

Πανεπιστήμιο Κρήτης
Τμήμα Φυσικής



Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης Σχεδιασμού Ενεργειακών Συστημάτων προς την Κλιματική Ουδετερότητα

Όνομα φοιτητή: Μάριος Νικολογιάννης
Α.Μ.:4878

Επιβλέπων:
Δρ. Εμμανουήλ Καραπιδάκης

Υπεύθυνος Καθηγητής:
Δρ. Ιωάννης Κομίνης

Ηράκλειο, 2023

Περιεχόμενα

1	Εισαγωγή	5
2	Διερεύνηση Ενεργειακής Επέκτασης των ΑΠΕ στην Κρήτη	5
2.1	Συλλογή Δεδομένων/Υπάρχουσα Κατάσταση Ενεργειακού Συστήματος	5
2.2	Το Υπόδειγμα	6
3	Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης Συστήματος	7
3.1	Ενίσχυση συστήματος με φωτοβολταϊκά πάρκα	7
3.2	Ενίσχυση συστήματος με αιολικά πάρκα	11
3.3	Ενίσχυση συστήματος με φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα	13
4	Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης	17
4.1	Περίπτωση επιπρόσθετης ηλιακής εκμετάλλευσης	17
4.2	Περίπτωση επιπρόσθετης αιολικής εκμετάλλευσης	18
4.3	Περίπτωση επιπρόσθετης ηλιακής και αιολικής εκμετάλλευσης	19
5	Συμπεράσματα και μελλοντικές προσπάθειες	20
6	Ευχαριστίες	21
7	Βιβλιογραφία	21

Κατάλογος Σχημάτων

1	Ενεργειακό μείγμα Κρήτης για το 2022	6
2	Διάγραμμα ροής υπολογισμού $NewLink[i]$	7
3	Εξάρτηση $sumNewLink$ από το x	8
4	Διάγραμμα ροής υπολογισμού $NewRej[i]$	9
5	Εξάρτηση $sumNewRej$ από το x	10
6	Εξάρτηση $sumNewLink$ από το y	11
7	Εξάρτηση $sumNewRej$ από το y	12
8	Εξάρτηση $sumNewLink$ από το x και y για $limit = 150MWh$	13
9	Εξάρτηση $sumNewRej$ από το x και y	14
10	Προβολή τιμών ποσοστών σε επίπεδο	15
11	Μέγιστη ευθεία της εφικτής περιοχής	16
12	Προσέγγιση $h(x)$	17
13	Ενεργειακό μείγμα για βέλτιστο x	18
14	Ενεργειακό μείγμα για βέλτιστο y	19
15	Ενεργειακό μείγμα για βέλτιστα x και y	20

Κατάλογος Πινάκων

1	Ενδεικτικές τιμές $sumNewLink(x)$	8
2	Ενδεικτικές τιμές $sumNewRej(x)$	9
3	Ενδεικτικές τιμές $sumNewLink(y)$	11
4	Ενδεικτικές τιμές $sumNewRej(y)$	12
5	Ενδεικτικές τιμές $sumNewLink(x, y)$	13
6	Ενδεικτικές τιμές $sumNewRej(x, y)$	14
7	Ενδεικτικές τιμές ποσοστών απορρίψεων	15

1 Εισαγωγή

Οι τρέχουσες μεταβολές στην χημική σύσταση της ατμόσφαιρας και στο κλιματικό προφίλ του πλανήτη γενικότερα χρήζουν τη λήψη μια σειράς αποφάσεων από την ανθρωπότητα που θα περιορίσουν τις συνέπειες των αλλαγών αυτών και θα αποτραπεί η ενδεχόμενη σημαντική πτώση του επίπεδο ζωής των ανθρώπων. Επιθυμητό είναι οι αποφάσεις αυτές να επιφέρουν μακροπρόθεσμα τα απαραίτητα αποτελέσματα, διατηρώντας (ή ακόμα και βελτιώνοντας) ταυτόχρονα το επίπεδο ζωής των ανθρώπων, με τις ενδιάμεσες αλλαγές να συνιστούν μία ομαλή μετάβαση σε αυτή την τελική κατάσταση.

Ένας από τους παράγοντες που συνεισφέρουν στην κλιματική αλλαγή είναι ο τρόπος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας για τις καθημερινές ανάγκες των ανθρώπων και τον σύγχρονο τρόπο ζωής τους, τρόπος ο οποίος παράγει τεράστιες ποσότητες ρύπων, καθώς τεράστια είναι και η ζήτηση για ηλεκτρική ενέργεια χαμηλού κόστους παραγωγής. Στα πλαίσια των στόχων που προαναφέρθηκαν, γίνονται προσπάθειες ανάπτυξης νέων τεχνολογιών μετατροπής και εκμετάλλευσης ενέργειας, καθώς και σχεδίασης ενεργειακών συστημάτων.

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η βελτιστοποίηση ενός υπάρχοντος ενεργειακού συστήματος με σκοπό τη μετατροπή του σε ένα πιο οικολογικό, λαμβάνοντας υπόψιν τη διατήρηση της ζήτησης των καταναλωτών, μερικούς τεχνικούς περιορισμούς, και τη χρήση υπαρχουσών τεχνολογιών παραγωγής ενέργειας (φωτοβολταϊκά πάνελ, ανεμογεννήτριες, γεννήτριες συμβατικού τύπου).

2 Διερεύνηση Ενεργειακής Επέκτασης των ΑΠΕ στην Κρήτη

2.1 Συλλογή Δεδομένων/Υπάρχουσα Κατάσταση Ενεργειακού Συστήματος

Για τους σκοπούς της εργασίας, το ενεργειακό σύστημα που επιλέχθηκε ήταν το δίκτυο παραγωγής και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας του νησιού της Κρήτης. Αφορμή για την επιλογή αυτή αποτελεί η ολοκλήρωση της διασύνδεσης Κρήτης-Πελοποννήσου με το ευρύτερο δίκτυο της χώρας, επιτρέποντας μεταβολές στο σύστημα της Κρήτης προς την κλιματική ουδετερότητα.

Έτσι, συλλέχθηκαν δεδομένα σχετικά με την παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας εντός του νησιού για το έτος 2022. Για το έτος αυτό, η ζήτηση του νησιού σε ηλεκτρικό ρεύμα (*Load*) καλύπτεται από την παραγωγή ισχύος από συμβατικούς σταθμούς (*Conv*), την παραγωγή ισχύος από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (*RES*) και από την εισαγωγή ισχύος μέσω της διασύνδεσης Κρήτης-Πελοποννήσου (*Link*). Σε περίπτωση που η παραγωγή από *RES* υπερβεί τη ζήτηση, η διαφορά εξάγεται στην ενδοχώρα πάλι μέσω της διασύνδεσης, κάτι το οποίο δε συμβαίνει με τους συμβατικούς σταθμούς, μιας και η παραγωγή τους είναι ελεγχόμενη. Ωστόσο, η διασύνδεση δύναται να μεταφέρει από και προς το σύστημα μέχρι μία συγκεκριμένη ποσότητα ισχύος ανά ώρα (*limit*), που σημαίνει ότι σε περίπτωση που σε κάποια ώρα της ημέρας η παραγωγή των ΑΠΕ ξεπεράσει τη ζήτηση και τη μέγιστη δυνατή ποσότητα εξαγωγής, η διαφορά απορρίπτεται από το σύστημα ανεκμετάλλευτη (*Rej*).

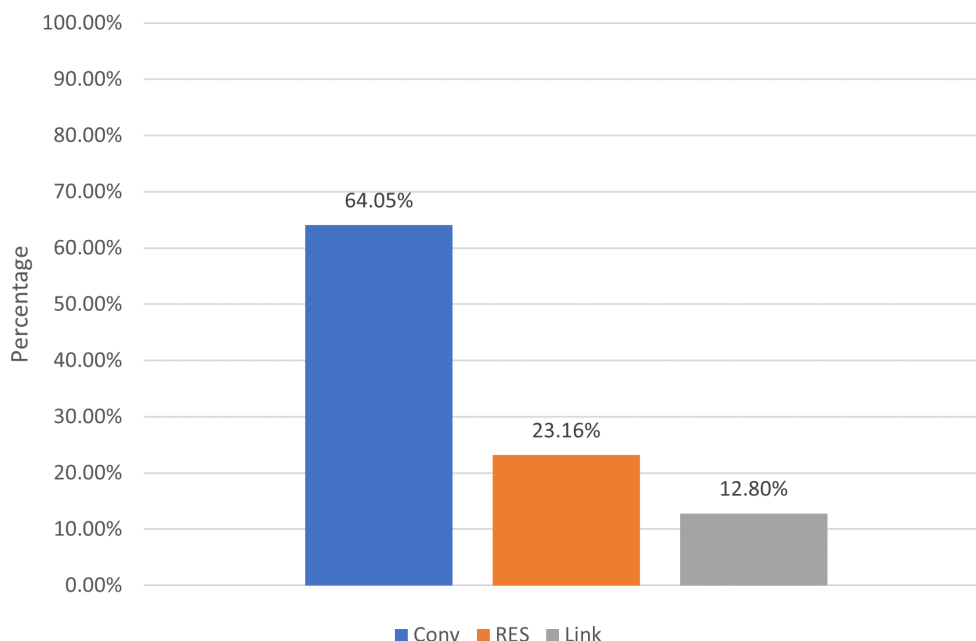
Τα παραπάνω μπορούν να εκφραστούν από την εξίσωση:

$$Load[i] = Conv[i] + RES[i] \pm Link[i] - Rej[i] \quad (1)$$

Όπου κάθε i όρος η τιμή της εκάστοτε ποσότητας σε MWh την ώρα i . Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται το ενεργειακό μείγμα της χρονιάς 2022, έτος στο οποίο σχεδόν τα 2/3 της παραγωγής ενέργειας

προήλθαν από ρυπογόνα, συμβατικά μέσα.

Σχήμα 1: Ενεργειακό μείγμα Κρήτης για το 2022



2.2 Το Υπόδειγμα

Η βελτιστοποίηση του συστήματος αποσκοπεί στην αύξηση της παραγωγής RES σε $NewRES$ ώστε να υπάρχει μεγαλύτερη διείσδυση των ΑΠΕ στο ετήσιο ενεργειακό μείγμα του νησιού, άρα η (1) γίνεται:

$$Load[i] = NewConv[i] + NewRES[i] \pm NewLink[i] - NewRej[i] \quad (2)$$

Όπου

$$NewRES[i] = RES[i] + x \cdot PV_{norm}[i] + y \cdot WT_{norm}[i] \quad (3)$$

Οι όροι x και y εκφράζουν την εγκατεστημένη ισχύ φωτοβολταϊκών και αιολικών αντίστοιχα που θα ενισχύσουν το σύστημα. $PV_{norm}[i]$ και $WT_{norm}[i]$ είναι οι ωριαίες κανονικοποιημένες παραγωγές ενέργειας των φωτοβολταϊκών και αιολικών αντίστοιχα την ώρα i σε μονάδες $\frac{kWh}{kW}$.

Αθροίζοντας τους όρους της εξίσωσης (3) για όλες τις ώρες του έτους προκύπτει:

$$\sum_{i=1}^{8670} NewRES[i] = \sum_{i=1}^{8670} RES[i] + x \cdot \sum_{i=1}^{8670} PV_{norm}[i] + y \cdot \sum_{i=1}^{8670} WT_{norm}[i] \quad (4)$$

όπου το x και το y βγαίνουν εκτός αθροίσματος ως κοινοί παράγοντες. Κάθε όρος αθροίσματος κάποιας ποσότητας θα συμβολίζεται από εδώ και μπρός ως $sumΠοσότητα$, π.χ. $\sum_{i=1}^{8670} \pm NewLink[i] = sumNewLink$. Άρα η εξίσωση (4) συμβολίζεται ως:

$$sumNewRES = sumRES + x \cdot sumPV + y \cdot sumWT \quad (5)$$

Για το φωτοβολταϊκό και αιολικό πάρκο των οποίων οι μετρήσεις αξιοποιήθηκαν για την παρούσα εργασία ισχύουν $sumPV = 1703.68 \frac{kWh}{kW}$ και $sumWT = 2789.169 \frac{kWh}{kW}$.

Σκοπός, πλέον, είναι η μεγιστοποίηση της ετήσιας παραγωγής ΑΠΕ, όπως εκφράζεται στην εξίσωση (5), υπό τον περιορισμό άνω φραγμού ετήσιου ποσοστού απορριφθείσας ενέργειας στο 10% της ετήσιας παραγωγής από ΑΠΕ.

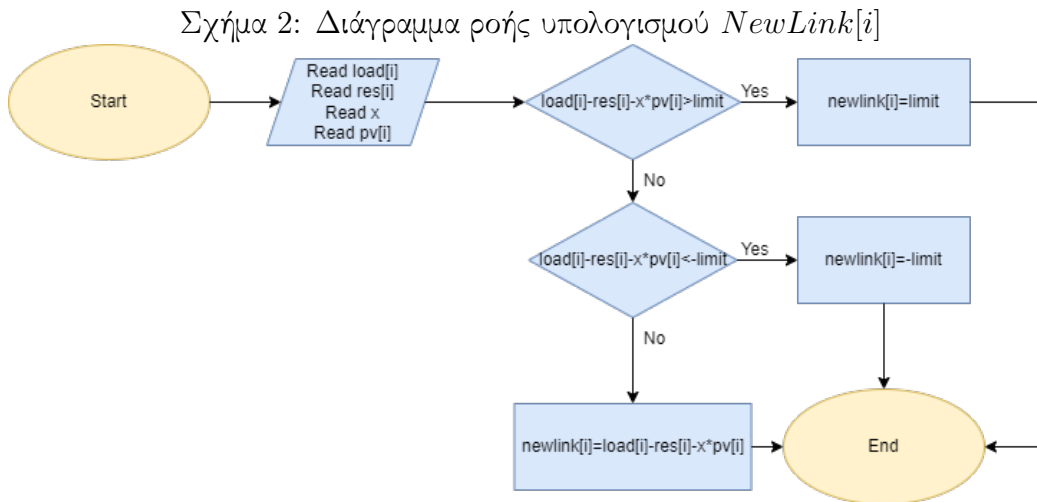
Στην επόμενη ενότητα, αναπτύσσονται τρεις περιπτώσεις μελέτης, μία όπου εγκαθίσταται μόνο ισχύς φωτοβολταϊκών ($x > 0, y = 0$), μία όπου γίνεται εγκατάσταση μόνο αιολικών ($x = 0, y > 0$), και τέλος εγκαθίστανται και οι δύο μορφές μετατροπής ενέργειας ($x, y \geq 0$).

3 Αλγόριθμοι Βελτιστοποίησης Συστήματος

Στα πλαίσια του οικολογικού σχεδιασμού, πρέπει να επιλεγεί μία σειρά προτεραιότητας παραγωγής ισχύος σε περίπτωση που η παραγωγή των ΑΠΕ δεν επαρκεί. Επιλέγεται η εισαγωγή από τη διασύνδεση ως προσπάθεια κάλυψης της διαφοράς μεταξύ φορτίου και παραγωγής ΑΠΕ, και αν η διαφορά ξεπερνά το όριο *limit*, τότε να καλύπτεται η εναπομείνσα ζήτηση από τους συμβατικούς σταθμούς. Ο λόγος είναι ότι έτσι ελαχιστοποιείται η κατανάλωση ορυκτών καυσίμων σε τοπικό επίπεδο και άρα η τοπική ρύπανση.

3.1 Ενίσχυση συστήματος με φωτοβολταϊκά πάρκα

Υπολογισμός μεταφοράς ενέργειας από/προς το σύστημα: Λαμβάνοντας υπόψιν τον συλλογισμό στην εισαγωγή της ενότητας, η εισροή/εκροή προς/από το σύστημα για κάθε ώρα *i* υπολογίζεται όπως περιγράφεται στο διάγραμμα ροής του Σχήματος 2:



Αθροίζοντας όλους τους όρους για όλες τις ώρες του έτους προκύπτει

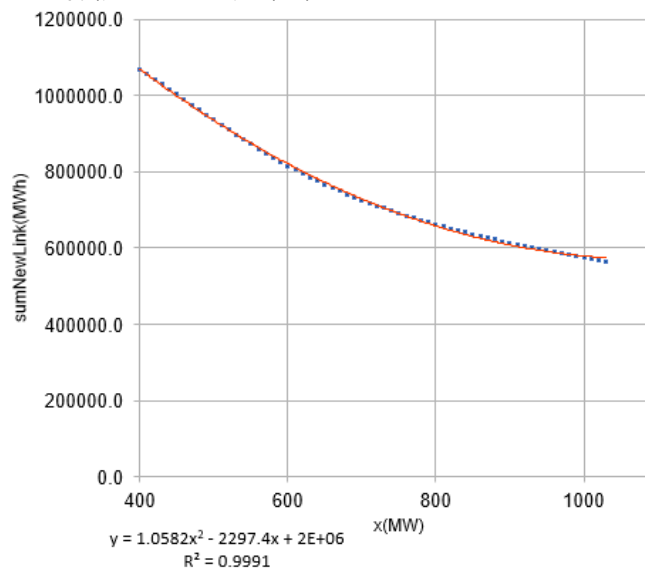
$$\sum_{i=1}^{8670} \pm NewLink[i] = \sum_{i=1}^{8670} Load[i] - \sum_{i=1}^{8670} newRES[i] = \sum_{i=1}^{8670} Load[i] - \sum_{i=1}^{8670} RES[i] - x \cdot \sum_{i=1}^{8670} PV_{norm}[i] \quad (6)$$

Έτσι, υπολογίζεται η συνολική εισροή/εξροή ενός έτους συναρτήσει του x . Ως αποτέλεσμα του περιορισμού, προκύπτει ο πίνακας ενδεικτικών τιμών, Πίνακας 1, και δημιουργείται συνάρτηση με μεταβλητή x και αντίστοιχη γραφική παράσταση:

Πίνακας 1: Ενδεικτικές τιμές $sumNewLink(x)$

$limit = 150MWh$	
$x(MW)$	$sumNewLink(MWh)$
400	1069274.1
410	1056222.8
420	1043075.6
430	1029849.2
440	1016587.4
450	1003237.8
460	989846.7
470	976445.8
480	963084.5
490	949751.8
500	936508.0
510	923422.4

Σχήμα 3: Εξάρτηση $sumNewLink$ από το x

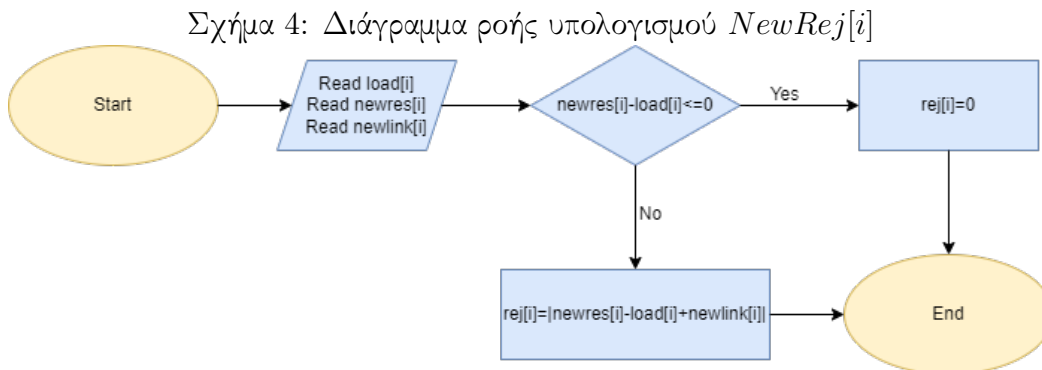


Απορρίψεις συστήματος: Αφού υπάρχει μέγιστη τιμή ενέργειας που μπορεί να εξαχθεί από το σύστημα, τότε η υπολειπόμενη που παράχθηκε από τις ΑΠΕ δεν μπορεί να αξιοποιηθεί και απορρίπτεται. Ο υπολογισμός της απορριφθείσας ενέργειας ανά ώρα υπολογίζεται ως εξής: Αν $Load[i] \geq newRES[i] + limit$ τότε η ενέργεια που παράγεται από ΑΠΕ αξιοποιείται πλήρως και έτσι $NewRej[i] = 0$. Διαφορετικά, η ζήτηση την ώρα i θα καλύπτεται και η περίσσεια ενέργειας θα εξάγεται μέσω της διασύνδεσης, όσο επιτρέπει το όριο του αγωγού, ενώ η υπόλοιπη απορρίπτεται

από το σύστημα. Σε αυτή την περίπτωση, δηλαδή, ισχύει:

$$NewRej[i] = |NewRES[i] - Load[i] + NewLink[i]| \quad (7)$$

Η παραπάνω διαδικασία περιγράφεται στο αντίστοιχο διάγραμμα ροής του Σχήματος 4:



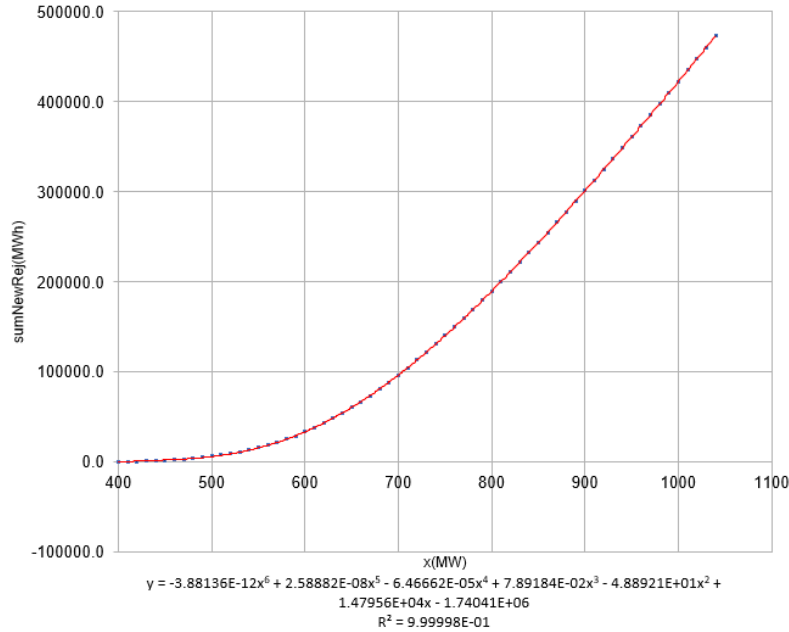
Έτσι, προκύπτει ενδεικτικός πίνακας τιμών:

Πίνακας 2: Ενδεικτικές τιμές $sumNewRej(x)$

$limit = 150MWh$	
$x(MW)$	$sumNewRej(MWh)$
500	6137.5
510	7521.0
520	9154.3
530	11028.4
540	13126.0
550	15598.1
560	18444.6
570	21605.2
580	25131.5
590	29048.0
600	33297.2

και γραφική παράσταση:

Σχήμα 5: Εξάρτηση sumNewRej από το x



Επιβάλλοντας το μέγιστο ποσοστό απορρίψεων το χρόνο ($\leq 10\%$), τότε προκύπτει η ανισότητα:

$$\frac{sumNewRej}{sumNewRES} \leq 0.1$$

Από την προσέγγιση της συνάρτησης $g(x)$ του Σχήματος 5 και τη σχέση (5), για $y = 0$, προκύπτει:

$$\begin{aligned} & -3.88136 \cdot 10^{-12} \cdot x^6 + 2.58882 \cdot 10^{-8} \cdot x^5 - 0.0000646662 \cdot x^4 \\ & + 0.0789184 \cdot x^3 - 48.8921 \cdot x^2 + 14625.2 \cdot x - 1.81528 \cdot 10^6 \leq 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Λόγω γραμμικότητας της αντικείμενης συνάρτησης, η βέλτιστη λύση είναι αυτή που βρίσκεται στο όριο της εφικτής περιοχής του προβλήματος, δηλαδή εκεί όπου η ανισότητα (8) γίνεται εξίσωση.

Η ρίζα της εξίσωσης αποτελεί την προσέγγιση της βέλτιστης λύσης και υπολογίζεται με τη μέθοδο Newton-Raphson. Η μέθοδος αυτή είναι κατάλληλη για εύρεση ριζών συνεχών και παραγωγίσιμων συναρτήσεων και συγκλίνει απαιτώντας μικρό υπολογιστικό χρόνο. Η μέθοδος εφαρμόζεται σε διάστημα της άγνωστης μεταβλητής $[a, b]$, με $f(a) \cdot f(b) < 0$. Ξεκινώντας από μία αρχική προσέγγιση λύσης $x_0 \in [a, b]$, η $f(x_0)$ υπολογίζεται, καθώς και η πρώτη παράγωγος $f'(x_0)$. Η νέα προσέγγιση, x_1 , αποτελεί το σημείο τομής της $y = 0$ και της ευθείας που καθορίζεται από την $f'(x_0)$, ώστε $y = f'(x_0) \cdot (x - x_1)$. Για $x = x_0$, $f(x_0) = f'(x_0) \cdot (x_0 - x_1) \Rightarrow x_1 = x_0 - \frac{f(x_0)}{f'(x_0)}$. Η μέθοδος επαναλαμβάνεται μέχρι η $x_n = x_{n-1} - \frac{f(x_{n-1})}{f'(x_{n-1})}$ να βρεθεί, όπου ιδανικά ισχύει $f'(x_{n-1}) \neq 0 \forall x_{n-1}$ με $f(x_n) \leq \epsilon$, ή μέχρι δύο συνεχόμενες προσεγγίσεις, x_n, x_{n-1} ικανοποιούν την $|x_n - x_{n-1}| \leq \epsilon$, όπου ϵ το σφάλμα προσέγγισης καθορισμένο από τον χρήστη. Από τις n το πλήθος ρίζες πολυωνύμου n βαθμού αγνοούνται πάντα οι μιγαδικές ρίζες, οι αρνητικές, καθώς και οι ρίζες εκτός διαστήματος προσέγγισης της συνάρτησης ως μη εφικτές λύσεις στο πρόβλημα εύρεσης βέλτιστης εγκατεστημένης ισχύος.

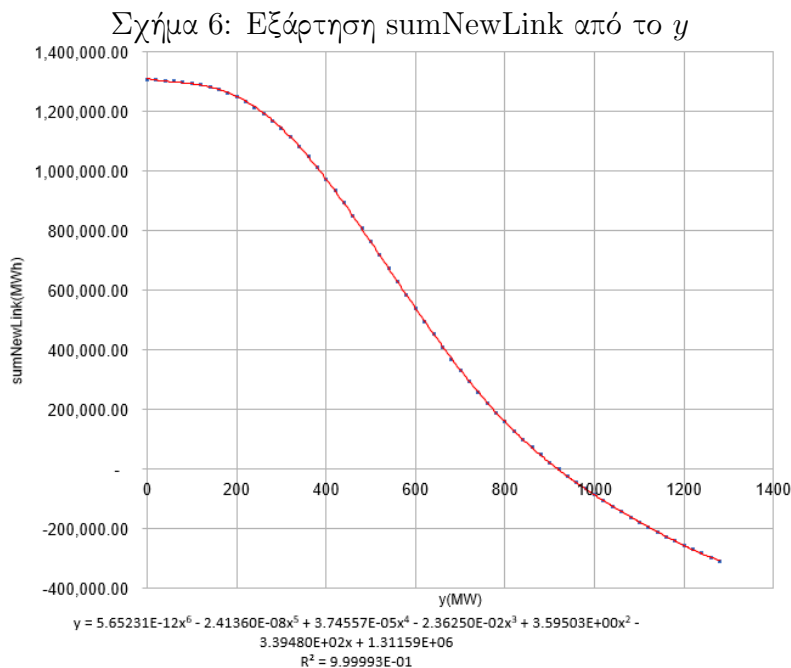
Εφαρμόζοντας στην (8) τη μέθοδο Newton-Raphson στο διάστημα $[0, 850]$ MW με $\epsilon = 10^{-10}$ και αρχική προσέγγιση ρίζας στη μέση του διαστήματος, προκύπτει ως προσεγγιστική λύση η τιμή $x = 824.126$ MW με $g(x) \approx 0$ MWh.

3.2 Ενίσχυση συστήματος με αιολικά πάρκα

Υπολογισμός μεταφοράς ενέργειας από/προς το σύστημα: Εφαρμόζοντας την ίδια μέθοδο με την παράγραφο 3.1 για την περίπτωση που λαμβάνεται υπόψιν μόνο η συνεισφορά των αιολικών πάρκων προκύπτει μη γραμμική συνάρτηση $sumNewLink(y)$ με πίνακα ενδεικτικών τιμών και αντίστοιχη γραφική παράσταση:

Πίνακας 3: Ενδεικτικές τιμές $sumNewLink(y)$

$limit = 150MWh$	
$y(MW)$	$sumNewLink(MWh)$
0	1307585.0
20	1306187.63
40	1304393.46
60	1302089.63
80	1299079.48
100	1295130.05
120	1289728.48
140	1282655.26
160	1273750.74
180	1262731.66
200	-1249462.76

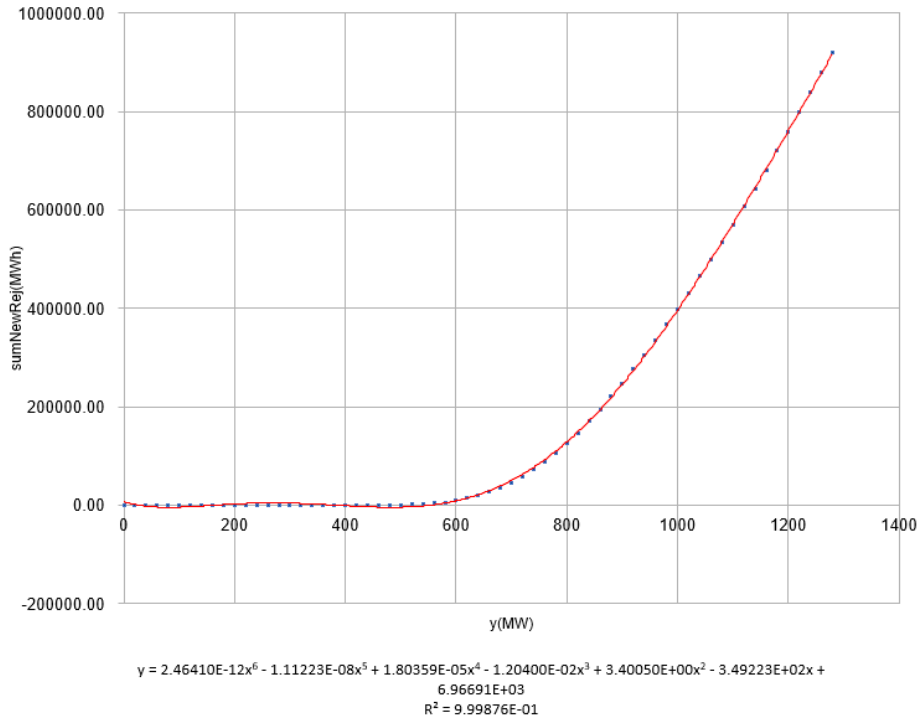


Απορρίψεις συστήματος: Εφαρμόζοντας τις ίδιες μεθόδους υπολογισμού με την περίπτωση $sumNewRej(x)$, προκύπτει συνάρτηση $sumNewRej(y)$ με ενδεικτικές τιμές και γραφική παράσταση:

Πίνακας 4: Ενδεικτικές τιμές $sumNewRej(y)$

$limit = 150MWh$	
$y(MW)$	$sumNewRej(MWh)$
900	247726.32
920	276093.53
940	305435.19
960	335675.00
980	366799.50
1000	398764.01
1020	431497.91
1040	465082.45
1060	499346.20
1080	534340.47
1100	570041.27

Σχήμα 7: Εξάρτηση $sumNewRej$ από το y



Επιβάλλοντας την συνθήκη

$$\frac{sumNewRej}{sumNewRES} \leq 0.1$$

σε συνδυασμό με την προσέγγιση συνάρτησης $g(y)$ στο Σχήμα 7 και τη σχέση (5), για $x = 0$, προκύπτει η ανισότητα:

$$2.4641 \cdot 10^{-12} \cdot y^6 - 1.11223 \cdot 10^{-8} \cdot y^5 + 0.0000180359 \cdot y^4$$

$$-0.01204 \cdot y^3 + 3.40050 \cdot y^2 - 628.14 \cdot y - 67899.7 \leq 0 \quad (9)$$

Για ακόμα μία φορά αναζητάται η μεγιστοποίηση της παραγωγής των ΑΠΕ με τον ισχύοντα περιορισμό και εφαρμόζεται στην (9) η μέθοδος Newton-Raphson στο διάστημα $[500,1000]$ MW με αρχική προσέγγιση στη μέση του διαστήματος. Προκύπτει προσέγγιση ρίζας 968.266 MW με τιμή συνάρτησης $g(y) = -1.44064 \cdot 10^{-9}$ MWh.

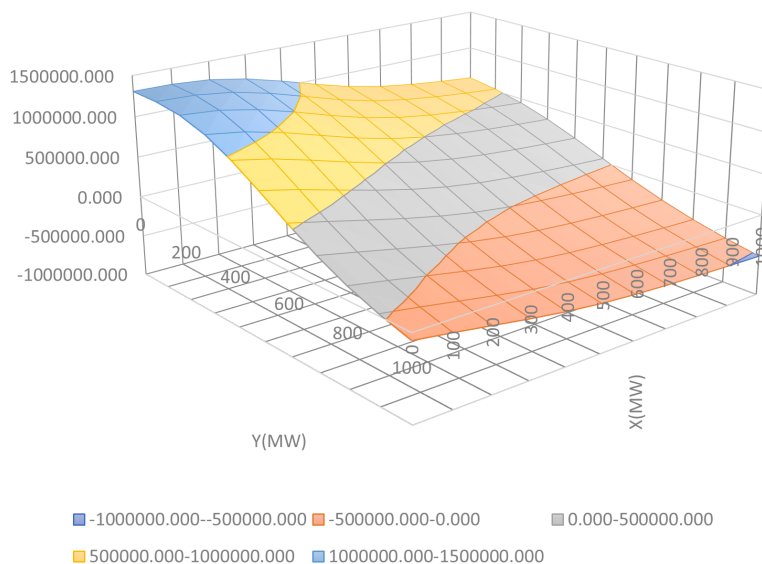
3.3 Ενίσχυση συστήματος με φωτοβολταϊκά και αιολικά πάρκα

Υπολογισμός μεταφοράς ενέργειας από/προς το σύστημα: Επεκτείνοντας τη μέθοδο στην περίπτωση δύο μεταβλητών x και y , προκύπτει ο πίνακας ενδεικτικών τιμών με την αντίστοιχη γραφική παράσταση για $limit = 150$ MWh:

Πίνακας 5: Ενδεικτικές τιμές $sumNewLink(x, y)$

	y(MW)						
	0	100	200	300	400	500	
x(MW)	0	1307585.30	1295130.05	1249462.76	1143299.81	974502.09	764395.34
100	1301842.05	1279431.12	1210704.20	1074203.71	882499.61	660928.78	
200	1267704.28	1220559.57	1121996.27	963143.83	760221.19	540089.31	
300	1187587.06	1114350.40	995792.16	826952.46	628137.07	422906.87	
400	1069274.12	980578.76	854934.40	691865.72	508452.15	317854.23	
500	936508.03	844728.00	727828.70	580264.30	411871.06	233755.01	
600	815844.03	734882.21	632579.38	498360.02	340540.68	171625.50	
700	725723.69	657831.74	565818.89	439581.77	289634.47	127371.37	
800	662104.92	602211.24	516031.24	395807.99	251261.00	93559.67	
900	613934.98	558473.76	476007.03	360651.10	220110.55	66173.11	

Σχήμα 8: Εξάρτηση $sumNewLink$ από το x και y για $limit = 150$ MWh

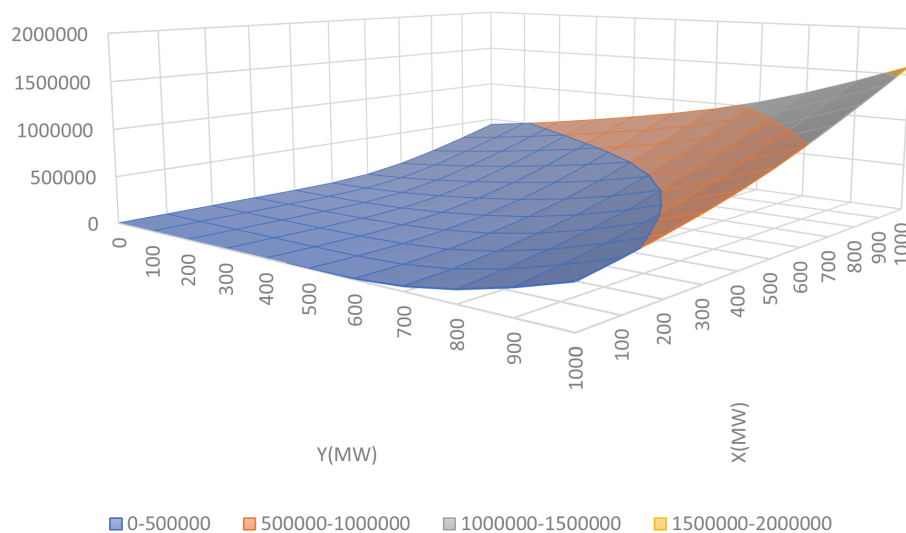


Απορρίψεις συστήματος: Υπολογίζονται, επίσης, και οι αντίστοιχες απορρίψεις του συστήματος συναρτήσει των x και y :

Πίνακας 6: Ενδεικτικές τιμές $sumNewRej(x, y)$
 y (MW)

	0	100	200	300	400	500
0	0	0	2.84E-14	6.96E-13	26.625	694.94
100	0	0	3.13E-13	3.01E-12	171.68	2695.08
200	2.84E-14	6.43E-13	3.93E-12	111.08	2168.60	14105.77
300	1.56E-12	6.96E-12	311.71	3079.47	15798.38	46887.96
400	239.47	1259.40	5695.44	20900.12	53122.56	101329.93
500	6137.46	13565.16	33300.92	68608.03	118161.8	180429.30
600	33297.17	57981.96	97148.63	148822.00	210857.50	283611.22
700	96375.46	139108.60	192331.50	254295.10	325649.00	405904.47
800	189732.10	244109.40	306204.60	376059.40	453944.70	539404.96
900	300929.80	362884.50	431144.50	507358.40	590117.00	679858.58

Σχήμα 9: Εξάρτηση $sumNewRej$ από το x και y

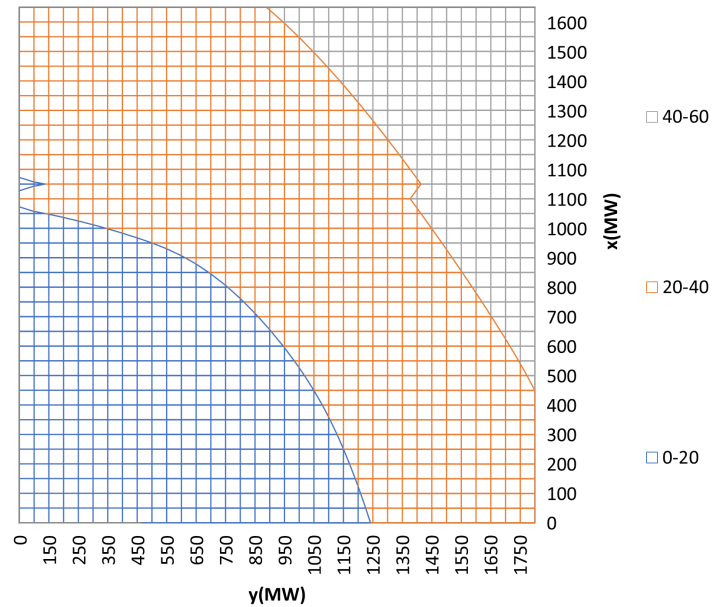


Για την εύρεση του επιθυμητού ορίου απορρίψεων υπολογίζεται ο λόγος $\frac{sumNewRej}{sumNewRES}$ ως ποσοστό συναρτήσει των x και y :

Πίνακας 7: Ενδεικτικές τιμές ποσοστών απορρίψεων
 y (MW)

	200	400	600	800	1000	1200	
0	2.18E-18	0.00	0.38	4.21	11.27	18.53	
100	2.12E-17	0.01	0.78	5.48	12.59	19.71	
200	2.39E-16	0.10	1.83	7.04	14.08	20.97	
x (MW)	300	0.017	0.67	3.43	8.86	15.68	22.32
	400	0.29	2.09	5.47	10.86	17.44	23.84
	500	1.54	4.35	7.93	13.16	19.44	25.55
	600	4.17	7.30	10.78	15.71	21.62	27.40
	700	7.70	10.65	13.83	18.37	23.88	29.30
	800	11.47	14.07	16.87	21.00	26.10	31.18
	900	15.18	17.37	19.80	23.53	28.24	33.00
	1000	18.74	20.51	22.59	25.94	30.30	34.75
	1100	22.10	23.49	25.23	28.24	32.26	36.44

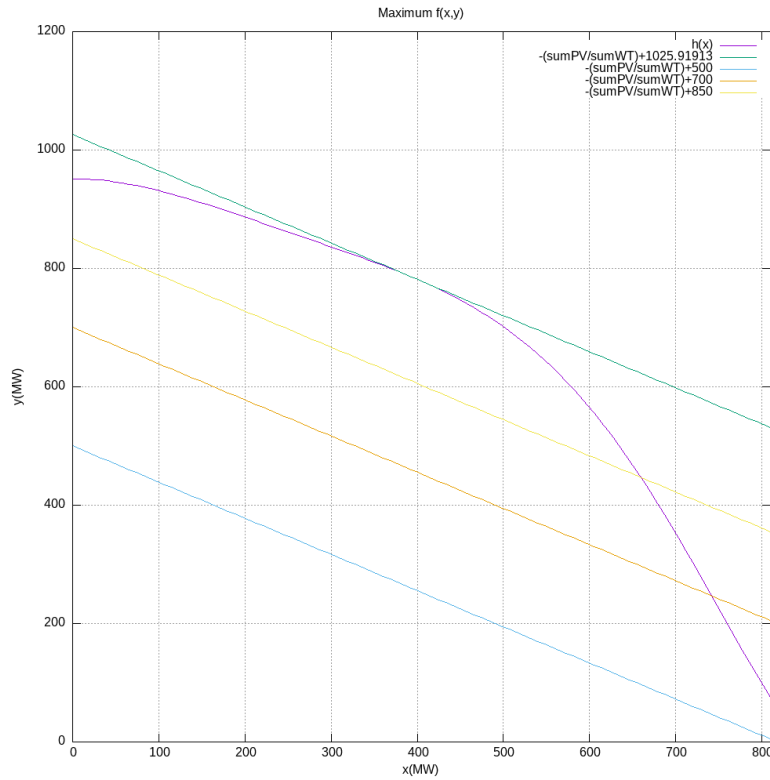
Σχήμα 10: Προβολή τιμών ποσοστών σε επίπεδο



Όπως έχει προαναφερθεί, η επιθυμητή λύση είναι στο όριο του 10% όπου η παραγωγή ΑΠΕ είναι μέγιστη. Δηλαδή, τα ζεύγη (x,y) που βρίσκονται εντός του μπλε πλαισίου.

Τώρα, μένει να βρεθεί το βέλτιστο ζεύγος από αυτό το διάστημα λύσεων. Στη μεγιστοποίηση της εξίσωσης (5) συνεισφέρουν μόνο οι όροι $x \cdot \text{sumPV} + y \cdot \text{sumWT}$, που αποτελούν μία ευθεία της μορφής $a \cdot x + b \cdot y = c$. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 11, η ευθεία με το μέγιστο c είναι αυτή που εφάπτεται πάνω στην καμπύλη $\text{sumNewRejpercent}(x,y) = 10\%$.

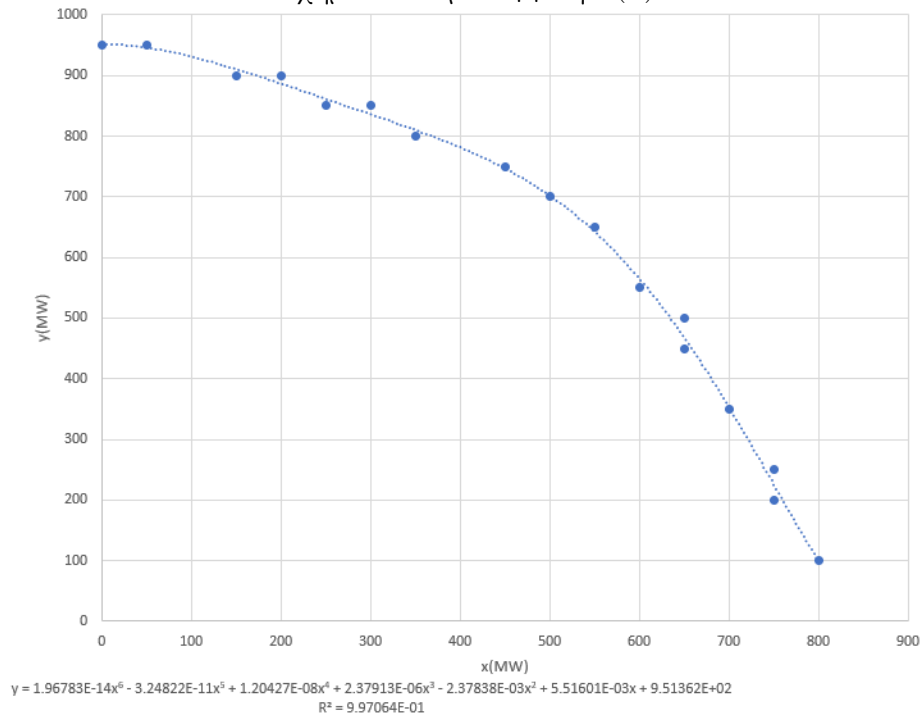
Σχήμα 11: Μέγιστη ευθεία της εφικτής περιοχής



Άρα, η λύση μπορεί να προσεγγιστεί ως το σημείο της καμπύλης $h(x)$ που αποτελεί προσέγγιση της $sumNewRej_{percent}(x, y) = 10\%$ όπου η ευθεία δρα ως πρώτη παράγωγός της και η κλίση της ισούται με $-\frac{sumPV}{sumWT}$.

Για τον σκοπό αυτό, αναζητούνται τα ζεύγη (x, y) εντός ενός εύρους ποσοστού απορρίψεων κοντά στο 10%, με διαφορά ποσοστών που να εξασφαλίζει αρκετό αριθμό σημείων για προσέγγιση με συνάρτηση (στη συγκεκριμένη περίπτωση $\pm 0.6\%$), ώστε να γίνει η προσέγγιση $h(x)$, όπου βρίσκεται η μέγιστη παραγωγή του συστήματος ΑΠΕ.

Σχήμα 12: Προσέγγιση $h(x)$



Για να βρεθεί το σημείο αυτό, γίνεται εφαρμογή της μεθόδου Newton-Raphson στο διάστημα x $[0,800]$ στην συνάρτηση

$$\frac{dh(x)}{dx} = -\frac{\text{sumPV}}{\text{sumWT}}$$

Με αντικατάσταση αριθμών, η τελική συνάρτηση $g(x)$ στην οποία εφαρμόζεται η Newton-Raphson είναι η:

$$1.1807 \cdot 10^{-13} \cdot x^5 - 1.62411 \cdot 10^{-10} \cdot x^4 + 4.81708 \cdot 10^{-8} \cdot x^3$$

$$+ 7.13739 \cdot 10^{-6} \cdot x^2 - 0.00475676 \cdot x + 0.616336 = 0 \quad (10)$$

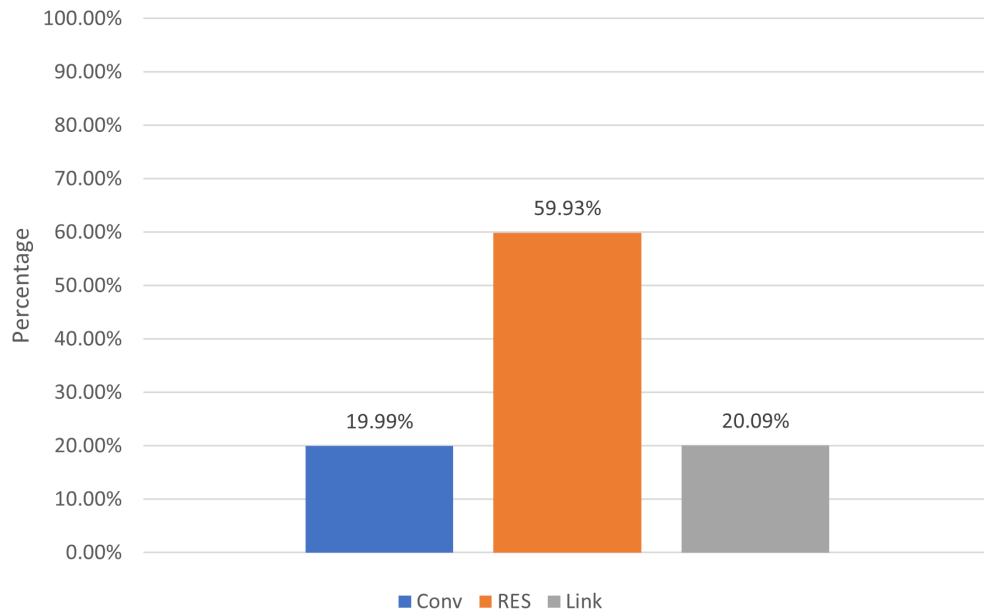
Με τιμή προσέγγισης ρίζας 395.634MW και τιμή συνάρτησης $g(x) = -5.78404 \cdot 10^{-14}$. Για τη συγκεκριμένη τιμή x , $h(395.634) = y = 784.258\text{MW}$.

4 Αποτελέσματα Βελτιστοποίησης

4.1 Περίπτωση επιπρόσθετης ηλιακής εκμετάλλευσης

Για τη συγκεκριμένη τιμή x υπολογίζεται το ενεργειακό μείγμα που θα ίσχυε για το συγκεκριμένο σχεδιασμό, στον οποίο το ετήσιο ποσοστό απόρριψης ισούται με 10.0022%:

Σχήμα 13: Ενεργειακό μείγμα για βέλτιστο x

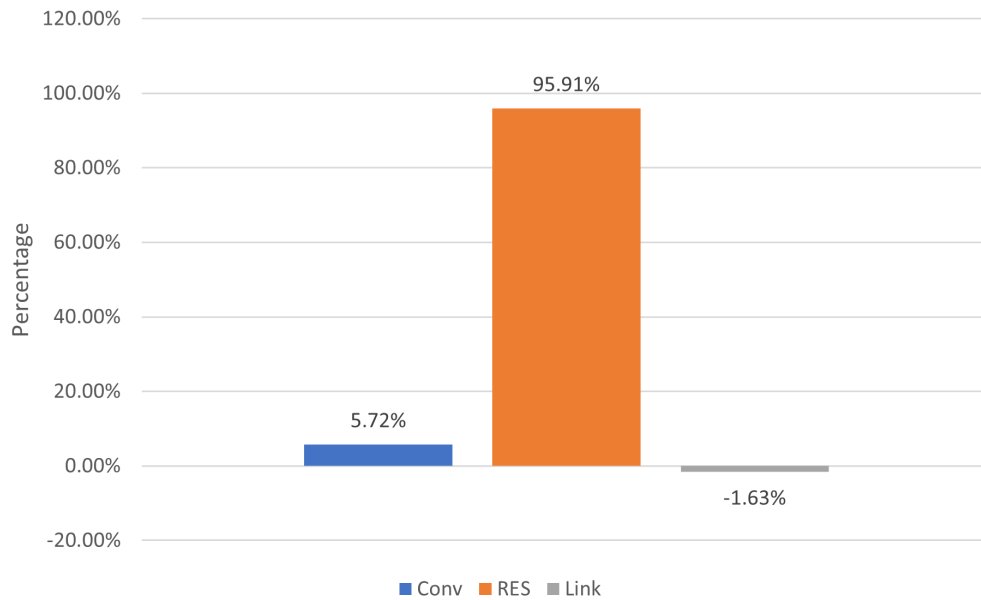


Από το Σχήμα 13 φαίνεται ότι για ενίσχυση του συστήματος μόνο με φωτοβολταϊκά πάρκα, η συνεισφορά των ΑΠΕ φτάνει κοντά στο 60%, δηλαδή αποτελεί την πλειοψηφία της παραγωγής. Ωστόσο, η συνεισφορά των συμβατικών μεθόδων και των εισαγωγών εξακολουθεί να είναι σημαντική.

4.2 Περίπτωση επιπρόσθετης αιολικής εκμετάλλευσης

Αντίστοιχα για την περίπτωση εγκατάστασης μόνο αιολικών πάρκων, υπολογίζεται το ενεργειακό μείγμα που θα ίσχυε το 2022 για τον τρέχοντα σχεδιασμό, όπου το ετήσιο ποσοστό απορριφθείσας ενέργειας αγγίζει το 10.1010%.

Σχήμα 14: Ενεργειακό μείγμα για βέλτιστο γ

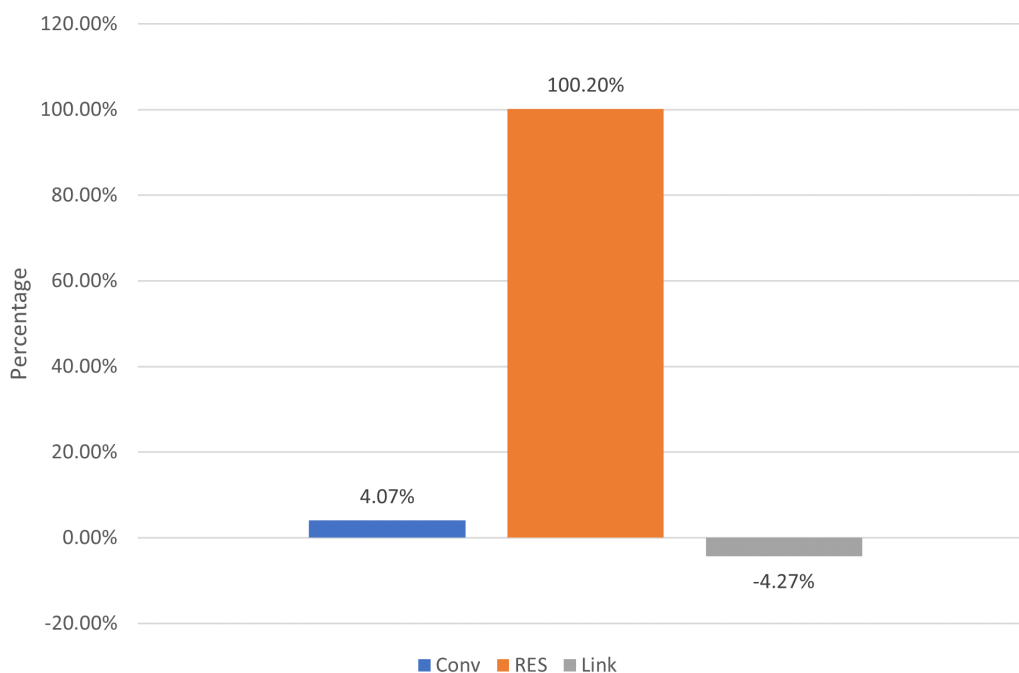


Σε αντίθεση με την πρώτη περίπτωση, η συνεισφορά των ΑΠΕ ξεπερνά το 95%, ενώ οι συμβατικοί σταθμοί αξιοποιούνται ελάχιστα και οι εισαγωγές μειώνονται κάτω από το 0% παραγωγής, μετατρέποντας το δίκτυο του νησιού σχεδόν ανεξάρτητο από το δίκτυο της ενδοχώρας, με ελάχιστες ευκαιρίες εξαγωγής κατά τη διάρκεια του έτους.

4.3 Περίπτωση επιπρόσθετης ηλιακής και αιολικής εκμετάλλευσης

Στην τελευταία περίπτωση, όπου εγκαθίστανται και οι δύο μορφές παραγωγής ενέργειας, το ενεργειακό μείγμα για σταθερή ζήτηση ίση με του 2022 διαμορφώνεται ως σύστημα με ετήσιο ποσοστό απορρίψεων 10.2701% και ενεργειακό μείγμα:

Σχήμα 15: Ενεργειακό μείγμα για βέλτιστα x και y



Στην τελευταία μελέτη περίπτωσης, για τις προσεγγίσεις των βέλτιστων x και y , η παραγωγή των ΑΠΕ ξεπερνά το 100% της ετήσιας ζήτησης, η συνεισφορά των συμβατικών σταθμών ελαχιστοποιείται κοντά στο 4%, ενώ μέσω της διασύνδεσης εξάγεται 4.27% της ετήσιας ζήτησης σε ενέργεια. Ο σχεδιασμός αυτός καθιστά το ενεργειακό σύστημα ως επί των πλείστων κλιματικά ουδέτερο, σχεδόν ανεξάρτητο και εξαγωγέα αξιοσημείωτης ποσότητας ενέργειας ετησίως ταυτόχρονα.

5 Συμπεράσματα και μελλοντικές προσπάθειες

Από την μελέτη των τριών περιπτώσεων, φαίνεται πώς επηρεάζει το ενεργειακό μείγμα η εκάστοτε τεχνολογία ΑΠΕ. Στην περίπτωση όπου το σύστημα επεκτάθηκε μόνο με φωτοβολταϊκά πάρκα, η συνεισφορά των ΑΠΕ έφτασε σχεδόν το 60%, ενώ στις άλλες δύο περιπτώσεις όπου αξιοποιήθηκαν τα αιολικά πάρκα, η συνεισφορά ξεπέρασε το 95%. Η συμπεριφορά αυτή οφείλεται στην αξιοποίηση διαφορετικών “πηγών” ενέργειας, του Ήλιου και του ανέμου. Λόγω περιοδικότητας της πλανητικής περιστροφής τα φωτοβολταϊκά πάρκα δεν παράγουν ρεύμα τις νυχτερινές ώρες, ούτε τις μέρες χωρίς ηλιοφάνεια, περιορίζοντας την αποδοτικότητά τους. Ενώ, τα αιολικά παράγουν εν δυνάμει όλες τις ώρες της ημέρας, όταν υπάρχει επαρκές αιολικό δυναμικό, καθιστώντας τα πιο αποδοτικά.

Αξιοσημείωτη είναι και η ικανότητα αναγωγής του προβλήματος μεγιστοποίησης υπό μη γραμμικό περιορισμό σε εύρεση ρίζας μη γραμμικής συνάρτησης. Αυτό οφείλεται στη γραμμική συμπεριφορά της αντικείμενης συνάρτησης προς μεγιστοποίηση που επιτρέπει την αναγωγή αυτή και “απορροφά” τον περιορισμό. Σε περίπτωση που ο σχεδιασμός του ενεργειακού συστήματος περιλάμβανε μη γραμμικούς όρους στην συνάρτηση παραγωγής (π.χ. μεθόδους αποθήκευσης) ή περισσότερο αριθμό περιορισμών (οικονομικής φύσεως, χωροταξικής κα.) θα έπρεπε να αξιοποιηθούν πιο σύνθετες μέθοδοι του μαθηματικού κλάδου Επιχειρησιακής Έρευνας (Operations Research). Ενδεικτικοί αλγόριθμοι είναι οι γενετικοί αλγόριθμοι (π.χ. Evolutionary method), αλγόριθμοι κλίσης (π.χ.

Generalized Reduced Gradient method) κ.α., μέθοδοι ιδιαίτερα εύχρηστες για προβλήματα βελτιστοποίησης μη γραμμικής αντικείμενης συνάρτησης με αρκετό αριθμό μη γραμμικών περιορισμών και ανεξάρτητων μεταβλητών, που θα απασχολήσουν το Εργαστήριο Σ.Η.Ε. του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ. σε μεταγενέστερες εργασίες.

6 Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Κομίνη για τις πολύτιμες συμβουλές του που συνέβαλλαν στην μελλοντική μου σταδιοδρομία. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τα μέλη του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας του ΕΛ.ΜΕ.ΠΑ. για την γενναιόδωρη παροχή δεδομένων, πόρων, τεχνογνωσίας και γενικότερης στήριξης, ζωτικής σημασίας για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας. Κυρίως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Καραπιδάκη για τις ανεκτίμητες συμβουλές, γνώσεις και ευκαιρίες που μου προσέφερε, οι οποίες πολλαπλασίασαν το ενδιαφέρον μου και τις γνώσεις μου σχετικά με τη σχεδίαση συστημάτων ενέργειας.

7 Βιβλιογραφία

1. Finney R.L., Weir M.D., & Giordano F.R. (2001). *Thomas' Calculus* (10th ed.). Addison Wesley Longman
2. Σταματιάδης Σ. (2023). *Εισαγωγή στην Αριθμητική Ανάλυση. Σημειώσεις Διαλέξεων και Εργασιών μαθήματος του Τμήματος Επιστήμης και Τεχνολογίας Υλικών Πανεπιστημίου Κρήτης*
3. Hillier, F.S., & Lieberman, G.J. (2021). *Introduction to Operations Research* (11th ed.). McGraw Hill