



**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ ΣΤΗ
ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ (MBA)**

Διπλωματική Εργασία

**«ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ ΜΕ ΤΗ
ΜΕΘΟΔΟ DATA ENVELOPMENT ANALYSIS (DEA)»**

ΤΟΥ

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΥ Π. ΣΟΥΚΑΚΟΥ

Με επιβλέποντα τον:

ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟ ΚΑΠΑΡΗ

**Υποβλήθηκε ως απαιτούμενο για την απόκτηση του διπλώματος μεταπτυχιακών
σπουδών στη Διοίκηση Επιχειρήσεων**

Θεσσαλονίκη, Μάρτιος 2021



*Στην Ελευθερία μου,
στους γονείς μου
και σε όσους με στηρίζουν.*

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία γίνεται αξιολόγηση 16 Αιολικών Πάρκων με τη χρήση της μεθόδου *Data Envelopment Analysis (DEA)* για χρονικό διάστημα ενός έτους, συγκεκριμένα του έτους 2019. Συγκεκριμένα εξετάζεται η *αποδοτικότητά* τους με χρήση ορισμένων δεδομένων λειτουργίας τους.

Το μοντέλο της μεθόδου DEA που επιλέγεται είναι το *BCC* και ο προσανατολισμός του είναι, αναλόγως της περίπτωσης, είτε στις εισροές είτε στις εκροές. Συνολικά εξετάζονται 7 σενάρια, που συνδυάζουν με διαφορετικούς τρόπους τα συλλεχθέντα δεδομένα: *Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας, ιδιοκατανάλωση, ταχύτητα ανέμου*. Σε όλα τα σενάρια ως εκροή τίθεται η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ενώ ως εισροές τίθενται είτε μεμονωμένα τα υπόλοιπα δεδομένα είτε συνδυαστικά. Η επίλυση του μοντέλου διενεργείται σε δύο φάσεις: Στην πρώτη φάση προκύπτουν τα *τεχνικώς αποδοτικά πάρκα (technical efficient parks – weakly efficient)*, συγκρινόμενα πάντα με τα υπόλοιπα, τα οποία εισάγονται στη δεύτερη φάση, στην οποία εξετάζονται τα ενδεχόμενα είτε τα συγκεκριμένα να είναι *κυριαρχούμενα* από κάποια άλλα πάρκα (*mix inefficient parks*) είτε να είναι *πλήρως αποδοτικά (fully efficient parks)*.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της επίλυσης της πρώτης φάσης των σεναρίων, ως αποδοτικά χαρακτηρίζονται τα πάρκα 4, 5, 7, 13, 14 και 16, με το πάρκο 4 να είναι το μοναδικό που χαρακτηρίζεται ως αποδοτικό σε όλα τα σενάρια. Το συγκεκριμένο πάρκο είναι και στη δεύτερη φάση το μοναδικό που χαρακτηρίζεται ως πλήρως αποδοτικό σε όλα τα σενάρια. Επίσης, κατέχει τη δεύτερη θέση ως προς τη συχνότητα χαρακτηρισμού του ως “πάρκο-στόχος” (45 φορές), δηλαδή ως το πάρκο του οποίου τις εκροές ή τις εισροές πρέπει να “μιμηθούν” τα μη αποδοτικά πάρκα για να μετατραπούν σε αποδοτικά, με την πρώτη θέση στην εν λόγω κατηγορία να καταλαμβάνει το πάρκο 13 (56 φορές).

Μέσω της χρήσης της μεθόδου DEA επιδιώκεται η *ταξινόμηση* των εξεταζόμενων Αιολικών Πάρκων σε αποδοτικά και μη καθώς και η υπόδειξη των *ποσοστών βελτίωσης* ορισμένων χαρακτηριστικών των μη αποδοτικών πάρκων ώστε αυτά να καταστούν αποδοτικά.

Λέξεις κλειδιά: *Αιολικό Πάρκο, DEA, ηλεκτρική ενέργεια, αποδοτικότητα, στόχος*

ABSTRACT

The aim of the study is the evaluation of 16 Wind Parks' *efficiency* using *Data Envelopment Analysis (DEA)*. All of them are installed in Greece and the functional data that are used, concern the year 2019.

The chosen DEA model is the one first introduced by Banker, Charnes & Cooper in 1984 and is called "BCC". It's input or output oriented, based on the selected scenario each time. Based on the 7 scenarios that are examined in our study, our dataset is analyzed in different ways. The dataset is composed of entries for the generation, losses and self-consumption of electricity, as well as for the wind speed. The generation of electrical energy is set through all the scenarios as the one and only output and the rest are introduced as inputs, either on their own or in a combination with others. The model's solution takes place in two phases: In the first phase, each Wind Park is characterized as *weakly efficient* or not, compared to the rest parks. In the second phase we further investigate the subset of weakly efficient units and thus characterize the set of *fully efficient* units.

According to the results, the parks 4, 5, 7, 13, 14 and 16 are characterized as weakly efficient after the examination of different scenarios and among them, only park 4 gets this characterization through all the scenarios. During the second phase, parks 16 and 13 are characterized as fully efficient by scenarios 1 and 2β , respectively, while scenario 2α names all the examined parks as fully efficient. Park 4 gets, like in the first phase, the characterization of fully efficient park through all the scenarios of second phase. Moreover, it is ranked second in the "frequency list", by setting for 45 times the benchmark for all the non-efficient parks. We finally note that park 13 is first in the ranking (56 times).

Overall then we could say that the objective of the present study is the classification of the Wind Parks under consideration based on their efficiency, using the non-parametric method of DEA, and the subsequent evaluation of the "distance" to the efficiency frontier for each inefficient unit.

Key words: *Wind Park, DEA, electrical energy, efficiency, aim*

Πίνακας περιεχομένων

1	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας	1
1.1	Γενικά	1
1.2	Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας.....	2
1.3	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ευρώπη	9
1.4	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα	15
2	Αιολική Ενέργεια	23
2.1	Η εξέλιξη της αιολικής ενέργειας	23
2.2	Η εξέλιξη της Αιολικής Ενέργειας στην Ευρώπη	23
2.3	Η κατάσταση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα	24
2.4	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Αιολικής Ενέργειας.....	28
3	Περιγραφή Αιολικού Πάρκου	30
3.1	Γενική περιγραφή	30
3.2	Χερσαία Αιολικά Πάρκα.....	30
3.3	Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα.....	32
4	Ανεμογεννήτριες	33
4.1	Κατηγορίες ανεμογεννητριών	33
4.1.1	Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα.....	34
4.1.2	Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα	35
4.2	Βασικά μέρη Ανεμογεννήτριας	36
4.3	Δυνατότητες βελτίωσης εγκατεστημένης Ανεμογεννήτριας	37
4.4	Επιλογή βέλτιστης θέσης Αιολικού Πάρκου-Ανεμογεννητριών	38
4.5	Η πρώτη ύλη των Ανεμογεννητριών: Ο άνεμος	39
4.6	Ταχύτητα - ισχύς ανέμου	41
4.7	Ανεμόμετρο	42
5	Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων	43
5.1	Μονάδα Λήψης Απόφασης.....	43
5.2	Αποδοτικότητα	43
5.3	Αποδοτικό σύνορο.....	44
5.4	Παρουσίαση της Μεθόδου Data Envelopment Analysis	45
5.5	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα DEA.....	47
5.6	Θεωρητικό υπόβαθρο – Μαθηματικά μοντέλα DEA.....	48
6	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	53
7	Εφαρμογή μεθόδου DEA για την αξιολόγηση Αιολικών Πάρκων.....	55
7.1	Μεθοδολογία έρευνας	55
7.2	Δείγμα έρευνας	55

7.3	Δεδομένα εισόδου – εξόδου.....	56
7.4	Μεθοδολογία επίλυσης μοντέλου	61
8	Ανάλυση αποτελεσμάτων αξιολόγησης.....	65
8.1	Σενάριο 1.....	65
8.2	Σενάριο 2α.....	70
8.3	Σενάριο 2β.....	75
8.4	Σενάριο 2γ	79
8.5	Σενάριο 3α.....	83
8.6	Σενάριο 3β.....	89
8.7	Σενάριο 3γ	93
9	Συμπεράσματα.....	98
10	Προτάσεις	103
	Βιβλιογραφία.....	105

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Γεωγραφική Κατανομή & Εξέλιξη Εγκατεστημένης Ισχύος (MW) Μονάδων ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα περιόδου 2009-2020 (Άρθρο 9 Ν.3468/2006)	22
Πίνακας 2: Inputs-Outputs σεναρίων αξιολόγησης.....	56
Πίνακας 3: Στατιστικά στοιχεία δεδομένων για το έτος 2019	57
Πίνακας 4: Αποτελέσματα συσχέτισης δεδομένων.....	57
Πίνακας 5: Διαγράμματα χρησιμοποιούμενων δεδομένων	59
Πίνακας 6: Συσχέτιση δεδομένων	60
Πίνακας 7: Εξεταζόμενα σενάρια	62
Πίνακας 8: Συγκεντρικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 1).....	68
Πίνακας 9: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 1).....	69
Πίνακας 10: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 1, Φάση 2).....	70
Πίνακας 11: Συγκεντρικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 2α).....	73
Πίνακας 12: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 2α).....	74
Πίνακας 13: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 2α, Φάση 2).....	75
Πίνακας 14: Συγκεντρικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 2β).....	77
Πίνακας 15: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 2β).....	78
Πίνακας 16: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 2β, Φάση 2).....	79
Πίνακας 17: Συγκεντρικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 2γ)	81
Πίνακας 18: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 2γ).....	82
Πίνακας 19: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 2γ, Φάση 2)	83
Πίνακας 20: Συγκεντρικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 3α).....	86
Πίνακας 21: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 3α).....	87
Πίνακας 22: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 3α, Φάση 2).....	88
Πίνακας 23: Συγκεντρικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 3β).....	91
Πίνακας 24: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 3β).....	92
Πίνακας 25: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 3β, Φάση 2).....	93
Πίνακας 26: Συγκεντρικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 3γ).....	95
Πίνακας 27: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 3γ).....	96
Πίνακας 28: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 3γ, Φάση 2)	97
Πίνακας 29: Χαρακτηριστικά σεναρίων και συγκεντρικά αποτελέσματα φάσεων επίλυσης μοντέλου	99

Κατάλογος εικόνων

Εικόνα 1: Βασική δομή ενός ηλιακού κελιού	4
Εικόνα 2: Φωτοβολταϊκά πάνελ	4
Εικόνα 3: Ηλιακή ακτινοβολία και ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα, 2016	4
Εικόνα 4: Αναερόβια χώνευση απορριμμάτων	5
Εικόνα 5: Διαδικασία παραγωγής βιοντίζελ και γλυκερίνης	5
Εικόνα 6: Διαδικασία μετατροπής υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια.....	6
Εικόνα 7: Ανοιχτό (επάνω) και κλειστό (κάτω) σύστημα αξιοποίησης γεωθερμικής ενέργειας για ψύξη/θέρμανση κατοικίας	7
Εικόνα 8: Παλιρροιακές τουρμπίνες.....	8
Εικόνα 9: Παλιρροιακά φράγματα.....	8
Εικόνα 10: Μεριδίο ενέργειας ανά κράτος-μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το 2018	11
Εικόνα 11: Διείσδυση ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της Ελλάδας 2010-2020	16
Εικόνα 12: Συνολική Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια στην Ελλάδα 1990-2007	17
Εικόνα 13: Χωρική κατανομή αιολικής δυναμικότητας (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ)	27
Εικόνα 14: Χερσαίο Αιολικό Πάρκο σε κορυφογραμμή.....	31
Εικόνα 15: Υπεράκτιο Αιολικό Πάρκο	33
Εικόνα 16: Μορφές χωροθέτησης υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων (Giebel & Hasager, 2016).....	33
Εικόνα 17: Πορεία μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική (Πηγή: “Wind Energy Power Plants,” 2014)	33
Εικόνα 18: Τύποι ανεμογεννητριών.....	34
Εικόνα 19: Τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα (Πηγή: Schaffarczyk, 2014)	35
Εικόνα 20: Βασικά μέρη Ανεμογεννήτριας (Πηγή: Badurek, 2015)	37
Εικόνα 21: Χάρτης αιολικού δυναμικού Ελλάδας (Πηγή: www.geo.rae.gr).....	40
Εικόνα 22: Ροή ανέμου μέσα από κύλινδρο επιφάνειας Α (Πηγή: Nelson, 2009)	41
Εικόνα 23: α)Κυπελλοφόρο (τριπλό) ανεμόμετρο, b) Ανεμοδείκτης, c) Ηχητικό ανεμόμετρο, d) Ανεμόμετρο προπέλας-ανεμοδείκτη (Πηγή: Walker & Swift, 2015)	42
Εικόνα 24: Διαδικασία μετατροπής εισροών σε εκροές μιας Μονάδας Λήψης Απόφασης (Πηγή: Thanassoulis, 2001).....	43
Εικόνα 25: Γραφική αναπαράσταση αποδοτικού συνόρου, DMUs, εφικτής, ανέφικτης περιοχής (Πηγή: Azadeh et al., 2007)	46
Εικόνα 26: Γραφική διάκριση μεταξύ των μοντέλων CCR (CRS) και BCC (VRS) της μεθόδου DEA (Πηγή: Azadeh et al., 2007)	51

Κατάλογος σχημάτων

Σχήμα 1: Ιστορικές τιμές εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, προβλέψεις, στόχοι μείωσης	10
Σχήμα 2: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (Πηγή: Eurostat)	13
Σχήμα 3: Συμβολή ΑΠΕ στις μεταφορές (Πηγή: Eurostat)	13
Σχήμα 4: Θέρμανση-ψύξη από ΑΠΕ (Πηγή: Eurostat)	14
Σχήμα 5: Ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ (Πηγή: Eurostat).....	14
Σχήμα 6: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ 2004-2018 (Πηγή: Eurostat).....	19
Σχήμα 7: Συμβολή ΑΠΕ στις μεταφορές 2004-2018 (Πηγή: Eurostat)	19
Σχήμα 8: Συμβολή ΑΠΕ σε θέρμανση-ψύξη κτιρίων 2004-2018 (Πηγή: Eurostat).....	20
Σχήμα 9: Ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας ΑΠΕ 2004-2018 (Πηγή: Eurostat)	20
Σχήμα 10: 2018-2020 Εθνική Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας (GWh) Μονάδων ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ (Άρθρα 9 & 10 Ν.3468/2006) & Φ/Β Στεγών <10 Kw (Πηγή: Δ.Α.Π.Ε.Ε.Π.)	21
Σχήμα 11: Συνολική έγχυση στο δίκτυο (MW) ανά χρόνο (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ).....	26
Σχήμα 12: Μεριδίο (MW) κατασκευαστών ανά έτος (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ)	26
Σχήμα 13: Κατανομή ανά Περιφέρεια της εγκατεστημένης ισχύος (MW) (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ). 27	
Σχήμα 14: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 1)	68
Σχήμα 15: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 1).....	69
Σχήμα 16: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 2α)	73
Σχήμα 17: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 2α)	74
Σχήμα 18: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 2α)	75
Σχήμα 19: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 2β)	77
Σχήμα 20: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 2β).....	78
Σχήμα 21: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 2γ)	81
Σχήμα 22: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 2γ).....	82
Σχήμα 23: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 3α)	86
Σχήμα 24: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 3α)	87
Σχήμα 25: Διαφορά απωλειών αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας (Σενάριο 3α)	88
Σχήμα 26: Διαφορά ιδιοκαταναλώσεων αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας (Σενάριο 3α).....	88
Σχήμα 27: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 3β)	91
Σχήμα 28: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς τις ιδιοκαταναλώσεις (Σενάριο 3β).....	92
Σχήμα 29: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 3γ).....	95
Σχήμα 30: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 3γ).....	96
Σχήμα 31: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 3γ).....	97
Σχήμα 32: Πλήθος πλήρως αποδοτικών πάρκων / Σενάριο.....	100
Σχήμα 33: Συχνότητα χαρακτηρισμού αποδοτικών πάρκων ως "πάρκα-στόχοι"	101
Σχήμα 34: Πλήθος χαρακτηρισμού πάρκων ως αποδοτικών (1η φάση)	102
Σχήμα 35: Πλήθος χαρακτηρισμού πάρκων ως πλήρως αποδοτικών (2η φάση)	102

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα παρατηρούμενα υψηλότερα επίπεδα ατμοσφαιρικής ρύπανσης των τελευταίων ετών σε συνδυασμό με την αλόγιστη χρήση ορυκτών καυσίμων, οφειλόμενα αμφότερα στην ανθρώπινη δραστηριότητα, οδήγησαν στην αναζήτηση διαφορετικών τρόπων κάλυψης των παγκόσμιων ενεργειακών αναγκών.

Η καλπάζουσα εξέλιξη και ανάπτυξη των τεχνολογιών εκμετάλλευσης του ενεργειακού περιεχομένου των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα της εποχής που διανύουμε. Με την αιολική ενέργεια να κατέχει ηγετική θέση στον κατάλογο των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, ο αριθμός των ήδη εγκατεστημένων αιολικών πάρκων αλλά και όσων πρόκειται να εγκατασταθούν άμεσα είναι πέρα από τις αρχικές προβλέψεις. Οι συνεχώς αναπτυσσόμενες τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται για την κατασκευή ανεμογεννητριών, αυξάνουν την αποδοτικότητά τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, καθιστώντας το ενδεχόμενο αντικατάστασης ή ακόμα και παύσης λειτουργίας αιολικών πάρκων παλαιότερης ημερομηνίας κατασκευής ολοένα και πιο πιθανό.

Η αρχική μελέτη της βέλτιστης θέσης εγκατάστασης ενός Αιολικού Πάρκου δεν θα πρέπει να αποτελεί αφορμή εφησυχασμού. Η συνεχής παρακολούθηση και αξιολόγηση της λειτουργίας των Αιολικών Πάρκων είναι μείζονος σημασίας. Αυτό είναι και το σημείο στο οποίο υπεισέρχονται διάφορες μέθοδοι αξιολόγησης ομοειδών μονάδων, όπως η μέθοδος DEA.

Η εν λόγω μέθοδος, γνωστή με τον ελληνικό όρο Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων, είναι ευρέως διαδεδομένη τα τελευταία χρόνια για αξιολόγηση ομοειδών μονάδων λήψης απόφασης όπως Οργανισμοί Τοπικής Αυτοδιοίκησης (Δήμος, 2014), εκπαιδευτικές μονάδες (Βαμβούρα, 2007), αεροδρόμια (Μπινιάρη, 2018), ναυτιλιακές εταιρείες (Γεωργάκας, 2017) καθώς και στην αξιολόγηση μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Golany et al., 1994; Goto & Sueyoshi, n.d.; Xinggang & Zhen, 2019; Τσαλιάνης, 2015). Μέσω της χρήσης των δεδομένων του συστήματος ελέγχου και λειτουργίας ενός Αιολικού Πάρκου και με την εφαρμογή των κατάλληλων μοντέλων αξιολόγησης, εξάγονται χρήσιμα συμπεράσματα για την αποδοτικότητα των επιμέρους μονάδων. Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να εξειδικευτούν είτε ως προς τα λειτουργικά χαρακτηριστικά, όπως είναι τα επίπεδα παραγωγής, απωλειών, ιδιοκαταναλώσεων είτε ως προς την οικονομική απόδοση της επένδυσης. Η μέθοδος DEA υποδεικνύει τους τομείς στους οποίους πρέπει να

βελτιωθούν οι μη αποδοτικές μονάδες καθώς και το στόχο βελτίωσης που εκείνες πρέπει να θέσουν.

Αντικειμενικός σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εφαρμογή της μεθόδου DEA για την αξιολόγηση της λειτουργίας 16 επιλεγμένων Αιολικών Πάρκων, με χρήση δεδομένων λειτουργίας του έτους 2019, καθώς και ο εντοπισμός και η παρουσίαση των αδυνάτων σημείων όπως και οι μέθοδοι βελτίωσής τους.

Αρχικά γίνεται αναφορά στις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας καθώς και στην κατάσταση που επικρατεί στην Ευρώπη και στην Ελλάδα (Κεφάλαιο 1). Στη συνέχεια γίνεται παρουσίαση της Αιολικής Ενέργειας και των χαρακτηριστικών της (Κεφάλαιο 2) ενώ στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφονται τα δύο είδη Αιολικών Πάρκων, τα χερσαία και τα υπεράκτια (Κεφάλαιο 3). Στο τελευταίο κεφάλαιο που αναφέρεται στην Αιολική Ενέργεια, παρουσιάζονται πληροφορίες για τις ανεμογεννήτριες όπως τα είδη τους, τεχνικά χαρακτηριστικά καθώς και η πρώτη ύλη της Αιολικής Ενέργειας, ο άνεμος (Κεφάλαιο 4). Στο κεφάλαιο που ακολουθεί παρουσιάζεται η μέθοδος της Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων που χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ως εργαλείο αξιολόγησης (κεφάλαιο 5). Ακολουθώς, γίνεται βιβλιογραφική ανασκόπηση των ερευνών που έχουν διεξαχθεί στον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και συγκεκριμένα των περιπτώσεων αξιολόγησης με χρήση της μεθόδου της Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων (Κεφάλαιο 6). Στη συνέχεια παρουσιάζεται η μεθοδολογία της έρευνας καθώς και τα δεδομένα εισόδου και εξόδου (Κεφάλαιο 7). Η ανάλυση των 7 σεναρίων που περιλαμβάνει σχόλια, πίνακες και διαγράμματα παρατίθεται στο κεφάλαιο που ακολουθεί (Κεφάλαιο 8). Στα δύο τελευταία κεφάλαια παρουσιάζονται τα συμπεράσματα (Κεφάλαιο 9) και οι προτάσεις της έρευνας (Κεφάλαιο 10).

1 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας

1.1 Γενικά

Η ενέργεια είναι ένα από τα πλέον απαραίτητα αγαθά στη ζωή του ανθρώπου. Η συμβολή κάθε μορφής της στην εξέλιξη της τεχνολογίας είναι καθοριστική. Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιήθηκαν εξ αρχής για την παραγωγή ενέργειας δηλαδή τα ορυκτά καύσιμα, αποτελούν εξ ορισμού μια πεπερασμένη πηγή. Παράλληλα, η χρήση των ορυκτών καυσίμων επιβαρύνει σημαντικά το πρόβλημα περιβαλλοντικής μόλυνσης, καθώς τα μέτρα πρόληψης και αποφυγής της είτε δεν εφαρμόζονται είτε δεν είναι ικανά να αποτρέψουν πλήρως τις αρνητικές συνέπειες. Τα στερεά και υγρά απόβλητα, τα καυσαέρια και ειδικά τα αέρια του θερμοκηπίου είναι χαρακτηριστικά παραδείγματα αρνητικών συνεπειών της χρήσης καυσίμων.

Τα ανωτέρω χαρακτηριστικά ασκούν έμμεση ή άμεση επιρροή σε διάφορα κρίσιμα θέματα όπως η ενεργειακή ασφάλεια, η οικονομική ανάπτυξη, η προστασία του περιβάλλοντος και η αξιοπιστία του δικτύου ηλεκτρισμού (EL-Shimy et al., 2018). Τόσο η σχετική αστάθεια που δημιουργούν, εξαιτίας των περιορισμένων αποθεμάτων τους, όσο και η συμβολή τους στη ρύπανση του περιβάλλοντος, δεν αρκούν ώστε να σταματήσουν να κατέχουν το μεγαλύτερο ποσοστό ως πρώτη ύλη για παραγωγή ενέργειας (EL-Shimy et al., 2018).

Τα περιορισμένα αποθέματα καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποτελούν τους βασικούς λόγους αντικατάστασης των συμβατικών καυσίμων. Η προσπάθεια που γίνεται για εύρεση νέων μορφών ενέργειας έχει στρέψει την παγκόσμια επιστημονική κοινότητα στη μελέτη και αξιοποίηση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ). Με τον όρο ‘ανανεώσιμη’ νοείται “η ενέργεια από ανανεώσιμες μη ορυκτές πηγές ήτοι αιολική, ηλιακή, αεροθερμική, γεωθερμική, υδροθερμική και ενέργεια των ωκεανών, υδροηλεκτρική, από βιομάζα, από τα εκλύόμενα στους χώρους υγειονομικής ταφής αέρια, από τα αέρια που παράγονται σε μονάδες επεξεργασίας λυμάτων και από τα βιοαέρια” (Οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Απριλίου 2009, σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ, 2009). Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας θεωρούνται η ηλιακή ενέργεια, η αιολική ενέργεια, η υδροηλεκτρική ενέργεια, η βιομάζα, η μπλε ενέργεια, η γεωθερμία και η ενέργεια προερχόμενη από απόβλητα (Gorjian, 2017).

1.2 Είδη Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας

Τα είδη των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας που υπάρχουν τη σημερινή εποχή καθώς και μια σύντομη περιγραφή της καθεμίας εξ αυτών παρουσιάζονται στη συνέχεια.

➤ Αιολική ενέργεια

Η χρήση της Αιολικής Ενέργειας συναντάται εδώ και πάρα πολλά χρόνια. Από τα ιστιοφόρα πλοία της αρχαιότητας και τους ανεμόμυλους της μεταγενέστερης εποχής ως τις ανεμογεννήτριες των τελευταίων ετών, η Αιολική Ενέργεια κατέχει πρωταρχική θέση στην εξέλιξη του πολιτισμού και της ανθρωπότητας. Με τον όρο ανεμογεννήτρια νοείται η κατασκευή που αποτελείται από μια έλικα η οποία περιστρέφεται με τη βοήθεια του ανέμου και είναι συνδεδεμένη με μια γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος. Αποτέλεσμα της κυκλικής κίνησης της έλικας είναι η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος. Επιτυγχάνεται δηλαδή η μετατροπή της κινητικής ενέργειας του ανέμου σε ηλεκτρική. Η διάταξη είναι τοποθετημένη πάνω σε στύλο μεγάλου ύψους. Στην κορυφή του στύλου είναι τοποθετημένο το κουβούκλιο εντός του οποίου βρίσκεται η γεννήτρια ηλεκτρικού ρεύματος καθώς και όλες οι απαιτούμενες για την εύρυθμη λειτουργία της ανεμογεννήτριας βοηθητικές διατάξεις. Στο εσωτερικό του στύλου βρίσκεται ειδικού τύπου ανελκυστήρας ο οποίος επιτρέπει τη μετάβαση στο κουβούκλιο της ανεμογεννήτριας. Δύο είναι οι βασικοί τύποι ανεμογεννητριών: Οριζοντίου άξονα και Κατακόρυφου άξονα (Riva et al., 2019).

Τα περισσότερα Αιολικά Πάρκα, αποτελούμενα από μεταβλητό ανά περίπτωση αριθμό ανεμογεννητριών, είναι συνήθως απομακρυσμένα. Εγκαθίστανται είτε στο έδαφος (on-shore wind parks) είτε στη θάλασσα (off-shore wind parks), σε συγκεκριμένες τοποθεσίες, οι οποίες επιλέγονται έπειτα από ειδική μελέτη. Οι κορυφογραμμές ήταν μέχρι πρότινος η πρώτη επιλογή για την εγκατάσταση Αιολικών Πάρκων, με τη θάλασσα να έχει έρθει στο προσκήνιο τα τελευταία χρόνια και να κερδίζει ολοένα και περισσότερο έδαφος. Κατά τη μελέτη επιλογής της θέσης εγκατάστασης, γίνεται ανάλυση του αιολικού δυναμικού των υποψήφιων περιοχών και αφού επιλεγεί η καλύτερη, στη συνέχεια γίνεται περαιτέρω ανάλυση για τη βέλτιστη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών εντός του Αιολικού Πάρκου. Αμφότερες οι μελέτες είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς μετά την εγκατάσταση των

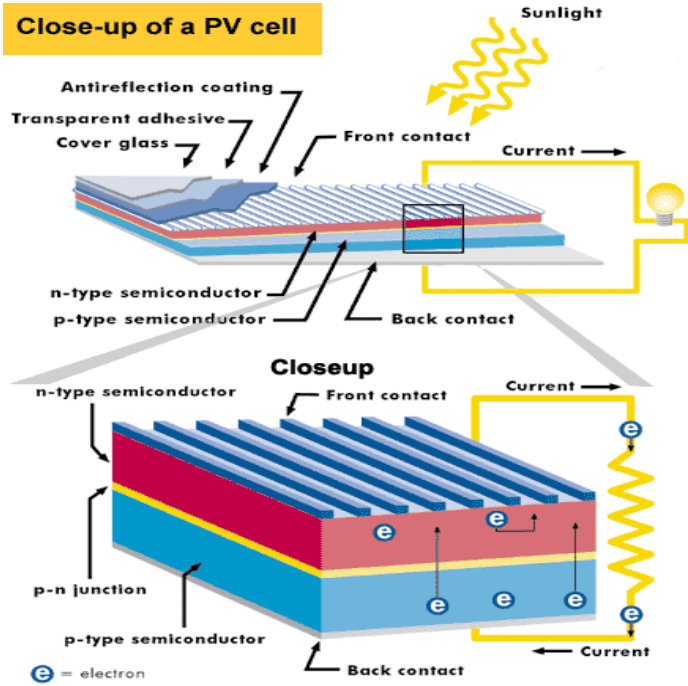
ανεμογεννητριών καμία αλλαγή στην τοποθεσία τους δεν θεωρείται συμφέρουσα να λάβει χώρα.

Η δημιουργία ενός Αιολικού Πάρκου απαιτεί ορισμένες παρεμβάσεις στο χώρο που τελικά επιλέγεται. Η διάνοιξη οδών για τη μεταφορά των ανεμογεννητριών στα σημεία τελικής τοποθέτησής τους, η εγκατάσταση του κέντρο ελέγχου του πάρκου καθώς και η διασύνδεση με το υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας γίνονται σύμφωνα με την ισχύουσα νομοθεσία και τους νόμους που διέπουν την προστασία του περιβάλλοντος.

Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται τιμάται περίπου 5-8 €/kWh και προβλέπεται να φθάσει κάτω από 4 €/kWh στο άμεσο μέλλον. Στη διαμόρφωση αυτής της τιμής συμβάλλουν η λειτουργία και η συντήρηση ενός Αιολικού Πάρκου. Οι δύο διαδικασίες θεωρούνται απλές και σχετικά φθηνές, με συνεισφορά παράλληλα και στη μείωση της ανεργίας της περιοχής, καθώς δημιουργούνται νέες θέσεις εργασίας (Riva et al., 2019).

➤ Ηλιακή ενέργεια

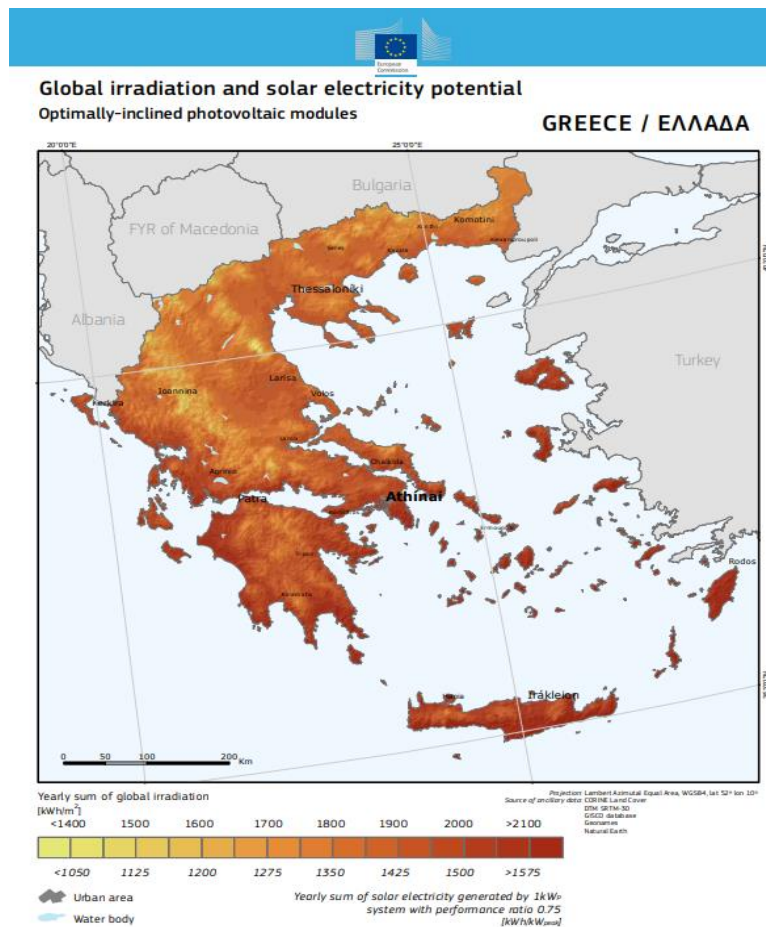
Πρόκειται για μια ανεξάντλητη μορφή ενέργειας. Η πρώτη ύλη-καύσιμο που χρησιμοποιείται παρέχεται δωρεάν και δεν επηρεάζεται από τις διακυμάνσεις των αγορών ενέργειας. Ένα φωτοβολταϊκό πάνελ αποτελείται από πλήθος ηλιακών κελιών μέσα στα οποία εισέρχεται το ηλιακό φως και ύστερα από μια σειρά διεργασιών παράγεται ηλεκτρικό ρεύμα. Η απόδοση των ηλιακών κελιών εκφραζόμενη ως το ποσοστό της ηλιακής ενέργειας που μετατρέπεται σε ηλεκτρική, εξαρτάται από την τεχνολογία των υλικών που χρησιμοποιούνται (Δαμιανίδης et al., 2011).



Εικόνα 1: Βασική δομή ενός ηλιακού κελιού



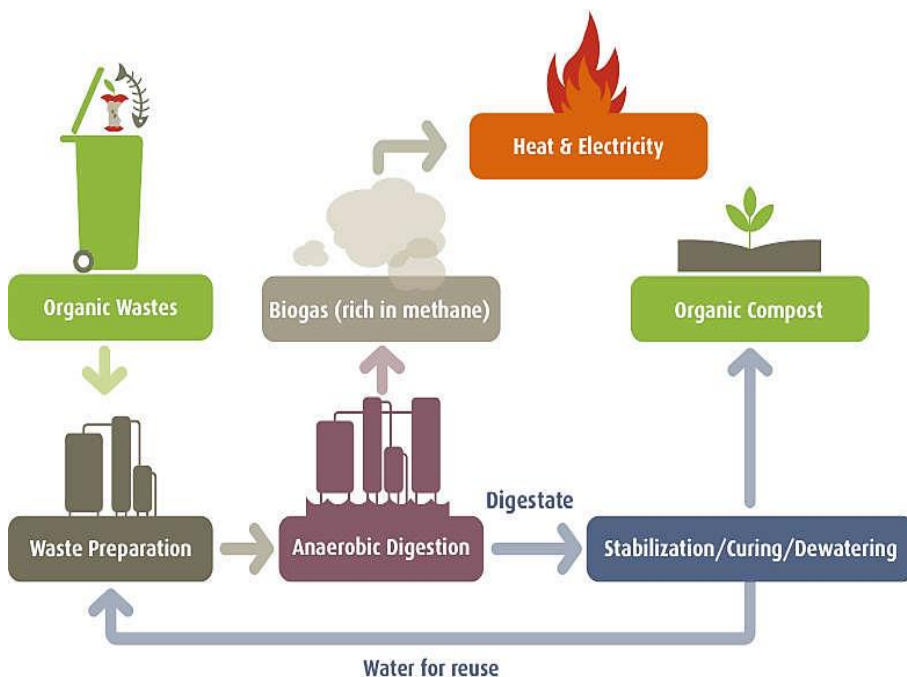
Εικόνα 2: Φωτοβολταϊκά πάνελ



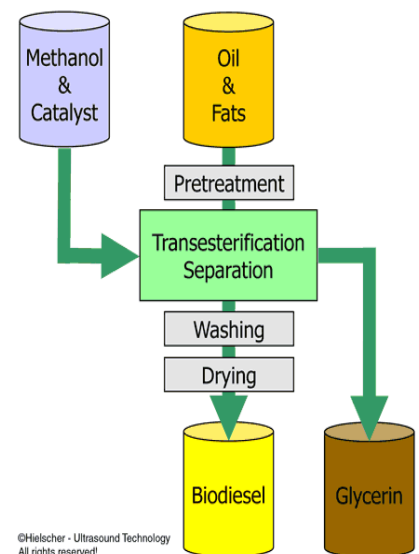
Εικόνα 3: Ηλιακή ακτινοβολία και ηλιακό δυναμικό στην Ελλάδα, 2016

➤ Βιομάζα

Σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/CE της Ευρωπαϊκής Ένωσης η βιομάζα είναι “το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα προϊόντων, αποβλήτων και καταλοίπων βιολογικής προέλευσης από τη γεωργία (συμπεριλαμβανομένων των φυτικών και των ζωικών ουσιών), τη δασοκομία και τους συναφείς κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αλιείας και της υδατοκαλλιέργειας, καθώς και το βιοαποικοδομήσιμο κλάσμα των βιομηχανικών αποβλήτων και των οικιακών απορριμμάτων” (Οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Απριλίου 2009, σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ, 2009). Αυτό σημαίνει ότι με την κατάλληλη επεξεργασία (πυρόλυση, αεριοποίηση, καύση) η συλλεχθείσα βιομάζα μπορεί να μετατραπεί σε διάφορες χρήσιμες μορφές όπως το οργανικό κομπόστ που προορίζεται για χρήση ως εδαφοβελτιωτικό, το βιοντίζελ η γλυκερίνη και άλλα (Riva et al., 2019).



Εικόνα 4: Αναερόβια χώνευση απορριμμάτων



Εικόνα 5: Διαδικασία παραγωγής βιοντίζελ και γλυκερίνης

➤ Υδροηλεκτρική ενέργεια

Η εκμετάλλευση των υδατοπτώσεων για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί τον απώτερο σκοπό ενός υδροηλεκτρικού έργου. Τα έργα ενός υδροηλεκτρικού εργοστασίου είναι το φράγμα, η υδροληψία, τα συστήματα προσαγωγής και απαγωγής του νερού και το κτήριο του υδροηλεκτρικού σταθμού. Ως ηλεκτρομηχανολογικός εξοπλισμός σε ένα υδροηλεκτρικό εργοστάσιο νοούνται οι υδροστρόβιλοι, οι ηλεκτρογεννήτριες, οι μετασχηματιστές, οι ανυψωτικές μηχανές, το σύστημα πεπιεσμένου ελαίου και αέρα καθώς και οι αυτοματισμοί για την ομαλή λειτουργία του έργου. Η υδραυλική ενέργεια που εμπεριέχεται στο νερό κατά την πτώση του από συγκεκριμένο ύψος θέτει σε κίνηση τον υδροστρόβιλο του έργου ο οποίος είναι συνδεδεμένος με μία ηλεκτρογεννήτρια. Αμέσως τίθεται και εκείνη σε κίνηση και ξεκινάει η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία αφού διέλθει από μετασχηματιστή εγχέεται στο συνδεδεμένο δίκτυο (Riva et al., 2019). Σχηματική περιγραφή της διαδικασίας μετατροπής της υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική παρουσιάζεται στην ακόλουθη εικόνα:



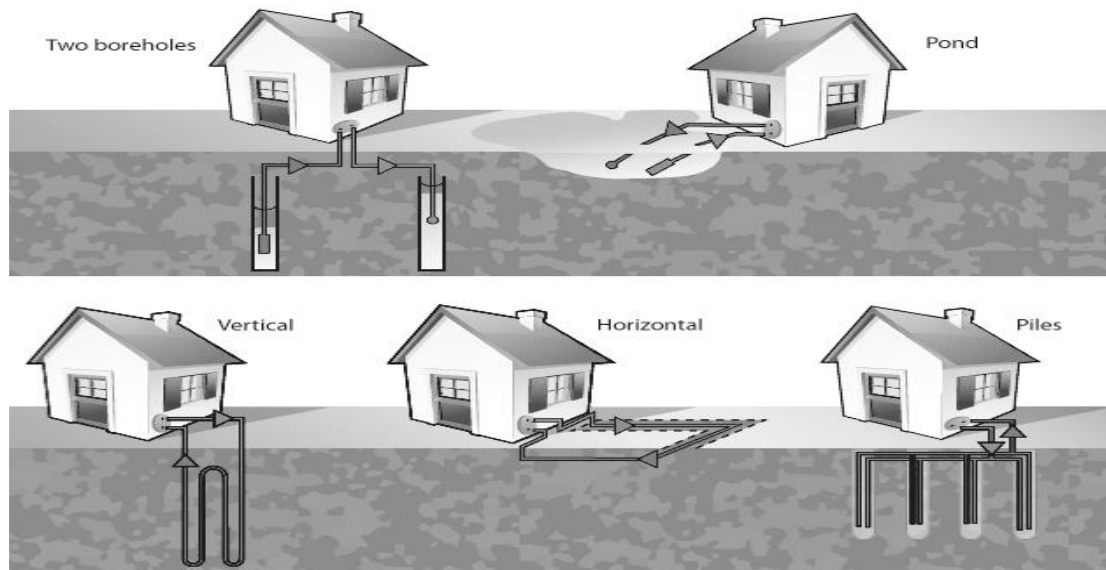
Εικόνα 6: Διαδικασία μετατροπής υδραυλικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια

➤ Γεωθερμία

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμική ενέργεια που είναι αποθηκευμένη στο υπέδαφος, συμπεριλαμβανομένων οποιοδήποτε υγρών, και η οποία είναι διαθέσιμη για εξόρυξη και μετατροπή σε ενεργειακά προϊόντα. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση κατοικιών, θερμοκηπίων, θέρμανση εδάφους καθώς και στη βιομηχανία για θέρμανση σε διεργασίες που την απαιτούν. Το 2016 η συνολική γεωθερμική ενέργεια που συλλέχθηκε ήταν της τάξης των 164,6 TWh. Η σχετική τεχνολογία εξελίσσεται διαρκώς επεκτείνοντας τις εφαρμογές της γεωθερμίας πέρα από τα ήδη

γνωστά όρια. Η χρήση της γης ως μια μεγάλη ενεργειακή αποθήκη είναι ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα της προαναφερθείσας εξέλιξης (Manzella, 2017).

Στην ακόλουθη εικόνα παρουσιάζεται η διάταξη 2 συστημάτων που χρησιμοποιούν τη γεωθερμία για θέρμανση αλλά και ψύξη. Στο πάνω μέρος της εικόνας παρουσιάζεται το ανοιχτό σύστημα αντλίας θερμότητας ενώ στο κάτω μέρος το κλειστό σύστημα:



Εικόνα 7: Ανοιχτό (επάνω) και κλειστό (κάτω) σύστημα αξιοποίησης γεωθερμικής ενέργειας για ψύξη/θέρμανση κατοικίας

➤ Μπλε ενέργεια

Η μπλε ενέργεια ή ενέργεια των ωκεανών διαχωρίζεται σε 4 κατηγορίες: Κυματική ενέργεια, ενέργεια λόγω της παλιρροιακής ροής, ενέργεια λόγω του παλιρροιακού εύρους και ωκεάνια θερμική ενέργεια (Hannon et al., 2016).

Η ενέργεια των κυμάτων αποτελείται από κινητική ενέργεια και δυναμική ενέργεια, το επίπεδο των οποίων είναι συνάρτηση του ύψους και της περιόδου των κυμάτων. Ελέγχοντας τα δύο αυτά είδη ενέργειας και χρησιμοποιώντας έναν ειδικό μετατροπέα κυματικής ενέργειας είναι δυνατή η παραγωγή ηλεκτρισμού (Hannon et al., 2016).

Η παλίρροια είναι αποτέλεσμα της σχετικής κίνησης της σελήνης και του ήλιου ως προς τη γη. Οι βαρυτικές δυνάμεις σε συνδυασμό με τη περιστροφή της γης γύρω από τον άξονά της προκαλούν περιοδική κίνηση των ωκεανών και των θαλασσών. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα την ύπαρξη είτε του φαινομένου της παλίρροιας είτε της άμπωτης. Μηχανήματα με παρόμοιο τρόπο λειτουργίας με

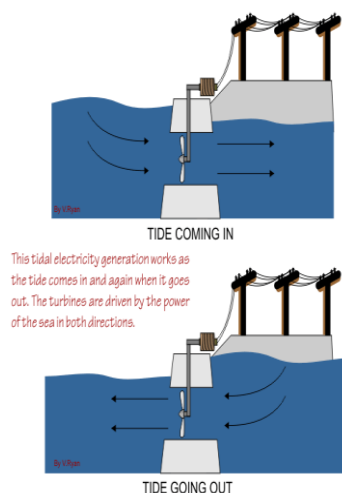
εκείνον των ανεμογεννητριών μετατρέπουν την κινητική ενέργεια των ωκεανών σε ηλεκτρισμό (European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport., 2015).

Το παλιρροιακό εύρος είναι η διαφορά του επιπέδου των ωκεανών/θαλασσών μεταξύ της υψηλής και της χαμηλής παλίρροιας. Στις περισσότερες παραθαλάσσιες περιοχές τα δύο είδη παλίρροιας εμφανίζονται 2 φορές τη μέρα ενώ σε κάποιες άλλες 1 φορά. Το φαινόμενο έχει μελετηθεί σε βάθος και πλέον είναι εύκολη η πρόβλεψή του, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα τον χαρακτηρισμό της ενέργειας που μπορεί να ανακτηθεί από το συγκεκριμένο φαινόμενο ως ‘σταθερή’ και ‘προβλέψιμη’ (Hannon et al., 2016).

Η ωκεάνια θερμική ενέργεια είναι η σπανιότερα ανακτώμενη μορφή μπλε ενέργειας, λόγω οικονομικών και τεχνικών περιορισμών. Είναι η ενέργεια που μεταφέρεται από τον ήλιο στα ανώτερα στρώματα της θάλασσας, μειούμενη όσο αυξάνεται το βάθος της θάλασσας (Hannon et al., 2016).



Εικόνα 8: Παλιρροιακές τουρμπίνες



Εικόνα 9: Παλιρροιακά φράγματα

➤ Ενέργεια από απόβλητα

Ενέργεια είναι δυνατό να ανακτηθεί από τα απόβλητα, αξιοποιώντας το θερμικό τους περιεχόμενο. Μέσω της θερμικής επεξεργασίας τους με τις ήδη γνωστές μεθόδους, οι οποίες εξελίσσονται συνεχώς βελτιώνοντας την αποδοτικότητά τους, εκλύουν θερμότητα που μπορεί να μετατραπεί σε ηλεκτρική ενέργεια. Έρευνες στην Αμερική έχουν δείξει ότι η καύση 1 τόνου δημοτικών στερεών αποβλήτων σε ένα σύγχρονο εργοστάσιο σκουπιδιών μπορεί να αποφέρει 600 kWh ηλεκτρικής

ενέργειας (Psomopoulos et al., 2009). Αυτό ισοδυναμεί με την αποφυγή εξόρυξης περίπου 250 χιλιάδων κιλών ορυκτών καυσίμων. Η θερμική επεξεργασία των αποβλήτων θεωρείται πως είναι η μοναδική εναλλακτική επιλογή έναντι της ταφής μη-ανακυκλώσιμων αποβλήτων. Κατά την αποσύνθεση των αποβλήτων έπειτα από την ταφή, παράγεται διοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο, το οποίο είναι ένα από τα ονομαζόμενα και ως ‘αέρια του θερμοκηπίου’. Τουλάχιστον το 25% του δεύτερου διαφεύγει στην ατμόσφαιρα, καθιστώντας την διαδικασία της ταφής των απορριμμάτων βασικό συντελεστή διαίωσισης του φαινομένου του θερμοκηπίου (Psomopoulos et al., 2009).

Η εξέλιξη της τεχνολογίας συντελεί στην βελτίωση της διεργασίας καύσης απορριμμάτων, εδραιώνοντάς την στη λίστα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και αναδεικνύει τον πράσινο χαρακτήρα της.

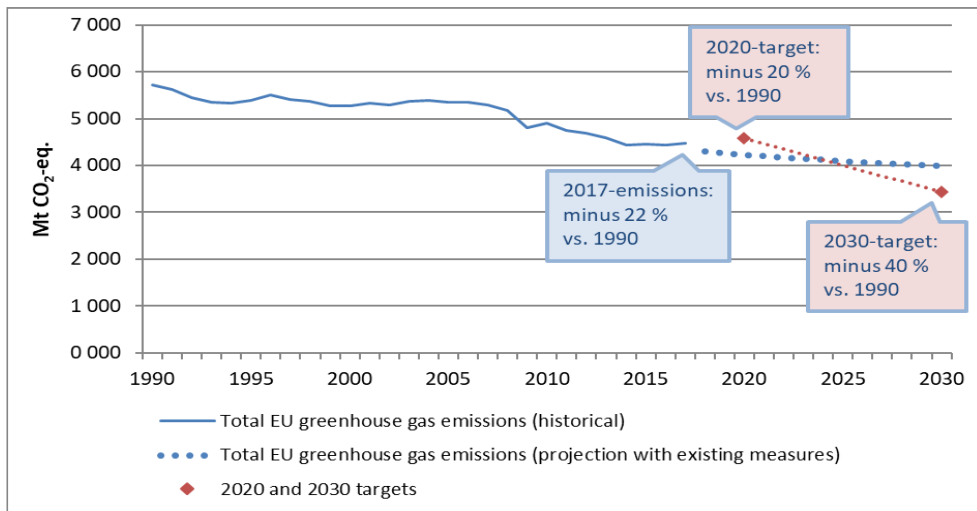
1.3 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ευρώπη

Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο έχουν ενταχθεί στο στρατηγικό σχεδιασμό της Ευρωπαϊκής Ένωσης –και όχι μόνο- για την αντιμετώπιση της κλιματικής αλλαγής. Με πρωταρχικό στόχο τη μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου, η Ευρωπαϊκή Ένωση έθεσε ορισμένους στόχους με χρονικό ορίζοντα πραγματοποίησής τους το 2020 (Amanatidis, 2019; ΥΠ.Ε.Κ.Α., 2020a):

- Μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου στην Ευρωπαϊκή Ένωση τουλάχιστον 20% κάτω από τα επίπεδα του 1990 σύμφωνα με την Οδηγία 2009/29/ΕΚ.
- Αύξηση του μεριδίου των Ανανεώσιμων Πηγών στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας στο 20% στο σύνολο των κρατών-μελών της Ευρωπαϊκής Ένωσης σύμφωνα με την Οδηγία 2009/28/ΕΚ.
- 20% εξοικονόμηση πρωτογενούς ενέργειας.

Εξαιτίας των ίδιων ποσοστών των τριών παραπάνω στόχων, οι τελευταίοι ονομάστηκαν χαρακτηριστικά ως στόχος «20-20-20».

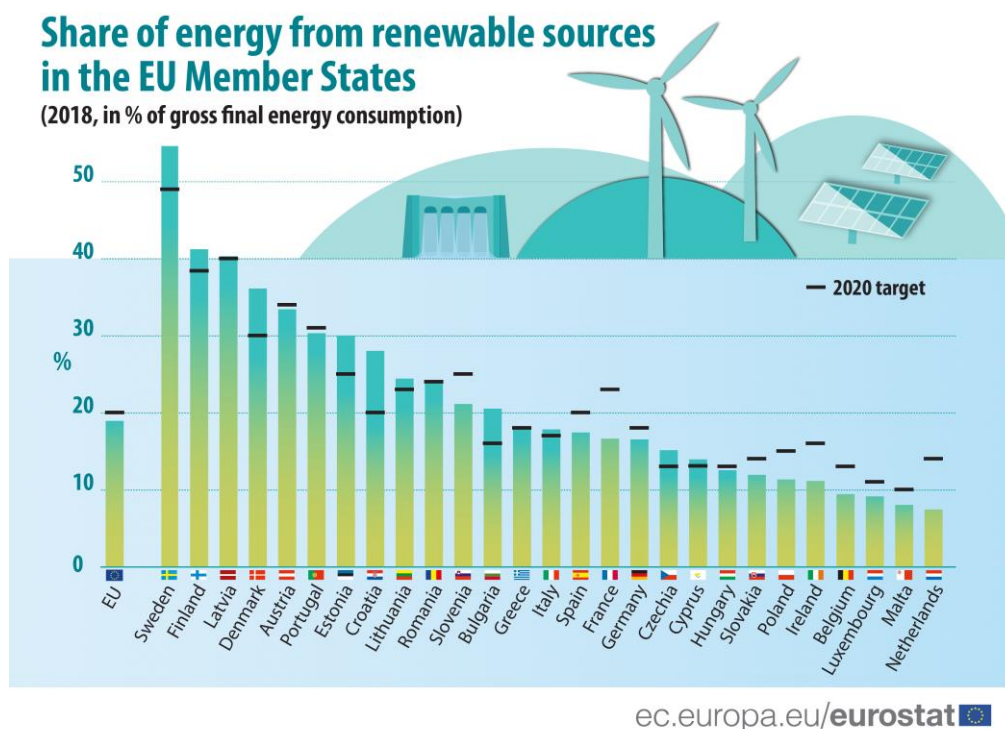
Στην ακόλουθη εικόνα φαίνονται οι ιστορικές τιμές των εκπομπών των αερίων θερμοκηπίου τα έτη 1990-2017, οι προβλέψεις για τα έτη 2018-2030 και οι στόχοι για τη μείωση των εκπομπών τους (Amanatidis, 2019).



Σχήμα 1: Ιστορικές τιμές εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, προβλέψεις, στόχοι μείωσης

Η μείωση των εκπομπών των αερίων του θερμοκηπίου εντός των συνόρων της Ευρωπαϊκής Ένωσης είναι εμφανής, όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Η μελλοντική πρόβλεψη, η οποία διακρίνεται με τις μπλε τελείες, δείχνει να πετυχαίνει με το παραπάνω το στόχο για το 2020, αντίθετα όμως δε συμβαδίζει με τον στόχο που έχει τεθεί για το 2030.

Σχετικά με το δεύτερο στόχο που τέθηκε από την Ευρωπαϊκή Ένωση, ο οποίος αναφέρεται στην αύξηση του μεριδίου ενέργειας από τις Ανανεώσιμες Πηγές, ο χρονικός ορίζοντας που τέθηκε (2020) φαίνεται πως ήταν περισσότερος από όσο χρειαζόταν. Πράγματι, το 20% το 2020 σχεδόν επιτεύχθηκε από το 2018, καθώς όπως φαίνεται από τα τελευταία στατιστικά δεδομένα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το 2018 το σύνολο των κρατών της Ένωσης άγγιξε το 18,9% (European Union, 2020).



Εικόνα 10: Μεριδίο ενέργειας ανά κράτος-μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης για το 2018

Την πρώτη θέση κατέχει η Σουηδία, με ποσοστό 54,6%, κάτι που σημαίνει ότι η μισή και παραπάνω ποσότητα ενέργειας που παράγεται στη χώρα προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές. Στη δεύτερη θέση βρίσκεται η Φινλανδία (41,2%) ενώ την πρώτη τετράδα της κατάταξης συμπληρώνουν η Λιθουανία (40,3%) και η Δανία (36,1%). Η Ελλάδα βρίσκεται στη 13^η θέση με ποσοστό 18%, γεγονός που σημαίνει ότι σαν χώρα πέτυχε το στόχο της ήδη από το 2018 (European Union, 2020).

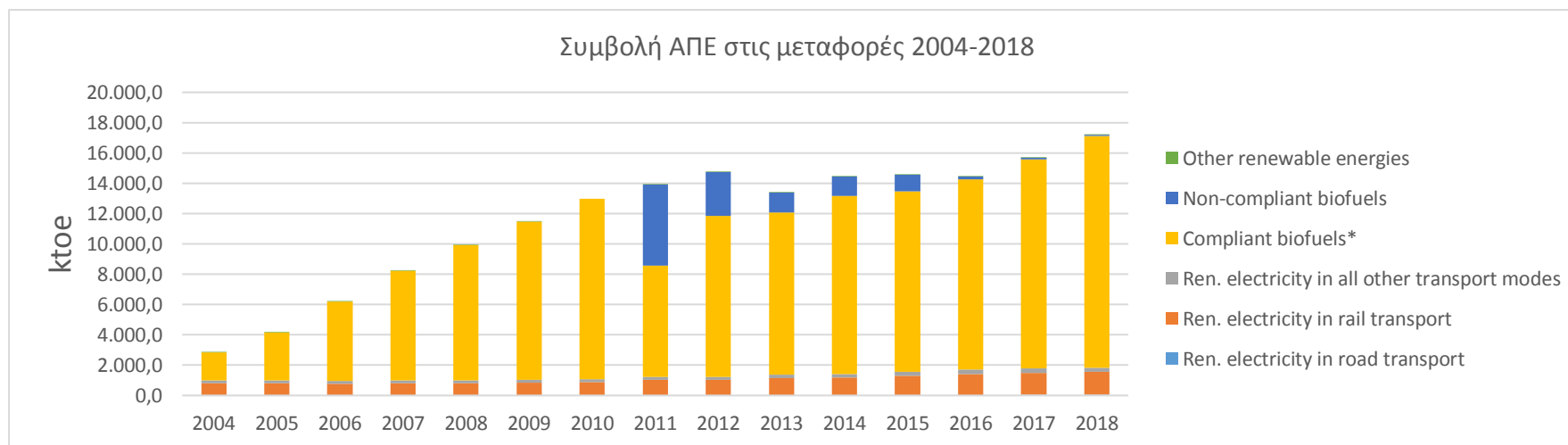
Εκτός από τα ποσοστά του μεριδίου ενέργειας μεταξύ των χωρών, διαφορές παρουσιάζονται και ως προς το είδος της ανανεώσιμης ενέργειας που χρησιμοποιεί η κάθε χώρα. Κατά τη διάρκεια της περιόδου 2008-2018 παρατηρήθηκε σημαντικότερη ανάπτυξη της αιολικής ενέργειας, της ηλιακής και της ενέργειας από βιοκαύσιμα. Το 2018 η Αιολική Ενέργεια χαρακτηρίστηκε ως η μεγαλύτερη ανανεώσιμη πηγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αντίθεση με την υδραυλική ενέργεια, η οποία κυμάνθηκε στα ίδια επίπεδα με την προηγούμενη δεκαετία, το σύνολο της αιολικής και της ηλιακής ενέργεια που παράχθηκαν το 2018 ήταν 2,9 και 15,5 φορές μεγαλύτερες, αντίστοιχα, από ότι το 2008. Ενδεικτικά αναφέρεται η τεράστια αύξηση της παραγόμενης ηλιακής ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση από 7,4 TWh το 2008 σε 115,0 TWh το 2018 (European Union, 2020).

Όπως εμφανίζεται και στα διαγράμματα που ακολουθούν (ktoe¹/έτος), υπάρχει σαφέστατη αύξηση της χρήσης Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας σε τομείς όπως η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, οι μεταφορές, η θέρμανση-ψύξη κτιρίων. Ειδικότερα, ιδιαίτερα αυξητική τάση παρουσιάζει η χρήση της αιολικής ενέργειας για την παραγωγή ηλεκτρισμού, με την ηλιακή ενέργεια να ακολουθεί αλλά σε χαμηλότερα επίπεδα. Στις μεταφορές τα βιοκαύσιμα δείχνουν να έχουν εδραιωθεί, ενώ στη θέρμανση κτιρίων οι αντλίες θερμότητας παρουσιάζουν μια αξιοπρόσεκτη αύξηση στη χρήση τους. Στο τελευταίο διάγραμμα, στο οποίο εμφανίζεται η ακαθάριστη κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ, φαίνεται πως μεταξύ παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, θέρμανσης-ψύξης και μεταφορών οι δύο πρώτες κατηγορίες καταναλώνουν τα μεγαλύτερα ποσά ενέργειας. Η κατανάλωση ενέργειας για θέρμανση-ψύξη είναι σημαντική αλλά σχετικά σταθερή τα τελευταία χρόνια. Αντίθετα, στην περίπτωση της κατανάλωσης ενέργειας για παραγωγή ηλεκτρισμού διαφαίνεται η αύξουσα πορεία των τελευταίων ετών (Eurostat, 2020).

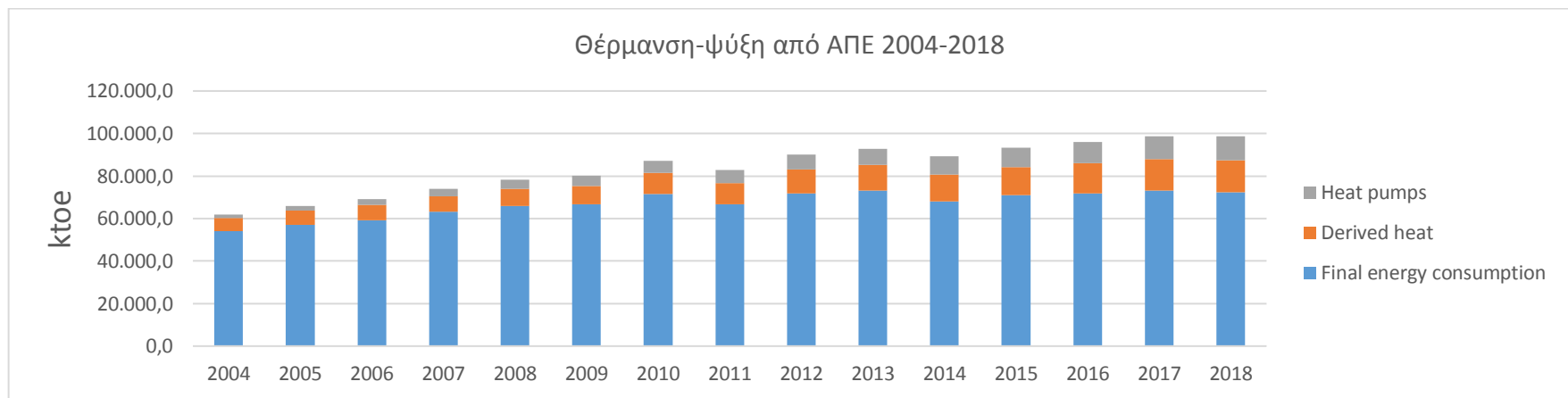
¹ Ktoe = τόνος ισοδύναμου πετρελαίου. Ισοδυναμεί με την ενέργεια που εκλύεται από την καύση ενός τόνου αργού πετρελαίου. 1 ktoe = 42 GJ = 11.630.000 kWh



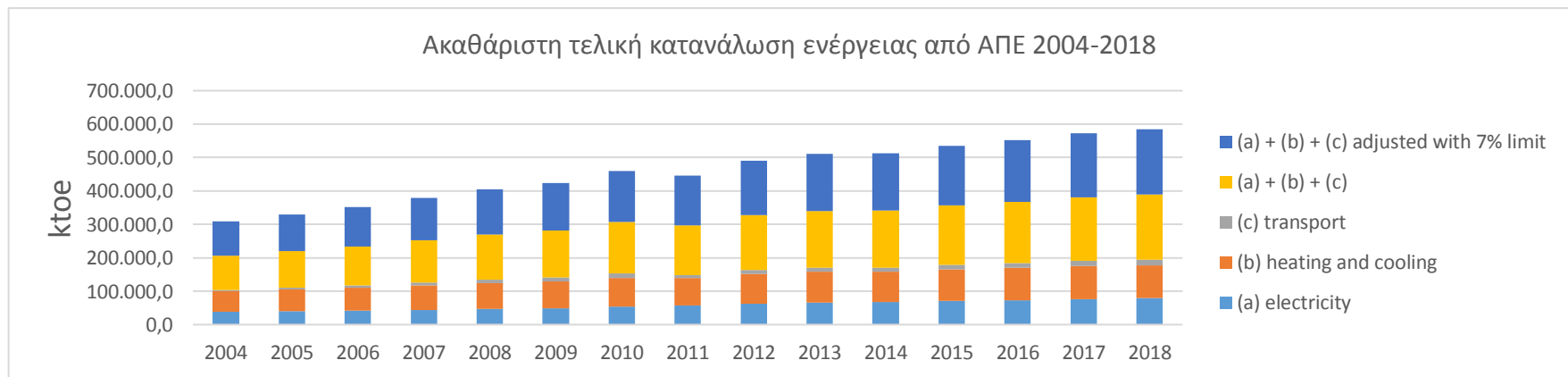
Σχήμα 2: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ (Πηγή: Eurostat)



Σχήμα 3: Συμβολή ΑΠΕ στις μεταφορές (Πηγή: Eurostat)



Σχήμα 4: Θέρμανση-ψύξη από ΑΠΕ (Πηγή: Eurostat)



Σχήμα 5: Ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ (Πηγή: Eurostat)

1.4 Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας στην Ελλάδα

Η ιστορία των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην Ελλάδα ξεκινάει από τη δεκαετία του 1920. Το 1928 συντάχθηκαν τα πρώτα άρθρα, σε τεχνικής φύσεως περιοδικά, σχετικά με την Αιολική Ενέργεια, βασισμένα στα αποτελέσματα ερευνών των Ανωτάτων Ιδρυμάτων της χώρας. Μεταπολεμικά, ως θέμα συζήτησης για πρώτη φορά, υπήρξε η αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το 1956 ιδρύθηκε η Ελληνική Εταιρεία Ηλιακής και Αιολικής Ενέργειας, αποτελούμενη από καθηγητές Πανεπιστημίων και άλλους επιστήμονες (Αγγελοπούλου, 2013). Τέσσερα χρόνια αργότερα, το 1960, δημοσιεύθηκε το πρώτο σχετικό άρθρο από τον καθηγητή ΕΜΠ Π. Σαντορίνη με τίτλο *“Περί της εν Ελλάδι χρησιμοποίησεως της ενέργειας πνοής ανέμου ως κινητηρίου δυνάμεως”*. Στο άρθρο προσδιορίστηκαν οι κατάλληλες περιοχές για εγκατάσταση αιολικών συστημάτων καθώς και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των προς εγκατάσταση σε αυτά μηχανών (Σαντορίνης, 1960).

Η πρώτη εγκατάσταση σταθμών μέτρησης αιολικού δυναμικού για ανάγκες παραγωγής αιολικού ηλεκτρισμού έγινε από τη ΔΕΗ σε συνεργασία με το Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο στα μέσα της δεκαετίας του 1970. Λίγο αργότερα, στις αρχές του 1980 και συγκεκριμένα το 1982, έλαβε χώρα η πρώτη δοκιμή λειτουργίας Αιολικού Πάρκου διεθνώς με τη συνεργασία της ΔΕΗ και της Γερμανικής εταιρείας M.A.N.. Το Αιολικό Πάρκο εγκαταστάθηκε στην Κύθνο και αποτελούνταν από 5 ανεμογεννήτριες των 20 kW η καθεμία. Ακολούθησαν αρκετές δοκιμές και προσπάθειες βελτίωσης των τεχνικών χαρακτηριστικών των ανεμογεννητριών με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητάς τους. Παράλληλα με τα Αιολικά Πάρκα, γινόταν και εγκατάσταση υβριδικών αιολικό-φωτοβολταϊκών συστημάτων για περαιτέρω μελέτη (Αγγελοπούλου, 2013).

Τη δεκαετία του 1990 το μονοπώλιο στην παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος κατείχε η ΔΕΗ, η οποία θέλοντας να καταστήσει τα νησιά ενεργειακά ανεξάρτητα, επιδόθηκε στην εγκατάσταση Αιολικών Πάρκων σε αυτά. Από το 1999 και ύστερα όμως, με την απελευθέρωση της ηλεκτρικής ενέργειας (Εφημερίς της Κυβερνήσεως, 1999), νέοι ανταγωνιστές εισήλθαν στον κλάδο, επιφέροντας σημαντικές αλλαγές στο μερίδιο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας.

Ακολουθώντας την τάση που επικράτησε τα τελευταία 12-15 έτη στην Ευρώπη, αυτή της έντονης διάχυσης των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Loumakis et al., 2019), η Ελλάδα παρουσίασε και εκείνη από τη μεριά της σημαντική πρόοδο στο συγκεκριμένο θέμα. Χαρακτηριστική είναι η διείσδυση των ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της χώρας.

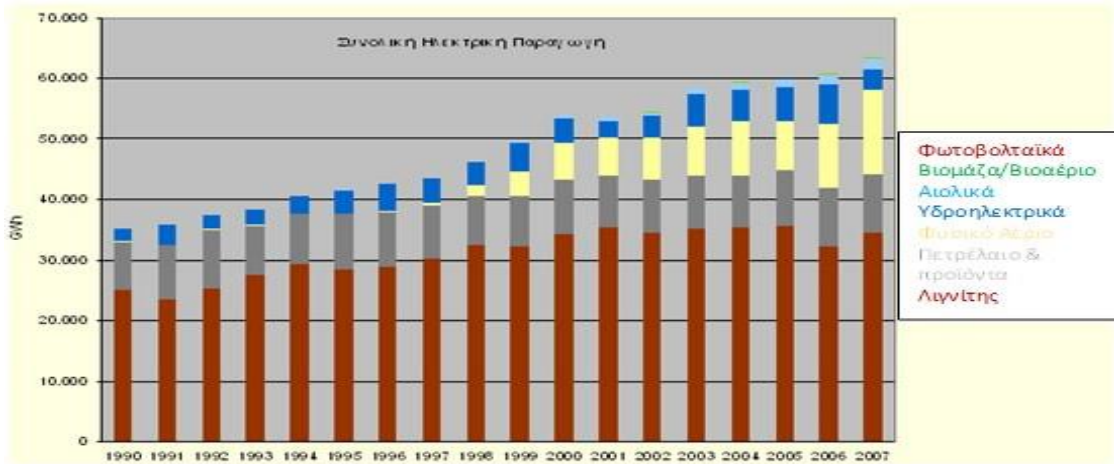


Εικόνα 11: Διείσδυση ΑΠΕ στο ενεργειακό ισοζύγιο της Ελλάδας 2010-2020

(πηγή: ΥΠ.Ε.Κ.Α.)

Στην Εικόνα 11 φαίνεται ξεκάθαρα η ανοδική τάση τόσο της διείσδυσης των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, όσο και στην παραγωγή θερμότητας καθώς και στην τελική κατανάλωση σύμφωνα με την Οδηγία 28/2009/EK. Η μεγαλύτερη άνοδος ανήκει στην ηλεκτροπαραγωγή, το ποσοστό της οποίας αγγίζει για το 2020 το 40%.

Κεντρικό στοιχείο της περαιτέρω διείσδυσης των ΑΠΕ στο ενεργειακό σύστημα της χώρας, αλλά και της βελτίωσης της ενεργειακής απόδοσης και της εξοικονόμησης ενέργειας, αποτελεί η άσκηση των κατάλληλων για το σκοπό αυτό πολιτικών και η υποστήριξη των σχετικών επενδυτικών πρωτοβουλιών. Η περαιτέρω προώθηση των ΑΠΕ, όπως διάφορες μελέτες καταδεικνύουν, μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην οικονομική ανάκαμψη, την κοινωνική και οικονομική συνοχή και την περιβαλλοντική προστασία (Biska & Stratigea, 2013).



Εικόνα 12: Συνολική Παραγόμενη Ηλεκτρική Ενέργεια στην Ελλάδα 1990-2007

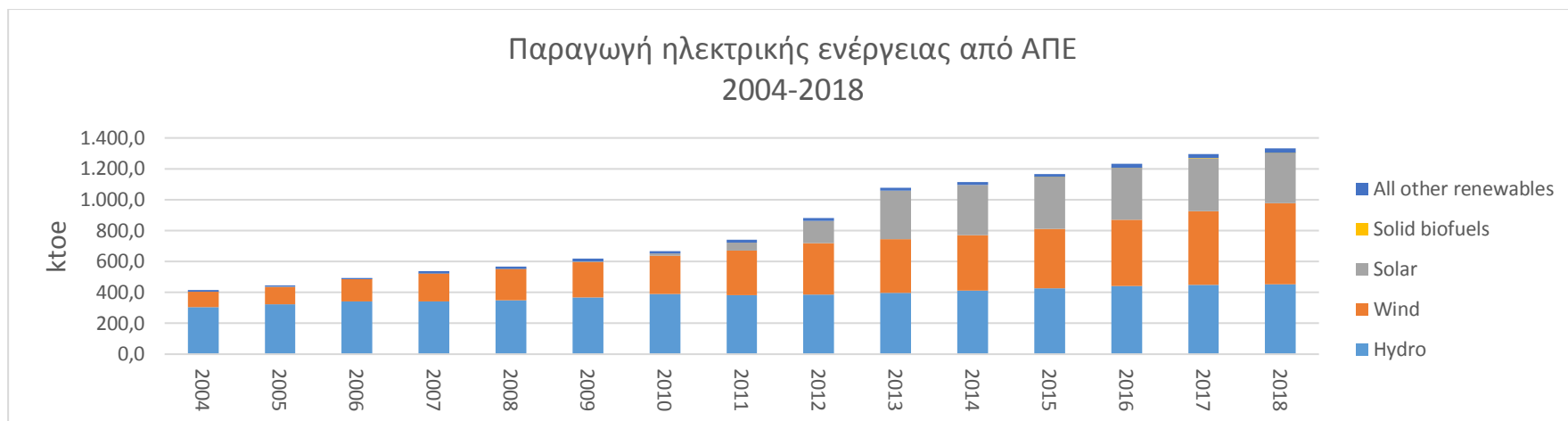
(πηγή: ΥΠ.Ε.Κ.Α.)

Παρατηρώντας το γράφημα της εξέλιξης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα για το χρονικό διάστημα από το 1990 μέχρι και το 2007, διαπιστώνονται τα εξής σημαντικά στοιχεία:

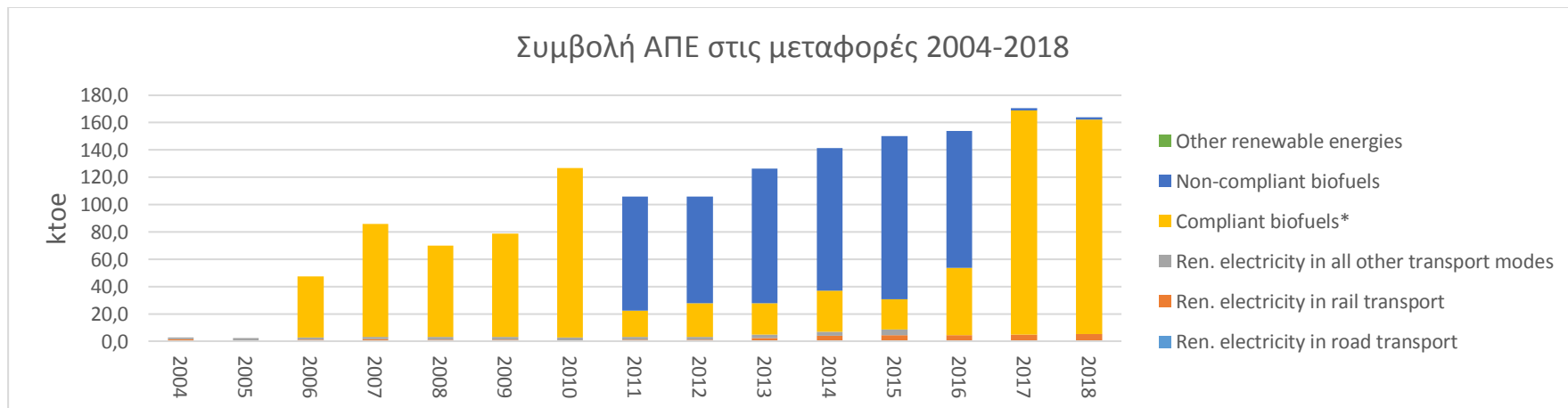
- Αυξανόμενη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με την πάροδο του χρόνου, η οποία απεικονίζει την οικονομική ανάπτυξη της εποχής αυτής και την αντανάκλασή της στην αυξανόμενη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας.
- Μεγάλο μερίδιο της ετήσιας παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη αλλά και ετήσια ποσοστιαία μείωση ως προς την ετήσια συνολική παραγωγή.
- Ετήσια παραγόμενη από πετρέλαιο Η/Ε, διατήρησή της σαν ποσότητα με την πάροδο του χρόνου και μείωσή της ως ποσοστού επί της ετήσιας παραγωγής με την πάροδο του χρόνου.
- Είσοδο του φυσικού αερίου στο μείγμα της παραγόμενης Η/Ε στην Ελλάδα και ετήσια σταδιακή αύξηση της παραγόμενης από αυτό Η/Ε λόγω της εγκατάστασης νέων Σταθμών Παραγωγής τεχνολογίας Φ/Α.
- Παραγόμενη από υδροηλεκτρικούς σταθμούς Η/Ε, με την διευκρίνιση ότι οι εμφανείς αυξομειώσεις απεικονίζουν τις ετήσιες βροχοπτώσεις των περιοχών εγκατάστασης των σταθμών.
- Βαθμιαία αύξηση της παραγόμενης από Ανανεώσιμες Πηγές Η/Ε τα τελευταία χρόνια και διείδυση των ΑΠΕ στην Ηλεκτροπαραγωγή (ΥΠ.Ε.Κ.Α., 2020b).

Τα παραπάνω συμπεράσματα επεκτείνονται με τη βοήθεια των παρακάτω διαγραμμάτων και στα επόμενα έτη, μέχρι το 2018 (Σχήματα 6-9) αλλά και το 2020 (Σχήμα 10). Πιο συγκεκριμένα, συνεχίζεται η αυξητική τάση του μεριδίου συμμετοχής, στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, της αιολικής ενέργειας, η περίπτωση της οποίας αναλύεται στη συνέχεια, καθώς και της ηλιακής ενέργειας. Το μερίδιο της υδροηλεκτρικής ενέργειας παραμένει υψηλό αλλά σχετικά στάσιμο. Τεράστια αλλαγή φαίνεται πως υπάρχει στη συμβολή των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στον κλάδο των μεταφορών, καθώς, όπως φαίνεται στο Σχήμα 7, ενώ το 2004 η συμβολή ήταν σχεδόν μηδενική, το 2017 έφτασε μέχρι τα 164,3 ktoe. Στο διάγραμμα του Σχήματος 8 φαίνεται η αυξητική τάση που έχει η χρήση των αντλιών θερμότητας στη θέρμανση-ψύξη των κτιρίων, με το διάγραμμα του Σχήματος 9 να επιβεβαιώνει την αυξητική τάση της κατανάλωσης ενέργειας από ΑΠΕ για ηλεκτροπαραγωγή (Eurostat, 2020).

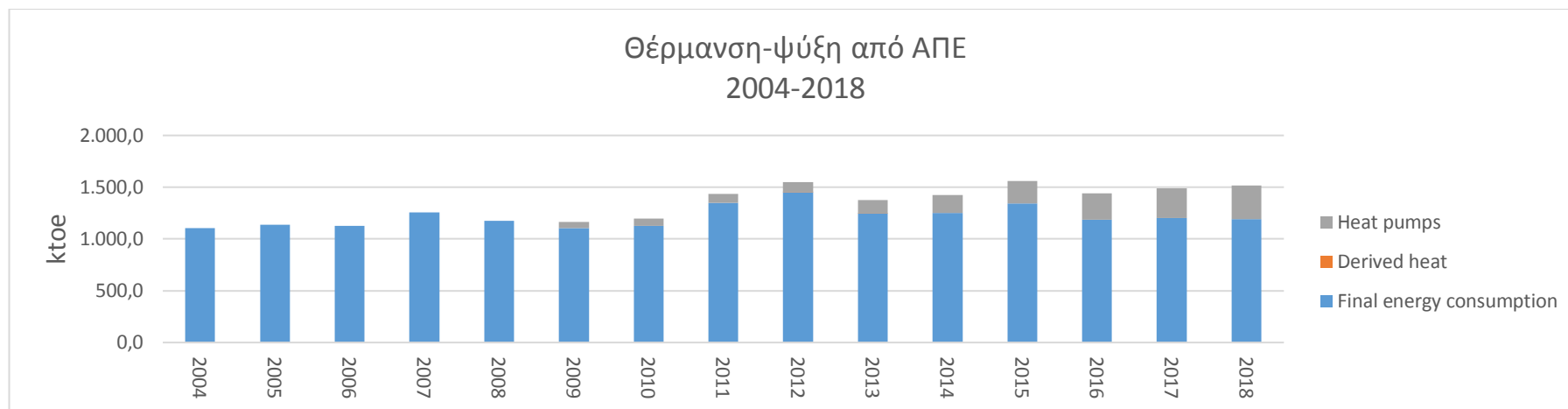
Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει την γεωγραφική κατανομή και την εξέλιξη της εγκατεστημένης ισχύος (MW) των μονάδων ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ στο διασυνδεδεμένο σύστημα όπως αυτές διαμορφώθηκαν το Σεπτέμβριο του 2020. Όσον αφορά τα Αιολικά Πάρκα, η Στερεά Ελλάδα πρωτοστατεί με την Αττική να ακολουθεί στη δεύτερη θέση. Η Εύβοια και η Ανατολική Μακεδονία - Θράκη έπονται ενώ μετά τη Δυτική Ελλάδα που βρίσκεται στην πέμπτη θέση οι υπόλοιπες περιοχές απέχουν αρκετά. Στους υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, την πρώτη θέση κατέχει η Κεντρική Μακεδονία, ακολουθούμενη από τη Δυτική Ελλάδα και την Ήπειρο με παρόμοια εγκατεστημένη ισχύ. Στον τομέα της βιομάζας, τρεις είναι οι περιοχές που ξεχωρίζουν και έχουν μεγάλη διαφορά από τις υπόλοιπες: Η Αττική που βρίσκεται στην πρώτη θέση, η Κεντρική Μακεδονία στη δεύτερη και η Θεσσαλία στην τρίτη. Στην κατηγορία της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας υψηλής απόδοσης (ΣΗΘΥΑ) η Ανατολική Μακεδονία-Θράκη βρίσκεται στην πρώτη θέση και ακολουθείται από την Αττική και την Κεντρική Μακεδονία. Τέλος, όσον αφορά τα εγκατεστημένα φωτοβολταϊκά συστήματα, η κατάσταση είναι πιο μοιρασμένη σε σχέση με τις παραπάνω περιπτώσεις. Παρ' όλα αυτά, στην πρώτη θέση με μικρή διαφορά βρίσκεται η Κεντρική Μακεδονία, στη δεύτερη η Ανατολική Μακεδονία - Θράκη με το Βόρειο Αιγαίο να συμπληρώνει την πρώτη τριάδα (Δ.Α.Π.Ε.Ε.Π., 2020).



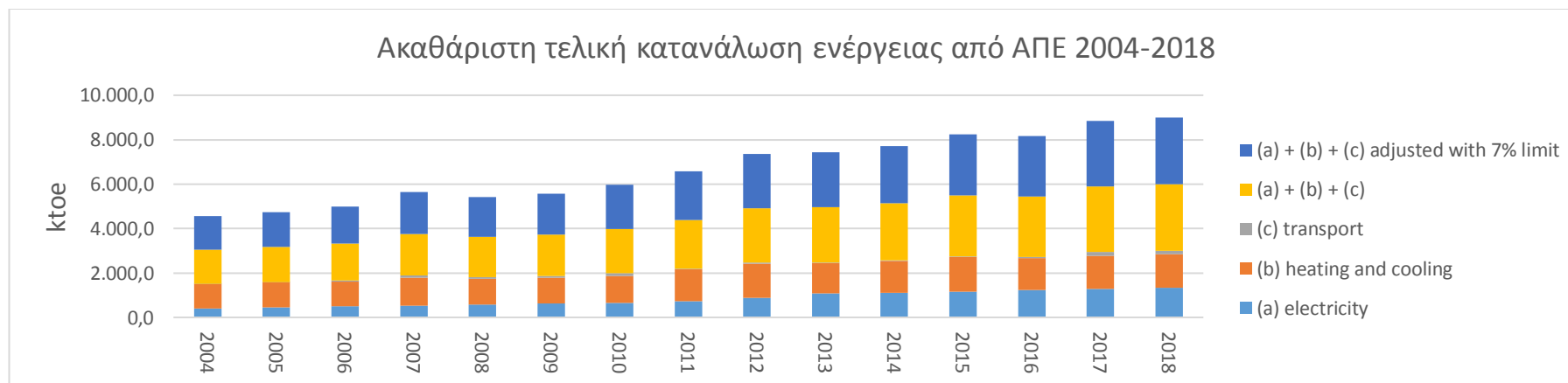
Σχήμα 6: Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ 2004-2018 (Πηγή: Eurostat)



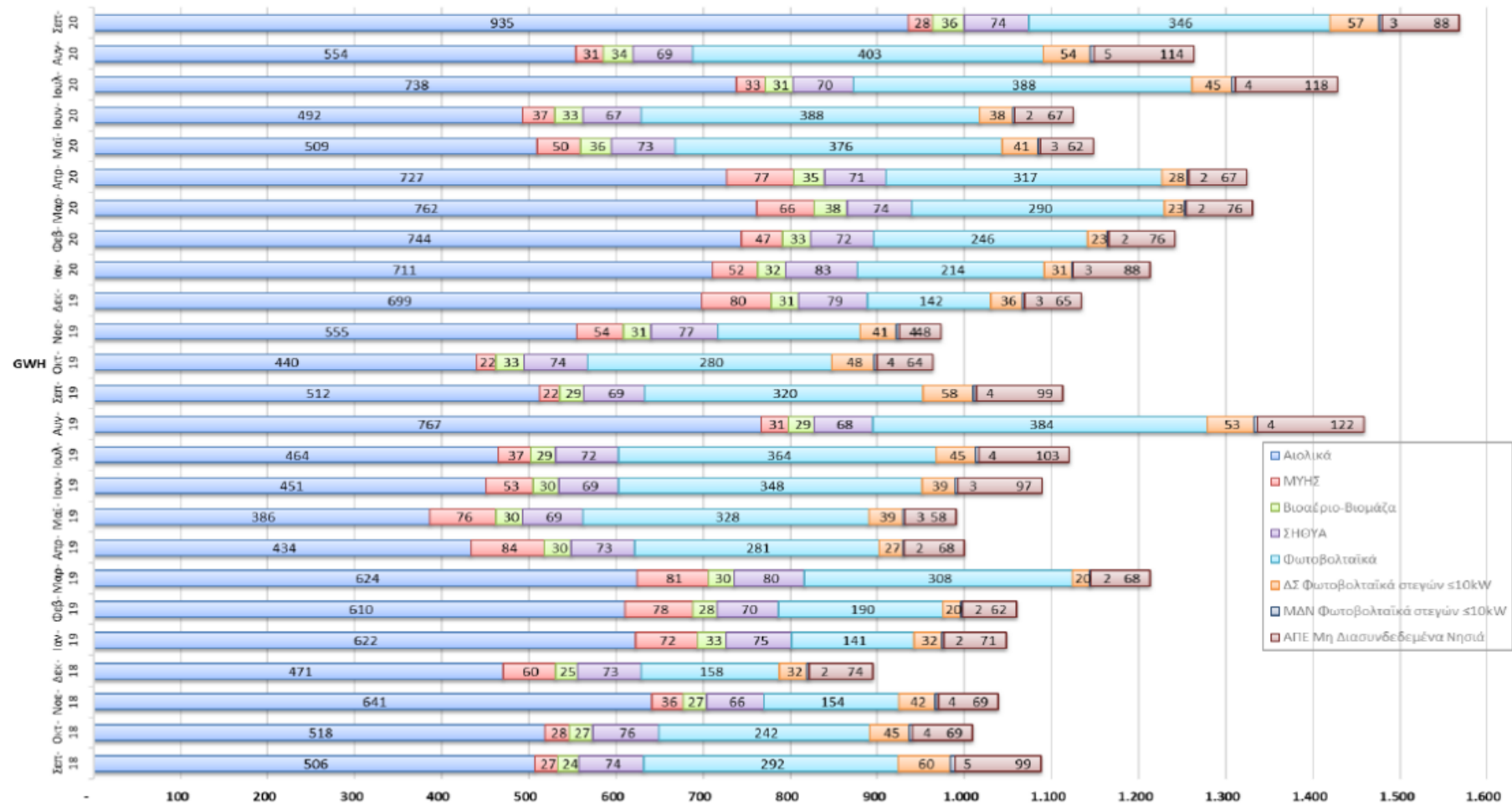
Σχήμα 7: Συμβολή ΑΠΕ στις μεταφορές 2004-2018 (Πηγή: Eurostat)



Σχήμα 8: Συμβολή ΑΠΕ σε θέρμανση-ψύξη κτιρίων 2004-2018 (Πηγή: Eurostat)



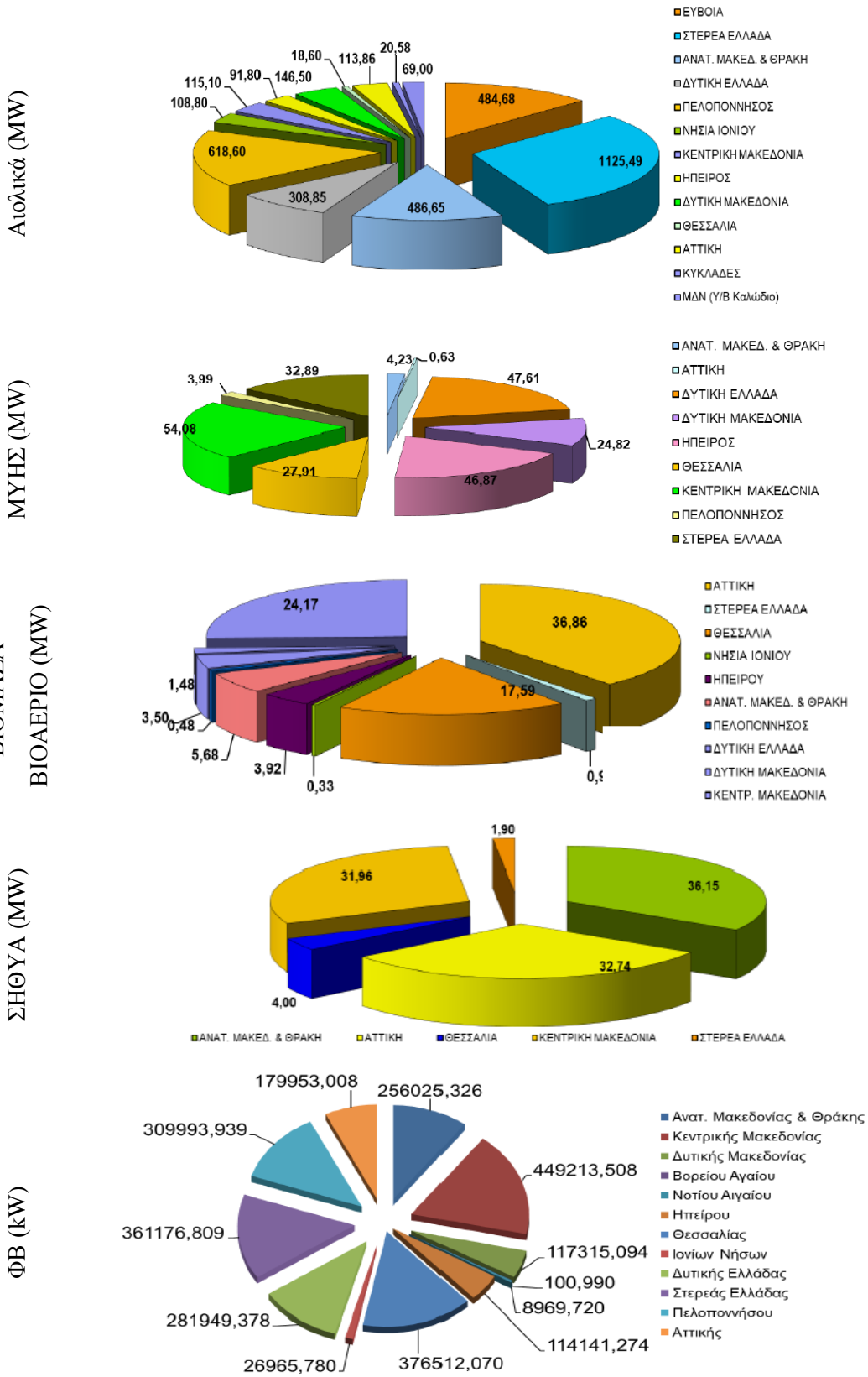
Σχήμα 9: Ακαθάριστη τελική κατανάλωση ενέργειας ΑΠΕ 2004-2018 (Πηγή: Eurostat)



Σχήμα 10: 2018-2020 Εθνική Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας (GWh) Μονάδων ΑΠΕ & ΣΗΘΥΑ (Άρθρα 9 & 10 Ν.3468/2006) & Φ/Β Στεγών <10 Kw (Πηγή: Δ.Α.Π.Ε.Ε.Π.)

Πίνακας 1: Γεωγραφική Κατανομή & Εξέλιξη Εγκατεστημένης Ισχύος (MW) Μονάδων ΑΠΕ και ΣΗΘΥΑ στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα περιόδου 2009-2020 (Άρθρο 9 Ν.3468/2006)

(Πηγή: Δ.Α.Π.Ε.Ε.Π.)



2 Αιολική Ενέργεια

2.1 Η εξέλιξη της αιολικής ενέργειας

Η παγκόσμια ανάπτυξη επέφερε σημαντικότερη αύξηση της κατανάλωσης ενέργειας κυρίως για δύο λόγους: Ο ένας είναι η αύξηση του πληθυσμού της γης ενώ ο δεύτερος είναι το γεγονός της πλειοψηφίας των ανθρώπων που ζει σε αναπτυσσόμενες χώρες. Ταυτόχρονα, η αύξηση του μέσου όρου ζωής των ανθρώπων επηρεάζει τα επίπεδα κατανάλωσης ενέργειας αυξάνοντάς τα. Για την ικανοποίηση των αυξανόμενων, εξαιτίας των παραπάνω λόγων, ενεργειακών αναγκών των ανθρώπων, υπήρξε αλόγιστη χρήση των συμβατικών καυσίμων από την αρχή της ανακάλυψής τους. Στην πορεία όμως, η ανθρωπότητα, ερχόμενη αντιμέτωπη με τον αρνητικό αντίκτυπο που είχε η υπέρμετρη αυτή χρήση των ορυκτών καυσίμων, αποφάσισε να στραφεί στα “πράσινα” καύσιμα, μεταξύ των οποίων η Αιολική Ενέργεια (Ngô & Natowitz, 2016).

Η Αιολική Ενέργεια ως ανεξάντλητη πηγή χρησιμοποιούνταν από αρχαιοτάτων χρόνων για την κάλυψη ανθρώπινων αναγκών. Η χρήση της ως κινητήρια δύναμη των ιστιοφόρων πλοίων για μεταφορά εμπορευμάτων ή για πολεμικούς σκοπούς και των ανεμόμυλων για την επεξεργασία των γεωργικών προϊόντων είναι δύο χαρακτηριστικές περιπτώσεις της διείσδυσης της αιολικής ενέργειας στις ανθρώπινες δραστηριότητες (Αντωνάκη, 2010). Δύο είναι οι χαρακτηριστικές περίοδοι-ορόσημα της αιολικής ενέργειας: Κατά τη διάρκεια της πρώτης (1700-1890) συνέβαλε στην εκβιομηχανοποίηση της Βόρειας Ευρώπης, ιδίως της Ολλανδίας, ενώ κατά τη δεύτερη, μετά την πετρελαϊκή κρίση του 1973, η ολοένα αυξανόμενη σημασία της στην παγκόσμια ανάπτυξη γίνεται αισθητή (Schaffarczyk, 2014).

2.2 Η εξέλιξη της Αιολικής Ενέργειας στην Ευρώπη

Το 1980 η Ευρωπαϊκή Ένωση μέσω των ερευνητικών της προγραμμάτων και των συνεδρίων έθεσε τις βάσεις υποστήριξης της αιολικής ενέργειας. Κατά τη διάρκεια αυτών των συνεδρίων, ιδρύθηκε η EWEA (European Wind Energy Association), ο παλιότερος και μεγαλύτερος οργανισμός για την Αιολική Ενέργεια, με περισσότερα από 700 μέλη (κατασκευαστές, προμηθευτές, ερευνητές) σε περισσότερες από 60 χώρες. Ευθύνη του οργανισμού απέναντι στην Ευρωπαϊκή

Ένωση αποτελεί η διαχείριση της “τεχνολογικής πλατφόρμας”, στο πλαίσιο της οποίας διεξάγονται συζητήσεις και προσδιορίζονται οι τεχνολογικές εξελίξεις και η βοήθεια που παρέχεται μέσω των ερευνητικών προγραμμάτων της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Schaffarczyk, 2014).

Την επόμενη δεκαετία ('90), εκδόθηκε το πρώτο “πράσινο” βιβλίο σχετικά με την Αιολική Ενέργεια, με βασικό συντελεστή τον Αρθούρο Ζερβό από το Πανεπιστήμιο Αθηνών, ο οποίος διετέλεσε πρόεδρος της EWEA για πολλά χρόνια όπως και της EREC (European Renewable Energy Council). Ακολούθησε ο στόχος “20-20-20” που τέθηκε στη συνεδρίαση του Βερολίνου το 2005. Οι συζητήσεις αλλά και οι διαφωνίες που υπήρξαν γύρω από τον προαναφερθέντα στόχο είχαν σαν αποτέλεσμα την απόφαση δημιουργίας ενός νέου εργαλείου για όλα τα κράτη-μέλη. Το εργαλείο αυτό ονομάστηκε «Εθνικό Σχέδιο Δράσης για την Ανανεώσιμη Ενέργεια» και έπρεπε να παρουσιαστεί μέχρι το φθινόπωρο του 2010, έχοντας ως περιεχόμενο τον τρόπο που επρόκειτο να επιτευχθεί ο στόχος του “20-20-20” σε εθνικό επίπεδο. Η παρουσίαση έγινε στο χρόνο που αποφασίστηκε από όλα τα κράτη-μέλη, δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο για πρώτη φορά ένα λεπτομερές πλαίσιο για την επέκταση και εδραίωση της ανανεώσιμης ενέργειας. Επίσης, η Αιολική Ενέργεια ανακηρύχθηκε παμπηφεί ως ο σημαντικότερος οδηγός στην προσπάθεια μείωσης των εκπομπών του CO₂ (Schaffarczyk, 2014).

2.3 Η κατάσταση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα

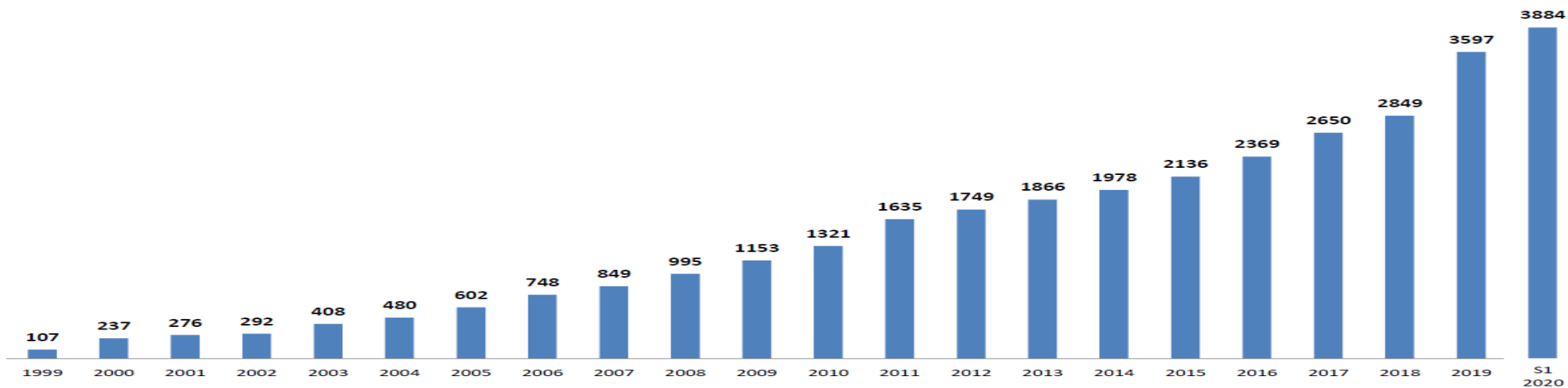
Η εξέλιξη στην εκμετάλλευση και αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας στην Ελλάδα τα τελευταία χρόνια είναι κάτι παραπάνω από εμφανής. Η συγκεκριμένη μορφή ενέργειας είναι η πλέον ταχύτατα αναπτυσσόμενη τα τελευταία χρόνια. Τα στοιχεία που δημοσιεύονται από την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας (ΕΛΕΤΑΕΝ) για το πρώτο εξάμηνο του 2020 είναι χαρακτηριστικά:

- Κατά το Α' εξάμηνο του 2020 συνδέθηκαν στο δίκτυο 110 νέες ανεμογεννήτριες συνολικής αποδιδόμενης ισχύος στο δίκτυο 287,3 MW, που ισοδυναμεί με αύξηση 8% σε σχέση με το τέλος του 2019.
- Στα τέλη του Ιουνίου 2020, το σύνολο των Αιολικών Πάρκων που βρισκόταν σε εμπορική ή δοκιμαστική λειτουργία ήταν 3883,9 MW.
- Η συνολική αποδιδόμενη ισχύς κατανέμεται ως εξής:

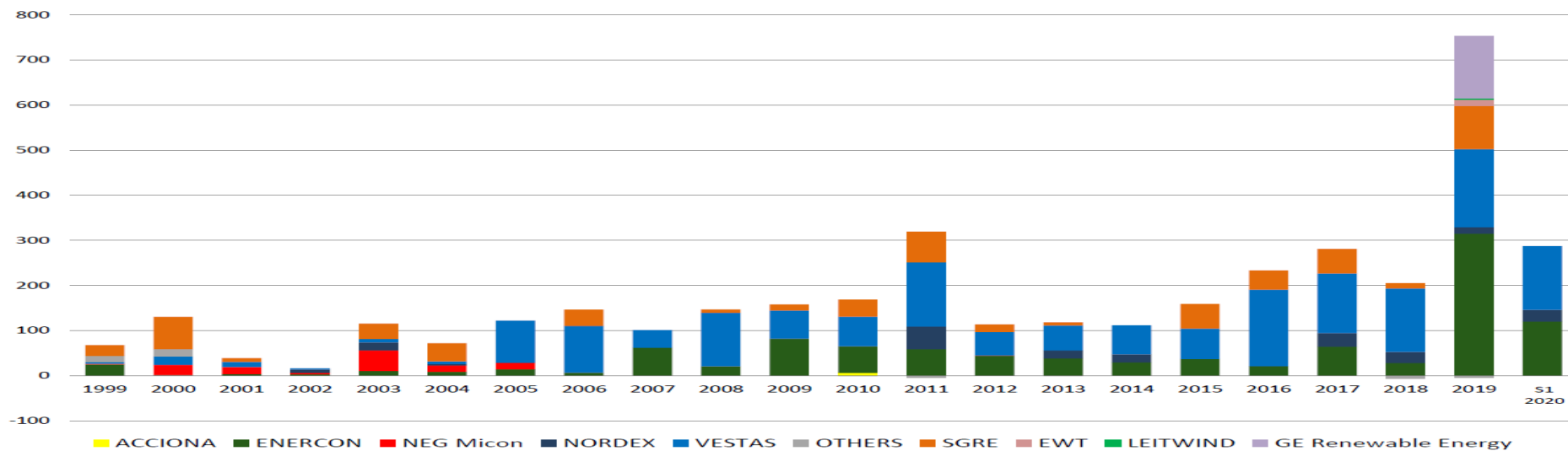
- Στα Μη Διασυνδεδεμένα Νησιά: 299,7 MW
- Στο Διασυνδεδεμένο Σύστημα: 3584,2 MW (μαζί με τα διασυνδεδεμένα νησιά)

Στο Σχήμα 11 σκιαγραφείται η κατάσταση που επικρατεί στην Ελλάδα σχετικά με την Αιολική Ενέργεια βάσει των πιο πρόσφατων στοιχείων. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται η πορεία της εγγεόμενης ισχύος στην Ελλάδα από το 1999 μέχρι το πρώτο εξάμηνο του 2020. Αρχική τιμή εγγεόμενης ενέργειας ήταν τα 107 MW το 1999 με την τωρινή κατάσταση να διαμορφώνει την συνολική εγγεόμενη ηλεκτρική ενέργεια στα 3884 MW. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ρυθμός ανάπτυξης του κλάδου για το Α' εξάμηνο του 2020 σε ετήσια βάση υπολείπεται της ανάπτυξης ρεκόρ που παρουσίασε το 2019, αλλά είναι υπερδιπλάσιος του 10ετούς μέσου όρου (ΕΛΕΤΑΕΝ, 2020).

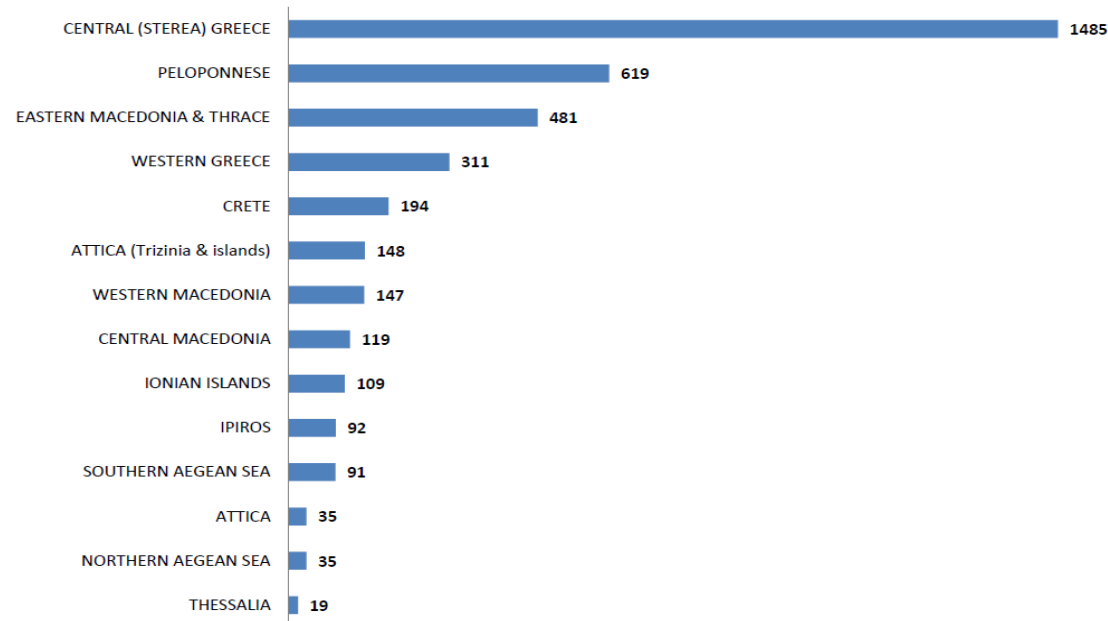
Στο Σχήμα 12 παρουσιάζονται τα μερίδια σε MW των κατασκευαστών ανεμογεννητριών στην Ελλάδα για το πρώτο εξάμηνο του έτους 2020: Η Vestas μαζί με την Enercon βρίσκονται στις πρώτες θέσεις με τη Nordex να έπεται. Το Σχήμα 13 καταδεικνύει τη μεγάλη απόσταση που έχουν οι τρεις πρώτες Περιφέρειες (Στερεά Ελλάδα, Πελοπόννησος, Ανατολική Μακεδονία-Θράκη) από τις υπόλοιπες ως προς την εγκατεστημένη ισχύ τους. Η Στερεά Ελλάδα παραμένει στην κορυφή των αιολικών εγκαταστάσεων αφού φιλοξενεί 1484,9 MW (38%), ακολουθούμενη από την Πελοπόννησο με 619,2 MW (16%) και την Ανατολική Μακεδονία-Θράκη με 481,2 MW (12%). Τέλος, στην Εικόνα 13 παρουσιάζεται μια γενική άποψη της χωρικής κατανομής της αιολικής δυναμικότητας της χώρας.



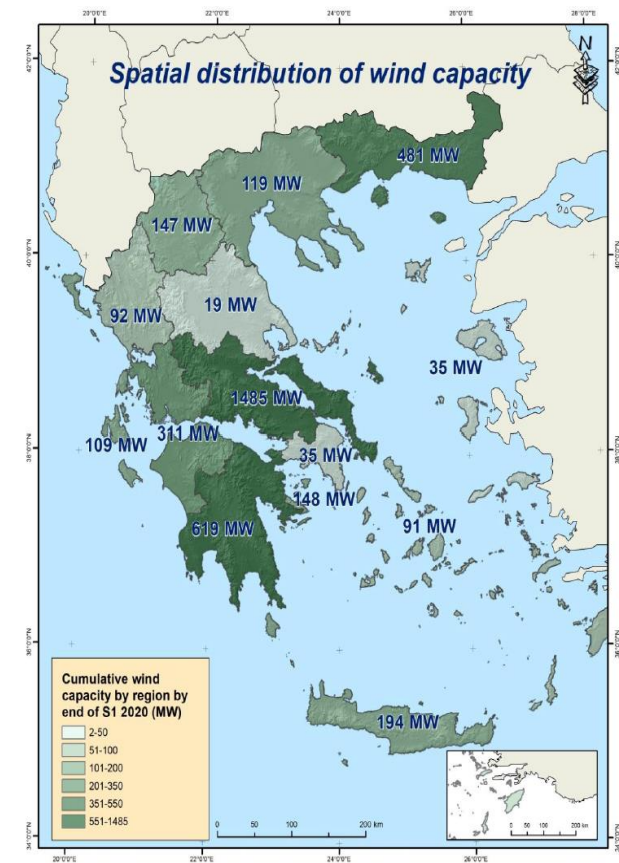
Σχήμα 11: Συνολική έγχυση στο δίκτυο (MW) ανά χρόνο (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ)



Σχήμα 12: Μεριδίο (MW) κατασκευαστών ανά έτος (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ)



Σχήμα 13: Κατανομή ανά Περιφέρεια της εγκατεστημένης ισχύος (MW) (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ)



Εικόνα 13: Χωρική κατανομή αιολικής δυναμικότητας (Πηγή: ΕΛΕΤΑΕΝ)

2.4 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Αιολικής Ενέργειας

Τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα της αιολικής ενέργειας παρουσιάζονται συνοπτικά στη συνέχεια:

Πλεονεκτήματα

- Πηγή καθαρής ενέργειας με σχετικά ασήμαντη επίδραση στο περιβάλλον και στα υπάρχοντα οικοσυστήματα κατά τη διάρκεια εγκατάστασης και λειτουργίας συγκριτικά με τα προσφερόμενα οφέλη (Χριστοφής, 2012).
- Ανεξαρτησία από ορυκτά καύσιμα: Απουσία αέριων ρύπων και περιβαλλοντικής επιβάρυνσης, παροχή προστασίας έναντι της αστάθειας τιμών των ορυκτών καυσίμων (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2010).
- Ωριμη τεχνολογικά, οικονομικά ανταγωνιστική, γρήγορη και τυποποιημένη συναρμολόγηση και εγκατάσταση εξοπλισμού (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2010; Παπαλαζαρίδου, 2009).
- Χαρακτηρισμός ανέμου ως ελεύθερη και ανεξάντλητη πηγή ενέργειας με αποτέλεσμα την εξοικονόμηση ορυκτών καυσίμων (Παπαλαζαρίδου, 2009).
- Συμβολή στην αποκέντρωση του ενεργειακού συστήματος μειώνοντας τις απώλειες μεταφοράς ενέργειας (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2010).
- Ενίσχυση ενεργειακής ανεξαρτησίας κάθε χώρας (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2010).
- Δημιουργία θέσεων εργασίας στην περιφέρεια (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2010).

Μειονεκτήματα

- Εκπεμπόμενος θόρυβος, που προέρχεται από τα περιστρεφόμενα μηχανικά τμήματα και από την περιστροφή των πτερυγίων (εκτιμάται σε περίπου 44 db σε απόσταση 200 m και για ταχύτητα ανέμου 8 m/s) (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2010).
- Οπτική όχληση, η οποία είναι κάτι υποκειμενικό (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2010; Χριστοφής, 2012).
- Επίδραση στις γεωργικές και κτηνοτροφικές δραστηριότητες. Μεγάλο ποσοστό της περιοχής στην οποία είναι εγκατεστημένο ένα Αιολικό Πάρκο είναι διαθέσιμο και για άλλες χρήσεις (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2010).

- Χωροθέτηση Αιολικών Πάρκων κοντά σε προστατευόμενες περιοχές. Έχουν σημειωθεί αρκετές περιπτώσεις θανάτων πτηνών έπειτα από πρόσκρουση σε ανεμογεννήτριες, κυρίως στην έλικα, για αυτό απαιτείται σωστή ορνιθολογική μελέτη της περιοχής που πρόκειται να εγκατασταθούν (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2010).
- Απρόβλεπτη διακύμανση ενέργειας που παράγεται από τις ανεμογεννήτριες εξαιτίας της μεταβαλλόμενης έντασης του ανέμου. Πηγή του συγκεκριμένου προβλήματος είναι η αδυναμία πρόβλεψης της ταχύτητας και της διεύθυνσης του ανέμου (Χριστοφής, 2012).
- Σχετικά υψηλό κόστος και μεγάλη χρονική διάρκεια έρευνας αιολικού δυναμικού (Μαμάσης & Κουτσογιάννης, 2010; Χριστοφής, 2012).
- Περιβαλλοντική επιβάρυνση από τη μεταφορά, εγκατάσταση και διάθεση των τμημάτων της ανεμογεννήτριας προς ανακύκλωση μετά το τέλος ζωής της, στάδια στα οποία δεν υπάρχει ενεργειακή αντιστάθμιση καθώς δεν παράγεται ενέργεια (Κλειάσου, 2016).

3 Περιγραφή Αιολικού Πάρκου

3.1 Γενική περιγραφή

Βασικό στοιχείο ενός Αιολικού Πάρκου είναι οι ανεμογεννήτριες. Με το ύψος του πυλώνα και τη διάμετρο της έλικας να ποικίλουν, το εύρος των διαστάσεων των “εργοστασίων” παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας του πάρκου είναι μεγάλο: Από τις ανεμογεννήτριες με ύψος 24 μέτρα και διάμετρο έλικας 15 μέτρα το 1980 μέχρι αυτές με ύψος 114 μέτρα και διάμετρο έλικας 124 μέτρα το 2005 (Ngô & Natowitz, 2016). Οι ανεμογεννήτριες συνδέονται μεταξύ τους με καλώδια, τα οποία μεταφέρουν την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια στο κέντρο ελέγχου του Αιολικού Πάρκου. Σε αυτό είναι εγκατεστημένα διάφορα συστήματα απαραίτητα για την εύρυθμη λειτουργία του πάρκου καθώς και για την εποπτεία του. Στη συνέχεια, μέσω ενός καλωδίου πλέον, η ηλεκτρική ενέργεια μεταφέρεται σε έναν υποσταθμό του διαχειριστή του δικτύου, στον οποίο αφού διέρχεται πρώτα από τον εγκατεστημένο μετασχηματιστή ανύψωσης τάσης, διαχέεται τελικά στο δίκτυο. Υπάρχει και η περίπτωση κατά την οποία οι ανεμογεννήτριες δεν συνδέονται στο δίκτυο αλλά παράγουν ρεύμα και τροφοδοτούν συγκεκριμένες εγκαταστάσεις μόνο (Χασικίδη, 2010).

Συνήθως κάθε Αιολικό Πάρκο διαθέτει ένα κέντρο ελέγχου. Εξαίρεση αποτελούν ορισμένες φορές όσα είναι σε πολύ κοντινή απόσταση μεταξύ τους. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει ένα κοινό κέντρο ελέγχου. Τόσο στον υποσταθμό όσο και στο κέντρο ελέγχου, εκτός από τα βασικά συστήματα ελέγχου και λειτουργίας ενός πάρκου, όπως ηλεκτρολογικοί πίνακες, μετρητές, υπολογιστές, είναι εγκατεστημένα και διάφορα βοηθητικά συστήματα όπως κλιματιστικά σώματα, συστήματα θέρμανσης, ασφαλείας και άλλα. Η εποπτεία γίνεται εξ αποστάσεως με εξαίρεση λίγες μόνο περιπτώσεις που το προσωπικό χρειάζεται να μεταβεί στις προαναφερθείσες εγκαταστάσεις, όπως ο τακτικός έλεγχος, ένα σήμα συναγερμού, κάποια έκτακτη κατάσταση.

3.2 Χερσαία Αιολικά Πάρκα

Τα χερσαία Αιολικά Πάρκα είναι εγκατεστημένα συνήθως σε κορυφογραμμές μεγάλου υψομέτρου με υψηλό αιολικό δυναμικό. Ωστόσο, υπάρχουν και αρκετές περιπτώσεις Αιολικών Πάρκων εγκατεστημένων και σε πεδινές περιοχές, όπου

γίνεται όσο το δυνατόν καλύτερη αξιοποίηση του αιολικού δυναμικού (Αντωνάκη, 2010). Σε κάθε περίπτωση, για την εγκατάσταση ενός πάρκου απαιτούνται μεγάλες εκτάσεις γης, καθώς οι ανεμογεννήτριες πρέπει να απέχουν αρκετά μέτρα μεταξύ τους αλλά και από το εγκατεστημένο κτίριο ελέγχου (Μπαρδάκης, 2018). Αποτελούν την πιο διαδεδομένη μορφή Αιολικών Πάρκων, καθώς η τεχνολογία τους έχει μελετηθεί διεξοδικά και χαρακτηρίζεται πολύ ώριμη και συμφέρουσα οικονομικά. Ωστόσο, οι προβληματισμοί και οι διαφωνίες σχετικά με την εγκατάστασή τους είναι συχνό φαινόμενο (Αντωνάκη, 2010).

Στους κινδύνους που πρέπει αρχικά να αναλυθούν και να αναζητηθούν πιθανές λύσεις προστίθενται οι κανονισμοί που διέπουν το εκάστοτε κράτος σχετικά με την εγκατάσταση Αιολικών Πάρκων. Κίνδυνοι στρατηγικού/επενδυτικού χαρακτήρα, διαχείρισης λειτουργίας, κίνδυνοι σχετιζόμενοι με την αγορά του κλάδου καθώς και πολιτικού, κοινωνικού, νομικού χαρακτήρα είναι ορισμένες περιπτώσεις που πρέπει να διερευνηθούν όσο το δυνατόν νωρίτερα (Gatzert & Kosub, 2016). Όσον αφορά τους κανονισμούς, ενδεικτικά αναφέρεται ο αποκλεισμός εγκατάστασης σε περιοχές σημαντικού περιβαλλοντικού ενδιαφέροντος όπως οι περιοχές Natura, σε κατοικημένες ή γύρω περιοχές, σε ακτές, σε περιοχές με εγκατεστημένα λατομεία και επιφανειακές μεταλλευτικές-εξορυκτικές ζώνες (Τριανταφυλλίδης, 2018).



Εικόνα 14: Χερσαίο Αιολικό Πάρκο σε κορυφογραμμή

3.3 Υπεράκτια Αιολικά Πάρκα

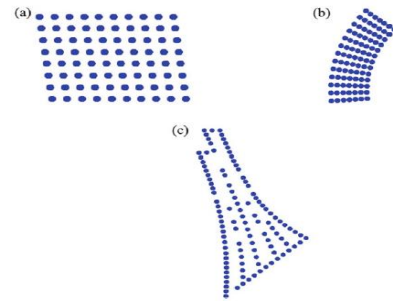
Τα υπεράκτια Αιολικά Πάρκα βρίσκονται εγκατεστημένα εντός της θάλασσας σε μεγάλη απόσταση από την ακτή. Αποτελούν εξέλιξη των τελευταίων ετών στον τομέα της αιολικής ενέργειας και ειδικότερα στο μείζον θέμα της χωροθέτησης (Αντωνάκη, 2010). Η αρχή έγινε με το πρώτο υπεράκτιο Αιολικό Πάρκο να κατασκευάζεται στην Δανία το 1991 και συγκεκριμένα στη Βαλτική θάλασσα, όπου το βάθος είναι σχετικά μικρό (Ngô & Natowitz, 2016). Το παράδειγμα της Δανίας ακολούθησαν και άλλες χώρες με πολύ θετικά αποτελέσματα.

Από τεχνικής πλευράς, τα υπεράκτια Αιολικά Πάρκα υπερισχύουν έναντι των χερσαίων ως προς τα χαρακτηριστικά του ανέμου. Έχει βρεθεί ότι ο άνεμος πάνω από τη θάλασσα χαρακτηρίζεται από υψηλότερες ταχύτητες αλλά και από απουσία τυρβώδους ροής, γεγονός που ευνοεί εξαιρετικά τη λειτουργία τους. Στον αντίποδα, η απαίτηση μεγαλύτερων κεφαλαίων για την εγκατάσταση υπεράκτιων πάρκων, εξαιτίας της ανάγκης αντιμετώπισης των κυμάτων, ο μεγαλύτερος κίνδυνος δημιουργίας τεχνικών προβλημάτων που οφείλονται σε καιρικά φαινόμενα, τα οποία είναι πολύ πιο έντονα στη θάλασσα από ότι στη στεριά, καθώς και η πολύ ακριβή ηλεκτρική σύνδεση με το δίκτυο αποτελούν σημαντικά εμπόδια κατά την εγκατάσταση και λειτουργία των εν λόγω είδους πάρκων (Ngô & Natowitz, 2016).

Ιδιαίτερη βαρύτητα δίδεται κατά τον σχεδιασμό της χωροθέτησης των υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων. Η αρχική διάταξη που επιλεγόταν, όλες οι ανεμογεννήτριες τοποθετημένες σε ίσες αποστάσεις μεταξύ τους σχηματίζοντας ένα τετράγωνο, ξεπεράστηκε με νέες διατάξεις να την αντικαθιστούν όπως η μορφή “βεντάλιας” ή η μορφή “επικεντρωμένη στην περίμετρο” να αποτελούν τα βασικότερα παραδείγματα (Εικόνα 16). Βασική αιτία της εξέλιξης στη μορφή αποτέλεσε, εκτός από την βέλτιστη εκμετάλλευση του ανέμου, η ανάγκη για ορθή αντιμετώπιση των κυμάτων της θάλασσας, με σκοπό την αποφυγή προβλημάτων (Giebel & Hasager, 2016).



Εικόνα 15: Υπεράκτιο Αιολικό Πάρκο

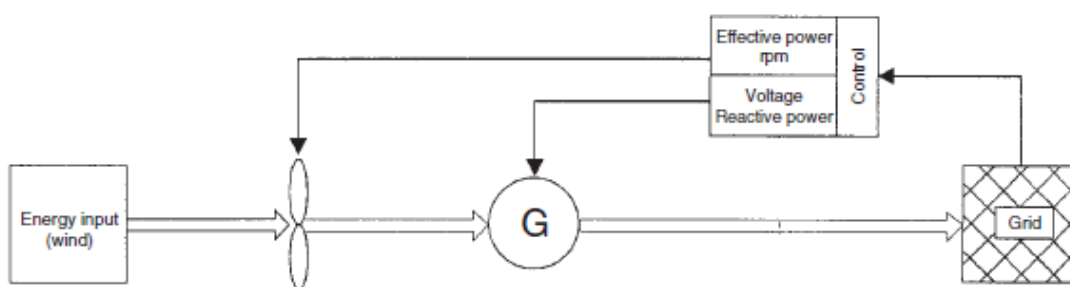


Εικόνα 16: Μορφές χωροθέτησης υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων (Giebel & Hasager, 2016)

4 Ανεμογεννήτριες

4.1 Κατηγορίες ανεμογεννητριών

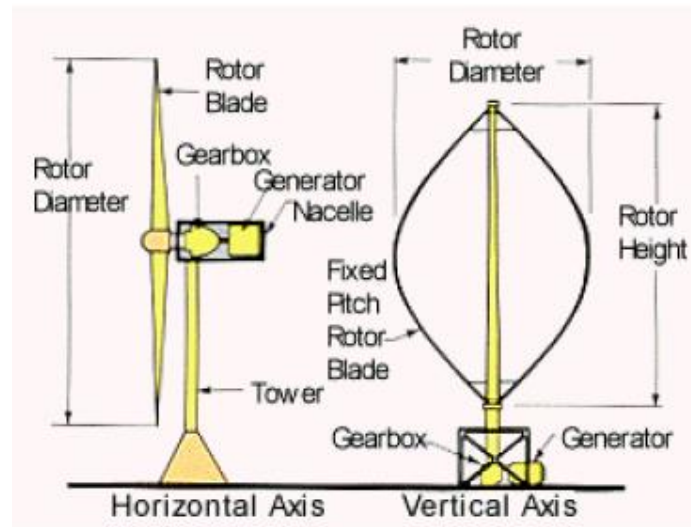
Όπως προαναφέρθηκε, οι ανεμογεννήτριες χωρίζονται σε δύο κατηγορίες: Οριζόντιου άξονα και κατακόρυφου άξονα. Η πορεία που ακολουθεί η Αιολική Ενέργεια για να μετατραπεί σε ηλεκτρική είναι κοινή για τους δύο τύπους. Η Αιολική Ενέργεια προκαλεί την περιστροφική κίνηση της έλικας που είναι ενσωματωμένη στην ανεμογεννήτρια. Εκείνη με τη σειρά της θέτει σε κίνηση την επίσης εγκατεστημένη εντός του κουβουκλίου στην κορυφή της μηχανής γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος. Στη συνέχεια, το παραγόμενο ρεύμα αφού διέλθει από κατάλληλες διατάξεις εγχέεται στο συνδεδεμένο δίκτυο. Στην Εικόνα 17 που ακολουθεί φαίνεται η προαναφερθείσα πορεία.



Εικόνα 17: Πορεία μετατροπής αιολικής ενέργειας σε ηλεκτρική (Πηγή: “Wind Energy Power Plants,” 2014)

Βάσει του διαχωρισμού των ανεμογεννητριών στις δύο επιμέρους κατηγορίες, παρατηρούνται ορισμένες διαφορές. Οι ανεμογεννήτριες κάθετου άξονα προσαρμόζονται αυτόματα στην κατεύθυνση του ανέμου κάθε στιγμή, αντίθετα με όσες έχουν οριζόντιο άξονα. Οι τελευταίες απαιτούν την ύπαρξη ειδικών μηχανισμών

προσανατολισμού στη διεύθυνση του ανέμου. Επιπρόσθετα, το κόστος κατασκευής των ανεμογεννητριών οριζόντιου άξονα, λόγω πιο απλού σχεδιασμού, είναι χαμηλότερο ενώ όσον αφορά την απόδοση, έρχονται πρώτες καταγράφοντας υψηλότερες τιμές αποδόσεων συγκριτικά με τις ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα. Τέλος, λόγω των χαμηλότερων στροφών ανά λεπτό, οι ανεμογεννήτριες κατακόρυφου άξονα χρειάζονται ισχυρότερους ανέμους για να ξεκινήσουν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Πάχυ, 2012).



Εικόνα 18: Τύποι ανεμογεννητριών

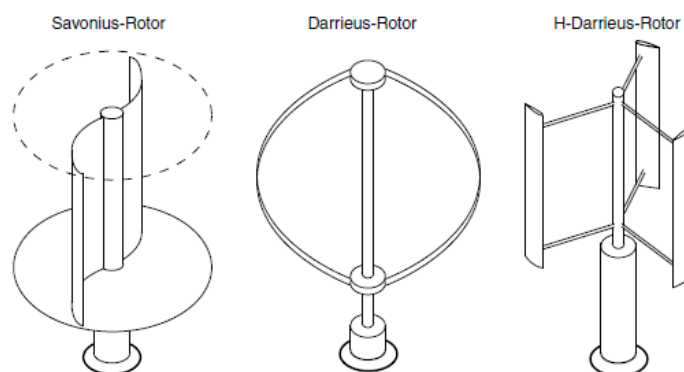
Ο τύπος που έχει επικρατήσει είναι αυτός του οριζόντιου άξονα με τρία πτερύγια, εξαιτίας της μικρής απαίτησής του σε μεγάλες ταχύτητες ανέμου για επίτευξη μεγάλων τιμών απόδοσης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ορισμένα χαρακτηριστικά του εν λόγω τύπου, καθώς και του έτερου τύπου ανεμογεννητριών που αναφέρθηκε.

4.1.1 Ανεμογεννήτριες Κατακόρυφου Άξονα

Το μεγάλο πλεονέκτημα των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι η ικανότητά τους να εκμεταλλεύονται τον άνεμο από τις κατευθύνσεις, παρουσιάζοντας ταυτόχρονα άμεση απόκριση στις αλλαγές της κατεύθυνσής του. Η θέση εγκατάστασης της γεννήτριας και των υπολοίπων μηχανισμών είναι κοντά στο έδαφος, γεγονός που καθιστά εύκολη τη διαδικασία συντήρησής τους. Στον αντίποδα, ένα βασικό τους μειονέκτημα είναι η ανάγκη υποβοήθησής τους κατά την εκκίνηση και ο κίνδυνος σημαντικής βλάβης σε καταστάσεις με δυνατούς ανέμους. Επίσης, ο

δρομέας τους βρίσκεται κοντά στο έδαφος όπου επικρατούν πιο χαμηλές ταχύτητες ανέμου σε σχέση με την κορυφή της κατασκευής, όπου είναι εγκατεστημένος ο δρομέας των ανεμογεννητριών οριζοντίου άξονα, εκμεταλλεύόμενος τις υψηλές ταχύτητες που αναπτύσσονται σε αυτό το ύψος. Αναφορικά με την απόδοσή τους, παρουσιάζουν σημαντικά μικρότερες τιμές συγκριτικά με τις ανεμογεννήτριες του άλλου τύπου (Πάχου, 2012).

Οι τύποι των ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα είναι τρεις: Savonius, Darrieus, H-Darrieus (Εικόνα 19) (Schaffarczyk, 2014).



Εικόνα 19: Τύποι ανεμογεννητριών κατακόρυφου άξονα (Πηγή: Schaffarczyk, 2014)

4.1.2 Ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα

Είναι ο τύπος ανεμογεννητριών που συναντιέται συχνότερα παγκοσμίως. Ο ρότορας και η ηλεκτρογεννήτρια είναι εγκατεστημένα στην κορυφή του πύργου, μαζί με διάφορα βοηθητικά συστήματα. Στη βάση της ανεμογεννήτριας βρίσκονται εγκατεστημένοι ηλεκτρολογικοί πίνακες ελέγχου καθώς και ειδικά διαμορφωμένος ανελκυστήρας για τη μεταφορά του προσωπικού, που είναι υπεύθυνο για τη συντήρηση, στην κορυφή της ανεμογεννήτριας.

Ο αριθμός των πτερυγίων τους ποικίλει: Μπορεί να έχουν ένα πτερύγιο, δύο, τρία κλπ. Ανάλογα με το αν ο άνεμος συναντά πρώτα τον δρομέα ή τον θάλαμο της γεννήτριας μπορούν να διακριθούν σε ανεμογεννήτριες ανάντι (upwind) και κατάντι (downwind) της ροής, αντίστοιχα. Σχετικά με τα πτερύγια από τα οποία αποτελούνται, το πλάτος τους τα τελευταία χρόνια έχει μειωθεί με σκοπό την ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας λόγω ιξώδους του αέρα. Η κλίση τους ως προς τον άξονα περιστροφής τους αποτελεί μοναδικό χαρακτηριστικό και καθορίζει

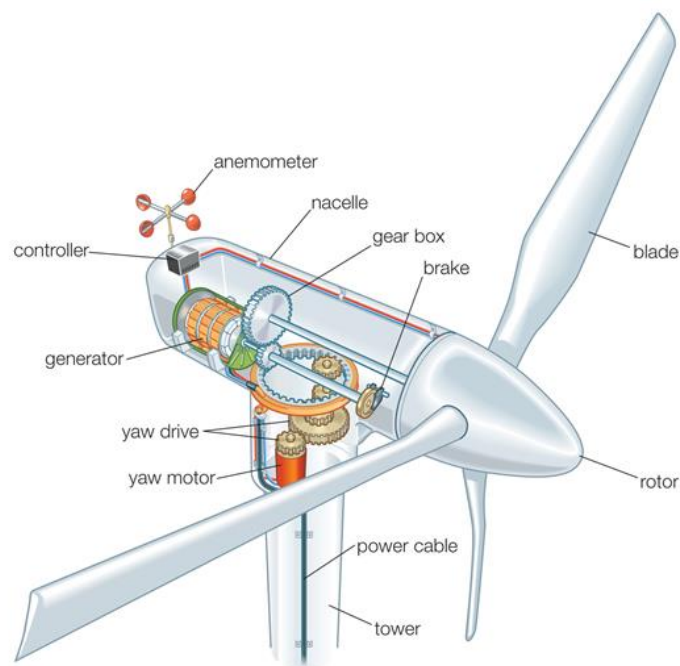
τη γωνία με την οποία προσπίπτει στην έλικα ο άνεμος, άρα και την απόδοση της ανεμογεννήτριας (Πάχυ, 2012). Το ύψος των ανεμογεννητριών όπως και η διάμετρος των πτερυγίων τους ποικίλει και εξαρτάται από την περιοχή στην οποία είναι εγκατεστημένες.

4.2 Βασικά μέρη Ανεμογεννήτριας

Τα βασικά μέρη μιας ανεμογεννήτριας (Εικόνα 20) είναι τα ακόλουθα (Πάχυ, 2012):

- Δρομέας (rotor): Ίσως το σημαντικότερο μέρος της ανεμογεννήτριας με πλήθος κρίσιμων παραγόντων που επηρεάζουν την αποδοτικότητά της. Η ταχύτητα περιστροφής, η διάμετρος του, ο αριθμός πτερυγίων (blades) είναι μερικά από αυτά. Ο δρομέας είναι εγκατεστημένος πάνω στο κουβούκλιο (nacelle) του πύργου ρε οριζόντια θέση.
- Σύστημα μετάδοσης κίνησης: Μέρη του είναι ο κύριος άξονας, τα έδρανά του, το κιβώτιο ταχυτήτων (gear box).
- Σύστημα πέδησης: Φρένο (brake) για την ακινητοποίηση του δρομέα σε καταστάσεις υψηλών ταχυτήτων ανέμου.
- Ηλεκτρική γεννήτρια (generator): Είναι υπεύθυνη για τη μετατροπή της κινητικής ενέργειας σε ηλεκτρική ενέργεια. Είναι εγκατεστημένη στο κουβούκλιο (nacelle) της ανεμογεννήτριας μαζί με το σύστημα ψύξης/θέρμανσής της. Συνδέεται με το σύστημα μετάδοσης κίνησης. Η κίνηση που δημιουργείται στο δρομέα από τον άνεμο διαμέσου των πτερυγίων, καταλήγει στην γεννήτρια μέσω του συστήματος μετάδοσης κίνησης με αποτέλεσμα την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας.
- Σύστημα προσανατολισμού: Το σύστημα προσανατολισμού (yaw control system) συναντάται στις ανεμογεννήτριες οριζόντιου άξονα. Χρησιμοποιώντας ως κύριο όργανο το ανεμόμετρο, το σύστημα στρέφει το κουβούκλιο της ανεμογεννήτριας σε τέτοια θέση ώστε ο δρομέας να έχει φορά αντίθετη από αυτή του ανέμου, να είναι δηλαδή “κόντρα” σε αυτόν. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται μέγιστη αξιοποίηση της ενέργειας του ανέμου.

- Πύργος: Πάνω στον πύργο (tower) στηρίζονται όλα τα μέρη που περιγράφηκαν πιο πάνω. Στο εσωτερικό του πύργου εκτείνεται το καλώδιο (power cable) που μεταφέρει την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια από τη γεννήτρια προς το κέντρο ελέγχου της εγκατάστασης. Επίσης, είναι εγκατεστημένος πίνακας ελέγχου και ανελκυστήρας.
- Πίνακας ελέγχου: Είναι εγκατεστημένος στο εσωτερικό της ανεμογεννήτριας. Ελέγχει τις λειτουργίες της προσφέροντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της μηχανής.



Εικόνα 20: Βασικά μέρη Ανεμογεννήτριας (Πηγή: Badurek, 2015)

4.3 Δυνατότητες βελτίωσης εγκατεστημένης Ανεμογεννήτριας

Οι δυνατότητες βελτίωσης σε μια ανεμογεννήτρια που είναι ήδη εγκατεστημένη είναι σχετικά περιορισμένες. Ενέργειες όπως η αντικατάσταση των καλωδιώσεων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με νέες που παρουσιάζουν λιγότερες απώλειες καθώς και η αντικατάσταση της γεννήτριας με μια πιο καινούρια και πιο αποδοτική ή του ηλεκτρολογικού πίνακα κρίνονται ασύμφορες ή δύσκολο να γίνουν πράξη. Αντίθετα, η αναβάθμιση του λογισμικού του ανεμόμετρου και γενικότερα του συστήματος ελέγχου του προσανεμισμού της ανεμογεννήτριας ώστε αυτή να ανταποκρίνεται πιο γρήγορα στις αλλαγές του ανέμου, αποτελεί μια εύκολα

υλοποιήσιμη ενέργεια με άμεσα αποτελέσματα. Επίσης η τακτική βαθμονόμηση του συγκεκριμένου οργάνου κρίνεται απαραίτητη και παρ' όλο που προτείνεται από τις κατασκευάστριες εταιρείες, δεν εφαρμόζεται στο σημείο που θα έπρεπε. Τέλος, η αναβάθμιση, αν όχι η αντικατάσταση με πιο σύγχρονα, των επίγειων συστημάτων εποπτείας της λειτουργίας των ανεμογεννητριών θα συνέβαλε επίσης στην αύξηση της αποδοτικότητας του συστήματος.

4.4 Επιλογή βέλτιστης θέσης Αιολικού Πάρκου-Ανεμογεννητριών

Η εύρεση της βέλτιστης θέσης για την εγκατάσταση ενός Αιολικού Πάρκου (χερσαίου ή υπεράκτιου) και εν συνεχεία των ανεμογεννητριών που το απαρτίζουν, αποτελεί το κύριο αντικείμενο μελέτης των σχεδιαστών Αιολικών Πάρκων και γενικότερα των μηχανικών τα τελευταία έτη.

Η διαδικασία επιλογής της θέσης εγκατάστασης ενός Αιολικού Πάρκου αποτελεί μια διαδικασία πολλών σταδίων. Ορισμένοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή της θέσης εγκατάστασης χερσαίων Αιολικών Πάρκων είναι η ταχύτητα του ανέμου στην περιοχή, τα χαρακτηριστικά του εδάφους, ο παραγόμενος μελλοντικά θόρυβος από τις ανεμογεννήτριες, ο αντίκτυπος στο περιβάλλον, η απόσταση από κατοικημένες περιοχές, η επιρροή στον τουρισμό, η αξία της γης (Montusiewicz et al., 2015). Στην περίπτωση των υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων παράγοντες όπως η ύπαρξη φυσικών πηγών, οι διαδρομές πλοίων αλλά και οι περιοχές εξόρυξης πετρελαίου, οι περιοχές με αυξημένη πιθανότητα ύπαρξης πυρομαχικών καθώς και οι περιοχές με πιθανότητα ύπαρξης αρχαιολογικών ευρημάτων αποτελούν ανασταλτικούς παράγοντες (Giebel & Hasager, 2016).

Αφού αποκλειστούν οι περιοχές που παρουσιάζουν τα παραπάνω χαρακτηριστικά, ακολουθεί η τοποθέτηση ειδικών συσκευών που μετρούν διάφορα χαρακτηριστικά του ανέμου στις υποψήφιες, προς εγκατάσταση Αιολικών Πάρκων, περιοχές. Οι συσκευές αυτές εγκαθίστανται για μεγάλα χρονικά διαστήματα με σκοπό την εξαγωγή όσο το δυνατόν ασφαλέστερων συμπερασμάτων (G.C. & S.P., 2015).

Επόμενο βήμα μετά την επιλογή του μέρους εγκατάστασης του πάρκου, είναι η χρήση “έξυπνων” υπολογιστικών τεχνικών για την βέλτιστη χωροθέτηση των ανεμογεννητριών εντός αυτού. Οι υπολογιστικές τεχνικές απαρτίζονται από αλγόριθμους βελτιστοποίησης, η χρήση των οποίων είναι ευρέως διαδεδομένη

(Cabestany et al., 2011). Οι εν λόγω αλγόριθμοι λαμβάνουν υπόψη τους αφενός τη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας και αφετέρου την ελαχιστοποίηση του κόστους τοποθέτησης των ανεμογεννητριών (Tesauro, 2011). Πολύ καλύτερα αποτελέσματα στη βέλτιστη χωροθέτηση ανεμογεννητριών φαίνεται πως έχουν μεθοδολογίες που προτείνονται στη βιβλιογραφία και ακολουθούν ευρεστικές μεθόδους καθώς και εξελκτικούς αλγόριθμους (Cabestany et al., 2011). Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάζουν και οι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούν δυϊκές μεταβλητές (Beşkırlı et al., 2018). Η αναλυτική εξήγηση των ανωτέρω ξεφεύγει από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

Ο αντίκτυπος που μπορεί να έχει στην ετήσια παραγωγή ενέργειας η εγκατάσταση δύο ανεμογεννητριών σε λάθος απόσταση μεταξύ τους είναι ιδιαίτερα σημαντικός. Χαρακτηριστικά αναφέρεται η μείωση κατά τουλάχιστον 5% στην ετήσια παραγωγή αν η απόσταση μεταξύ τους είναι μικρότερη από το πενταπλάσιο της διαμέτρου του δρομέα τους (Al-Addous et al., 2020). Το ποσοστό μπορεί να φαίνεται μικρό αλλά αν ληφθούν υπόψη τα τεράστια ποσά ενέργειας, τα κόστη και τα κέρδη, η ζημιά μπορεί να είναι σημαντική. Επίσης, είναι σημαντικό να συμπεριληφθούν στη βελτιστοποίηση όλα τα διαθέσιμα δεδομένα της περιοχής που πρόκειται να εγκατασταθεί το Αιολικό Πάρκο, συμπεριλαμβανομένης και της συχνότητας αλλαγής της διεύθυνσης του ανέμου (Brusca et al., 2014), ώστε το αποτέλεσμα να είναι το καλύτερο δυνατό.

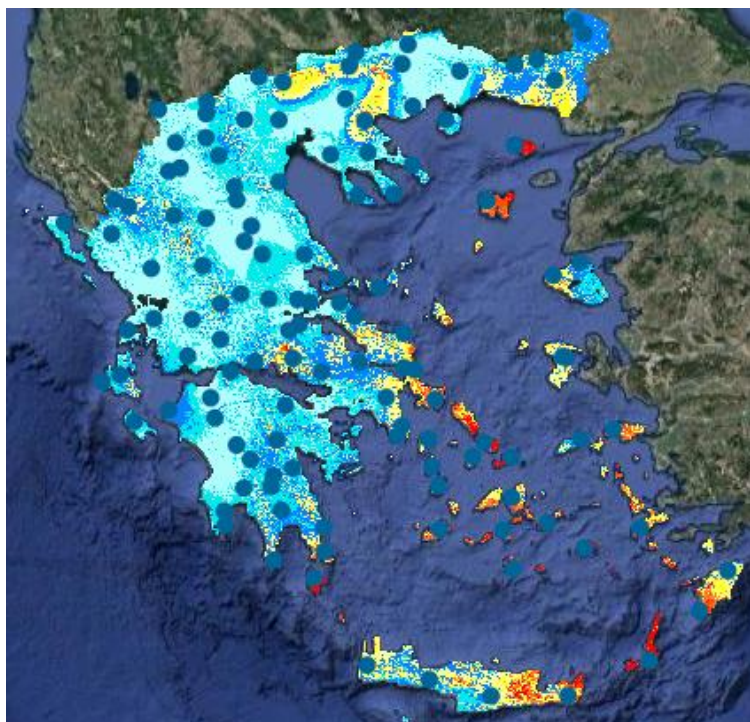
4.5 Η πρώτη ύλη των Ανεμογεννητριών: Ο άνεμος

Η χρήση του ανέμου ως πρώτη ύλη είναι η βασική αιτία χαρακτηρισμού των Αιολικών Πάρκων ως πηγών ανανεώσιμης ή “πράσινης” ενέργειας. Ως άνεμος νοείται ο κινούμενος αέρας που προκαλείται από διαφορές στην ατμοσφαιρική πίεση. Ο επιφανειακός αέρας, που είναι ο τύπος αέρα με τη μεγαλύτερη επιρροή στην Αιολική Ενέργεια, αναλύεται σε δύο συνιστώσες, την κατεύθυνση και την ταχύτητα. Για την πρόβλεψη της παραγωγής ενέργειας με τη βοήθεια των καμπυλών ενέργειας χρησιμοποιείται η μέση τιμή της ταχύτητας του επιφανειακού ανέμου, η οποία υπολογίζεται βάσει μετρήσεων μεγάλου χρονικού διαστήματος (Kalogeri, 2017).

Για τον καθορισμό του διανύσματος της ταχύτητας του ανέμου απαιτούνται πληροφορίες για την ένταση και για τη διεύθυνσή του, οι οποίες εξαρτώνται από παράγοντες όπως η γενική ατμοσφαιρική κυκλοφορία, το πεδίο πίεσης της γης, η

περιστροφή της γης κ.α. Η συνιστώσα του διανύσματος της ταχύτητας η οποία ορίζεται ως η πιο σημαντική για τον προσδιορισμό του αιολικού δυναμικού μιας περιοχής είναι η οριζόντια (Kalogeri, 2017).

Η μέση ετήσια τιμή της ταχύτητας του ανέμου χαρακτηρίζεται ως αιολικό δυναμικό. Είναι άμεσα συνδεδεμένο με την οικονομική αποδοτικότητα κάθε Αιολικού Πάρκου, καθιστώντας ιδιαίτερα σημαντική και κρίσιμη τη μέτρησή του στις υποψήφιες προς εγκατάσταση Αιολικών Πάρκων περιοχές. Όσες παρουσιάζουν υψηλές τιμές αιολικού δυναμικού επιλέγονται τελικά ώστε να εγκατασταθούν σε αυτές ανεμογεννήτριες για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Τριανταφυλλίδης, 2018). Στην Εικόνα 21 που ακολουθεί φαίνονται με μπλε κουκκίδες οι σταθμοί μέτρησης του αιολικού δυναμικού. Επίσης με γαλάζιο χρώμα οι περιοχές με μικρές τιμές αιολικού δυναμικού ενώ με κίτρινο και κόκκινο χρώμα οι περιοχές που παρουσιάζουν μεγάλες και πολύ μεγάλες, αντίστοιχα, τιμές αιολικού δυναμικού.



Εικόνα 21: Χάρτης αιολικού δυναμικού Ελλάδας (Πηγή: www.geo.rae.gr)

4.6 Ταχύτητα - ισχύς ανέμου

Η ταχύτητα είναι ένα από τα χαρακτηριστικά μεγέθη του ανέμου που ασκεί τη σημαντικότερη επιρροή στην αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας. Η χρήση της μέσης τιμής της είναι συχνό φαινόμενο, παρά τη δυσκολία μέτρησης στις κατά τόπους περιοχές ενδιαφέροντος (Tsolas, 2020).

Μέσω της μέσης ταχύτητας του ανέμου μπορεί να υπολογιστεί η ισχύς ανά επιφάνεια. Τα μόρια του αέρα που κινούνται σε μια περιοχή κατά τη διάρκεια ενός χρονικού διαστήματος έχουν κινητική ενέργεια. Η περιοχή αυτή είναι κάθετη στην κατεύθυνση του ανέμου. Πιο συγκεκριμένα, όπως απεικονίζεται και στο σχήμα που ακολουθεί, η μάζα m , που βρίσκεται στο νοητό όγκο του νοητού κυλίνδρου που σχηματίζεται, η οποία πρόκειται να περάσει από την περιοχή A σε χρονικό διάστημα t μπορεί να υπολογιστεί από την πυκνότητα του αέρα ρ και τον όγκο του κυλίνδρου V . Η δύναμη είναι η κινητική ενέργεια (KE) των μορίων του αέρα διαιρεμένη από τον χρόνο:

$$P = \frac{KE}{t} = 0.5 * m * \frac{v^2}{t}$$

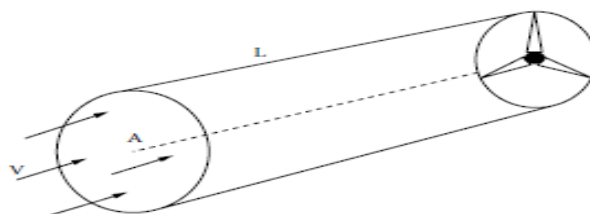
$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$V = area * length = A * L$$

$$m = \rho * V = \rho * A * L$$

Αντικαθιστώντας στην πρώτη εξίσωση την m όπως δίνεται από τον τελευταίο τύπο προκύπτει η ισχύς ανά επιφάνεια (Nelson, 2009):

$$P = 0.5 \rho A L \frac{v^2}{t} = 0.5 \rho A \frac{L}{t} v^2 = 0.5 \rho A v v^2 = 0.5 \rho A v^3 \rightarrow \frac{P}{A} = 0.5 \rho v^3$$

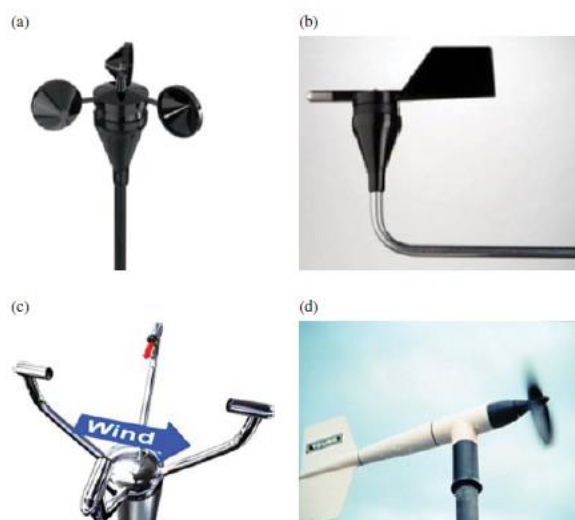


Εικόνα 22: Ροή ανέμου μέσα από κύλινδρο επιφάνειας A (Πηγή: Nelson, 2009)

Για της ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε η μέση μηνιαία τιμή της ταχύτητας και όχι η ισχύς.

4.7 Ανεμόμετρο

Το ανεμόμετρο είναι το όργανο που χρησιμοποιεί το σύστημα ελέγχου των ανεμογεννητριών για τη μέτρηση της ταχύτητας και της κατεύθυνσης του ανέμου. Εγκαθίσταται στην κορυφή της ανεμογεννήτριας, στο κουβούκλιο, ώστε να είναι στο ίδιο ακριβώς ύψος με τον ρότορα της ανεμογεννήτριας. Το συχνότερα χρησιμοποιούμενο είδος ανεμόμετρου στις ανεμογεννήτριες είναι το ηχητικό ανεμόμετρο. Ωστόσο, λόγω των προβλημάτων που παρουσιάζει εξαιτίας των καιρικών φαινομένων, συχνά χρησιμοποιούνται ως βοηθητικά ένα κυπελλοφόρο (τριπλό) ανεμόμετρο σε συνδυασμό με έναν ανεμοδείκτη. Σε αρκετές περιπτώσεις συναντάται η χρήση μόνο των δύο τελευταίων. Επίσης, ένας ακόμα τύπος είναι το συνδυαστικό ανεμόμετρο προπέλας-ανεμοδείκτη που μπορεί να μετρήσει ταυτόχρονα την ταχύτητα και να δείξει την κατεύθυνση του ανέμου (Walker & Swift, 2015). Στην Εικόνα 23 φαίνονται οι τέσσερις τύποι.



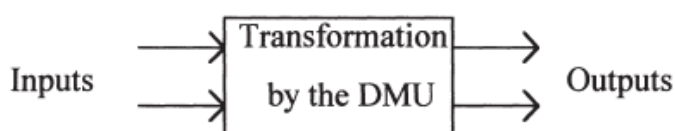
Εικόνα 23: a)Κυπελλοφόρο (τριπλό) ανεμόμετρο, b) Ανεμοδείκτης, c) Ηχητικό ανεμόμετρο, d) Ανεμόμετρο προπέλας-ανεμοδείκτη (Πηγή: Walker & Swift, 2015)

Όλα τα ανεμόμετρα πρέπει να βαθμονομούνται τουλάχιστον μία φορά ανά εξάμηνο. Η βαθμονόμησή τους θα πρέπει να λαμβάνει χώρα μέσα σε αεροδυναμικές σήραγγες. Με αυτό τον τρόπο οι μετρήσεις τους θα είναι πάντα ακριβείς, γεγονός το οποίο έχει άμεσο αντίκτυπο στην παραγωγή ενέργειας. Ένα σωστά και τακτικά βαθμονομημένο ανεμόμετρο παρέχει άμεσα τις σωστές πληροφορίες στο σύστημα ελέγχου μιας ανεμογεννήτριας, συμβάλλοντας στη μεγιστοποίηση της παραγωγής ενέργειας εξαιτίας της άμεσης απόκρισης του συστήματος στις αλλαγές του ανέμου (Hunter, 2003).

5 Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων

5.1 Μονάδα Λήψης Απόφασης

Μία Μονάδα Λήψης Απόφασης (Decision Making Unit – DMU) είναι μια επιχείρηση, ένας οργανισμός, μια νομική οντότητα γενικότερα η οποία ελέγχει τη διαδικασία μετατροπής των πόρων-εισροών (inputs) σε προϊόντα/υπηρεσίες-εκροές (outputs). Ο χαρακτηρισμός της μονάδας ως “λήπτης αποφάσεων” υποδηλώνει τον έλεγχο που ασκεί η εκάστοτε μονάδα στη διαδικασία μετατροπής των εισροών σε εκροές (Thanassoulis, 2001).



Εικόνα 24: Διαδικασία μετατροπής εισροών σε εκροές μιας Μονάδας Λήψης Απόφασης
(Πηγή: Thanassoulis, 2001)

Ως Μονάδα Λήψης Απόφασης μπορεί να θεωρηθεί ένα εργοστάσιο, ένα νοσοκομείο, ένα αεροδρόμιο, ένα εκπαιδευτικό ίδρυμα κ.α.

Η επιλογή των εισροών και των εκροών είναι εξαιρετικά κρίσιμη για τη μετέπειτα επίλυση του προβλήματος. Ως εισροές πρέπει να θεωρούνται οι ποσότητες που έχουν αντίκτυπο στις εκροές. Οι εκροές από την άλλη μεριά αντικατοπτρίζουν όλες τις “χρήσιμες ποσότητες” που εξάγονται και οι οποίες θέλουμε να χαρακτηρίζουν την DMU (Thanassoulis, 2001). Με άλλα λόγια, οι εισροές είναι τα «αγαθά» προς εξοικονόμηση και οι εκροές τα «αγαθά» προς μεγιστοποίηση (Γεωργάκας, 2017).

5.2 Αποδοτικότητα

Η ικανότητα που διαθέτει μια μονάδα στον αποτελεσματικό μετασχηματισμό των εισροών που καταναλώνει σε εκροές, με άγνωστο μηχανισμό παραγωγής, καλείται αποδοτικότητα (efficiency). Η αποδοτικότητα αναφέρεται στην ικανότητα της επιχείρησης/μονάδας (DMU-Decision Making Unit) να παράγει περισσότερες εκροές (outputs) με τις ίδιες εισροές (inputs) ή να μειώσει τις εισροές (inputs) χωρίς να μεταβάλλει τις εκροές (outputs) της (Cooper et al., 2007). Μέσω της ανάλυσης της

αποδοτικότητας μπορούν να αναγνωριστούν οι δυνάμεις και οι αδυναμίες των επιχειρησιακών λειτουργιών, η εταιρεία μπορεί να επαναξιολογήσει τη θέση της απέναντι στους πελάτες καθώς επίσης και να αναγνωρίσει ευκαιρίες μέσα από τις οποίες θα βελτιώσει τις υπηρεσίες/προϊόντα που ήδη παρέχει αλλά και να αρχίσει την παραγωγή νέων (Γεωργάκας, 2017).

Σύμφωνα με μελέτη του Farrell (Farrell, 1957), ως δείκτης αποδοτικότητας νοείται ο λόγος των συνολικών εκροών προς τις συνολικές εισροές:

$$\frac{\text{Συνολικές Εκροές}}{\text{Συνολικές Εισροές}}$$

Στόχος κάθε παραγωγικής μονάδας (DMU) είναι η μεγιστοποίηση του ανωτέρω τύπου. Στην ίδια μελέτη, περιγράφηκαν τα δύο τμήματα από τα οποία αποτελείται η αποδοτικότητα. Το ένα είναι η τεχνική αποδοτικότητα (technical efficiency) και το άλλο η οικονομική αποδοτικότητα (price or allocative efficiency). Τεχνική αποδοτικότητα είναι η αποτελεσματική χρήση ενός δεδομένου συνόλου εισροών για την παραγωγή εκροών. Επομένως, τεχνικά αποδοτική μονάδα καλείται η μονάδα η οποία παράγει το μέγιστο δυνατό προϊόν από το μικρότερο δυνατό σύνολο πόρων (εισροών). Από την άλλη μεριά, οικονομική αποδοτικότητα χαρακτηρίζει μια επιχείρηση όταν αυτή χρησιμοποιεί τις εισροές της (κεφάλαια) στις σωστές αναλογίες με δεδομένη τη σχέση των τιμών τους για να πετύχει το επιθυμητό αποτέλεσμα (Γεωργάκας, 2017).

5.3 Αποδοτικό σύνορο

Η μέθοδος της Περιβάλλουσας Ανάλυσης Δεδομένων είναι μία μη παραμετρική μέθοδος γραμμικού προγραμματισμού η οποία υπολογίζει το όριο αποδοτικότητας (αποδοτικό σύνορο) του συνόλου των εξεταζόμενων μονάδων απόφασης (DMUs). Η κατασκευή του αποδοτικού συνόρου βασίζεται στις συγκριτικά πιο αποδοτικές μονάδες, ενώ παράλληλα καθορίζονται και οι μη αποδοτικές. Μέσω της συγκεκριμένης διάκρισης του συνόλου των DMUs σε αποδοτικές και μη επιτυγχάνεται ο υπολογισμός του περιθωρίου βελτίωσης των αποδοτικών μονάδων και τίθεται ο στόχος βελτίωσης των μη αποδοτικών ώστε να καταστούν αποδοτικές

(Σταμάτη, 2014). Η μορφή του αποδοτικού συνόρου φαίνεται στην Εικόνα 25 από τη μαύρη γραμμή που σχηματίζεται (empirical frontier).

Μία μονάδα λήψης απόφασης θεωρείται πλήρως αποδοτική αν πλέον δεν είναι εφικτή η αύξηση (μείωση) του επιπέδου μιας εξόδου (εισόδου) χωρίς την προγενέστερη αύξηση του επιπέδου μιας εισόδου ή μείωση παραγωγής τουλάχιστον μιας άλλης εξόδου. Μέσα από την περιγραφή που προηγήθηκε, αναδεικνύεται η έννοια του ορίου των παραγωγικών δυνατοτήτων ή αποδοτικού συνόρου (Hosseini & Hasanpour, 2011). Το συγκεκριμένο όριο δεν μπορεί να ξεπεραστεί κατά τον υπολογισμό της τεχνικής αποδοτικότητας. Καθορίζεται από την εξέλιξη της επιστήμης, την εφαρμογή νέων τεχνολογιών στην παραγωγή, από το νομοθετικό πλαίσιο, από την συνεχή εκπαίδευση του προσωπικού (Τσαλιάνης, 2015).

5.4 Παρουσίαση της Μεθόδου Data Envelopment Analysis

Μέσω της μεθόδου Data Envelopment Analysis (DEA) αξιολογείται η αποδοτικότητα συγκρίσιμων μονάδων με στόχο τη βελτίωση της απόδοσής τους. Η μέθοδος στηρίζεται στην υπόθεση ότι μεταξύ των συγκρίσιμων μονάδων υφίστανται διαφορές στην απόδοση, οι οποίες μπορούν να μετρηθούν (Golany et al., 1994).

Η αποδοτικότητα υπολογίζεται μέσω του δείκτη αποδοτικότητας, ο οποίος αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Στην περίπτωση ύπαρξης πολλών μεταβλητών εισόδου και εξόδου μετασχηματίζεται ως εξής:

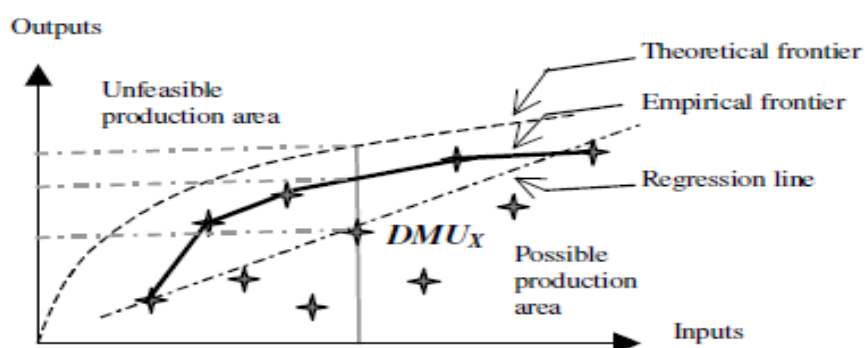
$$efficiency = \frac{\sum(\text{συντελεστής βαρύτητας} * \text{εκροή})}{\sum(\text{συντελεστής βαρύτητας} * \text{εισροή})}$$

Η αποδοτικότητα που υπολογίζεται από τον ανωτέρω τύπο καλείται σχετική αποδοτικότητα και είναι το πηλίκο του αθροίσματος των συντελεστών βαρύτητας των μεταβλητών εξόδου προς το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας των μεταβλητών εισόδου. Όπως φαίνεται από τον παραπάνω τύπο, η σχετική αποδοτικότητα είναι ανεξάρτητη από τις μονάδες μέτρησης των εισροών και των εκροών, γεγονός που επιτρέπει στη μέθοδο DEA την εφαρμογή της σε πληθώρα περιπτώσεων (Τσαλιάνης, 2015).

Σκοπός της DEA είναι ο προσδιορισμός των συντελεστών βαρύτητας κάθε DMU που μεγιστοποιούν την αποδοτικότητά της ενώ διατηρούν ταυτόχρονα τις αποδοτικότητες όλων των DMUs κάτω της μονάδας (input-oriented μοντέλα). Οι

ζητούμενες μεταβλητές είναι οι αποδόσεις των μονάδων και οι συντελεστές βαρύτητας εισόδων-εξόδων. Τα δεδομένα είναι οι εισόδοι και οι εξόδοι των μονάδων, δηλαδή οι παρατηρήσεις/δεδομένα που έχουν καταγραφεί (Τσαλιάνης, 2015).

Η καμπύλη που δημιουργείται στη μέθοδο DEA (empirical frontier) - ή επιφάνεια αναλόγως του πλήθους των μεταβλητών εισόδου-εξόδου - είναι το αποδοτικό σύνορο που περιγράφηκε παραπάνω. Πάνω της βρίσκονται οι πλήρως αποδοτικές μονάδες ενώ περιβάλλει (envelops) τις μη αποδοτικές (Τσαλιάνης, 2015). Οι μη αποδοτικές μονάδες βρίσκονται στην εφικτή περιοχή παραγωγής (possible production area) ενώ πάνω από το αποδοτικό σύνορο βρίσκεται η ανέφικτη περιοχή (unfeasible production area).



Εικόνα 25: Γραφική αναπαράσταση αποδοτικού συνόρου, DMUs, εφικτής, ανέφικτης περιοχής (Πηγή: Azadeh et al., 2007)

Στο σημείο αυτό τονίζεται ότι:

- Μια DMU κρίνεται ως αποδοτική όταν μειώνοντας οποιαδήποτε εισροή της διατηρούνται σταθερές οι εκροές της. Το μοντέλο αυτό χαρακτηρίζεται ως προσανατολισμένο στις εισροές (input-oriented model). Στη συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζεται αν η μονάδα απόφασης θα μπορούσε να έχει το ίδιο επίπεδο εκροών αλλά με λιγότερες εισροές (Γεωργάκας, 2017).
- Μια DMU κρίνεται ως αποδοτική όταν αυξάνοντας οποιαδήποτε εκροή της διατηρούνται σταθερές οι εισροές της. Το μοντέλο αυτό χαρακτηρίζεται ως προσανατολισμένο στις εκροές (output-oriented model). Στη συγκεκριμένη περίπτωση εξετάζεται αν η μονάδα απόφασης θα μπορούσε να πετύχει μεγαλύτερο επίπεδο εκροών χρησιμοποιώντας τις ίδιες εισροές (Γεωργάκας, 2017).

Επομένως, οι μονάδες που βρίσκονται πάνω στο σύνορο αποδοτικότητας έχουν σχετική αποδοτικότητα ίση με 1 (αποδοτικές) ενώ οι υπόλοιπες που είναι κάτω

από το σύνορο έχουν σχετική αποδοτικότητα μικρότερη του 1 (μη αποδοτικές) (Τσαλιάνης, 2015).

5.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα DEA

Η ευρεία διάδοση και εφαρμογή της μεθόδου DEA σε πολλούς τομείς οφείλεται σε ορισμένα πλεονεκτήματα που παρουσιάζει (Σταμάτη, 2014):

- Επιτρέπει τη διαχείριση μεγάλου όγκου δεδομένων.
- Δεν απαιτείται η γνώση του τρόπου μετασχηματισμού των εισροών σε εκροές.
- Μικρή απαίτηση σε παραδοχές.
- Δυνατότητα ύπαρξης διαφορετικών μονάδων μέτρησης σε εισροές και εκροές.
- Δεν υπεισέρχονται υποκειμενικοί παράγοντες κατά την εκτίμηση.
- Χρήση κοινών μεθόδων γραμμικού προγραμματισμού.
- Κατάλληλο εργαλείο για benchmarking και ανάπτυξη επιχειρηματικής στρατηγικής καθώς μετά τη σύγκριση των μη αποδοτικών μονάδων με τις αποδοτικές, προτείνονται λύσεις με στόχο τη μετατροπή των πρώτων σε αποδοτικές (Γεωργάκας, 2017).

Στον αντίποδα, ορισμένα μειονεκτήματα που παρουσιάζει η συγκεκριμένη μέθοδος πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν κατά την εφαρμογή της (Cooper et al., 2007):

- Καθώς γίνεται συγκριτική αξιολόγηση των υπό εξέταση μονάδων, μια μονάδα που μπορεί βάσει της μεθόδου να χαρακτηριστεί ως αποδοτική στην πραγματικότητα να μην είναι. Επομένως, δεν είναι σωστή η γενίκευση των αποτελεσμάτων.
- Δεν λαμβάνονται υπόψιν εξωτερικοί παράγοντες που μπορεί να επηρεάζουν τις μονάδες με άμεσο αντίκτυπο στην αποδοτικότητά τους.
- Εξαιτίας της κατηγοριοποίησης της μεθόδου στις μη παραμετρικές τεχνικές, η διεξαγωγή δοκιμών στατιστικών υποθέσεων είναι δύσκολη υπόθεση.
- Μεγάλη ευαισθησία αποτελεσμάτων σε σφάλματα μέτρησης με πιθανή την εξαγωγή εσφαλμένων συμπερασμάτων (Γεωργάκας, 2017).

5.6 Θεωρητικό υπόβαθρο – Μαθηματικά μοντέλα DEA

Ο αρχικός μαθηματικός τύπος της μεθόδου για την εκτίμηση της αποδοτικότητας μιας μονάδας λήψης απόφασης προτάθηκε από τους Charnes et al. (1978). Πιο συγκεκριμένα, προτάθηκε η εκτίμηση της αποδοτικότητας μέσω της μεγιστοποίησης του λόγου των σταθμισμένων εκροών προς τις σταθμισμένες εισροές της υπό εξέταση μονάδας, υπό τον περιορισμό ότι οι αντίστοιχοι λόγοι των υπολοίπων μονάδων είναι μικρότεροι ή ίσοι της μονάδας. Αν υπάρχουν n DMUs ($j=1, \dots, n$) που η καθεμία έχει m εισόδους ($X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj}$) και s εξόδους ($Y_{1j}, Y_{2j}, \dots, Y_{sj}$) ο υπολογισμός της αποδοτικότητας θ γίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} \text{Αντικειμενική συνάρτηση } \text{Max}_{u,v} \theta &= \frac{\sum_{r=1}^s u_r * y_{r0}}{\sum_{i=1}^m v_i * x_{i0}} \\ \text{s.t. } \frac{\sum_{r=1}^s u_r * y_{rj}}{\sum_{i=1}^m v_i * x_{ij}} &\leq 1, \quad j = 1, \dots, n, \quad r = 1, \dots, s \\ u_r, v_i &\geq 0, \quad i = 1, \dots, m, \quad r = 1, \dots, s \end{aligned}$$

Στο παραπάνω μοντέλο ο δείκτης αποδοτικότητας της DMU είναι η μεταβλητή $\theta \leq 1$ και τα u_r και v_i είναι οι συντελεστές βαρύτητας. Το παραπάνω μοντέλο είναι μη-γραμμικό. Ωστόσο θέτοντας τον παρονομαστή της αντικειμενικής ίσο με τη μονάδα μέσω του περιορισμού (3), προκύπτει το παρακάτω ισοδύναμο γραμμικό πρόβλημα (Charnes et al., 1978)

$$\text{Αντικειμενική συνάρτηση } \text{Max } \theta = \sum_{r=1}^s u_r y_{r0} \quad (1)$$

$$(A) \quad \text{s.t. } \sum_{r=1}^s u_r y_{rj} - \sum_{i=1}^m v_i x_{ij} \leq 0, \quad j = 1, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m v_i x_{i0} = 1 \quad (3)$$

$$u_r, v_i \geq \varepsilon, \quad i = 1, \dots, m, \quad r = 1, \dots, s$$

Όπου ε ένας πολύ μικρός αριθμός ο οποίος εισάγεται για να εξασφαλίσει ότι όλοι οι συντελεστές θα έχουν θετικές τιμές ως λύση.

Το παρακάτω μοντέλο υπολογίζει τις σχετικές αποδόσεις ελαχιστοποιώντας τις εισόδους και διατηρώντας σταθερές τις εξόδους. Από το δυϊκό πρόβλημα του τύπου (A) που περιγράφηκε παραπάνω, προκύπτει το γραμμικό πρόβλημα CCR (Charnes, Cooper, Rhodes) προσανατολισμένο στις εισόδους (CRS):

Αντικειμενική συνάρτηση $Min \theta$

$$\text{s.t. } \theta x_{io} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}, \quad i = 1, \dots, m,$$

$$y_{ro} \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}, \quad r = 1, \dots, s,$$

$$\lambda_j \geq 0, \theta \in R, j = 1, \dots, n$$

Όταν το CCR μοντέλο είναι προσανατολισμένο στις εξόδους, το γραμμικό μοντέλο είναι της μορφής:

Αντικειμενική συνάρτηση $Max \theta$

$$\text{s.t. } x_{io} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}, \quad i = 1, \dots, m,$$

$$\theta y_{ro} \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}, \quad r = 1, \dots, s,$$

$$\lambda_j \geq 0, \theta \in R, j = 1, \dots, n$$

Η γραφική αναπαράσταση των μοντέλων που περιγράφηκαν, παρουσιάζει μια καμπύλη περιβάλλουσας με σταθερή κλίση, με τη μορφή ευθείας γραμμής που διέρχεται από την αρχή των αξόνων και περνάει από την πρώτη πλήρως αποδοτική DMU. Η σταθερή αυτή κλίση της υποδηλώνει ότι στα μοντέλα που υποθέτουν CRS καμπύλη μια πιθανή αύξηση στις εισόδους (inputs) των DMUs θα έχει ως αποτέλεσμα ανάλογη αύξηση και στις εξόδους (outputs) των DMUs. Δεν υφίσταται δηλαδή η έννοια της οικονομίας κλίμακας. Διαφορετική είναι η προσέγγιση που ακολουθούν τα VRS μοντέλα, όπως αυτά που αναλύονται στη συνέχεια. Όταν το μέγεθος της DMU ασκεί επιρροή στην αποδοτικότητα της παραγωγής, το μοντέλο VRS είναι πλέον το κατάλληλο. Στην περίπτωση αυτή, οι μεταβολές των εισόδων και εξόδων είναι μη ανάλογες, με τις οικονομίες κλίμακας να είναι παρούσες (Τσαλιάνης, 2015).

Στα δύο τελευταία μοντέλα αν προστεθεί ο όρος $\sum \lambda_j = 1$ ($j = 1, \dots, n$) προκύπτει το μοντέλο BCC (VRS) που περιλαμβάνει μεταβαλλόμενες αποδόσεις κλίμακας και προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Banker, Charnes και Cooper το 1984:

Προσανατολισμένο στις εισροές

Αντικειμενική συνάρτηση $Min \theta$

$$\text{s.t. } \theta x_{io} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} , i = 1, \dots, m,$$

$$y_{ro} \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} , r = 1, \dots, s,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

Προσανατολισμένο στις εκροές

Αντικειμενική συνάρτηση $Max \theta$

$$\text{s.t. } x_{io} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} , i = 1, \dots, m,$$

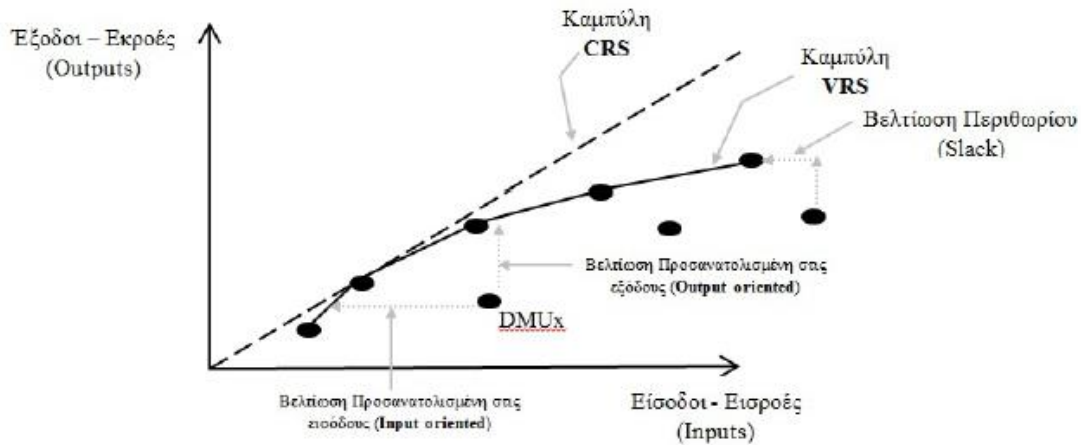
$$\theta y_{ro} \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} , r = 1, \dots, s,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

Από τα δύο τελευταία μοντέλα, όπως προαναφέρθηκε, μπορεί να εκτιμηθεί η αποδοτικότητα μιας DMU. Είναι, δηλαδή, δυνατός ο διαχωρισμός του συνόλου των εξεταζόμενων μονάδων σε αποδοτικές και μη αποδοτικές.

Σύμφωνα με τον Thanassoulis (2001) υπάρχει το ενδεχόμενο οι αποδοτικές μονάδες να είναι κυριαρχούμενες από κάποιες άλλες, δηλαδή να υπάρχει ένα περιθώριο (slack) μεμονωμένης μείωσης των εισροών ή αύξησης των εκροών των αποδοτικών μονάδων (Εικόνα 26). Το ενδεχόμενο ύπαρξης slacks μπορεί να εξεταστεί δημιουργώντας μια δεύτερη φάση στην επίλυση του μοντέλου για κάθε DMU, στην οποία η σχετική αποδοτικότητα είναι πια μια γνωστή σταθερά και εμφανίζονται τα ζητούμενα περιθώρια στην εξίσωση.



Εικόνα 26: Γραφική διάκριση μεταξύ των μοντέλων CCR (CRS) και BCC (VRS) της μεθόδου DEA (Πηγή: Azadeh et al., 2007)

Πιο αναλυτικά, αφού βρεθεί η θ για την εκάστοτε εξεταζόμενη DMU στην επόμενη φάση επιλύεται το ακόλουθο μοντέλο προσανατολισμένο στις εισόδους:

$$\text{Αντικειμενική συνάρτηση } \text{Min } \theta^* - \varepsilon[\sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{r=1}^s S_r^+]$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} = \theta^* x_{ij0} - S_i^- \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} = S_r^+ + y_{rj0} \quad r = 1, \dots, s$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n, S_i^-, S_r^+ \geq 0 \forall i \text{ και } r$$

Στη δεύτερη φάση δηλαδή, η θ θεωρείται ως μια σταθερά, έστω θ^* , και το μοντέλο ελαχιστοποιεί τη διαφορά μεταξύ της θ^* και των slacks (S_i^-, S_r^+) ή με άλλα λόγια μεγιστοποιεί το άθροισμα των slacks. Αν μετά την επίλυση του μοντέλου το ένα από τα δύο περιθώρια είναι θετικό, τότε είτε μια εισροή είτε μια εκροή (ανάλογα με το ποιο περιθώριο είναι θετικό) μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω. Σημειώνεται ότι στη βέλτιστη λύση του παραπάνω μοντέλου έχουμε $\theta^*=1$.

Αν $\theta^*=1$ και $S_i^- = 0, i = 1, \dots, m, S_r^+ = 0, r = 1, \dots, s$ τότε και μόνο τότε η εξεταζόμενη DMU είναι αποδοτική με σχετική αποδοτικότητα ίση με θ^* , επειδή το μοντέλο κατά την επίλυσή του δε μπόρεσε να βρει κάποιο άλλο σημείο το οποίο να βελτιώνει κάποια εισροή ή κάποια εκροή της DMU χωρίς να επηρεάζει τα επίπεδα των άλλων εισροών ή εκροών. Στην περίπτωση αυτή, η DMU βρίσκεται πάνω στην καμπύλη VRS της Εικόνας 26.

Παρόμοιο είναι και το μοντέλο που δημιουργείται στη δεύτερη φάση όταν το πρόβλημα είναι προσανατολισμένο στις εξόδους. Η διαφορά είναι ότι σε αυτή την

περίπτωση αρχικά μεγιστοποιείται το θ και στη συνέχεια τίθεται ως γνωστή σταθερά στη δεύτερη φάση του προβλήματος:

$$\text{Αντικειμενική συνάρτηση } \text{Max } \theta^* + \varepsilon[\sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{r=1}^s S_r^+]$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} = x_{ij0} - S_i^- \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} = S_r^+ + \theta^* y_{rj0} \quad r = 1, \dots, s$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n, S_i^-, S_r^+ \geq 0 \forall i \text{ και } r$$

Στη δεύτερη φάση δηλαδή, η θ θεωρείται ως μια σταθερά, έστω θ^* , και το μοντέλο μεγιστοποιεί το άθροισμα των slacks. Αν μετά την επίλυση του μοντέλου το ένα από τα δύο περιθώρια είναι θετικό, τότε είτε μια εισροή είτε μια εκροή (ανάλογα με το ποιο περιθώριο είναι θετικό) μπορεί να βελτιωθεί περαιτέρω. Σημειώνεται ότι στη βέλτιστη λύση του παραπάνω μοντέλου έχουμε $\theta^* \geq 1$. Επίσης, εξ ορισμού, η τεχνική αποδοτικότητα μιας μονάδας DMU είναι ίση με $1/\theta^*$.

Στην παρούσα Διπλωματική εργασία επιλέχθηκε το μοντέλο BCC δύο φάσεων (2-phase BCC) που περιγράφηκε βάσει του Thanassoulis (2001) ώστε να γίνει περαιτέρω εξέταση μεταξύ των αποδοτικών μονάδων και να βρεθούν εκείνες που επιδέχονται βελτίωση.

6 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Η ευρεία διάδοση της μεθόδου Data Envelopment Analysis δεν θα μπορούσε να αφήσει ανεπηρέαστο τον τομέα των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας. Η εφαρμογή της στη συγκριτική αξιολόγηση διαφόρων χαρακτηριστικών μεγεθών, που παίζουν σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από Ανανεώσιμες Πηγές, συμβάλλει στην εξαγωγή ιδιαίτερα χρήσιμων συμπερασμάτων. Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εφαρμογής της μεθόδου στον συγκεκριμένο τομέα και ειδικά στην Αιολική Ενέργεια παρουσιάζονται στη συνέχεια.

Ο χαρακτηρισμός της αιολικής ενέργειας ως της πιο αποδοτικής μορφής Ανανεώσιμης Πηγής Ενέργειας στην παραγωγή ηλεκτρισμού μεταξύ της ηλιακής, της θερμοηλεκτρικής, της βιομάζας και άλλων μορφών, επιβεβαιώνεται από τον San Cristóbal (2011). Η έρευνα έγινε με στοιχεία 13 εγκαταστάσεων από την Ισπανία με δυναμικότητες από 10 ως 50 MW. Μέσω της ανάπτυξης ενός μεθοδολογικού πλαισίου βασισμένο στη DEA (Iribarren et al., 2014) είναι δυνατό να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τον κύκλο ζωής μιας μονάδας λήψης απόφασης, η οποία στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι ένα Αιολικό Πάρκο. Τα αποτελέσματα της συγκριτικής αξιολόγησης 34 Αιολικών Πάρκων στις Η.Π.Α. με χρήση της μεθόδου DEA και προσανατολισμό στις εξόδους (Saglam, 2017), δείχνουν ότι περισσότερα από τα δύο τρίτα του συνόλου των πάρκων λειτουργούν αρκετά αποδοτικά αλλά μόνο τα πέντε από αυτά χαρακτηρίζονται ως 100% αποδοτικά. Επίσης, τονίζεται η δυσανάλογη σχέση μεταξύ κόστους εγκατάστασης και επιπέδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των παλαιότερων πάρκων, με το κόστος να φτάνει σε υψηλά επίπεδα και την παραγωγή να κυμαίνεται σε ιδιαίτερα χαμηλά. Την πρώτη θέση, από τη σκοπιά των κυβερνητικών επενδύσεων, μεταξύ της ηλιακής ενέργειας και της περίπτωσης των κυψελών καυσίμου καταλαμβάνει η Αιολική Ενέργεια. Τα αποτελέσματα εξήχθησαν με τη βοήθεια της μεθόδου DEA και αφορούν την περιοχή της Νότιας Κορέας (Kim et al., 2015). Η ανάλυση του τομέα της αιολικής ενέργειας και ειδικά της χρηματοδότησης των σχετικών επενδύσεων στην Κίνα κατά τη διάρκεια των ετών 2008-2012 (Liu et al., 2015), έδειξε καταρχάς ότι η απόδοση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έφτασε στο ανώτατο επίπεδό της το 2012. Η απόδοση, όμως, της βιομηχανίας παραγωγής ανεμογεννητριών παρ' όλο που έφτασε στα υψηλότερα επίπεδα το 2009 και το 2010, άρχισε να μειώνεται από το 2011, γεγονός που οδήγησε στο συμπέρασμα της απουσίας “συγχρονισμού” μεταξύ αυτής

και της παραγωγής ενέργειας. Μία όχι τόσο υποστηρικτική έρευνα έναντι της αιολικής ενέργειας διεξήχθη στη Βραζιλία (Lins, 2012). Πιο συγκεκριμένα, έπειτα από σύγκριση μεταξύ αιολικής, ηλιακής και άλλων Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας από περιβαλλοντική, κοινωνική και οικονομική σκοπιά, η έρευνα προτείνει να δοθεί προτεραιότητα από μεριάς κυβέρνησης στην ανάπτυξη των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν στερεά απόβλητα για παραγωγή ενέργειας. Σε άλλη μελέτη που αφορά την Ισπανία, έγινε συνδυασμός της μεθόδου DEA με την ανάλυση του κύκλου ζωής ενός Αιολικού Πάρκου (Iribarren et al., 2013). Έγινε σύγκριση 25 Αιολικών Πάρκων, από τα οποία τελικά χαρακτηρίστηκαν ως αποδοτικά τα 4. Επίσης, βρέθηκε ότι είναι δυνατή η μείωση κατά 19-45% του μέσου όρου κατανάλωσης ορισμένων εισροών κατά την ανακατασκευή ή την αντικατάσταση των παλιότερων Αιολικών Πάρκων. Η συγκεκριμένη μείωση της κατανάλωσης εισροών έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου κατά 18-29%.

Αντικείμενο μελέτης των τελευταίων ετών χάρη στην ιδιαίτερα ταχύτατη ανάπτυξή τους αποτελούν τα υπεράκτια Αιολικά Πάρκα, ειδικά στην περιοχή της βορειοδυτικής Ευρώπης. Σύμφωνα με έρευνα που διεξήχθη στην προαναφερθείσα περιοχή συμπεριλαμβάνοντας 71 υπεράκτια Αιολικά Πάρκα και βασισμένη στη μέθοδο DEA, η μέση τιμή της σχετικής αποδοτικότητας όλων των εξεταζόμενων πάρκων είναι 87%. Το γεγονός αυτό ενισχύει ακόμα περισσότερη την άποψη ότι τα υπεράκτια Αιολικά Πάρκα αποτελούν τα τελευταία χρόνια, αλλά θα αποτελέσουν και στο μέλλον την αιχμή του δόρατος στο κομμάτι της αιολικής ενέργειας (Akbari et al., 2020). Ενδιαφέρον παρουσιάζει επίσης συγκεκριμένη έρευνα βάσει της οποίας υπολογίζεται η σχετική αποδοτικότητα των Αιολικών Πάρκων ως προς το αρχικό κεφάλαιο της επένδυσης και το λειτουργικό κόστος τους χρησιμοποιώντας ως εισροές και εκροές ορισμένα σημαντικά χαρακτηριστικά τους. Μέσω αυτής εξάγονται συμπεράσματα που συμβάλλουν στην επιλογή βέλτιστων πρακτικών αναφορικά με το αρχικό κεφάλαιο και το λειτουργικό κόστος της επένδυσης (Ederer, 2015).

7 Εφαρμογή μεθόδου DEA για την αξιολόγηση Αιολικών Πάρκων

7.1 Μεθοδολογία έρευνας

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για την εκπόνηση της παρούσας Διπλωματικής εργασίας περιλάμβανε συλλογή των δεδομένων προς επεξεργασία σε συνεννόηση με την ιδιοκτήτρια εταιρεία, αναζήτηση βιβλιογραφικών πηγών στο διαδίκτυο όπως διπλωματικές εργασίες, δημοσιευμένα άρθρα σε ελληνικά περιοδικά, δημοσιευμένα ξενόγλωσσα άρθρα σε επιστημονικά περιοδικά, σημειώσεις μαθημάτων, παρουσιάσεις διδασκόντων σε ελληνικά Πανεπιστήμια καθώς και συζητήσεις τόσο με τον επιβλέποντα καθηγητή όσο και με συναδέλφους από τον χώρο εργασίας.

7.2 Δείγμα έρευνας

Το δείγμα που επιλέχθηκε για την εκπόνηση της έρευνας είναι 16 Αιολικά Πάρκα, εγκατεστημένα σε διάφορες περιοχές της ελληνικής επικράτειας. Τα βασικά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων πάρκων είναι ίδια, όπως οι βασικές αρχές λειτουργίας τους, ο τύπος των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών, ο τρόπος σύνδεσης μεταξύ τους αλλά και με το κτίριο ελέγχου και τον υποσταθμό ανύψωσης τάσης. Τα χαρακτηριστικά στα οποία διαφέρουν είναι η τοποθεσία του Αιολικού Πάρκου, με άμεσο επακόλουθο την υψομετρική διαφορά, τη διαφορά στο αιολικό δυναμικό της περιοχής, στη μορφολογία εδάφους, στη χρονολογία κατασκευής των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών στο εκάστοτε πάρκο (νεότερη τεχνολογία πιθανόν να επιδρά θετικά αυξάνοντας την απόδοση της ανεμογεννήτριας), στα τεχνικά χαρακτηριστικά των ανεμογεννητριών όπως η διάμετρος της έλικας, το ύψος της ανεμογεννήτριας και φυσικά στη κατασκευάστρια εταιρεία των ανεμογεννητριών.

Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν για τα 16 Αιολικά Πάρκα είναι μηνιαία και αφορούν το έτος 2019. Η συγκεκριμένη περίοδος επιλέχθηκε γιατί ήταν η τελευταία ολοκληρωμένη περίοδος (ένα έτος) πριν την έναρξη εκπόνησης της Διπλωματικής εργασίας. Με την επεξεργασία των μηνιαίων δεδομένων ενός ολόκληρου έτους, τα συμπεράσματα που εξάγονται περιγράφουν καλύτερα την γενική εικόνα των Αιολικών Πάρκων.

7.3 Δεδομένα εισόδου – εξόδου

Τα δεδομένα εισόδου και εξόδου που επιλέχθηκαν είναι ίδια για όλα τα Αιολικά Πάρκα. Χωρίστηκαν σε δύο κατηγορίες, εισόδου (inputs) και εξόδου (outputs):

Πίνακας 2: Inputs-Outputs σεναρίων αξιολόγησης

	Όνομασία	Μονάδα μέτρησης
Inputs	Ταχύτητα Ανέμου	m/s
	Ιδιοκατανάλωση	kwh
	Απώλειες Ηλεκτρικής Ενέργειας	kwh
Outputs	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	kwh
	Πώληση Ηλεκτρικής Ενέργειας	kwh

Ως *ιδιοκατανάλωση* καλείται το κομμάτι της ενέργειας που καταναλώνουν οι ανεμογεννήτριες από το σύνολο που παράγουν, για να τροφοδοτήσουν τα συστήματα κίνησης και θέρμανσης/ψύξης που διαθέτουν. Όταν δεν λειτουργεί η ανεμογεννήτρια, καταναλώνεται η αντίστοιχη ενέργεια από το δίκτυο μέσης τάσης με το οποίο είναι συνδεδεμένη. Ως *απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας* νοούνται οι απώλειες λόγω των καλωδιώσεων και του μετασχηματιστή υψηλής τάσης με τον οποίο συνδέεται η ανεμογεννήτρια. *Παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας* είναι το σύνολο της ενέργειας που παράγουν οι ανεμογεννήτριες και μετριέται μετά τον μετασχηματιστή που διαθέτουν. *Πώληση ηλεκτρικής ενέργειας* είναι το σύνολο της ενέργειας που διοχετεύεται στο δίκτυο και μετριέται μετά τον μετασχηματιστή υψηλής τάσης.

Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται ορισμένα σημαντικά στατιστικά στοιχεία των αρχικών δεδομένων. Για λόγους εμπιστευτικότητας δεν περιλαμβάνονται τα πηγαία δεδομένα αλλά μόνο τα αποτελέσματα που προκύπτουν έπειτα από την στατιστική ανάλυση και την εφαρμογή του μοντέλου στα σενάρια. Επίσης, παραλείπονται οι ονομασίες των Αιολικών Πάρκων, οι οποίες αντικαθίστανται από τους αριθμούς 1-16.

Σημειώνεται ότι κατά την επίλυση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκε το άθροισμα των μηνιαίων τιμών των δεδομένων για κάθε πάρκο. Επομένως, η στατιστική ανάλυση που παρουσιάζεται στον επόμενο πίνακα καθώς και τα διαγράμματα που ακολουθούν, περιλαμβάνουν όλα τα πάρκα και αναφέρονται στο άθροισμα των μηνιαίων ποσοτήτων του εκάστοτε μεγέθους, δηλαδή στην συνολική ετήσια ποσότητα. Εξαιρέση αποτελεί η ταχύτητα του ανέμου, όπου χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή των μηνών του έτους 2019, καθώς το άθροισμά της δεν έχει φυσικό νόημα.

Πίνακας 3: Στατιστικά στοιχεία δεδομένων για το έτος 2019

	<i>Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>	<i>Πώληση Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>	<i>Ιδιοκατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>	<i>Απώλειες Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>	<i>Ταχύτητα Ανέμου (m/s)</i>
Μέσος	60.212.125	59.041.125	139.437,5	1.229.562,5	7,821818047
Τυπικό σφάλμα	13.242.432	13.065.754,99	48.216,86848	198.250,3461	0,274537994
Διάμεσος	48.495.000	47.626.500	89.500	1.104.500	7,661924375
Μέση απόκλιση τετραγώνου	52.969.727,9	52.263.019,96	192.867,4739	793.001,3845	1,098151977
Διακύμανση	2,8058E+15	2,73142E+15	37.197.862.500	6,28851E+11	1,205937765
Κύρτωση	6,80554591	6,851545842	10,7770373	1,428138494	-0,612003943
Ασυμμετρία	2,3394117	2,347293878	3,064363504	1,173984157	0,086132905
Εύρος	213.952.000	211.172.000	802.000	3.060.000	4,00148875
Ελάχιστο	14.987.000	14.531.000	6.000	175.000	5,7279425
Μέγιστο	228.939.000	225.703.000	808.000	3.235.000	9,72943125
Άθροισμα	963.394.000	944.658.000	2.231.000	19.673.000	125,1490888
Πλήθος	16	16	16	16	16

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ο πίνακας συσχέτισης των δεδομένων.

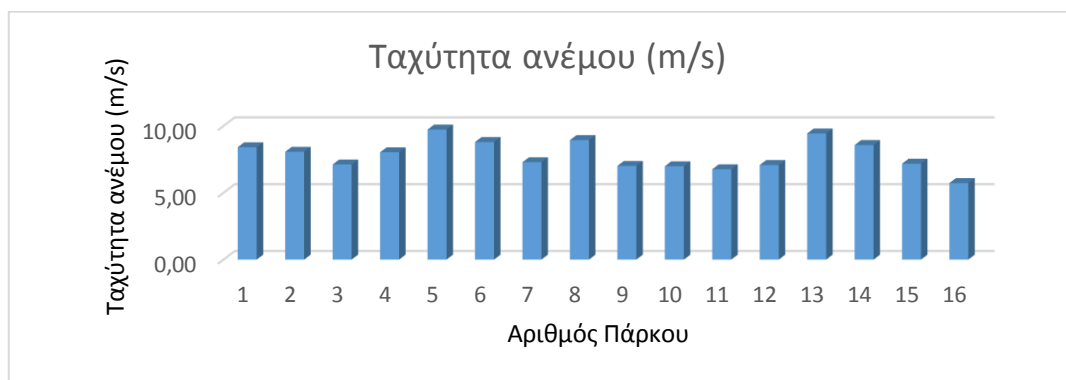
Πίνακας 4: Αποτελέσματα συσχέτισης δεδομένων

	<i>Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>	<i>Πώληση Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>	<i>Ιδιοκατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>	<i>Απώλειες Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>
<i>Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>	1			
<i>Πώληση Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>	0,99996742	1		
<i>Ιδιοκατανάλωση Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>	0,96843058	0,968271388	1	
<i>Απώλειες Ηλεκτρικής Ενέργειας (kwh)</i>	0,82513721	0,82117947	0,821580849	1

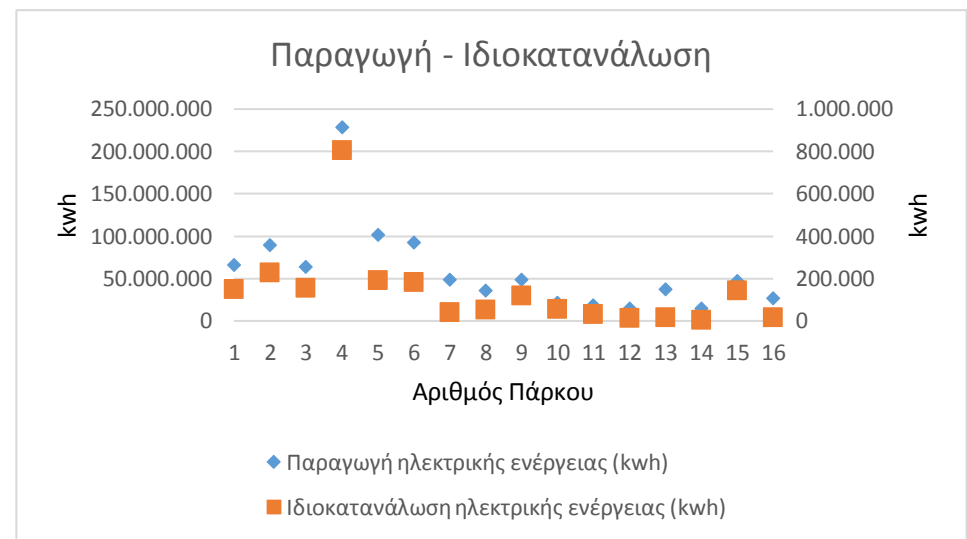
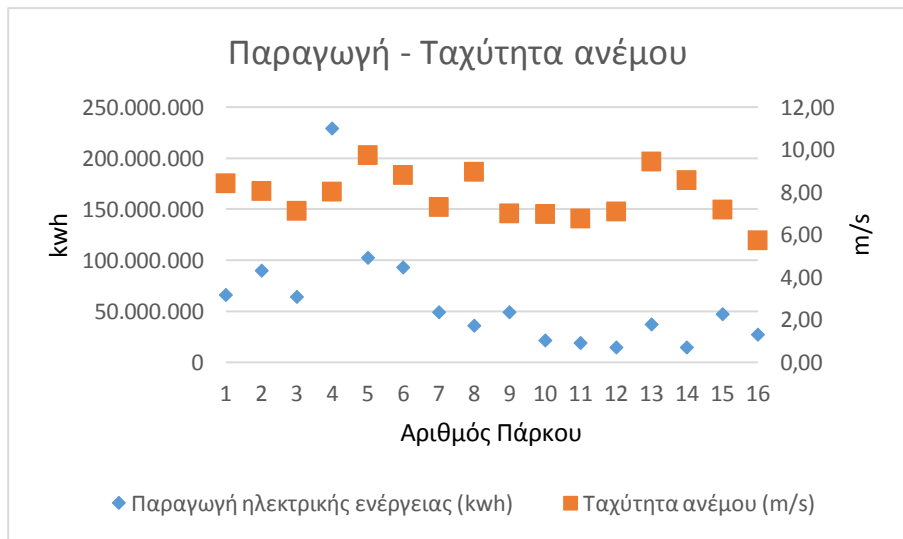
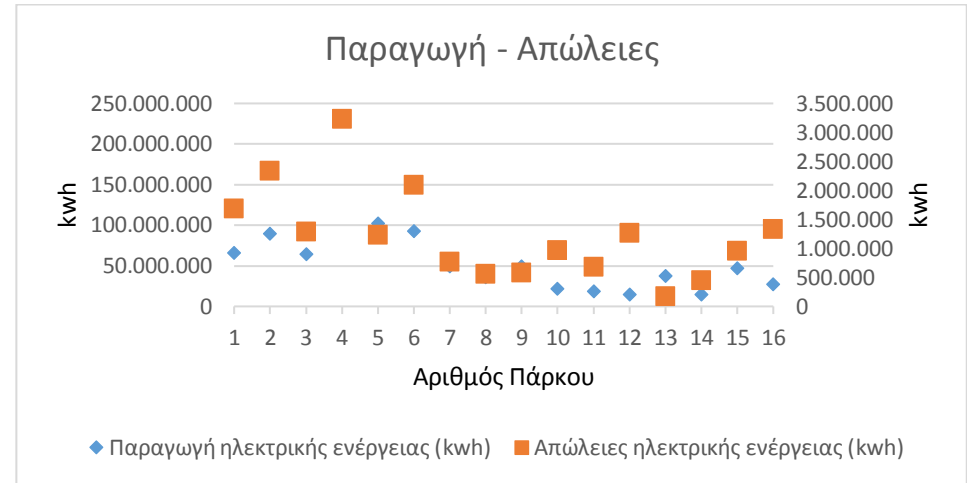
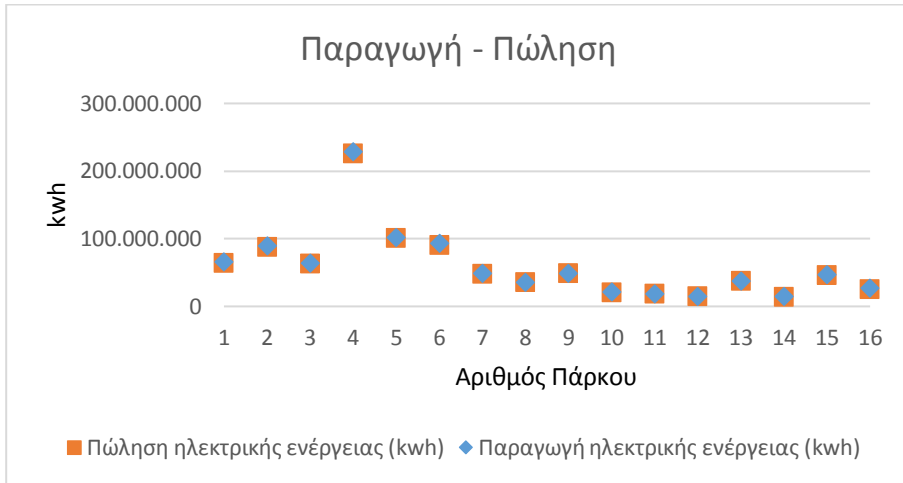
Όπως φαίνεται από τον παραπάνω πίνακα, μεταξύ των δεδομένων εισόδου, της παραγωγής και της πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχει μεγάλη συσχέτιση (>99.99%). Για τον λόγο αυτό, επιλέχθηκε να μην συμπεριληφθούν τα δεδομένα της πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά την εφαρμογή του μοντέλου στα διάφορα σενάρια, αλλά να γίνει χρήση μόνο των δεδομένων που αφορούν την παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στα διαγράμματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αθροίσματα των μηνιαίων δεδομένων κάθε πάρκου, εκτός από το διάγραμμα της ταχύτητας του ανέμου, στο οποίο παρουσιάζεται η ετήσια μέση τιμή του μεγέθους. Επίσης, στην επόμενη ομάδα διαγραμμάτων, παρουσιάζονται οι συσχετίσεις μεταξύ των δεδομένων.

Πίνακας 5: Διαγράμματα χρησιμοποιούμενων δεδομένων



Πίνακας 6: Συσχέτιση δεδομένων



Σύμφωνα με τον Πίνακα 6, το διάγραμμα παραγωγής – πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας επιβεβαιώνει τη μεγάλη συσχέτιση μεταξύ των δύο δεδομένων. Το διάγραμμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας – ταχύτητας ανέμου σκιαγραφεί την – αναμενόμενη – εξάρτηση της παραγωγής από την ταχύτητα του ανέμου.

Υπάρχουν όμως και περιπτώσεις πάρκων στις οποίες η σχέση αυτή δεν είναι η προσδοκώμενη εξαιτίας παραγόντων όπως τα τεχνικά χαρακτηριστικά ανεμογεννητριών, η χρησιμοποιούμενη τεχνολογία που είναι άμεσα συνυφασμένη με το έτος κατασκευής του πάρκου, καθώς και διάφορα γεωμορφολογικά χαρακτηριστικά της περιοχής. Δύο χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα πάρκα 4 και 5: Το πάρκο 5 αν και βρίσκεται εγκατεστημένο σε περιοχή με υψηλότερη μέση τιμή ταχύτητας ανέμου παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ότι το πάρκο 4, το οποίο πετυχαίνει υψηλότερη τιμή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με μικρότερη μέση τιμή ταχύτητας ανέμου.

Στα δύο επόμενα διαγράμματα του Πίνακα 6, παραγωγή – απώλειες και παραγωγή – ιδιοκατανάλωση, τα μεγέθη παρουσιάζουν σχετικά μεγάλη συσχέτιση, χωρίς να απουσιάζουν οι εξαιρέσεις, όπως τα πάρκα 5 και 6 στην περίπτωση του διαγράμματος παραγωγής – απωλειών: Το πάρκο 5 με μεγαλύτερη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει μικρότερες απώλειες από το πάρκο 6 που αν και χαρακτηρίζεται από χαμηλότερη ετήσια αθροιστική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας παρουσιάζει μεγαλύτερα επίπεδα απωλειών.

7.4 Μεθοδολογία επίλυσης μοντέλου

Κατά την αξιολόγηση των 16 Αιολικών Πάρκων με τη μέθοδο DEA εξετάστηκαν 7 διαφορετικά σενάρια, καθένα με διαφορετικό συνδυασμό δεδομένων εισόδου-εξόδου. Τα σενάρια και τα δεδομένα τους παρουσιάζονται στον ακόλουθο πίνακα:

Πίνακας 7: Εξεταζόμενα σενάρια

Σενάριο	Δεδομένα εισόδου	Δεδομένα εξόδου	Στόχος
1	Ταχύτητα ανέμου	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Output oriented
2α	Ιδιοκατανάλωση Απώλειες	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Output oriented
2β	Απώλειες	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Output oriented
2γ	Ιδιοκατανάλωση	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Output oriented
3α	Ιδιοκατανάλωση Απώλειες	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Input oriented
3β	Ιδιοκατανάλωση	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Input oriented
3γ	Απώλειες	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Input oriented

Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας χρησιμοποιήθηκε το εργαλείο Solver του προγράμματος Microsoft Excel. Ο αλγόριθμος γραμμικών προγραμμάτων τον οποίο χρησιμοποιεί το εργαλείο Solver βασίζεται στη μέθοδο simplex. Η συγκεκριμένη μέθοδος είναι μια συστηματική μέθοδος επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού οποιουδήποτε μεγέθους, η οποία ανακαλύφθηκε το 1947 από τον G.B. Dantzig (Βαρδαλής, 2007). Για κάθε σενάριο ξεχωριστά εισήχθησαν σε φύλλο εργασίας του Microsoft Excel τα προς επεξεργασία δεδομένα. Η ανάλυσή τους βασίζεται στο μοντέλο BCC (VRS), το οποίο αναπτύχθηκε αναλυτικά στα κελιά του φύλλου εργασίας. Το μοντέλο BCC (VRS) επιτρέπει μη ανάλογη μεταβολή στις εξόδους από ότι συμβαίνει στις εισόδους και το αντίστροφο. Αποτελείται από δύο φάσεις, οι οποίες εκτείνονται σε δύο φύλλα του Excel, προκειμένου να διαχωρίζονται με εμφανή τρόπο τα αποτελέσματα που επιδιώκει να εξάγει η κάθε φάση. Οι στόχοι και τα περιεχόμενα κάθε φάσης αναλύονται παρακάτω.

Πρώτη φάση

Στόχος κατά την πρώτη φάση, είναι η εύρεση της τιμής της μεταβλητής θ , η οποία εκφράζει για τη σύνθετη μονάδα το μέγιστο ποσοστό κατανάλωσης των εισροών της αξιολογούμενης ή το μέγιστο ποσοστό παραγωγής εκροών της

αξιολογούμενης, αντίστοιχα. Τα Αιολικά Πάρκα των οποίων η μεταβλητή θ είναι ίση με τη μονάδα χαρακτηρίζονται ως τεχνικά αποδοτικά πάρκα (technical efficient parks) και εισάγονται προς περαιτέρω διερεύνηση στη δεύτερη φάση. Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί του κάθε σεναρίου έχουν αναλυθεί στο Κεφάλαιο 5.6. Για διευκόλυνση, παρουσιάζονται στη συνέχεια:

Προσανατολισμένο στις εισροές

Αντικειμενική συνάρτηση $Min \theta$

$$\text{s.t. } \theta x_{io} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}, \quad i = 1, \dots, m,$$

$$y_{ro} \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}, \quad r = 1, \dots, s,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

Προσανατολισμένο στις εκροές

Αντικειμενική συνάρτηση $Max \theta$

$$\text{s.t. } x_{io} \geq \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij}, \quad i = 1, \dots, m,$$

$$\theta y_{ro} \leq \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj}, \quad r = 1, \dots, s,$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n$$

Υπενθυμίζεται ότι υπάρχουν n DMUs ($j=1, \dots, n$) που η καθεμία έχει m εισόδους ($X_{1j}, X_{2j}, \dots, X_{mj}$) και s εξόδους ($y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{sj}$). Επίσης, ο περιορισμός $\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1$ καθορίζει ότι το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας είναι ίσο με τη μονάδα.

Δεύτερη φάση

Στόχος κατά την δεύτερη φάση είναι η εύρεση πιθανών mix inefficient μονάδων μέσω του υπολογισμού των τιμών των περιθωρίων (slacks). Όσα Αιολικά Πάρκα βρέθηκαν κατά την πρώτη φάση να έχουν $\theta=1$ εισάγονται στη δεύτερη φάση. Πλέον η θ θεωρείται σταθερή και ίση με τη μονάδα. Ως τιμές των συντελεστών

βαρύτητας των Αιολικών Πάρκων τίθενται οι τιμές των συντελεστών που προκύπτουν από την πρώτη φάση. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι πλέον το άθροισμα των περιθωρίων (slacks), του οποίου επιχειρείται μεγιστοποίηση. Όσα Αιολικά Πάρκα παρουσιάζουν, μετά την δεύτερη φάση, μηδενικά περιθώρια τότε και μόνο τότε θεωρούνται πλήρως αποδοτικά, συγκρινόμενα πάντα με το σύνολο των υπολοίπων πάρκων. Υπάρχει η πιθανότητα ένα πάρκο το οποίο κατά την πρώτη φάση έχει $\theta=1$ όταν επιλυθεί το μοντέλο κατά τη δεύτερη φάση τα περιθώριά του να μην είναι μηδενικά με αποτέλεσμα να χαρακτηρίζεται τελικά ως μη αποδοτικό. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει κάποιο άλλο πάρκο το οποίο, όπως χαρακτηριστικά αναφέρεται στη βιβλιογραφία, “κυριαρχεί” έναντι του πρώτου.

Η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί του κάθε σεναρίου έχουν αναλυθεί στο Κεφάλαιο 5.6. Για διευκόλυνση, παρουσιάζονται στη συνέχεια:

Μοντέλο προσανατολισμένο στις εισροές

$$\text{Αντικειμενική συνάρτηση } \text{Min } \theta^* - \varepsilon[\sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{r=1}^s S_r^+]$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} = \theta^* x_{ij0} - S_i^- \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} = S_r^+ + y_{rj0} \quad r = 1, \dots, s$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n, S_i^-, S_r^+ \geq 0 \forall i \text{ και } r$$

Μοντέλο προσανατολισμένο στις εκροές

$$\text{Αντικειμενική συνάρτηση } \text{Max } \theta^* + \varepsilon[\sum_{i=1}^m S_i^- + \sum_{r=1}^s S_r^+]$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} = x_{ij0} - S_i^- \quad i = 1, \dots, m$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} = S_r^+ + \theta^* y_{rj0} \quad r = 1, \dots, s$$

$$\lambda_j \geq 0 \quad j = 1, \dots, n, S_i^-, S_r^+ \geq 0 \forall i \text{ και } r$$

Υπενθυμίζεται ότι η θ η οποία θεωρείται ως μια σταθερά στη δεύτερη φάση συμβολίζεται με θ^* και τα περιθώρια (slacks) με S_i^-, S_r^+ .

8 Ανάλυση αποτελεσμάτων αξιολόγησης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της μεθόδου DEA σε κάθε σενάριο και για κάθε Αιολικό Πάρκο. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται συγκεντρωτικοί πίνακες και διαγράμματα που προκύπτουν κατά την επίλυση του μοντέλου στο Microsoft Excel και αναφέρονται - σχολιάζονται τα κυριότερα σημεία των αποτελεσμάτων, τα οποία θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμα στα διοικητικά στελέχη της ιδιοκτήτριας εταιρείας. Επισημαίνεται ότι οι προτάσεις βελτίωσης που εξάγονται μέσω της μεθόδου δεν είναι πάντα εφικτές. Για παράδειγμα, μπορεί η μέθοδος να υποδεικνύει την αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ενός Αιολικού Πάρκου κατά ένα υπερβολικό ποσοστό, το οποίο να μην μπορεί να επιτευχθεί παρά μόνο με αντικατάσταση του συνόλου των ανεμογεννητριών με νεότερες, πιο εξελιγμένες.

Στο Κεφάλαιο 8.8 παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα όλων των σεναρίων που εξετάζονται.

8.1 Σενάριο 1

Σενάριο	Δεδομένα εισόδου	Δεδομένα εξόδου	Στόχος
1	Ταχύτητα ανέμου	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Output oriented

Τα αποτελέσματα της επίλυσης του μοντέλου για κάθε Αιολικό Πάρκο κατά την πρώτη φάση του Σεναρίου 1 φαίνονται στους ακόλουθους πίνακες, σχήματα και εικόνες. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 14 παρουσιάζονται ποιοτικά οι τιμές που παίρνει η μεταβλητή θ μετά την ανάλυση που λαμβάνει χώρα για κάθε Αιολικό Πάρκο. Από το σύνολο των πάρκων, το 4 και το 16 είναι αυτά που χαρακτηρίζονται, στην πρώτη φάση, ως τα πιο αποδοτικά, συγκρινόμενα πάντα με το σύνολο, καθώς $\theta=1$. Τα υπόλοιπα έχουν $\theta>1$, γεγονός αναμενόμενο καθώς το συγκεκριμένο σενάριο είναι προσανατολισμένο στις εκροές.

Στον Πίνακα 8 παρατίθενται οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας όλων των Αιολικών Πάρκων καθώς και οι τιμές της μεταβλητής θ . Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται τα Αιολικά Πάρκα που χαρακτηρίζονται ως αποδοτικά κατά την πρώτη

φάση. Ο χαρακτηρισμός των συγκεκριμένων ως αποδοτικά πρόκειται να διερευνηθεί περαιτέρω και να επαληθευθεί ή να απορριφθεί κατά τη δεύτερη φάση που ακολουθεί.

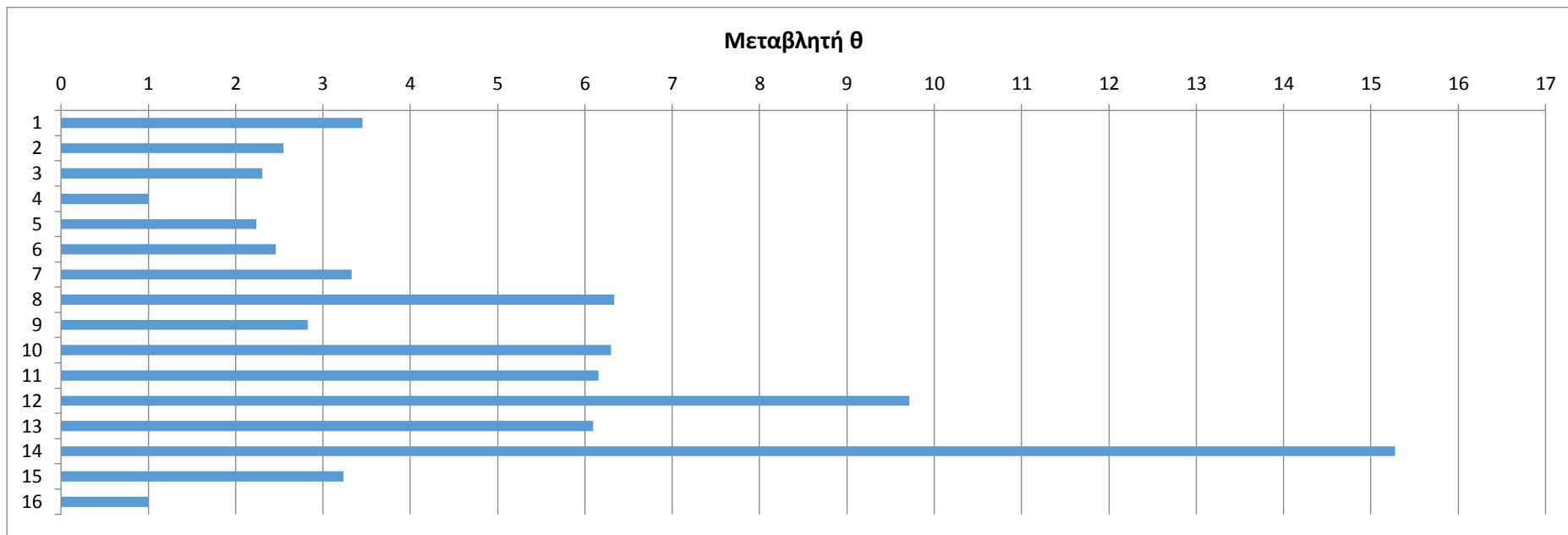
Οι συντελεστές βαρύτητας των μη αποδοτικών Αιολικών Πάρκων συμβάλλουν στον καθορισμό του στόχου βελτίωσης καθενός από αυτά. Στην περίπτωση ενός μη αποδοτικού πάρκου, από το γινόμενο των συντελεστών βαρύτητας των υπολοίπων πάρκων με τα αντίστοιχα δεδομένα εκροών τους, δηλαδή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας του καθενός, προκύπτει μια τιμή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας η οποία τίθεται ως στόχος. Το εξεταζόμενο μη αποδοτικό Αιολικό Πάρκο θα πρέπει να θέσει ως στόχο του και να τον πετύχει την συγκεκριμένη τιμή παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ώστε να μετατραπεί σε αποδοτικό. Για παράδειγμα, εξετάζοντας την περίπτωση του μη αποδοτικού πάρκου 1, η ετήσια πραγματική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας είναι της τάξης των 66.286.000 kWh. Βάσει των αποτελεσμάτων της ανάλυσης, η προηγούμενη τιμή θα πρέπει να αυξηθεί σε 228.939.000 kWh, δηλαδή να υποστεί αύξηση κατά 245,38%, προκειμένου το εν λόγω πάρκο να χαρακτηριστεί ως αποδοτικό. Τα ποσοστά-στόχοι όλων των πάρκων παρουσιάζονται στον Πίνακα 9. Υπενθυμίζεται ότι η τιμή των 66.286.000 kWh προκύπτει από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν ενώ η τιμή 228.939.000 kWh είναι το γινόμενο των συντελεστών βαρύτητας των πάρκων, που προκύπτουν από την επίλυση του μοντέλου, με τις αντίστοιχες τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας των πάρκων. Με τη μέση τιμή των ποσοστών του Πίνακα 9 να είναι της τάξης του 364,17%, είναι φανερό ότι οι αλλαγές που πρέπει να επέλθουν, γενικά, πρέπει να είναι πολύ μεγάλες ώστε να μετατραπούν τα μη αποδοτικά πάρκα σε αποδοτικά.

Παρατηρώντας την πρώτη γραμμή του Πίνακα 8, μόνο ο συντελεστής βαρύτητας του πάρκου 4 έχει μη μηδενική τιμή και συγκεκριμένα ίση με τη μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι το πάρκο 4 καθίσταται ως πάρκο-στόχος του πάρκου 1, δηλαδή το πάρκο 1 θα πρέπει να “μιμηθεί” τη συμπεριφορά του πάρκου 4, όσον αφορά την εκροή του, ώστε να καταστεί αποδοτικό. Η “μίμηση” αφορά μόνο την εκροή του πάρκου καθώς μόνο εκείνη επιδέχεται βελτίωση (αύξηση), μιας και η εισροή στο συγκεκριμένο σενάριο είναι η ταχύτητα του ανέμου που είναι μη ελεγχόμενη. Επομένως, θα πρέπει να διερευνηθούν τρόποι αύξησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα μη αποδοτικά πάρκα καθώς η μετρούμενη ταχύτητα του ανέμου είναι έμμεσο αποτέλεσμα της θέσης εγκατάστασης του Αιολικού Πάρκου και δεν αλλάζει.

Η εκροή, δηλαδή η ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μπορεί να βελτιωθεί με παρεμβάσεις τεχνικής φύσης, όπως η διαμόρφωση κατάλληλης διαδικασίας παρακολούθησης των ενεργειακών μεγεθών του πάρκου με ιδιαίτερη εστίαση στην παραγωγή ενέργειας, η συνεργασία με τις προμηθεύτριες εταιρείες για την καλύτερη παρακολούθηση της ακρίβειας του ανεμομέτρου καθώς και η τακτική βαθμονόμησή του.

Στο Σχήμα 15 φαίνεται ποιοτικά η σχέση μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της εξεταζόμενης μονάδας και της σύνθετης μονάδας. Στις περιπτώσεις των αποδοτικών πάρκων 4 και 16 οι αντίστοιχες στήλες είναι στο ίδιο επίπεδο. Τα εν λόγω πάρκα, 4 και 16, χαρακτηρίζονται ως πάρκα-στόχοι για τη βελτίωση των υπολοίπων μη αποδοτικών 15 και 7 φορές, αντίστοιχα.

Στον Πίνακα 10 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης. Τα πάρκα 4 και 16 είναι τα μοναδικά που συμμετέχουν στην επόμενη φάση ώστε να διερευνηθεί το γεγονός της πλήρους αποδοτικότητάς τους. Σύμφωνα με το μοντέλο που παρουσιάστηκε παραπάνω και εφαρμόζεται σε αυτό το στάδιο, προκύπτουν οι τιμές των περιθωρίων (slacks) που φαίνονται στον πίνακα. Οι τιμές αυτές πρακτικά είναι ίσες με το 0, γεγονός που χαρακτηρίζει τα συγκεκριμένα πάρκα ως πλήρως αποδοτικά, συγκρινόμενα πάντα με τα υπόλοιπα πάρκα του δείγματος.



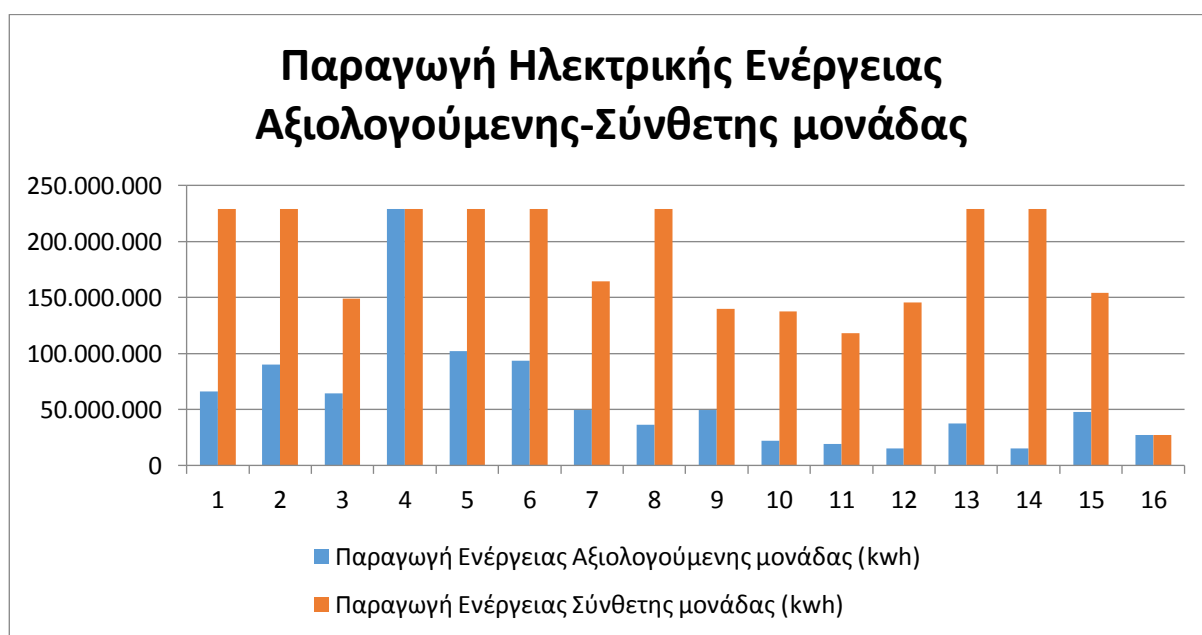
Σχήμα 14: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 1)

Πίνακας 8: Συγκεντρωτικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 1)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	θ
1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,453806234
2	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,545633465
3	0	0	0	0,602981889	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,397018111	2,307432327
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,23842115
5	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,457323487
6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,325932209
7	0	0	0	0,678748153	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,321251847	6,337938099
8	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,826214596
9	0	0	0	0,557102874	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,442897126	6,299821255
10	0	0	0	0,54572901	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,45427099	6,153742323
11	0	0	0	0,448798624	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,551201376	9,715805607
12	0	0	0	0,586792646	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,413207354	6,094151782
13	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15,27583906
14	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,235583864
15	0	0	0	0,629006961	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,370993039	1
16	0	0	0	3,33067E-16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1

Πίνακας 9: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 1)

Στόχος – Αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	
1	245,38%
2	154,56%
3	130,74%
4	0,00%
5	123,84%
6	145,73%
7	232,59%
8	533,79%
9	182,62%
10	529,98%
11	515,37%
12	871,58%
13	509,42%
14	1427,58%
15	223,56%
16	0,00%



Σχήμα 15: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 1)

Πίνακας 10: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 1, Φάση 2)

Αιολικό Πάρκο	Περιθώρια (slacks)	
	S_r^+	S_i^-
4	-5,96046E-08	8,88178E-16
16	2,03307E-07	0

8.2 Σενάριο 2α

Σενάριο	Δεδομένα εισόδου	Δεδομένα εξόδου	Στόχος
2α	Ιδιοκατανάλωση Απώλειες	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Output oriented

Ακολούθως, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα και ορισμένα παρελκόμενά τους από την επίλυση του μοντέλου κατά την πρώτη φάση του Σεναρίου 2α. Πιο συγκεκριμένα, στο Σχήμα 16 παρουσιάζονται ποιοτικά οι τιμές που παίρνει η μεταβλητή θ . Τα πάρκα 4, 5, 7, 13 και 14 είναι αυτά που χαρακτηρίζονται, στην πρώτη φάση, ως τα πιο αποδοτικά, συγκρινόμενα πάντα με τα υπόλοιπα, καθώς $\theta=1$. Τα υπόλοιπα έχουν $\theta>1$, γεγονός αναμενόμενο καθώς το συγκεκριμένο σενάριο, όπως και το προηγούμενο, είναι προσανατολισμένο στις εκροές.

Στον Πίνακα 11 παρουσιάζεται το σύνολο των τιμών των συντελεστών βαρύτητας καθώς και οι τιμές της μεταβλητής θ . Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται τα Αιολικά Πάρκα που χαρακτηρίζονται ως αποδοτικά κατά την πρώτη φάση και πρόκειται να εισαχθούν στο μοντέλο της δεύτερης φάσης για περαιτέρω διερεύνηση.

Όπως αναφέρθηκε και στο Σενάριο 1, οι συντελεστές βαρύτητας των μη αποδοτικών Αιολικών Πάρκων συμβάλλουν στον καθορισμό του στόχου βελτίωσης καθενός από αυτά. Μέσω του γινομένου των συντελεστών βαρύτητας των υπολοίπων πάρκων με τα αντίστοιχα δεδομένα εκροών ή εισροών προκύπτει μια νέα τιμή η οποία τίθεται ως στόχος. Τα ποσοστά-στόχοι όλων των πάρκων, τα οποία παρουσιάζονται στον Πίνακα 12, είναι τα ποσοστά κατά τα οποία πρέπει είτε να αυξηθούν οι τιμές της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είτε να μειωθούν οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας ή οι ιδιοκαταναλώσεις ώστε τα πάρκα να μετατραπούν σε αποδοτικά. Η μέση τιμή των ποσοστών-στόχων της παραγωγής είναι 41,80% ενώ των απωλειών 20,60% γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι γενικά απαιτούνται

μικρότερης έκτασης επεμβάσεις στην εκροή ενός μη αποδοτικού πάρκου ώστε να μετατραπεί αυτό σε αποδοτικό συγκριτικά με το Σενάριο 1. Αυτό βέβαια δεν ισχύει σε περιπτώσεις υψηλών ποσοστών όπως αυτών των πάρκων 10 και 11. Επίσης, το ποσοστό μείωσης των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας είναι σχετικά χαμηλό, χωρίς να απουσιάζουν ακραίες περιπτώσεις όπως αυτή του πάρκου 16, γεγονός που επιτρέπει την επίτευξη του στόχου βελτίωσης της αποδοτικότητας με μικρές επεμβάσεις. Τα ποσοστά των ιδιοκαταναλώσεων είναι όλα μηδενικά, επομένως σε αυτό το σενάριο δεν είναι σκόπιμη η προσπάθεια βελτίωσής τους. Σημειώνεται ότι η βελτίωση πρέπει να γίνει μόνο σε μία εκ των εισροών/εκροών και όχι σε περισσότερες ταυτόχρονα.

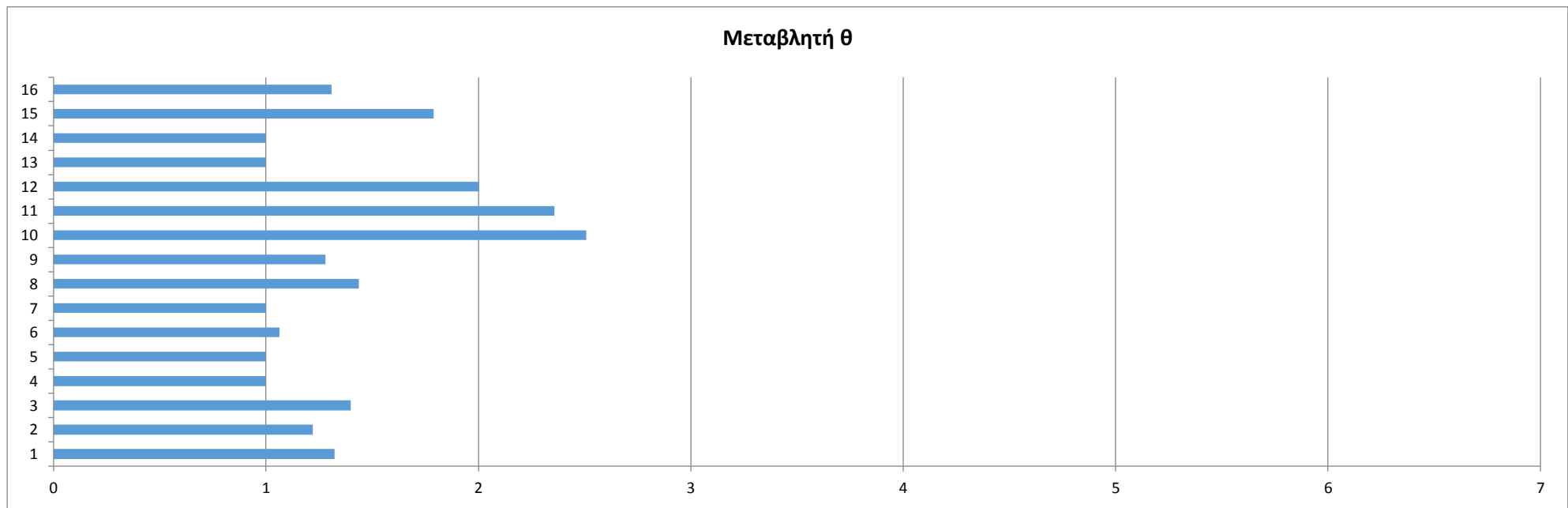
Επομένως, εκτός από τις επεμβάσεις για την αύξηση της παραγωγής που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο σενάριο, μπορούν να γίνουν επεμβάσεις για τη μείωση απωλειών όπως είναι η αλλαγή των καλωδιώσεων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας του Αιολικού Πάρκου με στόχο την εγκατάσταση νέων, που χαρακτηρίζονται από μικρότερες απώλειες. Η συγκεκριμένη αλλαγή κρίνεται ιδιαίτερα δαπανηρή και για το λόγο αυτό θα πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω, από την πλευρά της ιδιοκτήτριας εταιρείας, αν θα είναι συμφέρουσα μακροπρόθεσμα. Σημειώνεται ότι οι τρόποι μείωσης των απωλειών σε Αιολικά Πάρκα είναι αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνών επομένως δεν μπορεί επί του παρόντος να δοθεί τεκμηριωμένη πρόταση.

Παρατηρώντας την πρώτη γραμμή του Πίνακα 11, οι συντελεστές βαρύτητας των πάρκων 5 και 7 έχουν μη αρνητικές τιμές κατά την αξιολόγηση του πάρκου 1. Αυτό σημαίνει ότι τα πάρκα 5 και 7 καθίστανται ως πάρκα-στόχοι του πάρκου 1, δηλαδή το πάρκο 1 θα πρέπει να “μιμηθεί” τη συμπεριφορά των συγκεκριμένων πάρκων, όσον αφορά είτε την εκροή είτε την εισροή του, ώστε να καταστεί αποδοτικό.

Στα Σχήματα 17 και 18 φαίνεται ποιοτικά η σχέση μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της εξεταζόμενης μονάδας και της σύνθετης μονάδας καθώς και η σχέση των απωλειών, αντίστοιχα. Οι στήλες των Αιολικών Πάρκων 4, 5, 7, 13 και 14 είναι στο ίδιο επίπεδο. Η συχνότητα με την οποία τα συγκεκριμένα πάρκα χαρακτηρίζονται ως πάρκα-στόχοι για τη βελτίωση των υπολοίπων μη αποδοτικών είναι η εξής: Την πρώτη θέση κατέχουν τα πάρκα 5 και 13, τα οποία λειτουργούν ως στόχοι 8 φορές, με τα πάρκα 7 και 4 να ακολουθούν και να καθίστανται ως στόχοι 7

και 3 φορές αντίστοιχα, ενώ στην τελευταία θέση βρίσκεται το πάρκο 14 το οποίο “μιμούνται” άλλα πάρκα μόνο 2 φορές.

Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης. Τα αποδοτικά πάρκα της πρώτης φάσης είναι τα μοναδικά που συμμετέχουν. Σύμφωνα με το μοντέλο που παρουσιάστηκε και εφαρμόζεται σε αυτό το στάδιο, προκύπτουν οι τιμές των περιθωρίων (slacks) που φαίνονται στον πίνακα. Οι τιμές αυτές πρακτικά είναι ίσες με το 0, γεγονός που χαρακτηρίζει τα συγκεκριμένα πάρκα ως πλήρως αποδοτικά, συγκρινόμενα πάντα με τα υπόλοιπα πάρκα του δείγματος.



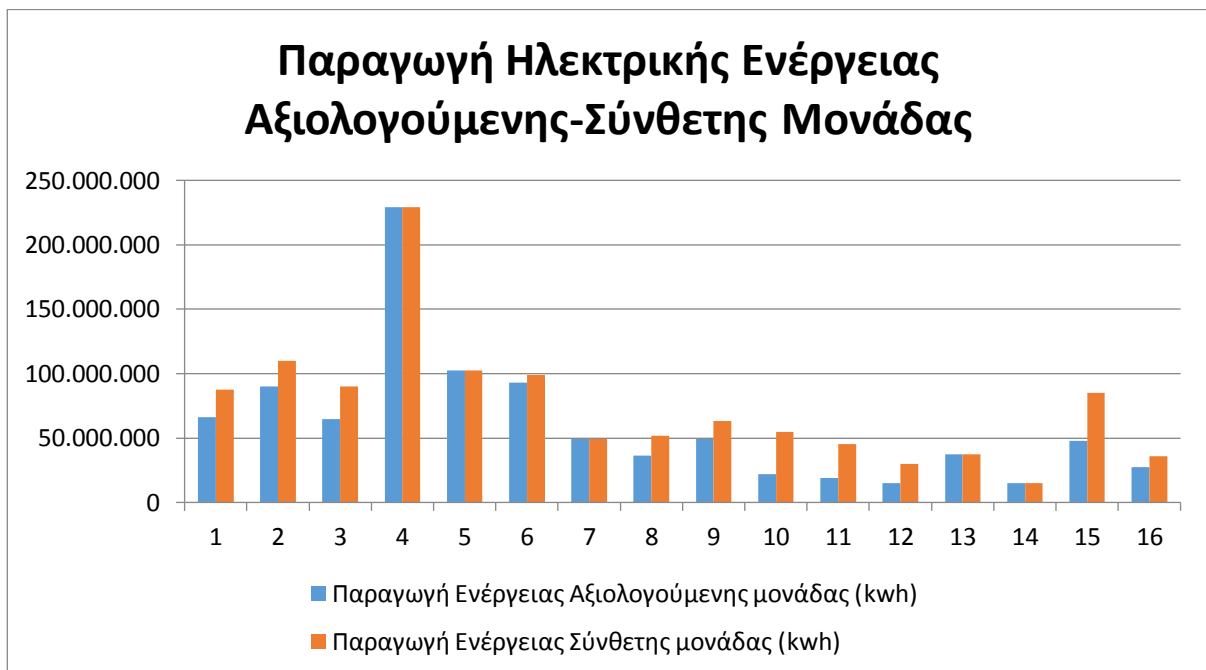
Σχήμα 16: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 2α)

Πίνακας 11: Συγκεντρωτικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 2α)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	θ
1	0	0	0	0	0,7248322	0	0,2751677	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,323278605
2	0	0	0	0,0584415	0,9415584	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,219553502
3	0	0	0	0	0,7718120	0	0,2281879	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,398032658
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	1,11022E-16	1	0	0	0	0	0	0	0	2,22045E-16	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0,93959731	0	0,0604026	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,063482703
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0,1528806	0	0,375951	0	0	0	0	0	0,471168	0	0	0	1,436575778
9	0	0	0	0,1229407	0,0337749	0	0	0	0	0	0	0	0,8432843	0	0	0	1,280893577
10	0	0	0	0	0,1006711	0	0,8993288	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,508537889
11	0	0	0	0	0	0	0,64	0	0	0	0	0	0,36	0	0	0	2,356946708
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,666666	0,3333	0	0	2,004426058
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,22045E-16	1	0	0	1
15	0	0	0	0	0,7339575	0	0,011655	0	0	0	0	0	0,254386	0	0	0	1,788613167
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,916666	0,083	0	0	1,308257262

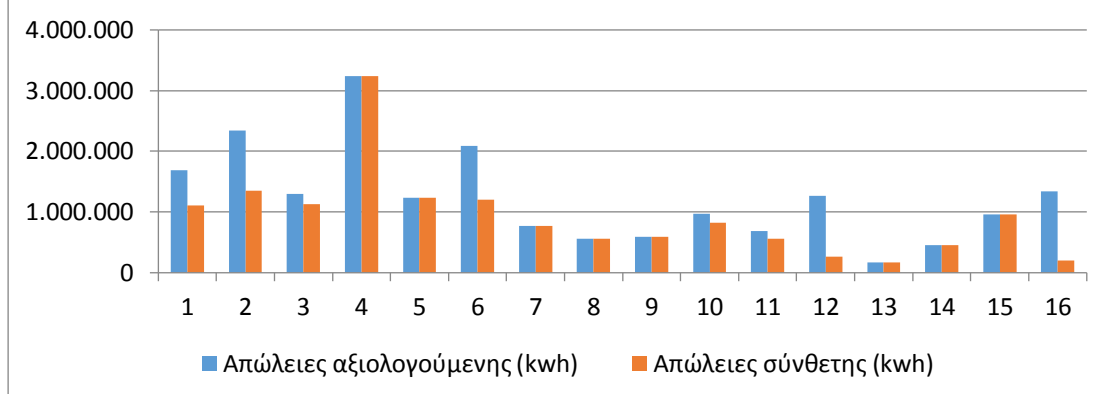
Πίνακας 12: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 2α)

	Στόχος – Αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	Στόχος – Μείωση απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας	Στόχος – Μείωση ιδιοκαταναλώσεων ηλεκτρικής ενέργειας
1	32,33%	34,32%	0,00%
2	21,96%	42,18%	0,00%
3	39,80%	12,72%	0,00%
4	0,00%	0,00%	0,00%
5	0,00%	0,00%	0,00%
6	6,35%	42,35%	0,00%
7	0,00%	0,00%	0,00%
8	43,66%	0,00%	0,00%
9	28,09%	0,00%	0,00%
10	150,85%	15,58%	0,00%
11	135,69%	18,42%	0,00%
12	100,44%	78,88%	0,00%
13	0,00%	0,00%	0,00%
14	0,00%	0,00%	0,00%
15	78,86%	0,00%	0,00%
16	30,83%	85,18%	0,00%



Σχήμα 17: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 2α)

Απώλειες Ηλεκτρικής Ενέργειας Αξιολογούμενης - Σύνθετης Μονάδας



Σχήμα 18: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 2α)

Πίνακας 13: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 2α, Φάση 2)

Αιολικό Πάρκο	Περιθώρια (slacks)		
	S_i^-	S_1^+	S_2^+
4	0	0	0
5	0	0	0
7	0	0	0
13	1,38778E-17	0	0
14	9,99201E-16	0	5,82077E-10

8.3 Σενάριο 2β

Σενάριο	Δεδομένα εισόδου	Δεδομένα εξόδου	Στόχος
2β	Απώλειες	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Output oriented

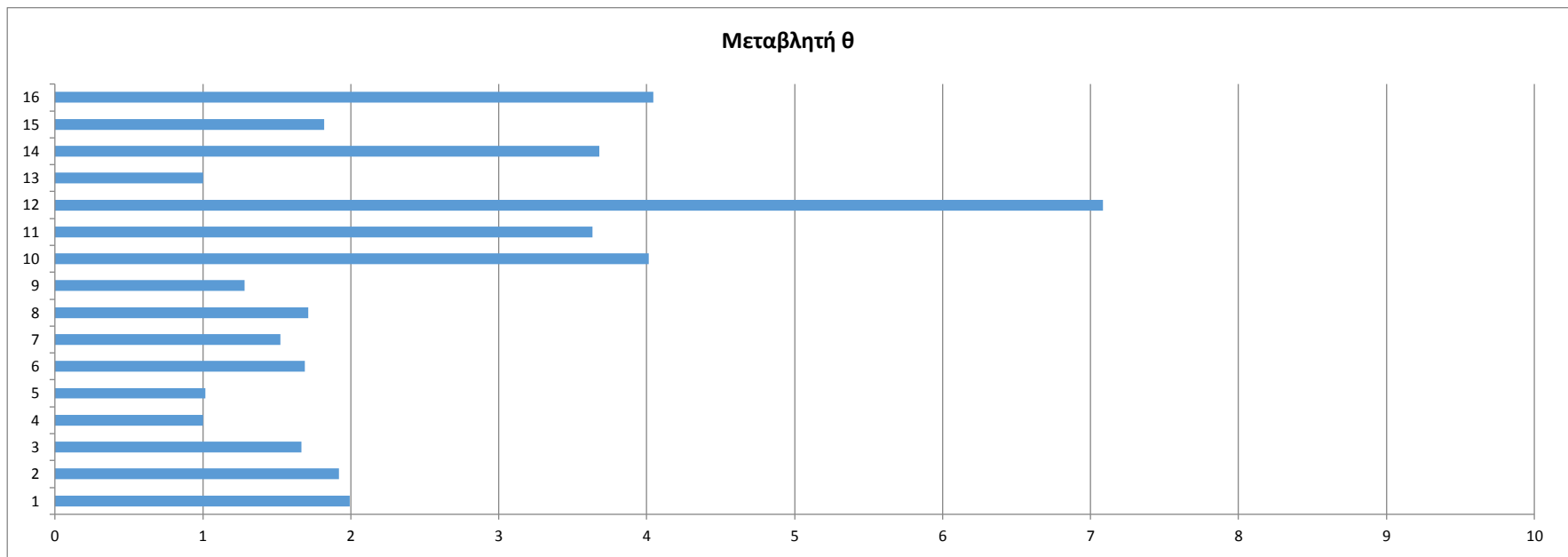
Όπως φαίνεται στο σχήμα 19, από το σύνολο των πάρκων, το 4 και το 13 είναι αυτά που χαρακτηρίζονται, στην πρώτη φάση, ως τα πιο αποδοτικά, συγκρινόμενα πάντα με το σύνολο, καθώς $\theta=1$. Τα υπόλοιπα έχουν $\theta>1$, γεγονός αναμενόμενο καθώς το συγκεκριμένο σενάριο είναι προσανατολισμένο στις εκροές, όπως και τα προηγούμενα δύο σενάρια.

Στον Πίνακα 14 παρατίθενται οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας όλων των Αιολικών Πάρκων καθώς και οι τιμές της μεταβλητής θ . Τα Αιολικά Πάρκα που χαρακτηρίζονται ως αποδοτικά κατά την πρώτη φάση σημειώνονται με κόκκινο

χρώμα. Όπως και στα προηγούμενα σενάρια, βάσει του γινομένου της εισροής ή της εκροής με τους συντελεστές βαρύτητας των πάρκων υπολογίζεται η τιμή-στόχος για τη μετατροπή του πάρκου σε αποδοτικό. Παρατηρείται ότι από όλα τα πάρκα, εκτός των 4 και 13, προκύπτουν τα ποσοστά-στόχοι που φαίνονται στον Πίνακα 15. Η μέση τιμή της πρώτης στήλης του πίνακα είναι 144,28% με κάποιες χαρακτηριστικές εξαιρέσεις, όπως το πάρκο 12 το οποίο για να καταστεί αποδοτικό πρέπει να αυξήσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά 608,44% αλλά και το πάρκο 5 το οποίο θα πρέπει να αυξήσει την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μόλις κατά 1,55% ώστε να μετατραπεί σε αποδοτικό. Τα ποσοστά-στόχοι της στήλης των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας είναι μηδενικά (δεύτερη στήλη), επομένως οι παρεμβάσεις θα πρέπει να επικεντρωθούν στην αύξηση της παραγωγής.

Στο Σχήμα 20 που ακολουθεί φαίνεται σχηματικά η διαφορά μεταξύ αξιολογούμενης-σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βάσει του Πίνακα 15. Για τα αποδοτικά πάρκα 4 και 13 παρατηρείται ότι οι στήλες τους βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο. Η συχνότητα με την οποία κάθε πάρκο από τα παραπάνω καθίσταται ως στόχος βελτίωσης των υπολοίπων μη αποδοτικών πάρκων είναι 14 φορές.

Στον τελευταίο πίνακα που παρουσιάζεται (Πίνακας 16), τα μηδενικά περιθώρια (slacks) των αποδοτικών - κατά την πρώτη φάση - πάρκων φανερώνουν την απουσία της κυριαρχίας επί αυτών άλλων, αποδοτικότερων πάρκων.



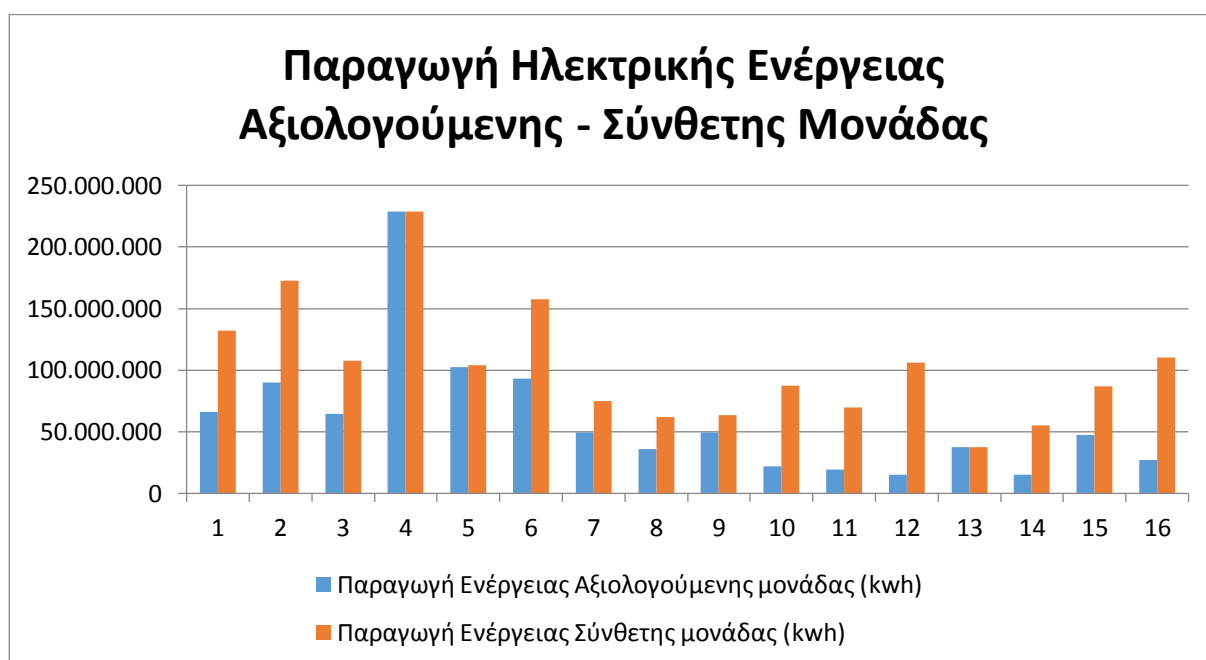
Σχήμα 19: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 2β)

Πίνακας 14: Συγκεντρωτικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 2β)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	θ
1	0	0	0	0,494444444	0	0	0	0	0	0	0	0	0,505555556	0	0	0	1,994234412
2	0	0	0	0,706862745	0	0	0	0	0	0	0	0	0,293137255	0	0	0	1,921862002
3	0	0	0	0,366013072	0	0	0	0	0	0	0	0	0,633986928	0	0	0	1,667880558
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0,346405229	0	0	0	0	0	0	0	0	0,653594771	0	0	0	1,015470354
6	0	0	0	0,627124183	0	0	0	0	0	0	0	0	0,372875817	0	0	0	1,691400394
7	0	0	0	0,196405229	0	0	0	0	0	0	0	0	0,803594771	0	0	0	1,522681365
8	0	0	0	0,126797386	0	0	0	0	0	0	0	0	0,873202614	0	0	0	1,711767601
9	0	0	0	0,134640523	0	0	0	0	0	0	0	0	0,865359477	0	0	0	1,281975308
10	0	0	0	0,261111111	0	0	0	0	0	0	0	0	0,738888889	0	0	0	4,015613356
11	0	0	0	0,166993464	0	0	0	0	0	0	0	0	0,833006536	0	0	0	3,632438516
12	0	0	0	0,358496732	0	0	0	0	0	0	0	0	0,641503268	0	0	0	7,084355548
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
14	0	0	0	0,091830065	0	0	0	0	0	0	0	0	0,908169935	0	0	0	3,679235555
15	0	0	0	0,256535948	0	0	0	0	0	0	0	0	0,743464052	0	0	0	1,819305483
16	0	0	0	0,380392157	0	0	0	0	0	0	0	0	0,619607843	0	0	0	4,04602441

Πίνακας 15: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 2β)

	Στόχος – Αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	Στόχος – Μείωση απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας
1	99,42%	0,00%
2	92,19%	0,00%
3	66,79%	0,00%
4	0,00%	0,00%
5	1,55%	0,00%
6	69,14%	0,00%
7	52,27%	0,00%
8	71,18%	0,00%
9	28,20%	0,00%
10	301,56%	0,00%
11	263,24%	0,00%
12	608,44%	0,00%
13	0,00%	0,00%
14	267,92%	0,00%
15	81,93%	0,00%
16	304,60%	0,00%



Σχήμα 20: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 2β)

Πίνακας 16: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 2β, Φάση 2)

Αιολικό Πάρκο	Περιθώρια (slacks)	
	S_r^+	S_i^-
4	0	0
13	7,27596E-12	0

8.4 Σενάριο 2γ

Σενάριο	Δεδομένα εισόδου	Δεδομένα εξόδου	Στόχος
2γ	Ιδιοκατανάλωση	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Output oriented

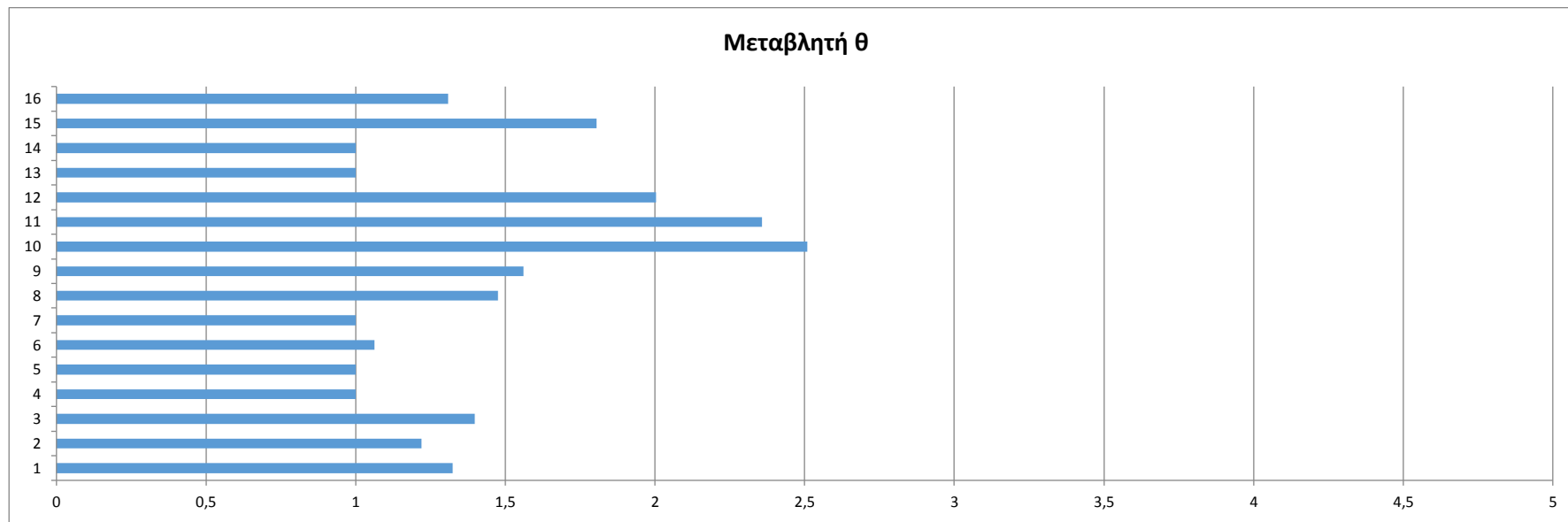
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 21, από το σύνολο των πάρκων τα 4, 5, 7, 13 και 14 είναι αυτά που χαρακτηρίζονται, στην πρώτη φάση, ως τα πιο αποδοτικά, συγκρινόμενα πάντα με το σύνολο, καθώς $\theta=1$. Τα υπόλοιπα έχουν $\theta>1$, γεγονός αναμενόμενο καθώς το συγκεκριμένο σενάριο είναι προσανατολισμένο στις εκροές, όπως και τα προηγούμενα τρία σενάρια.

Στον Πίνακα 17 παρατίθενται οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας όλων των Αιολικών Πάρκων καθώς και οι τιμές της μεταβλητής θ . Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται τα Αιολικά Πάρκα που χαρακτηρίζονται ως αποδοτικά κατά την πρώτη φάση. Όπως και προηγουμένως, από το γινόμενο της εισροής ή της εκροής με τους συντελεστές βαρύτητας των πάρκων υπολογίζεται η τιμή-στόχος για τη μετατροπή του πάρκου σε αποδοτικό. Παρατηρείται ότι από όλα τα πάρκα, εκτός των 4, 5, 7, 13 και 14, προκύπτουν τα ποσοστά-στόχοι που φαίνονται στον Πίνακα 18. Η μέση τιμή της πρώτης στήλης του πίνακα είναι 43,88% με κάποιες χαρακτηριστικές εξαιρέσεις, όμως, όπως το πάρκο 11 το οποίο για να καταστεί αποδοτικό πρέπει να αυξήσει την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κατά 135,69% αλλά και το πάρκο 6 το οποίο θα πρέπει να αυξήσει την ετήσια παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας μόλις κατά 6,35% ώστε να μετατραπεί σε αποδοτικό. Η στήλη της μείωσης των ιδιοκαταναλώσεων παρουσιάζει μηδενικά ποσοστά-στόχους (δεύτερη στήλη), επομένως οι παρεμβάσεις θα πρέπει να επικεντρωθούν στην αύξηση της παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο Σχήμα 22 που ακολουθεί φαίνεται σχηματικά η διαφορά μεταξύ αξιολογούμενης-σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βάσει του Πίνακα 18.

Η συχνότητα με την οποία το κάθε πάρκο καθίσταται ως στόχος βελτίωσης των υπολοίπων μη αποδοτικών πάρκων είναι: Το πάρκο 4 τίθεται ως πάρκο-στόχος μόνο 2 φορές, τα πάρκα 5 και 7 τίθενται αμφότερα ως πάρκα-στόχοι 8 φορές, ενώ τα πάρκα 13 και 14 χαρακτηρίζονται παρομοίως 4 και 3 φορές, αντίστοιχα.

Στον τελευταίο πίνακα (Πίνακας 19) παρατηρείται ένα γεγονός για πρώτη φορά. Από τα 5 πάρκα τα οποία κατά την πρώτη φάση χαρακτηρίστηκαν ως αποδοτικά, μόνο το ένα από αυτά, συγκεκριμένα το πάρκο 4 παρουσιάζει μηδενικά περιθώρια (slacks) στη δεύτερη φάση. Αντίθετα, τα υπόλοιπα πάρκα παρουσιάζουν μη μηδενικά περιθώρια. Συγκεκριμένα το περιθώριο S_i^+ , το οποίο αντιστοιχεί στην εκροή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παίρνει θετικές τιμές. Επομένως, παρ' όλο που κατά την πρώτη φάση χαρακτηρίζονται ως αποδοτικά και τα 5 πάρκα με $\theta=1$, κατά την εφαρμογή του ανάλογου μοντέλου στη δεύτερη φάση μόνο το 1 από αυτά είναι πλήρως αποδοτικό, με τα υπόλοιπα 4 να χαρακτηρίζονται ως “κυριαρχούμενα” και όχι πλήρως αποδοτικά.



Σχήμα 21: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 2γ)

Πίνακας 17: Συγκεντρωτικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 2γ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	θ
1	0	0	0	0	0,724832215	0	0,275167785	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,323278605
2	0	0	0	0,058441558	0,941558442	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,219553502
3	0	0	0	0	0,771812081	0	0,228187919	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,398032658
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	3,60822E-16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0,939597315	0	0,060402685	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,063482703
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0,073825503	0	0,926174497	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,474528527
9	0	0	0	0	0,523489933	0	0,476510067	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,559816423
10	0	0	0	0	0,100671141	0	0,899328859	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,508537889
11	0	0	0	0	0	0	0,64	0	0	0	0	0	0,36	0	0	0	2,356946708
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,6666667	0,3333333	0	0	2,004426058
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	9,992E-16	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2,22E-16	1	0	0	1
15	0	0	0	0	0,691275168	0	0,308724832	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,804151933
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,9166667	0,0833333	0	0	1,308257262

Πίνακας 18: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 2γ)

	Στόχος – Αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	Στόχος – Μείωση ιδιοκατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας
1	32,33%	0,00%
2	21,96%	0,00%
3	39,80%	0,00%
4	0,00%	0,00%
5	0,00%	0,00%
6	6,35%	0,00%
7	0,00%	0,00%
8	47,45%	0,00%
9	55,98%	0,00%
10	150,85%	0,00%
11	135,69%	0,00%
12	100,44%	0,00%
13	0,00%	0,00%
14	0,00%	0,00%
15	80,42%	0,00%
16	30,83%	0,00%



Σχήμα 22: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 2γ)

Πίνακας 19: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 2γ, Φάση 2)

Αιολικό Πάρκο	Περιθώρια (slacks)	
	S_r^+	S_i^-
4	0	0
5	43468986,67	0
7	31699800	0
13	26815466,67	0
14	1238545,455	0

8.5 Σενάριο 3α

Σενάριο	Δεδομένα εισόδου	Δεδομένα εξόδου	Στόχος
3α	Ιδιοκατανάλωση Απώλειες	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Input oriented

Στο Σχήμα 23 παρουσιάζονται οι τιμές της μεταβλητής θ οι οποίες στο παρόν σενάριο κυμαίνονται μεταξύ 0 και 1. Αυτό συμβαίνει διότι το πρόβλημα είναι πλέον προσανατολισμένο στις εισροές. Εκτός από τα πάρκα 4, 5, 7, 13 και 14 που παρουσιάζουν $\theta=1$ και χαρακτηρίζονται ως αποδοτικά, τα υπόλοιπα πάρκα έχουν $\theta < 1$.

Στον Πίνακα 20 παρουσιάζεται το σύνολο των τιμών των συντελεστών βαρύτητας καθώς και οι τιμές της μεταβλητής θ . Με κόκκινο χρώμα σημειώνονται τα αποδοτικά Αιολικά Πάρκα που πρόκειται να εισαχθούν στο μοντέλο της δεύτερης φάσης για περαιτέρω διερεύνηση.

Όπως και στα προηγούμενα σενάρια έτσι και σε αυτό, οι συντελεστές βαρύτητας των μη αποδοτικών Αιολικών Πάρκων συμβάλλουν στον καθορισμό του στόχου βελτίωσης καθενός από αυτά μέσω του γινομένου τους με τα αντίστοιχα δεδομένα εισροών ή εκροών. Στο παρόν σενάριο τόσο οι εισροές όσο και οι εκροές του μοντέλου είναι ελεγχόμενες. Επομένως, η μετατροπή ενός μη αποδοτικού πάρκου σε αποδοτικό μπορεί να επιτευχθεί αν αυτό θέσει ως στόχο του και τον πετύχει είτε τις τιμές ιδιοκατανάλωσης είτε τις τιμές απωλειών είτε τις τιμές παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Κοινός στόχος των ανωτέρω περιπτώσεων είναι η βελτίωση των χαρακτηριστικών του αξιολογούμενου πάρκου.

Τα ποσοστά-στόχοι όλων των πάρκων παρουσιάζονται στον Πίνακα 21. Συγκεκριμένα, στην πρώτη στήλη του πίνακα παρουσιάζονται τα ποσοστά κατά τα

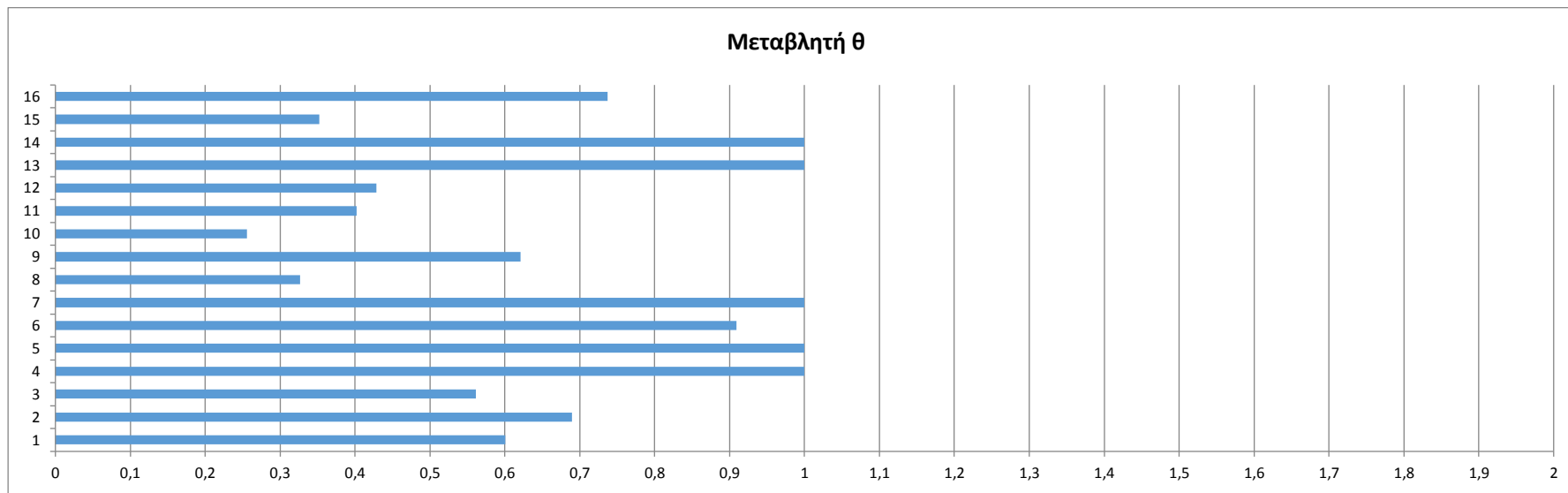
οποία πρέπει να αυξηθούν οι τιμές της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και στη δεύτερη και τρίτη στήλη τα ποσοστά κατά τα οποία πρέπει να μειωθούν οι τιμές της ιδιοκατανάλωσης και των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας, αντίστοιχα. Η μέση τιμή των ποσοστών-στόχων των ιδιοκαταναλώσεων είναι 32,40% και των απωλειών 39,47%, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι απαιτούνται σχετικά μικρής έκτασης επεμβάσεις στην εισροή ενός μη αποδοτικού πάρκου ώστε να μετατραπεί αυτό σε αποδοτικό. Αυτό βέβαια δεν ισχύει σε περιπτώσεις υψηλών ποσοστών όπως αυτών των πάρκων 10 και 15 για τις ιδιοκαταναλώσεις και των πάρκων 15 και 16 για τις απώλειες. Όσον αφορά τα ποσοστά αύξησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, μόνο τα πάρκα 8, 10 και 11 δίνουν τη δυνατότητα βελτίωσης με τιμές 2,05%, 45,01% και 53,84%, αντίστοιχα.

Παρατηρώντας την τρίτη γραμμή του Πίνακα 20, οι συντελεστές βαρύτητας των πάρκων 5, 7 και 13 έχουν μη μηδενικές τιμές και συγκεκριμένα ίσες με τη μονάδα. Αυτό σημαίνει ότι τα εν λόγω πάρκα καθίστανται ως πάρκα-στόχοι του πάρκου 1, δηλαδή το πάρκο 1 θα πρέπει να “μιμηθεί” τη συμπεριφορά των πάρκων 5, 7 και 13, όσον αφορά την εκροή του ή τις εισροές του, ώστε να καταστεί αποδοτικό. Σημειώνεται ότι, όπως και στο Σενάριο 2α, θα πρέπει να επιλεγεί μία εκ των εισροών ή εκροών για να μεταβληθεί και όχι ταυτόχρονα οι δύο ή και οι τρεις τους. Επομένως, θα πρέπει να διερευνηθούν είτε τρόποι αύξησης της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας στα μη αποδοτικά πάρκα είτε τρόποι μείωσης της ιδιοκατανάλωσης είτε των απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας που παρουσιάζουν τα μη αποδοτικά Αιολικά Πάρκα. Σε αυτό το σενάριο, δηλαδή, παρουσιάζεται μεγαλύτερη ποικιλία επιλογών κατά την προσπάθεια μετατροπής των πάρκων σε αποδοτικά.

Η εκροή μπορεί να βελτιωθεί (αυξηθεί) με παρεμβάσεις τεχνικής φύσης όπως αναφέρθηκαν στο Σενάριο 1. Επίσης με τεχνικές παρεμβάσεις μπορούν να βελτιωθούν (μειωθούν) οι απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες βέβαια θεωρούνται κατά γενική ομολογία πιο δύσκολα υλοποιήσιμες, όπως είναι για παράδειγμα η αντικατάσταση των καλωδιώσεων μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας με νέες από υλικό κατασκευής που παρουσιάζει μικρότερες απώλειες. Αναφορικά με τη μείωση των ιδιοκαταναλώσεων, η οποία παρουσιάζεται για πρώτη φορά ως διαθέσιμη επιλογή για την αύξηση της αποδοτικότητας ενός πάρκου, θα μπορούσε να γίνει αντικατάσταση των φωτιστικών των κτιρίων και των φωτιστικών εξωτερικού χώρου με νέα τύπου led, μικρότερης κατανάλωσης.

Στο Σχήμα 24 φαίνεται ποιοτικά η σχέση μεταξύ της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας της εξεταζόμενης μονάδας και της σύνθετης μονάδας, στο Σχήμα 25 η σχέση μεταξύ των απωλειών σύνθετης-εξεταζόμενης και στο Σχήμα 26 η σχέση μεταξύ των ιδιοκαταναλώσεων σύνθετης-αξιολογούμενης μονάδας. Η συχνότητα με την οποία το κάθε πάρκο χαρακτηρίζεται ως πάρκο-στόχος για τη βελτίωση των υπολοίπων μη αποδοτικών είναι 3 φορές το πάρκο 4, 5 φορές το πάρκο 5, 4 φορές το πάρκο 7, 10 φορές το πάρκο 13 και 5 φορές το πάρκο 14.

Στον Πίνακα 26 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δεύτερης φάσης. Τα αποδοτικά πάρκα της πρώτης φάσης είναι τα μοναδικά που συμμετέχουν. Σύμφωνα με το μοντέλο που παρουσιάστηκε και εφαρμόζεται σε αυτό το στάδιο, προκύπτουν οι τιμές των περιθωρίων (slacks) που φαίνονται στον πίνακα. Μόνο οι τιμές των περιθωρίων του πάρκου 4 είναι μηδενικές, γεγονός που χαρακτηρίζει το συγκεκριμένο πάρκο ως πλήρως αποδοτικό, συγκρινόμενο πάντα με τα υπόλοιπα πάρκα του δείγματος. Σχετικά με τα περιθώρια των υπολοίπων πάρκων, αρκεί η ύπαρξη ορισμένων μη μηδενικών τιμών (θετικών) ώστε αυτά να μην χαρακτηρίζονται, τελικά, ως πλήρως αποδοτικά.



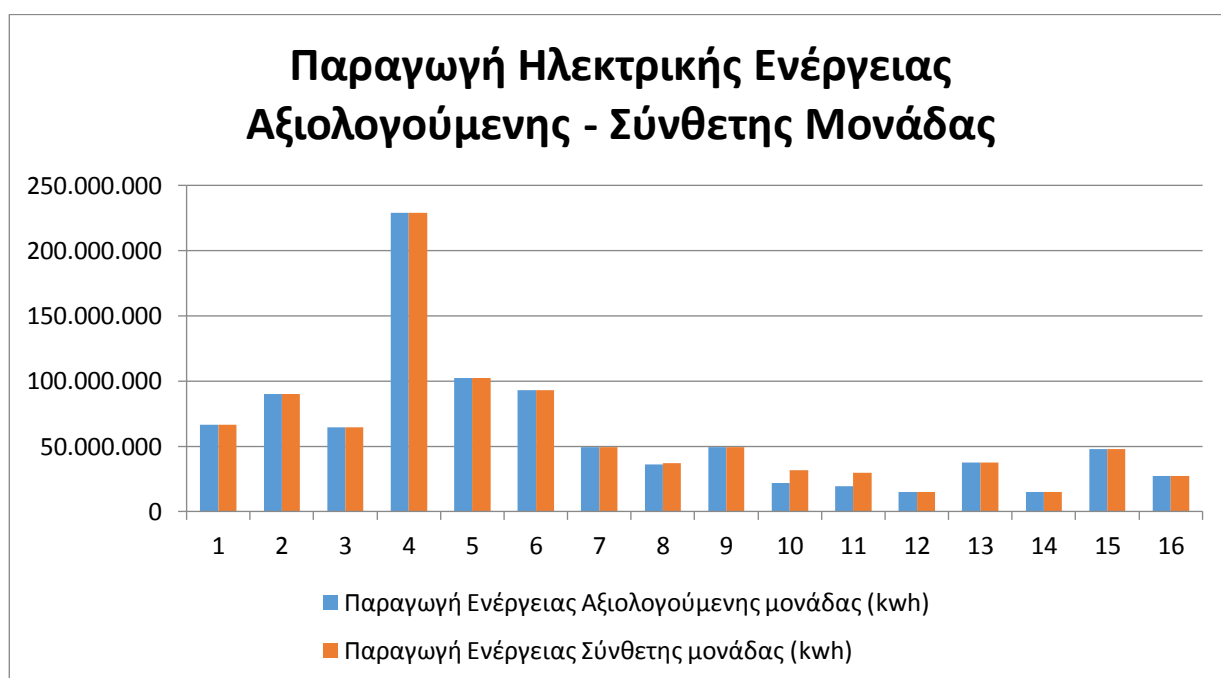
Σχήμα 23: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 3α)

Πίνακας 20: Συγκεντρωτικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 3α)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	θ
1	0	0	0	0	0,31991081	0	0,68008919	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,600441793
2	0	0	0	0	0,766765556	0	0,233234444	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,689684508
3	0	0	0	0	0,367299136	0	0,27017329	0	0	0	0	0	0,36252757	0	0	0	0,561166974
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	6,93889E-17	1	0	0	0	0	0	0	0	1,1102E-16	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0,82783772	0	0,17216228	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,909004483
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	5,5511E-16	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,96880985	0,0311902	0	0	0,326402189
9	0	0	0	0,061848128	0	0	0	0	0	0	0	0	0,93815187	0	0	0	0,620537091
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,73622526	0,2637747	0	0	0,255770743
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,64027887	0,3597211	0	0	0,402451366
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,1102E-16	1	0	0	0,428571429
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
15	0	0	0	0,023098612	0,087259658	0	0	0	0	0	0	0	0,88964173	0	0	0	0,352267697
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,54428698	0,455713	0	0	0,73714375

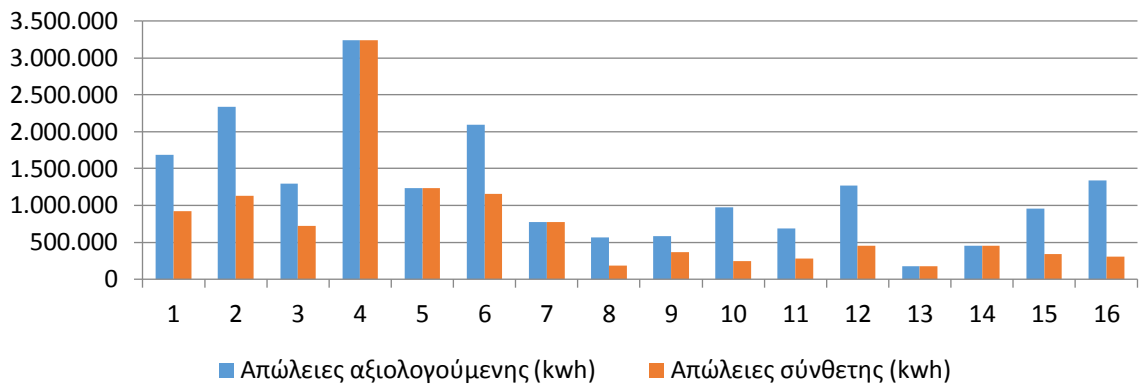
Πίνακας 21: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 3α)

	Στόχος – Αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	Στόχος – Μείωση ιδιοκατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας	Στόχος – Μείωση απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας
1	0,00%	39,96%	45,33%
2	0,00%	31,03%	51,76%
3	0,00%	43,88%	43,88%
4	0,00%	0,00%	0,00%
5	0,00%	0,00%	0,00%
6	0,00%	9,10%	44,80%
7	0,00%	0,00%	0,00%
8	2,05%	67,36%	67,36%
9	0,00%	44,74%	37,95%
10	45,01%	74,42%	74,42%
11	53,84%	59,75%	59,75%
12	0,00%	57,14%	64,15%
13	0,00%	0,00%	0,00%
14	0,00%	0,00%	0,00%
15	0,00%	64,77%	64,77%
16	0,00%	26,29%	77,37%



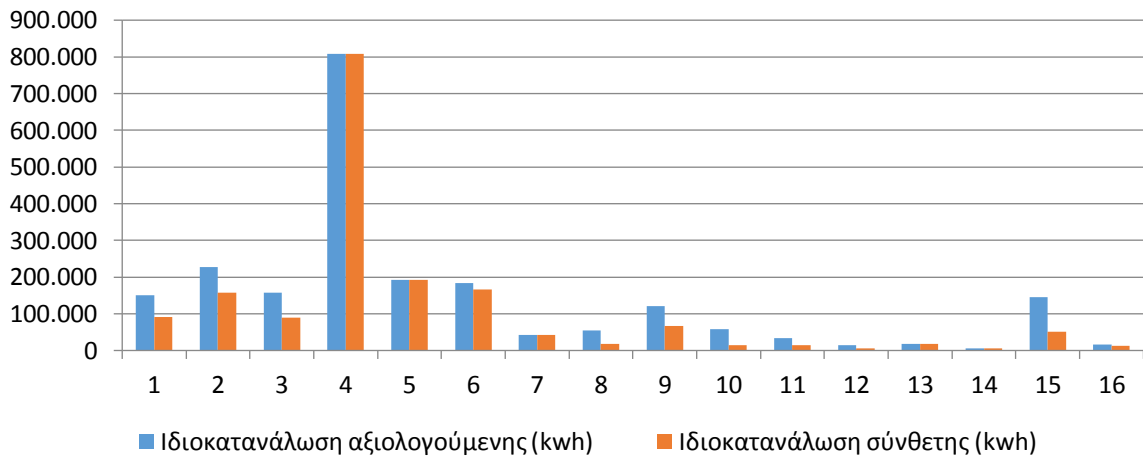
Σχήμα 24: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 3α)

Απώλειες Ηλεκτρικής Ενέργειας Αξιολογούμενης - Σύνθετης Μονάδας



Σχήμα 25: Διαφορά απωλειών αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας (Σενάριο 3α)

Ιδιοκατανάλωση Αξιολογούμενης - Σύνθετης Μονάδας



Σχήμα 26: Διαφορά ιδιοκαταναλώσεων αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας (Σενάριο 3α)

Πίνακας 22: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 3α, Φάση 2)

Αιολικό Πάρκο	Περιθώρια (slacks)		
	S_r^+	S_1^-	S_2^-
4	0	0	0
5	43468986,67	0	142965,333
7	29879272,73	0	299590,909
13	21960727,27	0	1069909,09
14	0	8000	816000

8.6 Σενάριο 3β

Σενάριο	Δεδομένα εισόδου	Δεδομένα εξόδου	Στόχος
3β	Ιδιοκατανάλωση	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Input oriented

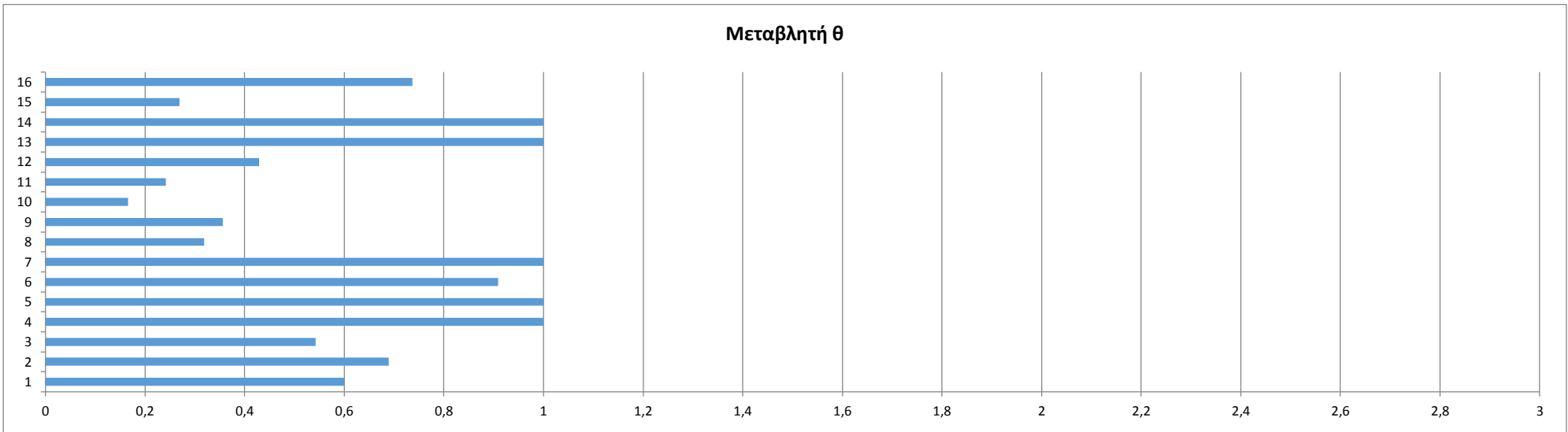
Όπως φαίνεται στο Σχήμα 27, από το σύνολο των πάρκων τα 4, 5, 7, 13 και 14 είναι αυτά που χαρακτηρίζονται, στην πρώτη φάση, ως τα πιο αποδοτικά, συγκρινόμενα πάντα με το σύνολο, καθώς $\theta=1$. Τα υπόλοιπα έχουν $\theta<1$, γεγονός αναμενόμενο καθώς το συγκεκριμένο σενάριο είναι προσανατολισμένο στις εισροές, όπως και το προηγούμενο σενάριο.

Στον Πίνακα 23 παρατίθενται οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας όλων των Αιολικών Πάρκων καθώς και οι τιμές της μεταβλητής θ . Τα Αιολικά Πάρκα που χαρακτηρίζονται ως αποδοτικά κατά την πρώτη φάση σημειώνονται με κόκκινο χρώμα. Όπως και στα προηγούμενα, βάσει του γινομένου της εισροής ή της εκροής με τους συντελεστές βαρύτητας των πάρκων υπολογίζεται η τιμή-στόχος για τη μετατροπή του πάρκου σε αποδοτικό. Παρατηρείται ότι από όλα τα πάρκα εκτός των 4, 5, 7, 13 και 14 προκύπτουν τα ποσοστά-στόχοι που φαίνονται στον Πίνακα 24. Η πρώτη στήλη του πίνακα που αναφέρεται στα ποσοστά-στόχους αύξησης της παραγωγής ενέργειας αποτελείται μόνο από μηδενικές τιμές. Αντίθετα, η μέση τιμή της δεύτερης στήλης του πίνακα είναι 35,88% με κάποιες χαρακτηριστικές εξαιρέσεις, όπως το πάρκο 10 το οποίο για να καταστεί αποδοτικό πρέπει να μειώσει την ιδιοκατανάλωσή του κατά 83,41% αλλά και το πάρκο 6 το οποίο θα πρέπει να μειώσει τα επίπεδα των ιδιοκαταναλώσεών του μόλις κατά 9,10% ώστε να μετατραπεί σε αποδοτικό. Στο Σχήμα 28 που ακολουθεί φαίνεται σχηματικά η διαφορά μεταξύ αξιολογούμενης-σύνθετης μονάδας ως προς την ιδιοκατανάλωση βάσει του Πίνακα 24.

Η συχνότητα με την οποία κάθε πάρκο καθίσταται ως στόχος βελτίωσης των υπολοίπων μη αποδοτικών πάρκων είναι χαρακτηριστική: Το πάρκο 14 τίθεται ως πάρκο-στόχος 5 φορές ενώ τα πάρκα 5, 7 και 13 τίθενται ως πάρκα-στόχοι 6 φορές. Το πάρκο 4, αν και αποδοτικό στην πρώτη φάση, δεν αποτελεί “παράδειγμα μίμησης” για κάποιο άλλο.

Στον τελευταίο πίνακα (Πίνακας 25) από τα 5 πάρκα τα οποία κατά την πρώτη φάση χαρακτηρίστηκαν ως αποδοτικά, μόνο το ένα από αυτά, συγκεκριμένα το πάρκο

4 παρουσιάζει μηδενικά περιθώρια (slacks) στη δεύτερη φάση. Αντίθετα, τα υπόλοιπα πάρκα παρουσιάζουν μη μηδενικά περιθώρια. Συγκεκριμένα το περιθώριο S_i^+ , το οποίο αντιστοιχεί στην εκροή της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, παίρνει θετικές τιμές. Επομένως, παρ' όλο που κατά την πρώτη φάση χαρακτηρίζονται ως αποδοτικά και τα 5 πάρκα με $\theta=1$, κατά την εφαρμογή του ανάλογου μοντέλου στη δεύτερη φάση μόνο το 1 από αυτά είναι πλήρως αποδοτικό, με τα υπόλοιπα 4 να χαρακτηρίζονται “κυριαρχούμενα” και όχι πλήρως αποδοτικά.



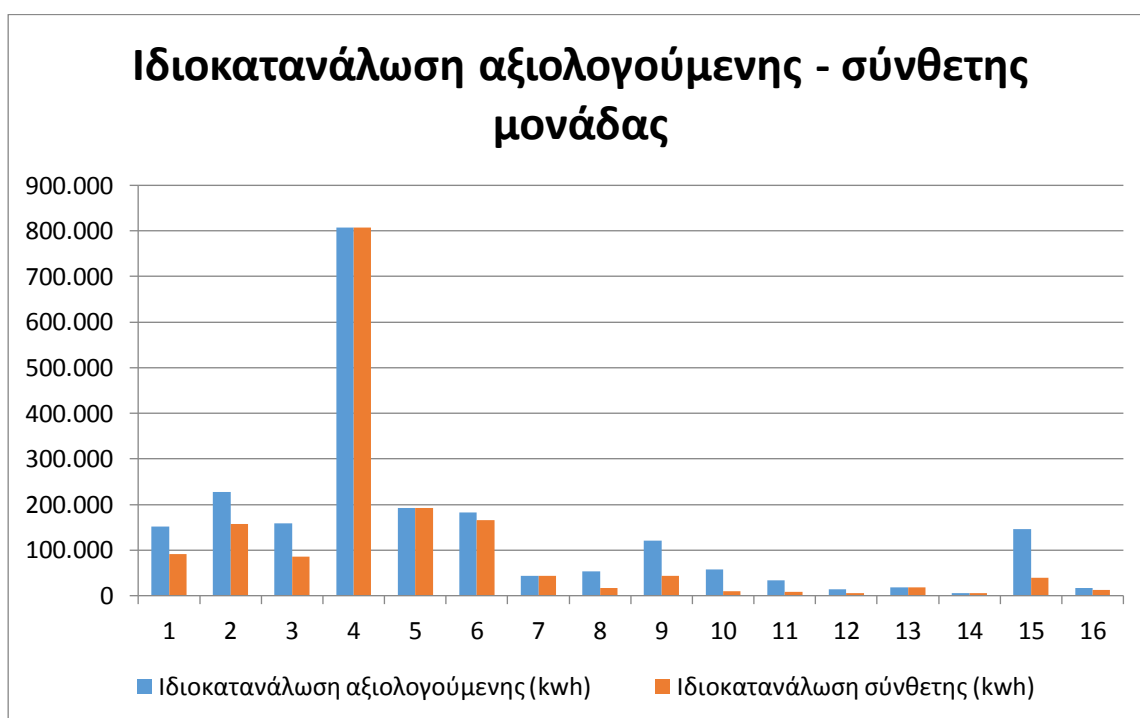
Σχήμα 27: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 3β)

Πίνακας 23: Συγκεντρωτικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 3β)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	θ
1	0	0	0	0	0,31991081	0	0,68008919	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,600441793
2	0	0	0	0	0,766765556	0	0,233234444	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,689684508
3	0	0	0	0	0,286540315	0	0,713459685	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,542370297
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
6	0	0	0	0	0,82783772	0	0,17216228	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,909004483
7	0	0	0	0	1,38778E-16	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,93600531	0,0639947	0	0	0,319112292
9	0	0	0	0	0,000888116	0	0,999111884	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,356465532
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,30168291	0,6983171	0	0	0,165865429
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,18392383	0,8160762	0	0	0,24138488
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0,428571429
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,5511E-17	1	0	0	1
15	0	0	0	0	0	0	0,853931631	0	0	0	0	0	0,14606837	0	0	0	0,269508841
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,54428698	0,455713	0	0	0,73714375

Πίνακας 24: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 3β)

	Στόχος – Αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	Στόχος – Μείωση ιδιοκατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας
1	0,00%	39,96%
2	0,00%	31,03%
3	0,00%	45,76%
4	0,00%	0,00%
5	0,00%	0,00%
6	0,00%	9,10%
7	0,00%	0,00%
8	0,00%	68,09%
9	0,00%	64,35%
10	0,00%	83,41%
11	0,00%	75,86%
12	0,00%	57,14%
13	0,00%	0,00%
14	0,00%	0,00%
15	0,00%	73,05%
16	0,00%	26,29%



Σχήμα 28: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς τις ιδιοκαταναλώσεις (Σενάριο 3β)

Πίνακας 25: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 3β, Φάση 2)

Αιολικό Πάρκο	Περιθώρια (slacks)	
	S_r^+	S_i^-
4	0	0
5	43468986,67	0
7	31699800	0
13	26815466,67	0
14	1238545,455	0

8.7 Σενάριο 3γ

Σενάριο	Δεδομένα εισόδου	Δεδομένα εξόδου	Στόχος
3γ	Απώλειες	Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας	Input oriented

Στο Σχήμα 29 φαίνονται τα δύο μοναδικά πάρκα, 4 και 13, που χαρακτηρίζονται στην πρώτη φάση ως τα πιο αποδοτικά, συγκρινόμενα πάντα με το σύνολο, καθώς $\theta=1$. Τα υπόλοιπα έχουν $\theta<1$, επιβεβαιώνοντας τον προσανατολισμό του εν λόγω σεναρίου στις εισροές.

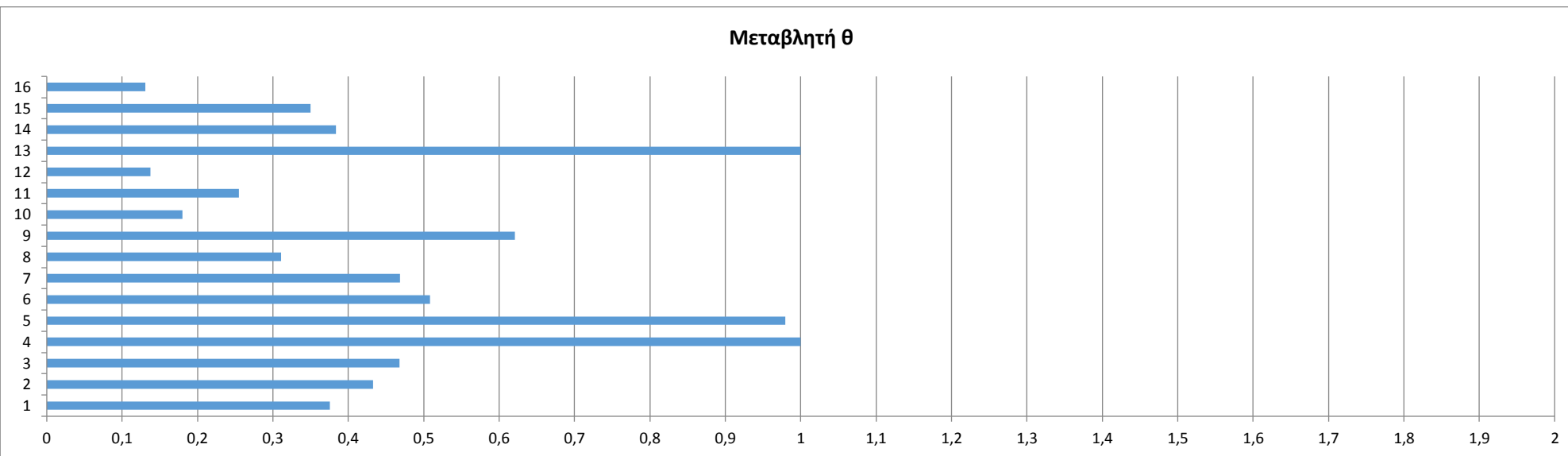
Στον Πίνακα 26 παρατίθενται οι τιμές των συντελεστών βαρύτητας όλων των Αιολικών Πάρκων καθώς και οι τιμές της μεταβλητής θ . Όπως και προηγουμένως, βάσει του γινομένου της εισροής ή της εκροής με τους συντελεστές βαρύτητας των πάρκων υπολογίζεται η τιμή-στόχος για τη μετατροπή του πάρκου σε αποδοτικό. Παρατηρείται ότι από όλα τα πάρκα, εκτός των αποδοτικών, προκύπτουν τα ποσοστά-στόχοι που φαίνονται στον Πίνακα 27. Η μέση τιμή της στήλης του πίνακα που αντιστοιχεί στις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας είναι 52,49% με κάποιες χαρακτηριστικές εξαιρέσεις, όμως, όπως το πάρκο 16 το οποίο για να καταστεί αποδοτικό πρέπει να μειώσει τις απώλειές του κατά 86,93% αλλά και το πάρκο 5 το οποίο θα πρέπει να μειώσει τις απώλειες μόλις κατά 2,05% ώστε να μετατραπεί σε αποδοτικό. Σχετικά με την αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (πρώτη στήλη), το πάρκο 8 χρειάζεται να την αυξήσει μόνο κατά 4% σε αντίθεση με το πάρκο 12 και 14 τα οποία χρειάζεται να την αυξήσουν κατά 150,66%, το οποίο είναι πρακτικά αδύνατο.

Στο Σχήμα 30 που ακολουθεί φαίνεται σχηματικά η διαφορά μεταξύ αξιολογούμενης-σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και

στο Σχήμα 31 φαίνεται σχηματικά η διαφορά μεταξύ αξιολογούμενης-σύνθετης μονάδας ως προς τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας. Αμφότερες οι εικόνες βασίζονται στον Πίνακα 27. Για τα αποδοτικά πάρκα 4 και 13 οι στήλες βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο.

Κατά την πρώτη φάση επίλυσης προκύπτει η συχνότητα με την οποία κάθε πάρκο καθίσταται ως στόχος βελτίωσης των υπολοίπων μη αποδοτικών πάρκων. Τα αποδοτικά πάρκα 4 και 13 καθίστανται ως στόχοι 8 και 14 φορές, αντίστοιχα.

Μέσω του Πίνακα 28 και των μηδενικών περιθωρίων που παρουσιάζει μόνο το πάρκο 4 κατά τη δεύτερη φάση εξάγεται το συμπέρασμα ότι μόνο το συγκεκριμένο πάρκο θεωρείται πλήρως αποδοτικό. Αντίθετα, το πάρκο 13 εμφανίζει θετικές τιμές περιθωρίων, γεγονός που απαγορεύει τον χαρακτηρισμό του ως πλήρως αποδοτικό, καθώς θεωρείται “κυριαρχούμενο” από άλλο πάρκο.



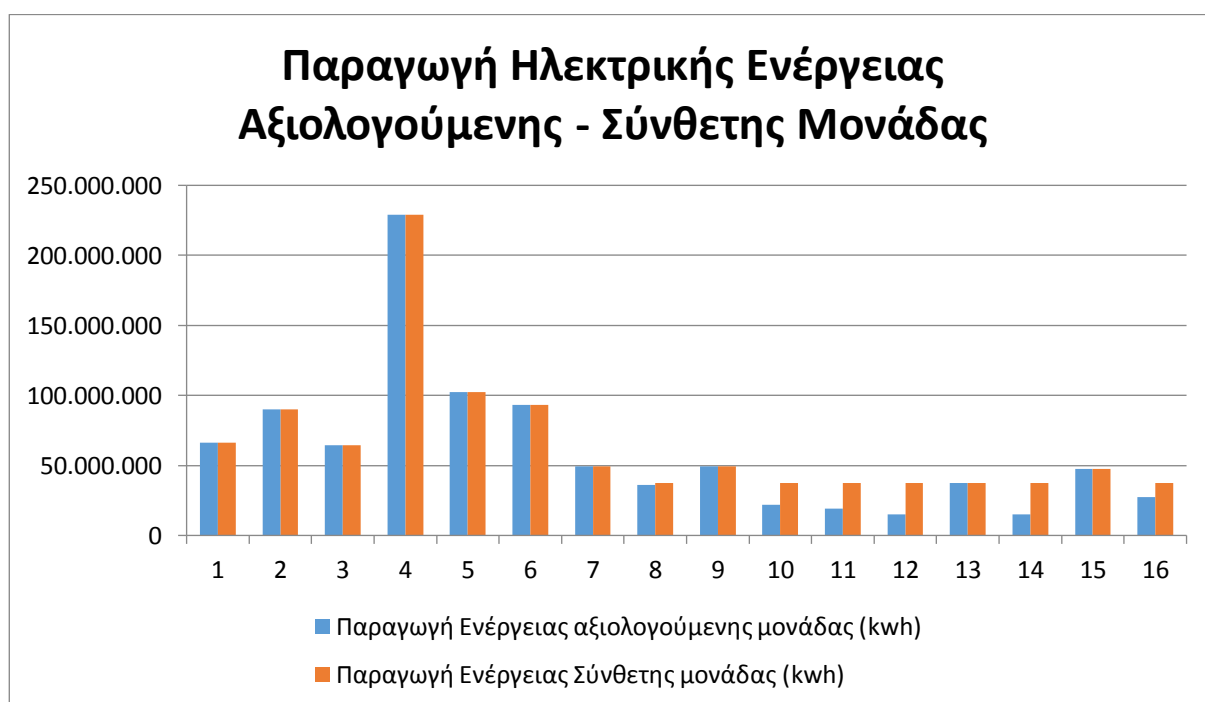
Σχήμα 29: Μεταβλητή θ Αιολικών Πάρκων (Σενάριο 3γ)

Πίνακας 26: Συγκεντρωτικός Πίνακας συντελεστών βαρύτητας Αιολικών Πάρκων και μεταβλητών θ (Σενάριο 3γ)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	θ
1	0	0	0	0,150068976	0	0	0	0	0	0	0	0	0,84993102	0	0	0	0,375717456
2	0	0	0	0,273639822	0	0	0	0	0	0	0	0	0,72636018	0	0	0	0,432993095
3	0	0	0	0,140840875	0	0	0	0	0	0	0	0	0,85915912	0	0	0	0,467932879
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
5	0	0	0	0,338137241	0	0	0	0	0	0	0	0	0,66186276	0	0	0	0,979514134
6	0	0	0	0,290528395	0	0	0	0	0	0	0	0	0,70947161	0	0	0	0,508126499
7	0	0	0	0,061602533	0	0	0	0	0	0	0	0	0,93839747	0	0	0	0,46843267
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,310834813
9	0	0	0	0,061848128	0	0	0	0	0	0	0	0	0,93815187	0	0	0	0,620537091
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,179671458
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,255102041
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,137578616
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,38377193
15	0	0	0	0,052604352	0	0	0	0	0	0	0	0	0,94739565	0	0	0	0,349968038
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0,130694548

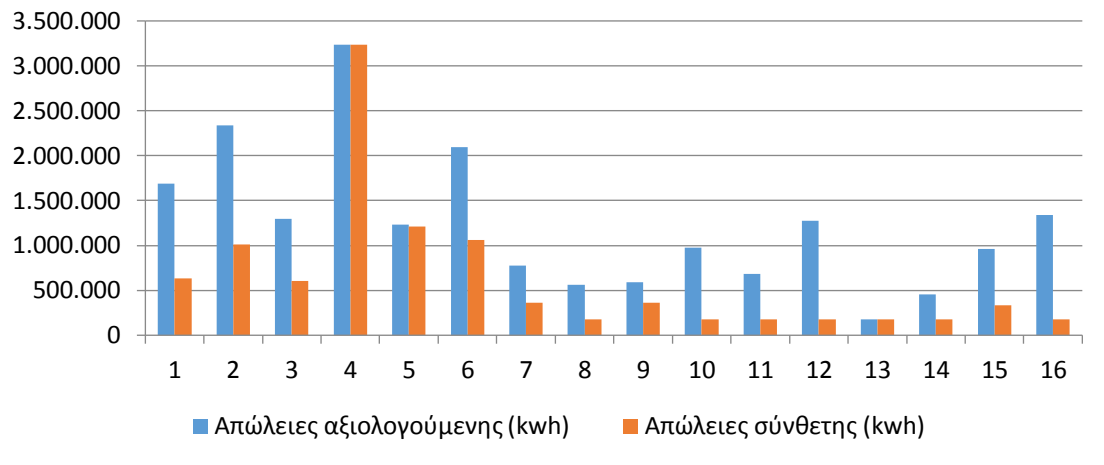
Πίνακας 27: Στόχος αξιολογούμενου Αιολικού Πάρκου για μετατροπή του σε αποδοτικό (Σενάριο 3γ)

	Στόχος – Αύξηση παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	Στόχος – Μείωση απωλειών ηλεκτρικής ενέργειας
1	0,00%	62,43%
2	0,00%	56,70%
3	0,00%	53,21%
4	0,00%	0,00%
5	0,00%	2,05%
6	0,00%	49,19%
7	0,00%	53,16%
8	4,00%	68,92%
9	0,00%	37,95%
10	72,33%	82,03%
11	96,27%	74,49%
12	150,66%	86,24%
13	0,00%	0,00%
14	150,66%	61,62%
15	0,00%	65,00%
16	37,72%	86,93%



Σχήμα 30: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 3γ)

Απώλειες Ηλεκτρικής Ενέργειας Αξιολογούμενης - Σύνθετης Μονάδας



Σχήμα 31: Διαφορά αξιολογούμενης - σύνθετης μονάδας ως προς τις απώλειες ηλεκτρικής ενέργειας (Σενάριο 3γ)

Πίνακας 28: Πίνακας περιθωρίων (slacks) (Σενάριο 3γ, Φάση 2)

Αιολικό Πάρκο	Περιθώρια (slacks)	
	S_r^+	S_i^-
4	0	0
13	22580000	1097000

9 Συμπεράσματα

Η εγκατάσταση και λειτουργία των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα πρέπει να παρακολουθείται και να αξιολογείται καθ' όλη τη διάρκεια ζωής τους και όχι μόνο πριν και κατά τη φάση υλοποίησής τους. Η αλματώδης εξέλιξη της τεχνολογίας συμπαρασύρει τόσο τα επιτεύγματά της όσο και τις μεθόδους αξιολόγησης της αποδοτικότητάς τους. Η εφαρμογή της μεθόδου DEA στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία επιχειρεί να ταξινομήσει τα εξεταζόμενα Αιολικά Πάρκα βάσει της συγκριτικής αποδοτικότητάς τους και να αναδείξει τα αδύναμα σημεία τους. Η μέθοδος δεν προτείνει συγκεκριμένους τρόπους βελτίωσης των μη αποδοτικών πάρκων παρά εστιάζει στα δεδομένα που χρίζουν βελτίωσης. Οι παρεμβάσεις, που είναι τεχνικής φύσεως, πηγάζουν από τη βιβλιογραφία αλλά κυρίως από την προσωπική εμπειρία του γράφοντος.

Στον ακόλουθο πίνακα παρουσιάζονται συγκεντρωτικά τα αποτελέσματα των σεναρίων που αναλύθηκαν παραπάνω.

Πίνακας 29: Χαρακτηριστικά σεναρίων και συγκεντρωτικά αποτελέσματα φάσεων επίλυσης μοντέλου

Προσανατολισμός	Σενάρια	Εισροές / Εκροές	Αποδοτικά πάρκα (1 ^η φάση)	Συχνότητα χαρακτηρισμού ως “πάρκο-στόχος”	Πλήρως αποδοτικά (2 ^η φάση)
Εκροές	1	Ταχύτητα ανέμου / Παραγωγή	4	15	NAI
			16	7	NAI
	2α	Απώλειες, Ιδιοκατανάλωση / Παραγωγή	4	3	NAI
			5	8	NAI
			7	7	NAI
			13	8	NAI
			14	2	NAI
	2β	Απώλειες / Παραγωγή	4	14	NAI
			13	14	NAI
	2γ	Ιδιοκατανάλωση / Παραγωγή	4	2	NAI
			5	8	OXI
			7	8	OXI
			13	4	OXI
			14	3	OXI
Εισροές	3α	Απώλειες, Ιδιοκατανάλωση / Παραγωγή	4	3	NAI
			5	5	OXI
			7	4	OXI
			13	10	OXI
			14	5	OXI
	3β	Ιδιοκατανάλωση / Παραγωγή	4	0	NAI
			5	6	OXI
			7	6	OXI
			13	6	OXI
			14	5	OXI
	3γ	Απώλειες / Παραγωγή	4	8	NAI
			13	14	OXI

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 29, από την εφαρμογή του μοντέλου στην πρώτη φάση του Σεναρίου 1, ως αποδοτικά χαρακτηρίζονται τα πάρκα 4 και 16 και αμφότερα ως πλήρως αποδοτικά στη δεύτερη φάση. Τα πάρκα 4, 5, 7, 13 και 14 καταδεικνύονται ως αποδοτικά στην πρώτη φάση επίλυσης του μοντέλου στο Σενάριο 2α καθώς και πλήρως αποδοτικά κατά τη δεύτερη φάση του ίδιου σεναρίου. Στο Σενάριο 2β, τα πάρκα 4 και 13 παίρνουν τον τίτλο των πιο αποδοτικών πάρκων, συγκρινόμενα με το υπόλοιπο δείγμα, ενώ αμφότερα χαρακτηρίζονται και ως πλήρως αποδοτικά κατά τη δεύτερη φάση. Στο Σενάριο 2γ, όμως, παρ' όλο που στην πρώτη φάση τα αποδοτικά πάρκα είναι τα 4, 5, 7, 13 και 14, μόνο το πάρκο 4 κρίνεται ως πλήρως αποδοτικό μετά την επίλυση της δεύτερης φάσης του μοντέλου. Τα ανωτέρω 4 σενάρια έχουν κοινό προσανατολισμό και συγκεκριμένα προσανατολισμό στις εκροές.

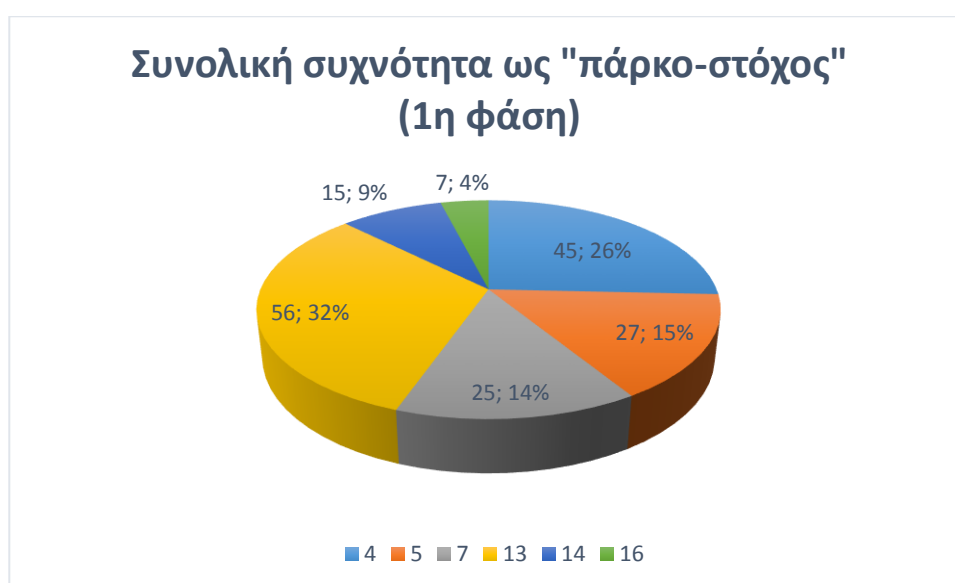
Σχετικά με την επόμενη ομάδα σεναρίων, τα οποία έχουν όλα προσανατολισμό στις εισροές, τα αποτελέσματα είναι λίγο διαφορετικά. Πιο συγκεκριμένα, στα Σενάρια 3α και 3β ως αποδοτικά κρίνονται τα πάρκα 4, 5, 7, 13 και 14, αλλά μόνο το πάρκο 4 θεωρείται πλήρως αποδοτικό, βάσει της δεύτερης φάσης, και στα δύο σενάρια. Στο τελευταίο κατά σειρά σενάριο, στο Σενάριο 3γ, τα αποδοτικά πάρκα είναι το 4 και το 13, με το πάρκο 4 να χαρακτηρίζεται εκ νέου ως το μοναδικό πλήρως αποδοτικό πάρκο του εν λόγω σεναρίου.

Για την πιο εύκολη διάκριση των αποδοτικών πάρκων σε κάθε φάση επίλυσης του μοντέλου, αυτά σημειώνονται στον παραπάνω πίνακα με κόκκινο χρώμα.



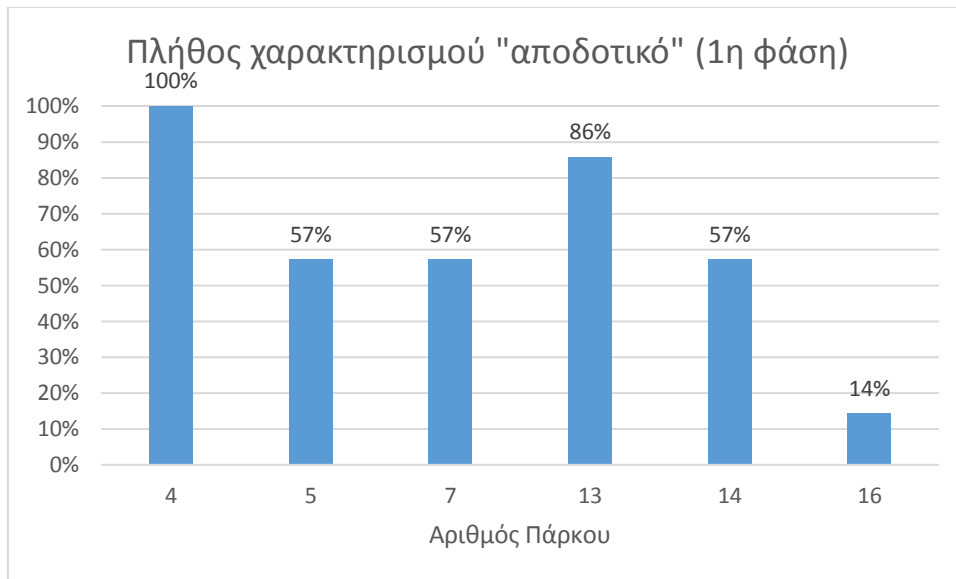
Σχήμα 32: Πλήθος πλήρως αποδοτικών πάρκων / Σενάριο

Στο Σχήμα 32 παρουσιάζεται το πλήθος των πλήρως αποδοτικών πάρκων ανά σενάριο, δηλαδή μετά την επίλυση της δεύτερης φάσης. Όπως φαίνεται ξεκάθαρα, την πρώτη θέση ως προς το πλήθος των πλήρως αποδοτικών πάρκων που διαθέτει, κατέχει το Σενάριο 2α με 5 πάρκα. Ακολουθούν τα Σενάρια 1 και 2β με 2 πάρκα και στην Τρίτη θέση ισοβαθμούν τα υπόλοιπα σενάρια με 1 πλήρως αποδοτικό πάρκο το καθένα.



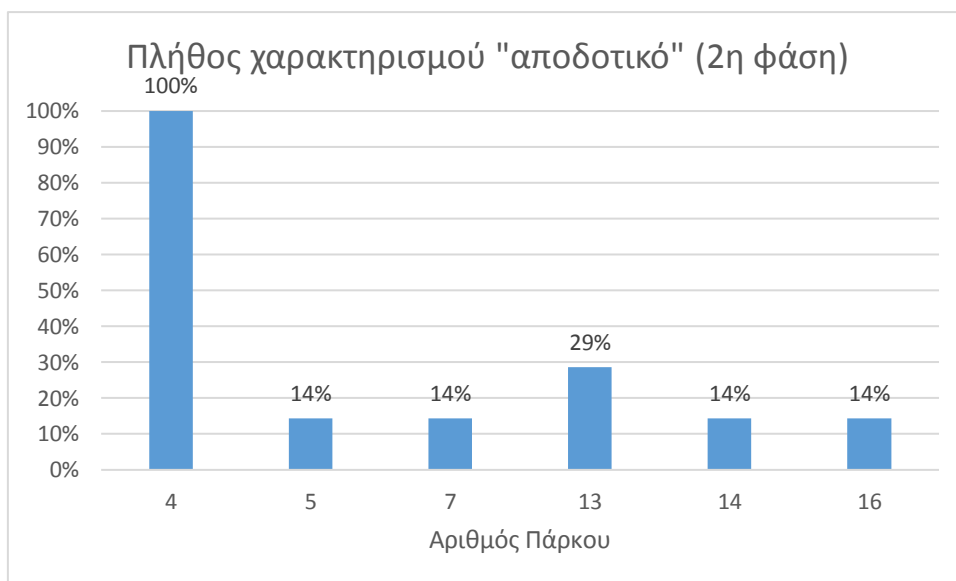
Σχήμα 33: Συχνότητα χαρακτηρισμού αποδοτικών πάρκων ως "πάρκα-στόχοι"

Η συνολική συχνότητα (αναφέρεται σε όλα τα σενάρια) με την οποία τα αποδοτικά, κατά την 1η φάση, πάρκα καθίστανται ως "πάρκα-στόχοι" των μη αποδοτικών φαίνεται στο ανωτέρω διάγραμμα (Σχήμα 33). Την πρώτη θέση καταλαμβάνει το πάρκο 13, το οποίο καθίσταται ως στόχος "μίμησης" 56 φορές συνολικά (32%) και ακολουθεί το πάρκο 4 με 45 φορές (26%). Έπεται το πάρκο 5 με 27 φορές (15%), το πάρκο 7 με 25 φορές (14%). Τα πάρκα 14 και 16 είναι στις τελευταίες θέσεις με 15 (9%) και 7 (4%) φορές, αντίστοιχα.



Σχήμα 34: Πλήθος χαρακτηρισμού πάρκων ως αποδοτικών (1η φάση)

Μετά το πέρας της πρώτης φάσης, όπως φαίνεται στο παραπάνω Σχήμα 34, το πάρκο 4 χαρακτηρίζεται ως αποδοτικό σε όλα τα σενάρια (7 φορές, 100%), το πάρκο 13 κρίνεται ως αποδοτικό σε 6 από τα 7 σενάρια (86%), τα πάρκα 5, 7, 14 σε 4 σενάρια (57%) και το πάρκο 16 μόνο σε ένα σενάριο (14%).



Σχήμα 35: Πλήθος χαρακτηρισμού πάρκων ως πλήρως αποδοτικών (2η φάση)

Κατά τη δεύτερη φάση επίλυσης του μοντέλου, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 35, μόνο το πάρκο 4 χαρακτηρίζεται ως πλήρως αποδοτικό σε όλα τα εξεταζόμενα σενάρια (100%), όπως και στην πρώτη φάση. Αντίθετα, τα υπόλοιπα πάρκα τα οποία χαρακτηρίστηκαν ως αποδοτικά κατά την πρώτη φάση, δεν χαρακτηρίζονται σε ισάριθμα σενάρια ως πλήρως αποδοτικά μετά τη δεύτερη φάση. Πιο συγκεκριμένα,

το πάρκο 13 ενώ χαρακτηρίζεται ως αποδοτικό σε 6 σενάρια, πλέον χαρακτηρίζεται ως πλήρως αποδοτικό σε μόλις 2 σενάρια (29%), ενώ τα υπόλοιπα πάρκα σε μόνο 1 σενάριο (14%).

10 Προτάσεις

Όσον αφορά τις προτάσεις για μελλοντική έρευνα, θα μπορούσε να συλλεχθεί και να τεθεί προς επεξεργασία μεγαλύτερος όγκος δεδομένων ως προς τη χρονική διάρκεια, πέρα από τα όρια δηλαδή του ενός έτους της παρούσας εργασίας, αλλά και ως προς τη φύση των δεδομένων. Συγκεκριμένα, θα μπορούσαν να συλλεχθούν δεδομένα σχετικά με τα χαρακτηριστικά των εγκατεστημένων ανεμογεννητριών, όπως ύψος ανεμογεννήτριας, διάμετρος έλικας, δυναμικότητα, αλλά και των πάρκων, όπως ο αριθμός των ανεμογεννητριών, το υψόμετρο της περιοχής εγκατάστασης, η απόσταση από τη θάλασσα και το αιολικό δυναμικό της περιοχής. Ακόμα, αξιολόγηση θα μπορούσε να γίνει βάσει χρηματοοικονομικών δεικτών ώστε να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με την επένδυση. Η διερεύνηση της εφαρμογής κάποιων παραλλαγών της μεθόδου DEA, όπως τα additive models, στο συγκεκριμένο θέμα αποτελεί ένα ακόμα αντικείμενο μελλοντικής έρευνας. Τέλος, θα μπορούσε να αξιολογηθεί η λειτουργία υπεράκτιων Αιολικών Πάρκων, τα οποία παρουσιάζουν εξαιρετικό ενδιαφέρον και επιλέγονται όλο και πιο συχνά προς εγκατάσταση.

Βιβλιογραφία

- Akbari, N., Jones, D., & Treloar, R. (2020). A cross-European efficiency assessment of offshore wind farms: A DEA approach. *Renewable Energy*, *151*, 1186–1195. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.11.130>
- Al-Addous, M., Jaradat, M., Albatayneh, A., Wellmann, J., & Al Hmidan, S. (2020). The Significance of Wind Turbines Layout Optimization on the Predicted Farm Energy Yield. *Atmosphere*, *11*(1), 117. <https://doi.org/10.3390/atmos11010117>
- Amanatidis, G. (2019). *European policies on climate and energy towards 2020, 2030 and 2050* (pp. 1–12). [https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/631047/IPOL_BRI\(2019\)631047_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2019/631047/IPOL_BRI(2019)631047_EN.pdf)
- Azadeh, A., Ghaderi, F., Anvari, M., Izadbakhsh, H., & Dehghan, S. (2007). *Performance assessment and optimization of thermal power plants by DEA BCC and multivariate analysis*. *66*, 13.
- Badurek, C. (n.d.). TYPES of wind turbines. In *Britannica*. <https://www.britannica.com/technology/wind-turbine>
- Beşkirlı, M., Koç, İ., Haklı, H., & Kodaz, H. (2018). A new optimization algorithm for solving wind turbine placement problem: Binary artificial algae algorithm. *Renewable Energy*, *121*, 301–308. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.087>
- Biska, A., & Stratigea, A. (2013). *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και Οικονομική Κρίση—Η Πορεία της Ελλάδας προς το 2020*. 32. https://www.researchgate.net/publication/261874352_Ananeosimes_Peges_Energieias_kai_Oikonomike_Krise_-_E_Poreia_tes_Elladas_pros_to_2020
- Brusca, S., Lanzafame, R., & Messina, M. (2014). Wind Turbine Placement Optimization by means of the Monte Carlo Simulation Method. *Modelling and Simulation in Engineering*, *2014*, 1–8. <https://doi.org/10.1155/2014/760934>
- Cabestany, J., Rojas, I., & Joya, G. (Eds.). (2011). *Advances in Computational Intelligence: 11th International Work-Conference on Artificial Neural Networks, IWANN 2011, Torremolinos-Málaga, Spain, June 8-10, 2011, Proceedings, Part I* (Vol. 6691). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-21501-8>
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). *Measuring the efficiency of decision making units*. *European Journal of Operational Research* *2*, 429–444.
- Cooper, W. W., Seiford, L. M., & Tone, K. (2007). *Data envelopment analysis: A comprehensive text with models, applications, references and DEA-solver software* (2nd ed.). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-45283-8>
- Ederer, N. (2015). Evaluating capital and operating cost efficiency of offshore wind farms: A DEA approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *42*, 1034–1046. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.071>
- EL-Shimy, M., Balcioglu, H., & Soyer, K. (2018). RENEWABLE Energy—Background. *Lambert Academic Publishing*, *34*. <https://doi.org/10.6084/M9.FIGSHARE.6169460>
- European Commission. Joint Research Centre. Institute for Energy and Transport. (2015). *2014 JRC ocean energy status report: Technology, market and economic aspects of*

- ocean energy in Europe*. Publications Office.
<https://data.europa.eu/doi/10.2790/866387>
- European Union. (2020). *Renewable energy statistics*.
<https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/pdfscache/7177.pdf>
- Eurostat. (2020). *Shares summary results 2018*.
<https://ec.europa.eu/eurostat/web/energy/data/shares>
- Farrell, M. J. (1957). *The Measurement of Productive Efficiency*. 120, 29.
- Gatzert, N., & Kosub, T. (2016). Risks and risk management of renewable energy projects: The case of onshore and offshore wind parks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 982–998. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.103>
- G.C., B., & S.P., S. (2015). Site Selection for Wind Farm Installation. *IJREEICE*, 3(8), 59–61. <https://doi.org/10.17148/IJREEICE.2015.3814>
- Giebel, G., & Hasager, C. B. (2016). An Overview of Offshore Wind Farm Design. In W. Ostachowicz, M. McGugan, J.-U. Schröder-Hinrichs, & M. Luczak (Eds.), *MARE-WINT* (pp. 337–346). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39095-6_19
- Golany, B., Roll, Y., & Rybak, D. (1994). *Measuring efficiency of power plants in Israel by data envelopment analysis*. 41, 291–301.
- Gorjian, S. (2017). *An Introduction to the Renewable Energy Resources*. 43. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27055.53928>
- Goto, M., & Sueyoshi, T. (n.d.). *DEA Efficiency Analysis of Solar Photovoltaic Power Stations in Germany and the United States*. 8.
- Hannon, M. J., Griffiths, J., Vantoch-Wood, A., Carcas, M., Bradley, S., Boud, R., & Wyatt, S. (2016). *Marine Energy (World Energy Resources 2016)*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24836.73607>
- Hosseini, M., & Hasanpour, J. (2011). *Evaluating the efficiency changes of the Thermal Power Plants in Iran and Examining its Relation with reform using DEA Model & Malmquist Index*. 12, 1–10. <http://www.ipedr.com/vol12/50-C123.pdf>
- Hunter, R. (2003). Wind Speed Measurement and Use of Cup Anemometry. In *Recommended practices for Wind Turbine testing and evaluation* (1999th ed., p. 60). <https://community.ieawind.org/HigherLogic/System/DownloadDocumentFile.ashx?DocumentFileKey=dcf4afa1-ee68-3111-0ac5-c235d2f2bc16&forceDialog=0>
- Iribarren, D., Martín-Gamboa, M., & Dufour, J. (2013). Environmental benchmarking of wind farms according to their operational performance. *Energy*, 61, 589–597. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.005>
- Iribarren, D., Vázquez-Rowe, I., Rugani, B., & Benetto, E. (2014). On the feasibility of using energy analysis as a source of benchmarking criteria through data envelopment analysis: A case study for wind energy. *Energy*, 67, 527–537. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.109>
- Kalogeri, C. (2017). *Offshore wind and wave energy resource characterization: An integrated approach for combined exploitation* [National and Kapodistrian University of Athens]. <https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/41918#page/1/mode/2up>
- Kim, K.-T., Lee, D. J., Park, S.-J., Zhang, Y., & Sultanov, A. (2015). Measuring the efficiency of the investment for renewable energy in Korea using data envelopment analysis.

- Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 694–702.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.034>
- Lins, M. E. (2012). Performance assessment of Alternative Energy Resources in Brazilian power sector using Data Envelopment Analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 898–903. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.09.010>
- Liu, Y., Ren, L., Li, Y., & Zhao, X. (2015). The industrial performance of wind power industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 644–655. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.003>
- Loumakis, S., Giannini, E., & Maroulis, Z. (2019). Renewable Energy Sources Penetration in Greece: Characteristics and Seasonal Variation of the Electricity Demand Share Covering. *Energies*, 12(12), 2441. <https://doi.org/10.3390/en12122441>
- Manzella, A. (2017). Geothermal energy. *EPJ Web of Conferences*, 148, 00012. <https://doi.org/10.1051/epjconf/201714800012>
- Montusiewicz, J., Gryniewicz-Jaworska, M., & Pijarski, P. (2015). LOOKING FOR THE OPTIMAL LOCATION FOR WIND FARMS. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 9, 135–142. <https://doi.org/10.12913/22998624/59095>
- Nelson, V. (2009). *Wind energy: Renewable energy and the environment*. CRC Press. http://library.uniteddiversity.coop/Energy/Wind/Wind_Energy-Renewable_Energy_and_the_Environment.pdf
- Ngô, C., & Natowitz, J. B. (2016). *Our energy future: Resources, alternatives and the environment* (Second edition). Wiley.
- Psomopoulos, C. S., Bourka, A., & Themelis, N. J. (2009). Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management*, 29(5), 1718–1724. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.020>
- Riva, G., Foppapedretti, E., De Carolis, C., Giakoumelos, E., Malamatenios, C., Signanini, P., Giancarlo, C., Di Fazio, M., Gajdos, J., & Rucinsky, R. (2019). *Handbook on Renewable Energy Sources*. http://www.ener-supply.eu/downloads/ENER_handbook_en.pdf
- Saglam, U. (2017). *The Productive Efficiency Assessment of Wind Power Generation in the United States*. 15. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2988422
- San Cristóbal, J. R. (2011). A multi criteria data envelopment analysis model to evaluate the efficiency of the Renewable Energy technologies. *Renewable Energy*, 36(10), 2742–2746. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.008>
- Schaffarczyk, A. (2014). *Understanding Wind Power Technology Theory, Deployment and Optimisation* (John Wiley&Sons, Ltd).
- Tesaro, A. (n.d.). *State of the Art of Wind Farm Optimization*. 12.
- Thanassoulis, E. (2001). *Introduction to the theory and application of data envelopment analysis: A foundation text with ...* Springer.
- Tsolas, I. E. (2020). Benchmarking Wind Farm Projects by Means of Series Two-Stage DEA. *Clean Technologies*, 2(3), 365–376. <https://doi.org/10.3390/cleantechnol2030022>
- Walker, R. P., & Swift, A. (2015). *Wind Energy Essentials: Societal, Economic, and Environmental Impacts*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119040934>
- Wind Energy Power Plants. (2014). In S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy* (pp. 1–30). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118703274.ch1>

- Xin-gang, Z., & Zhen, W. (2019). The technical efficiency of China's wind power list enterprises: An estimation based on DEA method and micro-data. *Renewable Energy*, 133, 470–479. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.10.049>
- Αγγελοπούλου, Β. (2013). *Πτυχές της Ανάπτυξης της Αιολικής Ενέργειας στην Ελλάδα: Από την Ιστορία της Τεχνολογίας στην Τεχνολογική Πολιτική* [Ε.Κ.Π.Α.]. <https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/34958>
- Αντωνάκη, Ι. (2010). *Οι Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας και ο ρόλος της Αιολικής Ενέργειας στην Τοπική και Περιφερειακή Ανάπτυξη*. https://www.ekdd.gr/ekdda/files/ergasies_esta/T3/028/10211.pdf
- Βαμβούρα, Β. (2007). *Εφαρμογή ποσοτικών μεθόδων (DEA) στην αξιολόγηση εκπαιδευτικών μονάδων* [Πανεπιστήμιο Μακεδονίας]. <https://dspace.lib.uom.gr/bitstream/2159/2593/1/BambouraMSc2007atomos.pdf>
- Βαρδαλής, Ν. (2007). *Η μέθοδος Simplex και ο προγραμματισμός στόχων* [Τ.Ε.Ι. Καβάλας]. <http://83.212.168.57/jspui/bitstream/123456789/2521/1/022007x03x319.pdf>
- Γεωργάκας, Α. (2017). *Αξιολόγηση της Παραγωγικής και Οικονομικής Αποδοτικότητας Ελληνικών και Διεθνών Ναυτιλιακών εταιρειών εισηγμένων στο Nasdaq με την Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων*. [Πανεπιστήμιο Πειραιώς]. <http://dione.lib.unipi.gr/xmlui/handle/unipi/10270>
- Δαμιανίδης, Μ., Κατσαρός, Γ., Ματθαίος, Τ., & Στεργιόπουλος, Φ. (2011). *Οδηγός Μελέτης και Υλοποίησης Φωτοβολταϊκών Έργων*. http://tkm.tee.gr/wp-content/uploads/2018/02/fwtovoltaika_ergwn.pdf
- Δ.Α.Π.Ε.Ε.Π. (2020). *Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας & ΣΗΘΥΑ. Συνοπτικό Πληροφοριακό Δελτίο*. https://www.dapeep.gr/wp-content/uploads/DAPE/%CE%94%CE%95%CE%9B%CE%A4%CE%99%CE%9F%20%CE%91%CE%A0%CE%95_%CE%A3%CE%95%CE%A0%CE%A4%CE%95%CE%9C%CE%92%CE%A1%CE%99%CE%9F%CE%A3_2020.pdf?t=1604320351
- Δήμος, Ι. (2014). *Αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των οργανισμών τοπικής αυτοδιοίκησης στην Ελλάδα μια εφαρμογή της περιβάλλουσας ανάλυσης δεδομένων* [Πολυτεχνείο Κρήτης]. <https://dias.library.tuc.gr/view/23734?locale=el>
- ΕΛΕΤΑΕΝ. (2020). *Η Στατιστική της Αιολικής Ενέργειας για το πρώτο εξάμηνο του 2020*. <https://eletaen.gr/wp-content/uploads/2020/07/2020-7-29-dt-eletaen-statistiki-s1-2020.pdf>
- Εφημερίς της Κυβερνήσεως. (1999). Ν. 2773/99 (Τεύχος ΦΕΚ Α' 286/22-12-99): "Απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας-Ρύθμιση θεμάτων ενεργειακής πολιτικής και λοιπές διατάξεις". [http://www.rae.gr/old/downloads/sub2/286\(22-12-99\)_2773.pdf](http://www.rae.gr/old/downloads/sub2/286(22-12-99)_2773.pdf)
- Κλειάσου, Η. (2016). *Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αιολικού Πάρκου στη θέση "Πυργουλόψη—Λιάζαρι", συνολικής ισχύος 1,5 MW, Περιφερειακής Ενότητας Ευβοίας, Περιφέρεια Στερεάς Ελλάδας* [Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο]. <https://core.ac.uk/download/pdf/81560543.pdf>
- Μαμάσης, Ν., & Κουτσογιάννης, Δ. (2010). *Υδρομετεωρολογία Αιολική Ενέργεια*. <https://ocw.aoc.ntua.gr/modules/document/file.php/CIVIL116/wind10.pdf>
- Μπαρδάκης, Δ.-Α. (2018). *Ενεργειακή βιωσιμότητα και αιολικά πάρκα: Μια πράσινη τεχνολογική προσέγγιση* [Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης]. <https://ikee.lib.auth.gr/record/296897/files/GRI-2018-21123.pdf>

- Μπινιάρη, Α. (2018). Αξιολόγηση περιβαλλοντικής αποδοτικότητας των ελληνικών περιφερειακών αεροδρομίων [Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο]. <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/bitstream/handle/123456789/48084/%CE%94%CE%99%CE%A0%CE%9B%CE%A9%CE%9C%CE%91%CE%A4%CE%99%CE%9A%CE%97%20%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%99%CE%91-%201%20%CE%9D%CE%BF%CE%B5%CE%BC%CE%B2%CF%81%CE%AF%CE%BF%CF%85%202018-%20%CE%9C%CF%80%CE%B9%CE%BD%CE%B9%CE%AC%CF%81%CE%B7%20%CE%91%CE%BD%CE%B1%CF%83%CF%84%CE%B1%CF%83%CE%AF%CE%B1.pdf?sequence=1>
- Οδηγία 2009/28/ΕΚ του Ευρωπαϊκού Κοινοβουλίου και του Συμβουλίου, της 23ης Απριλίου 2009, σχετικά με την προώθηση της χρήσης ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές και την τροποποίηση και τη συνακόλουθη κατάργηση των οδηγιών 2001/77/ΕΚ και 2003/30/ΕΚ. (2009). 47.
- Παπαλαζαρίδου, Σ. (2009). Αιολική ενέργεια—Κριτήρια Χωροθέτησης Αιολικών Πάρκων: Η περίπτωση του Νομού Φλώρινας [Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης]. <http://ikee.lib.auth.gr/record/124151/files/PAPALAZARIDOU.pdf>
- Πάχου, Π. (2012). Βελτιστοποίηση Απόδοσης Πάρκου Ανεμογεννητριών με εφαρμογή Μεταεπιστημονικών Μεθόδων [Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο]. <https://dspace.lib.ntua.gr/xmlui/handle/123456789/6554>
- Σαντορίνης, Π. (1960). Περί της εν Ελλάδα χρησιμοποιήσεως της ενέργειας πνοής ανέμου ως κινητηρίου δυνάμεως. *Τεχνικά Χρονικά*, 195–196, 25.
- Σταμάτη, Α. (2014). Διερεύνηση της αποτελεσματικότητας 37 Ελληνικών Εκπαιδευτικών Ιδρυμάτων που συμμετείχαν στο πρόγραμμα Κοινωνικής Δράσης ERASMUS για τα ακαδημαϊκά έτη 2007-08 έως 2010-11 με βάση την Περιβάλλουσα Ανάλυση Δεδομένων. <https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/8426>
- Τριανταφυλλίδης, Ι. (2018). Χωροθέτηση χερσαίων αιολικών πάρκων με χρήση πολυκριτηριακής Ανάλυσης και Συστημάτων γεωγραφικών πληροφοριών Η περίπτωση της Τήνου no.pdf [Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης]. http://ikee.lib.auth.gr/record/300171/files/TRIANTAFYLLIDIS581_DE.pdf
- Τσαλιάνης, Α. (2015). Αξιολόγηση Θερμοηλεκτρικών Σταθμών με τη μέθοδο *Data Envelopment Analysis (DEA)*. Πανεπιστήμιο Μακεδονίας.
- ΥΠ.Ε.Κ.Α. (2020a). Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. 4.
- ΥΠ.Ε.Κ.Α. (2020b). ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ & ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ - Ενέργεια—Ηλεκτρισμός—Ηλεκτροπαραγωγή. Υ.Π.Ε.Κ.Α. <http://www.ypeka.gr/el-gr/%CE%95%CE%BD%CE%AD%CF%81%CE%B3%CE%B5%CE%B9%CE%B1/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%B9%CF%83%CE%BC%CF%8C%CF%82/%CE%97%CE%BB%CE%B5%CE%BA%CF%84%CF%81%CE%BF%CF%80%CE%B1%CF%81%CE%B1%CE%B3%CF%89%CE%B3%CE%AE>
- Χασικίδη, Ε.-Φ. (2010). Αιολική ενέργεια σε Ελλάδα και Ευρώπη [Πανεπιστήμιο Πατρών]. [https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/4111/3/Nimertis_Chaskidi\(de\).pdf](https://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/bitstream/10889/4111/3/Nimertis_Chaskidi(de).pdf)
- Χριστοφής, Κ. (2012). Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας—Διδακτικές σημειώσεις. <http://environ.survey.ntua.gr/files/mathimata/6420/APE-kef1-6.pdf>