθήκες Φ/Β ισχύος, το **σημείο αναφοράς** στην ημερομηνία έναρξης των προσομοιώσεων τέθηκε ίσο με **0 MW** (δηλαδή ότι καμία οντότητα στις 1/1/2020 δεν διαθέτει ήδη Φ/Β σύστημα στέγης),
- v. Η σειρά απεικόνισης των αποτελεσμάτων αντιστοιχίζεται με τα **Σενάρια 1 – 12** του Πίνακα 5.2 (σελ. 90).

Πίνακας 5.3: Εξέλιξη τεχνολογικών και σχετικών με την αγορά παραμέτρων για την περίοδο υπό μελέτη (Ελλάδα).

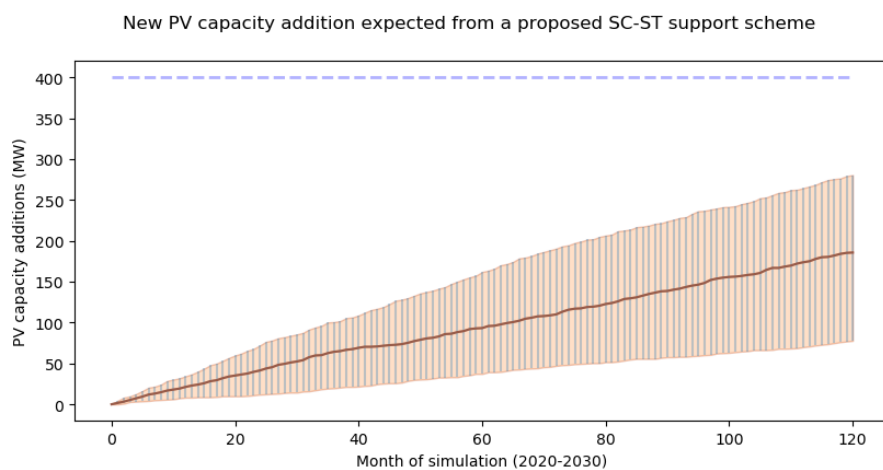
	Retail price increase_High (ct / kWh)	Retail price increase_Low (ct / kWh)	Demand increase / decrease_High (kWh)	Demand increase / decrease_Low (kWh)	Storage cost reduction (%/year)_High (€/kWh)	Storage cost reduction (%/year)_Low (€/kWh)	PV cost reduction_High (€/kWp)	PV cost reduction_Low (€/kWp)
2020	15.887	15.872	3795	3743	759.20	780.00	1417.73	1458.27
2021	16.046	16.014	3841	3735	720.48	760.50	1353.51	1432.02
2022	16.207	16.159	3887	3728	683.74	741.49	1292.19	1406.24
2023	16.369	16.304	3933	3720	648.87	722.95	1233.66	1380.93
2024	16.532	16.451	3980	3713	615.77	704.88	1177.77	1356.08
2025	16.698	16.599	4028	3705	584.37	687.25	1124.42	1331.67
2026	16.865	16.748	4077	3698	554.57	670.07	1073.48	1307.70
2027	17.033	16.899	4125	3690	526.28	653.32	1024.85	1284.16
2028	17.204	17.051	4175	3683	499.44	636.99	978.43	1261.04
2029	17.376	17.204	4225	3676	473.97	621.06	934.10	1238.34
2030	17.549	17.359	4276	3668	449.80	605.54	891.79	1216.05



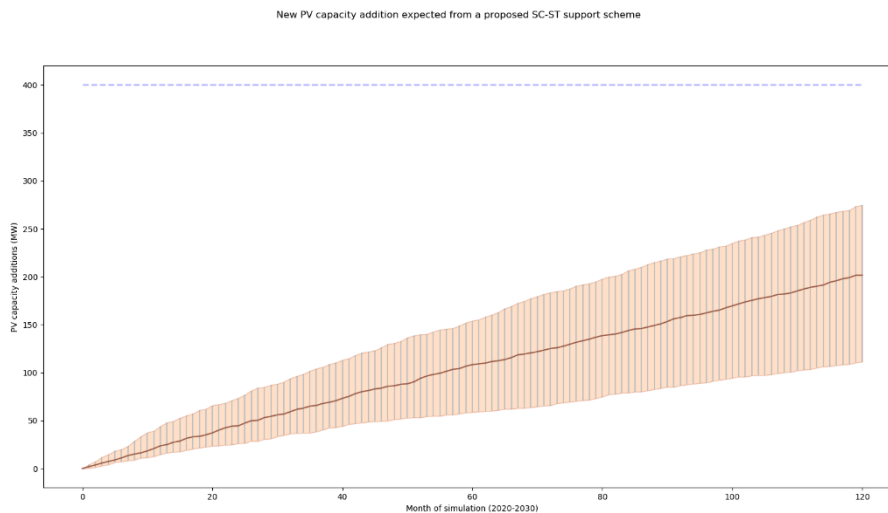
Εικόνα 5.6: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους του **Σεναρίου 1**. Παρατηρούμε ότι σε σύγκριση με το μηχανισμό στήριξης FIT, μια επιδότηση αποθήκευσης 30% με πρόβλεψη μειωμένης ζήτησης και μικρού ρυθμού ανόδου τιμών είναι σαφώς λιγότερο αποτελεσματική, με το πιο αισιόδοξο σενάριο να προβλέπει ότι θα χρειαστούν περισσότερα από δέκα χρόνια για να επιτευχθεί η λίγο περισσότερο από τη μισή προσθήκη ισχύος Φ/Β (**253 MW**) που επιτεύχθηκε στο παρελθόν, παρότι τα κόστη επένδυσης στα αναγκαία συστήματα υποχωρούν σε σημαντικό βαθμό στην περίοδο μελέτης.



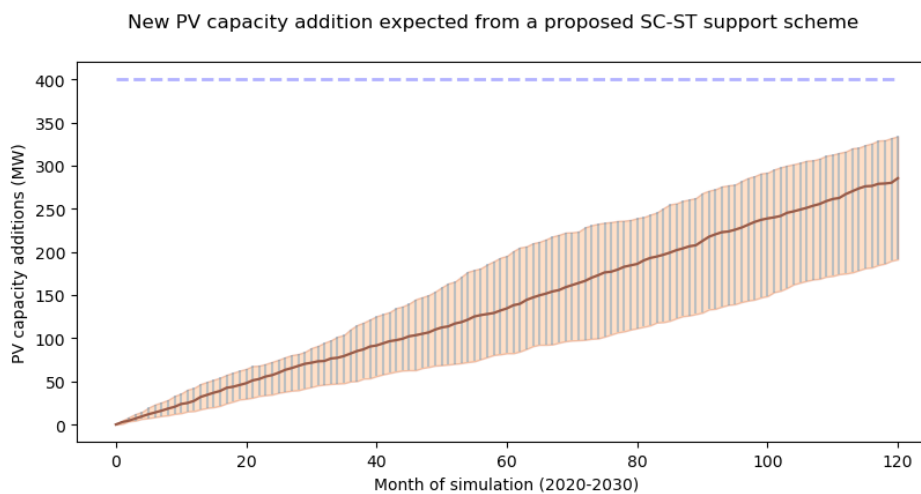
Εικόνα 5.7: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους του **Σεναρίου 2**. Παρατηρούμε ότι σε σύγκριση με το μηχανισμό στήριξης FIT, μια πολιτική επιδότησης αποθήκευσης 30% με πρόβλεψη αυξημένης ζήτησης, υψηλού ρυθμού ανόδου τιμών και σημαντικής υποχώρησης σε τεχνολογικά κόστη, επιτυγχάνει παρόμοιες αποδόσεις (**253 MW**) με το προηγούμενο σενάριο, με την ειδοποιό διαφορά να είναι ο **μικρός βαθμός αβεβαιότητας** (μικρή διασπορά γύρω από τη μέση τιμή) που προκαλείται από τις πιο αβέβαιες παραμέτρους των οντοτήτων (*probability of investing_{mu}*, *installed base_{mu}*). Παρόλα αυτά, είναι εμφανές πως το ύψος επιδότησης σε BESS παραμένει ανεπαρκές ώστε να μεταβάλλει τις πεποιθήσεις των καταναλωτών σχετικά με την κερδοφορία μιας τέτοιας επένδυσης.



Εικόνα 5.8: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους του **Σεναρίου 3**. Στη συγκεκριμένη προσομοίωση παρατηρείται το γεγονός πως οι προσθήκες κυμαίνονται σε πολύ χαμηλά επίπεδα (**192 MW**), λόγω των μη ευνοϊκών συνθηκών για την υιοθέτηση συστημάτων αυτοπαραγωγής – ιδιοκατανάλωσης σε ευρεία κλίμακα.

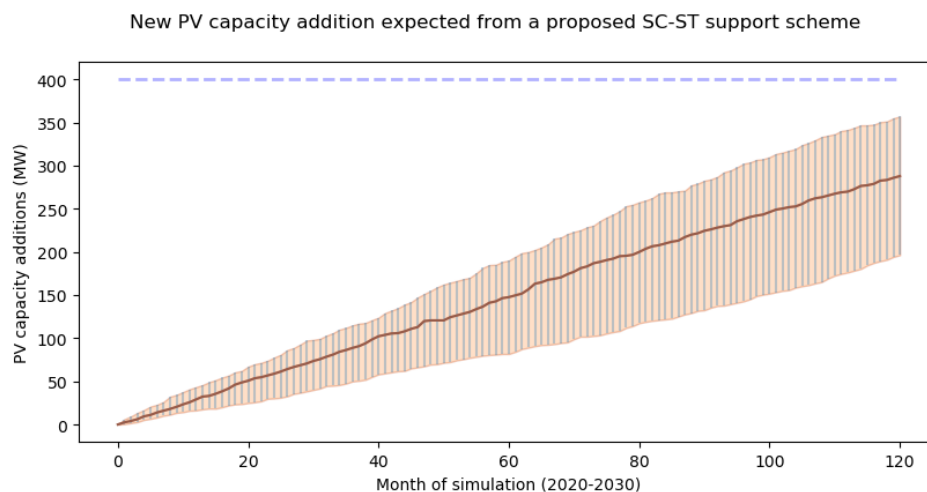


Εικόνα 5.9: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους του **Σεναρίου 4**. Παρατηρούμε ότι με το συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων, όπου τα κόστη επένδυσης μειώνονται με βραδύ ρυθμό και η ζήτηση ακολουθεί ανοδική, η πιο αισιόδοξη πρόβλεψη ανέρχεται σε προσθήκες 250 MW, μακριά από το επίπεδο αναφοράς των 400 MW. Επομένως, η επιδότηση με 30% σε BESS κρίνεται σε αυτή την περίπτωση ως ανεπαρκής να επιφέρει τις επιθυμητές αποδόσεις.

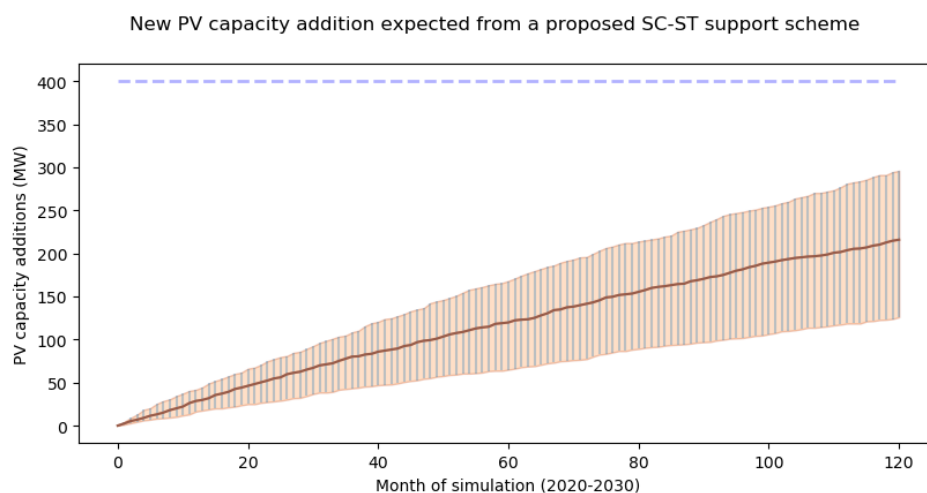


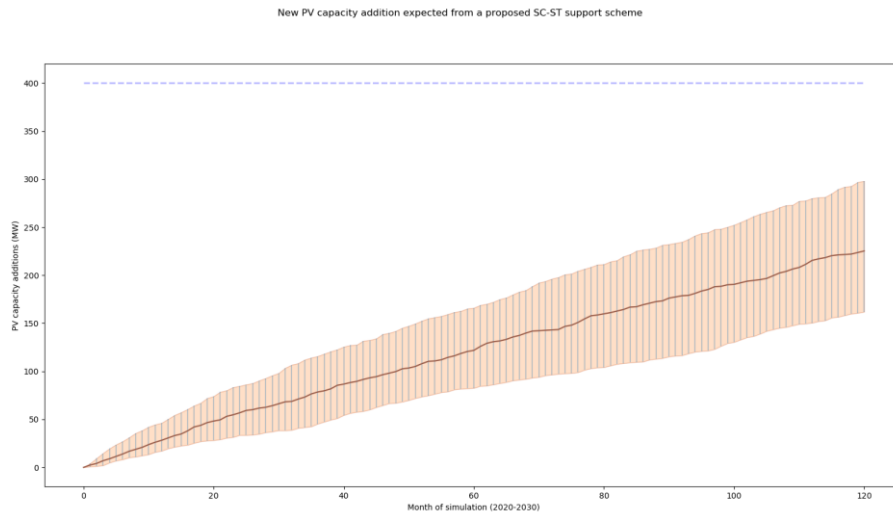
Εικόνα 5.10: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους του **Σεναρίου 5**. Συγκρίνοντας το συγκεκριμένο σενάριο με το Σενάριο 1 (ίδιες αβέβαιες παράμετροι πλην του αυξημένου ποσοστού επιδότησης, ίσο με 50%) παρατηρούμε αφενός τη σχετικά υψηλότερη μέση διείσδυση Φ/Β με **280 MW** νέας εγκατεστημένης ισχύος καθώς επίσης και τη σημαντικά χαμηλότερη διασπορά, με μεγαλύτερα ποσοστά αρνητικής αβεβαιότητας σε αντίθεση με το Σενάριο 1 όπου σημειώθηκε διασπορά προς την αντίθετη κατεύθυνση. Επομένως, είναι εμφανές ότι τα μεγαλύτερα ποσοστά επιδότησης είναι ικανά να

ελαττώσουν την εγγενή συμπεριφορική αβεβαιότητα των οντοτήτων, βελτιώνοντας την ευρωστία των προβλέψεων.

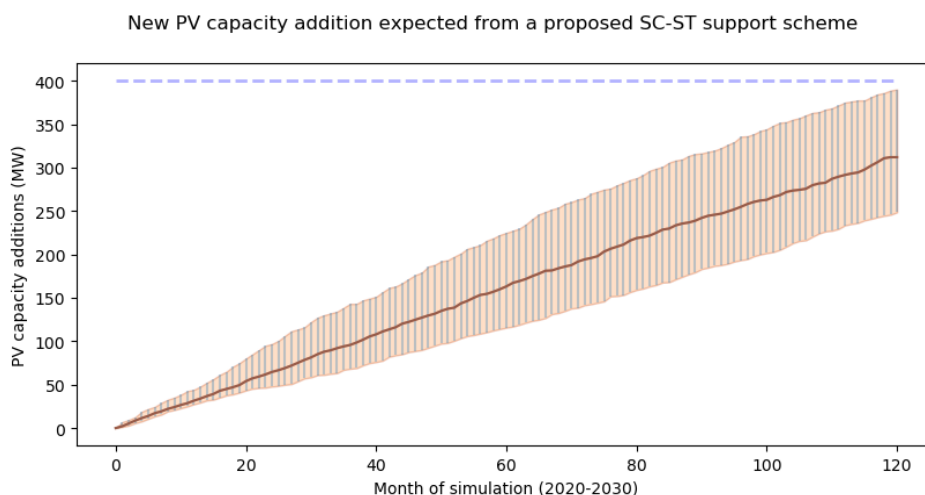


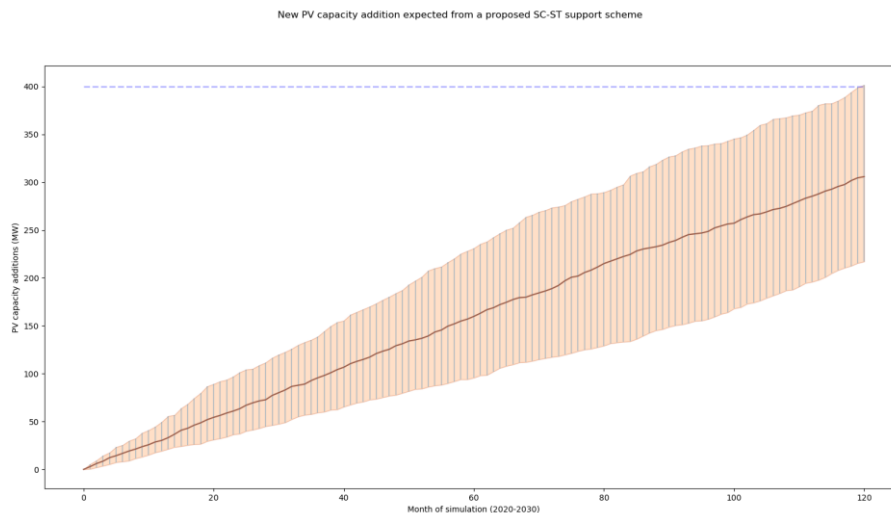
Εικόνα 5.11: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους του **Σεναρίου 6**. Με την υπόθεση αυτή τη φορά ότι η τιμή/ζήτηση της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα θα αυξηθεί, τα αποτελέσματά συνιστούν ότι με την παρούσα πολιτική επιτυγχάνεται σημαντική διείσδυση στα επίπεδα των 300 MW για περισσότερους εύλογους συνδυασμούς agent-related παραμέτρων. Ωστόσο, σε σύγκριση με την προηγούμενη περίπτωση όπου η τιμή λιανικής αυξάνεται με πιο αργό ρυθμό, η μέση βελτίωση δεν είναι σημαντική (της τάξης των 5 MW).



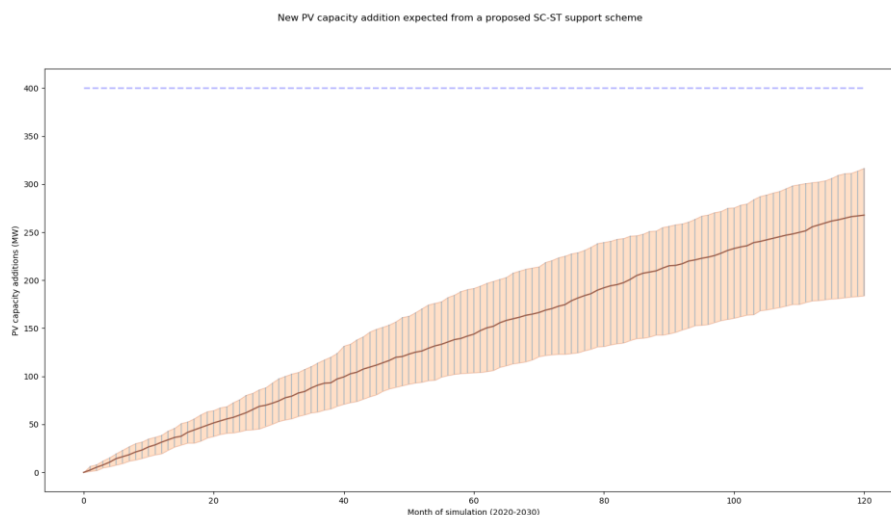


Εικόνες 5.12-5.13: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους των **Σεναρίων 7 και 8**. Στις παραπάνω περιπτώσεις, καθώς οι τεχνολογικές παράμετροι ακολουθούν πιο συντηρητική τροχιά μείωσης, η συνολική μέση αύξηση παραμένει σχεδόν αμετάβλητη σε χαμηλά επίπεδα μακριά του στόχου (~**220 MW**) και η αβεβαιότητα του μοντέλου είναι σε μεγάλο βαθμό πανομοιότυπη μεταξύ των σεναρίων. Έτσι, αυξάνοντας την τιμή λιανικής ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται να μην έχει σημαντική επίδραση στην αποτελεσματικότητα του συστήματος υποστήριξης, ικανή τουλάχιστον να μεταβάλλει τις πεποιθήσεις των υποψήφιων επενδυτών.



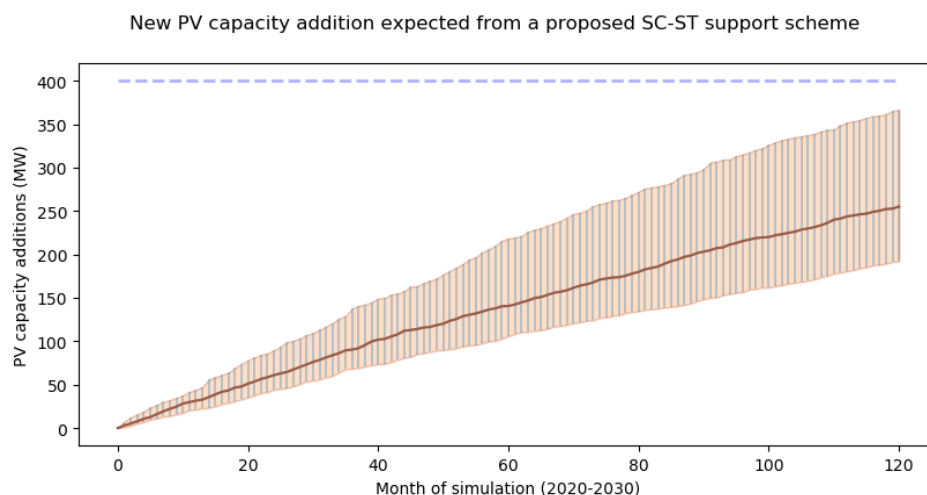


Εικόνες 5.14-5.15: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους των **Σεναρίων 9 και 10**. Τα συγκεκριμένα σενάρια, που αποτελούν και το συνδυασμό των best case σεναρίων για την περίπτωση της Ελλάδας λόγω τεχνολογικών παραμέτρων, καταδεικνύουν τη γενική διάθεση ανάληψης επενδυτικού ρίσκου των καταναλωτών όταν υπάρχει στήριξη από υψηλά ποσοστά συγχρηματοδότησης του συστήματος αποθήκευσης (απότομη κλίση τροχιάς καμπύλης). Η μέση τελική διείσδυση είναι από κοινού στα **311 MW**, με τη διασπορά ανάμεσα στα σενάρια να διαφέρει σημαντικά. Φαίνεται όμως ότι η αύξηση της ζήτησης και των τιμών αποτελούν ισχυρό κίνητρο για επένδυση για την πλειοψηφία των προφίλ οντοτήτων όπου συγκεκριμένα τα 15 από τα συνολικά 25 ξεπερνούν τη μέση τιμή νέων προσθηκών Φ/Β.



Εικόνα 5.16: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους του **Σεναρίου 11**. Το παραπάνω σχήμα υποδεικνύει την ύπαρξη πλειοψηφίας σε απαισιόδοξα σενάρια, υπό της μέσης τιμής που ανέρχεται στα **256 MW** και μακριά από το στόχο, παρόλη

τη γενναιόδωρη αρχική επιδότηση. Φαίνεται ότι τα χαμηλά ετήσια ποσοστά μείωσης του κόστους εγκατάστασης BESS είναι ανεπαρκή και οδηγούν σε μέτριες προσθήκες αναλογικά με τις προσδοκώμενες.

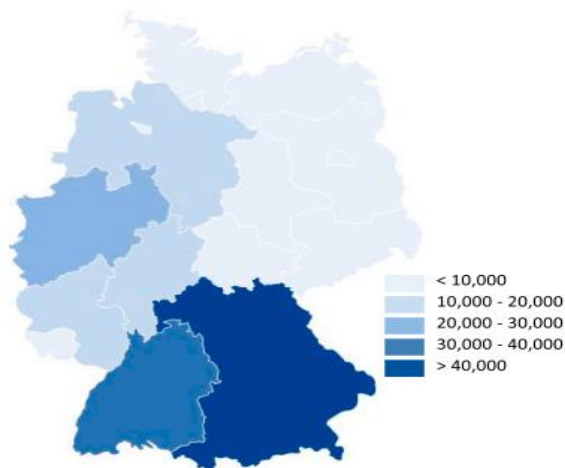


Εικόνα 5.16: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους του **Σεναρίου 12**. Σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο, παρατηρείται η ύπαρξη πλειοψηφίας σε αισιόδοξα σενάρια, πλέον της μέσης τιμής (**267 MW**), με ορισμένα εξ' αυτών να μην υπολείπονται σημαντικά της διείσδυσης με τη μέθοδο αποζημίωσης FIT. Επίσης, στο συγκεκριμένο παράδειγμα σε αντίθεση με το σενάριο 8, αποδεικνύεται η σημαντική επίδραση της παραμέτρου της ζήτησης στη βελτίωση των αρχικών πεποιθήσεων, λόγω της ευνοϊκότερης επιδότησης που αποτελεί συνθήκη ικανή να αντισταθμίσει το χαμηλό ετήσιο ρυθμό μείωσης κόστους της τεχνολογίας.

5.3 Εφαρμογή μελλοντικής προσομοίωσης: Μελέτη περίπτωσης: Γερμανία

Η Γερμανία επιλέχθηκε ως η δεύτερη εκ των αντιπροσωπευτικών κρατών της διαδικασίας διεξαγωγής μελλοντικών προσομοιώσεων για τους παρακάτω – αντίρροπους σε σύγκριση με την Ελληνική μελέτη περίπτωσης – παράγοντες:

- i. Μέτριο δυναμικό ηλιακής ακτινοβολίας, με μέσο δείκτη GHI ίσο με 1066 kWh/m² (J.Beták et al., 2010), το οποίο κατανέμεται ανισομερώς μεταξύ των βορείων και των νοτίων περιοχών της επικράτειας.
- ii. Ένα από τα πιο ισχυρά οικονομικά κράτη της ΕΕ με κεντρικό ρόλο στη θεσμοθέτηση προγραμμάτων προώθησης βιώσιμης πολιτικής (Energiewende).
- iii. Μεγάλος συνολικός πληθυσμός με υψηλή πληθυσμιακή πυκνότητα και μέση αγοραστική δύναμη ανά κάτοικο.
- iv. Θεσμικό πλαίσιο που ήδη εντάσσει και στηρίζει ενεργά τα την ιδιοκατανάλωση με συστήματα αποθήκευσης. Είναι ενδεικτικό πως η αγορά οικιακών συστημάτων αποθήκευσης (χωρητικότητας ≤ 30 kWh) συνέχισε τη δυναμική ανάπτυξή της το έτος 2019 με 60.000 νέες εγκαταστάσεις σε σύνολο 250 MW / 490 MWh. Ο σωρευτικός αριθμός εγκαταστάσεων ανέρχεται σε 185.000 οικιακές εγκαταστάσεις μέχρι το τέλος του έτος 2019 με αθροιστική ισχύ ίση με 750 MW και χωρητικότητα αποθήκευσης ενέργειας στις 1.420 MWh [61].
- v. Σημαντική εμπειρία σε προγράμματα επιχορήγησης συστημάτων αποθήκευσης, όπως το *KfW loan 270*⁹.



Εικόνα 5.17: Εκτιμώμενη γεωγραφική κατανομή συστημάτων οικιακών BESS στη Γερμανία μέχρι το τέλος του 2019 σε απόλυτους αριθμούς.

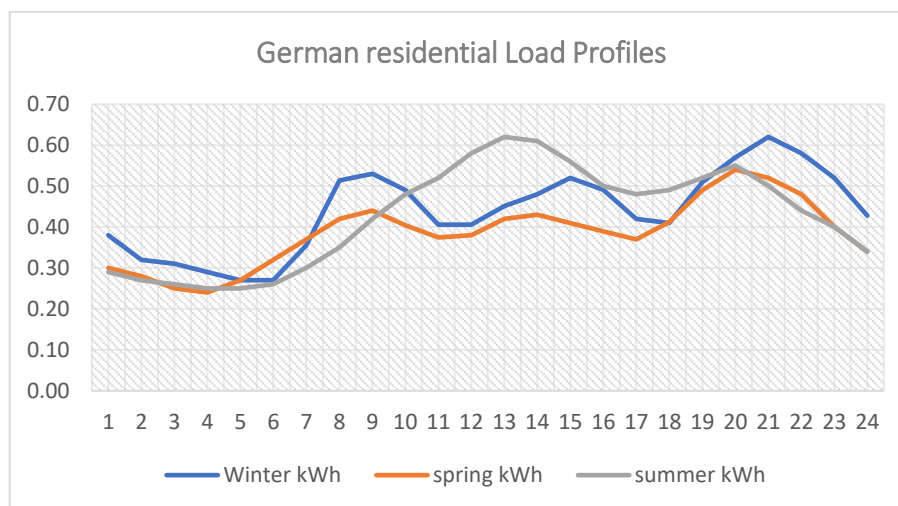
Σύμφωνα με διαθέσιμα στατιστικά από τη Γερμανική ένωση βιομηχανίας ηλιακής ενέργειας (*BSW-Solar*), η αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς στη χώρα στις 31/12/2019 ανέρχεται στα 49 GWp, με τα Φ/Β στεγών να ανέρχονται στα 6,86 GWp. Επίσης, καθώς οι ανανεωμένοι στόχοι

⁹ KfW-Programm Erneuerbare Energien "Speicher"

αύξησης του μίγματος ενέργειας παραγόμενης από ΑΠΕ ανέρχονται στο 65%, ορίζοντας παράλληλα τη συνολική Φ/Β εγκατεστημένη ισχύ στα 98 GWp ως το 2030 (*Integrated National Energy and Climate Plan, 2019*), η προβλεπόμενη διείσδυση Φ/Β μικρής κλίμακας θα πρέπει να κυμαίνεται σε επίπεδα άνω των 6 GWp. Καθόσον όμως η μελέτη στρέφεται στην εγκατάσταση συνδυασμού συστημάτων αυτοπαραγωγής - ιδιοκατανάλωσης και στη συγκριτική ανάλυση με το μηχανισμό FIT, ο υπό εξέταση **στόχος** προσθήκης Φ/Β ισχύος ορίστηκε ίσος με **1,500 GWp**, δηλαδή ίσος με τη συνολική διείσδυση Φ/Β ≤ 10 kWp τη χρονική περίοδο 1/8/2014 - 31/1/2019. Με άλλα λόγια, υποτίθεται ότι εφόσον επιτευχθεί ο συγκεκριμένος στόχος, που στην πραγματικότητα αποτελεί κλάσμα της συνολικής διείσδυσης Φ/Β μικρής κλίμακας που θα περιλαμβάνει και αυτόνομα συστήματα χωρίς αποθήκευση, τότε θα είναι εφικτό και το φιλόδοξο κυβερνητικό πλάνο για περισσότερα από 6 GWp πρόσθετων οικιακών ηλιακών συστημάτων. Ακόμη, θεωρούμε εκτός πεδίου μελέτης τις προβλέψεις των νέων διατάξεων¹⁰ που αφορούν την κατάταξη ως οικιακών (δηλαδή την απαλλαγή από την υποχρέωση καταβολής εισφοράς υπέρ ΑΠΕ – *EEG Levies*) συστημάτων ως και 30 kWp, θέτοντας το συγκεκριμένο όριο στα 20 kWp σε μια προσπάθεια ώστε η Γερμανική μελέτη περίπτωσης να είναι κατά το δυνατόν περισσότερο συγκρίσιμη της αντίστοιχης Ελληνικής.

Τα τεχνοοικονομικά στοιχεία που χρησιμοποιήθηκαν ως είσοδοι στη μελέτη περίπτωσης αποτυπώνονται ως εξής:

1. Ετήσια μέση συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ανά τυπικό Γερμανικό νοικοκυριό: **3260 kWh**, με αντίστοιχα προφίλ κατανάλωσης ανά εποχή

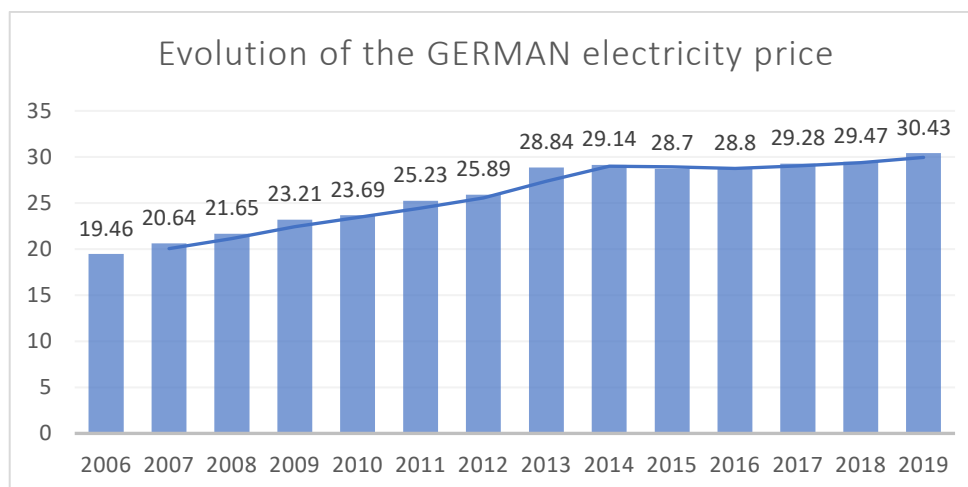


Εικόνα 5.18: Μέσα ημερήσια προφίλ κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που υπολογίζονται για το «μέσο» νοικοκυριό στη Γερμανία.

¹⁰ EEG 2021 - German Renewable Energy Sources Act 2021. Σε ισχύ από 1/1/2021.

2. Μεταβλητό κόστος προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας:

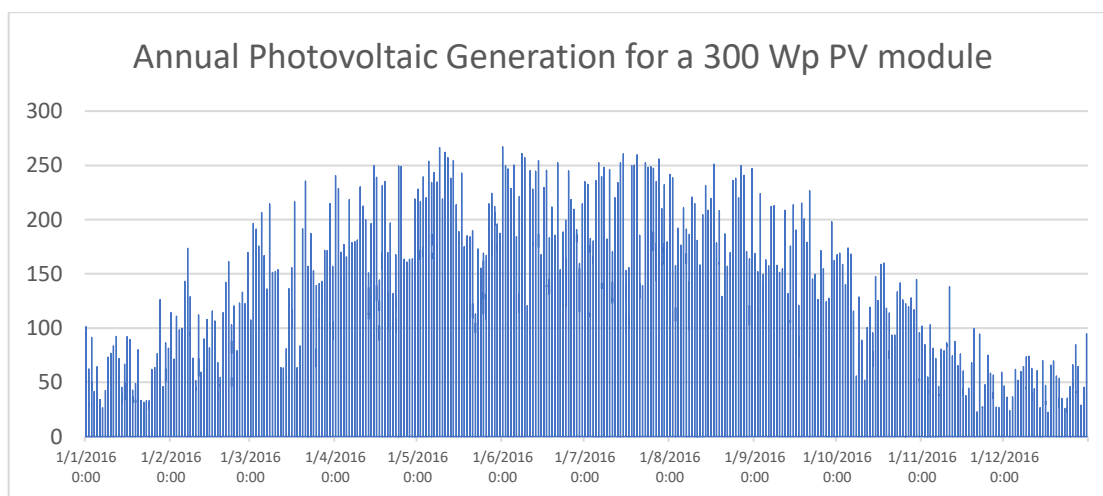
Power generation	7.06	23.20%
Network charges	7.39	24.30%
EEG levy	6.39	21.00%
Concession fee	1.67	5.50%
Electricity tax	2.04	6.70%
VAT	4.87	16.00%
Levies: Offshore liability levy, industry rebate, CHP	1.00	3.30%
German average electricity price of 2019 (ct/kWh)	30.43	



Εικόνα 5.19: Εξέλιξη της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας για οικιακούς καταναλωτές στη Γερμανία από το 2010 έως το 2019 (Eurostat, n.d.).

3. Κόστος κεφαλαίου ανάπτυξης μονάδων Φ/Β στέγης: 445 € / 300Wp ή 1482 €/kW.

Τα τεχνολογικά στοιχεία αναφοράς παραμένουν αμετάβλητα σε σχέση με τη διαδικασία βαθμονόμησης ενώ το ετήσιο ανά ημέρα προφίλ αποτυπώνεται παρακάτω



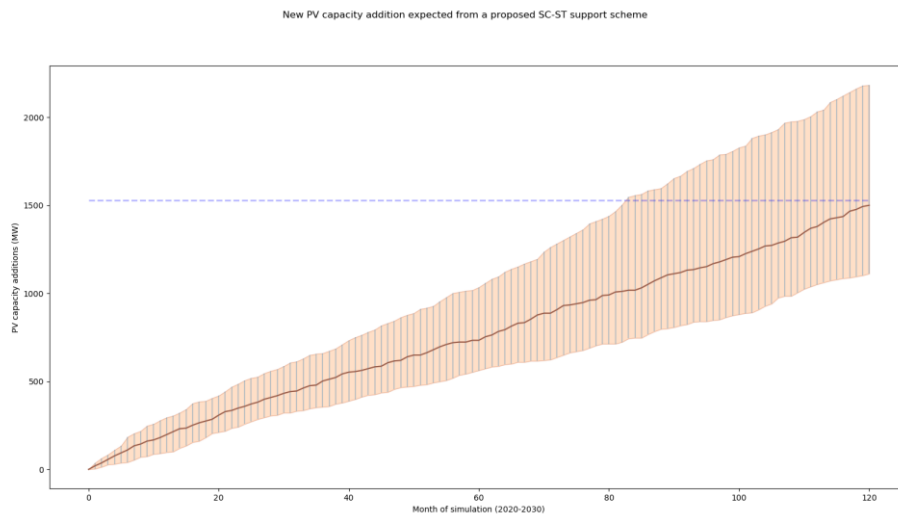
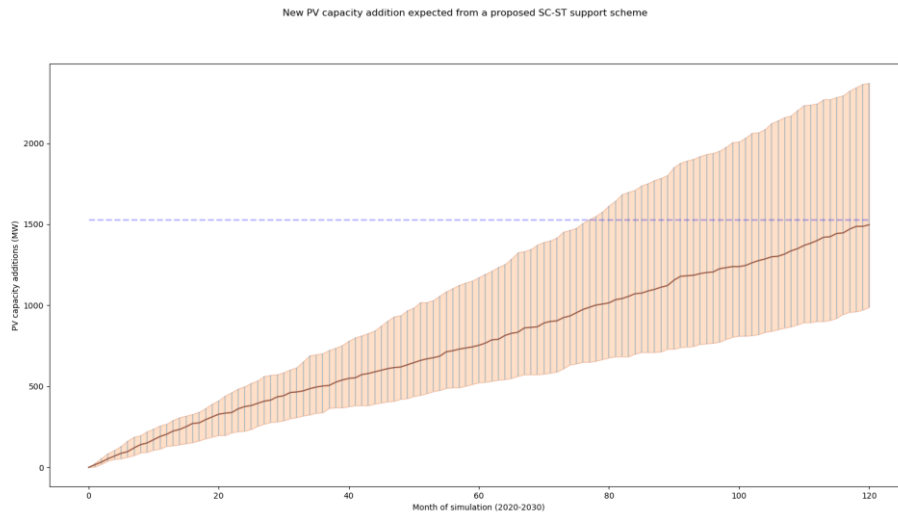
Εικόνα 5.20: Ισχύς στην έξοδο τυπικού Φ/Β στέγης για την περίπτωση της Γερμανίας.

4. Προϋπολογισμός μέσου νοικοκυριού για υλοποίηση επένδυσης: Ορίστηκε διπλάσιος του μέσου Ελληνικού νοικοκυριού, στα **10.000 €**. Προς αυτή την κατεύθυνση, σημειώνεται ότι οι αρχικές πεποιθήσεις και συγκεκριμένα η παράμετρος των μέσων αναμενόμενων χρηματορροών από επένδυση σε ένα Φ/Β ισχύος 300 Wp και αντίστοιχα σε ένα BESS χωρητικότητας 300 Wh μ^{CF} - Initial belief_mu, τέθηκε **διπλάσια** της αντίστοιχης Ελληνικής. Οι υπόλοιπες παράμετροι παρέμειναν στα εύρη που καθορίστηκαν στη διαδικασία βαθμονόμησης.

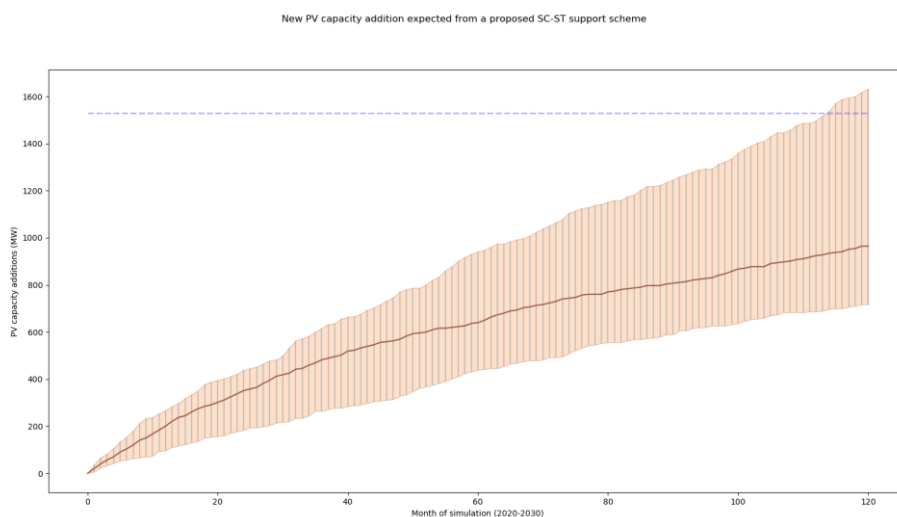
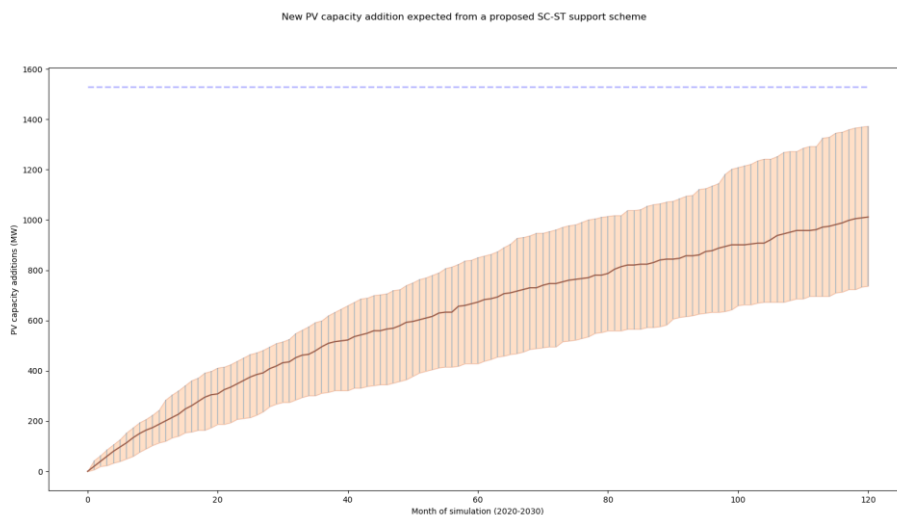
Πίνακας 5.4: Εξέλιξη τεχνολογικών και σχετικών με την αγορά παραμέτρων για την περίοδο υπό μελέτη (Γερμανία).

Year	Retail price increase_High (ct / kWh)	Retail price increase_Low (ct / kWh)	Demand increase/decrease_High (kWh)	Demand increase/decrease_Low (kWh)	Storage cost reduction (%/year)_High (€/kWh)	Storage cost reduction (%/year)_Low (€/kWh)	PV cost reduction_High (€/kWp)	PV cost reduction_Low (€/kWp)
2020	30.734	30.704	3299.12	3253	759.20	780.00	1414.865	1455.324
2021	31.042	30.980	3339	3247	720.48	760.50	1350.77	1429.13
2022	31.352	31.259	3379	3240	683.74	741.49	1289.58	1403.40
2023	31.666	31.540	3419	3234	648.87	722.95	1231.16	1378.14
2024	31.982	31.824	3460	3228	615.77	704.88	1175.39	1353.34
2025	32.302	32.111	3502	3221	584.37	687.25	1122.15	1328.98
2026	32.625	32.400	3544	3215	554.57	670.07	1071.31	1305.05
2027	32.951	32.691	3586	3208	526.28	653.32	1022.78	1281.56
2028	33.281	32.985	3629	3202	499.44	636.99	976.45	1258.50
2029	33.614	33.282	3673	3195	473.97	621.06	932.22	1235.84
2030	33.950	33.582	3717	3189	449.80	605.54	889.99	1213.60

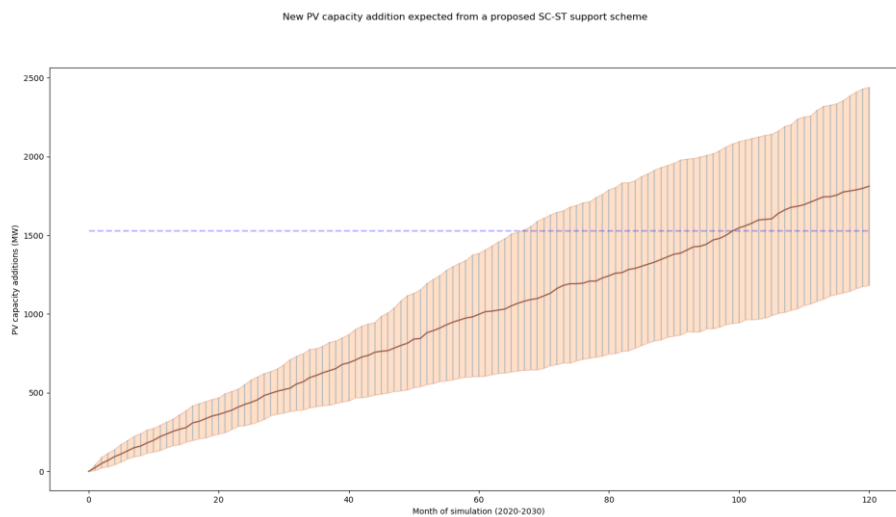
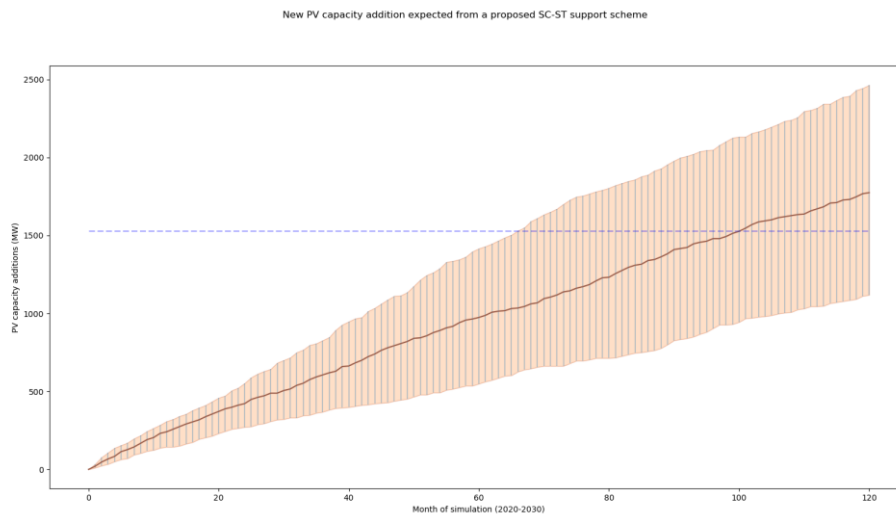
Σε ό,τι αφορά τις παραδοχές που πραγματοποιούνται για την εκτέλεση του μοντέλου, όπως ο αριθμός διαφορετικών συνόλων (25) agent-related παραμέτρων και η τεχνική εφαρμογής κλιμάκωσης από το επίπεδο των 1000 προσομοιούμενων υποψήφιων επενδυτών σε εθνικό επίπεδο, διευκρινίζεται ότι παραμένουν αμετάβλητες. Με βάση τα παραπάνω, προέκυψαν τα εξής αποτελέσματα:



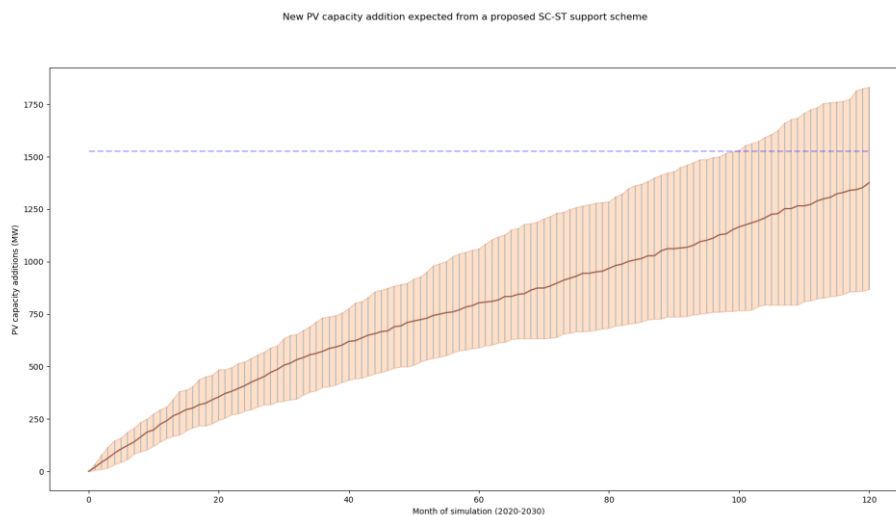
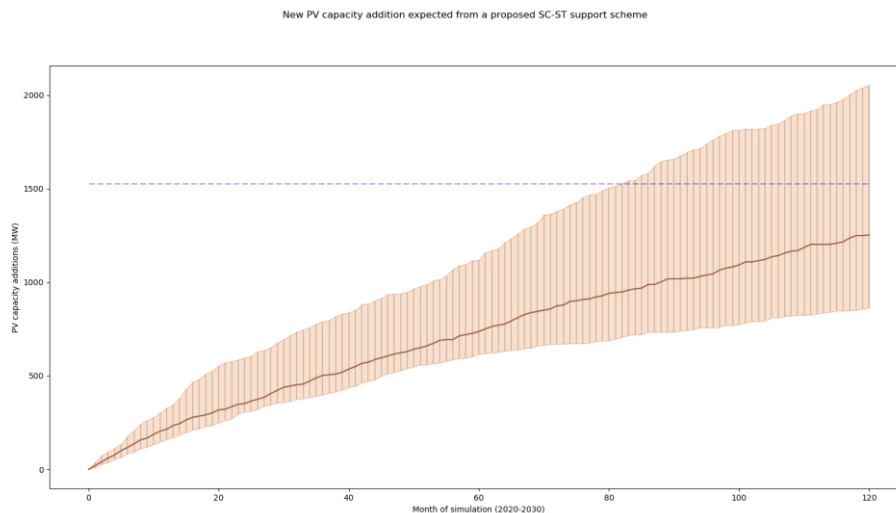
Εικόνες 5.21, 5.22: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους των **Σεναρίων 1 και 2**. Παρατηρούμε ότι σε σύγκριση με τον αντίστοιχο μηχανισμό ανταμοιβής FIT, μια πολιτική επιδότησης αποθήκευσης 30% υποθέτοντας υψηλό ρυθμό μείωσης σε τεχνολογικά κόστη επιτυγχάνει τον επιθυμητό στόχο διείσδυσης Φ/Β μικρής κλίμακας. Επίσης, προκύπτει ότι η διάμεση τιμή παραμένει η ίδια και στα δύο σενάρια (**1500 MWp**), με τη διαφορά να έγκειται στο μέτρο της αβεβαιότητας μεταξύ των σεναρίων, γεγονός που μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι μια ενδεχόμενη αύξηση των τιμών και της ζήτησης οδηγεί σε μικρότερες διασπορές επί της αντίστασης (Payback_std, Installed base_std) των καταναλωτών προς επενδύσεις, οι οποίες και διαμορφώνονται από σαφέστερες πεποιθήσεις.



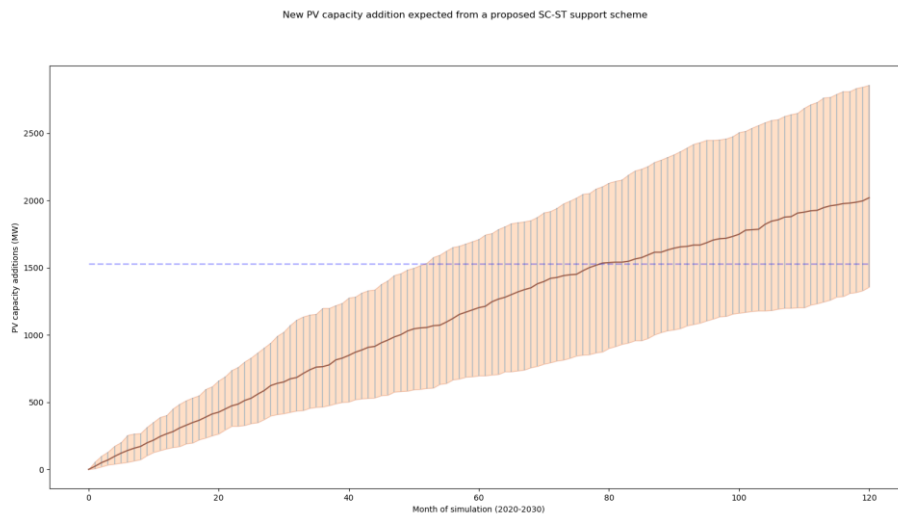
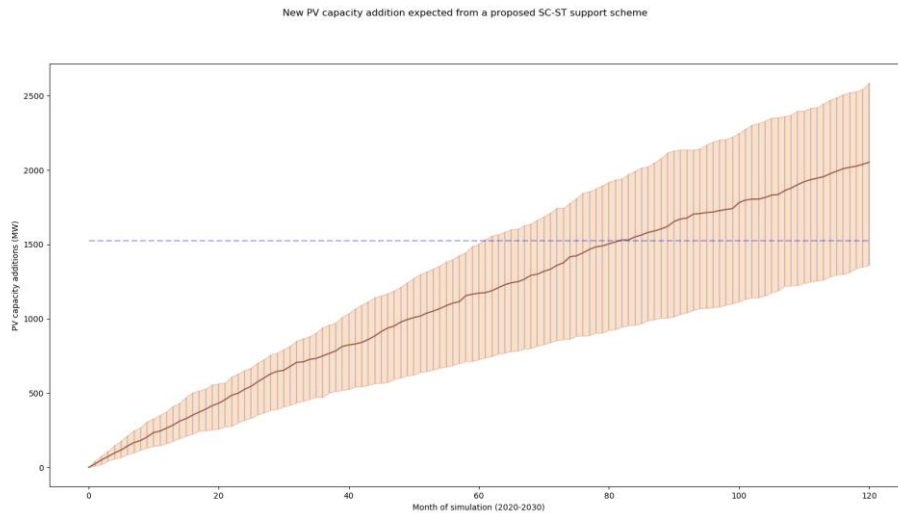
Εικόνες 5.23, 5.24: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους των **Σεναρίων 3 και 4**. Παρατηρούμε ότι σε σύγκριση με το μηχανισμό στήριξης FIT, μια πολιτική επιδότησης αποθήκευσης 30% υποθέτοντας χαμηλό ρυθμό μείωσης σε τεχνολογικά κόστη δεν επιτυγχάνει τις επιθυμητές αποδόσεις διείσδυσης, με τις διάμεσες τιμές μετά το πέρας των 120 μηνών μελέτης να κυμαίνονται μόλις στο 66% της παρελθοντικής εγκατεστημένης ισχύος. Από την άλλη μεριά, μεταξύ των σεναρίων διαφαίνεται μια διαφορετική συμπεριφορά σε σχέση με τον προηγούμενο συνδυασμό, καθώς μια ενδεχόμενη αύξηση της ζήτησης προσαυξάνει σε σημαντικό βαθμό την αβεβαιότητα που επιφέρουν οι τρεις παράμετροι με συντελεστή ευαισθησίας υψηλότερο του 0,2 (βλ. Εικόνα 4.20), με ορισμένους συνδυασμούς πρόθυμων επενδυτών να προσεγγίζουν ή και να υπερβαίνουν το ορισθέν σημείο αναφοράς, εφόσον διαισθάνονται ότι η αυξητική πορεία των τιμών δύναται να διευρύνει το οικονομικό όφελος της ιδιοκατανάλωσης.



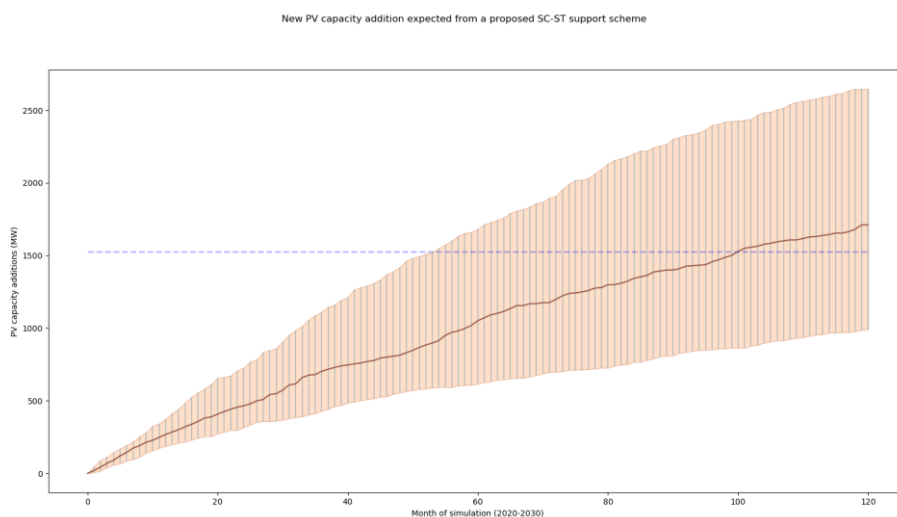
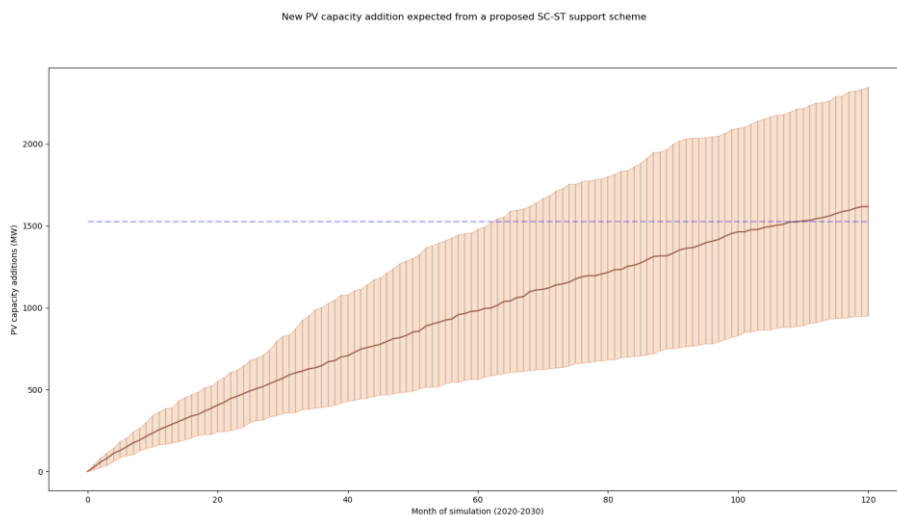
Εικόνες 5.25, 5.26: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους των **Σεναρίων 5 και 6**, τα οποία καταδεικνύουν ότι η συμμετοχή του κράτους με ποσοστό επιχορήγησης ίσο με 50% είναι ικανή συνθήκη ώστε στην πλειοψηφία τους τα διάφορα σενάρια να υπερβαίνουν τη τιμή στόχο των 1530 MWp του προηγούμενου μηχανισμού στήριξης, όταν παράλληλα η τεχνολογική πρόοδος (καμπύλη μάθησης, οικονομίες κλίμακας) οδηγεί τα σχετικά κόστη σε αυξημένες πτωτικές πορείες. Ακόμη, τα παραπάνω αποτελέσματα συνιστούν ότι η τελική διάχυση της τεχνολογίας χαρακτηρίζεται από σχετική αναισθησία από τις παραμέτρους που εξαρτώνται από την αγορά ενέργειας.



Εικόνες 5.27, 5.28: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους των **Σεναρίων 7 και 8**. Οι συγκεκριμένες περιπτώσεις χαρακτηρίζονται από την αφενός υψηλή αβεβαιότητα και αφετέρου από τη τελική χαμηλότερη διάμεση διάχυση της Φ/Β τεχνολογίας (1253 και 1377 MWp αντίστοιχα) παρόλη τη σημαντική κρατική συμμετοχή με 50% του αρχικού κόστους επένδυσης σε BESS. Στο 7^ο Σενάριο ο συνδυασμός μη ευνοϊκών τεχνολογικών και αγοραίων συνθηκών προσαυξάνει το μέγεθος της αντίστασης των καταναλωτών όπου επικρατούν τα απαισιόδοξα σενάρια με μειούμενη κλίση της καμπύλης διαμέσου στην πάροδο των μηνών προσομοίωσης. Σε αντίθεση, στο 8^ο Σενάριο η αύξηση της ζήτησης καταφέρνει σε μεγάλο βαθμό να αντισταθμίσει την αντίληψη των καταναλωτών για την κερδοφορία της επένδυσης καταφέροντας ικανοποιητικές αποδόσεις κοντά στη τιμή στόχο.



Εικόνες 5.29, 5.30: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους των **Σεναρίων 9 και 10**. Η μελέτη των περιπτώσεων στις οποίες η συμμετοχή του κράτους φθάνει σε ποσοστό 65% επί του αρχικού κόστους κεφαλαίου και με τις τεχνολογικές συνθήκες να πρόκειται να ακολουθήσουν καθοδική τροχιά, η συντριπτική πλειοψηφία των συνδυασμών (23 και 24 από τους συνολικά 25 αντίστοιχα) υπερβαίνει το προσδοκώμενο σημείο αναφοράς, επιτυγχάνοντας διεισδύσεις Φ/Β μικρής κλίμακας άνω των 2 GWp. Η μεγάλη διακύμανση του 10^{ου} Σεναρίου (*best case scenario*) οφείλεται στο γεγονός ότι τα αισιόδοξα υπο-σενάρια αυτού επιτυγχάνουν πολύ υψηλά μεγέθη υιοθέτησης της τεχνολογίας (~ 3 GWp), αποδεικνύοντας ότι υπό αυτές τις συνθήκες το μέσο Γερμανικό νοικοκυριό πρόκειται να υλοποιήσει την επένδυση. Ενδεικτικό επίσης είναι ότι ακόμη και με τους πιο απαισιόδοξους agent-related συνδυασμούς, παρατηρούμε διεισδύσεις επιπέδων EEG 2014 και EEG 2017.



Εικόνες 5.31, 5.32: Αποτελέσματα προσομοίωσης για την περίοδο 2020-2030 υπό τις παραμέτρους των **Σεναρίων 9 και 10**. Στο τελευταίο σετ σεναρίων, η παρατηρούμενη διάμεση μέση τιμή μεταξύ των σεναρίων κινείται στα επίπεδα της διείσδυσης που επιτεύχθηκε με τη μέθοδο πληρωμών FIT. Η αποτελεσματικότητα των σεναρίων κρίνεται αρνητικά, καθώς παρόμοιες αποδόσεις επιτυγχάνονται και σε σεσάρια με χαμηλότερη συμμετοχή του κράτους στην αρχική επένδυση αρκεί οι τεχνολογικές συνθήκες να ήταν ευνοϊκότερες, δεδομένου του υψηλού κοινωνικού κόστους που θα επιφέρει μια δεκαετής επιδότηση με 65% (520 €) ανά επενδυτή. Ένας ακόμη δυσμενής παράγοντας αποτελεί το μέγεθος της αβεβαιότητας, με άνοιγμα (*spread*) που ανέρχεται στο 1,5 GWp, παράμετρος εξαιρετικά σημαντική για τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής.

5.4 Συγκριτική ανάλυση μελετών περίπτωσης

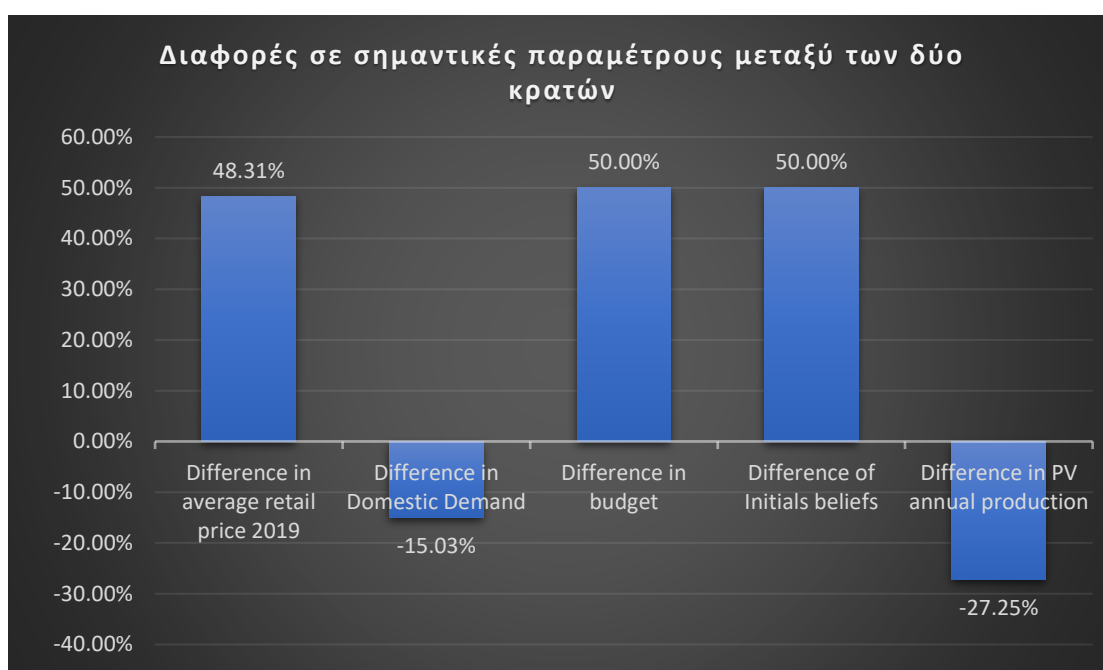
Με την περάτωση των μελετών περιπτώσεων στα δύο αντιπροσωπευτικά κράτη μέλη της ΕΕ, τα οποία στα πλαίσια των κλιματικών συνθηκών έχουν χαράξει δεσμευτικές πολιτικές για περαιτέρω ενίσχυση των ΑΠΕ στο συνολικό ενεργειακό μίγμα, συνάγονται τα εξής συμπεράσματα επί της αποτελεσματικότητας των πολιτικών δυναμικής στήριξης σε καινοτόμα συστήματα αυτοπαραγωγής - ιδιοκατανάλωσης:

1. Εξετάζοντας την περίπτωση της Ελλάδας, παρατηρούμε πως η **τιμή λιανικής** ρεύματος κινείται σε πολύ χαμηλότερα επίπεδα από την αντίστοιχη της Γερμανίας, παρόλο του γεγονότος πως η μέση ζήτηση στη Χαμηλή Τάση κινείται σε συγκριτικά υψηλότερα επίπεδα. Η ανταπόκριση σε συστήματα αποθήκευσης αξιολογείται όμως ως μη αποδοτική λόγω του αρκετά αυξημένου αρχικού κόστους επένδυσης σε BESS συγκριτικά με το διαθέσιμο προϋπολογισμό και του περιορισμένου οφέλους της ιδιοκατανάλωσης. Ως αποτέλεσμα, σε καμία περίπτωση δεν επιτυγχάνεται η επίτευξη των επιπέδων της διείσδυσης Φ/Β που παρατηρήθηκε την εποχή 2010 – 2013. Φαίνεται έτσι ότι η αποτελεσματικότητα της πολιτικής των FIT οφείλεται στις εξαιρετικά συμφέρουσες αποδόσεις με εγγυημένες πληρωμές στα επίπεδα των 500 €/MWh, η οποία για σημαντικό χρονικό διάστημα συνέπεσε χρονικά και με ραγδαίες πτώσεις στα αντίστοιχα τεχνολογικά κόστη (της τάξης των 20% ανά έτος), με το συγκεκριμένο σημείο αναφοράς να είναι πολύ δύσκολο να επαναληφθεί χωρίς δυσμενείς κοινωνικές επιβαρύνσεις.

Συνεπώς, η τιμή προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας δεν δίνει τα κατάλληλα οικονομικά σήματα στο μέσο Ελληνικό νοικοκυριό ώστε να προβεί σε μια τέτοια επένδυση με μαζικό τρόπο. Μια αύξηση της λιανικής τιμής όμως παρόλο που συνεπάγεται επιπλέον πηγές εσόδων ικανές να μεταβάλλουν τις πεποιθήσεις των καταναλωτών, θα πρέπει να εξετάζεται μόνο σε συνδυασμό με τις κατάλληλες πολιτικές διατάξεις ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα επιβάρυνσης ευαίσθητων κοινωνικών ομάδων. Στην πραγματικότητα όμως, είναι πιθανή μια απότομη αύξηση στην τιμή αυτή λόγω π.χ. της νέας αγοράς εξισορρόπησης ή των δυσθεώρητων τιμών δικαιωμάτων CO₂ και η οποία θα μπορούσε να αλλάξει ριζικά τις αρχικές πεποιθήσεις για την κερδοφορία της επένδυσης.

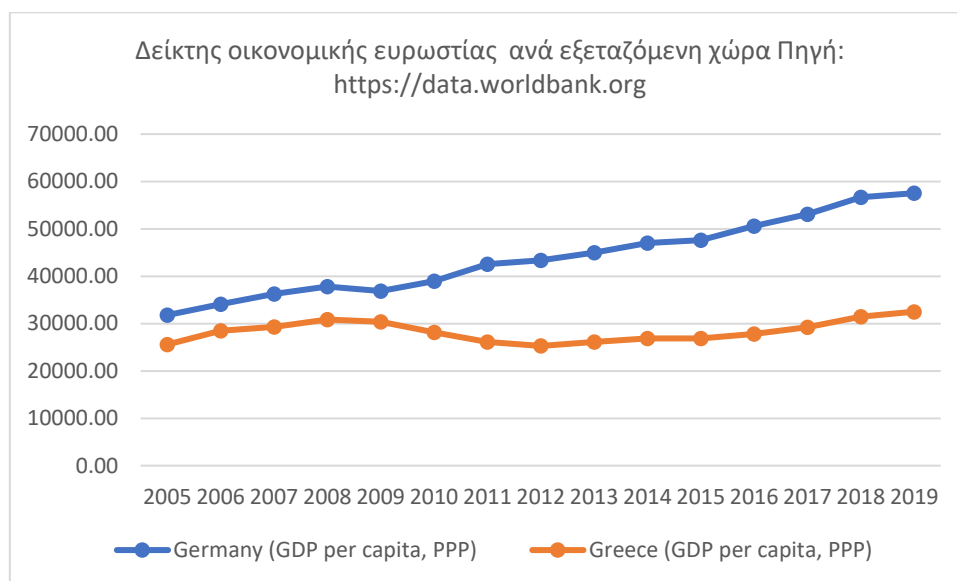
Αντιθέτως, η Γερμανική τιμή προμήθειας βρίσκεται σε τόσο υψηλά επίπεδα (συγκεκριμένα είναι η υψηλότερη στην ΕΕ και διπλάσια της αντίστοιχης Ελληνικής) ώστε να αποτελεί ισχυρό οικονομικό σήμα προς επένδυση σε συστήματα αποθήκευσης, ακόμη και σε σενάρια μείωσης της υφιστάμενης ζήτησης.

- Ένας σημαντικός παράγοντας που συντέλεσε στην επιτυχή έκβαση των σεναρίων υπό εξέταση για την περίπτωση της Γερμανίας, αποτελεί το γεγονός ότι το όριο εγκατεστημένης αυξήθηκε στα 20 kWp (για καλύτερη απεικόνιση της σημερινής κατάστασης) ώστε οι καταναλωτές να θεωρούν πως μια επένδυση σε ένα τέτοιο σύστημα (με έμφαση στα παραδείγματα μεγάλου ρυθμού καθόδου τεχνολογικού κόστους) έχει υψηλές πιθανότητες κερδοφορίας. Για την Ελλάδα, μια τέτοια υπόθεση ακόμη και να εφαρμοζόταν στα πλαίσια του μοντέλου, δεν θα επιτύχανε σημαντικές αποδόσεις λόγω του περιορισμένου προϋπολογισμού που χαρακτηρίζει τις οντότητες.



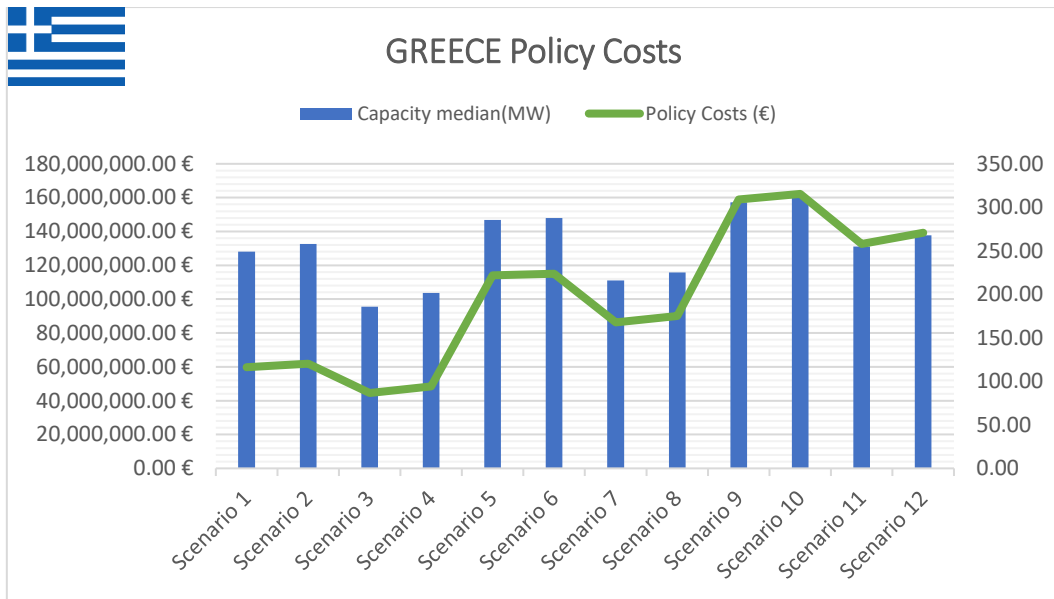
Εικόνα 5.33: Αποτύπωση των τεχνοοικονομικών διαφορών της Γερμανίας και Ελλάδας που χρησιμοποιούνται ως είσοδοι των προσομοιώσεων.

- Σχετικά με το γεωγραφικό – οικονομικό πλαίσιο των αντιπαραβαλλόμενων κρατών, η ανάλυση καταδεικνύει ότι η κατά σχεδόν 30% μειωμένη ετήσια παραγωγή ενός τυπικού Φ/Β μικρής κλίμακας στη Γερμανία συγκριτικά με την Ελλάδα αντισταθμίζεται από το σημαντικά υψηλότερο κατά 45% διαθέσιμο κατά κεφαλήν εισόδημα (βλ. Εικόνα 5.34), το οποίο επιτρέπει την επένδυση σε BESS μεγαλύτερης χωρητικότητας με πολλαπλάσια οφέλη. Με άλλα λόγια, ο συνδυασμός τιμών λιανικής – διαθέσιμων εισοδημάτων αποδεικνύεται πιο καταλυτικός στη διαμόρφωση της παραμέτρου της αντίστασης των επενδυτών απ’ ότι ο συνδυασμός ζήτησης – Φ/Β παραγωγής, σε ό,τι αφορά τη διάχυση συστημάτων αυτοπαραγωγής και ιδιοκατανάλωσης.

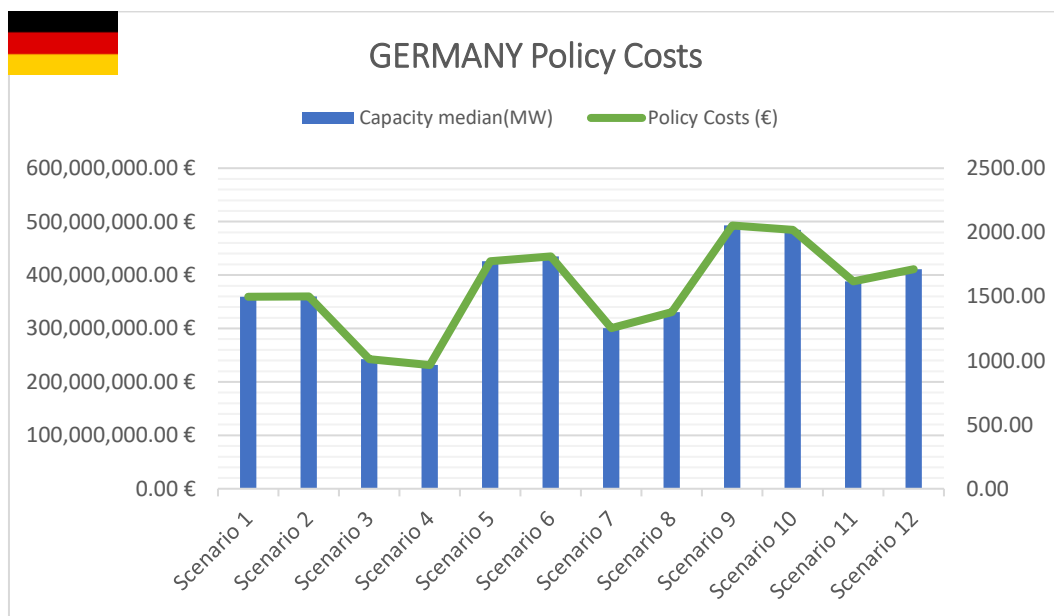


Εικόνα 5.34: Δείκτης κατά κεφαλήν εισοδήματος στις αντιπροσωπευτικές εξεταζόμενες χώρες.

- Τέλος, τα αποτελέσματα της προσομοίωσης κατέδειξαν ότι και για τις δύο χώρες, μια υψηλή αρχική επιδότηση είναι προαπαιτούμενη ώστε να προσελκύσει το επενδυτικό ενδιαφέρον κατά την εισαγωγή ενός καθεστώτος ιδιοκατανάλωσης. Αυτό οφείλεται αφενός στο υψηλό κόστος κεφαλαίου σε συστήματα αποθήκευσης (ενδεικτικά, για επένδυση σε συστήματα Φ/Β 3 kWp – BESS 3 kWh, χρειάζεται να δαπανηθεί ένα αρχικό κεφάλαιο που φτάνει τα 6500 €) και αφετέρου στην απότομη τροχιά των δεσμευτικών Ευρωπαϊκών στόχων σε προσθήκες Φ/Β. Οι μικρότερες επιδοτήσεις, αν και έως ένα βαθμό αποτελεσματικές με έμφαση στην περίπτωση της Γερμανίας, καταλήγουν να μην ακολουθούν με απόλυτη βεβαιότητα την επιθυμητή πορεία των στόχων, εάν εφαρμοστούν σε πολύ πρώιμο στάδιο.



Εικόνα 5.35: Για την περίπτωση της Ελλάδας παρατηρούμε ότι η διαφορά της διείσδυσης Φ/Β των (τεχνολογικά) αισιόδοξων σεναρίων δεν διαφέρει σημαντικά μεταξύ των διάφορων επιπέδων επιδότησης σε μπαταρίες. Παρόλα αυτά μια υψηλή αρχική επιδότηση συμβάλλει σημαντικά στην επίτευξη υψηλής διείσδυσης καθώς η κάμψη εμφανίζεται μετά το έτος 2027.



Εικόνα 5.36: Για την περίπτωση της Γερμανίας παρατηρούμε μια περισσότερο γραμμική σχέση μεταξύ των μεγεθών της νέας εγκατεστημένης Φ/Β ισχύος και του κόστους εφαρμογής της πολιτικής. Βάσει και των αποτελεσμάτων των σεναρίων, στη συγκεκριμένη περίπτωση μπορεί να επιτευχθεί θετικό αποτέλεσμα ακόμη και με σταδιακή μείωση του κόστους αρχικής επιδότησης από ένα – αρχικά (π.χ. έως το 2024) – υψηλό επίπεδο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα και Μελλοντικές Προεκτάσεις

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, αφού γίνονται σαφή τα αίτια που υπαγορεύουν τη λήψη βιώσιμων μέτρων που θα μετριάσουν τις δυσμενείς συνέπειες της κλιματικής αλλαγής ως αποτέλεσμα της ανθρωπογενούς δραστηριότητας στη μετα-βιομηχανική εποχή, εκθέτονται τα διεθνή και Ευρωπαϊκά πρωτόκολλα, καθώς και οι εθνικές προσπάθειες προσαρμογής στις επιταγές που επιτάσσει η αειφόρος ανάπτυξη. Δεδομένου ότι το ένα τρίτο των παγκόσμιων εκπομπών CO₂ εκπέμπονται από τον τομέα της ενέργειας, υπάρχει ευρεία επιστημονική συναίνεση ότι οι τεχνολογίες ΑΠΕ, όπως η ηλιακή Φ/Β ενέργεια, συμβάλλουν σημαντικά στην άμβλυνσή τους, με αποτέλεσμα τον παγκόσμιο περιορισμό της αύξησης της θερμοκρασίας. Τα Φ/Β συστήματα έχει αποδειχθεί ότι είναι μια από τις βασικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ για την υποστήριξη της μετάβασης προς ένα ενεργειακό σύστημα χαμηλών εκπομπών άνθρακα. Σε πρώτο στάδιο καταβλήθηκε σημαντική προσπάθεια στους τρόπους μείωσης του κόστους της τεχνολογίας και της προσαύξησης της λειτουργικής της αποδοτικότητας (Michas et al., 2019). Ξεκινώντας με την αξιολόγηση της έως σήμερα εμπειρίας από εργαλεία πολιτικής για την προώθηση συστημάτων βιώσιμης αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας σε επίπεδο τελικού καταναλωτή, παρήχθησαν τα απαραίτητα συμπεράσματα από τους πολυδιάστατους παράγοντες που συνέθεσαν τις παρελθοντικές επιτυχίες αλλά και αποτυχίες.

Σε επόμενο στάδιο παρουσιάστηκε εκτενώς το εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων ATOM, το οποίο στηρίζεται στη μοντελοποίηση διακριτών και ισότιμων στα πλαίσια της μελέτης (*government oriented*) οντοτήτων, η χρησιμότητα του οποίου έχει αποδειχθεί για τη διεξαγωγή μελλοντικών προσομοιώσεων υπό σενάρια συγκριτικής αξιολόγησης σεναρίων ιδιοκατανάλωσης – ενεργειακού συμψηφισμού και συσχέτισής τους με την επιτυχή βάσει κλιματικών στόχων διάχυση της Φ/Β τεχνολογίας μικρής κλίμακας στην Ελληνική επικράτεια. Συγκεκριμένα, το ATOM επιτρέπει τον υπολογισμό ρεαλιστικών ορίων αβεβαιότητας και τη διάσπαση της συνολικής αβεβαιότητας της εξόδου του μοντέλου στις κυριότερες συνιστώσες της, με βάση ένα πλαίσιο αποσύνθεσης της υφιστάμενης διασποράς (V_{es} , V_{em}) και μια μέθοδο εκτίμησης του μέτρου αληθοφάνειας για ένα συγκεκριμένο συνδυασμό παραμέτρων. Επιπλέον, με την εκτίμηση των τιμών παραμέτρων που χαρακτηρίζουν τις οντότητες, σύμφωνα με την προσαρμογή των αποτελεσμάτων του μοντέλου στις ιστορικές παρατηρήσεις, καθίσταται εφικτός ο χειρισμός του συνόλου των πιθανών αντιλήψεων και τάσεων των οντοτήτων της προσομοίωσης, συμπεριλαμβάνοντας το εύρος των μέσων διαφορετικών εύλογων σεναρίων συμπεριφοράς στη διακύμανση των αποτελεσμάτων που παράγουν.

Με αυτό ως δεδομένο, μελετήθηκε μετέπειτα η ευρωστία του υπολογιστικού εργαλείου στη βαθμονόμηση των κυριότερων συμπεριφορικών παραμέτρων που καθορίζουν την ανάληψη ή όχι επενδυτικού ρίσκου σε αντιπροσωπευτικές Ευρωπαϊκές χώρες με παρόμοιο ή και με δομικά διαφορετικό γεωγραφικό και κοινωνικο-οικονομικό πλαίσιο. Θα πρέπει να επισημανθεί ότι αν και τα συστήματα που μοντελοποιούν οντότητες παρέχουν ένα ευέλικτο πλαίσιο για την αναπαράσταση ετερογενών κοινωνικών συστημάτων, η ευελιξία αυτή οδηγεί σε μεγαλύτερη αβεβαιότητα δεδομένου ότι για την προσομοίωση της διαδικασίας λήψης αποφάσεων συχνά απαιτείται η συμπερίληψη πολλών κριτηρίων που εισάγουν πρόσθετη αβεβαιότητα στα αποτελέσματα του μοντέλου. Κατά συνέπεια, η διαδικασία της βαθμονόμησης-ανάλυσης ευαισθησίας για την ποσοτικοποίηση αυτών των αβεβαιοτήτων είναι κομβικού χαρακτήρα, ιδίως όταν οι παράμετροι χρησιμοποιούνται ως βασικές παραδοχές από τους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής. Βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, παρατηρήθηκε σημαντική σύγκλιση των agent-related παραμέτρων για τις περιπτώσεις της Ελλάδας και της Ιταλίας, που περιστρέφονται γύρω από τη συνιστώσα επιδίωξης χαμηλών χρόνων αποπληρωμής της επένδυσης καθώς και από την ανάγκη παρουσίας ισχυρής κρατικής οικονομικής στήριξης ώστε τα μεγέθη των αρχικών πεποιθήσεων να αντανakλούν πρόθυμους επενδυτές. Σε αντίθεση, τα ιστορικά στοιχεία της καμπύλης προσθηκών Φ/Β στη Γερμανία οδήγησαν στο συμπέρασμα λόγω και της μεγαλύτερης εμπειρίας τους σε τέτοιου είδους επενδύσεις, ότι υπάρχει δυναμική ανταπόκριση ακόμα και με λιγότερο συμφέρουσες αποδόσεις, κάτι που αποδεικνύεται και από τα προτεινόμενα εύρη των αντίστοιχων παραμέτρων.

Στη συνέχεια, εφόσον έχουν υπολογιστεί με ακρίβεια τα εύρη του δεδομένου συνόλου παραμέτρων των οντοτήτων για κάθε αντιπροσωπευτική χώρα, εξετάστηκαν μελλοντικά σενάρια για την περαιτέρω διάχυση Φ/Β μικρής κλίμακας, προς επίτευξη των δεσμευτικών στόχων των εκάστοτε Εθνικών Σχεδίων για την Ενέργεια και το Κλίμα ως το έτος 2030. Παράλληλα, εφόσον καταδείχθηκε η ομοιότητα του συμπεριφορικού προφίλ και των αβεβαιοτήτων που χαρακτηρίζουν τις οντότητες της Ελλάδας και της Ιταλίας, κρίθηκε σκόπιμο να δοθεί έμφαση στη μελέτη διασποράς Φ/Β συστημάτων σε χώρες με διαφορετικό κοινωνικό και οικονομικό προφίλ καθώς και με διαφορετικά γεωγραφικά (ένταση ηλιακής ακτινοβολίας) και *market related* (τιμή ηλεκτρισμού, ύψος και ετήσια προφίλ ζήτησης) χαρακτηριστικά. Πραγματοποιήθηκαν έτσι μελλοντικές προσομοιώσεις αύξησης της εγκατεστημένης ισχύος οικιακών Φ/Β υποθέτοντας τη δυναμική επιδότηση από μέρους των κρατών συστημάτων που καθιστούν δυνατή την αποθήκευση ενέργειας και την αποκόμιση οφέλους – τόσο για τον καταναλωτή όσο και για το δίκτυο – από τη συνέργεια μεταξύ των 2 συστημάτων. Πιο συγκεκριμένα, για κάθε επιλεγμένο κράτος αναλύθηκαν 12 διαφορετικά σενάρια διάχυσης, στα οποία υπήρχαν εναλλαγές μεταξύ των συναφών παραμέτρων αγοράς, ύψους επιδότησης και κόστους τεχνολογίας στην πάροδο της επόμενης δεκαετίας. Επίσης, για κάθε σενάριο

λήφθηκαν υπόψη 25 διαφορετικά προφίλ συμπεριφορών, εντός του εύρους που υποδεικνύουν τα αποτελέσματα της βαθμονόμησης, με αυτόν τον τρόπο να αποτυπώνεται η αβεβαιότητα μεταξύ των σεναρίων προς εξαγωγή πιο σφαιρικών συμπερασμάτων.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για την πλειοψηφία των σεναρίων υπογράμμισαν την ανάγκη για υψηλή (της τάξης του 50% του κόστους κεφαλαίου) αρχική επιδότηση για την προσέλκυση του επενδυτικού ενδιαφέροντος, εξαιτίας του συναφούς υψηλού κόστους εφαρμογής της τεχνολογίας και της αβεβαιότητας όσον αφορά τις μελλοντικές χρηματοροές. Οι υψηλές αρχικές επιδοτήσεις είναι απαραίτητες και για την επίτευξη οικονομικών κλίμακας συστημάτων αποθήκευσης και αύξησης της πιθανότητας μείωσης του κόστους τους. Σε ό,τι αφορά τη συγκριτική ανάλυση μεταξύ του διπόλου Ελλάδας – Γερμανίας, παρατηρήθηκε ότι τα δομικά χαρακτηριστικά που προσδιορίζουν μια αντιπροσωπευτική οικονομία της Νότιας Ευρώπης, δεν είναι σε θέση να αντισταθμίσουν την ύπαρξη ευνοϊκών σε όρους ενεργειακής απόδοσης συνθηκών. Κατά συνέπεια, μόνο για την περίπτωση της Γερμανίας παρατηρήθηκαν υπερβάσεις παλαιότερων σημείων αναφοράς, που επιτεύχθηκαν με συστήματα οικονομικής ενίσχυσης με σταθερή ταρίφα.

Ως μελλοντική έρευνα, το υπολογιστικό εργαλείο ATOM θα μπορούσε να επεκταθεί ώστε να εφαρμοστεί για την εξέταση **ακόμη περισσότερων παραμέτρων** για την προσομοίωση της συμπεριφοράς των υποψήφιων επενδυτών στις ολοένα μεταβαλλόμενες κοινωνικές συνθήκες των ημερών μας. Οι ανανεωμένοι κλιματικοί στόχοι για την επίτευξη κλιματικής ουδετερότητας ως το 2050, έχουν αναβαθμίσει το ρόλο του *prosumer* ως έναν εκ των σημαντικότερων παραμέτρων εξασφάλισης 100% παραγωγής ενέργειας από βιώσιμες πηγές, διατηρώντας παράλληλα την εθνική/ευρωπαϊκή ανταγωνιστικότητα σε απόλυτες τιμές ενέργειας και την απαιτούμενη ασφάλεια εφοδιασμού.

Επιπρόσθετα, καθώς σε ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα με υψηλή ζήτηση και υψηλή διείσδυση ΑΠΕ απαιτείται **ενεργός διαχείριση του φορτίου** και αποθήκευση ενέργειας παράλληλα με ευέλικτες συμβατικές μονάδες παραγωγής, σημαντικό ρόλο θα διαδραματίσουν οι λεγόμενες *περιφερειακές υπηρεσίες ελέγχου* που θα μπορούσαν να συμβάλουν στην καλύτερη λειτουργία του συστήματος στην περιοχή ελέγχου του τελικού οικιακού και εμπορικού καταναλωτή. Μια απομακρυσμένη μέτρηση στον τομέα της ζήτησης είναι απαραίτητη για να ληφθεί μια σαφής εικόνα του φορτίου, το οποίο πρέπει να εξυπηρετηθεί. Η ψηφιοποίηση (π.χ. έξυπνοι μετρητές, συνάθροιση ΑΠΕ με σχήματα σωρευτικής εκπροσώπησης, διαχείριση εικονικής μονάδας παραγωγής ενέργειας (*Virtual Power Plant*) κ.λπ.) θα επέτρεπε μια πιο εύρυθμη διαχείριση του συστήματος και θα δημιουργούσε σημαντικές ευκαιρίες για ενεργή συμμετοχή των καταναλωτών (π.χ. παροχή ενέργειας στο δίκτυο, απόκριση ζήτησης). Συνεπώς, τα μελλοντικά σενάρια θα μπορούσαν να δομηθούν θέτοντας σαν αφετηρία την

υπόθεση *επιδότησης σε συστήματα έξυπνων μετρητών* με σκοπό την ευρεία υιοθέτησή τους, καθώς σύμφωνα με ειδικούς οι έξυπνοι μετρητές έχουν τη δυνατότητα απόδοσης προστιθέμενης αξίας για τους καταναλωτές. Επιπλέον οικονομικά κίνητρα θα μπορούσαν να αποτελέσουν ταρίφες χρόνου χρήσης (Time-of-Use), ή ακόμη και πιο *προσαρμοστικές* αποζημιώσεις, με απώτερο σκοπό την επιδίωξη εξομάλυνσης των αιχμών (αποφυγή ένταξης ακριβών και ρυπογόνων κατανεμόμενων μονάδων παροχής ισχύος ευελιξίας π.χ. μονάδες ανοιχτού κύκλου) και την ταυτόχρονη μεγιστοποίηση των πλεονεκτημάτων των μετρητών για όλους τους εμπλεκόμενους (B. V. Stavrakas et al., 2021).

Τέλος, ως απόρροια των ευμετάβλητων κοινωνικών και ρυθμιστικών συνθηκών, η μοντελοποίηση των σεναρίων συστημάτων που βασίζονται σε οντότητες θα πρέπει να δομηθεί γύρω από την έννοια της προσαρμοστικότητας. Αυτό σημαίνει ότι καθώς εισρέουν νέα δεδομένα αποφάσεων από μεριάς συμμετεχόντων, η αρχική πολιτική θα πρέπει να αναδιαμορφώνεται, προσαρμοζόμενη στις αλλαγές του περιβάλλοντός που αφορά. Το αποτέλεσμα θα είναι να επιτραπεί μια πιο συμμετοχική προσέγγιση χάραξης πολιτικής η οποία θα διερευνά συνεργατικά τις ανάγκες και τις βασικές απαιτήσεις προδιαγραφών, με τελικό στόχο τη συνολική βελτίωση της χρηστικότητας των αποφάσεων πολιτικής μεγιστοποιώντας τη συλλογική κοινωνική ωφέλεια.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- [1] UNFCCC. (1992). United Nations Framework Convention on Climate Change United Nations. United Nations Framework Convention on Climate Change, 1–33. Διαθέσιμο: https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/conveng.pdf
- [2]. NASA’s Jet Propulsion Laboratory. (n.d.). Evidence | Facts – Climate Change: Vital Signs of the Planet. June 10, 2021. Retrieved October 5, 2020, from <https://climate.nasa.gov/evidence/>
- [3] IPCC. (2011). Special Report Renewable Energy Sources (SRREN). Timm Zwickel (Germany) Change Mitigation, May 2011, 24. Διαθέσιμο: <http://www.unclearn.org/sites/default/files/inventory/ipcc15.pdf>
- [4] Fawzy, S., Osman, A. I., Doran, J., & Rooney, D. W. (2020). Strategies for mitigation of climate change: a review. Environmental Chemistry Letters, 18(6), 2069–2094. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1007/s10311-020-01059-w>
- [5] Γενική Διεύθυνση Ενέργειας, (Ευρωπαϊκή Επιτροπή). (2019). ΑΝΑΚΟΙΝΩΣΗ ΤΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗΣ ΠΡΟΣ ΤΟ ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΟΒΟΥΛΙΟ, ΤΟ ΣΥΜΒΟΥΛΙΟ, ΤΗΝ ΕΥΡΩΠΑΪΚΗ ΟΙΚΟΝΟΜΙΚΗ ΚΑΙ ΚΟΙΝΩΝΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΦΕΡΕΙΩΝ Ενωμένοι στην υλοποίηση της Ενεργειακής Ένωσης και της Δράσης για το Κλίμα.
- [6] The Paris Agreement | UNFCCC. (n.d.). Retrieved October 15, 2020, from <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>
- [7] European Commission. (2020). Long-term low greenhouse gas emission development strategy of the EU and its Member States. 2019(March), 1–7. Διαθέσιμο: <http://www4.unfccc.int/submissions/INDC/Published Documents/Latvia/1/LV-03-06-EU INDC.pdf>
- [8] European Commission. (n.d.). 2020 climate & energy package | Climate Action. Retrieved October 20, 2020, from https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en
- [9] European Commission. (n.d.). 2020 climate & energy package | Climate Action. Retrieved October 20, 2020, from https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en
- [10] World Resources Institute - Navigating the Paris Agreement Rulebook: Global Stocktake. Διαθέσιμο : <https://www.wri.org/paris-rulebook/global-stocktake>
- [11] European Commission. (2019). The European Green Deal. European Commission, 53(9), 24. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- [12] European Commission. (2020). Stepping up Europe’s 2030 climate ambition Investing in a climate-neutral future for the benefit of our people. Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 1689–1699.
- [13] Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος. (2019), Έκθεση σχετικά με την ποιότητα του αέρα στην Ευρώπη για το 2019. Βρυξέλλες, 30.1.2019.

- [14] IOBE. (2020). Απολιγνιτοποίηση Της Ηλεκτροπαραγωγής: Κοινωνικοοικονομικές Επιπτώσεις Και Αντισταθμιστικές Δράσεις. Διαθέσιμο: https://www.sdam.gr/sites/default/files/consultation/Σχέδιο_δίκαιης_και_αναπτυξιακής_μετά_βασης_λιγνιτικών_περιοχών_Επιπτώσεις_και_αντισταθμιστικές_δράσεις.pdf
- [15] ΥΠΕΝ (2019). Ελληνική Δημοκρατία, Υπουργείο Περιβάλλοντος - Εθνικό Σχέδιο για την Ενέργεια και το Κλίμα. Αθήνα, Νοέμβριος 2019.
- [16] Υπουργείο Ενέργειας και Περιβάλλοντος. (2019). Μακροχρονία Στρατηγική Για Το 2050.
- [17] Γεωργιάκης, Π., 2015. Σύγχρονα συστήματα μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. [ηλεκτρ. Βιβλ.] Αθήνα:Σύνδεσμος Ελληνικών Ακαδημαϊκών Βιβλιοθηκών. Διαθέσιμο στο: <http://hdl.handle.net/11419/2013>
- [18] Mcdonald, J. D., Wojszczyk, B., Flynn, B., & Voloh, I. (2012). Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. In Encyclopedia of Sustainability Science and Technology. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3>
- [19] University of Cyprus. (n.d.). Εισαγωγή Στη Διεσπαρμένη Παραγωγή Ορισμός Διεσπαρμένης Παραγωγής. 1–37.
- [20] Martinot, E., Kristov, L., & Erickson, J. D. (2015). Distribution System Planning and Innovation for Distributed Energy Futures. Current Sustainable/Renewable Energy Reports, 2(2), 47–54. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1007/s40518-015-0027-8>
- [21] Mateo, C., Cossent, R., Gómez, T., Pretico, G., Frías, P., Fulli, G., Meletiou, A., & Postigo, F. (2018). Impact of solar PV self-consumption policies on distribution networks and regulatory implications. Solar Energy, 176(December), 62–72. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.10.015>
- [22] Jäger-Waldau, A. (2019). PV Status Report 2019. In JRC Science for Policy Report. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.2760/326629>
- [23] Doyle, C., Truitt, A., Inda, D., Lawrence, R., Lockhart, R., & Golden, M. (2015). SACP Best Practices in PV System Installation - Version 1.0, March 2015. Nrel, March, 36. Διαθέσιμο: <http://www.nrel.gov/docs/fy15osti/63234.pdf>
- [24] Kato, H. Odel, E. M. (2003). Outline Introduction World Energy Outlook Series, 1–14. Διαθέσιμο: https://iea-etsap.org/workshop/worksh_10_2003/wem_oct_2003.pdf
- [25] SolarPower Europe. (2020). European Market Outlook For Residential Battery Storage. SolarPower Europe. Διαθέσιμο: <https://www.ofgem.gov.uk/electricity/wholesale-market/european-market>
- [26] European Commission. (2020). Study on energy storage - Contribution to the security of the electricity supply in Europe (Issue March). Διαθέσιμο: https://ec.europa.eu/energy/sites/default/files/quarterly_report_on_european_electricity_market_q4_2020.pdf
- [27] Bundesnetzagentur. (n.d.). Bundesnetzagentur - EEG register data and reference values for payment. Retrieved December 20, 2020, from

https://www.bundesnetzagentur.de/EN/Areas/Energy/Companies/RenewableEnergy/Facts_Figures_EEG/Register_data_tariffs/EEG_registerdata_payments_node.html

[28] Ευρωπαϊκή Επιτροπή. (2001). Οδηγία 2001/77/Εκ Του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου Και Του Συμβουλίου Της 27^{ης} Σεπτεμβρίου 2001 Για Την Προαγωγή Της Ηλεκτρικής Ενέργειας Που Παράγεται Από Ανανεώσιμες Πηγές Στην Εσωτερική Αγορά Ηλεκτρικής Ενέργειας. 6, 33–40.

[29] Wirth, H. (2017). Recent facts about photovoltaics in Germany. Fraunhofer ISE, 1(101), 92. Διαθέσιμο: <http://pschuetzenduebe.webclient5.de/wp-content/uploads/130912-Recent-Facts-PV-Germany.pdf>

[30] Argyropoulos, D., Godron, P., Graichen, P., Litz, P., Pescia, D., Podewils, C., Redl, C., Ropenus, S., & Rosenkranz, G. (2016). Energiewende: What do the new laws mean? Agora Energiewende. Διαθέσιμο: https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2016/EEG-FAQ/Agora_FAQ-EEG_EN_WEB.pdf

[31] Antonelli, M., & Desideri, U. (2014). The doping effect of Italian feed-in tariffs on the PV market. *Energy Policy*, 67, 583–594. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.12.025>

[32] Di Dio, V., Favuzza, S., La Cascia, D., Massaro, F., & Zizzo, G. (2013). The evolution of the FIT mechanism in Italy for PV systems: A critical analysis. *Proceedings of 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2013*, October, 890–895. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2013.6749877>

[33] Gestore Servizi Energetici. (2013). Rapporto statistico fotovoltaico. Διαθέσιμο: <http://www.casaportale.com/public/uploads/43262-pdf1.pdf>

[34] J. Schwarz. Legal sources on renewable energy. Net-Metering (scambio sul posto). Διαθέσιμο: <http://www.res-legal.eu/search-by-country/italy/single/s/res-e/t/promotion/aid/net-metering-scambio-sul-posto/lastp/151/> accessed 5.4.21

[35] Ministero dello sviluppo economico. (2019). Incentivi per efficientamento energetico, sisma bonus, fotovoltaico e colonnine di ricarica di veicoli elettrici.

[36] Taylor, R., Coll Besa, M., & Forrester, J. (2016). Agent-based modelling: A tool for addressing the complexity of environment and development policy issues Stockholm Environment Institute, Working Paper 2016-12. Διαθέσιμο: www.sei-international.org

[37] Watts, D., & Strogatz, S. (1998). Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, 393(6684), 440–442..

[38] Young, H. P. (2009). Innovation diffusion in heterogeneous populations: Contagion, social influence, and social learning. *American Economic Review*, 99(5), 1899–1924. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1257/aer.99.5.1899>

[39] Papadelis, S., & Flamos, A. (2018). An application of calibration and uncertainty quantification techniques for agent-based models. *Understanding Risks and Uncertainties in Energy and Climate Policy: Multidisciplinary Methods and Tools for a Low Carbon Society*, 79–95. Διαθέσιμο: https://doi.org/10.1007/978-3-030-03152-7_3

- [40] Stavrakas, V., Papadelis, S., & Flamos, A. (2019). An agent-based model to simulate technology adoption quantifying behavioural uncertainty of consumers. *Applied Energy*, 255(May), 113795. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113795>
- [41] C. E. Rasmussen & C. K. I. Williams, *Gaussian Processes for Machine Learning*, the MIT Press, 2006, ISBN 026218253X. ©2006 Massachusetts Institute of Technology. Διαθέσιμο: <http://www.gaussianprocess.org/gpml/chapters/RW.pdf>
- [42] Oakley, J., & O'Hagan, A. (2002). Bayesian inference for the uncertainty distribution of computer model outputs. *Biometrika*, 89(4), 769–784. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1093/biomet/89.4.769>
- [43] Osborne, M. A. (2016). C24 Advanced Probability Theory Welcome to Advanced Probability Theory ! 1–58.
- [44] Saltelli A, Annoni P, Azzini I, Campolongo F, Ratto M, Tarantola S. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Comput Phys Commun* 2010;181:259–70. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>
- [45] Marc Claesen, Jaak Simm, D. P. (n.d.). Sobol sequences — Optunity 1.1.0 documentation. 2014. Retrieved April 20, 2021, from <https://optunity.readthedocs.io/en/latest/user/solvers/sobol.html>
- [46] Craig, P. S., Goldstein, M., Seheult, A. H., & Smith, J. A. (1997). Pressure matching for hydrocarbon reservoirs: A case study in the use of Bayes linear strategies for large computer experiments (with discussion). In C. Gastonis et al. (Eds.), *Case studies in Bayesian statistics* (Vol. III, pp. 37–93). New York: Springer.
- [47] Vernon, I., Goldsteiny, M., & Bowerz, R. G. (2010). Galaxy formation: A Bayesian uncertainty analysis. *Bayesian Analysis*, 5(4), 619–670. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1214/10-BA524>
- [48] Friedman, J.H., Fisher, N.I. Bump hunting in high-dimensional data. *Statistics and Computing* 9, 123–143 (1999). Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1023/A:1008894516817>
- [49] Christoforidis, G. C., Panapakidis, I. P., Papadopoulos, T. A., Papagiannis, G. K., Koumparou, I., Hadjipanayi, M., & Georghiou, G. E. (2016). A model for the assessment of different Net-Metering policies. *Energies*, 9(4). Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/en9040262>
- [50] G. Lettner, A. Hans, F. Andreas, S. Daniel, D. Bettina, M. Fabian, TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN, EXISTING AND FUTURE PV PROSUMER CONCEPTS. Vienna, May 2018. Διαθέσιμο: https://www.pvp4grid.eu/wp-content/uploads/2018/08/D2.1_Existing-future-prosumer-concepts_PVP4Grid_FV.pdf
- [51] Cerino Abdin, G., & Noussan, M. (2018). Electricity storage compared to net metering in residential PV applications. *Journal of Cleaner Production*, 176, 175–186. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.132>
- [52] SolarPower Europe. (2020). EU Market Outlook for Solar Power 2020-2024. Διαθέσιμο: https://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2020/12/3520-SPE-EMO-2020-report-11-mr.pdf?cf_id=23124

- [53] Department of Energy and Mining, 2018. Home Battery Scheme [WWW Document]. Gov. South Aust. http://www.energymining.sa.gov.au/energy_implementation/home_battery_scheme. accessed 2.5.21.
- [54] Steel, W., 2016. Sweden Set to Launch Residential Energy Storage Scheme [WWW Document]. Renew. Energy World. Διαθέσιμο: <https://www.renewableenergyworld.com/article/s/2016/10/sweden-set-to-launch-residential-energy-storage-scheme.html>. accessed 2.5.21.
- [55] European Commission. (2016). EU Reference Scenario 2016. EU Reference Scenario 2016, 27. Διαθέσιμο: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/ref2016_report_final-web.pdf
- [56] Ioannis Tsiropoulos, Dalius Tarvydas, & Natalia Lebedeva. (2018). Li-ion batteries for mobility and stationary storage applications - Scenarios for costs and market growth . Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.2760/8717>
- [57] Ardani, K. et al. (2010). Cost-Reduction Roadmap for Residential Solar Photovoltaics (PV), 2017–2030. January, 2017–2030. Διαθέσιμο: <https://www.nrel.gov/docs/fy18osti/70748.pdf>
- [58] Quoilin, S., Kavvadias, K., Mercier, A., Pappone, I., & Zucker, A. (2016). Quantifying self-consumption linked to solar home battery systems: Statistical analysis and economic assessment. Applied Energy, 182, 58–67. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.077>
- [59] Juraj Beták, Marcel Šúri, Tomáš Cebecauer, A. S. (2010). J. Beták, M. Šúri, T. Cebecauer, A. Skoczek, SOLAR RESOURCE AND PHOTOVOLTAIC ELECTRICITY POTENTIAL IN EU-MENA REGION. Thesis, May, 1–29.
- [60] Eurostat. (n.d.). Electricity price statistics - Statistics Explained. Retrieved June 20, 2021, from https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics
- [61] Figgenger, J., Stenzel, P., Kairies, K. P., Linßen, J., Haberschusz, D., Wessels, O., Robinius, M., Stolten, D., & Sauer, D. U. (2021). The development of stationary battery storage systems in Germany – status 2020. Journal of Energy Storage, 33. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101982>
- [62] Papadopoulou, A. G., Vasileiou, G., & Flamos, A. (2020). A comparison of dispatchable RES technoeconomics: Is there a niche for concentrated solar power? Energies, 13(18), 1–22. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/en13184768>
- [63] Michas, S., Stavrakas, V., Spyridaki, N. A., & Flamos, A. (2019). Identifying Research Priorities for the further development and deployment of Solar Photovoltaics. International Journal of Sustainable Energy, 38(3), 276–296. Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.1080/14786451.2018.1495207>
- [64] Stavrakas, V., Kleanthis, N., & Flamos, A. (2020). An ex-post assessment of RES-E support in greece by investigating the monetary flows and the causal relationships in the electricity market. Energies, 13(17). Διαθέσιμο: <https://doi.org/10.3390/en13174575>

[65] Anagnostopoulos, P., Spyridaki, N. A., & Flamos, A. (2017). A “new-deal” for the development of photovoltaic investments in Greece? A parametric techno-economic assessment. *Energies*, 10(8). [Διαθέσιμο: https://doi.org/10.3390/en10081173](https://doi.org/10.3390/en10081173)

[66] Stavrakas, V., Ceglarz, A., Kleanthis, N., Giannakidis, G., Schibline, A., Süsser, D., Lilliestam, J., Psyri, A., & Flamos, A. (2021). Case specification and scheduling. Deliverable 7.1. Sustainable Energy Transitions Laboratory (SENTINEL) project. European Commission. University of Piraeus Research Center (UPRC), Piraeus, Greece.

[67] V. Stavrakas, N. Kleanthis, G. Giannakidis (2021). Energy transition in Greece towards 2030 & 2050: Critical issues, challenges & research priorities, Stakeholder Interview Meetings – A Synthesis Report. Sustainable Energy Transitions Laboratory (SENTINEL) project. European Commission. University of Piraeus Research Center (UPRC), Piraeus, Greece.

Παράρτημα Α – Κώδικας βαθμονόμησης και Ανάλυσης Ευαισθησίας

Key agent related parameters, in this framework, include the parameters that quantify the
decision making process of customers' propensity to invest in small PV capacity additions
that took place in Germany from August 2014 to February 2019.

The mission of this process is to replicate in a plausible way the cumulative PV requests for
grid connection curve, under the above mentioned period - History Matching Method.

The following calibration module succeeds in:

1-Defining the set of the key parameters that govern the agents' behavior.

2-Appropriate value ranges based on historical data and observations

3-Quantify the uncertainties related to the decision-making process of the agents vis-a-vis
more obvious uncertainties.

4-Extrapolate calibration results to explore the plausible—given the historical data—
behaviour of the potential PV adopters in Greece under new schemes.

#-----NECESSARY PACKAGES-----

```
import numpy as np

import pandas as pd

import GPy

import datetime

from dateutil.relativedelta import relativedelta

from sklearn.model_selection import KFold

from sklearn.preprocessing import MinMaxScaler, StandardScaler

from tqdm import tqdm, trange

import optunity

import matplotlib.pyplot as plt

import seaborn as sns

from pyDOE import lhs

import math
```

```

from functools import partial

import prim

#from IPython import get_ipython

#get_ipython().run_line_magic('matplotlib', 'inline') # Whether figures created with
Matplotlib will show inside the IPython Console.

# Set the font to be serif, rather than sans serif

# Make the background white, and specify the specific font family

sns.set_context("paper")

sns.set(font='serif')

sns.set_style("whitegrid", {"font.family": "serif", "font.serif": ["Times", "Palatino", "serif"]})

#-----FUNCTIONS-----

# Figure size must be turn in inches by default

def cm2inch(*tupl):

    inch = 2.54

    if isinstance(tupl[0], tuple):

        return tuple(i/inch for i in tupl[0])

    else:

        return tuple(i/inch for i in tupl)

def plot_fig(data, labels, number=None, legend=False, for_paper=False):

    mpl_fig = plt.figure(figsize = cm2inch(12.2, 6) if for_paper else (10,4))

    ax = mpl_fig.add_subplot(111)

    ax.set_xlabel(labels['x'])

    ax.set_ylabel(labels['y'])

    data.plot(ax=ax, legend=legend)

```

```

if not for_paper:

    plt.title(labels["title"], fontsize=14)

else:

    for label in ax.get_xticklabels()[::-2]:

        label.set_visible(False)

    plt.savefig("Fig.{ }.png".format(number), bbox_inches='tight');

# A Gaussian Process emulator - 4 overall- was fitted on the results from a number of input
parameter

# combinations at which the ABM was run. The ABM results are the output data for the
emulator.

# The mean function of the emulator was set to 0.

# The Matern 3/2 kernel is used as the Cov[f(x)]. Important notes:

# 1.Calibration looked for similar shapes in cumulative capacity additions.

# 2.However the scale differs.This is because of the small number of the model's simulated

# agents compared to the wholesale potential adopters in Greece.

def fit_GP(X_train, y_train, nfeatures, add_mean=False):

    if add_mean:

        mf = GPy.mappings.Linear(nfeatures,1)    # Linear mapping: F(x)= Ax

    else:

        mf = None

    kernel = GPy.kern.Matern32(input_dim=nfeatures, ARD=True)

    if y_train.ndim < 2:

        y_train = np.expand_dims(y_train, axis=1)

```

```

m = GPy.models.GPRegression(X_train, y_train, kernel, mean_function=mf)

m.optimize_restarts(num_restarts = 3, verbose=True)

return m

# Filling the entire input space by maximizing the minimum distance between the points
generated.

def rescale(column, params, index):

    interval = params.iloc[index]

    return column * (interval['Max'] - interval['Min']) + interval['Min']

def replace_with(destination, source, column):

    result = np.copy(destination)

    result[:, column] = source[:, column]

    return result

# Assessing the sensitivity of Y to the uncertainty of the restricted parameters, through
# the expected reduction in the variance of Y if the real value of x' is learnt.
# The mathematical formula is expressed below, where F_B,k(x) is the output of the ABM for
# the period i at the kth run and F_A is the emulator's result.

def calculate_var(factor, A, B, f_A, f_B, m):

    N, _ = A.shape

    A_B = replace_with(A, B, factor)

    return (1./N) * np.sum(f_B*(m.predict(A_B)[0] - f_A))

def with_last_day_of_month(year, month, any_day):

    any_day = datetime.date(year, month, any_day)

    next_month = any_day.replace(day=28) + datetime.timedelta(days=4)

```

```

return next_month - datetime.timedelta(days=next_month.day)

# Based on ensemble variability Ves and on emulation uncertainty,

# where Vem= (1./N) * np.sum(f_B*(m.predict(A_B)[0] - f_A)) = Ves = 0.002, the
implausibility of those uncertainties

# of a specific parameter combination x is given by the following formula,

# where the argument "observed" represents the observed data for the period i.

def implausibility(x, observed, emulators, Ves, Vem, period):

    return abs(observed[period-1] - emulators[period-1].predict(x)[0][0][0]) / math.sqrt(Ves +
Vem)

# The "emulators[period-1].predict(x)[0][0][0]" factor represents the predictions of the

# cumulative capacity additions at the end of the period i for each one parameter combination.

def dummy_reverse(what, column):

    res = np.ones((2, 10))

    res[:, column] = np.asarray(what)

    return res

#-----MAIN PROGRAM-----

param_names = pd.read_csv('params.csv')['Var']    # Key agent-related parameters

X = pd.read_csv('design_inputs.csv', header=None) # 25 senarios X 10 parameters (The 11
th parameter - inertia - is constant)

scaler_X = StandardScaler()

scaler_X.fit(X)

X_scaled = pd.DataFrame(scaler_X.transform(X), columns=X.columns)

```

```

Y = pd.read_csv('design_outputs_capacity.csv', index_col=0) # 35 months X 25 senarios
under study

# Setting the starting date. Setting Y rows indexes as datetime months.

start = datetime.date(2014, 8, 1)

x_labels = pd.date_range(start, start+relativedelta(months=len(Y)), freq='M')

Y.index = x_labels.map(lambda s: s.date())

# Plotting the PV capacity additions under the simulated period, 25 scenarios.

# The input data is then normalized.

labels = {"x": "Month of simulation", "y": "PV capacity (MW)",

         "title": "PV capacity pathways under different model parameter combinations"}

plot_fig(Y, labels) # Capacity scenarios figure in MW

scaler_Y = MinMaxScaler()

scaler_Y.fit(np.array([0, Y.iloc[-1].median()]).reshape(-1,1)) # single column

Y_scaled = pd.DataFrame(scaler_Y.transform(Y), index = Y.index)

labels = {"x": "Month of simulation", "y": "PV capacity (scaled)",

         "title": "PV capacity pathways under different model parameter combinations"}

plot_fig(Y_scaled, labels) # Capacity scenarios figure in pu

# The ABM results were split into four periods (mid-2015, mid-2016, mid-2017, 02-2019)

# Validation method for GP emulator: The Generalization capability was judged by
performing

# K-fold cross-validation, to make sure that there is no region in the input space that is poorly
fitted.

```

```
# The input data is split into 2 sets (train consists of 21 rows and test of 4), training and test set to evaluate the GP regression performance.
```

```
results = []
```

```
n_splits = 6
```

```
kf = KFold(n_splits=n_splits)
```

```
with tqdm(total=n_splits) as pbar:          # Progressbar decorator
```

```
    for train_index, test_index in kf.split(X_scaled):
```

```
        X_train, X_test = X_scaled.iloc[train_index], X_scaled.iloc[test_index]
```

```
        y_train, y_test = Y_scaled.iloc[-1][train_index], Y_scaled.iloc[-1][test_index]
```

```
        m = fit_GP(X_train, y_train, 10)
```

```
        mu = m.predict(X_test.values)[0]
```

```
        predictions = np.fromiter((max(0, xi) for xi in mu), mu.dtype)
```

```
        results.append(1 - (np.power(y_test - predictions, 2).sum() / np.power(y_test - y_test.mean(), 2).sum()))
```

```
        pbar.update(1)
```

```
min(results)
```

```
m = fit_GP(X_scaled, Y_scaled.iloc[-1], 10)
```

```
num_pts = 10000 # the number of points to generate
```

```
skip = 1000    # the number of initial points of the Sobol sequence to skip
```

```
nfeatures = 10 # number of input parameters
```

```
design = optunity.solvers.Sobol.i4_sobol_generate(2*nfeatures, num_pts, skip) #efficiently optimize hyperparameters
```

```
design = np.asarray(design)
```

```
# By restricting the value ranges of the parameters that have only a small impact on the model's output uncertainty
```



```

# the initial dataset gets changed (X'). Then this dataset is split into two sets A & B.
# Sobol sequences were designed to cover the unit hypercube with lower
# discrepancy than completely random sampling.

A = design[:, :nfeatures]
B = design[:, nfeatures:]

# Dataset with restricted value ranges of the initial parameters of the agents' behaviour.

params = pd.read_csv('params_after.csv')

# A and B are independent Nx'n' matrices. They contain samples of the model's inputs.
# The matrices are generated from the above Sobol sequence of size N X 2n
for i in range(10):
    A[:, i] = rescale(A[:, i], params, i) #left half
    B[:, i] = rescale(B[:, i], params, i) #right half

# Performing normalization of the above samples.

A = scaler_X.transform(A)
B = scaler_X.transform(B)

f_A = m.predict(A)[0] # output of Gaussian Process emulator, X' = A
f_B = m.predict(B)[0] # output of Gaussian Process emulator, X' = B

var_Y = np.var(Y_scaled.iloc[-1])

```

```

# Computing the first order sensitivity coefficient Sj.
# It is used for determining the effect of input xj on model's output y.
results = {}

for i,param in enumerate(param_names[0:10]):
    results[param] = calculate_var(i, A, B, f_A, f_B, m) / var_Y

results[param] = calculate_var(i, A, B, f_A, f_B, m) / var_Y

#The model parameters with sensitivity coefficient greater than 0.02. Visualization provided.
mpl_fig = plt.figure(figsize=(10,4))
ax = mpl_fig.add_subplot(111)

to_remove = [] # Parameters with small impact on model's uncertainty
for key, value in results.items():
    if value < 0.02:
        to_remove.append(key)

for k in to_remove:
    results.pop(k)

x, y = zip(*results.items())

x_pos = range(len(x))

plt.bar(x_pos, y,
        align='center',
        # with color

```

```

    color='#FFC222',

    # alpha 0.5

    alpha=0.5)

plt.xticks(x_pos, x)

ax.set_xlabel("Model parameters")

ax.set_ylabel("Sensitivity coefficient")

ax.set_title("The model parameters with sensitivity coefficient greater than 0.02")

# Split into 4 periods were fitted on the respective results.

# The hyperparameters of each estimator were obtained by using the maximum likelihood
estimator.

# The emulated results for each senario is computed via Gaussian process

Y_mid_2015 = Y_scaled[Y_scaled.index == with_last_day_of_month(2015, 8, 1)]

m_mid_2015 = fit_GP(X_scaled, Y_mid_2015.values.T, 10)

Y_mid_2016 = Y_scaled[Y_scaled.index == with_last_day_of_month(2016, 9, 1)]

m_mid_2016 = fit_GP(X_scaled, Y_mid_2016.values.T, 10)

Y_mid_2017 = Y_scaled[Y_scaled.index == with_last_day_of_month(2017, 10, 1)]

m_mid_2017 = fit_GP(X_scaled, Y_mid_2017.values.T, 10)

m_end = m

# Reading the adopters' PV requests and constraining the data under the Feed-In-Tarrif
initiative implementation period.

requests = pd.read_csv('pv_connection_lic_requests.csv',

                      converters={'Date': lambda s: datetime.datetime.strptime(s,
"%d/%m/%Y").date()})

```

```

requests = requests.set_index('Date')

requests = requests[requests['Capacity (kW)'] <= 10]          # Scale reduction

requests = requests.sort_index()

requests = requests.loc[requests.index >= datetime.date(2014, 8, 1)] # starting date

requests = requests.loc[requests.index <= datetime.date(2019, 2, 1)] # end of simulated
period

requests = requests.groupby('Date').sum()

cumul_requests = requests.cumsum() # The initial data is changed accordingly, to fit in our
model.

# The median of the capacities achieved at the end of the simulated period is mapped to the
value of 1.

# Thus, 2019/02/01 Capacity = 1 pu. This is used as a point of reference, considering the issue
of the different scale of the agents parameters.

scaler_obs = MinMaxScaler()

scaler_obs.fit(cumul_requests.values.flatten().reshape(-1,1))

# Scaled capacity addition data

cumul_requests_sc = pd.DataFrame(scaler_obs.transform(cumul_requests), index =
cumul_requests.index)

# Scaled observations at the 4 simulated periods where GP emulation is performed

obs_mid_2015 = cumul_requests_sc.loc[cumul_requests_sc.index <= datetime.date(2015,
8, 31)].iloc[-1]

obs_mid_2016 = cumul_requests_sc.loc[cumul_requests_sc.index <= datetime.date(2016,
9, 30)].iloc[-1]

obs_mid_2017 = cumul_requests_sc.loc[cumul_requests_sc.index <= datetime.date(2017,
10, 31)].iloc[-1]

```

```

obs_end_02_2019 = cumul_requests_sc.loc[cumul_requests_sc.index >= datetime.date(2017,
11, 1)].iloc[-1]

# Mapped to the value of 1

# For the calculation of the implausibility function, firstly the data were scaled to the
# [0,1] range and a new set of possible parameters combination was derived by means of the
# Latin Hypercube Design (LHD). The idea is to take random points within the sampling
intervals

# to increase the accuracy of the model.

samples = lhs(10, samples=20000)

params = pd.read_csv('params_after.csv')

for i in range(10):

    samples[:, i] = rescale(samples[:, i], params, i)

# Performing normalization of the above samples.

samples = scaler_X.transform(samples)

period = 2

emul = [m_mid_2015, m_mid_2016, m_mid_2017 , m_end]

obs = [obs_mid_2015, obs_mid_2016, obs_mid_2017, obs_end_02_2019]

response = partial(implausibility, observed=obs, emulators=emul, Ves=0.002, Vem=0.002,
period=period)

results = []

for i in trange(len(samples)):

    results.append(response(samples[i,:].reshape(1,10)).values[0])

```

```

# A natural cut-off value for implausibility is 3, so any parameter combination x with
# implausibility > 3 should be considered implausible.
# The implausibility function was used as an indicator to split the samples into plausible
# and implausible ones through the Patient Rule Induction Method (PRIM).
# The goal is to identify rectangular partitions with high homogeneity.

p = prim.Prim(samples, results, threshold=3, threshold_type="<")

box = p.find_box() # Rectangular partitions of the input space where the average response is
much larger than the average.

print(box)

column = 0

scaler_X.inverse_transform(dummy_reverse([-1.7, 0.4], column))[:,column]

```

Παράρτημα Β – Μοντέλο βέλτιστης κατανομής οικιακής μονάδας αποθήκευσης

Σε κάθε χρονικό βήμα που ορίζεται ως ίσο με **1 ώρα** (σύνολο 8760 βημάτων σε διάρκεια ενός έτους, με τα αντίστοιχα προφίλ παραγωγής και κατανάλωσης), εκτελείται ο ακόλουθος αλγόριθμος κατανομής του εγκατεστημένου συστήματος BESS:

- Η μέγιστη ισχύς εκφόρτισης της μπαταρίας υπολογίζεται εκφράζεται από τη σχέση:

$$P_{max,dis,i} = \min \left(P_{max,bat}, \frac{SOC_{i-1} * n_{bat}}{\Delta t} \right) \quad (1)$$

ενώ η μέγιστη ισχύς φόρτισης από:

$$P_{max,ch,i} = \min \left(P_{max,bat}, \frac{CAP_{bat} - SOC_{i-1}}{\Delta t} \right) \quad (2)$$

- Η πραγματική ισχύς εκφόρτισης της μπαταρίας υπολογίζεται συγκρίνοντας τη Φ/Β παραγωγή με τη ζήτηση ως εξής:

$$P_{dis,i} = \min \left[P_{max,dis,i}, \max \left(0, \frac{P_{load,i}}{n_{inv}} - P_{PV,DC,i} \right) \right] \quad (3)$$

και πραγματική ισχύς φόρτισης υπολογίζεται με παρόμοιο τρόπο:

$$P_{ch,i} = \min \left[P_{max,ch,i}, \max \left(0, P_{PV,DC,i} - \frac{P_{load,i}}{n_{inv}} \right) \right] \quad (4)$$

ο Τέλος, το ενεργειακό ισοζύγιο του συστήματος (βλ. Εικόνα Παρ.Β 1) εκφράζεται:

$$SOC_i = SOC_{i-1} + P_{ch,i} * \Delta t - \frac{P_{dis,i}}{n_{bat}} * \Delta t \quad (5)$$

, όπου:

$P_{max,bat}$: Εγκατεστημένη ισχύς συστήματος BESS (kW).

SOC_i : Το επίπεδο φόρτισης μιας ηλεκτρικής μπαταρίας σε σχέση με τη χωρητικότητά της. Εκφράζεται σε ποσοστιαία μορφή (0% = άδεια, 100% = πλήρης).

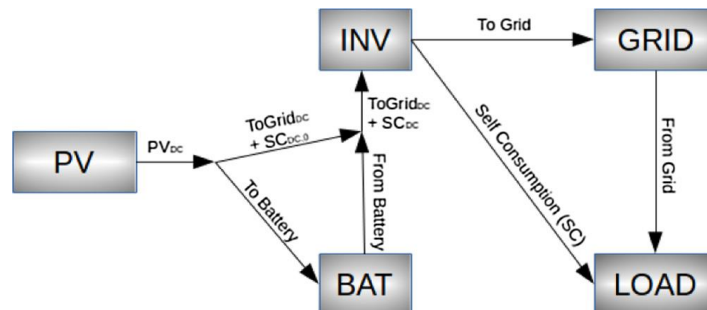
n_{bat} : Βαθμός απόδοσης συστήματος BESS.

CAP_{bat} : Η διαθέσιμη χωρητικότητα της μπαταρίας (kWh), που εκφράζεται και ως $P_{max,bat} * [\max(1 - SOC_i)]$, όπου $(1 - SOC_i)$ το βάθος εκφόρτισης (*Depth of Discharge – DoD*).

$P_{load,i}$: Στιγμαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας (kW).

$P_{PV,DC,i}$: Στιγμαία παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (kW), στην έξοδο του Φ/Β συστήματος.

n_{inv} : Βαθμός απόδοσης συστήματος μετατροπής ρεύματος DC/AC.



Εικόνα Παρ. Β 1: Σχηματική απεικόνιση των ενεργειακών ροών σε ένα οικιακό σύστημα αυτοπαραγωγής – ιδιοκατανάλωσης.