



Δ.Π.Μ.Σ. στην «Οργάνωση και Διοίκηση Βιομηχανικών Συστημάτων» με κατεύθυνση:

«Συστήματα Διαχείρισης Ενέργειας και Προστασίας Περιβάλλοντος»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ:

Σχεδιασμός της επέκτασης του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής της Μήλου.

Εκμετάλλευση του γεωθερμικού δυναμικού για κλιματισμό.



ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Μαυρωτάς Γεώργιος, Επίκουρος Καθηγητής Σχολής Χημικών Μηχανικών, Τομέας ΙΙ, Εργαστήριο Βιομηχανικής και Ενεργειακής Οικονομίας

ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ: Κουρεμπελέ Μαρία

ΑΘΗΝΑ 2010

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Βιομηχανικής και Ενεργειακής Οικονομίας, της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Πρωτίστως, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επίκουρο Καθηγητή Γιώργο Μαυρωτά, για την υποστήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια, για τις γνώσεις, τις ιδέες που μου μετέφερε καθώς και το ενδιαφέρον που μου καλλιέργησε για επιστημονική αναζήτηση.

Η διπλωματική αυτή εργασία, αποτελεί επέκταση δημοσιευμένης εργασίας στο περιοδικό Operational Research International Journal (Kourempele et al. 2010), που εκπονήθηκε στα πλαίσια συνεργασίας μου με το Γιώργο Μαυρωτά, τον Επίκουρο Καθηγητή του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Στέλιο Ροζάκη και τη Διδάκτωρ του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Γερονικολού Λουκία. Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Καθηγητή Στέλιο Ροζάκη, που έδωσε το έναυσμα για αυτή τη συνεργασία, για την πολύτιμη βοήθεια του, καθώς και τη Λουκία για τα δεδομένα που μου διέθεσε.

Θα ήθελα επίσης να αναφερθώ στον εκλιπόντα Καθηγητή Λευτέρη Παπαγιαννάκη, έναν σπουδαίο άνθρωπο και επιστήμονα, που με μύησε στον κλάδο των οικονομικών και μου έδωσε τα εφόδια για την επαγγελματική μου σταδιοδρομία και τη ζωή μου γενικότερα, κατά τα πρώτα μου βήματα μετά την αποφοίτηση μου από τη σχολή χημικών μηχανικών.

Τέλος, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στους γονείς μου, για την εμπύχωση και τη βοήθεια τους, καθόλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Κουρεμπελέ Μαρία

27/06/10

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ.....	5
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	6
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	8
1.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ	8
1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ	9
1.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΚΓΠ.....	10
2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ.....	13
2.1 Η ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ (AUGMENTED E-CONSTRAINT).....	13
2.1.1 Αλληλεπιδραστική διύλιση των κατά Pareto ικανών λύσεων.....	15
2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (REFERENCE POINT METHOD).....	17
2.3 ΑΣΑΦΗΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ.....	18
3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ.....	21
4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ - ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	23
4.1 ΓΕΝΙΚΑ	23
4.2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ	24
4.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ	27
4.3.1 Κόστος	27
4.3.2 Εκπομπές CO ₂	28
4.3.3 Μεγιστοποίηση του LAMDA.....	28
4.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ.....	29
4.4.1 Περιορισμός κάλυψης της ζήτησης.....	29
4.4.2 Περιορισμός κάλυψης του περιθωρίου ασφαλείας του συστήματος	30
4.4.3 Περιορισμός δυναμικότητας μονάδων.....	30
4.4.4 Περιορισμός λειτουργίας μονάδων.....	31
4.4.5 Περιορισμοί δυναμικότητας τεχνολογιών ΑΠΕ	31
4.4.6 Περιορισμοί μικτού αέριου προγραμματισμού	32
5. ΨΥΚΤΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ.....	33
5.1 Η ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΜΗΛΟΥ	33
5.2 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ	35
5.3 ΣΕΝΑΡΙΟ ΧΡΗΣΗΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΨΥΞΗΣ	37
6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	46
6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ (AUGMENTED E-CONSTRAINT)	46
6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (REFERENCE POINT INTERACTIVE PROCESS).....	56
7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΩΝ	58
7.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΚΓΠ.....	58
7.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 1 ΚΑΙ 2	60
8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	63
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	65
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.....	68
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.....	69
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.....	70

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.....	72
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.....	73
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ.....	75

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΡΔΙΑΣ

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΑΒΛΗΤΩΝ

Παράμετροι

$tf(p)$ ο αριθμός των ωρών που χαρακτηρίζει την p περιοχή της Καμπύλης Διάρκειας Φορτίου(ΚΔΦ) (h)
 d το περιθώριο ασφαλείας του συστήματος ως ποσοστό επί της αιχμής της ζήτησης
 r επιτόκιο αναγωγής
 $e(i)$ συντελεστής εκπομπής CO₂ για το καύσιμο i (tons CO₂ / MWhth)
 $invcost(j)$ κόστος επένδυσης της τεχνολογίας j (€/MW)
 $varcost(i,nr)$ μεταβλητό κόστος κατανάλωσης καυσίμου i από την τεχνολογία $nr(j)$ (€/MWh)
 $fixed(j)$ σταθερό κόστος λειτουργίας και συντήρησης της τεχνολογίας j (€/MW)
 $av(j)$ συντελεστής διαθεσιμότητας των μονάδων με τεχνολογία j (h/y)
 $cons(i,nr)$ κατανάλωση του καυσίμου i από την τεχνολογία $nr(j)$ (tons/MWh)
 $hu(i)$ κατώτερη θερμογόνο δύναμη του καυσίμου i (MWhth/ton)
 $b(j,t)$ συνολική εγκατεστημένη ισχύς της τεχνολογίας j , που υπάρχει ήδη στην αρχή του χρονικού ορίζοντα σχεδιασμού και εξακολουθεί να λειτουργεί το έτος t (MW)
 $dp(t,p)$ τιμή αναφοράς της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος για την περιοχή p της ΚΔΦ του χρόνου t (MW)
 $toler(t,p)$ ανώτατο όριο ασφαλείας της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος ίσο με το 10% της τιμής αναφοράς $dp(t,p)$ για την περιοχή p της ΚΔΦ του χρόνου t (MW)

Συνεχείς μεταβλητές

$AI(j,t)$ πρόσθετη εγκατεστημένη ισχύς της τεχνολογίας j , την t -υποπερίοδο (MW)
 $PW(j,t,p)$ η συνεχής μεταβλητή που εκφράζει την παραγωγή σε MW της μονάδας με τεχνολογία j , την t -υποπερίοδο, στην p -περιοχή της ΚΔΦ (MW)
LAMDA
Ο βαθμός ικανοποίησης της επιπλέον ζήτησης ή αλλιώς ο βαθμός ανταπόκρισης στην ενδεχόμενη αυξημένη ζήτηση που λαμβάνει τιμές στο διάστημα [0,1]

Ακέραιες μεταβλητές

$NSTEAM(t)$ ο αριθμός των νέων μονάδων ατμοστρόβιλων την t -υποπερίοδο [0,1,...,10]
 $NGAS(t)$ ο αριθμός των νέων μονάδων αεριοστρόβιλων την t -υποπερίοδο

Δείκτες

t χρονική περίοδος (έτη): $t = 1, \dots, Nt$ και $Nt=15$
 p ο αριθμός των περιοχών της ΚΔΦ: $p = 1, \dots, Np$ και $Np=8$
 i αντιπροσωπεύει τα είδη καυσίμων: $i=1$ heavy fuel oil, $i=2$ diesel oil
 j αντιπροσωπεύει τις τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής:
 $j=1$ παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης, $j=2$ φωτοβολταϊκά, $j=3$ ανεμογεννήτριες, $j=4$ αεριοστρόβιλοι, $j=5=Nj$ ατμοστρόβιλοι
 $nr(j)$ αντιπροσωπεύει τις συμβατικές τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής που εκμεταλλεύονται μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας:
 $j=1$ παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης, $j=4$ αεριοστρόβιλοι, $j=5$ ατμοστρόβιλοι
 $peak(p)$ αντιπροσωπεύει τις περιοχές της ΚΔΦ που ανήκουν στο φορτίο αιχμής, $peak(p)=1,2,3,4$ στο σενάριο 1 / $peak(p)=1,2,3$ στο σενάριο 2
 $middle(p)$ αντιπροσωπεύει τις περιοχές της ΚΔΦ που ανήκουν στο μέσο φορτίο, $middle(p)=5,6,7$ στο σενάριο 1 / $middle(p)=4,5,6$ στο σενάριο 2
 $base(p)$ αντιπροσωπεύει τις περιοχές της ΚΔΦ που ανήκουν στο φορτίο βάσης, $base(p)=8$ στο σενάριο 1 / $base(p)=7$ στο σενάριο 2

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο ενεργειακός σχεδιασμός είναι η επιλογή των βέλτιστων τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής και των απαιτούμενων δυναμικοτήτων τους, για μία περιοχή, με σκοπό την ικανοποίηση της προβλεπόμενης ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη κάποια κριτήρια. Ο Μαθηματικός Προγραμματισμός, και συγκεκριμένα ο Γραμμικός Προγραμματισμός (LP) αποτελεί εδώ και χρόνια ένα παραδοσιακό εργαλείο ενεργειακού σχεδιασμού, μονοκριτηριακών προβλημάτων και συγκεκριμένα προβλημάτων ελαχιστοποίησης κόστους (βλ. Kanragioglou 1980; 1987). Εντούτοις, τις τελευταίες δεκαετίες, λαμβάνονται σοβαρά υπόψη νέα κριτήρια εκτός από το κόστος όπως περιβαλλοντικά (μείωση αερίων του θερμοκηπίου και αερίων ρύπων), θέματα ασφάλειας ανεφοδιασμού και μείωσης εξωτερικής εξάρτησης μιας χώρας. Προκειμένου όλα αυτά τα κριτήρια να ληφθούν υπόψη κατά τον ενεργειακό σχεδιασμό, χρησιμοποιείται ως εργαλείο λήψης αποφάσεων, ο Πολυκριτηριακός Γραμμικός Προγραμματισμός¹ (ΠΚΓΠ). Σε πρόσφατη έρευνα, παρουσιάζεται η εξέλιξη της Πολυκριτηριακής Λήψης Αποφάσεων (MCDM) στον ενεργειακό σχεδιασμό, εξετάζοντας τα προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι Επιχειρήσεις Ηλεκτρισμού και οι υπόλοιποι αποφασίζοντες (Diakoulaki et al., 2005).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι ο σχεδιασμός της επέκτασης του αυτόνομου συστήματος ηλεκτροπαραγωγής της Μήλου, ο οποίος επιλύθηκε με χρήση του ΠΚΓΠ.

Το πεδίο εφαρμογής του ΠΚΓΠ μπορεί να διευρυνθεί σημαντικά με διαχείριση ακεραίων μεταβλητών εκτός από συνεχών. Η μετατροπή ενός προβλήματος ΠΚΓΠ σε Μικτό Ακέραιο ΠΚΓΠ, προσφέρει τη δυνατότητα ενσωμάτωσης διακριτών μεγεθών (οικονομίες κλίμακας, λογικές συνθήκες, σταθερά κόστη κ.τ.λ.) (Manrotas et al., 2008). Στο πρόβλημα μας ακέραιες μεταβλητές, θεωρήθηκαν οι μεταβλητές πρόσθετης εγκατεστημένης ισχύος αμμοστρόβιλων και αεριοστρόβιλων, λόγω τεχνικών περιορισμών που δεν τους επιτρέπουν να λάβουν συνεχείς τιμές.

Με γνώμονα την αειφορία το μοντέλο ενεργειακού σχεδιασμού που αναπτύχθηκε περιλαμβάνει τις εξής αντικειμενικές συναρτήσεις: ελαχιστοποίηση κόστους και μείωση των εκπομπών CO₂. Επιπροσθέτως, προκειμένου να αντιμετωπιστεί η αβεβαιότητα που πηγάζει από την πρόβλεψη ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου κατά τη διάρκεια του ορίζοντα σχεδιασμού, ενσωματώθηκαν στο μοντέλο μας ασαφείς παράμετροι. Η μέθοδος επίλυσης του συγκεκριμένου προβλήματος μετά την ενσωμάτωση αυτών των παραμέτρων γίνεται με την

¹ Η αγγλική ορολογία είναι Multi Objective Linear Programming (MOLP)

προσθήκη μιας τρίτης αντικειμενικής συνάρτησης, τη μεγιστοποίηση του βαθμού ικανοποίησης της αυξημένης ζήτησης. Έτσι καταλήγουμε σε μοντέλο τριών κριτηρίων.

Ως μέθοδοι επίλυσης του μοντέλου επιλεχθήκαν μια μέθοδος παραγωγής που ονομάζεται επαυξημένη μέθοδος των περιορισμών (augmented ϵ -constraint) και μια αλληλεπιδραστική μέθοδος, η μέθοδος σημείου αναφοράς (reference point). Στην πρώτη περίπτωση παράχθηκε ένα μεγάλος αριθμός ικανών λύσεων του προβλήματος και προκειμένου να διευκολυνθεί η επιλογή του αποφασίζοντα (DM) μεταξύ αυτών, χρησιμοποιήθηκε ακολούθως η μέθοδος αλληλεπιδραστικής διύλισης (interactive filtering method).

Τέλος, στον ενεργειακό σχεδιασμό είναι πολύ σημαντικό να λαμβάνονται υπόψη τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της υπό εξέταση περιοχής. Η Μήλος έχει σημαντικό γεωθερμικό δυναμικό και για το λόγο αυτό εξετάστηκε η αντικατάσταση των συμβατικών κλιματιστικών από ψυκτικές μηχανές απορρόφησης σε ξενοδοχεία, οι οποίες θα εκμεταλλεύονται γεωθερμία χαμηλής ενθαλπίας. Έτσι, αναπτύχθηκαν δύο διαφορετικά σενάρια, στο πρώτο ο κλιματισμός των ξενοδοχείων γίνεται με χρήση ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ στο δεύτερο με εκμετάλλευση της γεωθερμικής ενέργειας, που έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αιχμής της ζήτησης ηλεκτρικού φορτίου κατά τους καλοκαιρινούς μήνες.

Η παρούσα εργασία αποτελείται από οκτώ κεφάλαια. Στην εισαγωγή περιγράφεται ο μαθηματικός προγραμματισμός με πολλαπλά κριτήρια, ενώ στο δεύτερο κεφάλαιο το μεθοδολογικό πλαίσιο που περιλαμβάνει τις δύο μεθόδους επίλυσης ΠΚΓΠ που χρησιμοποιήθηκαν, καθώς και τον ασαφή μαθηματικό προγραμματισμό. Στο κεφάλαιο 3 γίνεται η περιγραφή της μελέτης περίπτωσης για το νησί της Μήλου και στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται η μαθηματική μοντελοποίηση του προβλήματος. Στο κεφάλαιο 5 αναπτύσσεται το σενάριο χρήσης ψυκτικών μηχανών απορρόφησης. Στο κεφάλαιο 6 γίνεται η παρουσίαση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων επίλυσης και στο κεφάλαιο 7 η σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο μεθόδων και των δύο εναλλακτικών σεναρίων. Τέλος στο κεφάλαιο 8 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα που αφορούν στις μεθόδους επίλυσης ΠΚΓΠ, στο βέλτιστο συνδυασμό των πηγών ενέργειας του νησιού και στη χρήση των ψυκτικών μηχανών απορρόφησης.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ ΜΕ ΠΟΛΛΑΠΛΑ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΤΟΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ

Ένας από τους βασικότερους τομείς της Επιχειρησιακής Έρευνας είναι ο Μαθηματικός Προγραμματισμός, όπου το υπό εξέταση σύστημα περιγράφεται με ένα μαθηματικό μοντέλο στο οποίο επιχειρείται η βελτιστοποίηση μίας ή περισσότερων αντικειμενικών συναρτήσεων (κριτήρια βελτιστοποίησης), εφαρμόζοντας συγκεκριμένους περιορισμούς που εκφράζονται με μαθηματικές σχέσεις (Μαυρωτάς, 2000).

Βασικό χαρακτηριστικό των πρώτων μεθόδων του μαθηματικού προγραμματισμού ήταν η επίλυση των προβλημάτων και η συνακόλουθη λήψη αποφάσεων επιδιώκοντας την εύρεση της βέλτιστης λύσης. Η βέλτιστη λύση αποτελεί χαρακτηριστικό των μονοκριτηριακών προβλημάτων (με ένα κριτήριο απόφασης, μία αντικειμενική συνάρτηση) όπως είναι αυτά του Γραμμικού Προγραμματισμού (ΓΠ), ο οποίος αποτέλεσε και το πιο δημοφιλές εργαλείο της Επιχειρησιακής Έρευνας. Καθώς όμως κόσμος εισέρχεται στην εποχή της πληροφορίας, οι νέες τάσεις στην αντιμετώπιση των σημερινών, πολύπλοκων προβλημάτων καθιστούν αναγκαία τη θεώρηση περισσότερων του ενός κριτηρίων. Έτσι δημιουργήθηκε η ανάγκη για ένα νέο τομέα, τη λήψη αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια (Multiple Criteria Decision Making) η οποία αναπτύχθηκε κυρίως μετά το 1970 και μάλιστα αποτέλεσε το ταχύτερα αναπτυσσόμενο πεδίο της Επιχειρησιακής Έρευνας τη δεκαετία του 1970 (Μαυρωτάς, 2000). Ο Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός (ΠΚΜΠ) ή Μαθηματικός Προγραμματισμός με πολλαπλά κριτήρια (Multiple Objective Mathematical Programming) αποτελεί τον κλάδο εκείνο της λήψης αποφάσεων με πολλαπλά κριτήρια, που ασχολείται με τη δημιουργία και επίλυση μοντέλων μαθηματικού προγραμματισμού με περισσότερες από μία αντικειμενικές συναρτήσεις (Μαυρωτάς, 2000).

Ο Πολυκριτηριακός Γραμμικός Προγραμματισμός (ΠΚΓΠ) αποτελεί τον κλάδο του Πολυκριτηριακού Μαθηματικού Προγραμματισμού όπου οι σχέσεις του μοντέλου είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης. Η επίλυση των προβλημάτων ΠΚΓΠ είναι αρκετά πιο πολύπλοκη σε σχέση με τα αντίστοιχα προβλήματα ΓΠ και εμπλέκουν άμεσα τον αποφασίζοντα στη διαδικασία εύρεσης της προτιμότερης λύσης. Το βασικότερο χαρακτηριστικό των προβλημάτων ΠΚΓΠ είναι ότι δεν υπάρχει μια αντικειμενικά βέλτιστη

λύση η οποία προκύπτει από τη διαδικασία επίλυσης (όπως στο ΓΠ), αλλά ένα σύνολο υποψηφίων για αποδοχή λύσεων (ικανές λύσεις), οι οποίες υπολογίζονται και μεταξύ αυτών, καλείται ο αποφασίζων να επιλέξει την καλύτερη σύμφωνα με βάση τις προτιμήσεις του (σχετικά «βέλτιστη» λύση) (Μαυρωτάς, 2000).

Μεταξύ των πρώτων εφαρμογών του ΠΚΓΠ (MOLP) στον ενεργειακό σχεδιασμό είναι οι Cohon, 1978; Zionts και Deshpande, 1981; Kavrakoglu και Kiziltan, 1983.; Schulz και Stephest 1984; Quaddus και Goh, 1985; Και Teghem και Kunsch, 1985. Τα μοντέλα ΠΚΓΠ, εξακολουθούν να αναπτύσσονται και να εφαρμόζονται προκειμένου να συμπεριληφθούν περιβαλλοντικές και κοινωνικές ανησυχίες στις αποφάσεις που αφορούν σε ενεργειακά ζητήματα (βλ. Chattopadhyay, 1995; Clímaco et al., 1995; Martins et al., 1996; Mavrotas et al., 1999; Hobbs and Meier 2000; Linares and Romero, 2000; Linares and Romero 2002; Antunes and Martins 2003; Oliveira and Antunes, 2003; Antunes et al., 2004).

1.2 ΜΕΘΟΔΟΙ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΩΝ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΟΥ ΓΡΑΜΜΙΚΟΥ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΥ

Στην πρώτη κατηγορία μεθόδων επίλυσης ΠΚΓΠ ανήκουν οι μέθοδοι a priori, στις οποίες ο αποφασίζων είναι σε θέση να συγκεκριμενοποιήσει απόλυτα τις προτιμήσεις του πριν τη διαδικασία επίλυσης. Αυτό γίνεται είτε καθορίζοντας a priori τη σημαντικότητα των κριτηρίων είτε καθορίζοντας κάποιες τιμές στόχους για τα κριτήρια.

Τη δεύτερη κατηγορία μεθόδων αποτελούν οι μέθοδοι παραγωγής (generation methods). Σύμφωνα με τις μεθόδους αυτές, παράγεται πρώτα το σύνολο ή κάποιο αντιπροσωπευτικό υποσύνολο των ικανών λύσεων του προβλήματος και στη συνέχεια καλείται ο αποφασίζων να εκφράσει τις προτιμήσεις του. Το μειονέκτημα των μεθόδων αυτών είναι η δυσκολία εφαρμογής τους σε μεγάλα προβλήματα, λόγω του αυξημένου υπολογιστικού φορτίου που καθιστούν τον υπολογισμό του συνόλου των ικανών λύσεων πολύ χρονοβόρο ή και αδύνατο. Επιπλέον στα μεγάλα προβλήματα, το αυξημένο πλήθος των ικανών λύσεων που παράγονται, δυσχεραίνει την επιλογή της τελικής λύσης από τον αποφασίζοντα. Με την εξέλιξη όμως των υπολογιστικών δυνατοτήτων των ηλεκτρονικών υπολογιστών, οι χρόνοι παραγωγής του συνόλου των ικανών λύσεων έχουν μειωθεί σημαντικά. Το πλεονέκτημά των μεθόδων αυτών, είναι ότι παρέχουν πλήρη πληροφόρηση στον αποφασίζοντα, ενώ δεν απαιτείται η εμπλοκή του στο πρώτο στάδιο, της παραγωγής των ικανών λύσεων η οποία γίνεται απολύτως αντικειμενικά.

Στην τρίτη κατηγορία μεθόδων ανήκουν οι αλληλεπιδραστικές (interactive methods) που ονομάζονται έτσι λόγω της άμεσης εμπλοκής και καθοδήγησης του αποφασίζοντα στη διαδικασία επίλυσης. Οι αλληλεπιδραστικές μέθοδοι χαρακτηρίζονται από φάσεις διαλόγου με τον αποφασίζοντα που εναλλάσσονται με φάσεις υπολογισμών από το πρόγραμμα. Είναι επαναληπτικές διαδικασίες όπου η αλληλεπίδραση μεταξύ αποφασίζοντα και μεθόδου συνεχίζεται μέχρι να ικανοποιηθεί κάποιο κριτήριο σύγκλισης και να βρεθεί η τελική λύση (Μαυρωτάς, 2000).

1.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΠΚΓΠ

Σε αυτή την παράγραφο παρουσιάζονται κάποιες βασικές έννοιες των προβλημάτων ΠΚΓΠ που θα συναντήσουμε και σε επόμενα κεφάλαια.

Το πρόβλημα του ΠΚΓΠ μαθηματικά ορίζεται ως εξής:

$$\max \{c_1 x = z_1 \}$$

$$\max \{c_2 x = z_2 \}$$

.....

$$\max \{c_p x = z_p \}$$

$$\text{s.t. } x \in S = \{x \in \mathbb{R}^n, Ax = b, x \geq 0, b \in \mathbb{R}^m \}$$

S: το εφικτό χωρίο των περιορισμών

n: ο αριθμός των μεταβλητών

m: ο αριθμός των περιορισμών

p: ο αριθμός των αντικειμενικών συναρτήσεων

c_i : το διάνυσμα γραμμής των συντελεστών της 'i' αντικειμενικής συνάρτησης

z_i : η τιμή της 'i' αντικειμενικής συνάρτησης

A : η μήτρα ($m \times n$) των τεχνολογικών συντελεστών

b : το διάνυσμα ($m \times 1$) των σταθερών όρων (δεξί σκέλος περιορισμών)

x : το διάνυσμα ($n \times 1$) των μεταβλητών απόφασης

Μεταβλητές απόφασης: Μεγέθη του προβλήματος για τα οποία πρέπει να υπολογιστούν οι τιμές τους.

Παράμετροι: Γνωστά μεγέθη του προβλήματος (μήτρα \mathbf{A} , διανύσματα \mathbf{b} και \mathbf{c}_i).

Αντικειμενικές συναρτήσεις: Συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης, των οποίων επιδιώκεται η βελτιστοποίηση.

Περιορισμοί: Είναι οι διάφορες σχέσεις (ισότητες ή ανισότητες) που πρέπει να πληρούν οι μεταβλητές απόφασης και οριοθετούν το εφικτό χωρίο S .

Λύση: συνδυασμός των τιμών που λαμβάνουν οι μεταβλητές απόφασης.

Ικανή λύση (efficient, non-dominated solution): Μία λύση \mathbf{x}' ενός προβλήματος ΠΚΓΠ λέγεται ικανή (ή κατά Pareto άριστη, ή αποτελεσματική) αν και μόνο αν $\mathbf{x}' \in S$ και δεν υπάρχει άλλη λύση $\mathbf{x} \in S$ τέτοια ώστε $c_i \mathbf{x} \geq c_i \mathbf{x}'$ για κάθε $i=1, 2, \dots, p$ και $c_i \mathbf{x} > c_i \mathbf{x}'$ για τουλάχιστον ένα i .

Κάθε ικανή λύση αντιστοιχεί σε ένα μη βελτιώσιμο διάνυσμα στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων, με την έννοια ότι δεν μπορούμε να βελτιώσουμε την τιμή μιας αντικειμενικής συνάρτησης χωρίς να χειροτερεύσουμε τουλάχιστον μία από τις άλλες.

Ικανή ακραία λύση (efficient extreme solution): Μια ικανή λύση ενός προβλήματος ΠΚΓΠ που αντιστοιχεί σ' ένα ακραίο σημείο του εφικτού χωρίου του προβλήματος (κορυφή) λέγεται ικανή ακραία λύση. Μία ακραία λύση αντιστοιχεί σε ακραίο σημείο και στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων.

Τελική ή σχετικά βέλτιστη λύση (final or best compromise solution): Η ικανή εκείνη λύση που τελικά επιλέγει από το σύνολο των ικανών λύσεων ο αποφασίζων, λέγεται τελική ή σχετικά βέλτιστη λύση. Ο όρος «σχετικά» σημαίνει ακριβώς ότι αποτελεί υποκειμενική επιλογή του αποφασίζοντα σε αντίθεση με τη βέλτιστη λύση σε ένα πρόβλημα ΓΠ που είναι αντικειμενικά προσδιοριζόμενη.

Πίνακας πληρωμών ή πίνακας τιμών (payoff table): Είναι ο τετραγωνικός πίνακας που αποτελείται από τόσες γραμμές και στήλες όσες και οι αντικειμενικές συναρτήσεις του προβλήματος ΠΚΓΠ. Σε κάθε στήλη αριστοποιείται μεμονωμένα μια αντικειμενική συνάρτηση και οι τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων που προκύπτουν (τόσο αυτής που αριστοποιήθηκε όσο και των υπολοίπων) τοποθετούνται στις σειρές του πίνακα. Στη διαγώνιο του πίνακα τιμών μπορούμε να διαβάσουμε τις συντεταγμένες του ιδεώδους σημείου. Στην παρούσα εργασία ο πίνακας πληρωμών προέκυψε με λεξικογραφική αριστοποίηση που αποτελεί βελτίωση της παραπάνω διαδικασίας και περιγράφεται στην παράγραφο 2.1.

Ιδεώδες σημείο (ideal point): Ιδεώδες σημείο (ή ιδεώδες διάνυσμα, ideal vector) στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων, ορίζεται το σημείο εκείνο που έχει ως συντεταγμένες τα άριστα των αντικειμενικών συναρτήσεων όπως αυτά προκύπτουν από τις μεμονωμένες αριστοποιήσεις. Συνήθως πρόκειται για σημείο που αντιστοιχεί σε μη εφικτή λύση (δεν υπάρχει εφικτή λύση που να αριστοποιεί συγχρόνως όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις). Συχνά αναφέρεται και ως σημείο ουτοπίας (utopia point). Το ιδεώδες σημείο χρησιμοποιείται συνήθως ως σημείο αναφοράς για να διερευνηθεί η προσέγγιση σ' αυτό των ικανών λύσεων (Μαυρωτάς, 2000).

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1 Η ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗ ΜΕΘΟΔΟΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ (AUGMENTED E-CONSTRAINT)

Μια εκ των μεθόδων παραγωγής των ικανών λύσεων είναι η μέθοδος των περιορισμών (e-constraint method). Κατά τη μέθοδο αυτή επιλέγεται μία αντικειμενική συνάρτηση και οι υπόλοιπες μετατρέπονται σε περιορισμούς του προβλήματος, ανάλογα με την κατεύθυνση της αριστοποίησής τους. Αν δηλαδή μία αντικειμενική συνάρτηση είναι προς μεγιστοποίηση, τότε μετατρέπεται σε περιορισμό «μεγαλύτερο ή ίσο», ενώ αν πρόκειται να ελαχιστοποιηθεί μετατρέπεται σε περιορισμό «μικρότερο ή ίσο».

Οι παρακάτω εξισώσεις περιγράφουν την παραπάνω μέθοδο.

$$\max z_1(\mathbf{x})$$

st

$$z_2(\mathbf{x}) \geq e_2$$

$$z_3(\mathbf{x}) \geq e_3 \quad (1)$$

...

$$f_p(\mathbf{x}) \geq e_p \quad (\text{Mavrotas, 2006})$$

Το πρόβλημα επιλύεται μεταβάλλοντας συστηματικά το δεξί σκέλος των περιορισμών των αντικειμενικών συναρτήσεων, «σαρώνοντας» το σύνολο των ικανών λύσεων. Το πρώτο βήμα για την εύρεση των τιμών για τη μεταβολή του δεξιού σκέλους RHS, είναι ο υπολογισμός του εύρους των τιμών της i αντικειμενικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται ως περιορισμός, από τον πίνακα πληρωμών (εύρεση μέγιστων και ελάχιστων τιμών). Το εύρος διαιρείται με την παράμετρο ενδιάμεσων σημείων g_i (grid point parameter), παράγοντας (g_i+1) τιμές για το δεξί σκέλος, e_i . Το πρόβλημα επιλύεται $(g_2+1)(g_3+1)\dots(g_p+1)$ φορές. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή της παραμέτρου g_i , τόσο πιο πυκνό είναι το χωρίο των ικανών λύσεων, σε βάρος όμως του χρόνου επίλυσης του προβλήματος (Μαυρωτάς, 2000).

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε η **επαυξημένη** μέθοδος των περιορισμών (augmented e-constraint), η οποία αντιμετωπίζει δύο σημεία που χρειάζονται προσοχή στην απλή μέθοδο των περιορισμών, την αποτελεσματικότητα των παραγόμενων λύσεων και το εύρος των τιμών που λαμβάνουν οι αντικειμενικές συναρτήσεις στο εφικτό χωρίο (κυρίως τον υπολογισμό των χειρότερων (nadir) τιμών) (Mavrotas, 2006).

Το πρώτο πρόβλημα συνοψίζεται ως εξής: η άριστη λύση του προκύπτοντος προβλήματος ΓΠ αποτελεί ικανή λύση, μόνο εάν όλοι οι περιορισμοί που προκύπτουν από τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις ικανοποιούνται ως ισότητες (binding constraints). Εάν δε συμβαίνει αυτό και υπάρχουν εναλλακτικά άριστα, τότε η άριστη λύση που θα βρεθεί μπορεί να μην αποτελεί ικανή λύση του προβλήματος ΠΚΓΠ (Μαυρωτάς, 2000). Η επαυξημένη μέθοδος των περιορισμών αντιμετωπίζει αυτό το πρόβλημα με τη μετατροπή των αντικειμενικών συναρτήσεων σε ισότητες, μέσω της ενσωμάτωσης πρόσθετων μεταβλητών (slack or surplus variables) που χρησιμοποιούνται και ως δευτερός όρος (με χαμηλότερη προτεραιότητα) στην αντικειμενική συνάρτηση (Μαυρωτάς, 2006).

Έτσι οι παραπάνω εξισώσεις μετατρέπονται ως εξής:

$$\max (z1(\mathbf{x}) + eps \times (s2 / r2 + s3 / r3 + \dots + sp / rp))$$

st

$$z2(\mathbf{x}) - s2 = e2$$

$$z3(\mathbf{x}) - s3 = e3 \quad (2)$$

...

$$zr(\mathbf{x}) - sp = ep$$

$\mathbf{x} \in S$ and $sp \in \mathbf{R}^+$

οπού eps είναι ένας πολύ μικρός αριθμός (συνήθως μεταξύ 10^{-3} και 10^{-6}) και r_i είναι το εύρος της i αντικειμενικής συνάρτησης που χρησιμοποιείται ως περιορισμός, όπως υπολογίστηκε από τον πίνακα πληρωμών (payoff table) (Μαυρωτάς, 2006).

Το δεύτερο πρόβλημα της μεθόδου είναι η εξασφάλιση της παραγωγής αποκλειστικά ικανών λύσεων κατά τον υπολογισμό του πίνακα πληρωμών και αντιμετωπίζεται με τη λεξικογραφική αριστοποίηση (lexicographic optimization). Ο όρος αυτός αναφέρεται σε μια αριστοποίηση προβλημάτων ΠΚΓΠ κατά στάδια. Στο πρώτο στάδιο αριστοποιείται η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση. Αν υπάρχουν εναλλακτικά άριστα αναζητείται μεταξύ αυτών αυτό που αριστοποιεί τη δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση (δεύτερο στάδιο). Με σταθερή δηλαδή την άριστη τιμή της πρώτης αντικειμενικής συνάρτησης επιδιώκεται η αριστοποίηση της δεύτερης. Στη συνέχεια με σταθερές τις τιμές της πρώτης και της δεύτερης αντικειμενικής συνάρτησης επιδιώκεται η βελτιστοποίηση της τρίτης κ.ο.κ. μέχρι την τελευταία αντικειμενική συνάρτηση. Το αποτέλεσμα της λεξικογραφικής αριστοποίησης για κάποια αντικειμενική συνάρτηση είναι η λύση εκείνη που αριστοποιεί τη συγκεκριμένη αντικειμενική συνάρτηση και παρουσιάζει τις καλύτερες δυνατές τιμές για τις υπόλοιπες αντικειμενικές συναρτήσεις με κάποια σειρά προτεραιότητας, παράγει δηλαδή μόνο ικανές λύσεις. Πρέπει να σημειωθεί ότι αν δεν υπάρχουν εναλλακτικά άριστες λύσεις για μία

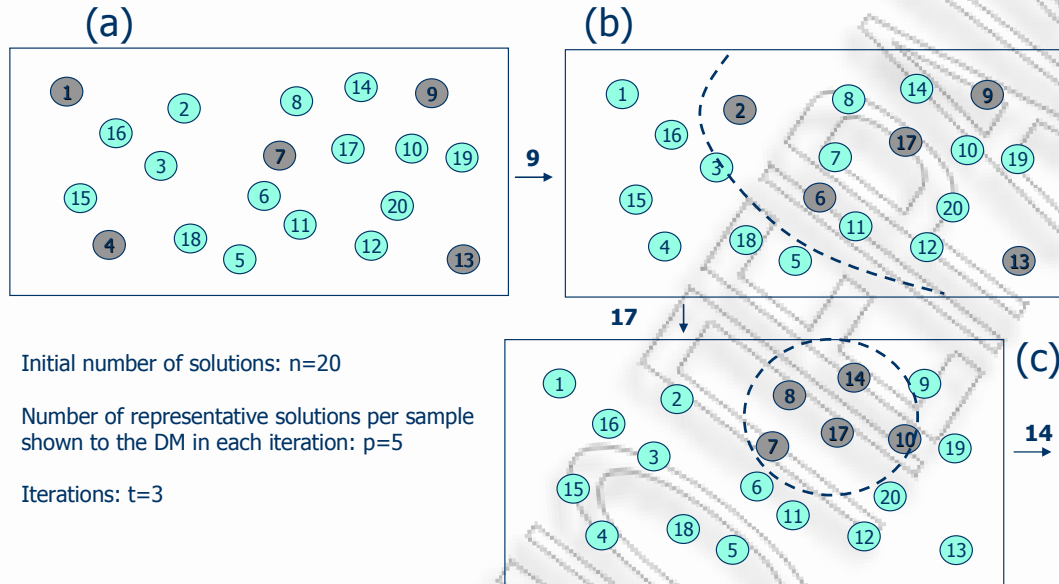
αντικειμενική συνάρτηση τότε το αποτέλεσμα της λεξικογραφικής αριστοποίησης ταυτίζεται με αυτό της απλής αριστοποίησης (Μαυρωτάς, 2000).

2.1.1 Αλληλεπιδραστική διύλιση των κατά Pareto ικανών λύσεων

Μετά την παραγωγή των κατά Pareto ικανών λύσεων, εφαρμόζεται η αλληλεπιδραστική διύλιση (interactive filtering). Η μέθοδος αυτή είναι μια επαναληπτική μέθοδος αναζήτησης, όπου ο αποφασίζων αλληλεπιδρά με το σύστημα και ανάλογα με τις απαντήσεις του κατευθύνει τη διαδικασία. Σε κάθε επανάληψη η περιοχή αναζήτησης συρρικνώνεται γύρω από την τελευταία προτίμηση του αποφασίζοντα, με αποτέλεσμα να εξετάζεται κάθε φορά ένα μικρότερο υποσύνολο λύσεων. Η διαδικασία ολοκληρώνεται με την εύρεση της προτιμότερης λύσης, έπειτα από καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων (Μαυρωτάς, 2000).

Στην πρώτη επανάληψη, το σύνολο των n ικανών λύσεων διυλίζεται με βάση τον αλγόριθμο “first point outside the neighborhood” (βλ. Steuer, 1989), έτσι ώστε να προκύψει ένα δείγμα p αντιπροσωπευτικών λύσεων (είναι συνήθως μεταξύ 3 και 7). Από το δείγμα αυτό ο αποφασίζων καλείται να επιλέξει την προτιμότερη λύση και η διαδικασία επαναλαμβάνεται για καθορισμένο αριθμό επαναλήψεων. Ο συντελεστής συρρίκνωσης του χώρου έχει σταθερή τιμή για όλες τις επαναλήψεις και καθορίζεται από τον αρχικό αριθμό των υπό εξέταση ικανών λύσεων n , το πλήθος του δείγματος p και τον αριθμό των επαναλήψεων q (Μαυρωτάς, 2000).

Σχηματικά παρουσιάζεται ένα ενδεικτικό παράδειγμα της μεθόδου στο Γράφημα 1.



Γράφημα 1: Γραφική αναπαράσταση της μεθόδου interactive filtering process

Στο πρόβλημα που απεικονίζεται ο αποφασίζων πρέπει να επιλέξει την προτιμότερη μεταξύ 20 ικανών λύσεων Pareto (Γράφημα 1a). Το αντιπροσωπευτικό δείγμα υπολογίζεται βάση του αλγόριθμου “first point outside the neighbourhood” και περιλαμβάνει 5 λύσεις, 1, 4, 7, 9 και 13 (απεικονίζονται ως σκούροι κύκλοι). Έστω ότι ο DM επιλέγει τη λύση 9. Στη συνέχεια ο χώρος συρρικνώνεται γύρω από τη λύση 9 (διακεκομμένη γραμμή Γράφημα 1b). Τώρα, το αντιπροσωπευτικό δείγμα αποτελείται από τις λύσεις 2, 6, 9, 13 και 17 όπως υπολογίστηκε από τη μέθοδο. Έστω ότι ο αποφασίζων επιλέξει τη λύση 17. Στην τελευταία επανάληψη, ο χώρος συρρικνώνεται γύρω από τη λύση 17 (διακεκομμένη γραμμή Γράφημα 1c). Οι πέντε λύσεις 7, 8, 10, 14, 17 παρουσιάζονται στον αποφασίζων και αυτός επιλέγει τη λύση 14 που είναι και το τελικό αποτέλεσμα (η προτιμότερη λύση Pareto). Περισσότερες λεπτομέρειες σχετικές με την αλληλεπιδραστική διύλιση βρίσκονται στον Steuer (1989, p. 314-318).

2.2 ΜΕΘΟΔΟΣ ΣΗΜΕΙΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (REFERENCE POINT METHOD)

Η αλληλεπιδραστική μέθοδος επίλυσης πολύ-κριτηριακών προβλημάτων, που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία, στηρίζεται σε μέθοδο που αναπτύχθηκε από τον Wierzbicki το 1982 και ανήκει στις μεθόδους σημείου αναφοράς (reference point method). Έκτοτε έχουν αναπτυχθεί αρκετές παραλλαγές της. Βασική ιδέα είναι ο καθορισμός ενός προσδοκώμενου σημείου αναφοράς (aspiration or reference point) zr στο χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Το σημείο αυτό προβάλλεται στο περίγραμμα του συνόλου των εφικτών λύσεων επιλύοντας το πρόβλημα ελαχιστοποίησης της σταθμισμένης απόστασης Tchebycheff του σημείου zr από το εφικτό χωρίο. Η συνάρτηση προβολής λέγεται achievement scalarizing function, που αποδίδεται ως συνάρτηση σταθμισμένης επίτευξης. Αν η προβολή του zr στο σύνολο των ικανών λύσεων δεν ικανοποιεί τον αποφασίζοντα συνεχίζει τη διαδικασία, ορίζοντας ένα νέο προσδοκώμενο σημείο επίτευξης zr' και συνεχίζει τη διαδικασία (Vanderpooten and Vincke, 1989).

Η βελτιστοποίηση της σταθμισμένης συνάρτησης(s) (scalarising function) πρέπει να πληροί τις παρακάτω προϋποθέσεις:

- η s πρέπει να παράγει μόνο ικανές λύσεις
- όλες οι εφικτές λύσεις μπορούν να παραχθούν από την s .

Για τους παραπάνω λόγους, επιλέγεται η συνάρτηση σταθμισμένης επίτευξης που προκύπτει από την επαυξημένη σταθμισμένη Tchebychev:

$$s(z, zr) = \max_{i=1, \dots, p} \{|\lambda_i(zr_i - z_i)|\} - rho \cdot \sum_{i=1}^p \lambda_i \cdot z_i$$
$$\lambda_i = \frac{1}{z_i^* - n_i} \quad (3)$$

όπου:

zr σημείο αναφοράς που αντιπροσωπεύει το προσδοκώμενο σημείο,

p αριθμός κριτηρίων (αντικειμενικών συναρτήσεων),

z_i^* μέγιστη τιμή του κριτηρίου i (ideal point),

n_i ελάχιστη τιμή του κριτηρίου i , στο εφικτό χωρίο των λύσεων (nadir point)

rho ένας μικρός θετικός αριθμός

Τελικά η σταθμισμένη συνάρτηση ελαχιστοποιείται $\min s(z, zr)$ και παράγεται η λύση. Η παραγόμενη λύση που είναι ίση με $\min \max_{i=1, \dots, p} \{|\lambda_i(zr_i - z_i)|\}$, αντιπροσωπεύει την απόσταση d , εκφράζεται δηλαδή ως ποσοστό που δείχνει την απόδοση του προσδοκώμενου

σημείου σε σχέση με κάθε αντικειμενική συνάρτηση. Η παραγόμενη λύση μπορεί να εκφραστεί και σαν απόλυτη τιμή, αλλά η έκφραση της ως ποσοστό διευκολύνει την επιλογή του αποφασίζοντα σε κάθε επανάληψη της διαδικασίας (Rozakis et al., 2001).

2.3 ΑΣΑΦΗΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΟΣ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑΤΙΣΜΟΣ

Ο βασικότερος περιορισμός των προβλημάτων ενεργειακού σχεδιασμού είναι η κάλυψη της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας. Εντούτοις, η μελλοντική ζήτηση δεν μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα. Προκειμένου να λάβουμε υπόψη αυτήν την αβεβαιότητα² χρησιμοποιούμε τη θεωρία των ασαφών συνόλων (fuzzy set theory) και το πρόβλημα μας μετατρέπεται σε πρόβλημα Ασαφούς Γραμμικού Προγραμματισμού (Μαυρωτάς, 2000).

Όταν το μοντέλο Ασαφούς ΓΠ του προβλήματος περιλαμβάνει αποκλειστικά σαφείς παραμέτρους και η ασάφεια βρίσκεται μόνο στην ικανοποίηση των περιορισμών (χαλαροί περιορισμοί) όπως στο πρόβλημα μας, τότε το αντίστοιχο πρόβλημα *ασαφούς προγραμματισμού* αποκαλείται πρόβλημα *ελαστικού προγραμματισμού* (flexible programming) (βλ. Lai and Hwang, 1992 ; Rommelfanger, 1996).

Η ασάφεια ως προς την ικανοποίηση του περιορισμού της ζήτησης εκφράζεται στο πρόβλημα μας θεωρώντας το δεξί σκέλος του περιορισμού (παράμετρος της ζήτησης) ασαφή αριθμό (βλ. παράγραφο 4.4.1). Ο ασαφής αριθμός x , έχει τιμή αναφοράς την τιμή $dp_{i,p}$ (κατώτατη τιμή) και ανώτατο όριο ανοχής $toler_{i,p}$. Η διαβάθμιση της συμμετοχής ενός στοιχείου x , σ' ένα ασαφές σύνολο A , παριστάνεται στο διάστημα από 0 (καθόλου συμμετοχή) έως 1 (πλήρης συμμετοχή) και χαρακτηρίζεται από τη *συνάρτηση συμμετοχής* (membership function) η οποία συμβολίζεται με $\mu(x) \in [0,1]$ (Μαυρωτάς, 2000).

² Είναι διαφορετική από την τυχαιότητα (randomness) που αντιμετωπίζεται με τη θεωρία των πιθανοτήτων. Η αβεβαιότητα λόγω ασάφειας έχει να κάνει με το κατά πόσο συμμετέχει ένα αντικείμενο σε ένα ασαφές σύνολο ενώ η αβεβαιότητα λόγω τυχαιότητας με το αν συμμετέχει ή όχι ένα αντικείμενο σε ένα σαφές σύνολο (Μαυρωτάς, 2000).

Για χαλαρούς περιορισμούς της μορφής '>≈' όπως στο πρόβλημα μας, η συνάρτηση συμμετοχής ορίζεται ως:

$$\mu(x) = \left. \begin{cases} 1 & x > dp + toler \\ f(x, dp, toler) & dp + toler \geq x \geq dp \\ 0 & x < dp \end{cases} \right\} \quad (4)$$

(Μαυρωτάς, 2000; Mavrotas et al., 2008).

Σύμφωνα με την παραπάνω μοντελοποίηση, το εφικτό χωρίο των λύσεων καθίσταται ασαφές χωρίο αφού εξαρτάται από το βαθμό ικανοποίησης του χαλαρού περιορισμού της ζήτησης που με τη σειρά του εξαρτάται από την τιμή της συνάρτησης συμμετοχής. Η μεθοδολογία αντιμετώπισης αυτών των προβλημάτων είναι η μετατροπή τους σε πολυκριτηριακά προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού με προσθήκη του κριτηρίου μεγιστοποίησης του βαθμού ικανοποίησης των χαλαρών περιορισμών δηλαδή της συνάρτησης συμμετοχής μ (ή LAMDA). Το μονοκριτηριακό πρόγραμμα ΓΠ μετατρέπεται στο ΠΚΓΠ:

$$\begin{aligned} \min z_1 &= cX \\ \max z_2 &= \mu \\ \text{s.t.} \\ a_f X &\geq dp + \mu toler && \text{όπου } f = 1 \\ a_k X &\geq b_k && \text{όπου } k = 1, \dots, n-1 \\ 1 &\geq \mu \geq 0 \\ X_1, X_2, \dots, X_n &\geq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

Όπου στην πρώτη εξίσωση, c είναι το διάνυσμα των συντελεστών των σαφών αντικειμενικών συναρτήσεων και X το διάνυσμα των μεταβλητών ($1 \dots n$). Η δεύτερη εξίσωση απεικονίζει την αντικειμενική συνάρτηση της μεγιστοποίησης της συνάρτησης συμμετοχής. Οι περιορισμοί χωρίζονται στους χαλαρούς (στην προκειμένη περίπτωση είναι ένας) και στους σαφείς περιορισμούς ($k=1 \dots n-1$). Στους σαφείς περιορισμούς με a_k συμβολίζονται τα διανύσματα των μεταβλητών και με b_k οι παράμετροι στο δεξί σκέλος των περιορισμών (RHS), ενώ με a_f απεικονίζεται το διάνυσμα του ασαφούς περιορισμού (Mavrotas et al., 2008).

Το μ εκφράζει το βαθμό ικανοποίησης του κάθε περιορισμού. Επιλύοντας το παραπάνω πρόβλημα παραμετρικά με παράμετρο το μ λαμβάνεται η μεταβολή της τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης σε συνάρτηση με τη μεταβολή της παραμέτρου. Η μεταβολή της παραμέτρου συνήθως γίνεται βηματικά και σε κάθε βήμα επιλύεται το αντίστοιχο πρόβλημα ΓΠ και λαμβάνεται η ελάχιστη τιμή για το z . Για παράδειγμα αν θεωρήσουμε βήμα μεταβολής για το LAMDA το 0.1 πρέπει να επιλυθούν 11 προβλήματα ΓΠ ($\mu = 0, 0.1, 0.2, \dots, 1.0$).

3. ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Η παρούσα μελέτη περίπτωσης αναφέρεται στην επέκταση του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής για το νησί της Μήλου, την περίοδο 2007-2021. Η Μήλος βρίσκεται στο νοτιοδυτικό τμήμα των Κυκλάδων, με επιφάνεια 151 τετραγωνικά χιλιόμετρα και πληθυσμό γύρω στους 5000 κατοίκους, που κατοικούν σε 7 χωριά στο βόρειο τμήμα του νησιού. Ο πληθυσμός διπλασιάζεται το καλοκαίρι.

Οι ανάγκες σε ηλεκτρική ενέργεια, καλύπτονται αυτή τη στιγμή, 1) από μία θερμοηλεκτρική μονάδα της ΔΕΗ που αποτελείται από παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης που χρησιμοποιούν μαζούτ σε ποσοστό 31% (HFO) και ντίζελ 69%, 2) ένα αιολικό πάρκο. Η εγκατεστημένη ισχύς των παραπάνω μονάδων είναι 17.3 MW και 2.9 MW αντιστοίχως (στοιχεία 2007). Η μέγιστη αποδιδόμενη ισχύς των παλινδρομικών μηχανών είναι 13.5 MW. Ισχύς 5MW από την συνολική ισχύ των παλινδρομικών μηχανών αφαιρείται στο 8^ο έτος του ορίζοντα σχεδιασμού λόγω παλαιότητας.

Η ηλεκτροπαραγωγή από ανεμογεννήτριες το έτος 2006 ήταν 6169 MWh, η οποία είναι αρκετά χαμηλή δεδομένου του πλούσιου αιολικού δυναμικού του νησιού. Το αιολικό δυναμικό έχει τα παρακάτω χαρακτηριστικά 1) $c = 6$ m/sec, 2) $k = 1.5$ 3) μέση ετήσια ταχύτητα του ανέμου = 7.1 m/sec. Οι πρώτες δύο παραπάνω παράμετροι είναι χαρακτηριστικές της καμπύλης Weibull, στην οποία απεικονίζονται οι συχνότητες κατανομής ταχυτήτων ανέμου (βλ. Παράρτημα Α) και η οποία συνδυάζεται με την καμπύλη ισχύος των ανεμογεννητριών για την εύρεση της παραγόμενης ενέργειας ενός αιολικού πάρκου.

Το γεωθερμικό δυναμικό του νησιού είναι εξαιρετικής σημασίας, αφού έχουν επιβεβαιωθεί ροές θερμότητας λόγω εισροής μάγματος, σε σχετικά χαμηλά βάθη. Πιο συγκεκριμένα στα πλαίσια ερευνητικού προγράμματος έγιναν γεωτρήσεις, εκ των οποίων οι πέντε φτάνουν σε βάθη 1000 – 1400 m με θερμοκρασία $T_{\text{reservoir}} = 320$ °C και μπορούν να αποδώσουν 300-400 t/h υγρό ατμό, σε θερμοκρασία άντλησης 180-230 °C. Το δυναμικό του πεδίου εκτιμήθηκε ότι ξεπερνά 20 MWe³. Εντούτοις, η γεωθερμία δε συμπεριελήφθη στο μοντέλο μας ως τεχνολογία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς έχει απορριφθεί από την τοπική κοινωνία. Κατά το παρελθόν έγινε προσπάθεια εκμετάλλευσης της από τη ΔΕΗ, κατά την οποία προκλήθηκαν εκρήξεις και εκλύσεις τοξικών αερίων που προκάλεσαν την ισχυρή εναντίωση της τοπικής κοινωνίας. Η γεωθερμία όμως εξετάστηκε, όπως αναλύεται στο

³ Δυναμικό σε ηλεκτρική ενέργεια

κεφάλαιο 5, ως εναλλακτική της κάλυψης των φορτίων ψύξης από το συμβατικό κλιματισμό, με σκοπό τη μείωση της αιχμής της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας το καλοκαίρι. Η κάλυψη των ψυκτικών φορτίων με χρήση της γεωθερμίας γίνεται μέσω της τεχνολογίας των ψυκτικών μηχανών απορρόφησης και δεν ενέχει κινδύνους αντίστοιχους με αυτούς που προαναφέρθηκαν καθώς δεν απαιτεί θερμότητα υψηλής ενθαλπίας.

Η συνολική ετήσια ακτινοβολία που δέχεται το νησί σε οριζόντιο επίπεδο είναι 1658 kWh/m².

Η Καμπύλη Διάρκειας Φορτίου στην οποία στηρίχτηκαν τα δεδομένα ζήτησης για ολόκληρο τον χρονικό ορίζοντα, ήταν διαθέσιμη μόνο για το έτος 2003 και απεικονίζεται στο Γράφημα 2 (δεδομένα της ΔΕΗ). Το έτος 2003 η εγκατεστημένη ισχύς των παλινδρομικών μηχανών και των ανεμογεννητριών ήταν 11 και 1.2 MW αντίστοιχως. Ως ετήσιοι ρυθμοί αύξησης της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος ελήφθησαν, 3% από το έτος 2003 έως το έτος 2006 και 5% για το 2007. Όσον αφορά τον χρονικό ορίζοντα σχεδιασμού 2007-2021 οι προβλεπόμενοι ρυθμοί αύξησης που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 5% για τα έτη 2007-2011 και 4% για τα έτη 2012-2021.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά υποψήφιων τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής

Μονάδα	Καύσιμο	Συντελεστής διαθεσιμότητας
Ατμοστρόβιλοι (NST)	HFO	0.82
Αεριοστρόβιλοι (NGT)	Diesel	0.78
Παλινδρομικές μηχανές	Diesel/HFO	0.78
Φωτοβολταϊκά	-	0.15
Ανεμογεννήτριες (NW)	-	0.3

Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται οι συντελεστές διαθεσιμότητας που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία (Πηγή: Manrotas and Diakoulaki, 2005). Στο μοντέλο GAMS οι συντελεστές διαθεσιμότητας υπολογίστηκαν σε ώρες (π.χ. 0.82*8760). Ο συντελεστής διαθεσιμότητας για τα φωτοβολταϊκά προκύπτει στην πράξη από έναν τυπικό συντελεστή για τα νησιά των Κυκλάδων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι επιλέχθηκε σταθερός συντελεστής διαθεσιμότητας για τις ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά, καθώς το μοντέλο μας είναι μοντέλο μακροπρόθεσμου ενεργειακού σχεδιασμού και όχι μοντέλο πιθανότητας έλλειψης φορτίου (Loss of Load Probability, (LOLP)) όπου η αβεβαιότητα προσδιορισμού του αιολικού δυναμικού και της ηλιακής ακτινοβολίας παίζουν πολύ σημαντικότερο ρόλο.

4. ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ - ΒΑΣΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το μοντέλο Μικτού Ακέραιου ΠΚΓΠ (MIMOLP) που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία, για τον ενεργειακό σχεδιασμό στο νησί της Μήλου, στοχεύει στη βέλτιστη χρήση των διαθέσιμων πηγών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη κριτήρια οικονομικά, περιβαλλοντικά, και ασφάλειας εφοδιασμού του συστήματος.

Τα μοντέλα Πολύ-κριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού αποτελούνται από αντικειμενικές συναρτήσεις και περιορισμούς που είναι γραμμικές συναρτήσεις των μεταβλητών απόφασης.

Συγκεκριμένα, οι αντικειμενικές συναρτήσεις που ενσωματώθηκαν στο μοντέλο μας, είναι η ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, η ελαχιστοποίηση των εκπομπών CO₂, και η μεγιστοποίηση του βαθμού ικανοποίησης της επιπλέον ζήτησης ενέργειας. Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση αντιπροσωπεύει την αυξανόμενη ανησυχία για τις εκπομπές CO₂, και ιδιαίτερα κάτω από το πρίσμα του Πρωτοκόλλου του Κιότο.

Οι περιορισμοί του μοντέλου μας, αποτελούνται από, περιορισμούς κάλυψης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από διάφορους τομείς (οικιακό, βιομηχανικό, εμπορικό κτλ.), τεχνολογικούς περιορισμούς της κάθε εναλλακτικής πηγής παραγωγής ενέργειας καθώς και περιορισμούς που προέρχονται από τις ιδιαιτερότητες του αυτόνομου συστήματος ηλεκτροπαραγωγής που εξετάζουμε. Η επιλογή και η μαθηματική μοντελοποίηση τους, βασίστηκε σε εργασία των Cormio, Dicorato Minoia και Trovato (Cormio et al., 2003) με αντικείμενο τον ενεργειακό σχεδιασμό αυτόνομου συστήματος ηλεκτροπαραγωγής, καθώς και στη διδακτορική διατριβή του Γ. Μαυρωτά (Μαυρωτάς, 2000).

Οι μεταβλητές απόφασης αφορούν στις ποσότητες, παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας και πρόσθετης εγκατεστημένης ισχύος ανά τεχνολογία. Η εγκατεστημένη ισχύς για δύο από τις πέντε τεχνολογίες που εξετάστηκαν, εκφράζεται από ακέραιες μεταβλητές, προκειμένου το μοντέλο μας να είναι πιο ρεαλιστικό. Μεταβλητή απόφασης αποτελεί επίσης και ο βαθμός ικανοποίησης της ζήτησης LAMDA.

Η μοντελοποίηση του προβλήματος στη γλώσσα προγραμματισμού GAMS, με την οποία και επιλύθηκε παρατίθεται στο Παράρτημα ΣΤ⁴.

⁴ Στο Παράρτημα ΣΤ, παρουσιάζονται και οι μαθηματικές εκφράσεις των δύο μεθόδων επίλυσης που χρησιμοποιήθηκαν και αναπτύχθηκαν στο κεφάλαιο 2.

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται, η Καμπύλη Διάρκειας Ηλεκτρικού Φορτίου από την οποία προκύπτουν τα δεδομένα της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας της Μήλου καθώς και οι μαθηματικές εκφράσεις των αντικειμενικών συναρτήσεων και των περιορισμών του μοντέλου μας.

4.2 ΚΑΜΠΥΛΗ ΔΙΑΡΚΕΙΑΣ ΦΟΡΤΙΟΥ

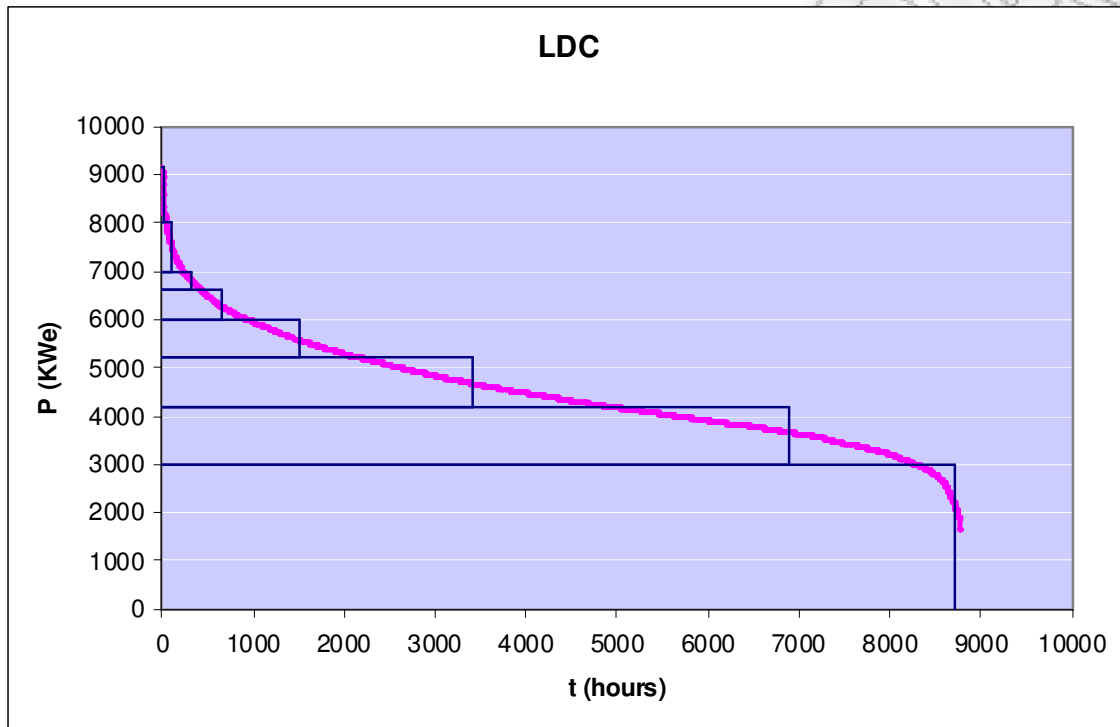
Το μοντέλο ΠΚΓΠ υπολογίστηκε για χρονικό ορίζοντα δεκαπενταετίας, από το 2007 μέχρι το 2021. Προκειμένου να καταστεί το μοντέλο δυναμικό ο χρονικός ορίζοντας θα χωριστεί σε 15 ίσες περιόδους(έτη). Η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας για μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο χαρακτηρίζεται από την αντίστοιχη Καμπύλη Διάρκειας Φορτίου (ΚΔΦ, Load Duration Curve), η οποία δείχνει για πόσες ώρες τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο, η απαιτούμενη ισχύς από το σύστημα ξεπερνάει μια συγκεκριμένη τιμή. Η Καμπύλη Διάρκειας Φορτίου της Μήλου του έτους 2003 (στο οποίο βασίστηκαν τα δεδομένα της ζήτησης για το έτος βάση, 2007), παρουσιάζεται στο Γράφημα 2.

Για τις ανάγκες της γραμμικής μοντελοποίησης, πραγματοποιήθηκε η γραμμική προσομοίωση της ΚΔΦ, δηλαδή η τελευταία περιγράφεται με ένα ιστόγραμμα το οποίο αποτελείται από n ορθογώνια τμήματα όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα, όπου $n=8$.

Κάθε ορθογώνιο τμήμα αντιπροσωπεύει μια περιοχή της γραμμικής προσομοίωσης της ΚΔΦ η οποία χαρακτηρίζεται από σταθερή ισχύ και εκτείνεται για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το εμβαδό κάθε περιοχής ισούται με την αντίστοιχη ηλεκτρική ενέργεια. Στην παρούσα εργασία, η αρίθμηση της ΚΔΦ ξεκινάει από το ανώτερο τμήμα, με τις τέσσερις πρώτες περιοχές να αντιπροσωπεύουν το φορτίο αιχμής⁵, τις επόμενες τρεις το ενδιάμεσο φορτίο και την κατώτερη, την περιοχή 8, το φορτίο βάσης. Στη γραμμική προσομοίωση της ΚΔΦ, το άθροισμα των εμβαδών των n περιοχών πρέπει να ισούται με τη συνολική απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια του συστήματος (εμβαδό κάτω από την ΚΔΦ). Όσο περισσότερες οι περιοχές της ΚΔΦ, τόσο ακριβέστερη η γραμμική προσομοίωση της (Μαυρωτάς, 2000).

⁵ Σε αντίθεση με αυτή την περιγραφή, ο όρος φορτίο αιχμής χρησιμοποιείται συχνά για να περιγράψει τη μέγιστη ζήτηση που είναι το άθροισμα όλων των περιοχών της ΚΔΦ (για οριζόντια γραμμικοποίηση). Με αυτή την έννοια θα χρησιμοποιηθεί και σε σημεία της παρούσας εργασίας.

Για να υπολογιστούν τα δεδομένα της ζήτησης για τα έτη 2007-2021 χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί ρυθμοί αύξησης για κάθε έτος, αλλά θεωρήθηκε ότι το σχήμα του ιστογράμματος παραμένει σταθερό και για τα 15 έτη.



Γράφημα 2: Γραμμική προσομοίωση της ΚΔΦ (LDC) του έτους 2003

Τα αποτελέσματα της ζήτησης μετά τη γραμμικοποίηση της ΚΔΦ, για το έτος 2007 παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Ζήτηση ισχύος για το έτος 2007

Περιοχή ΚΔΦ	Χρόνος (ώρες)	Ισχύς (KW) περίοδος 1 (2007)
Περιοχή 1 (φορτίο αιχμής)	19	1340
Περιοχή 2 (φορτίο αιχμής)	113	1147
Περιοχή 3 (φορτίο αιχμής)	320	459
Περιοχή 4 (φορτίο αιχμής)	645	688
Περιοχή 5 (ενδιάμεσο φορτίο)	1500	918
Περιοχή 6 (ενδιάμεσο φορτίο)	3417	1147
Περιοχή 7 (ενδιάμεσο φορτίο)	6896	1377
Περιοχή 8 (φορτίο βάσης)	8704	3442

4.3 ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΙΚΕΣ ΣΥΝΑΡΤΗΣΕΙΣ

4.3.1 Κόστος

Η πρώτη αντικειμενική συνάρτηση όπως προαναφέρθηκε είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους ηλεκτροπαραγωγής. Το κόστος επέκτασης της ηλεκτροπαραγωγής περιλαμβάνει τρεις συνιστώσες: Το λειτουργικό κόστος των μονάδων, που είναι ανάλογο της παραγωγής τους (μεταβλητό κόστος), το κόστος επένδυσης των νέων μονάδων που είναι ανεξάρτητο της παραγωγής τους (σταθερό κόστος) και το κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Για κάθε υποπερίοδο υπολογίζεται το κόστος ηλεκτροπαραγωγής ως άθροισμα των παραπάνω συνιστωσών και έπειτα ανάγεται σε τρέχουσες τιμές θεωρώντας ένα επιτόκιο αναγωγής $r=6\%$. Τα ανηγμένα κόστη κάθε υποπεριόδου προστίθενται προκειμένου να υπολογισθεί το συνολικό κόστος της ηλεκτροπαραγωγής. Η μαθηματική σχέση της αντικειμενικής συνάρτησης είναι η εξής:

$$\min \sum_{t=1}^{N_t} \frac{1}{(1+r)^t} \sum_{j=1}^{N_j} \text{invcost}_j \cdot AI_{j,t} + \sum_{t=1}^{N_t} \frac{1}{(1+r)^t} \sum_{j=1}^{N_j} \text{fixed}_j \cdot AI_{j,t} + \sum_{t=1}^{N_t} \frac{1}{(1+r)^t} \sum_{nr=1}^{Nnr} \text{var cost}_{t,nr} * \sum_{p=1}^{Np} PW_{nr,t,p} \cdot tf_p$$

(6)

Στην παραπάνω σχέση N_t είναι ο αριθμός των ετών του ορίζοντα σχεδιασμού ($N_t=15$), N_p είναι ο αριθμός των περιοχών της ΚΔΦ ($N_p=8$), N_j ο αριθμός των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής και Nnr ο αριθμός των τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Στον Πίνακα 3 αναφέρονται ενδεικτικά κόστη επένδυσης

Πίνακας 3: Κόστη επένδυσης και σταθερά κόστη λειτουργίας και συντήρησης

	Κόστος επένδυσης (€/MW)	Σταθερό κόστος λειτουργίας και συντήρησης (€/MW)
Μηχανές εσωτερικής καύσης (παλινδρομικές μηχανές)	1,000,000	30,000
Φωτοβολταϊκά συστήματα	6,000,000	4,920
Ανεμογεννήτριες	1,330,000	4,920
Αεριοστρόβιλοι	375,000	30,000
Ατμοστρόβιλοι	1,570,000	30,000

Το μεταβλητό κόστος υπολογίζεται από το γινόμενο του μοναδιαίου κόστους καυσίμου (€/tons) και του συντελεστή κατανάλωσης καυσίμου ανά μονάδα παραγόμενης

ηλεκτρικής ενέργειας $cons(i,nr)$ (tons/MWhe). Το κόστος καυσίμου θεωρήθηκε ότι αυξάνεται με ετήσιο ρυθμό 5%.

4.3.2 Εκπομπές CO₂

Η δεύτερη αντικειμενική συνάρτηση είναι η ελαχιστοποίηση των εκπομπών CO₂⁶, που παράγονται από συμβατικές τεχνολογίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κατά τη διάρκεια του ορίζοντα σχεδιασμού και εκφράζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\min \sum_{i=1}^{N_i} e_i \sum_{nr=1}^{N_{nr}} cons_{i,nr} \cdot hu_i \sum_{p=1,t=1}^{N_p,N_t} PW_{nr,t,p} \cdot tf_p \quad (7)$$

Όπου $e(i)$ είναι ο συντελεστής εκπομπών CO₂ σε tCO₂/MWth και είναι ίσος με 0.28 για το μαζούτ (HFO), και με 0.27 για το πετρέλαιο ντίζελ. Η Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη $Hu(i)$ του μαζούτ είναι 10.70 MWth/ton και του ντίζελ 11.90 MWth/ton.

4.3.3 Μεγιστοποίηση του LAMDA

Η τρίτη αντικειμενική συνάρτηση είναι η μεγιστοποίηση του βαθμού ικανοποίησης⁷ της επιπλέον ζήτησης και η μαθηματική της σχέση είναι:

$$\max LAMDA \quad (8)$$

⁶ Στην εφαρμογή της επαυξημένης μεθόδου των περιορισμών αυτή η αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται ως περιορισμός

⁷ Στην εφαρμογή της επαυξημένης μεθόδου των περιορισμών αυτή η αντικειμενική συνάρτηση χρησιμοποιείται ως περιορισμός

4.4 ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΙ

4.4.1 Περιορισμός κάλυψης της ζήτησης

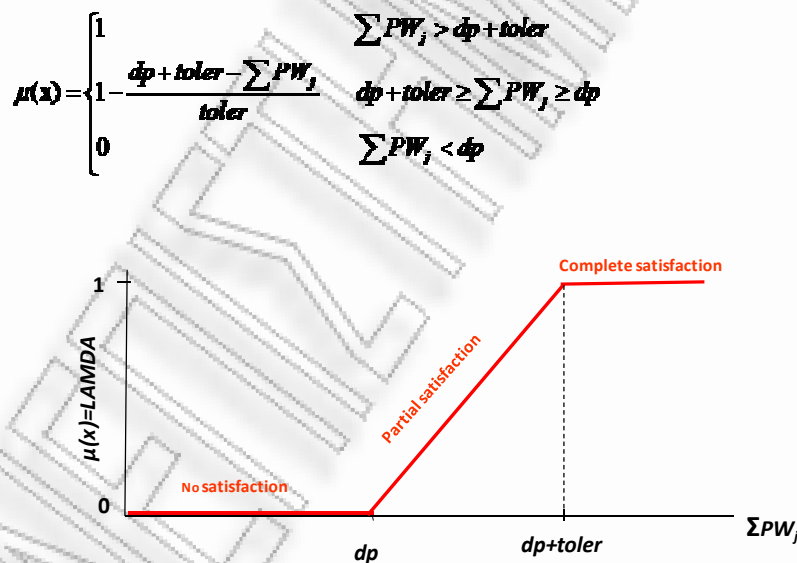
Το άθροισμα της παραγόμενης ισχύος όλων των μονάδων ηλεκτροπαραγωγής πρέπει να είναι ίσο με τη ζήτηση για κάθε περίοδο.

Όπως περιγράψαμε σε προηγούμενη παράγραφο, ο περιορισμός κάλυψης της ζήτησης εκφράζεται ως χαλαρός περιορισμός στην παρούσα εργασία, εξαιτίας της αβεβαιότητας που χαρακτηρίζει τη μελλοντική ζήτηση. Συγκεκριμένα, η ζήτηση κάθε περιόδου εκφράζεται σαν ασαφής αριθμός με τιμή αναφοράς ($dp_{t,p}$) και ανώτατο όριο ασφαλείας ($toler_{t,p}$), όπως φαίνεται στο δεξιό μέλος του παρακάτω περιορισμού.

$$\sum_{j=1}^{N_j} PW_{j,t,p} \geq dp_{t,p} + LAMDA \cdot toler_{t,p} \quad (9)$$

Για $t=1, \dots, N_t$ και $p=1, \dots, N_p$

Στο παρακάτω σχήμα απεικονίζεται γραφικά ο παραπάνω χαλαρός περιορισμός (τύπου \geq).



Γράφημα 3: Απεικόνιση του χαλαρού περιορισμού κάλυψης της ζήτησης

Το περιθώριο ασφαλείας ισούται με το 10% της τιμής αναφοράς της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κάθε περιόδου ($toler_{t,p} = 10 * dp_{t,p}$). Όσο υψηλότερη η τιμή της συνάρτησης συμμετοχής LAMDA, τόσο υψηλότερη η ασφάλεια στην ικανοποίηση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε περίοδο από το προτεινόμενο σύστημα παραγωγής.

4.4.2 Περιορισμός κάλυψης του περιθωρίου ασφαλείας του συστήματος

Το περιθώριο ασφαλείας είναι η διαφορά μεταξύ εγκατεστημένης ισχύος και μέγιστης απαιτούμενης ισχύος (αιχμή)⁸ που πρέπει να διαθέτει το σύστημα. Στη συγκεκριμένη περίπτωση το περιθώριο ασφαλείας του συστήματος τέθηκε στο 25% επί της αιχμής, για κάθε υποπερίοδο. Ο περιορισμός αυτός γράφεται ως εξής:

$$\sum_{j=1}^{N_j} (b_{j,t} + \sum_{y \leq t} AI_{j,y}) \geq (1+d) \cdot \left(\sum_{p=1}^{N_p} dp_{t,p} + LAMDA \cdot toler_{t,p} \right) \quad (10)$$

for $t=1, \dots, N_t$

4.4.3 Περιορισμός δυναμικότητας μονάδων

Οι περιορισμοί δυναμικότητας εκφράζουν το γεγονός ότι η παραγωγή των μονάδων δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από αυτή που υπαγορεύει η δυναμικότητα των μονάδων πολλαπλασιασμένη επί τον αντίστοιχο συντελεστή διαθεσιμότητας της μονάδας. Ο συντελεστής διαθεσιμότητας $av(j)$ (hours/year), εκφράζει τον αριθμό των ωρών ανά έτος που η μονάδα είναι διαθέσιμη να λειτουργήσει, και υπολογίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις χρονικές περιόδους συντήρησης και αστοχίας. Ο συντελεστής αυτός καθορίζει κατά συνέπεια τη μέγιστη παραγωγή ενέργειας της κάθε τεχνολογίας. Η μαθηματική σχέση του περιορισμού είναι η παρακάτω:

$$\sum_{p=1}^{N_p} (PW_{j,t,p} \cdot tf_p) \leq av_j \cdot (b_{j,t} + \sum_{y \leq t} AI_{j,y}) \quad (11)$$

Για $j=1,2,4,5$ και $t=1, \dots, N_t$

Στην περίπτωση της τεχνολογίας των ανεμογεννητριών στη θέση του συντελεστή διαθεσιμότητας $av(j)$ χρησιμοποιείται ο συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας (capacity factor). Ο συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας μετράει την παραγωγικότητα μιας ανεμογεννήτριας και καθορίζεται από το αιολικό δυναμικό της περιοχής και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της μηχανής (βλ. Παράρτημα Α). Δείχνει πόση ενέργεια παράγεται πραγματικά ως ποσοστό της ενέργειας που θα παραγόταν αν η αιολική μηχανή λειτουργούσε όλο το χρόνο (8760 ώρες) με την ονομαστική της ισχύ.

⁸ Το άθροισμα όλων των περιοχών της ΚΔΦ

Στην παρούσα εργασία, για τον υπολογισμό του συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας λάβαμε υπόψη και τις περιόδους συντήρησης (συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας*συντελεστής διαθεσιμότητας).

Όσον αφορά τον συντελεστή διαθεσιμότητας των φωτοβολταϊκών, καθορίζεται επίσης από τη διαθεσιμότητα της ηλιακής ακτινοβολίας και κατά συνέπεια βασίστηκε σε δεδομένα ηλιακής ακτινοβολίας της περιοχής.

4.4.4 Περιορισμός λειτουργίας μονάδων

Η παραγόμενη ισχύς κάθε τεχνολογίας δε μπορεί να ξεπερνά την αντίστοιχη εγκατεστημένη ισχύ:

$$\sum_{p=1}^{N_p} PW_{j,t,p} \leq b_{j,t} + \sum_{y \leq t} AI_{j,y} \quad (12)$$

Για $j=1, \dots, 12$, $t=1, \dots, N_t$ και $p=1, \dots, N_p$

4.4.5 Περιορισμοί δυναμικότητας τεχνολογιών ΑΠΕ

Οι δύο τεχνολογίες ΑΠΕ που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι οι ανεμογεννήτριες και τα φωτοβολταϊκά συστήματα.

Στα αυτόνομα συστήματα παραγωγής όπως στο νησί της Μήλου, η παραγωγή ισχύος των αιολικών πάρκων περιορίζεται στο 25% - 30% της αιχμής της ζήτησης εξαιτίας κάποιων περιορισμών λειτουργίας (σταθερότητα ηλεκτρικού συστήματος), παρόλο που το τεχνικά εκμεταλλεύσιμο δυναμικό μπορεί να ξεπερνάει κατά πολύ την παραπάνω τιμή:

$$\sum_{p=1}^{N_p} PW_{j3',t,p} \leq 0.3 \cdot \sum_{p=1}^{N_p} dp_{t,p} \quad (13)$$

for $t=1, \dots, N_t$

Ένας ακόμα περιορισμός που σχετίζεται με τα αιολικά πάρκα είναι ότι εξυπηρετούν το φορτίο βάσης. Κατά συνέπεια προκύπτουν οι παρακάτω περιορισμοί:

$$PW_{j3',t,peak} = 0 \quad (14)$$

για $t=1, \dots, N_t$ και $peak(p)=1, \dots, 4$

και:

$$PW_{j3',t,middle} = 0 \quad (15)$$

για $t=1, \dots, N_t$ και $middle(p)=5,6,7$

Επιπλέον, η εγκατεστημένη ισχύς των φωτοβολταϊκών περιορίστηκε στα 0.5MW για όλο τον ορίζοντα σχεδιασμού.

$$\sum_{t=1}^{N_t} \sum_{p=1}^{N_p} P W_{j2',t,p} \leq 0.5$$

4.4.6 Περιορισμοί μικτού αέριου προγραμματισμού

Η πρόσθετη εγκατεστημένη ισχύς μπορεί να μοντελοποιηθεί με αέριες μεταβλητές, προκειμένου τα μεγέθη των νέων μονάδων να είναι διακριτά. Στην παρούσα εργασία, μόνο η εγκατεστημένη ισχύς των αμμοστρόβιλων και αεριοστρόβιλων εκφράζονται από αέριες μεταβλητές, καθώς οι μονάδες αυτές είναι διαθέσιμες εμπορικά για συγκεκριμένες δυναμικότητες. Οι υπόλοιπες τρεις τεχνολογίες ηλεκτροπαραγωγής, είναι διαθέσιμες σε πλήθος μεγεθών ξεκινώντας από μερικά kilowatt, και για το λόγο αυτό η μοντελοποίησή τους με συνεχείς μεταβλητές θεωρήθηκε ικανοποιητική.

$$\begin{aligned} AI_{j5',t} &= NSTEAMt \cdot 15 \quad \text{για } t=1, \dots, N_t \\ AI_{j4',t} &= NGASt \cdot 0.5 \quad \text{για } t=1, \dots, N_t \end{aligned} \quad (16)$$

όπου, οι αέριες μεταβλητές, $NSTEAM(t)$ ο αριθμός των νέων μονάδων αμμοστρόβιλων την t -υποπερίοδο $[0,1, \dots, 10]$ και $NGAS(t)$ ο αριθμός των νέων μονάδων αεριοστρόβιλων την t -υποπερίοδο.

Η ελάχιστη δυναμικότητα μιας μονάδας αμμοστρόβιλου είναι 15 MW, ενώ αεριοστρόβιλου 0.5 MW.

5. ΨΥΚΤΙΚΕΣ ΜΗΧΑΝΕΣ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

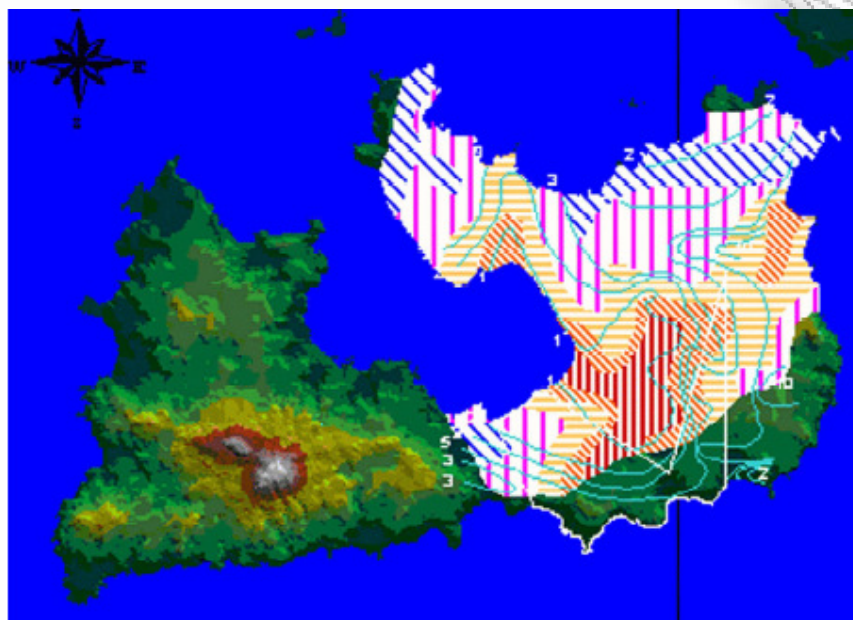
5.1 Η ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΓΕΩΘΕΡΜΙΚΟ ΠΕΔΙΟ ΤΗΣ ΜΗΛΟΥ

Η γεωθερμική ενέργεια είναι η θερμότητα που περιέχεται στο εσωτερικό της γης, η οποία προκαλεί τη δημιουργία διαφόρων γεωλογικών φαινομένων σε παγκόσμια κλίμακα. Συνήθως όμως, ο όρος «γεωθερμική ενέργεια» χρησιμοποιείται σήμερα για να δηλώσει εκείνο το τμήμα της γήινης θερμότητας που μπορεί να ανακτηθεί και να αξιοποιηθεί από τον άνθρωπο (Dickson and Fanelli, 2004).

Χαρακτηριστικό μέγεθος της γεωθερμικής ενέργειας είναι η γεωθερμική βαθμίδα, η οποία ορίζεται ως ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας της γης σε συνάρτηση με το βάθος, μέσα στο γήινο φλοιό. Σε βάθη που είναι προσβάσιμα με τις σύγχρονες γεωτρητικές μεθόδους, δηλαδή μέχρι τα 10,000 m, η μέση γεωθερμική βαθμίδα κυμαίνεται περίπου στους 2.5-3 °C/100 m. Για παράδειγμα, εάν η θερμοκρασία στα πρώτα μέτρα κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ανταποκρίνεται κατά μέσο όρο στη μέση ετήσια θερμοκρασία του ατμοσφαιρικού αέρα, δηλ. στους 15 °C, τότε μπορούμε να υποθέσουμε ότι η θερμοκρασία στο βάθος των 2000 m θα είναι περίπου 65-75°C, στα 3000 m 90-105°C, κ.ο.κ. για μερικά ακόμα χιλιάδες μέτρα. Παρόλα αυτά, υπάρχουν πολλές περιοχές στις οποίες η γεωθερμική βαθμίδα αποκλίνει πολύ από τη μέση τιμή. Λόγω της θερμοκρασιακής διαφοράς ανάμεσα στα διάφορα στρώματα, προκαλείται ροή θερμότητας από τις βαθιές και θερμές ζώνες του υπεδάφους προς τις ρηχές και ψυχρότερες, τείνοντας στη δημιουργία ομοιόμορφων συνθηκών, κάτι που ουδέποτε επιτυγχάνεται πλήρως, όπως πολύ συχνά συμβαίνει στη φύση (Dickson and Fanelli, 2004).

Η Μήλος βρίσκεται στο ηφαιστειακό τόξο του Αιγαίου και χαρακτηρίζεται από γεωθερμικά πεδία υψηλής ενθαλπίας. Η ανατολική πλευρά του νησιού και κυριότερα οι περιοχές Ζεφύρια και Αδάμας, είναι οι περιοχές με τις υψηλότερες γεωθερμικές βαθμίδες (στα Ζεφύρια η γεωθερμική βαθμίδα είναι έως και 30 φορές υψηλότερη από τη μέση της γης, περίπου 7.8°C/10 m) και τις χαμηλότερες αντιστάσεις πετρωμάτων του υπεδάφους, και κατά συνέπεια θεωρούνται οι πλέον υποσχόμενες για εκμετάλλευση γεωθερμικού δυναμικού υψηλής ενθαλπίας (Karytsas et al., 2004; Mendrinou and OSullivan, 1987). Πιο συγκεκριμένα στην περιοχή Ζεφύρια, σε βάθη 800-1400m από την επιφάνεια της θάλασσας έχουν βρεθεί ρευστά θερμοκρασίας 300-323°C (Karytsas et al., 2004).

Στο παρακάτω γράφημα απεικονίζεται το νησί χωρισμένο σε ζώνες γεωθερμικών βαθμίδων, όπου οι περιοχές με κόκκινο χρώμα εμφανίζουν τις υψηλότερες τιμές.



Γράφημα 4: Χάρτης της Μήλου στον οποίο απεικονίζονται οι θερμοκρασιακές βαθμίδες και οι αντιστάσεις των πετρωμάτων (Karytsas et al., 2004).

Εντούτοις, στην παρούσα εργασία δε θα ασχοληθούμε με τη γεωθερμία υψηλής ενθαλπίας που βρίσκεται σε μεγάλα βάθη, γιατί δεν εξετάστηκε το ενδεχόμενο εκμετάλλευσης της στην ηλεκτροπαραγωγή, για τους λόγους που προαναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3 και αφορούν στις αντιδράσεις της τοπικής κοινωνίας. Εξετάστηκε όμως η χρήση γεωθερμίας χαμηλής ενθαλπίας, για τον κλιματισμό των ξενοδοχείων και των ενοικιαζόμενων δωματίων του νησιού μέσω της τεχνολογίας των ψυκτικών μηχανών απορρόφησης, που καταναλώνουν ενέργεια με τη μορφή θερμότητας και περιγράφονται στην επόμενη παράγραφο.

Πράγματι, η ανατολική πλευρά του νησιού στην οποία βρίσκονται όλες οι τουριστικές υποδομές⁹, είναι επίσης πολλά υποσχόμενη για την εκμετάλλευση ρηχών, χαμηλής ενθαλπίας γεωθερμικών πεδίων (Karytsas et al., 2004; Manologlou et al., 2004). Για παράδειγμα, στην ευρύτερη περιοχή γύρω από τα Ζεφύρια, απαντώνται χαμηλής ενθαλπίας (≤ 100 °C) γεωθερμικά ρευστά σε πολύ μικρά βάθη (30–100 m). Επιπροσθέτως, το γεωθερμικό δυναμικό της Μήλου σε χαμηλής ενθαλπίας ρευστά είναι μεγαλύτερο από $280 \text{ m}^3/\text{h}$ (Manologlou et al., 2004).

⁹ Μεγάλο πλήθος ξενοδοχείων βρίσκεται στις περιοχές Αδάμας και Ζεφύρια που όπως προαναφέρθηκε έχουν τις υψηλότερες γεωθερμικές βαθμίδες

5.2 ΤΡΟΠΟΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ

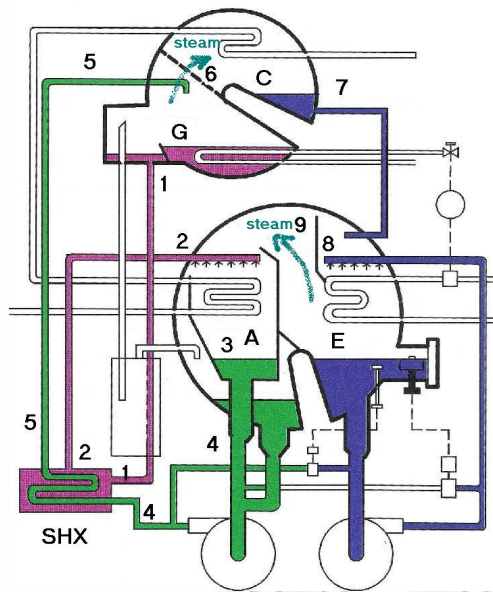
Η αρχή λειτουργίας της ψύξης στα κύκλα απορρόφησης είναι ίδια με αυτήν των κλασικών ψυκτικών μηχανών με συμπίεση ατμών, δηλαδή η απομάκρυνση θερμότητας επιτυγχάνεται με ατμοποίηση του ψυκτικού μέσου σε χαμηλή πίεση και η απόρριψη της με συμπύκνωση του ψυκτικού σε υψηλή πίεση. Η βασική διαφορά των δύο μηχανών είναι ο τρόπος δημιουργίας του δυναμικού πίεσης μέσω του οποίου κυκλοφορεί το ψυκτικό μέσο (Rafferty, 1998).

Στις κλασικές μηχανές με συμπίεση ατμών ο κύκλος ψύξης έχει ως εξής:

Το ψυκτικό μέσο εξατμίζεται λαμβάνοντας θερμότητα από τον ψυχόμενο χώρο, στη συνέχεια συμπιέζεται στον συμπιεστήρα με κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, συμπυκνώνεται αποβάλλοντας θερμότητα, και σε υγρή κατάσταση εκτονώνεται μέσω στραγγαλιστικής βαλβίδας με σκοπό την επίτευξη χαμηλής πίεσης και άρα θερμοκρασίας πριν τον εξατμιστήρα (Κουμούτσος, 1992).

Στις μηχανές απορρόφησης αντί το ψυκτικό μέσο να μεταφέρεται από την αέρια στην υγρή κατάσταση μέσω ενός συμπιεστήρα, μεταφέρεται με απορρόφηση του από ένα διαλυτικό μέσο (απορροφητή). Το υγρό διαλυτικό μέσο συμπιέζεται με τη βοήθεια μιας αντλίας με αποτέλεσμα να καταναλίσκεται πολύ λιγότερο μηχανικό έργο, από ότι στη συμπίεση ατμών. Αφού το ψυκτικό μέσο αντληθεί μέσω της απορρόφησης του από το διαλυτικό μέσο, ατμοποιείται και κατά συνέπεια διαχωρίζεται από αυτό με χρήση θερμότητας που στην περίπτωση μας προέρχεται από τη γεωθερμία (Rafferty, 1998; Dickson and Fanelli, 2004).

Πιο αναλυτικά ένα ψυκτικό κύκλο απορρόφησης βρωμιούχου λιθίου μονής δράσης αποτελείται από το κάτω κέλυφος που περιέχει τον εξατμιστήρα και τη μονάδα απορρόφησης και το άνω κέλυφος που περιλαμβάνει την ατμογεννήτρια και τον συμπυκνωτή. Διάλυμα βρωμιούχου λιθίου είναι ο απορροφητής ενώ το ψυκτικό μέσο είναι το νερό. Στην παρακάτω εικόνα απεικονίζεται το διάγραμμα ροής μιας μηχανής απορρόφησης 2 κελυφών με απορροφητή το πράσινο ρευστό και ψυκτικό μέσο το ιώδες ρευστό.



Γράφημα 5: διάγραμμα απορροφητή βρωμιούχου λιθίου 2 κελύφων μονής δράσης (Rafferty, 1998)

Ο κύκλος λειτουργίας του απορροφητή είναι ο παρακάτω:

Ατμοποιητής (evaporator): το ψυκτικό μέσο που είναι το νερό εξατμίζεται στην επιφάνεια του σωλήνα του ατμοποιητή (E) και κρυώνει το νερό του κυκλώματος που χρησιμοποιείται για την ψύξη του χώρου (chilled water).

Μονάδα απορρόφησης (absorber): Οι ατμοί του ψυκτικού μέσου πηγαίνουν από τον ατμοποιητή στην μονάδα απορρόφησης (A), όπου εκεί απορροφώνται από το διάλυμα βρωμιούχου λιθίου καθώς ψεκάζεται επάνω στους σωλήνες απορρόφησης. (8⇒9)

Ατμογεννήτρια (generator): Το διάλυμα στον απορροφητή αραιώνει καθώς απορροφά το νερό και έτσι αντλείται στην ατμογεννήτρια (G) όπου και συγκεντρώνεται (3⇒4⇒5). Το αραιό διάλυμα θερμαίνεται από ατμό ή θερμό νερό έτσι ώστε να βράσει και να διαχωριστεί το ψυκτικό μέσο από το βρωμιούχο λίθιο.

Συμπυκνωτής (condenser): Οι ατμοί του ψυκτικού περνούν μέσα στον συμπυκνωτή (6⇒7)(C) όπου συμπυκνώνονται.

Το συμπυκνωμένο ψυκτικό ρέει πίσω στην μονάδα του ατμοποιητή (7⇒8) και το επανασυγκεντρωμένο διάλυμα ρέει από την ατμογεννήτρια πίσω στον απορροφητή (1⇒2), έτσι ώστε να ξεκινήσει ένας νέος κύκλος. Η απόδοση του κύκλου μπορεί να βελτιωθεί παίρνοντας το σχετικά κρύο αραιό διάλυμα από τον απορροφητή και το ζεστό ισχυρό

διάλυμα από τον συλλέκτη διάμεσου ενός εναλλάκτη θερμότητας (SHX) (Rafferty, 1998; Κουμούτσος 1992).

5.3 ΣΕΝΑΡΙΟ ΧΡΗΣΗΣ ΨΥΚΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΩΝ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΛΥΨΗ ΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ ΨΥΞΗΣ

Στην παρούσα εργασία εξετάστηκε όπως προαναφέρθηκε η αντικατάσταση των συμβατικών μηχανών ψύξης (κλιματιστικά) από μηχανές απορρόφησης, στα τουριστικά καταλύματα, με σκοπό τη μείωση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που σχετίζεται με την καλοκαιρινή αιχμή ζήτησης για την κάλυψη των φορτίων ψύξης.

Οι μηχανές απορρόφησης βρωμιούχου λιθίου μονής δράσης¹⁰, που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, είναι οι πιο συνηθισμένες για εφαρμογές ψύξης άνω των 32 F, όπως ο κλιματισμός (Rafferty, 1998).

Όπως φαίνεται και στο Γράφημα 5 εκτός από το βρωμιούχο λίθιο και το ψυκτικό μέσο τα οποία ανακυκλοφορούν, υπάρχουν τρία ρευστά με εξωτερικές συνδέσεις 1) ο ατμός ή το ζεστό νερό της ατμογεννήτριας, 2) το νερό που συμπυκνώνει τους ατμούς του ψυκτικού μέσου στο συμπυκνωτή και 3) το παγωμένο νερό που ψύχεται από το ψυκτικό μέσο και χρησιμοποιείται τελικά για την ψύξη των χώρων. Κάθε ένα από αυτά τα ρευστά αντιστοιχίζεται με μία θερμοκρασία για την οποία οι μηχανές αυτές δίνουν την ονομαστική τους δυναμικότητα. Τυπικές τιμές είναι: 12psi ατμού ή 240°F (~116°C) ζεστού νερού, 85 °F (30°C) νερού συμπύκνωσης, και 44 °F (6,7°C) παγωμένου νερού (chilled water). Σε αυτές τις συνθήκες, ο συντελεστής απόδοσης (COP), δηλαδή η αποδιδόμενη ενέργεια ψύξης προς την απαιτούμενη θερμότητα που προέρχεται από τη γεωθερμία, αναμένεται να είναι γύρω στο 0.65 με 0.70 (Rafferty, 1998).

Οι περισσότεροι κατασκευαστές διαθέτουν μηχανές στο εύρος των 100 RT με 1,500 RT, δηλαδή 350 KWth με 5.2 MWth. Εντούτοις, στη Μήλο δραστηριοποιούνται κυρίως μικρές ξενοδοχειακές μονάδες, και το μέγιστο ψυκτικό φορτίο ενός τυπικού ξενοδοχείου υπολογίστηκε¹¹ ότι δεν ξεπερνά τα 30-40 KWc. Ψυκτικές μηχανές αυτής της τάξης μεγέθους κατασκευάζει μόνον η εταιρεία Yazaki, σε δυναμικότητες των 10, 20 και 30 RT (35, 70 και

¹⁰ Υπάρχουν και ψυκτικές μηχανές διπλής δράσης αλλά απαιτούν θερμότητα υψηλής ενθαλπίας

¹¹ Το ψυκτικό φορτίο ενός τυπικού ξενοδοχείου υπολογίστηκε προσεγγιστικά βάσει της συνολικής επιφάνειας των δωματίων του και τις ανάγκες σε ψύξη ανά μονάδα επιφάνειας

105 KWc) και παροχές ζεστού νερού (θερμαντικού μέσου) των 38, 76 και 114 gpm^{12} (8.6, 17, 26 m^3/h) αντιστοίχως. Οι θερμοκρασίες του ζεστού νερού κυμαίνονται μεταξύ 158°F με 203°F, αλλά οι μηχανές διαστασιολογούνται από τον κατασκευαστή στους 190°F (~88°C).

Όπως προαναφέρθηκε στην ανατολική πλευρά του νησιού υπάρχουν σε αφθονία γεωθερμικά ρευστά χαμηλής ενθαλπίας ($\leq 100^\circ\text{C}$) σε μικρά βάθη. Κατά συνέπεια, μπορούμε να υποθέσουμε με ασφάλεια ότι το θερμαντικό μέσο βρίσκεται τουλάχιστον στο εύρος των 170-180°F (76-82°C) (βλ. Karytsas et al., 2004). Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ονομαστική ισχύς των ψυκτικών μηχανών αποδίδεται στους 190°F, θα πρέπει για να καλυφθεί το ίδιο ψυκτικό φορτίο, η εγκατεστημένη ισχύς να είναι μεγαλύτερη στις προαναφερθείσες θερμοκρασίες. Σύμφωνα με δεδομένα της εταιρείας Yazaki η ισχύς υπολογίζεται από τη διαίρεση του μέγιστου ψυκτικού φορτίου με ένα συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας (cooling capacity factor) ίσο με 60% (για ζεστό νερό 170°F και νερό συμπύκνωσης 85 °F, βλ. Παράρτημα Β).

Προκειμένου να αξιολογηθεί η χρήση των ψυκτικών μηχανών απορρόφησης, θα αναπτύξουμε ένα 2^ο σενάριο του μοντέλου για τον ενεργειακό σχεδιασμό της Μήλου.

Οι διαφορές αυτού του σεναρίου σε σύγκριση με το βασικό του Κεφαλαίου 4 είναι,

- 1) η αύξηση του συνολικού κόστους επένδυσης εξαιτίας της εγκατάστασης των μηχανών απορρόφησης
- 2) η μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας κατά τους καλοκαιρινούς μήνες που αλλάζει την αρχική Καμπύλη Διάρκειας Φορτίου (ΚΔΦ).

Οι παραδοχές που έγιναν σε αυτό το σενάριο είναι οι εξής:

- υπολογίστηκε μόνο το κόστος των ψυκτικών μηχανών απορρόφησης, χωρίς να ενσωματωθούν τα απαιτούμενα κόστη εγκατάστασης τους, το κόστος βοηθητικών μονάδων (όπως πύργοι ψύξης), καθώς και το κόστος των γεωτρήσεων για την άντληση του γεωθερμικού ρευστού.
- κατασκευάστηκε η νέα ΚΔΦ, χωρίς να συνυπολογιστεί η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που απαιτείται για την άντληση του γεωθερμικού ρευστού, κατά τη λειτουργία των μηχανών απορρόφησης.

¹² Gallons per minute

Τα δεδομένα ζήτησης ψυκτικού φορτίου για τα ξενοδοχεία και τα ενοικιαζόμενα δωμάτια του νησιού είναι απαραίτητα για τον υπολογισμό της νέας μειωμένης ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος. Λόγω έλλειψης αυτών των δεδομένων τα τελευταία υπολογίστηκαν με χρήση ενός συντελεστή ψυκτικού φορτίου αιχμής ανά μονάδα επιφάνειας και ενός ωριαίου προφίλ ζήτησης ψυκτικού φορτίου μιας τυπικής καλοκαιρινής ημέρας στην Ελλάδα.

Μια προσεγγιστική τιμή του ψυκτικού φορτίου αιχμής ανά μονάδα επιφάνειας κατά τη διάρκεια μιας τυπικής καλοκαιρινής μέρας, είναι 0.15 KWc/m² (Balaras, 1993). Με δεδομένη την επιφάνεια των δωματίων των τουριστικών καταλυμάτων της Μήλου, υπολογίστηκε το ψυκτικό φορτίο αιχμής (μέγιστο ψυκτικό φορτίο) σε KWc (Πίνακας 4). Υποτέθηκε ότι τα κλιματιστικά απορρόφησης θα εγκατασταθούν¹³ στο 60% των τουριστικών καταλυμάτων και έτσι προκύπτει το τελικό ψυκτικό φορτίο αιχμής που θα εξυπηρετείται από αυτά και είναι ίσο με 2,351 KWc. Η παραπάνω υπόθεση είναι ασφαλής καθώς τα συμβατικά κλιματιστικά που λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια είναι εγκατεστημένα σε τουλάχιστον 60% των τουριστικών καταλυμάτων της Μήλου.

	Αριθμός καταλυμάτων ανά είδος	Αριθμός δωματίων	Ψυκτικό φορτίο αιχμής ανά μονάδα επιφάνειας KWc/m ²	Επιφάνεια (m ²)	Συνολικό ψυκτικό φορτίο αιχμής ανά ημέρα (KWc)	Υποκαθιστάμενο ψυκτικό φορτίο αιχμής ανά ημέρα (KWc)
Ξενοδοχεία	28	578	0.15	6,936	1,040	624
Ενοικιαζόμενα δωμάτια	314	1,599	0.15	19,188	2,878	1,726
Σύνολο	342	2,177	-	26,124	3,919	2,351

Πίνακας 4: Ψυκτικό φορτίο αιχμής των τουριστικών καταλυμάτων της Μήλου

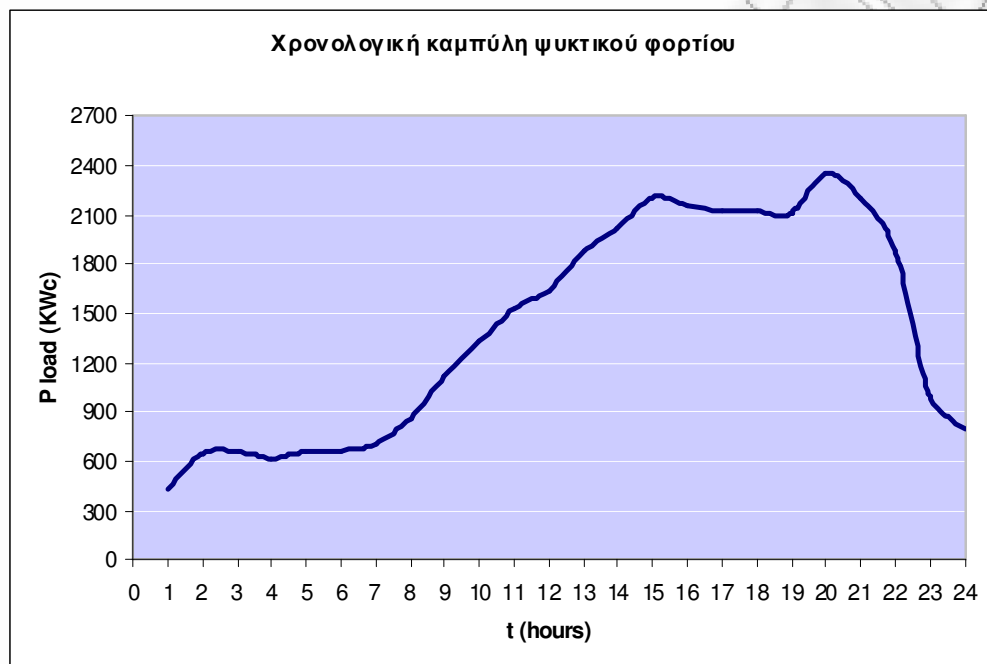
Το υποκαθιστάμενο ψυκτικό φορτίο αιχμής, συνδυάστηκε με το ωριαίο προφίλ ζήτησης ψυκτικού φορτίου μιας τυπικής ημέρας των μηνών Μαΐου, Ιουνίου, Ιουλίου, Αυγούστου, Σεπτεμβρίου και έτσι προέκυψε το ψυκτικό φορτίο για κάθε ώρα μιας τυπικής ημέρας όπως φαίνεται στην τρίτη στήλη του Πίνακα 5. Το ωριαίο προφίλ ζήτησης ψυκτικού φορτίου βασίστηκε σε μια μελέτη περίπτωσης για τον ελληνικό ξενοδοχειακό τομέα και συγκεκριμένα στα δεδομένα για τη Νότια Ελλάδα (SAVE, 1999-2000).

¹³ και θα αντικαταστήσουν τα συμβατικά κλιματιστικά

Ωρα της ημέρας	Ψυκτικό φορτίο για κάθε ώρα ως ποσοστό επί του συνόλου %	Ψυκτικό φορτίο για κάθε ώρα KWc
1:00	1.28	432
2:00	1.93	652
3:00	1.96	662
4:00	1.84	622
5:00	1.96	662
6:00	1.97	665
7:00	2.10	709
8:00	2.56	865
9:00	3.33	1125
10:00	3.95	1334
11:00	4.53	1530
12:00	4.87	1645
13:00	5.56	1878
14:00	6.00	2027
15:00	6.54	2209
16:00	6.40	2162
17:00	6.29	2125
18:00	6.28	2121
19:00	6.26	2115
20:00	6.96	2351
21:00	6.53	2206
22:00	5.57	1882
23:00	2.96	1000
24:00	2.38	804

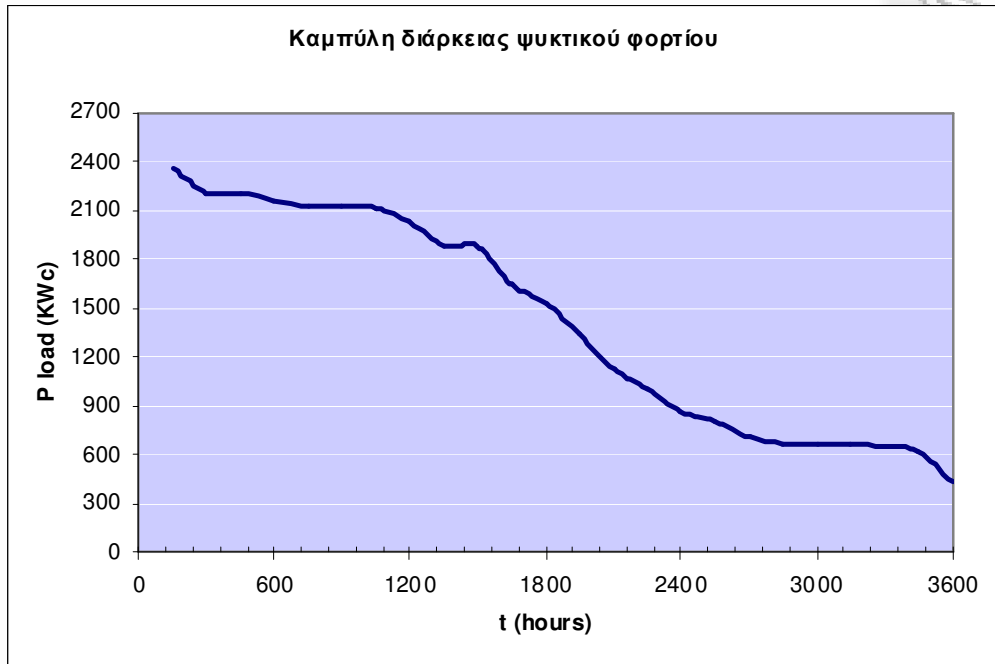
Πίνακας 5: Ωριαίο προφίλ ζήτησης ψυκτικού φορτίου για μια τυπική ημέρα αντιπροσωπευτική των μηνών Μάη ως Σεπτέμβρη (SAVE, 1999-2000)

Από τα παραπάνω δεδομένα προκύπτει η ακόλουθη χρονολογική καμπύλη ψυκτικού φορτίου (Γράφημα 6). Απεικονίζει τη ζήτηση σε ψυκτικό φορτίο για κάθε ώρα ενός τυπικού 24ώρου των μηνών Μάη με Σεπτέμβρη.



Γράφημα 6: Χρονολογική καμπύλη ψυκτικού φορτίου για μια τυπική ημέρα των ξενοδοχείων στη Μήλο

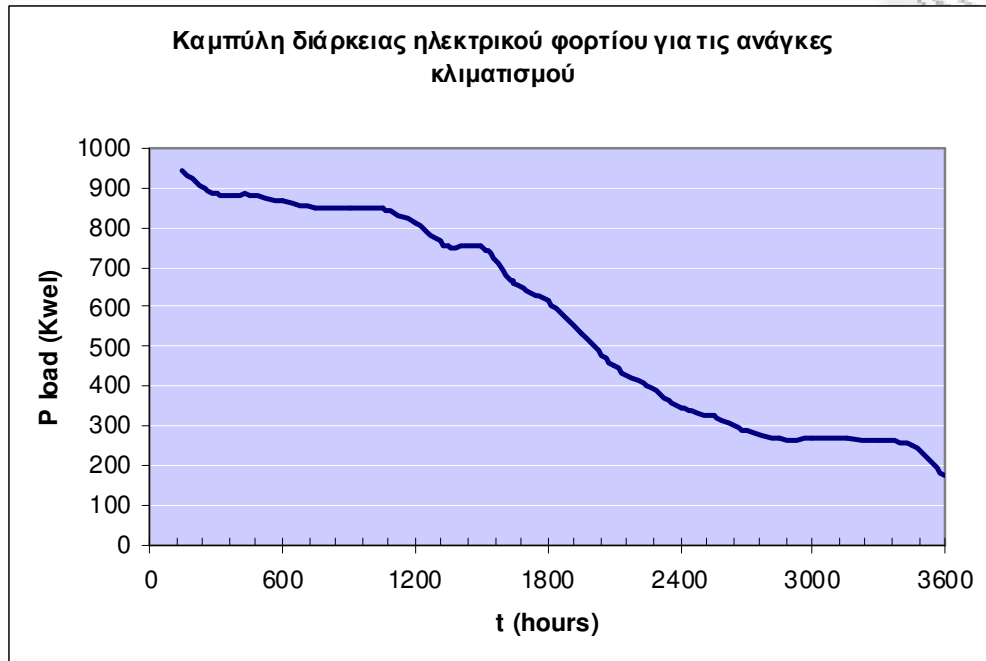
Η Καμπύλη Διάρκειας ψυκτικού φορτίου (Γράφημα 7) προκύπτει από την παραπάνω Χρονολογική Καμπύλη με τη διάταξη των ωριαίων φορτίων από το μεγαλύτερο στο μικρότερο για τη χρονική περίοδο των 5 μηνών Μάιο έως Σεπτέμβριο (3600 hours). Η Καμπύλη Διάρκειας ψυκτικού φορτίου απεικονίζει στην πράξη τη ζήτηση για ολόκληρο το έτος, αφού για τους υπολοίπους 7 μήνες η ζήτηση φορτίου ψύξης για τα δωμάτια των ξενοδοχειακών και άλλων μονάδων θεωρήθηκε μηδενική.



Γράφημα 7: Καμπύλη διάρκειας ψυκτικού φορτίου κατά τη διάρκεια ενός έτους

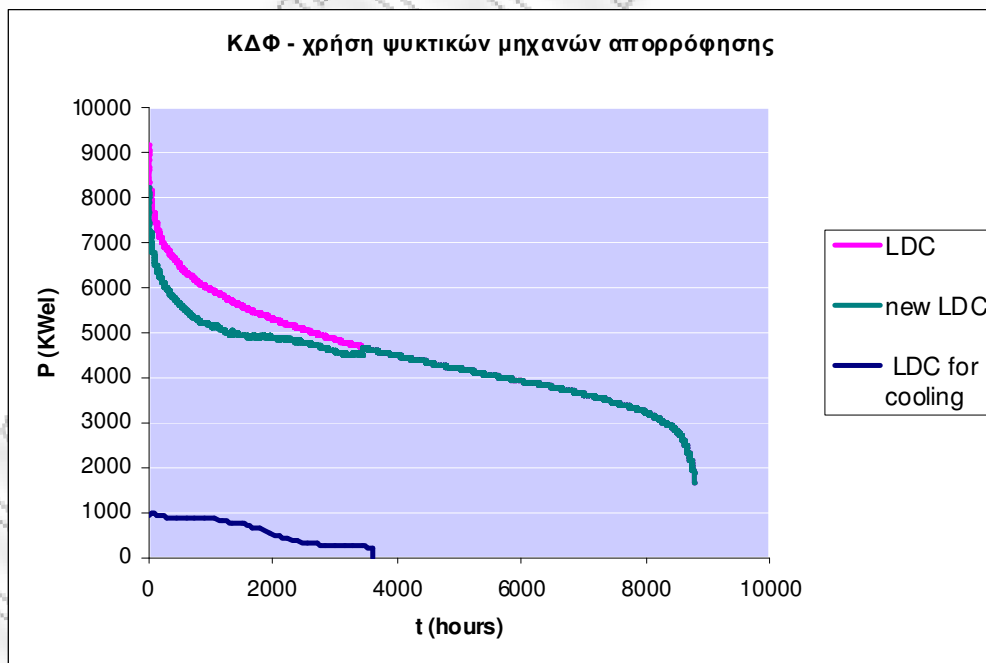
Από τα δεδομένα ζήτησης ψυκτικού φορτίου μπορούμε πλέον να καταλήξουμε στο ζητούμενο που είναι η έως τώρα ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας¹⁴ για την κάλυψη αυτών, την οποία σκοπεύουμε να μηδενίσουμε μέσω της χρήσης των απορροφητών ψύξης. Συγκεκριμένα, η Καμπύλη Διάρκειας ηλεκτρικού φορτίου (Γράφημα 8) μπορεί να υπολογιστεί με διαίρεση των τεταγμένων της Καμπύλης Διάρκειας ψυκτικού φορτίου με έναν τυπικό συντελεστή απόδοσης (C.O.P) μιας συμβατικής αντλίας θερμότητας ίσο με 2.5.

¹⁴ Αναφέρεται στο 60% των συνολικών τουριστικών καταλυμάτων



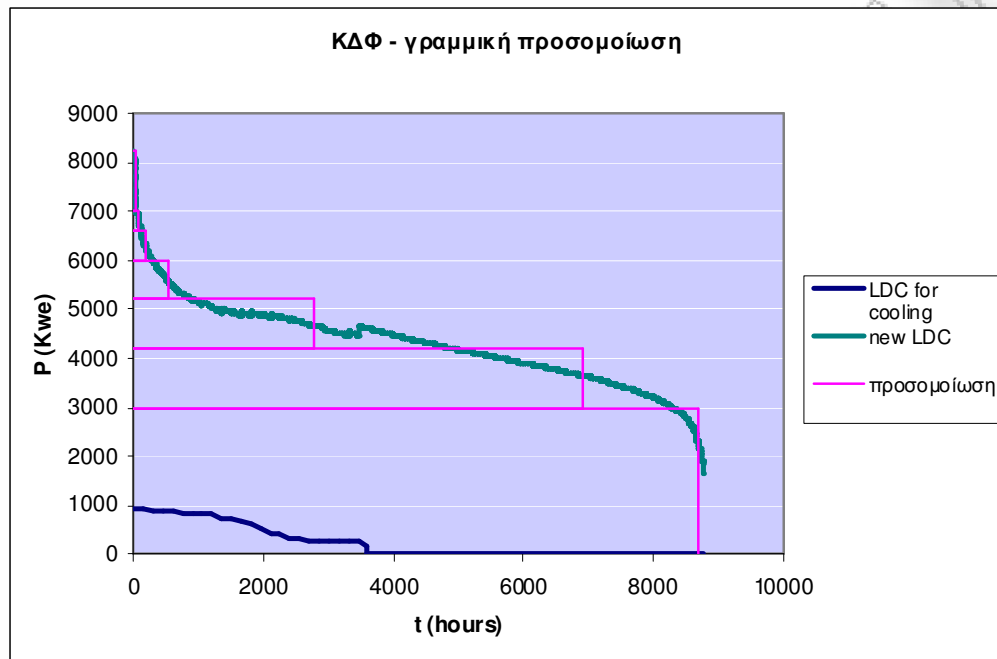
Γράφημα 8: Καμπύλη διάρκειας ηλεκτρικού φορτίου για τις ανάγκες των τουριστικών καταλυμάτων σε κλιματισμό ψύξης κατά τη διάρκεια ενός έτους

Τελικά η ετήσια Καμπύλη Διάρκειας ηλεκτρικού φορτίου του 2ου σεναρίου (Γράφημα 9), προκύπτει με την αφαίρεση από την αρχική ΚΔΦ¹⁵, της ΚΔΦ κλιματισμού ψύξης.



Γράφημα 9: Η ΚΔΦ του 2^{ου} σεναρίου

¹⁵ του βασικού σεναρίου, Γράφημα 2



Γράφημα 10: Γραμμική προσομοίωση της ΚΔΦ (LDC) με χρήση ψυκτικών μηχανών απορρόφησης του έτους 2003

Τα δεδομένα ζήτησης ισχύος του έτους 2007 προκύπτουν από τη γραμμική προσομοίωση της παραπάνω καμπύλης (Γράφημα 10), προσαυξημένα με τους ετήσιους συντελεστές του Κεφαλαίου 3 και παρουσιάζονται στον επόμενο Πίνακα.

Πίνακας 6: Ζήτηση ισχύος για το έτος 2007

	Χρόνος (ώρες)	Ισχύς (KW)
		Περίοδος 1 2007
Περιοχή 1 (φορτίο αιχμής)	20	1.41
Περιοχή 2 (φορτίο αιχμής)	69	0.46
Περιοχή 3 (φορτίο αιχμής)	170	0.69
Περιοχή 4 (ενδιάμεσο φορτίο)	529	0.92
Περιοχή 5 (ενδιάμεσο φορτίο)	2786	1.15
Περιοχή 6 (ενδιάμεσο φορτίο)	6895	1.38
Περιοχή 7 (φορτίο βάσης)	8704	3.44

Στο παρόν σενάριο, το ψυκτικό φορτίο που θα υποκατασταθεί δε επιλέχθηκε ως μεταβλητή απόφασης αλλά ως σταθερό ποσό ενέργειας για όλο τον ορίζοντα σχεδιασμού. Εκτός από την αλλαγή της ζήτησης σε ορίζοντα 15ετίας σε σχέση με το βασικό σενάριο αλλάζει η αντικειμενική συνάρτηση με την προσθήκη του κόστους των απορροφητών το πρώτο έτος.

Το κόστος των απορροφητών υπολογίστηκε βάση της απαιτούμενης εγκατεστημένης ισχύος των μηχανών απορρόφησης, που είναι ίση 3919 KWc και προκύπτει από το ψυκτικό φορτίο αιχμής (2351 KWc, βλ. Πίνακα 4) διαιρούμενο με τον συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας (cooling capacity factor), που ισούται με 60%, όπως προαναφέρθηκε. Το κόστος ενός μικρού απορροφητή είναι γύρω στα 600€/KWc¹⁶ (βλ. Bailey et al., 2002, Figure 6).

Κατά συνέπεια η αντικειμενική συνάρτηση του κόστους (6) μετατρέπεται στην παρακάτω εξίσωση:

$$\min \sum_{t=1}^{N_t} \frac{1}{(1+r)^t} \sum_{j=1}^{N_j} \text{invcost}_j \cdot AI_{j,t} + \sum_{t=1}^{N_t} \frac{1}{(1+r)^t} \sum_{j=1}^{N_j} \text{fixed}_j \cdot AI_{j,t} + \sum_{t=1}^{N_t} \frac{1}{(1+r)^t} \sum_{nr=1}^{N_{nr}} \text{var cost}_{t, nr} \cdot \sum_{p=1}^{N_p} PW_{nr,t,p} \cdot tf_p + 2.351.160$$

(17)

¹⁶ Το κόστος επένδυσης υπολογίστηκε πολλαπλασιάζοντας την τιμή ανά KWc με την συνολική εγκατεστημένη ισχύ. Αν θεωρούσαμε ότι ο μικρότερος απορροφητής της αγοράς είναι 30 KWc, το κόστος θα προέκυπτε από τον αριθμό των καταλυμάτων που θα εγκαθιστούσαν τους απορροφητές (205, δηλαδή το 60% των συνολικών) επί το κόστος του απορροφητή των 30 KWc (18,000€), και θα ήταν ίσο με 3,693,600€

6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

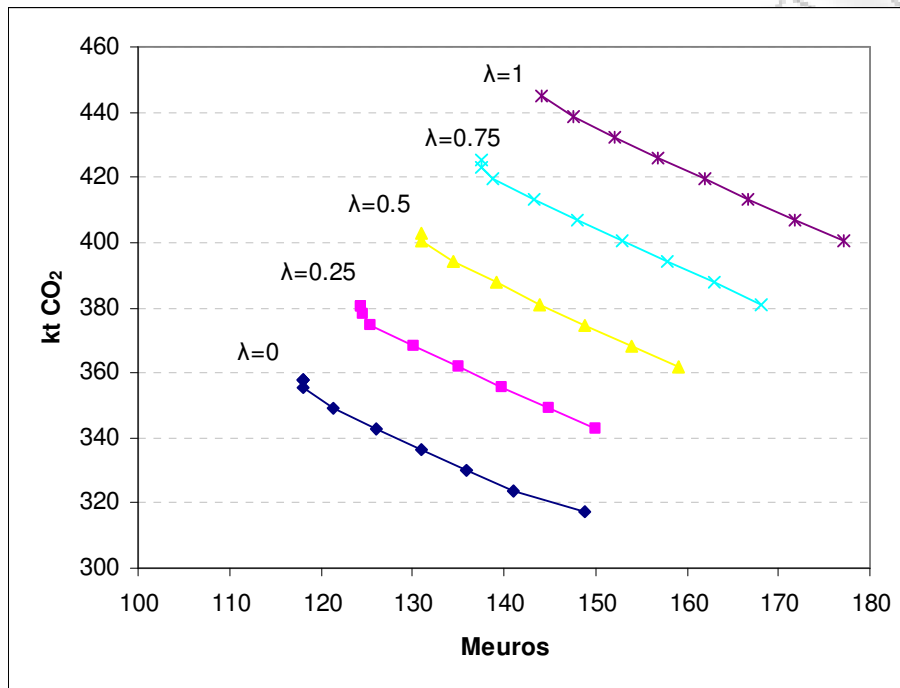
6.1 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΕΠΑΥΞΗΜΕΝΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΤΩΝ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΩΝ (AUGMENTED E-CONSTRAINT)

Το μοντέλο Μικτού Ακέραιου Πολυ-κριτηριακού Προγραμματισμού (MIMOLP) επιλύθηκε με χρήση του λογισμικού General Algebraic Modelling System (GAMS) και με επιλύτη (solver) τον αλγόριθμο MIP CPLEX, σε 2 λεπτά και 51 δευτερόλεπτα (επεξεργαστής Intel Core Duo 1.86 GHz).

Η πυκνότητα του εφικτού χωρίου¹⁷ που παράγεται μπορεί να ελεγχθεί προσδίδοντας διαφορετικές τιμές στην παράμετρο ενδιάμεσων σημείων g_i ¹⁸ (βλ. παράγραφο 2.1). 20 ενδιάμεσα σημεία επιλέχθηκαν και για τις 2 αντικειμενικές, που χρησιμοποιούνται ως περιορισμοί, την ελαχιστοποίηση των εκπομπών CO₂ και τη μεγιστοποίηση της συνάρτησης LAMDA. Παράχθηκαν 298 εφικτές λύσεις, που στην πράξη αντιστοιχούν σε 179 διαφορετικές εφικτές λύσεις (μερικές από τις ικανές λύσεις επαναλαμβάνονται). Οι καμπύλες συντελεστών αντιστάθμισης μεταξύ των κριτηρίων (trade-offs), ελαχιστοποίηση του κόστους και των εκπομπών CO₂ και για τις πέντε τιμές της 3^{ης} αντικειμενικής συνάρτησης LAMDA (λ) απεικονίζονται στο Γράφημα 11.

¹⁷ όσο μεγαλύτερη η πυκνότητα του εφικτού χωρίου, τόσο μεγαλύτερος ο χρόνος υπολογισμού

¹⁸ στην προκειμένη περίπτωση το i συμβολίζει τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων που χρησιμοποιούνται ως περιορισμοί



Γράφημα 11: Γράφημα των ικανών λύσεων στο επίπεδο κόστους και εκπομπές CO₂ για διαφορετικές τιμές λ

Οι παραπάνω καμπύλες που απεικονίζουν το εφικτό χωρίο έχουν παρόμοιο σχήμα, το οποίο είναι τυπικό για καμπύλες trade off μεταξύ οικονομικών και περιβαλλοντικών κριτηρίων. Μελετώντας το σχήμα τους ο DM μπορεί να αναγνωρίσει τις πιο υποσχόμενες λύσεις σε ένα πολυκριτηριακό πρόβλημα. Για παράδειγμα το άνω αριστερό μέρος των καμπύλων από $\lambda=0$ μέχρι $\lambda=0.75$ καταδεικνύει ότι με μικρή αύξηση του κόστους επιτυγχάνεται σχετικά υψηλή μείωση των εκπομπών CO₂.

Ένα υποσύνολο των 179 εφικτών λύσεων και οι αντίστοιχες εγκατεστημένες ισχύς κάθε τεχνολογίας στο τέλος του ορίζοντα σχεδιασμού απεικονίζονται στον Πίνακα 7.

Το πρώτο συμπέρασμα που μπορούμε να εξάγουμε μελετώντας το εφικτό χωρίο και την αντίστοιχη εγκατεστημένη ισχύ κάθε τεχνολογίας είναι ότι οι ατμοστρόβιλοι δεν εμφανίζονται σε καμία από τις 179 λύσεις, ενώ οι ανεμογεννήτριες εμφανίζονται σε όλες. Αυτό μπορεί να εξηγηθεί γιατί ισχύει περιορισμός ελάχιστης εγκατεστημένης ισχύος για τους ατμοστρόβιλους (βλ. παράγραφο 4.4.6). Επιπροσθέτως οι ανεμογεννήτριες εμφανίζονται σε όλες τις λύσεις με την ίδια ακριβώς εγκατεστημένη ισχύ. Η εγκατεστημένη ισχύς των αεριοστρόβιλων αυξάνεται για μειούμενες εκπομπές CO₂ ενώ η παραγόμενη ισχύς και εγκατεστημένη ισχύς των παλινδρομικών μηχανών μειώνεται αντιστοίχως, εξαιτίας του

γεγονότος ότι καίνε μίγμα μαζούτ και πετρελαίου ντίζελ, σε σύγκριση με τους αεριοστρόβιλους που καίνε μόνο ντίζελ. Τα φωτοβολταϊκά, όπως αναμενόταν, αυξάνονται για μειούμενες εκπομπές CO₂, εντούτοις η συνολική εγκατεστημένη ισχύς στο τέλος της 15ετίας είναι μικρή λόγω του περιορισμού δυναμικότητας. Εξαιτίας του γεγονότος ότι η ισχύς των ανεμογεννητριών είναι ίδια σε όλες τις λύσεις, η αύξηση του LAMDA (της ζήτησης) αντιμετωπίζεται με προσθήκη αεριοστρόβιλων.

Στον Πίνακα 7 φαίνεται ότι η ελάχιστη τιμή εκπομπών CO₂, 317 kt (βλέπε σειρά 8), επιτυγχάνεται για LAMDA=0, με προσθήκη μεγάλης ισχύος αεριοστρόβιλων και συγκεκριμένα 14 MW έναντι μόλις 4MW της προηγούμενης λύσης, που αντιστοιχούν σε εκπομπές CO₂ 323kt (βλέπε σειρά 7). Ο λόγος που συμβαίνει αυτό είναι ότι προκειμένου να επιτευχθούν τόσο χαμηλές εκπομπές, δεν αξιοποιείται καθόλου η υπάρχουσα εγκατεστημένη ισχύς των παλινδρομικών μηχανών¹⁹, και όλο το φορτίο που κάλυπταν στις προηγούμενες λύσεις με LAMDA=0, καλύπτεται εξ ολοκλήρου από αεριοστρόβιλους. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει την προηγούμενη παρατήρηση, ότι στο άνω αριστερά μέρος των καμπυλών trade-off (Γράφημα 11) επιτυγχάνεται μείωση των εκπομπών CO₂ με μικρή αύξηση του κόστους, ενώ στο κάτω δεξιά μια αντίστοιχη μείωση απαιτεί πολύ μεγαλύτερη αύξηση κόστους.

¹⁹ Είναι εγκατεστημένες από την αρχή του ορίζοντα σχεδιασμού

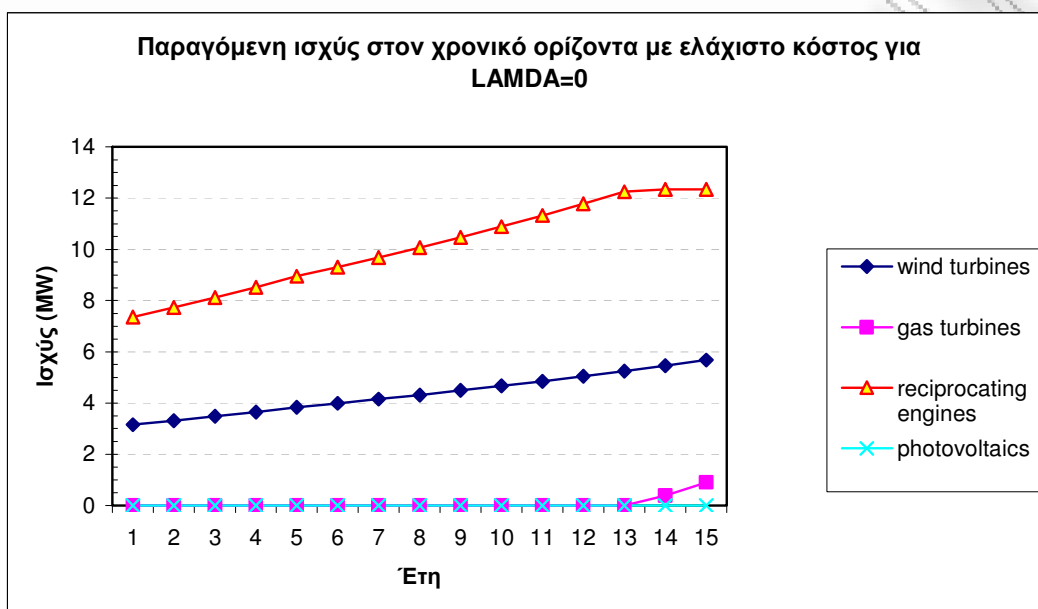
Πίνακας 7: Εφικτές λύσεις και συνολική πρόσθετη εγκατεστημένη ισχύς στο τέλος του ορίζοντα σχεδιασμού για κάθε τεχνολογία

Εφικτή λύση	Κόστος (χιλιάδες €)	CO ₂ (kt)	LAMDA	Παλινοδρομικές μηχανές (MW)	Φωτοβολταϊκά (MW)	Ανεμογεννήτριες (MW)	αεριοστρόβιλοι (MW)	ατμοστρόβιλοι
1	117,998	358	0.00	0.00	0.00	15.91	1.00	0.00
2	118,072	355	0.00	0.00	0.13	15.91	0.50	0.00
3	121,349	349	0.00	0.00	0.22	15.91	1.50	0.00
4	126,112	343	0.00	0.00	0.22	15.91	2.50	0.00
5	130,886	336	0.00	0.00	0.22	15.91	3.00	0.00
6	135,882	330	0.00	0.00	0.22	15.91	3.50	0.00
7	140,975	323	0.00	0.00	0.22	15.91	4.00	0.00
8	148,720	317	0.00	0.00	0.22	15.91	14.00	0.00
9	124,500	380	0.25	0.00	0.00	15.91	1.50	0.00
10	124,559	378	0.25	0.25	0.12	15.91	1	0
11	125,514	375	0.25	0.00	0.22	15.91	1.50	0.00
12	130,153	368	0.25	0.00	0.22	15.91	1.50	0.00
13	134,999	362	0.25	0.00	0.22	15.91	3.00	0.00
14	139,835	356	0.25	0.00	0.22	15.91	3.50	0.00
15	144,854	349	0.25	0.00	0.22	15.91	4.00	0.00
16	149,982	343	0.25	0.00	0.22	15.91	4.50	0.00
17	130,997	403	0.50	0.00	0.00	15.91	2.00	0.00
18	131,041	400	0.50	0.00	0.13	15.91	2.00	0.00
19	134,442	394	0.50	0.00	0.22	15.91	2.50	0.00
20	139,114	388	0.50	0.00	0.22	15.91	2.50	0.00
21	143,982	381	0.50	0.00	0.22	15.91	4.00	0.00
22	148,899	375	0.50	0.00	0.22	15.91	4.50	0.00
23	153,892	368	0.50	0.00	0.24	15.91	4.00	0.00
24	159,008	362	0.50	0.00	0.22	15.91	5.00	0.00
25	137,518	425	0.75	0.00	0.00	15.91	2.50	0.00
26	137,540	423	0.75	0.18	0.14	15.91	2.00	0.00
27	138,746	420	0.75	0.28	0.22	15.91	2.00	0.00
28	143,321	413	0.75	0.00	0.22	15.91	3.00	0.00
29	148,002	407	0.75	0.00	0.22	15.91	3.00	0.00
30	152,827	400	0.75	0.00	0.22	15.91	4.00	0.00
31	157,872	394	0.75	0.00	0.24	15.91	5.00	0.00
32	162,936	388	0.75	0.00	0.22	15.91	5.50	0.00
33	168,122	381	0.75	0.00	0.22	15.91	6.00	0.00
34	144,033	445	1.00	0.14	0.15	15.91	2.50	0.00
35	147,549	439	1.00	0.26	0.22	15.91	2.50	0.00
36	152,123	432	1.00	0.00	0.22	15.91	3.00	0.00
37	156,895	426	1.00	0.00	0.22	15.91	3.50	0.00
38	161,870	420	1.00	0.00	0.22	15.91	5.00	0.00
39	166,697	413	1.00	0.00	0.22	15.91	4.50	0.00
40	171,865	407	1.00	0.00	0.22	15.91	5.50	0.00
41	177,171	400	1.00	0.00	0.22	15.91	6.50	0.00

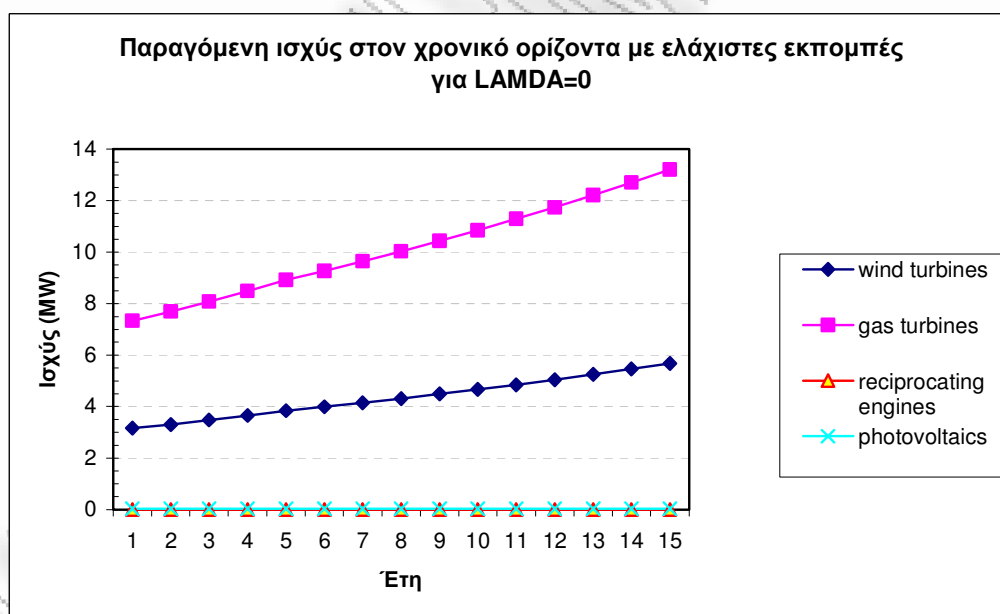
Επειδή οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης είναι ήδη εγκατεστημένες στην αρχή του ορίζοντα σχεδιασμού²⁰ και δε μπορούμε να βγάλουμε συμπέρασμα για τη συμμετοχή τους στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από τον παραπάνω πίνακα αλλά και για να μελετήσουμε τα αποτελέσματα παραγόμενης ισχύος όλων των τεχνολογιών για όλες τις περιοχές της ΚΔΦ, παραθέτουμε στο σημείο αυτό διαγράμματα της, για δύο τιμές του LAMDA. Για κάθε τιμή του LAMDA επιλέξαμε να παρουσιάσουμε τις ακραίες λύσεις²¹, δηλαδή τη λύση με το ελάχιστο κόστος και αυτή με τις ελάχιστες εκπομπές.

²⁰ Η ισχύς τους μειώνεται βέβαια στο 8^ο έτος λόγω παλαιότητας

²¹ Ακραίες για τη συγκεκριμένη τιμή του LAMDA και όχι για το σύνολο του εφικτού χωρίου



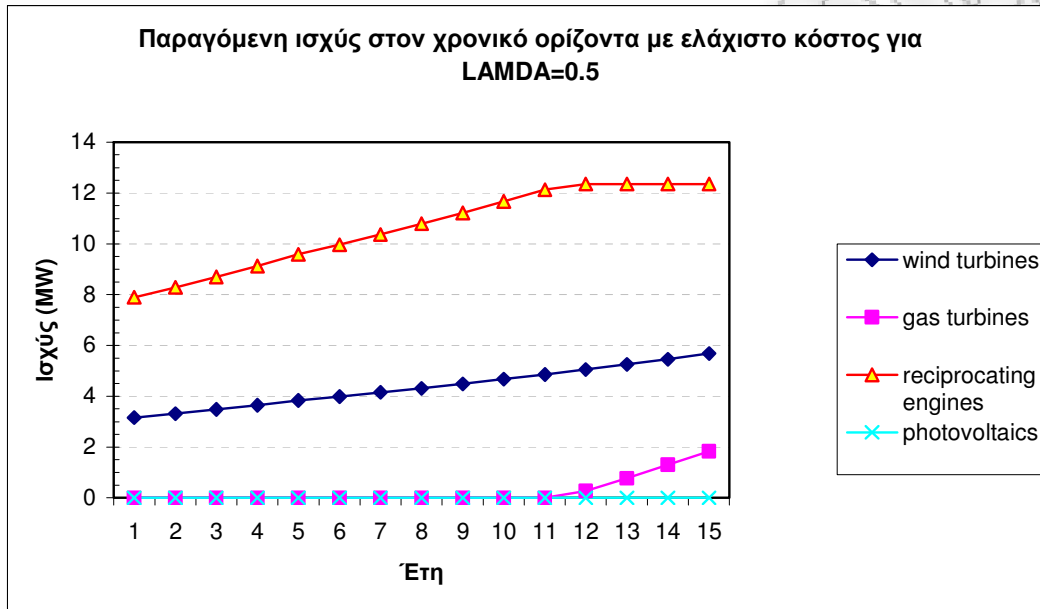
Γράφημα 12: Συνολική ετήσια παραγόμενη ισχύς για όλες τις περιοχές της ΚΔΦ με ελάχιστο κόστος για LAMDA=0



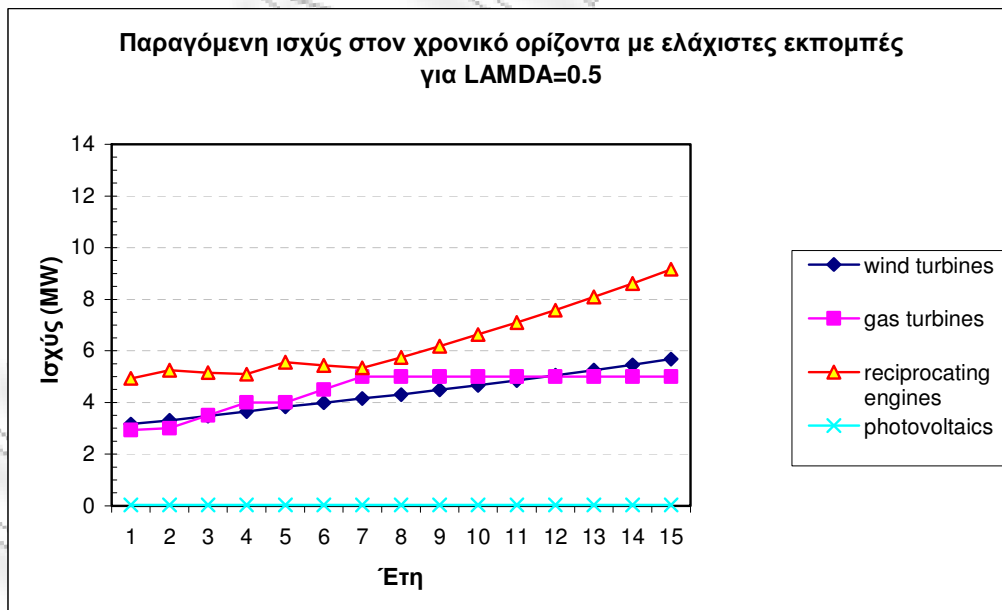
Γράφημα 13: Συνολική ετήσια παραγόμενη ισχύς για όλες τις περιοχές της ΚΔΦ με ελάχιστες εκπομπές για LAMDA=0

Συγκρίνοντας τα δύο παραπάνω διαγράμματα παρατηρούμε ξανά ότι για να επιτευχθούν οι ελάχιστες εκπομπές η παραγόμενη ισχύς των παλινδρομικών μηχανών εσωτερικής καύσης μηδενίζεται, και αντικαθίσταται από αεριοστρόβιλους. Οι ανεμογεννήτριες έχουν ίδια

παραγόμενη ισχύ κάθε έτος και για τις δύο λύσεις (και σε όλο το σύνολο των λύσεων του εφικτού χωρίου) εξαιτίας των περιορισμών δυναμικότητας για αυτή την τεχνολογία, ενώ τα φωτοβολταϊκά έχουν ελάχιστη συνεισφορά στην κάλυψη του απαιτούμενου φορτίου.



Γράφημα 14: Συνολική ετήσια παραγόμενη ισχύς για όλες τις περιοχές της ΚΔΦ με ελάχιστο κόστος για LAMBDA=0.5



Γράφημα 15: Συνολική ετήσια παραγόμενη ισχύς για όλες τις περιοχές της ΚΔΦ με ελάχιστες εκπομπές για LAMBDA=0.5

Τα διαγράμματα 14 και 15, με $LAMDA=0.5$ διαφέρουν από τα προηγούμενα στο ότι η ισχύς των παλινδρομικών μηχανών δε μηδενίζεται για ελάχιστες εκπομπές CO_2 , λόγω του ότι η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας είναι μεγαλύτερη. Στο Παράρτημα Γ παρατίθενται προς σύγκριση με τα παραπάνω, αντίστοιχα διαγράμματα της πρόσθετης εγκατεστημένης ισχύος κάθε τεχνολογίας.

Το πλεονέκτημα αυτής της μεθόδου επίλυσης (augmented ϵ -constraint) είναι ότι ο αποφασίζων μπορεί να δει όλη την εικόνα, δηλαδή όλες τις εφικτές λύσεις (ή ένα αντιπροσωπευτικό υποσύνολο)²² και τα χαρακτηριστικά τους. Συγκεκριμένα ο αποφασίζων έχει στη διάθεση του, τις τιμές όλων των μεταβλητών απόφασης κάθε λύσης: κόστος, CO_2 , $LAMDA$, εγκατεστημένη ισχύς και παραγόμενη ισχύς κάθε τεχνολογίας (για κάθε περιοχή της ΚΔΦ και κάθε περίοδο). Επειδή ο αριθμός των εφικτών μας λύσεων είναι μεγάλος 179, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της αλληλεπιδραστικής διύλισης (interactive filtering), προκειμένου ο αποφασίζων να επιλέξει την πλέον κατάλληλη.

Στο Γράφημα 16 απεικονίζονται τα βήματα της μεθόδου, μέσω διαγραμμάτων, που ακολουθήθηκαν στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης για να επιλεγεί μία λύση μεταξύ των 179 εφικτών λύσεων. Η όλη διαδικασία ολοκληρώθηκε σε 4 επαναλήψεις, και σε κάθε επανάληψη επιλέχθηκε μία από τις 5 αντιπροσωπευτικές λύσεις (η επιλογή σημειώνεται με κύκλο στα διαγράμματα). Ο ρόλος του DM παίχθηκε από ακαδημαϊκό, ειδικό στα ενεργειακά ζητήματα. Ο αποφασίζων μπορεί να δει την απόδοση κάθε μίας εκ των αντικειμενικών συναρτήσεων (ποσοστιαία %, με το 0% να αντιστοιχεί στην χειρότερη τιμή του κριτηρίου και το 100% στην ιδανική τιμή του), με τη μορφή γραφημάτων με μπάρες, αλλά και τις τιμές των αντικειμενικών κριτηρίων και των κύριων μεταβλητών απόφασης, προκειμένου να συγκρίνει τις 5 εναλλακτικές λύσεις. Οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές παρουσιάζονται στον Πίνακα 8 και οι εφικτές λύσεις από τις οποίες προκύπτουν στον Πίνακα 9. Παρατηρείται ότι όσο προχωράει η διαδικασία, οι αποδόσεις των κριτηρίων κάθε επανάληψης συγκλίνουν, που σημαίνει ότι ο DM τελικά επικεντρώνεται σε συγκεκριμένη περιοχή του εφικτού χωρίου. Κατά συνέπεια με αυτή τη μέθοδο, ο μεγάλος όγκος πληροφοριών που προκύπτει από τις 179 λύσεις, μειώνεται σημαντικά καθώς ο αποφασίζων έχει να επιλέξει μεταξύ 5 μόνο λύσεων κάθε φορά, οδηγώντας σταδιακά την επιλογή του σε μια συγκεκριμένη περιοχή του εφικτού χωρίου. Ταυτόχρονα, ο DM έχει αρκετές πληροφορίες για να συγκρίνει αποτελεσματικά τις εναλλακτικές λύσεις βάση των προτιμήσεων του. Η μέθοδος interactive filtering

²² προσδίδοντας διαφορετικές τιμές στην παράμετρο ϵ

εφαρμόστηκε στο Microsoft Excel και οι απαιτούμενες μακροεντολές γράφτηκαν σε κώδικα VBA.

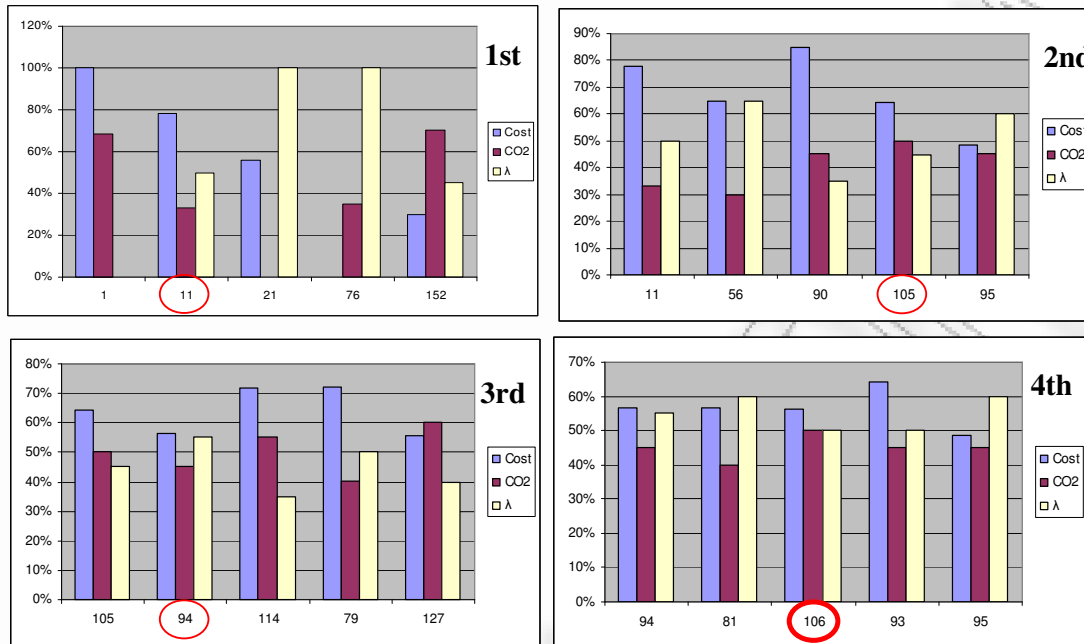
Σύμφωνα με το 1^ο διάγραμμα του Γραφήματος 16, ο DM συγκρίνει πρώτα τις εφικτές λύσεις #1, #11, #21, #76, #152 και επιλέγει την #11 που είναι και η πιο ισορροπημένη όσον αφορά τις αποδόσεις όλων των κριτηρίων. Έπειτα η περιοχή συστέλλεται γύρω από τη λύση 11 και προκύπτει ένα νέο υποσύνολο 5 λύσεων (#11, #56, #90, #105, #95), με αποδόσεις που φαίνονται στο 2^ο διάγραμμα του γραφήματος, οι οποίες παρουσιάζονται στον DM μαζί με τις αντίστοιχες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων και των κύριων μεταβλητών απόφασης. Εν συνεχεία ο DM επιλέγει τη λύση #105. Στην τρίτη επανάληψη ο αποφασίζων επιλέγει τη λύση #94 και στην τελευταία επανάληψη τη λύση 106 που είναι και η τελική του επιλογή. Οι τιμές των κριτηρίων κάθε επανάληψης παρουσιάζονται στον Πίνακα 10 ενώ τα τεχνικά χαρακτηριστικά και η ετήσια εξέλιξη του ηλεκτρικού συστήματος για την επιλεγμένη λύση στο Παράρτημα Δ.

Πίνακας 8: Μέγιστες και ελάχιστες τιμές του εφικτού χωρίου

	Κόστος (χιλιάδες €)	CO₂ (kt)	LAMDA
max	177,171	445	1
min	117,998	317	0

Πίνακας 9: Εφικτές λύσεις από τις οποίες προκύπτουν οι μέγιστες και ελάχιστες τιμές

	Κόστος (χιλιάδες €)	CO₂ (kt)	LAMDA
	177,171	400	1
	117,998	358	0
	144,033	445	1
	148,720	317	0



Γράφημα 16: Εφαρμογή μεθόδου interactive filtering σε 4 επαναλήψεις. Οι λύσεις σε κύκλο είναι αυτές που επιλέχθηκαν σε κάθε επανάληψη.

Πίνακας 10: Τιμές κριτηρίων για κάθε επανάληψη της μεθόδου interactive filtering

	1 ^η επανάληψη	2 ^η επανάληψη	3 ^η επανάληψη	4 ^η επανάληψη
Λύση	11	105	94	106
Κόστος (χιλιάδες €)	130,997	139,205	143,731	143,982
Εκπομπές CO ₂ (kt)	403	381	387	381
Lambda	0.5	0,45	0.55	0.5

6.2 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΤΙΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ ΣΗΜΕΙΟΥ ΑΝΑΦΟΡΑΣ (REFERENCE POINT INTERACTIVE PROCESS)

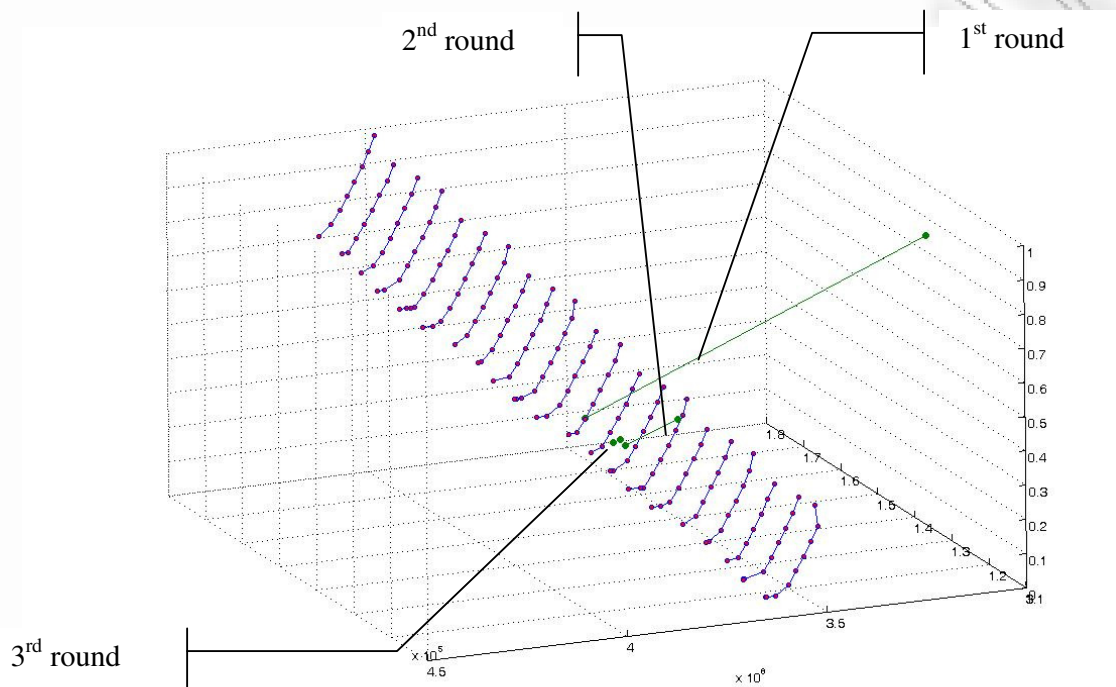
Το πρώτο βήμα εφαρμογής αυτής της μεθόδου είναι η παρουσίαση των λύσεων του πίνακα pay-off (Πίνακας 11) στον αποφασίζοντα, με σκοπό να διευκολυνθεί στην επιλογή των σημείων αναφοράς. Στην παρούσα εργασία, ο αποφασίζων (DM) επιλέγει αποδόσεις (ποσοστό % των καλύτερων τιμών του πίνακα pay-off), αντί σημείων αναφοράς σε απόλυτες τιμές. Η επίλυση ολοκληρώθηκε σε 7 seconds.

Πίνακας 11: Pay-off πίνακας

Αντικειμενική συνάρτηση	Κόστος (χιλιάδες €)	CO ₂ (kt)	LAMDA
κόστος	117,998 ²³	358	0
εκπομπές CO ₂	148,720	317	0
ικανοποίηση της ζήτησης (lamda)	144,033	445	1

Αρχικά, ο DM στοχεύει στην ιδεώδη (αλλά όχι εφικτή) λύση. Η κοντινότερη λύση στην ιδανική που ανήκει στο εφικτό χωρίο παρουσιάζεται στον Πίνακα 12. Οι αποδόσεις είναι ίσες για όλα τα κριτήρια (45%). Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού συστήματος και η ετήσια εξέλιξη του παρουσιάζονται στο Παράρτημα (Πίνακας E1). Παρατηρούμε ότι οι ανεμογεννήτριες κυριαρχούν σαν τεχνολογία με εγκατεστημένη ισχύ που ξεκινάει από τα 7.5 MW και αυξάνεται σταδιακά ως τα 15 MW στο τέλος του ορίζοντα σχεδιασμού. 220 kW φωτοβολταϊκών εγκαθίστανται στην αρχή του ορίζοντα σχεδιασμού, ενώ 2MW αεριοστροβίλων στο 10ο έτος. Οι αλλαγές που παρατηρούνται στις επόμενες επαναλήψεις της αλληλεπιδραστικής διαδικασίας εστιάζονται στην εγκατεστημένη ισχύ των αεριοστροβίλων και στο έτος εγκατάστασης. Στο Γράφημα 17 και στον Πίνακα 12, φαίνονται οι διαφοροποιήσεις των τιμών των κριτηρίων κάθε σημείου αναφοράς αλλά οι αντίστοιχες αλλαγές στα τεχνικά χαρακτηριστικά (Πίνακας E2 και E3) είναι μικρές και κατά συνέπεια ο αποφασίζων δεν έχει κίνητρο να εξερευνήσει περαιτέρω το εφικτό χωρίο, και αποδέχεται τη λύση μετά από 3 επαναλήψεις.

²³ Η διαγώνιος είναι το ιδεώδες σημείο



Γράφημα 17: Εφικτό χωρίο και προτιμότερη λύση μετά από 3 επαναλήψεις

Πίνακας 12: Σημεία αναφοράς και προβολές στο εφικτό χωρίο

	1 ^η επανάληψη		2 ^η επανάληψη		3 ^η επανάληψη	
	Σημείο αναφοράς	Προβολή	Σημείο αναφοράς	Προβολή	Σημείο αναφοράς	Προβολή
Κόστος (χιλιάδες €)	117,998 (100%)*	134,832 (45%)	130,287 (60%)	132,876 (52%)	131,823 (55%)	132,210 (54%)
Εκπομπές CO ₂ (kt)	317 (100%)	387 (45%)	368 (60%)	379 (52%)	381 (50%)	383 (49%)
Lambda	1 (100%)	0.45 (45%)	0.45 (45%)	0.37 (37%)	0.40 (40%)	0.39 (39%)

7. ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΘΟΔΩΝ ΚΑΙ ΣΕΝΑΡΙΩΝ

7.1 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΤΩΝ ΔΥΟ ΜΕΘΟΔΩΝ ΕΠΙΛΥΣΗΣ ΤΟΥ ΠΚΓΠ

Το πρώτο στάδιο επίλυσης και των δύο προηγούμενων μεθόδων, είναι η παραγωγή του πίνακα πληρωμών (pay-off table), με τη μέθοδο της λεξικογραφικής αριστοποίησης.

Στην πρώτη περίπτωση επίλυσης με την εφαρμογή της επαυξημένης μεθόδου των περιορισμών, αφού παραχθεί ο πίνακας πληρωμών, παράγεται το υποσύνολο των εφικτών λύσεων και τελικά ο DM μέσω της αλληλεπιδραστικής δύλισης επιλέγει την επιθυμητή λύση. Για να διευκολυνθεί η διαδικασία απόφασης οι λύσεις κάθε επανάληψης της τελευταίας μεθόδου παρουσιάζονται σαν απόδοση % της διαφοράς των βέλτιστων και χειρότερων τιμών για κάθε κριτήριο. Οι βέλτιστες και οι χειρότερες τιμές που χρησιμοποιούνται ως τιμές αναφοράς όπως παρουσιάζονται στον Πίνακα 8, προέκυψαν μετά την παραγωγή των εφικτών λύσεων και είναι στην πραγματικότητα οι ακραίες τιμές του υποσυνόλου των εφικτών λύσεων.

Για τα κριτήρια ελαχιστοποίησης κόστους και εκπομπών CO₂ τα ποσοστά απόδοσης προκύπτουν από τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{\max obj - x}{\max obj - \min obj} \%$$

Όπου x η τιμή του κριτηρίου της επιλεγμένης λύσης

Ενώ για το κριτήριο max LAMDA ο αντίστοιχος τύπος είναι ο εξής:

$$\frac{x - \min obj}{\max obj - \min obj} \%$$

Στην περίπτωση της μεθόδου του σημείου αναφοράς, ο αποφασίζων επιλέγει απευθείας ποσοστά απόδοσης όπως και στην προηγούμενη μέθοδο και με επίλυση, το Gams παρουσιάζει ως ποσοστό απόδοσης την κοντινότερη λύση σε αυτή που επέλεξε, η οποία όμως ανήκει στο εφικτό χωρίο, και η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται μέχρι ο DM να καταλήξει στη λύση που επιθυμεί. Εντούτοις τα ποσοστά αυτά έχουν ως ακραίες τιμές τις τιμές του πίνακα πληρωμών που δε συμπίπτουν με τις πραγματικές ακραίες τιμές. Συγκρίνοντας τους πίνακες 8 και 11 βλέπουμε ότι αποκλίνουν ως προς τις χειρότερες τιμές και συγκεκριμένα ως προς την ανώτερη τιμή κόστους.

Για να μπορέσουμε να συγκρίνουμε τις λύσεις στις οποίες κατέληξε ο DM για τις δύο διαφορετικές μεθόδους, παρουσιάζουμε στον Πίνακα 13 τις απόλυτες τιμές των λύσεων και τα ποσοστά βάση των πραγματικών ακραίων τιμών (βλ. Πίνακα 8) και για τις δύο περιπτώσεις.

Πίνακας 13: Τιμές και αποδόσεις κριτηρίων προτιμότερης λύσης (για τον αποφασίζοντα) και των δύο μεθόδων βάση των πραγματικών ακραίων τιμών.

Επιλεγμένες λύσεις	Κόστος (χιλιάδες €)	CO2 (kt)	LAMDA
Επαυξημένη μέθοδος των περιορισμών	143,982 (57%)	381 (50%)	0.5 (50%)
Μέθοδος σημείου αναφοράς	132,210 (75%)	383 (49%)	0.39 (39%)

Στον παραπάνω πίνακα βλέπουμε, ότι ο αποφασίζων καταλήγει σε 2 αρκετά διαφορετικά αποτελέσματα. Στη μέθοδο σημείου αναφοράς η λύση έχει ως κύριο χαρακτηριστικό την υψηλή απόδοση για το κριτήριο του κόστους 75% και μειωμένη τιμή ικανοποίησης της ζήτησης 39% , ενώ στην επαυξημένη μέθοδο περιορισμών η επιλεγμένη λύση είναι αρκετά πιο ισορροπημένη. Στην πράξη βέβαια ο αποφασίζων στη δεύτερη μέθοδο θεωρεί ότι επιλέγει πιο ισορροπημένη λύση αφού το ποσοστό του κριτηρίου κόστους που παράγει η μέθοδος βάση του πίνακα pay-off είναι 54% και όχι 75%. Όπως προαναφέρθηκε και στις δύο μεθόδους, ο αποφασίζων μπορεί να δει και τις τιμές των μεταβλητών απόφασης, προκειμένου να διευκολυνθεί στην επιλογή της τελικής λύσης.

Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε συγκρίνοντας τις παραπάνω μεθόδους, είναι ότι ο αποφασίζων δε μπορεί να είναι το ίδιο βέβαιος για την επιλογή του, στην περίπτωση της μεθόδου του σημείου αναφοράς σε σχέση με την επαυξημένη μέθοδο των περιορισμών, καθώς δε βλέπει ολόκληρη την εικόνα²⁴ και κατά συνέπεια οι αποδόσεις των κριτηρίων μπορεί να μην αντιπροσωπεύουν την πραγματικότητα όπως είδαμε παραπάνω. Έχει βέβαια τη δυνατότητα να επαναλάβει τη διαδικασία πολλές φορές μέχρι να επιλέξει την τελική λύση και να μελετήσει εκτός από τις τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων και αυτές των μεταβλητών απόφασης. Από την άλλη μεριά το βασικό μειονέκτημα της επαυξημένης μεθόδου των περιορισμών, είναι ότι απαιτεί πολύ μεγαλύτερο χρόνο επίλυσης (171 sec έναντι μόλις 7sec στην παρούσα εργασία) κάτι που σε μεγαλύτερα μοντέλα ΠΚΓΠ από το δικό μας, μπορεί να είναι απαγορευτικό. Επιπλέον λόγω του μεγάλου όγκου των εφικτών λύσεων που

²⁴ Σε σύγκριση με τη μέθοδο των περιορισμών που ο αποφασίζων βλέπει το σύνολο των εφικτών λύσεων, των οποίων η παραγωγή κατά το πρώτο στάδιο γίνεται απολύτως αντικειμενικά

παράγονται, κρίνεται απαραίτητη η χρήση μεθόδων επιλογής μεταξύ αυτών, όπως η μέθοδος της αλληλεπιδραστικής διύλισης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα εργασία. Τέλος, οι εξισώσεις που απαιτούνται για την εφαρμογή της επαυξημένης μεθόδου των περιορισμών, είναι πιο πολύπλοκες από τις αντίστοιχες της άλλης μεθόδου, κάτι που δυσκολεύει τη μοντελοποίηση του προβλήματος στο περιβάλλον GAMS (βλ. Παράρτημα ΣΤ)

7.2 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΣΕΝΑΡΙΟΥ 1 ΚΑΙ 2

Συγκρίνοντας τους πίνακες πληρωμών 14 και 15, βλέπουμε ότι το κόστος της επέκτασης του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής είναι μικρότερο στην περίπτωσης χρήσης των μηχανών απορρόφησης παρότι έχει ενσωματωθεί το κόστος αγοράς τους. Ιδιαίτερα σημαντική είναι και η διαφορά των εκπομπών CO₂ όπως ήταν αναμενόμενο.

Πίνακας 14: pay-off πίνακας σεναρίου 1

Αντικειμενική συνάρτηση	Κόστος (χιλιάδες €)	CO ₂ (kt)	LAMDA
κόστος	117,998	358	0
εκπομπές CO ₂	148,720	317	0
ικανοποίηση της ζήτησης (lamda)	144,033	445	1

Πίνακας 15: Pay-off πίνακας σεναρίου 2

Αντικειμενική συνάρτηση	Κόστος (χιλιάδες €)	CO ₂ (kt)	LAMDA
κόστος	108,150	314	0
εκπομπές CO ₂	135,199	278	0
ικανοποίηση της ζήτησης (lamda)	132,665	398	1

Ένα υποσύνολο των εφικτών λύσεων για αυτό το σενάριο και οι αντίστοιχες εγκατεστημένες ισχύς κάθε τεχνολογίας στο τέλος του ορίζοντα σχεδιασμού, απεικονίζονται στον Πίνακα 16.

Πίνακας 16: Εφικτές λύσεις και συνολική πρόσθετη εγκατεστημένη ισχύς στο τέλος του ορίζοντα σχεδιασμού για κάθε τεχνολογία, για το σενάριο 2

Εφικτή λύση	Κόστος (χιλιάδες €)	CO ₂ (kt)	LAMDA	Παλιόδρομικές μηχανές (MW)	Φωτοβολταϊκά (MW)	Ανεμογεννήτριες (MW)	αεριοστρόβιλοι (MW)	ατμοστρόβιλοι
1	108,150	315	0.00	0.00	0.02	15.89	0.00	0.00
2	108,155	314	0.00	0.00	0.02	15.89	0.00	0.00
3	109,816	308	0.00	0.00	0.22	15.89	0.50	0.00
4	114,292	302	0.00	0.00	0.22	15.89	1.50	0.00
5	118,833	296	0.00	0.00	0.22	15.89	3.00	0.00
6	123,374	290	0.00	0.00	0.22	15.89	3.00	0.00
7	128,182	284	0.00	0.00	0.22	15.89	3.50	0.00
8	135,199	278	0.00	0.00	0.22	15.89	2.00	0.00
9	114,243	336	0.25	0.00	0.00	15.89	0.00	0.00
10	114,309	332	0.25	0.00	0.20	15.89	0.00	0.00
11	118,602	326	0.25	0.00	0.22	15.89	1.50	0.00
12	123,068	320	0.25	0.00	0.22	15.89	2.50	0.00
13	127,560	314	0.25	0.00	0.22	15.89	3.00	0.00
14	132,175	308	0.25	0.00	0.22	15.89	3.50	0.00
15	136,993	302	0.25	0.00	0.22	15.89	4.00	0.00
16	120,335	357	0.50	0.00	0.00	15.89	0.00	0.00
17	120,359	356	0.50	0.00	0.07	15.89	0.00	0.00
18	122,840	350	0.50	0.00	0.22	15.89	1.00	0.00
19	127,301	344	0.50	0.00	0.22	15.89	2.00	0.00
20	131,777	338	0.50	0.00	0.22	15.89	3.00	0.00
21	136,307	332	0.50	0.00	0.22	15.89	3.50	0.00
22	140,996	326	0.50	0.00	0.22	15.89	4.00	0.00
23	145,809	320	0.50	0.00	0.22	15.89	4.50	0.00
24	126,515	376	0.75	0.08	0.16	15.89	0.00	0.00
25	127,068	374	0.75	0.00	0.22	15.89	0.50	0.00
26	131,535	368	0.75	0.00	0.22	15.89	1.50	0.00
27	136,010	362	0.75	0.00	0.22	15.89	2.50	0.00
28	140,505	356	0.75	0.00	0.22	15.89	3.50	0.00
29	145,094	350	0.75	0.00	0.22	15.89	4.00	0.00
30	149,884	344	0.75	0.00	0.22	15.89	4.50	0.00
31	154,680	338	0.75	0.00	0.22	15.89	5.00	0.00
32	132,665	398	1.00	0.04	0.13	15.89	0.50	0.00
33	135,769	392	1.00	0.00	0.22	15.89	1.00	0.00
34	140,243	386	1.00	0.00	0.22	15.89	2.00	0.00
35	144,721	380	1.00	0.00	0.22	15.89	3.00	0.00
36	149,255	374	1.00	0.00	0.22	15.89	4.00	0.00
37	153,928	368	1.00	0.00	0.22	15.89	4.50	0.00
38	158,699	362	1.00	0.00	0.22	15.89	5.00	0.00
39	163,849	356	1.00	0.00	0.22	15.89	6.50	0.00

Συγκρίνοντας με τον Πίνακα 7, παρατηρούμε ότι η ισχύς των ανεμογεννητριών και των φωτοβολταϊκών είναι σχεδόν ίδια με αυτή του βασικού σεναρίου. Όπως ήταν αναμενόμενο, η μείωση της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, αντικατοπτρίζεται πρωτίστως στη μείωση της εγκατεστημένης ισχύος των αεριοστροβίλων και δευτερευόντως των μηχανών εσωτερικής καύσης, καθώς αυτές οι τεχνολογίες εξυπηρετούν τα φορτία αιχμής, τα οποία μειώθηκαν στο παρόν σενάριο.

8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στην εφαρμογή του Μικτού Ακέραιου Πολυκριτηριακού Γραμμικού Προγραμματισμού, σε ένα αυτόνομο σύστημα και συγκεκριμένα το νησί της Μήλου. Το μοντέλο Μικτού Ακέραιου ΠΚΓΠ (MOMILP) λαμβάνει υπόψη την αβεβαιότητα στη μελλοντική ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας και αυτή αντιμετωπίζεται σαν ασαφής παράμετρος. Τρία κριτήρια, η ελαχιστοποίηση του κόστους, η ελαχιστοποίηση εκπομπών CO₂ και η μεγιστοποίηση του βαθμού ικανοποίησης της αυξημένης ζήτησης αποτελούν τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Το μοντέλο ΠΚΓΠ επιλύθηκε με δύο πολυκριτηριακές μεθόδους, μια μέθοδο παραγωγής (επαυξημένη μέθοδος των περιορισμών) και μια αλληλεπιδραστική μέθοδο (μέθοδος σημείου αναφοράς).

Στην επαυξημένη μέθοδο των περιορισμών, παράγονται πρώτα εντελώς αντικειμενικά οι εφικτές λύσεις (το σύνολο τους ή ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα) και στη συνέχεια ο αποφασίζων επιλέγει μεταξύ τους την τελική λύση. Από τη στιγμή που ο αποφασίζων βλέπει ολόκληρη την εικόνα του εφικτού χωρίου, ενισχύεται η βεβαιότητα του για την τελική λύση. Εντούτοις, η μέθοδος αυτή, είναι αρκετά πολύπλοκη σε σύγκριση με τη μέθοδο του σημείου αναφοράς και αυξανόμενου του μεγέθους του προβλήματος, αυξάνεται το πλήθος των εφικτών λύσεων και ο υπολογιστικός χρόνος. Προκειμένου, ο αποφασίζων να επιλέξει μεταξύ πολλών εναλλακτικών, δύναται να εφαρμοστεί η μέθοδος της αλληλεπιδραστικής διύλισης.

Στη μέθοδο του σημείου αναφοράς, φάσεις διαλόγου με τον αποφασίζοντα εναλλάσσονται με φάσεις υπολογισμών από το πρόγραμμα. Συνήθως η διαδικασία ολοκληρώνεται μετά από λίγες επαναλήψεις. Το μειονέκτημα της μεθόδου είναι, ότι ο αποφασίζων δε μπορεί να δει το σύνολο των εφικτών λύσεων (ή ένα αντιπροσωπευτικό υποσύνολο). Κατά συνέπεια η προτιμώμενη λύση είναι προτιμώμενη σε σχέση με ότι έχει δει μέχρι στιγμής. Από την άλλη μεριά, επειδή παρουσιάζεται στον αποφασίζοντα μόνο μια λύση σε κάθε επανάληψη, είναι πιο εύκολο να μελετήσει τις τιμές των μεταβλητών απόφασης που αντιστοιχούν σε αυτή και λαμβάνοντας τες υπόψη, να αναπροσαρμόσει κατάλληλα τα ποσοστά απόδοσης στην επόμενη επανάληψη.

Όσον αφορά τη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης, το πρώτο συμπέρασμα που μπορούμε να εξάγουμε, είναι ότι το μοντέλο μικτού ακέραιου μαθηματικού προγραμματισμού (MILP) παρέχει στον αποφασίζοντα τη δυνατότητα ρεαλιστικής και ελαστικής μοντελοποίησης. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε μπορεί να αντιμετωπίσει την αβεβαιότητα στη μελλοντική ζήτηση και επιπλέον είναι ελαστικό στην προσθήκη ή αφαίρεση περιορισμών με την ελάχιστη

υπολογιστική προσπάθεια. Όσον αφορά τη συγκεκριμένη εφαρμογή στο νησί της Μήλου, οι ανεμογεννήτριες εμφανίζονται σε όλες τις εφικτές λύσεις (“win-win” λύσεις) παρουσιάζοντας καλή οικονομική και περιβαλλοντική επίδοση. Αντιθέτως οι αμμοστρόβιλοι δεν παρουσιάζονται σε καμία λύση, ενώ ένας συνδυασμός των μηχανών εσωτερικής καύσης και των αεριοστρόβιλων καλύπτουν τις θερμοηλεκτρικές ανάγκες. Οι αεριοστρόβιλοι ευνοούνται όταν δίνεται μεγαλύτερη βαρύτητα στις εκπομπές CO₂ και τα φωτοβολταϊκά εμφανίζονται όποτε μετακινούμαστε από οικονομικά σε περιβαλλοντικά κριτήρια.

Τέλος, η υποκατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας από άλλες τεχνολογίες, αποτελεί πρόκληση για τα προβλήματα επέκτασης συστημάτων ηλεκτροπαραγωγής, καθώς επηρεάζει το σχήμα της Καμπύλης Διάρκειας Ηλεκτρικού Φορτίου. Στα πλαίσια αυτά και δεδομένου του σημαντικού γεωθερμικού πεδίου της Μήλου, εξετάστηκε το ενδεχόμενο χρήσης μηχανών απορρόφησης για την κάλυψη των αναγκών σε ψύξη κατά τους καλοκαιρινούς μήνες που υποκαθιστά την αιχμή ζήτησης σε ηλεκτρική ενέργεια το αντίστοιχο διάστημα. Το αποτέλεσμα είναι η μείωση του κόστους επέκτασης του συστήματος ηλεκτροπαραγωγής και η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Αντιθέτως η χρήση της γεωθερμικής ενέργειας για ηλεκτροπαραγωγή δεν εξετάστηκε καθόλου λόγω ισχυρών αντιδράσεων της τοπικής κοινωνίας κατά την προσπάθεια αξιοποίησης της από τη ΔΕΗ στο παρελθόν.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία:

- Antunes, C.H. and Martins, A.G. 2003. OR Models for Energy Policy, Planning and Management. *Annals of Operational Research*, 120/12.
- Antunes, C.H., Martins, A.G. and Brito, I. 2004. A multiple objective mixed integer linear programming model for power generation expansion planning. *Energy*, 29: 613-627.
- Bailey, O., Ouaglal, B., Bartholomew, E., Marnay, C., Bourassa, N. 2002. An Engineering-Economic Analysis of Combined Heat and Power Technologies in a μ Grid Application. Prepared for the U.S. Environmental Protection Agency.
- Belton, V., Stewart, T.J. 2002. Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach. *Kluwer Academic Publishers*, Boston.
- Chattopadhyay, D. 1995. Cost versus emissions minimization in thermal electricity generation: a case of SO₂ emissions reduction from the Indian power system. *International Journal of Energy Research*, 19: 721-727.
- Cheol-Joo Cho, 1999. The economic-energy-environmental policy problem: An application of the interactive multiobjective decision method for Chungbuk Province, *Journal of Environmental Management*, 56: 119-131.
- Clímaco, J., Antunes, C.H., Martins, A.G. and Almeida, A.T. 1995. A Multiple Objective Linear Programming Model for Power Generation Expansion Planning. *International Journal of Energy Research*, 19: 419-432.
- Cohon, J. 1978. Multiobjective Programming and Planning. *Academic Press*, New York.
- Cormio, C., Dicorato, M., Minoia, A., Trovato, M. 2003. A regional energy planning methodology including renewable energy sources and environmental constraints. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 7: 99-130
- Diakoulaki, D., Antunes, CH., Martins, AG. 2005. MCDA and Energy Planning, in: Figueira J, Greco S, Ehrgott M (Eds.) *Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys*, 859-898, Springer.
- Dickson, M. and Fanelli, M. 2004. What is geothermal energy? Istituto di Geoscienze e Georisorse, CNR, Pisa, Italy. Μετάφραση στα ελληνικά: Φύτικας Μ., Παπαχρήστου Μ. 2004.
- European Commission, SAVE II project. Assessment of CHP implementation possibilities in the tourist sector. Final report. June 2001.
- Hobbs, B.F. and Meier, P. 2000. Energy Decisions and the Environment: A Guide to the Use of Multicriteria Methods. *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht.
- Hwang, C.L., Masud, A. 1979. Multiple objective decision making. Methods and Applications: A state of the art survey. *Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems*, 164, Springer-Verlag, Berlin.
- Karytsas, C., Mendrinou, D., Radoglou, G. 2004. The current geothermal exploration and development of the geothermal field of Milos island in Greece. *Geo-Heat Center Bulletin*: 25(2).
- Kavrakoglu, I. and Kiziltan, G. 1983. Multiobjective strategies in power systems Planning. *European Journal of Operational Research*, 12:159-170.
- Kourempele, M., Mavrotas, G., Geronikou, L., Rozakis, S. 2010. Power generation expansion planning in an autonomous island system using multi-objective programming: the case of Milos Island. *ORIJ*, 10:109-132, Spriger

- Lai YJ, Hwang CL. 1992. A New Approach to Some Possibilistic Linear Programming Problems. *Fuzzy Sets and Systems*, 49: 121-133.
- Linares, P. and Romero, C. 2000. A multiple criteria decision making approach for electricity planning in Spain: economic versus environmental objectives. *Journal of the Operational Research Society*, 51: 736-743.
- Linares, P. and Romero, C. 2002. Aggregation of preferences in an environmental economics context: a goal-programming approach. *Omega*, 30: 89-95.
- Manoglou, E., Tsartas, P., Markou, A. 2004. Geothermal energy sources for water production-socio-economic effects and people's wishes on Milos island: a case study. *Energy Policy*, 32: 623-633
- Martins, A.G., Coelho, D., Antunes, C.H. and Clímaco, J. 1996. A Multiple Objective Linear Programming Approach to Power Generation Planning with Demand - Side Management. *International Transactions in Operational Research*, 3: 305-317.
- Mavrotas, G. 2006. Generation of efficient solutions in Multiobjective Mathematical Programming problems using GAMS. Effective implementation of the ϵ -constraint method. *Technical report available in: <http://www.gams.com/modlib/adddocs/epscm.pdf>*
- Mavrotas G. and Diakoulaki D. 2005. A Mixed Integer Multiple Objective Linear Programming model for capacity expansion in an autonomous power generation system. in R. Loulou, J.P. Wauub, G. Zaccour (eds) *Energy and Environment*, 191-210, Springer
- Mavrotas G., Diakoulaki, D. and Papayannakis, L. 1999. An Energy Planning Approach based on Mixed 0-1 MOLP. *International Transactions in Operational Research*, 6: 231-244.
- Mavrotas, G., Diakoulaki, D., Florios, K. and Georgiou, P. 2008. A mathematical programming framework for energy planning in services' sector buildings under uncertainty in load demand: The case of a hospital in Athens, *Energy Policy*, 36: 2415-2429.
- Manoglou, E. Tsartas, P., Markou, A. 2004. Geothermal energy sources for water production-socio-economic effects and people's wishes on Milos island: a case study. *Energy Policy* 32, 623-633.
- Mendrinou, D. and O'Sullivan, M. J. 1987. Modelling of the Milos Geothermal Field in Greece. *Proceedings 9th NZ Geothermal Workshop*
- Oliveira, C. and Antunes, C.H. 2003. A Multiple Objective Model to Deal with Economy-Energy-Environment Interactions. *European Journal of Operational Research*, 153: 370-375.
- Quaddus, M. and Goh, T. 1985. Electric power generation expansion planning with multiple objectives. *Applied Energy*, 19: 301-319.
- Rafferty, K. D. 1998. Chapter 13: Absorption Refrigeration. *Geo-Heat Center Bulletin*. Klamath Falls.
- Rommelfanger H. 1996. Fuzzy linear programming and applications. *European Journal of Operational Research*, 92: 512-527.
- Rozakis, S., Soldatos, P., Kallivroussis, L., and Nicolaou, I. 2001. Multiple Criteria Analysis of Bio-energy Projects: Evaluation of Bio-Electricity Production in Farsala Plain, Greece. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 5(1): 49-64
- Schulz, V. and Stehfest, H. 1984. Regional Energy Supply Optimization with Multiple Objectives. *European Journal of Operational Research*, 17: 302-312
- Steuer R.E. 1989. Multiple Criteria Optimization-Theory, Computation and Application (2nd ed). *Krieger, Malabar FL*.
- Steuer, R.E., 1989. Multiple Criteria Optimization. Theory, Computation and Application. Krieger, 2nd edition, Malabar FL.

Stoll, H.G. 1989. Least-Cost Electricity Utility Planning. *John Wiley & Sons*

Teghem, J. and Kunsch, P. 1985. Application of multiobjective stochastic linear programming to power systems planning. *Engineering Costs and Production Economics*, 9: 83-89.

Vanderpooten, D. and Vincke, P. 1989. Description and analysis of some representative interactive multicriteria procedures, *Mathematical Computation & Modelling*, 12(10/11): 1221-1238.

Wierzbicki, A. P., 1982. A mathematical basis for satisficing decision making. *Mathematical Modelling*, 3: 391-405

Zionts, S. and Deshpande, D. 1981. Energy planning using a multiple criteria decision method. In: P. Nijkamp and J. Spronk (eds.), *Multiple Criteria Analysis: Operational Methods*, 153-162, Gower Press, London. .

Ελληνική βιβλιογραφία:

Ζερβός, Α. 2004. Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας. Αθήνα.

Κουμούτσος, Ν. Γ. 1992. Εφαρμοσμένη Θερμοδυναμική. Έκδοση ΕΜΠ, Αθήνα.

Μαυρωτάς, Γ. 2000. Διδακτορική Διατριβή: Πολυκριτηριακός Προγραμματισμός σε συνθήκες αβεβαιότητας. Κατασκευή συστήματος υποστήριξης αποφάσεων και εφαρμογή στον ενεργειακό σχεδιασμό. Αθήνα.

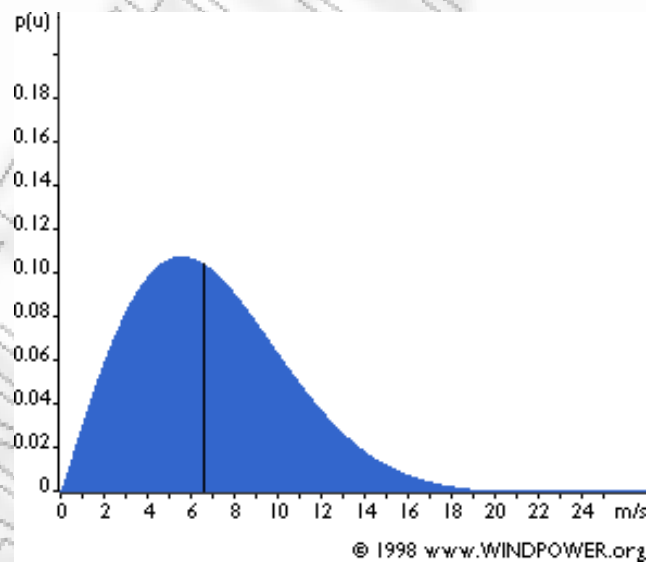
Ηλεκτρονικές διευθύνσεις:

www.windpower.org

www.yazakienergy.com/waterfiredperformance.htm

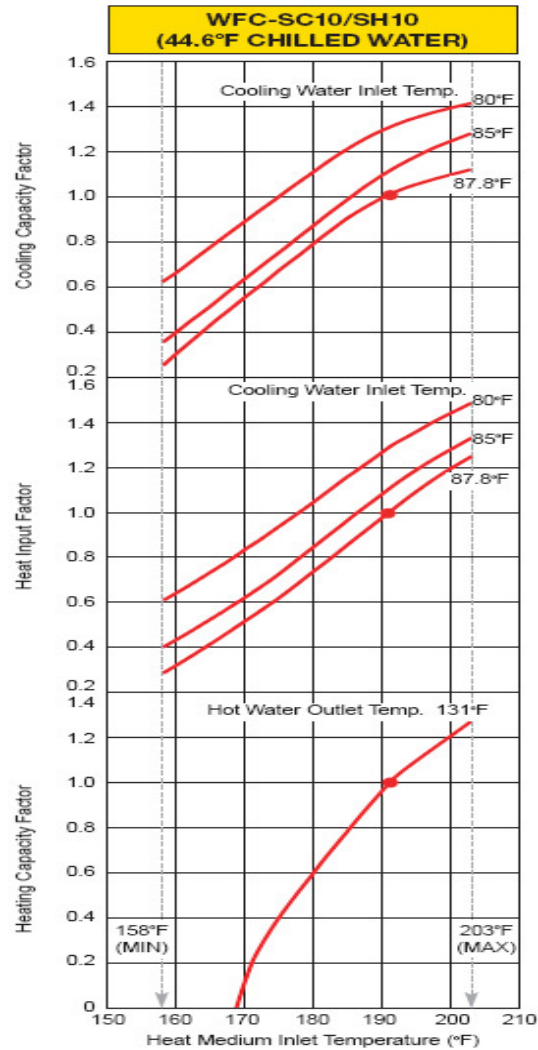
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α.

Η ετήσια παραγωγή ενέργειας από ανεμογεννήτριες, εξαρτάται από το αιολικό δυναμικό της περιοχής και τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ανεμογεννήτριας. Για να υπολογιστεί, χρησιμοποιείται η κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου και η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας. Η κατανομή της ταχύτητας είναι ένα ποσοτικό μέγεθος και απεικονίζει τον αριθμό των ωρών εμφάνισης ενός εύρους ταχυτήτων του ανέμου (βλ. Γράφημα 18). Η καμπύλη ισχύος είναι η παραγωγή ισχύος της ανεμογεννήτριας για διάφορες ταχύτητες του ανέμου και εξαρτάται από τα γεωμετρικά της χαρακτηριστικά και το σχεδιασμό της. Όταν τα δύο αυτά μεγέθη πολλαπλασιαστούν και αθροιστούν για όλες τις ταχύτητες ανέμου προκύπτει η ετήσια παραγωγή ενέργειας. Ο συντελεστής εκμεταλλευσιμότητας (capacity factor) της ανεμογεννήτριας, είναι ο λόγος της πραγματικής ετήσιας παραγωγής ενέργειας προς την ενέργεια που θα παραγόταν, αν η αιολική μηχανή ή το πάρκο λειτουργούσαν όλο το έτος στην ονομαστική τους ισχύ. Κατά συνέπεια γνωρίζοντας τον συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας και την εγκατεστημένη ισχύ μπορούμε να υπολογίσουμε την ετήσια παραγωγή ενέργειας (Ζερβός, 2004 ; www.windpower.org).



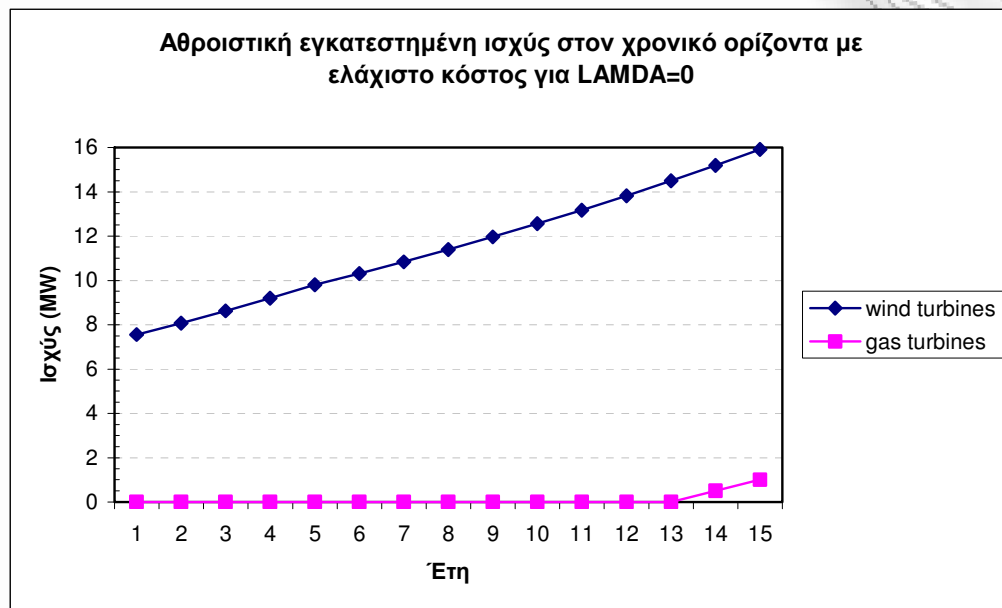
Γράφημα 18: Κατανομή πυκνότητας πιθανότητας της ταχύτητας του ανέμου
(Πηγή: www.windpower.org)

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β.

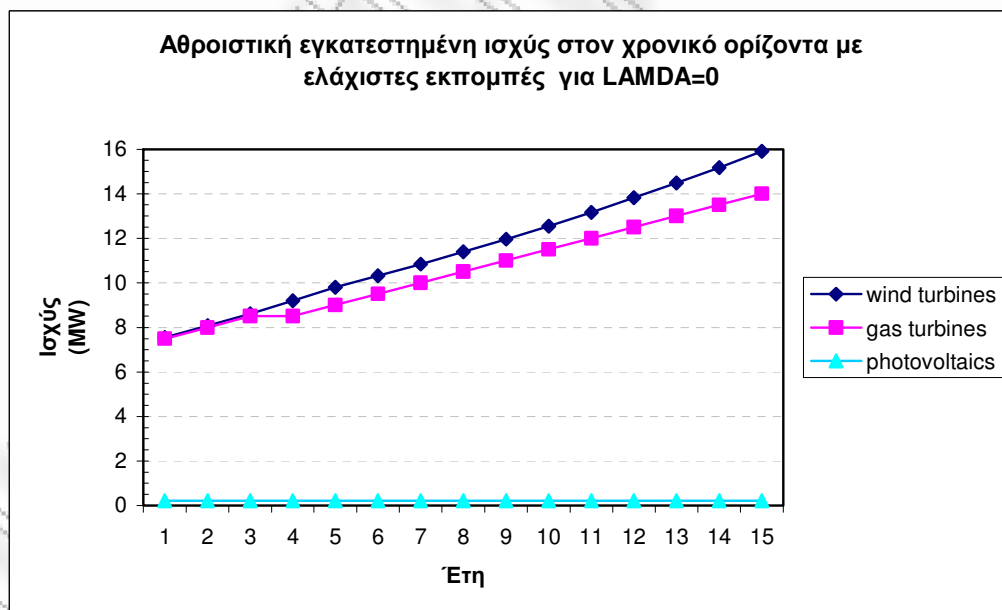


Γράφημα 19: Διάγραμμα συντελεστή εκμεταλλευσιμότητας ψύξης (cooling capacity factor) σε σχέση με τη θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου, των ψυκτικών μηχανών απορρόφησης Yazaki (Πηγή: <http://www.yazakienergy.com/waterfiredperformance.htm>)

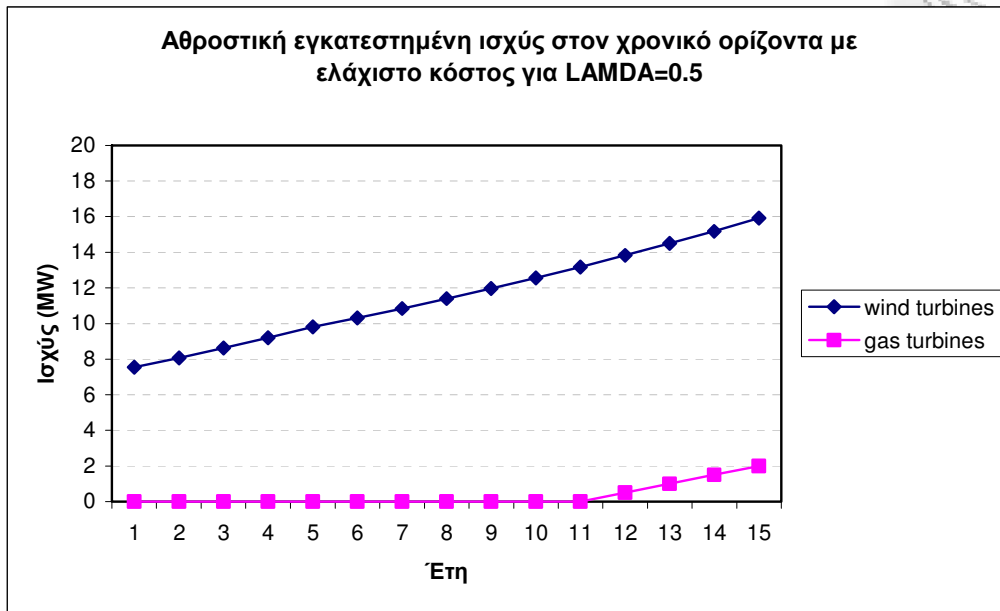
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ.



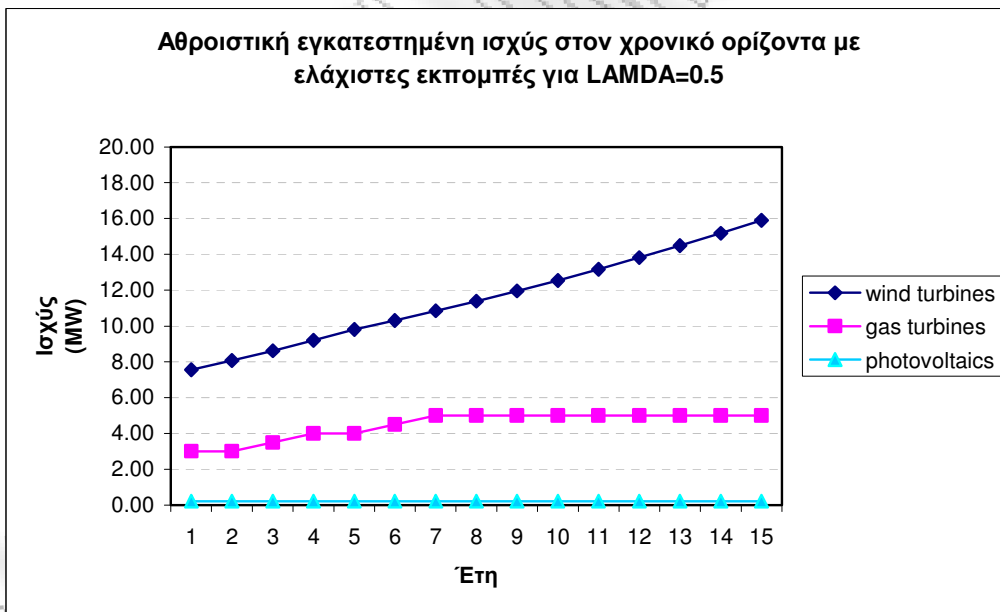
Γράφημα 20: Ετήσια αθροιστική πρόσθετη εγκατεστημένη ισχύς με ελάχιστο κόστος για LAMDA=0



Γράφημα 21: Ετήσια αθροιστική πρόσθετη εγκατεστημένη ισχύς με ελάχιστες εκπομπές για LAMDA=0



Γράφημα 22: Ετήσια αθροιστική πρόσθετη εγκατεστημένη ισχύς με ελάχιστο κόστος για LAMDA=0.5



Γράφημα 23: Ετήσια αθροιστική πρόσθετη εγκατεστημένη ισχύς με ελάχιστες εκπομπές για LAMDA=0.5

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ.

Πίνακας Δ: Ετήσια αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς ανά τεχνολογία: προτιμότερη λύση (106) επαυξημένης μεθόδου περιορισμών

Τεχνικά χαρακτηριστικά προτιμότερης λύσης	έτος														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Τεχνολογία															
j1 παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
j2 φωτοβολταϊκά	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
j3 ανεμογεννήτριες	7.55	8.07	8.62	9.2	9.8	10.31	10.84	11.39	11.96	12.55	13.17	13.82	14.49	15.18	15.91
j4 αεριοστρόβιλοι	0	0	0	0	0	0	0.5	3.5	4	4	4	4	4	4	4
j5 ατμοστρόβιλοι	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Ε.

Πίνακας Ε1: Ετήσια αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς ανά τεχνολογία: προτιμότερη λύση για το σημείο αναφοράς (100, 100, 100) ως ποσοστιαία απόδοση: 45, 45, 45

Τεχνικά χαρακτηριστικά προτιμότερης λύσης	έτος														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Τεχνολογία															
j1 παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
j2 φωτοβολταϊκά	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
j3 ανεμογεννήτριες	7.55	8.07	8.62	9.2	9.8	10.31	10.84	11.39	11.96	12.55	13.17	13.82	14.49	15.18	15.91
j4 αεριοστρόβιλοι	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2
j5 ατμοστρόβιλοι	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας Ε2: Ετήσια αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς ανά τεχνολογία: προτιμότερη λύση για το σημείο αναφοράς (60, 60, 45) ως ποσοστιαία απόδοση: 52, 37

Τεχνικά χαρακτηριστικά προτιμότερης λύσης	έτος														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Τεχνολογία															
j1 παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.06
j2 φωτοβολταϊκά	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
j3 ανεμογεννήτριες	7.55	8.07	8.62	9.2	9.8	10.31	10.84	11.39	11.96	12.55	13.17	13.82	14.49	15.18	15.91
j4 αεριοστρόβιλοι	0	0	0	0	0	0	0	1	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
j5 ατμοστρόβιλοι	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Πίνακας Ε3: Ετήσια αθροιστική εγκατεστημένη ισχύς ανά τεχνολογία: προτιμότερη λύση για το σημείο αναφοράς (55, 50, 40) ως ποσοστιαία απόδοση: 54, 49, 39

Τεχνικά χαρακτηριστικά προτιμότερης λύσης	έτος														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Τεχνολογία															
j1 παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.1
j2 φωτοβολταϊκά	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
j3 ανεμογεννήτριες	7.55	8.07	8.62	9.2	9.8	10.31	10.84	11.39	11.96	12.55	13.17	13.82	14.49	15.18	15.91
j4 αεριοστρόβιλοι	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
j5 ατμοστρόβιλοι	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤ.

sets

k number of objective functions /1*3/

km1(k) constrained objective functions according to the e-constraint method /2,3/
ALIAS(k,kk,lk);

sets i energy forms /i1 'heavy fuel oil', i2 'diesel'/

j technologies/j1 thermoelectric (reciprocating), j2 photovoltaic,

j3 wind, j4 gas turbines, j5 steam turbines/

nr(j) not renewable energy sources (res) /j1, j4, j5/

t years /1*15/

y(t) years/1*15/

p time intervals /1*8/

peak(p) load blocks/1*4/, middle(p) load blocks/5*7/, base(p) load blocks/8/;

*Parameters with lower case

*Decision variables with upper case

*## annual escalation factor for fuels 5%

scalars d reserve margin /0.25/, r discount rate/0.06/, ef annual escalation factor for
fuels/0.05/, rho small number /0.000001/;

parameter zr(k) reference point representing aspiration levels

/1 50485208,

2 338568,

3 1/

* the decision maker specifies the reference point

av(j) availability factor in hrs

/j1 6833, j2 1300, j3 2628, j4 6833, j5 7183/

Tf(p) operation time fraction in hrs/

1 19, 2 113, 3 320, 4 645, 5 1500, 6 3417, 7 6896, 8 8704/

*## prices July 2008

fuelcost(i) euros per tn /i1 432, i2 1380/;

table cons(i,nr) fuel consumption in tons per MWh (MWh of electric energy)

	j1	j4	j5
--	----	----	----

i1	0.14	0.0	0.26
----	------	-----	------

i2	0.17	0.27	0.1
----	------	------	-----

*gas turbines can burn only diesel therefore cons('i1','j4')=0

*reciprocating and steam turbines use a mixture of heavy fuel oil and diesel

*reciprocating engines use a mixture of HFO 38% ww and diesel 62% ww

*steam turbines 70% and 30% respectively

parameter Hu(i) Lower Heating Value in MWh(th) per fuel ton /i1 10.68, i2 11.92/;

parameter

varcost(nr) cost euros per MWh; varcost(nr)=sum(i,fuelcost(i)*cons(i,nr));

parameter

fixed(j) fixed operation and maintenance cost per MW

/j1 30000, j2 4920, j3 4920, j4 30000, j5 30000/

invcost(j) investment cost euros per MW

/j1 1000000, j2 6000000, j3 1330000, j4 375000, j5 1570000/

e(i) CO2 emission factor in tons CO2 per MWhth /i1 0.279, i2 0.267/;

*emission factor is usually expressed for each fuel as tons CO2 released to the atmosphere per MWh(th) produced by the combustion of the fuel

table dp(t,p) electrical demand in MW

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	1.340	1.147	0.459	0.688	0.918	1.147	1.377	3.442
2	1.407	1.204	0.482	0.722	0.964	1.204	1.446	3.614
3	1.477	1.265	0.506	0.759	1.012	1.265	1.518	3.795
4	1.551	1.328	0.531	0.796	1.063	1.328	1.594	3.985
5	1.629	1.394	0.558	0.836	1.116	1.394	1.674	4.184
6	1.694	1.450	0.580	0.870	1.160	1.450	1.741	4.351
7	1.762	1.508	0.603	0.905	1.207	1.508	1.810	4.525
8	1.832	1.568	0.628	0.941	1.255	1.568	1.883	4.706
9	1.905	1.631	0.653	0.978	1.305	1.631	1.958	4.894
10	1.982	1.696	0.679	1.017	1.358	1.696	2.036	5.090
11	2.061	1.764	0.706	1.058	1.412	1.764	2.118	5.294
12	2.143	1.835	0.734	1.100	1.468	1.835	2.203	5.506
13	2.229	1.908	0.764	1.144	1.527	1.908	2.291	5.726
14	2.318	1.984	0.794	1.190	1.588	1.984	2.382	5.955
15	2.411	2.064	0.826	1.238	1.652	2.064	2.478	6.193

;

*##reciprocating engines of total capacity 5 MW are removed in the 8th year of the planning horizon

table B(j,t) already installed capacity in MW

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
j1	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	17.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3	12.3
j2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
j3	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9	2.9
j4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
j5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

parameter

dir(K) direction of the objective functions (1 for max -1 for min)

/1 -1,

2 -1,

3 1/

term1(k) /1 1, 2 0, 3 0/

term2(k) /1 0, 2 1, 3 0/

term3(k) /1 0, 2 0, 3 1/

sign(k) /1 1, 2 1, 3 -1/

*sign(k) is included in order for tchebycheff(K) to be positive ;

*the denominator of the tchebycheff(K) norm is equal to the difference between

*the ideal point and the nadir point of each criterion which is MINOBJ(K)-

MAXOBJ(K) for the first two criteria and the opposite for the third one

*and as a result the parameter sign('3')=-1

toler(t,p) tolerance equals 10% of the respective power segment;

toler(t,p)=0.1*Dp(t,p);

parameters

RHS(K) right hand side of the constrained obj.functions in e-constraint

MAXOBJ(K) maximum value from the payoff table

MINOBJ(K) minimum value from the payoff table

w(k) indicator parameters for the objective functions

PAYOFF(K,KK) payoff table entries ;

* initial values for the parameters

MAXOBJ('1') = 1;

MINOBJ('1') = 0;

MAXOBJ('2') = 1;

MINOBJ('2') = 0;

MAXOBJ('3') = 1;

MINOBJ('3') = 0;

PAYOFF(K,KK) = 0;

rhs(K)=-dir(K)*10**12;

scalar

* the following scalars are for the implementation of the e-constraint method

g2, g3 index for grid points per objective function 2 and 3

numg2 number of grid points per objective function 2 /20/

numg3 number of grid points per objective function 3 /20/

totcounter total counter of generated points

jk counter used in the lexicographic optimization for the payoff table

kopt auxiliary parameter ;

positive variables
AI(j,t) additional installed capacity
PW(j,t,p) power output
LAMDA degree of demand satisfaction
SL(k) slack variable for k-th constraint objective function;

LAMDA.up=1 ;
*wind energy only for base load
PW.fx('j3',t,peak)=0;
PW.fx('j3',t,middle)=0;

*** MIP additional variables
integer variables
nsteam(t) discrete steam turbine sizes per period
ngas(t) discrete gas turbine sizes per period ;
nsteam.up(t)=10;

free variables
cost, tCO2, demandsat
Z(K) objective function variables
OBJ auxiliary variable for the objective function during the construction of the
payoff table
L reference point distance
aL augm tcheb distance
A_OBJVAL auxiliary for the e-constraint;
Equations

*** MIP additional constraints
bal_steam(t) discrete steam turbine balance
bal_gas(t) discrete gas turbine balance
*binary_steam(t) bin variables equal to one

peakdem(t) peak demand satisfaction
energyavail(j,t) available energy from each unit in each period
poweravail(j,t) available power from each unit in each period
balanceinter(t,p) balance each technology
windpower(t) wind units power output max 30% of peak load
pv_capacity total installed capacity

objcos, objCO2, objdem objectives
objf(K) k-th objective function
allobj all the objective functions in one expression

tchebycheff(K) tchebycheff norm used in the reference point method
atchebycheff augmented tchebycheff

con_obj(k) constraint objective function for e-constraint
augm_obj augmented objective function for e-constraint
;

```

*## MIP additional constraints
bal_steam(t).. AI('j5',t)=e=nsteam(t)*15;
bal_gas(t).. AI('j4',t)=e=ngas(t)*0.5;
*binary_steam(t).. sum(m, steam(m,t))=l=1;

peakdem(t)..sum(j,b(j,t)+sum(y$(ord(y)<=ord(t)),AI(j,y)))=g=(1+d)*sum(p,(dp(t,p)+
LAMDA*toler(t,p)));
energyavail(j,t)..sum((p),PW(j,t,p)*tf(p))=l=av(j)*(b(j,t)+sum(y$(ord(y)<=ord(t)),AI(j
,y)));
poweravail(j,t)..sum((p),PW(j,t,p))=l=b(j,t)+sum(y$(ord(y)<=ord(t)),AI(j,y));
balanceinter(t,p)..sum((j),PW(j,t,p))=g=(dp(t,p))+LAMDA*toler(t,p);
windpower(t)..sum((p),PW('j3',t,p))=l=0.3*sum(p,dp(t,p));
*## pv restriction 0.5
pv_capacity.. sum((t,p),PW('j2',t,p))=l=0.5;

OBJF(k).. z(k)=e=cost*term1(k)+tCO2*term2(k)+LAMDA*term3(k) ;

*## varcost multiplied by (1+ef)**t where ef escalation factor of fuel cost
objcos..cost=e=sum(t,1/(1+r)**ord(t)*(sum(j,invcost(j)*Ai(j,t)
+sum(j,fixed(j)*Ai(j,t))+sum((nr,p),varcost(nr)*Pw(nr,t,p)*Tf(p)*(1+ef)**ord(t))));

objCO2.. tCO2=e=sum((i,nr,t,p),e(i)*cons(i,nr)*Hu(i)*Pw(nr,t,p)*Tf(p));

objdem.. demandsat=e=LAMDA;

allobj..sum(k, w(k)*dir(k)*Z(k))=e=OBJ ;
* allobj is for the construction of the payoff matrix

atchebycheff..aL=e=L+rho*sum(k, (zr(k)-z(k))/((MINOBJ(K)-
MAXOBJ(K))*sign(k)));
tchebycheff(K)..L=g=(zr(k)-z(k))/((MINOBJ(K)-MAXOBJ(K))*sign(k));

con_obj(k).. Z(k) - dir(k)*SL(k) =E= rhs(k) ;
augm_obj.. dir('1')*Z('1')+10**(-3)*SUM(k$km1(K),SL(k)/(maxobj(k)-
minobj(k)))=E= A_OBJVAL ;

model milos/all/;
option mip=cplex;
FILE milosfile /milos.out/;
milosfile.AI=1000;
PUT milosfile ;
option optcr=0.001;

```

```

*$ontext
* lexicographic optimization for payoff table
* loop for the payoff table
* the optimizations are lexicographic optimizations in order to secure the efficiency
* of the produced extreme solutions
* the lk set and the jk parameters are used in order to optimize first the proper
* objective function in lexicographic optimizations

```

```

loop(lk,
  for (jk=1 to card(lk),
    if (ord(lk)+jk-1 > card(lk),
      kopt=ord(lk)+jk-1-card(lk);
    else
      kopt=ord(lk)+jk-1
    );
    w(kk)=0;
  * select the objective function to optimize
  w(kk)$ord(kk)=kopt)=1;
  solve milos using MIP maximizing OBJ ;
  payoff(lk,kk)$ord(kk)=kopt)=z.l(kk)$ord(kk)=kopt);
  * freeze the value of the last objective optimized
  z.fx(kk)$ord(kk)=kopt)=z.l(kk)$ord(kk)=kopt);
  );
  * loop(kk,
  * put payoff(lk,kk):10:2
  * );
  * release the values of the objective functions for the new loop of optimizations
  * put /;
  z.up(kk)=10**12 ;
  z.lo(kk)=-10**12 ;
  );

```

```

*$offtext

```

```

minobj(kk)=smin(k,payoff(k,kk));
maxobj(kk)=smax(k,payoff(k,kk));

```

```

PUT ' PAYOFF TABLE'/
loop (k,
  loop(kk, put payoff(k,kk):12:2);
  put /;
);

```

```

$ontext

```

```

*zr('1')=46485208; zr('2')=318568; zr('3')=0.40;

```

```

*$ontext

```

```

*expression allowing to give achievement percentages (distance from worst value)
*instead of targets in absolute values

```

```

parameter perc(k) percentage /1=100, 2=100, 3=100/;

```

```

zr(k)$sign(k) gt 0)=(perc(k)/100)*(MINOBJ(K)-MAXOBJ(K))+MAXOBJ(k);

```

```

zr(k)$sign(k) lt 0)=(perc(k)/100)*(MAXOBJ(K)-MINOBJ(K))+MINOBJ(k);

```



```

put/;
PUT 'REFERENCE POINT METHOD' /;
*put loop(k, put zr(k)); put /;
*put loop(k, put minobj(k)); put /;
*put loop(k, put maxobj(k)); put /;
*$offtext

option bratio = 0;
* option bratio=0 is for exploiting previous basis information in consecutive solve
statements
totcounter=0

put 'DIST COST(€) CO2(t) LAMDA/;

SOLVE milos USING LP MINIMISING aL ;
PUT milosfile;
put L.l:14:2;
put z.l('1'):14:0;
put z.l('2'):14:0;
put z.l('3'):14:2;
loop(j,
loop(t,put sum(y$(ord(y)<=ord(t)),ALL(j,y)):6:2);
put '***';
);

PUT //; put ' PAYOFF extented table/;
put "objectives", loop(k, put k.tl); put " ", "reference point"; put "cheb solution"/;
loop (k, put k.tl;
loop(kk, put payoff(k,kk):12:2); put" ", zr(k), z.l(k);
put /;
);

$offtext

*$ontext
* generation of the Pareto optimal solutions
numg2=20;
numg3=20;
put/;
put/;
PUT ' NON DOMINATED POINTS FROM E-CONSTRAINT METHOD' /;
option bratio = 0;
* option bratio=0 is for exploiting previous basis information in consecutive solve
statements
totcounter=0
put ' # z1 z2 z3 ', loop(j, put j.tl:6; loop(t, put t.tl:6)); put/;
for (g2=0 to numg2,
RHS('2') = (dir('2')+1)/2*MINOBJ('2')-(dir('2')-1)/2*MAXOBJ('2') + dir('2')*
(g2/numg2)*(MAXOBJ('2')-MINOBJ('2'));

```

```

for (g3=0 to numg3,
  RHS('3') = (dir('3')+1)/2*MINOBJ('3')-(dir('3')-1)/2*MAXOBJ('3') + dir('3')*
(g3/numg3)*(MAXOBJ('3')-MINOBJ('3'));
*##MIP STATEMENT
  SOLVE milos USING MIP MAXIMIZING A_OBJVAL ;
  PUT milosfile;
  totcounter=totcounter+1;
*##MIP: adapt modelstat to mip
  if (milos.modelstat = 10,
* =4 or milos.modelstat=9 or milos.modelstat=10,
    PUT totcounter:4:0,'**** infeasible ****'/;
* force it to exit the loop if infeasible
* if g3=0 at infeasibility it means that you must also exit the g2 loop
    if (g3=0, g2=numg2);
    g3=numg3;
    else
    PUT totcounter:4:0, Z.l('1'):14:2 ;
    loop(km1, put Z.l(km1):12:2) ;

      loop(j, put ' ',
        loop(t,put sum(y$(ord(y)<=ord(t)),ALL(j,y)):6:2);
        put ' *** ', ;
      );
    put ' ',milos.modelstat/ ;

  );
);
);

putclose milosfile;
*$offtext

```