



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ
ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ CHP ΚΑΙ
ΑΙΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ Σ. ΠΙΠΕΡΑΓΚΑΣ

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αναστασιάδης Ανέστης
Υ.Δ. Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Οκτώβριος 2009



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ
PARTICLE SWARM OPTIMIZATION: ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΣΕ
ΣΤΟΧΑΣΤΙΚΗ ΒΕΛΤΙΣΤΗ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΗ
ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΦΟΡΤΙΟΥ-ΘΕΡΜΟΤΗΤΑΣ ΜΕ CHP ΚΑΙ
ΑΙΟΛΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ Σ. ΠΙΠΕΡΑΓΚΑΣ

Επιβλέπων : Χατζηαργυρίου Νικόλαος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 16η Οκτωβρίου 2009.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

Χατζηαργυρίου Ν.

Παπαθανασίου Σ.

Καβατζά Σ.

.....

.....

.....

...

...

...

Αθήνα, Οκτώβριος 2009

(Υπογραφή)

.....
ΠΙΠΕΡΑΓΚΑΣ ΓΡΗΓΟΡΙΟΣ
Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογι-
στών Ε.Μ.Π.
© 2009 – All rights reserved



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΙΚΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Copyright©–All rights reserved Πιπεράγκας Γρηγόριος, 2009.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

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

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

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Ο σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η ανάπτυξη μίας παραλλαγής ενός μεταευριστικού αλγορίθμου, της μεθόδου Particle Swarm Optimization, και η εφαρμογή της σε ένα πρόβλημα στοχαστικής βέλτιστης κατανομής φορτίου και θερμότητας με διείσδυση συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας και αιολικής παραγωγής υπό τον περιορισμό εκπομπών αερίων NO_x και SO_2 . Για την πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση εισάγονται τεχνικές στον αλγόριθμο έτσι ώστε να εντοπίζεται με ακρίβεια και ταχύτητα η περιοχή των μη κυριαρχούμενων λύσεων όλων των αντικειμενικών συναρτήσεων, σύμφωνα με τα κριτήρια Pareto.

Ο αλγόριθμος εφαρμόζεται σε ένα στοχαστικό μοντέλο βέλτιστης κατανομής φορτίου και θερμότητας σε ένα δίκτυο με 6 μονάδες παραγωγής, εκ των οποίων οι 2 είναι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Το διάγραμμα απόφασης αποτελείται από την ενεργό ισχύ των μονάδων και τη θερμότητα που παράγουν οι μονάδες συμπαραγωγής (το φορτίο θεωρείται τυχαία μεταβλητή, άρα και οι μεταβλητές εξόδου των μονάδων). Οι αντικειμενικές συναρτήσεις που διαμορφώνονται είναι το αναμενόμενο συνολικό κόστος, η αναμενόμενη απόκλιση ενεργού ισχύος από τη ζήτηση και η αναμενόμενη απόκλιση θερμότητας από την αντίστοιχη ζήτηση.

Στη συνέχεια επεκτείνεται το μοντέλο με την πρόσθεση της αντικειμενικής συνάρτησης των εκπομπών αερίων NO_x και SO_2 και εφαρμόζεται ο αλγόριθμος στην κατανομή με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση και των εκπομπών αερίων ρύπων, μετά το μετασχηματισμό της αντικειμενικής συνάρτησης σε στοχαστική.

Η επόμενη επέκταση του μοντέλου αφορά τη διείσδυση αιολικής παραγωγής. Διαμορφώνεται η αντικειμενική συνάρτηση του συντελεστή ρίσκου ασφάλειας του δικτύου λόγω ποσοστού διείσδυσης αιολικής ισχύος, με χρήση γραμμικής ασφούς αναπαράστασης. Η διαθέσιμη αιολική ισχύς που απαιτείται για τον υπολογισμό της κατανομής ισχύος θεωρείται στοχαστική, λόγω των χαρακτηριστικών της ταχύτητας του ανέμου και ακολουθεί διαφορετική κατανομή από αυτή της τυχαίας μεταβλητής του φορτίου. Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας προκύπτει από τον μετασχηματισμό της τυχαίας μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου, που ακολουθεί την κατανομή Weibull με διαφορετική μορφή σε κάθε περιοχή, σε παραγόμενη ενεργό ισχύ, η οποία εισέρχεται στο πρόβλημα της κατανομής. Η εφαρμογή περιλαμβάνει το προηγούμενο δίκτυο, στο οποίο συνδέονται τα αιολικά πάρκα της Κρήτης, μετά από ανεμολογική μελέτη για τη διαμόρφωση των παραμέτρων της Weibull κατανομής σε κάθε περιοχή. Τελικά εφαρμόζεται ο αλγόριθμος και παράγεται το μέτωπο pareto των μη κυριαρχούμενων λύσεων.

Στο τέλος παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των εφαρμογών, τα συμπεράσματα και οι προοπτικές της διπλωματικής εργασίας.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ

βέλτιστη κατανομή, συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας, πρόβλεψη αιολικής παραγωγής, περιβαλλοντική κατανομή, πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση, particle swarm optimization, ολική βελτιστοποίηση, νοημοσύνη σμήνους, μεταευριστικές μέθοδοι βελτιστοποίησης

ABSTRACT

The purpose of the current diploma thesis is the development of a variation of a metaheuristic algorithm, the method of Particle Swarm Optimization, and the application on a stochastic economic heat and power dispatch incorporating wind power, under the restrictions of NO_x and SO_2 gas emissions, due to the fossil fuel units. Owing to multiobjective optimization, new techniques are introduced and implemented into the algorithm, so as to specify with speed and accuracy the region of non dominated solutions of all the objective functions, in terms of pareto dominance.

The algorithm is applied on a stochastic model of heat and power dispatch in a network with 6 units, of which 2 are cogeneration units. The decision variables is made up of the real output power of the units and the produced heat of the CHP units (the total load is considered random variable, thus the units output variables are random variables). the objective functions that are formed are the mean total production cost, the mean power deviation and the mean heat deviation.

Afterwards, the model is extended using the objective function of NO_x and SO_2 gas emissions and the algorithm is applied to the dispatch optimization problem with the simultaneous minimization of the above objective functions and the current gas emissions objective function, after its transformation into a stochastic.

Further, the model is transformed for wind power incorporation. The objective function of the security risk factor due to high wind power penetration is formed, using a linear fuzzy representation. The available wind power used in the dispatch model is considered as stochastic, due to the wind speed characteristics and follows different distribution from the load random variable distribution. The probability density function is exported from the transformation of the random variable of the wind speed, that follows the Weibull distribution with different shape and scale factor for each location, into the output power random variable, that is introduced at the dispatch problem. The implementation includes the above network, on which the wind parks of the island Crete are connected, after a wind study is performed to extract the Weibull distribution parameters for every location. Finally the algorithm is applied and the Pareto front of the non dominated solutions is presented.

In the last chapters the numerical solutions of the applications are presented, as well as the conclusions and discussion of the diploma thesis.

KEYWORDS

economic dispatch, cogeneration, CHP, wind power prediction, environmental dispatch, multiobjective optimization, multicriteria optimization, particle swarm optimization, global optimization, swarm intelligence, metaheuristics

Πρόλογος

Η παρούσα εργασία αποτελεί τη Διπλωματική Εργασία στα πλαίσια των σπουδών μου στον τομέα Ηλεκτρικής Ισχύος της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών του ΕΜΠ.

Η διπλωματική αυτή εργασία εκπονήθηκε κατά το ακαδημαϊκό έτος 2008-2009 υπό την επίβλεψη του κ. Νικόλαου Δ. Χατζηαργυρίου, καθηγητή του Ε.Μ.Π. της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, στον οποίο οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες για την ανάθεσή της.

Με την ευκαιρία αυτή θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Ανέστη Αναστασιάδη, για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές και την υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Περιεχόμενα

1 Περιγραφή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας	19
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία	19
1.2 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας	21
1.3 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας	22
1.4 Βασικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικού δικτύου	22
1.5 Φορτία	23
1.6 Κανονικές συνθήκες λειτουργίας	23
1.6.1 Ροή ισχύος και ενέργειας	23
1.6.2 Μηχανισμός Φορτίου-συχνότητας	24
1.6.3 Ευστάθεια λειτουργίας συστήματος	24
1.6.4 Άεργος ισχύς και τάσεις συστήματος	24
1.7 Οικονομική λειτουργία	25
1.8 Ανωμαλίες λειτουργίας του συστήματος	25
1.9 Σύστημα και μέσα προστασίας	25
2 Συμπαγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας	27
2.1 Εισαγωγή	27
2.2 Σύγχρονες τεχνικές συμπαγωγής	28
2.3 Πλεονεκτήματα και επιπτώσεις της συμπαγωγής	29
2.3.1 Επιπτώσεις στην κατανάλωση καυσίμου	29
2.3.2 Επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας	29
2.3.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις	30
2.4 Συμπαγωγή στην Ελλάδα και τομείς εφαρμογής	31
2.4.1 Τηλεθέρμανση	31
2.4.2 Τηλεθέρμανση και γεωθερμία	32
2.4.3 Βιομηχανικές διατάξεις και άλλες εφαρμογές	33
2.5 Φυσικό αέριο και βιομάζα	35
2.6 Συμπαγωγή ηλεκτρισμού θερμότητας και διανεμημένη παραγωγή	36
2.7 Ενεργειακή συμπεριφορά συστημάτων συμπαγωγής	37
2.7.1 Δείκτες ενεργειακής συμπεριφοράς	37
2.7.2 Τρόποι λειτουργίας συστημάτων συμπαγωγής	38
2.8 Μοντέλα λειτουργίας μονάδων συμπαγωγής	40
3 Οικονομική κατανομή φορτίου	45
3.1 Εισαγωγή	45
3.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες-όρια μονάδων παραγωγής	46
3.3 Η απλούστερη μορφή του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου	49

3.3.1	Γραφική επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου	51
3.4	Οικονομική κατανομή φορτίου με λειτουργικά όρια	52
3.5	Αλγόριθμος επαναλήψεων Λάμδα	53
3.6	Οικονομική κατανομή φορτίου με απώλειες μεταφοράς	55
3.6.1	Εξίσωση απωλειών με τη μέθοδο των Β-συντελεστών	57
4	Παραγωγή αιολικής ισχύος και περιορισμοί	59
4.1	Εισαγωγή	59
4.2	Προβλήματα από τη διείσδυση αιολικής ισχύος	60
4.2.1	Έλεγχος ενεργού ισχύος	61
4.2.2	Έλεγχος συχνότητας	61
4.2.3	Έλεγχος τάσης	62
4.2.4	Προστασία	62
4.2.5	Επάρκεια ισχύος και εφεδρεία συστήματος	62
4.3	Πιθανοτική ανάλυση παραγωγής αιολικής ισχύος	63
4.4	Αναφορά στις μεθοδολογίες πρόβλεψης αιολικής ισχύος	65
5	Τεχνικές βελτιστοποίησης	67
5.1	Εισαγωγή	67
5.2	Κατηγορίες προβλημάτων βελτιστοποίησης	68
5.2.1	Θεμελίωση προβλήματος βελτιστοποίησης	68
5.2.2	Κατηγοριοποίηση προβλημάτων βελτιστοποίησης	68
5.3	Μη γραμμικός προγραμματισμός (<i>Non-Linear Programming</i>)	70
5.4	Ολική Βελτιστοποίηση (<i>Global Optimization</i>)	72
5.4.1	Περιγραφή των αλγορίθμων Ολικής Βελτιστοποίησης	73
5.4.2	Βελτιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης	75
5.4.3	Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση	76
5.4.4	Χειρισμός περιορισμών	80
5.5	Particle Swarm Optimization	80
5.5.1	Εισαγωγή	80
5.5.2	Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου	81
5.5.3	Προσέγγιση της μεθόδου PSO για πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση	82
6	Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος	91
6.1	Εισαγωγή	91
6.2	Οι αντικειμενικές συναρτήσεις του στοχαστικού μοντέλου	93
6.2.1	Αναμενόμενο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος με διείσδυση αιολικής παραγωγής	93
6.2.2	Αναμενόμενη απόκλιση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος	96
6.2.3	Αναμενόμενη απόκλιση παραγωγής θερμότητας	97
6.2.4	Υπολογισμός των αναμενόμενων εκπομπών αερίων NO_x και SO_2	97
6.2.5	Ασφάλεια συστήματος με διείσδυση αιολικής παραγωγής	98
6.3	Περιορισμοί του προβλήματος	98
6.4	Υπολογισμός της διαθέσιμης αιολικής ισχύος	100
6.4.1	Χαρακτηρισμός ταχύτητας ανέμου	100
6.4.2	Υπολογισμός της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου των ανεμογεννητριών	101

6.5	Κωδικοποίηση των παραμέτρων	103
6.6	Η υπολογιστική διαδικασία της βελτιστοποίησης	104
7	Προσομοίωση και αποτελέσματα	109
7.1	Εισαγωγή- Σενάρια παραγωγής	109
7.2	Τα στοιχεία του δικτύου	109
7.3	Ανεμολογική μελέτη και στοιχεία αιολικών πάρκων νήσου Κρήτης	111
7.4	Προσομοίωση 1η: Δίκτυο χωρίς αιολική παραγωγή	115
7.5	Προσομοίωση 2η: Εκπομπές αερίων NO_X και SO_2	120
7.6	Προσομοίωση 3η: Δίκτυο με σύνδεση των αιολικών πάρκων της Κρήτης.	125
7.7	Ανάλυση των αποτελεσμάτων και σύγκριση	132
8	Συμπεράσματα και προοπτικές	133
8.1	Εισαγωγή	133
8.2	Η μέθοδος Particle Swarm Optimization	133
8.3	Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση	134
8.4	Πιθανοτική προσέγγιση ΣΗΕ	135
8.5	Συμπαράγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας	135
8.6	Αιολική παραγωγή	135
9	Παράρτημα Α: δεδομένα εξόδου της βελτιστοποίησης	141
9.1	1η προσομοίωση	141
9.2	2η προσομοίωση	144
9.3	3η προσομοίωση	157

Κατάλογος σχημάτων

1.1	Η βασική δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας	20
2.1	Απόδοση της χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού	28
2.2	Απόδοση της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας	28
2.3	Εκπομπή ρύπων ως συνάρτηση του βαθμού απόδοσης των συστημάτων	30
2.4	Παραδείγματα σύγκρισης εκπομπών μεταξύ συστημάτων συμπαραγωγής και συμβατικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας(ανά 100kWh παραγωγής)	31
2.5	Συστήματα συμπαραγωγής σε Ελληνικές Βιομηχανίες(1998)	34
2.6	Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων συμπαραγωγής	39
2.7	Εφικτή περιοχή λειτουργίας μονάδας συμπαραγωγής. (p =ηλ.ισχύς, q =θερμότητα, c =κόστος παραγωγής)	40
2.9	Αναλυτικά στοιχεία εγκατεστημένων συστημάτων συμπαραγωγής στην Ελλάδα το 2003	43
3.1	Ωριαία κατανάλωση καυσίμου	46
3.2	Διαφορική κατανάλωση καυσίμου	47
3.3	Ειδική κατανάλωση καυσίμου	47
3.4	Ωριαίο κόστος λειτουργίας	48
3.5	Διαφορικό κόστος λειτουργίας	48
3.6	Ειδικό κόστος λειτουργίας	49
3.7	Σχηματική επίλυση εξισώσεων συνεργασίας	52
3.8	Σχηματική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας με λειτουργικούς περιορισμούς	53
3.9	Αλγόριθμος επαναλήψεων λάμδα	54
3.10	Διαφορικό κόστος καυσίμου με και χωρίς απώλειες	56
3.11	Αλγόριθμος οικονομικής κατανομής φορτίου με απώλειες	58
4.1	Αθροιστικά εγκαθιστώμενη ισχύς σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ΑΠΕ (πηγή:Υπουργείο Ανάπτυξης).	60
4.2	(a)Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull για $c = 10$ και διάφορες τιμές του k . (b)Συντελεστής κλίμακας c , μέση ταχύτητα και πιθανότερη ταχύτητα της κατανομής Weibull.	64
4.3	Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας με $v_{in} = 5m/s, v_r = 15m/s$ και $v_{out} = 25m/s$	65
5.1	Κυρτός και μη κυρτός χώρος εφικτών λύσεων	71
5.2	Αποτελεσματικοί και πλεονάζοντες περιορισμοί σε ένα ΜΓΠ πρόβλημα	71

5.3	Θέση βέλτιστης λύσης στο χώρο των εφικτώ λύσεων	71
5.4	Κατηγοριοποίηση των πιο γνωστών μεθόδων ολικής βελτιστοποίησης	74
5.5	Ολικά και τοπικά βέλτιστα σε συνάρτηση δύο διαστάσεων	76
5.6	Δύο συναρτήσεις f_3 και f_4 με διαφορετικά ελάχιστα $\check{x}_1, \check{x}_2, \check{x}_3, \check{x}_4$	77
5.7	Βελτιστοποίηση με χρήση της μεθόδου των βαρών	77
5.8	Βελτιστοποίηση με προγραμματισμό στόχων	78
5.9	Βελτιστοποίηση με βάση την αρχή του μετώπου Pareto	79
5.10	Τοπολογίες σμήνους (a) Ολικός οδηγός, (b) Τοπολογία δακτυλίου, (c) Τοπολογία περιστροφής, (d) Τοπολογία πυραμίδας, (e) Τοπολογία Von Neumann.	85
5.11	Περιγραφή της διαδικασίας επιλογής του οδηγού του σμήνους	86
5.12	Πιθανές καταστάσεις ελέγχου του συνόλου Pareto.	87
5.13	Απλοποιημένο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO	89
6.1	Ασαφής γραμμική αναπαράσταση του επιπέδου ασφάλειας του συστήματος ως προς τη διείσδυση αιολικής ισχύος και κόστους παραγωγής αιολικής ενέργειας.	94
6.2	Πολυκριτηριακή απεικόνιση συνόλου P στο διανυσματικό χώρο Ω των αντικειμενικών συναρτήσεων.	106
7.1	Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας Vestas 850kW.	113
7.2	Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας Zond 550kW.	113
7.3	Οι θέσεις των ατόμων στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας για την 1η προσομοίωση.	116
7.4	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 60ή επανάληψη για την 1η προσομοίωση.	116
7.5	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 120ή επανάληψη για την 1η προσομοίωση.	117
7.6	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 180ή επανάληψη για την 1η προσομοίωση.	117
7.7	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 240ή επανάληψη για την 1η προσομοίωση.	118
7.8	Οι θέσεις των ατόμων και το μέτωπο Pareto, η τελική μορφή μετά τη λήξη των επαναλήψεων για την 1η προσομοίωση.	118
7.9	Το τελικό μέτωπο Pareto στο διανυσματικό χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Συνεχής απεικόνιση του συνόλου βέλτιστων λύσεων.	119
7.10	Οι θέσεις των ατόμων στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας για την 2η προσομοίωση.	121
7.11	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 60ή επανάληψη για την 2η προσομοίωση.	121
7.12	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 120ή επανάληψη για την 2η προσομοίωση.	122
7.13	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 180ή επανάληψη για την 2η προσομοίωση.	122
7.14	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, τελικό αποτέλεσμα για την 2η προσομοίωση.	123
7.15	Οι θέσεις των ατόμων στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας για την 3η προσομοίωση.	126
7.16	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 20ή επανάληψη για την 3η προσομοίωση.	126

7.17	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 40ή επανάληψη για την 3η προσομοίωση.	127
7.18	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 60ή επανάληψη για την 3η προσομοίωση.	127
7.19	Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 80ή επανάληψη για την 3η προσομοίωση.	128
7.20	Οι θέσεις των ατόμων και το μέτωπο Pareto, τελικό αποτέλεσμα για την 3η προσομοίωση.	128
7.21	Το μέτωπο Pareto και τα σημεία του συνόλου για την 3η προσομοίωση.	129

Κατάλογος πινάκων

7.1	Όρια των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος(P_u)	110
7.2	Όρια των μονάδων παραγωγής θερμότητας (P_u)	110
7.3	Συντελεστές εκπομπών αερίων NO_x και SO_2 των συμβατικών μονάδων	111
7.4	Συντελεστές τοποθεσίας και κλίμακας της σ.π.π. Weibull των επεξεργασμένων μετρήσεων ταχύτητας του ανέμου στην Κρήτη	112
7.5	Εν λειτουργία αιολικά πάρκα στην Κρήτη	114
7.6	Τιμές παραμέτρων της επαναληπτικής διαδικασίας	115
7.7	Ελάχιστες τιμές της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης για το αντίστοιχο διάλυμα απόφασης	120
7.8	Τιμές παραμέτρων της επαναληπτικής διαδικασίας, υπολογισμός εκπομπών αερίων ρύπων	123
7.9	Ελάχιστες τιμές της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης για το αντίστοιχο διάλυμα απόφασης	124
7.10	Τιμές παραμέτρων της επαναληπτικής διαδικασίας με σύνδεση αιολικών πάρκων	125
7.11	Ελάχιστες τιμές της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης για το αντίστοιχο διάλυμα απόφασης	131

Κεφάλαιο 1

Περιγραφή συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας

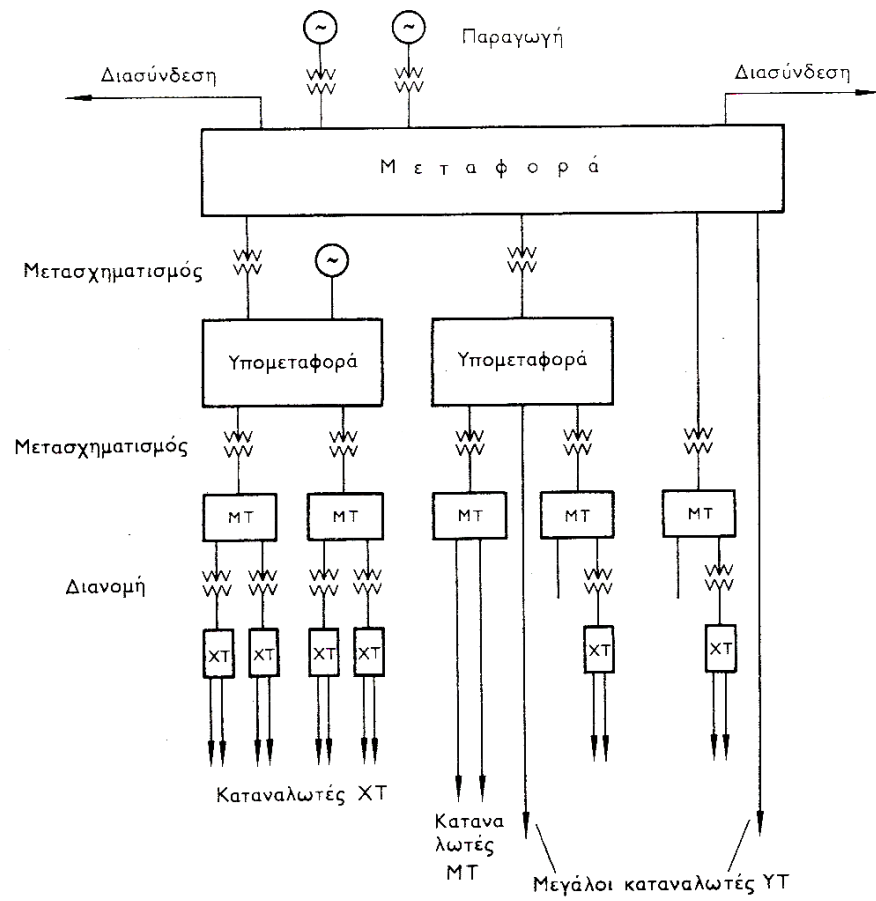
1.1 Εισαγωγικά στοιχεία

Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ), καλείται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε εξυπηρετούμενες περιοχές κατανάλωσης. Βασικές προϋποθέσεις καλής λειτουργίας ενός ΣΗΕ είναι η παροχή ηλεκτρικής ενέργειας οπουδήποτε υπάρχει ζήτηση με το ελάχιστο δυνατό κόστος και τις ελάχιστες οικολογικές επιπτώσεις, εξασφαλίζοντας σταθερή συχνότητα, σταθερή τάση και υψηλή αξιοπιστία τροφοδότησης.

Η τροφοδότηση των καταναλωτών με ηλεκτρική ενέργεια προϋποθέτει τρεις ξεχωριστές λειτουργίες του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας: *την παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή*. Τα χρησιμοποιούμενα συστήματα είναι τριφασικά εναλλασσόμενου ρεύματος, συχνότητας 50 ή 60Hz (50Hz για την Ελλάδα), χρησιμοποιούνται όμως σε ειδικές περιπτώσεις και συστήματα συνεχούς ρεύματος για τη μεταφορά κυρίως ηλεκτρικής ενέργειας. Οι γραμμές μεταφοράς και οι γραμμές διανομής μέσης τάσης έχουν τρεις αγωγούς φάσεων ενώ οι γραμμές διανομής χαμηλής τάσης έχουν επιπλέον και ουδέτερο αγωγό. Η τάση λειτουργίας παραμένει, με μικρές διακυμάνσεις, γύρω από μια δεδομένη για κάθε μέρος του συστήματος τιμή.

Η δομή και το μέγεθος του συστήματος επηρεάζεται σημαντικά από το μέγεθος της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας, τη χρονική της μεταβολή κατά τη διάρκεια του 24ωρου και από τη χωροταξική της κατανομή, καθώς όπως είναι γνωστό η ηλεκτρική ενέργεια δε μπορεί ακόμα να αποθηκευτεί σε μεγάλες και επαρκείς ποσότητες. Έτσι, η συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζει την ποσότητα των καυσίμων που χρησιμοποιούνται για τη λειτουργία των σταθμών παραγωγής, ενώ τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της ζήτησης διαμορφώνουν το κόστος μιας επιχείρησης ηλεκτρισμού. Το κόστος αυτό αυξάνεται προοδευτικά από την παραγωγή προς τη διανομή, καθώς μεσολαβούν πρόσθετες εγκαταστάσεις. Το κόστος καταβάλλεται από τους καταναλωτές σύμφωνα με τα χαρακτηριστικά της ζήτησής τους (οικιακό, αγροτικό, βιομηχανικό φορτίο), αλλά και με την τάση με την οποία συνδέονται (υψηλή, με την οποία συνδέονται πολύ μεγάλοι βιομηχανικοί καταναλωτές, μέση, όπου βρίσκονται μεγάλοι και μεσαίου μεγέθους καταναλωτές, ή χαμηλή, όπου συνδέονται οικιακοί καταναλωτές, εμπορικοί καταναλωτές, κλπ). Η βασική δομή ενός Σ.Η.Ε φαίνεται στο σχήμα 1.1.

Η παραγωγή ενέργειας παγκοσμίως μέχρι και τα τέλη της δεκαετίας του εξήντα



Σχήμα 1.1: Η βασική δομή ενός Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας

γινόταν αποκλειστικά από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής ενέργειας, όπως οι κλασικοί λιγνιτικοί και πετρελαϊκοί σταθμοί, καθώς και από μεγάλους υδροηλεκτρικούς σταθμούς όπου αυτό ήταν εφικτό, χωρίς όμως να έχει γίνει κάποια σημαντική προσπάθεια, τουλάχιστον σε επίπεδο μαζικής παραγωγής, για την εύρεση εναλλακτικών μορφών ενέργειας πλην της πυρηνικής. Μετά το 1973 και την πρώτη παγκόσμια πετρελαϊκή κρίση αναθερμάνθηκε το ενδιαφέρον για τη χρήση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (Α.Π.Ε.). Το ενδιαφέρον άρχισε να γίνεται εντονότερο τα τελευταία χρόνια εξαιτίας των δυσμενών προβλέψεων για τα αποθέματα πρώτων υλών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής, αλλά και μετά τη Διάσκεψη του Ρίο και τη διακήρυξη του Κιότο. Πλέον αποτελεί παγκόσμιο περιβαλλοντολογικό στόχο η μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων ούτως ώστε να αντιμετωπιστούν οι δυσμενείς συνέπειες από τη φωτοχημική ρύπανση στο περιβάλλον και να περιοριστούν οι αρνητικές επιπτώσεις του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Σημαντική θέση σε αυτήν την προσπάθεια κατέχει η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας. Πρόκειται για την παραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος συγχρόνως από θερμοηλεκτρικούς σταθμούς παραγωγής μέσω ανάκτησης της θερμότητας που σε κάποιο συμβατικό θερμοηλεκτρικό σταθμό θα απορριπτόταν. Έτσι επιτυγχάνεται αύξηση της απόδοσης από 30-45% σε ποσοστά της τάξης του 80-85% με χρήση της παραγόμενης θερμότητας στον βιομηχανικό, αγροτικό τομέα ή θέρμανση αστικών περιοχών (τηλεθέρμανση, π.χ. Κοζάνη). Τη διαδικασία της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας θα παρουσιάσουμε αναλυτικά στη συνέχεια, καθώς αποτελεί αντικείμενο μελέτης στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Η Ελλάδα είναι συγκριτικά με άλλες ευρωπαϊκές χώρες φτωχή σε φυσικές πρώτες ύλες (λιγνίτη και πετρέλαιο), ενώ υπάρχει μόνο λιγνίτης χαμηλής θερμογόνου δύναμης ο οποίος παρόλα αυτά συνεισφέρει κατά το μεγαλύτερο ποσοστό στην ενεργειακή ανάπτυξη της χώρας. Κατά συνέπεια, η ενεργειακή ανάπτυξη της χώρας μας στηρίζεται σε σημαντικό βαθμό σε εισαγόμενες πρώτες ύλες, όπως το πετρέλαιο και τα τελευταία χρόνια το φυσικό αέριο (από το 1998), των οποίων οι τιμές παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις ανάλογα με τις παγκόσμιες συγκυρίες.

Από την άλλη πλευρά η Ελλάδα παρουσιάζει σημαντικό αιολικό δυναμικό, ιδιαίτερα στις ανατολικές και παράκτιες περιοχές του ηπειρωτικού συγκροτήματός της (Ανατολική Θράκη και Εύβοια, Λακωνία και Μαγνησία) καθώς και στα νησιά του Αιγαίου και την Κρήτη, γεγονός που καθιστά ιδιαίτερα ελκυστική την εκμετάλλευσή του με τη βοήθεια ανεμογεννητριών σε Αιολικά πάρκα. Συν τοις άλλοις η έντονη ηλιοφάνεια, η μεγαλύτερη στην Ευρώπη σε μεγάλες περιόδους του έτους, καθιστά αρκετά ελκυστική και την εκμετάλλευση της Ηλιακής Ενέργειας μέσω Φωτοβολταϊκών Γεννητριών. Η εκμετάλλευση των υδατικών πόρων με τους υδροηλεκτρικούς σταθμούς, η εκμετάλλευση της γεωθερμίας στις περιοχές που υπάρχει η δυνατότητα και η χρήση της βιομάζας ως καύσιμο στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς, συνθέτουν ένα νέο μοντέλο παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (σε συνδυασμό και με τη διεσπαρμένη παραγωγή σε τοπικό επίπεδο) με στόχο τη μείωση χρήσης ορυκτών καυσίμων και την μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων.

1.2 Μεταφορά Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ο όρος περιλαμβάνει το σύνολο των διαδικασιών για τη λειτουργία και τον έλεγχο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας από την έξοδο των σταθμών παραγωγής μέχρι τους υποσταθμούς που τροφοδοτούν τα μεγάλα κέντρα κατανάλωσης, από όπου ξεξινούν τα δίκτυα διανομής.

Επίσης τροφοδοτούν τους μεγάλους καταναλωτές υψηλής τάσης, που κατασκευάζουν δικό τους υποσταθμό υποβιβασμού σε μέση τάση και εσωτερικά δίκτυα μέσης και χαμηλής τάσης, και είναι κυρίως μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις με εγκατεστημένη ισχύ άνω των 10MW.

Η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται με υψηλή τάση, διότι αυτό εξασφαλίζει τις μειωμένες απώλειες, άρα πιο οικονομική λειτουργία. Χρησιμοποιούνται διάφορες τάσεις μεταφοράς, από 66 έως 220kV στη βαθμίδα *υψηλών τάσεων*, από 275 έως 500kV για τη βαθμίδα των *υπερυψηλών τάσεων*, και άνω των 500kV για τη βαθμίδα των *εξαιρετικά υψηλών τάσεων*, αναλόγως της απόστασης και της ποσότητας της ισχύος μεταφοράς, ενώ η επιλογή της πιο κατάλληλης γίνεται με άξονα τη μείωση του κόστους μεταφοράς, που αποτελείται από το κόστος εγκατάστασης, το κόστος απωλειών και το κόστος συντήρησης των γραμμών. Επίσης χρησιμοποιούνται όπου κρίνεται κατάλληλο γραμμές συνεχούς ρεύματος (HVDC) για τη μεταφορά ισχύος σε μεγάλες αποστάσεις.

Οι γραμμές μεταφοράς αναχωρούν από και καταλήγουν στους υποσταθμούς, οι οποίοι αποτελούν τους κόμβους του δικτύου. Οι υποσταθμοί στους οποίους απλώς συνδέονται γραμμές χωρίς να γίνεται μετασχηματισμός της τάσης, λέγονται *υποσταθμοί ζεύξης ή διασύνδεσης*. Αν επιπλέον γίνεται και μετασχηματισμός από μία βαθμίδα τάσης μεταφοράς σε χαμηλότερη, τότε πρόκειται για *υποσταθμό μετασχηματισμού ή υποσταθμό ζεύξης και μετασχηματισμού*. Αντίστοιχα, οι *υποσταθμοί ανύψωσης* που ανήκουν στους σταθμούς παραγωγής ανυψώνουν την τάση από την τιμή της τάσης παραγωγής -περίπου 6 έως 20kV- στο επίπεδο της τάσης μεταφοράς.

1.3 Διανομή Ηλεκτρικής Ενέργειας

Το δίκτυο διανομής αποτελείται από δύο βαθμίδες:

- Τη διανομή Μέσης Τάσης ή πρωτεύουσα διανομή και
- τη διανομή Χαμηλής Τάσης ή δευτερεύουσα διανομή.

Το δίκτυο διανομής ΜΤ τροφοδοτείται από τους υποσταθμούς υποβιβασμού ΥΤ/ΜΤ και τροφοδοτεί τους υποσταθμούς διανομής ΜΤ/ΧΤ και τους καταναλωτές ΜΤ, και περιλαμβάνει τιμές τάσης από 6.6 kV μέχρι 20kV. Είναι συνήθως βροχοειδές αλλά λειτουργούν ακτινικά. Η βροχοειδής δομή επιτρέπει οικονομία γραμμών για τον ίδιο βαθμό εξυπηρέτησης, ενώ η ακτινική επιβάλλεται για την απλότητα της προστασίας και της ροής ενέργειας.

Μέσω των υποσταθμών διανομής, με βασικό εξοπλισμό τους μετασχηματιστές διανομής, γίνεται ο υποβιβασμός σε χαμηλή τάση διανομής, με την οποία τροφοδοτούνται οι οικιακοί καταναλωτές. Τα δίκτυα διανομής ΧΤ αναχωρούν από τους ζυγούς ΧΤ των υποσταθμών διανομής και τροφοδοτούν τις παροχές των καταναλωτών ΧΤ.

1.4 Βασικά χαρακτηριστικά ηλεκτρικού δικτύου

Τρία γενικά, αλλά βασικά, χαρακτηριστικά σχεδίασεως και αναφοράς ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι η *Τάση*, η *Ισχύς Βραχυκυκλώσεως* και η *Στάθμη Μονώσεως* αυτού. Τάση του δικτύου είναι η μέγιστη τάση λειτουργίας των ηλεκτρικών γραμμών. Ισχύς βραχυκυκλώσεως του δικτύου είναι η συμβατική ισχύς που αντιστοιχεί στη μέγιστη ισχύ, η οποία αποδίδεται στο δίκτυο σε περίπτωση τριφασικού βραχυκυκλώματος μέσα

σε αυτό. Η στάθμη μονώσεως του δικτύου αναφέρεται συνήθως στην τιμή της κρουστικής αντοχής αυτού, δηλαδή της διηλεκτρικής αντοχής της μόνωσης του εξοπλισμού των υποσταθμών σε κρουστικές υπερτάσεις τυποποιημένης μορφής.

1.5 Φορτία

Γενικά, ο όρος φορτίο θα αναφέρεται σε μία συσκευή ή συγκρότημα συσκευών που τροφοδοτούνται με ηλεκτρική ενέργεια από το σύστημα. Στην πραγματικότητα οι συσκευές των φορτίων ποικίλουν από μία λάμπα φωτισμού νυκτός λίγων watt ως ένα κινητήρα επαγωγικό πολλών MW. Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας κατάλληλα σχεδιασμένο μπορεί να παρέχει ενέργεια σε όλα αυτά τα διάφορα φορτία. Τα διάφορα φορτία μπορούν να καταταγούν στις εξής κατηγορίες:

- Κινητήρες (κάθε τύπου)
- Συσκευές θέρμανσης
- Ηλεκτρονικές συσκευές
- Φωτιστικά σώματα

Από ηλεκτρική άποψη υπάρχουν τεράστιες διαφορές μεταξύ των διαφόρων φορτίων σε ότι αφορά το μέγεθος, τη συμμετρία (μονοφασικό ή τριφασικό), τη σταθερότητα (ως προς το χρόνο, τη συχνότητα και την τάση), και την περίοδο λειτουργίας (συστηματική ή τυχαία λειτουργία).

1.6 Κανονικές συνθήκες λειτουργίας

Η λειτουργία ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να είναι καλή και ασφαλής, οι δύο δε αυτές έννοιες χαρακτηρίζουν τις κανονικές συνθήκες λειτουργίας του δικτύου. Ο όρος καλή λειτουργία αφορά περισσότερο τους καταναλωτές, ο δε όρος ασφαλής το σύστημα. Η ηλεκτρική ενέργεια παρέχεται από το ηλεκτρικό σύστημα στους καταναλωτές υπό ορισμένη τάση, της οποίας η τιμή πρέπει να τηρείται μέσα σε προκαθορισμένα συμβατικά όρια. Τα παραδεκτά όρια διακύμανσης της παρεχόμενης τάσης στην περιοχή του καταναλωτή είναι $\pm 5\%$ επί της ονομαστικής τιμής της τάσης, δηλαδή προκειμένου για XT επί των 230V. Ως καλή λειτουργία του δικτύου, θεωρείται εκείνη κατά την οποία η παροχή προς τους καταναλωτές είναι απρόσκοπτη και η τάση τροφοδότησης τηρείται μέσα στα συμβατικά όρια. Κατά τη λειτουργία του συστήματος οι εγκαταστάσεις του υφίστανται διηλεκτρικές, θερμικές και δυναμικές καταπονήσεις. Η ασφαλής λειτουργία απαιτεί, να μπορούν οι εγκαταστάσεις και ο εξοπλισμός του όλου συστήματος να υφίστανται ακίνδυνα τις παραπάνω λειτουργικές καταπονήσεις, και οι τελευταίες να τηρούνται μέσα στα προκαθορισμένα για την ασφάλεια του δικτύου όρια.

1.6.1 Ροή ισχύος και ενέργειας

Η ισχύς αποτελεί βασικό μέτρο, το οποίο είναι φυσικό σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας να χαρακτηρίζει το μέγεθος και την ικανότητα, τόσο του συστήματος ολόκληρου, όσο και κάθε στοιχείου της εγκατάστασης αυτού, όπως επίσης και του καταναλωτή. Η ηλεκτρική ισχύς ισούται γενικά με το γινόμενο της τάσης επί του ρεύματος. Ενώ

όμως στο συνεχές ρεύμα η ισχύς είναι μια και σχετίζεται με την ωμική αντίσταση του κυκλώματος, η ύπαρξη αυτεπαγωγών και χωρητικοτήτων σε ένα ηλεκτρικό σύστημα εναλλασσόμενου ρεύματος δημιουργεί δύο μορφές ισχύος, την ενεργό ή πραγματική ισχύ και την άεργο ισχύ ή ισχύ αντίδρασης.

1.6.2 Μηχανισμός Φορτίου-συχνότητας

Τα όρια διακύμανσης της συχνότητας πρέπει να είναι πολύ στενά, για διάφορους ειδικούς λόγους, όπως είναι η σημασία της σταθερής ταχύτητας των κινητήρων και των ωρολογιακών μηχανισμών, καθώς και για γενικότερους λόγους όπως ο έλεγχος της όλης λειτουργίας του συστήματος. Ο τελευταίος λόγος είναι και ο σοβαρότερος όλων. Ασυνήθιστες αποκλίσεις της συχνότητας δείχνουν ότι κάποια ανωμαλία συμβαίνει στο σύστημα. Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας η σταθερότητα της συχνότητας διατηρείται υπό κανονικές συνθήκες μέσα σε $\pm 0,05$ Hz. Σε αυτό συμβάλλει η διαδικασία της ρύθμισης φορτίου-συχνότητας, που εξασφαλίζει ότι κάθε μεταβολή στο ρυθμό κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας δεν προκαλεί αστάθεια στο σύστημα μέσω μεταβολών στη λειτουργία των γεννητριών.

1.6.3 Ευστάθεια λειτουργίας συστήματος

Συναφής με την ισορροπία φορτίου – συχνότητας είναι η έννοια της ευστάθειας του συστήματος. Η ευστάθεια είναι μία βασική ιδιότητα, η οποία πρέπει να διέπει τη λειτουργία ενός συστήματος παραγωγής και μεταφοράς και η οποία αποκτά τόσο μεγαλύτερη σπουδαιότητα, όσο πιο εκτεταμένο είναι το σύστημα, ή όσο περισσότερες διασυνδέσεις με γειτονικά συστήματα έχει. Το σύστημα χαρακτηρίζεται σαν ευσταθές, όταν, υφιστάμενο, ενώ λειτουργεί σε ορισμένη μόνιμη κατάσταση, μία διαταραχή από οποιαδήποτε αιτία τείνει να επανέλθει σε μόνιμη κατάσταση λειτουργίας, είτε την αρχική, είτε άλλη. Αντίθετα, εάν αυτό τείνει να μην επανέλθει πλέον σε κατάσταση μόνιμης λειτουργίας χαρακτηρίζεται σαν ασταθές. Μόνιμη κατάσταση λειτουργίας χαρακτηρίζεται η συνήθης κατάσταση λειτουργίας του συστήματος, κατά την οποία αυτό εκτελεί τον προορισμό του, δηλαδή παράγει, μεταφέρει και διανέμει σε κάθε στιγμή τη ζητούμενη κατά την ίδια στιγμή από την κατανάλωση ισχύ.

Έτσι, ανάλογα με τις διαταραχές που συμβαίνουν στο σύστημα, διακρίνονται δύο είδη ευστάθειας, η *στατική ευστάθεια* και η *μεταβατική*. Στην πρώτη κατηγορία μελετώνται οι διαταραχές μακράς διάρκειας στη μόνιμη λειτουργία του συστήματος, ενώ στη δεύτερη οι απότομες και μεγάλες διαταραχές δυναμικής μορφής που έχουν σαν αποτέλεσμα τη μεταβολή των στοιχείων του συστήματος, π.χ. βραχυκύκλωμα.

1.6.4 Άεργος ισχύς και τάσεις συστήματος

Σε αντιστοιχία με την ισορροπία της ενεργού ισχύος στο σύστημα, οι σταθερές τάσεις ζυγών εξασφαλίζουν ισορροπία μεταξύ παραγόμενης και καταναλισκόμενης άεργης ισχύος. Έτσι, για να διατηρείται η τάση στους ζυγούς σταθερή και να μη μεταφέρεται άεργη ισχύς από τις γραμμές, επιτυγχάνεται η τοπική παραγωγή άεργου ισχύος με χρήση στατών και σύγχρονων πυκνωτών παράλληλα. Σε περίπτωση ανύψωσης τάσης χρησιμοποιούνται εγκάρσια πηνία για αντιστάθμιση.

1.7 Οικονομική λειτουργία

Η οικονομία λειτουργίας του συστήματος έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς το σύστημα μπορεί να λειτουργεί, ικανοποιώντας τις απαιτήσεις τάσης και συχνότητας της ζήτησης με άπειρους τρόπους. Ωστόσο, μόνο μία διάταξη θα δώσει την πλέον οικονομική λειτουργία. Τότε το σύστημα λέγεται ότι λειτουργεί σε *οικονομική κατανομή φορτίου*, πρόβλημα που θα μελετηθεί στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

1.8 Ανωμαλίες λειτουργίας του συστήματος

Κατά τη λειτουργία ενός συστήματος δημιουργούνται πολλές φορές ανώμαλες συνθήκες, οφειλόμενες είτε σε βλάβες αυτού, είτε σε εξωτερικά τυχαία αίτια, ή σε ατμοσφαιρικές επιδράσεις. Οι ανώμαλες συνθήκες αποτελούν μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας του συστήματος – σε αντίθεση με την κανονική ή μόνιμη κατάσταση – κατά τις οποίες στο σύστημα εκδηλώνονται μεταβατικά φαινόμενα ταχείας ή βραδείας εξέλιξης, αναλόγως της περίπτωσης. Κατά τα μεταβατικά αυτά φαινόμενα δημιουργούνται ταλαντώσεις τάσεων και εντάσεων στο σύστημα, κατά τις οποίες τα μεγέθη αυτά είναι δυνατόν να αποκτήσουν τιμές επικίνδυνες για την ασφάλεια του συστήματος. Τα βραχυκυκλώματα αποτελούν τις συνηθέστερες ανωμαλίες ενός ηλεκτρικού δικτύου και οφείλονται είτε σε βλάβες των εγκαταστάσεων, ή του εξοπλισμού αυτού, ή σε επιδράσεις εξωτερικών αιτιών, κυρίως ατμοσφαιρικών. Όπως τα βραχυκυκλώματα αποτελούν ανώμαλες υπερεντάσεις οι οποίες καταπονούν θερμικά και δυναμικά τους αγωγούς των δικτύων, οι υπερτάσεις αποτελούν ανώμαλες τάσεις, πολλαπλάσιου μεγέθους των τάσεων λειτουργίας, οι οποίες αντίστοιχα καταπονούν διηλεκτρικά τις μονώσεις αυτών. Αυτές διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αναλόγως προέλευσης, τις ατμοσφαιρικές ή εξωτερικές και τις λειτουργικές ή εσωτερικές υπερτάσεις.

1.9 Σύστημα και μέσα προστασίας

Το σύστημα προστασίας ενός ηλεκτρικού δικτύου είναι το βασικότερο από τα βοηθητικά συστήματα, με τα οποία είναι εφοδιασμένο το δίκτυο και αποσκοπεί στην προστασία του από τις ανώμαλες καταστάσεις, οι οποίες παρουσιάζονται κατά τη λειτουργία του και κυρίως από τα βραχυκυκλώματα.

Κατηγορίες και είδη προστασιών έναντι βραχυκυκλωμάτων υπάρχουν πολλά, από τα οποία αναφέρονται τα βασικότερα:

- Προστασία απόστασης (γραμμές μεταφοράς)
- Προστασία υπερέντασης (γεννήτριες, μετασχηματιστές, γραμμές διανομής ΜΤ, κ.α.)
- Διαφορική προστασία (μετασχηματιστές, καλώδια, γεννήτριες, ζυγοί)
- Προστασία σύγκρισης φάσεων (γραμμές μεταφοράς)
- Προστασία Buch – holtz (μετασχηματιστές, κ.α.)
- Προστασία υπερθέρμανσης (μετασχηματιστές, κ.α.)

Τα κύρια όργανα προστασίας είναι οι ηλεκτρονόμοι ή ρελαί, οι διακόπτες ισχύος ή αυτόματοι διακόπτες και οι ασφάλειες. Βασικοί τύποι διακοπτών ισχύος υψηλής τάσεως

είναι οι διακόπτες: ελαίου, πεπιεσμένου αέρος και εξαφθοριούχου θείου. Επίσης, ένα μέσο προστασίας του δικτύου από τις υπερτάσεις είναι το αλεξικέραυνο.

Κεφάλαιο 2

Συμπααραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

2.1 Εισαγωγή

Ο συμβατικός τρόπος κάλυψης των ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων ενός καταναλωτή (ή μιας ομάδας καταναλωτών) είναι η αγορά ηλεκτρισμού από το εθνικό δίκτυο και η καύση κάποιου καυσίμου (σε λέβητα, κλίβανο, κ.λπ.) για την παραγωγή θερμότητας. Όμως, η ολική κατανάλωση καυσίμων μειώνεται σημαντικά εάν εφαρμοσθεί η Συμπααραγωγή (Cogeneration ή Combined Heat and Power, CHP).

Ορισμός: *Συμπααραγωγή είναι η συνδυασμένη παραγωγή ηλεκτρικής (ή μηχανικής) και θερμικής ενέργειας από την ίδια αρχική πηγή ενέργειας.*

Η θερμική ενέργεια μπορεί να χρησιμοποιηθεί τόσο για θέρμανση όσο και για ψύξη ή κλιματισμό. Η ψύξη ή ο κλιματισμός επιτυγχάνονται με μηχανές απορρόφησης, που λειτουργούν με ατμό ή θερμό νερό.

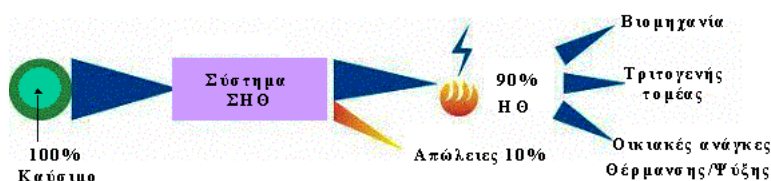
Κατά τη λειτουργία ενός συμβατικού θερμοηλεκτρικού σταθμού, μεγάλα ποσά θερμότητας αποβάλλονται στο περιβάλλον είτε μέσω των ψυκτικών κυκλωμάτων (συμπυκνωμάτων ατμού, πύργων ψύξης, ψυγείων νερού κινητήρων Diesel, κ.λπ.) είτε μέσω των καυσαερίων (αεριοστροβίλων, κινητήρων Diesel, κινητήρων Otto, κ.λπ.). Το μεγαλύτερο μέρος αυτής της θερμότητας μπορεί να ανακτηθεί και να χρησιμοποιηθεί ωφέλιμα. Έτσι, ενώ οι συμβατικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής έχουν βαθμό απόδοσης 30-45%, ο βαθμός απόδοσης των συστημάτων συμπααραγωγής φθάνει το 80-85%. Μια τυπική σύγκριση, ως προς τον βαθμό απόδοσης, της συμπααραγωγής με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας παρουσιάζει το Σχήμα 2.1 και το Σχήμα 2.2.

Η εφαρμογή της συμπααραγωγής διακρίνεται κυρίως σε τέσσερις βασικούς τομείς:

- Στο σύστημα ηλεκτρισμού της χώρας.
- Στο βιομηχανικό τομέα.
- Στον εμπορικό-τριτογενή τομέα.
- Στον αγροτικό τομέα.



Σχήμα 2.1: Απόδοση της χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού



Σχήμα 2.2: Απόδοση της συμπαραγωγής ηλεκτρισμού-θερμότητας

Έτσι, η χρήση της μπορεί να γίνει για θέρμανση χώρων ολόκληρων αστικών περιοχών (τηλεθέρμανση-*district heating*) όπως γίνεται στην Κοζάνη, στην Πτολεμαίδα και αλλού, και πρόσφατα αποφασίστηκε να λειτουργήσει και στη Φλώρινα. Περιλαμβάνει την κατασκευή δικτύων μεταφοράς και παροχής ύδατος, σε θερμοκρασίες 80 – 150 °C. Η τηλεθέρμανση χρησιμοποιείται ευρύτατα στις χώρες της βόρειας Ευρώπης καθώς οι περισσότερες μονάδες παραγωγής ηλεκτρισμού είναι πλέον συμπαραγωγικές. Για παράδειγμα, στη Δανία σχεδόν το 25% του συνολικού θερμικού φορτίου καλύπτεται μέσω τηλεθέρμανσης, από το οποίο το 1/3 (8%) προέρχεται από συμπαραγωγή. Σχεδόν το 20% του αντίστοιχου φορτίου στη Σουηδία καλύπτεται επίσης από τηλεθέρμανση, από το οποίο τα 3/5 (12%) προέρχονται από εγκαταστάσεις συμπαραγωγής ενώ το 0.7% περίπου του σχετικού γερμανικού φορτίου καλύπτεται από τη συμπαραγωγή. Τέλος στην Φινλανδία μόνο μία σημαντική πόλη δεν διαθέτει τηλεθέρμανση ενώ στα τέλη του '70 το 17% του φορτίου καλυπτόταν από τις εγκαταστάσεις αυτές (με σχεδιαζόμενη αύξηση στο 40% στη δεκαετία του '80), με το 50% αυτής να παρέχεται από σταθμούς συμπαραγωγής. Επίσης, στον τομέα των βιομηχανικών, αγροτικών και εμπορικών εφαρμογών μονάδες συμπαραγωγής μικρής σχετικά ισχύος (μερικών kW) χρησιμοποιούνται για να καλύψουν τις ανάγκες σε ηλεκτρική και θερμική ισχύ (βιομηχανικές περιοχές, νοσοκομεία, ξενοδοχεία, μεγάλα κτίρια, αθλητικά κέντρα, κλπ.)

2.2 Σύγχρονες τεχνικές συμπαραγωγής

Τα περισσότερα συστήματα συμπαραγωγής μπορούν να χαρακτηριστούν ως συστήματα «κορυφής» ή ως συστήματα «βάσης». Στα συστήματα κορυφής, ρευστό υψηλής θερμοκρασίας χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρισμού, ενώ στις θερμικές διεργασίες χρησιμοποιείται η αποβαλλόμενη θερμότητα. Στα συστήματα βάσης, παράγεται η θερμική ενέργεια υψηλής θερμοκρασίας και στη συνέχεια τα θερμά αέρια διοχετεύονται σε λέβητα ανακομιδής θερμότητας σε ατμοστρόβιλους για την κίνηση της στρο-

βιλλογεννήτριας ή σε αεριοστρόβιλο που κινεί τη γεννήτρια χωρίς να παρεμβάλεται λέβητας.

Ενδεικτικά αναφέρουμε τα συστήματα συμπαραγωγής:

- Συστήματα ατμοστρόβιλου
 - Συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο αντίθλιψης
 - Συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο απομάστευσης
 - Συστήματα συμπαραγωγής με ατμοστρόβιλο σε κύκλο βάσης
- Συστήματα αεριοστρόβιλου
 - Συστήματα αεριοστρόβιλου ανοικτού κύκλου
 - Συστήματα αεριοστρόβιλου κλειστού κύκλου.
- Συστήματα με παλινδρομική μηχανή εσωτερικής καύσης (κινητήρες Diesel ή βενζινοκινητήρες με κατάλληλη μετατροπή)
- Συστήματα συνδυασμένου κύκλου
- Κύκλοι βάσης Rankine με οργανικά ρευστά
- Τυποποιημένες μονάδες συμπαραγωγής (ηλ. ισχύς 10-1000kW)
- Κυψέλες καυσίμου (fuel cells)
- Μηχανές Stirling

2.3 Πλεονεκτήματα και επιπτώσεις της συμπαραγωγής

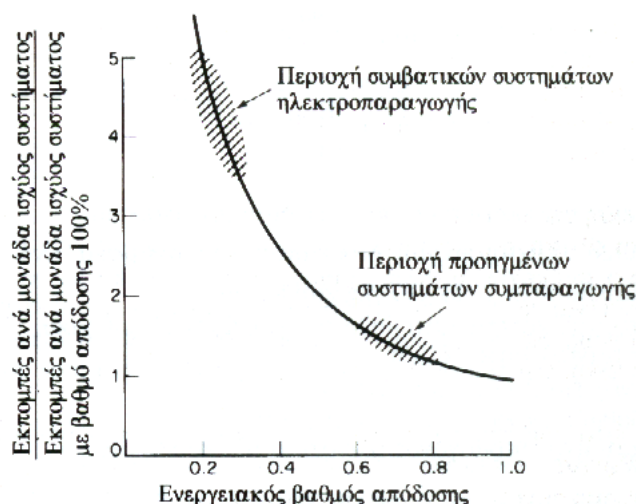
2.3.1 Επιπτώσεις στην κατανάλωση καυσίμου

Είναι προφανής η μείωση της κατανάλωσης καυσίμου λόγω του υψηλότερου βαθμού απόδοσης που παρουσιάζουν τα συστήματα συμπαραγωγής. Για παράδειγμα, ένα σύστημα με ατμοστρόβιλο μειώνει την κατανάλωση καυσίμου κατά 15% περίπου (σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού με μονάδα ατμοστρόβιλου και θερμότητας με λέβητα), ένα σύστημα συμπαραγωγής με κινητήρα Diesel τη μειώνει κατά 25% (σε σύγκριση με τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού με ντιζελοκίνητη ηλεκτρογεννήτρια και θερμότητας με λέβητα), κ.λ.π.

Μια πρόσθετη βελτίωση του βαθμού εκμετάλλευσης των καυσίμων οφείλεται στο ότι τα συστήματα συμπαραγωγής βρίσκονται συνήθως πιο κοντά στους καταναλωτές απ' ό,τι οι κεντρικοί σταθμοί ηλεκτροπαραγωγής. Έτσι, περιορίζονται οι απώλειες μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που είναι της τάξεως του 8-10%.

2.3.2 Επιπτώσεις στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας

Οι μονάδες συμπαραγωγής έχουν μικρότερο μέγεθος και βραχύτερο χρόνο εγκατάστασης από τους μεγάλους κεντρικούς σταθμούς, προσφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα σε απρόβλεπτες μελλοντικές μεταβολές της ζήτησης ηλεκτρισμού. Ο μικρός χρόνος εγκατάστασης των συστημάτων συμπαραγωγής συντελεί επίσης σε περιορισμό του χρηματοοικονομικού κόστους που συμβάλλει με τη σειρά του στη μείωση του μοναδιαίου κόστους παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας. Γι' αυτό και



Σχήμα 2.3: Έκπομη ρύπων ως συνάρτηση του βαθμού απόδοσης των συστημάτων

βρίσκουν εφαρμογή με χρήση της διεσπαρμένης παραγωγής και λειτουργούν παράλληλα με τους κεντρικούς σταθμούς, αυξάνοντας έτσι την αξιοπιστία του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Ωστόσο, μπορεί να προκαλέσουν προβλήματα ευστάθειας στο δίκτυο, εάν δεν πληρούν ορισμένες προϋποθέσεις.

Από την άλλη πλευρά, η εξάπλωση της συμπαραγωγής θα μπορούσε να έχει αρνητικές οικονομικές επιπτώσεις στο εθνικό σύστημα ηλεκτρισμού, εάν αυτό έχει ικανότητα παραγωγής μεγαλύτερη από τη ζήτηση, ή εάν ο ρυθμός αύξησης της ικανότητας με κατασκευή νέων σταθμών είναι μεγαλύτερος από τον ρυθμό αύξησης της ζήτησης και για διάφορους λόγους δεν μπορεί να επιβραδυνθεί. Τότε, το κόστος κεφαλαίου μοιράζεται σε μικρότερη ποσότητα παραγόμενου ηλεκτρισμού, με αποτέλεσμα την αύξηση του μοναδιαίου κόστους.

2.3.3 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Λόγω της μείωσης κατανάλωσης καυσίμου, η συμπαραγωγή συντελεί και στη μείωση των εκπεμπόμενων ρύπων, που συνεπάγεται και έμμεση μείωση ρύπων από τον υπόλοιπο κύκλο καυσίμου: εξόρυξη, επεξεργασία, μεταφορά, αποθήκευση. Η ποσοτικοποίηση του κόστους αυτού είναι δύσκολη και εξαρτάται από διάφορους παράγοντες: τεχνολογία, καύσιμο, τοπικές συνθήκες, κ.λ.π. Χαρακτηριστικά φαίνεται στο Σχήμα 2.3 η διαφορά των εκπομπών για τα συστήματα συμπαραγωγής και τις συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής.

Η επίδραση της συμπαραγωγής από πλευράς ρύπων εκφράζεται με τη διαφορά εκπομπών, που ορίζεται με τη σχέση:

$$\Delta M_X = M_{X\Sigma\Sigma} - M_{XH} - M_{X\Theta} \quad (2.1)$$

Όπου, ΔM_X η διαφορά εκπομπών του ρύπου X,

$M_{X\Sigma\Sigma}$ η έκπομη ρύπου X του συστήματος συμπαραγωγής,

M_{XH} η έκπομη ρύπου X του συστήματος παραγωγής ηλεκτρισμού, το οποίο αντικαθίσταται από το σύστημα συμπαραγωγής,

Ρύτος	Συνδυασμοί συστήματος συμπαράγωγής - συστημάτων χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας											
	1 - A		1 - B		2 - A		2 - B		3 - A		3 - B	
	gT	%	gT	%	gT	%	gT	%	gT	%	gT	%
CO ₂	- 51024	- 46,2	- 88458	- 59,9	- 62454	- 52,0	- 99888	- 63,4	- 70791	- 46,7	- 108225	- 57,2
NO _x	+ 812	+255,3	+ 802	+244,5	- 290	- 85,3	- 300	- 85,7	- 283	- 68,7	- 293	- 69,4
CO	+ 320	+524,6	+ 357	+1487	- 33	- 52,4	+ 4	+ 15,4	- 68	- 100,0	- 31	- 100,0
HC	+ 375	+ 1875	+ 388	+5543	- 15	- 75,0	- 2	- 28,6	+ 4	+ 18,2	+ 17	+188,9
SO _x	- 208	- 95,9	- 794	- 98,9	- 273	- 99,3	- 859	- 99,8	- 415	- 90,0	- 1001	- 95,6
Σωματίδια	- 44	- 91,7	- 40	- 90,9	- 51	- 91,1	- 47	- 90,4	- 77	- 91,7	- 73	- 91,3

Συστήματα συμπαράγωγής

1. Κινητήρας Diesel διπλού καυσίμου (90% της ενεργείας από φυσικό αέριο, 10% από καύσιμο Diesel) με $\eta_e = \eta_h = 0,35$ (PHR = 1).
2. Νέος αεριοστρόβιλος φυσικού αερίου με $\eta_e = 0,35$, $\eta_h = 0,45$. (PHR = 0,778).
3. Νέος ατμοστρόβιλος φυσικού αερίου με $\eta_e = 0,25$, $\eta_h = 0,55$. (PHR = 0,455).

Συστήματα χωριστής παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας

- A. Αεριοστρόβιλος με καύσιμο Diesel και βιομηχανικός ατμολέβητας με καύσιμο μαζούτ.
- B. Νέος ατμοστρόβιλος με καύσιμο άνθρακα και βιομηχανικός ατμολέβητας με καύσιμο μαζούτ.

Το αρνητικό πρόσημο σημαίνει μείωση εκπομπών με τη συμπαράγωγή.
Τα ποσοστά προοριζόσθσαν με βάση αναγωγή τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Σχήμα 2.4: Παραδείγματα σύγκρισης εκπομπών μεταξύ συστημάτων συμπαράγωγής και συμβατικών τρόπων παραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (ανά 100kWh παραγωγής)

$M_{X\Theta}$ η εκπομπή ρύπου X του συστήματος παραγωγής θερμότητας, το οποίο αντικαθίσταται από το σύστημα συμπαράγωγής (π.χ. ατμολέβητας).

Μερικά παραδείγματα σύγκρισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2.4. Εντυπωσιακή είναι η μείωση εκπομπών CO₂: 50–100kg ανά 100 kWh ηλεκτρικής διαστήματος αυτού, δηλαδή 50 kg ανά 100 kWh, τότε σε κάθε TWh ηλεκτρικής ενέργειας, που παράγεται με συμπαράγωγή, αντιστοιχεί μείωση 500000 τόνων CO₂. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με την εξοικονόμηση καυσίμου δικαιολογεί τη θέσπιση κινήτρων για τη διάδοση της συμπαράγωγής.

Επίσης, όταν καύσιμο σε συστήματα συμπαράγωγής είναι το φυσικό αέριο, οι εκπομπές οξειδίων του θείου και στερεών σωματιδίων, που παρουσιάζονται από την καύση άνθρακα ή υγρών καυσίμων σε σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής, σχεδόν εξαφανίζονται. Αξιοσημείωτη είναι επίσης η μεγάλη μείωση εκπομπών NO_x που επιτυγχάνεται με κυψέλες καυσίμου.

2.4 Συμπαράγωγή στην Ελλάδα και τομείς εφαρμογής

2.4.1 Τηλεθέρμανση

Αν και σε χώρες της -βόρειας κυρίως- Ευρώπης η τηλεθέρμανση είναι ευρέως διαδεδομένη για την παροχή θερμότητας στις αστικές περιοχές, στην Ελλάδα τα στοιχεία είναι απογοητευτικά, καθώς υπάρχουν εγκατεστημένα μόνο 4 δίκτυα (Κοζάνη, Πτολεμαίδα, Μεγαλόπολη, Αμύνταιο) και οι υπόλοιπες εγκαταστάσεις είναι κυρίως βιομηχανικές (αυτοπαραγωγή). Οι μεσαίες/μεγάλες μονάδες (200 – 600MW) συμπαράγωγής είναι περισσότερο ελκυστικές καθώς μπορούν να χρησιμοποιήσουν σταθ-

μούς μεγάλης ισχύος με υψηλά ενεργειακά αποθέματα και συνεπώς οικονομικότερη παραγωγή θερμότητας για θέρμανση-ψύξη περιοχών, αλλά και ηλεκτρικής ενέργειας. Το κόστος της θέρμανσης για τους καταναλωτές επιβαρύνεται από το κόστος των απωλειών του δικτύου μεταφοράς-διανομής, ωστόσο οι μεγάλες διατάξεις παραμένουν οικονομικότερες σε πολλές περιπτώσεις. Έτσι, για εφαρμογή στο εσωτερικό μιας μεγάλης πόλης, με τη χρήση μεσαίων/μεγάλων αεριοστροβίλων είναι μια ελκυστική οικονομική πρόταση για τους εθνικούς φυσικούς πόρους σε σύγκριση με εναλλακτικούς τρόπους θέρμανσης, αν ληφθούν υπόψη τα χαμηλότερα προεξοφλητικά επιτόκια (π.χ. 5%) και οι υψηλότερες τιμές καυσίμου. Απαιτείται όμως σε πολλές περιπτώσεις μεγάλος χρονικός ορίζοντας απόσβεσης, για αυτό το λόγο είναι απαραίτητη η επιδότηση τέτοιων επενδύσεων με προνομιακούς όρους.

Η εγκατάσταση μιας μεσαίας/μεγάλης μονάδας συμπαραγωγής που εξυπηρετεί περιοχές με υψηλή πυκνότητα φορτίου θέρμανσης σε πόλεις φαίνεται μια ελκυστική εναλλακτική λύση από άποψη οικονομίας και εξοικονόμησης ενέργειας σε σύγκριση με άλλες αναπτυγμένες μορφές θέρμανσης. Στην απουσία του φυσικού αερίου και του πετρελαίου σε μια μακροπρόθεσμη μελέτη άλλες λύσεις θέρμανσης όπως ηλεκτρική ενέργεια (εκτός αιχμής) ή ΥΦΑ (υποκατάστατο φυσικού αερίου) θα κυριαρχούσαν σε μία μεγάλη αγορά εκτός των περιοχών με υψηλή πυκνότητα φορτίου θέρμανσης.

Οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν τη βιωσιμότητα της επένδυσης ενός δικτύου τηλεθέρμανσης με συμπαραγωγή είναι:

1. η πυκνότητα δόμησης,
2. το προεξοφλητικό επιτόκιο,
3. η τιμή και το είδος του καυσίμου,
4. το μέγεθος του δικτύου.

Συμπερασματικά, για υψηλές τιμές καυσίμου, πυκνότητα δόμησης 7 κατοίκων/ m^2 και άνω και χαμηλό προεξοφλητικό επιτόκιο, μία μονάδα συμπαραγωγής με τηλεθέρμανση γίνεται η πιο συμφέρουσα επιλογή από οικονομικής-περιβαλλοντικής πλευράς.

2.4.2 Τηλεθέρμανση και γεωθερμία

Οι εφαρμογές της γεωθερμικής ενέργειας, τόσο σε Ευρωπαϊκό, όσο και σε παγκόσμιο επίπεδο, ομαδοποιούνται σε τρεις κύριες κατηγορίες:

1. Παραγωγή Ηλεκτρικής Ενέργειας
2. Χρήση της Θερμότητας
3. Γεωθερμικές Αντλίες Θερμότητας

Όσον αφορά την ηλεκτροπαραγωγή από γεωθερμία, η εγκατεστημένη ισχύς στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η οποία ανήλθε σε 883 MW(e) το έτος 2002, αντιστοιχεί στο 10% περίπου της παγκόσμιας εγκατεστημένης ισχύος.

Στην Ελλάδα, οι γεωθερμικές εφαρμογές εστιάζονται σε θερμικές χρήσεις με 69 MW(th), με κύριες εφαρμογές τα θερμά και ιαματικά λουτρά (50%), και τη θέρμανση θερμοκηπίων και εδαφών (50%). Στην Ευρωπαϊκή ένωση οι θερμικές χρήσεις της γεωθερμικής ενέργειας περιλαμβάνουν θέρμανση κτηρίων (600 MW(th), θερμοκηπίων (350 MW(th)), θερμά λουτρά (350 MW(th)) και άλλες εφαρμογές (100 MW(th)). Σε

παγκόσμιο επίπεδο, οι αντίστοιχες εφαρμογές αντιστοιχούν σε πολλαπλάσια εγκατεστημένη ισχύ (9.400 MW(th)).

Οι ερευνητικές δραστηριότητες στην Ελλάδα περιλαμβάνουν κυρίως αναζήτηση γεωθερμικών ρευστών θερμοκρασίας 75-100 °C, καθώς και εφαρμογές γεωθερμικών αντλιών θερμότητας. Ενδεικτικά ερευνητικά έργα αποτελούν η εγκατάσταση γεωθερμικών αντλιών θερμότητας στο δημαρχείο Πυλαίας Θεσσαλονίκης, στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Δημοσίου Δικαίου στα Λεγραινά Αττικής, στα γραφεία του ΚΑΠΕ στο Πικέρι Αττικής και στο κτίριο των Μεταλλειολόγων στην Πολυτεχνειούπολη του ΕΜΠ στην Αθήνα, η αξιοποίηση γεωθερμικού νερού >40 °C στο αεροδρόμιο «Μακεδονία», η τηλεθέρμανση δημοτικών κτιρίων στον Λαγκαδά με νερό από τα Λουτρά και αντλίες θερμότητας και η αφαλάτωση θαλασσινού νερού με γεωθερμική ενέργεια χαμηλής ενθαλπίας στη Ν. Κίμωλο και στη Ν. Μήλο.

2.4.3 Βιομηχανικές διατάξεις και άλλες εφαρμογές

Ευρεία εφαρμογή βρίσκουν οι μικρότερης κλίμακας μονάδες συμπαραγωγής, που εγκαθίστανται για καλύψουν βιομηχανικές κυρίως ανάγκες. Πρόκειται για μικρές μονάδες με λέβητες απομάστευσης ατμού και αεριοστροβίλους με ισχύ από 3 έως 50MW, όπως επίσης και μονάδες με μηχανές εσωτερικής καύσης(ΜΕΚ) που καταναλώνουν πετρέλαιο ή φυσικό αέριο για χαμηλότερα επίπεδα ισχύος. Η κατάταξη των εφαρμογών γίνεται με βάση τη θερμοκρασία που απαιτείται σε κάθε περίπτωση:

1. Διεργασίες χαμηλών θερμοκρασιών (μικρότερων των 100 °C) π.χ. ξήρανση γεωργικών προϊόντων, θέρμανση ή ψύξη χώρων, θερμό νερό χρήσης.
2. Διεργασίες μέτριων θερμοκρασιών (100-300 °C) π.χ. διεργασίες στη χαρτοποιία, κλωστοϋφαντουργία, εργοστάσια ζάχαρης, χημικές βιομηχανίες κ.α. όπου η θερμότητα χρειάζεται σε μορφή ατμού.
3. Διεργασίες υψηλών θερμοκρασιών (300-700 °C) π.χ. σε μερικές χημικές βιομηχανίες.
4. Διεργασίες πολύ υψηλών θερμοκρασιών (άνω των 700 °C) π.χ. σε εργοστάσια τσιμέντου, μεταλλουργικές βιομηχανίες, υαλουργία κ.τ.λ.

Σημαντικό δυναμικό συμπαραγωγής παρουσιάζουν κυρίως οι κλάδοι της βιομηχανίας τροφίμων-ποτών, οι κλωστοϋφαντουργίες, οι βιομηχανίες χάρτου, οι χημικές βιομηχανίες, τα εργοστάσια τσιμέντου και οι βασικές μεταλλουργικές βιομηχανίες (χαλυβουργία, εργοστάσια παραγωγής αλουμινίου κ.λ.π). Μικρότερο δυναμικό, αλλά όχι αμελητέο, έχουν οι υαλουργίες, οι βιομηχανίες κεραμικών υλικών, ξυλοβιομηχανίες κ.α.. Το Σχήμα 2.5 αναφέρει τις μονάδες συμπαραγωγής που είναι εγκατεστημένες σε ελληνικές βιομηχανίες. Το σύνολο της ετήσιας ηλεκτροπαραγωγής των μονάδων που λειτουργούν είναι της τάξης των 900000 MWh και αποτελεί περίπου το 2,5 % της συνολικής ηλεκτροπαραγωγής της χώρας.

Αντίστοιχα, στον εμπορικό-κτηριακό τομέα (ξενοδοχεία, νοσοκομεία, εμπορικά κέντρα, σχολεία κ.λ.π) η συμπαραγωγή καλύπτει τις ανάγκες σε ηλεκτρισμό και θέρμανση-ψύξη των κτηρίων. Η κάθε εγκατάσταση χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη μορφή της καμπύλης φορτίου, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη τόσο κατά τη μελέτη σκοπιμότητας, όσο και κατά τον τελικό σχεδιασμό του συστήματος συμπαραγωγής. Επίσης, θα πρέπει να εξετάζεται και ο ετεροχρονισμός μεταξύ ηλεκτρικού και θερμικού φορτίου, αλλά και η μεταβολή της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος κατά τη διάρκεια του 24ώρου,

α/α	Βιομηχανία	Είδος Βιομηχανίας	Τοποθεσία	Τεχνολογία Συμπαραγωγής	Εγκατεστημένη ηλ. ισχύς (MW)
1.	Ελλ. Βιομ. Ζάχαρης	Βιομ. Ζάχαρης	Λάρισα	Ατμοστρόβιλος	12,00
2.	Ελλ. Βιομ. Ζάχαρης	Βιομ. Ζάχαρης	Πλατύ	Ατμοστρόβιλος	12,00
3.	Ελλ. Βιομ. Ζάχαρης	Βιομ. Ζάχαρης	Σέρρες	Ατμοστρόβιλος	6,00
4.	Ελλ. Βιομ. Ζάχαρης	Βιομ. Ζάχαρης	Ξάνθη	Ατμοστρόβιλος	16,00
5.	Ελλ. Βιομ. Ζάχαρης	Βιομ. Ζάχαρης	Ορεστιάδα	Ατμοστρόβιλος	10,00
6.	ΕΤΜΑ	Κλωστοϋφαν/γία	Αθήνα	Ατμοστρόβιλος	9,40
7.	Πειραιϊκή Πατραϊκή*	Κλωστοϋφαν/γία	Πάτρα	Ατμοστρόβιλος	1,25
8.	Αθηναϊκή Χαρτοποιία*	Χαρτοποιία	Δράμα	Κινητήρας Diesel	34,55
9.	Θεσσαλική Χαρτοποιία	Χαρτοποιία	Λάρισα	Ατμοστρόβιλος	5,50
10.	Λαδόπουλος*	Χαρτοποιία	Πάτρα	Ατμοστρόβιλος	3,00
11.	Χαλυβουργική*	Χαλυβουργία	Ελευσίνα	Ατμοστρόβιλος	80,00
12.	Motor Oil	Διύλιστήριο	Κόρινθος	Αεριοστρόβιλος	23,00
13.	Ελλ. Διύλ. Ασπρόπυργου	Διύλιστήριο	Ασπρόπυργος	Αεριοστρόβιλοι	34,00
14.	Ε.Π.Β. Αιγαίου	Εξόρ. Πετρελαίου	Καβάλα	Ατμοστρόβιλος	16,00
				Αεριοστρόβιλοι	11,00
				Ατμοστρόβιλος	5,50
15.	Α.Ε.Ε.Χ.Π.Α.	Λιπάσματα	Δραπετσώνα	Ατμοστρόβιλος	11,80
16.	Β.Φ. Λιπασμάτων	Λιπάσματα	Καβάλα	Ατμοστρόβιλος	25,00
17.	Χ.Β.Β.Ε.	Λιπάσματα	Θεσσαλονίκη	Ατμοστρόβιλος	11,00
18.	Αλουμίνιο Ελλάδος	Παραγ. Αλουμινίου	Βοιωτία	Ατμοστρόβιλος	11,60
19.	Εκκομιστήρια Βάμβακος Δαύλειας, Α.Ε.Β.Ε.	Εκκομιστήρια	Δαύλεια Βοιωτίας	Ατμοστρόβιλος	0,5
Ολική εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς:					339,10
Εγκατεστημένη ηλεκτρική ισχύς των λειτουργούντων συστημάτων:					220,30
* Δέν λειτουργεί.					
Συνομογραφίες:					
ΕΤΜΑ:		Εταιρεία Τεχνητής Μετάξης Ε.Τ.Μ.Α. Α.Ε.			
Ε.Π.Β. Αιγαίου:		Εταιρεία Πετρελαίου Βορείου Αιγαίου			
Α.Ε.Ε.Χ.Π.Α.		Ανώνυμος Ελληνική Εταιρεία Χημικών Προϊόντων και Λιπασμάτων			
Β.Φ. Λιπασμάτων:		Βιομηχανία Φωσφορικών Λιπασμάτων			
Χ.Β.Β.Ε.:		Χημικές Βιομηχανίες Βορείου Ελλάδος			

Σχήμα 2.5: Συστήματα συμπαραγωγής σε Ελληνικές Βιομηχανίες(1998)

που συχνά κάνουν αναγκαία την ύπαρξη συστήματος αποθήκευσης θερμότητας, για την οικονομική εκμετάλλευση του συστήματος.

Στον αγροτικό τομέα η συμπαραγωγή δεν είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη, ωστόσο η εφαρμογή της μπορεί να εξοικονομήσει καύσιμα και να έχει θετικές επιπτώσεις σε αγροτικές κοινότητες. Ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί η βιομάζα, από γεωργικά υπολείμματα και η ανακτώμενη θερμότητα να χρησιμοποιηθεί για ξήρανση γεωργικών προϊόντων, θέρμανση θερμοκηπίων, σπιτιών κ.α.. Μελέτες που έχουν εκπονηθεί από το ΚΑΠΕ, έουν δείξει ότι αυτού του είδους οι εφαρμογές είναι τεχνικά δυνατές και οικονομικά βιώσιμες. Για παράδειγμα, η μονάδα ατμοστρόβιλου που είναι εγκατεστημένη στα Εκκοκιστήρια Βάμβακα Δαύλειας ΑΕΒΕ, χάρη στην οποία εξοικονομούνται 300.000lt πετρελαίου Diesel, 450.000lt μαζούτ και $1,35 * 10^6 kWh$ ηλεκτρισμού για κάθε εκκοκιστική περίοδο.

Η επιλογή των μονάδων που θα χρησιμοποιηθούν σε κάθε περίπτωση εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το λόγο ηλεκτρισμού - θερμότητας, αλλά και από τις απαιτήσεις σε ηλεκτρική ισχύ και θερμότητα ξεχωριστά. Παράλληλα, η διακύμανση της ζήτησης, είτε βραχυπρόθεσμα είτε μεσοπρόθεσμα είναι σημαντικός παράγοντας που συχνά επιβάλλει την εγκατάσταση πολλών όμοιων μηχανών παράλληλα. Οι μεταβολές της ζήτησης αφομοιώνονται με προγραμματισμό της ένταξης των μονάδων έτσι ώστε το σύστημα να λειτουργεί οικονομικά.

Οι κυριότερες παράμετροι για την επιλογή και σχεδιασμό μίας μονάδας συμπαραγωγής δεν είναι όμως μόνο τεχνικές, αλλά υπόκεινται στους περιορισμούς του οικονομικού-κοινωνικού περιβάλλοντος. Προφανώς εδώ δεν πρόκειται για πυκνότητα δόμησης, όπως στις εγκαταστάσεις τηλεθέρμανσης, αλλά κυρίως για τη βιωσιμότητα της επένδυσης. Έτσι λαμβάνονται υπόψη το προεξοφλητικό επιτόκιο, οι τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και προφανώς οι τιμές των καυσίμων και η πρόβλεψη των τιμών για το κάθε είδος καυσίμου στο μέλλον, παράλληλα με τη διάρκεια ζωής της εγκατάστασης.

2.5 Φυσικό αέριο και βιομάζα

Το φυσικό αέριο είναι η νέα πηγή ενέργειας, που έφτασε πρόσφατα στην Ελλάδα, μέσω αγωγών από τη Ρωσία αλλά και σε υγροποιημένη μορφή από την Αλγερία. Αποτελεί μια μοναδική ευκαιρία για διάφορους τομείς της οικονομίας, να μειώσουν το ενεργειακό τους κόστος, αλλά και να βελτιώσουν τις εκπομπές αερίων ρύπων προς το περιβάλλον.

Η άφιξη του φυσικού αερίου στην Ελλάδα και οι δυνατότητες που προσφέρει η τεχνολογία της συμπαραγωγής οδήγησαν στη δραστηριοποίηση ενός σημαντικού αριθμού εταιρειών ή οργανισμών, με στόχους την ενημέρωση του επιχειρηματικού κόσμου, την παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών για τη μελέτη και κατασκευή εγκαταστάσεων συμπαραγωγής με το «κλειδί στο χέρι», τη συντήρηση, λειτουργία και εκμετάλλευση εγκαταστάσεων συμπαραγωγής, κλπ.

Η αγορά της συμπαραγωγής μέχρι και σήμερα, παρ' όλα τα θετικά βήματα που έγιναν από την Πολιτεία (π.χ νέος ενεργειακός νόμος, Ν.2773/99, επιδοτήσεις σε συστήματα ΣΗΘ τόσο από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα Ενέργειας, ΕΠΕ, του Β' ΚΠΣ όσο και από το Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα» του Γ' ΚΠΣ, κλπ), παραμένει δύσπιστη και σε κατάσταση αναμονής, για τους εξής λόγους:

- Δυσκολία στον προσδιορισμό των βασικών μεγεθών για οικονομικοτεχνικές αναλύσεις στον ενεργειακό τομέα.

- Παντελής έλλειψη τιμολογιακής πολιτικής για συμπαραγωγή στον τριτογενή τομέα.
- Έλλειψη ανταγωνιστικής τιμολογιακής πολιτικής για συμπαραγωγή στον βιομηχανικό τομέα.
- Δυσκολίες για την περαιτέρω ανάπτυξη του δικτύου διανομής φυσικού αερίου.
- Αδυναμία της ΔΕΠΑ για την τήρηση του προβλεπόμενου χρονοδιαγράμματος για τη σύνδεση μεγάλων βιομηχανιών.
- Έλλειψη εμπειρίας στην ενεργειακή διαχείριση και αξιολόγηση εναλλακτικών λύσεων.

Σημαντική πηγή ενέργειας για τη συμπαραγωγή μπορεί να είναι και η βιομάζα, προερχόμενη από αστικά λύματα και απόβλητα, υπολείμματα γεωργικής και δασικής προέλευσης και ενεργειακές καλλιέργειες.

Με καύσιμο που προέρχεται από αστικά απόβλητα λειτουργεί από το 2001 ο σταθμός συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας από βιοαέριο στα Άνω Λιόσια. Το έργο αυτό, πρώτο του είδους του στην Ελλάδα, επιλύει το σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα στην περιοχή των Άνω Λιοσίων, ενώ εκμεταλλεύεται την έκλυση του βιοαερίου από τα απορρίμματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, που επαρκεί για την ηλεκτροδότηση μιας πόλης 15,000 κατοίκων, αφού ο συγκεκριμένος σταθμός ΣΗΘ έχει ηλεκτρική ισχύ 14 MWe και θερμική ισχύ 16.5 MWth.

Τα απογεγραμμένα δασικά και γεωργικά υπολείμματα της χώρας ανέρχονται σε 10,000,000 τόνους το χρόνο περίπου. Εάν το 25% εξ αυτών μπορεί να αξιοποιηθεί σε συστήματα συμπαραγωγής, τότε δημιουργείται ένα σημαντικό δυναμικό συμπαραγωγής άνω των 400 MWe. Επειδή τα γεωργικά και δασικά υπολείμματα της χώρας είναι αποκεντρωμένα και διάσπαρτα σε όλη την χώρα, η εγκατάσταση μονάδων ΣΗΘ μικρής ισχύος, αποτελεί τον καλύτερο τρόπο αντιμετώπισης των αναγκών τηλεθέρμανσης και τηλεψύξης σε όλη τη χώρα, προωθώντας ένα τοπικό πλαίσιο ανάπτυξης.

2.6 Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού θερμότητας και διανεμημένη παραγωγή

Με την διάδοση τα τελευταία χρόνια της διεσπαρμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, τη σύνδεση δηλαδή μικρών μονάδων παραγωγής (κυρίως Α.Π.Ε) στο δίκτυο διανομής και την αποκεντρωμένη παραγωγή που επιφέρει καλύτερη αξιοπιστία και χαμηλότερα επίπεδα ρύπων, σε ένα πλαίσιο απελευθερωμένης αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, γίνεται συχνή η χρήση αεριοστρόβιλων με συμπαραγωγή σε μικρή κλίμακα. Η ουσιαστική βελτίωση του κόστους, της απόδοσης, της ανθεκτικότητας και των περιβαλλοντικών εκπομπών έχει καταστήσει αυτά τα συστήματα περισσότερο ελκυστικά στα πλαίσια της αγοράς.

Το μέγεθος των micro-στροβίλων ποικίλει αρκετά και κυμαίνεται από 25kW έως και 80kW, ενώ μελλοντικά υπολογίζεται ότι θα παράγονται micro-στροβίλοι της τάξης των 500kW ή ακόμη και των 1000kW. Αντίστοιχα οι mini-στροβίλοι κυμαίνονται στα επίπεδα από 150kWe μέχρι 1MWe. Χρησιμοποιούνται διάφορες τεχνολογίες, συμπεριλαμβανομένων των ατμοστρόβιλων, των μηχανών παλινδρόμησης, των κυψελών καυσίμου και των αεριοστρόβιλων. Οι αεριοστρόβιλοι, αν και έχουν χαμηλότερη απόδοση κερδίζουν έδαφος καθώς έχουν μικρότερο κόστος συντήρησης, χαμηλό επίπεδο δονήσεων,

υψηλό βαθμό απώλειας θερμότητας. Η απουσία στοιχείων που προκαλούν παλινδρόμηση και τριβή έχει ως αποτέλεσμα την ύπαρξη λιγοστών προβλημάτων εξισορρόπησης ενώ η χρήση λιπαντικού λαδιού είναι περιορισμένη. Σε χαμηλότερο εύρος ενέργειας, οι μηχανές παλινδρόμησης παρουσιάζουν μεγαλύτερη απόδοση, αλλά πλέον η χρήση τους σε συστήματα συμπαραγωγής απειλείται λόγω της ύπαρξης σταθμών ενέργειας αεριοστροβίλων που αποτελούνται από υψηλής απόδοσης αεριο – μηχανές και της αυξανόμενης απόδοσης των βιομηχανικών αεριοστροβίλων.

Το βασικό εμπόδιο στην υλοποίηση της τεχνολογίας *micro* – στροβίλων έγκειται στο γεγονός ότι, επί του παρόντος, ο αεριοστροβίλος στην βασική του διάταξη παρουσιάζει μικρότερη απόδοση εν συγκρίσει με μια μηχανή παλινδρόμησης που παρέχει ίση ενέργεια εξόδου. Επιπλέον, η απόδοση των αεριοστροβίλων μειώνεται στη μερική φόρτιση ενώ παράλληλα υπάρχει περίπτωση η χρήση καυσίμων μικρότερης θερμικής αξίας να μην είναι εφικτή, ανάλογα με τον τύπο του στροβίλου. Γενικά, τα συστήματα διανομής ηλεκτρισμού δεν εμφανίζουν την απαραίτητη καταλληλότητα που απαιτεί η εγκατάσταση μεγάλου αριθμού μικρών σταθμών και απαιτούν τροποποίηση, το κόστος της οποίας πρέπει να ληφθεί υπόψη. Τέλος, για να παραχθεί ηλεκτρική ενέργεια στη συχνότητα του δικτύου, απαιτείται ρύθμισή της γεγονός που επιφέρει επιπλέον κόστος στην εγκατάσταση.

Τα τελευταία χρόνια έχει αυξηθεί η χρήση των αεριοστροβίλων στην παραγωγή ενέργειας ενώ προβλέπεται περαιτέρω αύξηση της χρήσης τους, κυρίως στον τομέα των συστημάτων κατανεμημένης ενέργειας. Επίσης, έχει διευρυνθεί η χρήση των συστημάτων συμπαραγωγής λόγω των βελτιώσεων στην απόδοση και των περιβαλλοντικών οφελών, καθώς και λόγω της διαφορετικής πολιτικής που ακολουθείται στο χώρο της ενέργειας με την απελευθέρωση της παραγωγής-αγοράς της και την κατεύθυνση της διεσπαρμένης παραγωγής. Το μέλλον της χρήσης *micro*-στροβίλων για τη συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας έγκειται κυρίως στις συνθήκες της αγοράς και του θεσμικού πλαισίου λειτουργίας τους, καθώς υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα από τη λειτουργία τους.

2.7 Ενεργειακή συμπεριφορά συστημάτων συμπαραγωγής

2.7.1 Δείκτες ενεργειακής συμπεριφοράς

Η ενεργειακή συμπεριφορά συστημάτων συμπαραγωγής περιγράφεται με ορισμένους χαρακτηριστικούς δείκτες. Στους ορισμούς που περιγράφουμε παρακάτω, χρησιμοποιούνται τα εξής σύμβολα:

W : ηλεκτρική ή μηχανική ισχύς,

Q : θερμική ισχύς,

$H_{f\Sigma}$: ισχύς καυσίμου που καταναλώνεται στο σύστημα συμπαραγωγής,

m_f : παροχή καυσίμου,

H_u : κατώτερη θερμογόνοος ικανότητα καυσίμου,

H_{fW} : ισχύς καυσίμου για τη χωριστή παραγωγή ηλεκτρικής ή μηχανικής ισχύος W ,

H_{fQ} : ισχύς καυσίμου για τη χωριστή παραγωγή θερμότητας Q ,

H_{fX} : ολική ισχύς καυσίμου για τη χωριστή παραγωγή των W και Q ,

E_Q : ροή θερμικής εξέργειας που αντιστοιχεί στη θερμική ισχύ Q ,

E_f : ροή εξέργειας καυσίμου,

ε_f : ειδική εξέργεια καυσίμου.

Για τα παραπάνω ισχύουν:

$$H_{f\Sigma} = m_f H_u \quad (2.2)$$

$$H_{fX} = H_{fW} + H_{fQ} = (m_f H_u)_W + (m_f H_u)_Q \quad (2.3)$$

$$E_f = m_f \varepsilon_f \quad (2.4)$$

Στη συνέχεια ορίζουμε τους κυριότερους δείκτες.

Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης, (ή μηχανικός, εάν πρόκειται για παραγωγή μηχανικού έργου):

$$n_e = \frac{W}{H_{f\Sigma}} \quad (2.5)$$

Θερμικός βαθμός απόδοσης:

$$n_h = \frac{Q}{H_{f\Sigma}} \quad (2.6)$$

Ολικός ενεργειακός βαθμός απόδοσης:

$$n = n_e + n_h = \frac{W + Q}{H_{f\Sigma}} \quad (2.7)$$

Ολικός εξεργειακός βαθμός απόδοσης:

$$\zeta = \frac{W + EQ}{E_{f\Sigma}} \quad (2.8)$$

Λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα (Power to Heat ratio):

$$PHR = \frac{W}{Q} \quad (2.9)$$

Λόγος εξοικονόμησης ενέργειας καυσίμου (fuel energy saving ratio):

$$FESR = \frac{H_{fX} - H_{f\Sigma}}{H_{fX}} \quad (2.10)$$

Από τα παραπάνω προκύπτει για τα μεγέθη n_e και PHR ότι:

$$n = n_e \left(1 + \frac{1}{PHR}\right) \quad (2.11)$$

που γράφεται και ως

$$PHR = \frac{n_e}{n - n_e} = \frac{n_e}{n_h} \quad (2.12)$$

Οι παραπάνω σχέσεις βοηθούν στον προσδιορισμό αποδεκτών τιμών του λόγου ηλεκτρισμού προς θερμότητα PHR , όταν η τιμή του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης n_e είναι γνωστή, δεδομένου ότι ο ολικός βαθμός απόδοσης δεν ξεπερνά το 85-88%. Στο Σχήμα 2.6 παρουσιάζονται τα κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων συμπαραγωγής ανά είδος μηχανής.

2.7.2 Τρόποι λειτουργίας συστημάτων συμπαραγωγής

Οι κυριότεροι τρόποι λειτουργίας των συστημάτων συμπαραγωγής, η ρύθμιση δηλαδή της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος κάθε χρονική στιγμή, είναι οι παρακάτω:

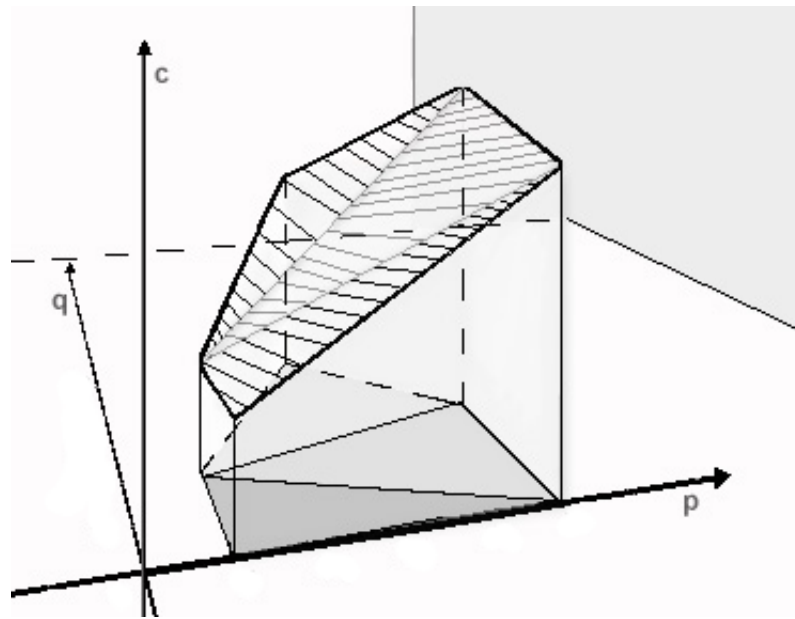
Σύστημα	Ηλεκτ. Ισχύς	Μέση ετήσια διαθεσιμότητα	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης %		Ολικός βαθμός απόδοσης %	Λόγος ηλεκτρισμού προς θερμότητα
	MW		%	Πλήρες φορτίο		
Ατμοστρόβιλου	0,5 - 100*	90 - 95	14 - 30	12 - 25	60 - 85	0,1 - 0,3
Αεριοστρόβιλου ανοικτού κύκλου	0,1 - 100	90 - 95	20 - 35	15 - 29	60 - 80	0,5 - 0,8
Αεριοστρόβιλου κλειτού κύκλου	0,5 - 100	90 - 95	30 - 35	30 - 35	60 - 80	0,5 - 0,8
Συνδυασμένου κύκλου αερίου/ατμοστρόβιλου	4 - 100*	77 - 85	35 - 45	25 - 35	70 - 88	0,6 - 1,1
Κινητήρα Diesel	0,07 - 40	80 - 90	35 - 45	32 - 40	60 - 80	1,2 - 2,4
Πακέτο με παλινδρομικό κινητήρα	0,015 - 2	80 - 85	27 - 35	25 - 32	60 - 80	0,5 - 0,7
Κυψέλες καυσίμου	0,04 - 50	90 - 92	37 - 45	37 - 45	85 - 90	0,8 - 1,0
Μηχανές Stirling	0,003-1,5	85 - 90 (αναμενόμενη)	35 - 50	34 - 49	60 - 80	1,2 - 1,7

(*) Η τιμή των 100 MW είναι το πιο συνηθισμένο άνω όριο σε βιομηχανικές εφαρμογές. Συστήματα του είδους αυτού κατασκευάζονται και με μεγαλύτερες ισχύεις.

Σχήμα 2.6: Κύρια τεχνικά χαρακτηριστικά συστημάτων συμπαραγωγής

- Παραγωγή θερμότητας ίσης με το θερμικό φορτίο (*heat match*). Εάν παράγεται περισσότερη ηλεκτρική ισχύς από το φορτίο, τότε πωλείται η διαφορά στο εθνικό δίκτυο. Εάν παράγεται λιγότερη, τότε το έλλειμμα συμπληρώνεται από το δίκτυο.
- Παραγωγή ηλεκτρισμού ίσου με το ηλεκτρικό φορτίο (*electricity match*). Χρησιμοποιείται βοηθητικός λέβητας για να καλυφθούν οι ανάγκες σε θερμότητα όποτε χρειάζεται, ή ειδικά ψυγεία για την αποβολή περίσσιας θερμότητας.
- *Μεικτός τρόπος*, δηλαδή συνδυασμός των παραπάνω με παρακολούθηση του θερμικού και ηλεκτρικού φορτίου αντίστοιχα.
- *Πλήρης κάλυψη θερμικού και ηλεκτρικού φορτίου* κάθε στιγμή χωρίς σύνδεση στο εθνικό δίκτυο. Σε αυτή την περίπτωση χρειάζεται επαρκής εφεδρεία ισχύος, άρα πιο πολύπλοκο σύστημα συμπαραγωγής που αυξάνει το αρχικό κόστος εγκατάστασης.

Γενικά, χωρίς όμως να λείπουν οι εξαιρέσεις, ο πρώτος από τους τρόπους αυτούς προσφέρει την υψηλότερη ενεργειακή και οικονομική απόδοση για συστήματα στο βιομηχανικό και εμπορικό-κτιριακό τομέα. Για σταθμούς συμπαραγωγής του συστήματος ηλεκτρισμού της χώρας, η επιλογή του τρόπου λειτουργίας, εξαρτάται από τις ευρύτερες ανάγκες του δικτύου, τις διαθέσιμες μονάδες και τις υποχρεώσεις απέναντι στους καταναλωτές ηλεκτρισμού και θερμότητας.



Σχήμα 2.7: Εφικτή περιοχή λειτουργίας μονάδας συμπαραγωγής. (p =ηλ.ισχύς, q =θερμότητα, c =κόστος παραγωγής)

2.8 Μοντέλα λειτουργίας μονάδων συμπαραγωγής

Για την οικονομική λειτουργία των μονάδων συμπαραγωγής απαιτείται η μοντελοποίηση της παραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού, και στη συνέχεια ο σχεδιασμός της λειτουργίας τους με βάση τα αποτελέσματα μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης. Ο μακροπρόθεσμος σχεδιασμός γίνεται κατακερματίζοντας τον χρονικό ορίζοντα σε χιλιάδες ωριαία μοντέλα, όταν πρόκειται για απελευθερωμένη αγορά, και στη συνέχεια υπολογίζεται με ένα νέο μοντέλο η λειτουργία των μονάδων για να καλυπτούν το φορτίο (θερμότητας και ηλεκτρισμού) με οικονομική ένταξη και κατανομή.

Η λειτουργία των μονάδων συμπαραγωγής σε επίπεδο κόστους-ισχύος μοντελοποιείται με βάση τη συνάρτηση κόστους λειτουργίας, οπότε προκύπτει η **εφικτή περιοχή** που συμπεριλαμβάνει όλες τις δυνατές καταστάσεις λειτουργίας της κάθε μονάδας με τα λειτουργικά όρια, όρια ασφάλειας και κόστος. Αντίστοιχα με τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, των οποίων η εφικτή περιοχή είναι δύο διαστάσεων (κόστος-παραγόμενη ηλ. ισχύς), για τις μονάδες συμπαραγωγής προκύπτει εφικτή περιοχή τριών διαστάσεων: κόστος-παραγόμενη ηλ. ισχύς- παραγόμενη θερμότητα. Χαρακτηριστικά στο Σχήμα 2.7 παρουσιάζεται η εφικτή περιοχή λειτουργίας (κυρτή σε αυτή την περίπτωση) μίας μονάδας συμπαραγωγής.

Η πιο συνήθης αναπαράσταση της περιοχής λειτουργίας γίνεται με χρήση κυρτού τετράπλευρου είτε με ένα τμήμα είτε με δύο, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 2.8. Αναφέρεται ότι η αναπαράσταση της εφικτής περιοχής με τετράπλευρο είναι κατάλληλη για μοντελοποίηση λειτουργίας του οποιουδήποτε συστήματος συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, και ιδιαίτερα συστημάτων αεριοστρόβιλων. Επίσης, τα δύο τμήματα δεν θεωρούνται πιο κατάλληλα, συγκρινόμενα με τη χρήση μόνο ενός. Το πιο κοινό μαθηματικό μοντέλο για κάθε γραμμικό περιορισμό που περιγράφει την εφικτή

περιοχή είναι :

$$a \times P + b \times Q \geq c$$

Αυτές οι ανισότητες εισάγονται στο πρόβλημα βελτιστοποίησης ως περιορισμοί.

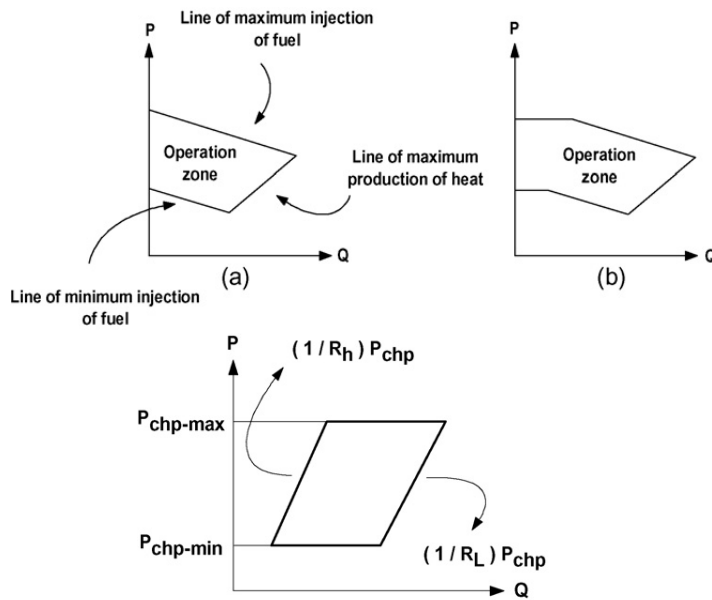
Μία άλλη μέθοδος μοντελοποίησης της κυρτής εφικτής περιοχής είναι με χρήση του λόγου ηλεκτρισμού-προς-θερμότητα, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.8. Σε αυτή την περίπτωση η παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος περιορίζεται από ελάχιστη και μέγιστη χωρητικότητα:

$$P_{chp-min} \leq P_{chp} \leq P_{chp-max}$$

Αντίστοιχα, η παραγωγή θερμότητας περιορίζεται από το μέγιστο και ελάχιστο λόγο ηλεκτρισμού-προς-θερμότητας:

$$Q_{chp} \geq \left(\frac{1}{R_H} \right) \times P_{chp}$$

$$Q_{chp} \leq \left(\frac{1}{R_L} \right) \times P_{chp}$$



Σχήμα 2.8: Μοντέλο εφικτής περιοχής λειτουργίας συστημάτων συμπαραγωγής,α: με ένα ή δύο τμήματα και β: με λόγο ηλεκτρισμού-θερμότητας

Ο κυριότερος παράγοντας κατά την βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη και βελτιστοποίηση λειτουργίας των μονάδων είναι η συνάρτηση κόστους που περιγράφει τη μονάδα. Συνήθως αρκεί η παράσταση του κόστους με χρήση πολυωνυμικής συνάρτησης (δευτέρου ή τρίτου βαθμού):

$$C_{chp}(P_{chp}, Q_{chp}) = a_{chp} + b_{chp}P_{chp} + c_{chp}P_{chp}^2 + d_{chp}Q_{chp} + f_{chp}Q_{chp}^2 + g_{chp}P_{chp}Q_{chp} \quad (2.13)$$

Πιο ειδικά, ανά περίπτωση μονάδας παραγωγής διακρίνουμε:

- Η είσοδος/έξοδος (MBTU/h καυσίμου - T/h ατμού) της ενθαλπίας του λέβητα σε ατμοστρόβιλο μοντελοποιείται με πολυωνυμική συνάρτηση τρίτου βαθμού:

$$H_b(M_b) = a_b + B_b M_b + c_b M_b^2 + d_b M_b^3 \quad (2.14)$$

- Πολυωνυμική συνάρτηση δευτέρου βαθμού χρησιμοποιείται για τον ατμοστρόβιλο αντίθλιψης (T/h ατμός-MW ηλ.ισχύος). Η καταναλισκόμενη ενθαλπία είναι όμοια με το μοντέλο του λέβητα.

$$P_{tg}(M_{tg}) = a_{tg} + b_{tg} M_{tg} + c_{tg} M_{tg}^2 \quad (2.15)$$

και

$$H_{tg}(P_{tg}) = a_g + b_g P_{tg} + c_g P_{tg}^2 + d_g P_{tg}^3$$

- Η συνάρτηση κόστους ατμοστρόβιλου απομάστευσης (T/h μέση πίεση ατμού, T/h εξερχόμενη πίεση ατμού -MW ηλ.ισχύος) περιγράφεται ως εξής:

$$P_{tg}(M_m, M_{ex}) = a_{tg} + b_{tg} M_m + c_{tg} M_{ex} \quad (2.16)$$

- Για την περίπτωση κατανάλωσης διαφορετικών ειδών καυσίμου η μοντελοποίηση γίνεται στη βάση του συντελεστή απόδοσης (n_{fuel}) και του λόγου ανάμειξης καυσίμου (λ_{fuel}) για τη μετατροπή των διαφορετικών συναρτήσεων σε μία. Για παράδειγμα, η καμπύλη της ενθαλπίας για ένα λέβητα με χρήση δύο ειδών καυσίμου περιγράφεται ως εξής:

$$H_{bT}(M_b) = H_b(M_b)(\lambda_{fuel1} + n_{fuel\frac{1}{2}} \lambda_{fuel2}) \quad (2.17)$$

όπου

$$n_{fuel\frac{1}{2}} = \frac{\text{αποδοτικότητα λέβητα με το καύσιμο 1}}{\text{αποδοτικότητα λέβητα με το καύσιμο 2}}$$

$$\lambda_{fuel} = \frac{\text{ενθαλπία καυσίμου}}{\text{συνολική ενθαλπία}}$$

και η συνολική συνάρτηση κόστους (C_T) του παραπάνω λέβητα είναι :

$$C_T(M_b) = H_{bT}(M_b)C \quad (2.18)$$

όπου

$$C = C_{fuel1} \lambda_{fuel1} + C_{fuel2} \lambda_{fuel2}$$

Για τις περιπτώσεις όπου το μοντέλο της μονάδας χρειάζεται μη-κυρτή (non-convex) βελτιστοποίηση, που μπορεί να είναι απαραίτητο για την επίλυση προβλημάτων οικονομικής κατανομής ή/και προγραμματισμού παραγωγής, τότε μοντελοποιούμε τη μονάδα συμπαραγωγής αναπαριστώντας την λειτουργία ως έναν κυρτό συνδυασμό από N_p ακραία σημεία (c_i, p_i, q_i) με βάση την εφικτή περιοχή:

$$C_{chp} = \sum_{i=1}^{N_p} c_i x_i \quad P_{chp} = \sum_{i=1}^{N_p} p_i x_i$$

$$Q_{chp} = \sum_{i=1}^{N_p} q_i x_i$$

2003										
ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΗΘ										
Κατηγορία τεχνολογίας	Ηλεκτροπαραγωγή (GWh)			Αποδεδειγμένη Θερμότητα ΣΗΘ (TJ)	Καύσιμο για Θερμότητα ΣΗΘ και μικτή ηλεκτρική ενέργεια (TJ)	Πλήθος μονάδων ΣΗΘ	Αυτοπαραγωγός	Μέγιστη ισχύς Θερμική		
	Μικτή (ΣΗΘ)	Μικτή	ΣΗΘ					Μικτή (MWe)	ΣΗΘ (MWe)	Καθαρή (MWh)
Συνδυασμένος κύκλος		391,76	353,72	1799,61	4081,28	2	ΝΑΙ (2/2)	66,50	59,20	62,67
ΜΕΚ	8,54	36,06	29,82	148,27	456,59	6	ΝΑΙ (3/6)	11,96		15,90
Αεριοστρόβιλος με ανάκτηση θερμότητας	31,70	313,62	263,48	2050,33	4499,82	5	ΝΑΙ (5/5)	53,93	46,04	83,05
Ατμοστρόβιλος αντίθλιψης	132,66			3380,27	4338,35	15	ΝΑΙ (14/15)	79,84	79,84	334,81
Ατμοστρόβιλος συμπίκνωσης		5291,75	147,55	1379,75	51335,02	4	ΟΧΙ	1120,00	33,55	260,00
Σύνολο								218,63	756,43	
ΑΝΑΛΥΤΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΤΗΣ ΣΗΘ										
Για $\eta > 75\%$										
Σύνολο	172,90			3689,27	4883,25	18	—	86,77	86,77	348,76
Εκ των οποίων αυτοπαραγωγή	143,56			3138,97	4174,34	17	—	76,77	76,77	292,76
Για $\eta < 75\%$										
Σύνολο		6033,19	794,57	5068,96	59827,81	14	—	1245,46	142,13	407,67
Εκ των οποίων αυτοπαραγωγή		715,51	647,02	3605,61	8239,79	7	—	118,32	102,38	138,07
Συνολική Παρουσίαση										
Σύνολο		6206,09	967,47	8758,23	64711,06	32	—	1332,23	228,90	756,43
Εκ των οποίων αυτοπαραγωγή		859,07	790,58	6744,58	12414,12	24	—	195,09	179,15	430,83

Σχήμα 2.9: Αναλυτικά στοιχεία εγκατεστημένων συστημάτων συμπαραγωγής στην Ελλάδα το 2003

όπου

$$\sum_{i=1}^{N_p} x_i = 1 \quad x_i \geq 0$$

Όπως φαίνεται στις παραπάνω σχέσεις, θεωρείται ότι η εφικτή περιοχή είναι κυρτή και το κόστος λειτουργίας της μονάδας είναι κυρτή συνάρτηση της παραγωγής θερμότητας (Q) και ηλεκτρικής ισχύος (P). Όταν η εφικτή περιοχή λειτουργίας είναι μη-κυρτή το ίδιο μοντέλο μπορεί να εφαρμοστεί, με την προϋπόθεση ότι η περιοχή λειτουργίας χωρίζεται σε κυρτές ζώνες.

Κεφάλαιο 3

Οικονομική κατανομή φορτίου

3.1 Εισαγωγή

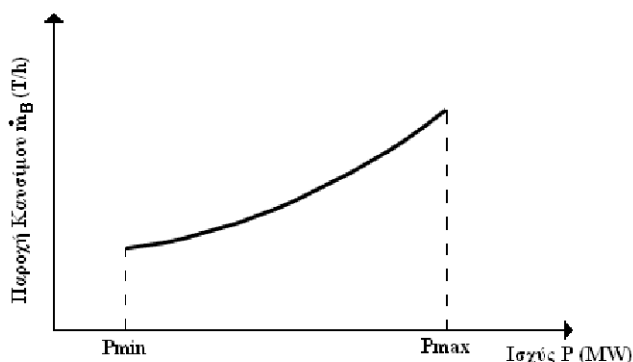
Ένα ζητούμενο φορτίο κατανάλωσης είναι δυνατόν να τροφοδοτηθεί από ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με πολλούς τρόπους. Ο καλύτερος τρόπος τροφοδότησης (βέλτιστος) είναι αυτός που παρέχει την οικονομικότερη λειτουργία του συστήματος. Το κριτήριο της βέλτιστης λειτουργίας είναι οικονομικό (πλέον υπεισέρχονται και άλλα κριτήρια, όπως π.χ. περιβαλλοντικά). Ο στόχος είναι η ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής, με τη χρησιμοποίηση του καταλληλότερου καυσίμου και κόστους μεταφοράς με τη μείωση των απωλειών του δικτύου.

Η βέλτιστη λειτουργία του συστήματος σε κάθε περίπτωση για κάθε φορτίο αποτελεί το πρόβλημα της **οικονομικής κατανομής φορτίου** η οποία βασίζεται στα παρακάτω:

1. Ακριβή πρόβλεψη φορτίου, αφενός βραχυπρόθεσμα, αφετέρου μακροπρόθεσμα.
2. Οικονομικό προγραμματισμό γεννητριών (προγραμματισμό ένταξης μονάδων στο σύστημα).
3. Οικονομική φόρτιση μονάδων σε λειτουργία (οικονομική λειτουργία συστήματος).

Με βραχυπρόθεσμη φόρτιση εννοούμε την πρόβλεψη του φορτίου του συστήματος κάθε ώρα για κάθε συγκεκριμένη μέρα (day-ahead). Στη μακροπρόθεση πρόβλεψη υπολογίζονται οι πιθανότερες ετήσιες ή εποχιακές αιχμές φορτίου σε μακροχρόνια κλίμακα για το σχεδιασμό του συστήματος. Με την ένταξη των μονάδων αναφερόμαστε στον καθορισμό και τη χρησιμοποίηση του βέλτιστου συνδυασμού γεννητριών για την εξυπηρέτηση της ωριαίας ζήτησης φορτίου. Η οικονομική λειτουργία του συστήματος αναφέρεται στη βελτιστοποίηση της φόρτισης της κάθε μονάδας ενός δεδομένου συνδυασμού μονάδων σε λειτουργία.

Για να γίνει η σωστή ένταξη των μονάδων σε λειτουργία χρειάζεται μια όσο το δυνατόν πιο ακριβής πρόβλεψη της ζήτησης φορτίου, διαφορετικά δε θα λειτουργεί το σύστημα στην πιο οικονομική κατάσταση, γεγονός που αποφέρει μεγαλύτερο κόστος. Παράλληλα, αν η πρόβλεψη της ζήτησης δεν είναι ορθή, θα υπάρχουν επιπτώσεις στην αξιοπιστία και την ασφάλεια του συστήματος και κατανάλωση περισσότερου καυσίμου με δυσμενότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η προμήθεια του καυσίμου απαιτεί *μακροπρόθεσμο* προγραμματισμό (ανθρακωρυχεία), *μεσοπρόθεσμο* (πυρηνικό καύσιμο), ή *βραχυπρόθεσμο* (ετήσιος προγραμματισμός).



Σχήμα 3.1: Ωριαία κατανάλωση καυσίμου

Το πρόβλημα της οικονομικής εκμετάλλευσης του συστήματος, όταν αυτό περιλαμβάνει πολλών ειδών μονάδες παραγωγής, και ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια με τη διεύθυνση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διανεμημένης παραγωγής, σε συνδυασμό με υδροηλεκτρικούς, θερμικούς και πυρηνικούς σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς και διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, αποτελεί ιδιαίτερα πολύπλοκο πρόβλημα που χρίζει εκτενούς μελέτης.

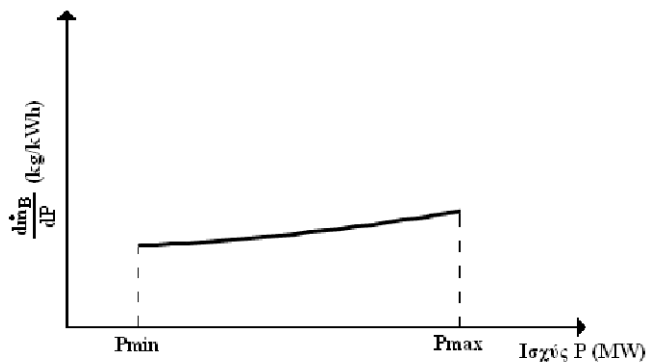
Συνεπώς, το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου σε ένα αυτόνομο σύστημα ενέργειας έγκειται στην εξυπηρέτηση της ζήτησης με το ελάχιστο δυνατό συνολικό κόστος καυσίμου, γεγονός που συμβάλλει στην επίτευξη ελάχιστου κόστους παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Στην ελαχιστοποίηση του κόστους σημαντικό ρόλο παίζουν οι εξής παράγοντες:

- Η λειτουργική απόδοση των μονάδων.
- Το κόστος καυσίμου.
- Οι απώλειες του δικτύου μεταφοράς.

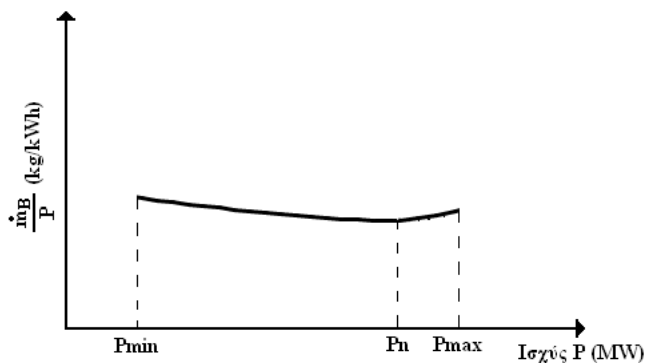
3.2 Χαρακτηριστικές καμπύλες-όρια μονάδων παραγωγής

Στην ανάλυση της οικονομικής λειτουργίας των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιούνται συγκεκριμένες καμπύλες εισόδου-εξόδου. Από αυτές θα σταθούμε στις παρακάτω, που εκφράζουν τη λειτουργία της κάθε μονάδας:

- Η καμπύλη **ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου**. Εκφράζει την παροχή καυσίμου ως συνάρτηση της καθαρής ισχύος εξόδου της μονάδας σε MW, μετράται σε (T/h) ή σε (m^3/h) αν το καύσιμο είναι ντίζελ ή φυσικό αέριο, αντίστοιχα. Σχήμα 3.1.
- Η καμπύλη **διαφορικής κατανάλωσης καυσίμου**. Προκύπτει από την παράγωγο της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου και εκφράζει την αύξηση στην παροχή του καυσίμου σε (kg/h) που απαιτείται για την αύξηση της καθαρής ισχύος εξόδου της μονάδας κατά 1kW. Σχήμα 3.2.



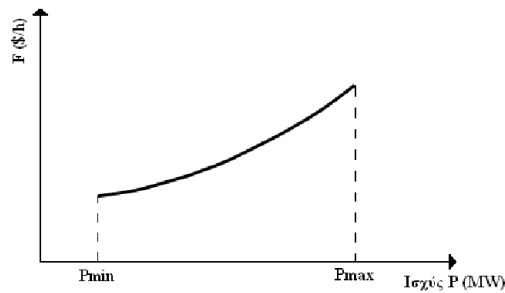
Σχήμα 3.2: Διαφορική κατανάλωση καυσίμου



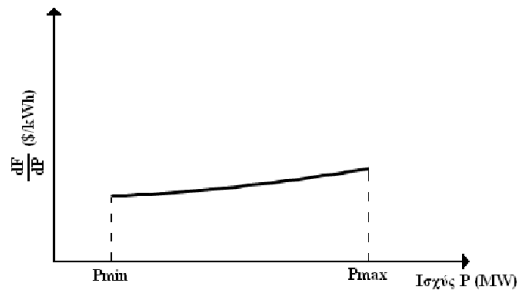
γ) Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου

Σχήμα 3.3: Ειδική κατανάλωση καυσίμου

- Η καμπύλη **ειδικής κατανάλωσης καυσίμου**. Μετράται σε (kg/kWh) και εκφράζει το λόγο της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου προς την καθαρή έξοδο της μονάδας συναρτήσει της παραγόμενης ισχύος εξόδου. Σχήμα 3.3.
- Η καμπύλη **ωριαίας κόστους λειτουργίας**. Εκφράζει το ωριαίο κόστος λειτουργίας σε $(€/h)$ συναρτήσει της ισχύος εξόδου σε MW και προκύπτει από τον πολλαπλασιασμό της ωριαίας κατανάλωσης καυσίμου με την τιμή του καυσίμου σε $(€/T)$. Στις οικονομικές μελέτες εκφράζεται συνήθως ως πολυωνυμική ή τμηματικά γραμμική κυρτή καμπύλη στο διάστημα $[P_{min}, P_{max}]$. Σχήμα 3.4.
- Η καμπύλη **διαφορικού κόστους λειτουργίας**. Προκύπτει από την παράγωγο του ωριαίου κόστους λειτουργίας συναρτήσει της ισχύος εξόδου της μονάδας. Εκφράζει την αύξηση του ωριαίου κόστους λειτουργίας σε $(€/h)$ που απαιτείται για την αύξηση της καθαρής ισχύος εξόδου της μονάδας κατά $1kW$, δηλαδή την αύξηση στο κόστος παραγωγής σε $(€)$ που προέρχεται από την παραγωγή μίας πρόσθετης kWh από τη μονάδα. Συνήθως είναι αύξουσα πολυωνυμική, τμηματικά γραμμική ή βαθμωτή συνάρτηση της ισχύος εξόδου στις οικονομικές μελέτες



Σχήμα 3.4: Ωριαίο κόστος λειτουργίας



Σχήμα 3.5: Διαφορικό κόστος λειτουργίας

του συστήματος, Σχήμα 3.5.

- Η καμπύλη **ειδικού κόστους λειτουργίας**. Είναι ο λόγος του ωριαίου κόστους λειτουργίας σε ($\$/h$) προς την ισχύ εξόδου σε (MW). Εκφράζει την τιμή παραγωγής της kWh σε ($\$/kWh$) από τη μονάδα. Σχήμα 3.6

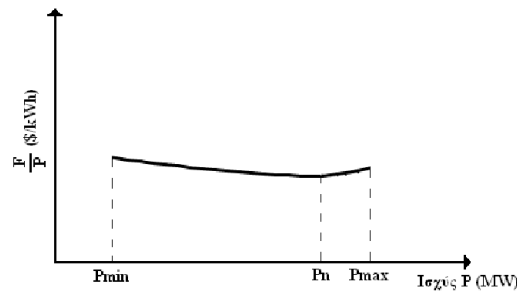
Οι μονάδες παραγωγής λειτουργούν αντικοινωνικά σε χαμηλά φορτία, έχουν δηλαδή μεγάλο ειδικό κόστος, ενώ λειτουργούν οικονομικά παράγοντας ισχύ κοντά στην ονομαστική τους τιμή (μικρό ειδικό κόστος).

Ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας με σταθερή συχνότητα λέγεται ότι λειτουργεί σε κατάσταση «ισορροπίας ισχύος» εάν η συνολική παραγόμενη ενεργός ισχύς είναι ίση με το φορτίο, περιλαμβάνοντας τις διασυνδέσεις με άλλα συστήματα, συν τις συνολικές απώλειες μεταφοράς. Σε μορφή εξίσωσης:

$$P_G = P_L + P_{TL} \quad (3.1)$$

όπου

- P_{Gi} : ηλεκτρική ισχύς εξόδου της i -οστής μονάδας σε ανά μονάδα τιμές.
- n : το σύνολο των μονάδων παραγωγής που λειτουργούν στο σύστημα.
- P_L : το συνολικό φορτίο του συστήματος, συμπεριλαμβανομένων των διασυνδέσεων, σε α.μ. τιμές.
- P_{TL} : οι συνολικές απώλειες μεταφοράς ισχύος, σε α.μ. τιμές.



Σχήμα 3.6: Ειδικό κόστος λειτουργίας

Αν και η εξίσωση 3.7 προβλέπει τη σωστή τιμή της συνολικής ισχύος P_G που απαιτείται για να καλύψει τη ζήτηση της περιοχής και τις διασυνδέσεις, ωστόσο δεν παρέχει καμία πληροφόρηση για τον τρόπο που διαμοιράζεται η ισχύς στις n μονάδες που λειτουργούν. Αρχικά, θεωρούμε ότι όλες οι μονάδες είναι διαθέσιμες να καλύψουν το φορτίο. Σε συνθήκες μη-αιχμής, δεν είναι αναγκαίο να βρίσκονται όλες οι μονάδες σε λειτουργία (on-line). Ωστόσο, για την εκκίνηση και παύση θερμικών μονάδων από το σύστημα υπεισέρχεται το κόστος εκκίνησης και παύσης αντίστοιχα, (start-up, shut-down cost). Επίσης, εάν μία μονάδα είναι εκτός λειτουργίας, μπορεί να απαιτούνται 8 ώρες ή και περισσότερο για να συνδεθεί στο δίκτυο. Κάποιες μονάδες μπορεί να είναι εκτός λειτουργίας λόγω συντήρησης ή λόγω βλάβης. Έτσι είναι απαραίτητο να διατηρούνται περισσότερες μονάδες σε λειτουργία από όσες απαιτούνται, ώστε να μπορεί να καλυφθεί η ζήτηση φορτίου σε περίπτωση κάποιας βλάβης, βραχυκυκλώματος κ.ο.κ (εφεδρεία συστήματος). Το πρόβλημα ένταξης μονάδων (*unit commitment*) περιλαμβάνει τον προγραμματισμό της λειτουργίας των μονάδων έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος (συμπεριλαμβάνοντας το κόστος εκκίνησης-παύσης των μονάδων) χωρίς να υπάρχει το ρίσκο της ασφάλειας του συστήματος.

Ένας βασικός περιορισμός που λαμβάνεται υπόψη για κάθε μονάδα είναι:

$$P_{min_i} \leq P_{G_i} \leq P_{max_i}$$

Το άνω όριο σχετίζεται με το όριο του στροβίλου της γεννήτριας, στη μέγιστη ισχύ που μπορεί να παράγει. Το κάτω όριο προκαλείται από θερμικούς περιορισμούς στη λειτουργία του λέβητα-ατμοπαραγωγού για τις θερμικές μονάδες και όταν αυτές τίθενται σε σύνδεση στο δίκτυο, η παραγόμενη ισχύς πρέπει να βρίσκεται άνω του κατώτατου ορίου για να καλύπτουν τις προϋποθέσεις ευστάθειας του συστήματος.

Καλύπτοντας αυτούς τους περιορισμούς, υπάρχουν άπειροι συνδυασμοί παραγόμενης ισχύος από τις μονάδες. Έτσι πρέπει να υπολογιστεί ο βέλτιστος συνδυασμός, με τη διαδικασία που παρουσιάζουμε στις παρακάτω ενότητες.

3.3 Η απλούστερη μορφή του προβλήματος Οικονομικής Κατανομής Φορτίου

Το κόστος λειτουργίας των μονάδων παραγωγής εξαρτάται από τον τύπο του καυσίμου που καταναλώνεται (πετρέλαιο, φυσικό αέριο, άνθρακας, λιγνίτης), από τις εθνικές και διεθνείς συνθήκες οικονομίας, πολιτική κατάσταση και άλλους παράγοντες, συ-

νεπώς είναι πολύπλοκη σχέση. Η συνάρτηση που περιγράφει εμπειρικά το κόστος των θερμικών μονάδων έχει οριστεί με χρήση πολυωνύμου υψηλού βαθμού. Για τις ανάγκες τις διπλωματικής θα θεωρήσουμε δευτέρου βαθμού της μορφής:

$$C_i = a_i P_{G_i}^2 + b_i P_{G_i} + c_i \quad (3.2)$$

όπου

i : i -οστή μονάδα παραγωγής από τις n .

C_i : λειτουργικό κόστος της i -οστής μονάδας σε (€/h).

P_{G_i} : η συνολική παραγωγή ενεργού ισχύος της i -οστής μονάδας Αντίστοιχα σε α.μ. τιμές.

a_i, b_i, c_i : οι συντελεστές σε (€/h).

πολώνυμα εκφράζουν το κόστος κάθε μονάδας παραγωγής, συνεπώς το συνολικό λειτουργικό κόστος είναι:

$$C_{total} = \sum_{i=1}^n C_i \quad \text{σε μονάδες (€/h)}. \quad (3.3)$$

Η συνολική παραγωγή που απαιτείται είναι:

$$P_G = P_L + P_{TL} \quad (3.4)$$

όπου,

$$P_G = \sum_{i=1}^n P_{G_i} = \eta \text{ συνολική παραγωγή} \quad (3.5)$$

και P_L το συνολικό φορτίο του συστήματος, και P_{TL} οι συνολικές απώλειες μεταφοράς.

Έτσι το πρόβλημα ουσιαστικά έγκειται στον υπολογισμό των $n - P_{G_i}$ υπό τους περιορισμούς, έτσι ώστε να ελαχιστοποιείται το κόστος παραγωγής.

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης ορίζεται ως εξής.

Σκοπός είναι η ελαχιστοποίηση (μεγιστοποίηση) μίας γνωστής αντικειμενικής συνάρτησης με σωστό χειρισμό ενός συνόλου μεταβλητών απόφασης, που υπόκειται σε μία ή περισσότερες συναρτήσεις ή περιορισμούς.

Αντικειμενική συνάρτηση: $F(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Μεταβλητές απόφασης: x_1, x_2, \dots, x_n

m εξισώσεις περιορισμού: $G_1(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$

⋮

⋮

⋮

$G_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$

Ένας γενικός τρόπος επίλυσης είναι με τους πολλαπλασιαστές Lagrange. Η διαδικασία είναι η εξής:

1. Διαμόρφωση της Lagrangian εξίσωσης

$$\mathcal{L} = F(x_1, x_2, \dots, x_n) - \lambda G(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

όπου λ άγνωστη σταθερά.

2. Διαμόρφωση των n μερικών παραγώγων

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_1} = \frac{\partial F(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} - \lambda \frac{\partial G(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_1} = 0$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_2} = \frac{\partial F(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_2} - \lambda \frac{\partial G(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_2} = 0$$

⋮

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_n} = \frac{\partial F(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n} - \lambda \frac{\partial G(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_n} = 0$$

3. Ταυτόχρονη επίλυση για όλες τις $n + 1$ μεταβλητές (x_1, x_2, \dots, x_n και λ) από τις σχέσεις των n μερικών παραγώγων και της $G_m(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$.
4. Επιβεβαίωση ότι στο βήμα 3 προσεγγίζεται η επιθυμητή λύση (τοπικό μέγιστο, ελάχιστο).

Η μερική παράγωγος ως προς τον πολλαπλασιαστή λ δίνει τον εξισωτικό περιορισμό, ενώ οι μερικές παράγωγοι ως προς τις μεταβλητές απόφασης δίνουν:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial x_i} = \frac{\partial F(x_i)}{\partial x_i} - \lambda = 0 \quad i = 1, \dots, n \quad (3.6)$$

Διαπιστώνουμε ότι η απαραίτητη συνθήκη για την ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους λειτουργίας είναι η εξής: Όλες οι θερμικές μονάδες του συστήματος πρέπει να λειτουργούν με το ίδιο διαφορικό κόστος λειτουργίας (€/kWh), ίσο με τον πολλαπλασιαστή LaGrange, λ . Οι εξισώσεις 3.6, που ονομάζονται εξισώσεις συνεργασίας, μαζί με την εξίσωση διατήρησης ισχύος από τον εξισωτικό περιορισμό χρησιμοποιούνται για την επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου.

3.3.1 Γραφική επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου.

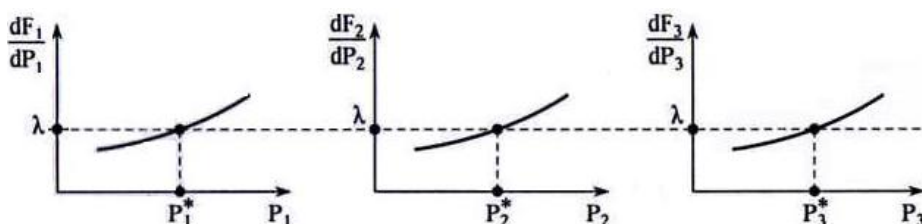
Στη γενική περίπτωση, που το διαφορικό κόστος λειτουργίας των μονάδων δεν είναι γραμμική συνάρτηση της εξόδου, μπορεί να γίνει γραφική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας 3.6, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.7.

Για τα διαγράμματα του διαφορικού κόστους λειτουργίας όλων των μονάδων επιλέγεται αρχικά μια τυχαία τιμή για το κοινό διαφορικό κόστος λειτουργίας όλων των μονάδων, λ . Από την τομή των καμπυλών διαφορικού κόστους λειτουργίας με την οριζόντια γραμμή που διέρχεται από την τιμή λ υπολογίζονται οι έξοδοι των μονάδων P_1, \dots, P_n . Σε περίπτωση που οι έξοδοι των μονάδων ικανοποιούν την εξίσωση διατήρησης ισχύος μέσα στα πλαίσια κάποιας ανοχής ϵ , δηλαδή αν ισχύει

$$\left| P_D - \sum_{i=1}^n P_i \right| < \epsilon, \quad (\text{όπου } P_D \text{ η συνολική ζήτηση})$$

τότε έχει λυθεί το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου διότι:

1. όλες οι μονάδες λειτουργούν με το ίδιο διαφορικό κόστος και



Σχήμα 3.7: Σχηματική επίλυση εξισώσεων συνεργασίας

2. ικανοποιείται ο περιορισμός διατήρησης ισχύος στο δίκτυο.

Αντίθετα, αν ισχύει $\left| P_D - \sum_{i=1}^n P_i \right| > \epsilon$, τότε διακρίνουμε δύο περιπτώσεις:

1. Αν $\sum_{i=0}^n P_i > P_D$, τότε σε αυτή την περίπτωση πρέπει να μειωθεί η παραγωγή για να ικανοποιηθεί η εξίσωση διατήρησης ισχύος. Επιλέγεται ένα νέο λ μικρότερο από το αρχικό.
2. Αν $\sum_{i=0}^n P_i < P_D$, τότε πρέπει να αυξηθεί η παραγωγή για να ικανοποιηθεί η εξίσωση διατήρησης ισχύος. Επιλέγεται ένα νέο λ μεγαλύτερο από το αρχικό.

Έτσι, μετά από ορισμένες επαναλήψεις, επιτυγχάνεται η γραφική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας.

3.4 Οικονομική κατανομή φορτίου με λειτουργικά όρια

Μια πιο ρεαλιστική αντιμετώπιση της οικονομικής κατανομής φορτίου λαμβάνει υπόψη και τα όρια λειτουργίας των μονάδων του συστήματος. Στην περίπτωση αυτή, η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος είναι:

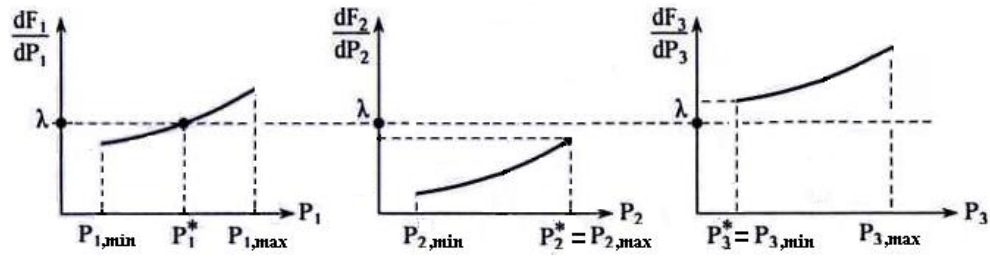
$$\text{Min}F(P_1, P_2, \dots, P_n) = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_n(P_n) = \sum_{i=0}^n F_i(P_i) \quad (3.7)$$

$$\text{Μ.Π.: } \Phi = P_D - \sum_{i=0}^n P_i = 0 \quad (3.8)$$

$$P_{i,\min} \leq P_i \leq P_{i,\max} \quad i = 1, \dots, n \quad (3.9)$$

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της αντικειμενικής συνάρτησης (εξίσωση 3.7) υπό τον εξισωτικό περιορισμό (εξίσωση 3.8) και τους ανισωτικούς περιορισμούς (εξίσωση 3.9) μπορεί να επιλυθεί με την εφαρμογή των συνθηκών Kuhn-Tucker. Μετά από πράξεις, οι συνθήκες Kuhn-Tucker δίνουν τις παρακάτω απαραίτητες συνθήκες βελτίστου:

$$\begin{aligned} \frac{dF_i}{dP_i} &= \lambda & P_{i,\min} &\leq P_i \leq P_{i,\max} \\ \frac{dF_i}{dP_i} &< \lambda & P_i &= P_{i,\min} \\ \frac{dF_i}{dP_i} &> \lambda & P_i &= P_{i,\max} \end{aligned} \quad (3.10)$$



Σχήμα 3.8: Σχηματική επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας με λειτουργικούς περιορισμούς

$$\sum_{i=0}^n P_i = P_D \quad (3.11)$$

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad (3.12)$$

Παρακάτω δίνεται μια γραφική αιτιολόγηση των συνθηκών βελτίστου (εξίσωση 3.11) με τη βοήθεια του σχήματος 3.8. Στο σχήμα αυτό έχει υπολογισθεί η βέλτιστη τιμή λ^* που ικανοποιεί τις συνθήκες βελτίστου (εξισώσεις 3.11, 3.11, 3.12).

Συγκεκριμένα, ικανοποιείται η εξίσωση διατήρησης ισχύος:

$$P_1^* + P_2^* + P_3^* = P_1^* + P_{2,max} + P_{3,min}$$

επιπλέον ικανοποιούνται τα λειτουργικά όρια των μονάδων (εξίσωση 3.12) και οι σχέσεις 3.11.

Η μονάδα 1, της οποίας το σημείο λειτουργίας βρίσκεται αυστηρά ανάμεσα στο κάτω και στο πάνω όριο λειτουργίας ($P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max}$), λειτουργεί με διαφορεικό κόστος $\frac{dF_1}{dP_1} = \lambda$

Η μονάδα 2 είναι πολύ πιο οικονομική σε σχέση με τις άλλες δυο. Η καμπύλη διαφορικού κόστους της μονάδας αυτής βρίσκεται ολόκληρη κάτω από την οριζόντια γραμμή που περνά από το λ . Ως εκ τούτου συμφέρει να λειτουργήσει η μονάδα 2 στο ανώτατο όριο της, $P_2^* = P_{2,max}$. Στο σημείο αυτό το διαφορικό κόστος λειτουργίας της είναι μικρότερο του λ , δηλαδή $\frac{dF_2}{dP_2} < \lambda$, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.8.

Αντίθετα, η μονάδα 3 είναι αρκετά δαπανηρή, αφού η καμπύλη διαφορικού κόστους λειτουργίας της βρίσκεται ολόκληρη πάνω από την οριζόντια γραμμή που περνά από το λ . Γι' αυτό τη λειτουργούμε στο κατώτατο όριο της, $P_3^* = P_{3,min}$. Στο σημείο αυτό το διαφορικό κόστος λειτουργίας της είναι μεγαλύτερο του λ , δηλαδή $\frac{dF_3}{dP_3} > \lambda$.

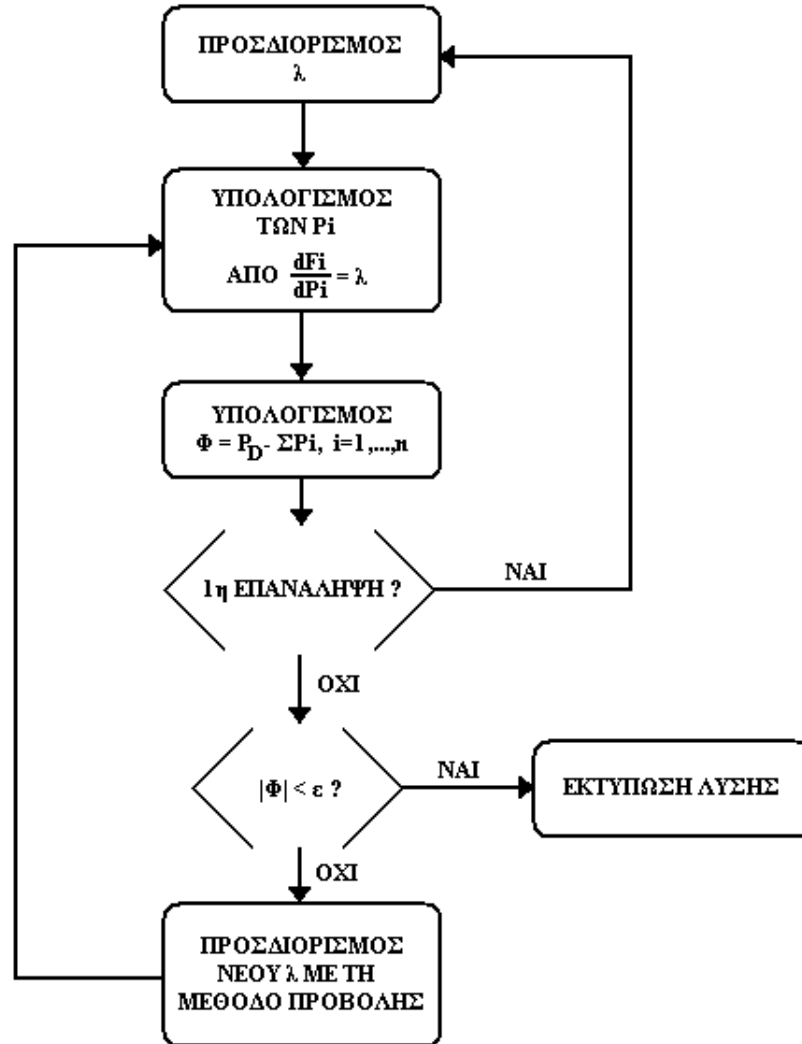
3.5 Αλγόριθμος επαναλήψεων Λάμδα

Η επίλυση του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου σε Η/Υ γίνεται με τη μέθοδο επαναλήψεων λάμδα. Ο αλγόριθμος δίνεται στο σχήμα 3.9.

Υποθέτοντας μια αρχική τιμή για τον πολλαπλασιαστή λ , υπολογίζονται όλες οι παραγόμενες ισχύεις των μονάδων P_i από τη λύση της εξίσωσης 3.6, $\frac{dF_i}{dP_i} = \lambda$.

Στη συνέχεια ξεκινούν οι επαναλήψεις. Κατά την πρώτη επανάληψη, η επιλογή της νέας τιμής του λ γίνεται

- με αύξηση, όταν η συνολική παραγωγή των μονάδων δεν καλύπτει τη ζήτηση του φορτίου, δηλαδή $P_D > \sum_{i=1}^n P_i$ ή



Σχήμα 3.9: Αλγόριθμος επαναλήψεων λάμδα

- με μείωση, όταν η συνολική παραγωγή των μονάδων είναι μεγαλύτερη από αυτή που απαιτείται για την κάλυψη της ζήτησης, δηλαδή $P_D < \sum_{i=1}^n P_i$.

Έτσι χρησιμοποιώντας τη μέθοδο των προβολών, το νέο λ υπολογίζεται κάθε φορά από τη σχέση:

$$\lambda^{k+1} = \lambda^k - \frac{\lambda^k - \lambda^{k-1}}{\Phi(\lambda^k) - \Phi(\lambda^{k-1})} \Phi(\lambda^k) \quad (3.13)$$

Δεδομένου του νέου λ , υπολογίζονται όλα τα νέα P_i και εξετάζεται ικανοποιείται η εξίσωση διατήρησης ισχύος $\Phi = P_D - \sum_{i=1}^n P_i = 0$ εντός κάποιων ορίων ανοχής ϵ .

Στην περίπτωση που ικανοποιείται και ταυτόχρονα ικανοποιούνται και τα όρια λειτουργίας, εκτυπώνονται τα αποτελέσματα που είναι οι ισχείς εξόδου όλων των μονάδων καθώς και ο πολλαπλασιαστής LaGrange, λ , που είναι το κοινό διαφορικό κόστος λειτουργίας όλων των μονάδων που λειτουργούν αυστηρά μεταξύ των ορίων λειτουργίας τους. Το λ εκφράζει το κόστος παραγωγής μιας πρόσθετης kWh από το σύστημα. Αντιθέτως, στην περίπτωση που δεν ικανοποιείται η εξίσωση διατήρησης ισχύος, υπολογίζεται μια νέα τιμή για το λ με χρήση της σχέσης 3.13 και οι επαναλήψεις συνεχίζονται μέχρι να συγκλίνει ο αλγόριθμος.

Τέλος, γίνεται έλεγχος των ορίων λειτουργίας των μονάδων. Αν οι ισχείς εξόδου όλων των μονάδων βρίσκονται εντός ορίων η διαδικασία τερματίζεται με τελικές τιμές παραγόμενης ισχύος τις ήδη υπολογισμένες. Διαφορετικά, αν για κάποιες μονάδες προκύψει $P_i > P_{i,max}$ ή $P_i < P_{i,min}$, θεωρούμε ότι αυτές λειτουργούν στο ανώτατο ή κατώτατο όριο λειτουργίας τους, δηλαδή $P_i = P_{i,max}$ ή $P_i = P_{i,min}$, αντίστοιχα. Έπειτα, με τις απομένουσες μονάδες, δηλαδή αυτές που δεν έφθασαν ακόμη στην οριακή τους φόρτιση, επαναλαμβάνεται από την αρχή ο αλγόριθμος.

3.6 Οικονομική κατανομή φορτίου με απώλειες μεταφοράς

Μέχρι στιγμής κατά τη διατύπωση του προβλήματος της οικονομικής κατανομής φορτίου αμελήθηκαν οι απώλειες του συστήματος μεταφοράς. Είναι γνωστό ότι, κατά τη μεταφορά της ηλεκτρικής ισχύος, υπάρχουν απώλειες που οφείλονται κυρίως στην ωμική αντίσταση των γραμμών. Άλλες απώλειες στο δίκτυο μεταφοράς είναι αυτές λόγω του φαινομένου Corona των γραμμών και λόγω χαλκού και σιδήρου των μετασχηματιστών.

Σε περίπτωση που ληφθούν υπόψη και οι απώλειες του δικτύου το πρόβλημα της οικονομικής κατανομής φορτίου γίνεται πιο σύνθετο, εξαιτίας της συνάρτησης απωλειών που συμμετέχει στο ισοζύγιο της ισχύος. Η εξίσωση διατήρησης ισχύος εκφράζει πλέον το γεγονός ότι η συνολική παραγωγή πρέπει να ισούται με το φορτίο συν τις απώλειες μεταφοράς.

Στην περίπτωση αυτή, το πρόβλημα συνίσταται στην ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους καυσίμου και διατυπώνεται μαθηματικά ως εξής:

$$\text{Min}F_T(P_1, \dots, P_n) = F_1(P_1) + F_2(P_2) + \dots + F_n(P_n) = \sum_{i=1}^n F_i(P_i) \quad (3.14)$$

$$\text{Μ.Π.} : \Phi = P_D + P_L(P_1, P_2, \dots, P_n) - \sum_{i=1}^n P_i = 0 \quad (3.15)$$

$$P_{i,min} \leq P_i \leq P_{i,max} \quad i = 1, \dots, n \quad (3.16)$$

3.6.1 Εξίσωση απωλειών με τη μέθοδο των Β-συντελεστών

Το πρόβλημα, πλέον, έγκειται στον προσδιορισμό της εξίσωσης των απωλειών συναρτήσει των ισχύων των μονάδων παραγωγής, $P_L(P_1 \dots P_n)$. Οι απώλειες εκφράζονται συναρτήσει των συντελεστών απωλειών ή συντελεστών Β του δικτύου και των ισχύων από εξισώσεις της μορφής:

$$P_L = [P]^T [B] [P] + [P]^T [B]_0 + B_{00} \quad (3.19)$$

όπου:

- $[P]$: το διάνυσμα εξόδου όλων των γεννητριών διάστασης $n \times 1$
- $[B]$: τετραγωνικός πίνακας $n \times n$
- $[B]_0$: διάνυσμα διάστασης $n \times 1$
- B_{00} : σταθερά

Η εξίσωση απωλειών 3.19 γράφεται σε πιο γενική μορφή και ως:

$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_i P_i + B_{00} \quad (3.20)$$

Έτσι η εξίσωση διατήρησης ισχύος, με βάση την 3.20, γίνεται:

$$\Phi = P_D + \left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^n B_i P_i + B_{00} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \quad (3.21)$$

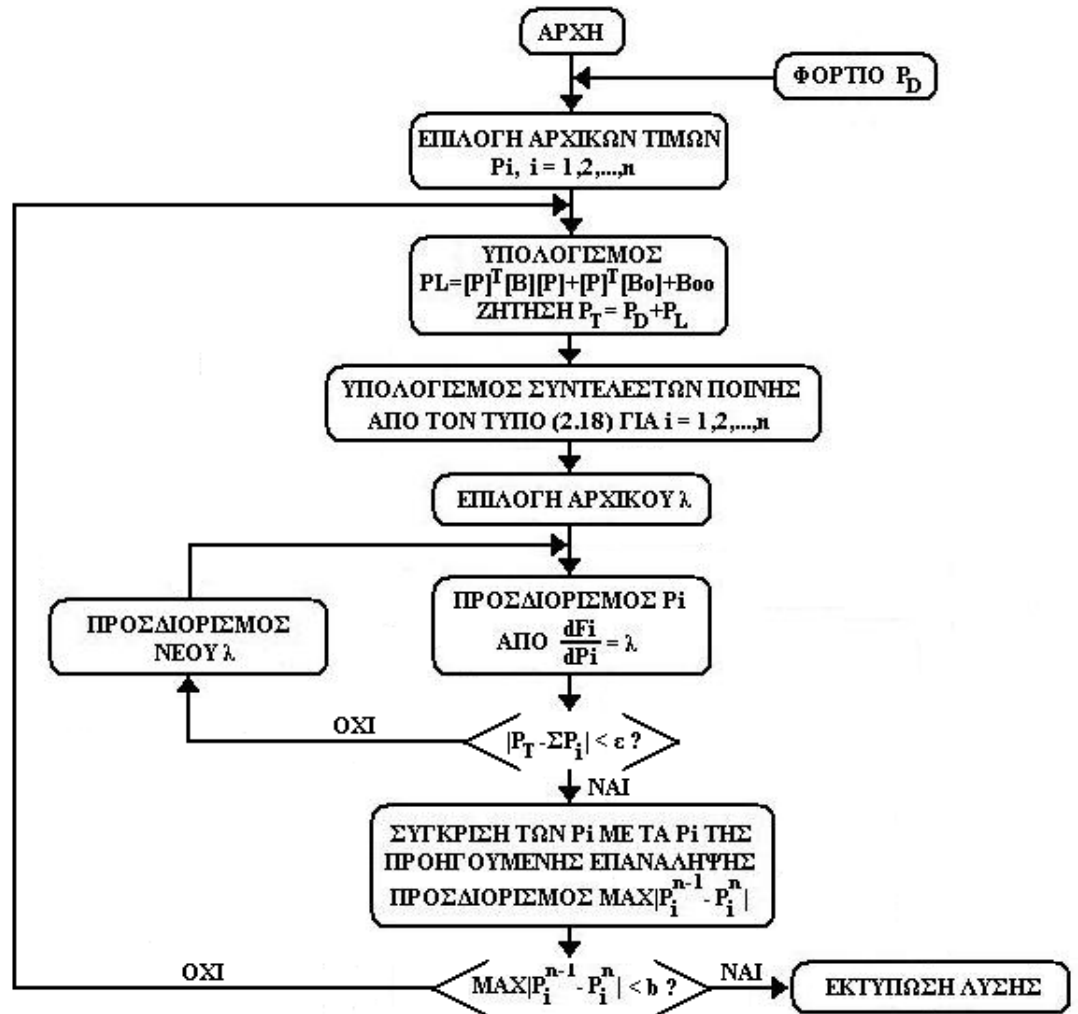
οπότε:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial P_i} = \frac{\partial F_i}{\partial P_i} + \lambda \left(\sum_{j=1}^n (B_{ij} P_j - B_j) - 1 \right) = 0 \quad (3.22)$$

και οι συντελεστές ποιής γίνονται:

$$P f_i = \frac{1}{1 - 2 \sum_{j=1}^n B_{ij} P_j - B_j} \quad (3.23)$$

Η παρουσία των διαφορικών απωλειών περιπλέκει την επίλυση των εξισώσεων συνεργασίας 3.22 καθώς περιέχει αφ' ενός τους όρους P_i και αφετέρου όλους τους όρους P_j . Στο σχήμα 3.11 απεικονίζεται σε διάγραμμα ροής ο αλγόριθμος οικονομικής επίλυσης του προβλήματος οικονομικής κατανομής φορτίου με απώλειες.



Σχήμα 3.11: Αλγόριθμος οικονομικής κατανομής φορτίου με απώλειες

Κεφάλαιο 4

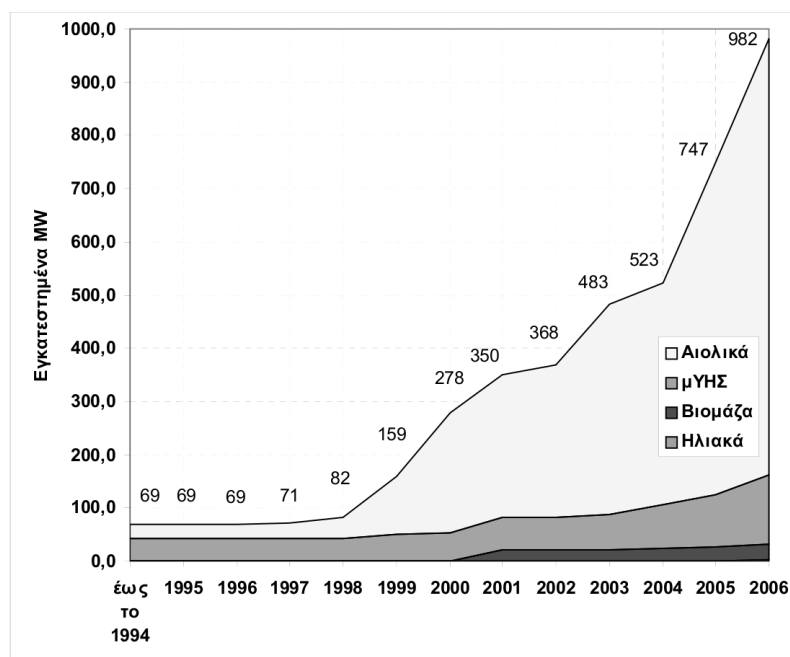
Παραγωγή αιολικής ισχύος και περιορισμοί

4.1 Εισαγωγή

Η αιολική ενέργεια έχει αποτελέσει τις τελευταίες δεκαετίες πηγή ενέργειας με μεγάλη διείσδυση στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της «καθαρής» και οικονομικής μορφής της. Η αιολική μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια μέσω των πτερυγίων των ανεμογεννητριών και στη συνέχεια σε ηλεκτρική μέσω της γεννήτριας. Η διαδικασία αυτή δεν συμπεριλαμβάνει χημική μετατροπή, άρα δεν προκαλεί εκπομπή αέριων ρύπων ούτε κατανάλωση υγρών ή στερεών καυσίμων. Ωστόσο τα τυχαία χαρακτηριστικά του ανέμου κάνουν δύσκολα προβλέψιμη τη διαθέσιμη ισχύ και οι απότομες μεταβολές μπορεί να προκαλούν προβλήματα στο δίκτυο, συνεπώς χρειάζεται ιδιαίτερη μελέτη τόσο στα ζητήματα δυναμικής ευστάθειας, όσο και στην πρόβλεψη παραγωγής αιολικής ισχύος, όπου αρκετές μεθοδολογίες έχουν αναπτυχθεί και θα περιγράψουμε στη συνέχεια, είτε βραχυπρόθεσμης, είτε μακροπρόθεσμης για το σχεδιασμό και την εγκατάσταση αιολικών πάρκων.

Σε διάστημα περίπου 10 ετών η εγκατεστημένη αιολική ισχύς αυξήθηκε ραγδαία στην Ευρώπη. Δε θα πρέπει, όμως, να δημιουργηθεί η εντύπωση ότι σε όλες τις χώρες της ΕΥ η ανάπτυξη ήταν η ίδια. Το μεγαλύτερο ποσοστό της εξέλιξης αυτής οφείλεται σε τρεις χώρες: τη Γερμανία, την Ισπανία και λίγο λιγότερο τη Δανία (η οποία εξελίσσεται με σταθερούς ρυθμούς). Τα νέα μέλη, δε, της ευρωπαϊκής ένωσης έχουν σημειώσει ελάχιστη ή μηδενική πρόοδο στον τομέα της παραγωγής αιολικής ισχύος. Σε πολλές χώρες, υπάρχουν ακόμα αμφιβολίες για τις περιβαλλοντικές συνέπειες των ανεμογεννητριών, γεγονός που εμποδίζει την ανάπτυξη της αιολικής ισχύος και λύσεις όπως η εγκατάσταση των αιολικών πάρκων μακριά από τις ακτές (offshore) φαίνεται ότι θα έρθουν στο προσκήνιο. Ήδη έρευνες έχουν δείξει ότι οι μεγάλες μηχανές είναι πιο ελκυστικές αισθητικά όταν παρατηρούνται μακριά από τις ακτές, ενώ παράλληλα βελτιώνεται η αξιοπιστία της παραγόμενης ισχύος (αφού οι άνεμοι εκεί είναι πιο έντονοι) και τα κόστη συντήρησης και επισκευής. Στην Ελλάδα χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 4.1 το μερίδιο που καταλαμβάνει η αιολική ισχύς στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ΑΠΕ.

Διείσδυση της αιολικής ισχύος ονομάζουμε το μερίδιο της ισχύος που παράγεται από αιολική ενέργεια προς το συνολικό ποσό παραγόμενης ισχύος σε μια χώρα. Η επιτυχία της μεγάλης διείσδυσης πλέον στην Ευρώπη της αιολικής ισχύος οφείλεται στην



Σχήμα 4.1: Αθροιστικά εγκαθιστώμενη ισχύς σταθμών ηλεκτροπαραγωγής με χρήση ΑΠΕ (πηγή: Υπουργείο Ανάπτυξης).

τοποθέτηση μεγάλων ανεμογεννητριών (>5 MW) τόσο σε παράκτιες όσο και σε απομακρυσμένες από την ακτή περιοχές (αν και στις τελευταίες η τεχνολογία είναι ακόμη υπό εξέταση). Σημαντικό ρόλο έπαιξε και η ανάπτυξη μικρών αιολικών πάρκων, τα οποία είναι ευκολότερα τόσο στην εγκατάσταση, όσο και στη συντηρησή τους, σε αναπτυσσόμενες χώρες ως κομμάτι του συστήματος ανεξάρτητης παραγωγής ισχύος. Τέλος, ας μην παραλείψουμε να αναφέρουμε και τη μεγάλη πρόοδο των μεθόδων πρόβλεψης της παραγωγής αιολικής ισχύος με την πάροδο των ετών, γεγονός που καταστεί την αιολική ενέργεια ολοένα και πιο αξιόπιστη στα «μάτια» των επενδυτών αλλά και των διαχειριστών των δικτύων μεταφοράς. Στόχος της ευρωπαϊκής ένωσης μέχρι το 2010 είναι να αυξηθεί το μερίδιο της ισχύος που παράγεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας σε 12% της συνολικής κατανάλωσης και σε 21% της συνολικής παραγωγής, από τα 5.3% και 13.8% που ήταν το 1995. Επίσης, υπάρχει και ο στόχος η εγκατεστημένη αιολική ισχύς να φτάσει τα 40GW μέχρι το 2010.

4.2 Προβλήματα από τη διείσδυση αιολικής ισχύος

Καθώς η ενσωμάτωση αιολικής ισχύος στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας αυξάνεται συνεχώς και τα συστήματα αναπτύσσονται και εξελίσσονται τεχνικά, έτσι ώστε να γίνεται με ασφάλεια η ένταξη αυτή, είναι σκόπιμο να εξετάσουμε τους παράγοντες που τίθενται ως περιορισμοί, που είναι κυρίως τεχνικοί και οικονομικοί, αλλά και κοινωνικοί σε ορισμένες περιπτώσεις. Η αιολική ισχύς προκαλεί αβεβαιότητα σε ένα ενεργειακό σύστημα γιατί είναι μεταβλητή και απρόβλεπτη. Για να αντιμετωπιστούν

τα παραπάνω θα χρειαστεί ενεργειακό σύστημα με μεγαλύτερη ευελιξία, που εξαρτάται από το μέγεθος της διείσδυσης της αιολικής ισχύος. Ειδικά για τα συστήματα με μεγάλη διείσδυση αιολικής ισχύος, η πρόβλεψη αποκτά πρωτεύουσα σημασία. Προβλέψεις τόσο για τη ζήτηση όσο και για την παραγωγή είναι απαραίτητες τόσο για τον Διαχειριστή του Δικτύου, όσο και για τους διάφορους επενδυτές.

Ο διαχειριστής του συστήματος είναι υπεύθυνος για την ασφαλή λειτουργία του δικτύου. Αναλαμβάνει την υποχρέωση της εν λειτουργία (online) ρύθμισης των παραμέτρων του συστήματος, την πρόβλεψη του φορτίου και της διαθέσιμης ισχύος, τις απώλειες του δικτύου κ.ο.κ. Έτσι επιφορτίζεται και με το ρόλο του υπολογισμού της διαθέσιμης αιολικής ισχύος είτε σε επίπεδο πολύ βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης των αμέσως επόμενων ωρών, είτε σε επίπεδο υπολογισμού της επόμενης μέρας για το πρόβλημα της ένταξης των μονάδων και της οικονομικής λειτουργίας του συστήματος. Η απόφαση για την ποσότητα και την ακολουθία με την οποία θα εισέλθει η αιολική ισχύς στο δίκτυο την επόμενη μέρα είναι πιο δύσκολο κομμάτι του σχεδίου παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος. Εκτός από μερικές διακοπές λειτουργίας σε διάφορους σταθμούς και τη μεταβλητότητα του ζητούμενου φορτίου, οι απρόσμενες μεταβολές στην παραγωγή αιολικής ισχύος είναι ο κυριότερος λόγος για τον οποίο η ισχύς χρειάζεται ρύθμιση και αντιστάθμιση. Οι αποφάσεις του διαχειριστή καθορίζονται επίσης και από τους κανονισμούς λειτουργίας του δικτύου, που διαμορφώνουν και τις σχέσεις του διαχειριστή με τους παραγωγούς αλλά και τους παραγωγούς μεταξύ τους σε περιβάλλον απελευθερωμένης αγοράς. Στόχος του κανονισμού αυτού είναι η εξασφάλιση της αποτελεσματικότητας και της αξιοπιστίας στην παραγωγή και τη μεταφορά της ισχύος και να ρυθμίζουν τα δικαιώματα και τις υποχρεώσεις όλων των συμμετοχόντων στο σύστημα αυτό.

Τα βασικά προβλήματα που καλείται να επιλύσει ο διαχειριστής όσον αφορά τη διείσδυση παραγωγής αιολικής ισχύος περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω, και σχετίζονται με την ασφάλεια του δικτύου.

4.2.1 Έλεγχος ενεργού ισχύος

Οι απότομες μεταβολές της ταχύτητας του ανέμου στις περιοχές των εγκατεστημένων αιολικών πάρκων μπορεί να προκαλέσουν μεταβολή στην παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ και ανισοροπία στο ισοζύγιο παραγωγής και κατανάλωσης ενεργού ισχύος. Αυτό φέρνει σαν αποτέλεσμα τις μεταβολές στη συχνότητα οι οποίες μεταφέρονται στις συμβατικές μονάδες και εάν δεν απορροφηθούν από τους αυτόματους ρυθμιστές και τη ρύθμιση συχνότητας μπορούν να προκαλέσουν προβλήματα στο δίκτυο και στους καταναλωτές. Επίσης μπορεί να υπερθερμανθούν γραμμές μεταφοράς, αύξηση του ρεύματος που εισρέει στις ανεμογεννήτριες κατά την εκκίνηση ή αποσύνδεση, η υπερφόρτιση των μονάδων, και να προκληθούν προβλήματα πιο μακροπρόθεσμου χαρακτήρα από τις στιγμιαίες μεταβολές παραγωγής ενεργού ισχύος των αιολικών πάρκων.

4.2.2 Έλεγχος συχνότητας

Η συχνότητα αποτελεί το δείκτη της ισορροπίας μεταξύ της ζήτησης φορτίου και της παραγόμενης ισχύος, και πρέπει να διατηρείται εντός συγκεκριμένων ορίων απόκλισης από την ονομαστική της τιμή. Στην Ευρώπη έχει τεθεί στα 50Hz \pm 0.1Hz και σπάνια ξεφεύγει από αυτά τα όρια. Για τη διατήρησή της από τις απότομες μεταβολές του συστήματος συντελείται ο πρωτεύων και ο δευτερεύων έλεγχος. Ο πρωτεύων περιλαμβάνει μονάδες που αυξάνουν/μειώνουν την παραγωγή τους μέχρι η ισορροπία ανάμεσα

στην παραγωγή και την κατανάλωση να αποκατασταθεί και η συχνότητα να σταθεροποιηθεί, αν και είναι χαμηλότερη από την ονομαστική και οι εφεδρικές μονάδες του πρωτεύοντος ελέγχου σπάνια χρησιμοποιούνται. Για να αποκατασταθεί η συχνότητα του δικτύου στην ονομαστική της τιμή και να τεθούν σε λειτουργία οι εφεδρικές μονάδες παραγωγής του πρωτεύοντος ελέγχου, χρησιμοποιείται ο δευτερεύων έλεγχος. Οι ανεμογεννήτριες γενικά δεν συμπεριλαμβάνονται στον έλεγχο συχνότητας, αν και κάποιοι διαχειριστές επιλέγουν το αντίθετο, ειδικά σε μη-διασυνδεδεμένα συστήματα.

4.2.3 Έλεγχος τάσης

Για τα ζητήματα ελέγχου τάσης διεξάγονται οι εξής διαδικασίες:

- Αντιστάθμιση άεργου ισχύος. Συμμετέχουν και οι ανεμογεννήτριες στη ρύθμιση της τάσης σε συνδυασμό με τον έλεγχο άεργου ισχύος έτσι ώστε να διατηρούνται στο δίκτυο τα κατάλληλα επίπεδα τάσης.
- Έλεγχος ποιότητας τάσης. Η ποιότητα της τάσης των αιολικών πάρκων εξαρτάται από τις διαρκείς αλλαγές στην τιμή της, από flicker τάσης (χαμηλής συχνότητας παρεμβολές) και από την ύπαρξη αρμονικών (πολλαπλάσια των 50Hz)
- Tap-changers μετασχηματιστές, που χρησιμοποιούνται για να διατηρήσουν τα προκαθορισμένα επίπεδα τάσης.

4.2.4 Προστασία

Το σύστημα προστασίας του δικτύου πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μπορεί να το υποστηρίξει σε περιπτώσεις διαταραχών. Είναι ζήτημα απόφασης του διαχειριστή το αν θα αποσυνδέονται τα αιολικά πάρκα σε διάφορες διαταραχές, εξετάζεται κατά περίπτωση και εξαρτάται από το ποσοστό διείσδυσης αιολικής παραγωγής, το είδος και μέγεθος της εκ διαταραχής και η τοπολογία του δικτύου. Για παράδειγμα, στα μη διασυνδεδεμένα νησιά που τα αιολικά πάρκα συμμετέχουν στο δευτερεύοντα έλεγχο συχνότητας ο διαχειριστής επιλέγει να μην αποσυνδέει τις ανεμογεννήτριες σε περιπτώσεις διαταραχών καθώς αυτό μπορεί να μεγενθύνει το πρόβλημα δυναμικής ευστάθειας.

4.2.5 Επάρκεια ισχύος και εφεδρεία συστήματος

Η μεταβλητότητα που παρουσιάζει η αιολική ισχύς επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό τον τρόπο με τον οποίο θα κατανομηθεί η παραγωγή ισχύος ανάμεσα στις μονάδες του συστήματος. Σε συνδυασμό με τη μεταβλητότητα της ζήτησης φορτίου μπορεί να προκαλέσει μεγάλα προβλήματα στο δίκτυο εάν δεν προβλεφθεί σωστά η ταχύτητα του ανέμου στις διάφορες περιοχές που εγκαθίστανται τα αιολικά πάρκα. Συνεπώς, για να ελαχιστοποιείται η πιθανότητα μη κάλυψης της ζήτησης σε συγκυρία απότομης μείωσης της παραγωγής αιολικής ισχύος και ίσως αύξησης του φορτίου, ο διαχειριστής οφείλει να διατηρεί σε στρεφόμενη εφεδρεία περισσότερες μονάδες ώστε να καλυφθεί το παραπάνω ενδεχόμενο, αναλόγως με την τοπολογία του δικτύου και το βαθμό διασποράς των αιολικών πάρκων. Εδώ πρέπει να σημειώσουμε ότι η εγκατεστημένη ισχύς θα πρέπει να μπορεί να καλύψει την παροχή ισχύος στην περίπτωση μέγιστης ζήτησης φορτίου, η τιμή της οποίας προκύπτει συνδυάζοντας ιστορικά στατιστικά δεδομένα με προβλέψεις ως προς την εξέλιξη του δικτύου.

Θεωρείται ότι συνολικά η παραγόμενη αιολική ισχύς μπορεί να ελέγχεται, έτσι ώστε να μπορεί να μειωθεί αν αυτό απαιτηθεί από το σύστημα, όπως αναλυσσαμε και παραπάνω. Για το λόγο αυτό οι αιολικοί σταθμοί πρέπει να είναι μικροί, πολλοί και διάσπαρτοι, με δυνατότητα ελέγχου της παραγόμενης από αυτούς ισχύος για την πλήρη εκμετάλλευση της αιολικής ενέργειας αλλά και την αποφυγή προβλημάτων από την μεγάλη αύξηση της έντασης του ανέμου. Τίθεται όριο για την στιγμιαία διείσδυση αιολικής ισχύος, δεδομένου ότι οι διακυμάνσεις της παραγόμενης ισχύος από τους αιολικούς σταθμούς μπορεί να έχουν δυσμενείς συνέπειες στη διατήρηση της συχνότητας αλλά και στην ευστάθεια του συστήματος. Το όριο αυτό μπορεί να κυμανθεί, ανά περιοχή ανάλογα με τις ιδιαιτερότητες των συνθηκών λειτουργίας του συστήματος, τόσο από πλευράς συμβατικών μονάδων (πχ ικανότητας ρύθμισης) όσο και από πλευράς αιολικών σταθμών (αριθμός, μέγεθος και είδος ανεμογεννητριών, διασπορά των ανεμογεννητριών κτλ). Με παραμετρική διερεύνηση ως προς τις τιμές των παραμέτρων που εμπλέκονται (ταχύτητα ανέμου, διεύθυνση ανέμου, όριο στιγμιαίας διείσδυσης, καμπύλη φορτίου κτλ) δίνεται η δυνατότητα καλύτερης εξέτασης του θέματος της αιολικής ισχύος. Θα πρέπει επίσης να ληφθούν υπόψιν δεδομένα που επηρεάζουν το βαθμό διείσδυσης (πχ η διασπορά των αιολικών σταθμών) αλλά και ότι η απορρόφηση αιολικής ενέργειας θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην παραβιάζεται η συμφωνημένη απορρόφηση ενέργειας από τους άλλους σταθμούς παραγωγής. Να σημειώσουμε, τέλος, ότι ιδιαίτερα στις περιπτώσεις αιολικών πάρκων που συνδέονται στα αυτόνομα ΣΗΕ, όπως για παράδειγμα σε μη διασυνδεδεμένα νησιά, οι συμβατικοί σταθμοί παραγωγής επιβάλλουν σημαντικούς περιορισμούς στη λειτουργία τους που ο διαχειριστής οφείλει να τους συμπεριλαμβάνει.

4.3 Πιθανοτική ανάλυση παραγωγής αιολικής ισχύος

Λόγω της αβεβαιότητας της ταχύτητας του ανέμου, άρα και της ενεργειακής απόδοσης των ανεμογεννητριών, αναπτύχθηκαν μεθοδολογίες εκτίμησης της παραγωγής αιολικής ισχύος για την εφαρμογή σε προβλήματα σύνδεσης στο δίκτυο, οικονομικής και ασφαλούς λειτουργίας. Την πιο συνηθισμένη προσέγγιση για την ταχύτητα του ανέμου αποτελεί η στατιστική κατανομή της v_i σε μία συγκεκριμένη περιοχή και εκφράζεται από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull:

$$f_V(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad 0 < v < \infty \quad (4.1)$$

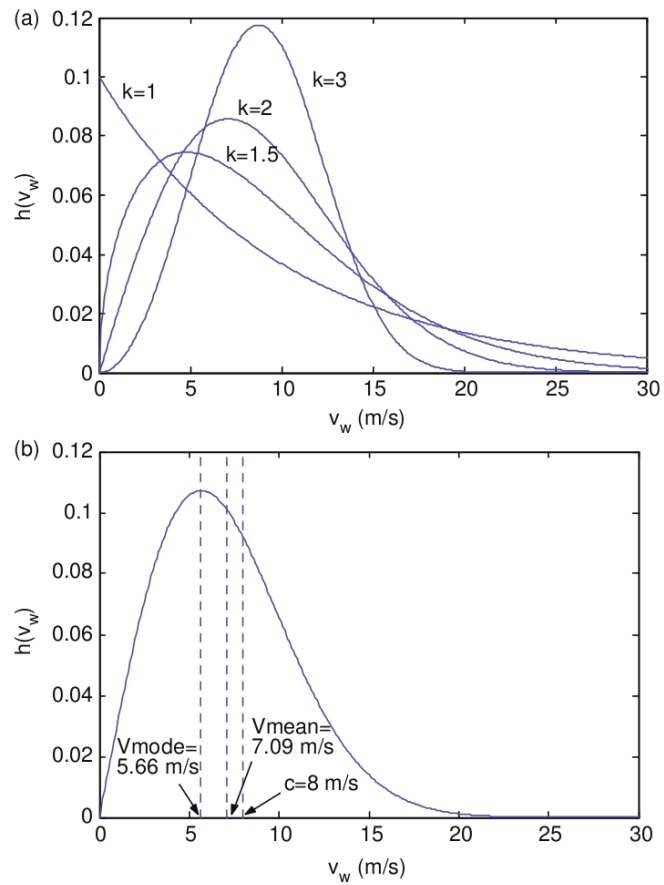
όπου k η παράμετρος μορφής και c η παράμετρος κλίμακας. Χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα ?? η μορφή και οι βασικές παράμετροι της σ.π.π της ταχύτητας του ανέμου.

από τη σχέση 4.1 συμπεραίνουμε ότι η πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται εντός συγκεκριμένου διαστήματος τιμών υπολογίζεται από την αθροιστική συνάρτηση πιθανότητας

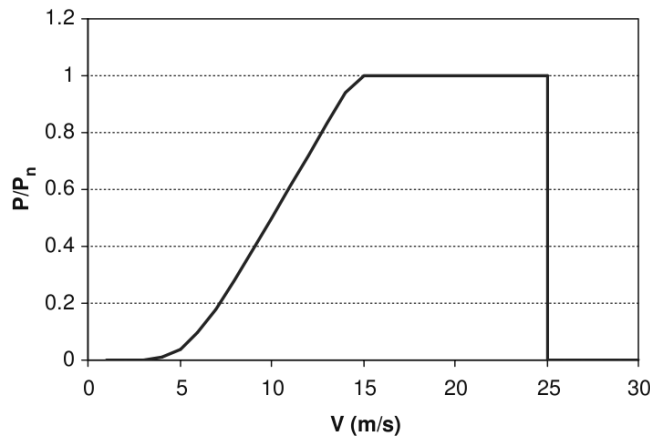
$$H(v) = p(v \leq V) = \int_0^V h(v) dv \quad (4.2)$$

η οποία για την κατανομή Weibull προκύπτει

$$H(V) = 1 - \exp^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad 0 \leq V \leq \infty \quad (4.3)$$



Σχήμα 4.2: (α) Η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull για $c = 10$ και διάφορες τιμές του k . (β) Συντελεστής κλίμακας c , μέση ταχύτητα και πιθανότερη ταχύτητα της κατανομής Weibull.



Σχήμα 4.3: Καμπύλη ισχύος ανεμογεννήτριας με $v_{in} = 5m/s$, $v_r = 15m/s$ και $v_{out} = 25m/s$

και άρα καταλήγουμε για την πιθανότητα η ταχύτητα του ανέμου να βρίσκεται εντός κάποιων ορίων ότι

$$p(V_1 \leq v \leq V_2) = H(V_2) - H(V_1) = e^{-\left(\frac{V_1}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{V_2}{c}\right)^k} \quad (4.4)$$

Τις παραπάνω σχέσεις θα χρησιμοποιήσουμε αναλυτικά στο πρόβλημα της βέλτιστης κατανομής που αναλύουμε σε επόμενο κεφάλαιο, για την τυχαία μεταβλητή της παραγόμενης αιολικής ισχύος, μέσω μετασχηματισμού της τυχαίας μεταβλητής ταχύτητας του ανέμου σε τυχαία μεταβλητή της παραγόμενης ενεργού ισχύος. Αυτός ο μετασχηματισμός προκύπτει με βάση την καμπύλη ισχύος των ανεμογεννητριών του σχήματος 4.3

Η στατιστική ανάλυση του ανέμου και πιο συγκεκριμένα ο καθορισμός των παραμέτρων της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας Weibull της ταχύτητας του ανέμου είναι ο καταλληλότερος τρόπος για την μελέτη του αιολικού δυναμικού της περιοχής που πρόκειται να εγκατασταθεί ένα αιολικό πάρκο, για αυτό το λόγο τη χρησιμοποιήσαμε και στο πρόβλημα της στοχαστικής βέλτιστης κατανομής φορτίου.

4.4 Αναφορά στις μεθοδολογίες πρόβλεψης αιολικής ισχύος

Καθώς τα χαρακτηριστικά του ανέμου παρουσιάζουν έντονη αβεβαιότητα, για τη διείσδυση αιολικής παραγωγής στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας δημιουργήθηκε η ανάγκη να αναπτυχθούν μεθοδολογίες πρόβλεψης της αιολικής ισχύος, για λόγους αφενός τεχνικούς και αφετέρου οικονομικούς ως προς τον προγραμματισμό παραγωγής και τη συμμετοχή των διάφορων επενδυτών. Οι μέθοδοι που έχουν αναπτυχθεί χωρίζονται σε δύο βασικές κατηγορίες. Οι απλές μέθοδοι που βασίζονται στην κλιματολογία ή στο μέσο όρο παλιών παραγόμενων τιμών θεωρούνται σαν αναφορικές μέθοδοι πρόβλεψης, αφού είναι πολύ εύκολο να εισαχθούν σε ένα μοντέλο και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να υποστηρίξουν πιο εξελιγμένες μεθόδους. Οι πιο εξελιγμένες μέθοδοι, μπορούν να χωριστούν σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τους συλλογισμούς που

γίνονται για να μετατραπούν οι μετεωρολογικές προβλέψεις σε έξοδο αιολικής ισχύος. Πρώτος συλλογισμός είναι η φυσική προσέγγιση που εστιάζει στην περιγραφή της ροής του ανέμου γύρω και μέσα σε ένα αιολικό πάρκο για να προτείνει έναν υπολογισμό της έξοδου ισχύος. Ο άλλος συλλογισμός είναι η στατιστική προσέγγιση που μοντελοποιεί τη σχέση ανάμεσα σε ένα πλήθος από ιστορικά δεδομένα και/ή μετεωρολογικές προβλέψεις και στην έξοδο ισχύος, χωρίς να ληφθούν καθόλου υπόψη τα διάφορα φυσικά φαινόμενα.

Με βάση τη φυσική προσέγγιση έχουν αναπτυχθεί τα παρακάτω μοντέλα που απλά θα αναφέρουμε:

- Το *eWind* από την αμερικάνικη εταιρία TrueWind Inc.
- Το *Prediktor* που αναπτύχθηκε στο εργαστήριο Riso της Δανίας.
- Το *Previento* που αναπτύχθηκε στο πανεπιστήμιο Oldenburg της Γερμανίας.
- Τα *LocalPred* και *RegioPred* που αναπτύχθηκαν από τον Marti Perez.
- Το *HIRPOM* από τον Morhlen και συνεργάτες
- Το *Cassandra* που αναπτύχθηκε στην Ισπανία το 2001.
- Το *Scirocco*, ένα πιο καινούριο μοντέλο που αναπτύχθηκε από τις Aeolis Forecasting Services.

και αντίστοιχα με τη στατιστική μέθοδο της πρόβλεψης, δημιουργήθηκαν τα εξής εργαλεία:

- Τα μοντέλα *ARMA*.
- Το *Wind Power Prediction Tool (WPPT)*, η πιο εξελιγμένη στατιστική μέθοδος που αναπτύχθηκε στο Τεχνικό Πανεπιστήμιο της Δανίας.
- Το *Sipreolico* που πρότεινε ο Sanchez και το λειτουργεί η ισπανική REE (Red Electrical de Espana).
- Τα μοντέλα *Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ANN)* και *ασαφούς λογικής*.
- Το *Advanced Wind Power Prediction Tool (AWPT)* από τον Li και τους συνεργάτες του που χρησιμοποιεί και μεθόδους νευρωνικών δικτύων.
- Το *Armines Wind Power Prediction System (A WPPS)* από την ARMINES και τη RAL που εφαρμόστηκε και στην Κρήτη.
- Η χρήση των *Μηχανών Υποστηρικτικών Διανυσμάτων ή Support Vector Machines (SVMs)* που ανήκουν στην τεχνητή νοημοσύνη.

Κεφάλαιο 5

Τεχνικές βελτιστοποίησης

5.1 Εισαγωγή

Πριν γίνει η ανάλυση του κύριου προβλήματος αυτής της διπλωματικής εργασίας, θα ήταν σκόπιμο να γίνει αναφορά στις μαθηματικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται γενικά στα προβλήματα βελτιστοποίησης.

Ορισμός: Βελτιστοποίηση ορίζεται η διαδικασία εύρεσης της καλύτερης δυνατής λύσης ενός προβλήματος υπό συγκεκριμένες συνθήκες και περιορισμούς. Στόχος μίας διαδικασίας βελτιστοποίησης είναι είτε η ελαχιστοποίηση του κόστους ή της διεργασίας που πρέπει να καταβληθεί για μία προσπάθεια, είτε η μεγιστοποίηση της ωφέλειας που μπορούμε να έχουμε από μία διαδικασία. Η απαιτούμενη προσπάθεια ή το επιθυμητό όφελος ενός έργου μπορεί να προσεγγισθεί από την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος. Το πρόβλημα της βελτιστοποίησης τότε μπορεί να οριστεί ως η εύρεση του μέγιστου ή του ελάχιστου αυτής της συγκεκριμένης συνάρτησης που περιγράφει το πρόβλημα με κάποιες συγκεκριμένες μεταβλητές απόφασης.

Για την επίλυση των προβλημάτων βελτιστοποίησης έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι μαθηματικού προγραμματισμού, καθώς η εύρεση του ελάχιστου μίας συνάρτησης υπό κάποιους περιορισμούς απαιτεί μαθηματικές τεχνικές. Για προβλήματα βελτιστοποίησης με στοχαστικό χαρακτήρα χρησιμοποιούνται στοχαστικές ανελίξεις, όπως για παράδειγμα οι αλυσίδες Markov, ενώ οι στατιστικές μέθοδοι βοηθούν στην εύρεση εμπειρικών μοντέλων για πειραματικά και στατιστικά μεγέθη.

5.2 Κατηγορίες προβλημάτων βελτιστοποίησης

5.2.1 Θεμελίωση προβλήματος βελτιστοποίησης

Ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης τίθεται ως η εύρεση ενός διανύσματος:

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ x_n \end{pmatrix}$$

το οποίο ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση $f(X)$ υπό τους περιορισμούς:

$$g_j(x) \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$l_j(x) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, p$$

όπου το διάνυσμα X είναι ένα διάνυσμα διαστάσεων n , η $f(X)$ είναι η *Αντικειμενική Συνάρτηση* και $g_j(x)$, $l_j(x)$ είναι οι περιορισμοί ανισότητας και ισότητας αντίστοιχα. Ένα τέτοιο πρόβλημα λέγεται πρόβλημα υπό περιορισμούς.

Αν προσπαθούμε να βελτιστοποιήσουμε τη συνάρτηση $f(X)$ χωρίς τις ισότητες και τις ανισότητες, τότε το πρόβλημα λέγεται χωρίς περιορισμούς. Το διάνυσμα X λέγεται και διάνυσμα σχεδιασμού και έχει τέτοια διάσταση όσες και οι ανεξάρτητες μεταβλητές μεταξύ τους. Οι εξισώσεις περιορισμών του προβλήματος εισάγονται για να μας δώσουν είτε τους περιορισμούς σχεδιασμού, είτε τους γεωμετρικούς περιορισμούς.

Η αντικειμενική συνάρτηση $f(X)$, που μπορεί να είναι και το άθροισμα επιμέρους συναρτήσεων $f_1(X)$ και $f_2(X)$, είναι η συνάρτηση η οποία εκφράζει το μέγεθος το οποίο θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε συναρτήσει των *μεταβλητών απόφασης*. Συχνά το μέγεθος προς βελτιστοποίηση είναι το κόστος, και οι μεταβλητές του διανύσματος σχεδιασμού αποτελούν τις παραμέτρους που συμβάλλουν στο κόστος. Η επιλογή της αντικειμενικής συνάρτησης έχει πολύ μεγάλη σημασία για την εκλογή ασφαλών συμπερασμάτων και για την επίλυση του προβλήματος. Συχνά επίσης μπορούν να χρησιμοποιούνται αντικειμενικές συναρτήσεις οι οποίες να προσπαθούν να βελτιστοποιήσουν περισσότερα από ένα διαφορετικά κριτήρια.

5.2.2 Κατηγοριοποίηση προβλημάτων βελτιστοποίησης

Κατηγοριοποιούμε τα διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης κυρίως με βάση τη μορφή των εξισώσεων, που καθορίζουν και τη μορφή της επίλυσης που θα ακολουθήσουμε.

1. *Μη γραμμικού προγραμματισμού*, είναι τα προβλήματα στα οποία η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί είναι μη γραμμικές συναρτήσεις. Οι υπόλοιπες κατηγορίες είναι ειδικές περιπτώσεις του παραπάνω προβλήματος.
2. *Γραμμικού προγραμματισμού*, είναι τα προβλήματα όπου η αντικειμενική συνάρτηση και οι περιορισμοί είναι γραμμικές συναρτήσεις του x .

3. *Γεωμετρικού προγραμματισμού*, είναι τα προβλήματα στα οποία οι συναρτήσεις είναι αθροίσματα γινομένων δυνάμεων των μεταβλητών σχεδιασμού. Δηλαδή είναι της μορφής:

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N_0} c_i \left(\prod_{j=1}^n x_j^{p_{ij}} \right) \quad x_i > 0 \quad c_j > 0$$

4. *Τετραγωνικού προγραμματισμού* είναι τα προβλήματα όπου έχουμε ένα πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού στο οποίο οι περιορισμοί είναι γραμμικοί και η αντικειμενική συνάρτηση είναι τετραγωνική. Τέτοιο πρόβλημα έχει τη μορφή:

$$f(x) = c + \sum_{i=1}^n q_i x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} x_i x_j$$

Η επίλυση ενός προβλήματος τετραγωνικού προγραμματισμού συναντάται συνήθως σε προβλήματα ένταξης μονάδων στο σύστημα (*unit commitment*) και περιλαμβάνει την εύρεση για την παραπάνω αντικειμενική συνάρτηση του βέλτιστου διανύσματος X υπό τους περιορισμούς:

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} x_i = b_j \quad j = 1, 2, \dots, m$$

$$x_i \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

όπου c, q_i, Q_{ij}, a_j, b_j είναι σταθερές.

Επίσης, στα διάφορα προβλήματα βελτιστοποίησης γίνονται οι εξής διαχωρισμοί:

- Ανάλογα με την επιτρεπτότητα των τιμών διακρίνονται σε προβλήματα *ακεραίου* και *συνεχών τιμών* προγραμματισμού.
- Σε *ντετερμινιστικά* και *στοχαστικά* προβλήματα ανάλογα με τη φύση των μεταβλητών.
- Ανάλογα με τη *διαχωρισιμότητα* ή μη των συναρτήσεων, των περιορισμών και της αντικειμενικής συνάρτησης. Δηλαδή αν η αντικειμενική συνάρτηση ή οι περιορισμοί περιλαμβάνουν άλλες συναρτήσεις.
- Ανάλογα με τον αριθμό των αντικειμενικών συναρτήσεων που βελτιστοποιούνται συγχρόνως.
 - Με μία αντικειμενική συνάρτηση (*Single-objective optimization*), όπως περιγράφουμε παραπάνω.
 - Με ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλών αντικειμενικών συναρτήσεων (*Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση ή Multi-objective optimization*), όπου οι αντικειμενικές συναρτήσεις βελτιστοποιούνται ανταγωνιστικά η μία ως προς την άλλη και υπεισέρχεται η έννοια της ανταπόδοσης (*trade-off*). Με βάση την αριστεία κατά Pareto παράγεται ένα σύνολο από μη κυριαρχούμενες λύσεις (*non-dominated solutions*) που ονομάζεται μέτωπο Pareto (*Pareto front*). Αυτή η μέθοδος εφαρμόζεται στην παρούσα διπλωματική και θα την αναλύσουμε εκτενώς παρακάτω.

5.3 Μη γραμμικός προγραμματισμός (*Non-Linear Programming*)

Για τη λύση προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού δεν υπάρχει μία μέθοδος που να έχει εφαρμογή σε όλες τις περιπτώσεις, όπως συμβαίνει στα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού των οποίων η λύση βασίζεται στη γενική μέθοδο Simplex. Για τον λόγο αυτό έχουν δημιουργηθεί διάφορες μέθοδοι επίλυσης τέτοιων προβλημάτων. Κάθε φορά επιλέγουμε εκείνη που είναι η πιο κατάλληλη ανάλογα με τη διατύπωση του προβλήματος και την πείρα που διαθέτουμε.

Στο μη γραμμικό προγραμματισμό γίνονται επίσης διάφοροι διαχωρισμοί. Από τη μορφή των αντικειμενικών συναρτήσεων συμπεραίνουμε και τη μέθοδο επίλυσης που θα ακολουθήσουμε:

- Εάν δεν υπάρχουν περιορισμοί, ακολουθούμε τις κλασικές μεθόδους διαφορικού λογισμού.
- Εάν οι περιορισμοί είναι υπό μορφή ισότητας, χρησιμοποιούμε τους πολλαπλασιαστές Lagrange
- Εάν οι περιορισμοί είναι στη μορφή ανισότητας (ή ισότητας και ανισότητας), τότε χρησιμοποιούμε τις συνθήκες Kuhn-Tucker

Ένας ακόμη διαχωρισμός γίνεται με κριτήριο τις υπολογιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται και τα χαρακτηριστικά των τεχνικών αυτών. Εδώ, διακρίνουμε τις εξής: Για αντικειμενική συνάρτηση χωρίς περιορισμούς με χρήση παραγώγων

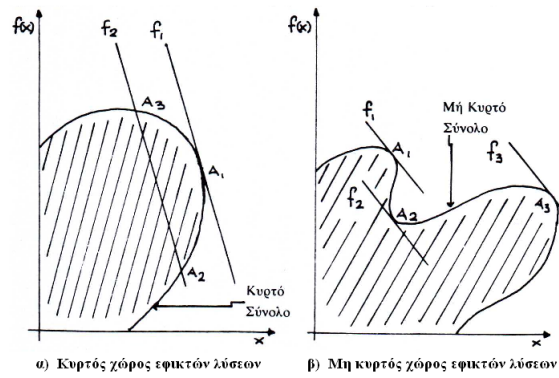
- Μέθοδοι Gradient
- Μέθοδοι Newton
- Μέθοδος Συζυγών Διευθύνσεων
- Διάφορες Μετρικές μέθοδοι
- Μέθοδοι αναζήτησης

ενώ για αντικειμενική συνάρτηση με περιορισμούς με χρήση γραμμικών προσεγγιστικών μεθόδων, όπως:

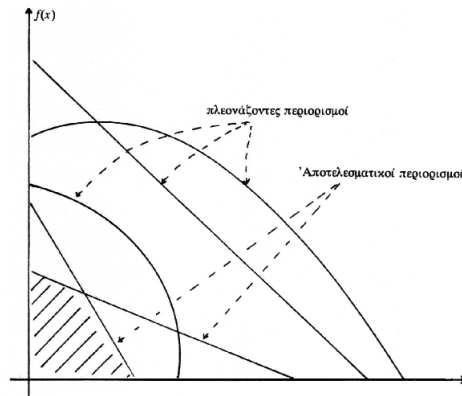
- Μέθοδος προσεγγιστικού προγραμματισμού (MAP)
- Τετραγωνικός προγραμματισμός
- Προβολικές μέθοδοι (Rosen's Gradient Projection method)
- Μέθοδος εφικτών κατευθύνσεων του Zoutendijk
- Μέθοδος συνάρτησης ποινής (Penalty function method)

Οι περιορισμοί σε κάποιο πρόβλημα μη γραμμικού προγραμματισμού μπορεί να σχηματίζουν κυρτό σύνολο, ή μη κυρτό σύνολο (σχήμα 5.1), μπορεί να είναι αποτελεσματικοί, ή μη αποτελεσματικοί ή πλεονάζοντες (σχήμα 5.2)

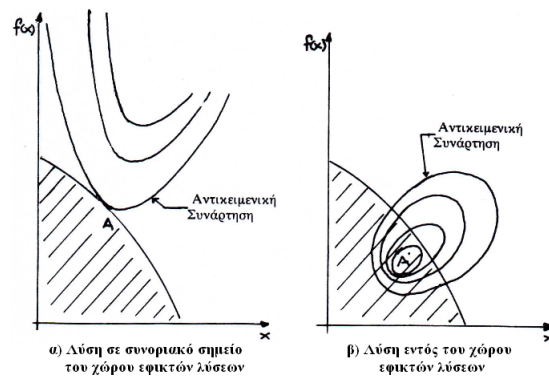
Στα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού δεν ισχύει για τις βέλτιστες λύσεις η ιδιότητα που ισχύει στο γραμμικό προγραμματισμό και στην οποία βασίζεται η μέθοδος Simplex, ότι δηλαδή η βέλτιστη λύση μπορεί να βρίσκεται μόνο σε ένα ακραίο σημείο του χώρου των εφικτών λύσεων. Η βέλτιστη λύση μπορεί να βρίσκεται



Σχήμα 5.1: Κυρτός και μη κυρτός χώρος εφικτών λύσεων



Σχήμα 5.2: Αποτελεσματικοί και πλεονάζοντες περιορισμοί σε ένα ΜΓΠ πρόβλημα



Σχήμα 5.3: Θέση βέλτιστης λύσης στο χώρο των εφικτώ λύσεων

σε οποιοδήποτε σημείο του συνοριακού χώρου εφικτών λύσεων ή εντός του χώρου αυτού (σχήμα 5.3)

Μια μεγάλη κατηγορία προβλημάτων μη γραμμικού προγραμματισμού αναφέρεται σε γραμμικές αντικειμενικές συναρτήσεις και μη γραμμικούς περιορισμούς, όπου ο χώρος εφικτών λύσεων μπορεί να είναι κυρτός ή μη κυρτός. Στην πρώτη περίπτωση όπου ο χώρος είναι κυρτός, μπορούμε να προσδιορίσουμε τη βέλτιστη λύση πολύ εύκολα. Για παράδειγμα, η βέλτιστη λύση (μέγιστο) στο σχήμα 5.1 δίνεται από το σημείο A_1 , το οποίο είναι ένα εφαπτόμενο συνοριακό σημείο. Οποιαδήποτε κίνηση πέραν του σημείου τούτου θα επιφέρει ελάττωση στην τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης. Έτσι, κινούμενοι από το A_1 προς το σημείο A_2 ή A_3 , η τιμή της συνάρτησης ελαττώνεται από f_1 σε f_2 .

Στην περίπτωση που ο χώρος των εφικτών λύσεων είναι μη κυρτός, η προσέγγιση είναι σαφώς πιο δύσκολη. Στο σχήμα 5.1 το σημείο A_1 , που είναι εφαπτόμενο σημείο, είναι προφανώς ένα τοπικό μέγιστο. Αν κινηθούμε κατά μήκος του συνόρου του χώρου των εφικτών λύσεων θα βρούμε το σημείο A_2 (όπου $f_2 < f_1$) και μετά το σημείο A_3 (όπου $f_3 < f_1$). Έτσι, γίνεται φανερή η δυσκολία που αντιμετωπίζουμε κατά τον προσδιορισμό του πραγματικού απόλυτου ακρότατου σε προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού.

Σε μεγάλα και πολύπλοκα προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού συνήθως αντιμετωπίζουμε το πρόβλημα των τοπικών ελαχίστων (μεγίστων αντίστοιχα). Είναι δύσκολο σε ορισμένες περιπτώσεις να κάνουμε διάκριση μεταξύ τοπικών και ολικών ακροτάτων σημείων, λόγω της μη γραμμικότητας της αντικειμενικής συνάρτησης ή/και των περιορισμών. Για παράδειγμα κάτι τέτοιο θα μπορούσε να συμβεί σε προβλήματα μεγιστοποίησης με κυρτή αντικειμενική συνάρτηση. Επίσης, η ίδια δυσκολία προκύπτει όταν σε προβλήματα μεγιστοποίησης με γραμμική αντικειμενική συνάρτηση ο χώρος των εφικτών λύσεων είναι μη κυρτό σύνολο. Επίσης, συνήθως είναι δύσκολο να βρεθεί η βέλτιστη λύση, καθώς αυτό απαιτεί την εύρεση όλων των τοπικών ακροτάτων, εκτός και αν οι συνερτήσεις του προβλήματος είναι κυρτές ή κοίλες με στενή σημασία.

Για αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί μέθοδοι επίλυσης τέτοιων προβλημάτων που χρησιμοποιούν ευριστικές μεθόδους ή με στοχαστική αναζήτηση σε ολόκληρο το χώρο των εφικτών λύσεων. Τις μεθόδους αυτές που ανήκουν στον κλάδο της Ολικής βελτιστοποίησης (*Global Optimization*) θα αναλύσουμε παρακάτω.

5.4 Ολική Βελτιστοποίηση (*Global Optimization*)

Το αντικείμενο της ολικής βελτιστοποίησης είναι η εύρεση της συνολικά βέλτιστης λύσης των (συνήθως μη γραμμικών) μοντέλων, εν μέσω πολλαπλών τοπικών βελτιστών. Τυπικά, η μέθοδος αυτή αναζητεί ολικές λύσεις ενός μοντέλου βελτιστοποίησης με περιορισμούς και χρησιμοποιείται σε πλήθος προβλημάτων και εφαρμογών. Ειδικά σε περιπτώσεις όπου είτε κάποιοι περιορισμοί, είτε η αντικειμενική συνάρτηση που χρησιμοποιείται παρουσιάζει ασυνέχεια ή είναι μη παραγωγίσιμη σε κάποια σημεία, τότε η χρήση αυτής της οικογένειας μεθόδων είναι μονόδρομος.

Έτσι, και εδώ ο στόχος είναι η εύρεση των καλύτερων στοιχείων x^* από ένα σύνολο \mathbb{X} σύμφωνα με ένα σύνολο κριτηρίων $\mathcal{F} = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ που μοντελοποιούνται όπως περιγράφουμε και παραπάνω ως μαθηματικές συναρτήσεις:

Ορισμός: Μία αντικειμενική συνάρτηση $f : \mathbb{X} \mapsto Y$ με $Y \subseteq \mathbb{R}$ καλείται η μαθηματική συνάρτηση που υπόκειται στη βελτιστοποίηση.

Το σύνολο (ή η περιοχή) Y πρέπει να είναι υποσύνολο των πραγματικών αριθμών. Το σύνολο X της f είναι ο χώρος αναζήτησης του προβλήματος και αντιπροσωπεύει τις μεταβλητές απόφασης. Οι αντικειμενικές συναρτήσεις στην ολική βελτιστοποίηση δεν είναι απαραίτητα μαθηματικές εκφράσεις, αλλά μπορούν να είναι πολύπλοκοι αλγόριθμοι με πολλαπλές προσομοιώσεις. Έτσι η ολική βελτιστοποίηση περιλαμβάνει όλες εκείνες τις τεχνικές που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να βρεθούν τα βέλτιστα στοιχεία $x^* \in \mathbb{X}$ που καλύπτουν την σχέση $f \in \mathcal{F}$.

5.4.1 Περιγραφή των αλγορίθμων Ολικής Βελτιστοποίησης

Οι τεχνικές που χρησιμοποιούνται στην ολική βελτιστοποίηση γενικά μπορούν να χωριστούν σε δύο τομείς:

- τους **ντετερμινιστικούς αλγόριθμους** που συνήθως χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει μία σαφής σχέση ανάμεσα στα χαρακτηριστικά των πιθανών λύσεων και στη διαδικασία επίλυσης τους. Τότε ο χώρος αναζήτησης μπορεί να εξερευνηθεί αποδοτικά με χρήση της τεχνικής διαίρει και κυρίευε (*divide and conquer*). Όταν όμως η αξιολόγηση μίας πιθανής λύσης είναι πολύπλοκη ή όταν οι διαστάσεις του προβλήματος είναι πολλές, τότε η επίλυση γίνεται δύσκολη και καταλήγει στην πλήρη αναζήτηση του χώρου εφικτών λύσεων.
- τους **στοχαστικούς αλγόριθμους**. Πρόκειται για μία οικογένεια πιθανοτικών αλγορίθμων βασισμένη στην προσέγγιση *Monte-Carlo*. Αυτοί οι αλγόριθμοι επιδιώκουν την εύρεση της λύσης σε μικρό υπολογιστικό χρόνο, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι δεν καταλήγουν σε αποτέλεσμα, ωστόσο μπορεί να καταλήξουν σε κάποιο τοπικό βέλτιστο.

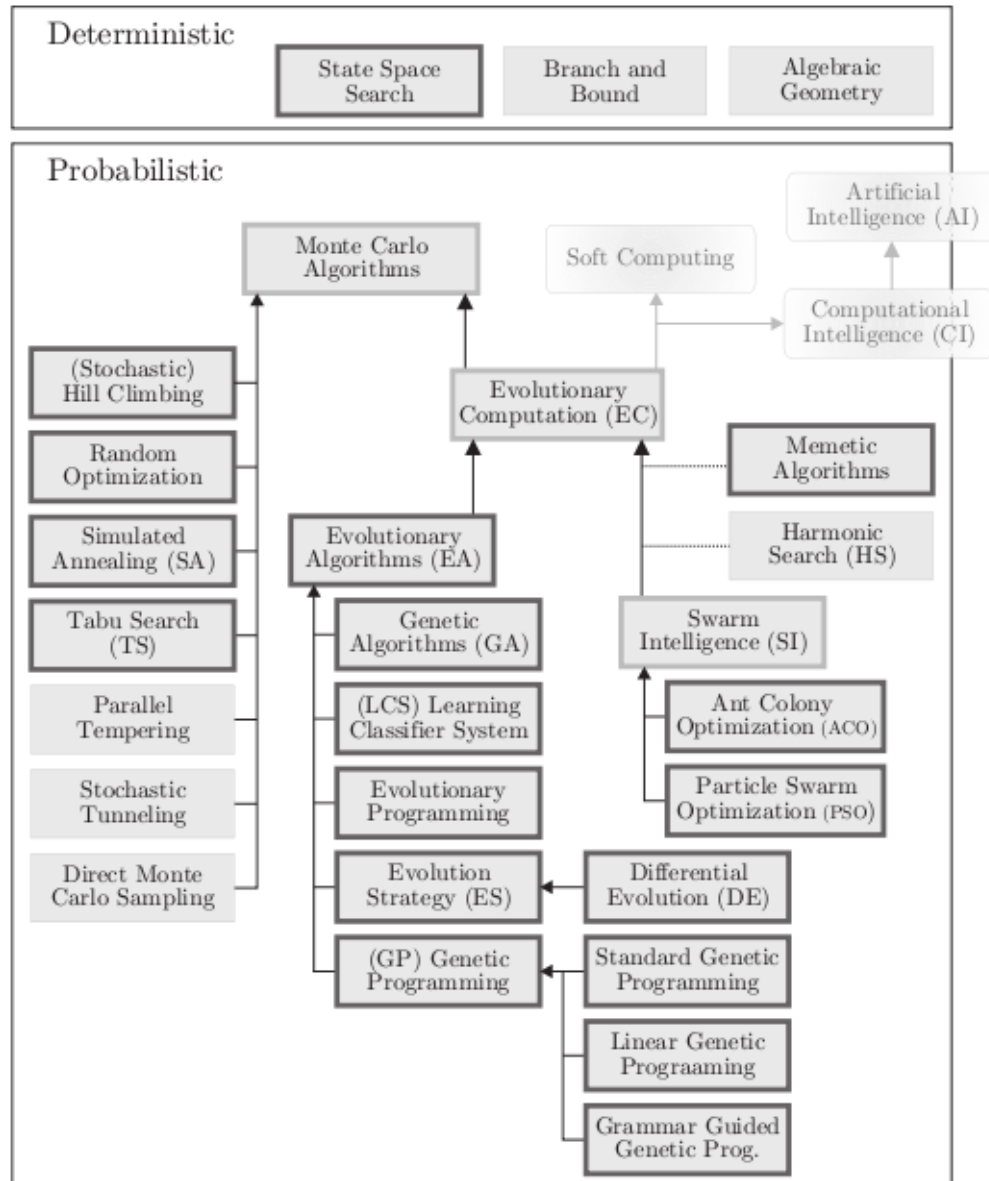
Πιο αναλυτική περιγραφή με παράθεση των πιο δημοφιλών αλγορίθμων φαίνεται στο σχήμα 5.4

Οι **ευριστικές συναρτήσεις** (*heuristics*) στην ολική βελτιστοποίηση είναι συναρτήσεις, το αποτέλεσμα των οποίων καθορίζει το σύνολο των πιθανών λύσεων που θα εξεταστούν στη συνέχεια της αναζήτησης. Οι ντετερμινιστικοί αλγόριθμοι τις χρησιμοποιούν για να καθορίσουν τη σειρά εξέτασης των πιθανών λύσεων, ενώ στους στοχαστικούς αλγόριθμους χρησιμοποιούνται απλά για περαιτέρω υπολογισμούς στα στοιχεία που επιλέγονται από το χώρο αναζήτησης.

Ορισμός: Μία *ευριστική συνάρτηση* είναι το κομμάτι του αλγορίθμου βελτιστοποίησης που χρησιμοποιεί τις ήδη υπάρχουσες πληροφορίες που έχουν συλλεχθεί για να καθορίσει ποιά υποψήφια λύση θα εξεταστεί στη συνέχεια ή πώς αυτή θα παραχθεί

Ορισμός: *Μετα-ευριστική* είναι η μέθοδος επίλυσης γενικών κλάσεων προβλημάτων. Συνδυάζει αντικειμενικές συναρτήσεις ή ευριστικές συναρτήσεις με έναν αφαιρετικό και αποδοτικό τρόπο, συνήθως χωρίς να επεκτείνεται βαθύτερα στη δομή τους.

Ο συνδυασμός αυτός συνήθως γίνεται στοχαστικά υλοποιώντας στατιστικά αποτελέσματα από δείγματα του χώρου αναζήτησης ή βασιζόμενα σε μοντέλα φυσικών φαινομένων, όπως για παράδειγμα η *προσομοιωμένη ανόπτηση* (*simulated annealing*) που χρησιμοποιεί την αξιολόγηση λύσεων σύμφωνα με μία συνάρτηση πιθανότητας που εντοπίζεται σε φυσικές διεργασίες δημιουργίας κρυσταλλικών δομών στη φύση. Ο αλγόριθμος *αναρρίχησης λόφων* (*hill-climbing search*) προσομοιώνει την αναζήτηση του



Σχήμα 5.4: Κατηγοριοποίηση των πιο γνωστών μεθόδων ολικής βελτιστοποίησης

βέλτιστου σημείου με την εύρεση του υψηλότερου σημείου ενός λόφου, ενώ ο αλγόριθμος *Tabu search* επεκτείνει αυτή τη λογική προσθέτοντας τον όρο *tabu* (απαγορευμένη κατάσταση) στις περιοχές που έχουν ήδη εξεταστεί.

Αντίστοιχα, οι **εξελικτικοί αλγόριθμοι** (*evolutionary algorithms*) προσομοιώνουν τη συμπεριφορά της φυσικής εξέλιξης. Έτσι προσομοιώνονται λειτουργίες όπως η διασταύρωση, η μετάλλαξη, η φυσική επιλογή και η επιβίωση για να καταλήξει ο αλγόριθμος στη βέλτιστη λύση μέσω πολλών γενεών απογόνων. Σε διάφορα προβλήματα συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας έχουν βρει εφαρμογή οι εξελικτικοί αλγόριθμοι, όπως στο σχεδιασμό επέκτασης του συστήματος παραγωγής και μεταφοράς, στο σχεδιασμό της άεργης ισχύος, στην οικονομική κατανομή φορτίου και αλλού.

Μία οικογένεια αλγορίθμων που έχει γίνει δημοφιλής τα τελευταία χρόνια είναι οι αλγόριθμοι **κοινωνικής νοημοσύνης** (*Swarm Intelligence*). Βασίζονται στη λογική αυτο-οργανωμένων, αποκεντρωμένων και συλλογικών συστημάτων, συνήθως λειτουργούν με βάση ένα πληθυσμό από άτομα (*agents*) που αλληλεπιδρούν τοπικά μεταξύ τους αλλά και με το περιβάλλον τους. Τα άτομα ακολουθούν συγκεκριμένους απλούς κανόνες, και ενώ δεν υπακούν σε κάποιους κεντρικούς κανόνες, η μεταξύ τους αλληλεπίδραση τα καθοδηγεί στην τοπική και ολική τους συμπεριφορά στο χώρο αναζήτησης, καταλήγοντας έτσι σε μία "ευφυή" ολική συμπεριφορά την οποία δεν αντιλαμβάνονται τα άτομα. Φυσικά παραδείγματα νοημοσύνης σμήνους είναι οι αποικίες μυρμηγκιών (*ant colony optimization*), σμήνη πουλιών, ψαριών, και αποικίες βακτηρίων.

Έναν αντίστοιχο αλγόριθμο υλοποιήσαμε στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αυτής, που προσομοιώνει την κοινωνική συμπεριφορά των ατόμων ενός σμήνους κινούμενο προς την εύρεση τροφής (*Particle swarm optimization*) και θα τον αναλύσουμε παρακάτω.

5.4.2 Βελτιστοποίηση μίας αντικειμενικής συνάρτησης

Για την περίπτωση βελτιστοποίησης ενός μόνο κριτηρίου f , το βέλτιστο είναι είτε μέγιστο είτε ελάχιστο αναλόγως την επιδίωξή μας, αν και συνήθως τα προβλήματα ανάγονται σε ελαχιστοποίησης επιλύοντας το αντίστροφο όπου απαιτείται. Στο σχήμα 5.5 φαίνεται μία συνάρτηση f ορισμένη στο χώρο των δύο διαστάσεων $\mathbb{X} = (X_1, X_2)$. Είναι προφανής ο διαχωρισμός τοπικών και ολικών βέλτιστων. Το ολικό βέλτιστο είναι βέλτιστο συνολικά στο χώρο \mathbb{X} ενώ το τοπικό βέλτιστο μόνο σε ένα υποσύνολο του \mathbb{X}

Ορισμός: Τοπικό ελάχιστο $\tilde{x}_l \in \mathbb{X}$ μίας αντικειμενικής συνάρτησης $f : \mathbb{X} \mapsto \mathbb{R}$ είναι μία μεταβλητή απόφασης για την οποία ισχύει:

$$\forall \tilde{x}_l \exists \epsilon > 0 : f(\tilde{x}_l) \leq f(x) \forall x \in \mathbb{X}, |x - \tilde{x}_l| < \epsilon \quad (5.1)$$

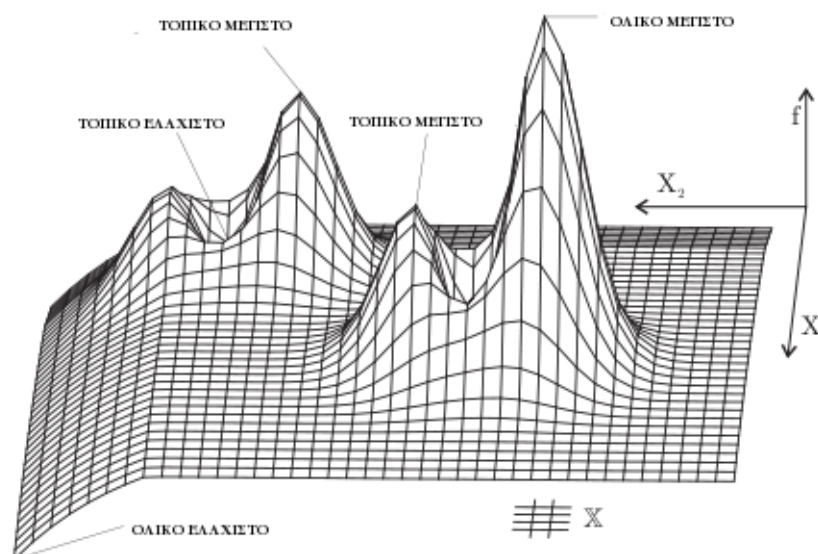
Αντίστοιχα μπορούμε να ορίσουμε το **τοπικό μέγιστο**.

Ορισμός: Τοπικό βέλτιστο $\tilde{x}_l^* \in \mathbb{X}$ μίας αντικειμενικής συνάρτησης $f : \mathbb{X} \mapsto \mathbb{R}$ είναι είτε ένα τοπικό ελάχιστο είτε ένα τοπικό μέγιστο

Ορισμός: Ολικό ελάχιστο $\tilde{x} \in \mathbb{X}$ μίας αντικειμενικής συνάρτησης $f : \mathbb{X} \mapsto \mathbb{R}$ είναι μία μεταβλητή απόφασης για την οποία ισχύει $f(\tilde{x}) \leq f(x) \forall x \in \mathbb{X}$.

Αντίστοιχα ορίζουμε το ολικό μέγιστο και το ολικό βέλτιστο.

Αυτό που πρέπει να παρατηρήσουμε είναι ότι υπάρχουν συναρτήσεις οι οποίες έχουν πολλαπλά ολικά βέλτιστα σημεία, όπως για παράδειγμα το συνημίτονο, το οποίο έχει



Σχήμα 5.5: Ολικά και τοπικά βέλτιστα σε συνάρτηση δύο διαστάσεων

ολικά μέγιστα $\tilde{x}_i = 2i\pi$ και ελάχιστα $\tilde{x}_i = (2i + 1)\pi \forall i \in \mathbb{Z}$. Τότε ορίζουμε ένα σύνολο X^* από βέλτιστες λύσεις στο \mathbb{X} παρά ένα μοναδικό ελάχιστο ή μέγιστο, λογική που επικρατεί στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση.

5.4.3 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

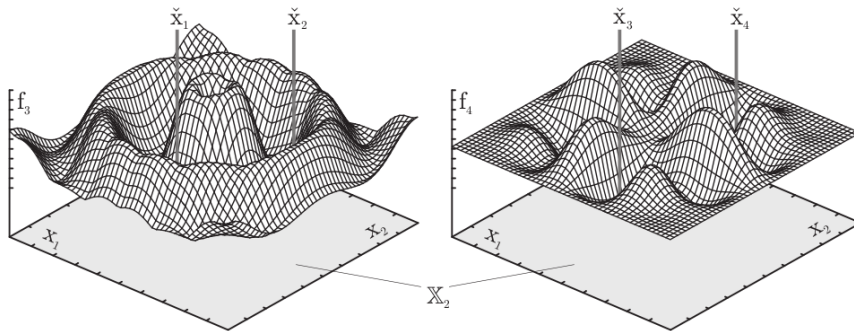
Οι τεχνικές ολικής βελτιστοποίησης δεν χρησιμοποιούνται μόνο για την εύρεση ελαχίστων ή μεγίστων μίας αντικειμενικής συνάρτησης, αλλά μπορούν να βρουν εφαρμογή και σε προβλήματα αποφάσεων και σύνθετα προβλήματα βελτιστοποίησης, όπου βελτιστοποιείται ένα σύνολο F από αντικειμενικές συναρτήσεις f_i , και καθεμία αντιπροσωπεύει ένα κριτήριο προς βελτιστοποίηση.

$$F = \{f_i : \mathbb{X} \mapsto Y_i : 0 < i \leq n, Y_i \subseteq \mathbb{R}\} \quad (5.2)$$

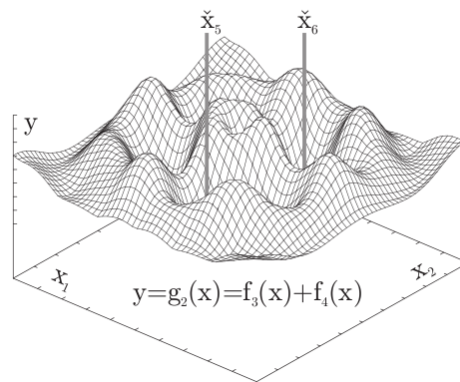
Οι αλγόριθμοι που βελτιστοποιούν συγχρόνως ανταγωνιστικές μεταξύ τους αντικειμενικές συναρτήσεις ονομάζονται πολυκριτηριακοί (*multi-objective*). Σε αυτή τη διαδικασία δεν έχει νόημα η εύρεση κάποιου ολικού ελαχίστου (ή μέγιστου), αλλά ορίζεται ένα σύνολο $X^* \subseteq \mathbb{X}$ ως βέλτιστο. Για παράδειγμα, στο σχήμα 5.6, ελαχιστοποιούμε τις αντικειμενικές συναρτήσεις f_3 και f_4 σε ένα χώρο δύο διαστάσεων $\mathbb{X}_2 \subset \mathbb{R}^2$ των πραγματικών αριθμών \mathbb{R} . Και οι δύο συναρτήσεις έχουν δύο ολικά ελάχιστα: η f_3 τα \tilde{x}_1 και \tilde{x}_2 ενώ η f_4 τα \tilde{x}_3 και \tilde{x}_4 , όπου $\tilde{x}_1 \neq \tilde{x}_2 \neq \tilde{x}_3 \neq \tilde{x}_4$.

Μέθοδος των βαρών (*weighted sums-linear aggregation*)

Η πιο απλή μέθοδος για να ορίσουμε το βέλτιστο σύνολο είναι υπολογίζοντας ένα άθροισμα $g(x)$ των αντικειμενικών συναρτήσεων $f_i \in F$. Κάθε αντικειμενική συνάρτηση πολλαπλασιάζεται με ένα βάρος w_i που αντιπροσωπεύει τη βαρύτητα του συγκεκριμένου κριτηρίου. Χρησιμοποιώντας βάρη με διαφορετικά πρόσημα μπορούμε να



Σχήμα 5.6: Δύο συναρτήσεις f_3 και f_4 με διαφορετικά ελάχιστα $\check{x}_1, \check{x}_2, \check{x}_3, \check{x}_4$



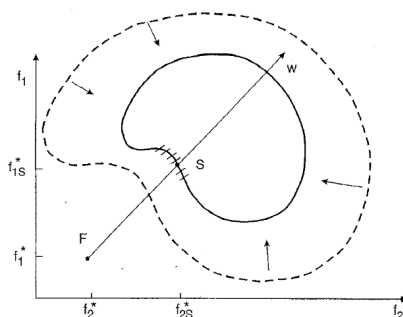
Σχήμα 5.7: Βελτιστοποίηση με χρήση της μεθόδου των βαρών

ελαχιστοποιήσουμε ένα κριτήριο μεγιστοποιώντας παράλληλα κάποιο άλλο. Έτσι με αυτή τη μέθοδο τα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης μετατρέπονται σε μονο-κριτηριακά προβλήματα.

$$g(x) = \sum_{i=1}^n w_i f_i(x) = \sum_{\forall f_i \in F} w_i f_i(x) \quad (5.3)$$

$$x^* \in \mathbf{X}^* \Leftrightarrow g(x^*) \geq g(x) \forall x \in \mathbb{X} \quad (5.4)$$

Πα παράδειγμα, από τις αντικειμενικές συναρτήσεις του σχήματος 5.6 f_3 και f_4 θέτοντας $w_3 = 1$ και $w_4 = 1$ προκύπτει το άθροισμα g_2 του σχήματος 5.7 με δύο ολικά ελάχιστα, τα \check{x}_5 και \check{x}_6 .



Σχήμα 5.8: Βελτιστοποίηση με προγραμματισμό στόχων

Προγραμματισμός στόχων (Goal programming)

Μία επέκταση της μεθόδου των βαρών είναι η μέθοδος προγραμματισμού στόχων, που επιδιώκει να ελαχιστοποιήσει την απόκλιση της λύσης από προκαθορισμένους στόχους που θέτει ο λήπτης της απόφασης (decision maker). Μία κοινή μοντελοποίηση είναι η εξής:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^N w_i |f_i(x) - T_i| \quad (5.5)$$

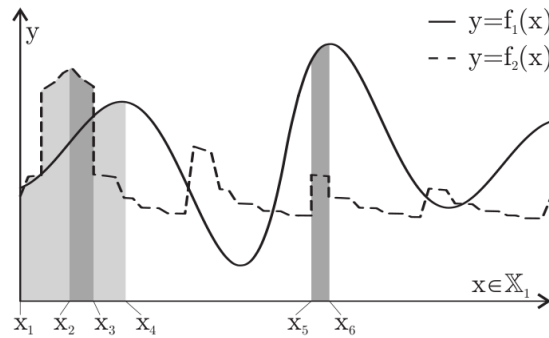
όπου T_i είναι ο στόχος που έχει τεθεί για την i -οστή αντικειμενική συνάρτηση και w_i οι προτεραιότητες των αντικειμενικών συναρτήσεων. Όπως και στη μέθοδο των βαρών, χρειάζεται μία εκ των προτέρων πληροφορία για τα βάρη και τους στόχους που θα χρησιμοποιηθούν κατά τη βελτιστοποίηση. Χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 5.8

Βελτιστοποίηση κατά Pareto

Η μαθηματική θεμελίωση της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης υπό ανταγωνιστικά κριτήρια που λαμβάνονται υπόψη με έναν ίσο τρόπο έγινε από τον Vilfredo Pareto. Η αριστεία Pareto έχει εφαρμοστεί εκτενώς στην οικονομική θεωρία, στη θεωρία παιγνίων, σε τεχνικά προβλήματα, ακόμη και σε κοινωνικές επιστήμες. Ορίζεται ένα μέτωπο (*frontier*) λύσεων που μπορεί να προκύψει από την «ανταπόδοση» (*trade-off*) πόρων μεταξύ ανταγωνιστικών αντικειμενικών συναρτήσεων με έναν βέλτιστο τρόπο. Χρησιμοποιώντας το παραγόμενο «μέτωπο» ο αποφασίζων (*decision-maker*, είτε άνθρωπος είτε υπολογιστής) μπορεί τελικά να επιλέξει τη ρύθμιση που θα καλύπτει βέλτιστα τον αρχικό σχεδιασμό. Η λογική της βελτιστότητας στην έννοια Pareto έγκειται στον ορισμό της κυριαρχίας των λύσεων:

Ορισμός (Κυριαρχία-Domination): Ένα στοιχείο x_1 κυριαρχεί (είναι προτιμότερο από) ένα στοιχείο x_2 ($x_1 \preceq x_2$) εάν το x_1 είναι «καλύτερο» από το x_2 σε τουλάχιστον μία αντικειμενική συνάρτηση και όχι «χειρότερο» σε όλες τις υπόλοιπες. Βασιζόμενοι στο σύνολο F των αντικειμενικών συναρτήσεων f , μπορούμε να γράψουμε:

$$x_1 \preceq x_2 \Leftrightarrow \forall i : 0 < i \leq n \Rightarrow \omega_i f_i(x_1) \leq \omega_i f_i(x_2) \wedge \exists j : 0 < j \leq n : \omega_j f_j(x_1) < \omega_j f_j(x_2) \quad (5.6)$$



Σχήμα 5.9: Βελτιστοποίηση με βάση την αρχή του μετώπου Pareto

$$\omega_i = \begin{cases} 1 & \text{εάν } f_i \text{ ελαχιστοποιείται} \\ -1 & \text{εάν } f_i \text{ μεγιστοποιείται} \end{cases} \quad (5.7)$$

Με διαφορετικό τρόπο από τη μέθοδο των βαρών, οι παράγοντες ω_i περιέχουν μόνο την πληροφορία του προσήμου, που μας επιτρέπει να μεγιστοποιούμε κάποιες αντικειμενικές συναρτήσεις ενώ ελαχιστοποιούμε άλλες.

Ορισμός (Pareto optimal): Ένα στοιχείο $x^* \in \mathbb{X}$ είναι άριστο κατά Pareto (Pareto optimal) ή μη κυριαρχούμενο, εάν δεν κυριαρχείται από κανένα άλλο στοιχείο στο χώρο αναζήτησης \mathbb{X} του προβλήματος. Με τους όρους της βελτιστοποίησης Pareto, το \mathbf{X}^* καλείται σύνολο Pareto ή μέτωπο Pareto (Pareto Frontier).

$$x^* \in \mathbf{X}^* \Leftrightarrow \nexists x \in \mathbb{X} : x \preceq x^* \quad (5.8)$$

Ορισμός (Pareto optimal Set): Βέλτιστο σύνολο Pareto για ένα δοσμένο σύνολο αντικειμενικών συναρτήσεων πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης ορίζεται ως:

$$\mathbf{X}^* = \{x^* \in \mathbb{X} \mid \nexists x' \in \mathbb{X} : f(x') \preceq f(x^*)\} \quad (5.9)$$

Για παράδειγμα, ας θεωρήσουμε το σχήμα 5.9, όπου οι f_1 και f_2 πρέπει να μεγιστοποιηθούν και άρα θεωρούμε $\omega_1 = \omega_2 = -1$. Οι περιοχές με το σκούρο γκρι χρώμα αναπαριστούν το μέτωπο Pareto, δηλαδή το βέλτιστο σύνολο $\mathbf{X}^* = [x_2, x_3] \cup [x_5, x_6]$. Όλα τα υπόλοιπα σημεία είναι κυριαρχούμενα, άρα μη βέλτιστα.

Τα σημεία στην περιοχή ανάμεσα στα x_1 και x_2 κυριαρχούνται από άλλα σημεία στην ίδια περιοχή, ή στην περιοχή $[x_2, x_3]$ καθώς και οι δύο αντικειμενικές συναρτήσεις μπορούν να βελτιωθούν καθώς το x αυξάνεται. Ξεκινώντας από το πιο αριστερό σημείο του \mathbb{X} , το x_1 , με μία μικρή μεταβολή Δ δεξιά βρίσκουμε ότι το σημείο $x_1 + \Delta$ κυριαρχεί επί του x_1 αφού $f_1(x_1 + \Delta) > f_1(x_1)$ και $f_2(x_1 + \Delta) > f_2(x_1)$, έως ότου φτάσουμε στο σημείο x_2 , που είναι το ολικό μέγιστο της f_2 και δεν μπορεί να κυριαρχείται από κανένα άλλο σημείο στο \mathbb{X} με βάση τη σχέση 5.7

Στη συνέχεια η f_2 μειώνεται ενώ η f_1 αυξάνεται. Αν μετακινηθούμε κατά Δ δεξιά θα ισχύει $f_2(x_2 + \Delta) < f_2(x_2)$ και $f_1(x_2 + \Delta) > f_1(x_2)$. Η μία αντικειμενική συνάρτηση μπορεί να μεγιστοποιείται μόνο εάν μειώνεται η τιμή της άλλης, έτσι τα σημεία αυτά είναι μη κυριαρχούμενα από το x_2 . Ωστόσο, κάποιες από τις τιμές της f_2 σε κάποια

$x \in [x_1, x_2]$ ενδέχεται να είναι μεγαλύτερες από την $f_2(x_2 + \Delta)$, όπου ισχύει $f_1(x_2 + \Delta) > f_1(x)$. Αυτό σημαίνει ότι κανένα σημείο στο διάστημα $[x_1, x_2]$ δεν κυριαρχεί κάποιο σημείο στο $[x_2, x_4]$ καθώς η f_1 αυξάνεται ως το x_4 .

Στο σημείο x_3 , η f_2 μειώνεται απότομα, χαμηλότερα από το σημείο $f_2(x_5)$. Καθώς οι τιμές της f_1 στα σημεία στο διάστημα $[x_5, x_6]$ είναι μεγαλύτερες από αυτές του διαστήματος (x_3, x_4) , όλα τα σημεία στο διάστημα $[x_5, x_6]$ κυριαρχούν αυτά του (x_3, x_4) . Αντίστοιχα μπορούμε να συμπεράνουμε για όλα τα σημεία στη λευκή περιοχή ανάμεσα στα x_4 και x_5 και μετά το x_6 , λαμβάνοντας όμοιες σχέσεις. Όλα κυριαρχούνται από τις μη κυριαρχούμενες περιοχές που αναλύσαμε παραπάνω.

5.4.4 Χειρισμός περιορισμών

Κυρίαρχο ρόλο στη βελτιστοποίηση προβλημάτων παίζουν οι περιορισμοί που κατευθύνουν τη λύση σε συγκεκριμένη υποπεριοχή. Σε πολλά προβλήματα, p περιορισμοί ανισότητας g και q περιορισμοί ισότητας h συμπληρώνουν τις αντικειμενικές συναρτήσεις. Τότε μία υποψήφια λύση x είναι εφικτή (*feasible*) αν $g_i(x) \geq 0 \forall i = 1, 2, \dots, p$ και $h_i(x) = 0 \forall i = 1, 2, \dots, q$ ισχύουν για το x . Προφανώς, μόνοσε εφικτή περιοχή μπορεί να βρεθεί λύση (ελάχιστο ή μέγιστο) για δεδομένο πρόβλημα βελτιστοποίησης.

Συναρτήσεις ποινής (Penalty functions)

Η πιο συνήθης προσέγγιση του χειρισμού των περιορισμών (ειδικά σε μονοκριτηριακά προβλήματα) γίνεται με την εισαγωγή «ποινής». Οι περιορισμοί συνδυάζονται με την αντικειμενική συνάρτηση f , καταλήγοντας σε μία νέα συνάρτηση f' η οποία βελτιστοποιείται στη θέση της προηγούμενης. Με αυτό τον τρόπο πετυχαίνουμε ότι η μη εφικτή περιοχή θα εκφράζεται μέσω της νέας αν συνάρτησης με μία υπερβολική τιμή που θα απορρίπτεται από τον αλγόριθμο βελτιστοποίησης. Η διαδικασία αυτή μπορεί να εφαρμοστεί με πολλούς τρόπους, συνήθως όμως προστίθεται μία συνάρτηση του περιορισμού.

Περιορισμοί ως επιπλέον αντικειμενικές συναρτήσεις

Ένας ακόμη τρόπος χειρισμού των περιορισμών ενός προβλήματος είναι με μετασχηματισμό τους σε νέες αντικειμενικές συναρτήσεις. Εάν πρέπει να ισχύει $g(x) \geq 0$, μπορούμε να το μετασχηματίσουμε σε $f^*(x) = \min \{-g(x), 0\}$ προς ελαχιστοποίηση. Αυτή ελαχιστοποιείται καθώς δεν έχει νόημα η μεγιστοποίηση της g πέραν του 0.

5.5 Particle Swarm Optimization

5.5.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της βελτιστοποίησης συνεχών μη γραμμικών συναρτήσεων, αναπτύχθηκε η στοχαστική μέθοδος των ατόμων σμήνους (*Particle Swarm Optimization*) από τους J. Kennedy και R. Eberhart. Η μέθοδος αυτή αναπτύχθηκε μέσω της προσομοίωσης απλοποιημένων κοινωνικών μοντέλων, και ενώ υφίσταται η μεταφορά στο κοινωνικό μοντέλο, το αλγόριθμος μπορεί να υπάρξει και χωρίς τη μεταφορική του έννοια. Η βασική ιδέα είναι σχετικά απλή και αναπτύσσεται με λίγες γραμμές προγραμματιστικού κώδικα. Χρησιμοποιεί συγκεκριμένους μαθηματικούς τελεστές, και ενώ συγκλίνει ταχύτατα, η υπολογιστική του χρονική και χωρική πολυπλοκότητα είναι μικρή (μικρές

απαιτήσεις σε μνήμη), γι' αυτό έχει βρει εφαρμογή σε πλήθος προβλημάτων βελτιστοποίησης.

Η μέθοδος PSO έχει ρίζες σε δύο βασικές μεθοδολογίες. Η πιο προφανής είναι η οικογένεια της «τεχνητής ζωής» (*artificial life- A-life*) και στα σμήνη πουλιών, ψαριών και γενικά στη θεωρία σμήνους. Επίσης σχετίζεται άμεσα με τους εξελικτικούς αλγόριθμους (*evolutionary computation*) και στους γενετικούς αλγόριθμους (*genetic algorithms*).

Συνοψίζοντας, τα βασικά της πλεονεκτήματα, συγκρινόμενη με άλλες μεθόδους, είναι τα εξής:

- *Ταχύτερη σύγκλιση*, η μέθοδος PSO μπορεί να παράγει αποτελέσματα ίδιας ποιότητας σε σημαντικά λιγότερες αξιολογήσεις υποψηφίων λύσεων (*fitness evaluations*) και περιορισμών.
- *Ευέλικτη* ως προς το εύρος των προβλημάτων που μπορούν να λυθούν. Μπορεί να εφαρμοστεί σε προβλήματα με συναρτήσεις που παρουσιάζουν ασυνέχειες, που δεν είναι παραγωγίσιμες σε σημεία, και μη κυρτές συναρτήσεις, όπου οι μέθοδοι μερικών παραγώγων δεν είναι αποτελεσματικές
- *Ποιοτική*, τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι πιο βελτιωμένα συγκρινόμενα με αυτά αντίστοιχων μεθόδων στη βιβλιογραφία, και ο αλγόριθμος έχει εξαιρετική ικανότητα να μην εμπλέκεται σε τοπικά βέλτιστα. Συγκρινόμενος με τους γενετικούς αλγόριθμους και άλλες ευριστικές τεχνικές, έχει ένα ευέλικτο και ισορροπημένο μηχανισμό βελτίωσης της ικανότητας ολικής και τοπικής αναζήτησης.
- «*Φτηνότερη*» σε υπολογιστική ισχύ, καθώς ο αλγόριθμος λειτουργεί με «διορατικότητα» και δεν χρειάζεται μετασχηματισμούς που καταναλώνουν υπολογιστική ισχύ, όπως οι γενετικοί αλγόριθμοι.

Ωστόσο, υπάρχουν κάποιοι περιορισμοί στη χρήση του, κυρίως λόγω της στοχαστικής φύσης των εξελικτικών αλγορίθμων, που καθιστούν δύσκολο το χειρισμό των περιορισμών ισότητας, και έτσι είναι δύσκολη η εύρεση συνόλου αρχικών λύσεων στην εφικτή περιοχή, ειδικά σε προβλήματα με «στενή» εφικτή περιοχή.

5.5.2 Βασικά χαρακτηριστικά της μεθόδου

Οι αλγόριθμοι PSO βελτιστοποιούν μία αντικειμενική συνάρτηση διεξάγοντας μία στοχαστική αναζήτηση βασισμένη στον «πληθυσμό» του αλγορίθμου. Ο πληθυσμός αποτελείται από πιθανές λύσεις, που καλούνται άτομα (*particles*, μεταφορά ατόμων ενός σμήνους), τα οποία στην αρχή της διαδικασίας αρχικοποιούνται τυχαία εντός του χώρου αναζήτησης, της εφικτής περιοχής δηλαδή, και «πετούν» ελεύθερα εντός του πολυδιάστατου χώρου αναζήτησης. Στη διαδικασία των επαναλήψεων, κάθε άτομο ανανεώνει την «ταχύτητα» (*velocity*) και τη «θέση» (*position*) του, βασιζόμενο στην βέλτιστη προηγούμενη εμπειρία του ίδιου (*cognitive*) αλλά και του συνολικού πληθυσμού έως τη συγκεκριμένη στιγμή (*social*). Ο κανόνας της ανανέωσης της θέσης και της ταχύτητας έχει το ρόλο του να κατευθύνει το «σμήνος» προς μία βέλτιστη περιοχή με καλύτερη τιμή για την αντικειμενική συνάρτηση, βάση μίας σχέσης ή και μίας συνάρτησης καταλληλότητας (*fitness function*), και τελικά όλα τα άτομα συγκεντρώνονται γύρω από τη βέλτιστη περιοχή ή σημείο, όπου ελέγχεται πιο σχολαστικά ο χώρος αναζήτησης για μεγαλύτερη ακρίβεια. Έτσι, η βασική μέθοδος συνίσταται από τα εξής βήματα:

- **Βήμα 1ο: Αρχικοποίηση.** Στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας ρυθμίζεται η θέση και η ταχύτητα όλων των ατόμων τυχαία, εντός της εφικτής περιοχής του προβλήματος, ώστε να ισχύουν οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας.
- **Βήμα 2ο: Ανανέωση της ταχύτητας.** Σε κάθε επανάληψη, οι ταχύτητες όλων των ατόμων ανανεώνονται με βάση την ακόλουθη σχέση:

$$\vec{u}_i \leftarrow \omega \vec{u}_i + c_1 r_1 (\vec{p}_{i,best} - \vec{p}_i) + c_2 r_2 (\vec{g}_{best} - \vec{p}_i) \quad (5.10)$$

όπου \vec{p}_i και \vec{u}_i είναι η θέση και η ταχύτητα του ατόμου i , αντίστοιχα, $\vec{p}_{i,best}$ και \vec{g}_{best} είναι οι θέσεις με την καλύτερη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που έχει βρεθεί έως αυτή τη στιγμή από το άτομο i και ολόκληρο τον πληθυσμό, αντίστοιχα. Οι μεταβλητές r_1, r_2 λαμβάνουν τυχαία τιμή στο διάστημα $[0, 1]$ εισάγοντας ένα στοχαστικό χαρακτήρα στην αναζήτηση, ενώ οι c_1, c_2 αποτελούν παράγοντες βαρύτητας. Η ω είναι μία παράμετρος που ελέγχει τη δυναμική της «πτήσης» και καθορίζει το βαθμό στον οποίο τα άτομα αναζητούν λύσεις στην κοντινή τους περιοχή ή ακολουθούν ταχύτατα το ολικά καλύτερο άτομο, και παίζει ουσιαστικό ρόλο στην αποφυγή των τοπικών βέλτιστων. Μεταβάλλεται γραμμικά από τη σχέση:

$$\omega = \omega_{max} - \left(\frac{\omega_{max} - \omega_{min}}{iterations} \right) * iter \quad (5.11)$$

όπου $\omega_{max}, \omega_{min}$ η μέγιστη και η ελάχιστη τιμή που έχουμε ορίσει, αντίστοιχα, $iterations$ ο συνολικός αριθμός των επαναλήψεων και $iter$ η συγκεκριμένη επανάληψη.

- **Βήμα 3ο: Ανανέωση της θέσης.** Μεταξύ συνεχόμενων επαναλήψεων, οι θέσεις όλων των ατόμων ανανεώνονται σύμφωνα με τον ακόλουθο κανόνα:

$$\vec{p}_i \leftarrow \vec{p}_i + \vec{u}_i \quad (5.12)$$

- **Βήμα 4ο: Ανανέωση της μνήμης.** Τα στοιχεία $\vec{p}_{i,best}$ και \vec{g}_{best} ανανεώνονται εφόσον οι αντίστοιχες προϋποθέσεις ισχύουν:

$$\vec{p}_{i,best} \leftarrow \vec{p}_i \quad \text{εάν } f(\vec{p}_i) < f(\vec{p}_{i,best}) \quad (5.13)$$

$$\vec{g}_{best} \leftarrow \vec{p}_i \quad \text{εάν } f(\vec{p}_i) < f(\vec{g}_{best}) \quad (5.14)$$

όπου $f(\vec{x})$ είναι η αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση.

- **Βήμα 5ο: Εξέταση κριτηρίων τερματισμού.** Ο αλγόριθμος επαναλαμβάνει τα βήματα 2 έως 4 έως ότου να ικανοποιούνται συγκεκριμένες συνθήκες τερματισμού. Μετά τον τερματισμό, εξάγονται οι λύσεις \vec{g}_{best} και $f(\vec{g}_{best})$.

5.5.3 Προσέγγιση της μεθόδου PSO για πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Κατά τη διαδικασία της στοχαστικής αναζήτησης και βελτιστοποίησης για το χειρισμό πολυκριτηριακών προβλημάτων, δύο βασικά ζητήματα πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά το σχεδιασμό του αλγορίθμου. Το πρώτο είναι η τακτική της αξιολόγησης καταλληλότητας των πιθανών λύσεων, έτσι ώστε ο αλγόριθμος να συγκλίνει προς το βέλτιστο σύνολο Pareto (*Pareto optimal set*). Το δεύτερο στοιχείο είναι η διασπορά του πληθυσμού εντός του χώρου αναζήτησης, που πρέπει να διατηρείται ώστε να παράγεται ένα αρκετά καταναμημένο μέτωπο Pareto.

Όπως περιγράψαμε και παραπάνω, στην πολυκριτηριακή λήψη αποφάσεων δεν υπάρχει ένα βέλτιστο σημείο. Αποδοτική λύση (μη κυριαρχούμενη ή άριστη κατά Pareto) θεωρείται η λύση, όπου καμία αύξηση δεν μπορεί να συντελεστεί σε μία αντικειμενική συνάρτηση χωρίς την παράλληλη μείωση σε τουλάχιστον μία από τις υπόλοιπες αντικειμενικές. Η πλήρης ικανοποίηση της μίας αντικειμενικής συνάρτησης αναμφίβολα αποκλείει την πλήρη ικανοποίηση των υπόλοιπων.

Ορίζουμε το πρόβλημα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης υπό περιορισμούς ως ακολούθως:

$$\text{Min}_{w.r.t.x} f_i(x), \quad \mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n \quad (5.15)$$

υπό τους περιορισμούς:

$$g_i(\mathbf{x}) \leq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (5.16)$$

$$h_i(\mathbf{x}) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (5.17)$$

όπου $f_i(\mathbf{x})$, $g_i(\mathbf{x})$, $h_i(\mathbf{x})$ είναι μονοδιάστατα μεγέθη που προκύπτουν από συναρτήσεις του διανύσματος απόφασης \mathbf{x} . Τα στοιχεία x_i του $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ είναι οι μεταβλητές απόφασης, $f(\mathbf{x}) = [f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})]^T$ το διάνυσμα των αντικειμενικών συναρτήσεων, $g_i(\mathbf{x})$ οι περιορισμοί ανισότητας και $h_i(\mathbf{x})$ οι περιορισμοί ισότητας.

Όπως αναλύσαμε και παραπάνω, ο στόχος είναι να βρεθεί το σύνολο των άριστων κατά Pareto λύσεων, και να παραχθεί ένα μέτωπο Pareto, από το οποίο μπορούν να συλλεχθούν λύσεις του προβλήματος που θα επιλέξει ο αποφασίζων, με βάση την αντικειμενική συνάρτηση που χρειάζεται να ικανοποιηθεί κάθε φορά σε διαφορετικό βαθμό. Έτσι γίνεται ανταλλαγή (*trade-off*) ποσοτήτων μεταξύ των αντικειμενικών συναρτήσεων εντός του συνόλου Pareto.

Παρουσίαση του προτεινόμενου αλγορίθμου

Καταλήγουμε ότι η προσέγγιση της μεθόδου για πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση απαιτεί τη χρήση ενός συνόλου ή πίνακα "A" (*archive*) στον οποίο αποθηκεύονται οι μη κυριαρχούμενες λύσεις κατά τη διαδικασία αναζήτησης στην εφικτή περιοχή, και ανανεώνεται σε κάθε επανάληψη με βάση τα κριτήρια Pareto, ενώ στην αρχή της διαδικασίας ο πίνακας αρχικοποιείται κενός. Η ακριβής μεθοδολογία για τη διαδικασία της εξαγωγή των τοιχείων του συνόλου "A" θα αναλυθεί παρακάτω.

Αρχικά γίνεται η αρχικοποίηση όλων των στοιχείων που χρησιμοποιούνται με τη συνάρτηση **Initialization()**. Οι θέσεις των ατόμων τίθενται εντός των ορίων της εφικτής περιοχής με χρήση τυχαίας συνάρτησης ώστε να είναι τυχαία κατανεμημένα στο χώρο αναζήτησης. Η αρχική τους ταχύτητα τίθεται μηδενική, καθώς η τιμή θα μεταβληθεί στην πρώτη επανάληψη. Από τις αρχικές θέσεις γίνεται η επιλογή του ολικού βέλτιστου σημείου του σμήνους (g_{best}) σύμφωνα με το κριτήριο Pareto (συγκρίνονται ανά δύο), ενώ το "προσωπικό" βέλτιστο σημείο του κάθε ατόμου ($p_{best,i}$) είναι η αρχική του θέση.

Κατά την επαναληπτική διαδικασία, η συνάρτηση **CheckConstraints()** ελέγχει αν οι θέσεις των ατόμων, δηλαδή οι πιθανές λύσεις, βρίσκονται εντός εφικτής περιοχής και καλύπτουν τους περιορισμούς ισότητας και ανισότητας. Εάν δεν καλύπτονται οι περιορισμοί ανισότητας η αντίστοιχη πιθανή λύση απορρίπτεται, οι συντεταγμένες όμως του ατόμου στον πολυδιάστατο χώρο των μεταβλητών απόφασης μεταβάλλονται έτσι ώστε να βρίσκεται στα όρια του χώρου αναζήτησης, άρα να μην εξέρχονται τα άτομα από την εφικτή περιοχή.

Η συνάρτηση **GlobalGuide()** είναι σχεδιασμένη έτσι ώστε να επιλέγει από τα προσωπικά βέλτιστα των ατόμων ($p_{best,i}$) το ολικό (g_{best}), με διαδικασία επιλογής τουρνουά (*tournament selection*) ανάμεσα στα άτομα και ένα μηχανισμό ασαφοποίησης κατά

τη βελτιστοποίηση. Ο αλγόριθμος τερματίζει όταν ολοκληρωθεί ο αριθμός των προεπιλεγμένων επαναλήψεων. Χαρακτηριστικά φαίνεται η διαδικασία στον ψευδοκώδικα 1.20

```

1.1  $A := \emptyset;$ 
1.2 for  $i \leftarrow 1$  to  $N$  do
1.3    $\{x_i, u_i, g_{best,i}, p_{best,i}\} := \text{Initialization}();$ 
1.4 end
1.5 for  $t \leftarrow 1$  to  $iterations$  do
1.6   for  $i \leftarrow 1$  to  $N$  do
1.7     for  $d \leftarrow 1$  to  $M$  do
1.8        $u_{id} := \omega u_{id} + c_1 r_1 (P_{id} - x_{id}) + c_2 r_2 (G_{id} - x_{id});$ 
1.9        $x_{id} := x_{id} + \chi u_{id};$ 
1.10     end
1.11      $x_i := \text{CheckConstraints}(x_i);$ 
1.12     if  $x_i \not\leq \alpha \forall \alpha \in A$  then
1.13        $A := \{\alpha \in A \mid \alpha \not\leq x_i\};$ 
1.14        $A := A \cup x_i;$ 
1.15     end
1.16     if  $x_i \leq p_{best,i} \vee (x_i \not\leq p_{best,i} \wedge p_{best,i} \not\leq x_i)$  then
1.17        $p_{best,i} := x_i;$ 
1.18     end
1.19    $g_{best,i} := \text{GlobalGuide}(x_i, A);$ 
1.20 end

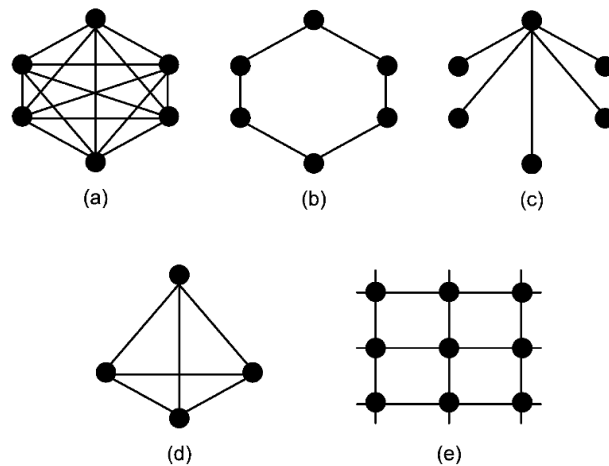
```

Algorithm 1: Η βασική διαδικασία του αλγορίθμου MOPSO

Επιλογή οδηγών του «σμήνους»

Σημαντικό ρόλο στο χειρισμό πολυκριτηριακών προβλημάτων παίζει η διαδικασία επιλογής των οδηγών των ατόμων, που είναι απαραίτητη για τη σύγκλιση του αλγορίθμου στο μέτωπο Pareto. Έτσι πρέπει να γίνεται προσεκτική επιλογή των θέσεων προσωπικών και ολικών βέλτιστων ($p_{best,i}$ και g_{best}) σε κάθε επανάληψη. Αντίθετα από τα μονοκριτηριακά προβλήματα, όπου η επιλογή γίνεται με απλή σύγκριση, στα πολυκριτηριακά προβλήματα δεν μπορούμε να κάνουμε τέτοια σύγκριση, αλλά εφαρμόζουμε τα κριτήρια της κυριαρχίας κατά Pareto σε δύο συγκρινόμενες θέσεις (πιθανές λύσεις) του χώρου αναζήτησης. Σε πολλές εφαρμογές, ο ολικός οδηγός g_{best} επιλέγεται για κάθε ένα άτομο ξεχωριστά, είτε χρησιμοποιείται αμόμη ένας τοπικός οδηγός, ρυθμίζοντας έτσι την τοπολογία του σμήνους και τη σχέση των ατόμων μεταξύ τους, όπως στο σχήμα 5.10.

Στην προτεινόμενη εφαρμογή εφαρμόσαμε έναν μηχανισμό ασαφопоίησης για την επιλογή του ολικού οδηγού g_{best} , χρησιμοποιώντας την τοπολογία (α) του σχήματος 5.10. Ο μηχανισμός αυτός μετατρέπει το σημείο g_{best} σε περιοχή, στην οποία κάθε σημείο έχει διαφορετική πιθανότητα να επιλεγεί ως το g_{best} . Η σχέση που χρησιμοποιήθηκε για την ασαφопоίηση είναι η $N(g_{best}, std^2)$, που αντιπροσωπεύει ένα σύνολο από κανονικά κατανομημένα άτομα με το g_{best} ως αναμενόμενη τιμή και std ως τυπική απόκλιση. Αρχικά, σε κάθε επανάληψη, το αυθεντικό g_{best} επιλέγεται με τουρνουά από τις προσωπικές βέλτιστες τιμές των ατόμων ($p_{best,i}$) ως η καλύτερη με βάση τα κριτή-



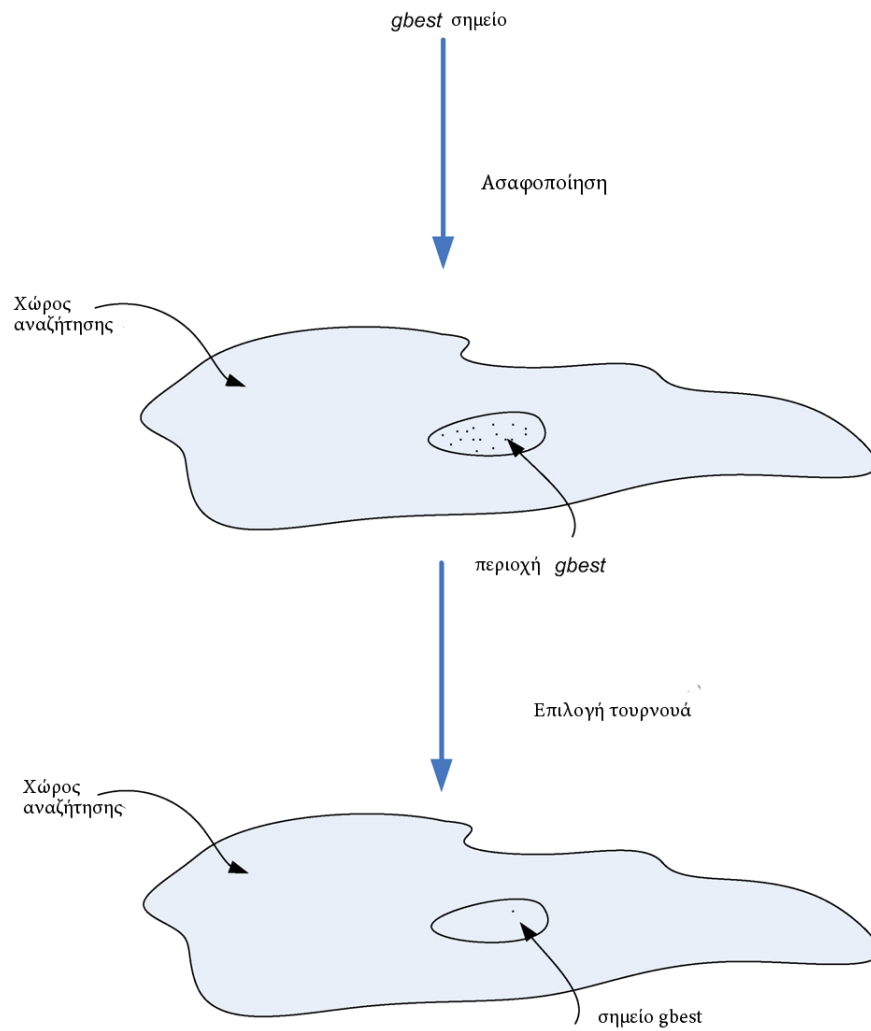
Σχήμα 5.10: Τοπολογίες σμήνους (a) Ολικός οδηγός. (b) Τοπολογία δακτυλίου. (c) Τοπολογία περιστροφής. (d) Τοπολογία πυραμίδας. (e) Τοπολογία Von Neumann.

ρια Pareto, αλλά δε χρησιμοποιείται απευθείας για την ανανέωση της θέσης και της ταχύτητας των ατόμων. Αντί για αυτό, παράγεται μία περιοχή γύρω από το σημείο με χρήση της κανονικής κατανομής, στα σημεία της οποίας εκτελείται το τουρνουά για την επιλογή του καλύτερου, που θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια (σχήμα 5.11). Είναι προφανές ότι μεγάλες τιμές της τυπικής απόκλισης θα προκαλέσουν και μεγάλη περιοχή για επιλογή σημείων. Κατά τη διαδικασία δυαδικής επιλογής τουρνουά (*binary tournament selection*), επιλέγονται κάθε φορά δύο σημεία, τα οποία συγκρίνονται με κριτήριο κάποια συνάρτηση καταλληλότητας (*fitness function*), όπου εδώ χρησιμοποιούμε την συνάρτηση αριστείας Pareto, και το σημείο που αξιολογείται ως καλύτερο επιλέγεται για το επόμενο τουρνουά, ενώ το άλλο σημείο απορρίπτεται.

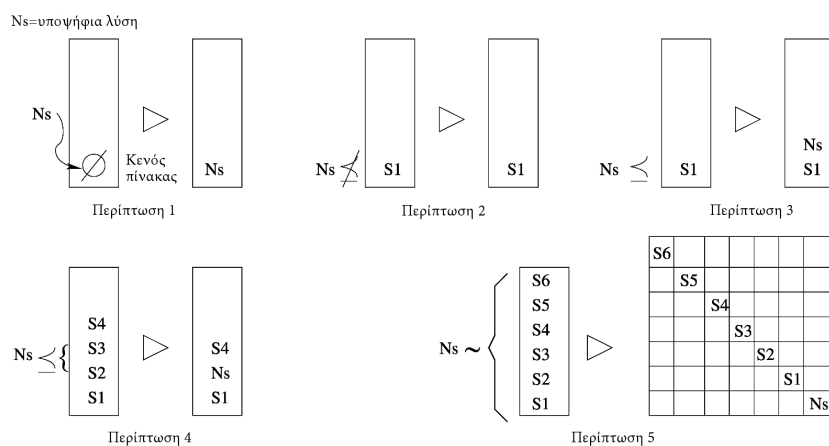
Μηχανισμός εξαγωγής συνόλου Pareto με χρήση ουράς

Η κεντρική λειτουργία του μηχανισμού εξαγωγής συνόλου Pareto είναι να διατηρεί και να ανανεώνει ένα αρχείο από τις μη κυριαρχούμενες λύσεις που συναντά ο αλγόριθμος κατά την ευριστική διαδικασία αναζήτησης. Το σύνολο αυτό αλληλεπιδρά με τον πληθυσμό κατά την επαναληπτική διαδικασία έτσι ώστε να αποθηκεύονται οι μη κυριαρχούμενες λύσεις και να απορρίπτονται οι κυριαρχούμενες που ήδη υπάρχουν. Οι μη κυριαρχούμενες λύσεις συγκρίνονται με τα υπάρχοντα στοιχεία του συνόλου σε μία βάση ένα προς ένα, ως προς τα κριτήρια Pareto και επιλέγονται εάν ισχύουν τα παρακάτω κριτήρια:

- Δεν υπάρχει καμία λύση ήδη αποθηκευμένη στο σύνολο
- Το σύνολο δεν είναι πλήρες και η υποψήφια λύση δεν κυριαρχείται από ή είναι ίση με κάποια λύση που ήδη υπάρχει στο σύνολο και είναι σε πιο αραιή περιοχή (όπως θα εξηγήσουμε παρακάτω)
- Η υποψήφια λύση κυριαρχεί κάποια υπάρχουσα λύση στο σύνολο



Σχήμα 5.11: Περιγραφή της διαδικασίας επιλογής του οδηγού του σμήνους



Σχήμα 5.12: Πιθανές καταστάσεις ελέγχου του συνόλου Pareto.

- Το σύνολο είναι πλήρες αλλά η υποψήφια λύση είναι μη κυριαρχούμενη και είναι σε πιο αραιή περιοχή από τουλάχιστον μία λύση αποθηκευμένη στο σύνολο.

Για τον έλεγχο και την αντικατάσταση των σημείων στο σύνολο Pareto εισάγουμε μία διαδικασία με χρήση ουράς έτσι ώστε μετά από ικανό αριθμό επαναλήψεων να παραμένουν οι μη κυριαρχούμενες λύσεις. Η διαδικασία αυτή λειτουργεί ως εξής: Κάθε υποψήφια λύση που ελέγχεται για εισαγωγή, συγκρίνεται με κάθε στοιχείο του συνόλου, ξεκινώντας από το πρώτο, έως ότου βρεθεί κάποιο το οποίο θα είναι κυριαρχούμενο από το νέο. Τότε το νέο παίρνει τη θέση του, και το ίδιο μεταφέρεται μία θέση μπροστά, διαδικασία που καταλήγει σε μετάθεση όλων των στοιχείων από το σημείο που εισάγεται το νέο και μετά, με αύξηση του αριθμού των στοιχείων κατά ένα, εάν ο πίνακας δεν είναι πλήρης. Εάν ο πίνακας είναι πλήρης, τότε η διαδικασία αυτή καταλήγει στην απόρριψη του τελευταίου στοιχείου του συνόλου και διατηρεί το σύνολο κατά κάποιο τρόπο ταξινομημένο. Η λογική αυτή φαίνεται στο σχήμα 5.12.

Κατά την ευριστική πολυκριτηριακή διαδικασία βελτιστοποίησης, καθώς ο αλγόριθμος τείνει να δημιουργήσει ένα διακριτό στιγμιότυπο ενός πιθανώς συνεχούς μετώπου Pareto, είναι αναγκαίο να κατανέμονται οι λύσεις όσο περισσότερο γίνεται στην καμπύλη των ανταλλαγών (*trade-off*). Επιπλέον, η ομοιομορφία μεταξύ των κατανεμημένων λύσεων, είναι ουσιαστική για την επίτευξη κατάλληλου συνόλου για περαιτέρω επεξεργασία και επιλογή των κατάλληλων λύσεων που ικανοποιούν το εκάστοτε πρόβλημα.

Μηχανισμός αξιολόγησης πυκνότητας σμήνους

Με τη συγκεκριμένη διαδικασία αξιολογείται η πυκνότητα της περιοχής ενός ατόμου που εξετάζεται, σε σύγκριση με κάποιο στοιχείο του συνόλου, έτσι ώστε να αποθηκεύονται στο σύνολο Pareto περισσότερα στοιχεία από πιο αραιή περιοχή. Η λογική αυτής της διαδικασίας καθώς συγκρίνονται ένα στοιχείο του συνόλου Pareto με την υποψήφια λύση, είναι ο υπολογισμός της κανονικοποιημένης ευκλείδειας απόστασης του στοιχείου του συνόλου από κάθε άλλο στοιχείο του συνόλου, ο αντίστοιχος υπολογισμός των αποστάσεων του νέου σημείου από κάθε στοιχείο του συνόλου, και η σύγκριση του αριθμού των στοιχείων του συνόλου που βρίσκονται εντός των νοητών

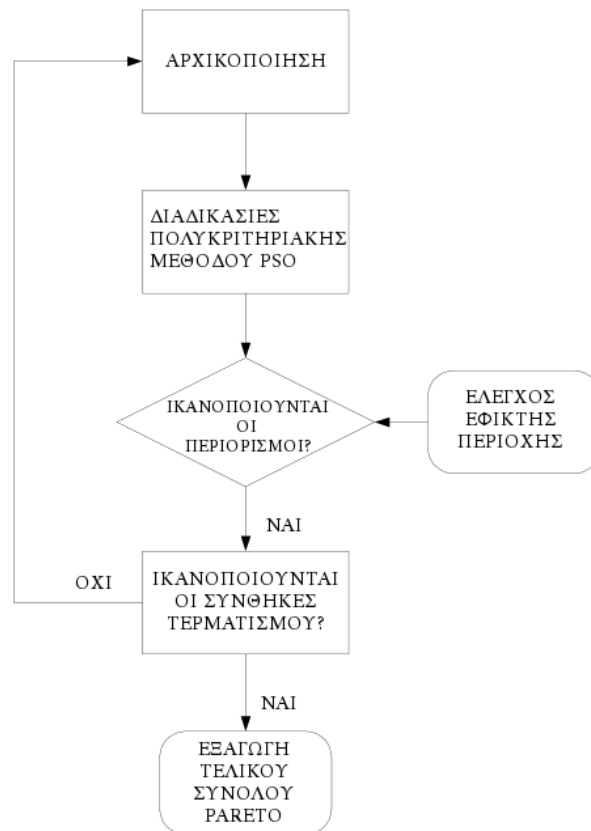
σφαιρών που δημιουργούνται στο διανυσματικό χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων με κέντρο τα δύο σημεία και ακτίνα μία παράμετρο που ορίζουμε εκ των προτέρων. Έτσι, με κατάλληλη ρύθμιση της παραμέτρου της ακτίνας ο αλγόριθμος επιδιώκει να αποθηκεύει στο σύνολο Pareto σημεία όσο το δυνατόν πιο κατανομημένα στο μέτωπο Pareto.

Χειρισμός περιορισμών

Η ικανοποίηση των περιορισμών καθορίζει και αν θα βρίσκονται οι λύσεις στην εφικτή περιοχή, συνεπώς είναι απαραίτητος ο έλεγχός τους πριν τη διαδικασία εξαγωγής στοιχείων για το σύνολο Pareto. Για τις περισσότερες προσεγγίσεις βασισμένες σε στοχαστική αναζήτηση, ο τρόπος χειρισμού των περιορισμών πάντα έχει ένα βαθύ αντίκτυπο στην ποιότητα των λύσεων που εξάγονται. Οι κυριότερες στρατηγικές περιλαμβάνουν τακτική απόρριψης, τακτική διόρθωσης, συνάρτηση ποινής κ.ο.κ.. Καθώς η μέθοδος PSO είναι κατά κόρον αλγόριθμος βελτιστοποίησης χωρίς περιορισμούς, η ακτική χειρισμού των περιορισμών πρέπει να ενταχθεί σε αυτήν έτσι ώστε να επιλύονται προβλήματα σύνθετων περιορισμών. Στην επιλογή των άριστων κατά Pareto λύσεων, όταν δύο πιθανές λύσεις εξετάζονται, οι περιορισμοί τους εξετάζονται πρώτα. Αν και οι δύο τους ικανοποιούν, η τακτική της κυριαρχίας Pareto εισάγεται στη συνέχεια και θα κρίνει ποια από τις δύο θα επικρατήσει. Αν και οι δύο δεν ανήκουν στην εφικτή περιοχή, τότε απορρίπτονται. Αν η μία καλύπτει τους περιορισμούς και η άλλη όχι, κυριαρχεί η πρώτη. Παρόλο που είναι πολύ απλή σαν λογική, καταλήγει να είναι αρκετά αποδοτικό στην εγγύηση της εφικτότητας των μη κυριαρχούμενων λύσεων κατά την επαναληπτική διαδικασία. Οι έλεγχοι αυτοί γίνονται στη συνάρτηση `CheckConstraints()` του ψευδοκώδικα 1.20.

Υπολογιστική διαδικασία

Την υπολογιστική διαδικασία θα περιγράψουμε αναλυτικά μετά την παρουσίαση της μοντελοποίησης του προβλήματος, ωστόσο παραθέτουμε ένα απλοποιημένο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου στο σχήμα 5.13.



Σχήμα 5.13: Απλοποιημένο διάγραμμα ροής του αλγορίθμου PSO

Κεφάλαιο 6

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος

6.1 Εισαγωγή

Ο στόχος της οικονομικής κατανομής είναι ο διαμοιρασμός της παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος στις μονάδες του δικτύου με τέτοιο τρόπο ώστε να ελαχιστοποιείται το συνολικό κόστος παραγωγής, υπό τους τεχνικούς και φυσικούς περιορισμούς, αλλά πρόσφατα και τους περιβαλλοντικούς. Η συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας (CHP) παίζει όλο και πιο κεντρικό ρόλο στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, λόγω της υψηλής απόδοσης των μονάδων με την ταυτόχρονη παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας και την μείωση του καταναλισκόμενου καυσίμου, αλλά και τη μείωση της εκπομπής αέριων ρύπων, καλύπτοντας την ανάγκη για ηλεκτρική ισχύ και θερμότητα ολόκληρων περιοχών. [1]

Κατά την οικονομική κατανομή, βασική διαδικασία του προβλήματος ένταξης μονάδων και οικονομικής λειτουργίας, συμπεριλαμβάνοντας και τις μονάδες συμπαραγωγής προκύπτουν προβλήματα που σχετίζονται με την εφικτή περιοχή λειτουργίας των μονάδων αυτών και οι περιορισμοί γίνονται πιο πολύπλοκοι. Παράλληλα υπεισέρχονται παράγοντες και μεταβλητές ελέγχου που σχετίζονται με την παραγωγή θερμότητας και πρέπει να συμπεριληφθούν στο μοντέλο της οικονομικής κατανομής. Οι περισσότερες μελέτες που έχουν γίνει ως τώρα χρησιμοποιούν ντετερμινιστικά μοντέλα, που σε πραγματικές συνθήκες δεν είναι η πιο κατάλληλη περιγραφή του συστήματος. Σε πραγματικές εφαρμογές, η ζήτηση φορτίου λαμβάνεται ως τυχαία μεταβλητή, άρα πρέπει να κατασκευαστεί ένα στοχαστικό μοντέλο, βασισμένο σε προηγούμενες μελέτες για την οικονομική κατανομή.[2],[3]

Πρόσφατα, η αιολική ενέργεια έχει τραβήξει σε μεγάλο βαθμό το ενδιαφέρον της έρευνας ως μία εξέχουσα ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, καθώς συμβάλλει στην μείωση των εκπομπών αέριων ρύπων και τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου των θερμικών μονάδων παραγωγής. Ωστόσο, η πρόβλεψη της αιολικής ισχύος αποτελεί ένα δύσκολο θέμα προς μελέτη καθώς η ταχύτητα του ανέμου έχει στοχαστική φύση σε κάθε περιοχή, καθώς και η μοντελοποίηση του μετασχηματισμού της μεταβλητής της ταχύτητας σε μεταβλητή παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος. [4]

Παράλληλα, εξαιτίας των συχνών και ενίοτε ισχυρών μεταβολών και διαταραχών του ανέμου, υπεισέρχεται το πρόβλημα της ασφάλειας του δικτύου που ενσωματώνει τα αιολικά πάρκα. Λόγω των διαταραχών του ανέμου προκαλούνται προβλήματα δυ-

ναμικής ευστάθειας στο δίκτυο που καθιστούν ακατάλληλη την διείσδυση αιολικής παραγωγής, όταν τα ποσοστά χρησιμοποίησης αιολικής ισχύος είναι υψηλά. Έτσι, προκειμένου να υπάρχει μία ισορροπία μεταξύ ρίσκου για την ασφάλεια του συστήματος και κόστους λειτουργίας του συστήματος, είναι σκόπιμο να γίνεται μία μελέτη κατά την οικονομική κατανομή για τον τρόπο που θα ενεργήσει ο διαχειριστής του συστήματος.[5],[6]

Το βασικότερο πρόβλημα της ενσωμάτωσης της αιολικής ισχύος στο μοντέλο της οικονομικής κατανομής φορτίου είναι η αβεβαιότητα της ταχύτητας του ανέμου σε κάθε χρονική στιγμή.[7] Όπως περιγράψαμε προηγούμενα, αβεβαιότητα παρουσιάζεται και στη ζήτηση φορτίου, αλλά και στις τιμές που καθορίζουν και τη συμβατική παραγωγή, όπως και οι τιμές των καυσίμων. Ωστόσο, οι μεταβολές αυτών των παραμέτρων τείνουν να είναι πολύ μικρότερες από τις μεταβολές του ανέμου. Αντίστοιχη έρευνα για την πρόβλεψη της αιολικής ισχύος έχει συμπεριλάβει μοντέλα ασαφούς λογικής, τεχνητών νευρωνικών δικτύων και χρονοσειρών. Στα πλαίσια της οικονομικής κατανομής θα χρησιμοποιήσουμε τη γνωστή συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας για την ωριαία πρόβλεψη του ανέμου (Weibull) και θα τη μετασχηματίσουμε στην ηλεκτρική ισχύ που αντιστοιχεί για να συμπεριληφθεί στο μοντέλο, ως η αναμενόμενη τιμή της διαθέσιμης αιολικής ισχύος.[4],[8],

Τις τελευταίες δεκαετίες, έχουν εισαχθεί νέοι περιορισμοί στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας στα πλαίσια της μείωσης των εκπομπών αερίων NO_x , SO_2 και CO_2 . Οι περιορισμοί αυτοί υποχρεώνουν αφενός τη βιομηχανία και τις μεταφορές και αφετέρου την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας να τους λαμβάνουν υπόψη. Έτσι στον προγραμματισμό παραγωγής και την οικονομική λειτουργία ενός Σ.Η.Ε πρέπει ο αποφασίζων να λαμβάνει μέτρα για την ελαχιστοποίηση όσο το δυνατόν εντός των στόχων εκπομπών αερίων και σε σχέση με την ελαχιστοποίηση του κόστους αλλά και τις υπόλοιπες παραμέτρους, έτσι ώστε να μην παραβιάζονται οι κανόνες που έχουν θεσπιστεί. Σε αυτή τη στρατηγική κεντρικό ρόλο παίζει η διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, παράγοντας ηλεκτρική ενέργεια με μηδενικούς ρύπους, και μειώνοντας την κατανάλωση και την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα.[9],[10], [11]

Για την επίλυση των προβλημάτων οικονομικής κατανομής έχουν εφαρμοστεί πολλές μέθοδοι, με εξέχουσες κυρίως τις μεθόδους πολλαπλασιαστών Lagrange και τις μεθόδους στοχαστικής αναζήτησης. Οι μέθοδοι πολλαπλασιαστών Lagrange χρησιμοποιούν τις μεθόδους των μερικών εξισώσεων στη διάρκεια της βελτιστοποίησης. Ωστόσο, μπορεί να εμφανίζονται στις συναρτήσεις κόστους ασυνέχειες ή τμήματα που δεν είναι διαφορίσιμα ή πολύπλοκο να εξαχθεί η παράγωγος. Έτσι οι ντετερμινιστικές προσεγγίσεις είναι ακατάλληλες αν η πληροφορία για τον καθορισμό της κατεύθυνσης αναζήτησης είναι ανεπαρκής σε κάθε επανάληψη.[12], [13], [14], [15], Οι μέθοδοι στοχαστικής αναζήτησης και βελτιστοποίησης γίνονται αρκετά δημοφιλείς την τελευταία δεκαετία, ως εναλλακτική μέθοδος προσέγγισης του ολικού βελτίστου, σε δύσκολα προβλήματα με πολύπλοκες συναρτήσεις. Σε αυτές τις μεθόδους συγκαταλέγεται και η μέθοδος που αναπτύξαμε που παρουσιάζεται στο προηγούμενο κεφάλαιο, η Particle Swarm Optimization, εξέχουσα στο χειρισμό μη γραμμικών συναρτήσεων.[16], [17],[18] [19], [20],[21], [3], [22]

6.2 Οι αντικειμενικές συναρτήσεις του στοχαστικού μοντέλου

6.2.1 Αναμενόμενο ωριαίο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος με διείσδυση αιολικής παραγωγής

Στο σύστημα χρησιμοποιούνται τεσσάρων ειδών μονάδες, οι θερμικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, οι μονάδες παραγωγής μόνο θερμότητας και οι ανεμογεννήτριες. Το κόστος καυσίμου μίας συμβατικής θερμικής μονάδας ηλεκτρισμού μπορεί να προσεγγιστεί από μία τετραγωνική συνάρτηση της ισχύος εξόδου της μονάδας P_i :

$$C_i(P_i) = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (6.1)$$

όπου P είναι η ισχύς εξόδου της i -οστής μονάδας και $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ οι συντελεστές κόστους.

Μία μονάδα συμπαραγωγής χαρακτηρίζεται από μία κυρτή συνάρτηση της ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος εξόδου, O_i και H_i αντίστοιχα. Η συνάρτηση κόστους που την περιγράφει προσεγγίζεται ως εξής:

$$C_j(O_j, H_j) = \alpha_j + \beta_j O_j + \gamma_j O_j^2 + \delta_j H_j + \theta_j H_j^2 + \xi O_j H_j \quad (6.2)$$

όπου $\alpha_j, \beta_j, \gamma_j, \delta_j, \theta_j$ οι συντελεστές κόστους της j -οστής μονάδας συμπαραγωγής.

Η συνάρτηση κόστους της μονάδας παραγωγής θερμότητας περιγράφεται αντίστοιχα από την τετραγωνική συνάρτηση της παραγόμενης θερμικής ισχύος:

$$C_k(T_k) = \alpha_k + \delta_k T_k + \theta_k T_k^2 \quad (6.3)$$

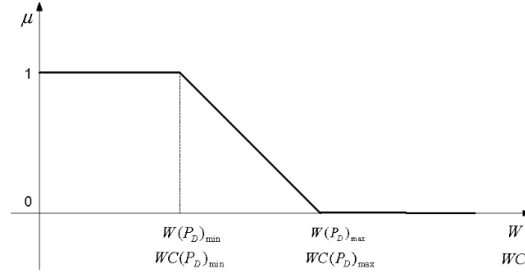
όπου αντίστοιχα $\alpha_k, \delta_k, \theta_k$ οι συντελεστές κόστους της k -οστής μονάδας παραγωγής θερμότητας.

Για το κόστος λειτουργίας των αιολικών πάρκων εισάγουμε τον συντελεστή μ . Εξαιτίας των μη προβλέψιμων και μεταβλητών χαρακτηριστικών, η διείσδυση της αιολικής παραγωγής στα συμβατικά συστήματα θερμικών μονάδων πρέπει να γίνεται με άξονα την διατήρηση της ασφάλειας του συστήματος από συνθήκες δυναμικής αστάθειας. Για τη συμπεριφορά του διαχειριστή του συστήματος εισάγεται μία ασαφής αναπαράσταση της διείσδυσης αιολικής ισχύος που δηλώνει την ασφάλεια του συστήματος. Ο συντελεστής (σχήμα 6.1) μπορεί μαθηματικά να εκφραστεί ως εξής:

$$\mu = \begin{cases} 1 & W \leq W(P_D)_{min} \\ \frac{W(P_D)_{max} - W}{W(P_D)_{max} - W(P_D)_{min}} & W_{min} \leq W \leq W_{max} \\ 0 & W \geq W(P_D)_{max} \end{cases} \quad (6.4)$$

όπου $W = \sum_{l=1}^{N_w} W_l$ είναι η αιολική ισχύς που υπολογίζεται κατά τη διαδικασία της οικονομικής κατανομής ως άθροισμα της ισχύος των ανεμογεννητριών σε κάθε αιολικό πάρκο για όλα τα αιολικά πάρκα του συστήματος, $W(P_D)_{min}$ είναι το κατώτατο όριο της διείσδυσης αιολικής ισχύος, κάτω από το οποίο το σύστημα θεωρείται ασφαλές, $W(P_D)_{max}$ είναι το ανώτατο όριο διείσδυσης αιολικής παραγωγής, πάνω από το οποίο το σύστημα θεωρείται μη ασφαλές λόγω των μεταβολών του ανέμου. Και τα δύο όρια εξαρτώνται από τη συνολική ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος (κάνουμε την παραδοχή για γραμμική σχέση).

Η συνάρτηση 6.4 μπορεί εύκολα να μετατραπεί σε συνάρτηση του συντελεστή μ ως προς το λειτουργικό κόστος των αιολικών πάρκων που συνδέεται γραμμικά με την



Σχήμα 6.1: Ασαφής γραμμική αναπαράσταση του επιπέδου ασφάλειας του συστήματος ως προς τη διείσδυση αιολικής ισχύος και κόστους παραγωγής αιολικής ενέργειας.

παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ. Έτσι προκύπτει ο συντελεστής διείσδυσης μ ως εξής:

$$\mu = \begin{cases} 1 & WC \leq WC(P_D)_{min} \\ \frac{WC(P_D)_{max} - WC}{WC(P_D)_{max} - WC(P_D)_{min}} & WC_{min} \leq WC \leq WC_{max} \\ 0 & WC \geq WC(P_D)_{max} \end{cases} \quad (6.5)$$

όπου $WC = \sum_{l=1}^{N_w} WC_l$ είναι το λειτουργικό κόστος της αιολικής παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, $WC(P_D)_{min}$ το κατώτατο όριο κόστους της διείσδυσης αιολικής ισχύος, κάτω από το οποίο το σύστημα θεωρείται ασφαλές, $WC(P_D)_{max}$ είναι το ανώτατο όριο κόστους αιολικής παραγωγής, πάνω από το οποίο το σύστημα θεωρείται μη ασφαλές λόγω των μεταβολών του ανέμου. Αντίστοιχα προκύπτουν τα όρια ως συνάρτηση της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος, τα οποία προκύπτουν από αντίστοιχες μελέτες για την ασφάλεια του συστήματος.

Για τη χρησιμοποίηση μικρότερης αιολικής ισχύος από την διαθέσιμη (W_{av}), εισάγεται το κόστος ποινής για τη διαφορά της διαθέσιμης αιολικής ισχύος από την προγραμματισμένη, το οποίο μπορεί να εφαρμοστεί ανεξάρτητα από το αν ο διαχειριστής του συστήματος είναι και ιδιοκτήτης του αιολικού πάρκου ή όχι. Έτσι η συνάρτηση κόστους υποεκτίμησης αιολικής παραγωγής για κάθε ανεμογεννήτρια διαμορφώνεται ως εξής:

$$C_{w,l}(W_{av,l} - W_l) = k_{p,l}(W_{av,l} - W_l) \quad (6.6)$$

όπου $k_{p,l}$ ο συντελεστής κόστους ποινής υποεκτίμησης για το l -οστό αιολικό πάρκο, $W_{av,l}$ η διαθέσιμη ισχύς από την l -οστό αιολικό πάρκο, τυχαία μεταβλητή με πεδίο τιμών το διάστημα $[0, w_{r,l}]$, όπου w_r η ονομαστική ισχύς εξόδου του κάθε αιολικού πάρκου ως άθροισμα των επιμέρους ανεμογεννητριών, και παίρνει τιμές σύμφωνα με την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας που θα αναλυθεί παρακάτω.

Από τα παραπάνω διαμορφώνεται η συνάρτηση του συνολικού κόστους:

$$J_1 = \sum_{i=1}^{N_p} C_i(P_i) + \sum_{j=1}^{N_c} C_j(O_j, H_j) + \sum_{k=1}^{N_h} C_k(T_k) - \mu \times \Delta WC + WC_{max} + \sum_{l=1}^{N_w} C_w(W_{av} - W_l) \quad (6.7)$$

όπου N_p, N_c, N_h, N_w ο αριθμός των συμβατικών θερμικών μονάδων παραγωγής, των μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, των μονάδων παραγωγής μόνο θερμότητας και των αιολικών πάρκων, αντίστοιχα.

Το στοχαστικό μοντέλο της αντικειμενικής συνάρτησης J_1 προκύπτει αν θεωρήσουμε τη ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος και θερμότητας ως τυχαίες μεταβλητές. Έτσι το αναμενόμενο κόστος παραγωγής γίνεται:

$$\begin{aligned} \bar{J}_1 &= \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ \alpha_i + \beta_i \bar{P}_i + \gamma_i (\bar{P}_i^2 + Var(P_i)) \right\} \\ &+ \sum_{j=1}^{N_c} \left\{ \alpha_j + \beta_j \bar{O}_j + \gamma_j (\bar{O}_j^2 + Var(O_j)) + \delta_j \bar{H}_j + \theta_j (\bar{H}_j^2 + Var(H_j)) \right\} \\ &+ \xi_j (\bar{O}_j \bar{H}_j + Cov(O_j, H_j)) \\ &+ \sum_{k=1}^{N_h} \left\{ \alpha_k + \delta_k \bar{T}_k + \theta_k (\bar{T}_k^2 + Var(T_k)) \right\} \\ &- \bar{\mu} \Delta WC + WC_{max} + \sum_{l=1}^{N_w} k_{p,l} (\overline{W_{av,l}} - W_l) \end{aligned} \quad (6.8)$$

όπου $Var(P_i) = V^2(P_i) \bar{P}_i^2$, $Var(T_k) = V^2(T_k) \bar{T}_k^2$, $Cov(O_j, H_j) = C^2(O_j, H_j) \bar{O}_j \bar{H}_j$, και $V(), C()$ οι συντελεστές μεταβλητότητας και, αντίστοιχα.¹

Η αναμενόμενη τιμή της διαφοράς της επιλεγόμενης για την βέλτιστη κατανομή ισχύος των ανεμογεννητριών από την προβλεπόμενη διαθέσιμη αιολική ισχύ προκύπτει από την αντικατάσταση:

$$Z_l = W_{av,l} - W_l$$

όπου Z_l τυχαία μεταβλητή και $W_{av,l}, W_l$ τυχαίες μεταβλητές με διαφορετική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας, αφού η $W_{av,l}$ προκύπτει από το μετασχηματισμό της

¹ Αν θεωρήσουμε τη ζήτηση θερμότητας και ηλεκτρικής ισχύος ως τυχαίες μεταβλητές που μεταβάλλονται κατά Δp_D και Δh_D , η παραγωγή του συστήματος θα μεταβάλλεται κατά αντίστοιχες τιμές για να καλύψει τη ζήτηση ισχύος και θερμότητας. Έστω ότι θεωρούμε αυτές τις μεταβολές στην παραγωγή ως $\Delta P_m (m \in N_p)$, $\Delta O_m (m \in N_c)$, $\Delta H_m (m \in N_c)$, $\Delta T_m (m \in N_h)$. Επίσης θεωρούμε ότι οι μεταβολές στη ζήτηση και στην παραγωγή, κατανέμονται σύμφωνα με την Gaussian κατανομή γύρω από μηδενική μέση τιμή. Έτσι για μικρές μεταβολές στις τιμές p_m και h_m όπως

$$\begin{aligned} P_m &= \bar{P}_m + \Delta P_m \quad m \in N_p \\ O_m &= \bar{O}_m + \Delta O_m \quad m \in N_c \\ H_m &= \bar{H}_m + \Delta H_m \quad m \in N_c \\ T_m &= \bar{T}_m + \Delta T_m \quad m \in N_h \end{aligned} \quad (6.9)$$

όπου $\bar{P}_m, \bar{O}_m, \bar{H}_m, \bar{T}_m$ είναι αντίστοιχα η αναμενόμενη τιμή της ισχύος και θερμότητας εξόδου της m -οστής μονάδας. Έτσι η σχέση 6.7 χωρίς τους παράγοντες για την αιολική παραγωγή γίνεται:

$$\begin{aligned} J_1 + \Delta J_1 &= \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ \alpha_i + \beta_i (P_i + \Delta P_i) + \gamma_i (P_i + \Delta P_i)^2 \right\} \\ &+ \sum_{j=1}^{N_c} \left\{ \alpha_j + \beta_j (O_j + \Delta O_j) + \gamma_j (O_j + \Delta O_j)^2 + \delta_j (H_j + \Delta H_j) + \theta_j (H_j + \Delta H_j)^2 \right\} \\ &+ \xi_j (O_j + \Delta O_j) (H_j + \Delta H_j) \\ &+ \sum_{k=1}^{N_h} \left\{ \alpha_k + \delta_k (T_k + \Delta T_k) + \theta_k (T_k + \Delta T_k)^2 \right\} \end{aligned} \quad (6.10)$$

Λαμβάνοντας την αναμενόμενη τιμή και στις δύο πλευρές της εξίσωσης 6.10 προκύπτει η εξίσωση 6.8.

τυχαίας μεταβλητής της ταχύτητας του ανέμου και η W_l από την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της ζήτησης φορτίου (παραδεχόμαστε ως Gaussian). Τότε προκύπτει για τις σ.π.π. με χρήση συνέλιξης η εξής σχέση:

$$\begin{aligned} h_l(Z) &= f_{w,l}(W_{av,l}) * g_l(-W_l) \\ &= \int_0^{w_{r,l}} f_{w,l}(W_{av,l}) g_l(Z - W_{av,l}) dW_{av,l} \end{aligned} \quad (6.11)$$

Έτσι για την αναμενόμενη τιμή $\overline{W_{av,l} - W_l}$ προκύπτει

$$E\{Z\} = \int_0^{w_{r,l}} z \left(\int_0^{w_{r,l}} f_{w,l}(w) g_l(z - w) dw \right) dz \quad (6.12)$$

όπου $w_{r,l}$ η ονομαστική τιμή ισχύος εξόδου της l -οστού αιολικού πάρκου και w_l η μεταβλητή απόφασης για την αιολική ισχύ.

6.2.2 Αναμενόμενη απόκλιση παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος

Η αναμενόμενη απόκλιση της ενεργού παραγόμενης ισχύος από τη ζήτηση μπορεί να μοντελοποιηθεί από την αναμενόμενη τιμή του τετραγώνου της ζήτησης που δεν καλύπτεται από την παραγωγή κατά τον υπολογισμό της κατανομής ισχύος, και προκύπτει ως εξής:

$$\bar{J}_2 = E \left\{ \left(p_D + p_L - \sum_{i=1}^{N_p} P_i - \sum_{j=1}^{N_c} O_j - \sum_{l=1}^{N_w} W_l \right)^2 \right\} \quad (6.13)$$

όπου p_D είναι η ζήτηση ηλεκτρικής ισχύος, p_L οι απώλειες μεταφοράς. Η σχέση 6.13 αναπτύσσεται περαιτέρω ως:

$$\begin{aligned} \bar{J}_2 &= \sum_{i=1}^{N_p} Var(P_i) + \sum_{j=1}^{N_c} Var(O_j) + \sum_{l=1}^{N_w} Var(W_l) \\ &+ 2 \sum_{i=1}^{N_p-1} \sum_{m=i+1}^{N_p} Cov(P_i, P_m) + 2 \sum_{j=1}^{N_c-1} \sum_{m=j+1}^{N_c} Cov(O_j, O_m) \\ &+ 2 \sum_{l=1}^{N_w-1} \sum_{m=l+1}^{N_w} Cov(W_l, W_m) \\ &+ 2 \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_c} Cov(P_i, O_j) + 2 \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{l=1}^{N_w} Cov(P_i, W_l) + 2 \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{l=1}^{N_w} Cov(O_j, W_l) \end{aligned} \quad (6.14)$$

6.2.3 Αναμενόμενη απόκλιση παραγωγής θερμότητας

Με παρόμοιο τρόπο² παριστάνεται η αναμενόμενη απόκλιση της παραγωγής θερμότητας από τη ζήτηση θερμότητας, ως η αναμενόμενη τιμή του τετραγώνου της ζήτησης θερμότητας που δεν καλύπτεται από τις υπολογισμένες τιμές παραγωγής θερμότητας. Έτσι:

$$\bar{J}_3 = E \left\{ \left(h_D - \sum_{j=1}^{N_c} H_j - \sum_{k=1}^{N_h} T_k \right)^2 \right\} \quad (6.16)$$

όπου h_D είναι η ζήτηση θερμότητας. Η σχέση 6.16 περαιτέρω αναπτύσσεται ως:

$$\begin{aligned} \bar{J}_3 &= \sum_{j=1}^{N_c} Var(H_j) + \sum_{k=1}^{N_h} Var(T_k) \\ &+ 2 \sum_{j=1}^{N_c-1} \sum_{m=j+1}^{N_c} Cov(H_j, H_m) + 2 \sum_{k=1}^{N_h-1} \sum_{m=k+1}^{N_h} Cov(T_k, T_m) \\ &+ 2 \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{k=1}^{N_h} Cov(H_j, T_k) \end{aligned} \quad (6.17)$$

6.2.4 Υπολογισμός των αναμενόμενων εκπομπών αερίων NO_x και SO_2

Οι συνολικές εκπομπές σε τόνους/ώρα αερίων NO_x και SO_2 των μονάδων παραγωγής με κατανάλωση ορυκτών καυσίμων περιγράφονται από την σχέση 6.18:

$$J_4 = \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ 10^{-2} (\alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2) + \zeta_i e^{(\lambda_i P_i)} \right\} + \sum_{j=1}^{N_c} \{ (\theta_j + \eta_j) O_j \} \quad (6.18)$$

όπου P_i η ισχύς εξόδου των θερμικών συμβατικών μονάδων και O_j η ηλεκτρική ισχύς εξόδου των μονάδων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, και $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, \zeta_i, \lambda_i$ οι συντελεστές εκπομπών αερίων για τις συμβατικές μονάδες και θ_j, η_j οι συντελεστές εκπομπών αερίων των μονάδων συμπαραγωγής, αντίστοιχα. Η σχέση 6.18 αναπτύσσεται για το στοχαστικό μοντέλο λαμβάνοντας την αναμενόμενη τιμή των παραμέτρων³ ως εξής:

² Για την ανάπτυξη των σχέσεων χρησιμοποιούμε γνωστές από τη θεωρία πιθανοτήτων σχέσεις για τη μεταβλητότητα, τη συμμεταβλητότητα και την αναμενόμενη τιμή των τυχαίων μεταβλητών:

$$\begin{aligned} E[X^2] &= Var(X) + (E[X])^2 \\ Cov(X, Y) &= E[XY] - E[X]E[Y] \\ Var\left(\sum_{i=1}^N X_i\right) &= \sum_{i=1}^N Var(X_i) + 2 \sum_{i < j} Cov(X_i, X_j) \\ Cov\left(\sum_{i=1}^N X_i, \sum_{j=1}^M X_j\right) &= \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M Cov(X_i, X_j) \end{aligned} \quad (6.15)$$

³ Για το εκθετικό μέρος, αναπτύσσουμε σε σειρά Taylor μέχρι δευτέρου βαθμού, με μικρό σφάλμα που δεν επηρεάζει ουσιαστικά τους υπολογισμούς:

$$e^x = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \dots$$

$$\begin{aligned}
\bar{J}_4 &= \sum_{i=1}^{N_p} \left\{ 10^{-2} (\alpha_i + \beta_i \bar{P}_i + \gamma_i (\bar{P}_i^2 + Var(P_i))) \right. \\
&\quad \left. + \zeta_i + \zeta_i \lambda_i \bar{P}_i + \frac{\zeta_i \lambda_i}{2} (\bar{P}_i^2 + Var(P_i)) \right. \\
&\quad \left. + \sum_{j=1}^{N_c} \{ (\theta_j + \eta_j) \bar{O}_j \} \right\} \quad (6.19)
\end{aligned}$$

6.2.5 Ασφάλεια συστήματος με διείσδυση αιολικής παραγωγής

Όπως περιγράφουμε προηγούμενα από τη σχέση 6.4 για το συντελεστή διείσδυσης αιολικής παραγωγής, ο διαχειριστής του συστήματος καλείται να αποφασίσει το ποσοστό χρησιμοποίησης της αιολικής ισχύος που παράλληλα θα καλύπτει και τις προϋποθέσεις ασφάλειας λόγω προβλημάτων δυναμικής ευστάθειας από τις διαταραχές του ανέμου, που σε υψηλά ποσοστά χρησιμοποίησης προκαλούν προβλήματα στο δίκτυο. Έτσι, όσο υψηλότερη είναι η τιμή του συντελεστή μ τόσο πιο ασφαλές γίνεται το σύστημα, σύμφωνα με την ασαφή αναπαράσταση της σχέσης 6.4, αυξάνοντας όμως το κόστος παραγωγής αλλά και τις εκπομπές αερίων, ενώ στην επιλογή χαμηλότερου συντελεστή μ το σύστημα γίνεται ανασφαλές ενώ το κόστος μειώνεται, όπως και οι εκπομπές. Κατά τη βελτιστοποίηση, σκοπός είναι η επίτευξη όσο το δυνατόν μεγαλύτερης ασφάλειας, για αυτό ορίζουμε την αντικειμενική συνάρτηση προς ελαχιστοποίηση:

$$J_5 = \frac{1}{\mu} \quad (6.20)$$

6.3 Περιορισμοί του προβλήματος

Κατά τη βελτιστοποίηση των αντικειμενικών συναρτήσεων που περιγράψαμε πρέπει να τηρούνται οι περιορισμοί ισότητας και ανισότητας. Το ισοζύγιο ενεργού ισχύος της παραγωγής και της ζήτησης όπως και το ισοζύγιο θερμότητας πρι καλύπτεται, συμπεριλαμβάνοντας και τις απώλειες του συστήματος.

$$\bar{p}_D + \bar{p}_L - \sum_{i=1}^{N_p} \bar{P}_i - \sum_{j=1}^{N_c} \bar{O}_j - \sum_{l=1}^{N_w} \bar{W}_l = 0 \quad (6.21)$$

όπου \bar{p}_L είναι οι αναμενόμενες απώλειες μεταφοράς. Για λόγους απλοποίησης του μοντέλου δεν συμπεριλαμβάνουμε τις απώλειες μεταφοράς λόγω της αιολικής παραγωγής. Υπολογίζονται με χρήση των συντελεστών B ως εξής:

$$p_L = \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{m=1}^{N_p} P_i B_{im} P_m + \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_c} P_i B_{ij} O_j + \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} O_j B_{jn} O_n \quad (6.22)$$

όπου B_{ij} οι συντελεστές απωλειών για ένα κλάδο δικτύου που συνδέει τις μονάδες i και j . Η εξίσωση 6.22 περαιτέρω αναπτύσσεται για το στοχαστικό μοντέλο ως:

άρα

$$e^{(\lambda_i P_i)} = 1 + \lambda_i P_i + \frac{\lambda_i}{2} P_i^2$$

$$\begin{aligned}
\bar{p}_L &= \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{m=1}^{N_p} \bar{P}_i B_{im} \bar{P}_m + \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_c} \bar{P}_i B_{ij} \bar{O}_j + \sum_{j=1}^{N_c} \sum_{n=1}^{N_c} \bar{O}_j B_{jn} \bar{O}_n \\
&+ \sum_{i=1}^{N_p} B_{ii} \text{Var}(P_i) + \sum_{j=1}^{N_c} B_{jj} \text{Var}(O_j) + 2 \sum_{i=1}^{N_p-1} \sum_{m=i+1}^{N_p} B_{im} \text{Cov}(P_i, P_m) \\
&+ 2 \sum_{j=1}^{N_c-1} \sum_{m=j+1}^{N_c} B_{jn} \text{Cov}(O_j, O_n) + \sum_{i=1}^{N_p} \sum_{j=1}^{N_c} B_{ij} \text{Cov}(P_i, O_j)
\end{aligned} \tag{6.23}$$

Αντίστοιχα, για το ισοζύγιο θερμότητας πρέπει να ισχύει:

$$\bar{h}_D = \sum_{j=1}^{N_c} \bar{H}_j + \sum_{k=1}^{N_h} \bar{T}_k \tag{6.24}$$

Επίσης, οι αναμενόμενες τιμές ηλεκτρικής ισχύος εξόδου κ παραγωγής θερμότητας των μονάδων, όπως και των ανεμογεννητριών, πρέπει να βρίσκονται εντός των ορίων λειτουργίας. Έτσι ισχύει:

$$\begin{aligned}
P_i^{\min} &\leq \bar{P}_i \leq P_i^{\max}, & i &= 1, 2, \dots, N_p \\
O_j^{\min} &\leq \bar{O}_j \leq O_j^{\max}, & j &= 1, 2, \dots, N_c \\
H_j^{\min} &\leq \bar{H}_j \leq H_j^{\max}, & j &= 1, 2, \dots, N_c \\
T_k^{\min} &\leq \bar{T}_k \leq T_k^{\max}, & k &= 1, 2, \dots, N_h \\
0 &\leq \bar{W}_l \leq w_{r,l}, & l &= 1, 2, \dots, N_w \\
0 &\leq \bar{\mu} \leq 1
\end{aligned} \tag{6.25}$$

όπου P^{\min} , P^{\max} , O^{\min} , O^{\max} τα όρια παραγωγής ενεργού ισχύος των συμβατικών μονάδων και των μονάδων συμπαγωγής, w_r η ονομαστική ισχύς των ανεμογεννητριών και H^{\min} , T^{\min} , H^{\max} , T^{\max} τα όρια των μονάδων συμπαγωγής και μονάδων παραγωγής θερμότητας.

Επίσης προκύπτει για τη συνολική αιολική παραγωγή, μέσω του συντελεστή μ :

$$\sum_{l=1}^{N_w} \bar{W}_l = W_{max} - \bar{\mu} \Delta W \tag{6.26}$$

αλλά θα πρέπει επίσης η επιλεγόμενη ισχύς από τις ανεμογεννήτριες να μην ξεπερνάει την αναμενόμενη διαθέσιμη αιολική ισχύ:

$$W_{max} - \bar{\mu} \Delta W \leq \sum_{l=1}^{N_w} \bar{W}_{av,l} \tag{6.27}$$

6.4 Υπολογισμός της διαθέσιμης αιολικής ισχύος

6.4.1 Χαρακτηρισμός ταχύτητας ανέμου

Για τον υπολογισμό της αναμενόμενης ενεργού ισχύος από το αιολικό πάρκο, πρέπει να προσεγγίσουμε την ταχύτητα του ανέμου, που χαρακτηρίζεται από υψηλή αβεβαιότητα. Από ετήσια στατιστικά δεδομένα έχει προκύψει ότι σε μία περιοχή που μελετάται η ταχύτητα του ανέμου ακολουθεί τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της κατανομής Weibull ως προς το χρόνο. Η σ.π.π. της Weibull κατανομής δίνεται από τη σχέση 6.28:

$$f_V(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{(k-1)} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad 0 < v < \infty \quad (6.28)$$

όπου

V η τυχαία μεταβλητή της ταχύτητας του ανέμου,

v η ταχύτητα του ανέμου,

c ο παράγοντας της κλίμακας σε συγκεκριμένη περιοχή (σε μονάδες ταχύτητας ανέμου)

k ο παράγοντας σχήματος σε συγκεκριμένη περιοχή (αδιάστατο μέγεθος)

Η συνάρτηση κατανομής πιθανότητας που προκύπτει από τη σχέση 6.28 δίνεται από την :

$$F_V(v) = \int_0^v f_V(\tau) d\tau = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (6.29)$$

Η συνάρτηση κατανομής Weibull με παράγοντα σχήματος ίσο με 2 καλείται επίσης και κατανομή Rayleigh. Τα βασικά πλεονεκτήματα της κατανομής Weibull είναι τα εξής:

- Είναι κατανομή δύο παραμέτρων, που είναι πιο γενική από την κατανομή Rayleigh μίας παραμέτρου, αλλά λιγότερο πολύπλοκη από τη διμεταβλητή κανονική κατανομή.
- Έχει αποδειχτεί ότι προσεγγίζει σε μεγάλο βαθμό τα ετήσια στατιστικά δεδομένα από παρατηρήσεις της ταχύτητας του ανέμου.
- Εάν οι παράμετροι k και c είναι γνωστές σε κάποιο υψόμετρο, η μεθοδολογία εύρεσης των αντίστοιχων παραμέτρων σε άλλο υψόμετρο είναι γνωστή.

Τα χαρακτηριστικά του ανέμου στηρίζονται σε ποικίλους παράγοντες όπως γεωγραφικούς, τοπογραφικούς κ.τ.λ. και μπορούν να προσεγγιστούν από τις παρατηρήσεις της ταχύτητας του ανέμου στην εκάστοτε περιοχή.

Τον τρόπο που επηρεάζουν οι παράμετροι k και c την συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας μπορούμε να εξετάσουμε και από τις σχέσεις για την αναμενόμενη τιμή και τη μεταβλητότητα της κατανομής:

$$\mu = c\Gamma(1 + k^{-1})$$

και

$$\sigma_v^2 = c^2\Gamma(1 + 2k^{-1}) - \mu^2$$

όπου η συνάρτηση Γ είναι η

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty y^{x-1} e^{-y} dy, \quad y > 0$$

Για την κατανομή Rayleigh, $k = 2$ και

$$\mu = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \text{ και } \sigma_v^2 = C^2 \left(1 - \frac{\pi}{4}\right)$$

Από τα παραπάνω αποδεικνύεται ότι όσο ο παράγοντας c της Weibull κατανομής αυξάνεται, η αναμενόμενη τιμή και η τυπική απόκλιση αυξάνονται επίσης με γραμμική σχέση.

6.4.2 Υπολογισμός της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας της ηλεκτρικής ισχύος εξόδου των ανεμογεννητριών

Καθώς ο αβέβαιος χαρακτήρας της ταχύτητας του ανέμου χαρακτηρίζεται ως τυχαία μεταβλητή, μπορούμε να θεωρήσουμε και την ισχύ εξόδου των ανεμογεννητριών ως τυχαία μεταβλητή μέσω ενός μετασχηματισμού από την ταχύτητα του ανέμου στην ενεργό ισχύ. Θεωρώντας τη μη γραμμικότητα ως αμελητέα, η έξοδος μίας ανεμογεννητριας με γνωστή την ταχύτητα του ανέμου θα δίνεται ως εξής:

$$\begin{aligned} w &= 0 && \text{για } v < v_i \text{ και } v > v_o \\ w &= w_r \frac{(v - v_i)}{(v_r - v_i)} && \text{για } v_i \leq v \leq v_r \\ w &= w_r && \text{για } v_r \leq v \leq v_o \end{aligned} \quad (6.30)$$

όπου

- w Η ισχύς εξόδου της Α/Γ (σε μονάδες των kW ή MW).
- w_r Η ονομαστική ισχύς της Α/Γ.
- v_i Η ελάχιστη ταχύτητα του ανέμου για τη λειτουργία της Α/Γ.
- v_r Η ονομαστική ταχύτητα του ανέμου.
- v_o Η ταχύτητα του ανέμου αποκοπής της Α/Γ.

Από τη σχέση 6.30 είναι προφανές ότι κάθε Α/Γ:

- Παρουσιάζει μηδενική ενεργό ισχύ εξόδου έως ότου η ταχύτητα του να είναι μεγαλύτερη της v_i .
- Παρουσιάζει γραμμική σχέση της ενεργού ισχύος εξόδου ως προς την ταχύτητα του ανέμου για το διάστημα $[v_i, v_r]$.
- Παρουσιάζει σταθερή ενεργό ισχύ εξόδου για ταχύτητα ανέμου μεταξύ ονομαστικής και ταχύτητας αποκοπής.
- Παρουσιάζει μηδενική ενεργό ισχύ εξόδου για ταχύτητα ανέμου μεγαλύτερη της v_o .

Λόγω του γεγονότος ότι η κάθε Α/Γ έχει μηδενική ισχύ εξόδου για ταχύτητες ανέμου εκτός των ορίων που περιγράψαμε παραπάνω, η τυχαία μεταβλητή της ενεργού ισχύος εξόδου θα έχει διακριτές τιμές σε αυτά τα διαστήματα του εύρους της ταχύτητας του ανέμου. Έτσι, η ισχύς εξόδου της Α/Γ θα είναι μεικτή τυχαία μεταβλητή, που θα είναι συνεχής στο διάστημα $(0, w_r)$ και διακριτή στις τιμές 0 και w_r .

Αν θεωρήσουμε ότι η ταχύτητα του ανέμου χαρακτηρίζεται από την κατανομή Weibull, πρέπει να μετασχηματίσουμε αυτή την κατανομή σε κατανομή της ενεργού ισχύος εξόδου για να συμπεριληφθεί στο μοντέλο της οικονομικής κατανομής. Ο μετασχηματισμός αυτός θα γίνει με τρόπο, ώστε για V ως την τυχαία μεταβλητή ταχύτητας του

ανέμου και W την τυχαία μεταβλητή της ισχύος της Α/Γ, με δεδομένη γραμμική σχέση, να είναι:

$$W = T(V) = aV + b \quad (6.31)$$

και

$$f_w(w) = f_v[T^{-1}(w)] \left[\frac{dT^{-1}(w)}{dw} \right] = f_v \left(\frac{w-b}{a} \right) \left| \frac{1}{a} \right| \quad (6.32)$$

όπου

T ένας μετασχηματισμός, εν γένει.

W Η τυχαία μεταβλητή της ενεργού ισχύος εξόδου της Α/Γ.

V Η τυχαία μεταβλητή της ταχύτητας του ανέμου.

w η ισχύς εξόδου της Α/Γ.

v η ταχύτητα του ανέμου.

Από την κατανομή Weibull, τα διακριτά μέρη της τυχαίας μεταβλητής ενεργού ισχύος εξόδου της κάθε Α/Γ θα παίρνουν τιμές ως ακολούθως, από τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας:

$$\begin{aligned} P_r \{W = 0\} &= F_V(v_i) + (1 - F_V(v_o)) \\ &= 1 - \exp \left(- \left(\frac{v_i}{c} \right)^k \right) + \exp \left(- \left(\frac{v_o}{c} \right)^k \right) \end{aligned} \quad (6.33)$$

και

$$\begin{aligned} P_r \{W = w_r\} &= F_V(v_o) - F_V(v_r) \\ &= \exp \left(- \left(\frac{v_r}{c} \right)^k \right) - \exp \left(- \left(\frac{v_o}{c} \right)^k \right) \end{aligned} \quad (6.34)$$

Για να γίνει ο μετασχηματισμός που περιγράψαμε από την τυχαία μεταβλητή της ταχύτητας του ανέμου στην τυχαία μεταβλητή της ενεργού ισχύος εξόδου της Α/Γ λιγότερο πολύπλοκος ορίζουμε τους ακόλουθους λόγους:

$\rho = \frac{w}{w_r}$ Λόγος της ισχύος εξόδου της Α/Γ ως προς την ονομαστική της.

$l = \frac{(v_r - v_i)}{v_i}$ Λόγος του γραμμικού εύρους της ταχύτητας ανέμου προς την ελάχιστη ταχύτητα ανέμου παραγωγής ενεργού ισχύος.

Χρησιμοποιώντας τους παραπάνω λόγους και την εξίσωση 6.32 η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας της Weibull κατανομής της τυχαίας μεταβλητής της ενεργού ισχύος εξόδου στο συνεχές διάστημα ορισμού της παίρνει τη μορφή:

$$f_W(w) = \frac{klv_i}{c} \left(\frac{(1 + \rho l)v_i}{c} \right)^{k-1} \exp \left(- \left(\frac{(1 + \rho l)v_i}{c} \right)^k \right) \quad (6.35)$$

η οποία χρησιμοποιείται μαζί με τις σχέσεις 6.33 και 6.34 στη σχέση 6.11 για τον υπολογισμό του κόστους ποινής μη χρησιμοποίησης ολόκληρης της διαθέσιμης αιολικής ισχύος στο μοντέλο της βέλτιστης κατανομής.

6.5 Κωδικοποίηση των παραμέτρων

Το πρώτο βήμα για την επίλυση του προβλήματος βελτιστοποίησης με τη μέθοδο Particle Swarm Optimization που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, είναι η σύνδεση των παραμέτρων και μεταβλητών του προβλήματος με τα στοιχεία του αλγορίθμου. Η σύνδεση δηλαδή του «πραγματικού» κόσμου του προβλήματος με τον κόσμο του αλγορίθμου επίλυσης.

Στη μέθοδο που αναπτύξαμε, κάθε άτομο που «πετάει» στο χώρο αναζήτησης είναι και μία πιθανή λύση του προβλήματος. Είναι ιδιαίτερα σημαντικό να παρασταθούν σωστά οι παράμετροι του προβλήματος, για την εξαγωγή ορθών αποτελεσμάτων της βέλτιστης κατανομής. Κάθε άτομο παριστάνει ένα διάνυσμα απόφασης \vec{x} με διαστάσεις όσες και οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος. Συνεπώς, για το πρόβλημα βέλτιστης κατανομής φορτίου και θερμότητας με συμβατικές μονάδες, μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας, μονάδες παραγωγής θερμότητας και αιολικά πάρκα, το διάνυσμα απόφασης διαμορφώνεται ως εξής:

$$\vec{x}_p = \left[\overbrace{P_{Gp,1}, P_{Gp,2}, \dots, P_{Gp,Np}}^{P_i}, \overbrace{P_{Gp,(Np+1)}, \dots, P_{Gp,(Np+Nc)}}^{O_j}, \right. \\ \left. \overbrace{P_{Gp,(Np+Nc+1)}, \dots, P_{Gp,(Np+2Nc)}}^{H_j}, \overbrace{P_{Gp,(Np+2Nc+1)}, \dots, P_{Gp,(Np+2Nc+Nh)}}^{T_k}, \right. \\ \left. \overbrace{P_{Gp,(Np+2Nc+Nh+1)}, \dots, P_{Gp,(Np+2Nc+Nh+Nw)}}^{W_l} \right] \quad p = 1, 2, \dots, M \quad (6.36)$$

όπου:

- M ο πληθυσμός του σμήνους που κινείται στο χώρο αναζήτησης,
- P_{Gp} η ισχύς εξόδου ή παραγόμενη θερμότητα της κάθε μονάδας, p-οστού ατόμου
- Np ο αριθμός των συμβατικών θερμικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος,
- Nc ο αριθμός των μονάδων συμπαραγωγής,
- Nh ο αριθμός των μονάδων παραγωγής θερμότητας,
- Nw ο αριθμός των αιολικών πάρκων.

Συνεπώς, οι διαστάσεις του πληθυσμού είναι $M \times (N_p + N_c + N_c + N_h + N_w)$. Για το διάνυσμα απόφασης θεωρήσαμε ότι στις πρώτες θέσεις είναι η παραγωγή των συμβατικών θερμικών μονάδων, στις επόμενες η παραγόμενη ισχύς των μονάδων συμπαραγωγής, στις επόμενες η παραγόμενη θερμότητα των μονάδων συμπαραγωγής και ακολουθεί η παραγόμενη θερμότητα των μονάδων παραγωγής μόνο θερμότητας και τα αιολικά πάρκα.

Το σύνολο των περιορισμών του προβλήματος καθορίζουν το χώρο αναζήτησης στον οποίο θα κινείται το «σμήνος», ο οποίος έχει τόσες διαστάσεις όσες και οι αντικειμενικές συναρτήσεις που βελτιστοποιούνται συγχρόνως στην πολυκριτηριακή διαδικασία.

Η επιλογή της συνάρτησης καταλληλότητας (*fitness function*) είναι το πιο σημαντικό τμήμα των αλγορίθμων αναζήτησης των μεθόδων τεχνητής νοημοσύνης. Η διαδικασία του αλγορίθμου που αναπτύξαμε είναι επαναληπτική, όπως και όλες οι μέθοδοι αναζήτησης λύσεων, δεν χρησιμοποιεί όμως μία ευριστική συνάρτηση όπως οι κλασικές μέθοδοι. Ωστόσο χρειάζεται μία συνάρτηση η οποία να αξιολογεί την υποψήφια λύση

του προβλήματος, και λόγω της επαναληπτικής διαδικασίας, η συνάρτηση που κατασκευάσαμε συγκρίνει τη λύση αυτή με την προηγούμενή της, είτε όταν πρόκειται για επιλογή του προσωπικού βέλτιστου σημείου του κάθε ατόμου, είτε όταν πρόκειται για την επιλογή του βέλτιστου σημείου του σμήνους, είτε για σύγκριση της υποψήφιας λύσης με κάποιο στοιχείο του συνόλου Pareto. Λόγω της πολυκριτηριακής παραλλαγής της μεθόδου που αναπτύξαμε, για τη σύγκριση αυτή χρησιμοποιήσαμε το βασικό κριτήριο Pareto ως συνάρτηση καταλληλότητας με λογικό κανόνα ελέγχου που φαίνεται στον ψευδοκώδικα 2.9:

```

2.1 for  $i \leftarrow 1$  to Objectives do
2.2   |  $J_{possible}(i) := J_i(possible\ solution);$ 
   |  $J_{previous}(i) := J_i(previous\ position);$ 
   |  $\Delta J := J_i(previous\ position) - J_i(possible\ solution);$ 
2.3 end
2.4 if  $(\Delta J_1 > 0) \wedge (\Delta J_2 > 0) \wedge \dots \wedge (\Delta J_{Objectives} > 0)$  then
2.5   |  $fitness = TRUE;$ 
2.6 else
2.7   |  $fitness = FALSE;$ 
2.8 end
2.9 return fitness;
```

Algorithm 2: Η συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function) του αλγορίθμου MOPSO βασισμένη στα κριτήρια Pareto

6.6 Η υπολογιστική διαδικασία της βελτιστοποίησης

Καθώς έχουμε συνδέσει το περιβάλλον της μεθόδου Particle Swarm Optimization με το περιβάλλον του προβλήματος, ακολουθεί η υπολογιστική διαδικασία της εκτέλεσης του αλγορίθμου που αναπτύξαμε.

- **Βήμα 1ο:** Προσδιορισμός του χώρου αναζήτησης. Αρχικά καθορίζονται οι παράμετροι του προβλήματος και αρχικοποιούνται οι συντελεστές του δικτύου που πρόκειται να μελετήσουμε, όπως τα όρια των μονάδων, οι συντελεστές κόστους και εκπομπών των μονάδων, οι συντελεστές απωλειών του δικτύου μεταφοράς, ο αριθμός των ατόμων, ο αριθμός των επαναλήψεων κ.ο.κ.
- **Βήμα 2ο:** Αρχικοποίηση των ατόμων εντός του χώρου αναζήτησης. Η θέση των ατόμων καθορίζεται έτσι ώστε κάθε διάσταση του κάθε ατόμου να βρίσκεται εντός της εφικτής περιοχής της αντίστοιχης μονάδας παραγωγής, αλλά λαμβάνει τυχαία τιμή εντός αυτού του εύρους. Παράλληλα, η προσωπική βέλτιστη θέση του κάθε ατόμου είναι ίση με την αρχική του θέση, αρχικοποιώντας έτσι την προσωπική του μνήμη, και η αρχική του ταχύτητα μηδενίζεται. Δεν έχει ουσιαστική διαφορά το αν η αρχική ταχύτητα θα είναι μηδενική ή όχι καθώς θα ανανεωθεί κατά την πρώτη επανάληψη. Μέσω επιλογής τουρνουά (*tournament selection*) γίνεται η επιλογή του οδηγού του σμήνους *gbest*, το αρχικά βέλτιστο σημείο με βάση τη συνάρτηση καταλληλότητας που περιγράψαμε πιο πάνω.

Υπολογίζονται επίσης τα διακριτά τμήματα για τις πιθανότητες της αιολικής ισχύος κάθε αιολικού πάρκου. Μία τιμή για την πιθανότητα η αιολική παραγωγή να είναι μηδενική και μία για ονομαστική τιμή αιολικής παραγωγής.

- **Βήμα 3ο:** Έναρξη της επαναληπτικής διαδικασίας. Καλείται η συνάρτηση $\text{fly}()$ μέσω της οποίας ανανεώνεται η ταχύτητα του κάθε ατόμου ως εξής:

$$v_{id}^{(t+1)} = wv_i^{(t)} + c_1r_1(pb_{est_{id}} - P_{Gid}^{(t)}) + c_2r_2(gbest_d - P_{Gid}^{(t)}) \quad (6.37)$$

για $i = 1, \dots, M, d = 1, \dots, N$ όπου M ο αριθμός του πληθυσμού και N η διάσταση του διανύσματος απόφασης, δηλαδή των μονάδων παραγωγής και w ο συντελεστής βάρους της ταχύτητας.

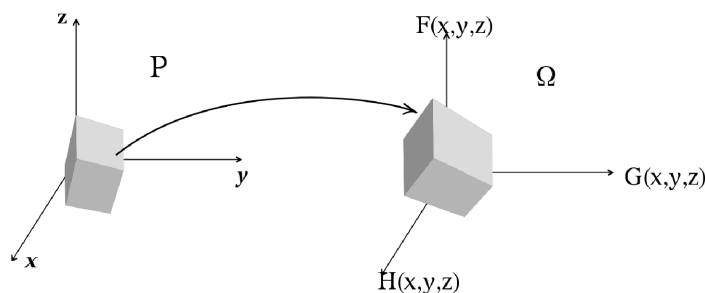
- **Βήμα 4ο:** Ανανέωση της θέσης των ατόμων του πληθυσμού με χρήση της νέας τιμής της ταχύτητας:

$$P_{Gid}^{(t+1)} = P_{Gid}^{(t)} + \chi v_{id}^{(t+1)} \quad (6.38)$$

και ακολούθως προστίθεται ο συντελεστής τυχαιότητας (*turbulence factor*) που παίρνει τυχαίες τιμές στο διάστημα $[-1, 1]$:

$$P_{Gid}^{(t+1)} = P_{Gid}^{(t+1)} + R_T P_{Gid}^{(t+1)} \quad (6.39)$$

- **Βήμα 5ο:** Ελέγχονται οι θέσεις των ατόμων $P_{Gid}^{(t+1)}$ ως προς τους περιορισμούς του συστήματος. Καλείται η συνάρτηση `checkConstraints()` η οποία επιστρέφει μία λογική τιμή TRUE/FALSE για την καταλληλότητα της πιθανής λύσης που εκφράζει το κάθε άτομο του πληθυσμού, καθώς και τη νέα θέση του ατόμου, εάν αυτό βρισκόταν εκτός ορίων. Τα όρια λειτουργίας των μονάδων πρέπει να ικανοποιούνται, γι' αυτό το λόγο εάν κάποιο άτομο βρίσκεται εκτός του ορίου, η θέση του ανανεώνεται εκ νέου στο κοντινότερο όριο το οποίο ξεπερνούσε, έτσι ώστε κατά την επόμενη επανάληψη να αποφευχθεί η διασπορά των ατόμων εκτός χώρου αναζήτησης. Επίσης εξετάζονται οι περιορισμοί ισοζυγίου της ζήτησης και παραγωγής ενεργού ισχύος και θερμότητας, αλλά και το όριο ασφάλειας που έχει οριστεί για τη διείσδυση αιολικής παραγωγής. Σε αυτό το σημείο υπολογίζονται οι απώλειες μεταφοράς του δικτύου μέσω των \mathbf{B} συντελεστών για τις τιμές της παραγόμενης ισχύος που αντιστοιχούν στο άτομο που εξετάζεται. Η λογική τιμή της καταλληλότητας της θέσης αποτελεί παράγοντα απόρριψης της πιθανής λύσης από το μηχανισμό εξαγωγής του συνόλου Pareto.
- **Βήμα 6ο:** Εάν ο έλεγχος των περιορισμών είναι επιτυχής, καλείται η συνάρτηση `archiving()` για τον έλεγχο των κριτηρίων που έχουμε περιγράψει σε προηγούμενο κεφάλαιο και συμπλήρωσης του συνόλου Pareto της πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης. Εάν το συγκεκριμένο άτομο το οποίο ελέγχεται είναι μη κυριαρχούμενο σε σχέση με το στοιχείο του πίνακα `archive` με το οποίο συγκρίνεται, τότε το αντικαθιστά και ακολουθεί η διαδικασία μετακίνησης όλων των στοιχείων όπως περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Επίσης στην δομή ελέγχου εντός της συνάρτησης `archiving()` καλείται η συνάρτηση `neighborhood()` που υπολογίζει και συγκρίνει τον αριθμό των στοιχείων του συνόλου Pareto που βρίσκονται εντός μίας ακτίνας *radius* από το καθένα από τα συγκρινόμενα στοιχεία (το υποψήφιο και το ήδη υπάρχον). Η συνάρτηση αυτή επιστρέφει λογική τιμή TRUE/FALSE για το αν το υποψήφιο στοιχείο βρίσκεται σε πιο αραιή περιοχή ή όχι. Η μέθοδος αυτή εξασφαλίζει τη διασπορά των στοιχείων του συνόλου Pareto έτσι ώστε να μην συγκεντρώνονται σε μία μόνο περιοχή.
- **Βήμα 7ο:** Ελέγχεται το στοιχείο ως προς την προσωπική του βέλτιστη τιμή, την προσωπική μνήμη (*pbest*). Με βάση τα κριτήρια Pareto για τις αντικειμενικές συ-



Σχήμα 6.2: Πολυκριτηριακή απεικόνιση συνόλου P στο διανυσματικό χώρο Ω των αντικειμενικών συναρτήσεων.

ναρτήσεις που ελαχιστοποιούμε συγχρόνως υπολογίζεται το αν είναι μη κυριαρχούμενη η υποψήφια λύση από την προσωπική καλύτερη έως τώρα τιμή του ατόμου. Ανεξάρτητα από το αν έγινε δεκτή κατά τη διαδικασία **archiving()** ή όχι, εάν είναι προτιμότερη την αντικαθιστά, διαφορετικά το άτομο διατηρεί την ήδη υπάρχουσα προσωπική του βέλτιστη μνήμη. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται για κάθε άτομο του οποίου η θέση έχει εγκριθεί από τον έλεγχο των περιορισμών.

- **Βήμα 8ο:** Καθώς έχει ολοκληρωθεί η διαδικασία εντός της συγκεκριμένης επανάληψης για όλα τα άτομα, ακολουθείται η διαδικασία **GlobalGuide()** με τον τρόπο που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η οποία με είσοδο τα προσωπικά βέλτιστα όλων των ατόμων, καταλήγει στην επιλογή του ολικού βέλτιστου για την οδήγηση όλων των ατόμων, σε βαθμό που κρίνεται από το συνδυασμό των συντελεστών c , w και R_T της δυναμικής πτήσης που δείχνει η σχέση 6.37. Αξίζει να σημειωθεί ότι μπορεί ο οδηγός που επιλέγεται να μην ανήκει στο σύνολο Pareto του πίνακα archive.
- **Βήμα 9ο:** Εάν τα κριτήρια τερματισμού καλύπτονται, τότε ακολουθεί η διαδικασία εκτύπωσης των αποτελεσμάτων, διαφορετικά επαναλαμβάνεται η παραπάνω διαδικασία με τις ανανεωμένες τιμές.
- **Βήμα 10ο:** Η διαδικασία εκτύπωσης των αποτελεσμάτων χρησιμοποιεί μία συνάρτηση που απεικονίζει τα άτομα και τα στοιχεία του πίνακα archive, από τον πολυδιάστατο διανυσματικό χώρο των μεταβλητών του διανύσματος απόφασης, δηλαδή της παραγόμενης ισχύος των μονάδων και της προβλεπόμενης ισχύος εξόδου των αιολικών πάρκων, στον επίσης πολυδιάστατο, αλλά με διαστάσεις όσες και οι αντικειμενικές συναρτήσεις που ελαχιστοποιούνται, διανυσματικό χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Η διαδικασία αυτή χρησιμοποιεί την κάθε αντικειμενική συνάρτηση με όρισμα το διάνυσμα απόφασης για το οποίο γίνεται η απεικόνιση. Χαρακτηριστικά φαίνεται στο σχήμα 6.2 η διαδικασία της απεικόνισης. Τελικά εκτυπώνονται τα αποτελέσματα, είτε ως διάγραμμα, είτε οι πίνακες των τελικών θέσεων των ατόμων, το σύνολο Pareto, και όποιες τιμές ζητούνται από τον αποφασίζοντα.

Η διαδικασία υπολογισμού της διαθέσιμης αιολικής ισχύος γίνεται κατά τη διάρκεια του υπολογισμού της αναμενόμενης τιμής της αντικειμενικής συνάρτησης του κόστους

όποτε αυτή ζητείται από τον αλγόριθμο. Αυτό σημαίνει ότι σε κάθε επανάληψη, καθώς η διαθέσιμη αιολική ισχύς υπολογίζεται σε συνέλιξη με την τυχαία μεταβλητή της ζήτησης φορτίου, άρα και των διαστάσεων του διανύσματος απόφασης που αντιστοιχούν στην ισχύ του κάθε αιολικού πάρκου, θα πρέπει να υπολογίζεται η συνέλιξη με την ανανεωμένη θέση του κάθε ατόμου για το κάθε αιολικό πάρκο. Η συνέλιξη υπολογίζεται μετά από μετατροπή του μοντέλου που παρουσιάσαμε σε διακριτή μορφή, με ακρίβεια η οποία εξαρτάται από την υπολογιστική ισχύ που διαθέτουμε.

Κεφάλαιο 7

Προσομοίωση και αποτελέσματα

7.1 Εισαγωγή- Σενάρια παραγωγής

Την μοντελοποίηση που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο εφαρμόζουμε στο δίκτυο που θα παρουσιάσουμε παρακάτω, όπου γίνεται η διαδικασία της βελτιστοποίησης με χρήση του αλγορίθμου που αναπτύξαμε. Οι υλοποιήσεις ως προς το δίκτυο και τις αντικειμενικές συναρτήσεις που έχουμε διαμορφώσει είναι οι εξής:

- Αρχικά υπολογίζεται η κατανομή της παραγωγής ενεργού ισχύος και θερμότητας από το δίκτυο χωρίς τη σύνδεση των αιολικών πάρκων. Ελαχιστοποίηση του κόστους παραγωγής συγχρόνως με την απόκλιση παραγόμενης ενεργού ισχύος από το φορτίο, και με την απόκλιση παραγόμενης θερμότητας από τη ζήτηση θερμότητας.
- Στη συνέχεια παρουσιάζεται η κατανομή της ισχύος στις μονάδες λαμβάνοντας υπόψη τους περιβαλλοντικούς περιορισμούς για τις εκπομπές των αερίων NO_x και SO_2 . Βέλτιστη κατανομή ως προς κόστος παραγωγής ελαχιστοποιώντας συγχρόνως τις προαναφερθείσες εκπομπές αερίων, στο ίδιο δίκτυο χωρίς τη σύνδεση των αιολικών πάρκων
- Χρησιμοποιώντας δεδομένα του δικτύου της Κρήτης για την αιολική παραγωγή, ουσιαστικά συνδέουμε τα αιολικά πάρκα στο παραπάνω δίκτυο. Παρουσιάζεται η διαδικασία της βελτιστοποίησης με ελαχιστοποίηση του συνολικού κόστους, συγχρόνως με την ελαχιστοποίηση των εκπομπών αερίων NO_x και SO_2 και του ποσοστού ρίσκου λόγω της διείσδυσης αιολικής παραγωγής.

7.2 Τα στοιχεία του δικτύου

Βασιζόμενοι στα δεδομένα των L. Wang και C. Singh στην αναφορά [3], το δίκτυο που χρησιμοποιήσαμε περιλαμβάνει 4 συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος και 2 μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας. Οι μονάδες παραγωγής μόνο θερμότητας θεωρούμε ότι δεν έχουν νόημα χρησιμότητας στα ελληνικά δεδομένα οπότε τις παραλείπουμε. Οι χαρακτηριστικές συναρτήσεις κόστους των συμ-

βατικών μονάδων¹ είναι οι εξής:

$$C_1(P_1) = 55.67997 + 55.6203P_1 + 10.2P_1^2 \quad (7.1)$$

$$C_2(P_2) = 45.13251 + 48.4779P_2 + 15.8P_2^2 \quad (7.2)$$

$$C_3(P_3) = 104.99983 + 121.1895P_3 + 28.2P_3^2 \quad (7.3)$$

$$C_4(P_4) = 124.35311 + 114.9183P_4 + 35.5P_4^2 \quad (7.4)$$

Αντίστοιχα, για τις μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας οι χαρακτηριστικές κόστους είναι:

$$C_1(O_1, H_1) = 265.00312 + 103.5033O_1 + 103.5O_1^2 + 22.031H_1 + 2.49H_1^2 + 0.51O_1H_1 \quad (7.5)$$

$$C_2(O_2, H_2) = 125.00431 + 108.0036O_2 + 43.5O_2^2 + 6.002H_2 + 2.7H_2^2 + 0.409O_2H_2 \quad (7.6)$$

θεωρώντας τις τιμές ανά μονάδα (pu). Στους πίνακες 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται τα κατώτερα και ανώτερα όρια παραγωγής των μονάδων για την ηλεκτρική ισχύ και θερμότητα, αντίστοιχα, σε ανά μονάδα τιμές(pu). Για κάθε πιθανή λύση του προβλήματος ελέγχονται οι τιμές των ορίων στη συνάρτηση των περιορισμών `checkConstraints()`, όπως έχουμε περιγράψει προηγούμενα.

Πίνακας 7.1: Όρια των μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος(pu)

Αριθμός μονάδας	Κατώτερο όριο	Ανώτερο όριο
Ηλ. ισχύος No 1	0.05	0.5
Ηλ. ισχύος No 2	0.05	0.6
Ηλ. ισχύος No 3	0.05	1.0
Ηλ. ισχύος No 4	0.05	1.2
Συμπαραγωγής Ηλ. και Θερμ. No 1	0.05	1.0
Συμπαραγωγής Ηλ. και Θερμ. No 2	0.05	0.6

Πίνακας 7.2: Όρια των μονάδων παραγωγής θερμότητας (pu)

Αριθμός μονάδας	Κατώτερο όριο	Ανώτερο όριο
Συμπαραγωγής Ηλ. και Θερμ. No 1	0	0.6
Συμπαραγωγής Ηλ. και Θερμ. No 2	0	1.75

Η σχέση 7.7 παρουσιάζει τους συντελεστές απωλειών ισχύος B_{ij} για ένα κλάδο δικτύου που συνδέει τις μονάδες i και j που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση.

$$B_{ij} = \begin{bmatrix} 0.002022 & -0.000286 & -0.000533 & -0.000565 & -0.000454 & -0.000103 \\ -0.000286 & 0.003243 & 0.000016 & -0.000307 & -0.000422 & -0.000147 \\ -0.000533 & 0.000016 & 0.002085 & 0.000831 & 0.000023 & -0.000270 \\ -0.000533 & 0.000016 & 0.002085 & 0.000831 & 0.000023 & -0.000270 \\ -0.000454 & -0.000422 & 0.000023 & 0.000113 & 0.000461 & -0.000153 \\ 0.000103 & -0.000147 & -0.000270 & -0.000295 & -0.000153 & 0.000898 \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

¹Οι τιμές μεταβλήθηκαν έτσι ώστε να προσεγγίζουν τις τιμές των πρότυπων μονάδων του μοντέλου των 30 ζυγών της IEEE ως προς τη γραμμικότητα των χαρακτηριστικών και μειώθηκε το κόστος στροφόμενης εφεδρείας που ήταν αδικαιολόγητα υψηλό

Η ζήτηση του φορτίου του δικτύου για το οποίο έγινε η προσομοίωση επιλέχθηκε 3 ανά μονάδα για την ηλεκτρική ισχύ και 0.8 ανά μονάδα για τη ζήτηση θερμότητας, θεωρώντας ως βάση τα 100 MVA, αντιπροσωπεύοντας κατά κάποιον τρόπο το φορτίο για κάποια ώρα μη αιχμής ενός μη διασυνδεδεμένου δικτύου, όπως είναι αυτό της Κρήτης.

Στη συνέχεια παρουσιάζουμε στον πίνακα 7.3 τους συντελεστές των χαρακτηριστικών συναρτήσεων εκπομπών αερίων NO_x και SO_2 που χρησιμοποιήθηκαν στην προσομοίωση και περιγράφουν τις μονάδες του δικτύου. Αντίστοιχα για τις μονάδες συμπαραγωγής οι συντελεστές κατά προσέγγιση λαμβάνουν τις τιμές των 7.8 και 7.9.

$$\theta_i = 0.00015 \quad (7.8)$$

$$\eta_i = 0.0015 \quad (7.9)$$

Πίνακας 7.3: Συντελεστές εκπομπών αερίων NO_x και SO_2 των συμβατικών μονάδων

Αριθμός μονάδας	α	β	γ	ζ	λ
Ηλ. ισχύος No 1	4.091	-5.554	6.490	2.0e-4	2.857
Ηλ. ισχύος No 2	2.543	-6.047	5.638	5.0e-4	3.333
Ηλ. ισχύος No 3	4.258	-5.094	4.586	1.0e-6	8.000
Ηλ. ισχύος No 4	5.326	-3.550	3.380	2.0e-3	2.000

Όσον αφορά τους συντελεστές της κατανομής της τυχαίας μεταβλητής του φορτίου, θεωρούμε ότι ο συντελεστής μεταβλητότητας της ζήτησης φορτίου λαμβάνει την τιμή $CV=0.2$ και ο συντελεστής συμμεταβλητότητας την τιμή $CC=0.3$.

7.3 Ανεμολογική μελέτη και στοιχεία αιολικών πάρκων νήσου Κρήτης

Από τα εγκατεστημένα αιολικά πάρκα της Κρήτης (πίνακας 7.5) λαμβάνουμε τα στοιχεία των ανεμογεννητριών (διάγραμμα ισχύος-ταχύτητας ανέμου) και από τα στατιστικά στοιχεία της κάθε τοποθεσίας, από τις ωριαίες μετρήσεις της ταχύτητας του ανέμου για ένα χρόνο (2006, σε κάποιες χρησιμοποιήθηκαν οι μετρήσεις του 2002), εξαγάγουμε τη συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας Weibull έτσι ώστε να χρησιμοποιηθεί στο μοντέλο που παρουσιάσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για την εξαγωγή των παραμέτρων κλίμακας και τοποθεσίας της συνάρτησης πυκνότητας πιθανότητας χρησιμοποιήσαμε το *Statistics Toolbox* της Matlab και συγκεκριμένα τη συνάρτηση `wblfit()`, με είσοδο τον πίνακα της ωριαίας ταχύτητας του ανέμου στην εκάστοτε τοποθεσία. Στον πίνακα 7.4 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων k και c .²

Τα όρια των ανεμογεννητριών που χρησιμοποιήθηκαν στη συνάρτηση ελέγχου των υποψήφιων λύσεων στην εφικτή περιοχή (`checkConstraints()`), προκύπτουν από τις μεταβλητές ταχύτητας ανέμου ένταξης (V_{in}), ταχύτητας ανέμου για την παραγωγή ονομαστικής ισχύος (V_r), και ταχύτητα ανέμου αποσύνδεσης της ανεμογεννήτριας (V_{out}). Οι τιμές αυτές προκύπτουν από τις κατασκευάστριες εταιρίες των ανεμογεννητριών

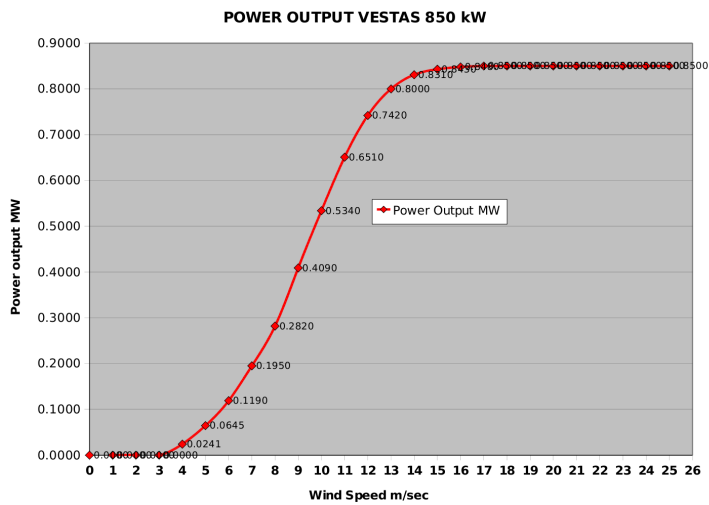
²Να σημειωθεί ότι στις περιοχές που οι μετρήσεις ήταν ελλιπείς οι συντελεστές της σ.π.π. Weibull μπορεί να αποκλίνουν σημαντικά από τους πραγματικούς.

Πίνακας 7.4: Συντελεστές τοποθεσίας και κλίμακας της σ.π.π. Weibull των επεξεργασμένων μετρήσεων ταχύτητας του ανέμου στην Κρήτη

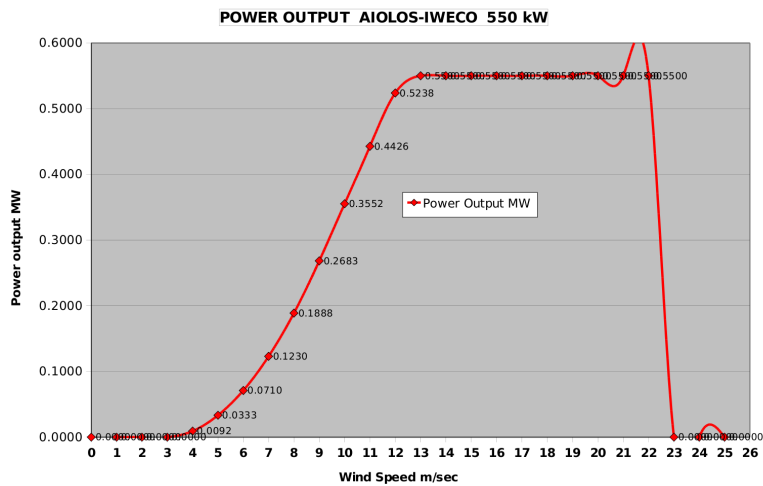
Τοποθεσία/Ιδιοκτήτης	Συντελεστής k	Συντελεστής c
Iweco	1.6259	16.0425
Iweco ΧΩΝΟΣ	0.3346	1.5137
WRE	1.4975	7.7051
ΑΙΟΛΟΣ	1.5930	19.8043
ΕΝΤΕΚΑ	1.5801	9.6170
ΞΗΡΟΛΙΜΝΗ	1.3830	7.8712
ΠΛΑΣΤΙΚΑ ΚΡΗΤΗΣ	1.7294	9.8072
ΡΟΚΑΣ	1.9585	10.3270
ΤΕΡΝΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗ	0.3822	0.0758
ΥΔΡΟΑΙΟΛΙΚΗ ΚΡΗΤΗΣ	0.5180	4.3160

που έχουν εγκατασταθεί (όπως φαίνεται και στον πίνακα 7.5), ενώ θεωρούμε την καμπύλη ισχύος γραμμική για την απλοποίηση των υπολογισμών, με μικρό σφάλμα σε σχέση με την πραγματική. Χαρακτηριστικά στα σχήματα 7.1 και 7.2 παρουσιάζονται οι καμπύλες ισχύος των ανεμογεννητριών VESTAS 850kW και των ανεμογεννητριών ZOND 550kW των αιολικών πάρκων IWECO, ΑΙΟΛΟΣ.

Όσον αφορά το κόστος λειτουργίας των αιολικών πάρκων, χωρίς να έχουμε πραγματικά δεδομένα, προκειμένου να υπάρχει μία πραγματική αναλογία με τα δεδομένα των συμβατικών μονάδων κ των μονάδων συμπαραγωγής θεωρήσαμε το συντελεστή κόστους $\sigma = 5pu$ και το συντελεστή ποινής για μη χρησιμοποίηση της διαθέσιμης αιολικής παραγωγής ως $k_p = 10pu$. Τα όρια ασφάλειας του δικτύου θεωρήθηκαν το κατώτερο στο 10% (0.3pu) του φορτίου και το ανώτερο ασφαλές όριο στο 23% (0.7pu).



Σχήμα 7.1: Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας Vestas 850kW.



Σχήμα 7.2: Η καμπύλη ισχύος της ανεμογεννήτριας Zond 550kW.

Πίνακας 7.5: Εν λειτουργία αιολικά πάρκα στην Κρήτη

NAME	LOCATION	No WT's	WT Power	WF Power	Vendor	Con. Line	Substation	Trans Name	Breaker Name	License
ROKAS	Xirolofti-Pikokleria Ipanos Sftia	30	0,6	18	BONUS MK4	AR 95	Sftia	3	380 -370	15/05/1998
ΕΝΥΠΤΕC VARDIA	Vardia Sefino Mousouron Chania	9	0,6	5,4	ENERCON	AR 90	Apta	2	260	2007
ΑΗΛΑΔΙΑ	Agfilda-Velras Sftia	20	0,5	10	Enercon 40/5-40	AR 90	Μαγρομιά	1	270	16/12/1999
ΑΣΕΜΟΕCΑ	Vrpl Achladia Sftia	10	0,5	5	Enercon 40/5-41	AR 90	Μαγρομιά	1	260	16/12/1999
ΧΙΡΟΛΟΦΤΙ	Xirolofti Sftia	22	0,6	13,2	NEG-MICON	AR 90	Sftia	3	350	20/09/2000
ΕΝΤΕΚΑ	Piskoripakes Piskolikos Ipanos Sftia	3	0,9	2,7	V52 900 (NEG-MICON)	AR 90	Sftia	3	350	14/11/2005
ENERCON	Platoni Achladia Sftia	5	0,5	2,5	Enercon 40/5-41	AR 90	Μαγρομιά	1	260	27/08/2004
WRE	Platoni Kria Sftia	4	0,25	3	NEG-MICON V44	AR 90	Μαγρομιά	1	260	16/12/2004
KRIA	Vonoli Achladia Sftia	20	0,5	10	Enercon 40/5-40	AR 90	Μαγρομιά	1	250	16/12/1999
ΕΝΥΠΤΕC ΒΑΤΙΑΙ	Vatli Sefino Mousouron Chania	9	0,6	5,4	ENERCON	AR 90	Μαγρομιά	2	260	2007
ΗΥΔΡΟΑΕΟΛΙΚΙ	Rovos Kissamos Chania	11	0,85	9,35	ENERCON V52	AR 90	Kasteli	1	200	02/08/2006
ΔΙΕΓΓΗΝΙC ΑΕΟΛΙΚΙ	S.Krtilos Corfina Heraklion	8	0,9	7,2	ENERCON	AR 90	Mires	1	410	1/10/2007
ΠΛΑCΤΙΚΑ ΚΡΗΤΙC	Broudas Zefiri Ag.Nikolaos	14	0,85	11,9	VESTAS V52	AR 90	Ag.Nikolaos	1	200	09/07/2003
ΤΟΡΠΙΛΙ 3	Torpla Sftia	3	0,5	1,5	NORDTANK	AR 90	Sftia	1	210	1995
ΤΟΡΠΙΛΙ 2	Torpla Sftia	17	0,3	5,1	HMZ	AR 90	Sftia	1	210	1991
ΤΡΕΝΑ	S.Yarvora Perifliokorifi Heraklion	17	0,85	14,45	W/G-G-52 GAMESA ΑΙΟΛΙΚΑ	AR 90	Ag Yavvora	1	210	05/07/2005
ΑΒΕΟΙC	Chandras Sftia	18	0,55	9,9	ZOND	AR 90	Sftia	3	390 -400	01/06/1999
ΙΠΕCΟ ΗΟΝΟC	Chonos Sftia	6	0,25	4,5	VESTAS V52	AR 90	Sftia	3	390	21/12/2004
ΙΠΕCΟ	Megal Vnisi Heraklion	9	0,55	4,95	ZOND	ACSR 95	Mires	2	260	01/06/1999
WF ΜΙΡΕC	Amisleri Mires Heraklion	7	0,25	5,25	ENERCON	AR 90	Mires	1	410	09/01/2008

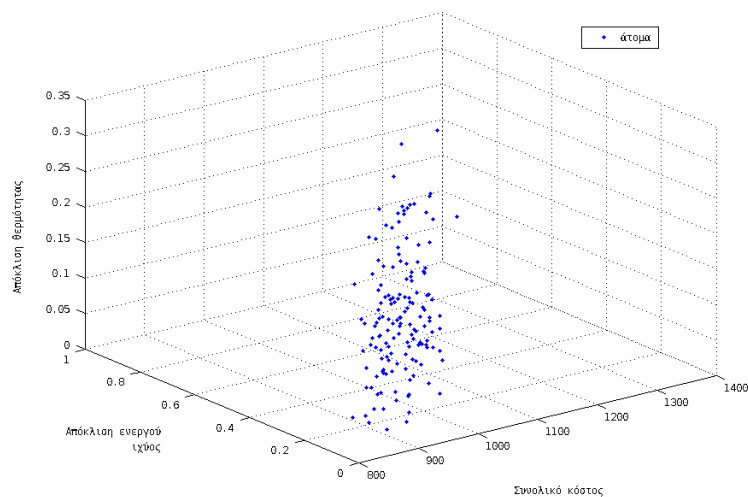
7.4 Προσομοίωση 1η: Δίκτυο χωρίς αιολική παραγωγή

Στην πρώτη προσομοίωση ελαχιστοποιούμε κατά την πολυκριτηριακή διαδικασία τις πρώτες τρεις βασικές αντικειμενικές συναρτήσεις του στοχαστικού μοντέλου που αναπτύξαμε. Στις συναρτήσεις ελέγχου του αλγορίθμου MOPSO εισάγονται η J_1 , συγχρόνως με την J_2 και την J_3 .

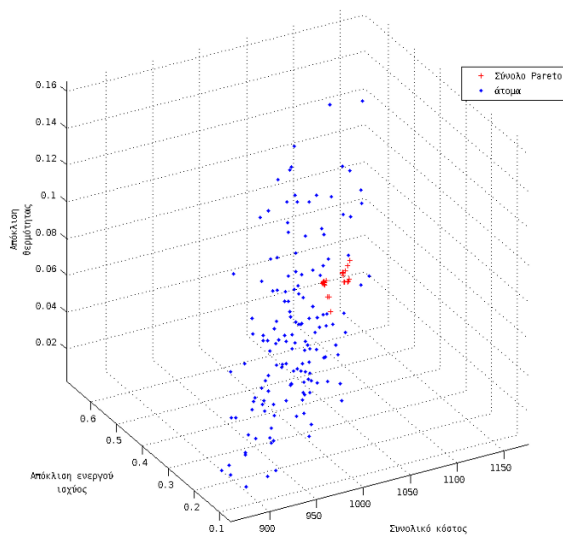
Οι παράμετροι του αλγορίθμου μετά από δοκιμές για την επιλογή των καλύτερων δυνατών επιλογών, που θα εξασφαλίζουν την επιθυμητή ταχύτητα σύγκλισης αλλά και παράλληλα το επιθυμητό εύρος αναζήτησης στο χώρο των εφικτών λύσεων, επιλέχθηκαν όπως φαίνεται στον πίνακα 7.6. Στη συνέχεια ακολουθούν τα στιγμιότυπα των διαγραμμάτων της απεικόνισης του διανύσματος απόφασης στο διανυσματικό χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων (3 διαστάσεις), του συνόλου Pareto αλλά και της θέσης των ατόμων σε περιοδικά διαστήματα κατά την επαναληπτική διαδικασία.

Πίνακας 7.6: Τιμές παραμέτρων της επαναληπτικής διαδικασίας

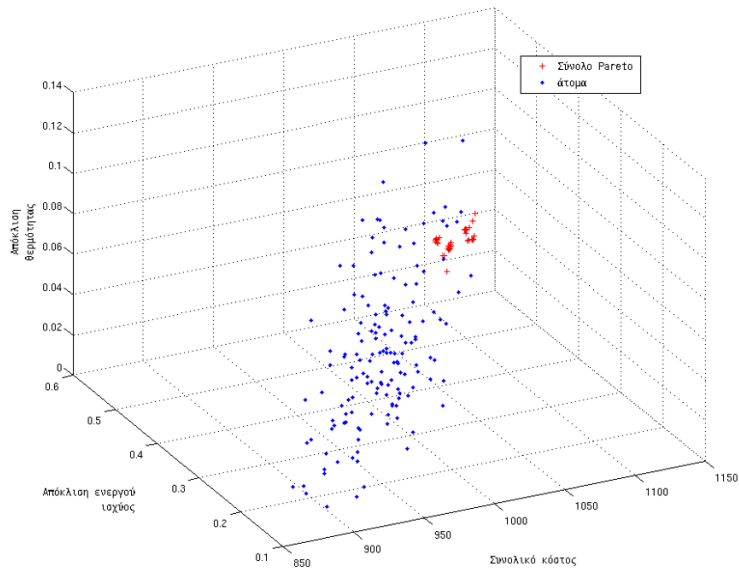
Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός ατόμων	150
Μέγιστο σύνολο Pareto	50
Επαναλήψεις	300
Συντελεστής $c[1]$	1
Συντελεστής $c[2]$	1
Συντελεστής ταχύτητας χ	0.004
Συντελεστής τυχαιότητας RT	τυχαίος, $\in [-1, 1]$
Συντελεστής W_{max}	0.6
Συντελεστής W_{min}	0.3



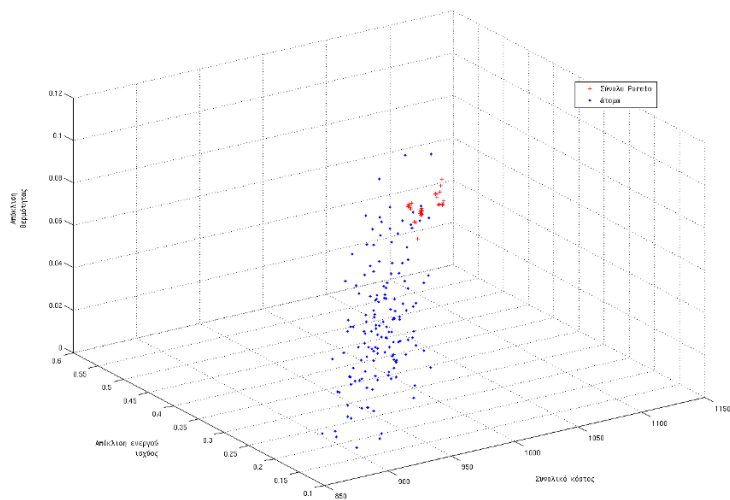
Σχήμα 7.3: Οι θέσεις των ατόμων στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας για την 1η προσομοίωση.



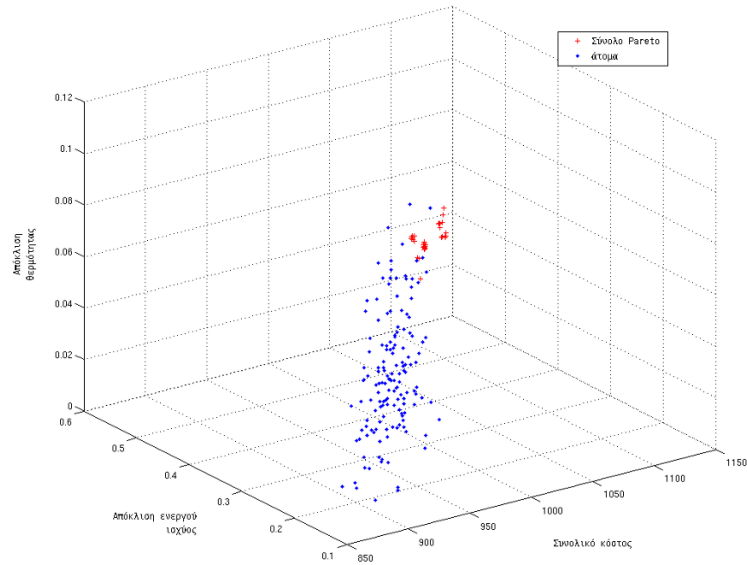
Σχήμα 7.4: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 60ή επανάληψη για την 1η προσομοίωση.



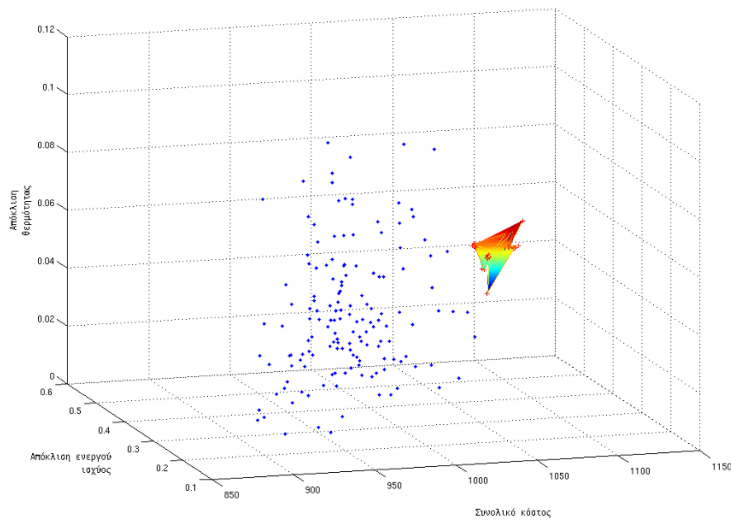
Σχήμα 7.5: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 120ή επανάληψη για την 1η προσομοίωση.



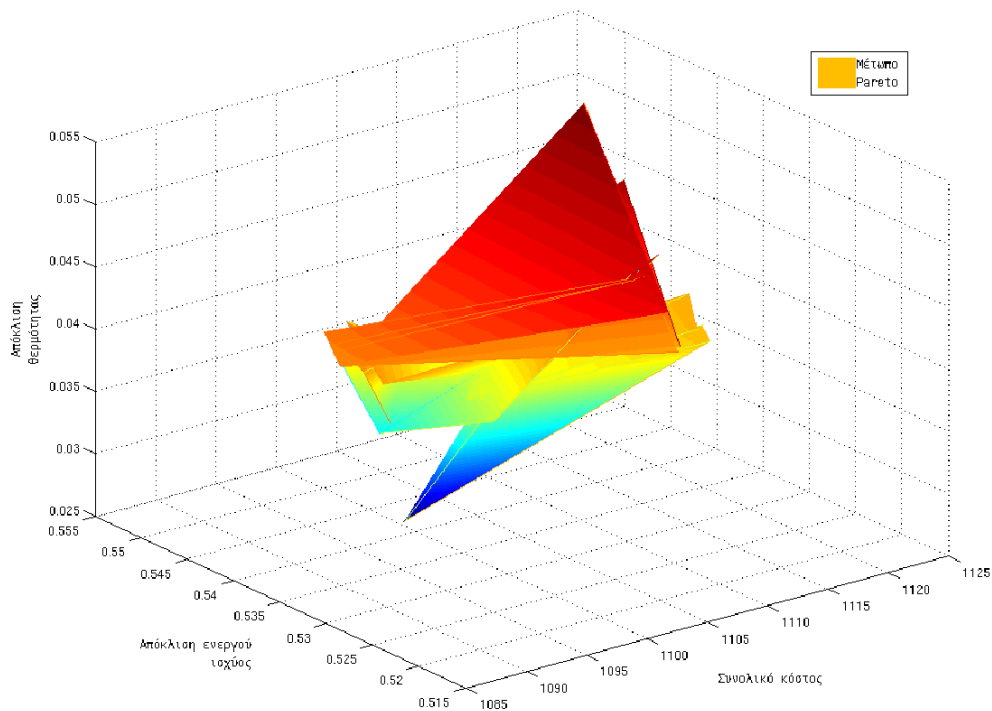
Σχήμα 7.6: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 180ή επανάληψη για την 1η προσομοίωση.



Σχήμα 7.7: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 240ή επανάληψη για την 1η προσομοίωση.



Σχήμα 7.8: Οι θέσεις των ατόμων και το μέτωπο Pareto, η τελική μορφή μετά τη λήξη των επαναλήψεων για την 1η προσομοίωση.



Σχήμα 7.9: Το τελικό μέτωπο Pareto στο διανυσματικό χώρο των αντικειμενικών συναρτήσεων. Συνεχής απεικόνιση του συνόλου βέλτιστων λύσεων.

Να σημειώσουμε ότι επιλέξαμε τις τιμές των παραμέτρων (συντελεστής ταχύτητας και συντελεστές των p_{best} , g_{best})³ έτσι ώστε να υπάρχει ισορροπία στο χώρο αναζήτησης και να μη συγκλίνουν γρήγορα εντός του αριθμού των επαναλήψεων. Παρατηρούμε το πώς σχηματίζεται το σύνολο Pareto ήδη από το στιγμιότυπο 7.4, ενώ τα άτομα κινούνται προς την ολικά βέλτιστη περιοχή συνολικά, η οποία όμως είναι εκτός συνόλου Pareto καθώς ο μηχανισμός `archiving()` αποκόπτει αυτή την περιοχή λόγω μη κάλυψης των περιορισμών του προβλήματος.

Στο τελικό στιγμιότυπο (διάγραμμα 7.8), παρατηρούμε ότι το μέτωπο Pareto έχει σχηματιστεί (διατηρείται ένας βαθμός προσέγγισης και όχι η ιδανική ακρίβεια, όπως συμβαίνει σε όλους τους επαναληπτικούς αλγορίθμους αναζήτησης), ενώ το «σμήνος» κινείται προς μικρότερες τιμές και των τριών αντικειμενικών συναρτήσεων, που ωστόσο δεν καλύπτονται από τους περιορισμούς. Χαρακτηριστικά φαίνεται στο διάγραμμα 7.9 το τελικό μέτωπο με το εύρος των τιμών που δύναται να πάρει η κάθε αντικειμενική συνάρτηση. Οι πλήρεις τιμές των στοιχείων του προβλήματος παρατίθενται στο παράρτημα.

Λαμβάνοντας υπόψη τις ανάγκες του εκάστοτε προβλήματος και τις επιλογές του διαχειριστή του συστήματος, μπορούμε να επιλέγουμε λιγότερες ή περισσότερες επαναλήψεις, με μικρότερη ή μεγαλύτερη ταχύτητα σύγκλισης εξαρτώμενη από το αν η αναζήτηση μας γίνεται για την εύρεση κάποιων ικανοποιητικών λύσεων ή αν χρειάζεται μια πιο ενδελεχής αναζήτηση στην εφικτή περιοχή, που υπολογιστικά απαιτεί περισ-

³ Οι επαναλήψεις ολοκληρώθηκαν σε 33 sec, σε υπολογιστή με Intel Core2 2.00GHz επεξεργαστή και 2Gb μνήμης RAM στη Matlab σε λειτουργικό σύστημα GNU/ Linux, διανομή Debian testing/ Lenny

σότερο χρόνο και πόρους. Από το σύνολο Pareto της προσομοίωσης που παρουσιάσαμε, στον πίνακα 7.7 καταγράφονται τα διανύσματα απόφασης για το ελάχιστο συνολικό κόστος, την ελάχιστη απόκλιση παραγωγής ισχύος και την ελάχιστη απόκλιση παραγωγής θερμότητας, αντίστοιχα.

Πίνακας 7.7: Ελάχιστες τιμές της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης για το αντίστοιχο διάνυσμα απόφασης

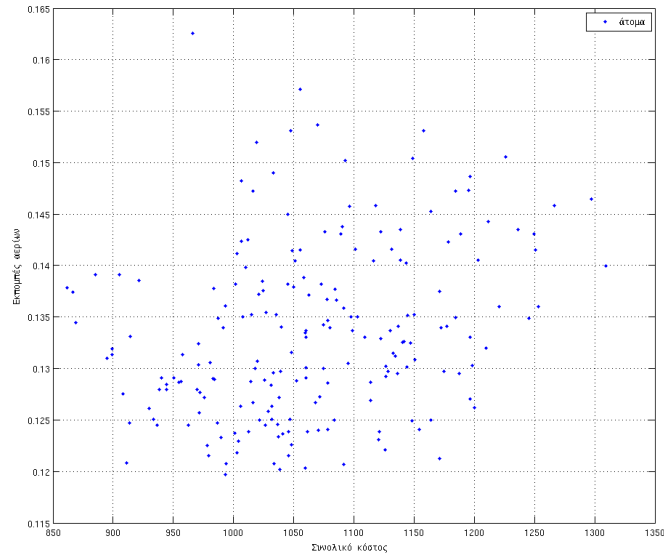
Διάνυσμα απόφασης (ρ)	Ελάχιστο κόστος	Ελάχιστη απόκλιση ισχύος	Ελάχιστη απόκλιση θερμότητας
\bar{P}_1	0.4236	0.3309	0.3800
\bar{P}_2	0.3937	0.4200	0.2144
\bar{P}_3	0.3894	0.3919	0.7906
\bar{P}_4	0.7136	0.6856	0.6434
\bar{O}_1	0.5903	0.7327	0.4214
\bar{O}_2	0.4478	0.3907	0.5181
\bar{H}_1	0.3077	0.2872	0.2680
\bar{H}_2	0.5331	0.5947	0.3855
Ελάχιστο κόστος (ρ)	1087	0.5311	0.0447
Ελ. απ. ισχύος (ρu^2)	1105.2	0.5194	0.0482
Ελ. απ. θερμ. (ρu^2)	1097.2	0.5375	0.0274

7.5 Προσομοίωση 2η: Εκπομπές αερίων NO_X και SO_2

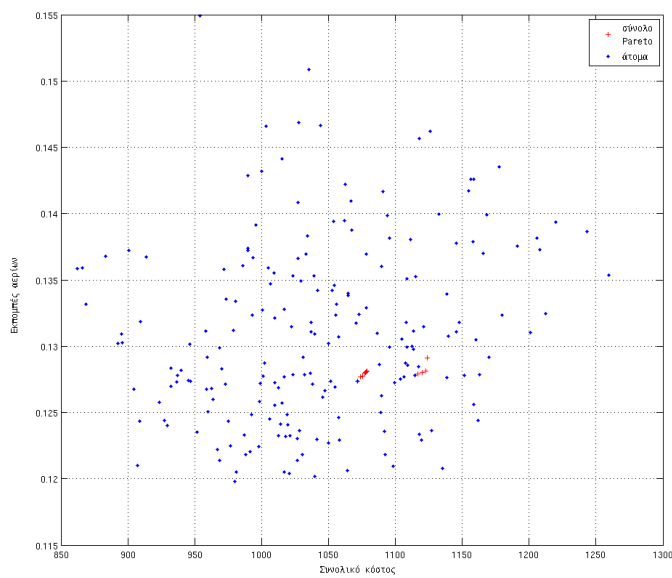
Στη δεύτερη εφαρμογή που υλοποιήσαμε υπολογίζουμε τους συνολικούς ρύπους που εκλύονται από τις μονάδες, τόσο τις συμβατικές, όσο και τις μονάδες συμπαραγωγής, χρησιμοποιώντας τους συντελεστές που αναφέραμε παραπάνω, ως προσέγγιση στα πραγματικά δεδομένα, ιδιαίτερα για τις μονάδες συμπαραγωγής, για τις οποίες είναι τμήμα έρευνας ακόμη να οριστούν αυτοί οι συντελεστές εκπομπών.

Στην πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση για τον υπολογισμό της κατανομής της παραγωγής εδώ υπεισέρχονται οι δύο εξής αντικειμενικές συναρτήσεις: Ελαχιστοποιείται το κόστος της παραγωγής όπως και στην προηγούμενη εφαρμογή ενώ συγχρόνως ελαχιστοποιούνται οι εκπομπές των προαναφερθέντων αερίων. Έτσι προκύπτει το αντίστοιχο μέτωπο Pareto αλλά αυτή τη φορά έχει 2 διαστάσεις. Το δίκτυο και οι μονάδες είναι τα ίδια που χρησιμοποιήθηκαν και στην πρώτη προσομοίωση.

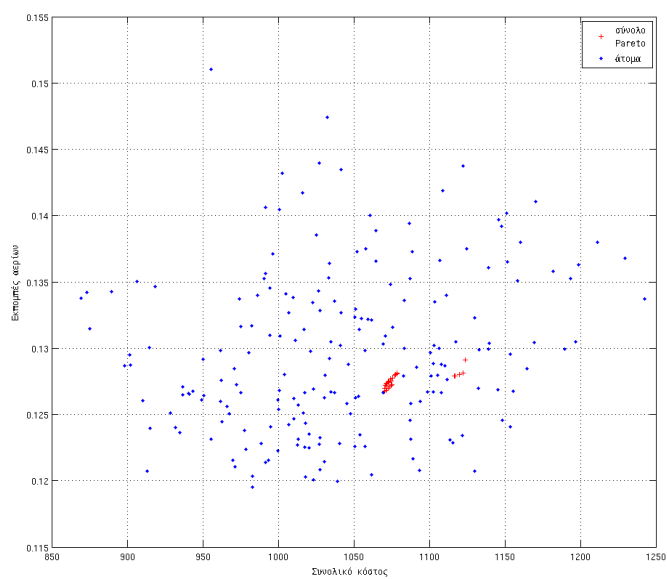
Στον πίνακα 7.8 παρουσιάζονται οι τιμές των παραμέτρων του αλγορίθμου MOPSO που επιλέχθηκαν για τη συγκεκριμένη προσομοίωση.



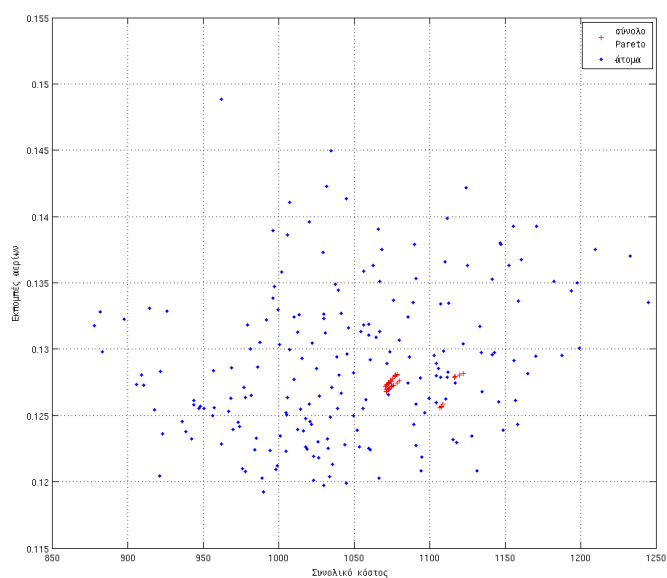
Σχήμα 7.10: Οι θέσεις των ατόμων στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας για την 2η προσομοίωση.



Σχήμα 7.11: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 60ή επανάληψη για την 2η προσομοίωση.



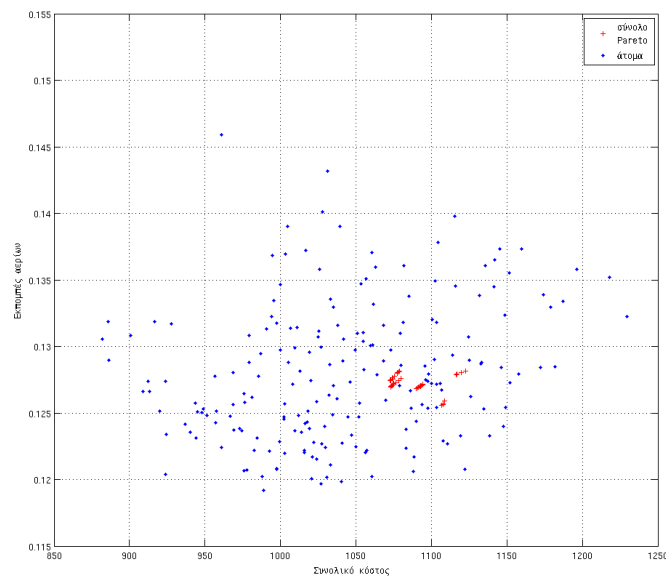
Σχήμα 7.12: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 120ή επανάληψη για την 2η προσομοίωση.



Σχήμα 7.13: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 180ή επανάληψη για την 2η προσομοίωση.

Πίνακας 7.8: Τιμές παραμέτρων της επαναληπτικής διαδικασίας, υπολογισμός εκπομπών αερίων ρύπων

Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός ατόμων	200
Μέγιστο σύνολο Pareto	40
Επαναλήψεις	250
Συντελεστής $c[1]$	1
Συντελεστής $c[2]$	1
Συντελεστής ταχύτητας χ	0.002
Συντελεστής τυχαιότητας RT	τυχαίος, $\in [-1, 1]$
Συντελεστής W_{max}	0.4
Συντελεστής W_{min}	0.25



Σχήμα 7.14: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, τελικό αποτέλεσμα για την 2η προσομοίωση.

Παρατηρήσαμε ότι η εύρεση βέλτιστων σημείων που να καλύπτουν τους περιορισμούς ήταν πιο χρονοβόρα λόγω ασύμβατων δεδομένων εισόδου (κόστος μονάδων ως προς συντελεστές εκπομπών), για αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε μεγαλύτερος αριθμός ατόμων στην αναζήτηση, με μικρότερο αριθμό όμως επαναλήψεων και μικρότερο συντελεστή W , έτσι ώστε να γίνεται πιο εκτενής αναζήτηση τοπικά στην περιοχή του κάθε ατόμου παρά συνολικά στο χώρο.

Από το διάγραμμα 7.11 στην 60ή επανάληψη έχει εντοπιστεί η βέλτιστη περιοχή που καλύπτει τους περιορισμούς, η οποία αρχικά δεν έχει τη μορφή του μέτωπου Pareto. Στη συνέχεια εντοπίζονται γειτονικές περιοχές στα 7.12 και 7.13, οι οποίες προσεγγίζουν το μέτωπο Pareto αν θεωρήσουμε μία νοητή γραμμή που να ενώνει αυτές τις περιοχές. Το πραγματικό μέτωπο Pareto δεν σχηματίστηκε στην επαναληπτική διαδικασία για λόγους δεδομένων εισόδου που επηρεάζουν τον τρόπο αναζήτησης, καθώς στη συγκεκριμένη εφαρμογή πιθανώς να μην υπάρχει ανταλλαγή (tradeoff) μεταξύ των αντικειμενικών συναρτήσεων κόστους και εκπομπών έτσι ώστε να διαγράφεται η γραμμή (μέτωπο) Pareto σε δύο διαστάσεις.

Ωστόσο προσεγγιστικά θεωρούμε ότι είναι η περιοχή που φαίνεται στο διάγραμμα 7.14, ενώνοντας τις κατώτερες κορυφές της περιοχής που βρέθηκε. Στον πίνακα 7.9 καταγράφονται τα διανύσματα απόφασης για τις ελάχιστες τιμές των αντικειμενικών συναρτήσεων.⁴

Πίνακας 7.9: Ελάχιστες τιμές της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης για το αντίστοιχο διάνυσμα απόφασης

Διάνυσμα απόφασης (pu)	Ελάχιστο κόστος	Ελάχιστες εκπομπές
\bar{P}_1	0.3659	0.1757
\bar{P}_2	0.5444	0.4152
\bar{P}_3	0.9050	0.7229
\bar{P}_4	0.6349	0.5853
\bar{O}_1	0.3241	0.5578
\bar{O}_2	0.2379	0.4961
\bar{H}_1	0.2098	0.4921
\bar{H}_2	0.7181	0.4321
Ελάχιστο κόστος (pu)	1078.5	1106.8
Ελάχιστες εκπομπές (ton/hr)	0.1275	0.1256

⁴Οι επαναλήψεις ολοκληρώθηκαν σε 35 sec, σε υπολογιστή με Intel Core2 2.00GHz επεξεργαστή και 2Gb μνήμης RAM στη Matlab σε λειτουργικό σύστημα GNU/ Linux, διανομή Debian testing/ Lenny

7.6 Προσομοίωση 3η: Δίκτυο με σύνδεση των αιολικών πάρκων της Κρήτης.

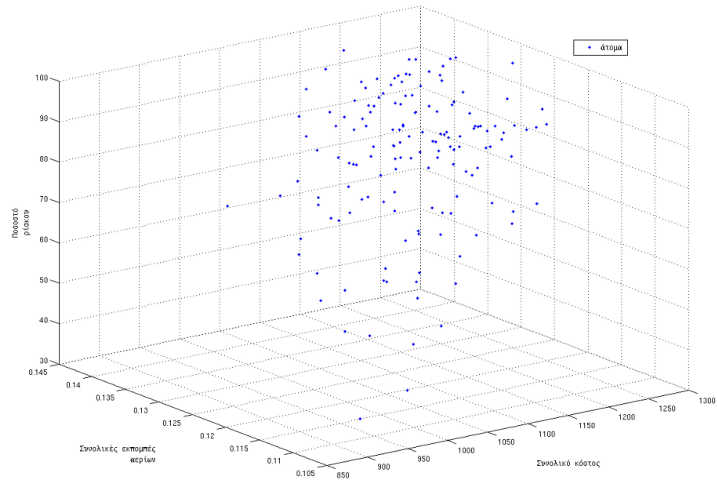
Σε αυτή την προσομοίωση εισάγουμε τα δεδομένα της ανεμολογικής μελέτης για τις περιοχές της Κρήτης που έχουν εγκατασταθεί αιολικά πάρκα. Οι τιμές των παραμέτρων των αιολικών πάρκων έχουν αναπτυχθεί παραπάνω. Θεωρούμε την ελαχιστοποίηση των τριών αντικειμενικών συναρτήσεων: αφ' ενός του συνολικού κόστους παραγωγής, ενώ παράλληλα ελαχιστοποιούνται οι εκπομπές αέριων ρύπων NO_x και SO_2 και ο συντελεστής διείδυσης αιολικής παραγωγής και ασφάλειας συστήματος που έχει περιγραφεί αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Να σημειώσουμε ότι κατά τον έλεγχο των περιορισμών σε αυτή την προσομοίωση δεν συμπεριλαμβάνεται ο έλεγχος της ζήτησης θερμότητας, αλλά μόνο της ζήτησης ηλεκτρικής ισχύος. Θεωρούμε δηλαδή λειτουργία του τύπου "electricity match" με πιθανή χρήση λεβήτων για την κάλυψη των αποκλίσεων παραγωγής και ζήτησης θερμότητας.

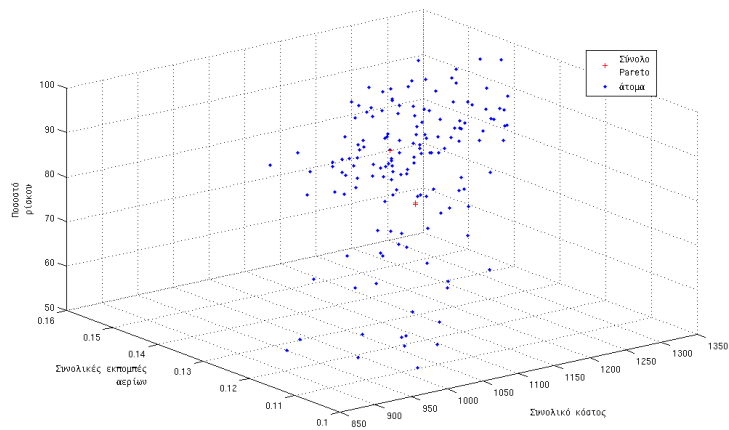
Ακολουθεί ο πίνακας 7.10 των παραμέτρων του αλγορίθμου, τα στιγμιότυπα της βελτιστοποίησης και ανάλυση των αποτελεσμάτων.

Πίνακας 7.10: Τιμές παραμέτρων της επαναληπτικής διαδικασίας με σύνδεση αιολικών πάρκων

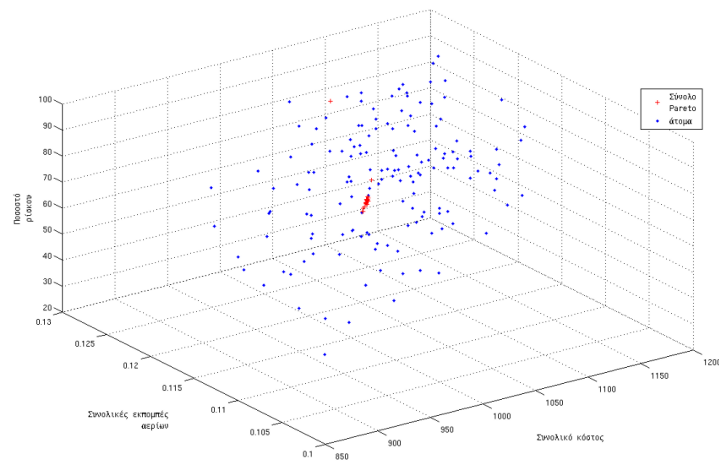
Παράμετρος	Τιμή
Αριθμός ατόμων	150
Μέγιστο σύνολο Pareto	30
Επαναλήψεις	100
Συντελεστής $c[1]$	1.6
Συντελεστής $c[2]$	1.6
Συντελεστής ταχύτητας χ	0.001
Συντελεστής τυχαιότητας RT	τυχαίος, $\in [-1, 1]$
Συντελεστής W_{max}	0.8
Συντελεστής W_{min}	0.4



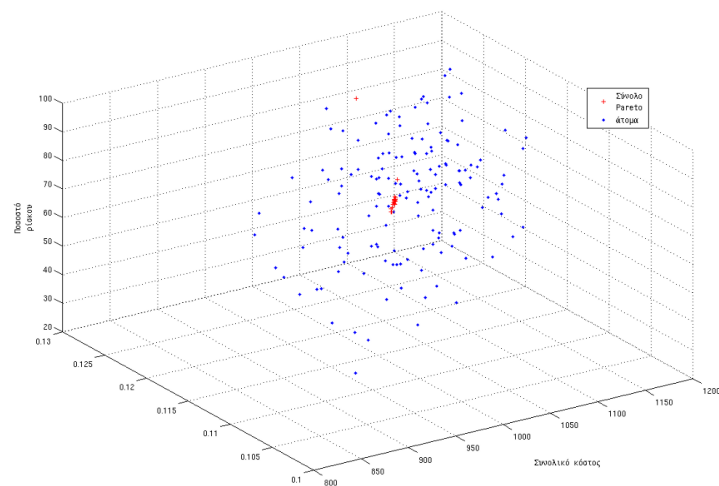
Σχήμα 7.15: Οι θέσεις των ατόμων στην αρχή της επαναληπτικής διαδικασίας για την 3η προσομοίωση.



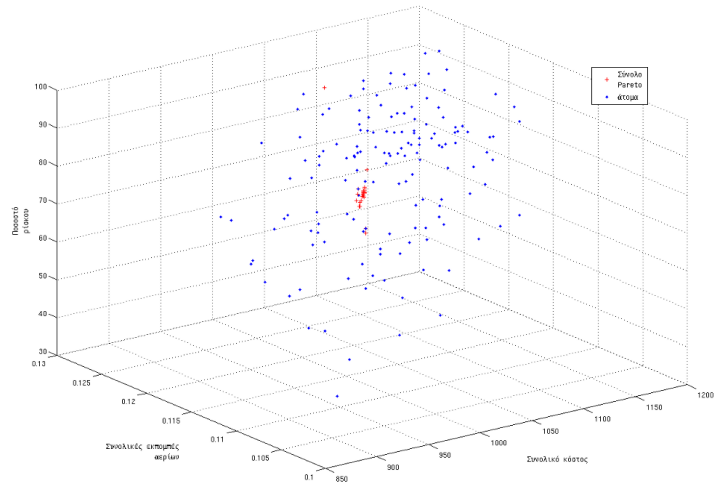
Σχήμα 7.16: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 20ή επανάληψη για την 3η προσομοίωση.



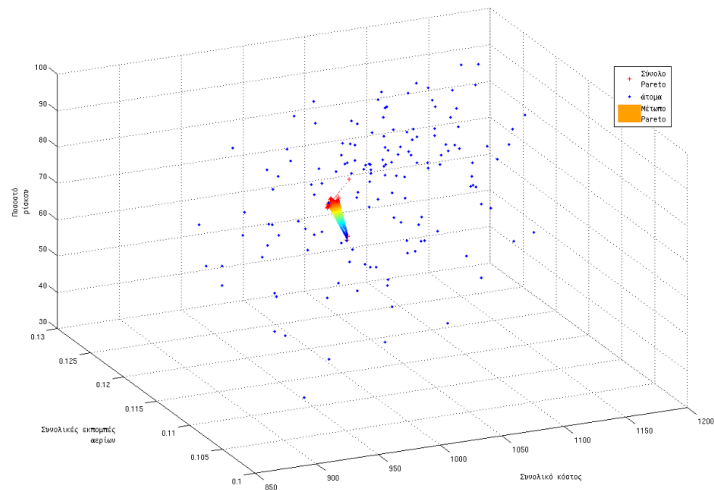
Σχήμα 7.17: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 40ή επανάληψη για την 3η προσομοίωση.



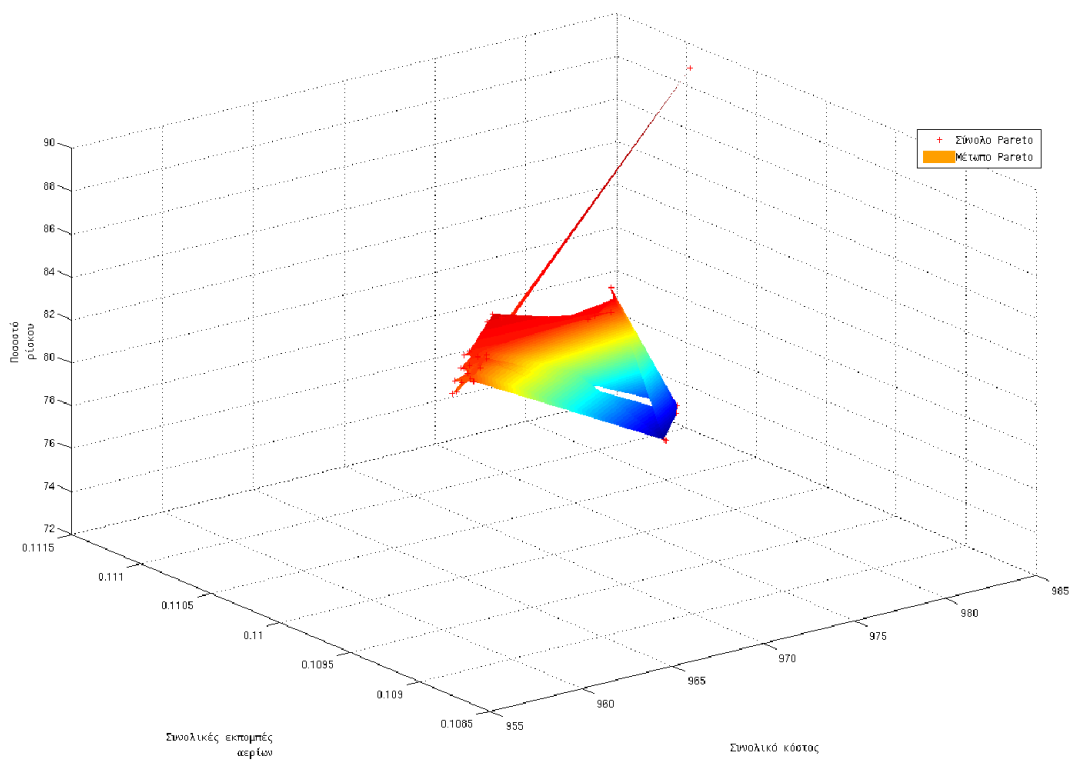
Σχήμα 7.18: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 60ή επανάληψη για την 3η προσομοίωση.



Σχήμα 7.19: Οι θέσεις των ατόμων και το σύνολο Pareto, στιγμιότυπο κατά την 80ή επανάληψη για την 3η προσομοίωση.



Σχήμα 7.20: Οι θέσεις των ατόμων και το μέτωπο Pareto, τελικό αποτέλεσμα για την 3η προσομοίωση.



Σχήμα 7.21: Το μέτωπο Pareto και τα σημεία του συνόλου για την 3η προσομοίωση.

Η συγκεκριμένη προσομοίωση είναι η πιο σύνθετη και χρονοβόρα⁵ από τις τρεις καθώς συνδυάζει τις μονάδες συμπαραγωγής με τα αιολικά πάρκα και οι διαστάσεις του προβλήματος αυξάνονται ιδιαίτερα (διάνυσμα απόφασης 28 στοιχείων, με 20 τα αιολικά πάρκα) συγκρινόμενες με τις 8 διαστάσεις των προηγούμενων εφαρμογών. Επίσης ο στοχαστικός χαρακτήρας της ταχύτητας του ανέμου στο μοντέλο που αναπτύξαμε προσθέτει περαιτέρω πολυπλοκότητα στον αλγόριθμο καθώς θα πρέπει να υπολογίζονται σε κάθε επανάληψη, για κάθε άτομο και για κάθε φορά που υπολογίζεται η αντικειμενική συνάρτηση του κόστους οι συνελίξεις των σ.π.π του φορτίου και της διαθέσιμης αιολικής ισχύος με βάση τη μετατροπή από την ταχύτητα του ανέμου που περιγράψαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για αυτό το λόγο επιλέγουμε να έχουμε πιο σύντομη σύγκλιση του αλγορίθμου επιλέγοντας τις παραπάνω τιμές του πίνακα 7.10.

Παρατηρούμε στα διαγράμματα ?? και ?? ότι τα διανύσματα του συνόλου βέλτιστων λύσεων είναι περιορισμένα σε μικρό χώρο σε σχέση με το μέγεθος του χώρου αναζήτησης και ενώ θα περιμέναμε στις επόμενες επαναλήψεις να διευρυνθεί το σύνολο Pareto, αυτό δε συμβαίνει γιατί λόγω του μεγάλου αριθμού διαστάσεων του προβλήματος, οι περιορισμοί γίνονται περισσότεροι και καθορίζουν το αποτέλεσμα. Ο πίνακας 7.11 παρουσιάζει τα αποτελέσματα για τα διανύσματα απόφασης με ελάχιστο κόστος, ελάχιστες εκπομπές αερίων NO_x και SO_2 και το ελάχιστο ποσοστό ρίσκου που αντιστοιχεί στο συντελεστή διείδυσης αιολικής παραγωγής στο δίκτυο. Ακολουθεί συνολικότερη ανάλυση των αποτελεσμάτων με σύγκριση των τριών εφαρμογών.

⁵Οι επαναλήψεις ολοκληρώθηκαν σε 26 min, σε υπολογιστή με Intel Core2 2.00GHz επεξεργαστή και 2Gb μνήμης RAM στη Matlab σε λειτουργικό σύστημα GNU/ Linux, διανομή Debian testing/ Lenny

Πίνακας 7.11: Ελάχιστες τιμές της κάθε αντικειμενικής συνάρτησης για το αντίστοιχο διάνυσμα απόφασης

Διάνυσμα απόφασης (ρu)	Ελάχιστο κόστος	Ελάχιστες εκπομπές	Ελάχιστο ρίσκο
\bar{P}_1	0.4298	0.4298	0.3631
\bar{P}_2	0.5539	0.5539	0.5086
\bar{P}_3	0.2503	0.2503	0.7582
\bar{P}_4	0.4480	0.4480	0.2392
\bar{O}_1	0.2140	0.2140	0.2442
\bar{O}_2	0.3762	0.3762	0.2125
\bar{H}_1	0.1602	0.1602	0.4340
\bar{H}_2	0.6221	0.6221	0.2790
\bar{W}_{rokas}	0.0698	0.0698	0.0356
\bar{W}_{toplu3}	0.0114	0.0114	0.0115
$\bar{W}_{toplu12}$	0.0144	0.0144	0.0216
\bar{W}_{enteke}	0.0130	0.0130	0.0164
$\bar{W}_{xirolimni}$	0.0263	0.0263	0.1049
$\bar{W}_{enercon}$	0.0204	0.0204	0.0067
\bar{W}_{wre}	0.0217	0.0217	0.0188
\bar{W}_{kria}	0.0291	0.0291	0.0854
$\bar{W}_{ahladia}$	0.0427	0.0427	0.0141
$\bar{W}_{anemoessa}$	0.0314	0.0314	0.0196
$\bar{W}_{iweco-honos}$	0.0051	0.0051	0.0245
\bar{W}_{iweco}	0.0446	0.0446	0.0138
\bar{W}_{aeolos}	0.0526	0.0526	0.0623
$\bar{W}_{Envitec-Vatali}$	0.0209	0.0209	0.0071
$\bar{W}_{Envitec-Vardia}$	0.0476	0.0476	0.0361
$\bar{W}_{Hydroaeoliki}$	0.0407	0.0407	0.0237
$\bar{W}_{WF-mires}$	0.0352	0.0352	0.0369
$\bar{W}_{Diethnis-Aioliki}$	0.0426	0.0426	0.0224
$\bar{W}_{Terna-energeiaki}$	0.0596	0.0596	0.0167
$\bar{W}_{Plastika-kritis}$	0.0573	0.0573	0.0512
Ελάχιστο κόστος (ρu)	955.2808	955.2808	981.2
Ελάχιστες εκπομπές (ton/hr)	0.1088	0.1088	0.1107
Ελάχιστο ρίσκο (%)	85.89	85.89	73.19
Ποσοστό διείσδυσης αιολικής παραγωγής (%)	22.88	22.88	20.98

7.7 Ανάλυση των αποτελεσμάτων και σύγκριση

Αυτό που πρέπει να σημειώσουμε αρχικά είναι ότι η κατανομή στα αιολικά πάρκα γίνεται καταχρηστικά, καθώς προφανώς ο διαχειριστής του συστήματος δεν μπορεί να προκαταβάλλει την αιολική παραγωγή, ωστόσο τα εισάγουμε στο δiάνυσμα απόφασης προκειμένου να υπολογιστεί η ισχύς των συμβατικών μονάδων και των μονάδων συμπαραγωγής. Η πιο ουσιαστική σύγκριση για τα αποτελέσματα των τριών προσομοιώσεων είναι η σύγκριση του κόστους παραγωγής (με δεδομένο αναμενόμενο φορτίο 3pu και αναμενόμενη ζήτηση θερμότητας 0.8.pu) αλλά και η σύγκριση των εκπομπών αερίων, πριν και μετά τη σύνδεση των αιολικών πάρκων στο αρχικό δίκτυο.

Αναφορικά με το κόστος παραγωγής, συγκρίνουμε τις επιλογές του διαχειριστή που αναφέρονται στο δiάνυσμα απόφασης με το ελάχιστο κόστος, επιλεγμένες από το σύνολο Pareto. Από τον πίνακα 7.7 το αναμενόμενο κόστος παραγωγής των συμβατικών και των μονάδων συμπαραγωγής είναι 1087 pu, ενώ από τον πίνακα 7.11 το αντίστοιχο αναμενόμενο κόστος μετά τη σύνδεση των αιολικών πάρκων της Κρήτης διαμορφώνεται σε 955 pu, με ποσοστό διείσδυσης 22.88%.

Η επί τοις εκατό μεταβολή του κόστους λοιπόν με διείσδυση 22.88% αιολικής παραγωγής υπολογίζεται ως μείωση 12.14% ως προς την αρχική. Αντίστοιχα, για την επιλογή με το ελάχιστο ποσοστό ρίσκου διείσδυσης αιολικής παραγωγής (73.19%) η επί τοις εκατό μείωση του κόστους υπολογίζεται ως 9.7%. Αν θεωρήσουμε την επιλογή με τις ελάχιστες εκπομπές αερίων, η επί τοις εκατό μεταβολή του κόστους υπολογίζεται ως 13.69% πριν και μετά τη σύνδεση των αιολικών πάρκων.

Αντίστοιχα, για τις εκπομπές αερίων NO_x και SO_2 , στη δεύτερη προσομοίωση υπολογίσαμε την αναμενόμενη ποσότητα σε ton/hr και στον πίνακα 7.9 παρουσιάζονται οι αντίστοιχες επιλογές του διαχειριστή που αντιστοιχούν σε ελάχιστο αναμενόμενο κόστος και ελάχιστες αναμενόμενες εκπομπές. Έτσι για την επιλογή που αντιστοιχεί στο ελάχιστο κόστος χωρίς την αιολική παραγωγή οι εκπομπές διαμορφώνονται σε 0.1275 ton/hr ενώ για την περίπτωση με διείσδυση 22.88% αιολικής ισχύος στο δίκτυο διαμορφώνονται σε 0.1088 ton/hr. Η επί τοις εκατό μείωση λοιπόν υπολογίζεται ως 14.67%.

Οι αναλυτικοί πίνακες των συνόλων Pareto και των τελικών δεδομένων παρουσιάζονται στο παράρτημα, όπως και τμήματα του πηγαίου κώδικα του αλγορίθμου.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα και προοπτικές

8.1 Εισαγωγή

Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας αναπτύξαμε μία μέθοδο πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης στηριζόμενη σε έναν νέο σχετικά αλγόριθμο του κλάδου κοινωνικής νοημοσύνης της τεχνητής νοημοσύνης, την Particle Swarm Optimization. Η παραλλαγή της μεθόδου έγινε για την αντιμετώπιση των πολλαπλών και αντικρουόμενων αντικειμενικών συναρτήσεων με ενιαίο τρόπο έτσι ώστε να παράγονται οι άριστες κατά Pareto λύσεις. Παράλληλα αναπτύξαμε ένα μοντέλο για τη βελτιστοποίηση της κατανομής ενεργού ισχύος σε ένα αυτόνομο δίκτυο, θεωρώντας το φορτίο του ως τυχαία μεταβλητή, προσπαθώντας έτσι να βρούμε τις λύσεις του προβλήματος σε ένα μεγαλύτερο εύρος από αυτό που παράγεται στις ντετερμινιστικές προσεγγίσεις των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες συνήθως έχουν σημαντικές αποκλίσεις από τις πραγματικές συνθήκες. Εδώ να σημειώσουμε ότι στο σύστημα υπάρχουν και μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας και η παραγωγή θερμότητας εισέρχεται με αντίστοιχο τρόπο στο διάνυσμα απόφασης. Στο μοντέλο αυτό ελαχιστοποιούνται το αναμενόμενο κόστος παραγωγής, η αναμενόμενη απόκλιση παραγωγής ενεργού ισχύος από το φορτίο και η αντίστοιχη απόκλιση της παραγωγής θερμότητας από τις μονάδες συμπαραγωγής, οι αναμενόμενες εκπομπές αερίων ρύπων NO_x και SO_2 και ο συντελεστής ασφάλειας του συστήματος για τη διείσδυση αιολικής παραγωγής. Το σύστημα στο οποίο εφαρμόσαμε τη μέθοδο που αναπτύξαμε αποτελείται από 4 συμβατικές μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος, 2 μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας και συνδέσαμε σε αυτό τα αιολικά πάρκα της Κρήτης. Η αιολική παραγωγή θεωρήθηκε στοχαστική, εξαρτώμενη από την ταχύτητα του ανέμου, για την οποία, με βάση τα ετήσια δεδομένα για την Κρήτη, υπολογίσαμε τις κατανομές Weibull που περιγράφουν την ταχύτητα σε κάθε περιοχή. Οι προσομοιώσεις που έγιναν είναι τρεις: αρχικά το δίκτυο χωρίς αιολική παραγωγή, στη συνέχεια στο ίδιο δίκτυο υπολογίστηκαν οι εκπομπές αερίων και στην τρίτη προσομοίωση αντίστοιχα, έχοντας συνδέσει τα αιολικά πάρκα της Κρήτης. Στις παρακάτω ενότητες αναλύουμε τα συμπεράσματα ανά θεματική ενότητα η οποία σχετίζεται με την παρούσα εργασία.

8.2 Η μέθοδος Particle Swarm Optimization

Η εν λόγω μέθοδος κερδίζει έδαφος τα τελευταία χρόνια σε διάφορους τομείς όπως και στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς όπως αναλύσαμε και στα προηγούμε-

να κεφάλαια, παρουσιάζει ιδιαίτερη ικανότητα να ρυθμίζεται ως προς την ταχύτητα σύγκλισης και τη μη εμπλοκή σε τοπικά βέλτιστα, ενώ παράλληλα είναι δεν απαιτεί ιδιαίτερη υπολογιστική ισχύ, όπως για παράδειγμα οι γενετικοί αλγόριθμοι, για τη βελτιστοποίηση μη γραμμικών ιδιαίτερα πολυδιάστατων προβλημάτων. Στα πλαίσια της διπλωματικής εργασίας αναπτύξαμε μία παραλλαγή της, και τα αποτελέσματα ήταν παραπάνω από ικανοποιητικά σε μικρό χρονικό διάστημα (τάξη μεγέθους των 30 sec στις πρώτες προσομοιώσεις) με δυνατότητα ρύθμισης του χρόνου βελτιστοποίησης και ποιότητας αναζήτησης στο χώρο των εφικτών λύσεων.

Αυτό μας ενέπνευσε να εφαρμόσουμε τη μέθοδο σε μία πιο σύνθετη εφαρμογή, αυτή με τη σύνδεση αιολικών πάρκων, καθώς, όχι μόνο αυξήθηκαν οι διαστάσεις του προβλήματος (από 8 έγιναν 28), αλλά σε αυτή την περίπτωση πρέπει σε κάθε επανάληψη, να υπολογίζεται η συνέλιξη των δύο κατανομών των τυχαίων μεταβλητών του φορτίου (κανονική) και της παραγόμενης ισχύος από τα αιολικά πάρκα (μετασχηματισμένη κατανομή Weibull), η οποία προσθέτει αρκετό υπολογιστικό κόστος το οποίο αυξάνεται όσο αυξάνεται η ζητούμενη ακρίβεια. Το αποτέλεσμα ήταν ικανοποιητικό και θα μπορούσε η μέθοδος να εφαρμοστεί σε συνολικά πραγματικά δεδομένα ενός δικτύου.

Έτσι θεωρούμε ότι θα μπορούσε να γίνει εφαρμογή σε πολλά προβλήματα βελτιστοποίησης στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς είναι ήδη σε επίπεδο έρευνας οι πιθανές εφαρμογές της μεθόδου και των παραλλαγών της, όπως για τη βέλτιστη ροή φορτίου, την ένταξη μονάδων, το σχεδιασμό επέκτασης δικτύου μεταφοράς, το Var σχεδιασμό, τον υπολογισμό μοντέλων πρόβλεψης αιολικής ισχύος, την υδροθερμική συνεργασία, τον υπολογισμό των θέσεων των FACTS, υπολογισμό στρατηγικών ενεργειακών αγορών και άλλα. Μία αξιολογή εφαρμογή θα μπορούσε να είναι σε ζητήματα λειτουργίας των μικροδικτύων, ως υπολογιστική λειτουργία του κεντρικού ελεγκτή (MGCC), ιδιαίτερα η πολυκριτηριακή της παραλλαγή που αναπτύξαμε. [17]

8.3 Πολυκριτηριακή βελτιστοποίηση

Τα προβλήματα πολυκριτηριακής βελτιστοποίησης, τείνουν εν γένει να περιγράφουν πληρέστερα το ζήτημα απόφασης που καλείται να ληφθεί, καθώς οι πραγματικές συνθήκες επιβάλλουν την ταυτόχρονη ικανοποίηση πολλών κριτηρίων. Η αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων με τη μέθοδο των βαρών (ανάθεση ποσοστών στην εκάστοτε αντικειμενική συνάρτηση) είναι χρονοβόρα και παράγει αποτελέσματα με σχετικά μεγάλη απόκλιση, ιδιαίτερα όταν χρειάζεται να παραχθεί το μέτωπο Pareto. Στην παραλλαγή που αναπτύξαμε και γενικά στις μεθόδους παραγωγής του μετώπου Pareto που στηρίζονται σε κάποια συνάρτηση καταλληλότητας (fitness function), το σύνολο Pareto παράγεται επαναληπτικά λαμβάνοντας υπόψη όλες τις αντικειμενικές συναρτήσεις, αυξάνοντας όμως την πολυπλοκότητα της βελτιστοποίησης. Για αυτό το λόγο η μέθοδος PSO μπορεί να « ανεχτεί » υπολογιστικά την πολυκριτηριακή αναζήτηση. Τα αποτελέσματα που παρήγαγε ως προς αυτόν τον τομέα ήταν ικανοποιητικά, όχι όμως τα ιδανικά, και αυτό είναι παράγοντας προς περαιτέρω βελτιστοποίηση στον αλγόριθμο, έτσι ώστε να παράγει λύσεις με μεγάλη διασπορά και όσο το δυνατό πιο ομοιόμορφα κατανομημένες. Από το σύνολο που παράγει η εν λόγω μέθοδος μπορεί στη συνέχεια να γίνει κάποια αξιολόγηση, μελέτη ως προς τα αποτελέσματά της ή κάποια ταξινόμηση των στοιχείων του συνόλου προκειμένου να δίνεται μία πλήρης εικόνα στο διαχειριστή (στον αποφασίζοντα γενικά) των δυνατών επιλογών και του βαθμού κάλυψης των αντικειμενικών συναρτήσεων.

8.4 Πιθανοτική προσέγγιση ΣΗΕ

Το πλήθος των παραμέτρων που μεταβάλλονται στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας και η τυχαιότητα με την οποία επιδρούν οι πολλαπλοί παράγοντες στη μόνιμη και μεταβατική λειτουργία, εξετάζονται προκειμένου να λαμβάνονται υπόψη όλα τα πιθανά σενάρια ώστε να διασφαλίζεται η οικονομική και ασφαλής λειτουργία. Η ανάλυση που κάναμε στο μοντέλο που αναπτύξαμε μας προσφέρει ένα μεγαλύτερο εύρος λύσεων στο σύνολο Pareto που περιλαμβάνει τις πιθανές αποκλίσεις από την αναμενόμενη τιμή της αντικειμενικής συνάρτησης που αντιστοιχεί στο διάλυμα απόφασης. Έτσι, θεωρώντας το φορτίο του συστήματος ως τυχαία μεταβλητή για το διάστημα της επόμενης ώρας, προέκυψαν λύσεις που είναι δυνατό να καλύψουν την ενδεχόμενη απόκλιση, οπότε ο διαχειριστής μπορεί να προβλέψει ενδεχόμενα σφάλματα ή να επιλέξει με μεγαλύτερη ακρίβεια την οικονομικότερη κατανομή. Ωστόσο στην πρώτη προσομοίωση επιδιώκουμε να ελαχιστοποιούμε αυτή την απόκλιση, προκειμένου το εύρος να μη διευρύνεται προς τις λιγότερο πιθανές λύσεις. Παράλληλα, είναι προφανής ο μεταβλητός χαρακτήρας του ανέμου, και συνεπώς η θεώρηση της ισχύος των ανεμογεννητριών ως τυχαίες μεταβλητές που ακολουθούν κατανομή που προσεγγίζει σππ Weibull. Ο συνδυασμός αυτός με την τυχαία μεταβλητή του φορτίου έγινε με μεγαλύτερη ακρίβεια με χρήση συνέλιξης και όχι θεώρησης των δύο κατανομών ως όμοιων, γεγονός που υπολογιστικά είναι σαφώς πιο πολύπλοκο και απαιτήσε αρκετό χρόνο για να παράγει αποτελέσματα, ωστόσο έχει μεγαλύτερη ακρίβεια και συνδυάζεται άψογα με τη γρήγορη μέθοδο που αναπτύξαμε.

8.5 Συμπαραγωγή ηλεκτρισμού και θερμότητας

Όπως έχουμε αναλύσει προηγούμενα τα συστήματα συμπαραγωγής έχουν σαφώς καλύτερη απόδοση ενεργειακά από τις συμβατικές μονάδες ηλεκτροπαραγωγής, καλύπτοντας τις ανάγκες σε θέρμανση και ψύξη. Λόγω των ιδιαίτερων περιορισμών των μονάδων η συνολική εφικτή περιοχή του προβλήματος γίνεται πιο περίπλοκη, η εύρεση βέλτιστων λύσεων πιο χρονοβόρα και οι μέθοδοι βελτιστοποίησης των κυρτών συναρτήσεων δεν αρκούν. Στο πρόβλημα που επιλύσαμε θεωρήσαμε μέρος του διανύσματος απόφασης την παραγωγή θερμότητας από τις μονάδες συμπαραγωγής και η επίλυση του ήταν ικανοποιητική όταν το πρόβλημα είχε λίγες διαστάσεις. Ωστόσο, με την πρόσθεση των αιολικών πάρκων στο πρόβλημα, η κάλυψη ταυτόχρονα του φορτίου και της ζήτησης θερμότητας έγινε με μεγάλη σχετικά απόκλιση θερμότητας, γεγονός που αποδίδουμε στην επιλογή των μονάδων που λειτουργούσαν στο δίκτυο και όχι σε αδυναμία του αλγορίθμου.

8.6 Αιολική παραγωγή

Όσον αφορά την αιολική παραγωγή, όπως μελετήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία, θεωρούμε ότι το μοντέλο που αναπτύξαμε εισάγει στο πρόβλημα της κατανομής με ορθό τρόπο τα αιολικά πάρκα, και ιδιαίτερα η στοχαστική προσέγγιση της αιολικής παραγωγής αλλά και ο έλεγχος διείσδυσης. Η ασαφής αναπαράσταση και η αντικειμενική συνάρτηση του συντελεστή διείσδυσης αποτελούν έναν αρκετά απλό και εύκολο στο χειρισμό τρόπο να ελέγχει ο διαχειριστής την ασφάλεια του συστήματος, που μέσω των λύσεων του συνόλου Pareto μπορεί να επιλεγεί η πιο κατάλληλη λύση και να αποφευχθούν τα προβλήματα στο δίκτυο που προαναφέραμε σε προηγούμενο

κεφάλαιο. Τα αιολικά πάρκα της Κρήτης με τα ανεμολογικά δεδομένα ήταν άριστη εφαρμογή στην οποία ανταποκρίθηκε ικανοποιητικά ο αλγόριθμος.

Το σημείο που θεωρούμε ότι μπορεί να δεχτεί βελτίωση είναι το ζήτημα της πρόβλεψης αιολικής ισχύος. Για το μοντέλο της κατανομής χρησιμοποιήσαμε την πιθανοτική προσέγγιση της κατανομής weibull της ταχύτητας του ανέμου που μετασχηματίσαμε σε ηλεκτρική ισχύ με την αντίστοιχη κατανομή. Καθώς το μοντέλο δε λαμβάνει υπόψη ενδιάμεσες προβλέψεις εντός της ώρας που αναφέρεται η βελτιστοποίηση αλλά παράγει μόνο την αναμενόμενη τιμή για την κάθε ώρα, θεωρούμε ότι αντί αυτού θα μπορούσε με πιο ακριβή αποτελέσματα να χρησιμοποιηθεί μία από τις πιο εξελιγμένες μεθόδους βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης αιολικής ισχύος (τα μοντέλα που αναφέρουμε σε προηγούμενο κεφάλαιο, για παράδειγμα η μέθοδος νευρωνικών δικτύων) και η οποία να συνδεθεί με τη μέθοδο που αναπτύξαμε για να παράγει τη βέλτιστη κατανομή με καλύτερη ακρίβεια από το κλασικό πιθανοτικό μοντέλο, όσον αφορά τη διαθέσιμη αιολική ισχύ.

Βιβλιογραφία

- [1] F. Salgado and P. Pedrero, “Short-term operation planning on cogeneration systems: A survey,” *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 5, pp. 835 – 848, 2008. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V30-4P6TH2H-2/2/d1e935903d81ef51d0f4c1aa97ed8af9>
- [2] C. Chang and W. Fu, “Stochastic multiobjective generation dispatch of combined heat and power systems,” in *IEE Proceedings, Generation Transmission and Distribution*, vol. 145, no. 5, 1998.
- [3] L. Wang and C. Singh, “Stochastic combined heat and power dispatch based on multi-objective particle swarm optimization,” in *Power Engineering Society General Meeting, IEEE*, 2006, pp. 8 pp.–.
- [4] J. Hetzer, D. Yu, and K. Bhattarai, “An economic dispatch model incorporating wind power,” *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 23, no. 2, pp. 603–611, June 2008.
- [5] V. Miranda and P. S. Hang, “Economic dispatch model with fuzzy wind constraints and attitudes of dispatchers,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 20, no. 4, 2005.
- [6] L. Wang and C. Singh, “Pso-based multi-criteria economic dispatch considering wind power penetration subject to dispatcher’s attitude,” in *Power Symposium, NAPS 2006. 38th North American*, 2006, pp. 269–276.
- [7] A. I. Tsouchnikas and N. D. Hatzigryriou, “Probabilistic analysis of isolated power systems with wind power penetration limitations,” in *9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 2006.
- [8] S. A. Papathanassiou and N. G. Boulaxis, “Power limitations and energy yield evaluation for wind farms operating in island systems,” *Renewable Energy*, vol. 31, no. 4, pp. 457 – 479, 2006. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V4S-4G9GN5F-1/2/36a8498a8cf61517562aeaf2c8b2906d>
- [9] L. Wang and C. Singh, “Stochastic economic emission load dispatch through a modified particle swarm optimization algorithm,” *Electric Power Systems Research*, vol. 78, no. 8, pp. 1466 – 1476, 2008. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V30-4S0RC3R-1/2/90349d037e2d165e10bfe042172882ca>

- [10] —, “Environmental/economic power dispatch using a fuzzified multi-objective particle swarm optimization algorithm,” *Electric Power Systems Research*, vol. 77, no. 12, pp. 1654 – 1664, 2007. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V30-4MNYJVR-1/2/c7993274b91a5a09770716a509045696>
- [11] M. Abido, “Multiobjective particle swarm for environmental/economic dispatch problem,” in *The 8th International Power Engineering Conference(IPEC 2007)*, 2007, pp. 1385–1390.
- [12] J. Momoh, *Electric Power System Applications of Optimization*. New York: Marcel Dekker, Inc, 2001.
- [13] C. A. Gross, *Power System Analysis*, 2nd ed. John Wiley and Sons, 1986.
- [14] G. Viviani and G. Heydt, “Stochastic optimal energy dispatch,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 100, no. 7, 1981.
- [15] S. K. Bath, J. S. Dhillon, and D. P. Kothari, “Fuzzy satisfying stochastic multi-objective generation scheduling by weightage pattern search methods,” *Electric Power Systems Research*, vol. 69, no. 2-3, pp. 311 – 320, 2004. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V30-4B6CPTN-2/2/caf3e61548763860a287068b87f5ea5b>
- [16] J. Kennedy and R. Eberhart, “Particle swarm optimization,” in *IEEE Proceedings of the International Conference on Neural Networks*, 1995, pp. 1942–1948.
- [17] Y. del Valle, G. K. Venayagamoorthy, S. Mohagheghi, J.-C. Hernandez, and R. G. Harley, “Particle swarm optimization: Basic concepts, variants and applications in power systems,” *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 12, no. 2, pp. 171–195, 2008.
- [18] C. A. C. Coello, G. T. Pulido, and M. S. Lechuga, “Handling multiple objectives with particle swarm optimization,” *IEEE transactions on evolutionary computation*, vol. 8, no. 3, pp. 256–279, June 2004.
- [19] K. Parsopoulos and M. Vrahatis, “Particle swarm optimization method in multiobjective problems,” in *Proceedings of the 2002 ACM Symposium on Applied Computing (SAC)*, 2002.
- [20] M. Abido, “Environmental/economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, vol. 18, no. 4, pp. 1529– 1537, November 2003.
- [21] T. Weise, *Global Optimization Algorithms- Theory and Application*, 2nd ed. Thomas Weise, 2009.
- [22] X. Hu, R. Eberhart, and Y. Shi, “Engineering optimization with particle swarm,” in *Proceedings of the IEEE Swarm Intelligence Symposium*, 2003, pp. 53–57.
- [23] J. C. Spall, *Introduction to Stochastic Search and Optimization: Estimation, Simulation and Control*. Wiley-Interscience, 2003.
- [24] Μ-Παπαδόπουλος, *Παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές*. Ε.Μ.Π, 1997.

- [25] Κ-Βουρνάς and Γ-Κονταξής, *Εισαγωγή στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας*. Ε.Μ.Π, 2001.
- [26] Β-Παπαδιάς, *Ανάλυση συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας*. Ε.Μ.Π, 1985, vol. 1.
- [27] Παπαδιάς and Κονταξής, *Ηλεκτρική Οικονομία*. Ε.Μ.Π, 2003.
- [28] *Μεθοδολογία υπολογισμού ορίου διείσδυσης ΑΠΕ στα μη διασυνδεδεμένα νησιά*, Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας, Αθήνα, Φεβρουάριος 2003.
- [29] Σπύρος-Τζαφέστας, *Υπολογιστική Νοημοσύνη*. Ε.Μ.Π, 2002, vol. 1.
- [30] Βλαχάβας, Κεφάλας, Βασιλειάδης, Κόκκορας, and Σακελλαρίου, *Τεχνητή Νοημοσύνη*. Γκιούρδας, 2006.
- [31] Παντελής-Μπότσαρης, *Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας*. Εκδόσεις Τζιόλα, 2003.
- [32] Φραγκόπουλος, Καρυδογιάννης, and Καραλής, *Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας*. Ελληνικό Κέντρο Παραγωγικότητας, ΕΛΚΕΠΑ, 1994.

Κεφάλαιο 9

Παράρτημα Α: δεδομένα εξόδου της βελτιστοποίησης

9.1 1η προσομοίωση

```
1 CHP me Power demand 3 kai Heat demand 0.8
2 #####
3 #####
4 #####
5 #####
6
7 archive =
8
9 0.3313 0.4259 0.3951 0.7065 0.7525 0.3942 0.2957 0.5995
10 0.4263 0.3135 0.3893 0.7752 0.6055 0.4816 0.2251 0.6075
11 0.4263 0.3136 0.3893 0.7747 0.6052 0.4816 0.2249 0.6076
12 0.4259 0.3134 0.3890 0.7710 0.6029 0.4807 0.2240 0.6070
13 0.4258 0.3135 0.3890 0.7661 0.6000 0.4800 0.2227 0.6069
14 0.4216 0.3098 0.3849 0.7774 0.6052 0.4778 0.2253 0.6009
15 0.4237 0.3118 0.3870 0.7682 0.6005 0.4784 0.2231 0.6039
16 0.4248 0.3127 0.3881 0.7627 0.5976 0.4786 0.2218 0.6054
17 0.4219 0.3102 0.3852 0.7735 0.6030 0.4776 0.2243 0.6013
18 0.4223 0.3106 0.3856 0.7690 0.6005 0.4773 0.2232 0.6019
19 0.4202 0.3088 0.3836 0.7723 0.6017 0.4759 0.2239 0.5989
20 0.4206 0.3092 0.3840 0.7694 0.6001 0.4758 0.2232 0.5995
21 0.4207 0.3094 0.3842 0.7673 0.5989 0.4756 0.2227 0.5996
22 0.4244 0.3949 0.3900 0.7199 0.5945 0.4491 0.3104 0.5335
23 0.4241 0.3945 0.3898 0.7174 0.5929 0.4486 0.3093 0.5334
24 0.4241 0.3943 0.3898 0.7161 0.5920 0.4484 0.3088 0.5335
25 0.4236 0.3937 0.3894 0.7136 0.5903 0.4478 0.3077 0.5331
26 0.3751 0.2847 0.8008 0.4076 0.6377 0.4480 0.4528 0.3720
27 0.3741 0.2839 0.8023 0.4091 0.6397 0.4477 0.4549 0.3698
28 0.4207 0.3925 0.3865 0.7245 0.5962 0.4462 0.3122 0.5275
29 0.4187 0.3909 0.3846 0.7234 0.5949 0.4444 0.3117 0.5247
30 0.1935 0.5075 0.7988 0.5438 0.5583 0.3559 0.3168 0.4278
31 0.4181 0.3918 0.3840 0.7365 0.6029 0.4452 0.3172 0.5224
32 0.4148 0.3886 0.3809 0.7294 0.5973 0.4415 0.3141 0.5184
33 0.3672 0.2780 0.8144 0.4205 0.6552 0.4457 0.4709 0.3530
34 0.3681 0.2789 0.8086 0.4161 0.6489 0.4450 0.4650 0.3567
35 0.3664 0.2775 0.8104 0.4180 0.6515 0.4442 0.4678 0.3531
36 0.3659 0.2771 0.8083 0.4167 0.6496 0.4434 0.4663 0.3530
37 0.3800 0.2144 0.7906 0.6434 0.4214 0.5181 0.2680 0.3855
38 0.3289 0.4219 0.3918 0.6982 0.7441 0.3908 0.2923 0.5945
39 0.3367 0.4235 0.3969 0.6830 0.7317 0.3955 0.2863 0.6023
40 0.3346 0.4231 0.3955 0.6870 0.7349 0.3942 0.2879 0.6001
41 0.3371 0.4235 0.3971 0.6818 0.7307 0.3957 0.2858 0.6026
42 0.3358 0.4230 0.3961 0.6837 0.7321 0.3948 0.2866 0.6011
43 0.3333 0.4224 0.3945 0.6879 0.7355 0.3932 0.2882 0.5986
44 0.3309 0.4200 0.3919 0.6856 0.7327 0.3907 0.2872 0.5947
45 0.3341 0.4301 0.3988 0.7147 0.7611 0.3979 0.2991 0.6051
46
47 #####
48
49 gbest =
50
51 0.3531
52 0.2770
53 0.3313
54 0.0859
55 0.1715
56 0.3228
57 0.0439
58 0.5044
59 #####
```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

142

particle =								
60	0.2475	0.4099	0.4088	0.2724	0.2571	0.2412	0.1309	0.4889
61	0.2818	0.3457	0.2515	0.2010	0.4592	0.2726	0.1216	0.5016
62	0.3200	0.4105	0.2659	0.3380	0.4350	0.4331	0.0583	0.8815
63	0.3903	0.3062	0.3663	0.0949	0.1896	0.3569	0.0485	0.5577
64	0.3352	0.2170	0.3826	0.5682	0.3104	0.4264	0.1003	0.7481
65	0.3068	0.4000	0.5658	0.0901	0.4474	0.3270	0.1701	0.5740
66	0.3351	0.2210	0.6183	0.4470	0.4667	0.4204	0.2660	0.9909
67	0.4090	0.2900	0.2872	0.1408	0.5195	0.3986	0.2742	0.9304
68	0.3995	0.3050	0.4410	0.1790	0.4795	0.4318	0.1514	0.7446
69	0.3193	0.3111	0.1838	0.5316	0.2171	0.4931	0.3126	0.2782
70	0.2907	0.4161	0.5546	0.5383	0.3583	0.3915	0.1887	0.8013
71	0.2994	0.2415	0.6224	0.4921	0.3869	0.2906	0.1942	0.9834
72	0.2342	0.2280	0.5757	0.1548	0.2410	0.2158	0.1709	0.5109
73	0.3963	0.3740	0.4534	0.1787	0.5513	0.3052	0.1352	0.5850
74	0.2940	0.3047	0.2818	0.5311	0.2292	0.3543	0.2237	1.0855
75	0.2465	0.2343	0.4707	0.1663	0.3369	0.4681	0.2495	0.7058
76	0.3782	0.2535	0.4020	0.2653	0.4786	0.3911	0.1125	0.5691
77	0.3525	0.3379	0.5321	0.3459	0.2726	0.3499	0.1009	0.6373
78	0.3175	0.2631	0.3877	0.0822	0.1841	0.3062	0.2278	1.0764
79	0.3819	0.3460	0.2348	0.4008	0.2619	0.2308	0.1844	0.8359
80	0.2863	0.4272	0.4907	0.4170	0.2623	0.4641	0.1514	0.5633
81	0.3845	0.3078	0.7011	0.7830	0.3189	0.1897	0.1193	0.2377
82	0.2476	0.4191	0.3177	0.3949	0.2207	0.2676	0.2073	0.5252
83	0.3170	0.2954	0.3753	0.4363	0.3450	0.3964	0.2378	0.4348
84	0.3874	0.3918	0.2681	0.0779	0.5527	0.2521	0.2222	0.8353
85	0.4266	0.3023	0.5869	0.2342	0.4615	0.3595	0.2479	0.6585
86	0.2872	0.2572	0.6013	0.5248	0.3716	0.4363	0.2241	0.4667
87	0.4304	0.3667	0.4115	0.4724	0.3038	0.2831	0.2816	0.7620
88	0.2899	0.3136	0.4010	0.1089	0.3175	0.2610	0.1987	0.4084
89	0.3133	0.3465	0.3343	0.3708	0.1667	0.4378	0.2280	0.5393
90	0.3376	0.2910	0.6439	0.1340	0.1639	0.3562	0.0821	0.8041
91	0.4260	0.3716	0.4150	0.2042	0.3404	0.4101	0.1004	0.8455
92	0.3730	0.3474	0.6381	0.1416	0.2356	0.3925	0.2381	0.4809
93	0.3107	0.4658	0.6855	0.4269	0.5734	0.4649	0.3407	0.2505
94	0.3269	0.3540	0.4577	0.5370	0.1453	0.3804	0.2792	0.9999
95	0.3976	0.2884	0.3307	0.2981	0.1712	0.4132	0.1361	0.5834
96	0.2751	0.3822	0.3487	0.5363	0.4519	0.4521	0.0942	0.5022
97	0.3008	0.3777	0.4147	0.5332	0.1620	0.3550	0.1478	1.1106
98	0.3699	0.2504	0.5213	0.3855	0.3295	0.2512	0.1383	0.7264
99	0.4026	0.3246	0.3450	0.2819	0.1533	0.3567	0.0553	0.9173
100	0.4090	0.2131	0.4194	0.2696	0.5031	0.3745	0.1454	0.7436
101	0.2539	0.4631	0.6341	0.7072	0.6337	0.1946	0.0423	0.5045
102	0.2702	0.3913	0.3238	0.4399	0.4945	0.2289	0.1725	0.6545
103	0.2552	0.4052	0.2995	0.5878	0.1944	0.3643	0.1275	0.7414
104	0.3918	0.2715	0.3955	0.1687	0.4951	0.4245	0.2491	0.3639
105	0.3295	0.4134	0.4275	0.5199	0.2005	0.3090	0.2237	0.4483
106	0.2615	0.4257	0.6346	0.4281	0.1658	0.4144	0.1606	0.7234
107	0.2408	0.4227	0.6081	0.5631	0.4623	0.3107	0.0537	1.0615
108	0.2864	0.2850	0.5909	0.4763	0.2365	0.3602	0.1223	0.6154
109	0.3836	0.4355	0.5085	0.5252	0.1451	0.4058	0.1011	0.7606
110	0.2586	0.3457	0.6268	0.5068	0.3276	0.4136	0.2141	0.7042
111	0.3917	0.2634	0.5952	0.3842	0.3145	0.4477	0.1645	0.4771
112	0.3114	0.1926	0.2844	0.1945	0.4439	0.4554	0.2169	0.6074
113	0.2768	0.3113	0.5451	0.5114	0.1967	0.2549	0.2011	1.0277
114	0.3420	0.3728	0.4761	0.2122	0.1966	0.4212	0.2580	0.8319
115	0.2654	0.4028	0.4539	0.4420	0.3209	0.3114	0.1972	1.0056
116	0.2640	0.1575	0.4028	0.4201	0.5260	0.4182	0.2355	0.2386
117	0.4278	0.1726	0.3797	0.5368	0.4642	0.2275	0.2948	0.2322
118	0.3265	0.1954	0.6206	0.2619	0.1824	0.3610	0.1239	1.0095
119	0.4512	0.2585	0.5833	0.6327	0.2994	0.3046	0.0544	0.4394
120	0.2429	0.4325	0.2506	0.2929	0.3017	0.4321	0.0845	0.8760
121	0.2442	0.2814	0.4998	0.3895	0.1571	0.2582	0.1112	0.6576
122	0.3301	0.4026	0.4976	0.2798	0.5650	0.2327	0.1174	0.4348
123	0.2428	0.3621	0.2219	0.4635	0.4161	0.3877	0.1659	0.4461
124	0.2344	0.4545	0.3432	0.3262	0.1475	0.4142	0.1980	0.2937
125	0.3245	0.3143	0.4641	0.1771	0.2179	0.4622	0.0575	0.7653
126	0.3468	0.3489	0.4984	0.0903	0.2210	0.4399	0.2091	0.7017
127	0.3757	0.3710	0.2731	0.3980	0.6730	0.4764	0.1689	0.3110
128	0.2808	0.1918	0.3004	0.3334	0.4058	0.2778	0.2573	1.1389
129	0.3600	0.2429	0.3912	0.2213	0.4687	0.3205	0.2902	0.6828
130	0.3236	0.2745	0.4230	0.0984	0.4432	0.2538	0.0789	0.9840
131	0.2918	0.1783	0.2703	0.4675	0.6065	0.2092	0.2645	0.2295
132	0.3645	0.2103	0.5387	0.4785	0.5027	0.3184	0.1203	0.4837
133	0.4168	0.2896	0.5960	0.2955	0.4425	0.2816	0.2683	0.4520
134	0.2574	0.3705	0.4449	0.1156	0.5080	0.2425	0.2624	0.6760
135	0.2906	0.2800	0.2393	0.2177	0.5619	0.3093	0.0419	0.2992
136	0.3319	0.2725	0.4500	0.4385	0.4732	0.4623	0.2284	0.8960
137	0.4237	0.4256	0.4103	0.1923	0.2547	0.3552	0.2316	0.9436
138	0.1956	0.2243	0.3244	0.1296	0.4960	0.3542	0.1493	0.2599
139	0.3697	0.2576	0.6147	0.4713	0.2527	0.3996	0.2076	0.7122
140	0.3551	0.2914	0.5096	0.1983	0.3020	0.3860	0.1849	0.9640
141	0.3729	0.3059	0.4897	0.3341	0.3512	0.2936	0.1349	0.8567
142	0.2523	0.3807	0.4686	0.5150	0.2328	0.2851	0.1572	0.7514
143	0.3984	0.2673	0.5345	0.1413	0.2940	0.4062	0.2862	0.6721
144	0.2617	0.4168	0.5515	0.1949	0.2861	0.3926	0.2606	0.5819
145	0.3153	0.3863	0.5706	0.5641	0.5012	0.3345	0.0591	0.9726
146	0.3283	0.2776	0.6530	0.4937	0.5238	0.4368	0.1986	0.4872
147	0.3606	0.4321	0.3411	0.1467	0.4542	0.4160	0.0594	0.7885
148	0.4251	0.2632	0.5278	0.6426	0.2897	0.3419	0.1729	0.3495
149	0.2892	0.4291	0.6222	0.3527	0.4045	0.3661	0.2024	0.4992
150	0.3939	0.3999	0.2363	0.3246	0.1522	0.4474	0.1450	0.8202
151	0.2350	0.2514	0.5632	0.5598	0.3121	0.2908	0.1506	0.9903
152	0.3027	0.2094	0.3806	0.5135	0.4433	0.3679	0.1079	0.6543
153	0.2644	0.3595	0.5083	0.5486	0.5452	0.4091	0.0976	0.6802
154	0.3438	0.3714	0.3704	0.2288	0.1924	0.2709	0.2477	0.4575

159	0.3726	0.2731	0.6446	0.5106	0.3992	0.2427	0.1513	0.9677
160	0.3500	0.2023	0.4993	0.4728	0.1472	0.2301	0.2255	0.8085
161	0.3849	0.2368	0.4606	0.1950	0.5307	0.2386	0.0440	0.8726
162	0.3245	0.2046	0.4007	0.2850	0.3124	0.4415	0.2517	0.5884
163	0.4343	0.1942	0.2968	0.5744	0.2659	0.3350	0.2424	0.4746
164	0.4195	0.2137	0.3851	0.5732	0.5629	0.2227	0.2166	0.8992
165	0.3871	0.2982	0.6231	0.2773	0.4517	0.4148	0.2833	0.4582
166	0.2179	0.4627	0.2649	0.2775	0.2669	0.2423	0.1703	0.3036
167	0.3051	0.2951	0.6142	0.3218	0.1646	0.3390	0.1087	0.4676
168	0.4369	0.3746	0.3795	0.5545	0.3451	0.2733	0.1239	0.8931
169	0.3220	0.2501	0.2853	0.2668	0.5247	0.3089	0.1739	0.5901
170	0.3550	0.3175	0.3803	0.2670	0.4263	0.3459	0.0807	0.9902
171	0.3454	0.3773	0.5020	0.5414	0.3132	0.2810	0.2380	0.5011
172	0.4382	0.4687	0.3521	0.1198	0.2308	0.2634	0.1012	0.3337
173	0.2796	0.2014	0.2384	0.2842	0.3315	0.4657	0.0486	0.6115
174	0.2286	0.3881	0.7216	0.3602	0.6600	0.2997	0.0800	0.2697
175	0.3644	0.2747	0.4503	0.0870	0.1473	0.3029	0.1908	0.6076
176	0.4222	0.2725	0.3455	0.4521	0.2538	0.4434	0.1001	0.8156
177	0.3496	0.2531	0.5603	0.2997	0.5351	0.2842	0.0663	0.7114
178	0.4323	0.3236	0.3977	0.6026	0.5052	0.4633	0.1812	0.6165
179	0.2873	0.2805	0.2196	0.5184	0.1702	0.3912	0.2964	0.8504
180	0.3853	0.2876	0.4095	0.5470	0.3088	0.3245	0.1099	0.4891
181	0.4148	0.4128	0.4898	0.2188	0.2374	0.3655	0.2597	0.5749
182	0.3625	0.3176	0.6353	0.4834	0.5096	0.4318	0.2167	0.6959
183	0.2870	0.3110	0.3063	0.3851	0.5039	0.3163	0.1269	0.5792
184	0.3402	0.4144	0.7485	0.1093	0.5391	0.2421	0.0370	0.3794
185	0.4173	0.3635	0.3868	0.4612	0.4292	0.4172	0.2021	0.5537
186	0.2659	0.3904	0.4844	0.1063	0.2128	0.3703	0.1675	0.6043
187	0.3943	0.3813	0.2945	0.2490	0.2000	0.2659	0.1006	0.8576
188	0.3744	0.2065	0.6022	0.2551	0.1717	0.4589	0.0985	1.0204
189	0.4158	0.2772	0.2802	0.5847	0.4708	0.2946	0.2034	0.5649
190	0.4063	0.3924	0.5475	0.1412	0.1650	0.3806	0.2364	0.7944
191	0.2488	0.1549	0.2897	0.4516	0.1754	0.3342	0.1490	0.2332
192	0.3751	0.3571	0.6528	0.2934	0.1288	0.3131	0.2121	1.0515
193	0.3059	0.2313	0.6130	0.3249	0.3029	0.4152	0.0659	0.5560
194	0.3878	0.3162	0.6518	0.2693	0.3857	0.4617	0.2426	1.0520
195	0.2810	0.3718	0.4807	0.2293	0.1713	0.4118	0.1493	0.5437
196	0.2368	0.2437	0.6091	0.5699	0.3789	0.3116	0.2146	0.3386
197	0.3569	0.3638	0.2616	0.4704	0.2093	0.3416	0.0327	0.7988
198	0.2499	0.3852	0.2749	0.4051	0.4631	0.3691	0.1265	0.5815
199	0.3651	0.3634	0.3817	0.3792	0.4518	0.3761	0.1635	0.5801
200	0.2601	0.3193	0.4473	0.5169	0.1305	0.2511	0.2694	0.6444
201	0.4478	0.4582	0.2174	0.7124	0.1844	0.3645	0.0662	0.3872
202	0.4057	0.4204	0.3990	0.3960	0.1493	0.4233	0.1007	0.7723
203	0.3814	0.2801	0.3619	0.3102	0.3758	0.3932	0.1806	0.4208
204	0.2552	0.3815	0.2890	0.4576	0.4057	0.2941	0.1786	0.8676
205	0.2672	0.2062	0.6077	0.4797	0.2124	0.4094	0.1790	0.8136
206	0.2420	0.2108	0.3849	0.3034	0.3072	0.2870	0.1905	0.9449
207	0.2543	0.2079	0.3365	0.1803	0.3978	0.3470	0.2680	0.4998
208	0.2846	0.3503	0.5529	0.3358	0.1991	0.4894	0.0233	0.2919
209	0.3305	0.3780	0.5466	0.4299	0.4017	0.2815	0.2049	0.9024
210	0.3557	0.3548	0.5297	0.3364	0.1373	0.4283	0.0649	0.8214
211	0.2859	0.2046	0.5612	0.1250	0.1599	0.3582	0.2621	1.0466
212	0.4063	0.2528	0.5324	0.1301	0.4166	0.3584	0.2308	0.8838
213	0.2629	0.2219	0.5032	0.5221	0.6512	0.2567	0.0772	0.3399
214								
215								
216								
217								
218								
219								
220								
221								
222								
223								
224								
225								
226								
227								
228								
229								
230								
231								
232								
233								
234								
235								
236								
237								
238								
239								
240								
241								
242								
243								
244								
245								
246								
247								
248								
249								
250								
251								
252								
253								
254								
255								
256								

```

#####
#####
[mincost minpower minheat]=minimumValues(archive)
1.0870e+03
0.4236 0.3937 0.3894 0.7136 0.5903 0.4478 0.3077 0.5331
0.5194
0.3309 0.4200 0.3919 0.6856 0.7327 0.3907 0.2872 0.5947
0.0274
0.3800 0.2144 0.7906 0.6434 0.4214 0.5181 0.2680 0.3855
mincost =
1.0870e+03
minpower =
0.5194
minheat =
0.0274
SYNOLIKOS XRONOS #### 33 SECONDS ####
#####

```

9.2 2η προσομοίωση

```

1  CHP  me  Power demand 3 kai Heat demand 0.8  z####
2  #####
3
4
5  [mincost minemissions]=minimumValues(archive);
6  1.0785e+03
7
8
9  eo =
10
11  0.6020
12
13
14  eoo =
15
16  0.0495
17
18
19  eooo =
20
21  0.1275
22
23  0.3659  0.5444  0.9050  0.6349  0.3241  0.2379  0.2098
24  0.7181
25
26
27  $$$
28
29  0.1256
30
31
32  eee =
33
34  1.1068e+03
35
36
37  eeeee =
38
39  0.5234
40
41
42  eeee =
43
44  0.0554
45
46  0.1757  0.4152  0.7229  0.5853  0.5578  0.4961  0.4921
47  0.4321
48
49  #####
50  35 seconds
51  #####
52
53
54
55
56
57  archive =
58
59  0.3659  0.5444  0.9050  0.6349  0.3241  0.2379  0.2098
60  0.7181
61  0.1757  0.4152  0.7229  0.5853  0.5578  0.4961  0.4921
62  0.4321
63  0.1734  0.4158  0.7240  0.5865  0.5592  0.4983  0.4918
64  0.4290
65  0.1752  0.4160  0.7244  0.5866  0.5591  0.4976  0.4928
66  0.4318
67  0.1683  0.4163  0.7251  0.5881  0.5611  0.5019  0.4904
68  0.4221

```


64	0.4527	0.3126	0.7886	0.6516	0.2823	0.4692	0.4955
	0.2609						
65	0.4541	0.3134	0.7904	0.6529	0.2831	0.4699	0.4970
	0.2626						
66	0.4518	0.3127	0.7908	0.6540	0.2821	0.4720	0.4953
	0.2555						
67	0.4537	0.3136	0.7923	0.6549	0.2831	0.4721	0.4970
	0.2589						
68	0.4522	0.3131	0.7925	0.6555	0.2825	0.4734	0.4959
	0.2545						
69	0.4536	0.3136	0.7924	0.6551	0.2831	0.4723	0.4970
	0.2586						
70	0.4549	0.3144	0.7941	0.6564	0.2838	0.4731	0.4982
	0.2599						
71	0.4556	0.3147	0.7945	0.6566	0.2841	0.4730	0.4988
	0.2614						
72	0.4549	0.3146	0.7951	0.6573	0.2839	0.4741	0.4985
	0.2588						
73	0.4568	0.3153	0.7952	0.6570	0.2847	0.4729	0.4999
	0.2638						
74	0.4563	0.3153	0.7961	0.6580	0.2846	0.4741	0.4997
	0.2613						
75	0.4553	0.3150	0.7965	0.6586	0.2843	0.4752	0.4990
	0.2580						
76	0.4555	0.3155	0.7990	0.6610	0.2846	0.4776	0.4996
	0.2553						
77	0.4565	0.3167	0.8031	0.6646	0.2855	0.4810	0.5012
	0.2530						
78	0.4589	0.3181	0.8061	0.6670	0.2869	0.4822	0.5036
	0.2560						
79	0.4592	0.3182	0.8062	0.6670	0.2870	0.4821	0.5038
	0.2566						
80	0.4511	0.3156	0.8078	0.6706	0.2838	0.4895	0.4981
	0.2320						
81	0.4547	0.3172	0.8093	0.6712	0.2855	0.4885	0.5011
	0.2400						
82	0.4527	0.3165	0.8099	0.6722	0.2847	0.4905	0.4997
	0.2338						
83	0.4609	0.3196	0.8099	0.6701	0.2882	0.4846	0.5059
	0.2568						
84	0.4605	0.3194	0.8099	0.6703	0.2880	0.4850	0.5056
	0.2555						
85	0.4541	0.3174	0.8116	0.6735	0.2855	0.4912	0.5011
	0.2355						
86	0.4606	0.3197	0.8111	0.6715	0.2882	0.4862	0.5059
	0.2541						
87	0.4561	0.3184	0.8128	0.6741	0.2865	0.4910	0.5029
	0.2397						
88	0.4634	0.2190	0.6792	0.6730	0.5071	0.4114	0.2412
	0.6876						
89	0.4572	0.3188	0.8129	0.6740	0.2870	0.4903	0.5037
	0.2427						
90	0.4550	0.3181	0.8137	0.6753	0.2861	0.4927	0.5022
	0.2353						
91	0.4638	0.2184	0.6803	0.6745	0.5085	0.4121	0.2408
	0.6886						
92	0.4589	0.3197	0.8149	0.6755	0.2879	0.4911	0.5053
	0.2447						
93	0.4625	0.2163	0.6796	0.6745	0.5090	0.4117	0.2392
	0.6874						
94	0.4634	0.2177	0.6801	0.6746	0.5087	0.4120	0.2402
	0.6882						
95	0.4555	0.3187	0.8159	0.6773	0.2866	0.4945	0.5030
	0.2340						
96	0.4628	0.2163	0.6802	0.6752	0.5096	0.4120	0.2392
	0.6880						
97	0.4554	0.3187	0.8160	0.6775	0.2865	0.4947	0.5029
	0.2335						
98	0.4631	0.2148	0.6818	0.6776	0.5119	0.4130	0.2382
	0.6891						
99							
100							
101							

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

146

	#####						
102	#####						
103	#####						
104	#####						
105	#####						
106	particle =						
107	#####						
108	0.2282	0.4270	0.6060	0.5414	0.2583	0.1643	0.3119
	0.9703						
109	0.4544	0.2845	0.6462	0.3766	0.4332	0.2896	0.2340
	1.3723						
110	0.4662	0.5002	0.2089	0.4487	0.2634	0.3725	0.3115
	0.3959						
111	0.4164	0.1345	0.2177	0.6530	0.4350	0.2452	0.3980
	0.9813						
112	0.3512	0.2959	0.5671	0.7869	0.2988	0.2668	0.3510
	0.5265						
113	0.3998	0.4941	0.2750	0.6448	0.3065	0.3413	0.4321
	0.4520						
114	0.3342	0.4234	0.5975	0.8076	0.1110	0.1963	0.4863
	1.4208						
115	0.2895	0.4720	0.5086	0.7857	0.5084	0.1718	0.2496
	0.8913						
116	0.2282	0.1573	0.3313	0.8384	0.2290	0.2952	0.3176
	0.8090						
117	0.4574	0.3740	0.6011	0.1357	0.2385	0.1025	0.5113
	0.8543						
118	0.2083	0.3845	0.6585	0.5264	0.4952	0.4287	0.4679
	0.4581						
119	0.2721	0.4985	0.1958	0.1449	0.5389	0.4260	0.2751
	1.0606						
120	0.3468	0.4120	0.8245	0.7839	0.1017	0.4174	0.2764
	0.9905						
121	0.1783	0.1607	0.3969	0.3068	0.1195	0.2271	0.1692
	0.3685						
122	0.2040	0.5070	0.4104	0.8264	0.2485	0.1523	0.2642
	1.4196						
123	0.2799	0.4444	0.5543	0.2936	0.3634	0.1907	0.4874
	0.3732						
124	0.4664	0.2079	0.5182	0.5834	0.5593	0.1417	0.2049
	0.9896						
125	0.3368	0.4780	0.3917	0.4498	0.5177	0.2620	0.5113
	0.8079						
126	0.2319	0.4756	0.4953	0.9162	0.6832	0.4054	0.3761
	0.3270						
127	0.4274	0.4596	0.4965	0.7828	0.5375	0.0996	0.2715
	1.1717						
128	0.4514	0.3862	0.6005	0.6450	0.5932	0.1429	0.3056
	1.4058						
129	0.4663	0.4945	0.3956	0.6330	0.1361	0.4201	0.3690
	1.3211						
130	0.2002	0.4857	0.5442	0.1851	0.3713	0.2070	0.3366
	0.4004						
131	0.4664	0.3176	0.6414	0.7349	0.2879	0.4574	0.2024
	1.0723						
132	0.2322	0.2263	0.3662	0.3615	0.2648	0.1235	0.5359
	0.5185						
133	0.1683	0.4126	0.5546	0.3115	0.3746	0.1534	0.4950
	0.8966						
134	0.3460	0.3392	0.7806	0.7290	0.2941	0.4034	0.5280
	1.0226						
135	0.2951	0.4416	0.5480	0.7522	0.5533	0.4484	0.4672
	1.3679						
136	0.4319	0.3536	0.4981	0.8001	0.7191	0.1882	0.2654
	1.1266						
137	0.3904	0.1513	0.2543	0.5410	0.5885	0.4401	0.1525
	1.2351						
138	0.2775	0.2208	0.5585	0.8302	0.3376	0.1073	0.1209
	0.8188						
139	0.3157	0.5127	0.3275	0.5094	0.3437	0.4282	0.3147
	1.0166						
140	0.4666	0.2216	0.6830	0.6762	0.5092	0.4137	0.2435
	0.6918						

141	0.2330	0.2073	0.7791	0.1283	0.6031	0.1164	0.4447
	1.4472						
142	0.2232	0.2477	0.6331	0.6164	0.1313	0.2083	0.3117
	0.5317						
143	0.4651	0.5118	0.4049	0.3568	0.3125	0.3301	0.1999
	0.9017						
144	0.2473	0.3034	0.7167	0.3436	0.7702	0.3950	0.4759
	0.2154						
145	0.2244	0.3317	0.1842	0.7274	0.6593	0.3954	0.3328
	0.8356						
146	0.1883	0.4235	0.3531	0.3959	0.6262	0.2573	0.2884
	1.3477						
147	0.4161	0.1773	0.8306	0.3544	0.5054	0.1756	0.1878
	0.9319						
148	0.3955	0.3663	0.3361	0.8788	0.2276	0.3187	0.4253
	0.3651						
149	0.3946	0.2677	0.6108	0.3982	0.4033	0.2976	0.4235
	1.1994						
150	0.2743	0.2301	0.7402	0.5795	0.7118	0.1716	0.3833
	1.1870						
151	0.4665	0.4649	0.5169	0.7153	0.1292	0.1905	0.2824
	1.1870						
152	0.4660	0.3501	0.6547	0.2860	0.3640	0.1373	0.1489
	0.2138						
153	0.2833	0.1340	0.3969	0.7606	0.3572	0.4281	0.4986
	0.9636						
154	0.3446	0.2593	0.6384	0.6375	0.2303	0.2734	0.1475
	0.8769						
155	0.4128	0.3047	0.6873	0.7561	0.6616	0.3517	0.1472
	0.8588						
156	0.2559	0.4276	0.7450	0.7182	0.7631	0.1704	0.5449
	0.3515						
157	0.3610	0.1698	0.5581	0.7996	0.6941	0.4306	0.4675
	0.9278						
158	0.4653	0.4422	0.3652	0.1197	0.3868	0.1822	0.1726
	1.0726						
159	0.2774	0.4251	0.1935	0.5533	0.4816	0.4582	0.3763
	1.2368						
160	0.3998	0.2402	0.4698	0.3170	0.2295	0.4713	0.4003
	1.1301						
161	0.1911	0.3378	0.1672	0.5121	0.1870	0.1180	0.4784
	0.8473						
162	0.3508	0.1941	0.2493	0.8078	0.5243	0.4587	0.3600
	0.5054						
163	0.3510	0.3401	0.6038	0.2265	0.5417	0.0935	0.1309
	0.6669						
164	0.2013	0.3385	0.6329	0.4427	0.4704	0.0862	0.1681
	1.4394						
165	0.3870	0.2476	0.2711	0.8711	0.0985	0.4094	0.5182
	1.1697						
166	0.4667	0.3793	0.7190	0.9314	0.1360	0.2418	0.4643
	1.1039						
167	0.4525	0.1874	0.7254	0.1472	0.4942	0.4713	0.2735
	1.0783						
168	0.2278	0.2378	0.3511	0.9219	0.3365	0.2819	0.2318
	0.2131						
169	0.4664	0.2970	0.3199	0.7335	0.4914	0.3975	0.4207
	0.8564						
170	0.4667	0.3983	0.7159	0.2935	0.7617	0.1483	0.1536
	1.1383						
171	0.1863	0.3932	0.7509	0.2167	0.6240	0.4604	0.5475
	0.5296						
172	0.1805	0.1794	0.4475	0.1391	0.3638	0.1734	0.3750
	1.1737						
173	0.4661	0.2906	0.6542	0.6644	0.2416	0.1453	0.5193
	0.9296						
174	0.4663	0.2595	0.4275	0.2952	0.2495	0.0917	0.4437
	0.7877						
175	0.2961	0.4677	0.7880	0.2541	0.4105	0.1846	0.1331
	0.7094						
176	0.4448	0.3551	0.6811	0.7826	0.4361	0.0972	0.5041
	0.5528						

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

148

177	0.2652 0.2817	0.1442	0.1668	0.9029	0.2094	0.1009	0.4168
178	0.3569 0.2570	0.1951	0.7610	0.4637	0.6978	0.4198	0.4033
179	0.3093 0.5516	0.2713	0.2474	0.3485	0.5779	0.1863	0.4204
180	0.1913 1.2433	0.4277	0.2982	0.1668	0.1818	0.4205	0.5466
181	0.4188 0.5501	0.2724	0.8233	0.5861	0.5042	0.2225	0.2219
182	0.4382 0.4081	0.2922	0.3193	0.4758	0.4374	0.0837	0.4510
183	0.4458 0.2387	0.4365	0.6379	0.2895	0.7373	0.3962	0.3138
184	0.2002 1.2980	0.3947	0.4976	0.7499	0.1729	0.1839	0.4621
185	0.3736 1.3949	0.2554	0.5333	0.9021	0.4941	0.3118	0.3311
186	0.4669 0.4498	0.3275	0.5568	0.1565	0.6113	0.1727	0.1327
187	0.2183 1.1751	0.3114	0.4680	0.7029	0.1512	0.4125	0.3876
188	0.4138 0.6003	0.4155	0.4474	0.4973	0.4210	0.3581	0.5180
189	0.2727 0.7111	0.5054	0.6181	0.8765	0.1500	0.2701	0.2945
190	0.4480 0.2659	0.3123	0.7719	0.6362	0.2762	0.4583	0.4888
191	0.4356 0.3407	0.2027	0.6914	0.4553	0.2081	0.1357	0.3688
192	0.3768 0.7117	0.4968	0.8165	0.5719	0.3045	0.2152	0.2425
193	0.4188 0.9542	0.4650	0.4993	0.7248	0.4419	0.2739	0.3163
194	0.3659 1.0663	0.1774	0.3019	0.3148	0.5233	0.1727	0.4459
195	0.3948 0.5091	0.3218	0.7477	0.1288	0.4922	0.1862	0.1801
196	0.3113 1.3175	0.4548	0.4001	0.6580	0.7623	0.2770	0.3245
197	0.4299 1.2316	0.2376	0.4550	0.3670	0.2897	0.1139	0.1369
198	0.2244 1.1565	0.3242	0.4253	0.3566	0.7094	0.1759	0.5486
199	0.3833 0.9893	0.1881	0.1714	0.9129	0.1916	0.4348	0.5236
200	0.4285 1.0519	0.3925	0.6346	0.5708	0.4768	0.2863	0.4491
201	0.3175 1.4465	0.2350	0.3441	0.7514	0.2958	0.4568	0.1376
202	0.2366 0.4837	0.4123	0.5687	0.1265	0.7139	0.1718	0.4185
203	0.4656 1.4391	0.5155	0.2995	0.4855	0.1872	0.1806	0.3745
204	0.4323 0.5482	0.4359	0.4115	0.2773	0.1379	0.2189	0.4115
205	0.2562 0.6971	0.5036	0.1655	0.7121	0.7601	0.1237	0.3567
206	0.3323 0.3114	0.3701	0.7084	0.9101	0.6261	0.2174	0.3643
207	0.2674 1.0745	0.4769	0.3469	0.1393	0.5210	0.0943	0.4417
208	0.4571 0.9886	0.4670	0.3804	0.4104	0.7017	0.1142	0.4741
209	0.2732 0.7796	0.1660	0.8280	0.5458	0.1297	0.1371	0.1480
210	0.4665 0.8638	0.1788	0.5504	0.3154	0.1849	0.1683	0.4692
211	0.4097 1.3463	0.4981	0.7290	0.3667	0.1435	0.2176	0.2392
212	0.2566 1.4478	0.3433	0.2820	0.5515	0.3701	0.1288	0.3485

213	0.4274	0.4377	0.7806	0.1462	0.6969	0.4073	0.4351
	1.0384						
214	0.4585	0.1460	0.1849	0.6296	0.6321	0.4229	0.1603
	0.2195						
215	0.2968	0.4383	0.2980	0.7990	0.1973	0.1354	0.1566
	1.2302						
216	0.3016	0.4800	0.6050	0.5190	0.3065	0.0824	0.2542
	0.7328						
217	0.2782	0.3329	0.5298	0.3619	0.6325	0.1174	0.1708
	0.6300						
218	0.3396	0.2573	0.7662	0.6390	0.5646	0.3026	0.5376
	0.9288						
219	0.1999	0.5140	0.6775	0.5245	0.3835	0.2713	0.5198
	0.2406						
220	0.3365	0.1376	0.2898	0.3903	0.7086	0.4471	0.1761
	1.0997						
221	0.3525	0.3694	0.6990	0.4784	0.3915	0.3064	0.2662
	1.1440						
222	0.2860	0.4371	0.2779	0.1838	0.3466	0.3182	0.5202
	1.4109						
223	0.3860	0.2742	0.7456	0.8057	0.7463	0.4370	0.1254
	1.1184						
224	0.2069	0.4204	0.3585	0.8501	0.1823	0.1651	0.3219
	0.3076						
225	0.3508	0.2265	0.2053	0.1650	0.6767	0.4659	0.3122
	0.2068						
226	0.1932	0.1878	0.8305	0.7657	0.4037	0.2655	0.4668
	1.3729						
227	0.4514	0.3495	0.6021	0.5982	0.3352	0.2385	0.5466
	0.9740						
228	0.4662	0.3095	0.5606	0.1306	0.5249	0.2121	0.2850
	1.2125						
229	0.2596	0.4881	0.3750	0.3019	0.7412	0.2431	0.4847
	0.7125						
230	0.2639	0.4404	0.4628	0.8814	0.2819	0.4105	0.4179
	0.4156						
231	0.2368	0.3400	0.6549	0.6557	0.2702	0.2529	0.2125
	0.7550						
232	0.2830	0.3385	0.3717	0.5768	0.3299	0.0933	0.3632
	1.3080						
233	0.3085	0.3008	0.4799	0.6847	0.6646	0.1505	0.2808
	1.3338						
234	0.2386	0.4963	0.5223	0.9188	0.1908	0.1935	0.4562
	1.2036						
235	0.3995	0.4941	0.4488	0.6025	0.4388	0.1785	0.3230
	0.4430						
236	0.3021	0.2281	0.6520	0.8507	0.3976	0.2999	0.4910
	1.2937						
237	0.1955	0.1557	0.6171	0.6327	0.7505	0.4065	0.3178
	0.6296						
238	0.2631	0.3484	0.2789	0.9338	0.6642	0.4360	0.5184
	1.1283						
239	0.4620	0.4922	0.5558	0.7620	0.3331	0.2905	0.3088
	1.1982						
240	0.4664	0.3911	0.7452	0.9068	0.2974	0.3499	0.4952
	0.5822						
241	0.3181	0.4076	0.3410	0.6713	0.4121	0.0882	0.1305
	1.2577						
242	0.4403	0.2639	0.3319	0.4904	0.5552	0.2299	0.3977
	0.4301						
243	0.3184	0.2031	0.7704	0.6219	0.6293	0.1906	0.1498
	1.4149						
244	0.4109	0.1934	0.4042	0.4414	0.0960	0.1881	0.3912
	0.4865						
245	0.4211	0.1775	0.2073	0.2132	0.3236	0.0860	0.4669
	0.9183						
246	0.3548	0.1432	0.5054	0.6638	0.2442	0.2257	0.2652
	1.0630						
247	0.2919	0.2477	0.5044	0.7859	0.4592	0.1722	0.3506
	0.8069						
248	0.3647	0.4087	0.6159	0.3429	0.4515	0.2423	0.4296
	0.3485						

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

150

249	0.4493	0.2697	0.5950	0.5360	0.6802	0.2588	0.3104
	1.3120						
250	0.1758	0.3008	0.7353	0.1853	0.5458	0.2584	0.4400
	0.3982						
251	0.1819	0.4373	0.1753	0.8408	0.6731	0.3665	0.4424
	0.2048						
252	0.4256	0.2583	0.2058	0.8159	0.7704	0.4275	0.3585
	0.5556						
253	0.3945	0.4508	0.4265	0.3200	0.6025	0.1950	0.5114
	0.5293						
254	0.2570	0.1487	0.2405	0.7276	0.3359	0.3177	0.4296
	1.3315						
255	0.3422	0.2459	0.3633	0.5624	0.1199	0.2984	0.3646
	1.0574						
256	0.3608	0.4703	0.3573	0.7835	0.5221	0.3679	0.5278
	0.5939						
257	0.1987	0.2406	0.6802	0.1206	0.5778	0.3323	0.2790
	0.8346						
258	0.3601	0.1636	0.6802	0.5837	0.4621	0.0849	0.3878
	0.7289						
259	0.4514	0.3705	0.3465	0.7112	0.3243	0.1520	0.2813
	0.5532						
260	0.4017	0.2890	0.2551	0.7160	0.4821	0.1652	0.1994
	0.8687						
261	0.1960	0.3548	0.7987	0.2566	0.3544	0.1863	0.3077
	1.1920						
262	0.3914	0.4899	0.8204	0.1443	0.5756	0.4616	0.1754
	0.4119						
263	0.2234	0.4804	0.8165	0.8481	0.3454	0.3802	0.1737
	0.5949						
264	0.1813	0.5106	0.6449	0.6993	0.7626	0.1571	0.4582
	0.5248						
265	0.2113	0.3315	0.6276	0.9312	0.2246	0.1766	0.3432
	0.2248						
266	0.3749	0.4761	0.5295	0.6658	0.1683	0.2490	0.1670
	1.0026						
267	0.3672	0.2661	0.3588	0.3294	0.6738	0.1228	0.4435
	0.7535						
268	0.2360	0.2883	0.1748	0.5493	0.3758	0.3892	0.1283
	1.2794						
269	0.4494	0.3771	0.8263	0.8708	0.6579	0.1068	0.3587
	0.5972						
270	0.4463	0.3459	0.7581	0.4407	0.6889	0.3361	0.4096
	0.7508						
271	0.3028	0.2443	0.3298	0.1738	0.3599	0.2595	0.2185
	0.2847						
272	0.4047	0.3445	0.1578	0.8419	0.6334	0.0881	0.2659
	0.8648						
273	0.1892	0.4479	0.8062	0.6233	0.2583	0.1302	0.5185
	0.9652						
274	0.3148	0.1982	0.6373	0.1458	0.6751	0.2370	0.2686
	0.3101						
275	0.4672	0.4794	0.2938	0.3312	0.7147	0.3951	0.5451
	0.9844						
276	0.4468	0.2007	0.6315	0.2022	0.7591	0.1677	0.5061
	0.8956						
277	0.2688	0.2665	0.3323	0.8920	0.7610	0.1033	0.4718
	1.2135						
278	0.4016	0.2253	0.3551	0.3634	0.7028	0.2941	0.1403
	0.9913						
279	0.4621	0.4984	0.7371	0.9310	0.6575	0.2017	0.2918
	1.1329						
280	0.3731	0.4369	0.7700	0.8448	0.1127	0.3259	0.3534
	1.1529						
281	0.3639	0.4343	0.4669	0.1678	0.5858	0.2800	0.3668
	1.2852						
282	0.2564	0.3117	0.8020	0.3597	0.6454	0.3217	0.1536
	1.1424						
283	0.3723	0.4441	0.4596	0.4203	0.4199	0.1651	0.2707
	0.4068						
284	0.3570	0.2554	0.7835	0.3963	0.6972	0.1468	0.5211
	0.5610						

```

285 0.4254 0.4198 0.3607 0.4732 0.2942 0.2501 0.1998
      1.1748
286 0.1988 0.1811 0.5347 0.9182 0.1566 0.1785 0.5464
      0.6373
287 0.4668 0.1896 0.3614 0.2113 0.5236 0.1249 0.3311
      0.8054
288 0.1756 0.1723 0.6965 0.2969 0.5320 0.0935 0.2474
      0.4910
289 0.3014 0.3186 0.2117 0.1559 0.1245 0.3888 0.2422
      1.1853
290 0.4283 0.5067 0.6207 0.5348 0.5191 0.2414 0.5038
      0.8324
291 0.2732 0.2455 0.2106 0.1489 0.3305 0.4704 0.4889
      0.7397
292 0.3727 0.4256 0.4819 0.2139 0.5499 0.1638 0.4660
      0.5065
293 0.2966 0.2961 0.3413 0.7528 0.4575 0.4694 0.2373
      0.5674
294 0.2443 0.4890 0.1664 0.8721 0.3723 0.1136 0.4153
      1.2109
295 0.2781 0.5131 0.1658 0.8599 0.1421 0.2029 0.4500
      1.3400
296 0.2838 0.1485 0.2449 0.3895 0.5741 0.3529 0.2938
      0.3910
297 0.2389 0.2180 0.6621 0.8823 0.5468 0.3941 0.1627
      0.2728
298 0.3827 0.5060 0.4164 0.7608 0.4396 0.4616 0.3445
      0.7295
299 0.4092 0.2663 0.2289 0.6617 0.5860 0.3889 0.3388
      1.1788
300 0.3195 0.3757 0.1797 0.5808 0.7004 0.2681 0.4575
      0.9669
301 0.4584 0.4582 0.2011 0.2468 0.4870 0.2503 0.5032
      1.4383
302 0.4296 0.2807 0.2654 0.3147 0.3401 0.3691 0.3305
      0.2188
303 0.2866 0.2692 0.2755 0.2644 0.1524 0.3918 0.1247
      1.1748
304 0.2550 0.1394 0.7338 0.4520 0.1733 0.4176 0.3482
      0.5744
305 0.1985 0.3933 0.2883 0.7196 0.2165 0.4240 0.3612
      1.0482
306 0.3561 0.2765 0.5876 0.2764 0.4163 0.4484 0.2037
      0.9004
307 0.2954 0.2669 0.4815 0.1716 0.1765 0.4184 0.4459
      1.3857
308
309
310
311 #####
312
313 gbest =
314
315 0.4115 0.4631 0.3977 0.2664 0.1103 0.2409 0.3943
      0.4828
316 #####
317
318
319
320
321
322 pbest =
323
324 0.2217 0.4199 0.6000 0.5375 0.2567 0.1606 0.3058
      0.9632
325 0.4480 0.2782 0.6392 0.3721 0.4303 0.2857 0.2287
      1.3615
326 0.4597 0.4930 0.2033 0.4441 0.2613 0.3685 0.3057
      0.3888
327 0.4101 0.1275 0.2117 0.6488 0.4332 0.2415 0.3920
      0.9737
328 0.3458 0.2901 0.5614 0.7820 0.2969 0.2635 0.3458
      0.5199

```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

152

329	0.3935	0.4870	0.2692	0.6399	0.3044	0.3374	0.4260
	0.4447						
330	0.3291	0.4173	0.5911	0.8012	0.1095	0.1933	0.4805
	1.4095						
331	0.2835	0.4649	0.5024	0.7808	0.5060	0.1682	0.2439
	0.8832						
332	0.2219	0.1502	0.3252	0.8344	0.2274	0.2915	0.3115
	0.8017						
333	0.4322	0.3800	0.6165	0.0904	0.2277	0.0969	0.5051
	0.8376						
334	0.2041	0.3788	0.6514	0.5210	0.4911	0.4242	0.4621
	0.4518						
335	0.2695	0.4950	0.1935	0.1432	0.5370	0.4237	0.2726
	1.0557						
336	0.3416	0.4060	0.8168	0.7774	0.1002	0.4132	0.2717
	0.9812						
337	0.0975	0.1246	0.3708	0.2954	0.0846	0.2463	0.0947
	0.2541						
338	0.1983	0.4998	0.4044	0.8209	0.2464	0.1488	0.2586
	1.4098						
339	0.2791	0.4436	0.5537	0.2931	0.3634	0.1903	0.4868
	0.3723						
340	0.4606	0.2025	0.5124	0.5787	0.5562	0.1387	0.2002
	0.9813						
341	0.3385	0.4870	0.3967	0.4616	0.5365	0.2677	0.5215
	0.8265						
342	0.2273	0.4693	0.4894	0.9091	0.6787	0.4012	0.3709
	0.3214						
343	0.4218	0.4534	0.4907	0.7769	0.5341	0.0969	0.2667
	1.1621						
344	0.4456	0.3803	0.5942	0.6396	0.5894	0.1401	0.3007
	1.3949						
345	0.4598	0.4873	0.3895	0.6276	0.1344	0.4157	0.3631
	1.3105						
346	0.1942	0.4786	0.5380	0.1812	0.3693	0.2033	0.3306
	0.3931						
347	0.4606	0.3120	0.6349	0.7291	0.2856	0.4532	0.1980
	1.0630						
348	0.1630	0.2038	0.3382	0.3662	0.2631	0.1229	0.5414
	0.4397						
349	0.1626	0.4057	0.5482	0.3073	0.3723	0.1499	0.4887
	0.8883						
350	0.3406	0.3334	0.7740	0.7239	0.2920	0.3996	0.5223
	1.0143						
351	0.2901	0.4354	0.5420	0.7465	0.5498	0.4442	0.4616
	1.3575						
352	0.4263	0.3477	0.4924	0.7948	0.7156	0.1851	0.2605
	1.1180						
353	0.3849	0.1457	0.2492	0.5368	0.5859	0.4364	0.1477
	1.2269						
354	0.2721	0.2149	0.5529	0.8258	0.3358	0.1042	0.1159
	0.8118						
355	0.3131	0.5091	0.3250	0.5063	0.3418	0.4256	0.3123
	1.0106						
356	0.4609	0.2160	0.6769	0.6716	0.5067	0.4100	0.2386
	0.6847						
357	0.2275	0.2014	0.7714	0.1248	0.5994	0.1132	0.4384
	1.4358						
358	0.2176	0.2415	0.6262	0.6111	0.1296	0.2047	0.3060
	0.5242						
359	0.4645	0.5111	0.4042	0.3564	0.3125	0.3298	0.1991
	0.9013						
360	0.2430	0.2984	0.7087	0.3394	0.7635	0.3906	0.4700
	0.2110						
361	0.2184	0.3248	0.1784	0.7227	0.6569	0.3916	0.3269
	0.8278						
362	0.1855	0.4285	0.3562	0.4032	0.6439	0.2613	0.2894
	1.3806						
363	0.4099	0.1707	0.8238	0.3502	0.5030	0.1720	0.1822
	0.9237						
364	0.3900	0.3605	0.3310	0.8724	0.2255	0.3151	0.4198
	0.3591						

365	0.3916	0.2651	0.6070	0.3958	0.4014	0.2956	0.4205
	1.1930						
366	0.2694	0.2250	0.7332	0.5744	0.7073	0.1687	0.3780
	1.1770						
367	0.4601	0.4579	0.5106	0.7101	0.1275	0.1869	0.2767
	1.1778						
368	0.4595	0.3434	0.6478	0.2819	0.3615	0.1339	0.1437
	0.2073						
369	0.2781	0.1286	0.3915	0.7558	0.3551	0.4244	0.4930
	0.9559						
370	0.3392	0.2535	0.6325	0.6332	0.2285	0.2700	0.1426
	0.8696						
371	0.4072	0.2990	0.6809	0.7508	0.6581	0.3480	0.1428
	0.8509						
372	0.2511	0.4215	0.7379	0.7124	0.7584	0.1675	0.5388
	0.3456						
373	0.3556	0.1644	0.5522	0.7944	0.6908	0.4268	0.4619
	0.9199						
374	0.4491	0.4641	0.3349	0.0719	0.4070	0.1937	0.0995
	1.1033						
375	0.2733	0.4204	0.1895	0.5505	0.4804	0.4556	0.3723
	1.2317						
376	0.3998	0.2402	0.4698	0.3170	0.2295	0.4713	0.4003
	1.1301						
377	0.1143	0.3360	0.0972	0.5404	0.1660	0.1153	0.4650
	0.8279						
378	0.3455	0.1892	0.2446	0.8015	0.5208	0.4544	0.3549
	0.4988						
379	0.3503	0.3394	0.6030	0.2261	0.5412	0.0932	0.1305
	0.6659						
380	0.1953	0.3316	0.6265	0.4384	0.4682	0.0827	0.1624
	1.4307						
381	0.3808	0.2409	0.2652	0.8660	0.0968	0.4054	0.5120
	1.1612						
382	0.4609	0.3735	0.7119	0.9240	0.1344	0.2386	0.4586
	1.0939						
383	0.4467	0.1829	0.7179	0.1443	0.4903	0.4666	0.2690
	1.0681						
384	0.2233	0.2327	0.3460	0.9149	0.3338	0.2784	0.2273
	0.2080						
385	0.4602	0.2898	0.3137	0.7298	0.4900	0.3939	0.4147
	0.8493						
386	0.4608	0.3924	0.7086	0.2898	0.7563	0.1456	0.1497
	1.1279						
387	0.1815	0.3871	0.7444	0.2133	0.6209	0.4565	0.5417
	0.5230						
388	0.1084	0.1507	0.4341	0.0994	0.3766	0.1817	0.3453
	1.2161						
389	0.4597	0.2839	0.6475	0.6593	0.2396	0.1419	0.5130
	0.9210						
390	0.4641	0.2467	0.4142	0.2862	0.2444	0.0855	0.4302
	0.7685						
391	0.2909	0.4614	0.7813	0.2506	0.4080	0.1816	0.1287
	0.7021						
392	0.4392	0.3492	0.6749	0.7774	0.4337	0.0944	0.4984
	0.5461						
393	0.2583	0.1359	0.1599	0.9012	0.2081	0.0967	0.4108
	0.2736						
394	0.3514	0.1893	0.7550	0.4598	0.6953	0.4162	0.3980
	0.2508						
395	0.3085	0.2703	0.2466	0.3482	0.5781	0.1858	0.4198
	0.5509						
396	0.1214	0.4431	0.2579	0.1321	0.1619	0.4726	0.5476
	1.2979						
397	0.4126	0.2660	0.8157	0.5809	0.5011	0.2189	0.2165
	0.5425						
398	0.4351	0.2893	0.3166	0.4732	0.4356	0.0824	0.4480
	0.4048						
399	0.4395	0.4294	0.6316	0.2855	0.7348	0.3924	0.3079
	0.2316						
400	0.1941	0.3877	0.4914	0.7454	0.1712	0.1803	0.4561
	1.2899						

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

154

401	0.3681	0.2494	0.5278	0.8978	0.4922	0.3085	0.3259
	1.3874						
402	0.4637	0.3246	0.5533	0.1550	0.6084	0.1713	0.1309
	0.4465						
403	0.2130	0.3051	0.4617	0.6969	0.1494	0.4080	0.3816
	1.1645						
404	0.4196	0.4266	0.4573	0.5177	0.4410	0.3752	0.5326
	0.6086						
405	0.2674	0.4991	0.6123	0.8717	0.1484	0.2668	0.2893
	0.7041						
406	0.4422	0.3072	0.7636	0.6298	0.2735	0.4534	0.4828
	0.2611						
407	0.4292	0.1970	0.6838	0.4503	0.2059	0.1326	0.3629
	0.3340						
408	0.3713	0.4906	0.8109	0.5681	0.3029	0.2119	0.2372
	0.7050						
409	0.4132	0.4587	0.4934	0.7187	0.4386	0.2704	0.3114
	0.9451						
410	0.3630	0.1745	0.2992	0.3128	0.5218	0.1710	0.4429
	1.0618						
411	0.3885	0.3145	0.7423	0.1244	0.4912	0.1824	0.1737
	0.5017						
412	0.3061	0.4486	0.3947	0.6527	0.7578	0.2736	0.3195
	1.3072						
413	0.4237	0.2303	0.4489	0.3630	0.2882	0.1101	0.1307
	1.2249						
414	0.2221	0.3266	0.4315	0.3636	0.7333	0.1778	0.5596
	1.1871						
415	0.3779	0.1833	0.1671	0.9061	0.1897	0.4306	0.5176
	0.9802						
416	0.4228	0.3866	0.6281	0.5657	0.4735	0.2828	0.4435
	1.0426						
417	0.3125	0.2303	0.3392	0.7445	0.2930	0.4521	0.1340
	1.4335						
418	0.2355	0.4114	0.5684	0.1258	0.7150	0.1712	0.4179
	0.4829						
419	0.4595	0.5086	0.2931	0.4822	0.1857	0.1767	0.3684
	1.4348						
420	0.4115	0.4631	0.3977	0.2664	0.1103	0.2409	0.3943
	0.4828						
421	0.2511	0.4972	0.1610	0.7069	0.7563	0.1208	0.3515
	0.6898						
422	0.3271	0.3642	0.7020	0.9043	0.6228	0.2143	0.3591
	0.3055						
423	0.2608	0.4699	0.3407	0.1349	0.5203	0.0902	0.4358
	1.0686						
424	0.4698	0.4846	0.3890	0.4273	0.7443	0.1151	0.4892
	1.0308						
425	0.2674	0.1600	0.8204	0.5407	0.1280	0.1338	0.1429
	0.7712						
426	0.4614	0.1499	0.5549	0.3070	0.1652	0.1756	0.4559
	0.8494						
427	0.4034	0.4911	0.7238	0.3629	0.1419	0.2138	0.2328
	1.3414						
428	0.2498	0.3358	0.2755	0.5483	0.3693	0.1247	0.3423
	1.4435						
429	0.4218	0.4316	0.7728	0.1434	0.6916	0.4030	0.4295
	1.0283						
430	0.4525	0.1425	0.1814	0.6229	0.6261	0.4181	0.1570
	0.2152						
431	0.2917	0.4322	0.2931	0.7933	0.1954	0.1326	0.1523
	1.2206						
432	0.2956	0.4729	0.5985	0.5143	0.3044	0.0791	0.2485
	0.7249						
433	0.2792	0.3361	0.5424	0.3705	0.6567	0.1168	0.1676
	0.6435						
434	0.3346	0.2524	0.7584	0.6330	0.5601	0.2989	0.5313
	0.9194						
435	0.1943	0.5078	0.6722	0.5211	0.3822	0.2681	0.5145
	0.2340						
436	0.3337	0.1347	0.2870	0.3881	0.7069	0.4450	0.1736
	1.0953						

437	0.3472	0.3636	0.6922	0.4738	0.3887	0.3029	0.2615
	1.1344						
438	0.2338	0.4523	0.2345	0.1527	0.3553	0.3500	0.5153
	1.4901						
439	0.3806	0.2686	0.7391	0.8003	0.7427	0.4330	0.1210
	1.1098						
440	0.2022	0.4143	0.3534	0.8438	0.1805	0.1622	0.3169
	0.3019						
441	0.3485	0.2236	0.2028	0.1633	0.6772	0.4650	0.3100
	0.2037						
442	0.1893	0.1837	0.8217	0.7582	0.3999	0.2620	0.4609
	1.3594						
443	0.4456	0.3439	0.5957	0.5929	0.3326	0.2353	0.5405
	0.9650						
444	0.4623	0.3041	0.5573	0.1272	0.5256	0.2095	0.2805
	1.2109						
445	0.2587	0.4953	0.3787	0.3062	0.7649	0.2467	0.4924
	0.7253						
446	0.2592	0.4343	0.4570	0.8740	0.2793	0.4062	0.4124
	0.4095						
447	0.2309	0.3332	0.6483	0.6508	0.2681	0.2492	0.2070
	0.7470						
448	0.2803	0.3355	0.3688	0.5741	0.3285	0.0920	0.3604
	1.3025						
449	0.3032	0.2951	0.4742	0.6798	0.6614	0.1475	0.2758
	1.3247						
450	0.2341	0.4899	0.5162	0.9114	0.1888	0.1906	0.4505
	1.1928						
451	0.3940	0.4877	0.4433	0.5980	0.4365	0.1754	0.3179
	0.4366						
452	0.2970	0.2228	0.6455	0.8447	0.3949	0.2964	0.4853
	1.2837						
453	0.1897	0.1494	0.6105	0.6277	0.7473	0.4024	0.3120
	0.6219						
454	0.2572	0.3417	0.2732	0.9279	0.6610	0.4318	0.5121
	1.1192						
455	0.4555	0.4850	0.5489	0.7553	0.3303	0.2866	0.3032
	1.1871						
456	0.4607	0.3850	0.7387	0.9013	0.2953	0.3463	0.4896
	0.5754						
457	0.3124	0.4009	0.3353	0.6651	0.4089	0.0854	0.1258
	1.2463						
458	0.4403	0.2639	0.3319	0.4904	0.5552	0.2299	0.3977
	0.4301						
459	0.3134	0.1985	0.7627	0.6161	0.6246	0.1876	0.1460
	1.4026						
460	0.3814	0.1648	0.3846	0.4610	0.0596	0.2001	0.3656
	0.4051						
461	0.3888	0.1454	0.1462	0.1842	0.3283	0.0774	0.4509
	0.9111						
462	0.3485	0.1361	0.4993	0.6598	0.2425	0.2220	0.2592
	1.0556						
463	0.2868	0.2422	0.4986	0.7805	0.4565	0.1691	0.3454
	0.7993						
464	0.3685	0.4154	0.6303	0.3497	0.4655	0.2474	0.4366
	0.3477						
465	0.4436	0.2641	0.5889	0.5315	0.6767	0.2555	0.3054
	1.3026						
466	0.1705	0.2944	0.7281	0.1815	0.5426	0.2546	0.4338
	0.3912						
467	0.1779	0.4312	0.1714	0.8335	0.6679	0.3625	0.4367
	0.2000						
468	0.4200	0.2534	0.2017	0.8087	0.7646	0.4230	0.3534
	0.5486						
469	0.4028	0.4677	0.4389	0.3307	0.6396	0.2018	0.5299
	0.5385						
470	0.2509	0.1421	0.2347	0.7229	0.3339	0.3140	0.4235
	1.3230						
471	0.3360	0.2391	0.3573	0.5580	0.1183	0.2946	0.3586
	1.0495						
472	0.3555	0.4640	0.3521	0.7775	0.5187	0.3641	0.5219
	0.5868						

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

156

473	0.1944 0.8260	0.2357	0.6731	0.1178	0.5736	0.3285	0.2744
474	0.3548 0.7212	0.1587	0.6735	0.5786	0.4590	0.0824	0.3825
475	0.4450 0.5457	0.3636	0.3405	0.7064	0.3223	0.1485	0.2755
476	0.3961 0.8615	0.2830	0.2500	0.7116	0.4800	0.1621	0.1944
477	0.1904 1.1822	0.3481	0.7913	0.2526	0.3519	0.1828	0.3020
478	0.3859 0.4056	0.4835	0.8136	0.1410	0.5726	0.4576	0.1708
479	0.2182 0.5882	0.4742	0.8103	0.8433	0.3435	0.3767	0.1688
480	0.1774 0.5180	0.5040	0.6377	0.6925	0.7564	0.1544	0.4524
481	0.2061 0.2187	0.3255	0.6218	0.9265	0.2229	0.1734	0.3380
482	0.3696 0.9925	0.4698	0.5233	0.6595	0.1664	0.2457	0.1632
483	0.3720 0.7723	0.2665	0.3638	0.3367	0.7003	0.1226	0.4523
484	0.2312 1.2771	0.2830	0.1700	0.5475	0.3756	0.3873	0.1234
485	0.4437 0.5902	0.3712	0.8192	0.8648	0.6542	0.1041	0.3535
486	0.4407 0.7438	0.3398	0.7522	0.4368	0.6865	0.3327	0.4042
487	0.2513 0.1614	0.2258	0.2951	0.1389	0.3780	0.2865	0.1575
488	0.3984 0.8559	0.3379	0.1526	0.8356	0.6297	0.0850	0.2604
489	0.1853 0.9551	0.4418	0.7977	0.6170	0.2557	0.1278	0.5122
490	0.3108 0.3055	0.1940	0.6328	0.1433	0.6730	0.2346	0.2648
491	0.4765 1.0131	0.4893	0.2961	0.3385	0.7422	0.4068	0.5583
492	0.4411 0.8876	0.1955	0.6253	0.1989	0.7553	0.1647	0.5003
493	0.2641 1.2026	0.2614	0.3274	0.8846	0.7556	0.1009	0.4660
494	0.4102 1.0326	0.2256	0.3620	0.3766	0.7441	0.3078	0.1317
495	0.4565 1.1255	0.4921	0.7312	0.9264	0.6552	0.1985	0.2866
496	0.3676 1.1451	0.4307	0.7640	0.8401	0.1112	0.3225	0.3481
497	0.3686 1.3289	0.4425	0.4770	0.1677	0.6089	0.2871	0.3722
498	0.2513 1.1339	0.3059	0.7955	0.3558	0.6423	0.3182	0.1490
499	0.3768 0.4085	0.4529	0.4687	0.4315	0.4344	0.1671	0.2712
500	0.3516 0.5543	0.2497	0.7769	0.3923	0.6940	0.1438	0.5153
501	0.4247 1.1746	0.4190	0.3600	0.4730	0.2941	0.2497	0.1989
502	0.1939 0.6303	0.1757	0.5290	0.9127	0.1550	0.1755	0.5406
503	0.4628 0.8005	0.1854	0.3577	0.2087	0.5222	0.1227	0.3274
504	0.1706 0.4844	0.1667	0.6905	0.2933	0.5296	0.0905	0.2425
505	0.2484 1.2326	0.3141	0.1528	0.1172	0.0929	0.4378	0.1857
506	0.4220 0.8234	0.4994	0.6135	0.5295	0.5155	0.2377	0.4973
507	0.2183 0.7039	0.2268	0.1550	0.1113	0.3367	0.5282	0.4783
508	0.3777 0.5143	0.4332	0.4929	0.2158	0.5728	0.1652	0.4762

509	0.2917	0.2908	0.3362	0.7466	0.4542	0.4649	0.2328
	0.5604						
510	0.2387	0.4818	0.1614	0.8654	0.3695	0.1104	0.4092
	1.2003						
511	0.2721	0.5060	0.1602	0.8545	0.1404	0.1993	0.4439
	1.3306						
512	0.2797	0.1441	0.2411	0.3866	0.5725	0.3504	0.2899
	0.3862						
513	0.2338	0.2125	0.6558	0.8767	0.5439	0.3904	0.1581
	0.2669						
514	0.3773	0.4996	0.4109	0.7553	0.4369	0.4575	0.3394
	0.7220						
515	0.4037	0.2605	0.2239	0.6574	0.5836	0.3854	0.3336
	1.1709						
516	0.3155	0.3712	0.1760	0.5776	0.6982	0.2657	0.4534
	0.9612						
517	0.4542	0.4535	0.1970	0.2441	0.4860	0.2479	0.4993
	1.4338						
518	0.4233	0.2735	0.2592	0.3106	0.3385	0.3654	0.3244
	0.2113						
519	0.2302	0.2590	0.2287	0.2480	0.1251	0.4502	0.0421
	1.2345						
520	0.2491	0.1330	0.7271	0.4476	0.1715	0.4136	0.3423
	0.5669						
521	0.1921	0.3862	0.2822	0.7158	0.2149	0.4204	0.3552
	1.0412						
522	0.3561	0.2765	0.5876	0.2764	0.4163	0.4484	0.2037
	0.9004						
523	0.2895	0.2604	0.4752	0.1678	0.1746	0.4143	0.4398
	1.3758						

9.3 3η προσομοίωση

```

1 #####chp_windCRETE
2 #####
3 archive =
4
5 Columns 1 through 9
6
7      0.4298      0.5539      0.2503      0.4480      0.2140      0.3762      0.1602
8      0.6221      0.0698
9      0.4296      0.5539      0.2505      0.4488      0.2139      0.3773      0.1592
10     0.6231      0.0700
11     0.4303      0.5549      0.2510      0.4497      0.2143      0.3781      0.1594
12     0.6244      0.0702
13     0.4313      0.5554      0.2508      0.4485      0.2146      0.3763      0.1615
14     0.6229      0.0697
15     0.4307      0.5557      0.2514      0.4508      0.2146      0.3792      0.1591
16     0.6259      0.0704
17     0.4316      0.5563      0.2515      0.4503      0.2149      0.3783      0.1604
18     0.6253      0.0702
19     0.4321      0.5566      0.2514      0.4497      0.2151      0.3774      0.1615
20     0.6245      0.0700
21     0.4315      0.5565      0.2517      0.4512      0.2149      0.3794      0.1597
22     0.6264      0.0704
23     0.4316      0.5571      0.2522      0.4528      0.2151      0.3812      0.1585
24     0.6285      0.0708
25     0.3680      0.5131      0.7552      0.2406      0.2458      0.2120      0.4371
26     0.2819      0.0354
27     0.3683      0.5136      0.7564      0.2409      0.2461      0.2123      0.4376
28     0.2821      0.0355
29     0.4334      0.5581      0.2520      0.4504      0.2157      0.3778      0.1625
30     0.6256      0.0700
31     0.4332      0.5582      0.2522      0.4513      0.2156      0.3789      0.1616
32     0.6267      0.0703
33     0.4348      0.5608      0.2537      0.4548      0.2166      0.3825      0.1607
34     0.6314      0.0710
35     0.4351      0.5614      0.2541      0.4559      0.2168      0.3836      0.1603
36     0.6328      0.0712

```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

158

22	0.2627	0.4942	0.2206	0.6270	0.3697	0.2804	0.5959
	0.1081	0.0822					
23	0.4308	0.5569	0.2525	0.4544	0.2149	0.3833	0.1564
	0.6304	0.0713					
24	0.4298	0.5556	0.2519	0.4532	0.2144	0.3823	0.1562
	0.6288	0.0711					
25	0.4296	0.5547	0.2513	0.4514	0.2141	0.3802	0.1573
	0.6264	0.0706					
26	0.4289	0.5543	0.2513	0.4519	0.2139	0.3811	0.1561
	0.6270	0.0708					
27	0.3637	0.5090	0.7568	0.2392	0.2443	0.2121	0.4342
	0.2793	0.0355					
28	0.4336	0.5606	0.2542	0.4576	0.2163	0.3861	0.1573
	0.6348	0.0718					
29	0.3659	0.5124	0.7627	0.2408	0.2459	0.2138	0.4371
	0.2811	0.0358					
30	0.4303	0.5565	0.2524	0.4544	0.2147	0.3835	0.1559
	0.6305	0.0713					
31	0.3631	0.5086	0.7582	0.2392	0.2442	0.2125	0.4340
	0.2790	0.0356					
32	0.4238	0.5579	0.2581	0.4781	0.2139	0.4133	0.1303
	0.6601	0.0778					
33	0.4221	0.5564	0.2578	0.4785	0.2132	0.4143	0.1279
	0.6604	0.0781					
34	0.4223	0.5555	0.2568	0.4749	0.2130	0.4101	0.1309
	0.6559	0.0772					
35	0.4207	0.5549	0.2573	0.4780	0.2126	0.4142	0.1267
	0.6597	0.0781					
36	0.4228	0.5555	0.2565	0.4736	0.2131	0.4084	0.1324
	0.6543	0.0768					
37							
38	Columns 10 through 18						
39							
40	0.0114	0.0144	0.0130	0.0263	0.0204	0.0217	0.0291
	0.0427	0.0314					
41	0.0114	0.0143	0.0130	0.0263	0.0204	0.0217	0.0289
	0.0427	0.0315					
42	0.0114	0.0144	0.0131	0.0263	0.0204	0.0217	0.0290
	0.0427	0.0315					
43	0.0114	0.0146	0.0131	0.0263	0.0204	0.0217	0.0293
	0.0429	0.0315					
44	0.0114	0.0143	0.0131	0.0264	0.0205	0.0218	0.0289
	0.0428	0.0316					
45	0.0114	0.0145	0.0131	0.0264	0.0205	0.0218	0.0292
	0.0429	0.0316					
46	0.0114	0.0146	0.0131	0.0264	0.0205	0.0217	0.0294
	0.0430	0.0316					
47	0.0115	0.0144	0.0131	0.0264	0.0205	0.0218	0.0290
	0.0429	0.0316					
48	0.0115	0.0143	0.0131	0.0265	0.0205	0.0219	0.0288
	0.0428	0.0317					
49	0.0115	0.0221	0.0165	0.1043	0.0069	0.0188	0.0859
	0.0149	0.0199					
50	0.0115	0.0221	0.0165	0.1045	0.0069	0.0188	0.0860
	0.0149	0.0199					
51	0.0114	0.0147	0.0131	0.0264	0.0205	0.0218	0.0295
	0.0431	0.0317					
52	0.0114	0.0146	0.0131	0.0265	0.0205	0.0218	0.0294
	0.0431	0.0317					
53	0.0115	0.0145	0.0132	0.0266	0.0207	0.0220	0.0292
	0.0432	0.0319					
54	0.0116	0.0144	0.0132	0.0267	0.0207	0.0220	0.0291
	0.0432	0.0319					
55	0.0130	0.0503	0.0242	0.0036	0.0052	0.0072	0.0180
	0.0339	0.0286					
56	0.0116	0.0141	0.0131	0.0265	0.0205	0.0220	0.0285
	0.0427	0.0317					
57	0.0115	0.0140	0.0131	0.0265	0.0205	0.0219	0.0284
	0.0426	0.0316					
58	0.0115	0.0142	0.0131	0.0264	0.0204	0.0218	0.0286
	0.0426	0.0316					
59	0.0115	0.0140	0.0131	0.0264	0.0204	0.0218	0.0284
	0.0425	0.0315					

60	0.0115	0.0217	0.0164	0.1046	0.0067	0.0188	0.0854
	0.0143	0.0196					
61	0.0116	0.0141	0.0132	0.0267	0.0207	0.0221	0.0286
	0.0430	0.0319					
62	0.0116	0.0218	0.0166	0.1055	0.0068	0.0189	0.0860
	0.0143	0.0198					
63	0.0116	0.0140	0.0131	0.0265	0.0205	0.0220	0.0284
	0.0427	0.0317					
64	0.0115	0.0216	0.0164	0.1049	0.0067	0.0188	0.0854
	0.0141	0.0196					
65	0.0123	0.0115	0.0133	0.0273	0.0208	0.0231	0.0239
	0.0413	0.0323					
66	0.0123	0.0112	0.0132	0.0273	0.0207	0.0231	0.0235
	0.0411	0.0323					
67	0.0122	0.0115	0.0132	0.0272	0.0207	0.0230	0.0240
	0.0412	0.0322					
68	0.0123	0.0111	0.0132	0.0272	0.0207	0.0231	0.0233
	0.0410	0.0322					
69	0.0122	0.0117	0.0132	0.0271	0.0207	0.0229	0.0243
	0.0413	0.0321					
70							
71	Columns 19 through 27						
72							
73	0.0051	0.0446	0.0526	0.0209	0.0476	0.0407	0.0352
	0.0426	0.0596					
74	0.0051	0.0447	0.0526	0.0209	0.0476	0.0407	0.0353
	0.0427	0.0597					
75	0.0051	0.0447	0.0527	0.0209	0.0477	0.0408	0.0353
	0.0428	0.0598					
76	0.0052	0.0447	0.0528	0.0209	0.0477	0.0409	0.0353
	0.0426	0.0597					
77	0.0050	0.0448	0.0527	0.0210	0.0478	0.0408	0.0354
	0.0429	0.0600					
78	0.0051	0.0448	0.0528	0.0210	0.0478	0.0409	0.0354
	0.0428	0.0599					
79	0.0052	0.0448	0.0529	0.0209	0.0478	0.0409	0.0354
	0.0427	0.0598					
80	0.0051	0.0449	0.0528	0.0210	0.0478	0.0409	0.0354
	0.0429	0.0600					
81	0.0050	0.0449	0.0528	0.0211	0.0479	0.0409	0.0355
	0.0431	0.0602					
82	0.0247	0.0143	0.0628	0.0072	0.0363	0.0242	0.0370
	0.0224	0.0170					
83	0.0247	0.0143	0.0629	0.0072	0.0364	0.0242	0.0371
	0.0225	0.0170					
84	0.0053	0.0449	0.0531	0.0210	0.0479	0.0411	0.0355
	0.0428	0.0599					
85	0.0052	0.0450	0.0530	0.0210	0.0479	0.0411	0.0355
	0.0429	0.0601					
86	0.0051	0.0452	0.0532	0.0212	0.0482	0.0412	0.0357
	0.0433	0.0605					
87	0.0051	0.0453	0.0532	0.0212	0.0483	0.0413	0.0358
	0.0434	0.0607					
88	0.0063	0.0049	0.0467	0.0408	0.0522	0.0379	0.0415
	0.0354	0.0622					
89	0.0048	0.0450	0.0527	0.0212	0.0480	0.0409	0.0356
	0.0433	0.0604					
90	0.0048	0.0449	0.0526	0.0211	0.0479	0.0408	0.0355
	0.0432	0.0603					
91	0.0049	0.0448	0.0526	0.0210	0.0478	0.0407	0.0354
	0.0430	0.0600					
92	0.0049	0.0448	0.0525	0.0211	0.0478	0.0407	0.0354
	0.0430	0.0601					
93	0.0245	0.0139	0.0624	0.0072	0.0361	0.0238	0.0369
	0.0224	0.0167					
94	0.0049	0.0453	0.0530	0.0213	0.0483	0.0411	0.0358
	0.0436	0.0609					
95	0.0246	0.0139	0.0628	0.0072	0.0363	0.0239	0.0371
	0.0225	0.0168					
96	0.0048	0.0450	0.0526	0.0212	0.0480	0.0408	0.0356
	0.0433	0.0604					
97	0.0245	0.0138	0.0623	0.0071	0.0361	0.0237	0.0369
	0.0224	0.0167					

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

160

98	0.0030	0.0457	0.0516	0.0223	0.0492	0.0405	0.0364
	0.0462	0.0634					
99	0.0028	0.0456	0.0514	0.0224	0.0491	0.0403	0.0364
	0.0463	0.0634					
100	0.0030	0.0455	0.0515	0.0222	0.0489	0.0403	0.0362
	0.0458	0.0630					
101	0.0027	0.0455	0.0512	0.0223	0.0490	0.0402	0.0363
	0.0462	0.0634					
102	0.0031	0.0455	0.0515	0.0221	0.0489	0.0403	0.0362
	0.0457	0.0628					
103							
104	Column 28						
105							
106	0.0573						
107	0.0572						
108	0.0573						
109	0.0576						
110	0.0573						
111	0.0575						
112	0.0577						
113	0.0574						
114	0.0573						
115	0.0522						
116	0.0522						
117	0.0579						
118	0.0578						
119	0.0579						
120	0.0578						
121	0.1095						
122	0.0571						
123	0.0570						
124	0.0570						
125	0.0569						
126	0.0513						
127	0.0574						
128	0.0516						
129	0.0570						
130	0.0512						
131	0.0541						
132	0.0537						
133	0.0540						
134	0.0535						
135	0.0542						
136							
137	#####						
138							
139	gbest =						
140							
141	Columns 1 through 9						
142							
143	0.4426	0.4816	0.1724	0.1874	0.1985	0.0683	0.3734
	0.2887	0.0036					
144							
145	Columns 10 through 18						
146							
147	0.0035	0.0357	0.0104	0.0164	0.0159	0.0091	0.0663
	0.0500	0.0224					
148							
149	Columns 19 through 27						
150							
151	0.0213	0.0330	0.0560	0.0082	0.0316	0.0397	0.0237
	0.0122	0.0266					
152							
153	Column 28						
154							
155	0.0772						
156							
157	#####						
158							
159	pbest =						
160							
161	Columns 1 through 9						

162							
163	0.2502	0.3748	0.5134	0.5120	0.6336	0.1698	0.3793
	1.3350	0.0674					
164	0.1718	0.3195	0.0877	0.6428	0.4573	0.0956	0.4170
	0.0712	0.0168					
165	0.3368	0.4767	0.7296	0.2255	0.2300	0.2038	0.4080
	0.2606	0.0344					
166	0.3557	0.1069	0.5238	0.9447	0.6980	0.3567	0.4481
	1.3724	0.1034					
167	0.1662	0.1891	0.6888	0.5034	0.4673	0.1951	0.5011
	0.1090	0.1148					
168	0.4014	0.3247	0.4402	0.4702	0.7904	0.1890	0.2283
	0.4153	0.1718					
169	0.4426	0.4816	0.1724	0.1874	0.1985	0.0683	0.3734
	0.2887	0.0036					
170	0.2835	0.3648	0.4450	0.1401	0.5205	0.1707	0.1409
	0.5825	0.0477					
171	0.2609	0.4456	0.1934	0.5107	0.3125	0.2264	0.5106
	0.1211	0.0643					
172	0.4485	0.1489	0.9160	0.7853	0.3155	0.2396	0.5189
	0.0478	0.1560					
173	0.1128	0.5268	0.3158	0.8317	0.5500	0.0736	0.3165
	1.2330	0.0964					
174	0.2269	0.0531	0.7967	0.7398	0.5793	0.5204	0.1355
	1.1092	0.1169					
175	0.3133	0.4173	0.5761	1.1166	0.1876	0.5629	0.2271
	1.1899	0.1117					
176	0.3984	0.5925	0.2050	1.0655	0.9511	0.3846	0.1388
	0.1542	0.1630					
177	0.4179	0.1361	0.5246	0.9178	0.3703	0.2998	0.3467
	0.3627	0.0593					
178	0.1679	0.5174	0.2280	0.7723	0.4783	0.2839	0.3576
	0.1052	0.0099					
179	0.3764	0.2922	0.3410	0.6949	0.5202	0.2148	0.0903
	0.5342	0.1268					
180	0.1325	0.4448	0.1794	0.5977	0.4377	0.5778	0.5977
	0.5241	0.0399					
181	0.1590	0.4855	0.7152	0.3267	0.2813	0.1082	0.2691
	0.1026	0.0248					
182	0.4021	0.0838	0.5360	0.8739	0.2743	0.5447	0.0363
	1.6702	0.0946					
183	0.3646	0.1206	0.1039	0.2060	0.4498	0.1321	0.2812
	0.4479	0.0283					
184	0.3611	0.1107	0.7191	0.7938	0.6835	0.1626	0.1650
	0.5081	0.0415					
185	0.1520	0.3897	0.3347	0.7907	0.3789	0.1553	0.2654
	0.7066	0.0844					
186	0.3259	0.2235	0.6169	0.2329	0.4098	0.1251	0.2342
	0.5108	0.0021					
187	0.3462	0.1577	0.5663	0.8728	0.6611	0.0836	0.1506
	0.2707	0.0498					
188	0.1453	0.3054	0.8663	0.9058	0.6182	0.4918	0.1001
	1.6382	0.0467					
189	0.3195	0.2181	0.7574	0.5970	0.5219	0.4668	0.4299
	0.9470	0.1384					
190	0.1313	0.2440	0.4516	0.6950	0.2228	0.0652	0.3156
	0.1066	0.0302					
191	0.2337	0.3558	0.4450	0.3069	0.6097	0.0510	0.2568
	0.1207	0.0011					
192	0.2044	0.1312	0.4622	0.4088	0.1898	0.2364	0.3588
	0.7637	0.0361					
193	0.3018	0.5159	0.4194	0.9378	0.2678	0.2920	0.0860
	1.1285	0.0968					
194	0.3474	0.4525	0.7878	0.3280	0.5731	0.1209	0.4865
	0.6729	0.0319					
195	0.4402	0.4292	0.7482	0.2466	0.5715	0.2492	0.4944
	0.4594	0.1495					
196	0.3025	0.1063	0.1598	0.5468	0.5082	0.2844	0.4181
	1.3513	0.0885					
197	0.3163	0.4552	0.3805	0.8854	0.1472	0.2718	0.4881
	1.1092	0.1016					
198	0.2397	0.3848	0.4452	0.4946	0.1670	0.4526	0.3371
	1.1544	0.0492					

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

162

199	0.3518	0.3769	0.7643	0.2732	0.3861	0.3028	0.0813
	0.4097	0.0039					
200	0.2129	0.3710	0.7225	0.2011	0.3047	0.3902	0.3398
	0.3400	0.1187					
201	0.3615	0.3314	0.7646	0.4921	0.7603	0.2426	0.1272
	0.1633	0.0201					
202	0.4406	0.3745	0.4742	0.3644	0.6248	0.3916	0.3491
	0.5072	0.1278					
203	0.2951	0.2685	0.1521	0.1764	0.4543	0.4554	0.5744
	1.2917	0.1682					
204	0.1630	0.3942	0.7439	0.5313	0.2500	0.4617	0.2697
	0.4297	0.0984					
205	0.1397	0.3329	0.7737	0.6424	0.7460	0.0558	0.2472
	0.1465	0.0973					
206	0.1573	0.4329	0.2734	0.8605	0.6002	0.0695	0.3466
	0.8907	0.0047					
207	0.2726	0.2833	0.2545	0.0863	0.2390	0.4260	0.5119
	0.8019	0.0611					
208	0.4427	0.1077	0.2051	0.5301	0.7586	0.3016	0.1298
	1.1554	0.0374					
209	0.2489	0.3874	0.7900	0.5904	0.4295	0.3358	0.2361
	1.2810	0.1235					
210	0.3136	0.3780	0.4026	0.8915	0.4295	0.2488	0.1857
	0.5135	0.0290					
211	0.4001	0.1402	0.0767	0.5181	0.5956	0.1469	0.2900
	1.1384	0.1221					
212	0.1372	0.4271	0.5689	1.0754	0.6029	0.2888	0.1553
	1.4224	0.1337					
213	0.1699	0.2024	0.1121	0.1024	0.3484	0.3053	0.3152
	0.0366	0.1303					
214	0.4524	0.4841	0.3674	0.4368	0.6252	0.5932	0.4651
	0.9269	0.1643					
215	0.4544	0.2895	0.2681	0.4747	0.3024	0.3567	0.4054
	0.5382	0.1075					
216	0.2510	0.3763	0.6333	0.6748	0.5154	0.2881	0.2012
	0.4085	0.0340					
217	0.1996	0.4172	0.4835	0.6852	0.6869	0.0664	0.4184
	0.5028	0.1383					
218	0.2587	0.2922	0.2141	0.7090	0.5859	0.3196	0.2183
	0.7676	0.1198					
219	0.3254	0.5165	0.5423	0.2164	0.5460	0.3098	0.3146
	0.6044	0.0280					
220	0.4334	0.1588	0.1691	0.9455	0.1782	0.0658	0.4095
	0.8588	0.0580					
221	0.2613	0.2932	0.4956	0.5381	0.5012	0.2381	0.1545
	0.4526	0.0294					
222	0.1476	0.0581	0.5390	1.0075	0.3554	0.2231	0.0150
	0.2368	0.1563					
223	0.4208	0.4459	0.6635	0.2861	0.6344	0.3582	0.4810
	0.4756	0.0040					
224	0.4701	0.5038	0.6681	1.0591	0.2565	0.4432	0.0254
	1.4033	0.1742					
225	0.4764	0.1051	0.9731	0.3984	0.4701	0.4129	0.4751
	0.3391	0.0842					
226	0.2948	0.4160	0.7662	0.3728	0.6657	0.2388	0.1552
	0.5272	0.0178					
227	0.1999	0.2993	0.3478	0.4027	0.5511	0.1894	0.4518
	0.3441	0.1334					
228	0.3843	0.4895	0.4106	0.1189	0.6585	0.4551	0.2792
	1.2778	0.0541					
229	0.4543	0.5240	0.6448	0.6196	0.8014	0.5166	0.0848
	0.9430	0.1704					
230	0.0983	0.1908	0.4145	0.4726	0.7649	0.2237	0.4462
	0.2262	0.0026					
231	0.2839	0.3533	0.5521	0.1565	0.1253	0.2825	0.2641
	0.3493	0.0794					
232	0.3557	0.4147	0.6541	0.1636	0.5603	0.1157	0.3421
	0.2816	0.1002					
233	0.3742	0.4658	0.1773	0.8304	0.2013	0.2591	0.2231
	0.7146	0.0235					
234	0.2788	0.4553	0.3234	0.3564	0.6432	0.2414	0.1584
	0.2713	0.1037					

235	0.4344	0.3914	0.0744	0.0969	0.3802	0.2839	0.0690
	0.9609	0.0909					
236	0.0986	0.2126	0.1081	0.5314	0.4214	0.2082	0.3421
	0.8559	0.0300					
237	0.2502	0.2301	0.3218	0.4474	0.3085	0.3842	0.3532
	0.3692	0.0725					
238	0.3976	0.3366	0.5229	0.5302	0.3184	0.1590	0.3715
	0.0924	0.0820					
239	0.3333	0.2540	0.4981	0.2753	0.7322	0.3017	0.4063
	0.8866	0.0047					
240	0.3561	0.4645	0.1118	0.4395	0.7548	0.2708	0.3494
	0.2931	0.0396					
241	0.3446	0.1268	0.2773	0.4754	0.0706	0.2955	0.3196
	0.6408	0.0777					
242	0.1230	0.3397	0.5403	0.5509	0.3069	0.2336	0.3591
	0.6124	0.0583					
243	0.2611	0.3813	0.4172	0.8634	0.8026	0.2806	0.3613
	0.5487	0.1042					
244	0.1106	0.2237	0.3770	0.3571	0.6672	0.4629	0.2436
	0.2885	0.0031					
245	0.3728	0.3651	0.0860	0.1281	0.5988	0.3931	0.4177
	1.1570	0.0027					
246	0.1396	0.3879	0.5256	0.6610	0.7479	0.4709	0.2623
	0.4522	0.0777					
247	0.4167	0.2414	0.1200	0.7959	0.2761	0.4381	0.2598
	0.6558	0.0835					
248	0.2360	0.3022	0.5356	0.9487	0.2307	0.1464	0.0794
	0.8019	0.1342					
249	0.0941	0.3653	0.3675	0.1691	0.7557	0.4743	0.4166
	0.8069	0.1098					
250	0.2338	0.3720	0.4291	0.2147	0.1033	0.4271	0.0582
	0.3054	0.0754					
251	0.2963	0.4565	0.3048	0.1414	0.6045	0.0570	0.0768
	0.0397	0.0338					
252	0.2453	0.3978	0.6467	0.4528	0.2687	0.1814	0.2091
	0.7399	0.0173					
253	0.3449	0.2480	0.4847	0.7015	0.5360	0.2326	0.0988
	0.8819	0.0383					
254	0.2620	0.3117	0.5035	0.1634	0.1251	0.0727	0.1198
	0.4939	0.0280					
255	0.3843	0.1853	0.4034	0.5522	0.1014	0.1846	0.5061
	0.2769	0.1045					
256	0.3354	0.4653	0.6152	0.2331	0.6323	0.3919	0.3287
	0.2756	0.0337					
257	0.3234	0.1365	0.2826	0.7956	0.4762	0.1102	0.1420
	0.8323	0.1395					
258	0.3890	0.2940	0.7334	0.7531	0.5831	0.0801	0.3163
	0.1951	0.0705					
259	0.1882	0.4797	0.1453	0.2885	0.0734	0.1048	0.2431
	0.7155	0.0562					
260	0.1963	0.3336	0.2609	0.3892	0.4010	0.4607	0.4063
	0.3029	0.0908					
261	0.3183	0.2403	0.6815	0.4275	0.4423	0.1633	0.2297
	0.8085	0.0987					
262	0.1042	0.4776	0.3510	0.3647	0.5060	0.1945	0.3456
	0.5431	0.0626					
263	0.1830	0.3685	0.7360	0.5761	0.4266	0.3348	0.4791
	0.9989	0.0181					
264	0.1578	0.1301	0.7839	0.4943	0.4951	0.1269	0.1422
	0.6748	0.1086					
265	0.3498	0.4839	0.7263	0.1248	0.6487	0.0712	0.5030
	0.1007	0.0789					
266	0.2763	0.3082	0.4111	0.0760	0.5955	0.3959	0.0974
	0.4117	0.0387					
267	0.1720	0.2782	0.7355	0.4041	0.5113	0.0575	0.1768
	1.3354	0.0640					
268	0.2027	0.1388	0.4814	0.7958	0.5671	0.1125	0.4825
	0.6414	0.1156					
269	0.4367	0.5262	0.4169	0.0955	0.6569	0.3419	0.0588
	1.1683	0.0849					
270	0.3144	0.1978	0.1992	0.1383	0.7630	0.4448	0.4763
	0.9944	0.1313					

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

164

271	0.4439	0.4756	0.3826	0.4036	0.2240	0.5840	0.4604
	0.3261	0.1178					
272	0.1818	0.1109	0.7078	0.1762	0.2865	0.0653	0.2130
	1.2706	0.0038					
273	0.3585	0.2640	0.6506	0.4185	0.9525	0.2725	0.5314
	1.2407	0.0124					
274	0.3285	0.2611	0.3333	0.6931	0.3571	0.2736	0.1246
	0.0709	0.1216					
275	0.1774	0.5009	0.0829	0.3526	0.1896	0.3095	0.2843
	0.7770	0.0453					
276	0.3540	0.2933	0.6783	0.7630	0.4698	0.3194	0.4197
	0.0836	0.0464					
277	0.3107	0.2346	0.1480	0.1080	0.7953	0.2945	0.2652
	1.3921	0.0692					
278	0.2548	0.2247	0.7885	0.5470	0.2976	0.3272	0.1954
	1.3168	0.1094					
279	0.4074	0.4867	0.0940	0.7188	0.2201	0.2467	0.4786
	0.4611	0.1335					
280	0.3979	0.2698	0.3478	0.2519	0.1918	0.0854	0.1449
	0.4899	0.1378					
281	0.2629	0.4410	0.2844	0.4616	0.4993	0.2730	0.2708
	0.5298	0.1323					
282	0.1401	0.2456	0.5248	0.0783	0.4880	0.3388	0.4549
	0.7460	0.0350					
283	0.4053	0.1133	0.5091	0.1085	0.5700	0.2550	0.1892
	0.5340	0.0534					
284	0.1853	0.3423	0.2774	1.1065	0.9032	0.5945	0.0997
	0.3537	0.1300					
285	0.1842	0.3999	0.5669	0.4350	0.3888	0.4346	0.4769
	1.2065	0.0991					
286	0.1949	0.4482	0.6608	0.5119	0.6155	0.3495	0.4916
	0.7546	0.1208					
287	0.3549	0.3635	0.3593	0.7556	0.2281	0.3956	0.3009
	0.4904	0.1028					
288	0.1948	0.3217	0.4258	0.6988	0.3286	0.0885	0.1580
	1.0165	0.0281					
289	0.2524	0.2440	0.7121	0.3654	0.2047	0.4640	0.0958
	1.0342	0.0388					
290	0.2376	0.2002	0.2154	0.5842	0.5241	0.1873	0.4101
	0.3031	0.0927					
291	0.3241	0.3009	0.1303	0.3423	0.2189	0.4772	0.0003
	1.1076	0.1618					
292	0.3573	0.5244	0.0637	0.5034	0.5062	0.4695	0.1836
	0.2294	0.1171					
293	0.3801	0.2834	0.4815	0.9032	0.6344	0.2640	0.5109
	0.9170	0.0024					
294	0.1625	0.3371	0.2911	0.5671	0.2612	0.0915	0.0107
	1.0071	0.1641					
295	0.2823	0.2657	0.4902	0.0755	0.4820	0.3388	0.3622
	0.2725	0.0925					
296	0.1489	0.4386	0.3768	0.9101	0.4549	0.1278	0.0510
	0.5834	0.0537					
297	0.2079	0.1699	0.7738	0.6065	0.4873	0.4531	0.1056
	1.0414	0.1063					
298	0.4314	0.1132	0.6279	0.1966	0.7095	0.2229	0.5078
	1.0028	0.0774					
299	0.1089	0.4187	0.1008	0.3068	0.4339	0.3467	0.2028
	0.1923	0.0331					
300	0.0983	0.1028	0.6018	0.1952	0.2983	0.2495	0.3397
	0.4852	0.1085					
301	0.4021	0.5230	0.2388	0.4340	0.2014	0.3693	0.1385
	0.6011	0.0690					
302	0.1472	0.4284	0.3086	0.2917	0.7945	0.1085	0.2565
	0.8422	0.0268					
303	0.2489	0.1693	0.7604	0.2699	0.3897	0.5159	0.3849
	1.6836	0.1573					
304	0.4212	0.4283	0.2224	0.4462	0.1870	0.1073	0.1520
	0.8139	0.0298					
305	0.3227	0.1093	0.2236	0.5826	0.4050	0.1281	0.1692
	0.7191	0.0970					
306	0.2488	0.4223	0.4686	0.9362	0.5724	0.1557	0.2993
	0.3765	0.1138					

307	0.3455	0.3853	0.4581	0.8512	0.1757	0.2099	0.4573
	0.6372	0.1307					
308	0.3677	0.3062	0.5510	0.4910	0.4015	0.0639	0.1415
	0.7009	0.1258					
309	0.3276	0.1725	0.6834	0.8555	0.2670	0.2660	0.2702
	0.9031	0.0233					
310	0.2633	0.4627	0.5307	0.8043	0.1013	0.1831	0.3066
	0.4071	0.0849					
311	0.3911	0.2337	0.1020	0.6645	0.2440	0.2597	0.3302
	0.3238	0.0134					
312	0.3067	0.2719	0.7115	0.9049	0.1458	0.0530	0.2089
	0.7856	0.1284					
313							
314	Columns 10 through 18						
315							
316	0.0013	0.0241	0.0059	0.0483	0.0136	0.0130	0.0122
	0.0133	0.0400					
317	0.0116	0.0314	0.0043	0.0700	0.0119	0.0094	0.0797
	0.0183	0.0287					
318	0.0110	0.0197	0.0156	0.1012	0.0060	0.0179	0.0805
	0.0120	0.0183					
319	0.0111	0.0316	0.0088	0.0322	0.0129	0.0136	0.0223
	0.0645	0.0182					
320	0.0006	0.0263	0.0184	0.0819	0.0049	0.0139	0.0618
	0.0748	0.0401					
321	0.0014	0.0474	0.0249	0.1224	0.0043	0.0037	0.0470
	0.0694	0.0279					
322	0.0035	0.0357	0.0104	0.0164	0.0159	0.0091	0.0663
	0.0500	0.0224					
323	0.0054	0.0359	0.0084	0.0111	0.0140	0.0186	0.0790
	0.0739	0.0286					
324	0.0105	0.0436	0.0201	0.0049	0.0061	0.0067	0.0225
	0.0328	0.0251					
325	0.0001	0.0210	0.0111	0.0585	0.0208	0.0113	0.0026
	0.0695	0.0321					
326	0.0007	0.0103	0.0139	0.0940	0.0202	0.0126	0.0096
	0.0493	0.0354					
327	0.0022	0.0201	0.0223	0.0734	0.0201	0.0207	0.0721
	0.0629	0.0337					
328	0.0106	0.0092	0.0090	0.1142	0.0151	0.0276	0.0364
	0.0595	0.0466					
329	0.0110	0.0493	0.0086	0.0743	0.0078	0.0098	0.0957
	0.0251	0.0365					
330	0.0098	0.0439	0.0148	0.0933	0.0100	0.0130	0.0556
	0.0782	0.0129					
331	0.0050	0.0049	0.0199	0.0161	0.0198	0.0241	0.0186
	0.0380	0.0408					
332	0.0032	0.0400	0.0126	0.0445	0.0144	0.0165	0.0517
	0.0235	0.0097					
333	0.0060	0.0213	0.0004	0.1118	0.0029	0.0153	0.0429
	0.0524	0.0403					
334	0.0040	0.0133	0.0075	0.0999	0.0133	0.0142	0.0288
	0.0527	0.0392					
335	0.0062	0.0262	0.0035	0.0056	0.0203	0.0140	0.0696
	0.0884	0.0196					
336	0.0083	0.0284	0.0212	0.0118	0.0090	0.0027	0.0802
	0.0708	0.0221					
337	0.0063	0.0387	0.0036	0.0830	0.0213	0.0035	0.0623
	0.0675	0.0227					
338	0.0019	0.0060	0.0217	0.0173	0.0213	0.0114	0.0222
	0.0460	0.0379					
339	0.0046	0.0419	0.0065	0.0968	0.0062	0.0099	0.0712
	0.0483	0.0101					
340	0.0058	0.0241	0.0132	0.0208	0.0122	0.0098	0.0826
	0.0442	0.0216					
341	0.0103	0.0377	0.0246	0.1286	0.0078	0.0145	0.0735
	0.0764	0.0322					
342	0.0036	0.0114	0.0019	0.0099	0.0186	0.0115	0.0513
	0.0096	0.0155					
343	0.0114	0.0300	0.0152	0.0047	0.0021	0.0241	0.0415
	0.0379	0.0169					
344	0.0023	0.0269	0.0190	0.0432	0.0065	0.0221	0.0482
	0.0625	0.0241					

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

166

345	0.0033	0.0332	0.0138	0.0231	0.0175	0.0081	0.0436
	0.0528	0.0050					
346	0.0006	0.0082	0.0203	0.0933	0.0158	0.0109	0.0721
	0.0358	0.0411					
347	0.0084	0.0350	0.0076	0.0813	0.0062	0.0183	0.0562
	0.0318	0.0100					
348	0.0076	0.0305	0.0059	0.1149	0.0159	0.0113	0.0146
	0.0151	0.0113					
349	0.0075	0.0221	0.0069	0.0039	0.0171	0.0091	0.0361
	0.0070	0.0245					
350	0.0062	0.0390	0.0181	0.0551	0.0209	0.0239	0.0247
	0.0821	0.0406					
351	0.0108	0.0062	0.0060	0.0449	0.0068	0.0217	0.0716
	0.0769	0.0232					
352	0.0013	0.0371	0.0022	0.0544	0.0204	0.0097	0.0184
	0.0587	0.0188					
353	0.0119	0.0081	0.0142	0.0167	0.0028	0.0078	0.0712
	0.0434	0.0095					
354	0.0109	0.0109	0.0088	0.0589	0.0062	0.0134	0.0269
	0.0407	0.0226					
355	0.0046	0.0082	0.0167	0.0530	0.0172	0.0046	0.0215
	0.0128	0.0324					
356	0.0076	0.0495	0.0221	0.0101	0.0096	0.0264	0.0751
	0.0509	0.0450					
357	0.0050	0.0387	0.0128	0.0340	0.0104	0.0151	0.0765
	0.0203	0.0189					
358	0.0011	0.0195	0.0195	0.0085	0.0188	0.0053	0.0254
	0.0801	0.0038					
359	0.0024	0.0230	0.0052	0.0143	0.0174	0.0086	0.0655
	0.0299	0.0348					
360	0.0032	0.0162	0.0113	0.0352	0.0067	0.0027	0.0675
	0.0168	0.0220					
361	0.0067	0.0129	0.0047	0.1019	0.0039	0.0155	0.0573
	0.0366	0.0290					
362	0.0088	0.0194	0.0023	0.0483	0.0082	0.0226	0.0658
	0.0294	0.0048					
363	0.0054	0.0362	0.0145	0.0889	0.0022	0.0124	0.0641
	0.0285	0.0177					
364	0.0014	0.0358	0.0014	0.0926	0.0102	0.0033	0.0595
	0.0151	0.0278					
365	0.0088	0.0354	0.0214	0.1087	0.0129	0.0284	0.0466
	0.0829	0.0078					
366	0.0012	0.0294	0.0067	0.0623	0.0073	0.0074	0.0509
	0.0116	0.0195					
367	0.0064	0.0276	0.0144	0.1204	0.0202	0.0055	0.0251
	0.0873	0.0220					
368	0.0012	0.0083	0.0070	0.1018	0.0080	0.0225	0.0586
	0.0849	0.0384					
369	0.0090	0.0353	0.0220	0.0048	0.0116	0.0236	0.0291
	0.0800	0.0134					
370	0.0037	0.0481	0.0191	0.0955	0.0161	0.0277	0.0128
	0.0710	0.0427					
371	0.0026	0.0357	0.0165	0.0112	0.0103	0.0140	0.0468
	0.0446	0.0236					
372	0.0033	0.0154	0.0190	0.0782	0.0088	0.0165	0.0511
	0.0221	0.0204					
373	0.0005	0.0439	0.0041	0.0980	0.0205	0.0053	0.0464
	0.0316	0.0275					
374	0.0041	0.0117	0.0136	0.0083	0.0044	0.0137	0.0270
	0.0084	0.0104					
375	0.0066	0.0375	0.0036	0.1296	0.0133	0.0255	0.0283
	0.0327	0.0457					
376	0.0044	0.0379	0.0216	0.0498	0.0133	0.0108	0.0300
	0.0082	0.0381					
377	0.0089	0.0277	0.0163	0.1277	0.0083	0.0237	0.0954
	0.0765	0.0232					
378	0.0080	0.0445	0.0248	0.0847	0.0195	0.0223	0.0417
	0.0701	0.0225					
379	0.0103	0.0147	0.0022	0.0667	0.0060	0.0161	0.0474
	0.0708	0.0298					
380	0.0115	0.0243	0.0182	0.0730	0.0162	0.0168	0.0233
	0.0218	0.0187					

381	0.0091	0.0438	0.0062	0.0471	0.0181	0.0102	0.0863
	0.0542	0.0038					
382	0.0139	0.0290	0.0195	0.1284	0.0050	0.0042	0.0855
	0.0901	0.0233					
383	0.0025	0.0413	0.0167	0.0668	0.0160	0.0187	0.0509
	0.0537	0.0351					
384	0.0008	0.0270	0.0085	0.0461	0.0082	0.0160	0.0139
	0.0421	0.0147					
385	0.0062	0.0219	0.0130	0.0966	0.0165	0.0095	0.0377
	0.0171	0.0415					
386	0.0118	0.0437	0.0206	0.0113	0.0160	0.0053	0.0260
	0.0337	0.0335					
387	0.0079	0.0096	0.0170	0.0829	0.0100	0.0132	0.0533
	0.0581	0.0272					
388	0.0074	0.0199	0.0156	0.0876	0.0021	0.0169	0.0847
	0.0792	0.0052					
389	0.0119	0.0084	0.0017	0.0278	0.0102	0.0219	0.0789
	0.0589	0.0203					
390	0.0055	0.0048	0.0015	0.0977	0.0182	0.0127	0.0280
	0.0674	0.0406					
391	0.0122	0.0180	0.0105	0.0987	0.0196	0.0189	0.0571
	0.0094	0.0399					
392	0.0025	0.0240	0.0151	0.0476	0.0160	0.0097	0.0807
	0.0563	0.0220					
393	0.0098	0.0415	0.0175	0.0120	0.0027	0.0038	0.0159
	0.0588	0.0253					
394	0.0081	0.0286	0.0093	0.0059	0.0078	0.0222	0.0266
	0.0252	0.0155					
395	0.0017	0.0360	0.0099	0.0114	0.0035	0.0240	0.0587
	0.0780	0.0388					
396	0.0035	0.0078	0.0110	0.0926	0.0101	0.0080	0.0085
	0.0161	0.0266					
397	0.0015	0.0055	0.0204	0.0214	0.0064	0.0066	0.0690
	0.0626	0.0357					
398	0.0042	0.0129	0.0115	0.0375	0.0029	0.0019	0.0386
	0.0112	0.0088					
399	0.0019	0.0096	0.0107	0.0533	0.0060	0.0061	0.0341
	0.0084	0.0156					
400	0.0030	0.0411	0.0069	0.0272	0.0198	0.0089	0.0709
	0.0177	0.0254					
401	0.0030	0.0341	0.0141	0.0029	0.0130	0.0149	0.0277
	0.0123	0.0136					
402	0.0106	0.0256	0.0119	0.0193	0.0143	0.0206	0.0841
	0.0401	0.0332					
403	0.0086	0.0147	0.0160	0.0842	0.0084	0.0025	0.0669
	0.0182	0.0052					
404	0.0066	0.0263	0.0115	0.0021	0.0137	0.0142	0.0118
	0.0060	0.0351					
405	0.0106	0.0218	0.0153	0.0726	0.0068	0.0216	0.0126
	0.0842	0.0335					
406	0.0058	0.0183	0.0059	0.0129	0.0094	0.0055	0.0655
	0.0078	0.0221					
407	0.0050	0.0135	0.0061	0.0748	0.0214	0.0107	0.0218
	0.0743	0.0072					
408	0.0033	0.0064	0.0069	0.0696	0.0106	0.0050	0.0738
	0.0751	0.0136					
409	0.0077	0.0086	0.0172	0.0870	0.0044	0.0075	0.0302
	0.0387	0.0046					
410	0.0035	0.0163	0.0014	0.0116	0.0213	0.0056	0.0091
	0.0582	0.0160					
411	0.0120	0.0257	0.0147	0.0407	0.0192	0.0193	0.0412
	0.0372	0.0397					
412	0.0063	0.0438	0.0151	0.0176	0.0035	0.0038	0.0797
	0.0528	0.0405					
413	0.0092	0.0213	0.0084	0.0740	0.0216	0.0140	0.0328
	0.0484	0.0155					
414	0.0017	0.0249	0.0134	0.0639	0.0193	0.0044	0.0676
	0.0366	0.0086					
415	0.0034	0.0140	0.0025	0.0034	0.0214	0.0036	0.0517
	0.0725	0.0267					
416	0.0083	0.0175	0.0120	0.0127	0.0054	0.0015	0.0707
	0.0093	0.0237					

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

168

417	0.0118	0.0331	0.0163	0.0536	0.0058	0.0043	0.0540
	0.0166	0.0159					
418	0.0016	0.0290	0.0038	0.0187	0.0122	0.0033	0.0251
	0.0624	0.0108					
419	0.0014	0.0359	0.0095	0.0546	0.0021	0.0127	0.0561
	0.0678	0.0357					
420	0.0105	0.0232	0.0105	0.0693	0.0153	0.0160	0.0242
	0.0109	0.0056					
421	0.0075	0.0145	0.0117	0.0170	0.0166	0.0087	0.0258
	0.0780	0.0183					
422	0.0074	0.0342	0.0181	0.0918	0.0110	0.0090	0.0258
	0.0500	0.0271					
423	0.0020	0.0278	0.0075	0.0045	0.0177	0.0036	0.0741
	0.0618	0.0070					
424	0.0002	0.0196	0.0152	0.1151	0.0081	0.0044	0.0358
	0.0043	0.0414					
425	0.0053	0.0435	0.0134	0.0415	0.0055	0.0079	0.0333
	0.0771	0.0413					
426	0.0050	0.0207	0.0090	0.1307	0.0226	0.0118	0.0118
	0.0899	0.0235					
427	0.0035	0.0064	0.0020	0.0261	0.0104	0.0140	0.0393
	0.0623	0.0329					
428	0.0057	0.0373	0.0060	0.0081	0.0077	0.0237	0.0309
	0.0145	0.0168					
429	0.0090	0.0366	0.0177	0.0204	0.0050	0.0055	0.0759
	0.0687	0.0379					
430	0.0037	0.0208	0.0157	0.1035	0.0185	0.0228	0.0754
	0.0785	0.0409					
431	0.0074	0.0372	0.0153	0.0560	0.0121	0.0200	0.0180
	0.0408	0.0202					
432	0.0043	0.0337	0.0141	0.0741	0.0148	0.0037	0.0496
	0.0621	0.0412					
433	0.0103	0.0414	0.0143	0.0063	0.0192	0.0206	0.0812
	0.0188	0.0140					
434	0.0032	0.0381	0.0036	0.0966	0.0142	0.0090	0.0599
	0.0479	0.0300					
435	0.0091	0.0177	0.0175	0.0674	0.0118	0.0121	0.0675
	0.0464	0.0383					
436	0.0052	0.0164	0.0098	0.0542	0.0047	0.0188	0.0567
	0.0824	0.0210					
437	0.0114	0.0461	0.0202	0.0868	0.0067	0.0151	0.0855
	0.0037	0.0103					
438	0.0105	0.0107	0.0041	0.0792	0.0194	0.0213	0.0209
	0.0606	0.0102					
439	0.0062	0.0342	0.0014	0.0510	0.0086	0.0129	0.0108
	0.0537	0.0359					
440	0.0051	0.0362	0.0185	0.0840	0.0070	0.0241	0.0561
	0.0234	0.0045					
441	0.0023	0.0180	0.0019	0.0550	0.0120	0.0182	0.0593
	0.0541	0.0047					
442	0.0108	0.0079	0.0129	0.0391	0.0113	0.0057	0.0612
	0.0082	0.0336					
443	0.0043	0.0413	0.0032	0.0891	0.0062	0.0134	0.0438
	0.0646	0.0249					
444	0.0023	0.0444	0.0177	0.1300	0.0156	0.0075	0.0726
	0.0752	0.0193					
445	0.0010	0.0227	0.0190	0.0674	0.0073	0.0177	0.0252
	0.0188	0.0124					
446	0.0019	0.0292	0.0204	0.0141	0.0184	0.0195	0.0484
	0.0663	0.0062					
447	0.0041	0.0112	0.0206	0.1291	0.0161	0.0158	0.0578
	0.0184	0.0405					
448	0.0121	0.0423	0.0152	0.0175	0.0037	0.0095	0.0102
	0.0328	0.0185					
449	0.0082	0.0411	0.0080	0.0123	0.0120	0.0130	0.0457
	0.0086	0.0039					
450	0.0110	0.0425	0.0134	0.0317	0.0030	0.0077	0.0657
	0.0552	0.0055					
451	0.0100	0.0224	0.0198	0.0859	0.0118	0.0080	0.0276
	0.0299	0.0080					
452	0.0053	0.0216	0.0192	0.0621	0.0158	0.0124	0.0267
	0.0603	0.0037					

453	0.0029	0.0068	0.0219	0.0434	0.0139	0.0164	0.0622
	0.0359	0.0382					
454	0.0111	0.0124	0.0124	0.0251	0.0194	0.0210	0.0253
	0.0397	0.0300					
455	0.0043	0.0097	0.0214	0.0663	0.0144	0.0144	0.0356
	0.0069	0.0324					
456	0.0032	0.0431	0.0039	0.0888	0.0035	0.0146	0.0333
	0.0162	0.0277					
457	0.0079	0.0150	0.0193	0.0077	0.0209	0.0087	0.0677
	0.0078	0.0200					
458	0.0098	0.0360	0.0119	0.0311	0.0021	0.0173	0.0301
	0.0106	0.0089					
459	0.0068	0.0169	0.0051	0.0570	0.0213	0.0156	0.0565
	0.0167	0.0127					
460	0.0021	0.0143	0.0161	0.0229	0.0055	0.0051	0.0610
	0.0437	0.0045					
461	0.0113	0.0151	0.0076	0.0332	0.0143	0.0114	0.0180
	0.0729	0.0373					
462	0.0028	0.0146	0.0104	0.0894	0.0127	0.0033	0.0266
	0.0077	0.0319					
463	0.0028	0.0300	0.0096	0.0391	0.0215	0.0064	0.0705
	0.0597	0.0263					
464	0.0108	0.0280	0.0050	0.0107	0.0037	0.0222	0.0562
	0.0608	0.0224					
465	0.0025	0.0303	0.0028	0.0266	0.0031	0.0079	0.0721
	0.0350	0.0082					
466							
467	Columns 19 through 27						
468							
469	0.0328	0.0298	0.0347	0.0187	0.0305	0.0426	0.0137
	0.0395	0.1063					
470	0.0200	0.0401	0.0796	0.0364	0.0156	0.0572	0.0333
	0.0051	0.0820					
471	0.0230	0.0122	0.0585	0.0066	0.0339	0.0216	0.0350
	0.0213	0.0153					
472	0.0344	0.0054	0.0182	0.0222	0.0087	0.0128	0.0264
	0.0057	0.0596					
473	0.0247	0.0419	0.0632	0.0032	0.0202	0.0314	0.0082
	0.0093	0.0133					
474	0.0129	0.0276	0.0590	0.0062	0.0136	0.0333	0.0398
	0.0112	0.1236					
475	0.0213	0.0330	0.0560	0.0082	0.0316	0.0397	0.0237
	0.0122	0.0266					
476	0.0039	0.0176	0.0511	0.0048	0.0172	0.0473	0.0064
	0.0360	0.0493					
477	0.0076	0.0081	0.0434	0.0327	0.0445	0.0346	0.0352
	0.0291	0.0517					
478	0.0266	0.0464	0.0100	0.0538	0.0416	0.0535	0.0423
	0.0550	0.1386					
479	0.0062	0.0304	0.0701	0.0188	0.0108	0.0429	0.0290
	0.0287	0.1157					
480	0.0139	0.0298	0.0780	0.0368	0.0074	0.0155	0.0521
	0.0339	0.1259					
481	0.0316	0.0408	0.0712	0.0347	0.0019	0.0895	0.0053
	0.0535	0.0574					
482	0.0163	0.0425	0.0353	0.0327	0.0069	0.0137	0.0011
	0.0329	0.1407					
483	0.0115	0.0362	0.0493	0.0233	0.0313	0.0108	0.0163
	0.0421	0.0104					
484	0.0069	0.0276	0.0256	0.0355	0.0257	0.0543	0.0237
	0.0035	0.0058					
485	0.0150	0.0368	0.0101	0.0423	0.0081	0.0242	0.0040
	0.0139	0.0120					
486	0.0423	0.0229	0.0948	0.0157	0.0273	0.0387	0.0492
	0.0582	0.0640					
487	0.0300	0.0065	0.0181	0.0285	0.0069	0.0239	0.0384
	0.0524	0.1113					
488	0.0278	0.0176	0.0894	0.0319	0.0467	0.0370	0.0264
	0.0667	0.1176					
489	0.0115	0.0235	0.0514	0.0231	0.0257	0.0606	0.0155
	0.0156	0.0270					
490	0.0098	0.0077	0.0165	0.0379	0.0382	0.0291	0.0339
	0.0303	0.0048					

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

170

491	0.0238	0.0293	0.0837	0.0090	0.0156	0.0378	0.0225
	0.0347	0.0620					
492	0.0162	0.0245	0.0578	0.0310	0.0427	0.0494	0.0374
	0.0558	0.0204					
493	0.0098	0.0361	0.0733	0.0163	0.0285	0.0100	0.0153
	0.0552	0.0222					
494	0.0359	0.0252	0.0405	0.0254	0.0417	0.0744	0.0383
	0.0271	0.0847					
495	0.0103	0.0144	0.0278	0.0085	0.0071	0.0189	0.0238
	0.0414	0.1035					
496	0.0044	0.0086	0.0799	0.0316	0.0134	0.0636	0.0428
	0.0190	0.0517					
497	0.0193	0.0159	0.0795	0.0229	0.0064	0.0405	0.0397
	0.0207	0.0107					
498	0.0032	0.0166	0.0272	0.0107	0.0140	0.0480	0.0065
	0.0116	0.0207					
499	0.0179	0.0106	0.0360	0.0285	0.0245	0.0390	0.0103
	0.0045	0.0495					
500	0.0235	0.0400	0.0379	0.0063	0.0440	0.0320	0.0290
	0.0165	0.0609					
501	0.0316	0.0444	0.0294	0.0501	0.0527	0.0281	0.0350
	0.0533	0.0875					
502	0.0154	0.0125	0.0597	0.0146	0.0205	0.0461	0.0293
	0.0182	0.0337					
503	0.0101	0.0315	0.0283	0.0219	0.0116	0.0208	0.0210
	0.0065	0.0523					
504	0.0180	0.0356	0.0401	0.0340	0.0201	0.0430	0.0074
	0.0105	0.0934					
505	0.0182	0.0143	0.0699	0.0396	0.0078	0.0072	0.0038
	0.0269	0.0298					
506	0.0196	0.0128	0.0693	0.0316	0.0082	0.0311	0.0175
	0.0573	0.0652					
507	0.0189	0.0368	0.0512	0.0117	0.0057	0.0217	0.0082
	0.0168	0.0663					
508	0.0153	0.0316	0.0136	0.0192	0.0140	0.0444	0.0353
	0.0184	0.0993					
509	0.0111	0.0286	0.0932	0.0537	0.0043	0.0459	0.0015
	0.0695	0.1022					
510	0.0186	0.0375	0.0635	0.0267	0.0352	0.0637	0.0314
	0.0073	0.0542					
511	0.0122	0.0096	0.0545	0.0096	0.0103	0.0313	0.0122
	0.0481	0.0906					
512	0.0035	0.0307	0.0588	0.0172	0.0108	0.0205	0.0146
	0.0185	0.0838					
513	0.0320	0.0314	0.0715	0.0398	0.0131	0.0069	0.0334
	0.0209	0.0332					
514	0.0196	0.0101	0.0709	0.0178	0.0253	0.0471	0.0383
	0.0275	0.0606					
515	0.0104	0.0346	0.0552	0.0406	0.0351	0.0074	0.0277
	0.0337	0.0990					
516	0.0248	0.0328	0.0787	0.0269	0.0327	0.0140	0.0393
	0.0214	0.0300					
517	0.0092	0.0242	0.0611	0.0172	0.0444	0.0471	0.0354
	0.0133	0.0907					
518	0.0341	0.0039	0.0987	0.0134	0.0508	0.0548	0.0259
	0.0145	0.0006					
519	0.0059	0.0148	0.0203	0.0309	0.0433	0.0152	0.0267
	0.0079	0.0900					
520	0.0075	0.0495	0.0034	0.0271	0.0197	0.0700	0.0120
	0.0444	0.1026					
521	0.0255	0.0258	0.0730	0.0244	0.0376	0.0149	0.0469
	0.0691	0.0888					
522	0.0185	0.0186	0.0629	0.0235	0.0058	0.0668	0.0342
	0.0326	0.0765					
523	0.0395	0.0462	0.0484	0.0409	0.0296	0.0193	0.0083
	0.0686	0.0202					
524	0.0356	0.0085	0.0181	0.0340	0.0210	0.0330	0.0266
	0.0033	0.0217					
525	0.0318	0.0403	0.0153	0.0425	0.0275	0.0588	0.0393
	0.0361	0.0208					
526	0.0214	0.0414	0.0225	0.0084	0.0267	0.0248	0.0063
	0.0027	0.0242					

527	0.0067	0.0069	0.0560	0.0418	0.0354	0.0669	0.0426
	0.0442	0.1013					
528	0.0225	0.0149	0.0688	0.0279	0.0430	0.0758	0.0419
	0.0412	0.1107					
529	0.0095	0.0215	0.0073	0.0299	0.0389	0.0589	0.0214
	0.0162	0.1078					
530	0.0424	0.0433	0.0627	0.0102	0.0454	0.0040	0.0348
	0.0225	0.0112					
531	0.0331	0.0097	0.0858	0.0217	0.0316	0.0349	0.0459
	0.0697	0.0832					
532	0.0087	0.0368	0.0559	0.0342	0.0113	0.0126	0.0107
	0.0089	0.0744					
533	0.0056	0.0129	0.0114	0.0218	0.0362	0.0129	0.0355
	0.0290	0.0999					
534	0.0242	0.0360	0.0533	0.0286	0.0163	0.0392	0.0404
	0.0228	0.0904					
535	0.0168	0.0206	0.0753	0.0116	0.0011	0.0500	0.0288
	0.0229	0.0164					
536	0.0190	0.0080	0.0833	0.0278	0.0056	0.0623	0.0110
	0.0524	0.0985					
537	0.0187	0.0324	0.0571	0.0254	0.0285	0.0442	0.0261
	0.0149	0.0425					
538	0.0220	0.0188	0.0437	0.0020	0.0441	0.0692	0.0365
	0.0262	0.0167					
539	0.0200	0.0071	0.0125	0.0124	0.0348	0.0698	0.0429
	0.0122	0.0127					
540	0.0158	0.0362	0.0210	0.0428	0.0382	0.0775	0.0281
	0.0172	0.0673					
541	0.0297	0.0276	0.0421	0.0268	0.0349	0.0341	0.0389
	0.0221	0.0095					
542	0.0190	0.0174	0.0522	0.0023	0.0298	0.0119	0.0152
	0.0571	0.0614					
543	0.0224	0.0148	0.0471	0.0084	0.0220	0.0650	0.0063
	0.0403	0.1020					
544	0.0308	0.0325	0.0107	0.0206	0.0217	0.0775	0.0272
	0.0331	0.0512					
545	0.0264	0.0337	0.0486	0.0355	0.0401	0.0171	0.0187
	0.0399	0.0704					
546	0.0345	0.0284	0.0566	0.0032	0.0425	0.0776	0.0057
	0.0285	0.0389					
547	0.0084	0.0396	0.0568	0.0265	0.0053	0.0334	0.0127
	0.0352	0.0209					
548	0.0336	0.0257	0.0533	0.0177	0.0214	0.0632	0.0259
	0.0025	0.0712					
549	0.0190	0.0169	0.0457	0.0185	0.0071	0.0704	0.0172
	0.0229	0.1125					
550	0.0342	0.0154	0.0666	0.0184	0.0316	0.0316	0.0172
	0.0494	0.0741					
551	0.0035	0.0400	0.0797	0.0269	0.0197	0.0083	0.0217
	0.0065	0.0340					
552	0.0374	0.0282	0.0407	0.0386	0.0273	0.0704	0.0089
	0.0139	0.0141					
553	0.0265	0.0081	0.0300	0.0276	0.0246	0.0128	0.0289
	0.0509	0.0157					
554	0.0207	0.0403	0.0536	0.0175	0.0401	0.0389	0.0329
	0.0098	0.0936					
555	0.0282	0.0271	0.0480	0.0072	0.0322	0.0678	0.0405
	0.0042	0.0394					
556	0.0154	0.0105	0.0615	0.0291	0.0121	0.0780	0.0194
	0.0443	0.0692					
557	0.0321	0.0425	0.0328	0.0238	0.0453	0.0057	0.0394
	0.0264	0.0578					
558	0.0091	0.0362	0.0298	0.0302	0.0179	0.0092	0.0245
	0.0368	0.0378					
559	0.0238	0.0246	0.0085	0.0131	0.0123	0.0699	0.0060
	0.0463	0.1055					
560	0.0088	0.0415	0.0240	0.0202	0.0192	0.0197	0.0426
	0.0266	0.1157					
561	0.0125	0.0214	0.0216	0.0105	0.0236	0.0291	0.0210
	0.0249	0.0894					
562	0.0370	0.0110	0.0373	0.0087	0.0272	0.0275	0.0214
	0.0430	0.0930					

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

172

563	0.0218	0.0117	0.0548	0.0375	0.0205	0.0363	0.0097
	0.0499	0.0229					
564	0.0033	0.0349	0.0302	0.0349	0.0338	0.0284	0.0262
	0.0190	0.0960					
565	0.0206	0.0329	0.0281	0.0257	0.0049	0.0213	0.0186
	0.0222	0.0290					
566	0.0296	0.0397	0.0742	0.0403	0.0463	0.0355	0.0068
	0.0362	0.0640					
567	0.0165	0.0421	0.0149	0.0188	0.0231	0.0171	0.0402
	0.0312	0.0257					
568	0.0243	0.0393	0.0352	0.0065	0.0163	0.0257	0.0333
	0.0451	0.0254					
569	0.0178	0.0085	0.0244	0.0029	0.0166	0.0308	0.0415
	0.0472	0.0652					
570	0.0046	0.0063	0.0539	0.0122	0.0396	0.0221	0.0298
	0.0321	0.0401					
571	0.0251	0.0398	0.0775	0.0104	0.0428	0.0742	0.0347
	0.0251	0.0678					
572	0.0279	0.0213	0.0683	0.0164	0.0429	0.0558	0.0098
	0.0283	0.0158					
573	0.0064	0.0389	0.0431	0.0168	0.0128	0.0512	0.0097
	0.0233	0.1150					
574	0.0288	0.0197	0.0387	0.0344	0.0309	0.0342	0.0112
	0.0295	0.0972					
575	0.0213	0.0175	0.0547	0.0242	0.0298	0.0505	0.0178
	0.0080	0.0644					
576	0.0278	0.0324	0.0499	0.0331	0.0156	0.0688	0.0202
	0.0280	0.0257					
577	0.0342	0.0091	0.0911	0.0459	0.0522	0.0847	0.0376
	0.0694	0.0279					
578	0.0325	0.0227	0.0272	0.0131	0.0271	0.0548	0.0100
	0.0022	0.0655					
579	0.0175	0.0159	0.0843	0.0467	0.0080	0.0577	0.0357
	0.0703	0.1374					
580	0.0325	0.0105	0.0337	0.0144	0.0134	0.0110	0.0402
	0.0057	0.0544					
581	0.0098	0.0413	0.0772	0.0401	0.0244	0.0411	0.0289
	0.0492	0.0408					
582	0.0069	0.0401	0.0333	0.0290	0.0434	0.0536	0.0437
	0.0333	0.0254					
583	0.0041	0.0202	0.0394	0.0228	0.0217	0.0234	0.0137
	0.0303	0.0301					
584	0.0322	0.0364	0.0087	0.0128	0.0064	0.0347	0.0081
	0.0405	0.0124					
585	0.0131	0.0163	0.0762	0.0132	0.0425	0.0448	0.0119
	0.0229	0.0328					
586	0.0172	0.0363	0.0156	0.0232	0.0086	0.0578	0.0145
	0.0081	0.0110					
587	0.0118	0.0071	0.0189	0.0145	0.0077	0.0307	0.0137
	0.0343	0.0897					
588	0.0096	0.0426	0.0487	0.0123	0.0121	0.0190	0.0041
	0.0479	0.0408					
589	0.0185	0.0112	0.0761	0.0258	0.0203	0.0358	0.0219
	0.0193	0.1119					
590	0.0414	0.0444	0.0062	0.0005	0.0276	0.0557	0.0146
	0.0293	0.1002					
591	0.0036	0.0368	0.0401	0.0260	0.0264	0.0696	0.0130
	0.0450	0.0736					
592	0.0139	0.0169	0.0690	0.0280	0.0252	0.0061	0.0270
	0.0293	0.0676					
593	0.0181	0.0051	0.0336	0.0222	0.0262	0.0660	0.0338
	0.0177	0.0337					
594	0.0052	0.0419	0.0817	0.0274	0.0329	0.0586	0.0204
	0.0072	0.0292					
595	0.0242	0.0247	0.0385	0.0186	0.0191	0.0207	0.0376
	0.0139	0.0124					
596	0.0336	0.0165	0.0625	0.0314	0.0049	0.0228	0.0200
	0.0251	0.1028					
597	0.0409	0.0132	0.0886	0.0049	0.0458	0.0163	0.0049
	0.0487	0.1416					
598	0.0230	0.0355	0.0114	0.0207	0.0209	0.0400	0.0162
	0.0384	0.0847					

599	0.0326	0.0080	0.0332	0.0410	0.0055	0.0566	0.0055
	0.0048	0.0225					
600	0.0254	0.0046	0.0740	0.0095	0.0203	0.0530	0.0351
	0.0039	0.1019					
601	0.0184	0.0052	0.0744	0.0327	0.0186	0.0201	0.0347
	0.0165	0.0119					
602	0.0270	0.0216	0.0133	0.0400	0.0317	0.0766	0.0340
	0.0459	0.0105					
603	0.0224	0.0055	0.0601	0.0139	0.0384	0.0537	0.0106
	0.0316	0.0261					
604	0.0122	0.0407	0.0101	0.0037	0.0063	0.0329	0.0188
	0.0019	0.1063					
605	0.0107	0.0396	0.0224	0.0049	0.0109	0.0093	0.0067
	0.0229	0.0412					
606	0.0092	0.0245	0.0308	0.0045	0.0101	0.0093	0.0384
	0.0284	0.1152					
607	0.0039	0.0425	0.0491	0.0202	0.0454	0.0382	0.0337
	0.0415	0.0577					
608	0.0137	0.0085	0.0722	0.0162	0.0082	0.0617	0.0387
	0.0321	0.0475					
609	0.0142	0.0050	0.0344	0.0392	0.0430	0.0332	0.0295
	0.0606	0.1166					
610	0.0091	0.0229	0.0745	0.0092	0.0411	0.0170	0.0401
	0.0111	0.0168					
611	0.0314	0.0422	0.0378	0.0263	0.0126	0.0148	0.0364
	0.0282	0.0418					
612	0.0250	0.0359	0.0262	0.0068	0.0397	0.0062	0.0325
	0.0488	0.0374					
613	0.0325	0.0246	0.0810	0.0422	0.0084	0.0232	0.0264
	0.0024	0.0331					
614	0.0044	0.0264	0.0479	0.0362	0.0236	0.0086	0.0220
	0.0351	0.0465					
615	0.0054	0.0160	0.0551	0.0427	0.0377	0.0456	0.0420
	0.0220	0.0570					
616	0.0150	0.0388	0.0263	0.0175	0.0416	0.0620	0.0127
	0.0368	0.0735					
617	0.0117	0.0422	0.0256	0.0205	0.0051	0.0273	0.0071
	0.0100	0.0778					
618	0.0320	0.0190	0.0458	0.0145	0.0309	0.0105	0.0113
	0.0404	0.0151					
619							
620	Column 28						
621							
622	0.0828						
623	0.0328						
624	0.0470						
625	0.0700						
626	0.0703						
627	0.0551						
628	0.0772						
629	0.0549						
630	0.0949						
631	0.0412						
632	0.0119						
633	0.0253						
634	0.0382						
635	0.0875						
636	0.0348						
637	0.0991						
638	0.0632						
639	0.1072						
640	0.0608						
641	0.0865						
642	0.0262						
643	0.0479						
644	0.0678						
645	0.0789						
646	0.0915						
647	0.0264						
648	0.0403						
649	0.0428						
650	0.0557						
651	0.0254						

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

174

652	0.0236
653	0.0770
654	0.1036
655	0.0425
656	0.0177
657	0.0206
658	0.0548
659	0.0447
660	0.0848
661	0.0986
662	0.1080
663	0.0285
664	0.0337
665	0.0140
666	0.1017
667	0.0543
668	0.0426
669	0.0615
670	0.0248
671	0.0895
672	0.0372
673	0.0452
674	0.1083
675	0.0683
676	0.0764
677	0.0168
678	0.0499
679	0.0192
680	0.0868
681	0.0822
682	0.0860
683	0.1076
684	0.0611
685	0.0900
686	0.0723
687	0.0251
688	0.0758
689	0.0507
690	0.0969
691	0.0140
692	0.0998
693	0.0144
694	0.0304
695	0.0586
696	0.0212
697	0.0733
698	0.0547
699	0.0161
700	0.0338
701	0.0424
702	0.0458
703	0.1010
704	0.0631
705	0.0469
706	0.0686
707	0.0450
708	0.0244
709	0.1014
710	0.0820
711	0.0429
712	0.0733
713	0.0412
714	0.0425
715	0.0191
716	0.1017
717	0.1029
718	0.0742
719	0.0233
720	0.0412
721	0.0296
722	0.0154
723	0.0219

```

724 0.0331
725 0.0544
726 0.0909
727 0.0116
728 0.0614
729 0.0185
730 0.0940
731 0.0749
732 0.0763
733 0.0199
734 0.0573
735 0.0352
736 0.0147
737 0.0754
738 0.0384
739 0.0789
740 0.0396
741 0.0311
742 0.0541
743 0.1150
744 0.0279
745 0.0398
746 0.0602
747 0.0821
748 0.0222
749 0.0213
750 0.0014
751 0.0204
752 0.0207
753 0.0666
754 0.0962
755 0.1019
756 0.0684
757 0.0257
758 0.0989
759 0.0258
760 0.0526
761 0.0666
762 0.0894
763 0.0575
764 0.0814
765 0.0917
766 0.1011
767 0.1015
768 0.0565
769 0.0573
770 0.0402
771 0.0662
772 #####
773
774
775 955.2808
776
777 Columns 1 through 9
778
779 0.4298 0.5539 0.2503 0.4480 0.2140 0.3762 0.1602
      0.6221 0.0698
780
781 Columns 10 through 18
782
783 0.0114 0.0144 0.0130 0.0263 0.0204 0.0217 0.0291
      0.0427 0.0314
784
785 Columns 19 through 27
786
787 0.0051 0.0446 0.0526 0.0209 0.0476 0.0407 0.0352
      0.0426 0.0596
788
789 Column 28
790
791 0.0573
792

```

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9. ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΔΕΔΟΜΕΝΑ ΕΞΟΔΟΥ ΤΗΣ
ΒΕΛΤΙΣΤΟΠΟΙΗΣΗΣ

176

793							
794							
795	0.1088						
796							
797	Columns 1 through 9						
798							
799	0.4298	0.5539	0.2503	0.4480	0.2140	0.3762	0.1602
	0.6221	0.0698					
800							
801	Columns 10 through 18						
802							
803	0.0114	0.0144	0.0130	0.0263	0.0204	0.0217	0.0291
	0.0427	0.0314					
804							
805	Columns 19 through 27						
806							
807	0.0051	0.0446	0.0526	0.0209	0.0476	0.0407	0.0352
	0.0426	0.0596					
808							
809	Column 28						
810							
811	0.0573						
812							
813							
814							
815							
816	0.7319						
817							
818	Columns 1 through 9						
819							
820	0.3631	0.5086	0.7582	0.2392	0.2442	0.2125	0.4340
	0.2790	0.0356					
821							
822	Columns 10 through 18						
823							
824	0.0115	0.0216	0.0164	0.1049	0.0067	0.0188	0.0854
	0.0141	0.0196					
825							
826	Columns 19 through 27						
827							
828	0.0245	0.0138	0.0623	0.0071	0.0361	0.0237	0.0369
	0.0224	0.0167					
829							
830	Column 28						
831							
832	0.0512						
833							
834							
835	mincost =						
836							
837	955.2808						
838							
839							
840	minemissions =						
841							
842	0.1088						
843							
844							
845	pgminmi =						
846							
847	Columns 1 through 9						
848							
849	0.3631	0.5086	0.7582	0.2392	0.2442	0.2125	0.4340
	0.2790	0.0356					
850							
851	Columns 10 through 18						
852							
853	0.0115	0.0216	0.0164	0.1049	0.0067	0.0188	0.0854
	0.0141	0.0196					
854							
855	Columns 19 through 27						
856							

857	0.0245	0.0138	0.0623	0.0071	0.0361	0.0237	0.0369
858	0.0224	0.0167					
859	Column 28						
860							
861	0.0512						