



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Βιομηχανικής Διοίκησης και Επιχειρησιακής
Έρευνας

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“Βελτιστοποίηση του εθνικού ενεργειακού μείγματος παραγωγής με την χρήση
Εξελικτικών Στρατηγικών και στοχαστικής ταξινόμησης.”

Βρυώνης Γ. Κωνσταντίνος

Επιβλέπων καθηγητής: Αθανάσιος Τόλης

Επίκουρος Καθηγητής ΕΜΠ

Αθήνα, 2015

Έποψη

Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η εφαρμογή εξελικτικών στρατηγικών και στοχαστικής ταξινόμησης (ISRES) για την βελτιστοποίηση του εθνικού μείγματος παραγωγής ενέργειας. Η αναζήτηση του βέλτιστου σχεδίου επέκτασης της ηλεκτροπαραγωγής είναι μείζονος σημασίας για τους σχεδιαστές του δικτύου, την πολιτεία, τους οικονομικούς αναλυτές και τους ερευνητές. Το ποσοστό συμβολής των τεχνολογιών και τα αντίστοιχα κόστη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας διαμορφώνουν την τελική τιμή αγοράς από τους προμηθευτές και αντίστοιχα την τελική τιμή πώλησης στους καταναλωτές.

Τροποποιείται ένα ήδη υπάρχον μοντέλο έτσι ώστε να απεικονίζει την ενεργειακή αγορά της Ελλάδας. Σε αυτό προστίθενται οι διαθέσιμες τεχνολογίες προς εκμετάλλευση και εισάγονται τα δεδομένα της ελληνικής αγοράς όπου γίνεται χρήση στοχαστικής διαδικασίας γεωμετρικής κίνησης Brown για την δημιουργία προβλέψεων.

Εντάσσονται μια σειρά από περιορισμοί όσο αφορά την Ελληνική ενεργειακή αγορά λαμβάνοντας υπόψιν τους στόχους που έχουν τεθεί από τα σχέδια NREAP και ΕΣΣ για τα έτη 2020 και 2050 αντίστοιχα. Η λύση που επιδιώκεται αποτελεί μια σειρά από παραγγελίες εγκατάστασης ισχύος έτσι ώστε αυτή να αποτελείται από τα βέλτιστα από οικονομικής φύσης βήματα για επίτευξη των στόχων αυτών.

Η μελέτη εμπεριέχει παρουσίαση και εφαρμογή της μεθόδου των εξελικτικών στρατηγικών και των μηχανισμών που χρησιμοποιεί, της μεθόδου χειρισμού περιορισμών της στοχαστικής ταξινόμησης, καθώς και των πλεονεκτημάτων που εμφανίζει κατά την διάρκεια μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης, και εφαρμογής αυτών όπως υλοποιούνται στην μέθοδο ISRES.

Εξάγονται συμπεράσματα ως προς το βέλτιστο μείγμα παραγωγής αλλά και την μελλοντική διαμόρφωση της SMP αφού αυτή λαμβάνει μέρος στην διαδικασία του προγραμματισμού. Τέλος αναλύεται η καταλληλότητα χρήσης της μεθόδου ISRES σε ένα GEP.

Ευχαριστήριο σημείωμα

Κατ' αρχάς θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Α. Τόλη και τον Β. Τσαλαβούτη για την πολύτιμη βοήθεια και καθοδήγησή τους στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την οικονομική και ψυχολογική στήριξη που μου παρείχαν κατά την διάρκεια των σπουδών μου και τον αδελφό μου για την έμπρακτη βοήθειά του. Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους τους φίλους μου που ο καθένας με τον δικό του τρόπο συνέβαλε στην προσπάθεια μου αυτή.

Πίνακας Περιεχομένων

1	Εισαγωγικά στοιχεία και μελέτη περίπτωσης.	9
1.1	Πιθανοί ενδιαφερόμενοι για την μελέτη.....	9
1.2	Υφιστάμενη κατάσταση του ενεργειακού τομέα.....	10
1.3	Οικονομική ύφεση	12
1.4	Πρωτόκολλο του Κιότο	12
1.5	Μοντέλα αγοράς	13
1.6	Διαθέσιμες προς εκμετάλλευση ΑΠΕ στην Ελλάδα.....	14
2	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	16
2.1	Εισαγωγή	16
2.2	Εθνικό σχέδιο δράσης για τις ΑΠΕ (NREAP).....	16
2.3	Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός: Οδικός χάρτης για το 2050.....	18
2.4	Generation Expansion Plan (GEP).....	19
3	Βιβλιογραφική Ανασκόπηση στην Βελτιστοποίηση	23
3.1	Εισαγωγή στην Βελτιστοποίηση- Βασικές έννοιες	23
3.1.1	<i>Τοπική και καθολική βελτιστοποίηση</i>	<i>24</i>
3.1.2	<i>Ολικό Ελάχιστο</i>	<i>24</i>
3.1.3	<i>Τοπικό Ελάχιστο.....</i>	<i>25</i>
3.2	Κατηγοριοποίηση μεθόδων	25
3.2.1	<i>Εισαγωγή.....</i>	<i>25</i>
3.2.2	<i>Βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς.....</i>	<i>26</i>
3.2.3	<i>Αιτιοκρατικές μέθοδοι</i>	<i>27</i>
3.3	Στοχαστικές μέθοδοι.....	27
3.3.1	<i>Εξελκτικοί αλγόριθμοι</i>	<i>28</i>
3.4	Εξελκτικές Στρατηγικές.....	30
3.4.1	<i>Εισαγωγή και Ιστορική αναδρομή στις Εξελκτικές Στρατηγικές 30</i>	
3.4.2	<i>Ο βασικός αλγόριθμος ES</i>	<i>32</i>
4	Η μέθοδος βελτιστοποίησης ISRES.....	40
4.1	Εισαγωγή	40
4.2	Η μέθοδος της στοχαστικής ταξινόμησης (Stochastic Ranking).....	44
4.3	Global Competitive Ranking	46
4.4	Εξελκτικές στρατηγικές στη μέθοδο SRES	47
4.5	Εξελκτικές στρατηγικές στη μέθοδο ISRES.....	48

5	Μαθηματικό μοντέλο	51
5.1	Εισαγωγή	51
5.2	Βασικές έννοιες.....	56
	5.2.1 Οριακή τιμή συστήματος (<i>System Marginal Price-SMP</i>).....	56
	5.2.2 Αξιολογική Ταξινόμηση (<i>Merit Order</i>).....	56
	5.2.3 Παραγγελίες παραγωγικής ικανότητας.....	56
	5.2.4 Μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας	56
	5.2.5 Τεχνολογία.....	57
	5.2.6 Τεχνολογική βελτίωση-καμπύλες γνώσεων.....	57
	5.2.7 Εισαγωγές και εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας	57
	5.2.8 Χρονικός ορίζοντας στα <i>GEP</i>	57
5.3	Υπολογισμός παραγωγής ενέργειας από κάθε τεχνολογία.....	58
5.4	Ενδογενής Υπολογισμός <i>SMP</i>	59
5.5	Αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί.....	61
	5.5.1 Αντικειμενική συνάρτηση.....	61
	5.5.2 Μεταβλητές σχεδιασμού.....	62
	5.5.3 Περιορισμοί.....	63
	5.5.4 Διαδικασίες υπολογισμών.....	67
5.6	Μαθηματικά εργαλεία για τις προβλέψεις.....	68
	5.6.1 Γραμμική Παρεμβολή.....	68
	5.6.2 Γεωμετρική κίνηση <i>Brown</i>	68
	5.6.3 Υπολογισμός με χρήση της γεωμετρικής κίνησης <i>Brown</i>	69
	5.6.4 <i>Cox-Ingersoll-Ross (CIR)</i>	70
6	Υπολογιστικό μοντέλο	71
6.1	Εισαγωγή	71
6.2	Δομή προγράμματος	71
6.3	Περιγραφή των επιμέρους διαδικασιών εντός του προγράμματος.....	73
	6.3.1 Ορισμός μεταβλητών μοντέλου.....	73
	6.3.2 Ορισμός παραμέτρων της <i>ES</i>	73
	6.3.3 Άντληση δεδομένων.....	73
	6.3.4 Υπολογισμός μελλοντικών τιμών.....	74
	6.3.5 Υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης.....	74
	6.3.6 Υπολογισμός των συναρτήσεων περιορισμού.....	75
	6.3.7 Ταξινόμηση της γενιάς μέσω της μεθόδου <i>SR</i>	75
	6.3.8 Δημιουργία της επόμενης γενιάς	76

6.3.9	Έλεγχος κριτηρίου τερματισμού.....	76
6.3.10	Παρουσίαση Αποτελέσματος.....	76
6.4	Δεδομένα υπολογιστικού μοντέλου.....	76
6.5	Δημιουργία Σεναρίου.....	82
7	Παρουσίαση αποτελεσμάτων	88
8	Συμπεράσματα	110
8.1	Συμπεράσματα για την φυσική σημασία των αποτελεσμάτων.....	110
8.2	Συμπεράσματα για το μαθηματικό μοντέλο	112
8.3	Συμπεράσματα ως προς την μέθοδο βελτιστοποίησης	112
8.4	Ανάλυση ευαισθησίας.....	113
9	Βιβλιογραφία.....	114
10	ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ	120

Συντομογραφίες

ΑΠΕ	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΕΕΣ	Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός
Ε.Ε.	Ευρωπαϊκή Ένωση
ΜΕΑΠ	Σενάριο Μέτρων Μεγιστοποίησης των ΑΠΕ
ΠΕΚ	Σενάριο Περιβαλλοντικών Μέτρων Ελαχίστου Κόστους
ΥΦ	Σενάριο Υφιστάμενων πολιτικών
ALM	Augmented Lagrangian method
BBH	Building Block Hypothesis
CMA	Covariance Matrix Adaptation
CSP	Concentrated Solar Power
DE	Differential Evolution
EA	Evolutionary Algorithm
EP	Evolutionary Programming
ES	Evolutionary Strategies
GA	Genetic Algorithms
GEP	Generation Expansion Planning
GHG	Green House Gas

GENCO	Generation Companies
K.K.T	Karush Kuhn Tucker
LP	Linear Programming
MILP	Mixed Integer Linear Programming
MINLP	Mixed Integer Non Linear Programming
NLP	Non Linear Programming
NREAP	National Renewable Energy Action Plan
SUMT	Sequential Unconstrained Minimization Techniques
PPC	Probabilistic Production Costing
PSO	Particle Swarm Optimization
WASP IV	Wien Automatic System Planning Package

1 Εισαγωγικά στοιχεία και μελέτη περίπτωσης.

1.1 Πιθανοί ενδιαφερόμενοι για την μελέτη

Η βελτιστοποίηση του Ελληνικού τομέα ηλεκτροπαραγωγής θα μπορούσε να ενδιαφέρει άμεσα ομάδες και εταιρείες οι οποίες δραστηριοποιούνται στον χώρο αυτό. Η ενεργειακή αγορά της Ελλάδας καθώς διανύει μια μεταβατική περίοδο από ελεγχόμενη αγορά σε ημι-απελευθερωμένη και ταυτόχρονα, επηρεασμένη από την χρηματοοικονομική κρίση, χρίζει ιδιαίτερου ενδιαφέροντος. Η σημερινή αβεβαιότητα αλλά και το γενικότερο περιβάλλον της αγοράς δημιουργεί την ανάγκη στους ενδιαφερόμενους για συνεχή μελέτη και παρατήρηση των συνεπειών των μεταβολών αυτών σε μακροπρόθεσμο επίπεδο. Η ανάλυση των αποτελεσμάτων καθίσταται ενδιαφέρουσα για υποψήφιους επενδυτές της αγοράς καθώς φανερώνει πιθανές κερδοφόρες επενδύσεις. Η μεγάλη και ταυτόχρονα σίγουρη διείσδυση των ΑΠΕ τα επόμενα χρόνια δημιουργεί ένα πρόσφορο έδαφος για την είσοδο νέων επενδυτών σε μια μεγάλη αγορά.

Η πολιτεία και οι κρατικοί της μηχανισμοί, που διαμορφώνουν την ενεργειακή πολιτική της χώρας, θα μπορούσαν να μελετήσουν την μοντελοποίηση και τον προγραμματισμό που προκύπτει αφού στόχος είναι η εξαγωγή της βέλτιστης στρατηγικής που πρέπει να ακολουθηθεί. Παράλληλα στην διαμόρφωση του μακροπρόθεσμου πλάνου γίνεται ενδογενείς υπολογισμός της Οριακής Τιμής του συστήματος (SMP) εξάγοντας λύση, κοινωνικά ωφέλιμη. Ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψιν η απεξάρτηση από εξωτερικούς παράγοντες πράγμα που αποτελεί στρατηγικό στόχο του κράτους.

Γνωρίζοντας, η πολιτεία, τα απαραίτητα βήματα για την επίτευξη αυτών αλλά και των στόχων που έχουν τεθεί από την Ε.Ε., που οδήγησαν στην δημιουργία του NREAP και του ΕΕΣ, θα μπορεί να διαμορφώσει πολιτικές στην κατεύθυνση αυτή.

Επιπλέον η χρήση της μεθόδου ISRES, η οποία περιλαμβάνει εξελικτική στρατηγική και μέθοδο χειρισμού περιορισμών, σε ένα μοντέλο GEP μπορεί να συμβάλλει στην ποιοτικότερη λύση ενός τέτοιου σύνθετου προβλήματος.

1.2 Υφιστάμενη κατάσταση του ενεργειακού τομέα

Η αύξηση του πληθυσμού και των ρυθμών ανάπτυξης που γνώρισε η Ελλάδα από τα τέλη της δεκαετίας του 70' μέχρι πρόσφατα, προκάλεσε την αύξηση του ρυθμού μεταβολής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Η ανάγκη για κάλυψη των διαρκώς αυξανόμενων απαιτήσεων οδήγησε σε κατασκευή σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με κύρια κριτήρια, για την επιλογή του είδους των σταθμών, το κόστος παραγωγής αλλά και την απεξάρτηση από εξωτερικούς παράγοντες. Αποτέλεσμα αυτού ήταν η διάρθρωση της ηλεκτροπαραγωγής με επίκεντρο τεχνολογίες που έχουν ως πηγή ενέργειας συμβατικά καύσιμα. Αργότερα οι κλιματικές αλλαγές και το φαινόμενο του θερμοκηπίου σε συνδυασμό με τις περιβαλλοντικές πολιτικές που επιβλήθηκαν οδήγησαν στη σταδιακή διεύθυνση των ΑΠΕ. Παρ' ολ' αυτά μέχρι το 2005 το ποσοστό των συμβατικών μέσων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ήταν ακόμη στο 87% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της Ελλάδας.

Η συνεχής αυξητική πορεία της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας διακόπηκε μετά την αρχή της οικονομικής κρίσης στην Ελλάδα. Η πτώση αυτή συνεχίζεται μέχρι και σήμερα, θέμα που προκαλεί ενδιαφέρον όσο αφορά την ελαστικότητα της ζήτησης και την επιρροή που είχε η αύξηση της SMP.

Αξίζει να αναφερθεί και μια ιδιομορφία του Ελληνικού δικτύου, η ύπαρξη και ενός μη πλήρους διασυνδεδεμένου ηλεκτρικού συστήματος, που οφείλεται στο γεγονός ότι ένας αριθμός νησιών αποτελούν αυτόνομα δίκτυα.

Σήμερα ο ελληνικός ενεργειακός τομέας βρίσκεται εντός μεταβατικής περιόδου, από ελεγχόμενη αγορά σε ημι-απελευθερωμένη, καθώς βάσει της συνθήκης του Μάαστριχτ (07/02/1992) η Ελλάδα είναι υποχρεωμένη να απελευθερώσει την ενεργειακή της αγορά. Αν και προς το παρόν δραστηριοποιούνται επτά GENCOs στην Ελλάδα, η ΔΕΗ κατέχει ακόμη την μερίδα του λέοντος της αγοράς με ποσοστό μεγαλύτερο του 60% της εγκατεστημένης ισχύς. Η παρούσα εγκατεστημένη ισχύς, βάσει των στοιχείων του έτους 2014 ανέρχεται στα 17598 MW της οποίας το 57% αφορά θερμικούς σταθμούς λιγνίτη, φυσικού αερίου και υγρών υδρογονανθράκων. Το υπόλοιπο 43% αφορά υδροηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής και ΑΠΕ. Η εγκατεστημένη ισχύς ανά τεχνολογία φαίνεται στο πίνακα.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	ΕΓΚΑΤΑΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ (MW)	ΠΟΣΟΣΤΟ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΣ (%)
Natural Gas	4906	27.9
Lignite	4456	25.3
Oil	698	3.9
Hydro Low (≤ 25 MW)	220	1.3
Hydro medium (> 25 MW)	2473	14.0
Hydro Pumped and Storage	699	3.9
Biomass	48	0.23
Solar PV (Photovoltaics)	2436	13.9
CSP (Concentrated Solar Power)	0	0
Wind on-shore	1662	9.5
Wind off-shore	0	0
Geothermal	0	0
Συνολικό	17598	100

ΠΙΝΑΚΑΣ 1-1 ΠΑΡΟΥΣΑ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ.

Στο πιο πάνω πίνακα φαίνεται το μεγάλο ποσοστό που κατέχουν ακόμη και σήμερα οι τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικά μέσα και ιδιαίτερα οι λιγνιτικοί σταθμοί. Αυτό οφείλεται στα μεγάλα κοιτάσματα λιγνίτη που υπάρχουν στην

Ελλάδα και για αυτό αποτέλεσε στρατηγική επιλογή του κράτους. Γενικά μεγάλη εξάρτηση από εισαγωγές καυσίμων, των οποίων οι προβλέψεις και οι μεταβολές της τιμής τους καθίστανται πολύ δύσκολες, επιφέρουν ένα σημαντικό παράγοντα αβεβαιότητας στο σχεδιασμό ενεργειακών πολιτικών αλλά και στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού.

Παρ' ολ' αυτά οι Ευρωπαϊκές περιβαλλοντικές πολιτικές που υιοθετήθηκαν απαιτούν τη μείωση των αέριων ρύπων CO_2 , άρα και την μείωση παραγωγής ενέργειας από συμβατικά καύσιμα. Τα τελευταία χρόνια παρατηρήθηκε αύξηση της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ που οφείλεται κυρίως σε πολιτικές του Ελληνικού κράτους για την επίτευξη των στόχων που έχουν τεθεί από το εθνικό σχέδιο δράσης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (NREAP).

1.3 Οικονομική ύφεση

Η χρηματοοικονομική κρίση και τα προβλήματα των ευρωπαϊκών οικονομιών έχουν επηρεάσει τον ενεργειακό τομέα της Ελλάδας, με αποτέλεσμα τις μειωμένες επενδύσεις, και την τεχνολογική αγορά .

Μια άμεση επίπτωση ήταν η συνεχόμενη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας από το 2008 μέχρι και σήμερα, που ενισχύθηκε από την περεταίρω αύξηση στις τιμές ενέργειας. Η εισαγωγή του φυσικού αερίου δημιούργησε πρόοδο στον τομέα της προσφοράς ενέργειας και στις χρήσεις τελικής κατανάλωσης αλλά και στην ηλεκτροπαραγωγή. Παρ' ολ' αυτά η διείδυση τού ακόμη βρίσκετε σε χαμηλά επίπεδα σε σχέση με το μέσο όρο της Ε.Ε. Επίσης η αυξημένη αβεβαιότητα σε συνδυασμό με το μεταβατικό στάδιο, στο οποίο βρίσκεται η αγορά, δυσχεραίνουν τις επενδύσεις.

1.4 Πρωτόκολλο του Κιότο

Το Πρωτόκολλο του Κιότο τέθηκε σε ισχύ στις 16 Φεβρουαρίου 2005. Αφορά μια συμφωνία δεσμευτικού χαρακτήρα 141 χωρών. Στόχος της ήταν η αντιμετώπιση του φαινομένου του θερμοκηπίου και των κλιματικών αλλαγών. Η συνθήκη υπογράφηκε στο Κιότο το 1997 και ήταν βασισμένη στη Διεθνή Σύμβαση για τις κλιματικές αλλαγές, που είχε υπογραφεί στο Ρίο το 1992. Το Πρωτόκολλο ρίχνει βάρος κυρίως στις βιομηχανικές χώρες, οι οποίες θα έπρεπε να μειώσουν υποχρεωτικά τους 6 βασικούς ρύπους (διοξείδιο του άνθρακα, μεθάνιο, πρωτοξείδιο του αζώτου,

υδρογονάνθρακες, υπερφθοριωμένοι υδρογονάνθρακες και εξαφθοριούχο θείο), (Green House Gas-GHG), που συνθέτουν το φαινόμενο του θερμοκηπίου και κυρίως το διοξείδιο του άνθρακα κατά 5,2% ως το 2012, σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Χώρες που δεν μπορούν να πραγματοποιήσουν τους στόχους του Πρωτοκόλλου, έχουν τη δυνατότητα αντί να μειώσουν τις δικές τους εκπομπές να χρηματοδοτήσουν προγράμματα για τη μείωση των εκπομπών σε αναπτυσσόμενες χώρες ή αντίστοιχα εάν έχουν ξεπεράσει το όριο που έχει τεθεί να αγοράσουν το επιπλέον δικαίωμα ρύπανσης.

1.5 Μοντέλα αγοράς

Μια αγορά ηλεκτρικής ενέργειας έχει στόχο την ασφαλή και οικονομική λειτουργία της. Η ασφαλής λειτουργία της αφορά την ανταπόκριση της σε ακραίες συνθήκες ενώ η οικονομική, την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με χαμηλό κόστος.

Τρία από τα κυριότερα μοντέλα της αγοράς είναι:

- Κοινοπραξία Ισχύος (Pool Corporation)
- Τα Διμερή συμβόλαια (Bilateral Contracts)
- Τα υβριδικά μοντέλα

Μοντέλο Κοινοπραξία Ισχύος (Pool Corporation).

Στο μοντέλο της κοινοπραξίας ισχύος οι πωλητές ανταγωνίζονται μεταξύ τους για το δικαίωμα της τροφοδοσίας του δικτύου με ηλεκτρική ενέργεια, αλλά όχι για τους τελικούς καταναλωτές. Η κοινοπραξία ισχύος ορίζεται σαν μια ελεγχόμενη από το κράτος πλειοδοσία που ισορροπεί την προσφορά και τη ζήτηση της αγοράς, για τους πωλητές και τους αγοραστές, στην οποία λαμβάνει χώρα μια διαδικασία προσφορών, εμπορεύσιμης ηλεκτρικής ισχύος, από τους πωλητές και τους αγοραστές. Οι πλειοδότες με την υψηλότερη τιμή πώλησης ίσως δεν γίνουν αποδεκτοί ενώ αγοραστές που προσφέρουν πολύ χαμηλή τιμή αγοράς ίσως δεν εξασφαλίζουν τα κόστη των πωλητών. Η τιμή αγοράς σε αυτό το μοντέλο καθορίζεται από το ανεξάρτητο διαχειριστή του συστήματος, ο οποίος αποφασίζει για μια τιμή (spot price) αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, η οποία μέσω του ανταγωνισμού οδηγείται συνήθως κοντά στο οριακό κόστος των περισσότερων πλειοδοτών. Η υψηλότερη αποδεκτή πλειοδοσία, αυτή με

την οποία τελικά καλύπτεται η ζήτηση, ορίζει την τελική αγοραστική τιμή που είναι ίδια για όλους τους πλειοδότες, πράγμα που οδηγεί στην μεγαλύτερη αμοιβή των πλειοδοτών με τα χαμηλότερα κόστη παραγωγής.

Διμερή συμβόλαια (Bilateral Contracts).

Στο μοντέλο με τα διμερή συμβόλαια γίνονται διαπραγματεύσεις μεταξύ του πωλητή και του αγοραστή ηλεκτρικής ισχύος, στις οποίες συμφωνούνται οι όροι. Αν και οι διαπραγματεύσεις αυτές μπορούν να είναι αρκετά ευέλικτες, κάποιες φορές καθίστανται χρονοβόρες και εμπεριέχουν κόστη διαπραγματεύσεων και συγγραφής συμβολαίων. Σε μια τέτοια συμφωνία λαμβάνεται υπόψιν πάντα η φερεγγυότητα των εμπλεκόμενων αλλά και το ρίσκο.

Υβριδικά μοντέλα.

Όταν το μοντέλο περιέχει στοιχεία από τα δυο προαναφερθέντα μοντέλα, έχουμε υβριδικό μοντέλο που πλεονεκτεί στην κάλυψη των αναγκών σε ηλεκτρική ενέργεια αλλά και στην δυνατότητα εφαρμογής ειδικών πολιτικών για τιμολόγηση των υπηρεσιών που ανταποκρίνονται στις ανάγκες, προσδίδοντας έτσι περαιτέρω ευελιξία.

1.6 Διαθέσιμες προς εκμετάλλευση ΑΠΕ στην Ελλάδα

Για την Ελλάδα, όπως αναφέρεται και στο ΕΕΣ (Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός: Οδικός χάρτης για το 2050) [23] σκοπός είναι η αξιοποίηση των διαθέσιμων ΑΠΕ, συγκεκριμένα του αιολικού και ηλιακού δυναμικού, των πεδίων για ηλεκτροπαραγωγή από γεωθερμία, της βιομάζας και των υδάτινων πόρων για ηλεκτροπαραγωγή μέσα από υδροηλεκτρικά έργα. Όσον αφορά τις τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής με συμβατικά μέσα η Ελλάδα χρησιμοποιεί σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής των οποίων τα καύσιμα είναι οι υγροί και στερεοί υδρογονάνθρακες και το φυσικό αέριο. Σχετικά με τους στερεούς υδρογονάνθρακες χρησιμοποιείται κυρίως ο λιγνίτης και ο άνθρακας, του οποίου άνθρακα αναμένεται η παύση χρήσης όντας ήδη σε πολύ μικρά επίπεδα.

Αιολική Ενέργεια

Το αιολικό δυναμικό της Ελλάδας, νησιά και ηπειρωτική χώρα, ανέρχεται στα 16GW. Ταυτόχρονα εμφανίζεται μετά από πρώτες μελέτες ένα επιπλέον τεχνικό δυναμικό για off-shore εγκαταστάσεις (θαλάσσιες εγκαταστάσεις) της τάξης του 1,8GW.

Βιομάζα

Οι αναμενόμενες επενδύσεις αντιστοιχούν σε μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού με χρήση προϊόντων στερεής βιομάζας και μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού με χρήση υγρών οργανικών αποβλήτων. Το εν δυνάμει δυναμικό υπολογίζεται 400-500 MWe και 300-400 MWe αντίστοιχα.

Ηλιακή Ενέργεια

Αναφέρεται ότι η ακριβής εκτίμηση του δυναμικού λόγω των πολλών παραμέτρων (κλίση και προσανατολισμός του εδάφους, απόσταση από το δίκτυο κ.τ.λ.) είναι πολύ δύσκολη. Παρ' ολ' αυτά αναφέρεται ότι οι δυνατότητες εκμετάλλευσης ισχύος από μεγάλα έργα ηλεκτροπαραγωγής από φωτοβολταϊκά μπορούν να προσεγγιστούν λαμβάνοντας υπόψιν ότι 1GWp εγκατεστημένων συστημάτων αντιστοιχεί σε περίπου 20.000 στρέμματα γης.

Γεωθερμία

Το δυναμικό για την ανάπτυξη έργων ηλεκτροπαραγωγής από Γεωθερμία είναι της τάξης των 2000MWe. Ο υπολογισμός αυτός βασίζεται κυρίως στην διαθεσιμότητα των πόρων, σε έρευνες που έχουν ήδη γίνει και εκτιμήσεις αποτελεσμάτων μελλοντικών ερευνών.

Υδροηλεκτρικά Έργα

Η εκμετάλλευση του δυναμικού μπορεί να οδηγήσει σε εγκατάσταση ισχύος της τάξης των 1000-1200MW για μικρά υδροηλεκτρικά έργα και 4.5-5GW για τα μεγάλα υδροηλεκτρικά έργα. Επίσης υπάρχουν κατά μέγιστο 4GW για αξιοποίηση αντλητικών υδροηλεκτρικών έργων που λειτουργούν ως συστήματα αποθήκευσης της περίσσειας παραγωγής των μη ελεγχόμενων μονάδων ΑΠΕ.

2 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δυο σχέδια που έχουν εκπονηθεί για την διάρθρωση του Ελληνικού ενεργειακού συστήματος. Αρχικά παρουσιάζεται το εθνικό σχέδιο δράσης για τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που εκπονήθηκε το 2010 και στην συνέχεια ο εθνικός ενεργειακός σχεδιασμός. Τα δυο αυτά σχέδια θα αποτελέσουν τις κατευθυντήριες γραμμές για το μοντέλο που θα δημιουργηθεί στην παρούσα εργασία. Τέλος παρουσιάζεται μια γενική βιβλιογραφική ανασκόπηση στα Generation Expansion Plans (GEP).

2.2 Εθνικό σχέδιο δράσης για τις ΑΠΕ (NREAP)

Κάθε κράτος μέλος της Ε.Ε. βάσει της οδηγίας 09/28/ΕΚ και στο πλαίσιο της εφαρμογής της Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής κλήθηκε να εκπονήσει ένα Εθνικό Σχέδιο Δράσης για τις Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (NREAP-National Renewable Energy Action Plan)[23]. Το πλάνο αυτό, γνωστό και ως 20-20-20, απαρτίζεται από τρεις κύριους πυλώνες.

- Την διείσδυση των ΑΠΕ στον Ενεργειακό τομέα, συγκεκριμένα με στόχο το 2020 το 20% της ακαθάριστης τελικής κατανάλωσης ενέργειας να παράγεται από ΑΠΕ (2009/28/ΕΚ).
- Τον περιορισμό των αέριων ρύπων του θερμοκηπίου. Ειδικότερα, 20% μείωση αυτών μέχρι το 2020 σε σχέση με τα επίπεδα του έτους 1990 (20/29/ΕΚ).
- Την εξοικονόμηση 20% πρωτογενούς ενέργειας.

Αναλυτικότερα, για την Ελλάδα, ο στόχος για τις εκπομπές GHG είναι η μείωση κατά 4%, στους τομείς εκτός εμπορίας, σε σχέση με τα επίπεδα του 2005, και 18% διείσδυση των ΑΠΕ στην ακαθάριστη τελική κατανάλωση. Η Ελληνική κυβέρνηση με το Νόμο 3851/2010 προχώρησε στην αύξηση του εθνικού στόχου συμμετοχής των ΑΠΕ, στην τελική κατανάλωση ενέργειας, στο 20%. Το ποσοστό αυτό όμως διαχωρίζεται σε 40% συμμετοχή των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, 20% σε ανάγκες θέρμανσης-ψύξης και 10% στις μεταφορές. Ο στόχος του 40% συμμετοχής των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή απαιτεί επενδύσεις που θα αλλάξουν την Ελληνική ενεργειακή αγορά, αξιοποιώντας το

φυσικό δυναμικό που προσφέρεται με επενδύσεις στα υδροηλεκτρικά έργα, στα φωτοβολταϊκά και στα CSP, σε ανεμογεννήτριες (onshore και offshore), στην βιομάζα αλλά και στους γεωθερμικούς σταθμούς. Αναφέρεται το πως η επίτευξη των στόχων θα συνεισφέρει στην ασφάλεια του ενεργειακού εφοδιασμού, στη βελτίωση της αξιοποίηση των φυσικών πόρων και στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας σε βασικούς κλάδους της Ελληνικής οικονομίας. Οι εθνικοί στόχοι για το 2020, σύμφωνα και με τα αποτελέσματα των ενεργειακών μοντέλων, αναμένεται να ικανοποιηθούν για την ηλεκτροπαραγωγή με την ανάπτυξη περίπου 13300MW από ΑΠΕ, που διαχωρίζονται όπως φαίνεται στον πιο κάτω πίνακα:

ΕΙΔΟΣ ΑΠΕ	ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΣΥΝΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ [%]	ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΗ ΠΑΡΑΓΩΜΕΝΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΠΟ ΑΠΕ [%]
Hydro Low	0.7	1.7
Hydro medium	7.3	18.2
Hydro Pumped	4.3	10.7
Biomass	0.7	1.7
Solar PV	5.9	14.8
CSP	0.7	1.7
Wind on-shore	19.3	48.4
Wind off-shore	0.8	2.0
Geothermal	0.3	0.8
Συνολικό	40	100

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-1. ΣΤΟΧΟΙ ΣΧΕΔΙΟΥ NREAP ΓΙΑ ΤΑ ΠΟΣΟΣΤΑ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΣΤΗΝ ΗΛΕΚΤΡΟΠΑΡΑΓΩΓΗ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2020.

Από τα αποτελέσματα των υπολογισμών στο σχέδιο είναι σαφές ότι η επίτευξη των στόχων απαιτεί τον συντονισμό και την υποστήριξη από τους φορείς της αγοράς καθώς και την έγκαιρη υλοποίηση έργων ανάπτυξης του ηλεκτρικού δικτύου ώστε να είναι δυνατή η απορρόφηση της παραγόμενης ενέργειας από τους σταθμούς ΑΠΕ.

Τέλος αναφέρεται ότι το NREAP, θα διαδραματίσει το ρόλο ενός δυναμικού εργαλείου παρακολούθησης των εθνικών ενεργειακών στόχων, όπου ανάλογα με τα μέτρα και τις πολιτικές που λαμβάνονται, την ανταπόκριση των φορέων της αγοράς καθώς και την τεχνολογική ωριμότητα των ΑΠΕ θα προσαρμόζεται αντίστοιχα, ώστε να μπορούν να επιτευχθούν οι δεσμευτικοί εθνικοί στόχοι για το 2020, συμβάλλοντας παράλληλα στην επιτυχή ολοκλήρωση του μοντέλου «πράσινης» ανάπτυξης που έχει υιοθετήσει η Ελληνική κυβέρνηση.

2.3 Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός: Οδικός χάρτης για το 2050

Το σχέδιο ΕΕΣ [62] υλοποιήθηκε το 2012 βάσει του NREAP αλλά και των κατευθυντήριων γραμμών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την περίοδο 2020-2050. Λήφθηκαν υπόψιν μια σειρά από οικονομικούς παράγοντες όπως η οικονομική δραστηριότητα ανά κλάδο, οι διεθνείς τιμές καυσίμων και το επίπεδο χρήσης του λιγνίτη.

Ουσιαστικά εξετάστηκαν τρία σενάρια:

- Σενάριο Υφιστάμενων πολιτικών (ΥΦ)
- Σενάριο Μέτρων Μεγιστοποίησης των ΑΠΕ (ΜΕΑΠ)
- Σενάριο Περιβαλλοντικών Μέτρων Ελαχίστου Κόστους (ΠΕΚ)

Το ΥΦ υποθέτει 40% περιορισμού των εκπομπών CO_2 μέχρι το 2050 σε σχέση με το 2005 που αποτελεί μέτριο επίπεδο μείωσης, την μέτρια διείσδυση των ΑΠΕ στο σύστημα και την εξοικονόμηση ενέργειας. Το ΜΕΑΠ υποθέτει τη μεγιστοποίηση της διείσδυσης των ΑΠΕ, όπου το επίπεδο συμβολής στην ηλεκτροπαραγωγή ανέρχεται στο 100%, την μείωση των εκπομπών CO_2 κατά 60-70% και την μεγάλη εξοικονόμηση ενέργειας. Αντίστοιχα το ΠΕΚ έχει τις ίδιες παραδοχές με το ΜΕΑΠ αλλά επιδιώκεται

η εξασφάλιση του χαμηλότερου επενδυτικού κόστους μέσω της ρύθμισης του ποσοστού των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή.

Το σενάριο των ΥΦ παρατηρήθηκε να οδηγεί σε περιορισμένη μείωση εκπομπών CO_2 μέχρι το 2050 και η εξέλιξη του ενεργειακού τομέα δεν προέκυπτε ως η οικονομικότερη δυνατή. Τα άλλα δυο σενάρια επιτυγχάνουν υψηλή διείσδυση των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή, μεγάλη μείωση των εκπομπών CO_2 της τάξης του 60%-70% αλλά και μείωση της εισαγόμενης ενέργειας και της εξάρτησης της χώρας από εισαγωγές ορυκτών καυσίμων. Παρ' ολ' αυτά σε κανένα από τα σενάρια δεν παρατηρείται μεγάλη μείωση στο κόστος ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι στόχοι τελικά που θέτονται από το σχέδιο είναι η 60% -70% μείωση στα επίπεδα GHG σε σχέση με τα επίπεδα του 2005 και η διείσδυση της τάξης του 85%-100% των ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή. Στόχοι που αναφέρονται στην εγκατεστημένη ισχύ των τεχνολογιών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας φαίνονται στο πιο κάτω πίνακα.

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ	ΑΝΩ ΟΠΙΟ [GW]	ΚΑΤΩ ΟΠΙΟ [GW]
Lignite	1	-
Natural Gas	-	3
Hydro Medium & Low	-	5.6
Hydro Pumped	4	-
Solar PV	-	11
Wind turbines	-	13

ΠΙΝΑΚΑΣ 2-2 ΣΤΟΧΟΙ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗΣ ΙΣΧΥΟΣ ΤΟΥ ΕΣΣ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2050

2.4 Generation Expansion Plan (GEP)

Τα GEP Generation Expansion Plan ορίζονται ως προβλήματα λήψεων αποφάσεων όπου ορίζεται το πότε και το τι είδους σταθμοί παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας θα κατασκευαστούν σε ένα μακροπρόθεσμο ορίζοντα. Βασικό κριτήριο των αποφάσεων είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους ή η μεγιστοποίηση των εσόδων από

την πραγματοποίηση των προτεινόμενων επενδύσεων. Ο μακροπρόθεσμος αυτός προγραμματισμός λαμβάνει υπόψιν περιορισμούς που αφορούν την ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας, την ευστάθεια του δικτύου, το περιθώριο εφεδρείας, τη λειτουργικότητα των σταθμών, τη βιωσιμότητα κάθε επένδυσης κ.τ.λ., και ανάλογα από το μοντέλο και την αγορά που εξετάζεται.

Μια από τις πρώτες απόπειρες επίλυσης σχεδίου επέκτασης ενός μοντέλου έγινε από τον Phillips το 1969 [5]. Προτείνει ένα μοντέλο για δημιουργία μη γραμμικού στατικού σχεδίου επέκτασης το οποίο εφαρμόζει και επιλύει το σύστημα των θερμικών σταθμών της Μεγάλης Βρετανίας. Ο Ramos [3] βασισμένος στον προηγούμενο, προτείνει ένα μοντέλο για δημιουργία μη γραμμικού στατικού σχεδίου επέκτασης στο οποίο το κόστος επένδυσης αλλά και τα λειτουργικά κόστη των σταθμών hydro storage and pumped υπολογίζονται. Στο μοντέλο αυτό εισάγει ως όριο το κατώτατο επίπεδο λειτουργίας των θερμικών σταθμών (technical minima) και λαμβάνεται υπόψιν στους υπολογισμούς.

Η σύνοδος των Ηνωμένων Εθνών το 1992 στο Ρίο, με θέμα το περιβάλλον και την ανάπτυξη, (United Nation Conference on Environment and Development UNCED), αύξησε την επίγνωση για την κλιματική αλλαγή αλλά και των συνεπειών που έχει ειδικά στις ανεπτυγμένες χώρες. Αυτό οδήγησε τις περισσότερες χώρες να λάβουν υπόψιν τον περιβαλλοντικό παράγοντα για τα μετέπειτα αναπτυξιακά τους σχέδια στο χώρο της ενέργειας, παράγοντας που εντάχθηκε και στα επόμενα GEP μοντέλα.

Ο Karaki [43] ανέπτυξε και χρησιμοποίησε ένα GEP για την δημιουργία συντελεστών παραγωγικής ικανότητας των παραγγελιών που είχαν προβλεφθεί από την Ηλεκτρική Αρχή του Λιβάνου, βασισμένο στην Πιθανολογική Κοστολόγηση της Παραγωγής (Probabilistic Production Costing-PPC), στον δυναμικό προγραμματισμό Tunnel (Tunnel Dynamic Programming) και σε περιβαλλοντικούς παράγοντες. Οι περιβαλλοντικοί παράγοντες στο μοντέλο εντάσσονται στην συνάρτηση κόστους που ελαχιστοποιείται ως κόστος καθαρισμού της μόλυνσης λόγω της παραγωγής με συμβατικά μέσα.

Ο Rajesh [31] χρησιμοποιεί ένα μοντέλο για το σχέδιο επέκτασης της παραγωγικής ικανότητας συμβατικών τεχνολογιών για να μελετήσει την επίδραση που θα έχει η διείσδυση των μέσων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από την αξιοποίηση της

αιολικής στο μείγμα παραγωγής της πολιτείας του Ταμίλ Ναδού στην Ινδία. Το GEP μοντέλο αυτό καθορίζει τις επενδύσεις σε παραγωγική ικανότητα σε διάφορα πιθανά σενάρια διεύθυνσης της αιολικής ενέργειας, με στόχο την ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης και λειτουργίας εντάσσοντας ταυτόχρονα περιορισμούς.

Η αβεβαιότητα που προκύπτει από την εισχώρηση της αιολικής ενέργειας σε ένα GEP εξετάστηκε από τον Hemmati [36]. Το μοντέλο αναπαριστά μια απελευθερωμένη αγορά η οποία διαχωρίζεται σε δυο επίπεδα, πρωτεύον-αφέντης και δευτερεύον-σκλάβος (slave και master level) στην οποία η εκκαθάριση των τιμών γίνεται μέσω ενός μοντέλου Κοινοπραξίας Ισχύος. Στο δευτερεύον επίπεδο για κάθε GENCO υλοποιείται ένα σχέδιο επέκτασης της εγκατεστημένης της ισχύς με στόχο την μεγιστοποίηση των κερδών της. Τα σχέδια αυτά εξετάζονται από τον ανεξάρτητο διαχειριστή του συστήματος κι εγκρίνονται μόνο όταν ικανοποιούνται οι περιορισμοί που αφορούν την αξιοπιστία του συστήματος, το οποίο αποτελεί και το πρωτεύον επίπεδο. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο αυτό οδηγεί σε πιο στιβαρές (Robust) λύσεις συγκριτικά με μοντέλα που δεν λάμβαναν υπόψιν την αβεβαιότητα της που προσδίδει στο σύστημα η αιολική ενέργεια.

Ο περιβαλλοντικός παράγοντας και η επίδραση που έχει σε ένα GEP εξετάστηκαν από τους Unsuhay-Vila [4]. Παρουσιάστηκε ένα πολυκριτηριακό και με πολλά επίπεδα μοντέλο βασισμένο σε προσέγγιση από κάτω προς τα πάνω (bottom up approach) για το σχέδιο επέκτασης και τις διασυνδέσεις του συστήματος. Το μοντέλο αυτό ονομάστηκε MESEDES και η αναζήτηση της βέλτιστης λύσης γίνεται βάσει τριών κριτηρίων, την ελαχιστοποίηση του κόστους επένδυσης και λειτουργίας των μονάδων, την ελαχιστοποίηση των εκπομπών CO_2 που υπολογίζονται για όλο τον κύκλο ζωής μιας επένδυσης, και την μεγιστοποίηση της διαφοροποίησης του μίγματος παραγωγής. Για την επίλυση αυτού το πολυκριτηριακού μοντέλου χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος του Linares [23].

Ο Nguyen [22] και οι Becker et al. [29] ασχολήθηκαν με την ενσωμάτωση κόστους που πηγάζει από εξωτερικούς παράγοντες στα GEP. Ο πρώτος ενέταξε στα GEP τα κόστη που δημιουργούνται από ζημιές υλικών, σοδειών αλλά και από τις επιπτώσεις στην υγεία των ανθρώπων που οφείλονται στην εκπομπή των αέριων ρύπων. Εξάγονται οι βέλτιστες προσθήκες στην εγκατεστημένη παραγωγή ισχύος για τον ενεργειακό

τομέα του Βιετνάμ με την χρήση ενός μοντέλου MARKAL. Αντίστοιχα οι Becker et al. εκτίμησαν την επίδραση κόστους από περιβαλλοντικές παραμέτρους σε ένα GEP του Ισραηλινού ενεργειακού τομέα χρησιμοποιώντας μια παραλλαγμένη έκδοση του μοντέλου WASP IV.

Μια ενδιαφέρουσα μελέτη για τον καθορισμό των παραμέτρων που επηρεάζουν ένα GEP έγινε από τον Sevilgen [44]. Εξετάστηκαν οικονομικοί παράμετροι όπως το επιτόκιο και ο πληθωρισμός, η κλιμάκωση της αναλογίας της κατασκευής, η κλιμάκωση της αναλογίας των τιμών καυσίμου και του ετήσιου κόστους που οφείλεται στον παράγοντα προεξόφλησης. Το κόστος αυτό εμπεριέχει το σταθερό και μεταβλητό κόστος κάθε έτους του χρόνου ζωής της κάθε υποψήφιας μονάδας παραγωγής ενέργειας. Η περίπτωση της μελέτης ήταν ο Τουρκικός τομέας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με εφαρμογή πέντε διαφορετικών ειδών τεχνολογιών.

Οι εξελικτικοί αλγόριθμοι (EA) έχουν χρησιμοποιηθεί εκτενώς για την βελτιστοποίηση ενός προβλήματος GEP. Οι Park et al.[19] και οι Chung et al. [48] εφάρμοσαν σε προβλήματα GEP παραλλαγές του βασικού κώδικα των γενετικών αλγορίθμων (GA). Η μέθοδος σωματιδίων σμήνους (Particle Swarm Optimization-PSO) εφαρμόζεται από τον Tafreshi [45] και τον Kannan [46] για να εντοπίσουν τις βέλτιστες παραγγελίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας σε ένα μοντέλο ενός τομέα ηλεκτρικής ισχύος. Άλλες μεταευρετικές τεχνικές όπως η αναζήτηση Tabu και η διαφορική εξέλιξη (Differential Evolution-DE) εφαρμόστηκαν σε προβλήματα GEP [47] και συγκρίθηκαν όσο αφορά την απόδοσή τους στην ποιότητα λύσης και την απαίτηση σε υπολογιστικό χρόνο.

Αρκετές μελέτες αξιολόγησης έγιναν για να εξεταστούν τα προβλήματα GEP και οι μέθοδοι επίλυσης τους. Ο Kagiannas [21] εξέτασε την εξέλιξη ενός GEP προβλήματος κατά την διάρκεια μετάβασης της αγοράς από ελεγχόμενη σε απελευθερωμένη. Ο βασικός στόχος στην δεύτερη μορφή της αγοράς ήταν η μεγιστοποίηση των κερδών των GENCOS.

3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση στην Βελτιστοποίηση

3.1 Εισαγωγή στην Βελτιστοποίηση- Βασικές έννοιες

Η μέθοδος βελτιστοποίησης είναι εργαλείο που αποσκοπεί στην εύρεση της βέλτιστης λύσης μέσα από ένα χώρο υποψήφιων λύσεων. Στο μοντέλο που δημιουργείται ορίζεται η αντικειμενική συνάρτηση ή συνάρτηση στόχος (Objective Function), που καλείται να ελαχιστοποιηθεί ή μεγιστοποιηθεί. Το προς επίλυση πρόβλημα μπορεί να είναι ενός στόχου (Single Objective Optimization-SOO) ή και περισσότερων (Multi Objective Optimization-MOO). Οι μεταβλητές απόφασης ή μεταβλητές σχεδιασμού ορίζουν το σύνολο των τιμών από όπου προκύπτει η βέλτιστη λύση. Στην περίπτωση όπου το πρόβλημα τίθεται υπό περιορισμούς ισότητας ή ανισότητας (constraints), που μπορεί να αφορούν ορισμένες ή όλες τις ανεξάρτητες μεταβλητές του προβλήματος, η λύση πρέπει να τους ικανοποιεί. Προβλήματα βελτιστοποίησης απαντώνται σε πολλά επιστημονικά πεδία όπως π.χ. στην αεροδυναμική, στην μετεωρολογία, στα οικονομικά.

Γενικά, η μορφή ενός προβλήματος βελτιστοποίησης ορίζεται μαθηματικά ως η εύρεση ενός διανύσματος

$$\vec{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n] \in \vec{S} \quad (3.1.1)$$

Όπου

$$\vec{S} = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n, S_i \subseteq IR, i = 1, \dots, n \quad (3.1.2)$$

το οποίο ελαχιστοποιεί τις συναρτήσεις $\vec{f}(x)$

ή ισοδύναμα $f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_n(\vec{x})$,

ή ισοδύναμα $f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), f_2(x_1, x_2, \dots, x_n), \dots, f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)$.

Ικανοποιώντας τους περιορισμούς ανισότητας και ισότητας (όταν αυτοί υπάρχουν):

$$g_j(x) \leq 0, j = 0, 1, \dots, m \quad (3.1.3)$$

$$I_j(x) = 0, j = 0, 1, \dots, p \quad (3.1.4)$$

Ο πιο πάνω ορισμός καλύπτει όλα τα πιθανά προβλήματα βελτιστοποίησης καθώς η ελαχιστοποίηση της $f(x)$ ισοδυναμεί με την μεγιστοποίηση της $-f(x)$.

Ο βασικός διαχωρισμός των προβλημάτων βελτιστοποίησης γίνεται σε συνεχή και διακριτά προβλήματα.

Στα συνεχή προβλήματα οι μεταβλητές σχεδιασμού είναι πραγματικές μεταβλητές και ως επί το πλείστο συνοδεύονται με άνω και κάτω όρια. Οι συναρτήσεις στόχου και περιορισμών συνήθως είναι συνεχείς και παραγωγίσιμες. Η αναζήτηση γίνεται σε ένα απείρου πλήθους υποψήφιων λύσεων.

Στα διακριτά προβλήματα η αναζήτηση γίνεται σε ένα πεπερασμένο αριθμό ακέραιων επιθυμητών λύσεων, αφού μια σύγκριση όλων των υποψήφιων λύσεων σε μεγάλα προβλήματα θα ήταν υπολογιστικά απαγορευτική. Πολλές φορές σε διακριτά προβλήματα χρησιμοποιούνται συνεχείς μέθοδοι βελτιστοποίησης, ορίζοντας την διακριτή μεταβλητή σαν συνεχή, στρογγυλοποιώντας την λύση στο πλησιέστερο ακέραιο, παρόλα αυτά η εμπειρία έχει δείξει ότι τα αποτελέσματα αυτά μπορούν τελικά να απέχουν αρκετά από την βέλτιστη λύση.

3.1.1 Τοπική και καθολική βελτιστοποίηση

Τα δυο αυτά είδη βελτιστοποίησης ορίζουν αν στο πρόβλημα, στόχος είναι η εύρεση μιας λύσης που να υπερτερεί στις γειτονικές της λύσεις, άρα είναι τοπικό ακρότατο (Local Optimum), ή αν αναζητείται η βέλτιστη λύση σε όλο το χώρο των αποδεκτών λύσεων, επομένως είναι ολικό ή καθολικό ακρότατο (Global Optimum). Επιθυμητή είναι πάντα η εύρεση του ολικού ακρότατου που πολλές φορές η εξασφάλισή του αποδεικνύεται επίπονη. Στον ορισμό μιας λύσης ως ολικό ακρότατο απαιτείται επιφύλαξη καθώς πολλοί αλγόριθμοι βελτιστοποίησης εγκλωβίζονται συχνά σε τοπικά ακρότατα, οπότε γενικά συνιστάται η χρήση του αλγορίθμου αρκετές φορές και από διαφορετικές αρχικοποιήσεις (Initial Point). Παρακάτω παρατίθεται μια σύντομη αναφορά στην θεωρία των ακροτάτων.

3.1.2 Ολικό Ελάχιστο

Το \vec{x}^* καλείται διάνυσμα ολικού ελαχίστου (Global minimizer) της $f(\vec{x})$ και η $f(\vec{x}^*)$ ολικό ελάχιστο (Global Optimum) αν για κάθε \vec{x} ισχύει $f(\vec{x}^*) \leq f(\vec{x})$.

3.1.3 Τοπικό Ελάχιστο

Το \vec{x}^* καλείται διάνυσμα τοπικού ελαχίστου (Local minimizer) της $f(\vec{x})$ και η $f(\vec{x}^*)$ ολικό ελάχιστο (Local Optimum) αν για κάθε \vec{x} ισχύει $f(\vec{x}^*) \leq f(\vec{x})$ στην γειτονιά του \vec{x}^* .

3.2 Κατηγοριοποίηση μεθόδων

3.2.1 Εισαγωγή

Μια από τις πιο πιθανές κατηγοριοποιήσεις των μεθόδων βελτιστοποιήσεων είναι βάση των μεταβλητών σχεδιασμού, ακέραιες ή συνεχείς, αλλά και το είδος των εξισώσεων, γραμμικές ή μη γραμμικές, και είναι η ακόλουθη:

- Γραμμικός προγραμματισμός (linear Programming-LP)
- Μεικτός ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (mixed integer linear programming-MILP)
- Μη γραμμικός προγραμματισμός (non linear programming-NLP)
- Μεικτός ακέραιος μη γραμμικός προγραμματισμός (mixed integer non linear programming-MINLP)

Μια άλλη κατηγοριοποίηση που βασίζεται στην μέθοδο βελτιστοποίησης, αντί στο είδος του προβλήματος ως προς βελτιστοποίηση, είναι η διάκριση σε στοχαστικές και αιτιοκρατικές μεθόδους. Οι αιτιοκρατικές μέθοδοι (derivative methods) βασίζονται στην παράγωγο της αντικειμενικής συνάρτησης, η οποία είτε υπολογίζεται είτε προσεγγίζεται, σε αντίθεση με τις στοχαστικές μεθόδους που χρησιμοποιούν στοιχεία τυχαίας ή οργανωμένης τυχαίας αναζήτησης της βέλτιστης λύσης (non derivative methods).

Συνοπτικά, οι αιτιοκρατικές μέθοδοι έχουν ταχύτερο ρυθμό σύγκλισης αλλά προσαρμόζονται δυσκολότερα σε πολύπλοκα προβλήματα καθώς απαιτούν εκ νέου προγραμματισμό με κάθε αλλαγή στο πρόβλημα και απαιτούν υψηλότερο μαθηματικό υπόβαθρο συγκριτικά με τις στοχαστικές μεθόδους. Τέλος χρίζουν προσοχής καθώς υπάρχει ο κίνδυνος εγκλωβισμού σε τοπικό βέλτιστο που εξαρτάται από το σημείο εκκίνησης. Αντίθετα οι στοχαστικοί αλγόριθμοι είναι πιο ευέλικτοι ως προς την

προσαρμογή τους σε διαφορετικά προβλήματα, είναι πιο ανεξάρτητοι ως προς την αρχικοποίηση τους αλλά υστερούν ως προς την ταχύτητα σύγκλισης.

Μια τελευταία κατηγοριοποίηση που βασίζεται στην φύση του προβλήματος, είναι η βελτιστοποίηση με ή χωρίς περιορισμούς.

3.2.2 Βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς

Τα περισσότερα πραγματικά προβλήματα συνοδεύονται από ένα πλήθος περιορισμών. Η ένταξη περιορισμών σε ένα πρόβλημα αλλάζει τόσο το αποτέλεσμα της βελτιστοποίησης όσο και τον βαθμό δυσκολίας επίτευξης αποδεχτού αποτελέσματος. Μαθηματικά οι συναρτήσεις περιορισμών διατυπώνονται σαν ισότητες ή ανισότητες και συνήθως οι μεταβλητές σχεδιασμού συνοδεύονται με άνω και κάτω όρια (upper and lower bounds) που ανάλογα με την μέθοδο που χρησιμοποιείται αντιμετωπίζονται διαφορετικά, στη περίπτωση λύσης ενός προβλήματος βελτιστοποίησης με ΕΑ (Evolutionary Algorithms) είναι απαραίτητος ο ορισμός αυτών των ορίων. Λόγω της μεγάλης επιρροής που έχουν οι περιορισμοί σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης πολλές φορές είναι απαραίτητος κάποιος μετασχηματισμός των περιορισμών.²

Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης που επιλύουν προβλήματα χωρίς περιορισμούς μπορούν με τις κατάλληλες παρεμβάσεις στην αντικειμενική συνάρτηση να επιλύσουν και προβλήματα με περιορισμούς. Τέτοιες τεχνικές βασίζονται στην διατύπωση Langrage και λαμβάνουν υπόψη τις συνθήκες K.K.T. (Karush-Kuhn-Tucker).

Ένας από τους πιο διαδεδομένους τρόπους επίλυσης τέτοιων προβλημάτων είναι οι μέθοδοι SUMT που εισάγει την έννοια της Ποινής (Penalty), δίνοντας της δυνατότητα μετατροπής ενός προβλήματος A σε A' , του οποίου στην αντικειμενική συνάρτηση εισάγεται η συνάρτηση Ποινής (Penalty function) μαζί με συντελεστές Ποινής (Penalty coefficient) που ελέγχουν την επιρροή της στην αντικειμενική συνάρτηση.

Οι τρεις κλασικότερες μέθοδοι SUMT είναι:

- Μέθοδος της εξωτερικής Ποινής (exterior penalty function method)
- Μέθοδος της εσωτερικής Ποινής (interior penalty function method)
- Μέθοδος της διευρυμένης εσωτερικής Ποινής (extended interior penalty method)

Μια πιο αξιόπιστη και αποδοτική μέθοδος αυτή της κατηγορίας είναι η μέθοδος ALM (Augmented Lagrange Multiplier Methods) όπου οι βοηθητικοί παράμετροι, συντελεστές ποινής, συμμετέχουν και αυτοί στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης μειώνοντας έτσι την εξάρτηση της βελτιστοποίησης από τις παραμέτρους αυτές.

3.2.3 Αιτιοκρατικές μέθοδοι

Κάθε συνάρτηση μπορεί να εμφανίσει ακρότατο μόνο σε σημεία όπου όλες οι μερικές παράγωγοι είναι ίσες με μηδέν ή δεν ορίζονται. Για την εύρεση των ριζών, ακροτάτων των συναρτήσεων χρησιμοποιούνται αναλυτικές ή και αριθμητικές (υπολογιστικές) μέθοδοι που βασίζονται στα θεωρήματα της μαθηματικής ανάλυσης για εύρεση των ριζών αυτών. Απαραίτητες προϋποθέσεις είναι οι συναρτήσεις να είναι διαφορίσιμες, συνεχείς και με συνεχείς παραγώγους.

Μερικές αιτιοκρατικές μέθοδοι παρατίθενται πιο κάτω.

- Μέθοδος πολλαπλασιαστών Lagrange
- Μέθοδος Διχοτόμου
- Μέθοδος Απότομης Καθόδου (Steepest Descent)
- Μέθοδος Newton
- Προσεγγιστική μέθοδος Newton

3.3 Στοχαστικές μέθοδοι

Οι στοχαστικές μέθοδοι δεν απαιτούν τη συνέχεια των συναρτήσεων και πολλές φορές ούτε και την ύπαρξη συναρτήσεων για την έκφραση του προβλήματος, ιδιότητα που βρίσκει εφαρμογή σε περίπλοκα προβλήματα.

Μια αναφορά των κυριότερων αντιπροσώπων της κατηγορίας αυτής φαίνεται πιο κάτω:

- Complex/ Simplex
- Simulated annealing
- Random search
- Tabu Search
- Swarm intelligence

- Εξελικτικοί Αλγόριθμοι (Evolutionary Algorithms-EA)

Στην παρούσα εργασία θα γίνει εκτενέστερη ανάλυση των Εξελικτικών Αλγορίθμων, και ειδικά των Εξελικτικών Στρατηγικών.

3.3.1 Εξελικτικοί αλγόριθμοι

3.3.1.1 Εισαγωγή

Το έργο του Δαρβίνου “On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life”, αποτελεί την έμπνευση μιας σειράς μεθόδων βελτιστοποίησης, των Εξελικτικών Αλγορίθμων (EA). Γενικά ο Δαρβίνος με την θεωρία του ανέλυσε πως τα άτομα ενός πληθυσμού συναγωνίζονται για την επιβίωση τους, τόσο για την απόκτηση πόρων όσο και για την προσέλκυση συντρόφου. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα τα επιτυχημένα άτομα να έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα αναπαραγωγής και επιβίωσης, άρα και διαίωσισης των χαρακτηριστικών τους, των γονιδίων τους. Με την πάροδο του χρόνου, των γενιών, αυτοί που έχουν προσαρμοστεί καλύτερα επιβιώνουν και τα χαρακτηριστικά τους μεταβιβάζονται σε περισσότερους απογόνους, όπου ο συνδυασμός των καλών αυτών χαρακτηριστικών μπορεί να αποφέρει απογόνους με χαρακτηριστικά καλύτερα από αυτά των γονέων. Με τον φυσικό μηχανισμό αυτό τα είδη, οι πληθυσμοί εξελίσσονται και επιβιώνουν στο εκάστοτε περιβάλλον.

Ένα πλήθος επιστημόνων του χώρου των ηλεκτρονικών υπολογιστών μελέτησαν αυτά τα εξελικτικά συστήματα της φύσης, με την προσδοκία ότι υπολογιστικά προβλήματα στο χώρο της μηχανικής θα μπορούσαν να επιλυθούν με διαδικασίες που θα ακολουθούσαν την λογική της φυσικής εξέλιξης. Οι EA όμως δεν είναι καινούριοι μέθοδοι, προτάθηκαν το 1960 αλλά με την γεωμετρική αύξηση της υπολογιστικής ισχύς και την μείωση του κόστους των γρήγορων και ισχυρών υπολογιστών, οι στοχαστικές μέθοδοι απέσπασαν ιδιαίτερο ακαδημαϊκό ενδιαφέρον αλλά και αποδοχή κατά την δεκαετία του 1990, με κυριότερο εκπρόσωπο τούς τους EA.

Κύριοι εκπρόσωποι των EA είναι οι Γενετικοί Αλγόριθμοι (GA), ο Εξελικτικός Προγραμματισμός (EP) και οι Εξελικτικές Στρατηγικές (ES). Κάθε ένας από τους πιο πάνω έχει τα δικά του διακριτά γνωρίσματα, αν και οι σύγχρονοι μέθοδοι αλληλοδανείζονται στοιχεία ανάλογα με την καταλληλότητα τους σε κάθε πρόβλημα.

Οι ΕΑ διαθέτουν ένα σύνολο από υποψήφιες λύσεις του προβλήματος, πληθυσμό, που εξελίσσεται χρησιμοποιώντας μηχανισμούς παρμένους από την φύση, όπως διασταύρωση (recombination), μετάλλαξη (mutation) και επιλογή (selection). Στην γενική της μορφή, μια μέθοδος βελτιστοποίησης ονομάζεται ΕΑ όταν χρησιμοποιεί πληθυσμούς ατόμων που εξελίσσονται από γενιά σε γενιά, αντί μεμονωμένων ατόμων, στους οποίους εμφανίζονται νέα άτομα ή εξαφανίζονται παλαιότερα με κριτήριο την απόδοσή τους. Επίσης, από γενιά σε γενιά, επανάληψη σε επανάληψη, υπάρχει κληρονομικότητα χαρακτηριστικών από τους γονείς στους απογόνους αλλά και εμφάνιση καινούριων από στοχαστικά μέσα που χρησιμοποιούνται. Η καταλληλότητα τους καθορίζεται από την απόδοσή τους ως προς την εκάστοτε αντικειμενική συνάρτηση.

3.3.1.2 Πλεονεκτήματα των ΕΑ

Οι ΕΑ έχουν περιορισμένες απαιτήσεις ως προς τη φύση του προβλήματος, που πρακτικά σημαίνει πως σε ένα πρόβλημα η χρήση τους είναι σχεδόν άμεση σε αντίθεση με τις αιτιοκρατικές μεθόδους που θα απαιτούσαν παρεμβάσεις στη διαδικασία βελτιστοποίησης. Επίσης οι περισσότερες από τις συμβατικές μεθόδους εφαρμόζονται σε συγκεκριμένες κατηγορίες προβλημάτων και πλεονεκτούν ως προς την ταχύτητα σύγκλισης ενώ οι ΕΑ εφαρμόζονται σε όλα τα προβλήματα και η ταχύτητα σύγκλισης δεν επηρεάζεται σημαντικά από το πρόβλημα. Γενικά απαιτούν μόνο την τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης για να εφαρμοστούν, δεν απαιτούν πληροφορία για τις παραγώγους της, και μαζί με την ευκολία και απλότητα υλοποίησης τους στον ηλεκτρονικό υπολογιστή τους κάνει δημοφιλή σε πολύπλοκα προβλήματα, και ιδιαίτερα σε προβλήματα όπου η αντικειμενική συνάρτηση είναι μη παραγωγίσιμη, υπάρχουν ασυνέχειες, έντονη μη-γραμμικότητα ή υπάρχουν πολλά τοπικά ακρότατα. Στις περιπτώσεις αυτές οι κλασσικές μέθοδοι έχουν δείξει να αποτυγχάνουν, καθώς στην περίπτωση της ασυνέχειας η επίλυση καθίσταται δυσχερή έως αδύνατη, ενώ στην περίπτωση των πολλών τοπικών ακροτάτων συγκλίνουν σε ένα από αυτά το οποίο εξαρτάται και σε μεγάλο βαθμό από το σημείο εκκίνησης της αναζήτησης.

3.3.1.3 Τρόπος Λειτουργίας των ΕΑ

Ο αλγόριθμος ξεκινά με την τυχαία αρχικοποίηση του πληθυσμού, που είναι η πρώτη γενιά, και η οποία αξιολογείται από την αντικειμενική συνάρτηση του εκάστοτε

προβλήματος. Στην συνέχεια, με την είσοδο στον επαναληπτικό κύκλο, εφαρμόζονται οι μηχανισμοί διασταύρωσης και μετάλλαξης από όπου προκύπτουν τα νέα άτομα του πληθυσμού, η νέα γενιά. Στην συνέχεια, ανάλογα με την διαδικασία επιλογής που έχει προκαθοριστεί, προκρίνονται στην επόμενη γενιά οι απόγονοι που έχουν κριθεί ως πιο κατάλληλοι. Η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού που μπορεί να είναι η επίτευξη ενός αριθμού επαναλήψεων, η ανάλωση του υπολογιστικού χρόνου που επέτρεψε ο χρήστης, η επίτευξη μιας τιμής-στόχου, η ομογενοποίηση του πληθυσμού ή η μη περαιτέρω βελτίωση της λύσης για ένα προκαθορισμένο αριθμό επαναλήψεων (stagnation).

3.4 Εξελικτικές Στρατηγικές

3.4.1 Εισαγωγή και Ιστορική αναδρομή στις Εξελικτικές Στρατηγικές

Όπως προαναφέρθηκε, οι ES είναι μια από τις τρεις κύριες αντιπρόσωπους των EA. Παράλληλα με την ανάπτυξη των EP στο San Diego από τον Fogel [8],[9], των GA στο Ann Arbor από τον Holland [15], [16], οι ΕΣ δημιουργήθηκαν από τους τότε φοιτητές Rechenberg και Schwefel [32][33][37][38] στο Technical University of Berlin (TUB). Στην παρούσα διπλωματική εργασία η ES χρησιμοποιήθηκε σαν μέθοδος βελτιστοποίησης, οπότε στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί εκτενέστερα. Ακολουθεί μια σύντομη ιστορική αναδρομή, η βασική φιλοσοφία των ES αλλά και το state of the art όπως αναφέρονται και στα [14][27]. Θα αναλυθεί ο τρόπος με τον οποίο χρησιμοποιούνται οι μηχανισμοί μετάλλαξης, διασταύρωσης και επιλογής στην μέθοδο αυτή.

Αρχικά οι ΕΣ ήρθαν στο προσκήνιο σαν κανόνες αυτομάτου ελέγχου με βηματική προσαρμογή των μεταβλητών ενός συστήματος για την μείωση της επίδρασης του θορύβου πετυχαίνοντας ένα πιο κατάλληλο και ευέλικτο σύστημα. Σε πείραμα που είχε πραγματοποιηθεί στο χώρο της αεροδυναμικής είχε αποδειχθεί ότι μια τυχαίοποιημένη απλή ευρετική μέθοδος απέδωσε καλύτερα αποτελέσματα από μια διακριτή βασισμένη σε παραγώγους στρατηγική, γεγονός που οδήγησε στη χρήση της και σε άλλα θορυβώδη (noisy) προβλήματα βελτιστοποίησης. Η αρχική αυτή μορφή της μεθόδου είχε μόνο δυο κανόνες:

- Αλλαγή όλων των μεταβλητών κατά μια μικρή τυχαία τιμή.

- Αν η λύση ικανοποιούσε την φύση του προβλήματος αποθηκευόταν, και σε αντίθετη περίπτωση επέστρεφε στην προηγούμενη αποθηκευμένη τιμή.

Οι κανόνες αυτοί αναπαριστούσαν τη θεωρία του Δαρβίνου, ο πρώτος την μετάλλαξη ενώ ο δεύτερος την επιβίωση του καταλληλότερου. Η μέθοδος αυτή, που είναι και η απλούστερη μορφή των ES, αργότερα ονομάστηκε (1+1)-ES καθώς είχε ένα γονέα και ένα απόγονο. Στην συνέχεια η διπλωματική εργασία του Schwefel [37] έδειξε πως ο αλγόριθμος εγκλωβιζόταν σε σημεία όπου οι λύσεις γύρω από αυτήν ήταν χειρότερες, η μετάλλαξη που είχε οριστεί δεν επέτρεπε την αναζήτηση σε νέους χώρους, πράγμα που οδήγησε στην χρήση συνεχών μεταβλητών και κατανομής Gauss για την αλλαγή των μεταβλητών. Η πρώτη διατριβή στο χώρο των ES, που αφορούσε εφαρμογή σε δυο συναρτήσεις (hypersphere model, corridor model), ολοκληρώθηκε από τον Rechenberg το 1971 [32] από όπου εξάγονται 3 συμπεράσματα:

- Ο ρυθμός σύγκλισης είναι αναλογικός του αριθμού των μεταβλητών του προβλήματος αλλά και αναλογικός μιας μέτρησης της ισοϋνής καμπυλότητας της αντικειμενικής συνάρτησης.
- Γραμμική σύγκλιση μπορεί να επιτευχθεί με ορισμό του βήματος (mutation) το οποίο θα βρίσκετε μόνιμα σε σωστή τάξη μεγέθους.
- Το βέλτιστο βήμα αντιστοιχεί σε μια πιθανότητα επιβίωσης περίπου 1/5 και είναι ανεξάρτητη των διαστάσεων των δυο συναρτήσεων.

Στην συνέχεια πρότεινε για πρώτη φορά την ένταξη πληθυσμού στην ES, δημιουργώντας έτσι την $(\mu + 1) - ES$, στην μέθοδο αυτή επιβιώνουν όλοι πλην του χειρότερου απογόνου και ο νέος απόγονος δημιουργείται με διασταύρωση από δυο τυχαίους γονείς του πληθυσμού, δείχνοντας έτσι ότι η διασταύρωση μπορεί να επιταχύνει την σύγκλιση από γενιά σε γενιά και ότι ο πληθυσμός μπορεί να μάθει να μειώνει την επιρροή που έχει το βήμα, προτείνοντας έτσι την ορισμό σταθερού βήματος χωρίς εξωτερικό έλεγχο.

Ακολούθως έχουμε την είσοδο των ES στο χώρο των μοντέλων προσομοίωσης, που έγινε εφικτό με την αύξηση της υπολογιστικής ισχύος και στη συνέχεια και στο χώρο της επιχειρησιακής έρευνας. Ο Schwefel με την διατριβή του το 1974 [38] [39] συνέκρινε τις ES ως προς την αποδοτικότητα και στιβαρότητα τους, αλλά και εισήγαγε δυο νέες παραλλαγές της ES, την $(\mu+\lambda)$ -ES και την (μ,λ) -ES. Στην πρώτη

δημιουργούνται λ απόγονοι από τους μ γονείς και στην συνέχεια επιλέγονται οι μ καλύτεροι ως μελλοντικοί γονείς. Αντίθετα στην (μ, λ) -ES οι γονείς της προηγούμενης γενιάς δεν συγκρίνονται με τους λ απογόνους, αλλά επιλέγονται μ άτομα από τους λ απογόνους ως μελλοντικοί γονείς, δημιουργώντας έτσι μια πιο αυστηρή κατά Δαρβίνο επιλογή.

Στην πορεία η έρευνα στις ES επικεντρώθηκε στην ανάπτυξη και βελτίωση των μεθόδων αυτών, από όπου και προέκυψαν μέθοδοι όπως η CMA [28] όπου εισάγονται παράμετροι στους οποίους γίνεται προσαρμογή εντός του αλγόριθμου βάσει των διακυμάνσεων.

3.4.2 Ο βασικός αλγόριθμος ES

3.4.2.1 Γενικά.

Όπως αναφέρει ο Schwefel στο [14] το state of the art ES αλγόριθμος είναι ο $(\mu/\rho^+, \lambda)$ -ES. Το μ αναπαριστά τον αριθμό των γονέων, το ρ τον αριθμό των γονέων που εμπλέκονται στην διαδικασία παραγωγής απογόνων, το '+' ή το ',' το μηχανισμό επιλογής και το λ τον αριθμό των απογόνων.

Στις ES δοσμένης μιας objective function $f : f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, η fitness function Φ είναι όμοια με την f , και δοσμένου ενός ατόμου, $\vec{a} = (\vec{x}, \vec{\sigma}, \vec{\alpha}) \in I$ προκύπτει $\Phi(a) = f(x)$

Το \vec{x} είναι το διάνυσμα μεταβλητών σχεδιασμού του $\vec{a} = (\vec{x}, \vec{\sigma}, \vec{\alpha}) \in I = \mathbb{R}^n \times A_s$ όπου

$$A_s = \mathbb{R}_+^{n_s} \times [-\pi, \pi]^{n_a} \quad (3.3.2.1.1)$$

$$n_\sigma \in \{1, \dots, n\}$$

$$n_\alpha \in \{0, (2n - n_\sigma)(n_\sigma - 1)/2\}$$

Το άτομο μπορεί να φέρει από μια μέχρι n τυπικές αποκλίσεις (standard deviations) σ_i και μέχρι $n(n - 1)/2$ γωνιές περιστροφής (rotation angles) $\alpha_{ij} \in [-\pi, \pi]$ ($i \in \{1, \dots, n - 1\}, j \in \{i + 1, \dots, n\}$), η μετατροπή του \vec{a} από απεικόνιση διανύσματος σε απεικόνιση πίνακα γίνεται βάσει το [34]. Ο μέγιστος αριθμός στρατηγικών παραμέτρων (strategy parameters) να είναι ίσος με $w = n(n + 1)/2$. Ο αριθμός των

γωνιών περιστροφής n_a , εξαρτάται άμεσα από το n_σ και το n , και μπορεί να ορισθεί ως μηδέν σε περιπτώσεις όπου δεν γίνεται η χρήση των γωνιών περιστροφής.

Οι στρατηγικοί αυτοί παράμετροι, αποτελούμενοι από τις τυπικές αποκλίσεις και τις γωνίες περιστροφής παρέχουν τη πλήρη περιγραφή μιας γενικευμένης n -διάστατης κανονικής κατανομής με αναμενόμενη τιμή διανύσματος $\vec{0}$ και συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας

$$p(\vec{z}) = \frac{\exp(-\frac{1}{2}\vec{z}^T C^{-1}\vec{z})}{\sqrt{(2\pi)^n \det C}} \quad (3.3.2.1.2)$$

Όπου $C^{-1} = (c_{ij})$ ο πίνακας συνδιακύμανσης (covariance matrix) με στοιχεία της διαγώνιου $c_{ij} = \sigma_i^2$. Οι άξονες των ελλείψεων της μετάλλαξης είναι παράλληλοι στους άξονες συντεταγμένων μόνο αν ο C είναι διαγώνιος πίνακας [40]. Στην γενική περίπτωση όπου παραμένουν οι συνδιακυμάνσεις, οι ελλείψεις της μετάλλαξης μπορούν να είναι αυθαίρετες στο χώρο αναζήτησης και οι μεταλλάξεις των μεταβλητών σχεδιασμού να συσχετίζονται γραμμικά, δίνοντας έτσι την δυνατότητα στα άτομα να προσαρμόσουν την αναζήτηση σε οποιαδήποτε κατεύθυνση θεωρηθεί πλεονεκτική. Σε προβλήματα όπου υπάρχουν narrow valleys η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη.

Οι γωνίες περιστροφής χρησιμοποιούνται για να περιστρέψουν την ευθυγράμμιση των ελλείψεων μετάλλαξης καθώς η ένταξη των συνδιακυμάνσεων άμεσα στην απεικόνιση και η μετάλλαξή τους δεν εξασφαλίζει ότι το σύστημα συντεταγμένων θα παραμείνει ορθογώνιο ή αντίστοιχα ότι ο πίνακας συνδιακύμανσης θα παραμείνει θετικά ορισμένος. Οι γωνίες περιστροφής συσχετίζονται με τις συνδιακυμάνσεις και τις διακυμάνσεις μέσω της παρακάτω σχέσης:

$$\tan(2\alpha_{ij}) = \frac{2c_{ij}}{\sigma_i^2 - \sigma_j^2} \quad (3.3.2.1.3)$$

Στα παρακάτω θα χρησιμοποιηθεί ο συμβολισμός $\vec{N}(\vec{0}, \mathbf{C})$ για να υποδείξει την υλοποίηση (realization) ενός τυχαίου διανύσματος βασισμένο στην γενικευμένη n -διάστατη κανονική κατανομή με αναμενόμενη τιμή το $\vec{0}$, και ενός πίνακα συνδιακυμάνσεων $\mathbf{C}^{-1} = \mathbf{C}^{-1}(\vec{\sigma}, \vec{\alpha})$, απεικονισμένο μέσω ενός διανύσματος $\vec{\sigma}$

τυπικών αποκλίσεων και $\vec{\alpha}$ γωνιών περιστροφής. Σε ένα αλγόριθμο η δημιουργία μιας συσχετιζόμενης υλοποίησης (correlated realization) από μιας μη συσχετιζόμενης υλοποίησης (uncorrelated realization) $\sigma_u = \vec{N}(\vec{0}, \vec{\sigma})$, μπορεί να γίνει μέσω πολλαπλασιασμού του σ_u με n_a πινάκων περιστροφής (rotation matrices) $\mathbf{R}(a_{ij}) = (r_{kl})$. Η μορφή των πινάκων αυτών δίνεται από ένα μοναδιαίο πίνακα με την παραλλαγή ότι ισχύει [40][34].

$$r_{ii} = r_{jj} = \cos(\alpha_{ij}), \quad (3.3.2.1.4)$$

$$r_{ij} = -r_{ji} = -\sin(\alpha_{ij}) \quad (3.3.2.1.5)$$

Πολλαπλασιασμοί μέσω ενός τέτοιου πίνακα δημιουργούν μια μετατροπή των συντεταγμένων που σέβεται τον αριθμό i και j των συντεταγμένων αλλά και την γωνία α_{ij} . Εφόσον απαιτούνται n_a περιστροφές για να απεικονιστούν όλες οι συσχετίσεις, η συνολική σχέση μεταξύ των $\vec{\sigma}_u$ και $\vec{\sigma}_c$ προκύπτει:

$$\vec{\sigma}_c = \left(\prod_{i=1}^{n-1} \prod_{j=i+1}^n \mathbf{R}(\alpha_{ij}) \right) \cdot \vec{\sigma}_u \quad (3.3.2.1.6)$$

3.4.2.2 Μηχανισμός διασταύρωσης (Recombination).

Με τον μηχανισμό της διασταύρωσης έχουμε την δημιουργία απογόνων με στοιχεία παρμένα από δυο ή περισσότερους γονείς σε κάθε ένα από αυτούς. Η θεωρία του BBH (building block hypothesis) [12][17] που αφορά την έρευνα στις GA εξηγεί πως με την ανάμειξη των blocks των γονέων δημιουργούνται απόγονοι από την συνένωση των θετικών στοιχείων τους, παρόλα αυτά υπάρχει συζήτηση ως προς την χρησιμότητα και αποδοτικότητα της [26][18].

Γενικότερα ο ρόλος της διασταύρωσης είναι να διατηρεί την διαφορετικότητα υψηλή ανάμεσα στα άτομα του πληθυσμού. Υπάρχει μια πληθώρα τρόπων διασταύρωσης που χρησιμοποιούνται στις ES, που λειτουργούν είτε ως sexual είτε ως panmictic. Στις sexual παραλλαγές ένας απόγονος παράγεται από δυο τυχαία επιλεγμένους γονείς, χωρίς να είναι απαραίτητο ένας γονέας να συμμετάσχει μόνο μια φορά στην διαδικασία. Αντίθετα στις panmictic ένας γονέας επιλέγεται τυχαία ως σταθερός (fixed), για την δημιουργία όλων των στοιχείων του διανύσματος του απογόνου, και επιλέγεται τυχαία ένας δεύτερος γονέας για κάθε ένα από τα στοιχεία του. Γενικά

μπορεί ακόμη να δημιουργηθεί και απόγονος με στοιχεία από όλους τους γονείς, οπότε εύκολα γίνεται ο παραλληλισμός των γονέων σαν μια δεξαμενή γονιδίων, από όπου δημιουργούνται απόγονοι. Αναλυτικότερα στην panmictic ένα απόγονος $\vec{a} = (\vec{x}, \vec{\sigma}, \vec{\alpha})$ παράγεται από ένα πληθυσμό $P(t) \in I^\mu$ με $r': I^\mu \rightarrow I$ ενώ στην asexual μορφή έχουμε $r': I^2 \rightarrow I$.

Εκτός από τις μεταβλητές σχεδιασμού, μπορεί να γίνει διασταύρωση και στις στρατηγικές παραμέτρους. Ο τρόπος με τον οποίο υλοποιείται η διασταύρωση στις μεταβλητές σχεδιασμού δεν είναι δεσμευτικός και για τον τρόπο που θα γίνει στις στρατηγικές παραμέτρους, και οι γονείς που θα χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία των στρατηγικών παραμέτρων των απογόνων δεν είναι απαραίτητο να προέρχονται από τους γονείς που παρήγαγαν τις μεταβλητές σχεδιασμού των αντίστοιχων απογόνων. Γενικότερα υπάρχει μια ελευθερία ως προς την υλοποίηση της διασταύρωσης και ανεξαρτησία μεταξύ της εφαρμογής τους στις στρατηγικές παραμέτρους και στις μεταβλητές σχεδιασμού που απορρέει κυρίως από εμπειρικά συμπεράσματα.

Οι παραδοσιακοί τρόποι διασταύρωσης είναι η διακριτή και η ενδιάμεση διασταύρωση, discrete και intermediate recombination αντίστοιχα, οι οποίες μπορούν να υλοποιηθούν στην sexual ή στην panmictic μορφή. Στην διακριτή διασταύρωση το κάθε στοιχείο του εκάστοτε διανύσματος του απογόνου επιλέγεται τυχαία από ποιο γονέα θα παρθεί και δημιουργείται ένας απόγονος χωρίς περεταίρω αλλαγές στις τιμές που λαμβάνει. Στην περίπτωση αυτή δεν δημιουργούνται καινούριες τιμές στα διανύσματα των απογόνων, που δεν υπήρχαν στους γονείς,. Στην ενδιάμεση διασταύρωση το κάθε στοιχείο του εκάστοτε διανύσματος του απογόνου υπολογίζεται βάσει του αριθμητικού μέσου των αντίστοιχων στοιχείων των γονέων. Μια νεότερη μορφή διασταύρωσης προτάθηκε από τον Schwefel, η γενικευμένη ενδιάμεση διασταύρωση, generalized intermediate recombination, όπου εισάγονται στοχαστικοί συντελεστές βάρους $[0,1]$ σε κάθε υπολογισμό του αριθμητικού μέσου. Στην περίπτωση όπου σε μια συγκεκριμένη διασταύρωση ο συντελεστής βάρους προκύψει 0.5, η γενικευμένη ενδιάμεση διασταύρωση λειτουργεί σαν ενδιάμεση διασταύρωση.

$$x'_i = \begin{cases} x_{S,i} & \text{no recombination} & r'_- \\ x_{S,i} \text{ or } x_{T,i} & \text{discrete} & r'_d \\ x_{S,i} \text{ or } x_{T,i} & \text{panmictic discrete} & r'_D \\ x_{S,i} + (x_{T,i} - x_{S,i})/2 & \text{intermediate} & r'_i \\ x_{S,i} + (x_{T,i} - x_{S,i})/2 & \text{panmictic intermediate} & r'_I \\ x_{S,i} + \chi \cdot (x_{T,i} - x_{S,i}) & \text{generalized intermediate} & r'_g \\ x_{S,i} + \chi_i \cdot (x_{T,i} - x_{S,i}) & \text{panmictic generalized} & r'_G \\ & \text{intermediate} & \end{cases}$$

ΕΙΚΟΝΑ 3-1. ΟΙ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ ΥΛΟΠΟΙΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΔΙΑΣΤΑΥΡΩΣΗΣ.

ΠΗΓΗ:[55]

Όπου S και T οι δυο γονείς που επιλέχθηκαν τυχαία και λαμβάνουν μέρος στην διασταύρωση και i ο δείκτης των μεταβλητών σχεδιασμού $i \in \{1, \dots, n\}$. Ο δείκτης i που συνοδεύει τα S και T , S_i και T_i , υποδεικνύει ότι για κάθε μεταβλητή σχεδιασμού επιλέγεται εκ νέου τυχαία γονέας. Η στοχαστική μεταβλητή $\chi \in [0,1]$ λαμβάνεται από την ομοιόμορφη κατανομή για κάθε ένα απόγονο, ενώ όταν συνοδεύεται από τον δείκτη i λαμβάνεται εκ νέου για κάθε μεταβλητή σχεδιασμού κάθε απογόνου. Τελικά κάθε τελεστής διασταύρωσης συμβολίζεται ως $r_x r_\sigma r_\alpha$ όπου $r_x, r_\sigma, r_\alpha \in \{-, d, D, i, I, g, G\}$. Προκύπτει ότι μπορούν να υπάρξουν $7^3 = 343$ διαφορετικοί τελεστές.

Ο Schwefel [39][41] τονίζει την σημαντικότητα ύπαρξης διασταύρωσης για επιτάχυνση της σύγκλισης αλλά και της εξέλιξης των στρατηγικών παραμέτρων κατά την διάρκεια των επαναλήψεων.

3.4.2.3 Μετάλλαξη (Mutation).

Οι τελεστές μετάλλαξης στην ES εισάγουν μεταβολές, δημιουργώντας μια συμμετρική διαταραχή ενός σημείου. Σε ένα ανεξάρτητο χώρο $I = R^n \times R^n \times R^{n(n-1)/2}$ η μετάλλαξη είναι ένας asexual τελεστής $m_{\{\tau, \tau', \beta\}} : I^\lambda \rightarrow I^\lambda$ που φέρει τα διανύσματα $(\vec{x}', \vec{\sigma}', \vec{a}')$ για κάθε ένα άτομο $(\vec{x}, \vec{\sigma}, \vec{a})$ του πληθυσμού και υλοποιείτε ως εξής:

$$\sigma'_i = \sigma_i \cdot \exp(\tau' \cdot N(0,1) + \tau \cdot N_i(0,1)) \quad (3.3.2.2.1)$$

$$a'_j = a_j + \beta \cdot N_j(0,1) \quad (3.3.2.2.2)$$

$$\vec{x}' = \vec{x} + \vec{N}(\vec{0}, \mathbf{C}(\vec{\sigma}', \vec{a}')) \quad (3.3.2.2.3)$$

Όπου

$$\forall i \in \{1, \dots, n\}, \forall j \in \{1, \dots, n \cdot (n - 1)/2\}.$$

Αρχικά γίνεται μετάλλαξη στις τυπικές αποκλίσεις και στις γωνιές περιστροφής από όπου προκύπτουν τα ανανεωμένα και στην συνέχεια από αυτά παράγεται η καινούργια θέση \vec{x}' . Η τυχαιότητα στην μετάλλαξη βασίζεται στις τιμές που παράγει ο λογαριθμικός πολλαπλασιαστής που εμπεριέχει δυο τελεστές. Ο γενικός συντελεστής (global factor) $\exp(\tau' \cdot N(0,1))$, εγγυάται την διατήρηση όλων των βαθμών ελευθερίας αλλά και την γενική μεταβολή των μεταλλάξεων του πληθυσμού, ενώ ο δεύτερος συντελεστής (individual factor), $\exp(\tau \cdot N_i(0,1))$ επιτρέπει την διαφορετικού μεγέθους μετάλλαξη από άτομο σε άτομο αλλά και τη μεταβολής του μέσου όρου των σ_i , καθώς το διάνυσμα $\vec{N}_i(0,1)$ είναι διαφορετικό για κάθε άτομο του πληθυσμού. Το διάνυσμα $\vec{N}(0,1)$ εμπεριέχει τιμές υλοποιημένες από την γενικευμένη κανονική κατανομή με αναμενόμενη τιμή μηδέν και τυπική απόκλιση 1.

Αρχικά οι συντελεστές τ και τ' θέτονται συνήθως ίσες με την μονάδα, ενώ η παράμετρος β ίση με 5° , γενικά όμως μπορούν να ερμηνευθούν σαν συντελεστές εκμάθησης (learning rates) οι οποίοι για συγκεκριμένα προβλήματα μπορούν να ρυθμιστούν και να βελτιωθεί η αναζήτηση στον χώρο. Ο Schwefel [13] προτείνει να ορίζονται

$$\tau \propto \left(\frac{\varphi^*}{\sqrt{2\sqrt{n}}} \right) \quad (3.3.2.2.4)$$

$$\tau' \propto \left(\frac{\varphi^*}{\sqrt{n}} \right) \quad (3.3.2.2.5)$$

$$\beta \approx 0.0873 \text{ rad} \approx 5 \text{ deg}$$

Η ταχύτητα σύγκλισης φ^* ορίζεται ως η αναμενόμενη μεταβολή της απόστασης του κέντρου του πληθυσμού της γενιάς των γονέων στον χώρο αναζήτησης, προς το ολικό βέλτιστο. Ο αναλυτικός ορισμός μπορεί να βρεθεί στο [14]. Η μεταβλητή φ^* συνήθως θέτεται ίση με ένα [55].

Στην περίπτωση που $n_\alpha = 0$, δηλαδή που δεν χρησιμοποιούνται γωνιών περιστροφής, και για $1 < n_\sigma < n$ η μετάλλαξη παίρνει τη μορφή

$$\sigma'_i = \sigma_i \cdot \exp(\tau' \cdot N(0,1) + \tau \cdot N_i(0,1)) \quad (3.3.2.2.6)$$

$$x_i' = x_i + \sigma'_i \cdot N(0,1) \quad (3.3.2.2.7)$$

Αντίστοιχα στην περίπτωση που $n_\sigma = 1$, μια μόνο τυπική απόκλιση, οι γενικός και ατομικός συντελεστές μετατρέπονται σε ένα κοινό συντελεστή $\tau_o \propto 1/\sqrt{n}$.

$$\sigma' = \sigma \cdot \exp(\tau_o \cdot N(0,1)) \quad (3.3.2.2.8)$$

$$x_i' = x_i + \sigma' \cdot \vec{N}_i(0,1) \quad (3.3.2.2.9)$$

Ο μηχανισμός της μετάλλαξης αυτός δίνει την δυνατότητα στην ES να εξελίξει τις στρατηγικές αυτές παραμέτρους κατά την διάρκεια των επαναλήψεων εκμεταλλευόμενος την έμμεση σχέση της επίδοσης της αντικειμενικής συνάρτησης και των παραμέτρων αυτών (self-adaptation). Υπάρχει το ενδεχόμενο κατά την διάρκεια των επαναλήψεων η τιμή των τ και τ' να τείνει να μηδενιστεί ή η τιμή του β να βγει εκτός ορίων $[-\pi, \pi]$, οπότε επανεναρμόζονται ξανά εντός του χώρου των αποδεκτών τιμών μέσω διορθωτικών σχέσεων.

3.4.2.4 Μηχανισμός επιλογής (Selection Scheme).

Όπως προαναφέρθηκε ο Schwefel[40] πρότεινε δυο ντετερμινιστικούς μηχανισμούς επιλογής (selection schemes) την $(\mu + \lambda)$ -ES και την (μ, λ) -ES. Η $(\mu + \lambda)$ -ES με $s_{(\mu+\lambda)} : I^{\mu+\lambda} \rightarrow I^\mu$ όπου οι μ καλύτεροι υποψήφιοι, που είναι το σύνολο των μ προηγούμενων γονέων και των λ απογόνων αυτών, επιλέγονται ως γονείς της επόμενης γενιάς. Αντίθετα στην (μ, λ) -ES με $s_{(\mu,\lambda)} : I^\lambda \rightarrow I^\mu$ που είναι λιγότερο ελιτιστική, οι μ καλύτεροι υποψήφιοι επιλέγονται μόνο από τους λ απογόνους ως γονείς της επόμενης γενιάς. Πρακτικά στην περίπτωση αυτή υπάρχει η απαίτηση $\mu < \lambda$.

Συγκρίνοντας τους δυο αυτούς μηχανισμούς επιλογής πρώτα υποθέτεται ότι η $(\mu + \lambda)$ -ES είναι πιο αποδοτική καθώς δίνει το δικαίωμα σε μια καλή λύση να επιβιώσει και στην επόμενη γενιά χωρίς να εντάσσει την έννοια του χρόνου ζωής και να εξαφανίζονται λύσεις καλύτερες από τις καινούριες. Παρ' ολ' αυτά αυτή η

ιδιαιτερότητα της (μ, λ) –ES έχει σημαντικά πλεονεκτήματα σε συναρτήσεις με πολύπλοκες τοπολογίες καθώς της επιτρέπει να ξεχάσει καλές λύσεις και να απομακρυνθεί από τοπικά ακρότατα. Επίσης μειώνει την μακροπρόθεσμη επίπτωση που έχουν οι μη προσαρμοσμένοι στρατηγικοί παράμετροι, σε περιπτώσεις όπου έχει επιτευχθεί λύση τυχαία, και επιβιώνουν για αρκετές γενιές μειώνοντας την απόδοση του μηχανισμού. Τέλος σε στοχαστικά προβλήματα με χρήση της $(\mu + \lambda)$ –ES υπάρχει ο κίνδυνος να διατηρηθεί μια λύση που δεν ακολουθεί το κινούμενο βέλτιστο καθώς στην μέθοδο αυτή δεν γίνεται επαναξιολόγηση των γονέων βάση της αντικειμενικής συνάρτησης.

Συνοψίζοντας ο προτεινόμενος από τον Schwefel ES αλγόριθμος είναι ο (μ, λ) –ES με χρήση της αναλογίας $\mu/\lambda \approx 1/7$ για επιτάχυνση της προσαρμογής των στρατηγικών παραμέτρων. Ο αριθμός των γονέων μπορεί να επηρεάσει πολύ το ύψος της αναζήτησης καθώς μια αύξηση του μ οδηγεί σε μια αναζήτηση προσανατολισμένη στην εξερεύνηση όλου του όγκου των αποδεκτών λύσεων ενώ μια μείωση του μ στον εντοπισμό ενός τυχαίου αποδεκτού σημείου και στην εξερεύνηση στην κατεύθυνση αυτή.

3.4.2.5 Αρχικοποίηση.

Οι ES απαιτούν τον ορισμό κάποιων αρχικών τιμών κατά την εκκίνηση του αλγορίθμου. Η αρχικοποίηση των μεταβλητών σχεδιασμού μπορεί να γίνει εντός του εύρους που καθορίζεται από τα όρια τους, βάσει μιας n -διάστατης ομοιόμορφης κατανομής ή ακόμη αν θεωρηθεί σκόπιμο κοντά σε μια συγκεκριμένη περιοχή. Σε αντίθεση οι τυπικές αποκλίσεις προτείνεται να αρχικοποιούνται στην τιμή $\sigma_i(0) \approx \Delta x_i / \sqrt{n}$. Όπου το Δx_i δηλώνει την εκτιμώμενη απόσταση του αρχικού σημείου και μιας προσέγγισης της βέλτιστης τιμής [13] και n ο αριθμός των μεταβλητών σχεδιασμού. Η τιμή εφόσον η εκτίμηση της απόστασης αυτής ίσως να μην μπορεί να γίνει, θέτεται και ως η απόσταση μεταξύ των ορίων της μεταβλητής σχεδιασμού[50]. Συνήθως όμως θέτονται μικρότερες τιμές ως $\sigma_i(0) \approx 3.0$ [39] καθώς ο συνδυασμός ενός μεγάλου $\sigma_i(0)$ και μειωμένου ελιτισμού στην επιλογή γονέων, μιας μεγάλης τιμής μ , μπορεί να οδηγήσει τον αλγόριθμο στο να αποκλίνει. Οι αρχικές τιμές των γωνιών περιστροφής εξαρτώνται από τις τυπικές αποκλίσεις και υλοποιούνται από τη σχέση (3.3.2.1.6).

4 Η μέθοδος βελτιστοποίησης ISRES

4.1 Εισαγωγή

Οι T.P. Runarsson & Xin Yao το 2000 εισήγαγαν μια μέθοδο, γνωστή ως Stochastic Ranking for Constrained Evolutionary Optimization, SRES [50], για προβλήματα βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς και στην συνέχεια μια βελτιωμένη μορφή την Improved Stochastic Ranking ISRES [54]. Οι μέθοδοι αυτοί αποτελούνται από ένα αλγόριθμο βελτιστοποίησης ES και μια μέθοδο χειρισμού των περιορισμών (constraint handling technique) που ακόμη και σήμερα θεωρείται ένας από τους αντιπροσώπους του state of the art. Οι μέθοδοι αυτοί θα αναλυθούν στο παρόν εδάφιο καθώς αποτελούν το υπολογιστικό εργαλείο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική.

Όπως προαναφέρθηκε, η επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης που τίθεται υπό περιορισμούς απαιτεί την ένταξη μιας μεθόδου για χειρισμό των περιορισμών έτσι ώστε το αποτέλεσμα του υπολογισμού να εμπίπτει εντός του χώρου αποδεκτών λύσεων. Υπάρχουν διάφορες τέτοιες μέθοδοι, που μετατρέπουν ένα πρόβλημα A σε A' και τιμωρούν κατά την διάρκεια των επαναλήψεων τις παραβιάσεις των περιορισμών.

Έστω σε ένα πρόβλημα ελαχιστοποίησης A αντικειμενική συνάρτηση (objective function)

$$\text{Minimize } f(x), \quad x = (x_1, x_1, \dots, x_n) \in R^n$$

Στο οποίο $x \in S \cap F$, $S \subseteq R^n$ που ορίζει τον χώρο αναζήτησης (search space) εντός του n – διάστατου χώρου που ορίζεται από το καθορισμένο εύρος των μεταβλητών (parametric constraints) και το σύνολο των αποδεκτών λύσεων (Feasible region) F ορισμένο από

$$F = \{x \in R^n \mid g_j(x) \leq 0 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\}\} \quad (4.1.1)$$

Όπου,

$$g_j(x) \leq 0 \quad \forall j \in \{1, 2, \dots, m\} \text{ οι συναρτήσεις περιορισμών.}$$

Που τελικά προκύπτει το πρόβλημα A' με fitness function

$$\psi(x) = f(x) + r_g \varphi(g_j(x); j = 1, 2, \dots, m)$$

Με συνάρτηση Ποινής πραγματικών αριθμών $\varphi \geq 0$,

$$\varphi(g_j(x); j = 1, 2, \dots, m) = \sum_{j=1}^m \max\{0, g_j(x)\}^2 \quad (4.1.2)$$

και συντελεστές ποινής (penalty coefficients) $\{r_g\}_0^G$ όπου g ο μετρητής επαναλήψεων.

Η μέθοδος αυτή λειτουργεί αρκετά καλά σε πολλά προβλήματα Παρ' ολ' αυτά η επιλογή των βέλτιστων συντελεστών r_g μπορεί να καταλήξει από μόνη της ένα νέο πρόβλημα βελτιστοποίησης. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη επιρροή που έχει στη διαδικασία αναζήτησης καθώς αν στο r_g δοθεί μεγάλη τιμή η αναζήτηση έχει μειωμένη εξερεύνηση (exploration) από τις πρώτες κιόλας επαναλήψεις με αποτέλεσμα η λύση που τελικά επιτυγχάνεται να είναι εντός του χώρου αποδεκτών λύσεων αλλά χαμηλής ποιότητας. Σε αντίθετη περίπτωση, όπου στο r_g δοθεί μικρή τιμή, η ποινή που αποδίδεται στη συνάρτηση ίσως να μην είναι αρκετή να οδηγήσει σε λύσεις εντός του χώρου αποδεκτών λύσεων. Το πρόβλημα αυτό γίνεται εντονότερο σε προβλήματα όπου οι συναρτήσεις τους παρουσιάζουν ασυνέχειες, όπου εμφανίζονται δυσκολίες για μεταπήδηση από μια περιοχή αποδεκτών λύσεων σε άλλη. Η δυνατότητα αυτή εξασφαλίζεται από την αύξηση της εξερεύνησης που είναι αλληλένδετη με το μέγεθος του r_g , του οποίου η απαίτηση αλλάζει όχι μόνο σε κάθε διαφορετικό πρόβλημα αλλά ακόμη και στα στάδια εντός ενός προβλήματος κατά την διάρκεια των επαναλήψεων.

Στην εξελικτική βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς (evolutionary constrained optimization) [20][48] υπάρχουν τρόποι με τους οποίους η ρύθμιση του r_g μπορεί να γίνει δυναμικά και βασισμένη σε προκαθορισμένες μονοτονικά μη φθίνουσες ακολουθίες των τιμών του r_g , μέθοδοι οι οποίοι έδειξαν να δουλεύουν σε απλά προβλήματα αλλά να αποτυγχάνουν σε δυσκολότερα λόγω της εξάρτησης της καταλληλότητας του r_g στην φύση του προβλήματος. Μια προσέγγιση δοκιμή-σφάλματος έχει δοκιμαστεί για την εύρεση σταθερής προκαθορισμένης ακολουθίας που όμως δεν μπορεί να θεωρηθεί κατάλληλη για ποικιλία προβλημάτων. Η πιο υποσχόμενη μέθοδος ήταν αυτή στην οποία το r_g αντλούσε πληροφορία από τον πληθυσμό και προσαρμοζόταν δυναμικά και εντός του ΕΑ.

Διάφορα προβλήματα οδηγούν σε διαφορετικούς πληθυσμούς της αναζήτησης άρα και διαφορετικές τιμές του r_g . Ειδικότερα οι διάφορες τιμές του r_g ορίζουν διαφορετικές συναρτήσεις καταλληλότητας, που συνεπάγει ότι η καταλληλότητα ενός ατόμου διαφέρει από τιμή σε τιμή του r_g . Από τα πιο πάνω πηγάζει η ανάγκη για την βαθμολόγηση των ατόμων βάσει της αντικειμενικής τους συνάρτησης αλλά και της συνάρτησης ποινής τους.

Η μέθοδος που πρότειναν οι T.P. Runarsson & Xin Yao είναι στην ουσία μια multiobjective optimization (MOO) προσέγγιση. Οι συναρτήσεις ποινής αντιμετωπίζονται σαν μια επιπλέον αντικειμενική συνάρτηση, η οποία μετατρέπεται σε ένα πρόβλημα πολλών στόχων αποφεύγοντας έτσι το δύσκολο καθορισμό του r_g . Αν και στα MOO πάλι πρέπει να καθοριστούν οι συντελεστές βάρους, πράγμα που δεν θα άλλαζε πρακτικά τη δυσκολία αυτή, για αυτό εισάγεται και η μέθοδος της στοχαστικής ταξινόμησης (Stochastic Ranking-SR). Μια νετερμινιστική παραλλαγή της μεθόδου αυτής, η Global Competitive Ranking, που προτάθηκε αργότερα από τους ίδιους, δίνει έμφαση στις ισοπαλίες μεταξύ δυο ατόμων κατά τη σύγκριση. Οι μέθοδοι αυτοί αναπτύχθηκαν για CEO (Constrained Evolutionary Optimization) αλλά πριν αναλυθούν περαιτέρω, θα εξεταστεί συνοπτικά η σχέση μεταξύ r_g – ταξινόμησης αλλά και η έννοια της κυριαρχίας (dominance).

Έστω για συντελεστή ποινής $r_g > 0$ η ταξινόμηση των λ ατόμων είναι

$$\psi(\vec{x}_1) \leq \psi(\vec{x}_2) \leq \psi(\vec{x}_3) \leq \dots \leq \psi(\vec{x}_\lambda) \quad (4.1.3)$$

Όπου έστω για δυο εν σειρά στην κατάταξη άτομα i και $i + 1$ με συναρτήσεις

$$\psi(\vec{x}_i) \leq \psi(\vec{x}_{i+1}) \quad (4.1.4)$$

$$f_i + r_g \varphi_i \leq f_{i+1} + r_g \varphi_{i+1} \quad i \in \{1, \dots, \lambda - 1\}$$

Όπου χρησιμοποιούνται οι συμβολισμοί $f_i = f(\vec{x}_i)$ και $\varphi_i = \varphi(g_j(\vec{x}_i), j = 1, 2, \dots, m)$

Και ο κρίσιμος συντελεστής ποινής (critical penalty coefficient) \check{r}_i για τα δυο εν σειρά άτομα

$$\tilde{\gamma}_i = \frac{f_{i+1} - f_i}{\varphi_{i+1} - \varphi_i} \quad (4.1.5)$$

Με $\varphi_{i+1} - \varphi_i \neq 0$.

Οπότε δημιουργούνται 3 περιπτώσεις για $r_g \geq 0$ για να διαμορφωθούν οι ανισότητες αυτές:

- Η κατάταξη κυριαρχείται από την επίδοση της αντικειμενικής συνάρτησης:

$$f_i \leq f_{i+1} \text{ και } \varphi_i \geq \varphi_{i+1}$$

$$0 < r_g \leq \tilde{\gamma}_i$$

Στην περίπτωση όπου και οι δυο λύσεις βρίσκονται εντός του χώρου των αποδεκτών λύσεων η τιμή του $\tilde{\gamma}_i$ απειρίζεται.

- Η κατάταξη κυριαρχείται από την επίδοση της συνάρτησης ποινής:

$$f_i \geq f_{i+1} \text{ και } \varphi_i < \varphi_{i+1}$$

$$0 < r_g \leq \tilde{\gamma}_i$$

- Ούτε η αντικειμενική συνάρτηση ούτε η συνάρτηση ποινής μπορούν να καθορίσουν την κατάταξη μεμονωμένα. Στην σύγκριση αυτή δεν υπάρχει κυριαρχία (nondominated).

$$f_i < f_{i+1} \text{ και } \varphi_i < \varphi_{i+1}$$

$$\tilde{\gamma}_i > 0$$

Κατανοώντας τις επιπτώσεις που έχουν οι πιο πάνω περιπτώσεις παρατηρούμε ότι όταν δυο άτομα βρίσκονται εντός του χώρου αποδεκτών λύσεων αλλά και όταν δεν υπάρχει κυριαρχία, ο συντελεστής ποινής r_g δεν έχει καμία επίδραση στην κατάταξη. Αντίθετα στις υπόλοιπες περιπτώσεις όταν το r_g έχει μεγαλύτερη τιμή από το $\tilde{\gamma}_i$ θα καθορίσει αν στην σύγκριση θα κυριαρχίσει η αντικειμενική συνάρτηση ή η συνάρτηση ποινής, με αποτέλεσμα η ταξινόμηση να υλοποιηθεί εις βάρος πιθανών καταλληλότερων ατόμων.

Επίσης η επίδραση του r_g , δηλαδή όταν η ταξινόμηση γίνεται βάσει ενός συνδυασμού της αντικειμενικής συνάρτησης και της συνάρτησης ποινής, περιορίζεται εντός κάποιων κάτω και άνω ορίων $\underline{r_g} < r_g < \overline{r_g}$. Στην περίπτωση όπου ξεπεραστεί το κάτω όριο η κατάταξη γίνεται βάσει μόνο της αντικειμενικής συνάρτησης,

underpenalization, ενώ στην περίπτωση όπου ξεπεραστεί το άνω όριο οδηγείται στο φαινόμενο να αγνοείται η αντικειμενική συνάρτηση και η ταξινόμηση να βασίζεται αποκλειστικά στην συνάρτηση ποινής, overpenalization.

Μια αναζήτηση μπορεί να περάσει σε διαφορετική περίπτωση κατά την διάρκεια των επαναλήψεων. Για παράδειγμα υπάρχουν περιπτώσεις όπου η αναζήτηση ξεκινά με χαμηλό r_g , έτσι ώστε να βρεθεί μια περιοχή καλών λύσεων, και στην συνέχεια αυξάνει έτσι ώστε να εντοπιστεί αποδεκτή λύση. Γενικότερα όμως επιδιώκεται το r_g να βρίσκεται εντός ορίων καθώς στόχος είναι η εύρεση αποδεκτής λύσης αλλά και ταυτόχρονα ποιοτικής.

Στις ES οι μέθοδοι για βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς εμπίπτουν στην κατηγορία των overpenalized, θεωρούν όλες τις λύσεις που παραβιάζουν τους περιορισμούς χειρότερες από τις λύσεις εντός του χώρου αποδεκτών λύσεων. Ιδιαίτερα στην αυθεντική ES όπου ο αλγόριθμος βελτιστοποιούσε αρχικά την συνάρτηση των περιορισμών, και το αποτέλεσμα αυτού ήταν η αρχικοποίηση ενός δεύτερου κύκλου βελτιστοποίησης για την αντικειμενική συνάρτηση, όπου απορρίπτονταν όλες οι μη αποδεκτές λύσεις που παράγονταν.

4.2 Η μέθοδος της στοχαστικής ταξινόμησης (Stochastic Ranking)

Η ανάγκη για εύρεση ενός συντελεστή ποινής που θα ισορροπούσε την επίδραση της αντικειμενικής συνάρτησης και της συνάρτησης ποινής αλλά και ταυτόχρονα θα ήταν εύκολο να ορισθεί, οδήγησε τους T.P. Runarsson και Xin Yao στη δημιουργία της μεθόδου Stochastic Ranking. Η μέθοδος αυτή αρχικά μοιάζει με την μέθοδο των Surry και Radcliffe[42], που αφορά το αποτέλεσμα της επιλογής μέσω τουρνουά (tournament selection) μεταξύ δυο ατόμων, χωρίς όμως την επιπλέον υπολογιστική απαίτηση για προσαρμογή της πιθανότητας της επικράτησης ενός από αυτούς. Επιπλέον η μέθοδος αυτή έχει σαν βάση την ταξινόμηση των ατόμων αλλά και την άμεση εξισορόπηση της αντικειμενικής συνάρτησης και της συνάρτησης ποινής σε ένα πληθυσμό.

Η ταξινόμηση επιτυγχάνεται μέσα από μια στοχαστική διαδικασία ταξινόμησης με μορφή παρόμοια με την bubble sort. Κάθε άτομο συγκρίνεται με το επόμενο στην κατάταξη και ανταλλάζει θέση με αυτό όταν αποδεικνύεται καταλληλότερο του.

Εισάγεται η πιθανότητα P_f η οποία συγκρίνεται με μια τιμή $u \in U(0,1)$, και δίνει τη δυνατότητα σε δυο άτομα εκτός του χώρου αποδεκτών λύσεων να αλλάξουν θέση στην κατάταξη βάσει της επίδοσης τους στην αντικειμενική συνάρτηση. Στην περίπτωση που δεν τηρηθεί το κριτήριο της πιθανότητας και τα άτομα είναι εκτός του χώρου αποδεκτών λύσεων συγκρίνονται βάσει της επίδοσης τους στη συνάρτηση ποινής. Οποιαδήποτε δυο άτομα βρίσκονται στο χώρο των αποδεκτών λύσεων συγκρίνονται πάντα βάσει της απόδοσης τους στην αντικειμενική συνάρτηση, αφού στη συγκεκριμένη περίπτωση θεωρείται πιθανότητα ίση με 1. Στην διαδικασία αυτή τα λ άτομα συγκρίνονται με το αμέσως επόμενο άτομο στην κατάταξη και παύει όταν δεν υπάρξει καμία αλλαγή στην κατάταξη, άρα απαιτούνται τουλάχιστον λ σαρώσεις.

Η πιθανότητα P_f που προαναφέρθηκε είναι ουσιαστικά η πιθανότητα σύγκρισης δυο ατόμων βάσει της αντικειμενικής τους συνάρτησης ακόμη και αν δεν βρίσκονται στο χώρο των αποδεκτών λύσεων. Εφόσον το αποτέλεσμα απαιτείται να είναι εντός του χώρου αποδεκτών λύσεων θέτεται μικρότερο από 0.5 ενώ η περεταίρω μείωση του αυξάνει την αυστηρότητα ως προς του περιορισμούς και περιορίζει την δυνατότητα εξερεύνησης. Στην πράξη, αυτή θέτεται από το χρήστη και προτείνεται η τιμή της να βρίσκεται στο εύρος $0.4 < P_f < 0.5$. Τέλος η πιθανότητα επικράτησης μιας σύγκρισης είναι διαφορετική σε κάθε στάδιο της διαδικασίας ταξινόμησης και με την αύξηση των σαρώσεων μειώνεται η επίδραση που είχε η αρχική κατάταξη. Η μέθοδος αυτή φαίνεται στο σχήμα.

```

1   $I_j = j \forall j \in \{1, \dots, \lambda\}$ 
2  for  $i = 1$  to  $\lambda$  do
3      for  $j = 1$  to  $\lambda - 1$  do
4          sample  $u \in U(0, 1)$  (uniform random number generator)
5          if  $(\phi(I_j) = \phi(I_{j+1}) = 0)$  or  $(u < 0.45)$  then
6              if  $(f(I_j) > f(I_{j+1}))$  then
7                   $swap(I_j, I_{j+1})$ 
8              fi
9          else
10             if  $(\phi(I_j) > \phi(I_{j+1}))$  then
11                  $swap(I_j, I_{j+1})$ 
12             fi
13         fi
14     od
15     if no  $swap$  done break fi
od

```

ΕΙΚΟΝΑ 4-1 Η ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ (SR). ΠΗΓΗ:[50]

4.3 Global Competitive Ranking

Η ντετερμινιστική αυτή παραλλαγή της Stochastic Ranking, σε αντίθεση με την τελευταία, συγκρίνει κάθε άτομο του πληθυσμού με όλα. Αρχικά ταξινομεί ξεχωριστά την απόδοση των ατόμων ως προς την αντικειμενική συνάρτηση και τη συνάρτηση ποιής, δημιουργώντας μια κατάταξη π_f και μια κατάταξη π_φ αντίστοιχα. Η τελική κατάταξη προκύπτει από την συνάρτηση:

$$P(\pi(i)) = P_f \frac{\lambda - \pi_f(i)}{\lambda - 1} - (1 - P_f) \frac{\lambda - \pi_\varphi(i)}{\lambda - 1} \quad (4.3.1)$$

Με συνάρτηση καταλληλότητας

$$\Psi(\vec{x}_i) = P_f \frac{\lambda - \pi_f(i)}{\lambda - 1} - (1 - P_f) \frac{\lambda - \pi_\varphi(i)}{\lambda - 1} \quad (4.3.2)$$

$$i \in \{1, \dots, \lambda\}$$

Η πιθανότητα P_f εδώ λειτουργεί σαν την πιθανότητα να καθοριστεί η ταξινόμηση μόνο βάση της αντικειμενικής συνάστησης. Σε αντίθεση με την Stochastic Ranking δεν συγκρίνεται με κάποια τιμή παρμένη από ομοιόμορφη κατανομή αλλά λειτουργεί σαν κατανομή βάρους στις δυο κατατάξεις. Έτσι μπορεί να ρυθμιστεί ώστε να εστιάζεται η

αναζήτηση προς όφελος είτε της αντικειμενικής συνάρτησης, $0.5 < P_f < 1$, είτε ως προς της συνάρτησης ποινής, $0 < P_f < 0.5$. Η τιμή P_f συνήθως θέτεται μικρότερη του 0.5 για να εξασφαλιστεί ότι η λύση θα ικανοποιεί τους περιορισμούς και όσο πλησιάζει στο 0.5 τόσο μεγαλύτερη έμφαση δίνεται στην αντικειμενική συνάρτηση. Αντίστοιχα για ρύθμιση στην τιμή μηδέν, η μέθοδος λειτουργεί σαν μέθοδος overpenalization.

Global competitive ranking (P_f, f, ϕ):

Step 1: Determine the ranking, π_f, π_ϕ :

$$f(\mathbf{x}_{\pi_f^{-1}(1)}) \leq f(\mathbf{x}_{\pi_f^{-1}(2)}) \leq \dots \leq f(\mathbf{x}_{\pi_f^{-1}(\lambda)})$$

$$\phi(\mathbf{x}_{\pi_\phi^{-1}(1)}) \leq \phi(\mathbf{x}_{\pi_\phi^{-1}(2)}) \leq \dots \leq \phi(\mathbf{x}_{\pi_\phi^{-1}(\lambda)})$$

Step 2. Compute competitive fitness:

$$\psi(\mathbf{x}_i) = P_f \frac{\pi_f(i)-1}{\lambda-1} + (1 - P_f) \frac{\pi_\phi(i)-1}{\lambda-1}.$$

Step 3. Determine final ranking, π :

$$\psi(\mathbf{x}_{\pi^{-1}(1)}) \leq \psi(\mathbf{x}_{\pi^{-1}(2)}) \leq \dots \leq \psi(\mathbf{x}_{\pi^{-1}(\lambda)})$$

ΕΙΚΟΝΑ 4-2 Η ΜΕΘΟΔΟΣ GLOBAL COMPETITIVE RANKING. ΠΗΓΗ:[53]

4.4 Εξελικτικές στρατηγικές στη μέθοδο SRES

Στην σύνθεση της μεθόδου αυτής οι T.P. Runarsson & Xin Yao εξηγούν πως ένας από τους κύριους λόγους που επιλέχθηκε η ES ήταν η ευκολία προσαρμογής στην μέθοδο του Stochastic Ranking καθώς δε διαθέτουν ειδικούς τελεστές για χειρισμό μεταβλητών. Η SR λειτουργεί σαν προσθήκη στην ES για χειρισμό των περιορισμών και αποδίδει καλά αποτελέσματα χωρίς να απαιτούνται άλλες πολύπλοκες τεχνικές.

Η ES που χρησιμοποιείται είναι η (μ, λ) –ES στην απλή της μορφή, δηλαδή χωρίς την χρήση γωνιών περιστροφής. Γίνεται αρχικοποίηση των μεταβλητών σχεδιασμού βάσει της ομοιόμορφης n-διάστατης κατανομής στο χώρο αναζήτησης ενώ οι τυπικές αποκλίσεις αρχικοποιούνται βάσει της σχέσης $\sigma_i(0) \approx \Delta x_i / \sqrt{n}$, με Δx_i την απόσταση των άνω και κάτω ορίων των μεταβλητών σχεδιασμού,, που θέτεται και το άνω όριων αυτών. Χρησιμοποιείται η αναλογία $\mu/\lambda = 1/7$. Οι γενιές αξιολογούνται από το SR και οι μ καταλληλότεροι προκρίνονται στην επόμενη γενιά. Αρχικά γίνεται η ανανέωση των στρατηγικών παραμέτρων, στην προκείμενη περίπτωση των τυπικών αποκλίσεων, όπου χρησιμοποιείται διασταύρωση και μετάλλαξη. Η μέθοδος διασταύρωσης που χρησιμοποιείται είναι η γενικευμένη ενδιάμεση διασταύρωση και προηγείται της

μετάλλαξης. Η μετάλλαξη είναι του log-normal κανόνα και η μεταβλητή φ^* θέτεται ως ένα. Ακολουθεί η ανανέωση, μετάλλαξη, των μεταβλητών σχεδιασμού βάσει της σχέσης (3.3.2.2.6), και γίνεται έλεγχος για τιμές που ίσως προκύψουν εκτός ορίων. Στην περίπτωση αυτή επαναλαμβάνεται η διαδικασία της μετάλλαξης σε κάθε μεταβλητή σχεδιασμού που ήταν εκτός ορίων μέχρι και δέκα φορές, μεγαλύτερος αριθμός δοκιμών θα είχε απαιτήσεις σε υπολογιστική ισχύ, και σε περίπτωση όπου δεν επιτευχθεί μετάλλαξη που να μεταφέρει την συγκεκριμένη μεταβλητή εντός ορίων, ξαναπέρνει την τιμή που είχε στην προηγούμενη γενιά η οποία ήταν εντός ορίων.

Τρεις μορφές αυτού του ES η SRES, ο συγκεκριμένος ES μαζί με την Global Competitive Ranking με $P_f = 0.45$ και $P_f = 0$, δηλαδή ουσιαστικά με μέθοδο overpenalization, συγκρίθηκαν στο [53]. Η σύγκριση έγινε σε 13 test function όπου φάνηκε ότι οι λύσεις με τις δυο πρώτες υπερτερούσαν της overpenalized μεθόδου εκτός από την συνάρτηση Hock and Schittkowsky. Με χρήση γωνιών περιστροφής η SRES ξεπέρασε την overpenalization μέθοδο πράγμα που οδήγησε στην επιβεβαίωση της σημαντικότητας της έλλειψης γωνιών περιστροφής σε ορισμένα προβλήματα.

4.5 Εξελικτικές στρατηγικές στη μέθοδο ISRES

Αργότερα οι T.P. Runarsson & Xin Yao προσπάθησαν να εντάξουν ένα τρόπο ώστε η αναζήτηση να γίνει λιγότερο στοχαστική ως προς το χώρο αναζήτησης, μειώνοντας δηλαδή την επιρροή της τυχαίας εύρεσης λύσεων και μεταφοράς των μη προσαρμοσμένων στρατηγικών παραμέτρων αυτών, για πολλές επαναλήψεις. Το πρόβλημα αυτό οφείλεται κυρίως στην αφαίρεση των γωνιών περιστροφής από τον αλγόριθμο των οποίων όμως η πρόσθεσή τους θα οδηγούσε στην απαίτηση $n(n + 1)/2$ στρατηγικών παραμέτρων. Αυτό θα αύξανε δραματικά το υπολογιστικό κόστος, ειδικά σε μεγάλα προβλήματα όπου θα το κατασττούσε απαγορευτικό.

Πρότειναν την εισαγωγή της διαφορικής μεταβολής (differential variation) για την δημιουργία μ απογόνων αλλά και της εκθετικής εξομάλυνσης (exponential smoothing) στην διαδικασία της μετάλλαξης των υπολοίπων λ-μ απογόνων στην ES του SRES, δημιουργώντας έτσι την ISRES. Η διαδικασία αυτή θυμίζει τη μέθοδο Nelder-Mead [30] ή τη διαφορική εξέλιξη (Differential Evolution). Όπως θα φανεί στη συνέχεια, υποθέσεις για τις συναρτήσεις που βελτιστοποιούνται μπορούν να οδηγήσουν στην αύξηση της απόδοσης σε ορισμένα προβλήματα, αλλά και την ταυτόχρονη αύξηση της πιθανότητας εγκλωβισμού σε τοπικά ακρότατα. Αυτό συνάδει με το no-free-launch

theorem των Wolpert και Macready [56]. Στο [54] δείχνουν σε ποιες περιπτώσεις η χρήση αυτής της τεχνικής χειρισμού περιορισμών μπορεί να αποφέρει καλά αποτελέσματα.

Στην διαφορική μεταβολή οι μεταβλητές σχεδιασμού των απογόνων δημιουργούνται μέσα από μια λιγότερο στοχαστική διαδικασία. Το διάλυμα των μεταβλητών σχεδιασμού τους δημιουργείται από την απόσταση του εκάστοτε επιλεγμένου γονέα και του γονέα που βρίσκεται πρώτος στην κατάταξη, πολλαπλασιασμένο με μια παράμετρο γ . Η δημιουργία των διανυσμάτων των μεταβλητών σχεδιασμού μοιάζει με την γενικευμένη ενδιάμεση διασταύρωση, με την διαφορά ότι η παράμετρος γ δεν είναι μια στοχαστική μεταβλητή $\gamma \in [0,1]$ που λαμβάνεται από την ομοιόμορφη κατανομή για κάθε έναν απόγονο αλλά θέτεται από την αρχή και είναι σταθερή για όλους τους απογόνους σε όλες τις γενιές. Επίσης δεν επιλέγονται τυχαία δυο γονείς, επλέγεται ως πρώτος ο καταλληλότερος ενώ ως δεύτερος αυτός από τον οποίο κληρονόμησε ο απόγονος τις στρατηγικές παραμέτρους. Όπως και στην SRES με τον όρο στρατηγικοί παράμετροι αναφερόμαστε μόνο σε τυπικές αποκλίσεις, αφού δεν χρησιμοποιούνται γωνιές περιστροφής. Οι απογόνοι κληρονομούν τις στρατηγικές παραμέτρους των γονέων χωρίς αλλαγές στις τιμές τους. Τα διανύσματα μεταβλητών σχεδιασμού και στρατηγικών παραμέτρων των συγκεκριμένων απογόνων δεν υπόκεινται σε μετάλλαξη. Με αυτόν τον τρόπο κάθε γονέας παράγει ακριβώς έναν απόγονο.

Η εκθετική εξομάλυνση εφαρμόζεται στο τέλος της μετάλλαξης, διαδικασία που παράγει λ - μ απογόνους. Η διαδικασία μετάλλαξης είναι της μορφής (3.3.2.2.6). Στην εκθετική εξομάλυνση υπολογίζεται η απόσταση μεταξύ των στρατηγικών παραμέτρων, που προκύπτουν μετά τη μετάλλαξη, με αυτή του γονέα, από τον οποίο δημιουργήθηκαν, και προστίθεται στις αρχικές στρατηγικές παραμέτρους του γονέα, πολλαπλασιασμένη με μια σταθερά α . Η σταθερά αυτή θέτεται από την αρχή, και είναι σταθερή για όλους τους απογόνους σε όλες τις γενιές, ως $\alpha \approx 0.2$, αν και η τιμή της μπορεί να επηρεάσει την απόδοση του αλγόριθμου [51]. Σε αυτήν τη διαδικασία μπορούν να παρατηρηθούν ορισμένες ομοιότητες σε σχέση με την γενικευμένη ενδιάμεση διασταύρωση των στρατηγικών παραμέτρων.

Βάσει του [51], καθώς η διαδικασία βασίζεται στο μέσον όρο, η διαφοροποίηση των στρατηγικών παραμέτρων εντός μιας γενιάς παραμένει η ίδια, αλλά η διαφοροποίηση

από γενιά σε γενιά μειώνεται. Για να διατηρηθεί η διαφορετικότητα αυτή προτείνεται ο διορθωμένος ρυθμός εκμάθησης για μετάλλαξη μη-ισοτοπικής (non-isotropic) μορφής:

$$\bar{\varphi}^2 = \frac{2}{u} \ln \left(\frac{1}{\alpha} \left(\exp \left(\frac{\varphi^2 u}{2} \right) - (1 - \alpha) \right) \right) \quad (4.5.1)$$

Όπου,

$$u = \frac{1}{2n} + \frac{1}{2\sqrt{n}},$$

και για $\alpha = 1$, $\bar{\varphi} = \varphi$.

Τέλος, παρατίθεται ένας ψευδοκώδικας του αλγόριθμου που περιγράφηκε:

```

1 Initialize:  $\sigma'_k := (\bar{x}_k - \underline{x}_k) / \sqrt{n}$ ,  $x'_k = \underline{x}_k + (\bar{x}_k - \underline{x}_k) U_k(0, 1)$ 
2 while termination criteria not satisfied do
3   evaluate:  $f(x'_k)$ ,  $g^+(x'_k)$ ,  $k = 1 \dots, \lambda$ 
4   rank the  $\lambda$  points and copy the best  $\mu$  in their ranked order:
5    $(x_i, \sigma_i) \leftarrow (x'_{i;\lambda}, \sigma'_{i;\lambda})$ ,  $i = 1, \dots, \mu$ 
6   for  $k := 1$  to  $\lambda$  do
7      $i \leftarrow \text{mod}(k - 1, \mu) + 1$ 
8     if  $(k < \mu)$  do (differential variation)
9        $\sigma'_k \leftarrow \sigma_i$ 
10       $x'_k \leftarrow x_i + \gamma(x_1 - x_{i+1})$ 
11     else (standard mutation)
12       $\sigma'_{k,j} \leftarrow \sigma_{i,j} \exp(\tau' N(0, 1) + \tau N_j(0, 1))$ ,  $j = 1, \dots, n$ 
13       $x'_k \leftarrow x_i + \sigma'_k N(0, 1)$ 
14       $\sigma_k \leftarrow \sigma_i + \alpha(\sigma'_k - \sigma_i)$ 
15     od
16   od
17 od

```

ΕΙΚΟΝΑ 4-3 Η ΕΣ ΠΟΥ ΕΦΑΡΜΟΖΕΤΑΙ ΣΤΗΝ ΜΕΘΟΔΟ ISRES. ΠΗΓΗ: [54]

5 Μαθηματικό μοντέλο

5.1 Εισαγωγή

Στο ‘The effect of long-term expansion on the evolution of electricity price: numerical analysis of a theoretically optimized electricity market’ [1] προτείνεται ένα μοντέλο για βελτιστοποίηση ενός GEP, για μια ημι-απελευθερωμένη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, στο οποίο γίνεται υπολογισμός της SMP. Η ανάγκη κάλυψης της ζήτησης και η διαμόρφωση του μείγματος παραγωγής επηρεάζουν την τιμή πώλησης του ηλεκτρικού ρεύματος στους πολίτες και στην βιομηχανία, αλλά και το αποτέλεσμα των προτεινόμενων επενδύσεων του μοντέλου. Σε αυτό χρησιμοποιούνται δύο τρόποι ενδογενούς υπολογισμού της SMP αλλά στην παρούσα διπλωματική επιλέχθηκε να χρησιμοποιηθεί ένας εκ των δύο ο οποίος θα αναλυθεί στην συνέχεια.

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε σαν βάση για την παρούσα διπλωματική εργασία και τροποποιήθηκε ώστε να απεικονίζει την Ελληνική ενεργειακή αγορά, και προστέθηκαν περιορισμοί για να στοχεύει ταυτόχρονα στην επίτευξη των στόχων όπως αυτοί διαμορφώθηκαν από τα ΕΕΣ και NREA. Το ίδιο αποτελεί βελτιωμένη μορφή προγενέστερου [2], και έχει διαμορφωθεί για την ένταξη της διαδικασίας προσέγγισης της SMP ταξινομώντας το μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας βάσει του μοναδιαίου κόστους παραγωγής.

Στο μοντέλο γίνεται αναζήτηση των ετήσιων παραγγελιών εγκατάστασης ισχύος από το διαχειριστή του συστήματος, που μπορεί να ερμηνευθεί και ως αδειοδοτήσεις για την εγκατάσταση διαφόρων μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις διαθέσιμες προς εκμετάλλευση τεχνολογίες στην Ελλάδα. Αναζητείται επίσης και ο βαθμός απασχόλησης των μονάδων κάθε συμβατικής τεχνολογίας. Λαμβάνεται υπόψιν και μια σειρά από περιορισμούς που αφορούν τις απαιτήσεις του συστήματος αλλά και τον ρεαλισμό της λύσης.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση του μοντέλου αυτού καθώς και τον τροποποιήσεων που έγιναν. Αναφέρονται κάποιες βασικές έννοιες και παρουσιάζονται οι συναρτήσεις που υπολογίζονται. Τέλος αναφέρονται τα μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιήθηκαν για να εξαχθούν οι τιμές για τον χρονικό ορίζοντα που θα εξεταστεί.

Συμβολισμοί	Περιγραφή
$\alpha_{a,i}$	Συντελεστής διαθεσιμότητας της τεχνολογίας (i) ως προς το συνολικό διαθέσιμο χρόνο λειτουργίας [%]
$\alpha_{c,i}$	Συντελεστής διαθεσιμότητας της τεχνολογίας (i) ως προς το συνολικό διαθέσιμο φορτίο [%]
$b^{(i)}$	Συντελεστής τεχνολογικής βελτίωσης κάθε τεχνολογίας (i)
$C_{i,v}$	Παραγγελίες παραγωγικής ικανότητας της τεχνολογίας (i) την χρονική περίοδο (v) πριν το έτος βάσης
$Cf_{i,z}$	Τιμή καυσίμου της τεχνολογίας (i) στο έτος (z) [€/MWh]
$Cv_{i,z}$	Κόστη λειτουργίας και συντήρησης της τεχνολογίας (i) στο έτος (z) [€/MW]
$d_{z,f}$	Συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας [MWh]
D_z	Συντελεστής προεξόφλησης [%]
E_{CO_2i}	Εκπομπές CO_2 της τεχνολογίας (i)[ισοδύναμους τόνους CO_2]
En_i	Διαθέσιμη δυναμικότητα φυσικών πόρων της τεχνολογίας (i) [MW]

f_{CO_2i}	Συντελεστής εκπομπής CO_2 της τεχνολογίας (i) [ισοδύναμους τόνους CO_2/MWh_{fuel}]
G_{20}	Ποσοστό συμβολής στην ηλεκτροπαραγωγή για κάθε τεχνολογία (i) το έτος 2020 [%]
G_{50}	Εγκατεστημένη παραγωγική ικανότητα για κάθε τεχνολογία (i) το έτος 2050 [MW]
I	Συνολικός αριθμός τεχνολογιών/ειδών καυσίμου.
$I_{i,v}$	Κόστος επένδυσης της παραγγελίας παραγωγικής ικανότητας της τεχνολογίας (i) την χρονική περίοδο (v) [€/MWh e]
$I_{Dz,i}$	Κόστος ετήσιας απόσβεσης επένδυσης της παραγγελίας παραγωγικής ικανότητας της τεχνολογίας (i), πληρωτέα την περίοδο (z) [€/MWh e]
$L_{i,z}$	Εγκατεστημένη παραγωγική ικανότητα της τεχνολογίας (i) το έτος (z) [MWh e]
m_r	Περιθώριο ασφαλείας της δυναμικότητας για τις ώρες αιχμής [%]
n_i	Συντελεστής απόδοσης της μονάδας (i) [%]

NPV	Καθαρή παρούσα αξία [€]
p_{CO_2z}	Τιμή δικαιωμάτων εκπομπής CO_2 το έτος (z) [€/tons CO_2]
pre_z	Ορισμένη τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος για τις τεχνολογίες ΑΠΕ το έτος (z) [€/MWh]
PP_i, Py_i	Μέγιστο και ελάχιστο ετήσιο παραγωγικό επίπεδο της τεχνολογίας (i) [MWh]
Pc_z	Μέγιστη ζήτηση ενέργειας το έτος (z) [MW]
$P_{i,z}$	Συνολική παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας το έτος (z) της τεχνολογίας (i) [MWh]
$Po_z(t)$	Καταμετρημένη ηλεκτρική κατανάλωση την ώρα (t) του έτους (z) [MWh]
$profits_{i,z}$	Έσοδα της τεχνολογίας (i) το έτος (z) [€]
RE	Αριθμός τεχνολογιών βασισμένες σε ΑΠΕ
$r_{in,t}$	Πληθωρισμός στο έτος (t) [%]
r_t	Επιτόκιο στο έτος (t) [%]

$T I_i$	Χρόνος παράδοσης, κατασκευής σταθμού της τεχνολογίας (i) εφόσον έχει γίνει επένδυση [έτη]
$T o_i$	Χρόνος ζωής μιας μονάδας της τεχνολογίας (i) [έτη]
$T_{z max}$	Συνολικός αριθμός ωρών ενός έτους [ώρες]
v	Έτος που γίνεται η επένδυση ή η παραγγελία[έτος]
$X_{i,v}$	Άγνωστη παραγγελία παραγωγικής ικανότητας της τεχνολογίας (i) την χρονική περίοδο (v) [MWhe]
Y	Χρονικός ορίζοντας του συστήματος [έτη]
z	Μετρητής έτους [έτη]
$\theta_{i,z}$	Άγνωστος συντελεστής απασχόλησης, δηλαδή το ποσοστό των ωρών που λειτουργεί μια μονάδα επί των συνολικών ωρών του έτους (z) [%]

ΠΙΝΑΚΑΣ 5-1 ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

5.2 Βασικές έννοιες

5.2.1 Οριακή τιμή συστήματος (System Marginal Price-SMP)

Η SMP είναι η τελική τιμή αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας από τους προμηθευτές. Βασικός παράγοντας που διαμορφώνει την SMP είναι το μείγμα παραγωγής και η πρωτογενής πηγή ενέργειας. Το κόστος παραγωγής από τεχνολογία σε τεχνολογία διαφέρει και οφείλεται σε αρκετούς παράγοντες και ιδιαίτερα στις τιμές των καυσίμων.

5.2.2 Αξιολογική Ταξινόμηση (Merit Order)

Η αξιολογική ταξινόμηση είναι η διαδικασία στην οποία κατατάσσονται οι προμηθευτές από τον ανεξάρτητο διαχειριστή του συστήματος βάσει της τιμής της προσφοράς τους στον πλειστηριασμό. Βασικό κριτήριο αποτελεί το κόστος προμήθειας κάθε παραγωγού ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ανεξάρτητος διαχειριστής του συστήματος αποδέχεται τις προσφορές με το χαμηλότερο κόστος μέχρι να εξασφαλίσει την κάλυψη της ζήτησης. Από τη διαδικασία αυτή εξαιρούνται οι ΑΠΕ καθώς αφενός η διαθεσιμότητά τους εξαρτάται και από φυσικά φαινόμενα και αφετέρου χαίρουν ευνοϊκότερου πλαισίου από το σύστημα λόγω των πράσινων πολιτικών. Οι ΑΠΕ γίνονται δεκτές από το σύστημα όταν είναι διαθέσιμες.

5.2.3 Παραγγελίες παραγωγικής ικανότητας

Στο μοντέλο θεωρείται ότι κατά τη διάρκεια ενός έτους ο ανεξάρτητος διαχειριστής του συστήματος προβαίνει σε παραγγελίες παραγωγής ενέργειας από τους παραγωγούς της εκάστοτε τεχνολογίας. Κατευθυνόμενος από τη ζήτηση και την ελαχιστοποίηση του κόστους ορίζει ποιο θα είναι το μείγμα παραγωγής. Οι GENCOS προχωρούν σε παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας βάσει αυτού και επενδύουν στην κατασκευή νέων σταθμών ανάλογα με την ζήτηση και τα αναμενόμενα έσοδα που θα είχε μια επένδυση σε κάθε τεχνολογία. Συγκεκριμένα οι μελλοντικές απαιτήσεις του συστήματος ερμηνεύονται ως παραγγελίες παραγωγικής ικανότητας ή αλλιώς παραγγελίες εγκατεστημένης ισχύος που θα αποφέρουν κέρδη στους επενδυτές.

5.2.4 Μείγμα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας

Το ποσοστό συμμετοχής κάθε τεχνολογίας στην παραγωγή καθορίζεται κυρίως από τη ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια, τη διαθεσιμότητα των προμηθευτών και το κόστος

παραγωγής τα οποία τελικά οδηγούν και στην τιμή της SMP. Ο ανεξάρτητος διαχειριστής του συστήματος ενημερώνει τους προμηθευτές για τις απαιτήσεις οι οποίοι ανάλογα με τα κόστη παραγωγής τους προσφέρουν στο δίκτυο ηλεκτρική ενέργεια, σε τιμή συμφωνημένη μετά από έναν είδος πλειστηριασμού. Εφόσον όμως η τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας τελικά διαμορφώνεται από τον πιο ακριβό αποδεκτό προμηθευτή, σε περιόδους αυξημένης ζήτησης η τιμή πώλησης αυξάνεται καθώς προκρίνονται και οι ακριβότεροι προμηθευτές για να καλύψουν τις ανάγκες.

5.2.5 Τεχνολογία

Στην παρούσα εργασία με τον όρο ‘Τεχνολογία’ αναφερόμαστε στους διαθέσιμους μηχανισμούς για εκμετάλλευση μιας πηγής ενέργειας.

5.2.6 Τεχνολογική βελτίωση-καμπύλες γνώσεων

Με βάση τις καμπύλες γνώσεων εντάσσεται ένας παράγοντας εκμάθησης της εργασίας στους συντελεστές κόστους. Λόγω της ενασχόλησης σε μια εργασία, της εμπειρίας που αποκτάται και της τεχνολογικής εξέλιξης μειώνονται οι συντελεστές κόστους. Βάσει του τύπου των καμπυλών γνώσεων η ποσοτική μεταβολή είναι μεγαλύτερη στα πρώιμα στάδια της εκάστοτε τεχνολογίας και μειώνεται σταδιακά σε βάθος χρόνου αφού επέρχεται ο κορεσμός στα περιθώρια βελτίωσης. Οι καμπύλες γνώσεων δίνονται από την σχέση:

$$Y_x = K \cdot x^{\log_2 b} \quad (5.2.6.1)$$

Όπου K είναι το κόστος παραγωγής της πρώτης μονάδας, b ο συντελεστής γνώσης και Y_x το κόστος παραγωγής της μονάδας x .

5.2.7 Εισαγωγές και εξαγωγές ηλεκτρικής ενέργειας

Στο μοντέλο αυτό το ισοζύγιο εισαγόμενης και εξαγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας θεωρείται ίσο.

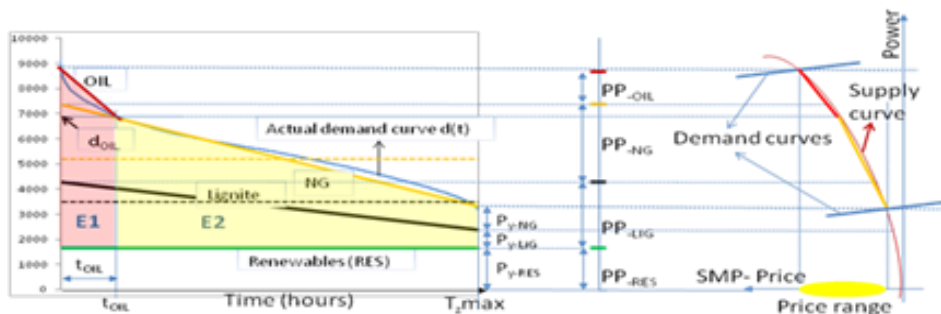
5.2.8 Χρονικός ορίζοντας στα GEP

Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στο πλήθος των χρονικών μονάδων που εξετάζεται το GEP. Συνήθως αναφερόμαστε σε μακροπρόθεσμο προγραμματισμό άρα οι χρονικές μονάδες αντιστοιχούν σε έτη. Αξίζει να αναφερθεί ότι αν αναζητείται πλάνο για μια

χρονική περίοδο ο χρονικός ορίζοντας της μελέτης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερος από αυτή, καθώς ο προγραμματισμός για τα τελευταία έτη επηρεάζεται από το τέλος του χρονικού ορίζοντα. Για παράδειγμα μπορεί το μοντέλο να αποφεύγει να κάνει επενδύσεις σε τεχνολογίες με μεγάλο χρόνο κατασκευής αφού ακόμη και αν προλάβουν να κατασκευαστούν δεν θα απολαύει τα έσοδα από αυτές. Το φαινόμενο αυτό στην παρούσα εργασία θα ονομάζεται lead-time-effect.

5.3 Υπολογισμός παραγωγής ενέργειας από κάθε τεχνολογία.

Η ηλεκτρική ζήτηση ενός έτους ικανοποιείται από την ολοκλήρωση των φορτίων που προσφέρει κάθε τεχνολογία στην διάρκεια ενός έτους, ή 8760 ωρών. Η αξιολογική ταξινόμηση κατανέμει τη διαθέσιμη ισχύ σε φθίνουσα σειρά, με τεχνολογία, της οποίας το κόστος παραγωγής είναι χαμηλότερο, να προηγείται των υπολοίπων.



ΕΙΚΟΝΑ 5-1 ΣΧΗΜΑ ΑΞΙΟΛΟΓΙΚΗΣ ΤΑΞΙΝΟΜΗΣΗΣ. ΠΗΓΗ:[1]

Η ηλεκτρική ενέργεια $P_{i,z}$ [MWh_{el}] που παράγεται από κάθε τεχνολογία i του έτους z υπολογίζεται από την σχέση :

$$P_{i,z} = L_{i,z} \theta_{i,z} a_{a,i} a_{c,i} \cdot 8760 \quad \forall i, z \quad (5.3.1)$$

Όπου συντελεστές $\theta_{i,z}$, $a_{a,i}$, $a_{c,i}$ αφορούν την εκάστοτε τεχνολογία, Πίνακας 10-1.

Καθώς οι ΑΠΕ θεωρείται ότι προσφέρουν πάντα στο δίκτυο όταν η πηγή τους είναι διαθέσιμη, τα άνω και κάτω όρια παραγωγής είναι ίσα και ισχύει:

$$PP_{RES} \cdot T_{zmax} = P_{RES} \quad (5.3.2)$$

$$PP_{RES} \cdot T_{zmax} = P_{yRES} \quad (5.3.3)$$

Η μέγιστη παραγωγή ενέργειας των συμβατικών τεχνολογιών προσεγγίζεται μέσω της εγκατεστημένης παραγωγικής τους ικανότητας όπου λαμβάνεται υπόψιν και ένα περιθώριο m_r για την ευστάθεια του δικτύου:

$$PP_{LIG} = L_{LIG}/(1 + m_r) \quad (5.3.4)$$

$$PP_{NG} = L_{OIL}/(1 + m_r) \quad (5.3.5)$$

$$PP_{OIL} = L_{OIL}/(1 + m_r) \quad (5.3.6)$$

Η παραγόμενη ενέργεια των συμβατικών τεχνολογιών μπορεί να υπολογιστεί από το εμβαδόν που περικλείεται μεταξύ της άνω και κάτω γραμμής ισχύος της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Η άνω γραμμή ισχύος προφανώς συμπίπτει με την κάτω γραμμή ισχύος της αμέσως ακριβότερης τεχνολογίας. Ανάλογα με τη συνέχεια του χρόνου που τίθενται οι μονάδες σε λειτουργία, δημιουργούνται τραπεζοειδή ή τριγωνικά προφίλ τα οποία υπολογίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$Py_i = L_i \cdot (2 \cdot a_{a,i} \cdot a_{c,i} \cdot \theta_i - \frac{1}{1+m_r}) \quad (5.3.7)$$

$$t_i = 2 \cdot (1 + m_r) \cdot a_{a,i} \cdot a_{c,i} \cdot \theta_i \cdot T_{zmax} \quad (5.3.8)$$

Η τεχνολογία των υγρών υδρογονανθράκων (πετρέλαιο και παράγωγα), καθώς είναι η ακριβότερη όσον αφορά τα μεταβλητά κόστη, παρουσιάζει αρκετά τριγωνικά προφίλ. Σε καμία περίπτωση το Py_i δεν μπορεί να είναι αρνητικό, προκύπτει υπολογιστικά στις περιπτώσεις όπου ο χρόνος λειτουργίας είναι μικρότερος του T_{zmax} , και είναι τότε που χρησιμοποιείται η σχέση για τριγωνικό προφίλ. Ο εντοπισμός του είδους του προφίλ και η επιλογή της σχέσης που θα χρησιμοποιηθεί γίνεται εντός του μοντέλου.

5.4 Ενδογενής Υπολογισμός SMP

Η καμπύλη προσφοράς περιλαμβάνει τα οριακά κόστη του συστήματος που αντιστοιχούν στις προσφορές των διαφόρων τεχνολογιών που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια. Αυτή είναι συναρτήσεως της διαθέσιμης δυναμικότητας και προσεγγίζεται μέσω διαδοχικών γραμμικών τμημάτων.

Με την αποδοχή μιας προσφοράς η τελική τιμή ρυθμίζεται περαιτέρω βάσει των καμπύλων προσφοράς και ζήτησης. Σε ένα σύστημα με ομοιόμορφη τιμολογιακή πολιτική, η τιμή είναι τουλάχιστον ίση με την τιμή αγοράς ισχύος από την πιο ακριβή τεχνολογία που συμβάλλει στο σύστημα, ώστε το κόστος παραγωγής των παραγωγών αυτής να καλύπτεται. Για τους παραγωγούς των άλλων τεχνολογιών που προσφέρουν στο σύστημα, η τιμή αυτή θα καθορίζει και το κέρδος τους το οποίο πηγάζει από την διαφορά στο κόστος παραγωγής από τεχνολογία σε τεχνολογία.

Σε διάφορες χρονικές περιόδους εντός ενός έτους, η συμβαλλόμενη τεχνολογία με την ακριβότερη τιμή παραγωγής, άρα και αγοράς, μπορεί να αλλάξει, από πετρέλαιο σε φυσικό αέριο που είναι και η συνηθέστερη, με αποτέλεσμα αλλαγής και της τιμής αγοράς πάλι στην ακριβότερα αγορασμένη. Η παραγωγή ενέργειας αλλά και η τιμή SMP σε κάθε διάστημα υπολογίζεται από τις σχέσεις:

$$E1_z = \int_{t=0}^{t=t_{OIL}} d(t)dt \cong \frac{t_{OIL}}{2} \cdot \left(\sum_{i=1}^{I-RE} \frac{L_i}{(1+m_r)} + d_{OIL} - PP_{RES} \right) \quad (5.4.1)$$

$$SMP1_z = Cf_{OIL,z} + \frac{f_{CO_2OIL}}{n_{OIL}} p_{CO_2z} + \frac{Cv_{OIL,z}}{a_{a,OIL} \cdot a_{c,OIL} \cdot \theta_{OIL,z} \cdot T_{zmax}} \quad (5.4.2)$$

Για το χρονικό ορίζοντα στον οποίο δεν συμβάλουν στην παραγωγή οι σταθμοί πετρελαίου:

$$E2_z = \int_{t=t_{OIL}}^{t=T_{zmax}} d(t)dt \cong \frac{T_{zmax} - t_{OIL}}{2} \cdot \left(\sum_{i=1}^{I-RE-1} P_{yi} + d_{OIL} - PP_{RES} \right) \quad (5.4.3)$$

$$SMP2_z = Cf_{NG,z} + \frac{f_{CO_2NG}}{n_{NG}} p_{CO_2z} + \frac{Cv_{NG,z}}{a_{a,NG} \cdot a_{c,NG} \cdot \theta_{NG,z} \cdot T_{zmax}} \quad (5.4.4)$$

Η ποσότητα παραγωγής ενέργειας μιας συμβαλλόμενης τεχνολογίας είναι το εμβαδόν μεταξύ δυο εν σειρά γραμμών ισχύος στην κατάταξη βάσει κόστους παραγωγής των τεχνολογιών. Σε κάθε μονάδα χρόνου η παραγωγή αυτή ορίζεται από ένα ευθύγραμμο τμήμα που ακολουθεί μια γραμμική μείωση από $\sum_{i=1}^{I-RE-1} \frac{L_i}{(1+m_r)}$ σε $\sum_{i=1}^{I-RE-1} P_{yi}$. Στην περίπτωση της παραγωγής με χρήση πετρελαίου, που παρουσιάζει και την προαναφερθούσα ιδιαιτερότητα, η σχέση για την παραγόμενη ενέργεια διαμορφώνεται ως εξής:

$$d_{OIL} = \sum_{i=1}^{I-RE-1} \frac{L_i}{(1+m_r)} - \frac{t_{OIL}}{T_{zmax}} \left(\sum_{i=1}^{I-RE-1} \frac{L_i}{(1+m_r)} - \sum_{i=1}^{I-RE-1} P_{yi} \right) + PP_{RES} \quad (5.4.5)$$

Η SMP σε κάθε μονάδα του χρόνου θεωρείται ως μερικώς ευθύγραμμο τμήμα καθώς η συσχέτιση ισχύος-χρόνου και SMP-ισχύος μοντελοποιήθηκαν γραμμικά. Τελικά η ετήσια μέση τιμή της SMP προκύπτει:

$$SMP_z = \frac{\int_{t=0}^{t=t_{OIL}} SMP(t)dt + \int_{t=t_{OIL}}^{t=T_z max} SMP(t)dt}{T_z max} \quad (5.4.6)$$

5.5 Αντικειμενική συνάρτηση και περιορισμοί

5.5.1 Αντικειμενική συνάρτηση

Στο παρόν μοντέλο GEP στόχος είναι η μεγιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης που αναπαριστά την καθαρή παρούσα αξία του επενδυτικού πλάνου, NPV. Το πλάνο με τη μέγιστη τιμή του NPV ερμηνεύεται ως η πιο συμφέρουσα επένδυση.

Η αντικειμενική συνάρτηση προκύπτει ως:

$$NPV(X_{l=1,v}, \dots, X_{l=I,v}, \dots, \theta_{l=1,v}, \dots, \theta_{l=I,v}) = \quad (5.5.1.1)$$

$$\begin{aligned} \max & \left(\sum_{z=1}^Y [\overline{SMP}_{Z_{1-0}} \cdot E1_z + \overline{SMP}_{Z_{2-1}} \cdot E2_z] \cdot D_z + \sum_{i=1}^{RE} \sum_{z=1}^Y pre_z \cdot P_{i,z} \cdot D_z \right. \\ & + \sum_{z=1}^Y \overline{SMP}_z \cdot \left(d_{z,f} - \sum_{i=1}^{RE} P_{i,z} - E1_z - E2_z \right) \cdot D_z - \sum_{v=0}^Y \sum_{i=1}^I I_{i,v} \cdot X_{i,v} \\ & - \sum_{i=1}^{I-RE} \sum_{z=1}^Y P_{i,z} \frac{f_{CO_2i}}{n_i} p_{CO_2z} \cdot D_z + \sum_{i=1}^{RE} \sum_{z=1}^Y P_{i,z} \frac{\sum_{i=1}^{I-RE} E_{CO_2i}}{\sum_{i=1}^{I-RE} P_{i,z}} p_{CO_2z} \cdot D_z \\ & \left. - \sum_{i=1}^I \sum_{z=1}^Y Cf_{i,z} \cdot P_{i,z} \cdot D_z - \sum_{i=1}^I \sum_{z=1}^Y Cv_{i,z} \cdot L_{i,z} \cdot D_z \right) \end{aligned}$$

Όπου $\overline{SMP}_{Z_{1-0}} = \frac{SMP_{0z} + SMP_{1z}}{2}$ και $\overline{SMP}_{Z_{2-1}} = \frac{SMP_{1z} + SMP_{2z}}{2}$, ενώ η τιμή SMP_{0z} δηλώνει την υψηλότερη τιμή των καυσίμων πετρελαίου.

Ο πρώτος όρος της εξίσωσης υπολογίζει τα έσοδα από την πώληση του ηλεκτρικού ρεύματος στην περίοδο όπου δεν συμβάλουν οι μονάδες του υγρού υδρογονάνθρακα

(πετρέλαιο και παράγωγα) και προστίθεται το διάστημα που συμβάλουν. Ο δεύτερος όρος είναι τα έσοδα από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας στην προκαθορισμένη τιμή των ΑΠΕ. Ο τρίτος όρος προκύπτει αφού η προσέγγιση της ετήσιας ζήτησης μέσω των σχέσεων (5.4.2) (5.4.4) μπορεί να μην συμπίπτει ακριβώς με την προβλεπόμενη ζήτηση σε κάποια επανάληψη οπότε τα έσοδα αυτά υπολογίζονται βάσει μιας μέσης τιμής της SMP κάθε έτους.

Ακολούθως αφαιρούνται τα κόστη επενδύσεων κάθε παραγγελίας αλλά και τα κόστη αγοράς μονάδων CO_2 για την παραγωγή με συμβατικά μέσα. Ο επόμενος όρος αφορά τα έσοδα από τη συναλλαγή των μονάδων CO_2 , που προκύπτουν από την παραγωγή ενέργειας μέσω ΑΠΕ, που σε αντίθετη περίπτωση θα δεσμεύονταν για την παραγωγή ενέργειας με συμβατικά μέσα. Τέλος οι δυο τελευταίοι όροι αφαιρούν τα κόστη καυσίμων και τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης των εγκατεστημένων μονάδων αντίστοιχα.

Παρατηρώντας την αντικειμενική συνάρτηση αντιλαμβάνεται κανείς ότι πρόκειται για μη γραμμικό πρόβλημα υπό περιορισμούς. Η μη γραμμικότητα της συνάρτησης έγκειται στον 4^ο και 6^ο όρο της.

5.5.2 Μεταβλητές σχεδιασμού

Οι μεταβλητές σχεδιασμού του προβλήματος είναι οι παραγγελίες εγκατάστασης ισχύος $X_{i,v}$ που γίνονται από το διαχειριστή του συστήματος σε κάθε έτος z καθώς και οι συντελεστές απασχόλησης $\theta_{i,z}$ των εγκαταστάσεων των συμβατικών τεχνολογιών σε κάθε έτος z . Η δυναμικότητα των εγκαταστάσεων είναι συνδεδεμένη με τη συνολική εγκατεστημένη παραγωγική ικανότητα της τεχνολογίας μέσω της σχέσης:

$$L_{i,z} = \sum_{v=1}^{z-TI_i} X_{i,v} + \sum_{v=-40}^0 C_{i,v} - \sum_{v=1}^z \overline{X}_{i,v} - \sum_{v=-40}^0 \overline{C}_{i,v}, \quad (5.5.2.1)$$

$$\forall i \ 0 \leq z \leq Y$$

Με:

$$\overline{X}_{i,v} = 0, \overline{C}_{i,v} = 0 \quad v + TI_i \leq z \leq v + TI_i + To_i$$

$$\overline{X_{i,v}} = X_{i,v}, \overline{C_{i,v}} = C_{i,v} \quad v + Tl_i + To_i \leq z$$

Όπου οι δυο τελευταίοι όροι δηλώνουν την παραγωγική ικανότητα εκτός του χρόνου ζωής της εγκατάστασης. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι καμία μονάδα δεν μπορεί να συμβάλει στην παραγωγή όταν έχει ξεπεράσει το χρόνο ζωής της.

5.5.3 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί του προβλήματος διαμορφώθηκαν σε περιορισμούς ανισότητας και μετά την προσθήκη των νέων προκύπτουν:

Περιορισμοί Διαθεσιμότητας Πόρων:

Οι πόροι της Ελλάδας όσο αφορά κάθε τεχνολογία περιορίζονται βάσει των στατιστικών δεδομένων του ΕΕΣ:

$$L_{iz} \leq En_i \quad \forall i, z \quad (5.5.3.1)$$

Ικανοποίηση Ζήτησης

Η απαιτούμενη ζήτηση ενέργειας, που έχει προβλεφθεί για τον χρονικό ορίζοντα που επιλύεται το GEP, πρέπει να ικανοποιείται. Ο αλγόριθμος σε κάποιες περιπτώσεις τείνει να παράγει περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια από την αντίστοιχη ζήτηση ενός έτους επειδή εντοπίζει ότι μπορεί να αποκομίσει έσοδα με την επιπλέον παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τις φθηνότερες συμβατικές τεχνολογίες εφόσον η SMP αμείβει αυτές βάσει της ακριβότερα αγορασμένης. Η εκτεταμένη παραγωγή δε θα μπορεί στην πραγματικότητα να αξιοποιηθεί από το σύστημα οπότε απαραίτητος είναι και ο ορισμός άνω ορίου που παίρνει τη μορφή μιας μικρής χάρης e . Οι σχέσεις για τους πιο πάνω περιορισμούς προκύπτουν:

$$(1 + e) \cdot d_{z,f} \geq \sum_{i=1}^I P_{i,z} \geq d_{z,f} \Rightarrow \quad (5.5.3.2)$$

$$(1 + e) \cdot d_{z,f} \geq \sum_{i=1}^I \left(\sum_{v=1}^{z-Tl_i} X_{i,v} + \sum_{v=-40}^0 C_{i,v} - \sum_{v=1}^z \overline{X_{i,v}} - \sum_{v=-40}^0 \overline{C_{i,v}} \right) \times \theta_{i,z} a_{a,i} a_{c,i}$$

$$\cdot 8760 \geq d_{z,f}, \quad \forall z, e \ll 1$$

Επίσης το εγκατεστημένο δυναμικό θα πρέπει να μπορεί να ανταπεξέλθει σε απώλειες στην μεταφορά μέσα στο σύστημα, σε αστοχίες μονάδων αλλά και να μπορεί να ικανοποιεί τις περιόδους αιχμής της ζήτησης (Peak Power Demand).

$$\sum_{i=1}^I a_{a,i} \cdot \sum_{i=1}^I (\sum_{v=1}^{z-TI_i} X_{i,v} + \sum_{v=-40}^0 C_{i,v} - \sum_{v=1}^z \overline{X_{i,v}} - \sum_{v=-40}^0 \overline{C_{i,v}}) \geq P_{C_z} \cdot (1 + m_r) \quad (5.5.3.3)$$

Η μοντελοποίηση για τις ώρες αιχμής των συγκεκριμένων συντελεστών $a_{a,i} \cdot a_{a,i} = 1$ όπου i οι διαθέσιμες τεχνολογίες εκτός των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν ως μέσα παραγωγής ενέργειας την αιολική, ηλιακή και υδροηλεκτρική ενέργεια, στις οποίες ισχύει $a_{a,i} \leq 1$, οδηγεί στην εγκατάσταση περισσότερων μονάδων της δεύτερης κατηγορίας για την ικανοποίηση των απαιτήσεων. Ταυτόχρονα δημιουργεί μια πιο ρεαλιστική παραδοχή καθώς οι δεύτερες είναι πιο επιρρεπείς στις καιρικές συνθήκες.

Η μακροπρόθεσμη διεύθυνση των ΑΠΕ.

Στους περιορισμούς αυτούς λαμβάνεται υπόψιν το NREAP και ουσιαστικά θέτονται οι στόχοι που έχουν τεθεί σαν περιορισμοί προς ικανοποίηση. Όπως έχει αναφερθεί απαιτείται η ηλεκτροπαραγωγή των ΑΠΕ να ανέρχεται στο 40% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής του έτους 2020. Αντίστοιχα για το έτος 2050 το ποσοστό αυτό πρέπει να κυμαίνεται στο εύρος 85%-100%.

$$\sum_{i=1}^{RE} P_{i,z} \geq 0.40 \cdot \sum_{i=1}^I P_{i,z} \quad \forall z \geq 2020 \quad (5.5.3.4)$$

$$\sum_{i=1}^{RE} P_{i,z} \geq 0.85 \cdot \sum_{i=1}^I P_{i,z} \quad \forall z \geq 2050 \quad (5.5.3.5)$$

Περιορισμοί για επίτευξη στόχων σχεδίων NREAP και ΕΕΣ.

Το μοντέλο λαμβάνει υπόψιν τους στόχους κατανομής της ηλεκτροπαραγωγής σε κάθε τεχνολογία. Όπως προαναφέρθηκε τα αποτελέσματα των σχεδίων λήφθηκαν υπόψιν στο συγκεκριμένο GEP εντάσσοντας και τις παραμέτρους M_{20} και M_{50} . Καθώς πρόκειται για μακροχρόνιο προγραμματισμό, στον οποίο εντάσσεται και η αβεβαιότητα, και τα σχέδια NREAP και ΕΕΣ είναι δυναμικά και ανανεώνονται βάσει των εξελίξεων του σχεδίου, θα ήταν άσκοπο οι απαιτήσεις αυτές να οριστούν σαν περιορισμοί ισότητας. Οι παράμετροι M_{20} και M_{50} , είναι ποσοστά απόκλισης τα οποία

καθορίζουν το άνω και κάτω όριο μέσα στα οποία θεωρείται ότι ο εκάστοτε στόχος έχει επιτευχθεί. Για παράδειγμα στην περίπτωση των στόχων για το 2020 θα παρατηρηθεί ότι η επίτευξη ορισμένων είναι αδύνατη καθώς κάποιες μονάδες λόγω χρόνου κατασκευής δεν προφταίνουν να εγκατασταθούν. Αυτό οδηγεί στον ορισμό των δύο παραμέτρων M_{20} και M_{50} . Εδώ αξίζει να αναφερθεί ότι η σύνταξη του NREAP έγινε στην αρχή της ελληνικής οικονομικής κρίσης. Η μη υλοποίηση αναμενόμενων επενδύσεων έχει ως αποτέλεσμα κάποιοι από τους στόχους να μην είναι απόλυτα επιτεύξιμοι. Για αυτό εξάλλου θεωρήθηκε σκόπιμη και η μετατροπή του στόχου παραγωγικής ικανότητας για το 2020 σε ποσοστό συμβολής στην ηλεκτροπαραγωγή. Αυτό αφενός εξασφαλίζει την δυνατότητα εύρεσης λύσης και αφετέρου αποτελεί παραλλαγή η οποία συνάδει εν μέρει με το στόχο που τέθηκε. Αντίθετα για το έτος 2050 δεν υπάρχει αυτή η ανάγκη καθώς το χρονικό περιθώριο επιτρέπει την υλοποίηση τους.

Περιορισμοί για επίτευξη των στόχων ποσοστού συμβολής στην ηλεκτροπαραγωγή για το 2020.

$$P_{i,z} \geq (1 - M_{20}) \cdot G_{20} \cdot \sum_{i=1}^I P_{i,z} \quad \forall z = 2020, i = 1, \dots, RE \quad (5.5.3.6)$$

Δεν τίθενται άνω όρια στην διείσδυση των ΑΠΕ μέχρι το έτος 2020 καθώς ορισμένα έχουν ήδη αισίως ξεπεραστεί.

Περιορισμοί για επίτευξη των στόχων εγκατεστημένης παραγωγικής ικανότητας για το 2050.

$$(1 + M_{50}) \cdot G_{50} \geq L_{i,z} \geq (1 - M_{50}) \cdot G_{50} \quad \forall z = 2050, i = 1, \dots, I \quad (5.5.3.7)$$

Περιορισμοί μεταβλητών σχεδιασμού

Οι μεταβλητές σχεδιασμού που αφορούν τις παραγγελίες εγκατάστασης από τον διαχειριστή του συστήματος πρέπει να είναι θετικοί αριθμοί. Σαν κάτω όριο θέτεται η ελάχιστη παραγγελία εγκατάστασης που μπορεί να αντιπροσωπεύει την εκάστοτε τεχνολογία έτσι ώστε να επιτυγχάνεται οικονομία κλίμακας. Παρ' ολ' αυτά περιορίζονται και από ένα άνω όριο που αντιπροσωπεύει την μέγιστη ρεαλιστική επένδυση που θα μπορούσε να γίνει από επενδυτές σε ένα έτος. Οι συντελεστές απασχόλησης που αφορούν την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με συμβατικά μέσα

περιορίζονται σε ένα εύρος ποσοστών καθώς εκτεταμένη χρήση τους θα ανέβαζε την SMP σε επίπεδα μη κοινωνικά αποδεκτά, αλλά και μη χρήση ενός κάτω ορίου θα οδηγούσε το σύστημα στο να αναζητεί λύσεις μη ρεαλιστικές. Ανεξάρτητα, η επίλυση αυτού του μοντέλου με ΕΑ θα απαιτούσε άνω και κάτω όριο στις μεταβλητές σχεδιασμού.

$$0 \leq X_{i,v} \leq \overline{X_{i,v}} \quad (5.5.3.8)$$

$$\underline{\theta_{i,z}} \leq \theta_{i,z} \leq \overline{\theta_{i,z}} \quad (5.5.3.9)$$

Το άνω όριο των $\theta_{i,z}$ ισοδύναμα μπορεί να τεθεί ως:

$$t_{z \text{ marginal}} < t_{z \text{ peak}} \quad \forall z \quad (5.5.3.10)$$

Περιορισμοί ελαχίστου φορτίου για κερδοφόρα επένδυση.

Κάθε μονάδα που επιλέγεται να παραχθεί, εφόσον θεωρείται ότι πρόκειται για επενδυτή, θα πρέπει να είναι λειτουργική για ένα χρονικό περιθώριο έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η βιωσιμότητα της επένδυσης του. Αυτό συνεπάγει ότι τα έσοδα της επένδυσης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερα ή ίσα με το μηδέν. Είναι προφανές η άμεση συσχέτιση μεταξύ του κάτω ορίου του $\theta_{i,z}$, του κόστους αρχικής επένδυσης, των τιμών καυσίμου και των συντελεστών κάθε τεχνολογίας στον ορισμό της επένδυσης αυτής, καθώς και στην διαμόρφωση της SMP. Η τελική σχέση που προκύπτει:

$$profits_{i,z} = -I_{Dz,i} + \left[\theta_{i,z} a_{a,i} a_{c,i} 8760 \left(t_{OIL} \cdot \overline{SMPz_{1-0}} + (1 - \delta_{ij}) \cdot (T_{zmax} - t_{zmax}) \cdot \overline{SMPz_{2-1}} - Cf_{i,z} - \frac{f_{CO_2i}}{n_i} p_{CO_2z} \right) - Cv_{i,z} \right] \geq 0 \quad (5.5.3.11)$$

Όπου ο όρος $(1 - \delta_{ij})$ δεν είναι μηδενικός για των υπολογισμό των ΑΠΕ, εφόσον η δ_{ij} είναι το δέλτα του Kronecker με $j = j_{OIL}$. Στην περίπτωση όπου ερευνούνται τα ελάχιστα έσοδα για τις συμβατικές μονάδες παραγωγής εμφανίζεται μόνο ο όρος $t_{OIL} \cdot \overline{SMPz_{1-0}}$. και $\theta_{i,minz}$ εμπλέκεται ως άγνωστος στο t_{OIL} και χρησιμοποιείται η σχέση $\theta_{i,minz} = \theta_{i=marginal,minz}$ με $i = i_{marginal}$ των μονάδων παραγωγής ηλεκτρική ενέργειας με πετρελαίο.

5.5.4 Διαδικασίες υπολογισμών

Διαδικασία υπολογισμού του σταθερού κόστους και του κόστους αρχικής επένδυσης κάθε τεχνολογίας για κάθε έτος.

Στην διαδικασία αυτή γίνεται χρήση των τιμών του πληθωρισμού που έχουν παραχθεί από την στοχαστική διαδικασία GBM για να αναχθούν οι τιμές του σταθερού κόστους και του κόστους αρχικής επένδυσης κάθε τεχνολογίας (i) από το έτος μηδέν σε κάθε έτος (z).

$$Cv_{i,z} = \left[\prod_{t=1}^z (1 + r_{n,t}) \right] \cdot Cv_{i,0} \quad \forall i \quad (5.5.4.1)$$

$$I_{iv} = I_{iv} \cdot \left[\frac{\sum_{k=1}^v X_{i,k} + \sum_{v=-40}^0 C_{i,v}}{\sum_{v=-40}^0 C_{i,v}} \right]^{\log_2[1-b(i)]} \quad \forall i \quad (5.5.4.2)$$

Στην περίπτωση του κόστους αρχικής επένδυσης λαμβάνεται υπόψιν και ο συντελεστής τεχνολογικής βελτίωσης $b(i)$ καθώς θεωρείται ότι μέσα από τα χρόνια αποκτάτε γνώση στην αγορά ως προς την εγκατάσταση μονάδων. Επίσης η συνάρτηση αυτή είναι μη γραμμική και έχει υπολογιστικό κόστος αλλά αναπαριστά με ικανοποιητική ακρίβεια την εξέλιξη του κόστους επένδυσης.

Διαδικασία υπολογισμού του κόστους και των εσόδων από την συναλλαγή μονάδων CO_2 .

Στην αντικειμενική συνάρτηση οι όροι $-\sum_{i=1}^{I-RE} \sum_{z=1}^Y P_{i,z} \frac{f_{CO_2i}}{n_i} p_{CO_2z} \cdot D_z$ και $+\sum_{i=1}^{RE} \sum_{z=1}^Y P_{i,z} \frac{\sum_{i=1}^{I-RE} E_{CO_2i}}{\sum_{i=1}^{I-RE} P_{i,z}} p_{CO_2z} \cdot D_z$ αφορούν τα κόστη αγοράς μονάδων CO_2 για την παραγωγή με συμβατικά μέσα και τα έσοδα από την χρήση ΑΠΕ, που σε αντίθετη περίπτωση η αντίστοιχη παραγωγή ενέργειας θα απαιτούσε αγορά των ανάλογων μονάδων CO_2 . Από αυτήν την παραδοχή ο 2^{ος} όρος μπορεί να θεωρηθεί ως έσοδα του συστήματος.

Συντελεστές παραγωγής

Η παραγωγή ενέργειας με συμβατικά μέσα έχει την δυνατότητα ρύθμισης, με άλλα λόγια οι σταθμοί δεν απαιτείται να δουλεύουν στο μέγιστο φορτίο της δυναμικότητας

τους. Οι συντελεστές $a_{a,i}, a_{c,i}$ προσομοιάζουν την δυνατότητα αυτή. Όμως κατά τον ορισμό της μέσης τιμής των συντελεστών διαθεσιμότητας ως προς τον χρόνο και το φορτίο τους, υπάρχει ο κίνδυνος να καταστούν ίσα τα κόστη λειτουργίας σε \min ή \max της παραγωγικής τους δυνατότητας. Η μεταβλητή σχεδιασμού $\theta_{i,z}$, η οποία βελτιστοποιείται, εξασφαλίζει να είναι το φορτίο παραγωγής δυναμικό και συμβάλει στην δημιουργία της προτεραιότητας της παραγωγής.

Σε αντίθεση για τις ΑΠΕ η εκμετάλλευση του φορτίου, δηλαδή ο συντελεστής απασχόλησης, θεωρείται πάντα ίσος με ένα, που σημαίνει ότι οι μονάδες αυτές παράγουν το μέγιστο της εγκατεστημένης δυναμικότητας τους, λαμβάνοντας υπόψιν την διαθεσιμότητα της φυσικής πηγής τους και του φορτίου τους, και αυτό απορροφάτε με προτεραιότητα από το δίκτυο.

5.6 Μαθηματικά εργαλεία για τις προβλέψεις

5.6.1 Γραμμική Παρεμβολή

Η γραμμική παρεμβολή είναι η πιο απλή περίπτωση παρεμβολής μεταξύ δυο ή περισσότερων σημείων. Η συνάρτηση της είναι γραμμική, δηλαδή ένα πολυώνυμο 1^{ου} βαθμού και αρκούν δυο σημεία για τον υπολογισμό των παραμέτρων της συνάρτησης:

$$f(x) = a \cdot x + b \quad (5.6.1.1)$$

Με τελική συνάρτηση γραμμικής παρεμβολής

$$f(x) = \frac{f(x_1) - f(x_0)}{x_1 - x_0} x + f(x_0) \quad (5.6.1.2)$$

Με τα δεδομένα μιας χρονοσειράς και την χρήση της μεθόδου ελαχίστων τετραγώνων μπορεί να ληφθεί το αντίστοιχο πολυώνυμο.

5.6.2 Γεωμετρική κίνηση Brown

Η γεωμετρική κίνηση Brown (Geometric Brownian Motion) βρίσκει μεγάλη εφαρμογή στη δημιουργία στατιστικών μοντέλων για τη χρηματοοικονομική αγορά. Χρησιμοποιείται κυρίως για την πρόβλεψη της πορείας τιμών λαμβάνοντας υπόψιν στατιστικά δεδομένα και εισάγοντας στοχαστικότητα.

Μια διαδικασία ακολουθεί GBM όταν ικανοποιεί την παρακάτω στοχαστική διαφορική εξίσωση:

$$dA_t = \mu(t) \cdot A_t dt + D(t, A_t) \cdot V(t) dW_t \quad (5.6.2.1)$$

Όπου W_t είναι η μεταβλητή Wiener $N(0,1)$, $\mu(t)$ είναι η ποσοστιαία μετατόπιση (percentage drift) της μέσης τιμής της στοχαστικής διαδικασίας Wiener, D το διάνυσμα διάχυσης της στοχαστικής διαδικασίας Wiener και V η ποσοστιαία μεταβλητότητα (percentage volatility) της στοχαστικής διαδικασίας Wiener. Οπότε, ο πρώτος όρος της σχέσης ελέγχει την τάση της πορείας ενώ ο δεύτερος τον τυχαίο θόρυβο (random noise) της πορείας.

Όταν μια πρόβλεψη υλοποιείται σε περισσότερες μεταβλητές, υπάρχει η δυνατότητα συσχέτισης (correlation). Ουσιαστικά οι μεταβλητές Wiener που υλοποιούνται από την κατανομή Gauss για κάθε μια από τις μεταβλητές δεν είναι ανεξάρτητες και η πρόβλεψη γίνεται παράλληλα ορίζοντας ένα βαθμό συσχέτισης.

Τέλος η αύξηση του χρόνου t οδηγεί σε αύξηση των διακυμάνσεων άρα όσο αφορά τις προβλέψεις γίνονται λιγότερο αξιόπιστες.

5.6.3 Υπολογισμός με χρήση της γεωμετρικής κίνησης Brown

Για τον υπολογισμό χρησιμοποιείται ο αναδρομικός τύπος

$$p_z = p_{z-1} \cdot (1 + \mu \cdot dt + \sigma \cdot W_t \cdot \sqrt{dt}) \quad (5.6.3.1)$$

Για τον υπολογισμό των μεταβλητών μ, σ απαιτούνται οι χρονοσειρές της τιμής p .

Αν p_1, p_2, \dots, p_{n+1} τιμές του p για το διάστημα $t = 0$ έως $t = n + 1$ τότε ορίζεται το μέγεθος $\Delta p = p_{n+1} - p_n$ το οποίο ακολουθεί κανονική κατανομή και τα μ, σ ορίζονται ως η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση του Δp αντίστοιχα.

Από την κανονική κατανομή ισχύει:

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{v=1}^n \Delta p_v \quad (5.6.3.2)$$

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{n}} \cdot \sum_{\omega=1}^n |\Delta p_{\omega} - \mu| \quad (5.6.3.3)$$

5.6.4 Cox-Ingersoll-Ross (CIR)

Το μοντέλο Cox-Ingersoll-Ross (CIR) είναι μια μαθηματική φόρμουλα που χρησιμοποιείται για να κάνει προβλέψεις για την κίνηση των επιτοκίων και του πληθωρισμού. Θεωρείται καλό μοντέλο για βραχυπρόθεσμες προβλέψεις καθώς εξασφαλίζει και τη δημιουργία μη αρνητικών τιμών. Η συνήθης διαφορική εξίσωση που χρησιμοποιείται:

$$dr_t = u(t) \cdot [L(t) - r_t]dt + D(t, r_t^{\frac{1}{2}}) \cdot V(t)dW_t \quad (5.6.4.1)$$

Η εισαγωγή της τιμής του r_t , και γενικότερα το CIR, εξασφαλίζει την εξέλιξη των επιτοκίων και του πληθωρισμού στο χρόνο χωρίς να εντάσσει αυθαίρετη αβεβαιότητα και κίνδυνο.

6 Υπολογιστικό μοντέλο

6.1 Εισαγωγή

Για τον υπολογισμό του στόχου της εργασίας χρειάστηκε ο συνδυασμός του μοντέλου που αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 5 και της μεθόδου βελτιστοποίησης στο κεφάλαιο 4. Για την διεκπεραίωση των απαραίτητων μαθηματικών υπολογισμών σχεδιάστηκε πρόγραμμα στα πλαίσια της υπολογιστικής πλατφόρμας Matlab. Η ομώνυμη γλώσσα προγραμματισμού που χρησιμοποιήθηκε δίνει την δυνατότητα στο χρήστη πρόσβασης σε μεγάλη βιβλιοθήκη εντολών. Αυτό επιταχύνει την δημιουργία προγραμμάτων σε σχέση με άλλες γλώσσες προγραμματισμού. Επίσης το αλληλεπιδραστικό της περιβάλλον δίνει τη δυνατότητα λεπτομερούς ανάλυσης των αποτελεσμάτων.

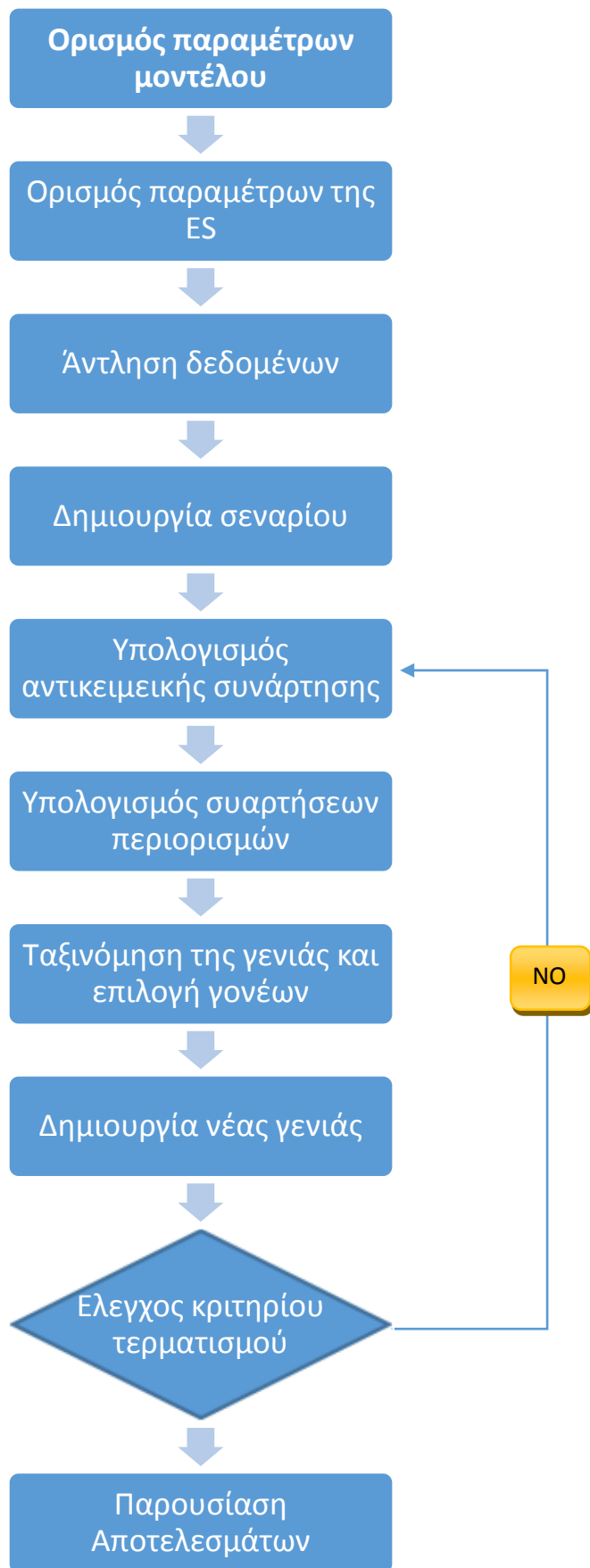
Το πρόγραμμα που δημιουργήθηκε αποτελείται από έναν αριθμό υποπρογραμμάτων-υπορουτίνες οι οποίες αντιπροσωπεύουν τις διάφορες εξισώσεις και τους απαραίτητους υπολογισμούς.

6.2 Δομή προγράμματος

Η διαδικασία που ακολουθείται φαίνεται στο Διάγραμμα.6-1 .

Η διαδικασία ξεκινά με την παραγωγή των δεδομένων. Υπολογίζονται τα μεγέθη που ακολουθούν την γεωμετρική κίνηση Brown όπως η τιμή των καυσίμων, που είναι η τιμή μεταβλητού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανά τεχνολογία, η τιμή της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας και η τιμή συναλλαγής μονάδων CO_2 .

Η μέθοδος βελτιστοποίησης παράγει υποψήφιες λύσεις τις οποίες εξετάζει το μοντέλο ως προς την καταλληλότητα τους προς την αντικειμενική συνάρτηση και τις συναρτήσεις περιορισμών. Η πληροφορία αυτή μεταβιβάζεται πίσω στον αλγόριθμο βελτιστοποίησης όπου γίνεται η διαδικασία παραγωγής νέων υποψήφιων λύσεων. Η επαναληπτική αυτή διαδικασία συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί το κριτήριο τερματισμού.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-1 ΔΟΜΗ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΟΣ

6.3 Περιγραφή των επιμέρους διαδικασιών εντός του προγράμματος

6.3.1 Ορισμός μεταβλητών μοντέλου

Γίνεται ο ορισμός του χρονικού ορίζοντα (46 χρόνια) που θα εξεταστεί και η επιτρεπτή απόκλιση από τους στόχους για τα έτη 2020 και 2050. ($M_{20} = \pm 40\%$, $M_{50} = \pm 20\%$). Με τα δεδομένα αυτά προκύπτουν 690 μεταβλητές σχεδιασμού και 731 εξισώσεις περιορισμών.

6.3.2 Ορισμός παραμέτρων της ES

Ο αλγόριθμος της ES, όπως προαναφέρθηκε, απαιτεί τον ορισμό κάποιων παραμέτρων από το χρήστη.

- Σαν κριτήριο τερματισμού επιλέχθηκε η διεξαγωγή 15000 επαναλήψεων.
- Η μεταβλητή φ^* ορίστηκε να έχει τιμή ίση με 1.
- Οι αριθμοί γονέων και απογόνων τέθηκαν ίσοι με $\mu = 80$ και $\lambda = 560$ τηρώντας έτσι την προτεινόμενη αναλογία $\mu/\lambda \approx 1/7$.
- Ορισμός της πιθανότητα P_f της SR ίσης με 0.45.
- Δημιουργία πίνακα με τα άνω και κάτω όρια των μεταβλητών σχεδιασμού.
- Αρχικοποίηση του πίνακα των μεταβλητών σχεδιασμού.
- Αρχικοποίηση του πίνακα τυπικών αποκλίσεων και ορισμός του ανωτάτου ορίου.
- Ορισμός της τιμής $\alpha = 0.2$ και της στοχαστικής παραμέτρου $\gamma = 0.85$
- Υπολογισμός των συντελεστών μετάλλαξης τ' και τ .
- Ορισμός του μεγίστου αριθμού αποτυχημένων δοκιμών επανάληψης της μετάλλαξης για να επιτευχθεί λύση εντός ορίων όπως προτείνεται, ίση με δέκα.

Με τον ορισμό των πιο πάνω δεν απαιτείται άλλη παρέμβαση από τον χρήστη στην ES ούτε και στην SR.

6.3.3 Άντληση δεδομένων

Τα τεχνολογικά και τα στατιστικά δεδομένα που έχουν παρθεί από τους αρμόδιους οργανισμούς και είναι απαραίτητα για τους υπολογισμούς των συναρτήσεων αλλά και

των μεγεθών που ακολουθούν την γεωμετρική κίνηση Brown αντλούνται από ένα αρχείο excel. Τα δεδομένα αυτά είναι:

- ο πίνακας με τα τεχνοοικονομικά δεδομένα κάθε τεχνολογίας (Πίνακας10-1)
- η ημερήσια ζήτηση σε ηλεκτρική ενέργεια από το διάστημα 2002-2014
- η ημερήσια ζήτηση σε ισχύ στις ώρες αιχμής 2002-2014
- οι ημερήσιες τιμές συναλλαγής μονάδων CO_2 τα έτη 2008-2014
- οι ημερήσιες τιμές των καυσίμων από το 2000-2014
- η μηνιαία τιμή του επιτοκίου και του πληθωρισμού στην Ελλάδα τα έτη 2002-2014
- η ετήσια εγκατάσταση ισχύος τα έτη 1965-2014
- η συνολική εγκατεστημένη ισχύς το έτος 2014

6.3.4 Υπολογισμός μελλοντικών τιμών.

Στην διαδικασία αυτή υπολογίζονται οι απαραίτητες μελλοντικές τιμές των μεγεθών με την αντίστοιχη μέθοδο προβλέψεων όπως αναφέρονται στην ενότητα 5.6.

6.3.5 Υπολογισμός της αντικειμενικής συνάρτησης

- Η πρώτη γενιά αποτελούμενη από λ άτομα λαμβάνεται από το μοντέλο. Κάθε ένα από τα άτομα ακολουθεί την παρακάτω πορεία.
- Αρχικά υπολογίζεται η παραγόμενη ποσότητα ενέργειας από κάθε τεχνολογία βάσει των ήδη εγκατεστημένων μονάδων και του χρόνου ζωής τους αλλά και των παραγγελιών παραγωγικής ικανότητας ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτουν από τις μεταβλητές σχεδιασμού.
- Στην συνέχεια υπολογίζονται τα έξοδα από την εκπομπή αέριων ρύπων CO_2 αλλά και η μείωση των εξόδων, που λαμβάνονται ως έσοδα, λόγω παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.
- Υπολογίζεται το μεταβλητό κόστος κάθε έτους και κάθε τεχνολογίας από το γινόμενο της πραγματικής παραγόμενης ηλεκτρικής και του κόστους των καυσίμων.
- Υπολογίζονται τα κόστη επένδυσης και τα κόστη συντήρησης. Το κόστος επένδυσης υπολογίζεται για κάθε έτος και για κάθε τεχνολογία λαμβάνοντας

υπόψιν την καμπύλη γνώσης, δηλαδή τον συντελεστή τεχνολογικής βελτίωσης κάθε τεχνολογίας από τον (Πίνακας10-1).

- Με την άθροιση του μεταβλητού κόστους, του κόστους επένδυσης, του κόστους συντήρησης και του κόστους λόγω εκπομπής αέριων ρύπων CO_2 , για τις συμβατικές τεχνολογίες, προκύπτει το συνολικό κόστος ανά τεχνολογία ανά έτος.
- Για τον υπολογισμό του μείγματος παραγωγής γίνεται η ταξινόμηση των τεχνολογιών βάσει του συνολικού κόστους ανάλογα με την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας κάθε τεχνολογίας. Ακολουθεί ο υπολογισμός του διαθέσιμου χρόνου λειτουργίας μέσω λογικών τελεστών για τις συμβατικές τεχνολογίες και ο υπολογισμός της δυναμικότητας της εγκατεστημένης ισχύς. Δημιουργούνται οι γραμμές ισχύος για κάθε τεχνολογία βάσει της ταξινόμησης που έγινε.
- Γίνεται ο ενδογενείς υπολογισμός της SMP για κάθε έτος. Η κατάταξη των συμβατικών τεχνολογιών καθώς και η ζήτηση σε ισχύ οδηγούν στην επιλογή των τεχνολογιών που θα λειτουργούν. Αυτό γίνεται μέσω των εμβαδών που προκύπτουν για την ικανοποίηση της ζήτησης ισχύος.
- Υπολογίζεται η τελική παραγωγή και τα έσοδα από την πώληση του παραγόμενου ηλεκτρισμού. Εδώ αφαιρούνται και τα έξοδα αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.
- Υπολογισμός των συνολικών εσόδων.

6.3.6 Υπολογισμός των συναρτήσεων περιορισμού.

Στην διαδικασία αυτή υπολογίζεται ο πίνακας των περιορισμών που περιέχει όλα τα αποτελέσματα των συναρτήσεων περιορισμών. Έχει γίνει μετατροπή των περιορισμών σε μικρότεροι ή ίσοι με το μηδέν. Υπολογίζονται οι συναρτήσεις και παραβιάσεις θεωρούνται μόνο οι θετικές τιμές. Το άθροισμα αυτών των παραβιάσεων δηλώνει την απόδοση του ατόμου ως προς τους περιορισμούς.

6.3.7 Ταξινόμηση της γενιάς μέσω της μεθόδου SR

Εδώ λαμβάνει χώρα η διαδικασία της στοχαστικής ταξινόμησης. Εντοπίζονται βάσει της διαδικασίας αυτής τα καταλληλότερα διανύσματα λύσεων και επιλέγονται ως γονείς της επόμενης γενιάς.

6.3.8 Δημιουργία της επόμενης γενιάς

Με γνωστή την καταλληλότητα των ατόμων, γίνονται οι διαδικασίες της διαφορικής μεταβολής και μετάλλαξης των μεταβλητών σχεδιασμού και της μετάλλαξης των στρατηγικών παραμέτρων. Τέλος γίνεται η διαδικασία της εκθετικής εξομάλυνσης από όπου προκύπτει κι η νέα γενιά.

6.3.9 Έλεγχος κριτηρίου τερματισμού

Κριτήριο τερματισμού επιλέχθηκε να είναι η διεξαγωγή ενός αριθμού επαναλήψεων.

6.3.10 Παρουσίαση Αποτελέσματος

Μετά το τέλος της επαναληπτικής διαδικασίας μια υπορουτίνα δημιουργεί τα διαγράμματα για την εποπτεία τόσο των αποτελεσμάτων όσο και της διαδικασίας της βελτιστοποίησης τα οποία θα παρουσιαστούν στην συνέχεια.

6.4 Δεδομένα υπολογιστικού μοντέλου

Το μοντέλο αφενός για να απεικονίσει την ελληνική ενεργειακή αγορά αφετέρου για να μπορούν να γίνουν οι υπολογισμοί απαιτούσε να παρθούν πραγματικά δεδομένα. Τα τεχνολογικά και οικονομικά αυτά δεδομένα λήφθηκαν από διάφορες πηγές.

Ο Πίνακας 10-1 δείχνει τα τεχνολογικά δεδομένα που αντιπροσωπεύουν την ελληνική ενεργειακή αγορά, όσον αφορά τις διαθέσιμες τεχνολογίες προς αξιοποίηση όπως αυτές αναφέρονται στα ΕΕΣ και ΝΡΕΑΡ. Ουσιαστικά φαίνονται τα κόστη αρχικής επένδυσης, τα σταθερά κόστη και οι διάφοροι συντελεστές κάθε μιας από τις επιλεγμένες και υλοποιήσιμες τεχνολογίες στην Ελλάδα. Κάθε ένα από τα πιο πάνω συμβάλλει στον καθορισμό του μείγματος παραγωγής καθώς αλλοιώνει τα κόστη αλλά και την τελική SMP.

Πιο κάτω παρουσιάζονται τα υπόλοιπα δεδομένα της Ελληνικής αγοράς που αποτελούσαν είσοδο του μοντέλου και οι αντίστοιχες πηγές από όπου πάρθηκαν.

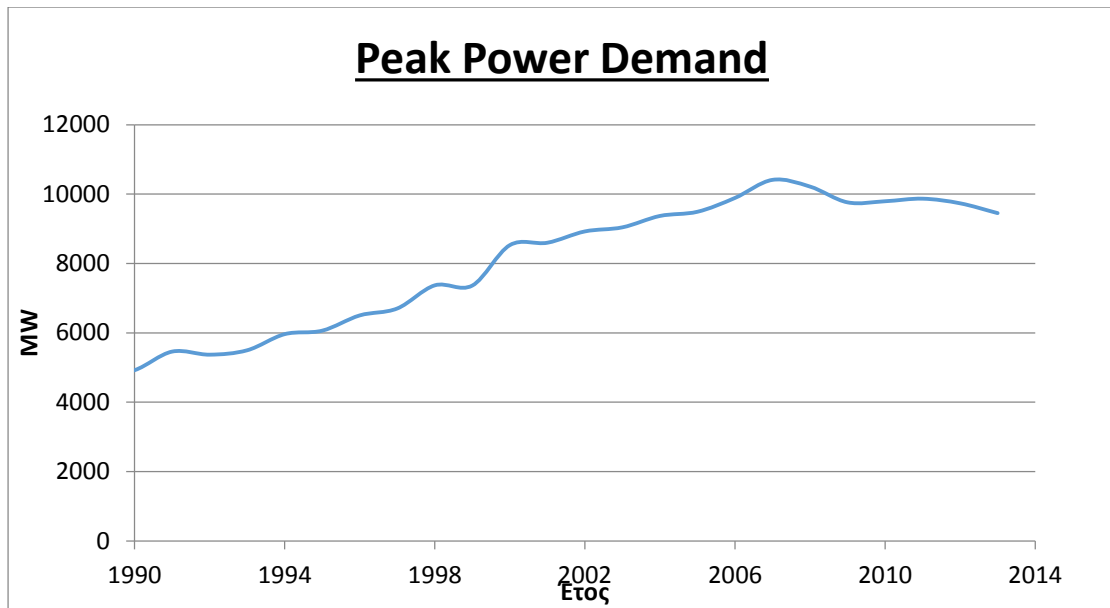
- Η ωριαία ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και η απαίτηση ισχύος στις ώρες αιχμής για τα έτη 2002-2014 που παραχωρήθηκαν από τον ΑΔΜΙΕ.

- Οι τιμές συναλλαγής εκπομπών CO_2 αντλήθηκαν από τα στοιχεία των EUA (European Unit Allowances) του EU ETS (European emissions trading system).
- Οι τιμές του επιτοκίου και του πληθωρισμού που λήφθηκαν από την Τράπεζα της Ελλάδος.
- Τα στοιχεία για την συναλλαγματική αξία δολαρίου ευρώ πάρθηκαν από την Ευρωπαϊκή Κεντρική Τράπεζα (ΕΚΤ)
- Πηγές για τις τιμές καυσίμων αποτέλεσαν η Ελληνική Στατιστική Αρχή (ΕΛΣΤΑΤ) και IEA (International Energy Agency).

Οι διακυμάνσεις των τιμών την περίοδο 2000-2014 αυτών φαίνονται στα πιο κάτω σχήματα.

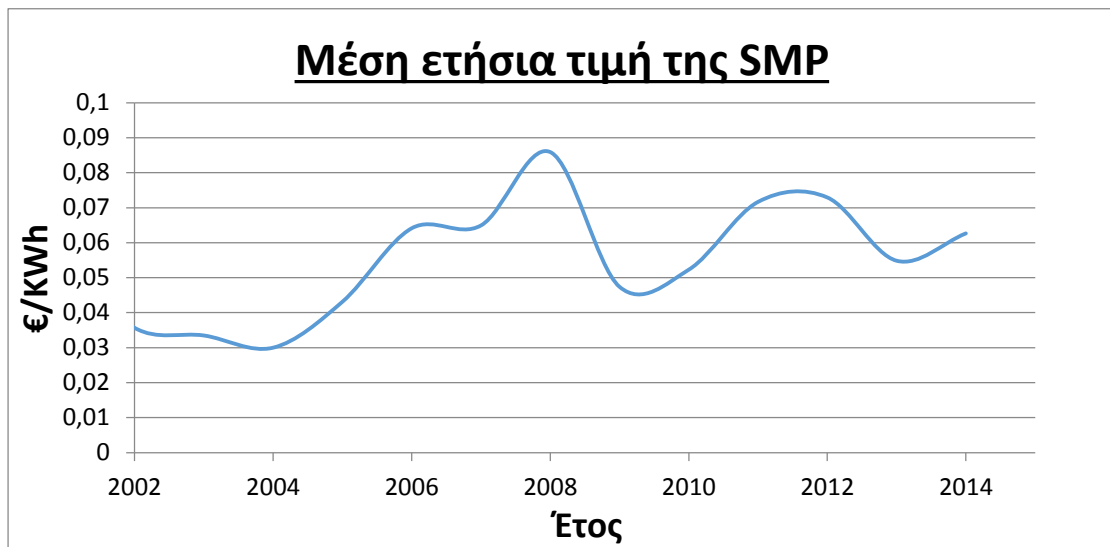


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-2 Η ΕΤΗΣΙΑ ΖΗΤΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

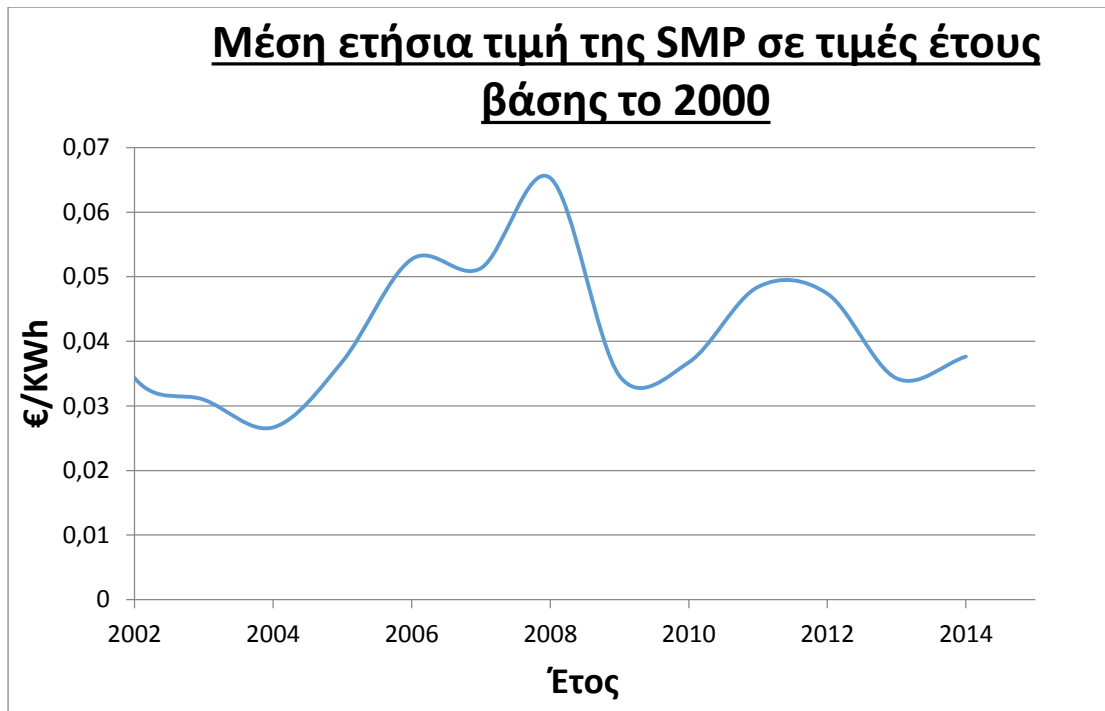


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-3 Η ΜΕΓΙΣΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΘΕ ΕΤΟΥΣ

Όπως προαναφέρθηκε, η αύξηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας που σημειώθηκε από τα τέλη της δεκαετίας του 70' σταμάτησε από τα πρώτα χρόνια της οικονομικής κρίσης. Η αύξηση της τιμής της SMP αλλά και της μείωσης της αγοραστικής ισχύος των καταναλωτών συνέβαλαν στην πτώση αυτή. Αντίστοιχη πορεία ακολουθεί και η μέγιστη ζήτηση ισχύος.

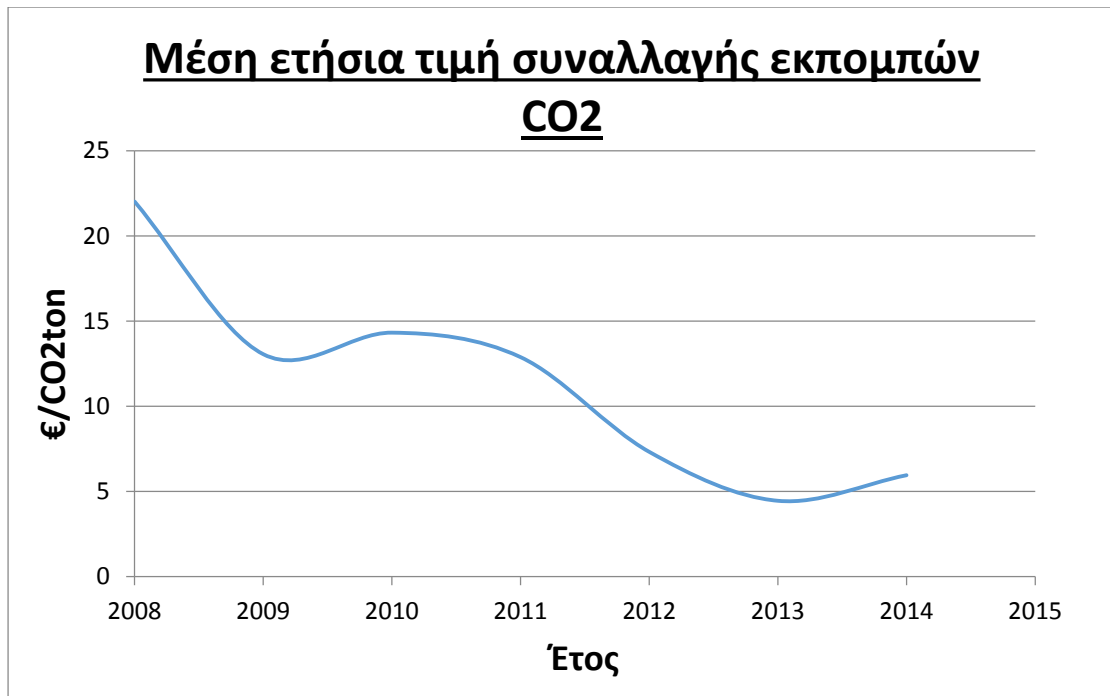


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-4 Η ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΤΙΜΗ ΤΗΣ SMP



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-5 Η ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΤΙΜΗ ΤΗΣ SMP ΣΕ ΤΙΜΕΣ ΕΤΟΥΣ ΒΑΣΗΣ 2000

Οι επιπτώσεις από τις διακυμάνσεις της τιμής της SMP μπορούν να παρατηρηθούν και στο διάγραμμα της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας που προκύπτουν από την ελαστικότητα της ηλεκτρικής ζήτησης. Παρ' ολ' αυτά στα έτη 2008-2009 παρατηρείται μεγάλη πτώση στην τιμή της SMP αλλά και στην ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας που αποδεικνύει την επίδραση που είχαν εξωτερικοί παράγοντες σε αυτή, και κυρίως η οικονομική ύφεση.

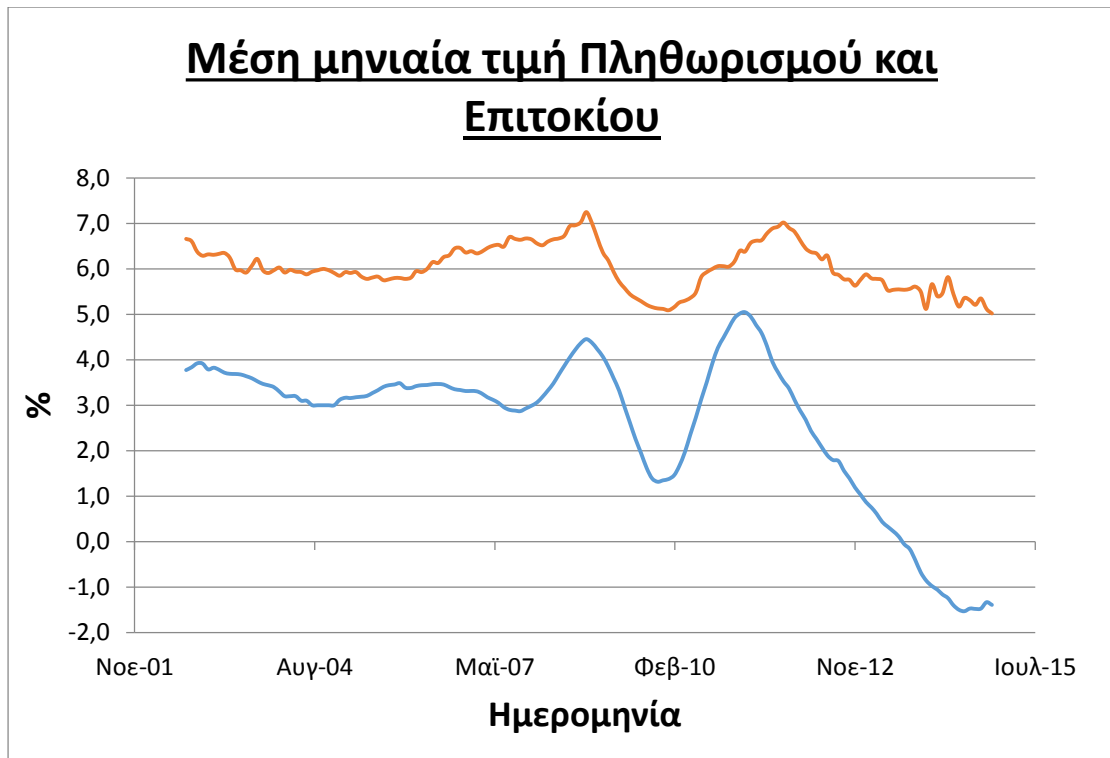


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-6 Η ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΤΙΜΗ ΣΥΝΑΛΛΑΓΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂



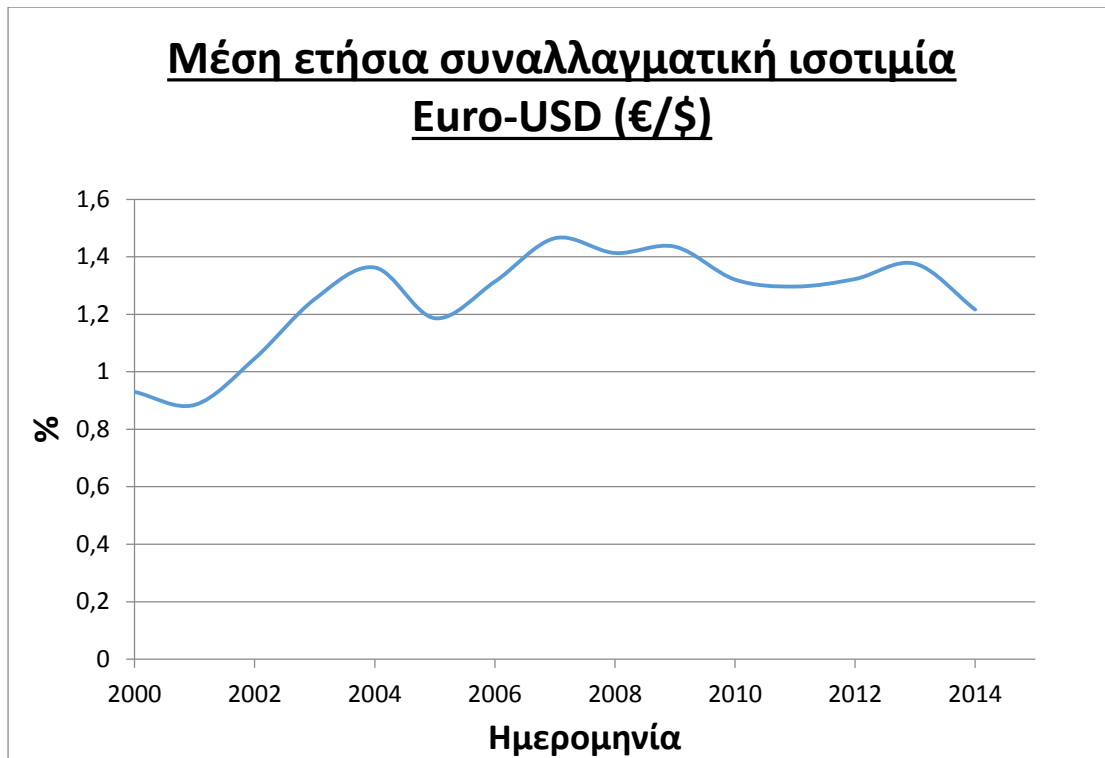
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-7 Η ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΤΙΜΗ ΣΥΝΑΛΛΑΓΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂

Οι τιμές CO₂ σημειώνουν μεγάλη πτώση τα τελευταία έτη που πιθανόν να οφείλεται στην διείσδυση των ΑΠΕ στην Ευρωπαϊκή Ενεργειακή Αγορά.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-8 ΜΕΣΗ ΜΗΝΙΑΙΑ ΤΙΜΗ ΠΛΗΘΩΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΤΟΚΙΟΥ

Τα στατιστικά δεδομένα για το επιτόκιο και των πληθωρισμό και η μεγάλη επίδραση που είχε σε αυτά η οικονομική κρίση στην Ελλάδα γίνονται εμφανή στο πιο πάνω γράφημα.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-9 ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΣΥΝΑΛΛΑΓΜΑΤΙΚΗ ΙΣΟΤΙΜΙΑ ΕΥΡΩ-ΔΟΛΑΡΙΟΥ

Η μέση ετήσια συναλλαγματική ισοτιμία μεταξύ Ευρώ και Δολαρίου ήταν απαραίτητη για την μετατροπή του μεταβλητού κόστους των τεχνολογιών που χρησιμοποιήθηκαν και συγκεκριμένα των τεχνολογιών που χρησιμοποιούν εισαγόμενα καύσιμα.

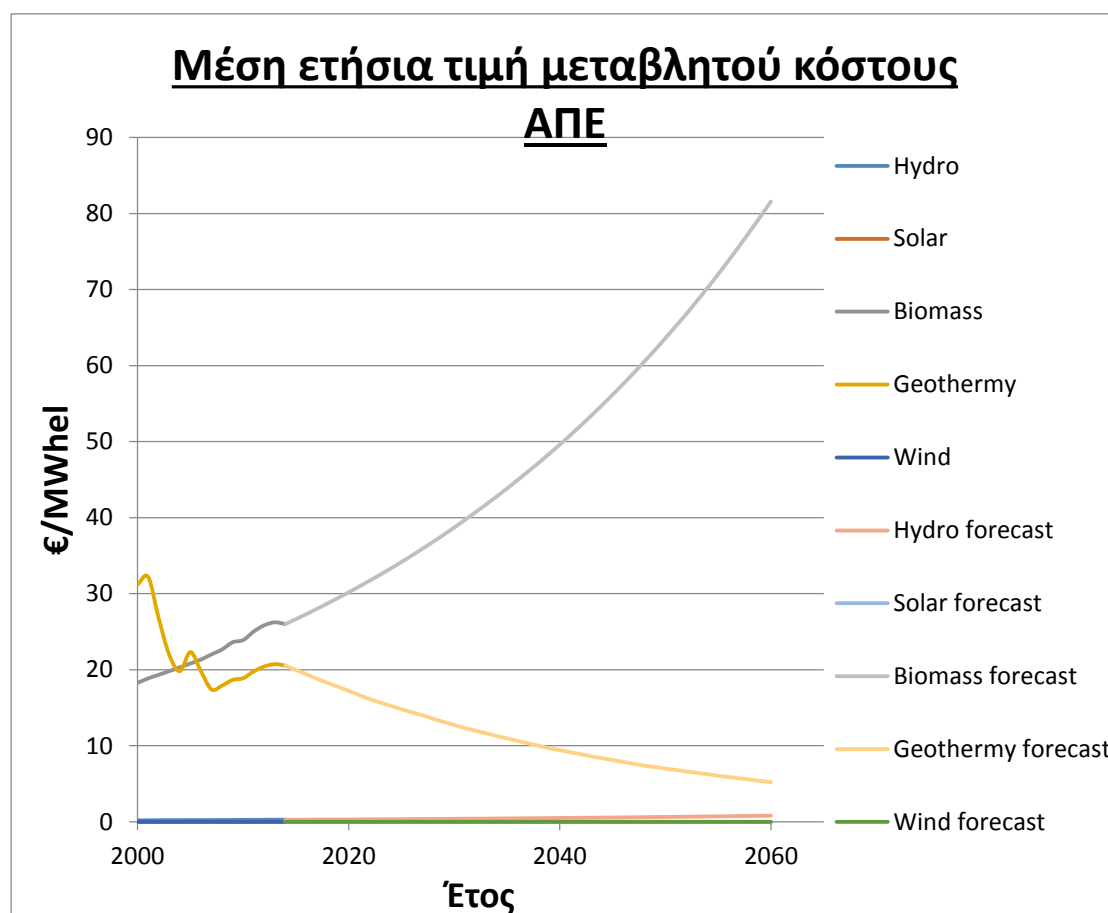
6.5 Δημιουργία Σεναρίου

Τα αριθμητικά δεδομένα που πάρθηκαν χρησιμοποιήθηκαν για την εξαγωγή δεδομένων που ήταν απαραίτητα για το χρονικό ορίζοντα που εξετάζουμε. Οι προβλέψεις υλοποιήθηκαν με διάφορα εργαλεία ανάλογα με τις απαιτήσεις σε ακρίβεια αλλά και από τη φύση των δεδομένων. Η ζήτηση ισχύος στις ώρες αιχμής προσεγγίστηκε με γραμμική παρεμβολή και δημιουργήθηκε η πρόβλεψη για το χρονικό ορίζοντα.

Αντίθετα για την πρόβλεψη ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και των τιμών συναλλαγής εκπομπών CO_2 χρησιμοποιήθηκε η στοχαστική μέθοδος GBM όπου έγινε η παραδοχή ότι ακολουθούν Brownian κίνηση. Στην περίπτωση του μοναδιαίου μεταβλητού κόστους κάθε τεχνολογίας έγινε χρήση της μεθόδου GBM με χρήση συσχέτισης (correlation).

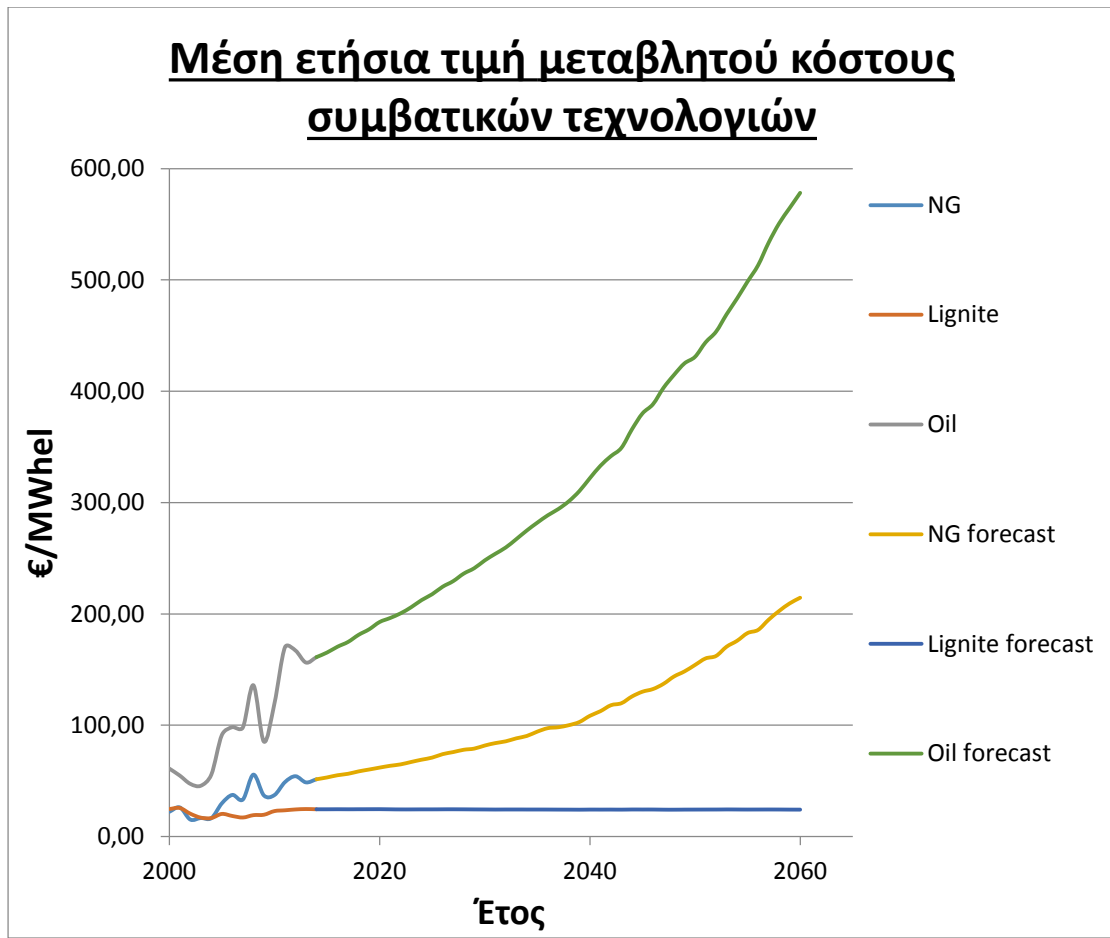
Στις προβλέψεις αυτές χρησιμοποιήθηκε μια επαναληπτική διαδικασία. Οι τελικές τιμές ήταν ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων πέντε χιλιάδων ανεξάρτητων τρεξιμάτων για κάθε μιας από τις πιο πάνω διαδικασίες. Αυτό οδηγεί σε χρήση πιο αξιόπιστων τιμών καθώς οι τιμές αυτές είναι στοχαστικές και εμπεριέχουν αβεβαιότητα.

Οι προβλέψεις όπως υλοποιήθηκαν φαίνονται στα παρακάτω σχήματα.



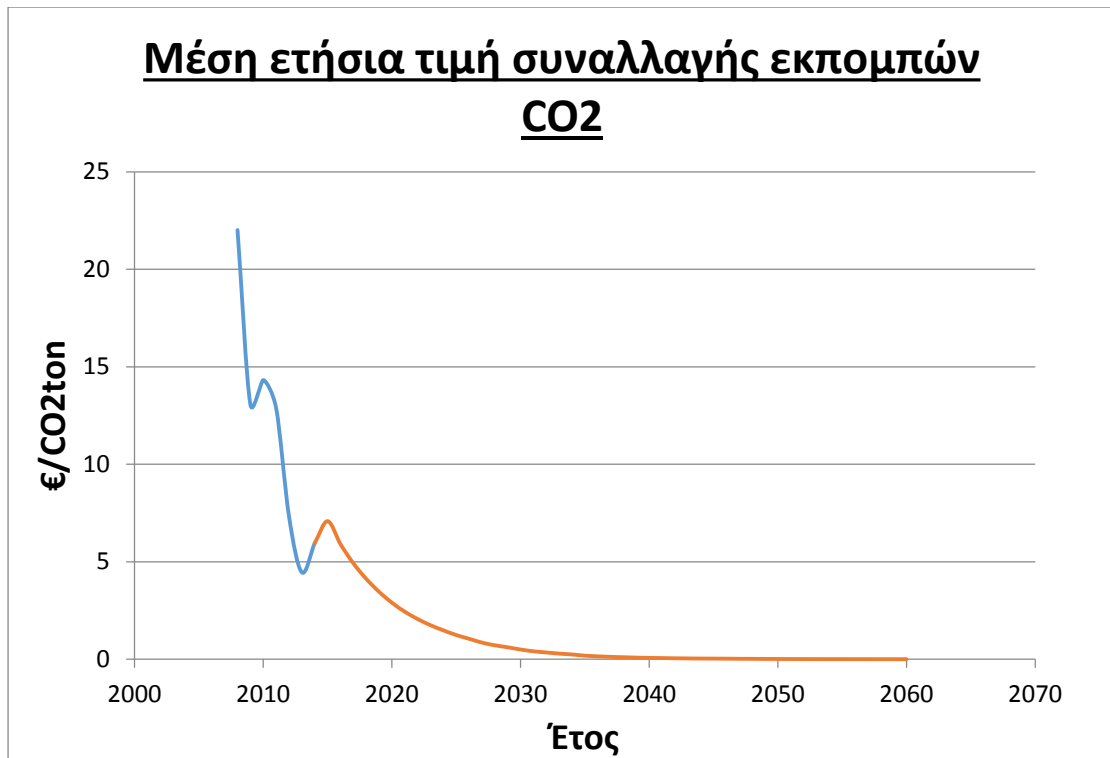
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-10 ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΤΩΝ ΑΠΕ

Τα μοναδιαία μεταβλητά κόστη για χρήση Γεωθερμίας και Βιομάζας έχουν αυξανόμενη πορεία ενώ για χρήση της Υδροηλεκτρικής ενέργειας παραμένουν σχεδόν σταθερά και σε πολύ χαμηλά επίπεδα. Στο σενάριο θεωρείται ότι δεν υπάρχουν μεταβλητά κόστη για χρήση Ηλιακής και Αιολικής.



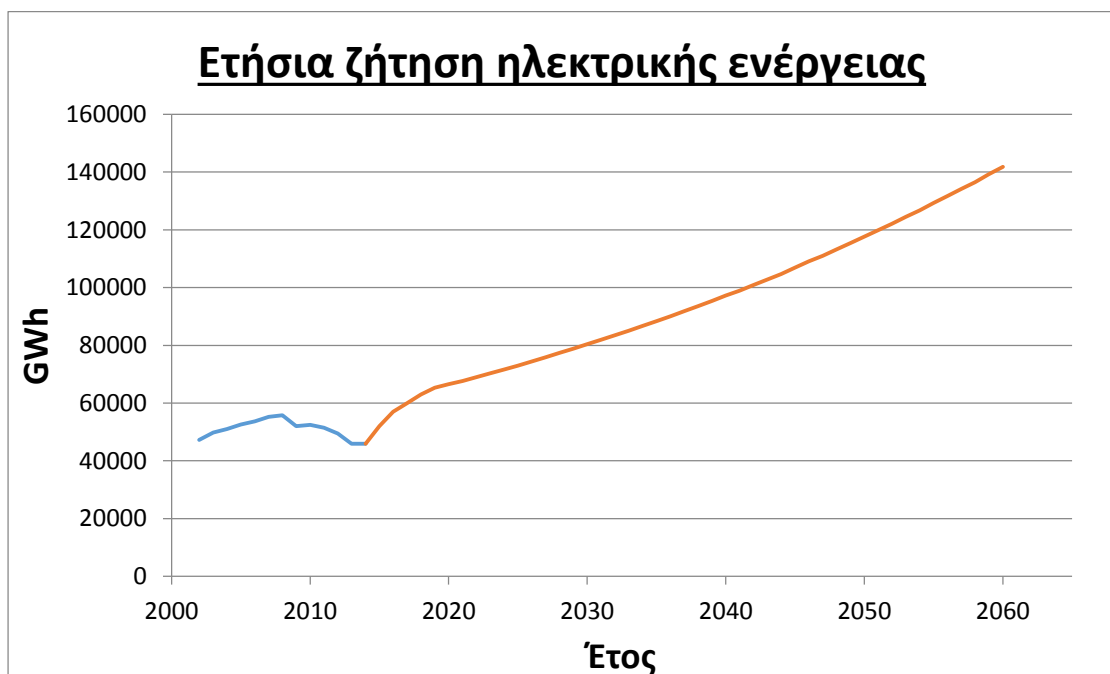
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-11 ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΤΙΜΗ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΥ ΚΟΣΤΟΥΣ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ

Τα μοναδιαία μεταβλητά κόστη για παραγωγή με συμβατικά μέσα πηγάζουν κυρίως από τις τιμές εφοδιασμού των καυσίμων. Οι τιμές για χρήση φυσικού αερίου και πετρελαίου προκύπτουν να αυξάνονται ενώ του λιγνίτη να παραμένουν σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.



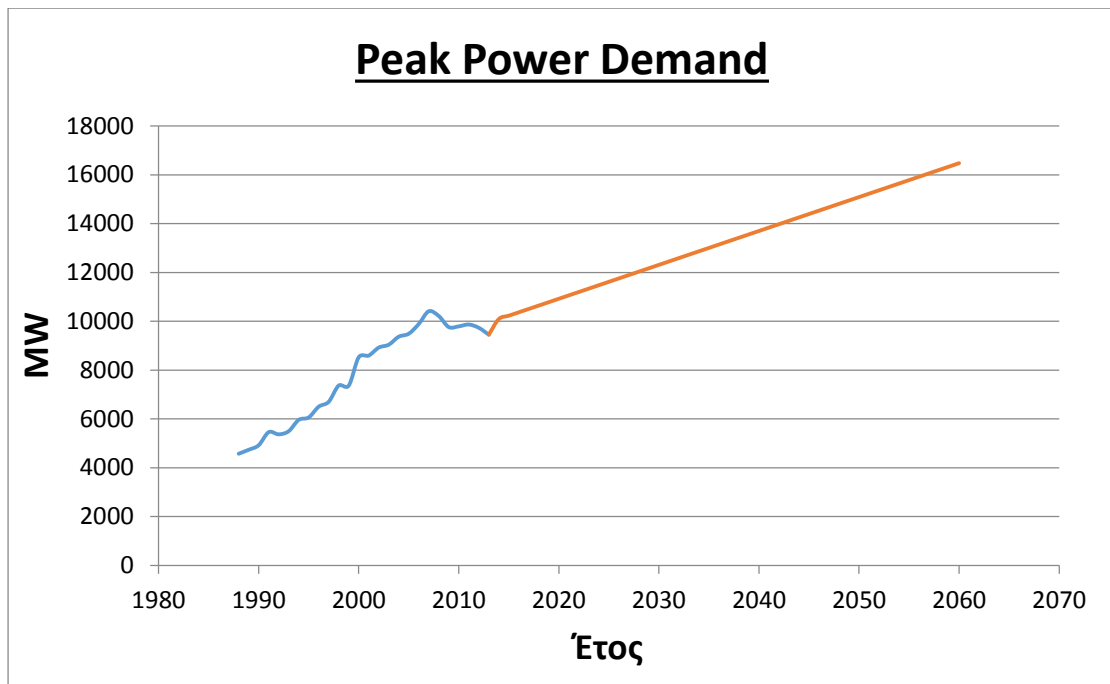
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-12 ΜΕΣΗ ΕΤΗΣΙΑ ΤΙΜΗ ΣΥΝΑΛΛΑΓΗΣ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂

Η τιμή συναλλαγής μονάδων CO₂ βάσει των δεδομένων φαίνεται να μειώνεται. Αυτό οφείλεται στην φθίνουσα πορεία που ακολούθησαν τα τελευταία χρόνια.



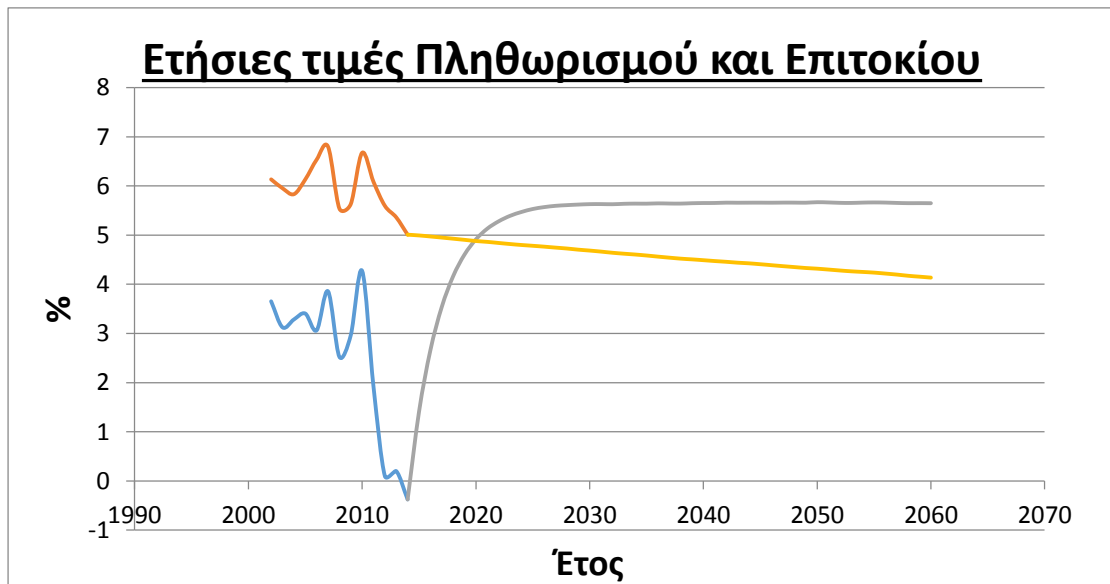
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-13 ΕΤΗΣΙΑ ΖΗΤΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας παρά την πτώση που παρουσίασε πρόσφατα, στο σενάριο αυτό αναμένεται να αυξηθεί τα επόμενα χρόνια.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-14 Η ΜΕΓΙΣΤΗ ΖΗΤΗΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΘΕ ΕΤΟΥΣ

Η μέγιστη ζήτηση ισχύος, που παριστά την ζήτηση ισχύος στις ώρες αιχμής, συνεχίζει την ανοδική της πορεία.



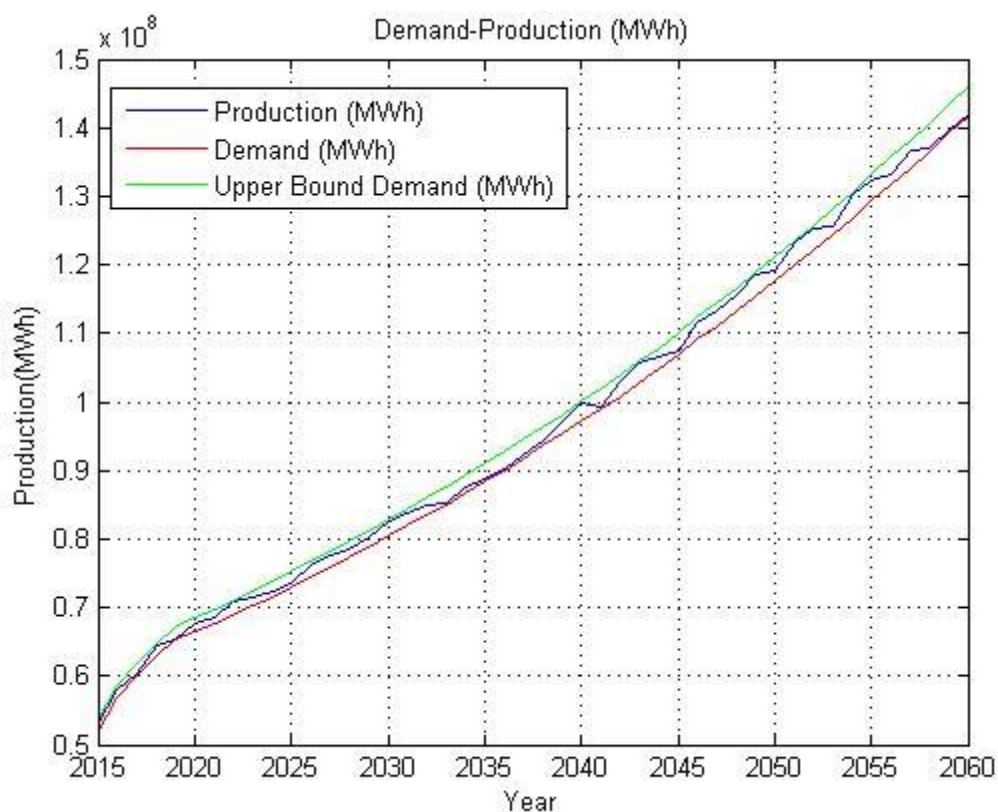
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-15 ΟΙ ΕΤΗΣΙΕΣ ΤΙΜΕΣ ΠΛΗΘΩΡΙΣΜΟΥ ΚΑΙ ΕΠΙΤΟΚΙΟΥ

Οι τιμές που λήφθηκαν με χρήση του μοντέλου CIR οδηγούν σε δημιουργία σεναρίου στο οποίο παρουσιάζεται αύξηση του πληθωρισμού και σταδιακή μείωση των επιτοκίων σε σχέση με τα σημερινά στοιχεία.

7 Παρουσίαση αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από την εκτέλεση των υπολογισμών που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο βάσει και του μαθηματικού μοντέλου. Τα αποτελέσματα μετά το έτος 2050 δεν αναλύονται για τους λόγους που προαναφέρθηκαν (lead-time-effect).

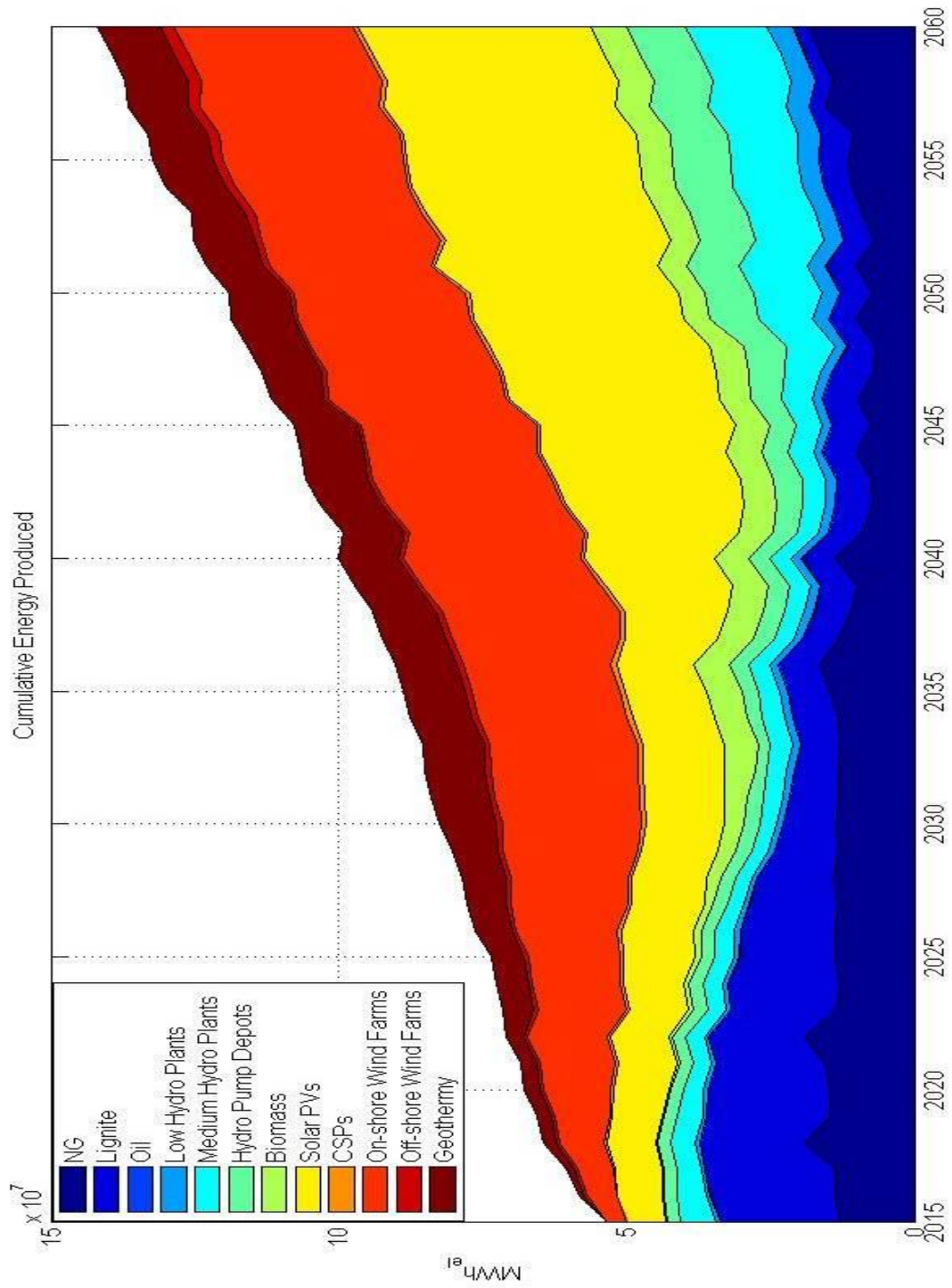
Ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-1 Η ΖΗΤΗΣΗ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΟ ΑΝΩ ΟΡΙΟ ΠΟΥ ΤΕΘΗΚΕ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΤΟΣ

Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας ικανοποιείται στον χρονικό ορίζοντα που εξετάζεται. Παρατηρούνται μικρές διακυμάνσεις μεταξύ των ορίων που τέθηκαν. Το άνω όριο είναι ρυθμισμένο στο 3% της αναμενόμενης ηλεκτρικής ζήτησης.

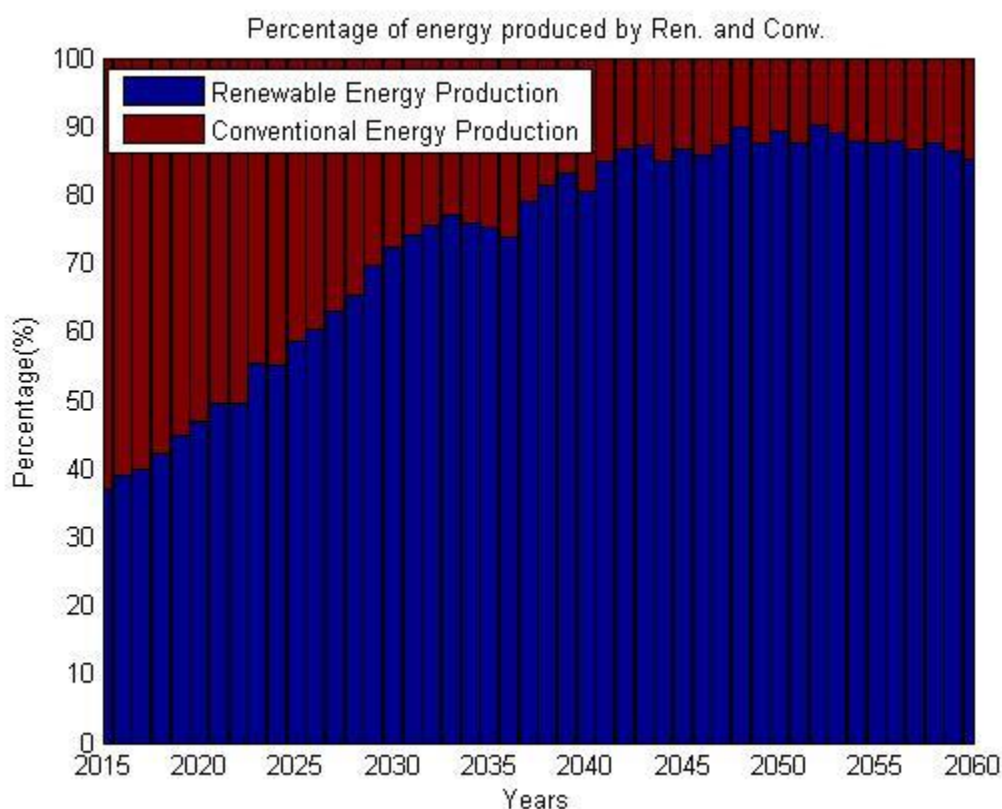
Μείγμα παραγωγής



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-2 ΤΟ ΜΕΙΓΜΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΘΕ ΕΤΟΥΣ

Η διαμόρφωση του μείγματος παραγωγής κάθε έτους φαίνεται στο πιο πάνω σχήμα. Παρατηρούμε την συμβολή κάθε μιας τεχνολογίας όπως αυτή προκύπτει μετά τις παραγγελίες εγκατάστασης ισχύος και την διαδικασία αξιολογικής ταξινόμησης. Η παράλληλη αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής και του ποσοστού που αντιστοιχεί στην παραγωγή από ΑΠΕ προϋδεάζει για την επίτευξη των στόχων. Οι τεχνολογίες των φωτοβολταϊκών και των αιολικών πάρκων αναμένεται να αποτελούν το μεγαλύτερο μέρος της ηλεκτροπαραγωγής. Η εκμετάλλευση της γεωθερμίας φαίνεται να οδηγείται στα όρια της διαθέσιμης της δυναμικότητας. Τα υδροηλεκτρικά έργα οδηγούνται στην αύξηση της συμβολής τους μετά το έτος 2040 καθώς έχουν μεγάλο χρόνο κατασκευής. Η βιομάζα συμβάλει αισθητά στην παραγωγή μετά το έτος 2025 που οφείλεται στο αυξημένο μοναδιαίο μεταβλητό κόστος της τεχνολογίας αυτής. Η πιο σημαντική παρατήρηση αφορά την πτώση του ποσοστού συμβολής των συμβατικών τεχνολογιών και ιδιαίτερα του λιγνίτη.

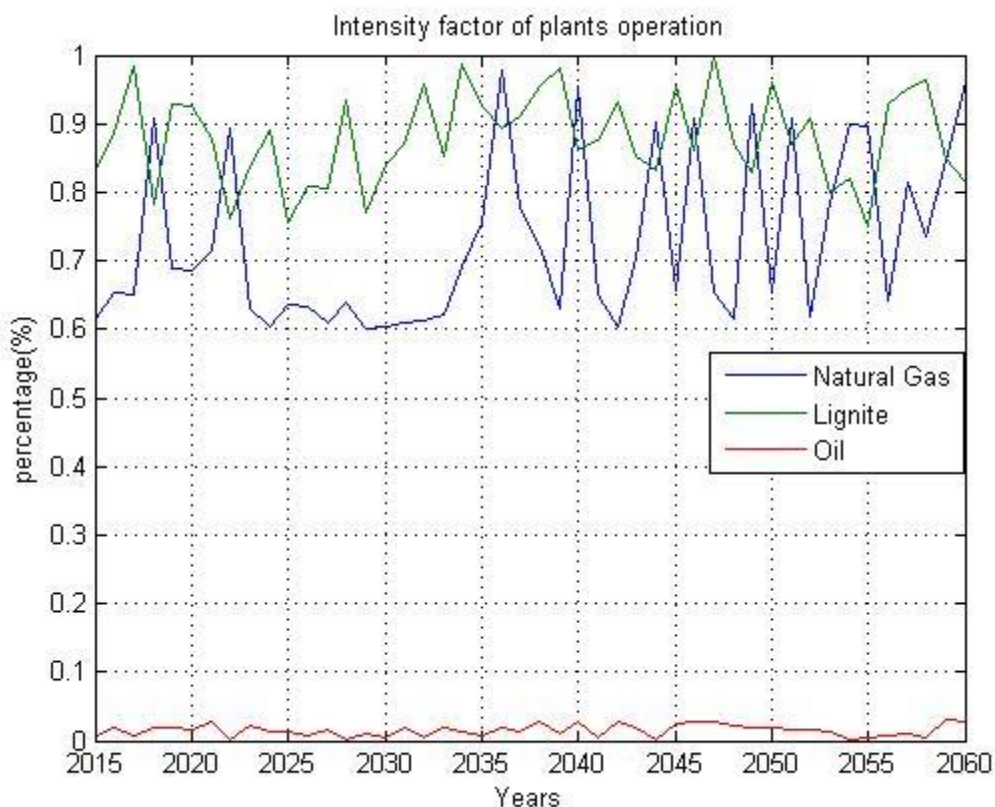
Συμβολή ΑΠΕ στην ηλεκτροπαραγωγή.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΠΟΣΟΣΤΟΥ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΑΠΕ ΚΑΙ ΣΥΜΒΑΤΙΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΚΑΘΕ ΕΤΟΥΣ

Για το έτος 2020 η συμβολή των ΑΠΕ ανέρχεται στο 49.67% και ξεπερνά τον στόχο του 40% όπως καθορίζει και το NREAP. Αντίστοιχα το έτος 2050 ξεπερνά το ποσοστό στόχος του ΕΕΣ των 85% και επιτυγχάνουν 89.22% συμβολή στην ηλεκτροπαραγωγή.

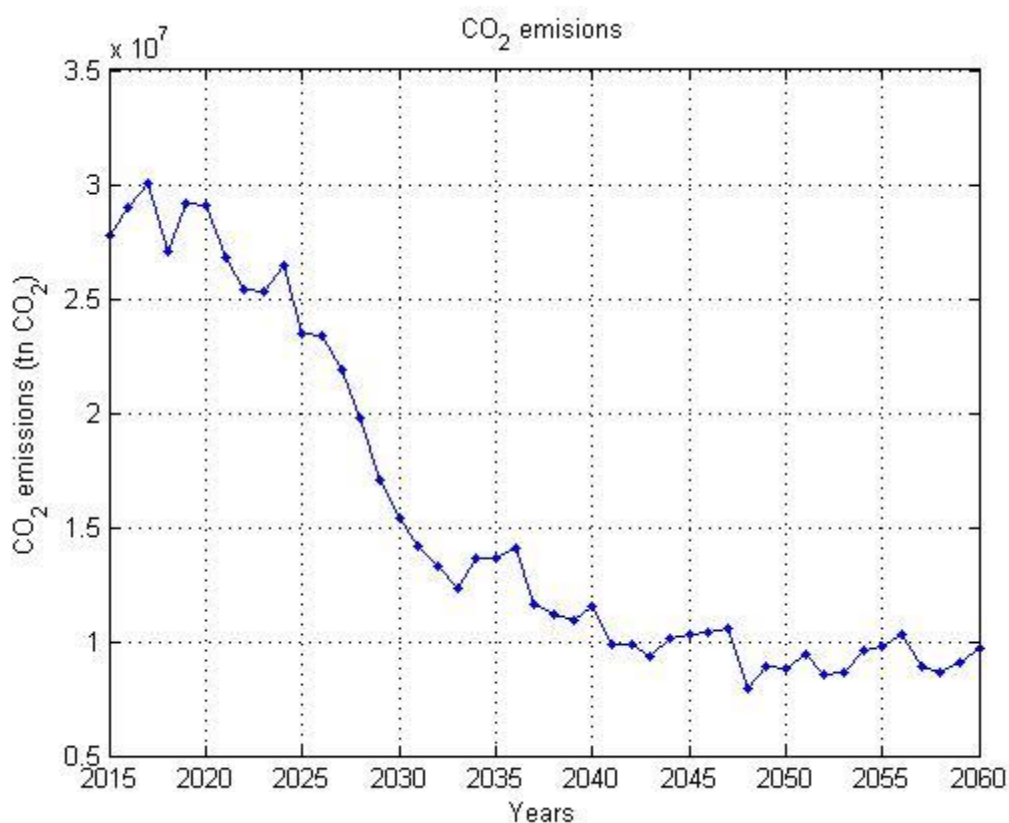
Συντελεστές απασχόλησης συμβατικών μονάδων.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-4 ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΠΑΣΧΟΛΗΣΗΣ ΚΑΘΕ ΣΥΜΒΑΤΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΤΟΣ

Οι συντελεστές απασχόλησης των συμβατικών τεχνολογιών παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις. Όσο αφορά τις μονάδες λιγνίτη και φυσικού αερίου κυμαίνονται στα επίπεδα 60%-100% ενώ αντίθετα των μονάδων πετρελαίου σε πολύ χαμηλά επίπεδα <5% που αποτελεί ρεαλιστική λύση. Την διαμόρφωση αυτή προφανώς επηρέασαν τα όρια που είχαν τεθεί στις μεταβλητές σχεδιασμού αυτές.

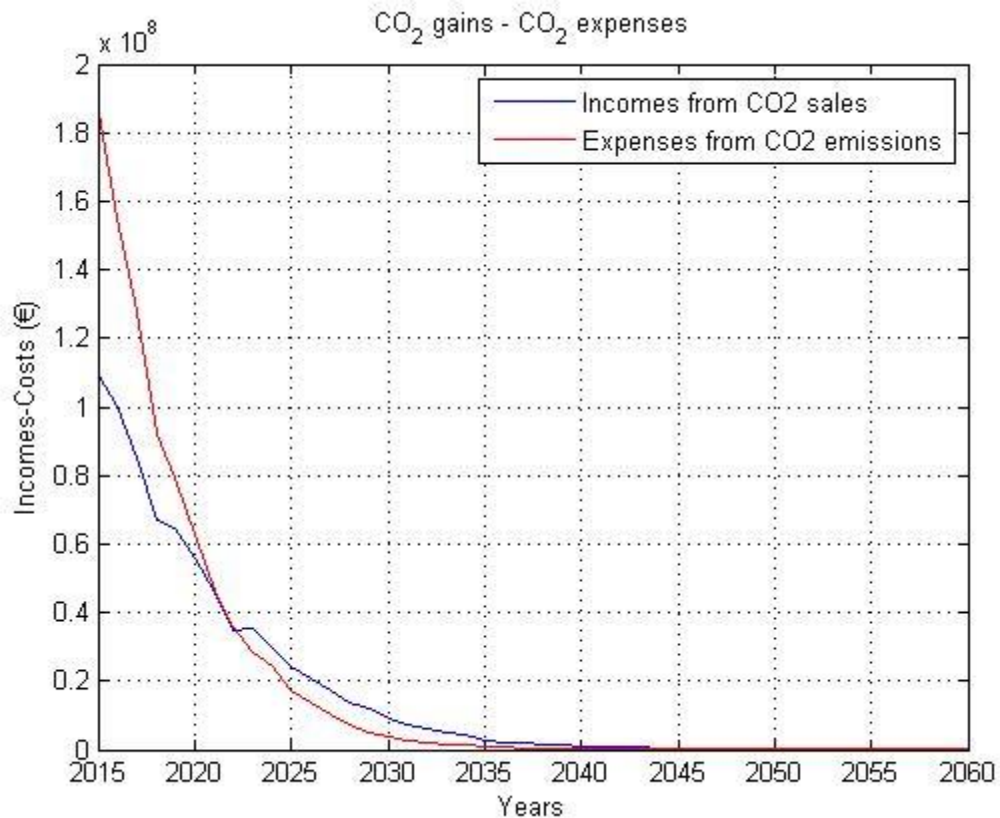
Εκπομπή μονάδων GHG.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-5 ΕΚΠΟΜΠΕΣ ΜΟΝΑΔΩΝ CO₂ ΚΑΘΕ ΕΤΟΥΣ

Η μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ οδηγεί στην ταυτόχρονη ραγδαία μείωση των GHG. Σε σχέση με τα επίπεδα του έτους 2005 (98675tnCO_2) επιτυγχάνεται μείωση της τάξης του 72.81% (26834tnCO_2 το έτος 2020) και με τις παραγγελίες για εγκατάσταση μονάδων ΑΠΕ που γίνονται στα πρώτα χρόνια και την ένταξή τους στο σύστημα καταλήγει το έτος 2050 να επιτυγχάνει μείωση της τάξης του 91.08% (8798tnCO_2). Όσο αφορά την απόδοση του μοντέλου η μείωση πρέπει να εξεταστεί σε σχέση με τα επίπεδα του έτους βάσης (2014) όπου τα αντίστοιχα ποσοστά είναι 3.23% και 68.27%.

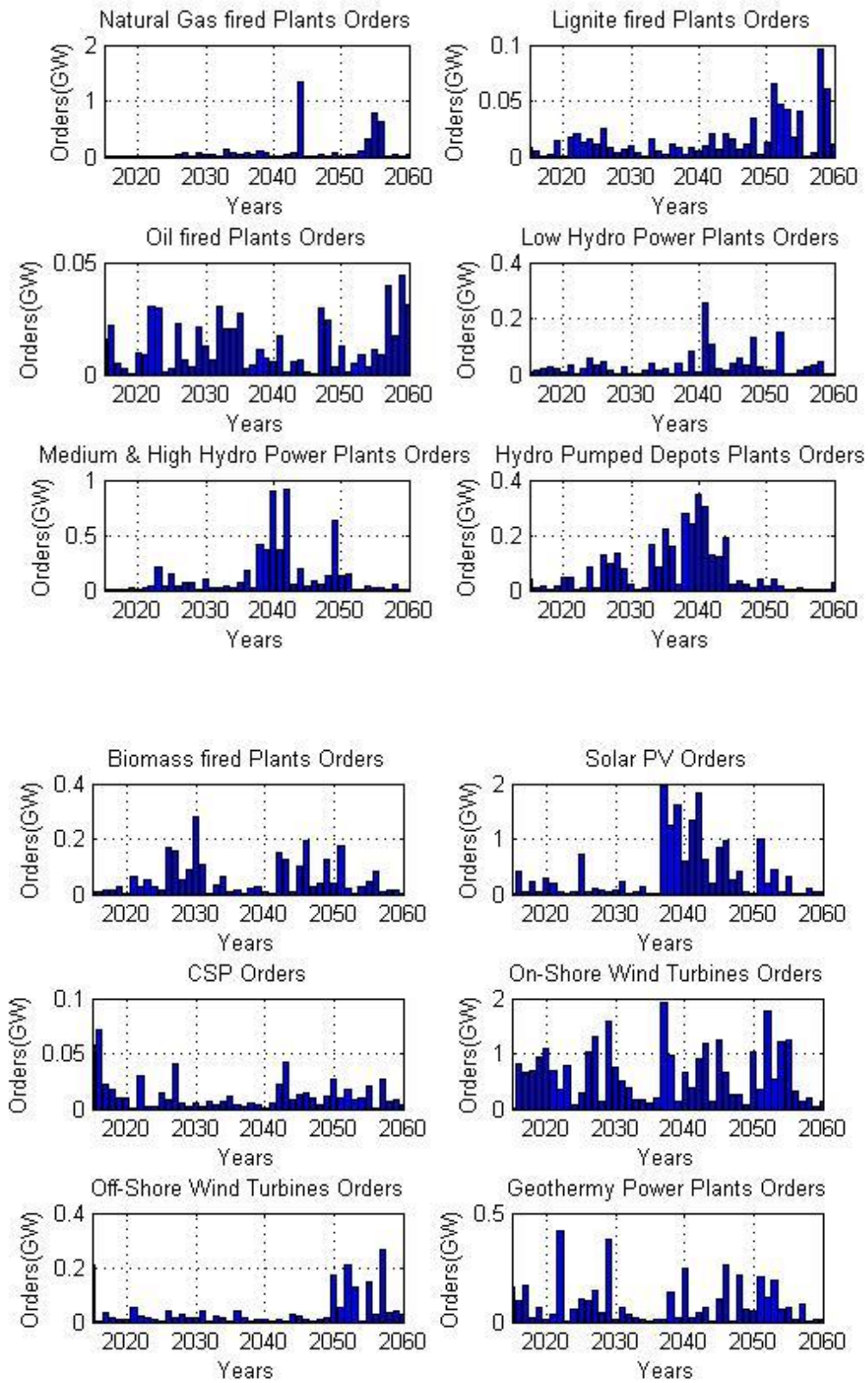
Εσοδα και έξοδα από την συναλλαγή μονάδων CO₂.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-6 ΕΣΟΔΑ ΚΑΙ ΕΞΟΔΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΣΥΝΑΛΛΑΓΗ ΕΚΠΟΜΠΩΝ CO₂ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΤΟΣ

Η μείωση της χρήσης συμβατικών καυσίμων, η διεύδυση των ΑΠΕ και η παράλληλη πτώση της αξίας συναλλαγής μονάδων CO₂ οδηγούν στην μεγάλη μείωση τόσο των εσόδων όσο και των εξόδων από συναλλαγή αυτών μετά το έτος 2030. Παρ' ολ' αυτά αξίζει να σημειωθεί ότι η αναλογία εσόδων και εξόδων, η οποία είναι ανεξάρτητη της τιμής συναλλαγής αυτών, μειώνεται δραματικά μέχρι το 2022, όπου το ισοζύγιο γίνεται θετικό για τα υπόλοιπα έτη και εξαρτάται από την τιμή συναλλαγής.

Παραγγελίες για εγκατάσταση ισχύος.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-7 ΠΑΡΑΓΓΕΛΙΕΣ ΕΚΓΑΤΑΣΤΑΣΗ ΙΣΧΥΟΣ ΚΑΘΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

Παραγγελίες για εγκατάσταση τεχνολογιών που κάνουν χρήση συμβατικών καυσίμων.

Η απαιτήσεις για ηλεκτροπαραγωγή οδηγούν στην συνέχιση των παραγγελιών εγκατάστασης σταθμών φυσικού αερίου λιγνίτη και πετρελαίου. Οι παραγγελίες φυσικού αερίου αυξάνονται για να καλύψουν την ανοδική ζήτηση της ηλεκτροπαραγωγής και το έτος 2042 παρουσιάζεται μια μεγάλη παραγγελία. Αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι μεγάλες εγκαταστάσεις τεχνολογιών που κάνουν χρήση φυσικού αερίου που είχαν κατασκευαστεί στην τριετία 2008-2011 ξεπερνάνε το προτεινόμενο χρόνο ζωής τους και αποσύρονται. Το κενό που δημιουργείται στην ηλεκτροπαραγωγή σε συνδυασμό με τον στόχο του ΕΕΣ, για κατώτατο όριο εγκατεστημένης ισχύος τεχνολογιών φυσικού αερίου (3GW), δημιουργεί την ανάγκη για αυτή την επένδυση. Επενδύσεις σε τεχνολογίες λιγνίτη γίνονται με σκοπό την κάλυψη της ηλεκτροπαραγωγής αλλά και λαμβάνοντας υπόψιν το ανώτατο όριο εγκατεστημένης ισχύος που προτείνεται από το ΕΕΣ(1GW). Οι παραγγελίες αλλά και η εγκατεστημένη ισχύς τεχνολογιών λιγνίτη σημειώνουν μεγάλη πτώση. Στα τελευταία έτη παρατηρούνται μεγάλες επενδύσεις των οποίων μέρος αιτιολογείται από την απόσυρση παλαιότερων εγκαταστάσεων αλλά κατά το μεγαλύτερο μέρος από το lead-time-effect. Αντίστοιχα παρατηρείται ότι οι επενδύσεις που αφορούν τεχνολογίες πετρελαίου είναι πολύ μικρού μεγέθους. Αυτό οδηγεί σε μείωση της εγκατεστημένης ισχύος και την διατήρησή τους σε πολύ μικρά ποσοστά συμβολής, λύση που προσδίδει ρεαλισμό όσο αφορά το μη συνδεδεμένο δίκτυο των νησιών.

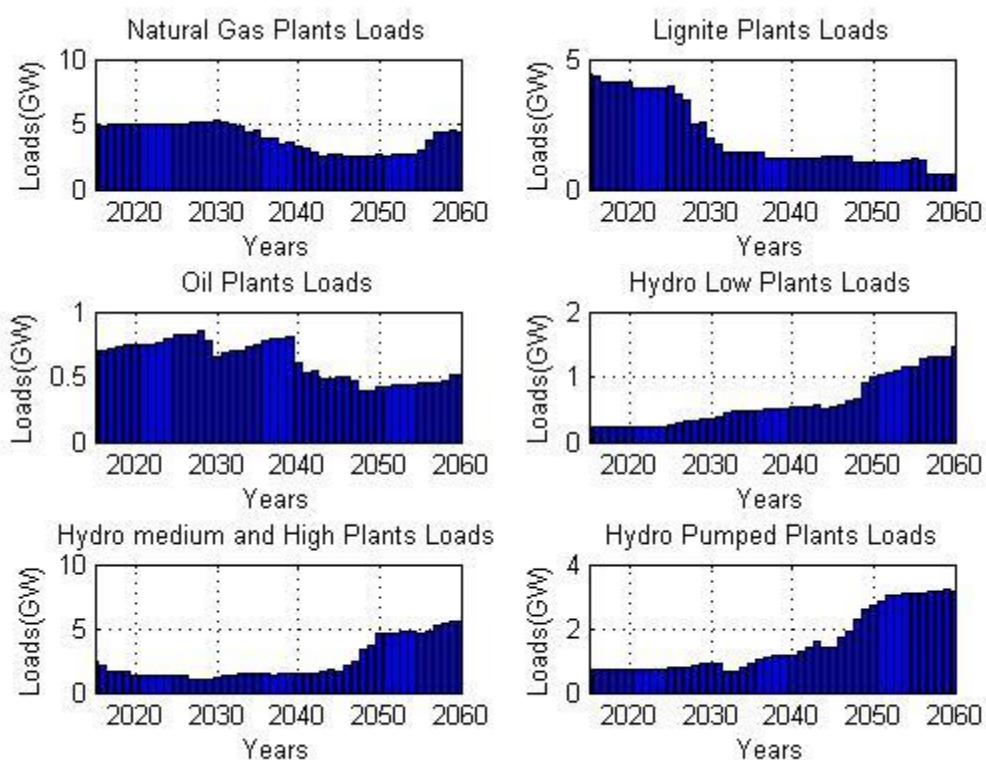
Γενικότερα όμως παρατηρείται μείωση του ποσοστού συμβολής των τεχνολογιών συμβατικών καυσίμων λόγω την διείσδυση των ΑΠΕ. Ταυτόχρονα το φυσικό αέριο ξεπερνά τον λιγνίτη σε ποσοστό συμβολής στην ηλεκτροπαραγωγή καθώς υπερτερεί όσο αφορά τα κόστη παραγωγής αλλά και τις εκπομπές GHG.

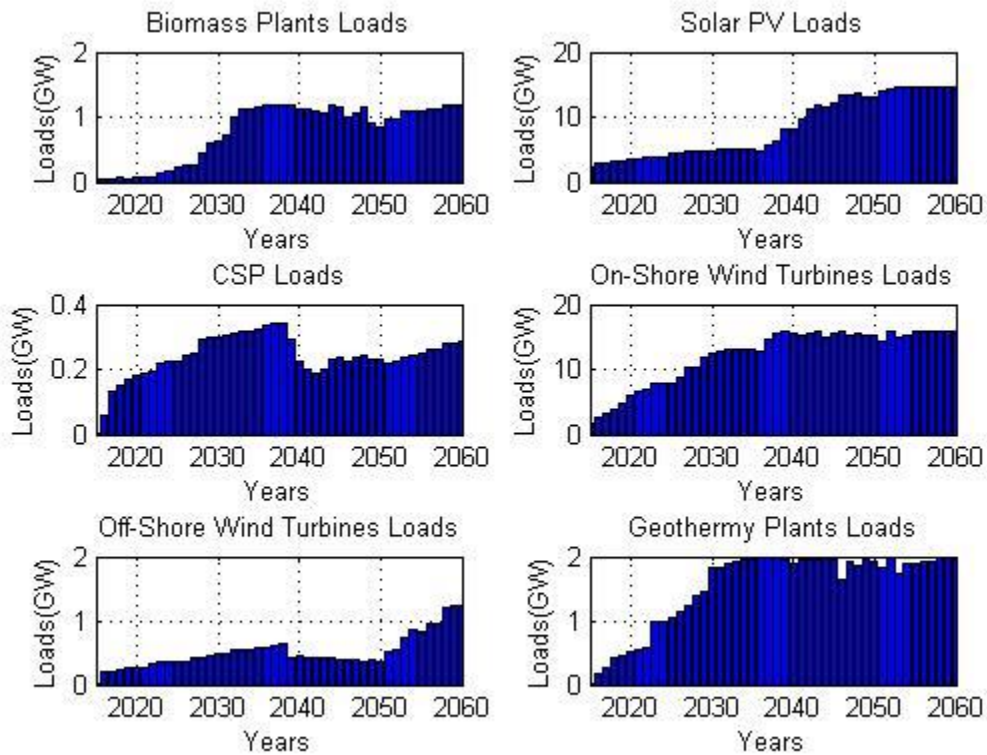
Παραγγελίες για εγκατάσταση τεχνολογιών ΑΠΕ

Οι παραγγελίες σε τεχνολογίες ΑΠΕ είναι σαφώς μεγαλύτερες, και οι περισσότερες από αυτές τείνουν να εκμεταλλευτούν όλο το διαθέσιμο δυναμικό που έχει εκτιμηθεί στο ΕΕΣ. Τα υδροηλεκτρικά έργα (μικρού δυναμικού, μεσαίου ή μεγάλου δυναμικού και αποθηκευτικές-αντλητικές εγκαταστάσεις) παρουσιάζουν μια συνεχή τάση για επενδύσεις με κλιμάκωση κατά την διάρκεια την δεκαετίας 2035-2045. Παραγγελίες στο χώρο των φωτοβολταϊκών προκύπτουν σταθερές αλλά ιδιαίτερα αυξημένες μετά το έτος 2035 λόγω της αύξησης της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας αλλά και της

δυνατότητας αξιοποίησης ενός μεγάλου φυσικού δυναμικού. Ταυτόχρονα οι στόχοι εγκατεστημένης ισχύος για τα φωτοβολταϊκά, που προτείνονται από το NREAP για το έτος 2020, έχουν ήδη υπερκαλυφθεί. Οι μεγαλύτερες παραγγελίες όμως αφορούν τις τεχνολογίες που κάνουν χρήση το διαθέσιμο αιολικό δυναμικό καθώς οι χερσαίες εγκαταστάσεις αιολικών τεχνολογιών αποτελούν το μεγαλύτερο διαθέσιμο φυσικό δυναμικό της Ελλάδας. Οι παραγγελίες αυτές υλοποιούνται με κάλυψη της πλειοψηφίας αυτού μέχρι το έτος 2035. Οι παραγγελίες στις τεχνολογίες που κάνουν χρήση της Γεωθερμίας, της Βιομάζας, των εγκαταστάσεων CSP's και των θαλάσσιων αιολικών πάρκων ξεκινάνε άμεσα, και μέχρι το έτος 2030 φτάνουν σχεδόν στο όριο της διαθέσιμης δυναμικότητας τους.

Εγκατεστημένη ισχύς

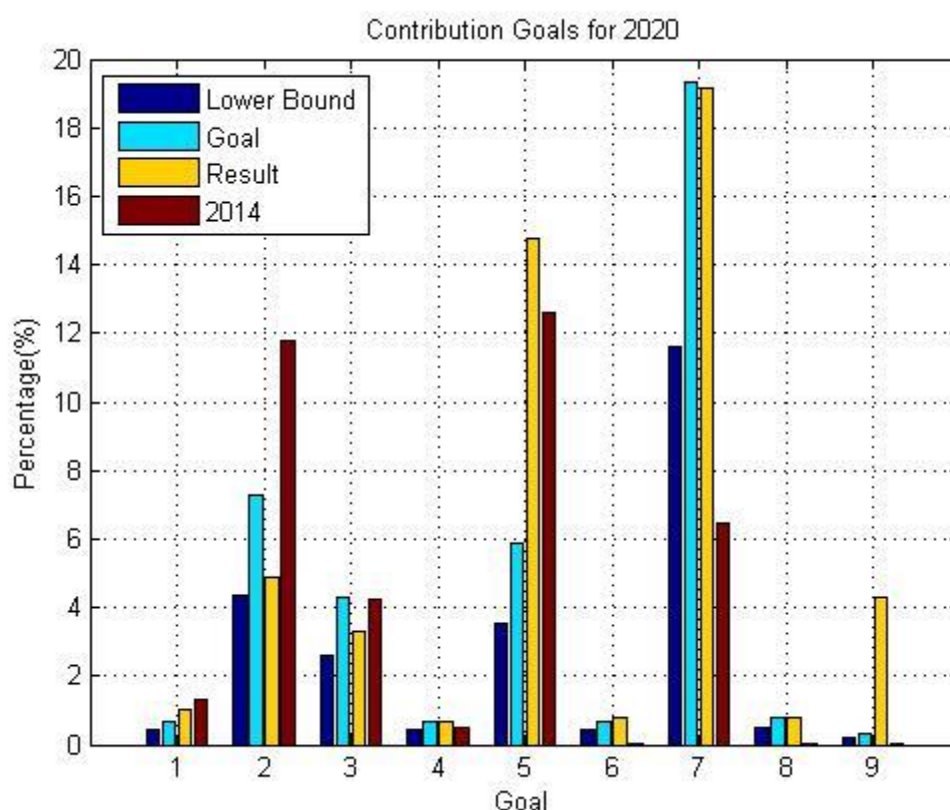




ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-8 ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥΣ ΚΑΘΕ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΓΙΑ ΚΑΘΕ ΕΤΟΣ

Με την υλοποίηση των παραγγελιών διαμορφώνεται η ισχύς για κάθε μια από τις χρησιμοποιούμενες τεχνολογίες. Όπως αναφέρθηκε και πριν οι ΑΠΕ τείνουν να εκμεταλλευτούν το μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης δυναμικότητας τους και ταυτόχρονα οι συμβατικές τεχνολογίες, με την απόσυρση των εγκατεστημένων σταθμών, μειώνουν την συμβολή τους στην ηλεκτροπαραγωγή μέχρι το έτος 2050.

Στόχοι σχεδίου NREAP για το έτος 2020.



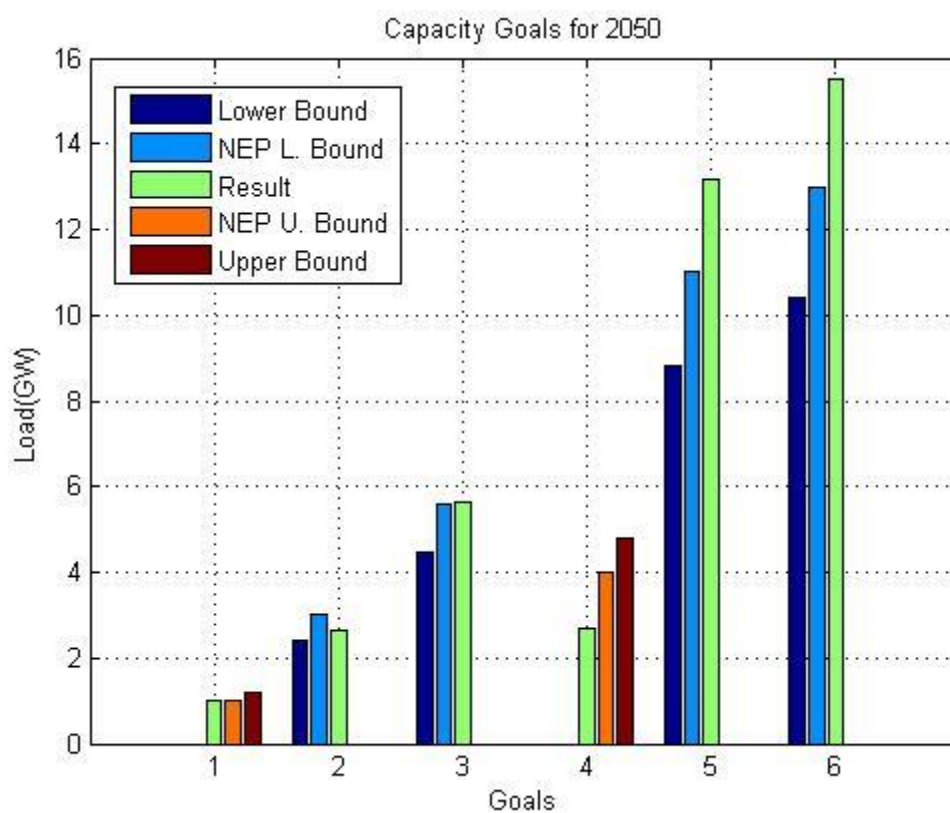
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-9 ΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΠΟΣΟΣΤΩΝ ΣΥΜΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ 2020 ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΕΥΡΟΣ ΠΟΥ ΔΟΘΗΚΕ, ΜΕ ΤΟ NREAP ΚΑΙ ΤΗΝ ΠΑΡΟΥΣΑ ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ

Οι στόχοι για το έτος 2020 εμπίπτουν μέσα στο εύρος M_{20} . Ιδιαίτερα στην περίπτωση του στόχου που αφορά το ποσοστό συμβολής των ηλιακών μέσων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας φαίνεται το ποσοστό αυτό να είναι αρκετά μεγαλύτερο από τον στόχο που τέθηκε, καθώς μεσολάβησαν μεγάλες επενδύσεις στα φωτοβολταϊκά από την σύνταξη του NREAP. Επίσης μεγάλη θετική απόκλιση παρουσιάζει η γεωθερμία +4% της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής. Σε κάθε περίπτωση συνολικά επιτυγχάνεται 49.47% διεύρυνση των ΑΠΕ η οποία ξεπερνά τον στόχο του NREAP. Παρ' ολ' αυτά η επίτευξη των απόλυτων στόχων του NREAP για τις τεχνολογίες δεν έγινε αν και βρίσκονται εντός του εύρους που αποδόθηκε. Αυτό ίσως οφείλεται σε οικονομικούς λόγους, δηλαδή επιλέχθηκε μερική απόκλιση από τον στόχο καθώς θα ήταν πιο συμφέρουσα, ή σε λόγους που αφορούν τον χρόνο κατασκευής των μονάδων, για παράδειγμα οι τεχνολογίες της υδροηλεκτρικής ενέργειας έχουν χρόνο κατασκευής 9 χρόνια άρα οι παραγγελίες που θα γίνουν ακόμη και στο πρώτο έτος δεν προλαβαίνουν να κατασκευαστούν πριν το έτος 2020

A/A Στόχου	Τεχνολογία	Στόχος συμβολής στην ηλεκτροπαραγωγή για το έτος 2020 (%)	Συμβολή στην ηλεκτροπαραγωγή για το έτος 2020 (%)	Διαφορά ποσοστού (%)	Ποσοστιαία απόκλιση από τον στόχο (%)
1	Hydro Low	0.70	1.01	0.314	+44,85
2	Hydro medium	7.30	4.89	-2.405	-32,95
3	Hydro Pumped	4.30	3.29	-1.007	-23,41
4	Biomass	0.70	0.64	-0.055	-7,92
5	Solar PV	5.90	14.79	8.889	+150,66
6	CSP	0.70	0.76	0.064	+9,16
7	Wind on- shore	19.30	19.18	-0.121	-0,63
8	Wind off- shore	0.80	0.80	-0.002	-0,25
9	Geothermal	0.30	4.30	3.99	+1331,00
Συνολικό		40	49.47	-	-

ΠΙΝΑΚΑΣ 7-1 ΕΠΙΔΟΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΚΑΘΕ ΣΤΟΧΟ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2020

Στόχοι σχεδίου ΕΕΣ για το έτος 2050.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-10 ΟΙ ΣΤΟΧΟΙ ΓΙΑ ΕΓΚΑΤΕΣΤΗΜΕΝΗ ΙΣΧΥ ΤΟΥ ΕΤΟΥΣ 2050 ΣΕ ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ ΤΟ ΕΕΣ ΚΑΙ ΤΟ ΕΥΡΟΣ ΠΟΥ ΔΟΘΗΚΕ

Αντίστοιχα στην περίπτωση των στόχων για την εγκατεστημένη ισχύ του έτους 2050 βάσει του σχεδίου ΕΕΣ οι στόχοι επιτυγχάνονται στο εύρος που επιτράπηκε με χρήση της παραμέτρου M_{50} και μόνο οι τεχνολογίες που κάνουν χρήση καυσίμου λιγνίτη δεν πετυχαίνουν τον ακριβή στόχο του ΕΕΣ, με απόκλιση μόλις 20.9MW. Οι αποκλίσεις κάθε ενός από τους στόχους που επιτράπηκαν από την παράμετρο M_{50} φαίνονται στον πίνακα.

Αριθμός Στόχου	Τεχνολογία	Στόχος ορίων εγκατεστημένης ισχύος	Εγκατεστημένη ισχύς (GW)	Διαφορά (MW)
1	Lignite	<1GW	1.0209	-20.9
2	Natural Gas	>3GW	2.6240	624.0
3	Hydro Medium & Low	>5.6GW	5.6396	39.6
4	Hydro Pumped	<4GW	2.7024	1297.6
5	Solar PV	>11GW	13.1618	2. 1618
6	Wind turbines	>13GW	15.5240	2524.0

ΠΙΝΑΚΑΣ 7-2 ΕΠΙΔΟΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΟΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΚΑΘΕ ΣΤΟΧΟ ΓΙΑ ΤΟ ΕΤΟΣ 2050

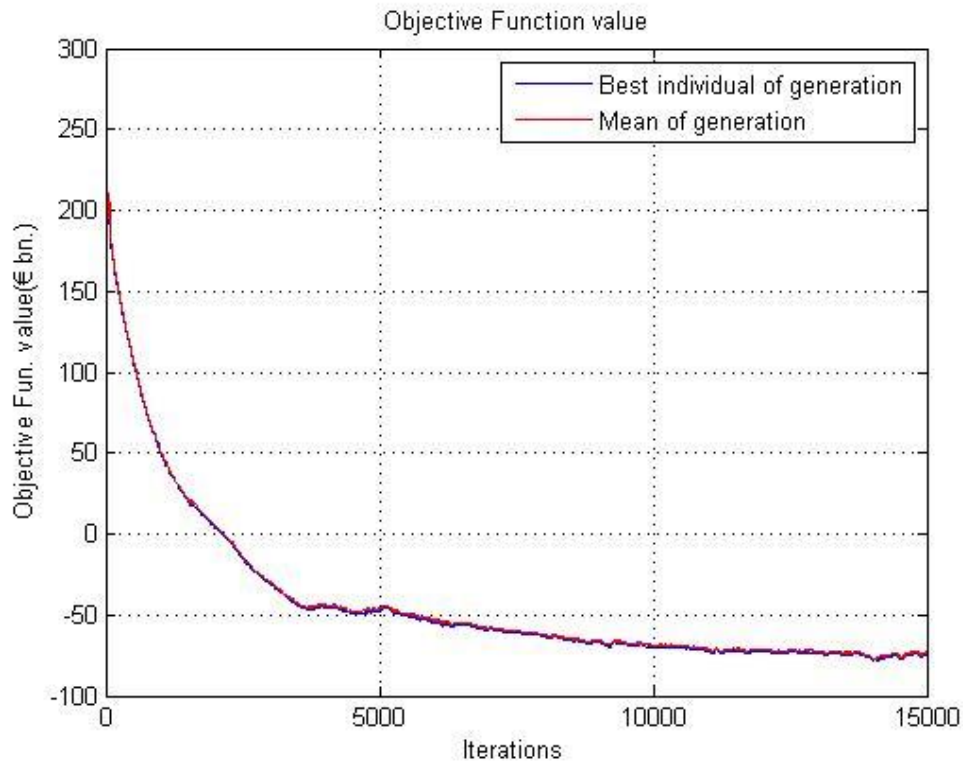
Η εξέλιξη της SMP.



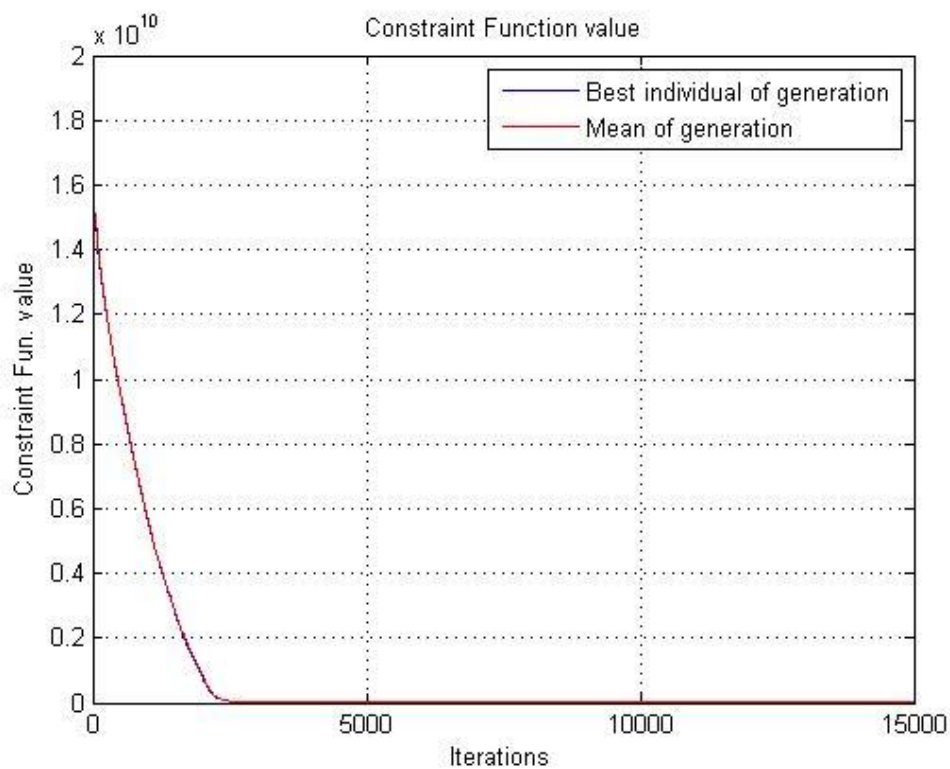
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-11 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΗΣ SMP

Η SMP αναμένεται να μειωθεί κατά την διάρκεια των επόμενων ετών. Αυτό οφείλεται στην μείωση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής, του κόστους λειτουργίας και συντήρησης, στην μεταβολή των τιμών καυσίμου, στην διείσδυση των ΑΠΕ, στην τεχνολογική εξέλιξη αλλά και στην απελευθέρωση της αγοράς. Η τιμή αυτή καταλήγει το έτος 2050 στα 25.75€/MWh. Συγκρίνοντας με την σημερινή που βρίσκετε στα 46.30€/MWh παρατηρείται μείωση της τάξης του 44.17% .

Πορεία σύγκλισης

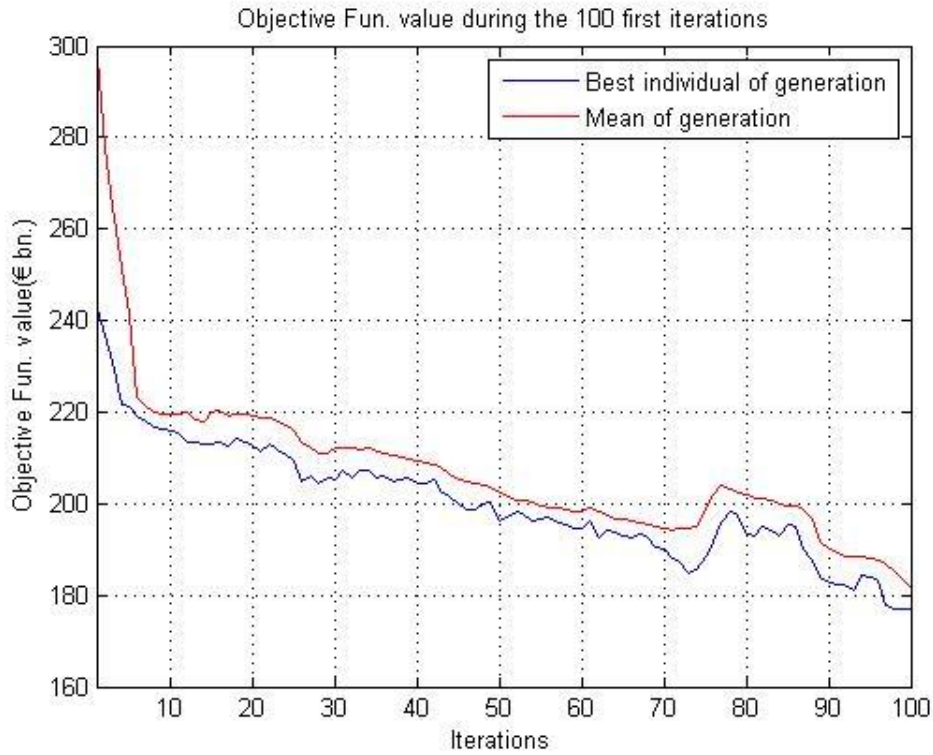


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-12 Η ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ

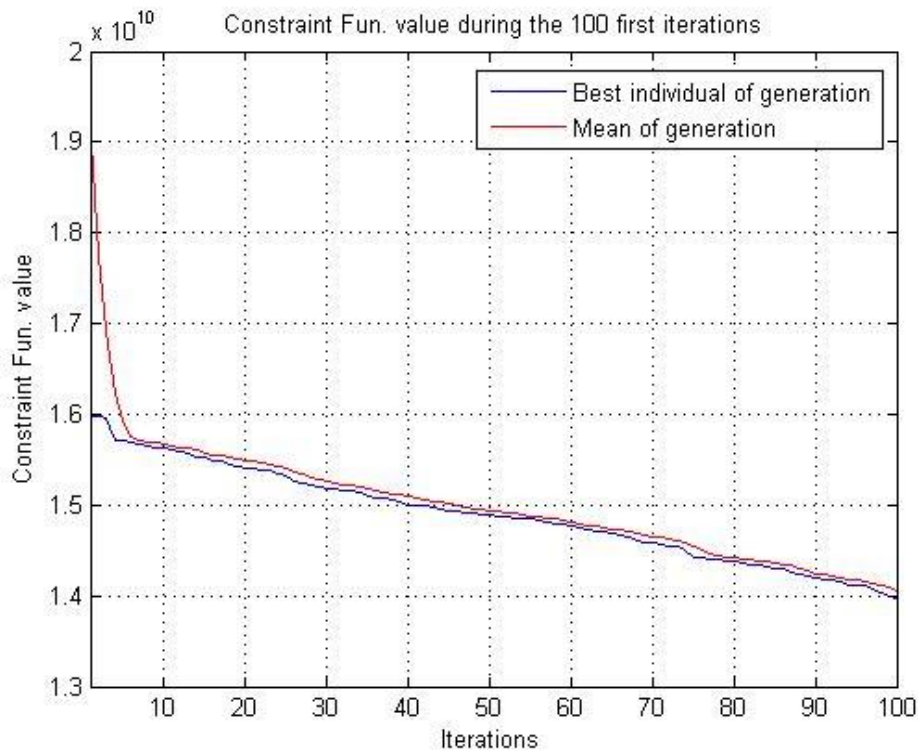


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-13 Η ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ

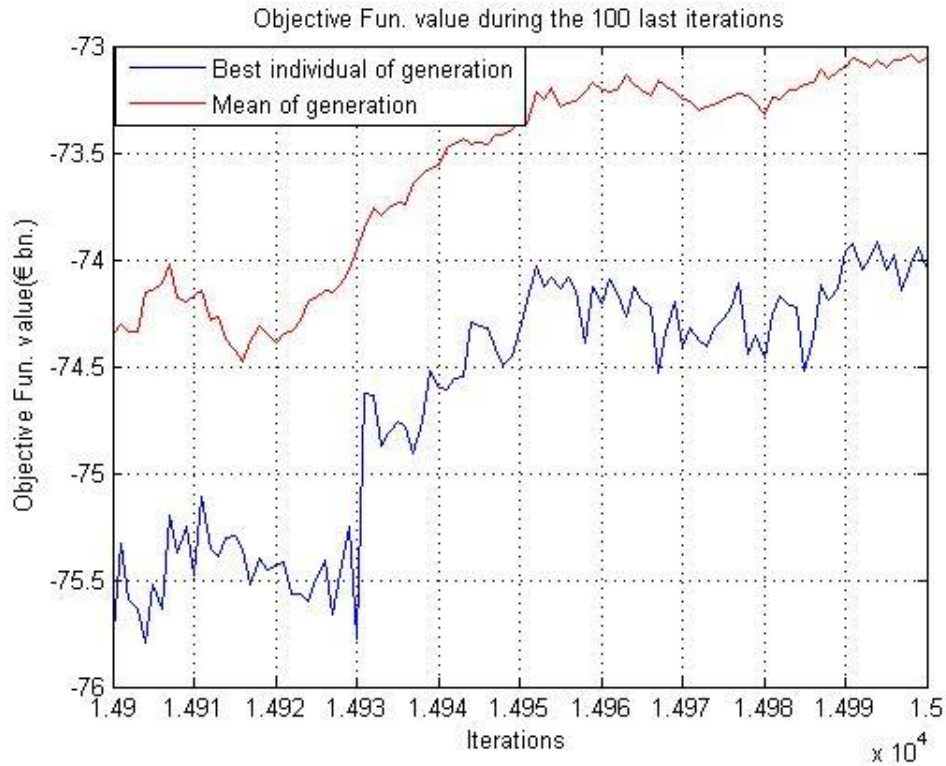
Το πρώτο γράφημα παρουσιάζει την τιμή του καλύτερου ατόμου του πληθυσμού κάθε επανάληψης ως προς την αντικειμενική συνάρτηση και στο δεύτερο ως προς την τιμή της συνάρτησης περιορισμών. Παρατηρείται ότι η μεγαλύτερη βελτίωση στην αντικειμενική συνάρτηση γίνεται εντός των πρώτων 3500 επαναλήψεων, όπου ταυτόχρονα γίνεται αναζήτηση περιοχής αποδεκτών λύσεων. Η συνάρτηση των περιορισμών σημειώνει την μεγαλύτερη πτώση της στις πρώτες 2500 επαναλήψεις και η πρώτη αποδεκτή λύση επιτυγχάνεται στην επανάληψη 7729. Το γεγονός ότι η μείωση της παραβίασης των περιορισμών και η ελαχιστοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης γίνονται παράλληλα επαληθεύει την θεωρία της μεθόδου, δηλαδή της ταυτόχρονης αναζήτησης για εφικτή και ποιοτική λύση ακόμη και όταν η αναζήτηση βρίσκεται σε περιοχή μη αποδεκτών λύσεων.



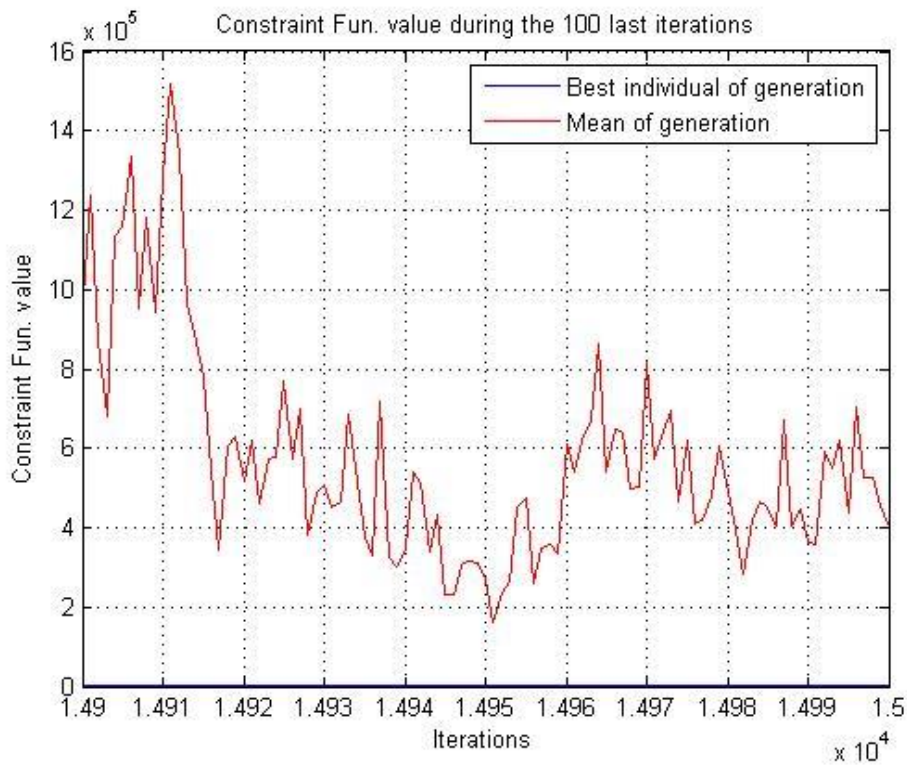
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-14 Η ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΣΤΙΣ ΠΡΩΤΕΣ 100 ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-15 Η ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ ΣΤΙΣ ΠΡΩΤΕΣ 100 ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ

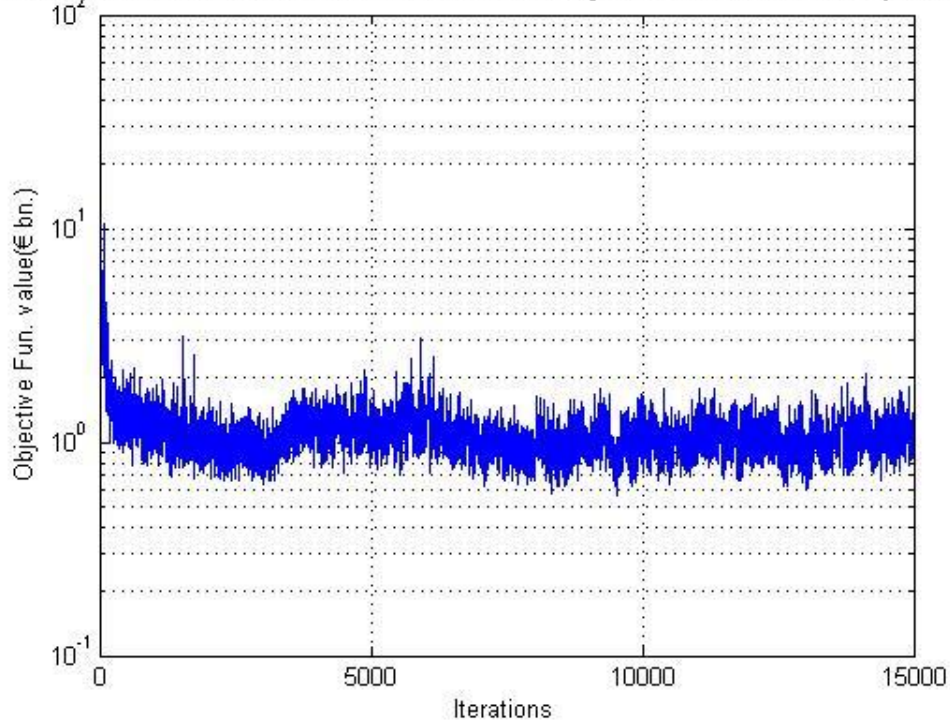


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-16 Η ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ ΣΤΙΣ ΤΕΛΕΥΤΑΙΕΣ 100 ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ



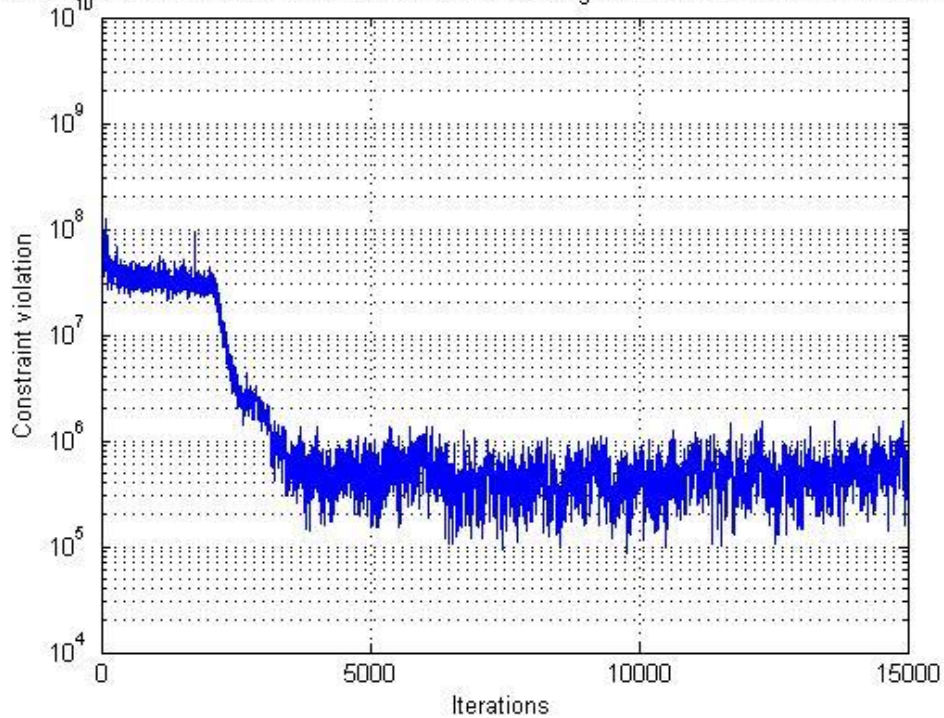
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-17 Η ΣΥΓΚΛΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗΣ ΣΤΙΣ ΤΕΛΕΥΤΑΙΕΣ 100 ΕΠΑΝΑΛΗΨΕΙΣ

The distance of the best individual from the mean of each generation based on the Objective funct



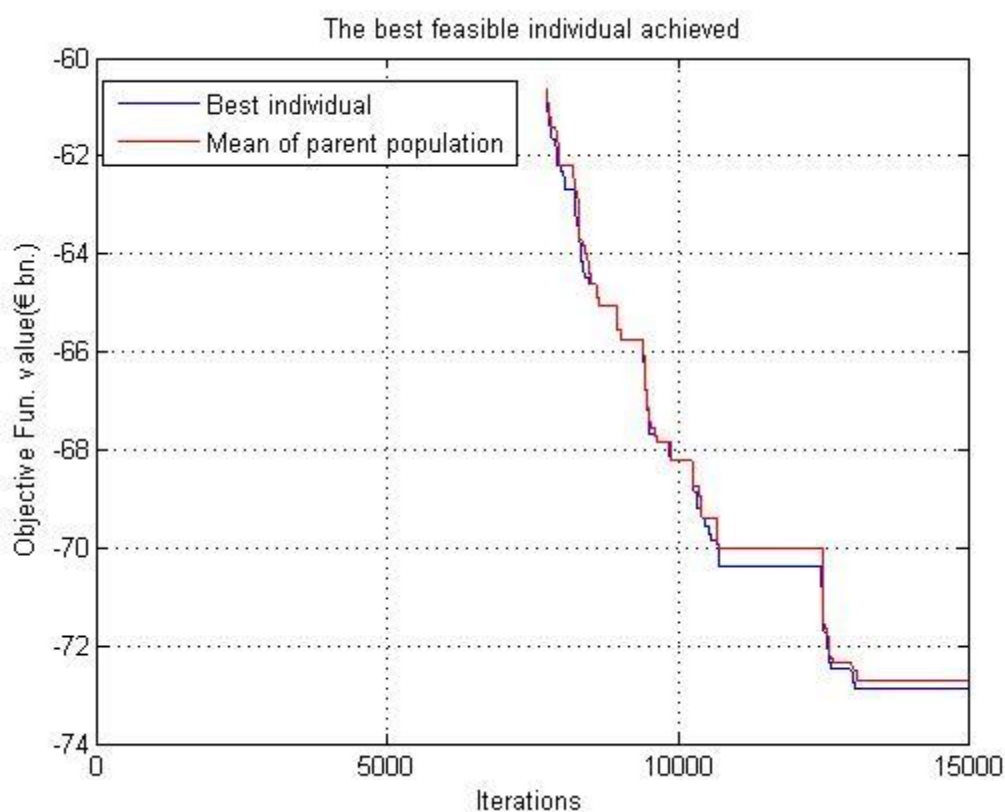
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-18 Η ΑΠΟΛΥΤΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΛΥΤΕΡΟΥ ΑΤΟΜΟΥ ΑΠΟ ΤΟΝ ΜΕΣΟ ΟΡΟ ΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΗ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ

The distance of the best individual from the mean of each generation based on the Constraint func:



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-19 Η ΑΠΟΛΥΤΗ ΔΙΑΦΟΡΑ ΤΗΣ ΑΠΟΔΟΣΗΣ ΤΟΥ ΚΑΛΥΤΕΡΟΥ ΑΤΟΜΟΥ ΑΠΟ ΤΟΝ ΜΕΣΟ ΟΡΟ ΤΗΣ ΓΕΝΙΑΣ ΩΣ ΠΡΟΣ ΤΗΝ ΣΥΝΑΡΤΗΣΗ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ

Στα πιο πάνω διαγράμματα παρουσιάζεται η σύγκλιση για τις πρώτες και τις τελευταίες 100 επαναλήψεις αλλά και η διαφορά της απόδοσης του καλύτερου ατόμου της γενιάς σε σχέση με την μέση απόδοση του πληθυσμού της γενιάς. Η απόδοση του μέσου όρου της γενιάς ακολουθεί την βελτίωση της απόδοσης του καλύτερου ατόμου της γενιάς και η απόκλιση αυτή μειώνεται ιδιαίτερα στις πρώτες επαναλήψεις. Παρ' ολ' αυτά ακόμη και στις τελευταίες επαναλήψεις, παρατηρείται ότι ιδιαίτερα στην περίπτωση της συνάρτησης περιορισμών ο μέσος όρος της απόδοσης του πληθυσμού παραμένει σε χαμηλά επίπεδα. Αυτό αφενός σημαίνει ότι δεν υπάρχει ομογενοποίηση του πληθυσμού και συνεχίζεται η αναζήτηση για νέους χώρους αποδεκτών λύσεων αφετέρου η αναζήτηση δαπανά μεγάλο χρονικό διάστημα σε χώρους μη αποδεκτών λύσεων. Παρατηρώντας τα δυο τελευταία διαγράμματα, δηλαδή της απόστασης της απόδοσης του καλύτερου ατόμου της γενιάς από την απόδοση του μέσου όρου φαίνεται ότι η μέθοδος μετά τις πρώτες επαναλήψεις έχει προσαρμόσει τις στρατηγικές της παραμέτρους μειώνοντας την μέγιστη απόκλιση στην οποία μπορούν να παραχθούν απόγονοι.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-20 Η ΜΕΧΡΙ ΤΗΝ ΕΚΑΣΤΟΤΕ ΕΠΑΝΑΛΗΨΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΕΝΤΟΠΙΣΜΕΝΗ ΛΥΣΗ

Εδώ παρουσιάζεται η πορεία της απόδοσης της καλύτερης αποθηκευμένης λύσης αλλά και του μέσου όρου των γονέων της συγκεκριμένης γενιάς. Ουσιαστικά η τιμή αυτή πρέπει να είναι αποδεκτή, δηλαδή να μην παραβιάζει κανένα περιορισμό, και να ανανεώνεται μόνο αν επιτευχθεί καλύτερη λύση. Μετά την επίτευξη της πρώτης αποδεκτής λύσης μέχρι και την επανάληψη 10721 υπάρχει μια συνεχής βελτίωση, ενώ στην συνέχεια ο αλγόριθμος αδυνατεί να εντοπίσει καλύτερη λύση για μεγαλύτερα διαστήματα.

8 Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η καταγραφή των συμπερασμάτων από την εκπόνηση της παρούσα εργασίας. Τα συμπεράσματα αυτά μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής:

- Συμπεράσματα για την φυσική σημασία των αποτελεσμάτων.
- Συμπεράσματα για το μαθηματικό μοντέλο.
- Συμπεράσματα για την μέθοδο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιήθηκε.
- Ανάλυση ευαισθησίας.

8.1 Συμπεράσματα για την φυσική σημασία των αποτελεσμάτων

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 7 φαίνεται να είναι άκρως ρεαλιστικά. Δημιουργήθηκε ένα σενάριο, με τις μεθόδους που αναλύθηκαν, με δεδομένα που λήφθηκαν από μια ενεργειακή αγορά εντός οικονομικής κρίσης και εμπειρείχαν μεγάλες διακυμάνσεις και Παρ' ολ' αυτά το μοντέλο έδειξε να παράγει λύση η οποία πετυχαίνει του στόχους που έχουν τεθεί και είναι κερδοφόρα για το κράτος και τους επενδυτές.

Εκμετάλλευση του φυσικού δυναμικού της Ελλάδας.

Η αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής οδήγησε στην εκμετάλλευση της πλειοψηφίας του διαθέσιμου φυσικού δυναμικού της Ελλάδας. Η εκμετάλλευση των δυο μεγαλύτερων, του αιολικού και του ηλιακού δυναμικού, συγκεκριμένα μέσω φωτοβολταϊκών και αιολικών πάρκων, είναι μείζονος σημασίας και αναμένεται να αποτελέσει καθοριστικό ρόλο. Ιδιαίτερα συμφέρουσες προκύπτουν οι επενδύσεις και η εκμετάλλευση του μικρού δυναμικού CSP και της γεωθεμίας καθώς το σύστημα προβαίνει σε άμεσες παραγγελίες και μέχρι το έτος 2025 έχει καλύψει το μεγαλύτερο μέρος της διαθέσιμης δυναμικότητας τους. Η ουσιαστική εκμετάλλευση της βιομάζας λόγω του αυξημένου μοναδιαίου μεταβλητού κόστους ξεκινά μετά το έτος 2025. Αντίστοιχα οι επενδύσεις σε θαλάσσια αιολικά πάρκα αποδεικνύονται λιγότερο συμφέρουσες, γεγονός που οφείλεται στα αυξημένα σταθερά κόστη και κόστη επένδυσης. Τα υδροηλεκτρικά έργα αναμένεται να καταλαμβάνουν σταθερά αυξανόμενο ποσοστό στην ηλεκτροπαραγωγή.

Ηλεκτροπαραγωγή με τη χρήση συμβατικών καυσίμων.

Τα σχέδια ΕΣΣ και NREAP στοχεύουν στην μείωση της συμβολής των τεχνολογιών που κάνουν χρήση συμβατικών καυσίμων. Οι στόχοι που έχουν τεθεί οδηγούν στην επίτευξη της μείωσης αυτής, συγκεκριμένα για το έτος 2020 η συμβολή περιορίζεται στο 50.33% ενώ για έτος 2050 στο 10.78%. Αξίζει να αναφερθεί ότι η επίτευξη των στόχων θεωρείτο αποδεκτή και σε μεγαλύτερα επίπεδα, 40% και 15% αντίστοιχα, και η περαιτέρω μείωση τους υποδεικνύει το γεγονός ότι αποτελεί οικονομικότερη λύση. Ταυτόχρονα η εγκατεστημένη ισχύς των τεχνολογιών που κάνουν χρήση πετρελαίου μειώνεται από 698MW σε 416MW παρά την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό συνάδει με τις απαιτήσεις του μη συνδεδεμένου δικτύου των νησιών. Αντίστοιχα η εγκατεστημένη ισχύς μονάδων λιγνίτη μειώνεται καθώς αυτές είναι ακριβότερες από τις μονάδες φυσικού αερίου όσο αφορά τα κόστη συντήρησης, κόστη επένδυσης και εκπέμπουν αυξημένους ρύπους GHG. Η εγκατεστημένη ισχύς που προκύπτει για το έτος 1021MW είναι στρατηγικός στόχος του κράτους. Το φυσικό αέριο μειώνεται στο 53.49% της σημερινής του εγκατεστημένης ισχύς, υλοποιώντας έτσι ακόμη ένα στρατηγικό στόχο όσο αφορά την απεξάρτηση από εισαγόμενα καύσιμα. Η υποχώρηση αυτή των συμβατικών τεχνολογιών παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα όσο αφορά την τιμή της SMP.

Διαμόρφωση του μείγματος παραγωγής και μείωση της τιμής της SMP.

Ίσως το πιο ενδιαφέρον αποτέλεσμα αποτελεί η ραγδαία μείωση της SMP. Η απελευθέρωση της αγοράς σε συνδυασμό με την μεγάλη διείσδυση των ΑΠΕ άρα και την μειωμένη συμβολή των συμβατικών τεχνολογιών στο μείγμα παραγωγής μειώνουν την SMP. Αυτό συμβαίνει καθώς ο χρόνος στον οποίο συμβάλουν οι συμβατικές τεχνολογίες στην ηλεκτροπαραγωγή μειώνεται, όπως και τα κόστη λειτουργίας και συντήρησης λόγω της μείωσης της εγκατεστημένης ισχύς, γεγονός που οδηγεί και στην παράλληλη μείωση του συνολικού κόστους προμήθειας. Τα συμπεράσματα που προκύπτει είναι ότι ο συνδυασμός των πιο πάνω θα συμβάλει και στην μείωση της SMP.

8.2 Συμπεράσματα για το μαθηματικό μοντέλο

Το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για αναζήτηση του βέλτιστου μείγματος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είχε σαν κριτήριο την εύρεση της οικονομικότερης λύσης. Οι τροποποιήσεις που έγιναν στο αρχικό μοντέλο, κατάφεραν με καλή ακρίβεια να προσεγγιστεί η Ελληνική αγορά.

Η ένταξη των διαθέσιμων τεχνολογιών της Ελλάδας και των τεχνοοικονομικών παραμέτρων αυτών, η λήψη πραγματικών δεδομένων της αγοράς και η εισαγωγή περιορισμών (άνω όριο στις παραγγελίες) κατάφεραν να προσεγγίσουν σε ένα πολύ καλό επίπεδο την Ελληνική πραγματικότητα, συμπέρασμα που επαληθεύεται και από τα αποτελέσματα. Η εισαγωγή των παραμέτρων προσφέρει μια οικονομική λύση για επίτευξη των στόχων αυτών και ταυτόχρονα παρουσιάζονται οι απαραίτητες επενδύσεις για να επιτευχθούν αυτοί. Παρατηρείται ότι οι παράμετροι αυτοί επαληθεύουν τις οικονομικές ωφέλειες που θα έχει η επίτευξη των στόχων καθώς παρά το εύρος που προσδόθηκε η λύση δεν απέκλινε πολύ από τους στόχους. Η μεγαλύτερη απόκλιση παρουσιάζεται στα ποσοστά συμβολής της γεωθερμίας για το έτος 2020 που προτείνεται η άμεση εκμετάλλευση του δυναμικού αυτού.

8.3 Συμπεράσματα ως προς την μέθοδο βελτιστοποίησης

Η χρήση της μεθόδου ISRES κατάφερε να εξασφαλίσει την σύγκλιση παρά τον αυξημένο αριθμό μεταβλητών σχεδιασμού και περιορισμών. Όπως παρατηρήθηκε και στα διαγράμματα η λύση που επιτεύχθηκε προέκυψε με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης. Η έλλειψη υπόθεσης αρχικού σημείου εξασφαλίζει ότι η λύση δεν εγκλωβίστηκε από την αρχικοποίηση. Παρ' ολ' αυτά η αναζήτηση εντός του χώρου αποδεκτών λύσεων καταλαμβάνει ένα μικρό ποσοστό της συνολικής αναζήτησης. Η πρόσδοση περισσότερων επαναλήψεων πιθανόν να οδηγούσε σε περαιτέρω βελτίωση της λύσης αλλά και στην ταυτόχρονη αύξηση του υπολογιστικού κόστους. Το ποσοστό βελτίωσης αυτό θα πρέπει να συγκριθεί με το υπολογιστικό κόστος για να αποφανθεί κανείς τον αριθμό επαναλήψεων, εφόσον αυτό τεθεί σαν κριτήριο τερματισμού, αλλά σε κάθε περίπτωση οι απαιτήσεις για ακρίβεια της λύσης θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψιν την φύση του προβλήματος και των αβεβαιοτήτων που αυτό εμπεριέχει. Ταυτόχρονα ο αριθμός απογόνων και γονέων που επιλέχθηκαν, η μεταβλητή φ^* αλλά και οι υπόλοιποι παράμετροι της μεθόδου που ορίστηκαν (παράγραφος 6.3.2.) επηρεάζουν την πορεία

σύγκλισης, το υπολογιστικό κόστος και την ποιότητα της λύσης. Οι τελικά επιλεγμένες τιμές ήταν οι προτεινόμενες, αν και δεν υπάρχει μια βέλτιστη ρύθμιση για όλα τα προβλήματα. Οι πιο ενδιαφέρουσες παρατηρήσεις που έγιναν κατά την προσπάθεια ορισμού των μεταβλητών αυτών παρατίθενται στο παράρτημα.

8.4 Ανάλυση ευαισθησίας

Ο προγραμματισμός αυτός εξαρτάται όμως από πολλούς παράγοντες αβεβαιότητας οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν το μείγμα παραγωγής. Συγκεκριμένα η λύση βασίζεται στα δεδομένα που εισήχθησαν και αποτελούν αποτέλεσμα στοχαστικών διαδικασιών όπου κάθε απόκλιση από μια τιμή μιας χρονικής στιγμής μεταφέρεται και στον υπόλοιπο χρονικό ορίζοντα. Ουσιαστικά αποτελεί μια πρόβλεψη βασισμένη σε στατιστικά δεδομένα στην οποία εντάσσεται θόρυβος και μπορεί να μην απεικονίζει τελικά την πραγματική εξέλιξη των τιμών. Το εύρος των αποκλίσεων των δεδομένων αυτών στο οποίο η λύση αυτή παραμένει βέλτιστη μπορεί να εντοπιστεί μέσω μιας ανάλυσης ευαισθησίας. Ιδανικά θα μπορούσε να δημιουργηθεί δυναμικό μοντέλο ή να προγραμματιστεί έτσι ώστε να λαμβάνεται υπόψιν η κυρτότητα της αντικειμενικής συνάρτησης για κάθε υποψήφια λύση κατά την διάρκεια της διαδικασίας της βελτιστοποίησης.

Παρ' ολ' αυτά το γεγονός ότι η εισαγωγή των δεδομένων ήταν ο μέσος όρος 5000 επαναλήψεων προσδίδει αξιοπιστία στην προσέγγιση. Επίσης η χρήση Εξελικτικών Στρατηγικών και ιδιαίτερα η (μ, λ) –ES βασίζεται στην μετακίνηση του μέσου όρου των απογόνων, όπου κάθε απόγονος αντιπροσωπεύει μια λύση εντός της έλλειψης που δημιουργείται με αποτέλεσμα να εξετάζονται διπλανάς από την βέλτιστη. Οι απόγονοι που θα δημιουργηθούν από ένα γονέα θα είναι εντός του ορίου που επιτρέπουν οι στρατηγικές παράμετροι και αν η γειτονιά γύρω από τον γονέα δεν είναι εξίσου καλή μετά από ένα αριθμό επαναλήψεων αναμένεται αυτή να χαθεί και να μην εξερευνηθεί περαιτέρω. Η κατά Δαρβίνο αυτή αυστηρότητα πιθανόν να συμβάλει στην επίτευξη μιας πιο στιβαρής λύσης (3.3.2.4) αλλά και αυτό εξαρτάται από την ρύθμιση των παραμέτρων της αναζήτησης.

9 Βιβλιογραφία

- [1] A.Tolis, 2015. The effect of long-term expansion on the evolution of electricity price: numerical analysis of a theoretically optimized electricity market. *EJOR*, 244(3), 939-954.
- [2] A. Tolis, A. A. Rentizelas, 2011. An impact assessment of electricity and emission allowances pricing in optimized expansion planning of power sector portfolios. *Applied Energy*, 88(11), 3791-3806.
- [3] A. Ramos, I.J. Perez-Arriaga, J. Bogas, 1989. A non-linear programming approach to optimal static generation expansion planning. *Power Systems*, 4(3), 1140-1146.
- [4] A. Unsihuay-Vila, J.W. Marangon-Lima, A.C. Zambroni de Souza, I.J. Perez-Arriaga, 2010. Multistage expansion planning of generation and interconnections with sustainable energy development criteria: A multiobjective model. *EPES*, 33(2), 258-270.
- [5] A. Philips, 1969. A mathematical model for determining generating plant mix, *Power Systems proceedings of Computation Conf. Proc.*
- [6] EIA, 2014. *International Energy Outlook 2014*.
- [7] EUROSTAT, 2014. *Europe in figures-Eurostat yearbook 2014*.
- [8] Fogel L.J., 1962. Autonomous automata. *Industrial Research* 4: 14-9.
- [9] Fogel L.J., 1966. *Artificial Intelligence through Simulated Evolution*. Wiley, New York.
- [10] Foley, A.M., 2010. A strategic review of electricity system models, *Energy*, 35, 4522-4530.
- [11] G. Kumbaroglu, M. Reinhard, M. Demirel, 2008. A real options evaluation model for the diffusion prospects of new renewable power generation technologies. *Energy Economics*, 30(4), 1882-1908.
- [12] Goldberg D., 1989. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Addison Wesley, Reading, MA.
- [13] Hans-Paul Schwefel, 1994. *Evolution and Optimum Seeking*. Wiley, New York.

- [14] Hans-Georg Beyer and Hans-Paul Schwefel, 2002. Evolution Strategies: A comprehensive introduction. Kluwer Academic Publishers, Natural Computing, chapter 2, 3-52.
- [15] Holland J. H., 1962 Outline for a logical theory of theory of adaptive systems. J. ACM 9 297-314.
- [16] Holland J. H., 1975 Adaptation in Natural and Artificial Systems. MI: University of Michigan Press, Ann Arbor.
- [17] Holland J. H., 1995. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity, Addison-Wesley, Reading, MA.
- [18] Jansen T and Wegener I, 2001. Real royal road functions – where crossover provably is essential. In: Spector L (ed) GECCO'01: Proceedings of Genetic and Evolutionary Computation Conference. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA.
- [19] Jong Bae Park, Y.M. Park, J.R Won, Lee, 200. An improved Genetic algorithm for Generation Expansion Planning. Power Systems, 15(3), 916-922.
- [20] J. Joines and C. Houck, 1994. "On the use of nonstationary penalty functions to solve nonlinear constrained optimization problems with GAs," in Proc. IEEE Int. Conf. Evolutionary Computing. Piscataway, NJ:IEEE ,579–584.
- [21] Kagiannas A.G., Askounis D.T., Psarras J., 2004. Power generation planning: a survey from monopoly to competition. IEE 26 (6), 413-426.
- [22] K.Q. Nguyen, 2008. Internalizing externalities into the capacity expansion planning: The case of electricity in Vietnam. Energy, 33(5), 740-746.
- [23] Linares P., C. Romero, 2000. A multiple criteria decision making approach for electricity planning in Spain: Economic versus environmental objectives. Operation Research Society, 51, 736-743.
- [24] Ministry of environment, energy & climate change, 2010. National Renewable Energy Action Plan in the scope of Directive 2009/28/EC
- [25] M. Shahidehpour, Hatim Yamin and Zuyi Li. Market operations in electric power systems: Forecasting, Scheduling, and Risk Management. John Wiley&Sons Inc.: New York, U.S.A., 2002.
- [26] Mitchell M., Holland J. and Forrest S., 1994. When will a genetic algorithm outperform hill climbing. In: Cowan J., Tesauro G. and Alspector J (eds). Advances

in Neural Information Processing Systems, 51-58. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.

- [27] N. Hansen, D.V. Arnold and A. Auger, 2013. Evolution Strategies. In Janusz Kacprzyk and Witold Pedrycz: Handbook of Computational Intelligence, Chapter 44, 871-898.
- [28] N. Hansen and A. Ostermeier, 2001. Completely Derandomized Self-Adaptation in Evolution Strategies. *Evolutionary Computation*, 9(2), 159-195.
- [29] N. Becker, D. Soloveitchik, M. Olshansky, 2011. Incorporating environmental externalities into the capacity expansion planning: An Israeli case study. *ECM*, 52(7), 2489-2494.
- [30] Nelder J. A. and Mead R., 1965. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*, 7, 308-313.
- [31] Rajesh et al. Least cost generation expansion planning with solar power using Differential Evolution algorithm. *Renewable Energy*, 85, 677-686.
- [32] Rechenberg I, 1965. Cybernetic solution path of an experimental problem. Royal Aircraft Establishment, Farnborough p. Library Translation 1122.
- [33] Rechenberg I, 1971. Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. Dr.-Ing. Thesis, Technical University of Berlin, Department of Process Engineering.
- [34] Rudolph G., 1990. Globale Optimierung mit parallelen Evolutionsstrategien. Diplomarbeit, Universität Dortmund, Fachbereich Informatik.
- [35] Rudolph G., 1992. On correlated mutations in evolution strategies. In Manner and Manderick [MM92], 105-114.
- [36] R. Hemmadi, R.A Hooshmand, A. Khodabakhshian, 2013. Reliability constrained generation expansion planning with consideration of wind farms uncertainties in deregulated electricity market. *ECM*, 76, 517-526.

- [37] Schwefel H-P., 1965. Kybernetische Evolution als Strategie der experimentellen Forschung in der Stromungstechnik. Master's thesis, Technical University of Berlin.
- [38] Schwefel H-P., 1975. Evolutionsstrategie und numerische Optimierung. Dissertation, TU Berlin, Germany.
- [39] Schwefel H-P., 1977. Numerische Optimierung von Computer-Modellen mittels der Evolutionsstrategie, Interdisciplinary systems research; 26. Birkhauser, Basel.
- [40] Schwefel H-P., 1981. Numerical Optimization of Computer Models. Wiley, Chichester, 1981.
- [41] Schwefel H-P, 1987. Collective phenomena in evolutionary systems. In: Checkland P and Kiss I (eds) Problems of Constancy and Change – the Complementarity of Systems Approaches to Complexity, Papers presented at the 31st Annual Meeting of the Int'l Soc. For General System Research, Vol. 2. Budapest, pp. 1025-1033. Int'l Soc. For General System Research.
- [42] Surry P. D. and Radcliffe N. J., 1997. The COMOGA method: Constrained optimization by multiobjective genetic algorithms. Constr. Cybern., 26(3).
- [43] S.H. Karaki, B. Farid, N. Al-Nakhl, K.A. Tarhini, 2002. Power generation expansion planning with environmental consideration for Lebanon. EPES, 24(8), 611-619.
- [44] S.H. Sevilgen, H.H. Erdem, B. Certin, A.V. Akkaya, A. Dagdas, 2005. Effect of economic parameters on power generation expansion planning. ECM, 46(11-12), 1780-1789.
- [45] S.M. Moghddas-Tafreshi, H.A. Shyaynfar, A. Saliminia Lahiji, A. Rabiee, J. Aghaei, 2001. Generation expansion planning in Pool market: A hybrid modified game theory and particle swarm optimization. ECM, 52, 1512-1519.
- [46] S. Kannan, S. Mary Raja Slochanal, P. Subbaraj, Narayana Prasad Padhy, 2004. Application of particle swarm optimization technique and its variants to generation expansion planning problem. EPSR, 70(3), 203-210.

- [47] S. Kannan Application and Comparison of Metaheuristic Techniques to Generation Expansion Planning Problem IEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL.20, NO. 1, FEBRUARY 2005.
- [48] S. Kazarlis and V. Petridis, 1998. “Varying fitness functions in genetic algorithms: Studying the rate of increase in the dynamic penalty terms,” in Parallel Problem Solving from Nature. Berlin, Germany: Springer, vol. 1498, Lecture Notes in Comput. Sci., pp. 211–220.
- [49] T.S. Chung, Y.Z. Li, Z.Y. Wang, 2004. Optimal Generation Expansion Planning via improved genetic algorithm approach. IEE, vol. 26(8), pg. 655-659
- [50] Thomas P. Runarsson and Xin Yao, 2000. Stochastic Ranking for Constrained Evolutionary Optimization. Evolutionary Computation, 4(3), 274-283
- [51] Thomas P. Runarsson, 2002. Reducing random fluctuations in mutative self-adaptation. Parallel Problem Solving from Nature (PPSN II), Lecture notes in Computer Science. Spring-Verlang, Berlin, 194-203
- [52] Thomas P. Runarsson and Xin Yao, 2002. Continuous Selection and Self-Adaptive Evolution Strategies. IEEE Congress on Evolutionary Computation, Honolulu, 279-284.
- [53] Thomas P. Runarsson and Xin Yao, 2005. Search Biases in Constrained Evolutionary Optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Man and Cybernetics, 4(3), 274-283
- [54] Thomas P. Runarsson and Xin Yao, 2002. Chapter 4. Constrained Evolutionary Optimization: the penalty function approach. Evolutionary Optimization. Kluwer Academic Publishers, USA.
- [55] Thomas Back, 1996. Evolutionary Algorithms in Theory and Practice, evolution strategies, evolutionary programming, genetic algorithms. Oxford University Press, NY.
- [56] Wolpert D. H. and Macready W. G., 1997. No free lunch theorems for optimization. Evolutionary Computation, 1(1), 67-82.
- [57] Ανεξάρτητος διαχειριστής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Α.Δ.Μ.Η.Ε), 2014. Δεκαετές Πρόγραμμα ανάπτυξης συστήματος μεταφοράς 2015-2024.
- [58] Ανεξάρτητος διαχειριστής μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας (Α.Δ.Μ.Η.Ε), 2010. Μελέτη ανάπτυξης συστήματος μεταφοράς περιόδου 2010-2014.

- [59] Ιωάννης Γ. Πεταλάς, 2008. Μιμικτικοί και εξελικτικοί αλγόριθμοι στην αριθμητική βελτιστοποίηση και στη μη γραμμική δυναμική. Διδακτορική Διατριβή, Παν. Πάτρας.
- [60] Κ.Χ. Γιαννάκογλου, 2012. Μέθοδοι Αιτιοκρατικής και Στοχαστικής Βελτιστοποίησης και Εφαρμογές. ΕΜΠ.
- [61] Μανουσάκης Γεώργιος, 2005. Οικογένειες αλγορίθμων βελτιστοποίησης μη γραμμικών συναρτήσεων. Διδακτορική Διατριβή, Παν. Πάτρας.
- [62] Υπουργείο Περιβάλλοντος, Ενέργειας και Κλιματικής Αλλαγής, 2012. Εθνικός Ενεργειακός Σχεδιασμός: Οδηγός χάρτης για το 2050.
- [63] Φωτεινός Διονύσιος, 2007. Ανάπτυξη ενός έμπειρου συστήματος για την επιλογή των βέλτιστων υπάρχουσών τεχνολογιών κατασκευής/εγκατάστασης βιομηχανικών μονάδων και βελτιστοποίηση των παραμέτρων της επιλεχθείσας τεχνολογίας με την χρήση ενός γενετικού αλγόριθμου. Διδακτορική Διατριβή, Παν. Πάτρας.

10 ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

Πειραματικές Παρατηρήσεις

Για την επίλυση του προβλήματος της συγκεκριμένης εργασίας δοκιμάστηκαν πέντε από τις μεθόδους που έχουν αναφερθεί στο κεφάλαιο 4. Δοκιμάστηκε η επίλυση με χρήση της `Fmincon` από την βιβλιοθήκη της Matlab, της SRES, της 'GRES', της 'IGRES' και της ISRES. Ανάλυση των αποτελεσμάτων και αναλυτική εξήγηση της συμπεριφοράς κάθε μιας από τις πιο πάνω θα ξέφευγαν από τα πλαίσια της συγκεκριμένης εργασίας. Όμως για λόγους πληρότητας αναφέρεται ότι:

Η επίλυση με την χρήση της `Fmincon` απαιτούσε αρχικοποίηση των μεταβλητών σχεδιασμού. Αυτό είχε σαν αποτέλεσμα πολλές φορές το αρχικό σημείο που οριζόταν να απορρίπτεται από την συνάρτηση και η εντολή αναζητούσε για άλλο. Αν κατάφερνε να εντοπίσει σημείο το οποίο αξιολογούσε ως 'άξιο', δεν μπορούσε να εγγυηθεί ότι η τελική λύση δεν ήταν τοπικό ακρότατο.

Οι υπόλοιπες μέθοδοι αναφέρεται στην βιβλιογραφία να είχαν δοκιμαστεί σε συναρτήσεις ελέγχου (test functions) οι οποίες όμως δεν είχαν μεγάλο αριθμό μεταβλητών σχεδιασμού και περιορισμών. Η δυνατότητα εφαρμογής αλλά και απόδοση τους σε ένα GEP δεν ήταν εξασφαλισμένη και για αυτόν το λόγο θεωρήθηκε απαραίτητο να εξεταστούν και να συγκριθούν πριν γίνει η επιλογή. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα των υπολοίπων μεθόδων, παρατηρήθηκαν κυρίως διαφορές ως προς την ταχύτητα σύγκλισης, την αξιοπιστία εύρεσης λύσης αλλά και την ποιότητα λύσης. Η ISRES έδειξε να υπερτερεί της SRES ως προς την αξιοπιστία και την ταχύτητα σύγκλισης ενώ η μέθοδος χειρισμού των περιορισμών SR έδειξε να εξασφαλίζει ποιοτικότερες λύσεις από την αντίστοιχη GR.

Μεγάλη επιρροή στην απόδοση αποδείχτηκε να έχουν και οι παράμετροι των μεθόδων. Μεταβολή του αριθμού απογόνων, αλλαγή της αναλογίας γονείς/απόγονοι, μεταβολή του άνω ορίου ή της τάξης μεγέθους των αρχικών τιμών των τυπικών αποκλίσεων, αλλαγή των μεταβλητών φ^* , α , γ , ή αλλαγή του κριτηρίου τερματισμού οδηγούν σε διαφορετικές συμπεριφορές ως προς την σύγκλιση.

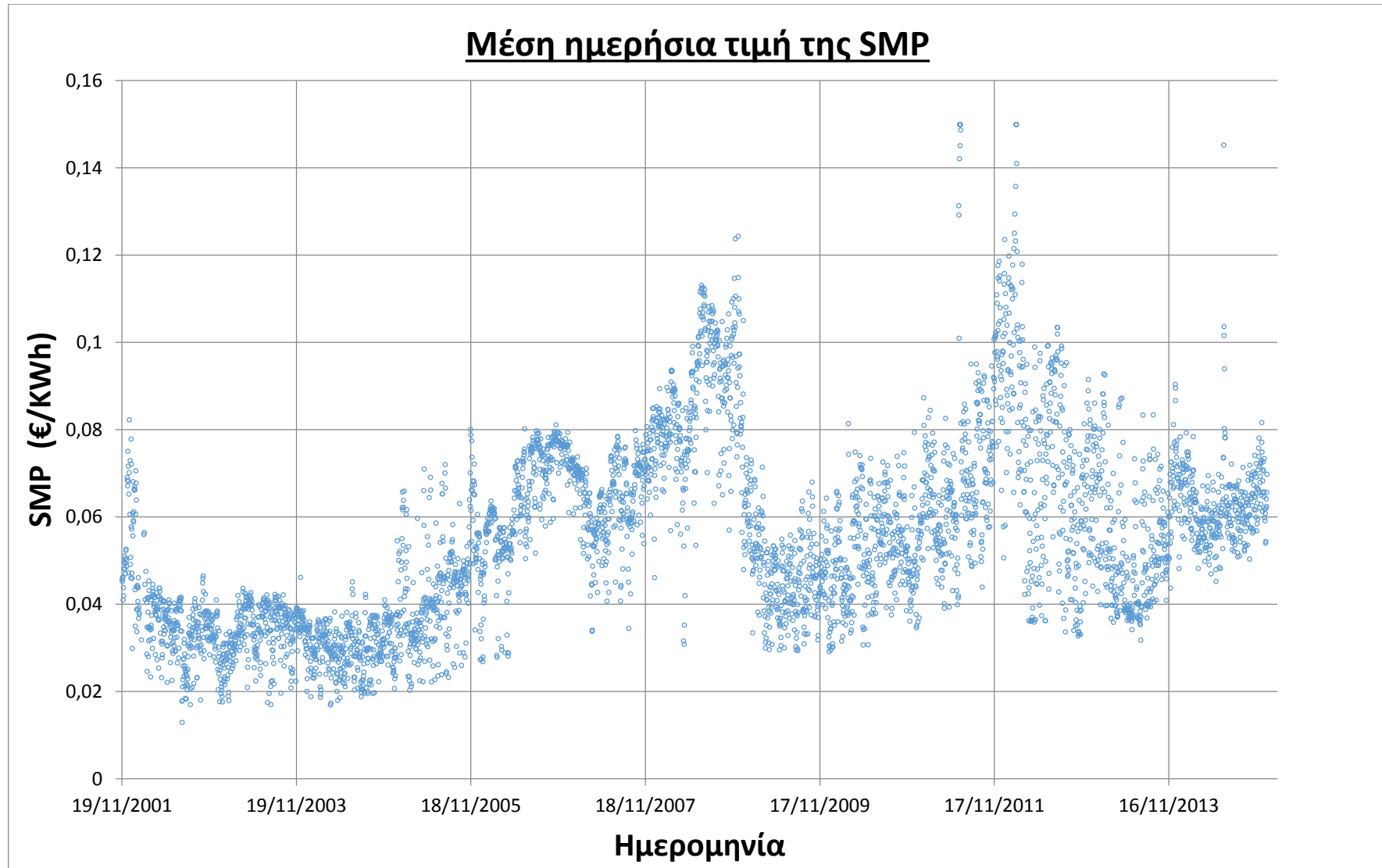
Προφανώς ο υπολογιστικός χρόνος και των 4 αυτών μεθόδων ήταν αρκετά μεγαλύτερος από το χρόνο που χρειαζόταν η εντολή `Fmincon`, δοσμένου ενός 'καλού'

αρχικού σημείου, να συγκλίνει. Παρ' ολ' αυτά προκύπταν λύσεις με χρήση της ISRES που απέδιδαν καλύτερα αποτελέσματα από αυτά της Fmincon, που πιθανό να οφείλεται στην απαίτηση ενός αρχικού σημείου, γεγονός που συνάδει με την θεωρία που αναλύθηκε στο κεφάλαιο 4.

Στο σημείο αυτό δοκιμάστηκε η εισαγωγή της τελικής λύσης του ISRES σαν αρχικό σημείο της Fmincon συνδυασμός που λειτουργεί σαν μια μορφή υβριδισμού. Το αποτέλεσμα ήταν μια σχετική περεταίρω βελτίωση της λύσης αυτής. Το μέγεθος της βελτίωσης αυτής έδειξε να εξαρτάται από τον αριθμό επαναλήψεων της ISRES, καθώς αυτό είχε οριστεί σαν κριτήριο τερματισμού. Αναλυτικότερα, αν η τελική λύση της IGRES είχε περιθώρια να βελτιωθεί με την πρόσδοση μερικών ακόμη επαναλήψεων η Fmincon πετύχαινε την βελτίωση αυτή σε μικρότερο χρονικό διάστημα από ότι θα απαιτείτο από την ISRES. Εδώ εμφανίζεται όμως και ένα ουσιαστικό ερώτημα, πόσο υπολογιστικό χρόνο διατίθεται ο χρήστης να αφιερώσει ώστε να πετύχει μια πιο ποιοτική λύση;. Ένας συνδυασμός των δυο μεθόδων, όπου θα γίνεται σκόπιμη κατανομή των βαρών υπολογιστικό κόστος-ποιότητα λύσης και θα λαμβάνονται υπόψιν οι απαιτήσεις για επίλυση του προβλήματος, για ποιοτική λύση αλλά και του χρήστη, θα είχε ιδιαίτερο ενδιαφέρον.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10-1 Η ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΖΗΤΗΣΗ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10-2 Η ΜΕΣΗ ΗΜΕΡΗΣΙΑ ΤΙΜΗ ΤΗΣ SMP

Πίνακας τεχνοοικονομικών στοιχείων	Natural Gas	Lignite	Oil	Low Head Hydro	Medium & High Head Hydro	Hydro Pumped-Storage	Biomass	Solar PV	CSP	Onshore Wind Turbine	Offshore wind turbine	Geothermy
Κόστος Επένδυσης με έτος βάσης το 2014(€/kW _{el})	690	2100	1100	2500	2000	3400	3700	2700	4760	1300	2800	2200
Σταθερό Κόστος με έτος βάσης το 2014(€/kW _{el})	14	39	38	30	25	50	19	15	45	23	35	32
Συντελεστής Διαθεσιμότητας	0.75	0.85	0.75	0.8	0.85	0.92	0.75	0.9	0.9	0.9	0.9	0.7
Συντελεστής Διαθεσιμότητας Φορτίου	0.65	0.75	0.8	0.45	0.34	0.4	0.8	0.35	0.35	0.25	0.25	0.9
Συντελεστής τεχνολογικής βελτίωσης	0.01	0.01	0.01	0	0	0	0.15	0.15	0.15	0.1	0.08	0
Χρόνος κατασκευής	2	4	3	9	9	9	3	1	2	1	2	2
Τύπος καυσίμων	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	10	12
Συντελεστής απόδοσης	0.57	0.37	0.31	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Συντελεστής εκπομπής CO ₂ της τεχνολογίας (i) (ισοδύναμος τόνους CO ₂ /MWh _{fuel})	0.21	0.41	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Χρόνος ζωής εγκατάστασης (έτη)	35	45	45	45	45	45	20	25	25	25	25	25

ΠΙΝΑΚΑΣ 10-1 ΠΙΝΑΚΑΣ ΤΕΧΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

