



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

*Βέλτιστη ενσωμάτωση διεσπαρμένων πόρων στην
τοπική αγορά*

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Μαρκεζίνης

Αθήνα, 2021



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

***Βέλτιστη ενσωμάτωση διεσπαρμένων πόρων στην
τοπική αγορά***

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Ιωάννης Μαρκεζίνης

Επιβλέπων: Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 22^η Φεβρουαρίου 2021.

.....
Νικόλαος Χατζηαργυρίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Πάυλος Γεωργυλάκης
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....
Σταύρος Παπαθανασίου
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2021

.....

Μαρκεζίνης Ιωάννης

Copyright © Μαρκεζίνης Ιωάννης, 2021

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.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Χατζηαργυρίου για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με αυτό ένα τόσο ενδιαφέρον θέμα καθώς και την κυρία Ασημακοπούλου Γεωργία και τον κύριο Μηλιώνη Γιώργο για την αμέριστη βοήθεια τους όποτε την χρειάστηκα.

Ευχαριστώ τους γονείς μου και όλους μου τους φίλους για την ηθική και ψυχολογική υποστήριξη που μου παρήχαν όλο αυτό το χρονικό διάστημα που διήρκεσε η εκπόνηση της παρούσας εργασίας και ήταν πρόθυμοι πάντα να βοηθήσουν και να διορθώσουν καλοπροαίρετα.

Χωρίς όλους αυτούς δεν είχα καταφέρει να κάνω όλη αυτή τη δουλειά.

Στους γονείς μου , Ευάγγελο και Φωτεινή και στον αδερφό μου Αναστάση.

Περίληψη

Οι διεσπαρμένοι πόροι αποτελούν μια νέα τεχνολογία η οποία φαίνεται ότι θα αποτελεί σημαντικό κομμάτι των ενεργειακών κοινοτήτων και τον μικροδικτύων.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετάται μια οντότητα – ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων- ο οποίος λειτουργεί ως μεσάζων μεταξύ των διεσπαρμένων πόρων και της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός του είναι να μεγιστοποιήσει το κέρδος εντάσσοντας κατά βέλτιστο τρόπο τους τοπικούς πόρους που εκπροσωπεί στην διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων να έχει να λύσει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης δύο επιπέδων καθώς αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο και από τους τοπικούς παραγωγούς και πουλάει ενέργεια στα φορτία που εκπροσωπεί. Χρησιμοποιούνται τέσσερις οντότητες : τοπικοί παραγωγοί, καταναλωτές με ευέλικτο φορτίο, καταναλωτές χωρίς ευέλικτο φορτίο, καταναλωτές με δυνατότητα περικοπής και καταναλωτές με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης

Σε ό,τι αφορά το πρόβλημα δύο επιπέδων , στην παρούσα εργασία μετατράπηκε σε πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού ενός επιπέδου μέσω της χρήσης των συνθηκών Karush-Kuhn-Tucker.

Το συγκεκριμένο μοντέλο μεικτού ακέραιου προγραμματισμού προσομοιώθηκε μέσω του εργαλείου GAMS στο οποίο και εξετάστηκαν διάφορα σενάρια ένταξης.

Λέξεις –Κλειδιά

Διεσπαρμένοι πόροι, διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων, πρόβλημα διεπίπεδου μαθηματικού προγραμματισμού , συνθήκες Karush-Kuhn-Tucker, πρόβλημα μεικτού ακέραιου προγραμματισμού

Abstract

Distributed energy resources constitute a cutting edge technology that will likely make up a significant aspect of energy communities and microgrids in the future.

In the present thesis an entity is analyzed – the aggregator of distributed resources – that acts as a mediator between the distributed resources and the electrical energy market.

Its purpose is to maximize profit by optimally incorporating local resources that the aggregator represents in the market clearance procedure. As a result, the distributed resources aggregator has to solve a bilevel programming problem as he buys electrical energy from the grid and local producers and sells energy to the represented loads. Five entities are being used: local producers, flexible load consumers and consumers without flexible load, consumers with the ability to cut-back and consumers with a specific demand profile.

Concerning the bilevel problem, in the present thesis it was converted to a single level -mixed integer programming problem using the Karush-Kuhn-Tucker conditions.

This specific mixed integer programming model was simulated using the GAMS tool in which several integration scenarios were examined.

Keywords

Distributed energy resources, DER Aggregator , bilevel programming problem, Karush-Kuhn-Tucker conditions, mixed integer programming problem

Πρόλογος

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε μέσω του Εργαστηρίου Συστημάτων Ηλεκτρικής Ενέργειας της σχολής Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Ηλεκτρικτρονικών Υπολογιστών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου υπό την επίβλεψη του καθηγητή κ. Νικόλαου Χατζηαργυρίου και αποσκοπή στην μελέτη της βέλτιστης ενσωμάτωσης διεσπαρμένων πόρων στην τοπική αγορά ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο κεφάλαιο 1 γίνεται μια εισαγωγή στην εργασία , στα δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας καθώς και στην διαδικασία ένταξης που ακολουθεί ο ΛΑΓΗΕ.

Στο κεφάλαιο 2 γίνεται μια σύντομη ανασκόπηση στο μαθηματικό υπόβαθρο της εργασίας, τον μαθηματικό προγραμματισμό. Εξετάζονται τα είδη του και γίνεται μια εκτενής αναφορά στον διεπίπεδο προγραμματισμό. Ταυτόχρονα, δίνεται έμφαση στην μετατροπή του σε πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού.

Στο κεφάλαιο 3 αναφέρεται η ουσία αυτής της εργασίας. Αρχικά ορίζονται οι διεσπαρμένοι πόροι , οι κατηγορίες τους και η χρησιμότητα τους. Εν συνεχεία δίνεται η εξήγηση για ποιο λόγο χρειάζεται να υπάρχει μια οντότητα ώστε να προωθεί τα συμφέροντα τους αλλά και ποια είναι η λειτουργία της. Στο τέλος γίνεται μια σύντομη αναφορά στις ενεργειακές κοινότητες και στους νόμους περί αυτών.

Στο κεφάλαιο 4 παρουσιάζεται το περιβάλλον στο οποίο μοντελοποιήθηκε το πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Γίνεται μια εισαγωγή στο που χρησιμοποιείται, ποια ήταν η ιδέα πίσω από την σύλληψη του ενώ αναλύονται τα πλεονεκτήματα του και τα επιμέρους βήματα που χρειάστηκαν στην μοντελοποίηση του προβλήματος αυτής της εργασίας

Στο κεφάλαιο 5 αναλύονται τα προβλήματα άνω και κάτω επιπέδου μαζί με τις εξισώσεις και τους περιορισμούς τους. Αυτή τη φορά γίνεται η μετατροπή συγκεκριμένου προβλήματος διεπίπεδου προγραμματισμού σε κλασσικό πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού μέσω των συνθηκών ΚΚΤ καθώς και της γραμμικοποίησης μέσω της μεθόδου big M και του δυικού προβλήματος.

Στο κεφάλαιο 6 αναλύονται τα σενάρια του προβλήματος που χρησιμοποιήθηκαν. Γίνεται μια παρουσίαση των δεδομένων εισόδου καθώς και των αποτελεσμάτων.

Στο κεφάλαιο 7 παρουσιάζονται οι επεκτάσεις τις συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Περιεχόμενα

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή	21
1.1 Σκοπός εργασίας	21
1.2 Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας	21
1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.....	22
1.4 Λειτουργία των μονάδων παραγωγής - Ημερήσιος Ενεργειακός προγραμματισμός ..	24
Κεφάλαιο 2 : Μοντέλα Μαθηματικού Προγραμματισμού	27
2.1 Εισαγωγή.....	27
2.2 Μαθηματικός Προγραμματισμός.....	27
2.3 Γραμμικός Προγραμματισμός	28
2.3.1 Ακέραιος Προγραμματισμός	29
2.3.2 Δυαδικός Προγραμματισμός	29
2.3.3 Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός	30
2.3.4 Θεωρητική επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού	30
2.3.5 Γραφική επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού.....	30
2.3.6 Αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού	31
2.4 Θεωρία δυισμού	31
2.5 Θεωρία Παιγνίων, Μοντέλο Ηγεσίας, Stackelberg Game	33
2.6 Πολυεπίπεδος και Διεπίπεδος Προγραμματισμός	33
2.6.1 Μαθηματική Διατύπωση Προβλήματος Διεπίπεδου Προγραμματισμού.....	34
2.6.2 Εφαρμογές Διεπίπεδου Προγραμματισμού.....	35
2.6.3 Αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων διεπίπεδου προγραμματισμού	35
Κεφάλαιο 3 : Διεσπαρμένη Παραγωγή-Διαχειριστής Διεσπαρμένων Πόρων	39
3.1 Εισαγωγή.....	39
3.2 Διεσπαρμένη Παραγωγή και κατηγορίες της	39
3.3 Πλεονεκτήματα Διεσπαρμένων πόρων	40
3.4 Μειονεκτήματα Διεσπαρμένων πόρων	42
3.5 Αλληλεπίδραση με την τοπική αγορά	42

3.6 Ενσωμάτωση Διεσπαρμένων Πόρων στην τοπική αγορά Απουσία Διαχειριστή Διεσπαρμένων Πόρων.....	43
3.7 Ενσωμάτωση Διεσπαρμένων Πόρων στην τοπική αγορά Παρουσία Διαχειριστή Διεσπαρμένων Πόρων.....	44
3.8 Μικροδίκτυα- Microgrids.....	45
3.9 Ενεργειακές Κοινότητες - Energy Communities.....	47
4.10 Smart Grids – Έξυπνα δίκτυα.....	48
Κεφάλαιο 4 : Περιβάλλον Μοντελοποίησης.....	51
4.1 Εισαγωγή.....	51
4.2 Γενικά στοιχεία για το GAMS.....	52
4.3 Σύνταξη κώδικα σε GAMS.....	53
4.3.1 Sets-Subsets.....	53
4.3.2 Alias.....	53
4.3.3 Scalars.....	53
4.3.4 Parameters.....	54
4.3.5 Tables.....	54
4.3.6 Variables.....	54
4.3.7 Equations.....	55
4.3.7 Solvers.....	56
Κεφάλαιο 5 : Βέλτιστη ενσωμάτωση διεσπαρμένων πόρων στην τοπική αγορά.....	59
5.1 Εισαγωγή.....	59
5.2 Κατάλογος Συμβόλων.....	59
5.2.1 Σύνολα – Υποσύνολα.....	59
5.2.2 Παράμετροι.....	60
5.2.3 Μεταβλητές.....	61
5.3 Μοντέλο απόφασης Διαχειριστή Διεσπαρμένων Πόρων (Πρόβλημα Ένω Επιπέδου).....	63
5.4 Πρόβλημα Κάτω Επιπέδου.....	66
5.4.1 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για τοπικούς παραγωγούς.....	66
5.4.2 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για καταναλωτές με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης.....	67
5.4.3 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για την ζήτηση περικοπής.....	68
5.4.4 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για τους καταναλωτές χωρίς ευέλικτα φορτία.....	68
5.4.5 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για καταναλωτές με ευέλικτα φορτία.....	69

5.5 Μετατροπή Προβλήματος Διεπίπεδου Προγραμματισμού σε ένα επίπεδο	69
5.5.1 Υπολογισμός συνάρτησης <i>Lagrange</i>	70
5.5.2 Υπολογισμός Συνθηκών Στασιμότητας	72
5.5.3 Υπολογισμός Συνθηκών Συμπληρωματικής Χαλαρότητας.....	73
5.5.4 Γραμμικοποίηση Συνθηκών Συμπληρωματικής Χαλαρότητας.....	74
5.5.5 Γραμμικοποίηση Αμοιβαία Αποκλειόμενων Συνθηκών	79
5.6 Τελική Διαμόρφωση Προβλήματος.....	79
Κεφάλαιο 6 : Προσομοίωση	83
6.1 Εισαγωγή.....	83
6.2 Γενικά Στοιχεία	83
6.3 Σενάριο για τους τοπικούς παραγωγούς Pb.....	83
6.3.1 Δεδομένα εισόδου σεναρίου τοπικών παραγωγών	84
6.3.2 Αποτελέσματα σεναρίου τοπικών παραγωγών	86
6.4 Σενάριο για καταναλωτές db χωρίς ευέλικτο φορτίο	88
6.4.1 Δεδομένα εισόδου σεναρίου καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο.....	88
6.4.2 Αποτελέσματα σεναρίου καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο	90
6.5 Σενάριο για καταναλωτές df με ευέλικτο φορτίο	92
6.5.1 Δεδομένα εισόδου σεναρίου καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο.....	92
6.5.2 Αποτελέσματα σεναρίου καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο	93
6.6 Σενάριο για καταναλωτές dc με δυνατότητα περικοπής φορτίου	97
6.6.1 Δεδομένα εισόδου σεναρίου καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής φορτίου .97	
6.6.2 Αποτελέσματα σεναρίου καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής φορτίου	99
6.7 Σενάριο για καταναλωτές dp με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης	101
6.8 Γενικά Συμπεράσματα	105
Κεφάλαιο 7 : Επεκτάσεις	107
7.1 Τελική Διαμόρφωση Προβλήματος.....	107
7.2 Διεσπαρμένοι Πόροι.....	107
7.3 Ενεργειακές κοινότητες και ανταγωνιστικό περιβάλλον	108
7.4 Συμπεράσματα	109
Bibliography.....	111

Κατάλογος Διαγραμμάτων

Διάγραμμα 1 : Σχηματική απεικόνιση μικροδικτύου (40).....	46
Διάγραμμα 2 : Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων	64
Διάγραμμα 3 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τις καθημερινές ημέρες για τα σενάρια τοπικών παραγωγών	87
Διάγραμμα 4 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια τοπικών παραγωγών	88
Διάγραμμα 5: Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τις καθημερινές ημέρες για τα σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο	91
Διάγραμμα 6 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο	91
Διάγραμμα 7 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τις καθημερινές ημέρες για τα σενάρια καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο	94
Διάγραμμα 8 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο	94
Διάγραμμα 9 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο	96
Διάγραμμα 10 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τις καθημερινές ημέρες για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής	100
Διάγραμμα 11 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής.....	100
Διάγραμμα 12 : Κατάσταση ένταξης καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης στα σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης	103
Διάγραμμα 13: Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τις καθημερινές ημέρες για τα σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης.....	104
Διάγραμμα 14 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης	105

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1 : Μετατροπή αρχικού προβλήματος στο δυικό ανάλογο του	32
Πίνακας 2 : Διαφορές παραδοσιακών και έξυπνων δικτύων.....	49
Πίνακας 3: Επιλυτές προγράμματος GAMS (29).....	56
Πίνακας 4: Μέγιστες ποσότητες ενέργειας που υποβάλλουν οι τοπικοί παραγωγοί και στα δύο σενάρια τοπικών παραγωγών	84
Πίνακας 5: Τιμές πώλησης ενέργειας που υποβάλλουν οι τοπικοί παραγωγοί στο πρώτο σενάριο τοπικών παραγωγών	85
Πίνακας 6 : Τιμές πώλησης ενέργειας που υποβάλλουν οι τοπικοί παραγωγοί στο δεύτερο σενάριο τοπικών παραγωγών	85
Πίνακας 7 : Ποσότητες ενσωμάτωσης τοπικών παραγωγών για τα σενάρια τοπικών παραγωγών	86
Πίνακας 8 : Λιανικές τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους τοπικούς παραγωγούς για τα δύο σενάρια τοπικών παραγωγών.....	87
Πίνακας 9 : Συγκρητικός πίνακας τιμών ζήτησης καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο για τα δύο σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο	89
Πίνακας 10 : Συγκρητικός πίνακας ποσοτήτων ζήτησης καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο για τα δύο σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο	89
Πίνακας 11 : Ενσωμάτωση καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο τις καθημερινές ημέρες για τα δύο σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο	90
Πίνακας 12: Κέδος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο.....	92
Πίνακας 13 : Δεδομένα εισόδου καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο για τα τρία σενάρια καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο.....	92
Πίνακας 14 : Ενσωμάτωση καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο στα σενάρια 1 και 2 των καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο.....	93
Πίνακας 15: Κέδος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια 1 και 2 καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο	95
Πίνακας 16 : Ενσωμάτωση καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο στα σενάρια 2 και 3 των καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο.....	95
Πίνακας 17: Περιθώρια κέρδους στα υπό εξέταση σενάρια 2 και 3 καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο	97
Πίνακας 18: Κέδος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια 2 και 3 καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο.....	97
Πίνακας 19: Ποσότητα ζήτησης χωρίς περικοπή για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής	97
Πίνακας 20: Ποσότητα ζήτησης περικοπής για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής.....	98
Πίνακας 21 : Τιμή αποζημίωσης ζήτησης περικοπής για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής	98
Πίνακας 22 : Ενσωμάτωση τοπικών παραγωγών στα σενάρια 1 και 2 καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής	99

Πίνακας 23 : Κέδος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια 1 και 2 καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής	101
Πίνακας 24 : Λιανικές τιμές αποζημίωσης περικοπτόμενης ενέργειας για τα σενάρια 2 και 3 καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής	101
Πίνακας 25: Κέδος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια 2 και 3 καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής	101
Πίνακας 26: Ποσότητα υποβολής καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης για τις δύο περιόδους κατανομής και τα δύο σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης.....	102
Πίνακας 27 : Πλήρεις ποσότητες ένταξης καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης που προκύπτουν από την εξέταση των σεναρίων καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης για αυτούς τους καταναλωτές	103
Πίνακας 28 : Άθροισμα των ποσοτήτων ενέργειας καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ που εντάχθηκαν στα δύο σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης για τις καθημερινές ημέρες	104
Πίνακας 29 : Κέδος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης.....	105

Κεφάλαιο 1 : Εισαγωγή

1.1 Σκοπός εργασίας

Ακολουθώντας τις εξελίξεις των τελευταίων ετών τα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας έχουν αρχίσει να διαφοροποιούνται. Πλέον δεν υπάρχουν μόνο συμβατικές μονάδες παραγωγής. Υπάρχουν αποκεντρωμένες μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, νέες μορφές φορτίων (ευέλικτα φορτία) καθώς και τοπικοί παραγωγοί. Ταυτόχρονα, σημαντική εξέλιξη αποτελεί και η ύπαρξη διεσπαρμένων μονάδων αποθήκευσης της ενέργειας. Ο λειτουργός του συστήματος θα πρέπει να βρει έναν βέλτιστο τρόπο ώστε να ενσωματώσει όλες αυτές τις μονάδες στην διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς. Σκοπός αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι να αναλύσει πως ο διαχειριστής του συστήματος θα εντάξει τους διεσπαρμένους πόρους στην τοπική αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας και πως θα καταφέρει εν τέλει να ικανοποιήσει τους παραγωγούς, τους καταναλωτές και το σύστημα.

1.2 Εισαγωγή στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας

Ως Σύστημα Ηλεκτρικής Ενέργειας (ΣΗΕ) ορίζεται το σύνολο των εγκαταστάσεων και των μέσων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, την μεταφορά και την διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας. Τα βασικά μέσα ενός συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι σταθμοί παραγωγής, οι υποσταθμοί, οι γραμμές μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και τα φορτία. Η λειτουργία των συστημάτων αυτών βασίζεται σε μια εύκολη ως προς την κατανόηση διαδικασία. Η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται στους σταθμούς παραγωγής που βρίσκονται τοπικά διασκορπισμένοι. Οι σταθμοί αυτοί μετατρέπουν μια μορφή ενέργειας σε ηλεκτρική και μπορεί να έχουν εγκατεστημένες συμβατικές μονάδες παραγωγής και μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η ηλεκτρική ενέργεια που έχει παραχθεί μεταφέρεται στους υποσταθμούς ανύψωσης τάσης και από εκεί μέσω των γραμμών υψηλής/υπερψηλής τάσης φτάνει στους υποσταθμούς μεταφοράς υψηλής/μέσης τάσης. Από εκεί μέσω των γραμμών μέσης τάσης οδηγείται στους υποσταθμούς διανομής μέσης χαμηλής/τάσης ώστε να καταλήξει στους χρήστες χαμηλής/μέσης τάσης.

Όπως μπορεί να γίνει κατανοητό από τα προηγούμενα υπάρχουν τρία επιμέρους συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας

Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας: Περιλαμβάνει όλους τους σταθμούς παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και τους μετασχηματιστές ανύψωσης. Οι μονάδες παραγωγής μπορεί να είναι θερμικές μονάδες, υδροηλεκτρικές μονάδες ή μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας.

Σύστημα μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας: Είναι το κομμάτι που ενώνει τους σταθμούς παραγωγής με το επίπεδο της κατανάλωσης. Περιλαμβάνει τις γραμμές μεταφοράς υψηλής/υπερψηλής τάσης καθώς και τους υποσταθμούς μετασχηματισμού των διαφορετικών επιπέδων τάσης

Σύστημα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας: Περιλαμβάνει το δίκτυο μέσης και χαμηλής τάσης καθώς και όλους τους υποσταθμούς που αναλαμβάνουν τον υποβιβασμό της τάσης στα επίπεδα της κατανάλωσης. Μέσω αυτού του συστήματος η ηλεκτρική ενέργεια φτάνει στους καταναλωτές.

1.3 Ανανεώσιμες πηγές ενέργειας

Έχοντας διανύσει την πρώτη εικοσαετία του 21ου αιώνα τα προβλήματα της ενέργειας είναι όλο και πιο φανερά. Τα αποθέματα ορυκτών καυσίμων μειώνονται την ίδια ώρα που οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα αυξάνονται. Καθώς η παραγωγή της ηλεκτρικής ενέργειας δεν γινόταν μέχρι το τέλος του προηγούμενου αιώνα με καμία προστασία προς το περιβάλλον το φαινόμενο του θερμοκηπίου έχει αρχίσει να προβληματίζει όλο και περισσότερο τους αρμόδιους επιστήμονες. Τόσο σε Εθνικό όσο και σε Ευρωπαϊκό και Παγκόσμιο επίπεδο οι αρμόδιοι φορείς προσπαθούν να λάβουν μέτρα ώστε η ενέργεια να γίνει πιο φιλική προς το περιβάλλον. Ένα από αυτά τα μέτρα είναι η μεγαλύτερη διείσδυση Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας στην παραγωγική διαδικασία. Με τον όρο Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας (ΑΠΕ) ορίζονται όλες οι πηγές ενέργειας που δεν προέρχονται από ορυκτά καύσιμα και υπάρχουν σε αφθονία στο περιβάλλον. Παραδείγματα ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι η αιολική ενέργεια, η ηλιακή ενέργεια, η γεωθερμία η βιομάζα και η ενέργεια των κυμάτων. Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες ανανεώσιμη πηγή ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί και η πυρηνική ενέργεια (1).

Αιολική ενέργεια: Είναι η ενέργεια που προέρχεται από την ταχύτητα του ανέμου και μετατρέπεται σε ηλεκτρική μέσω των ανεμογεννητριών. Ο αέρας καθώς κινείται προσπίπτει πάνω στα πτερύγια των ανεμογεννητριών και τα ωθεί σε μια περιστροφική κίνηση η οποία παράγει την ηλεκτρική ενέργεια. Οι ανεμογεννήτριες εμφανίζονται συνήθως μαζικά σε εγκαταστάσεις αιολικών πάρκων είτε αυτά είναι σε χερσαίο (onshore) ή θαλάσσιο (offshore) χώρο.

Ηλιακή ενέργεια: Είναι η ενέργεια που προέρχεται από τον ήλιο και μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια μέσω των φωτοβολταϊκών. Όσον αφορά τα φωτοβολταϊκά συστήματα πρόκειται για τεχνητούς ημιαγωγούς (συνήθως από πυρίτιο) οι οποίοι ενώνονται με σκοπό να δημιουργήσουν ένα ηλεκτρικό κύκλωμα σε σειρά. Οι ημιαγωγοί αυτοί απορροφούν φωτόνια από την ηλιακή ακτινοβολία και παράγουν μια ηλεκτρική τάση.

Γεωθερμία: Ονομάζεται η φυσική θερμική ενέργεια της Γης που διαρρέει από το θερμό εσωτερικό του πλανήτη προς την επιφάνεια. Η μετάδοση θερμότητας πραγματοποιείται είτε με αγωγή από το εσωτερικό προς την επιφάνεια είτε με ρεύματα μεταφοράς, που περιορίζονται όμως στις ζώνες κοντά στα όρια των λιθοσφαιρικών πλακών, λόγω ηφαιστειακών και υδροθερμικών φαινομένων. Χαρακτηριστικό παράδειγμα χώρας που χρησιμοποιεί ευρέως την γεωθερμία αποτελεί η Ισλανδία.

Βιομάζα: Είναι η ενέργεια που είναι δεσμευμένη στις φυτικές ουσίες και προέρχεται από τον ήλιο. Με τη διαδικασία της φωτοσύνθεσης, τα φυτά μετασχηματίζουν την ηλιακή ενέργεια σε βιομάζα. Οι ζωικοί οργανισμοί αυτή την ενέργεια την προσλαμβάνουν με την τροφή τους και αποθηκεύουν ένα μέρος της. Αυτή την ενέργεια αποδίδει τελικά η βιομάζα, μετά την επεξεργασία και τη χρήση της. Είναι μια ανανεώσιμη πηγή ενέργειας γιατί στην πραγματικότητα είναι αποθηκευμένη ηλιακή ενέργεια που δεσμεύτηκε από τα φυτά κατά τη φωτοσύνθεση.

Ενέργεια των κυμάτων: Ονομάζεται η ενέργεια που προέρχεται από την θάλασσα. Αυτή η ενέργεια μπορεί να προέρχεται από τα κύματα (η κινητική ενέργεια των κυμάτων προσπίπτει σε μια τουρμπίνα δημιουργώντας μια περιστροφική κίνηση), από τις παλίρροιες (μέσω της δημιουργίας φραγμάτων σε στενές εκβολές ποταμών) και από τις θερμοκρασιακές διαφορές του νερού (υπό την προϋπόθεση ότι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ πυθμένα και επιφάνειας να είναι τουλάχιστον 3.5 βαθμοί Κελσίου).

Πυρηνική ενέργεια: Ονομάζεται η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν μετασχηματίζονται ατομικοί πυρήνες. Η πυρηνική ενέργεια απελευθερώνεται με την σχάση ή την σύντηξη πυρήνων σωματιδίων. Αν οι αντιδράσεις αυτές συμβαίνουν ενεργόμοια σε ειδικούς αντιδραστήρες τότε παράγεται ενέργεια. Τα πιο συχνά χρησιμοποιούμενα χημικά στοιχεία για την παραγωγή πυρηνικής ενέργειας είναι το ουράνιο και το πλουτόνιο.

Οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, μπορεί να είναι η λύση για το περιβαλλοντικό πρόβλημα και την προστατευτική προς το περιβάλλον παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ωστόσο αντιμετωπίζουν μια μεγάλη πρόκληση. Τα δίκτυα δεν είναι έτοιμα να λάβουν ακόμα τόσο μεγάλες ποσότητες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Η τεράστια διείσδυση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας που θα έλυσε το πρόβλημα θα έπρεπε να συνοδευτεί με αλλαγές στα δίκτυα μεταφοράς ώστε να γίνεται με ασφαλή τρόπο η μεταφορά της ηλεκτρικής ενέργειας, με επενδύσεις σε ηλεκτρονικά ισχύος για την βελτίωση της ποιότητας της παραγόμενης ενέργειας καθώς και σε επενδύσεις για νέες προστασίες, τοπικές αντισταθμίσεις των γραμμών κ.ά. Όπως είναι λογικό όλα αυτά απαιτούν μεγάλο κόστος και χρόνο για την διεκπεραίωση τους.

Η Ευρωπαϊκή Ένωση θέλοντας να συμμορφώσει τα κράτη σε μια πράσινη πολιτική κάνοντας σταθερά και όχι βιαστικά βήματα όρισε κάποιους στόχους για τα επόμενα έτη , 2020, 2030 και 2050 σε ό.τι αφορά τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου , την ενεργειακή αποδοτικότητα και την διείσδυση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (2).

Έτος 2020: Οι στόχοι του 2020 είναι η γνωστή τριάδα 20/20/20. Το πρώτο σημαίνει 20% μείωση των αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Το δεύτερο σημαίνει 20% της συνολικής παραγωγή ενέργειας να γίνεται από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Το τρίτο σημαίνει αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητα στα επίπεδα του 20%

Έτος 2030: Ο στόχος σε ό.τι αφορά τα αέρια που συμβάλλουν στο φαινόμενο του θερμοκηπίου, έχει οριστεί σε μείωση 42% σε σχέση με τα επίπεδα του 1990. Η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας θα πρέπει να είναι τουλάχιστον το 32% της συνολικής παραγόμενης ενέργειας ενώ η ενεργειακή αποδοτικότητα θα πρέπει να ξεπερνάει το 32.5%

Έτος 2050: Η Ευρωπαϊκή Ένωση στοχεύει το 2050 να έχει μετατραπεί σε μια κοινωνία με μηδενικές εκπομπές αερίων του φαινομένου του θερμοκηπίου. Μέχρι τότε υπολογίζεται ότι η ηλεκτροκίνηση θα πραγματοποιείται στην μέγιστη ενεργειακή της απόδοση.

1.4 Λειτουργία των μονάδων παραγωγής - Ημερήσιος Ενεργειακός προγραμματισμός

Κάθε χώρα, για να καλύπτει τις ενεργειακές ανάγκες της διαθέτει εγκαταστάσεις παραγωγής. Κάθε μια από αυτές τις εγκαταστάσεις αποτελείται από επί μέρους μονάδες (γεννήτριες) οι οποίες έχουν μια δεδομένη ονομαστική ισχύ, μια μέγιστη δηλαδή τιμή ενέργειας που μπορούν να προσφέρουν. Όπως είναι λογικό μια εγκατάσταση κάποια χρονική στιγμή είναι δυνατόν να μην χρειάζεται να προσφέρει ενέργεια στο δίκτυο. Τότε οι γεννήτριες της αδρανοποιούνται και τίθενται εκτός λειτουργίας. Κάποια άλλη χρονική στιγμή είναι δυνατόν να χρειάζεται να προσφέρει στο δίκτυο ένα ποσό ενέργειας. Έτσι κάποιες μονάδες της (ή και όλες) τίθενται σε λειτουργία, παράγουν ενέργεια και μέσω των δικτύων μεταφοράς και διανομής την προσφέρουν στους καταναλωτές. Εύλογο είναι τα ερωτήματα πως αποφασίζεται ποιες μονάδες θα είναι εντός λειτουργίας και ποιες εκτός ανα πάσα στιγμή και ποιοι είναι οι συμμετέχοντες σε αυτή τη διαδικασία. Το πρόβλημα αυτό λύνεται μέσω του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού (ΗΕΠ) .Ο ημερήσιος ενεργειακός προγραμματισμός έχει ως στόχο τον βέλτιστο προγραμματισμό της λειτουργίας των θερμικών και υδροηλεκτρικών μονάδων παραγωγής του συστήματος, των μονάδων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και της διαθέσιμης ενέργειας από εισαγωγές προκειμένου να καλύπτεται, σε ημερήσια βάση, η ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας από καταναλωτές , η ζήτηση για εξαγωγές ενέργειας από την χώρα και οι απαραίτητες επικουρικές υπηρεσίες. Κάθε μονάδα παραγωγής υποχρεούται να προσφέρει το σύνολο της διαθεσιμότητας της τόσο σε ενέργεια όσο και σε επικουρικές υπηρεσίες. Πρόκειται συνεπώς για ένα μοντέλο υποχρεωτικής κοινοπραξίας (3).

Οι βασικοί συμμετέχοντες στην διαδικασία ανταλλαγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι εξής:

Παραγωγοί : Μέσω μιας διαδικασίας η οποία διαρκεί αρκετά χρονικά παραχωρούνται οι άδειες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Παραγωγοί είναι οι κάτοχοι αυτών των αδειών οι οποίοι έχουν καταγεγραμμένες μονάδες και λαμβάνουν μέρος στην διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς

Αυτοπαραγωγοί: Είναι όλοι όσοι έχουν την παραπάνω άδεια και έχουν ως στόχο να παράγουν ηλεκτρική ενέργεια την οποία θα καταναλώσουν οι ίδιοι, για δική τους χρήση. Επειδή είναι λογικό ότι κάποιες περιόδους η ποσότητα παραγωγής θα είναι μεγαλύτερη από την ποσότητα ιδιοκατανάλωσης , το πλεόνασμα της ενέργειας εγχέεται στο δίκτυο

Πελάτες: Είναι οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Πλέον , οι καταναλωτές έχουν την δυνατότητα να επιλέγουν τον προμηθευτή τους.

Εισαγωγείς-Εξαγωγείς: Πρόκειται για φορείς οι οποίοι έχουν άδειες προμήθειας ή εμπορίας ηλεκτρικής ενέργειας. Οι εισαγωγείς λαμβάνουν ενέργεια μέσω των διασυνδέσεων από το εξωτερικό και εν συνεχεία την εγχέουν στο δίκτυο μέσω του ημερήσιου ενεργειακού

προγραμματισμού. Οι εξαγωγείς από την άλλη, αποδίδουν ενέργεια προς το εξωτερικό μέσω διασυνδέσεων.

Προμηθευτές: Είναι οι γνωστοί μεσάζοντες. Έχουν άδεια προμήθειας ηλεκτρικής ενέργειας η οποία τους δίνει την δυνατότητα να αγοράζουν ενέργεια την οποία μετά πωλούν στους πελάτες τους ώστε να ικανοποιήσουν τις ανάγκες τους.

Λειτουργός της Αγοράς (ΛΑ): Πρόκειται για τον φορέα ο οποίος επιλέγει ποιοι θα λάβουν μέρος στην διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς. Καθημερινά επιλύει ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης το οποίο εξαρτάται από τις τιμές και τις ποσότητες που προσφέρουν οι συμμετέχοντες καθώς και από μια σειρά από τεχνικά και οικονομικά δεδομένα. Μετά την επίλυση του προβλήματος, ο λειτουργός της αγοράς ενημερώνει τους συμμετέχοντες ποιες περιόδους θέλει να συμμετάσχουν στην διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς και με ποιές ποσότητες. Όλη αυτή η διαδικασία υπολογίζει και την οριακή τιμή του συστήματος

Στην διαδικασία του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού λαμβάνουν μέρος ο Κύριος και Διαχειριστής του Συστήματος(ΚΔΣ), ο Διαχειριστής του Δικτύου(ΔΔ) και η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας(ΡΑΕ).

Κεφάλαιο 2 : Μοντέλα Μαθηματικού Προγραμματισμού

2.1 Εισαγωγή

Η εξέλιξη της τεχνολογίας και των επιστημών τα τελευταία χρόνια είναι τεράστια. Ο ρόλος του μηχανικού έχει αλλάξει αρκετά σε σχέση με ότι συνέβαινε πριν έναν αιώνα. Παλαιότερα, στόχος της επιστήμης ήταν να επιλύσει ένα πρόβλημα. Πλέον, το ζητούμενο είναι τα προβλήματα να επιλύονται με βέλτιστο τρόπο. Αυτό σημαίνει ότι είναι επιθυμητό να υπάρχει μικρή πολυπλοκότητα. Ο χρόνος εκτέλεσης και επίλυσης του προβλήματος πρέπει να είναι μικρός όπως και η μνήμη που δεσμεύεται στον ηλεκτρονικό υπολογιστή που πρόκειται να το επιλύσει.

Στο παρόν κεφάλαιο γίνεται μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σε ό,τι αφορά τον μαθηματικό προγραμματισμό. Αρχικά, ορίζεται ο μαθηματικός προγραμματισμός, ενώ στην συνέχεια αναλύονται διάφορα μοντέλα του σε επίπεδο ορισμού, μαθηματικής διατύπωσης και επίλυσης. Στο τέλος του κεφαλαίου παρατίθεται μια εισαγωγή στον πολυεπίπεδο προγραμματισμό καθώς και η μαθηματική έκφραση και απλούστευση του διεπίπεδου προγραμματισμού.

2.2 Μαθηματικός Προγραμματισμός

Ο μαθηματικός προγραμματισμός είναι ένας κλάδος της επιστήμης των εφαρμοσμένων μαθηματικών ο οποίος έχει ως στόχο να μοντελοποιήσει ένα πραγματικό πρόβλημα βελτιστοποίησης με κάποιους περιορισμούς και κατόπιν να το επιλύσει. Στην πραγματικότητα, είναι ένα σύνολο μεθόδων και τεχνικών για την επίλυση προβλημάτων μεγιστοποίησης ή ελαχιστοποίησης, οι μεταβλητές των οποίων υπόκεινται σε ορισμένους περιορισμούς. Έτσι, ένα πρόβλημα το οποίο θα επιλυθεί με την βοήθεια του μαθηματικού προγραμματισμού θα πρέπει να περιλαμβάνει κάποιες μεταβλητές και παραμέτρους οι οποίες θα περιγράφουν το πρόβλημα, μια συνάρτηση βελτιστοποίησης η οποία θα ορίζει τον στόχο του προβλήματος, καθώς και μια σειρά από ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς, το πλήθος και το είδος των οποίων εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα. Ένα πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού υποχρεούται να περιλαμβάνει μια συνάρτηση βελτιστοποίησης, αλλά δεν είναι απαραίτητο να έχει και ισοτικούς και ανισοτικούς περιορισμούς (4) (5). Η μαθηματική έκφραση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης μαθηματικού προγραμματισμού με n μεταβλητές, k ισοτικούς περιορισμούς και m ανισοτικούς είναι η ακόλουθη που περιλαμβάνει την συνάρτηση

βελτιστοποίησης (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση) [2.1] καθώς και τους ισοτικούς περιορισμούς [2.2] και τους ανισοτικούς περιορισμούς [2.3] :

$$\text{optimize } z = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n) \quad [2.1]$$

υπό τους περιορισμούς

$$h_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0 \quad [2.2]$$

$$h_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0$$

⋮

$$h_k(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n) = 0$$

και

$$g_1(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n) \leq (\text{ή } \geq) 0 \quad [2.3]$$

$$g_2(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n) \leq (\text{ή } \geq) 0$$

⋮

$$g_m(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n) \leq (\text{ή } \geq) 0$$

2.3 Γραμμικός Προγραμματισμός

Ο γραμμικός προγραμματισμός αναφέρεται σε αρκετές συνδεδεμένες μεταξύ τους μαθηματικές και υπολογιστικές τεχνικές που χρησιμοποιούνται για την κατανομή περιορισμένων πόρων σε ανταγωνιστικές απαιτήσεις με βέλτιστο τρόπο. Αποτελεί υποκατηγορία του μαθηματικού προγραμματισμού καθώς προϋποθέτει τόσο η συνάρτηση βελτιστοποίησης όσο και οι ισοτικοί και ανισοτικοί περιορισμοί να είναι γραμμικοί (5) (6) (7) (8). Για να μην οδηγηθεί σε κάποια προβληματική κατάσταση ο γραμμικός προγραμματισμός, όπως αυτός εκφράζεται σε κάθε πρόβλημα, πρέπει να υπακούει σε πέντε βασικούς κανόνες :

να υπάρχουν περιορισμένοι πόροι, γιατί σε διαφορετική περίπτωση δεν θα υπάρχει πρόβλημα,

να έχει ένα σαφή στόχο , δηλαδή να είναι εμφανές ότι θέλει να ελαχιστοποιήσει είτε να βελτιστοποιήσει μια συνάρτηση (για παράδειγμα ελαχιστοποίηση κόστους ή μεγιστοποίηση κέρδους),

να υπάρχει γραμμικότητα , όπως αναφέρθηκε και παραπάνω,

να υπάρχει ομοιογένεια , για παράδειγμα όλες οι μηχανές μιας παραγωγικής διαδικασίας να παράγουν όμοια προϊόντα και τέλος

να υπάρχει διαιρετότητα.

Η μαθηματική έκφραση του γραμμικού προγραμματισμού περιγράφεται με τις παρακάτω σχέσεις [2.4] και [2.5]

$$\begin{aligned} \text{optimize } z &= f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_i, \dots, x_n) = c_1x_1, c_2x_2, c_3x_3, \dots, c_ix_i, \dots, c_nx_n \\ &= \sum_i c_ix_i \end{aligned} \quad [2.4]$$

υπό τους περιορισμούς

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + a_{1n}x_n = (\text{ή } \leq \text{ ή } \geq) b_1 \quad [2.5]$$

$$a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + a_{2n}x_n = (\text{ή } \leq \text{ ή } \geq) b_2$$

⋮

$$a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + a_{mn}x_n = (\text{ή } \leq \text{ ή } \geq) b_m$$

2.3.2 Ακέραιος Προγραμματισμός

Στις περισσότερες περιπτώσεις προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού οι μεταβλητές δεν έχουν κάποιον φυσικό περιορισμό και μπορούν να κινούνται ελεύθερα σε οποιαδήποτε τιμή των πραγματικών αριθμών θέλουν. Παρόλα αυτά υπάρχουν προβλήματα στα οποία οι μεταβλητές μπορούν να πάρουν μόνο ακέραιες τιμές. Αυτά τα προβλήματα ονομάζονται προβλήματα ακέραιου προγραμματισμού. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι μια εταιρεία που λύνει ένα πρόβλημα μαθηματικού προγραμματισμού με σκοπό να υπολογίσει πόσες στον αριθμό πωλήσεις θα πρέπει να κάνει για να έχει κέρδος. Σε αυτή την περίπτωση επειδή ο αριθμός των πωλήσεων πρέπει να είναι ακέραιος χρησιμοποιείται αυτό το μοντέλο.

2.3.2 Δυαδικός Προγραμματισμός

Υπάρχουν περιπτώσεις, ωστόσο είναι λίγες, στις οποίες οι μεταβλητές μπορούν να πάρουν μόνο τις τιμές 0 και 1. Τέτοια προβλήματα είναι παρακλάδια του ακέραιου προγραμματισμού μιας και μπορούν να πάρουν μόνο τις ακέραιες τιμές 0 και 1. Οι αριθμοί 0 και 1 είναι αυτοί που ορίζουν το δυαδικό σύστημα αρίθμησης και για αυτό επικράτησε ο όρος δυαδικός προγραμματισμός. Χαρακτηριστικά παραδείγματα τέτοιων προβλημάτων είναι τα προβλήματα ένταξης. Για παράδειγμα σε μια διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς αν μια μονάδα εισέρχεται ή όχι στην διαδικασία δηλώνεται μέσω μιας δυαδικής μεταβλητής. Αν η μονάδα εντάσσεται, θα έχει τιμή 1, αλλιώς τιμή 0.

2.3.3 Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός

Σε ένα πρόβλημα είναι πολύ πιθανό να χρειάζονται τόσο ακέραιες μεταβλητές όσο δεκαδικές και δυαδικές . Ένα τέτοιο πρόβλημα εντάσσεται στην κατηγορία του μικτού ακέραιου προγραμματισμού (7). Στην παρούσα διπλωματική εργασία γίνεται μια μετατροπή του προβλήματος βέλτιστης ενσωμάτωσης δεισπαρμένων πόρων στην τοπική αγορά σε πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού. Θα χρησιμοποιηθούν τόσο δυαδικές μεταβλητές για να εξετάζεται αν κάποιες μονάδες είναι εντός λειτουργίας μια δεδομένη χρονική στιγμή όσο και ακέραιες και δεκαδικές για να περιγραφούν ποσότητες παραγωγής τιμές καθώς και άλλα μεγέθη (5).

2.3.4 Θεωρητική επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού

Μέχρι στιγμής αναλύθηκαν κατηγορίες του γραμμικού προγραμματισμού ενώ περιγράφηκε και η μαθηματική διατύπωση του. Παρόλα αυτά εύλογο θα ήταν το ερώτημα “πως μοντελοποιείται ένα τέτοιο πρόβλημα;” . Η μοντελοποίηση αυτή μπορεί να γίνει μέσω μιας σειράς πολύ απλών και μεθοδολογικών βημάτων που έχουν ως εξής (6):

Καθορισμός Μεταβλητών Απόφασης. Πρόκειται για τους άγνωστους του προβλήματος οι οποίοι πρέπει να εντοπισθούν και να είναι κατάλληλοι ώστε να περιγράψουν τα ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν

Διαμόρφωση Αντικειμενικής Συνάρτησης. Η αντικειμενική συνάρτηση είναι το μέσο με το οποίο θα εκφραστεί το ζητούμενο του προβλήματος με την βοήθεια των μεταβλητών και των παραμέτρων. Είναι σημαντικό βήμα γιατί ένα λάθος στην μοντελοποίηση της αντικειμενικής συνάρτησης θα αλλάξει εντελώς το πρόβλημα και προφανώς θα οδηγήσει σε εσφαλμένη λύση.

Εντοπισμός Περιορισμών. Είναι εξίσου σημαντικό βήμα με το παραπάνω. Εδώ είναι το σημείο στο οποίο γίνεται ανάλυση του προβλήματος και των μεταβλητών του με σκοπό να βρεθούν μέσω της φύσεως του προβλήματος τα όρια των μεταβλητών . Όπως είναι λογικό λανθασμένοι περιορισμοί θα οδηγήσουν σε τελείως διαφορετικό πρόβλημα με το αρχικό.

Επιλογή του κατάλληλου εργαλείου επίλυσης : Αποτελεί το τελευταίο βήμα ενός τέτοιου προβλήματος και περιγράφεται στις επόμενες παραγράφους.

2.3.5 Γραφική επίλυση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού

Μια ειδική περίπτωση προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού είναι αυτά τα οποία περιλαμβάνουν μόνο δύο μεταβλητές απόφασης αν πρόκειται για δυσδιάστατα γραφικά ή τρεις για τρισδιάστατα γραφικά (8). Σε αυτές τις δύο περιπτώσεις η επίλυση του προβλήματος μπορεί να πραγματοποιηθεί μέσω μιας γραφικής μεθόδου στην οποία εξηγούνται οι περιπτώσεις

Μοναδικής βέλτιστης λύσης

Άπειρος αριθμός βέλτιστων λύσεων

Καμία λύση

Μη φραγμένη λύση
Μοναδικό εφικτό σημείο

Παράλληλα εξηγείται γιατί η εφικτή περιοχή είναι κυρτό πολύγωνο και αν η βέλτιστη λύση βρίσκεται σε μια κορυφή της εφικτής περιοχής. Ωστόσο, η συγκεκριμένη ανάλυση δεν χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία οπότε και δεν θα αναλυθεί παραπάνω.

2.3.6 Αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού

Ο πιο τυπικός αλγόριθμος επίλυσης προβλημάτων γραμμικού προγραμματισμού είναι ο αλγόριθμος Simplex ο οποίος επινοήθηκε την δεκαετία του 1940. Το βασικό του μειονέκτημα είναι ότι δεν εγγυάται ότι θα εκτελεστεί σε πολυωνυμικό χρόνο, οπότε υπάρχουν σενάρια στα οποία θα είναι αρκετά αργός. Παρόλα αυτά πρόκειται για μια μέθοδο αρκετά αξιόπιστη και γρήγορη. Αρκετά χρόνια αργότερα, την δεκαετία του 1980 εμφανίστηκε ο ελλειψοειδής αλγόριθμος (Ellipsoid Algorithm) ο οποίος φάνηκε πως μπορούσε να λύσει τα προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού σε πολυωνυμικό χρόνο. Παρά την αρχική αισιοδοξία ο αλγόριθμος αυτός ήταν αρκετά αργός στην πράξη. Άλλοι δυο αλγόριθμοι με πολυωνυμική προλυπλοκότητα που ακολούθησαν ήταν ο αλγόριθμος Criss-cross καθώς και οι μέθοδοι εσωτερικού σημείου (interior point methods) (9).

2.4 Θεωρία δυισμού

Πρωτού γίνει μια ανάλυση του πολυεπίπεδου και διεπίπεδου προγραμματισμού είναι σημαντικό να αναφερθεί μια ιδιαίτερη έννοια σε ό,τι αφορά τον γραμμικό προγραμματισμό. Πρόκειται για την έννοια του δυισμού. Θεωρώντας το πρόβλημα γραμμικού προγραμματισμού [2.6]-[2.8]

$$\min_x z = c^T x \quad [2.6]$$

υπό τους περιορισμούς

$$Ax \geq b \quad [2.7]$$

$$x \geq 0 \quad [2.8]$$

μπορεί να οριστεί το δυικό πρόβλημα [2.9]-[2.11]

$$\max_y z = b^T y \quad [2.9]$$

υπό τους περιορισμούς

$$A^T y \leq c \quad [2.10]$$

$$y \geq 0$$

[2.11]

Το πρώτο πρόβλημα [2.6]-[2.8] καλείται αρχικό πρόβλημα (primal problem) ενώ το δεύτερο [2.9]-[2.11] είναι γνωστό ως δυικό ανάλογο ή δυικό αντίστοιχο (dual problem). Με λίγα λόγια οι μεταβλητές στο αρχικό πρόβλημα γίνονται σταθερές στο δυικό και αντίστροφα ενώ παράλληλα αντιστρέφεται η λογική της αντικειμενικής συνάρτησης. Αυτό σημαίνει ότι ένα πρωτεύον πρόβλημα μεγιστοποίησης μετασχηματίζεται σε πρόβλημα ελαχιστοποίησης και αντίστροφα. Υπάρχουν δύο θεωρήματα στα οποία βασίζεται η θεωρία του δυισμού, το Θεώρημα Ασθενούς Δυικότητας (Weak Duality Theorem) και το Θεώρημα Ισχυρής Δυικότητας (Strong Duality Theorem). Σύμφωνα με το πρώτο, αν το αρχικό πρόβλημα είναι μη φραγμένο τότε το αντίστοιχο δυικό είναι μη εφικτό και αντίστροφα. Σύμφωνα με το δεύτερο, αν το αρχικό πρόβλημα έχει βέλτιστη λύση, θα έχει και το δυικό ανάλογο του. Απόρροια αυτών των δύο θεωρημάτων αποτελούν οι συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας (complementary slackness conditions). Σύμφωνα με αυτές, αν μια μεταβλητή του δυικού προβλήματος είναι μεγαλύτερη του μηδενός τότε ο αντίστοιχος περιορισμός στο αρχικό πρόβλημα πρέπει να είναι ανισοτικός και αντίστροφα. Επίσης, αν μια μεταβλητή του δυικού προβλήματος δεν έχει περιορισμούς τότε ο αντίστοιχος περιορισμός στο αρχικό πρόβλημα είναι ισοτικός και αντίστροφα (4) (5) (10).

Συγκεντρωτικά ,λοιπόν,

Πίνακας 1 : Μετατροπή αρχικού προβλήματος στο δυικό ανάλογο του

Αρχικό Πρόβλημα	Δυικό Πρόβλημα
Ελαχιστοποίηση	Μεγιστοποίηση
Ισοτικός περιορισμός	Μεταβλητή χωρίς περιορισμούς
Ανισοτικός περιορισμός \geq	Μη αρνητική μεταβλητή
Ανισοτικός περιορισμός \leq	Μη θετική μεταβλητή
Μεταβλητή χωρίς περιορισμούς	Ισοτικός περιορισμός
Μη αρνητική μεταβλητή	Ανισοτικός περιορισμός \geq
Μη θετική μεταβλητή	Ανισοτικός περιορισμός \leq

2.5 Θεωρία Παιγνίων, Μοντέλο Ηγεσίας, Stackelberg Game

Όπως στην καθημερινή ζωή καλούμαστε να πάρουμε συνεχώς αποφάσεις ανάλογα με τις συνθήκες και τις δράσεις άλλων ανθρώπων, έτσι και οι επιχειρήσεις, οι παραγωγοί και γενικά όσοι μετέχουν σε οποιαδήποτε ανταγωνιστική διαδικασία υποχρεούνται να λάβουν αποφάσεις με κριτήριο το πως αντιδρούν οι υπόλοιποι συναγωνιστές ή ανταγωνιστές τους. Η θεωρία παιγνίων είναι η επιστήμη η οποία οριοθετεί ένα πλαίσιο για την μελέτη προβλημάτων λήψης αποφάσεων. Η βασική προϋπόθεση της θεωρίας αυτής βρίσκεται στο γεγονός ότι κάθε οντότητα θα πρέπει να λάβει βέλτιστες αποφάσεις κάνοντας μια πρόβλεψη για το τι έχουν αποφασίσει να κάνουν οι ανταγωνιστές της. Αν για παράδειγμα ένας παραγωγός προβλέψει ότι ο ανταγωνιστής του θα αυξήσει τον επόμενο καιρό την τιμή διάθεσης του προϊόντος του θα πρέπει να λάβει μια απόφαση για το αν θα ακολουθήσει αυτή την μεταβολή, αν θα την πραγματοποιήσει νωρίτερα από αυτόν ή αν δεν πράξει τίποτα. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι το δίλημμα του φυλακισμένου. Αποτελεί γνωστό παράδειγμα της θεωρίας παιγνίων και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως πρότυπο σε πολλές καταστάσεις του πραγματικού κόσμου που αφορούν συμπεριφορές συνεργασίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το μοντέλο ηγεσίας το οποίο είναι κατάλληλο για την περιγραφή συστημάτων που περιλαμβάνουν μια πλειάδα συμμετεχόντων και χαρακτηρίζονται από την ύπαρξη αποσυγκεντρωμένης πληροφορίας και μιας ιεραρχικής δομής λήψης αποφάσεων. Το μοντέλο ηγεσίας περιγράφηκε πρώτη φορά το 1934 από τον γερμανό οικονομολόγο Heinrich Freiherr von Stackelberg.

Σύμφωνα με το παιχνίδι του Stackelberg υπάρχουν δύο παίχτες οι οποίοι καλούνται να λάβουν κάποιες αποφάσεις. Ο παίχτης ο οποίος κινείται πρώτος ονομάζεται ηγέτης ενώ ο παίχτης που αντιδρά στην απόφαση του ηγέτη λέγεται ακόλουθος. Και οι δυο παίχτες του παιχνιδιού αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και οι αποφάσεις του ενός επηρεάζουν τον τρόπο που θα δράσει ο άλλος (11). Συνοπτικά, ο ηγέτης κινείται πρώτος με στόχο να ελαχιστοποιήσει την αντικειμενική του συνάρτηση και ανακοινώνει την στρατηγική του στον ακόλουθο. Ο ακόλουθος παρατηρεί την κίνηση του ηγέτη και αμέσως μετά δρα με γνώμονα το προσωπικό του όφελος. Σε μια καθημερινή προσέγγιση το παιχνίδι του Stackelberg θα μπορούσε να ήταν μια παρτίδα σκάκι. Τα άσπρα παίζουν πρώτα και είναι ο ηγέτης του προβλήματος. Έχοντας αποφασίσει την αρχική στρατηγική που θα ακολουθήσουν κάνουν την πρώτη τους κίνηση. Τα μαύρα αυτόματα γίνονται ο ακόλουθος. Τα μαύρα βλέπουν την κίνηση των άσπρων, αντιλαμβάνονται τα πιθανά ανοίγματα και αποφασίζοντας την στρατηγική που θα ακολουθήσουν περνάνε στην δικιά τους κίνηση.

2.6 Πολυεπίπεδος και Διεπίπεδος Προγραμματισμός

Προβλήματα πολυεπίπεδου προγραμματισμού καλούνται όλα τα προβλήματα μαθηματικού προγραμματισμού τα οποία χαρακτηρίζονται από μια ιεραρχία σε ό,τι αφορά την λήψη των αποφάσεων. Πρόκειται για ιδιαίτερα περίπλοκα προβλήματα ειδικά όταν

αποτελούνται από τρία επίπεδα και πάνω. Αντικείμενο αυτής της εργασίας αποτελεί ο διεπίπεδος μαθηματικός προγραμματισμός και αυτός θα αναλυθεί.

Το πρόβλημα διεπίπεδου προγραμματισμού είναι μια ειδίκευση του προβλήματος πολυεπίπεδου προγραμματισμού με την προϋπόθεση ότι υπάρχουν δύο οντότητες με αλληλοσυγκρουόμενα συμφέροντα που καλούνται να λάβουν αποφάσεις. Το πρόβλημα διεπίπεδου προγραμματισμού είναι το πρόβλημα ηγεσίας που αναφέρθηκε παραπάνω όπου το επίπεδο του ηγέτη ονομάζεται άνω επίπεδο και το επίπεδο του ακόλουθου κάτω επίπεδο.

2.6.1 Μαθηματική Διατύπωση Προβλήματος Διεπίπεδου Προγραμματισμού

Η μαθηματική διατύπωση του προβλήματος δεν διαφέρει πολύ με αυτή του γραμμικού προγραμματισμού ή του γενικότερου μαθηματικού προγραμματισμού που παρασυστάστηκε παραπάνω (παράγραφοι 2.2 Μαθηματικός Προγραμματισμός και 2.3 Γραμμικός Προγραμματισμός). Ο ηγέτης παίρνει μια απόφαση για να βελτιστοποιήσει την αντικειμενική του συνάρτηση ως προς μια μεταβλητή που ελέγχει. Αποφασίζει δηλαδή με γνώμονα το $\min_x F(x, y)$ με βάση μια σειρά από ισοτικούς $-H(x, y)=0$ - και ανισοτικούς $-G(x, y) \leq 0$ - περιορισμούς. Εν συνεχεία, ο ακόλουθος παίρνει την ανατροφοδότηση της δράσης του ηγέτη και θέλει με την σειρά του να βελτιστοποιήσει την δική του αντικειμενική συνάρτηση ως προς την μεταβλητή που ελέγχει. Επηρεαζόμενος από την κίνηση του ηγέτη αποφασίζει με γνώμονα το $\min_y f(x, y)$ με βάση μια σειρά από ισοτικούς $-h(x, y)=0$ - και ανισοτικούς $-g(x, y) \leq 0$ - περιορισμούς (4) (5) (10) (11) (12) (13).

Με λίγα λόγια το μαθηματικό πρόβλημα διεπίπεδου προγραμματισμού έχει την εξής μορφή

$$\min_x F(x, y) \quad [2.12]$$

υπό τους περιορισμούς

$$G(x, y) \leq 0 \quad [2.13]$$

$$H(x, y) = 0 \quad [2.14]$$

Και

$$\min_y f(x, y) \quad [2.15]$$

υπό τους περιορισμούς

$$g(x, y) \leq 0 \quad [2.16]$$

$$h(x, y) = 0 \quad [2.17]$$

2.6.2 Εφαρμογές Διεπίπεδου Προγραμματισμού

Προβλήματα διαφόρων επιστημών μπορούν να μοντελοποιηθούν μέσω του διεπίπεδου προγραμματισμού με την προϋπόθεση να περιλαμβάνουν μια ιεραρχική σχέση μεταξύ δύο διαφορετικών επιπέδων απόφασης (12). Έτσι, προβλήματα διεπίπεδου προγραμματισμού εμφανίζονται στην επιστήμη της οργάνωσης και διοίκησης (για παράδειγμα εύρεση βέλτιστης τοποθεσίας εγκατάστασης, βέλτιστες περιβαλλοντικές ρυθμίσεις, βέλτιστη κατανομή πιστώσεων, βέλτιστη ενεργειακή πολιτική κ.ά.), στον οικονομικό σχεδιασμό (για παράδειγμα βέλτιστη κοινωνική πολιτική, βέλτιστη τιμολόγηση ενέργειας, βέλτιστη παραγωγή πετρελαίου κ.ά.), την μηχανική (για παράδειγμα βέλτιστος σχεδιασμός κ.ά.), την χημεία, τις περιβαλλοντικές επιστήμες κ.ά.

2.6.3 Αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων διεπίπεδου προγραμματισμού

Το πρόβλημα διεπίπεδου προγραμματισμού ακόμα και στην πιο απλή μορφή του, όπου όλες οι συναρτήσεις και οι περιορισμοί είναι γραμμικοί είναι μη επιλύσιμο σε πολυωνυμικό χρόνο (κλάση NP hard). Έχουν αναπτυχθεί πολλοί αλγόριθμοι οι οποίοι στοχεύουν στο να λύσουν προβλήματα διεπίπεδου προγραμματισμού. Στόχος τους είναι η ελαχιστοποίηση ή μεγιστοποίηση αντικειμενικών συναρτήσεων. Προσπαθούν δηλαδή να εντοπίσουν τοπικά μέγιστα και ελάχιστα.

Η πιο συνηθισμένη μέθοδος επίλυσης προβλημάτων διεπίπεδου προγραμματισμού -και αυτή που χρησιμοποιείται στην παρούσα διπλωματική εργασία- είναι αυτή η οποία μετατρέπει το πρόβλημα διεπίπεδου προγραμματισμού σε απλό πρόβλημα βελτιστοποίησης ενός επιπέδου μέσω των συνθηκών Karush-Kuhn-Tucker (KKT conditions). Όταν οι συναρτήσεις f και g είναι συνεχώς διαφορίσιμες και κυρτές και η h συνεχώς διαφορίσιμη και γραμμική τότε το πρόβλημα του κάτω επιπέδου μπορεί να αντικατασταθεί από τις ισοδύναμες συνθήκες KKT. Η αντικατάσταση του προβλήματος κάτω επιπέδου με τις ισοδύναμες συνθήκες ακολουθεί μια μεθοδολογία. Αρχικά υπολογίζεται η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος κάτω επιπέδου [2.18]

$$L(x, y, \mu_i, \lambda_j) = f(x, y) + \sum_i \mu_i * g_i(x, y) + \sum_j \lambda_j * h_j(x, y) \quad [2.18]$$

Όπου μ_i και λ_j οι δυικές μεταβλητές των ισοτικών και ανισοτικών περιορισμών g και h ή αλλιώς οι συντελεστές Lagrange. Αφότου υπολογίστηκε η λαγκρανζιανή συνάρτηση, σε αυτή πρέπει να τηρούνται οι συνθήκες στασιμότητας (ύπαρξη τοπικών ακροτάτων). Αυτό

σημαίνει ότι η παράγωγος της συνάρτησης [2.18] για όλα τα y θα πρέπει να ισούται με μηδέν [2.19].

$$\begin{aligned} \nabla_y L(x, y, \mu_i, \lambda_j) &= \nabla_y f(x, y) \\ &+ \sum_i \mu_i * \nabla_y g_i(x, y) + \sum_j \lambda_j * \nabla_y h_j(x, y) = 0 \end{aligned} \quad [2.19]$$

Κατά την αντικατάσταση του προβλήματος με τις συνθήκες ΚΚΤ θα πρέπει να συνεχίσουν να ικανοποιούνται και οι συνθήκες που όριζε το πρόβλημα κάτω επιπέδου (συνθήκες εφικτότητας) [2.16] , [2.17]. Τέλος, θα πρέπει να ισχύουν οι συνθήκες εφικτότητας του δευτερεύοντος προβλήματος καθώς και οι συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας [2.20] , [2.21].

$$\mu_i \geq 0 \quad [2.20]$$

$$\mu_i g_i(x, y) = 0 \quad [2.21]$$

Το ισοδύναμο πρόβλημα ενός επιπέδου που προκύπτει έπειτα από τις παραπάνω σχέσεις είναι το ακόλουθο

$$\min_x F(x, y) \quad [2.22]$$

$$G(x, y) \leq 0 \quad [2.23]$$

$$H(x, y) = 0 \quad [2.24]$$

$$\begin{aligned} \nabla_y L(x, y, \mu_i, \lambda_j) &= \nabla_y f(x, y) \\ &+ \sum_i \mu_i * \nabla_y g_i(x, y) + \sum_j \lambda_j * \nabla_y h_j(x, y) = 0 \end{aligned} \quad [2.25]$$

$$h(x, y) = 0 \quad [2.26]$$

$$0 \leq -g_i(x, y) \perp \mu_i \geq 0 \quad [2.27]$$

Το τελευταίο πρόβλημα που πρέπει να αντιμετωπιστεί είναι οι μη γραμμικότητες. Καθώς το διεπίπεδο πρόβλημα έχει μετατραπεί σε απλό πρόβλημα ενός επιπέδου, θα πρέπει να μετασχηματιστεί και σε γραμμικό ώστε η επίλυση του να είναι πιο γρήγορη. Χαρακτηριστικό παράδειγμα μη γραμμικότητας είναι η σχέση [2.27]. Σε ό.τι αφορά την γραμμικοποίηση αυτής εφαρμόζεται η μέθοδος του μεγάλου M (Big M Method) σύμφωνα με την οποία

$$\begin{aligned} [0 \leq -g_i(x, y)] \perp [\mu_i \geq 0] &\Leftrightarrow \\ 0 \leq -g_i(x, y) \leq M * u \quad &\& \quad 0 \leq \mu_i \leq (1 - u) * M \end{aligned} \quad [2.28]$$

Όπου M μεγάλος ακέραιος αριθμός και u δυαδική μεταβλητή

Σύμφωνα με την σχέση [2.27] απαιτείται είτε η συνάρτηση g να είναι μηδέν, είτε η δυική μεταβλητή μ να είναι μηδέν. Η σχέση [2.28] λέει ότι αν το u είναι 0 τότε η συνάρτηση g θα είναι μικρότερη ή ίση του μηδενός και ταυτόχρονα μεγαλύτερη η ίση του μηδενός. Άρα θα πρέπει να είναι αναγκαστικά μηδέν. Ταυτόχρονα η μ θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη ίση του μηδενός και ταυτόχρονα μικρότερη ή ίση ενός μεγάλου ακέραιου αριθμού. Αυτό σημαίνει ότι μπορεί να δεχθεί όποια τιμή θέλει. Όταν η δυαδική μεταβλητή είναι ένα αντί για μηδέν ισχύουν τα ακριβώς αντίθετα (14).

Άλλοι αλγόριθμοι που χρησιμοποιούνται για την επίλυση προβλημάτων διεπίπεδου προγραμματισμού είναι οι ακόλουθοι οι οποίοι αναφέρονται μόνο ονομαστικά (15) (16):

Μέθοδοι Συναρτήσεων Ποινής (Penalty Function Methods)

Αλγόριθμοι Κλίσης (Descent Methods)

Αλγόριθμοι Διακλάδωσης και Περιορισμού (Branch and Bound Algorithms)

Αλγόριθμοι Ακραίου Σημείου (Extreme Point Algorithms)

Μέθοδοι Περιοχής Εμπιστοσύνης (Trust Region Methods)

Μέθοδοι Complementary Pivoting

Κεφάλαιο 3 : Διεσπαρμένη Παραγωγή-Διαχειριστής Διεσπαρμένων Πόρων

3.1 Εισαγωγή

Τα υπάρχοντα δίκτυα βασίζονται κυρίως σε μεγάλους κεντρικούς σταθμούς παραγωγής. Οι σταθμοί αυτοί συνδέονται με συστήματα μεταφοράς υψηλής τάσης τα οποία με την σειρά τους συνδέονται με συστήματα μέσης και χαμηλής τάσης. Η παροχή ισχύος και ο έλεγχος του δικτύου γίνονται καθημερινά από κεντρικές εγκαταστάσεις. Αυτό δημιουργεί ένα πρόβλημα. Ο καταναλωτής απουσιάζει από την γενικότερη διαδικασία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Στόχος των επόμενων ετών είναι τα δίκτυα διανομής να έχουν ενεργό ρόλο και να υποστηρίζουν μια αμφίδρομη ροή ισχύος μεταξύ παραγωγού και καταναλωτή. Επιπλέον μια μεγάλη ποσότητα ηλεκτρισμού που παράγεται μέχρι τώρα από συμβατικούς σταθμούς παραγωγής θα προέρχεται από διεσπαρμένη παραγωγή και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

3.2 Διεσπαρμένη Παραγωγή και κατηγορίες της

Η διεσπαρμένη παραγωγή ορίζεται ως η παραγωγή ενέργειας μικρής κλίμακας , με τιμές που κυμαίνονται από 1kW μέχρι 100MW. Στην διεσπαρμένη παραγωγή οι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι εγκατεστημένες κοντά στην κατανάλωση.

Οι Διεσπαρμένοι Πόροι (ΔΠ , Distributed Energy Resources- DER) χαρακτηρίζονται από την ικανότητα παραγωγής , αποθήκευσης ή ελεγχόμενης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Σε ό,τι αφορά το κομμάτι της αποθήκευσης και της κατανάλωσης οι διεσπαρμένες μονάδες αποθήκευσης ενέργειας είναι ιδιαίτερα σημαντικές για δύο λόγους. Αρχικά, σε περίπτωση σφάλματος στις γραμμές μεταφοράς μπορούν να τεθούν σε λειτουργία και εν συνεχεία να τροφοδοτήσουν με ενέργεια τους καταναλωτές γρήγορα. Επιπλέον, συμβάλουν στην σταθεροποίηση των επιπέδων της τάσης και συχνότητας (17).

Σε ό,τι αφορά το κομμάτι της παραγωγής διακρίνονται πέντε τύποι διεσπαρμένων πόρων ανάλογα με την εγκατεστημένη ισχύ τους (18).

Micro : Η εγκατεστημένη ισχύς δεν ξεπερνά τα 2kW, ενώ οι μονάδες παραγωγής είναι συνδεδεμένες στο δίκτυο χαμηλής τάσης. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της κατηγορίας αποτελούν φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις στα σπίτια.

Mini : Η εγκατεστημένη ισχύς είναι μερικά δεκάδες kW . Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν οι κυψέλες καυσίμων καθώς και οι μονάδες συνδιασμένης παραγωγής. Τα συστήματα ισχύος με κυψέλες καυσίμου είναι αθόρυβα καθαρά και αποδοτικά συστήματα παραγωγής καθώς χρησιμοποιούν μια ηλεκτροχημική διαδικασία (όχι καύση) για μετατροπή του καυσίμου σε ηλεκτρισμό.

Small : Επίσης η εγκατεστημένη ισχύς είναι μερικά δεκάδες και εκατοντάδες kW και μικρότερη από 1MW. Χαρακτηριστικά παραδείγματα εδώ αποτελούν σταθμοί βιομάζας καθώς και μικροί υδροηλεκτρικοί.

Medium : Η εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγαλύτερη από 1MW και μικρότερη από 5MW. Σε αυτή την κατηγορία περιλαμβάνονται επίσης εγκαταστάσεις βιομάζας , υδροηλεκτρικοί σταθμοί καθώς και μικρές τοπικές μονάδες αιολικής ενέργειας

Large : Η εγκατεστημένη ισχύς είναι μεγαλύτερη από 5MW. Συγκαταλέγονται μονάδες συμπαραγωγής , υδροηλεκτρικές μονάδες. Πολλά αιολικά πάρκα επίσης συνδέονται στο δίκτυο διανομής.

3.3 Πλεονεκτήματα Διεσπαρμένων πόρων

Οι διεσπαρμένοι πόροι αποτελούν μια τεχνολογία σχετικά καινούργια στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας η οποία κατά πολλούς θα αλλάξει τον τρόπο με τον οποίο παράγεται και καταναλώνεται η ενέργεια. Ως νέα τεχνολογία συγκεντρώνει αρκετά πλεονεκτήματα έναντι της συμβατικής παραγωγής σε κεντρικούς σταθμούς. Αυτά τα πλεονεκτήματα μπορεί να είναι οικονομικά, κατασκευαστικά, τεχνικά και περιβαλλοντικά.

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής εγκαθίστανται στο δίκτυο της κατανάλωσης. Κάποιες φορές η εγκατάσταση τους γίνεται ακόμα και στο ίδιο το κτίριο στο οποίο θα προσφέρουν την ενέργεια τους. Αυτό το χαρακτηριστικό, τους προσφέρει δύο βασικά πλεονεκτήματα. Αρχικά μειώνεται η ποσότητα της ενέργειας η οποία χάνεται. Στα σύγχρονα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας, οι απώλειες και η αξιοπιστία της ενέργειας αποτελούν κάποια από τα σημαντικότερα αντικείμενα που προσπαθούν να βελτιστοποιηθούν. Καθώς η ενέργεια παράγεται από σταθμούς παραγωγής , περνάει στα δίκτυα μεταφοράς και εν συνεχεία στα δίκτυα κατανάλωσης. Αυτό σημαίνει ότι οι απώλειες της είναι σαφώς περισσότερες σε σχέση με το να ήταν η εγκατάσταση παραγωγής απευθείας στην πλευρά της κατανάλωσης. Το δεύτερο πλεονέκτημα έχει να κάνει με τις γραμμές μεταφοράς και τους υποσταθμούς μετατροπής της τάσης. Για να ενταχθούν νέες μονάδες στην παραγωγική διαδικασία θα πρέπει να κατασκευαστούν νέες ή να διορθωθούν οι ήδη υπάρχοντες γραμμές ώστε να μπορούν να υποστηρίξουν τα επιπλέον ποσά ενέργειας. Παράλληλα , χρειάζονται και νέοι (ή αναβαθμισμένοι) σταθμοί μετατροπής ώστε να μετασχηματίζουν την τάση. Είναι λογικό πως ο αριθμός των νέων γραμμών και υποσταθμών θα μειωθεί αν οι μονάδες βρίσκονται ήδη στην πλευρά της κατανάλωσης , πράγμα το οποίο θα μειώσει τόσο το κόστος κατασκευής όσο και την πολυπλοκότητα του δικτύου (19).

Άλλο ένα χαρακτηριστικό των διεσπαρμένων πόρων αποτελεί η φιλικότητα τους προς το περιβάλλον. Σε ένα πρώτο επίπεδο και σε απόλυτη συνάρτηση με τις απώλειες , μείωση

των απωλειών οδηγεί σε σημαντική μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO₂ emissions) . Χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του Ηνωμένου Βασιλείου , στο οποίο έρευνες έδειξαν ότι μείωση των απωλειών ενέργειας κατά 1% οδήγησε σε ελάττωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 2 εκατομμύρια τόνους το χρόνο (20). Επιπλέον ως μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής χρησιμοποιούνται είτε ανανεώσιμες πηγές ενέργειας είτε πιο εξευγενισμένα καύσιμα όπως είναι το φυσικό αέριο και το diesel. Αυτό όπως είναι αναμενόμενο μειώνει τους εκπεμπόμενους ρύπους κάνοντας την τεχνολογία πιο φιλική στο περιβάλλον.

Οι διεσπαρμένοι πόροι χαρακτηρίζονται από μια σειρά τεχνικών-κατασκευαστικών πλεονεκτημάτων. Για να κατασκευαστεί μια εγκατάσταση μεγάλης ισχύος απαιτείται ένα μεγάλο αρχικό κεφάλαιο, αρκετός χρόνος και ένας συγκεκριμένος χώρος. Σε ό.τι αφορά τον χώρο επιλογής για έναν μεγάλο σταθμό παραγωγής θα πρέπει να γίνει έρευνα της τοποθεσίας , του εδάφους , των γεωλογικών και μετεωρολογικών χαρακτηριστικών. Αυτό αφενός δημιουργεί το πρόβλημα της μη ύπαρξης αρκετών τέτοιων περιοχών και αφετέρου χρειάζεται χρόνο. Αντίθετα, μικρές μονάδες παραγωγής που θα εγκατασταθούν στην κατανάλωση μπορούν να υπάρχουν ακόμα και στα ίδια τα σπίτια (με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα τα φωτοβολταϊκά στις οροφές κτιρίων). Στο κομμάτι του αρχικού κεφαλαίου μεγαλύτερη ισχύς σημαίνει και μεγαλύτερη επένδυση. Ένας αποκεντρωμένος σταθμός παραγωγής δεν μπορεί να είναι μικρής ισχύος και συνεπώς μικρού κεφαλαίου (χαρακτηριστικά ένα αιολικό πάρκο μπορεί να στοιχίσει αρκετά εκατομμύρια ευρώ σε αρχική επένδυση) σε αντίθεση με μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Η απόφαση κατασκευής ενός σταθμού παραγωγής μεγάλης ισχύος ακολουθείται από μια χρονοβόρα διαδικασία μέχρι την ημέρα λειτουργίας του σταθμού. Χρειάζονται μελέτες , κατασκευές των εξαρτημάτων, κατασκευές των διασυνδέσεων , δημοπρασίες και άλλες τέτοιες διαδικασίες οι οποίες χρειάζονται κάποια χρόνια για να διαικπεραιωθούν. Από την άλλη πλευρά η διεσπαρμένη παραγωγή χαρακτηρίζεται από μικρότερο χρονικό διάστημα εγκατάστασης. Αυτό έχει και ένα ακόμα οφέλος . Η τεχνολογία των διεσπαρμένων πόρων μπορεί να λειτουργεί σύμφωνα με την ζήτηση. Αν η ζήτηση αυξηθεί τότε μπορούν εύκολα και γρήγορα να εγκατασταθεί περισσότερη διεσπαρμένη παραγωγή για να την καλύψει (21).

Η ανάγκη για βελτιωμένη αξιοπιστία και καλύτερη ποιότητα ενέργειας μπορεί να οδηγήσει στην απόφαση για την εγκατάσταση τοπικών μονάδων. Είναι αναμενόμενο ότι η ύπαρξη εγκατεστημένης ισχύος στην κατανάλωση μπορεί να λειτουργήσει και ως εφεδρεία. Αν δηλαδή συμβεί κάποιο σφάλμα και ανοίξουν οι προστασίες σε κάποιο κομμάτι του δικτύου οι διεσπαρμένοι πόροι , μιας και είναι στο κομμάτι της κατανάλωσης, θα μπορέσουν να τροφοδοτήσουν αμέσως τους χρήστες.

Μεγάλη βοήθεια θα προσφέρουν οι διεσπαρμένοι πόροι και σε απομακρυσμένες και μη διασυνδεδεμένες με το κεντρικό δίκτυο περιοχές. Αυτές οι περιοχές (στην Ελλάδα τέτοιες περιοχές θα μπορούσαν να ήταν μικρά νησιά μακριά από τον ηπειρωτικό κορμό) όντας σε μεγάλη απόσταση από τον κορμό του δικτύου απαιτούν αρκετά μεγάλο κόστος για την σύνδεση τους. Μέσω της εγκατάστασης διεσπαρμένης παραγωγής σε αυτά θα μπορούν να λειτουργούν σαν αυτόνομα συστήματα καλύπτοντας την ζήτηση τους.

Η διεσπαρμένη παραγωγή βοηθά στην βελτίωση του συντελεστή χρησιμοποίησης των δικτύων δεδομένου ότι πλέον περιορίζονται οι απαιτήσεις για την υπέρ-διαστασιολόγηση των εγκαταστάσεων για την αντιμετώπιση μικρών σε διάρκεια αιχμών. Τέλος, υποστηρίζει το δίκτυο με βοηθητικές υπηρεσίες όπως είναι η παροχή άεργου ισχύος και υποστήριξης τάσης η παροχή παραγωγής με γρήγορη απόκριση για αποφυγή διακοπής της κατανάλωσης και η δυνατότητα επανεκκίνησης μετά από διακοπή. Αυτές οι βοηθητικές υπηρεσίες μπορεί να προσφέρονται κάθε μία χωριστά ή περισσότερες από μία ταυτόχρονα.

3.4 Μειονεκτήματα Διεσπαρμένων πόρων

Κάθε νόμισμα έχει δύο όψεις και έτσι οι διεσπαρμένοι πόροι έχουν κάποια μειονεκτήματα τα οποία εμποδίζουν την ευρεία χρήση τους ακόμα (21).

Ένα από τα βασικότερα ζητήματα που προκύπτει είναι το υψηλό κόστος. Συγκεκριμένα, απαιτούν υψηλότερο αρχικό κεφάλαιο ανά kW εγκατεστημένης ισχύος συγκριτικά με τα μεγάλα κεντρικά εργοστάσια παραγωγής.

Οι διεσπαρμένοι πόροι θα επηρεάσουν τα επίπεδα τάσης του συστήματος. Το δίκτυο κατανάλωσης μέχρι στιγμής έχει μια απλή μορφή, είναι ακτινικό μονής κατεύθυνσης. Μεγάλης ονομαστικής ισχύος διεσπαρμένες μονάδες θα επηρεάσουν σημαντικά τα επίπεδα τάσης και ρεύματος καθώς θα μετατρέψουν το δίκτυο της κατανάλωσης σε ένα δίκτυο με αμφίδρομη ροή ισχύος.

Η διεσπαρμένη παραγωγή θα έχει σημαντική επίδραση στις προστασίες. Μέσω αυτών η κατανάλωση, από ένα απλό παθητικό δίκτυο μετατρέπεται σε ένα ενεργητικό δίκτυο ιδιοκατανάλωσης. Αυτό αλλάζει τα ρεύματα σφάλματος και απαιτεί περεταίρω μελέτη των προστασιών.

Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής χαρακτηρίζονται από μια μεγάλη αβεβαιότητα. Καθώς οι μονάδες αυτές χρησιμοποιούν συνήθως ανανεώσιμες πηγές ενέργειας οι οποίες εξαρτώνται από τα καιρικά φαινόμενα (ταχύτητα ανέμου για της ανεμογεννήτριες, ηλιοφάνεια για τα φωτοβολταϊκά) είναι δύσκολο να έχουν μια σταθερή παραγωγή και δυσκολεύουν την διαδικασία πρόβλεψης και κατανάλωσης του φορτίου. Αυτή η αβεβαιότητα, όπως είναι λογικό μπορεί να δημιουργήσει και προβλήματα ευστάθειας του δικτύου.

3.5 Αλληλεπίδραση με την τοπική αγορά

Μέχρι στιγμής έχουν αναφερθεί τα τεχνικά χαρακτηριστικά των διεσπαρμένων πόρων. Παρόλα αυτά αυτό το κομμάτι δεν αποτελεί την ουσία αυτής της διπλωματικής εργασίας. Αν και είναι ένα πολύ σημαντικό ζήτημα το οποίο χρήζει μεγάλης ανάλυσης το που θα τοποθετηθούν ποιες μονάδες και με τι εγκατεστημένες ισχείς, εδώ το ζήτημα που μας ενδιαφέρει είναι άλλο. Αφού αυτές οι μονάδες υπάρχουν ήδη στο τοπικό δίκτυο πως θα ενσωματωθούν στην αγορά ενέργειας ώστε να λάβουν μέρος στις καθημερινές

αγοραπωλησίες . Κάθε τοπικός παραγωγός θέλει να πουλήσει την ενέργεια που παράγει και να αποκτήσει κάποιο κέρδος από αυτήν. Όπως είναι λογικό η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας όπως και κάθε άλλη αγορά είναι ανταγωνιστική και έχει την μορφή δημοπρασίας. Αυτό που συμβαίνει είναι ένας αλγόριθμος να λαμβάνει υπόψη την ζήτηση του φορτίου της ημέρας και να ειδοποιεί τις μονάδες παραγωγής ποιά ώρα της ημέρας πρέπει να παράγουν πόση ποσότητα. Εκτός αυτών η επίλυση του αλγορίθμου υπολογίζει και την οριακή τιμή του συστήματος. Οι καταναλωτές (ή οι εκπρόσωποι τους) είτε πρόκειται για κλασσικούς καταναλωτές είτε για ευέλικτους πρέπει να κάνουν τις δηλώσεις φορτίου τους . Οι παραγωγοί (ή οι εκπρόσωποι τους) λοιπόν είτε πρόκειται για τοπικούς είτε για συμβατικούς θα πρέπει να κάνουν προσφορές παραγωγής. Η όλη δράση των παραγωγών σε αυτή τη διαδικασία χαρακτηρίζεται όμως από μια αβεβαιότητα. Κάθε παραγωγός πρέπει να πράξει ανάλογα με το τι θα αποφασίσουν να κάνουν οι υπόλοιποι παραγωγοί και καταναλωτές τους συστήματος. Υπό αυτό το πρίσμα ο κάθε παραγωγός μπορεί να δράσει με έναν από τους ακόλουθους τρόπους (3)

Θεωρεί ότι η προσφορά του δεν μπορεί να επηρεάσει την οριακή τιμή του συστήματος , την θεωρεί δεδομένη και τυχαία και λύνει πρόβλημα βελτιστοποίησης ώστε να προσδιορίσει τις ποσότητες που πρέπει να προσφέρει.

Θεωρεί ότι η προσφορά του μπορεί να επηρεάσει την οριακή τιμή του συστήματος. Ελέγχει και χρησιμοποιεί στο πρόβλημα του τις δηλώσει φορτίου και τις προσφορές ενέργειας των υπόλοιπων συμμετεχόντων.

Λαμβάνει υπόψη την στρατηγική συμπεριφορά των άλλων συμμετεχόντων που και αυτοί δρουν με βάση την μεγιστοποίηση του κέρδους τους.

Διακρίνονται δυο κατηγορίες ενσωμάτωσης των διεσπαρμένων πόρων στην τοπική αγορά η οποίες θα αναλυθούν στις επόμενες παραγράφους .

Ενσωμάτωση Διεσπαρμένων Πόρων Απουσία Διαχειριστή Διεσπαρμένων Πόρων
Ενσωμάτωση Διεσπαρμένων Πόρων Παρουσία Διαχειριστή Διεσπαρμένων Πόρων.

3.6 Ενσωμάτωση Διεσπαρμένων Πόρων στην τοπική αγορά Απουσία Διαχειριστή Διεσπαρμένων Πόρων

Απουσία του Διαχειριστή Διεσπαρμένων Πόρων (ΔΔΠ , DER Aggregator) το βάρος της ευθύνης του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού εμπίπτει στον λειτουργό της αγοράς. Η διαχείριση του ενεργειακού προγραμματισμού ακολουθεί μια σταθερή διαδικασία η οποία έχει ως εξής

Οι παραγωγοί οι οποίοι έχουν στην κατοχή τους συμβατικές μονάδες παραγωγής υποβάλλουν τις προσφορές τους. Οι υποβολές αυτές αποτελούνται από ένα ζεύγος τιμής ποσότητας το οποίο αντικατοπτρίζει την επιθυμία του παραγωγού να προσφέρει κάποια

χρονική στιγμή ένα συγκεκριμένο ποσό ενέργειας σε μια δεδομένη τιμή.

Οι παραγωγοί οι οποίοι έχουν στην διάθεση τους τοπικές μονάδες παραγωγής ακολουθούν ακριβώς την ίδια διαδικασία.

Οι καταναλωτές με ευέλικτα φορτία υποβάλλουν και αυτοί δηλώσεις με τις προσφορές τους . Οι υποβολές αυτές όπως και στο κομμάτι των παραγωγών αποτελούνται από ένα ζεύγος τιμής ποσότητας. Τα ευέλικτα φορτία έχουν την δυνατότητα να προσαρμόζονται στις εκάστοτε συνθήκες. Δηλαδή μπορούν να αυξήσουν ή να μειώσουν την κατανάλωση τους ανάλογα με το τι χρειάζεται το δίκτυο για αυτό και συμμετέχουν στον προγραμματισμό.

Οι απλοί καταναλωτές με μη ευέλικτα φορτία δεν λαμβάνουν μέρος στην διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς και ένταξης των μονάδων γιατί απλά θα καταναλώσουν ενέργεια και δεν θα αποτελέσουν βαρόμετρο για το αν μια μονάδα θα ενταχθεί ή όχι.

Καθώς ο λειτουργός της αγοράς λάβει όλες αυτές τις προσφορές θα επιλύσει το πρόβλημα του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού. Η επίλυση του προβλήματος έχει ως σκοπό να επιλέξει ποιες μονάδες θα λειτουργούν και πότε ώστε να καλύπτεται η ζήτηση των φορτίων των καταναλωτών. Είναι λογικό ότι η ζήτηση θα μπορούσε να καλυφθεί με διάφορους τρόπους καθώς δεν θα λειτουργούν όλες οι μονάδες συνεχώς, οπότε οι συνδιασμοί είναι πολλοί. Ο λειτουργός της αγοράς ωστόσο, λύνει το πρόβλημα του ενεργειακού προγραμματισμού με σκοπό να μεγιστοποιήσει το κοινωνικό όφελος , σκεπτόμενος δηλαδή και τον ίδιο τον καταναλωτή. Μετά την ολοκλήρωση της διαδικασίας που περιγράφηκε ανακοινώνονται τα αποτελέσματα. Σε αυτά συμπεριλαμβάνονται το πότε και πως θα λειτουργήσουν οι συμβατικές μονάδες παραγωγής αλλά και το πότε θα ενταχθούν οι διεσπαρμένοι πόροι.

3.7 Ενσωμάτωση Διεσπαρμένων Πόρων στην τοπική αγορά Παρουσία Διαχειριστή Διεσπαρμένων Πόρων

Πρωτού γίνει η ανάλυση της λειτουργίας του Διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων πρέπει να δοθεί ένας ορισμός για το τι είναι αυτή η οντότητα. Ως διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων νοείται μια οντότητα η οποία διαχειρίζεται και συντονίζει τους τοπικούς πόρους , τους εκπροσωπεί στις διαδικασίες της αγοράς και υποβάλλει εκ μέρους τους προσφορές.

Ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων λαμβάνει αποφάσεις που βασίζονται σε δύο στόχους. Από την μια θέλει να υποβάλει κατάλληλες προσφορές (ζεύγη τιμών-ποσοτήτων) ώστε οι μονάδες που εκπροσωπεί να ενταχθούν στην διαδικασία αγοραπωλησίας ηλεκτρικής ενέργειας. Από την άλλη θέλει να συμμετέχει στις διαδικασίες της αγοράς με βέλτιστο τρόπο. Για τον λόγο αυτό δρά με τρεις τρόπους . (14) (22) (23)

Υπογράφει συμβάσεις με τους ιδιοκτήτες των μονάδων διεσπαρμένων πόρων οι οποίες εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά των μονάδων τους. Σύμφωνα με αυτές τις συμβάσεις

ορίζονται ζεύγη τιμών ποσοτήτων οι οποίες προσφέρουν ανταμοιβές ή ποινές ανάλογα με την ικανότητα των διεσπαρμένων πόρων να προσφέρουν την απαιτούμενη ενέργεια που έχουν δεσμευτεί (είτε σε αυξημένη είτε σε μειωμένη ζήτηση)

Διαχειρίζεται ένα χαρτοφυλάκιο ώστε να υπάρχουν αποθέματα ενέργειας σε περίπτωση μεγάλης ζήτησης (αιχμή φορτίου).

Αγοράζει ενέργεια από το δίκτυο και από τους τοπικούς παραγωγούς που εκπροσωπεί για την ικανοποίηση φορτίου

Πουλάει ενέργεια στο δίκτυο από τμήματα του δικτύου που εμφανίζουν περίσσεια ενέργειας καθώς και ενέργεια που προέρχεται από ευέλικτους καταναλωτές

Σύμφωνα με τα παραπάνω η διαδικασία για την ενσωμάτωση διεσπαρμένων πόρων στην διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας έχει ως εξής. Ο λειτουργός της αγοράς εκτελεί μια πρόβλεψη φορτίου για την επόμενη μέρα. Αφότου η πρόβλεψη ολοκληρωθεί και γνωρίζει πόση ποσότητα ισχύος θα καταναλωθεί την επόμενη μέρα επικοινωνεί με τον διαχειριστή ώστε να ενημερωθεί για τα ποσά ενέργεια που μπορούν να προσφέρουν οι μονάδες που εκπροσωπεί. Με τη σειρά του διαχειριστής θέλοντας να ενημερώσει τον λειτουργό της αγοράς επικοινωνεί με τους κατόχους των συγκεκριμένων μονάδων και τους υποβάλει σε μια διαδικασία στην οποία θα τρέξουν τις μονάδες τους και θα βεβαιωθεί ότι είναι ικανές να προσφέρουν τα ποσά ισχύος που θα δηλώσει. Μόλις η διαδικασία αυτή ολοκληρωθεί και πάρει τα αποτελέσματα από τους ιδιοκτήτες των διεσπαρμένων πόρων θα τα μεταφέρει στον λειτουργό της αγοράς και η διαδικασία θα ολοκληρωθεί.

3.8 Μικροδίκτυα- Microgrids

Με τον όρο μικροδίκτυο ορίζεται ένα τοπικό δίκτυο αποτελούμενο από μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και ηλεκτρικά φορτία που συνήθως λειτουργούν συνδεδεμένα και σύγχρονα με το κεντρικό δίκτυο. Ωστόσο, έχουν την δυνατότητα να αποσυνδεθούν από αυτό και να λειτουργούν αυτόνομα ως αυτοτελή συστήματα (24). Η σημασία και η λειτουργία των μικροδικτύων μπορεί να αναδειχτεί με ένα απλό παράδειγμα. Έστω ένα νοσοκομείο το οποίο είναι συνδεδεμένο κατευθείαν στο κεντρικό δίκτυο. Σε περίπτωση σφάλματος, το κεντρικό δίκτυο αποσυνδέεται και σταματά να τροφοδοτεί με ενέργεια τους καταναλωτές και συνεπώς το νοσοκομείο. Αν όμως το νοσοκομείο ήταν συνδεδεμένο σε ένα δικό του μικροδίκτυο τα πράγματα θα ήταν διαφορετικά. Θα αποσυνδεόταν το μικροδίκτυο από το κεντρικό σύστημα, αλλά ταυτόχρονα θα μπορούσε να λειτουργήσει αυτόνομα και το νοσοκομείο θα τροφοδοτούνταν με ενέργεια.



Διάγραμμα 1 : Σχηματική απεικόνιση μικροδικτύου (40)

Όπως φαίνεται και από το παραπάνω παράδειγμα τα μικροδίκτυα παρουσιάζουν μια σειρά από πλεονεκτήματα τα οποία μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως εξής (25):

Βελτίωση ποιότητας ισχύος-Μείωση απωλειών ισχύος : Μιας και η ισχύς δεν πρέπει να ακολουθήσει την παραδοσιακή διαδρομή για να φτάσει στην κατανάλωση, μιας και βρίσκεται στην πλευρά της είναι καλύτερης ποιότητας. Μειώνονται οι αρμονικές των ρευμάτων , οι βυθίσεις τάσης, οι τοπικές αντισταθμίσεις. Ταυτόχρονα όπως είναι λογικό μειώνονται και οι απώλειες ισχύος καθώς αυτή δεν χρειάζεται να μεταφερθεί μέσω γραμμών μεταφοράς μεγάλου μήκους. Με λίγα λόγια για την ίδια κατανάλωση ενέργειας απαιτείται λιγότερη παραγωγή

Μείωση Εκπομπών Αερίων του Φαινομένου του Θερμοκηπίου : Στην γενικότερη περίπτωση οι μονάδες παραγωγής που εγκαθίστανται στα μικροδίκτυα χρησιμοποιούν πράσινες πηγές ενέργειας οι οποίες είναι φιλικές προς το περιβάλλον.

Εύκολη Επισκευή : Εδώ μπορεί να γίνει διαχωρισμός σε δύο κατηγορίες. Αν το μικροδίκτυο διαθέτει συσκευές αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας τα πράγματα είναι απλά. Σε περίπτωση σφάλματος , οι μονάδες παραγωγής αποσυνδέονται και τα φορτία τροφοδοτούνται μέσω των συσκευών αποθήκευσης. Για όσο χρόνο δηλαδή χρειαστεί για να διορθωθεί το σφάλμα το σύστημα δεν σταματάει την λειτουργία του. Από την άλλη πλευρά , μια βλάβη στο κεντρικό δίκτυο θα σήμαινε αποσύνδεση πολλών φορτίων. Από την στιγμή που υπάρχει οργάνωση σε μικροδίκτυα είναι δυνατόν σε περίπτωση σφαλμάτων να υπάρξει μερική αποσύνδεση φορτίων και όχι ολική (αν πχ το σφάλμα είναι στο τέλος του μικροδικτύου).

Τα πλεονεκτήματα των μικροδικτύων είναι πολλά και δίνουν το συμπέρασμα ότι τα επόμενα χρόνια η οργάνωση σε μικροδίκτυα πρόκειται να αυξηθεί. Στην ιδανική περίπτωση θα ήταν επιθυμητή η ύπαρξη ενός μεγάλου δικτύου αποτελούμενο από πολλά μικροδίκτυα.

Αυτή η ποσοτική αύξηση των μικροδικτύων αλλά και η ποιοτική τους εξέλιξη πρόκειται να είναι άμεσα συνδεδεμένη με την εξέλιξη τεχνολογιών όπως

Επικοινωνία μέσω διαδικτύου : Η επικοινωνία μέσω διαδικτύου έχει κάνει ραγδαία βήματα τόσο σε κοινωνικό όσο και σε επιστημονικό επίπεδο. Τα διάφορα μικροδίκτυα επικοινωνώντας τόσο μεταξύ τους όσο και με το κεντρικό δίκτυο άμεσα μέσω του διαδικτύου θα έχουν μια καλύτερη εποπτεία της παραγωγής και της ζήτησης της ενέργειας. Έτσι , θα γίνεται μια πιο εξελιγμένη και προσαρμοστική χρήση της.

Λογισμικό και Τεχνολογίες Τεχνητής Νοημοσύνης : Τα συστήματα θα μπορούν να λειτουργούν πρακτικά αυτόματα μέσω αυτών των τεχνολογιών. Θα μπορούν να επιλύσουν μικρά σφάλματα από μόνα τους ενώ θα μπορούν να χρησιμοποιήσουν δεδομένα παλαιότερων ημερών ώστε να αυξήσουν την απόδοσή τους.

Μονάδες Παραγωγής : Η εξέλιξη των τεχνολογιών στο κομμάτι της παραγωγής μπορεί να φέρει νέες μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρής ισχύος . Αυτό αφενός μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των συστημάτων και αφετέρου να προσφέρει εναλλακτικούς τρόπους παραγωγής.

3. 9 Ενεργειακές Κοινότητες - Energy Communities

Ως ενεργειακές κοινότητες , ορίζονται τοπικοί αστικοί συνεταιρισμοί αποκλειστικού σκοπού μέσω των οποίων προτίστωσ οι πολίτες ως φυσικά ή νομικά πρόσωπα μπορούν να δραστηριοποιηθούν στον ενεργειακό τομέα , αξιοποιώντας καθαρές πηγές ενέργειας. Από τον ορισμό και όλες προκύπτει ένα βασικό όφελος που θα προσφέρει η οργάνωση σε τέτοιες κοινότητες (26). Η χρήση καθαρών πηγών ενέργειας θα είναι ευρεία και θα έρθει να αντικαταστήσει τις υπάρχουσες μονάδες παραγωγής που επιβάρυναν το περιβάλλον. Μεγάλοι σταθμοί παραγωγής ορυκτών καυσίμων θα δώσουν την θέση τους σε μικρά φωτοβολταϊκά πάρκα , ανεμογεννήτριες και μικρούς σταθμούς βιομάζας. Το δεύτερο και πλέον βασικό πλεονέκτημα που έρχονται να προσφέρουν οι ενεργειακές κοινότητες είναι η αλλαγή στους ρόλους των συμμετεχόντων στην διαδικασία παραγωγής-κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Μέχρι πρότινος, ακολουθείται μια μονόδρομη διαδικασία στην οποία κάποιος παράγει την ηλεκτρική ενέργεια και κάποιος άλλος την καταναλώνει. Ο καταναλωτής ,δηλαδή, δεν παράγει. Μέσω των ενεργειακών κοινοτήτων όμως ο καταναλωτής θα γίνει και παραγωγός. Έχοντας στην επίβλεψη του κάποιες μονάδες παραγωγής , θα παράγει την ενέργεια που θα καταναλώνει κάνοντας την λεγόμενη ιδιοκατανάλωση. Ταυτόχρονα, όμως είναι εξαιρετικά πιθανό κάποια στιγμή να έχει περίσσεια ενέργειας την οποία δεν μπορεί να καταναλώσει. Αυτή η περίσσεια ενέργειας θα αποδοθεί πίσω στο δίκτυο και εν συνεχεία θα πωληθεί αποφέροντας και το αντίστοιχο κέρδος. Ταυτόχρονα και με την βοήθεια συσκευών αποθήκευσης οι ενεργειακές κοινότητες θα αποτελούν έναν μηχανισμό αύξησης της ενεργειακής αποδοτικότητας. Ένα επιπλέον κοινωνικό όφελος που μπορεί να προκύψει από αυτή τις ενεργειακές κοινότητες είναι η μείωση της ενεργειακής φτώχειας. Σε εθνικό επίπεδο η επιδότηση της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των ευάλωτων νοικοκυριών γίνεται μέσω του κοινωνικού οικιακού τιμολογίου. Πλέον αυτό μπορεί να αλλάξει αν τα ίδια γίνουν μικροπαραγωγοί της δικής τους ενέργειας που χρειάζονται μέσω επιδοτήσεων για μικρές μονάδες παραγωγής όπως

για παράδειγμα κάποια φωτοβολταϊκά πάνελ. Τέλος , σε εθνικό και πάλι επίπεδο μιας και η χώρα διαθέτει πολλά νησιά των οποίων η διασύνδεση με τον κεντρικό κορμό είναι δύσκολη θα ενισχυθεί η ενεργειακή ασφάλεια και η αυτάρκεια , καθώς θα υπάρχει ιδιοκατανάλωση και δεν θα χρειάζεται μεταφορά ηλεκτρικής ενέργειας από τα ηπειρωτικά – αστικά κέντρα.

Στην Ελλάδα η σύσταση και λειτουργία των ενεργειακών κοινοτήτων θεσμοθετήθηκε από τον νόμο 4513/2018. Σύμφωνα με το άρθρο 2 το οποίο δημοσιεύθηκε στην εφημερίδα της κυβερνήσεως μέλη μιας ενεργειακής κοινότητας μπορεί να είναι

Φυσικά πρόσωπα με πλήρη δικαιοπρακτική ικανότητα

Νομικά πρόσωπα δημοσίου δικαίου εκτός των οργανισμών τοπικής αυτοδιοίκησης α΄ και β΄ βαθμού ή νομικά πρόσωπα ιδιωτικού δικαίου

Οργανισμοί τοπικής αυτοδιοίκησης α΄ βαθμού ίδιας περιφέρειας εντός της οποίας βρίσκεται η έδρα της ενεργειακής κοινότητας ή επιχειρήσεις αυτών

Οργανισμοί τοπικής αυτοδιοίκησης β΄ βαθμού της έδρας της ενεργειακής κοινότητας

Στα επόμενα άρθρα που ακολουθούν στην δημοσίευση περιγράφονται επιπλέον οι σκοποί και οι δραστηριότητες των ενεργειακών κοινοτήτων που δεν θα αναλυθούν στην παρούσα εργασία.

Κλείνοντας με το κομμάτι των ενεργειακών κοινοτήτων είναι σημαντικό να αναφερθούν κάποια παραδείγματα εγκαταστάσεων που μπορεί να περιλαμβάνονται σε μια τέτοια οντότητα

Συστήματα φωτοβολταϊκών σε κτίρια (ιδιωτικά ή δημόσια) και πάρκα για την αυτοπαραγωγή των μελών της κοινότητας

Αιολικά πάρκα υπό την λειτουργία μελών της κοινότητας ή των οργανισμών τοπικών αυτοδιοίκησης για αυτοπαραγωγή ή/και για την πώληση ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της απόδοσης πίσω στο δίκτυο

Σταθμοί βιομάζας ή βιοαερίου για παραγωγή ενέργειας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα εκμετάλλευσης αυτού του είδους ενέργειας αποτελούν οι αγροτικές κοινότητες

Μονάδες ανανεώσιμων πηγών ενέργειας με συστήματα αποθήκευσης

4.10 Smart Grids – Έξυπνα δίκτυα

Με τον όρο έξυπνο δίκτυο (Smart Grid) ορίζεται ένα ηλεκτρικό δίκτυο που χρησιμοποιεί εξελιγμένες τεχνολογίες τηλεπικοινωνιών , ηλεκτρονικών ισχύος και ηλεκτρονικών υπολογιστών (27). Σε σχέση με τα παροδοσιακά δίκτυα που χρησιμοποιούνται μέχρι σήμερα η νέα τεχνολογία των ευφυών δικτύων παρουσιάζει αρκετές διαφορές. Αρχικά η διαδικασία παραγωγής της ηλεκτρικής ενέργειας γίνεται μέσω μεγάλων σταθμών απομακρυσμένων από το επίπεδο της κατανάλωσης. Μετά την παραγωγή η ενέργεια

μεταφέρεται μέσω του δικτύου μεταφοράς στους καταναλωτές για την αξιοποίηση της. Ακολουθεί δηλαδή μια μονή κατεύθυνση από την παραγωγή στην κατανάλωση και όχι αντίστροφα. Τα ευφυή δίκτυα στοχεύουν σε μια αξιοποίηση μονάδων μικρής ισχύος στην πλευρά της κατανάλωσης. Με αυτές τις συνθήκες το μοντέλο παραγωγού καταναλωτή θα αλλάξει καθώς ο καταναλωτής θα έχει την δυνατότητα να παράγει. Έτσι, θα υπάρχει μια αμφίδρομη επικοινωνία και ανταλλαγή ενέργειας δίνοντας ταυτόχρονα περισσότερες επιλογές στον καταναλωτή/πελάτη. Παράλληλα το υπάρχον δίκτυο στερείται σε πλήθος αισθητήρων που είναι εγκατεστημένοι στις γραμμές μεταφοράς. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα αν συμβεί ένα σφάλμα κατά μήκος μιας γραμμής να είναι δύσκολο να προσδιοριστεί με ακρίβεια το σημείο βλάβης και κατεπέκταση να απαιτείται περισσότερος χρόνος για την αποκατάσταση σε σχέση με την νέα φιλοσοφία στην οποία θα προστεθούν αισθητήρες στις γραμμές για καλύτερη εποπτεία τους. Τέλος, μια βασική διαφορά μεταξύ των δύο δικτύων έχει να κάνει με την αυτοματοποίηση και την ψηφιοποίηση των διαδικασιών. Μέχρι στιγμής στα δίκτυα ακολουθείται μια ηλεκτρομηχανική προσέγγιση εποπτείας και επαναφοράς. Υπάρχει ένας τεχνικός ο οποίος παρακολουεί το σύστημα, ενημερώνεται για πιθανά σφάλματα και τα επιλύει ο ίδιος. Σύμφωνα με τη νέα φιλοσοφία τα δίκτυα όντας εφοδιασμένα με εξελιγμένα λογισμικά και τεχνολογίες τεχνητής νοημοσύνης θα μπορούν να ελέγχονται από μόνα τους και να επιλύουν μικρές βλάβες. Πιο συνοπτικά όλα αυτά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 2).

Πίνακας 2 : Διαφορές παραδοσιακών και έξυπνων δικτύων

Υπάρχον Ηλεκτρικό δίκτυο	Smart Grid
Ηλεκτρομηχανικό	Ψηφιακό
Επικοινωνία μονής κατεύθυνσης	Αμφίδρομη Επικοινωνία
Κεντρική Παραγωγή	Κατανεμημένη Παραγωγή
Λίγοι αισθητήρες	Πολλοί Αισθητήρες
Χειροκίνητος Έλεγχος	Αυτοέλεγχος
Χειροκίνητη Επαναφορά	Αυτοίαση
Λίγες Επιλογές για πελάτες	Πολλές Επιλογές για πελάτες

Κεφάλαιο 4 : Περιβάλλον Μοντελοποίησης

4.1 Εισαγωγή

Με την πάροδο των χρόνων και την ανάπτυξη της τεχνολογίας η επιστημονική κοινότητα καλείται να αντιμετωπίσει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο όλο και μεγαλύτερα προβλήματα τόσο σε όγκο όσο και σε χρονική διάρκεια. Για αυτόν ακριβώς τον λόγο έχουν αναπτυχθεί λογισμικά που μπορούν να επιλύσουν συστηματικά, μεγάλα προβλήματα σε πεπερασμένο χρόνο, με την βοήθεια ενός ηλεκτρονικού υπολογιστή. Πλέον, προβλήματα εκατοντάδων μεταβλητών και εξισώσεων μπορούν να περατωθούν από έναν κοινό προσωπικό υπολογιστή σε λίγα μόλις δευτερόλεπτα. Είναι λογικό ότι ένα πρόβλημα εκατοντάδων εξισώσεων και μεταβλητών θα ήταν σχεδόν αδύνατο να λυθεί με χαρτί και μολύβι, πράγμα που αναδεικνύει την χρησιμότητα και την σημασία της υπολογιστικής συστηματοποίησης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία , όπου στόχος είναι η βελτιστοποίηση προβλημάτων διεπίπεδου προγραμματισμού αφότου πρώτα έχουν μετατραπεί στα αντίστοιχα μικτού ακέραιου προγραμματισμού, χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό GAMS.

4.2 Γενικά στοιχεία για το GAMS

Το Γενικό Αλγεβρικό Σύστημα Μοντελοποίησης (General Algebraic Modeling System ή αλλιώς GAMS) είναι ένα ισχυρό εργαλείο επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης και μαθηματικού προγραμματισμού. Αν και χρησιμοποιείται μόνο για αυτά τα θέματα είναι καθολικό, με την έννοια ότι μπορεί να επιλύσει όλες τις κατηγορίες μαθηματικού προγραμματισμού είτε πρόκειται για απλό γραμμικό, μικτό ακέραιο, μη γραμμικό ακόμα και στοχαστικό προγραμματισμό (28) (29).

Η ιδέα του λογισμικού GAMS παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1976 στο ISMP (International Symposium on Mathematical Programming) στη Βουδαπέστη. Η σύλληψη της ιδέας έγινε από μαθηματικούς και οικονομολόγους οι οποίοι υποστήριζαν ότι η βελτιστοποίηση είναι μια κομψή και ισχυρή δομή για την επίλυση επιστημονικών προβλημάτων της καθημερινής ζωής. Έκτοτε το GAMS εφαρμόζεται σε πολλούς κλάδους των επιστημών όπως είναι η μηχανική, η οικονομία, η διοίκηση επιχειρήσεων και έργων. Η ευρεία χρήση του δικαιολογείται από τα πλεονεκτήματα που προσφέρει στον χρήστη, κάποια εκ των οποίων είναι τα εξής:

Διαχωρίζει την διαδικασία μοντελοποίησης με την διαδικασία επίλυσης. Σε αυτό το περιβάλλον ο χρήστης έχει ως μοναδική δουλειά να μοντελοποιήσει το πρόβλημα και να γράψει τις εξισώσεις τις μεταβλητές και τις παραμέτρους. Δεν χρειάζεται να ασχοληθεί με την επίλυση του προβλήματος καθώς αυτή γίνεται αυτόματα από το λογισμικό. Ο χρήστης το μόνο που έχει να κάνει είναι να επιλέξει το εργαλείο επίλυσης.

Αφότου ο κώδικας του χρήστη τρέξει πέραν των αποτελεσμάτων θα εμφανιστεί στην οθόνη και μια λίστα με το πως τρέχουν οι εξισώσεις του και το πως γεμίζουν οι πίνακες που έχει δηλώσει και χρησιμοποιήσει. Αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί μπορεί να γίνει έλεγχος του προγράμματος ανεξάρτητα με τα αποτελέσματα. Ο χρήστης να μπορεί να διαμορφώσει άποψη για το αν τα αποτελέσματα δεν είναι τα αναμενόμενα λόγω λογικών λαθών ή λόγω λαθών στα δεδομένα.

Το GAMS είναι ένα από τα λογισμικά που αναφέρθηκαν και στην εισαγωγή. Έχει μεγάλη ταχύτητα και μικρή κατανάλωση μνήμης πράγμα το οποίο καθιστά δυνατή την επίλυση ενός προβλήματος εκατοντάδων εξισώσεων σε μόλις λίγα δευτερόλεπτα.

Οι κώδικες που γράφονται σε αυτό το περιβάλλον είναι εύκολοι στην ανάγνωση, την τροποποίηση και την διόρθωση. Αυτό συμβαίνει διότι το GAMS δέχεται όλα τα στοιχεία σε μορφή παρόμοια με αυτή που θα γράφονταν στο χέρι. Συνεπώς, είναι πολύ πιο εύκολο για τον χρήστη να διαβάσει το πρόγραμμα του, ή το πρόγραμμα κάποιου άλλου, και να δει τι λείπει ή τι παραπάνω υπάρχει.

Οι κώδικες έχουν μικρό μέγεθος. Το GAMS κάνει από μόνο του τις συστοιχίες μεταξύ όμοιων πραγμάτων. Αυτό σημαίνει ότι ένας κώδικας που θα τρέξει για χρονικό ορίζοντα 24 ωρών θα έχει ίδιο συντακτικό μέγεθος με τον αντίστοιχο που θα τρέξει για 8760 ώρες, γιατί το GAMS θα κάνει όλες τις παρόμοιες πράξεις εσωτερικά. Θα χρειαστεί, δηλαδή, να πληκτρολογηθεί μια εξίσωση και έπειτα αυτή θα επαναληφθεί για 1,2,24 ή και 8760 ώρες.

Το περιβάλλον αυτό παρέχει μια εύκολη και γρήγορη σύνδεση τόσο με το Microsoft Excel όσο και με την Matlab. Ο χρήστης το μόνο που έχει να κάνει είναι να πληκτρολογήσει μια σειρά από εντολές και ύστερα είτε τα δεδομένα του θα εισέρχονται στο GAMS μέσω του

Microsoft Excel ή της Matlab είτε τα αποτελέσματα του θα αποθηκεύονται σε αρχεία ενός εκ των δύο προγραμμάτων. Αυτή η διασύνδεση αφενός μειώνει τον όγκο του κώδικα κάνοντας τον πιο ευανάγνωστο και δίνει στον χρήστη την δυνατότητα να παρουσιάσει τα δεδομένα με τον τρόπο που θέλει. Αφετέρου συμβάλλει ώστε τα τελικά αποτελέσματα να είναι συγκεντρωμένα σε ένα εργαλείο το οποίο μπορεί εύκολα να τα επεξεργαστεί κάνοντας γραφικές παραστάσεις, βρίσκοντας μέσες τιμές κλπ.

4.3 Σύνταξη κώδικα σε GAMS

Ο προγραμματισμός στο GAMS αποτελείται από κάποια στάδια τα οποία αν ακολουθηθούν σωστά θα οδηγήσουν σε σωστό συντακτικό αποτέλεσμα. Αρχικά, θα πρέπει να γίνει δήλωση των Sets και των Alias. Εν συνεχεία θα πρέπει να δηλωθούν Scalars, Parameters και Variables. Αμέσως μετά θα πρέπει να γραφούν τα Equations ενώ η διαδικασία ολοκληρώνεται με την επιλογή του επιλυτή.

4.3.1 Sets-Subsets

Τα Sets και τα Subsets είναι τα γνωστά σύνολα και υποσύνολα. Ορίζονται γράφοντας την λέξη Sets σαν επικεφαλίδα και εν συνεχεία το όνομα του συνόλου ακολουθούμενο από τις τιμές που παίρνει.

4.3.2 Alias

Τα Alias είναι άμεσα συνδεδεμένα με τα Sets. Ουσιαστικά πρόκειται για την δομή που επιτρέπει στον χρήστη να δίνει παραπάνω ονόματα στο ίδιο σύνολο. Έτσι, σε κάποιο παρακάτω σημείο του κώδικα μπορεί να χρησιμοποιηθεί το σύνολο που δηλώθηκε σαν Alias και να δωθούν ακριβώς τα ίδια αποτελέσματα με την χρήση του αρχικού συνόλου.

4.3.3 Scalars

Πρόκειται για τις σταθερές του προβλήματος οι οποίες μένουν αναλοίωτες κατά την διάρκεια εκτέλεσης του και δεν εξαρτώνται από τα σύνολα. Θα μπορούσαν να ήταν αριθμοί όπως το π , μια δεδομένη σταθερή τιμή ή ένας μεγάλος αριθμός για χρήση σε ανισότητες.

4.3.4 Parameters

Οι παράμετροι είναι σταθερές του προβλήματος οι οποίες όμως εξαρτώνται από κάποια σύνολα, είναι δηλαδή οι γνωστοί πίνακες. Συνηθίζεται με τον όρο parameters να γίνεται αναφορά στους μονοδιάστατους πίνακες, αυτούς δηλαδή που έχουν εξάρτηση από ένα μόνο σύνολο.

4.3.5 Tables

Στην γενική περίπτωση πρόκειται για πίνακες σταθερών. Μιας και στην περίπτωση των parameters είναι διαδομένη η χρήση μονοδιάστατων πινάκων, στην περίπτωση των tables γίνεται λόγος για πίνακες περισσότερων διαστάσεων, δηλαδή πίνακες που εξαρτώνται από πάνω από ένα σύνολο. Μια σημαντική σημείωση: δεν χρειάζεται οι πίνακες στο GAMS να είναι μονοδιάστατοι ή δυοδιάστατοι, υπάρχει και οι επιλογή περισσότερων διαστάσεων.

Ένας κώδικας ο οποίος θα μοντελοποιούσε το πρόβλημα εκκαθάρισης της αγοράς θα είχε σαν παράμετρο έναν μονοδιάστατο πίνακα 24 γραμμών για την πρόβλεψη φορτίου κάθε ώρας της μέρας. Η ύπαρξη τόσο μεγάλων πινάκων στον κώδικα δυσκολεύει την εποπτεία του από τον χρήστη ή από αυτόν που καλείται να τον διορθώσει. Όπως αναφέρθηκε και στα πλεονεκτήματα του λογισμικού μπορεί να πραγματοποιηθεί εισαγωγή των δεδομένων και από το εργαλείο Microsoft Excel. Αυτό μπορεί να συμβεί με τον εξής απλό τρόπο. Αφού δηλωθούν οι παράμετροι που θα χρησιμοποιηθούν από τον κώδικα (μαζί με τα αντίστοιχα σύνολα τους) καλείται το αρχείο Excel που περιέχει αυτές τις τιμές. Η κλήση του αρχείου γίνεται με πολύ συγκεκριμένο τρόπο. Αναφέρονται σαφώς στην εντολή το όνομα του αρχείου, καθώς και το φύλλο και τα κελιά του φύλλου που θα αντιστοιχηθούν με την κάθε παράμετρο. Στο τέλος μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εντολή εξόδου display η οποία θα εμφανίσει στην οθόνη του GAMS τους πίνακες και ο χρήστης θα μπορεί άμεσα να ελέγξει αν η αντιστοιχία είναι σωστή ή όχι.

4.3.6 Variables

Είναι οι κλασσικές μεταβλητές. Αναπαριστούν μεγέθη τα οποία δεν είναι γνωστά και πρέπει να υπολογιστούν ενώ μπορούν να έχουν εξάρτηση από κανένα, ένα ή και περισσότερα σύνολα. Στο περιβάλλον του GAMS γίνεται διαφοροποίηση μεταξύ τριών τύπων μεταβλητών. Αυτές είναι οι απλές variables οι οποίες μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε τιμή θέλουν, οι positive variables οι οποίες μπορούν να πάρουν μόνο θετικές τιμές και οι binary variables οι οποίες μπορούν να πάρουν μόνο τις τιμές 0 και 1. Η διαφοροποίηση αυτή γίνεται έτσι ώστε να μειωθούν οι περιορισμοί του προβλήματος. Για παράδειγμα μια μεταβλητή που θα οριστεί σαν απλή και κάποιος περιορισμός απαιτήσει να είναι μεγαλύτερη ή ίση του μηδενός μπορεί να γραφεί κατευθείαν σαν positive variable και να μην χρειαστεί ο περιορισμός.

4.3.7 Equations

Πρόκειται για τις εξισώσεις του προβλήματος ή αλλιώς τους περιορισμούς του. Διακρίνονται δύο είδη περιορισμών οι ισωτικοί που δηλώνονται με τον συνδιασμό συμβόλων “=E=” και οι ανισωτικοί που δηλώνονται με τους συνδιασμούς “=G=” αν το αριστερό μέλος είναι μεγαλύτερο από το δεξιά και “=L=” αν το αριστερό μέλος είναι μικρότερο από το δεξιά. Πρέπει να τονιστεί ότι απαγορεύεται η χρήση διπλών ανισοτήτων. Αν μια μεταβλητή είναι ταυτόχρονα μεγαλύτερη από μια ποσότητα και μικρότερη από μια άλλη δεν μπορεί να μοντελοποιηθεί αυτή η διπλή ανίσωση με μια σχέση στο GAMS.

Επιπλέον, σε αυτό το περιβάλλον πρέπει ένας περιορισμός να δηλώνεται αρχικά και εν συνεχεία να γράφεται η εξίσωση του. Για τον λόγο αυτό προτείνεται όλοι οι ορισμοί των περιορισμών να είναι συγκεντρωμένοι και από κάτω να είναι γραμμένες όλες οι εξισώσεις. Κάθε εξίσωση για να είναι συντακτικά σωστή θα πρέπει να φέρει δίπλα της μέσα σε παρενθέσεις τα σύνολα από τα οποία αποτελείται. Σε κάθε άλλη περίπτωση το πρόγραμμα δεν θα περάσει τον συντακτικό έλεγχο και δεν θα δώσει αποτελέσματα.

Για την σύνταξη των εξισώσεων-περιορισμών του προβλήματος που μοντελοποιήθηκε στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκαν πέραν των κλασικών αριθμητικών πράξεων (+, -, *, /) τρεις ακόμα τελεστές

Τελεστής αθροίσματος : Πρόκειται για τις μαθηματικές σειρές. Χρησιμοποιείται όταν πρέπει να γίνει άθροιση πολλών στοιχείων τα οποία ανήκουν στην ίδια κατηγορία. Μιας και το GAMS δεν αναγνωρίζει τον σύμβολισμό $\sum_i x_i$ για την δήλωση μιας σειράς χρησιμοποιείται η δεσμευμένη λέξη “Sum” και δεξιά της τα σύνολα στα οποία πρέπει να γίνει η άθροιση και η μεταβλητή ή παράμετρος άθροισης.

Dollar Condition \$: Ο τελεστής “\$” είναι ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία αυτού του λογισμικού. Η σύνταξη του είναι η εξής “term \$ logical_condition” όπου term μπορεί να είναι μια οποιαδήποτε μεταβλητή, παράμετρος και στην γενική περίπτωση μια έκφραση. Έτσι η πρόταση αυτή διαβάζεται ως “κάνε το term υπό την προϋπόθεση ότι η λογική συνθήκη είναι αληθής”. Κατά βάση δηλαδή αυτός ο τελεστής είναι το αντίστοιχο if άλλων γλωσσών προγραμματισμού.

Ord operator : Ο τελεστής ord δεν είναι κάτι διαφορετικό από μια συνθήκη. Δηλαδή περιορίζει ένα σύνολο, ώστε μια μεταβλητή ή παράμετρος να μην εισέρχεται στην εξίσωση για όλες τις τιμές του συνόλου από το οποίο εξαρτάται αλλά για μερικές από αυτές. Είναι πολύ σημαντικός τελεστής γιατί σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας δεν αντιμετωπίζονται όλοι οι ζυγοί με τον ίδιο τρόπο (Ζυγός αναφοράς και ζυγοί φορτίου/παραγωγής).

4.3.7 Solvers

Το GAMS περιέχει ένα πλήθος 25 περίπου επιλυτών οι οποίοι ειδικεύονται σε κατηγορίες επίλυσης μαθηματικού προγραμματισμού. Για προβλήματα γραμμικού προγραμματισμού, μικτού ακέραιου προγραμματισμού χρησιμοποιούνται οι επιλυτές CPLEX, CUROBI, MOSEK, XPRESS. Για προβλήματα μη γραμμικού προγραμματισμού χρησιμοποιούνται οι CONOP, IPOPT, KNITRO, MINOS, SNOPT. Αναλυτικότερα οι επιλυτές του GAMS μαζί με τις εφαρμογές τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα, όπου

LP : Γραμμικός Προγραμματισμός (Linear Programming)

MIP : Μικτός Ακέραιος Προγραμματισμός (Mixed Integer Programming)

NLP : Μη γραμμικός Προγραμματισμός (Non Linear Programming)

MCP : Μικτό Πρόβλημα Συμπληρωματικότητας (Mixed Complementary Problem)

MPEC : Μαθηματικός Προγραμματισμός με Ισοτικούς Περιορισμούς (Mathematical Program with Equilibrium Constraints)

CNS : Περιορισμένο Μη γραμμικό Σύστημα (Constrained Nonlinear System)

DNLP : Μη Γραμμικός Προγραμματισμός με ασυνέχειες (Non Linear Programming with Discontinuous Derivatives)

MINLP : Μικτός Ακέραιος Μη Γραμμικός Προγραμματισμός (Mixed Integer Non Linear Programming)

QCP : Τετραγωνικά Περιορισμένα Προγράμματα (Quadratically Constrained Programs)

MIQCP : Τετραγωνικά Περιορισμένα Προγράμματα Μικτού Ακέραιου Προγραμματισμού (Mixed Integer Quadratically Constrained Programs)

Πίνακας 3: Επιλυτές προγράμματος GAMS (29)

	LP	MI P	NL P	MC P	MPE C	CN S	DNL P	MINL P	QC P	MIQC P	Stoc h.	Glob al
ALPHAECP								✓		✓		
ANTIGONE 1.1			✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓*
BARON	✓	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓*
BDMLP	✓	✓										
BONMIN 1.8								✓		✓		
CBC 2.10	✓	✓										
CONOPT 3	✓		✓			✓	✓		✓			
CONOPT 4	✓		✓			✓	✓		✓			
COUENNE 0.5			✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓*
CPLEX 12.10	✓	✓							✓	✓		
DECIS	✓										✓	

DICOPT								✓		✓		
GLOMIQO 2.3									✓	✓		✓*
GUROBI 9.0	✓	✓							✓	✓		
GUSS	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓	✓		
IPOPT 3.12	✓		✓			✓	✓		✓			
KESTREL	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓		
KNITRO 11.1	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓		
LGO	✓		✓				✓		✓			✓
LINDO 12.0	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓	✓	✓*
LINDOGLOB AL 12.0	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓		✓*
LOCALSOLV ER 9.0		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		
MILES				✓								
MINOS	✓		✓			✓	✓		✓			
MOSEK 9	✓	✓	✓				✓	✓	✓	✓		
MSNLP			✓				✓		✓			✓
NLPEC				✓	✓							
ODHCPLEX 4		✓								✓		
PATH				✓		✓						
SBB								✓		✓		
SCIP 6.0		✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓		✓*
SNOPT	✓		✓			✓	✓		✓			
SOLVEENGI NE	✓	✓										
SOPLEX 4.0	✓											
XA	✓	✓										
XPRESS 33.01	✓	✓							✓	✓		

Κεφάλαιο 5 : Βέλτιστη ενσωμάτωση διεσπαρμένων πόρων στην τοπική αγορά

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο θα αναλυθεί το μαθηματικό πρόβλημα ένταξης διεσπαρμένων πόρων στην τοπική αγορά. Ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων καλείται να δημιουργήσει τις συνθήκες κάτω από τις οποίες θα εκκαθαριστεί η αγορά. Σε αυτή την μελέτη του θα πρέπει να λάβει υπόψην του τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά του κάθε παραγωγού (συμβατικού και τοπικού) , του κάθε φορτίου (ευέλικτου και μη) καθώς και του δικτύου (γραμμές μεταφοράς , ροή ενεργού ισχύος). Αρχικά παρουσιάζονται όλα τα μεγέθη τα οποία θα λάβουν μέρος στην διατύπωση του προβλήματος. Στην συνέχεια αναφέρονται τα επιμέρους προβλήματα καθώς και το τελικό πρόβλημα μικτού αέριου προγραμματισμού. Στο τέλος του κεφαλαίου γίνεται μια περιγραφή του μοντέλου που χρησιμοποιήθηκε για την μοντελοποίηση του τελικού προβλήματος.

5.2 Κατάλογος Συμβόλων

5.2.1 Σύνολα – Υποσύνολα

T : Σύνολο χρονικού ορίζοντα . Εδώ ασχολούμαστε με κάθε ώρα της ημέρας

D : Σύνολο ημερών. Έχει να κάνει με την απόφαση για μελέτη αν εβδομάδα , μήνα , χρόνο

S : Σύνολο βαθμίδων προσφορών

PB : Σύνολο τοπικών παραγωγών

DP : Σύνολο καταναλωτών των οποίων η ζήτηση ακολουθεί συγκεκριμένο προφίλ

DC : Σύνολο καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής φορτίου

DB : Σύνολο καταναλωτών με μη ευέλικτο φορτίο

DF : Σύνολο καταναλωτών με ευέλικτα φορτία

5.2.2 Παράμετροι

Πρόκειται για τα δεδομένα του προβλήματος τα οποία εξαρτώνται από τα τεχνικά και οικονομικά μεγέθη όπως αυτά θα αναλυθούν παρακάτω

$\bar{Q}_{pb,s,t,d}$: Μέγιστη ποσότητα προσφοράς που υποβάλλει ο τοπικός παραγωγός. Εξαρτάται από τον εκάστοτε τοπικό παραγωγό , την βαθμίδα προσφοράς και την περίοδο κατανομής.

$\bar{Q}_{dp,s,t,d}$: Μέγιστη ποσότητα ζήτησης που υποβάλλει ο καταναλωτής με προφίλ κατανάλωσης. Εξαρτάται από τον εκάστοτε καταναλωτή , την βαθμίδα προσφοράς και την περίοδο κατανομής.

$\bar{Q}_{dc,s,t,d}$: Μέγιστη ποσότητα ζήτησης που υποβάλλει ο καταναλωτής με δυνατότητα περικοπής φορτίου. Εξαρτάται από τον εκάστοτε καταναλωτή , την βαθμίδα προσφοράς και την περίοδο κατανομής.

$\bar{Q}_{db,s,t,d}$: Μέγιστη ποσότητα ζήτησης που υποβάλλει ο καταναλωτής με μη ευέλικτο φορτίο. Εξαρτάται από τον εκάστοτε ευέλικτο καταναλωτή , την βαθμίδα προσφοράς και την περίοδο κατανομής.

$\bar{Q}_{df,s,t,d}$: Μέγιστη ποσότητα ζήτησης που υποβάλλει ο καταναλωτής με ευέλικτο φορτίο. Εξαρτάται από τον εκάστοτε ευέλικτο καταναλωτή , την βαθμίδα προσφοράς και την περίοδο κατανομής.

$\bar{P}_{pb,s,t,d}$: Μέγιστη τιμή προσφοράς που υποβάλλει ο τοπικός παραγωγός. Εξαρτάται από τον εκάστοτε τοπικό παραγωγό , την βαθμίδα προσφοράς και την περίοδο κατανομής.

$\bar{P}_{dp,s}$: Μέγιστη τιμή ζήτησης που υποβάλλει ο καταναλωτής με προφίλ κατανάλωσης. Εξαρτάται από τον εκάστοτε καταναλωτή και την βαθμίδα προσφοράς .

$\bar{P}_{dc,s,t,d}$: Μέγιστη τιμή ζήτησης που υποβάλλει ο καταναλωτής με δυνατότητα περικοπής φορτίου. Εξαρτάται από τον εκάστοτε καταναλωτή , την βαθμίδα προσφοράς και την περίοδο κατανομής.

$\bar{P}_{db,s,t,d}$: Μέγιστη τιμή ζήτησης που υποβάλλει ο καταναλωτής με μη ευέλικτο φορτίο. Εξαρτάται από τον εκάστοτε καταναλωτή, την βαθμίδα προσφοράς και την περίοδο κατανομής.

$\lambda_{s,t,d}$: Οριακή τιμή συστήματος.

$T_{t,d}$: Συχνότητα εμφάνισης φορτίου.

$RU_{t,d}$: Μέγιστη διαφορά ποσότητας φορτίου που μπορεί να προσφέρει καταναλωτής με ευέλικτο φορτίο μεταξύ δύο διαδοχικών περιόδων κατανομής.

$\overline{RU}_{t,d}$: Μέγιστη ποσότητα φορτίου που μπορεί να προσφέρει κατά τη διάρκεια μιας ολόκληρης μέρας καταναλωτής με ευέλικτο φορτίο.

PP^{max} : Άνω όριο λιανικής τιμής αποζημίωσης παραγόμενης ενέργειας.

PM^{max} : Άνω όριο λιανικής τιμής χρέωσης φορτίου καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο.

CP^{max} : Άνω όριο λιανικής τιμής αποζημίωσης φορτίου περικοπής.

RP^{max} : Άνω όριο λιανικής τιμής χρέωσης φορτίου καταναλωτών.

GP^{min} : Ελάχιστη τιμή τιμολογούμενης προσφοράς παραγωγής διαχειριστή.

GP^{max} : Μέγιστη τιμή τιμολογούμενης προσφοράς παραγωγής διαχειριστή.

LP^{max} : Μέγιστη τιμή τιμολογούμενης δήλωσης φορτίου διαχειριστή.

GQ^{max} : Μέγιστη ποσότητα τιμολογούμενης προσφοράς παραγωγής διαχειριστή.

LQ^{max} : Μέγιστη ποσότητα τιμολογούμενης δήλωσης φορτίου διαχειριστή

M : Μεγάλος ακέραιος αριθμός.

5.2.3 Μεταβλητές

Πρόκειται για τις μεταβλητές απόφασης του προβλήματος, δηλαδή για τα μεγέθη τα οποία θα προσδιοριστούν μετά την επίλυση

$Q_{pb,s,t,d}$: Ποσότητα παραγωγής τοπικού παραγωγού. Εξαρτάται από τον εκάστοτε τοπικό παραγωγό, την βαθμίδα προσφοράς και την περίοδο της χρονικής κατανομής.

$Q_{dp,s}$: Ποσότητα ζήτησης φορτίου καταναλωτή με προφίλ κατανάλωσης. Εξαρτάται από τον εκάστοτε καταναλωτή και την βαθμίδα προσφοράς

$Q_{dc,s,t,d}$: Ποσότητα ζήτησης φορτίου καταναλωτή με δυνατότητα περικοπής. Εξαρτάται από τον εκάστοτε τοπικό παραγωγό, την βαθμίδα προσφοράς και την περίοδο της χρονικής κατανομής.

$Q_{ab,s,t,d}$: Ποσότητα ζήτησης φορτίου μη ευέλικτου καταναλωτή καταναλωτή. Εξαρτάται από τον εκάστοτε καταναλωτή την βαθμίδα προσφοράς και την περίοδο χρονικής κατανομής.

$Q_{df,t,d}$: Ποσότητα ζήτησης φορτίου ευέλικτου καταναλωτή. Εξαρτάται από τον εκάστοτε τοπικό παραγωγό και την περίοδο της χρονικής κατανομής.

$\overline{GP}_{t,d}$: Τιμή τιμολογούμενης προσφοράς παραγωγής.

$\overline{LP}_{t,d}$: Τιμή τιμολογούμενης δήλωσης φορτίου.

$\overline{GQ}_{t,d}$: Ποσότητα τιμολογούμενης προσφοράς παραγωγής.

$\overline{LQ}_{t,d}$: Ποσότητα τιμολογούμενης δήλωσης φορτίου.

PP_d : Λιανική τιμή αποζημίωσης παραγόμενης ενέργειας. Εξαρτάται μόνο από την ημέρα κατανομής.

RP : Λιανική τιμή χρέωσης φορτίου καταναλωτών.

CP_d : Λιανική τιμή αποζημίωσης φορτίου περικοπής. Εξαρτάται μόνο από την περίοδο κατανομής.

$PM_{t,d}$: Λιανική τιμή χρέωσης φορτίου καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο. Εξαρτάται μόνο από την περίοδο κατανομής.

$\gamma_{pb,s,t,d}$: Δυική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της τοπικής παραγωγής .

$\xi_{dp,s}$: Δυική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της ζήτησης φορτίου καταναλωτή .

$\varphi_{dc,s,t,d}$: Δυική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της περικοπής φορτίου .

$\psi_{db,s,t,d}$: Δυική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της ζήτησης.

$w_{df,t,d}^{min}$: Δυική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο των ευέλικτων φορτίων.

$w_{df,t,d}^{max}$: Δυική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο των ευέλικτων φορτίων.

$\pi_{df,t,d}^{min}$: Δυική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο των ευέλικτων φορτίων .

$\pi_{df,t,d}^{max}$: Δυική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της τοπικής παραγωγής .

$z_{pb,s,t,d}^1$: Δυαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της τοπικής παραγωγής . Πρώτη από τις συνολικά δύο.

$Z_{pb,s,t,d}^2$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της τοπικής παραγωγής .Δεύτερη από τις συνολικά δύο.

$Z_{dp,s}^1$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της ζήτησης φορτίου καταναλωτή .Πρώτη από τις συνολικά δύο.

$Z_{dp,s}^2$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της ζήτησης φορτίου καταναλωτή .Δεύτερη από τις συνολικά δύο.

$Z_{dc,s,t,d}^1$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της περικοπής φορτίου .Πρώτη από τις συνολικά δύο.

$Z_{dc,s,t,d}^2$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της περικοπής φορτίου .Δεύτερη από τις συνολικά δύο

$Z_{db,s,t,d}^1$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της ζήτησης. Πρώτη από τις συνολικά δύο.

$Z_{db,s,t,d}^2$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της ζήτησης. Δεύτερη από τις συνολικά δύο.

$Z_{df,t,d}^1$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της τοπικής παραγωγής .Πρώτη από τις συνολικά πέντε.

$Z_{df,t,d}^2$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της τοπικής παραγωγής .Δεύτερη από τις συνολικά πέντε.

$Z_{df,t,d}^3$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της τοπικής παραγωγής .Τρίτη από τις συνολικά πέντε.

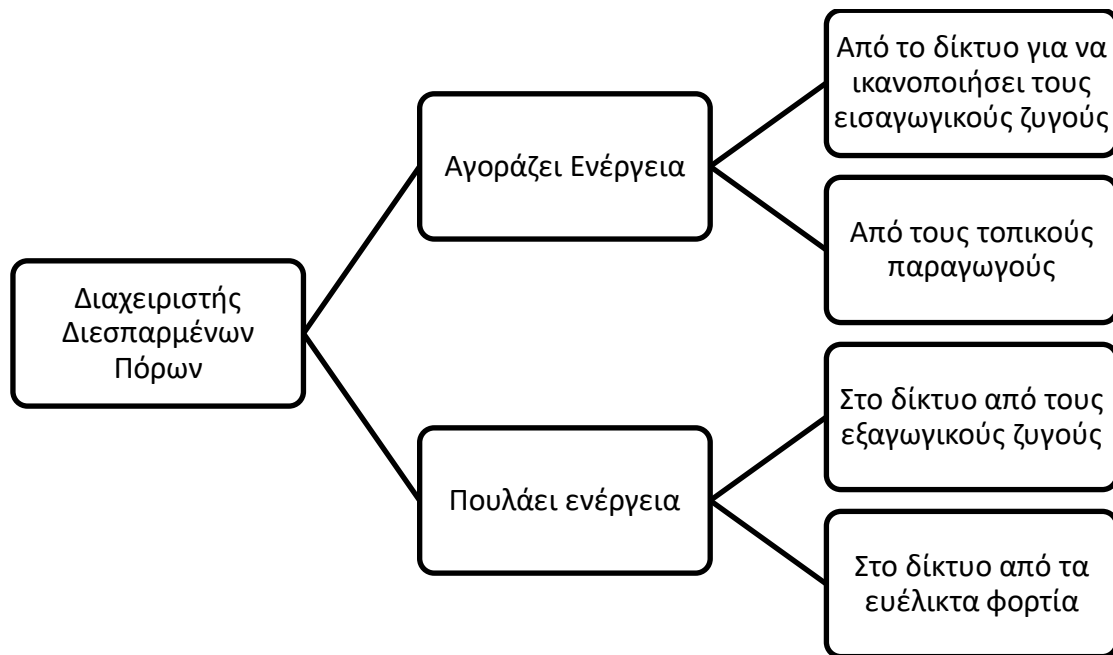
$Z_{df,t,d}^4$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της τοπικής παραγωγής .Τέταρτη από τις συνολικά πέντε.

$Z_{df,t,d}^5$: Διαδική μεταβλητή που χρησιμοποιείται στο μοντέλο της τοπικής παραγωγής .Πέμπτη από τις συνολικά πέντε.

5.3 Μοντέλο απόφασης Διαχειριστή Διεσπαρμένων Πόρων (Πρόβλημα Άνω Επιπέδου)

Ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων καλείται σε ένα πρώτο επίπεδο να προβεί σε μια αγοραπωλησία ενέργειας. Αυτό που θέλει να κάνει είναι να αγοράσει ενέργεια από την χονδρεμπορική αγορά για να την προσφέρει στους πελάτες του οι οποίοι την δεδομένη στιγμή χαρακτηρίζονται ως εισαγωγικοί καθώς έχουν έλλειμμα ενέργειας καθώς και από τους τοπικούς παραγωγούς που εκπροσωπεί. Ταυτόχρονα θέλει να πουλήσει την περίσσεια

ενέργειας των εξαγωγικών ζυγών στο σύστημα καθώς και την ενέργεια που προσφέρουν οι ευέλικτοι καταναλωτές.



Διάγραμμα 2 : Σχηματική απεικόνιση λειτουργίας διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων

Απώτερος στόχος του είναι αυτές οι τέσσερις διαδικασίες να πραγματοποιηθούν με το ελάχιστο κόστος. Το κόστος για τον διαχειριστή εν γένει ορίζεται ως η ποσότητα αγοράς ενέργειας από το δίκτυο μείον την ποσότητα προσφοράς ενέργειας στο δίκτυο $\sum_n \lambda_{n,t} [LQ_{n,t} - GQ_{n,t}]$ σύν την ποσότητα αγοράς από τους τοπικούς παραγωγούς μείον την ποσότητα πώλησης από τους ευέλικτους καταναλωτές $\sum_{pb,s,t,d} PP_t Q_{pb,s,t,d} - \sum_{ab,s,t,d} PM_{t,d} Q_{af,s,t,d}$ (σχέση [5.1]). Σε ένα δεύτερο επίπεδο το σύστημα είναι δυνατό να περιλαμβάνει και καταναλωτές με δυνατότητα περικοπής του φορτίου. Με τον όρο περικοπή νοείται η μείωση της εξόδου μιας μονάδας σε σχέση με τα ονομαστικά μεγέθη που θα μπορούσε να προσφέρει. Η χρησιμότητα αυτής της οντότητας έγκειται στην μείωση των αιχμών σε συνθήκες υπεροφόρτισης με σκοπό την αξιοπιστία με την μη υπερφόρτιση των μετασχηματισμών και των γραμμών μεταφοράς. Σύμφωνα με αυτά οι συμβεβλημένοι καταναλωτές θα έχουν την δυνατότητα αποζημίωσης σε περίπτωση περικοπής. Παράλληλα, το σύστημα είναι δυνατό να περιλαμβάνει και κλασσικούς καταναλωτές οι οποίοι δεν παρέχουν καμία ευελιξία. Αυτοί επιζητούν οι ζήτηση τους να ικανοποιείται πλήρως ανά πάσα στιγμή. Τέλος, θα μπορούσαν να συμπεριληφθούν και καταναλωτές οι οποίοι δηλώνουν την ωριαία καμπύλη φορτίου που επιθυμούν. Έτσι, ορίζεται και η αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος που καλείται να επιλύσει ο διαχειριστής. Ο πρώτος περιορισμός τον οποίο θα πρέπει να λάβει υπόψη του για τις αποφάσεις του ενεργειακού μίγματος είναι το ισοζύγιο ισχύος (σχέση [5.2]). Σύμφωνα με αυτό οι ποσότητες που θα μεταχειριστεί θα πρέπει να καλύπτουν την πρόβλεψη φορτίου που έχει ήδη πραγματοποιήσει. Καθώς, ο διαχειριστής ανακοινώνει τις τιμές αγοράς

ενέργειας στους τοπικούς παραγωγούς και τις τιμές πώλησης της ενέργειας στους καταναλωτές με ευέλικτα φορτία αυτές θα πρέπει να είναι θετικές , ως τιμές, και ταυτόχρονα μικρότερες από μια διοικητικά οριζόμενη τιμή (σχέσεις [5.3] και [5.4] αντίστοιχα). Αντίστοιχες σχέσεις ισχύουν και για τις τιμολογούμενες προσφορές παραγωγής και δηλώσεις φορτίου. Σε ό.τι αφορά τις τιμολογούμενες προσφορές παραγωγής οι περιορισμοί που πρέπει να ικανοποιηθούν είναι δύο. Από την μία θα πρέπει η ποσότητα παραγωγής να είναι θετική και ταυτόχρονα μικρότερη από μια μέγιστη τιμή η οποία εξαρτάται από τεχνικά δεδομένα (σχέση [5.7]). Από την άλλη η τιμή προσφοράς παραγωγής θα πρέπει να είναι θετική μεγαλύτερη από μια διοικητικά οριζόμενη ελάχιστη τιμή και μικρότερη από μια διοικητικά οριζόμενη μέγιστη τιμή(σχέση [5.5]). Σε ό.τι αφορά τις τιμολογούμενες δηλώσεις φορτίου ισχύουν ακριβώς τα ίδια μόνο που το κατώτερο όριο τιμών ορίζεται στο μηδέν (σχέσεις [5.8] και [5.6] αντίστοιχα). Όπως είναι λογικό είναι αδύνατο να υπάρχει μη μηδενική ποσότητα προσφοράς παραγωγής ή δηλωσης φορτίου με αντίστοιχη μηδενική τιμή και αντίστροφα (σχέσεις [5.9] , [5.10] , [5.11] και [5.12]). Τέλος δεν γίνεται ένας ζυγός να είναι ταυτόχρονα εισαγωγικός και εξαγωγικός (σχέση [5.13]). Όταν το ισοζύγιο ισχύος του διαχειριστή είναι εισαγωγικό σημαίνει ότι θα υπάρχει έλλειμμα ισχύος το οποίο θα πρέπει να καλυφθεί ($\text{An } \overline{LQ}_{t,d} > 0 \text{ τότε αναγκαστικά } \overline{GQ}_{t,d} = 0$) . Όταν το ισοζύγιο ισχύος του διαχειριστή είναι εξαγωγικό σημαίνει ότι θα υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας το οποίο θα πρέπει να αποδωθεί πίσω στο σύστημα ($\text{An } \overline{GQ}_{n,t} > 0 \text{ τότε αναγκαστικά } \overline{LQ}_{n,t} = 0$) (30) (31) (32) (33) (34).

$$\min \sum_t T_t \left\{ \sum \lambda_{s,t,d} [LQ_{t,d} - GQ_{t,d}] + \sum_{pb,s} PP_d Q_{pb,s,t,d} - \sum_{df,s} PM_{t,d} Q_{df,s,t,d} \right. \\ \left. + \sum_{dc,s} CP_d Q_{dc,s,t,d} - \sum_{dp,s} RPQ_{dp,s} - \sum_{db,s} RPQ_{db,s} \right. \\ \left. - \sum_{dc,s} QC_{dc,s,t,d} RP \right\} \quad [5.1]$$

$$LQ_t - GQ_t + \sum_{pb,s} Q_{pb,s,t,d} \\ - \sum_{df,d,s} Q_{df,s,t,d} + \sum_{dc,s} Q_{dc,s,t,d} - \sum_{db,s} Q_{db,s,t,d} - \sum_{dp,s} Q_{dp,s} \\ = 0 \quad [5.2]$$

$$0 \leq PP_{t,d} \leq PP^{\max} \quad [5.3]$$

$$0 \leq PM_{t,d} \leq RP^{\max} \quad [5.4]$$

$$GP^{\min} \leq \overline{GP}_{t,d} \leq GP^{\max} \quad [5.5]$$

$$0 \leq \overline{LP}_{t,d} \leq LP^{\max} \quad [5.6]$$

$$0 \leq \overline{GQ}_{t,d} \leq GQ^{\max} \quad [5.7]$$

$$0 \leq \overline{LQ}_{t,d} \leq LQ^{\max} \quad [5.8]$$

$$-\overline{GQ}_{t,d}M \leq \overline{GP}_{t,d} \leq \overline{GQ}_{t,d}M \quad [5.9]$$

$$-\overline{GP}_{t,d}M \leq \overline{GQ}_{t,d} \leq \overline{GP}_{t,d}M \quad [5.10]$$

$$-\overline{LQ}_{t,d}M \leq \overline{LP}_{t,d} \leq \overline{LQ}_{t,d}M \quad [5.11]$$

$$-\overline{LP}_{t,d}M \leq \overline{LQ}_{t,d} \leq \overline{LP}_{t,d}M \quad [5.12]$$

$$\overline{LQ}_{t,d} > 0 \text{ ή } \overline{GQ}_{t,d} > 0 \quad [5.13]$$

$$0 \leq RP \leq RP^{\max} \quad [5.14]$$

$$0 \leq CP_{t,d} \leq CP^{\max} \quad [5.15]$$

Οι σχέσεις [5.1] και [5.13] είναι μη γραμμικές και η γραμμικοποίηση τους θα πραγματοποιηθεί στις επόμενες παραγράφους μέσω των μαθηματικών μοντέλων που παρουσιάστηκαν στο κεφάλαιο 2. Οι μεταβλητές απόφασης του προβλήματος αυτού είναι η παραγωγή τοπικού παραγωγού , οι ζητήσεις φορτίου , οι εντασσόμενες ποσότητες τιμολογούμενης προσφοράς παραγωγής και δήλωσης φορτίου , οι λιανικές τιμές αποζημίωσης παραγόμενης ενέργειας και χρέωσης φορτίου καταναλωτών με φορτίο καθώς και οι τιμές και ποσότητες τιμολογούμενων προσφορών παραγωγής και δηλώσεων φορτίου $Q_{dp,s}, Q_{dc,s,t,d}, Q_{df,s,t,d}, Q_{pb,s,t}, Q_{db,s,t}, GQ_{n,t}, LQ_{n,t}, PP_d, CP_d, PM_{t,d}, RP, \overline{GQ}_{n,t}, \overline{LQ}_{n,t}, \overline{GP}_{n,t}, \overline{LP}_{n,t}$.

5.4 Πρόβλημα Κάτω Επιπέδου

Το πρόβλημα κάτω επιπέδου περιγράφει την διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τον λειτουργό της αγοράς. Όπως είναι λογικό , οι μονάδες παραγωγής-κατανάλωσης και το δίκτυο έχουν κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την διαδικασία. Λαμβάνοντας υπόψη τους διεσπαρμένους πόρους, ο διαχειριστής καλείται να υποβάλει τιμολογούμενες προσφορές παραγωγής και τιμολογούμενες δηλώσεις φορτίου για τους πελάτες του (14) (23) (35) (36) .

Για κάθε μια οντότητα η οποία θα λάβει μέρος στον ημερήσιο ενεργειακό προγραμματισμό στόχος είναι να ελαχιστοποιηθεί το κόστος της ενέργειας που προσφέρεται ή καταναλώνεται από το δίκτυο. Για να γίνει η διαδικασία αυτή με τον κατάλληλο τρόπο θα εξεταστούν τα μοντέλα ξεχωριστά τόσο σε θεωρητικό όσο και σε μαθηματικό επίπεδο.

5.4.1 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για τοπικούς παραγωγούς

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους οι τοπικοί παραγωγοί είναι οντότητες οι οποίες έχουν στην κατοχή τους διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής. Σκοπός

τους είναι να εντάξουν τις μονάδες τους στην διαδικασία εκαθάρισης της αγοράς. Έτσι για κάθε χρονική περίοδο κατανομής καλούνται να υποβάλλουν μια προσφορά παραγωγής. Η προσφορά αυτή χαρακτηρίζεται από ένα ζεύγος τιμής (€/MWh) ποσότητας (MWh) . Έτσι σε κάθε περίοδο κατανομής και για κάθε βαθμίδα ο παραγωγός ορίζει ότι μπορεί να δώσει στο σύστημα μια ποσότητα ενέργειας $\bar{Q}_{pb,s,t,d}$ χρεώνοντάς της με μια τιμή $\bar{P}_{pb,s,t,d}$. Μετά την εκτέλεση του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων ανακοινώνει τις λιανικές τιμές (PP_d) στους παραγωγούς. Σκοπός του διαχειριστή διεσπαρμένων είναι να μεγιστοποιείται το πλεόνασμα του τοπικού παραγωγού (σχέση [5.16]). Με βάση αυτές τιμές καθορίζεται και η ποσότητα ένταξης της κάθε μονάδας την κάθε χρονική στιγμή της κατανομής ($Q_{pb,s,t,d}$). Σε όλη αυτή τη διαδικασία ο μόνος περιορισμός που καλείται να λάβει υπόψη του ο διαχειριστής έχει να κάνει με τις ποσότητες που έχει υποβάλει ο κάθε τοπικός παραγωγός . Όπως είναι λογικό οι ποσότητες που ανακοινώνονται δεν μπορούν να υπερβαίνουν τις ποσότητες που έχουν δηλώθει (σχέση[5.17])

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{Q_{pb,s,t,d}} \sum_{s,t} (\bar{P}_{pb,s,t,d} - PP_d) Q_{pb,s,t,d} \\ Q_{pb,s,t,d} \leq \bar{Q}_{pb,s,t,d} \end{array} \right. \quad [5.16], [5.17]$$

5.4.2 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για καταναλωτές με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης

Όπως αναφέρθηκε ήδη πρόκειται για καταναλωτές που ακολουθούν συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης το οποίο βασίζεται σε ωριαίες καμπύλες φορτίου . Για κάθε περίοδο κατανομής καλούνται να υποβάλλουν δηλώσεις φορτίου. Σε αντίθεση με τα παραπάνω κάθε δήλωση περιλαμβάνει μια τιμή (€/MWh) καθολική για όλο το εικοσιτετράωρο και ποσότητες (MWh) για κάθε ώρα της ημέρας . Μετά την εκτέλεση του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων ανακοινώνει στους καταναλωτές με συγκεκριμένο προφίλ την λιανική τιμή χρέωσης του φορτίου. Σκοπός τους –όπως και των υπόλοιπων οντοτήτων – είναι να μεγιστοποιήσουν το πλεόνασμα τους. Σε όλο το πρόβλημα υπάρχει ένας περιορισμός ο οποίος σχετίζεται με τις ποσότητες δήλωσης που υποβάλλονται. Έτσι , οι ποσότητες που ανακοινώνονται δεν μπορούν να υπερβαίνουν τις ποσότητες που έχουν δηλωθεί. (σχέση [5.19])

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{Q_{dp,s}} \sum_s (\bar{P}_{dp,s} - RP) Q_{dp,s} \\ Q_{dp,s} \leq \bar{Q}_{dp,s,t,d} \end{array} \right. \quad [5.18], [5.19]$$

5.4.3 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για την ζήτηση περικοπής

Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες παραγράφους οι καταναλωτές με δυνατότητα περικοπής είναι οντότητες οι οποίες έχουν στην κατοχή τους περικοπτόμενα φορτία. Σκοπός τους είναι να εντάξουν τις μονάδες τους στην διαδικασία εκαθάρισης της αγοράς. Έτσι για κάθε χρονική περίοδο κατανομής καλούνται να υποβάλλουν μια προσφορά . Η προσφορά αυτή χαρακτηρίζεται από ένα ζεύγος τιμής (€/MWh) ποσότητας (MWh) . Έτσι σε κάθε περίοδο κατανομής και για κάθε βαθμίδα ο καταναλωτής ορίζει ότι μπορεί να κόψει από το σύστημα μια ποσότητα ενέργειας $\bar{Q}_{dc,s,t,d}$ χρεώνοντάς της με μια τιμή $\bar{P}_{dc,s,t,d}$. Μετά την εκτέλεση του Ημερήσιου Ενεργειακού Προγραμματισμού ο Διαχειριστής Διεσπαρμένων Πόρων ανακοινώνει τις λιανικές τιμές (CP_d) στους καταναλωτές. Σκοπός τους είναι να μεγιστοποιείται το πλεόνασμα του καταναλωτή αν και εφόσον κρίνεται απαραίτητη η μείωση της αιχμής του φορτίου (σχέση [5.20]). Με βάση αυτές τιμές καθορίζεται και η ποσότητα ένταξης της κάθε μονάδας την κάθε χρονική στιγμή της κατανομής ($Q_{dc,s,t,d}$). Σε όλη αυτή τη διαδικασία ο μόνος περιορισμός που καλείται να λάβει υπόψη του ο διαχειριστής έχει να κάνει με τις ποσότητες που έχει υποβάλει ο κάθε καταναλωτής . Όπως είναι λογικό οι ποσότητες που ανακοινώνονται δεν μπορούν να υπερβαίνουν τις ποσότητες που έχουν δηλωθεί (σχέση [5.21])

$$\begin{cases} \min_{Q_{dc,s,t,d}} \sum_{s,t} (\bar{P}_{dc,s,t,d} - CP_{t,d}) Q_{dc,s,t,d} \\ Q_{dc,s,t,d} \leq \bar{Q}_{dc,s,t,d} \end{cases} \quad [5.20], [5.21]$$

5.4.4 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για τους καταναλωτές χωρίς ευέλικτα φορτία

Όπως αναφέρθηκε ήδη πρόκειται για καταναλωτές που δεν έχουν ευελιξία. Θέλουν η ζήτηση τους να ικανοποιείται στο ακέραιο. Έτσι για κάθε περίοδο κατανομής καλούνται να υποβάλλουν δηλώσεις φορτίου. Κάθε δήλωση περιλαμβάνει ένα ζεύγος (€/MWh) ποσότητας (MWh) το οποίο ορίζει πόση ενέργεια θέλουν να καταναλώσουν και σε τι τιμή. Μετά την εκτέλεση του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων ανακοινώνει στους καταναλωτές με μη ευέλικτο φορτίο την λιανική τιμή χρέωσης του φορτίου. Σκοπός τους –όπως και των υπόλοιπων οντοτήτων – είναι να μεγιστοποιήσουν το πλεόνασμα τους. Σε όλο το πρόβλημα υπάρχει ένας περιορισμός ο οποίος σχετίζεται με τις ποσότητες δήλωσης που υποβάλλονται. Έτσι , οι ποσότητες που ανακοινώνονται δεν μπορούν να υπερβαίνουν τις ποσότητες που έχουν δηλωθεί. ([σχέση 5.23])

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{Q_{ab,s,t,d}} \sum_{s,t} (\bar{P}_{ab,s,t,d} - RP) Q_{ab,s,t,d} \\ Q_{ab,s,t,d} \leq \bar{Q}_{ab,s,t,d} \end{array} \right. \quad [5.22], [5.23]$$

5.4.5 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για καταναλωτές με ευέλικτα φορτία

Σε απόλυτη αντιστοιχία με τους τοπικούς παραγωγούς οι καταναλωτές με ευέλικτα φορτία θέλουν και αυτοί να ενταχθούν στην διαδικασία εκκαθάρισης της αγοράς. Ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων μετά την επίλυση του προβλήματος του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού ανακοινώνει στους ευέλικτους καταναλωτές τις λιανικές τιμές. Οι περιορισμοί που καλείται να συνυπολογίσει έχουν να κάνουν με τις ποσότητες που θα ανακοινώσει οι οποίες δεν πρέπει να ξεπερνούν την ποσότητα δήλωσης, με τις αυξομειώσεις στις ποσότητες ανάμεσα σε διαδοχικές περιόδους κατανομής καθώς και στην συνολική ποσότητα παραγωγής ανά ημέρα. Σε ό,τι αφορά τις αυξομειώσεις, οι καταναλωτές με ευέλικτα φορτία δεν μπορούν να προσφέρουν ποσότητες που η διαφορά μεταξύ δύο διαδοχικών περιόδων ξεπερνάει κάποιο όριο που ορίζουν οι ίδιοι (37) (38). Τέλος, η συνολική ποσότητα που μπορεί να προσφέρει ένας ευέλικτος καταναλωτής σε περίοδο μιας μέρας είναι μικρότερη από ένα όριο.

$$\begin{array}{l} \min \left((1 + PM_{a,t}) \lambda_{s,t,d} \right) Q_{df,t,d} \\ Q_{df,t,d} \leq \bar{Q}_{df,t,d} \\ Q_{df,t,d} - Q_{df,t-1,d} \leq RU_{df,d} \\ Q_{df,t-1,d} - Q_{df,t,d} \leq RU_{df,d} \\ \sum_{s,t} Q_{df,t,d} \leq \bar{RU}_{df,d} \end{array} \quad [5.24] - [5.28]$$

5.5 Μετατροπή Προβλήματος Διεπίπεδου Προγραμματισμού σε ένα επίπεδο

Σύμφωνα με αυτά που περιγράφηκαν στην παράγραφο 2.6.3 Αλγόριθμοι επίλυσης προβλημάτων διεπίπεδου προγραμματισμού το πρόβλημα διεπίπεδου προγραμματισμού πρέπει να μετατραπεί σε πρόβλημα ενός επιπέδου. Όλη η διαδικασία της μετατροπής βασίζεται στην αντικατάσταση του προβλήματος κάτω επιπέδου με τις ισοδύναμες συνθήκες Karush Kuhn Tucker.

5.5.1 Υπολογισμός συνάρτησης Lagrange

Αρχικά θα πρέπει να υπολογιστεί η συνάρτηση Lagrange των πέντε προβλημάτων του κάτω επιπέδου. Σύμφωνα με την θεωρία για να συμβεί αυτό κάθε ισοτικός και ανισοτικός περιορισμός που περιγράφηκε παραπάνω θα συνεισφέρει και έναν όρο στην συνάρτηση με την προσθήκη των δυικών μεταβλητών. Έτσι κατά σειρά έχουμε τους κάτωθι όρους της Λαγκρανζιανής συνάρτησης :

Στο πρόβλημα της παραγράφου 5.4.1 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για τοπικούς παραγωγούς περιορισμός

$$Q_{pb,s,t,d} \leq \bar{Q}_{pb,s,t,d} \Rightarrow Q_{pb,s,t,d} - \bar{Q}_{pb,s,t,d} \leq 0$$

θα συνεισφέρει τον όρο που θα περιέχει την δυική μεταβλητή του περιορισμού $\gamma_{pb,s,t,d}$ επί τον ίδιο τον περιορισμό

$$\sum_{s,t} \gamma_{pb,s,t,d} (Q_{pb,s,t,d} - \bar{Q}_{pb,s,t,d})$$

Επομένως η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος [5.16]-[5.17] θα είναι η κάτωθι

$$L_{pb} = \sum_{s,t} (\bar{P}_{pb,s,t,d} - PP_d) Q_{pb,s,t,d} + \sum_{s,t} \gamma_{pb,s,t,d} (Q_{pb,s,t,d} - \bar{Q}_{pb,s,t,d}) \quad [5.29]$$

Στο πρόβλημα της παραγράφου 5.4.2 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για καταναλωτές με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησηςο περιορισμός

$$Q_{Dp,s} \leq \bar{Q}_{Dp,s,t,d} \Rightarrow Q_{Dp,s} - \bar{Q}_{Dp,s,t,d} \leq 0$$

θα συνεισφέρει τον όρο που θα περιέχει την δυική μεταβλητή του περιορισμού $\xi_{Dp,s}$ επί τον ίδιο τον περιορισμό

$$\sum_{s,t} \xi_{Dp,s} (Q_{Dp,s} - \bar{Q}_{Dp,s,t,d})$$

Επομένως η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος [5.18]-[5.19] θα είναι η κάτωθι

$$L_{dp} = \sum_{s,t} (\bar{P}_{Dp,s} - RP) Q_{Dp,s} + \sum_{s,t} \xi_{Dp,s} (Q_{Dp,s} - \bar{Q}_{Dp,s,t,d}) \quad [5.30]$$

Στο πρόβλημα της παραγράφου 5.4.3 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για την ζήτηση περικοπής ο περιορισμός

$$Q_{dc,s,t,d} \leq \bar{Q}_{dc,s,t,d} \Rightarrow Q_{dc,s,t,d} - \bar{Q}_{dc,s,t,d} \leq 0$$

θα συνεισφέρει τον όρο που θα περιέχει την δυική μεταβλητή του περιορισμού $\varphi_{dc,s,t,d}$

επί τον ίδιο τον περιορισμό

$$\sum_{s,t} \varphi_{dc,s,t,d} (Q_{dc,s,t,d} - \bar{Q}_{dc,s,t,d})$$

Επομένως η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος [5.18]-[5.19] θα είναι η κάτωθι

$$L_{dc} = \sum_{s,t} (\bar{P}_{dc,s,t,d} - CP_d) Q_{dc,s,t,d} + \sum_{s,t} \varphi_{dc,s,t,d} (Q_{dc,s,t,d} - \bar{Q}_{dc,s,t,d}) \quad [5.31]$$

Στο πρόβλημα της παραγράφου 5.4.4 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για τους καταναλωτές χωρίς ευέλικτα φορτία περιορισμός

$$Q_{db,s,t,d} \leq \bar{Q}_{db,s,t,d} \Rightarrow Q_{db,s,t,d} - \bar{Q}_{db,s,t,d} \leq 0$$

θα συνεισφέρει τον όρο που θα περιέχει την δυική μεταβλητή του περιορισμού $\psi_{db,s,t,d}$ επί τον ίδιο τον περιορισμό

$$\sum_{s,t} \psi_{db,s,t,d} (Q_{db,s,t,d} - \bar{Q}_{db,s,t,d})$$

Επομένως η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος [5.20]-[5.21] θα είναι η κάτωθι

$$L_{db} = \sum_{s,t} (\bar{P}_{db,s,t,d} - RP) Q_{db,s,t,d} + \sum_{s,t} \psi_{db,s,t,d} (Q_{db,s,t,d} - \bar{Q}_{db,s,t,d}) \quad [5.32]$$

Στο πρόβλημα της παραγράφου 5.4.5 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για καταναλωτές με ευέλικτα φορτία οι περιορισμοί είναι περισσότεροι και συνεπώς, περισσότεροι θα είναι και οι όροι της συνάρτησης Lagrange. Έτσι ο περιορισμός

$$Q_{af,t,d} \leq \bar{Q}_{af,t,d} \Rightarrow Q_{af,t,d} - \bar{Q}_{af,t,d} \leq 0$$

θα συνεισφέρει τον όρο που θα περιέχει την δυική μεταβλητή του περιορισμού $w_{af,t,d}^{min}$ επί τον ίδιο τον περιορισμό

$$\sum_t w_{af,t,d}^{min} (Q_{af,t,d} - \bar{Q}_{af,t,d})$$

Αντίστοιχα, ο περιορισμός

$$\sum_t Q_{af,t,d} \leq \bar{RU}_{af,d} \Rightarrow \sum_t Q_{af,t,d} - \bar{RU}_{af,d} \leq 0$$

θα συνεισφέρει τον όρο που θα περιέχει την δυική μεταβλητή του περιορισμού $w_{af,t,d}^{max}$ επί τον ίδιο τον περιορισμό

$$\sum_t w_{df,t,d}^{max}(Q_{df,t,d} - \bar{RU}_{df,d})$$

Ο περιορισμός

$$Q_{df,t,d} - Q_{df,t-1,d} \leq RU_{df,d} \Rightarrow Q_{df,t,d} - Q_{df,t-1,d} - RU_{df,d} \leq 0$$

θα συνεισφέρει τον όρο που θα περιέχει την δυική μεταβλητή του περιορισμού $\pi_{df,t,d}^{min}$ επί τον ίδιο τον περιορισμό

$$\sum_t \pi_{df,t,d}^{min}(Q_{df,t,d} - Q_{df,t-1,d} - RU_{df,d})$$

Και ο περιορισμός

$$Q_{df,t-1,d} - Q_{df,t,d} \leq RU_{df,d} \Rightarrow Q_{df,t-1,d} - Q_{df,t,d} - RU_{df,d} \leq 0$$

θα συνεισφέρει τον όρο που θα περιέχει την δυική μεταβλητή του περιορισμού $\pi_{df,t,d}^{max}$ επί τον ίδιο τον περιορισμό

$$\sum_t \pi_{df,t,d}^{max}(Q_{df,t-1,d} - Q_{df,t,d} - RU_{df,d})$$

Τελικά η συνάρτηση Lagrange του προβλήματος [5.24]-[5.28] θα είναι η ακόλουθη

$$\begin{aligned} L_{df} = & \sum_t \left((1 + PM_{d,t}) \lambda_{s,t,d} \right) Q_{df,t,d} + \sum_t w_{df,t,d}^{min}(Q_{df,t,d} - \bar{Q}_{df,t,d}) \\ & + \sum_{s,t} w_{df,t,d}^{max}(Q_{df,t,d} - \bar{RU}_{df,d}) + \sum_{s,t} \pi_{df,t,d}^{min}(Q_{df,t,d} - Q_{df,t-1,d} - RU_{df,d}) \\ & + \sum_{s,t} \pi_{df,t,d}^{max}(Q_{df,t-1,d} - Q_{df,t,d} - RU_{df,d}) \end{aligned} \quad [5.33]$$

5.5.2 Υπολογισμός Συνθηκών Στασιμότητας

Αφότου έχουν υπολογιστεί οι τρεις συναρτήσεις Lagrange σε αυτές θα πρέπει να υπολογιστούν οι συνθήκες στασιμότητας. Αυτές προκύπτουν αν παραγωγιστούν ως προς κάθε μεταβλητή απόφασης οι συναρτήσεις και οι παράγωγοι τεθούν ίσοι με το μηδέν. Οι σχέσεις [5.34]-[5.38] είναι οι συνθήκες στασιμότητας κατά αντιστοιχία των συναρτήσεων [5.29]-[5.33]

$$\nabla_{Q_{pb,s,t,d}} L_{pb} = 0 \Rightarrow \bar{P}_{pb,s,t,d} - PP_d + \gamma_{pb,s,t,d} = 0 \quad [5.34]$$

$$\nabla_{Q_{dp,s}} L_{dp} = 0 \Rightarrow \bar{P}_{dp,s} - RP + \xi_{dp,s} = 0 \quad [5.35]$$

$$\nabla_{Q_{dc,s,t,d}} L_{dc} = 0 \Rightarrow \bar{P}_{dc,s,t,d} - CP_d + \varphi_{dc,s,t,d} = 0 \quad [5.36]$$

$$\nabla_{Q_{db,s,t,d}} L_{db} = 0 \Rightarrow \bar{P}_{db,s,t,d} - RP + \psi_{db,s,t,d} = 0 \quad [5.37]$$

$$\nabla_{Q_{df,t,d}} L_{df} = 0 \Rightarrow (1 + PM_{d,t})\lambda_{s,t,d} + w_{df,t,d}^{\min} + w_{df,t,d}^{\max} + \pi_{df,t,d}^{\min} + \pi_{df,t,d}^{\max} = 0 \quad [5.38]$$

5.5.3 Υπολογισμός Συνθηκών Συμπληρωματικής Χαλαρότητας

Κάθε ένας από τους ανισοτικούς περιορισμούς των προβλημάτων θα δώσει και από μια συνθήκη συμπληρωματικής χαλαρότητας.

$$0 \leq (-Q_{pb,s,t,d} + \bar{Q}_{pb,s,t,d}) \perp \gamma_{pb,s,t,d} \geq 0 \quad [5.39]$$

$$0 \leq (\bar{P}_{pb,s,t,d} - PP_{t,d} + \gamma_{pb,s,t,d}) \perp Q_{pb,s,t,d} \geq 0 \quad [5.40]$$

$$0 \leq (-Q_{dp,s} + \bar{Q}_{dp,s,t,d}) \perp \xi_{dp,s} \geq 0 \quad [5.41]$$

$$0 \leq (-\bar{P}_{dp,s} + RP + \xi_{dp,s}) \perp Q_{dp,s} \geq 0 \quad [5.42]$$

$$0 \leq (-Q_{dc,s,t,d} + \bar{Q}_{dc,s,t,d}) \perp \varphi_{dc,s,t,d} \geq 0 \quad [5.43]$$

$$0 \leq (\bar{P}_{dc,s,t,d} - CP_{t,d} + \varphi_{dc,s,t,d}) \perp Q_{dc,s,t,d} \geq 0 \quad [5.44]$$

$$0 \leq (-Q_{db,s,t,d} + \bar{Q}_{db,s,t,d}) \perp \psi_{db,s,t,d} \geq 0 \quad [5.45]$$

$$0 \leq (-\bar{P}_{db,s,t,d} + RP + \psi_{db,s,t,d}) \perp Q_{db,s,t,d} \geq 0 \quad [5.46]$$

$$0 \leq (-Q_{df,t,d} + \bar{Q}_{df,t,d}) \perp w_{df,t,d}^{\min} \geq 0 \quad [5.47]$$

$$0 \leq \left(-\sum_{s,t} Q_{df,t,d} + \bar{R}U_{df,d}\right) \perp w_{df,t,d}^{\max} \geq 0 \quad [5.48]$$

$$0 \leq (-Q_{df,t,d} + Q_{df,t-1,d} + RU_{df,d}) \perp \pi_{df,t,d}^{\min} \geq 0 \quad [5.49]$$

$$0 \leq (-Q_{df,t-1,d} + Q_{df,t,d} + RU_{df,d}) \perp \pi_{df,t,d}^{\max} \geq 0 \quad [5.50]$$

$$0 \leq \left((1 + PM_{d,t})\lambda_{s,t,d} + w_{df,t,d}^{\min} + w_{df,t,d}^{\max} + \pi_{df,t,d}^{\min} + \pi_{df,t,d}^{\max}\right) \perp Q_{df,t,d} \geq 0 \quad [5.51]$$

Οι σχέσεις [5.1]-[5.51] αποτελούν το ισοδύναμο πρόβλημα ενός επιπέδου. Ωστόσο, οι σχέσεις [5.1], [5.13] και [5.39]-[5.51] είναι μη γραμμικές και για αυτό θα πρέπει να γίνουν

κάποιες εργασίες ακόμα ώστε να καταλήξουμε σε πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού.

5.5.4 Γραμμικοποίηση Συνθηκών Συμπληρωματικής Χαλαρότητας

Οι σχέσεις [5.39]-[5.51] είναι εξαιρετικά μη γραμμικές λόγω του τελεστή της καθετότητας. Η γραμμικοποίηση τους θα βασιστεί στην θεωρία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 2 σύμφωνα με την οποία θα χρησιμοποιηθεί ένας μεγάλος ακέραιος αριθμός. Οι αντίστοιχες γραμμικές σχέσεις είναι οι ακόλουθες

Η σχέση [5.39]

$$0 \leq (-Q_{pb,s,t,d} + \bar{Q}_{pb,s,t,d}) \perp \gamma_{pb,s,t,d} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq -Q_{pb,s,t,d} + \bar{Q}_{pb,s,t,d} \leq (1 - z_{pb,s,t,d}^1)M \\ 0 \leq \gamma_{pb,s,t,d} \leq z_{pb,s,t,d}^1 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} Q_{pb,s,t,d} \leq \bar{Q}_{pb,s,t,d} \\ -Q_{pb,s,t,d} + \bar{Q}_{pb,s,t,d} - (1 - z_{pb,s,t,d}^1)M \leq 0 \end{cases} \quad [5.52], [5.53]$$

$$\begin{cases} \gamma_{pb,s,t,d} \geq 0 \\ \gamma_{pb,s,t,d} - z_{pb,s,t,d}^1 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.54], [5.55]$$

Η σχέση [5.40]

$$0 \leq (\bar{P}_{pb,s,t,d} - PP_d + \gamma_{pb,s,t,d}) \perp Q_{pb,s,t,d} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq \bar{P}_{pb,s,t,d} - PP_d + \gamma_{pb,s,t,d} \leq (1 - z_{pb,s,t,d}^2)M \\ 0 \leq Q_{pb,s,t,d} \leq z_{pb,s,t,d}^2 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} -\bar{P}_{pb,s,t,d} + PP_d - \gamma_{pb,s,t,d} \leq 0 \\ \bar{P}_{pb,s,t,d} - PP_d + \gamma_{pb,s,t,d} - (1 - z_{pb,s,t,d}^2)M \leq 0 \end{cases} \quad [5.56], [5.57]$$

$$\begin{cases} Q_{pb,s,t,d} \geq 0 \\ Q_{pb,s,t,d} - z_{pb,s,t,d}^2 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.58], [5.59]$$

Η σχέση [5.41]

$$0 \leq (-Q_{dp,s} + \bar{Q}_{dp,s,t,d}) \perp \xi_{dp,s} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq -Q_{dp,s} + \bar{Q}_{dp,s,t,d} \leq (1 - z_{dp,s}^1)M \\ 0 \leq \xi_{dp,s} \leq z_{dp,s}^1 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} Q_{dp,s} \leq \bar{Q}_{dp,s,t,d} \\ -Q_{dp,s} + \bar{Q}_{dp,s,t,d} - (1 - z_{dp,s}^1)M \leq 0 \end{cases} \quad [5.60], [5.61]$$

$$\begin{cases} \xi_{dp,s} \geq 0 \\ \xi_{dp,s} - z_{dp,s}^1 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.62], [5.63]$$

Η σχέση [5.42]

$$0 \leq (-\bar{P}_{dp,s} + RP + \xi_{dp,s}) \perp Q_{dp,s} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq -\bar{P}_{dp,s} + RP + \xi_{dp,s} \leq (1 - z_{dp,s}^2)M \\ 0 \leq Q_{dp,s} \leq z_{dp,s}^2 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} +\bar{P}_{dp,s} - RP - \xi_{dp,s} \leq 0 \\ -\bar{P}_{dp,s} + RP + \xi_{dp,s} - (1 - z_{dp,s}^2)M \leq 0 \end{cases} \quad [5.64], [5.65]$$

$$\begin{cases} Q_{dp,s} \geq 0 \\ Q_{dp,s} - z_{dp,s}^2 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.66], [5.67]$$

Η σχέση [5.43]

$$0 \leq (-Q_{dc,s,t,d} + \bar{Q}_{dc,s,t,d}) \perp \varphi_{dc,s,t,d} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq -Q_{dc,s,t,d} + \bar{Q}_{dc,s,t,d} \leq (1 - z_{dc,s,t,d}^1)M \\ 0 \leq \varphi_{dc,s,t,d} \leq z_{dc,s,t,d}^1 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} Q_{dc,s,t,d} \leq \bar{Q}_{dc,s,t,d} \\ -Q_{dc,s,t,d} + \bar{Q}_{dc,s,t,d} - (1 - z_{dc,s,t,d}^1)M \leq 0 \end{cases} \quad [5.68], [5.69]$$

$$\begin{cases} \varphi_{dc,s,t,d} \geq 0 \\ \varphi_{dc,s,t,d} - z_{dc,s,t,d}^1 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.70], [5.71]$$

Η σχέση [5.44]

$$0 \leq (\bar{P}_{dc,s,t,d} - CP_d + \varphi_{dc,s,t,d}) \perp Q_{dc,s,t,d} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq \bar{P}_{dc,s,t,d} - CP_d + \varphi_{dc,s,t,d} \leq (1 - z_{dc,s,t,d}^2)M \\ 0 \leq Q_{dc,s,t,d} \leq z_{dc,s,t,d}^2 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} -\bar{P}_{dc,s,t,d} + CP_d - \varphi_{dc,s,t,d} \leq 0 \\ \bar{P}_{dc,s,t,d} - CP_d + \varphi_{dc,s,t,d} - (1 - z_{dc,s,t,d}^2)M \leq 0 \end{cases} \quad [5.72], [5.73]$$

$$\begin{cases} Q_{dc,s,t,d} \geq 0 \\ Q_{dc,s,t,d} - z_{dc,s,t,d}^2 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.74], [5.75]$$

Η σχέση [5.45]

$$0 \leq (-Q_{ab,s,t,d} + \bar{Q}_{ab,s,t,d}) \perp \psi_{ab,s,t,d} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq -Q_{ab,s,t,d} + \bar{Q}_{ab,s,t,d} \leq (1 - z_{ab,s,t,d}^1)M \\ 0 \leq \psi_{ab,s,t,d} \leq z_{ab,s,t,d}^1 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} Q_{ab,s,t,d} \leq \bar{Q}_{ab,s,t,d} \\ -Q_{ab,s,t,d} + \bar{Q}_{ab,s,t,d} - (1 - z_{ab,s,t,d}^1)M \leq 0 \end{cases} \quad [5.76], [5.77]$$

$$\begin{cases} \psi_{ab,s,t,d} \geq 0 \\ \psi_{ab,s,t,d} - z_{ab,s,t,d}^1 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.78], [5.79]$$

Η σχέση [5.46]

$$0 \leq (-\bar{P}_{ab,s,t,d} + RP + \psi_{db,s,t,d}) \perp Q_{dc,s,t,d} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq -\bar{P}_{ab,s,t,d} + RP + \psi_{db,s,t,d} \leq (1 - z_{db,s,t,d}^2)M \\ 0 \leq Q_{db,s,t,d} \leq z_{db,s,t,d}^2 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} +\bar{P}_{ab,s,t,d} - RP - \psi_{db,s,t,d} \leq 0 \\ -\bar{P}_{ab,s,t,d} + RP + \psi_{db,s,t,d} - (1 - z_{db,s,t,d}^2)M \leq 0 \end{cases} \quad [5.80], [5.81]$$

$$\begin{cases} Q_{db,s,t,d} \geq 0 \\ Q_{db,s,t,d} - z_{db,s,t,d}^2 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.82], [5.83]$$

Η σχέση [5.47]

$$0 \leq (-Q_{df,t,d} + \bar{Q}_{df,t,d}) \perp w_{df,t,d}^{\min} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq -Q_{df,t,d} + \bar{Q}_{df,t,d} \leq (1 - z_{df,t,d}^1)M \\ 0 \leq w_{df,t,d}^{\min} \leq z_{df,t,d}^1 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} Q_{df,t,d} \leq \bar{Q}_{df,t,d} \\ -Q_{df,t,d} + \bar{Q}_{df,t,d} - (1 - z_{df,t,d}^1)M \leq 0 \end{cases} \quad [5.84], [5.85]$$

$$\begin{cases} w_{df,t,d}^{\min} \geq 0 \\ w_{df,t,d}^{\min} - z_{df,t,d}^1 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.86], [5.87]$$

Η σχέση [5.48]

$$0 \leq (-\sum_{s,t} Q_{df,t,d} + \overline{RU}_{df,d}) \perp w_{df,t,d}^{\max} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq -\sum_t Q_{df,s,t,d} + \overline{RU}_{df,s,t,d} \leq (1 - z_{df,s,t,d}^2)M \\ 0 \leq w_{df,s,t,d}^{\max} \leq z_{df,s,t,d}^2 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} \sum_t Q_{df,s,t,d} - \overline{RU}_{df,s,t,d} \leq 0 \\ -\sum_t Q_{df,s,t,d} + \overline{RU}_{df,s,t,d} - (1 - z_{df,s,t,d}^2) M \leq 0 \end{cases} \quad [5.88], [5.89]$$

$$\begin{cases} w_{df,t,d}^{max} \geq 0 \\ w_{df,t,d}^{max} - z_{df,t,d}^2 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.90], [5.91]$$

Η σχέση [5.49]

$$0 \leq (-Q_{df,t,d} + Q_{df,t-1,d} + RU_{df,d}) \perp \pi_{df,t,d}^{min}$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq -Q_{df,s,t,d} + Q_{df,s,t-1,d} + RU_{df,d} \leq (1 - z_{df,s,t,d}^3) M \\ 0 \leq \pi_{df,s,t,d}^{min} \leq z_{df,s,t,d}^3 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} +Q_{df,s,t,d} - Q_{df,s,t-1,d} - RU_{df,d} \leq 0 \\ -Q_{df,s,t,d} + Q_{df,s,t-1,d} + RU_{df,d} - (1 - z_{df,s,t,d}^3) M \leq 0 \end{cases} \quad [5.92], [5.93]$$

$$\begin{cases} \pi_{df,s,t,d}^{min} \geq 0 \\ \pi_{df,s,t,d}^{min} - z_{df,s,t,d}^3 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.94], [5.95]$$

Η σχέση [5.50]

$$0 \leq (-Q_{df,t-1,d} + Q_{df,t,d} + RU_{df,d}) \perp \pi_{df,t,d}^{max} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq -Q_{df,s,t-1,d} + Q_{df,s,t,d} - RU_{df,d} \leq (1 - z_{df,s,t,d}^4) M \\ 0 \leq \pi_{df,s,t,d}^{max} \leq z_{df,s,t,d}^4 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} +Q_{df,s,t-1,d} - Q_{df,s,t,d} - RU_{df,d} \leq 0 \\ -Q_{df,s,t-1,d} + Q_{df,s,t,d} + RU_{df,d} - (1 - z_{df,s,t,d}^4) M \leq 0 \end{cases} \quad [5.96], [5.97]$$

$$\begin{cases} \pi_{df,s,t,d}^{max} \geq 0 \\ \pi_{df,s,t,d}^{max} - z_{df,s,t,d}^4 M \leq 0 \end{cases} \quad [5.98], [5.99]$$

Η σχέση [5.51]

$$0 \leq \left((1 + PM_{d,t})\lambda_{s,t,d} + w_{df,t,d}^{\min} + w_{df,t,d}^{\max} + \pi_{df,t,d}^{\min} + \pi_{df,t,d}^{\max} \right) \perp Q_{df,t,d} \geq 0$$

μεταφράζεται ως το σύστημα

$$\Rightarrow \begin{cases} 0 \leq (1 + PM_{d,t})\lambda_{s,t,d} + w_{df,s,t,d}^{\min} + w_{df,s,t,d}^{\max} + \pi_{df,s,t,d}^{\min} + \pi_{df,s,t,d}^{\max} \leq (1 - z_{df,s,t,d}^5)M \\ 0 \leq Q_{df,t,d} \leq z_{df,s,t,d}^5 M \end{cases}$$

από το οποίο προκύπτουν οι ισοδύναμες γραμμικές συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας

$$\begin{cases} -(1 + PM_{d,t})\lambda_{s,t,d} - w_{df,s,t,d}^{\min} - w_{df,s,t,d}^{\max} - \pi_{df,s,t,d}^{\min} - \pi_{df,s,t,d}^{\max} \leq 0 \\ (1 + PM_{d,t})\lambda_{s,t,d} + w_{df,s,t,d}^{\min} + w_{df,s,t,d}^{\max} + \pi_{df,s,t,d}^{\min} + \pi_{df,s,t,d}^{\max} - (1 - z_{df,s,t,d}^5)M \leq 0 \\ \begin{cases} Q_{df,s,t,d} \geq 0 \\ Q_{df,s,t,d} - z_{df,s,t,d}^5 M \leq 0 \end{cases} \end{cases} \quad [5.100], [5.101], [5.102], [5.103]$$

5.5.5 Γραμμικοποίηση Αμοιβαία Αποκλειόμενων Συνθηκών

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω η σχέση [5.13] είναι μη γραμμική και καλείται ως αμοιβαία αποκλειόμενη συνθήκη. Η ονομασία της προέρχεται από το γεγονός ότι ένας ζυγός δεν γίνεται να είναι ταυτόχρονα εισαγωγικός και εξαγωγικός. Η γραμμικοποίηση της βασίζεται στην ιδέα ότι σε μια δεδομένη στιγμή είτε το $\overline{LQ}_{n,t} = 0$ ή $\overline{GQ}_{n,t} = 0$.

$$\overline{LQ}_{t,d} \leq r_{t,d} \leq \overline{LQ}_{t,d} + u_{t,d}^1 M \quad [5.104] [5.105]$$

$$\overline{GQ}_{t,d} \leq r_{t,d} \leq \overline{GQ}_{t,d} + (1 - u_{t,d}^1)M \quad [5.106] [5.107]$$

5.6 Τελική Διαμόρφωση Προβλήματος

Από την στιγμή που το πρόβλημα κάτω επιπέδου αντικαταστάθηκε από τις ισοδύναμες ΚΚΤ συνθήκες και εξαλείφθηκαν οι μη γραμμικότητες των περιορισμών το ισοδύναμο πρόβλημα ενός επιπέδου περιγράφεται από την συνάρτηση βελτιστοποίησης [5.1] υπό τους περιορισμούς του προβλήματος άνω επιπέδου [5.2]-[5.12] και [5.14]-[5.15] τις συνθήκες στασιμότητας [5.35]-[5.38], τις ισοδύναμες γραμμικοποιημένες συνθήκες συμπληρωματικής χαλαρότητας [5.52]-[5.103] και τις γραμμικοποιημένες αμοιβαία αποκλειόμενες συνθήκες [5.104]-[5.107]. Πρωτού γίνει η γραμμικοποίηση της συνάρτησης βελτιστοποίησης [5.1] διευκρινίζονται δύο πράγματα. Αρχικά κατά την μελέτη του θέματος θεωρήθηκε απουσία δικτύου. Δεν συμπεριλήφθηκαν δηλαδή στην ανάλυση και τους περιορισμούς οι ροές ισχύος μεταξύ των ζυγών στους οποίους ο διαχειριστής διαθέτει

πελάτες , τα όρια φόρτισης των γραμμών μεταφοράς σύνδεσης των ζυγών καθώς και οι γωνίες τάσης των ζυγών ώστε το σύστημα να καθίσταται ευσταθές. Σε μια απλοϊκή θεωρητική ανάλυση βασιζόμενη στην DC ροή ισχύος για να συμπεριληφθούν στο πρόβλημα οι ζυγοί του συστήματος θα έπρεπε να προστεθούν οι κάτωθι σχέσεις:

$$-\bar{f}_l \leq f_{l,t} \leq \bar{f}_l \quad [5.108]$$

$$-\pi \leq \delta_{n,t} \leq \pi \quad [5.109]$$

$$\delta_{n,t} = 0 \quad [5.110]$$

Η σχέση [5.108] δηλώνει ότι μια γραμμή μεταφοράς δεν μπορεί να μεταφέρει μεγαλύτερη ισχύ από τα ονομαστικά της μεγέθη , η σχέση [5.109] ότι για να καθίσταται το σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας ευσταθές οι γωνίες των ζυγων δεν μπορούν να ξεπερνούν τις $-\pi$ και π μοίρες ενώ η [5.110] αναφέρεται στην παραδοχή της DC ροής ισχύος ότι ο ζυγός αναφοράς θα πρέπει να έχει γωνία 0 μοίρες. Όπως είναι λογικό για να συμμετέχουν οι σχέσεις αυτές στο τελικό πρόβλημα μικτού ακέραιου προγραμματισμού θα πρέπει να αντικατασταθούν από τις ισοδύναμες ΚΚΤ συνθήκες. Χάρην της βιβλιογραφικής ανασκόπησης του θέματος αναφέρονται οι ισοδύναμες σχέσεις που θα μετείχαν στο πρόβλημα οι οποίες προέκυψαν με τον ίδιο τρόπο όπως οι σχέσεις τις παραγράφου 5.5.

$$0 \leq [\bar{f}_l + f_{l,t}] \perp \varphi_{l,t}^{\min} \geq 0 \Leftrightarrow$$

$$0 \leq \left[\bar{f}_l + S_b \sum_{n:l \in L_n} A_{(n,l)} B_l \delta_{n,t} \right] \perp \varphi_{l,t}^{\min} \geq 0 \quad [5.111]$$

$$0 \leq [\bar{f}_l - f_{l,t}] \perp \varphi_{l,t}^{\max} \geq 0 \Leftrightarrow$$

$$0 \leq \left[\bar{f}_l - S_b \sum_{n:l \in L_n} A_{(n,l)} B_l \delta_{n,t} \right] \perp \varphi_{l,t}^{\max} \geq 0 \quad [5.112]$$

$$0 \leq [\pi + \delta_{n,t}] \perp \gamma_{n,t}^{\min} \geq 0 \quad [5.113]$$

$$0 \leq [\pi - \delta_{n,t}] \perp \gamma_{n,t}^{\max} \geq 0 \quad [5.114]$$

$$0 \leq \bar{f}_l + S_b \sum_{n:l \in L_n} A_{(n,l)} B_l \delta_{n,t} \leq u_{l,t}^7 M$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \bar{f}_l + S_b \sum_{n:l \in L_n} A_{(n,l)} B_l \delta_{n,t} \geq 0 \\ \bar{f}_l + S_b \sum_{n:l \in L_n} A_{(n,l)} B_l \delta_{n,t} \leq u_{l,t}^7 M \end{cases} \quad [5115] [5.116]$$

$$0 \leq \varphi_{l,t}^{\min} \leq (1 - u_{l,t}^7)M \Leftrightarrow \begin{cases} \varphi_{l,t}^{\min} \geq 0 \\ \varphi_{l,t}^{\min} \leq (1 - u_{l,t}^7)M \end{cases} \quad [5.117] [5.118]$$

$$0 \leq \bar{f}_l - S_b \sum_{n:l \in L_n} A_{(n,l)} B_l \delta_{n,t} \leq u_{l,t}^8 M \Leftrightarrow \begin{cases} \bar{f}_l \geq S_b \sum_{n:l \in L_n} A_{(n,l)} B_l \delta_{n,t} \\ \bar{f}_l - S_b \sum_{n:l \in L_n} A_{(n,l)} B_l \delta_{n,t} \leq u_{l,t}^8 M \end{cases} \quad [5.119] [5.120]$$

$$0 \leq \varphi_{l,t}^{\max} \leq (1 - u_{l,t}^8)M \Leftrightarrow \begin{cases} \varphi_{l,t}^{\max} \geq 0 \\ \varphi_{l,t}^{\max} \leq (1 - u_{l,t}^8)M \end{cases} \quad [5.121] [5.122]$$

$$0 \leq \pi + \delta_{n,t} \leq u_{n,t}^9 M \Leftrightarrow \begin{cases} \delta_{n,t} \geq -\pi \\ \pi + \delta_{n,t} \leq u_{n,t}^9 M \end{cases} \quad [5.123] [5.124]$$

$$0 \leq \gamma_{n,t}^{\min} \leq (1 - u_{n,t}^9)M \Leftrightarrow \begin{cases} \gamma_{n,t}^{\min} \geq 0 \\ \gamma_{n,t}^{\min} \leq (1 - u_{n,t}^9)M \end{cases} \quad [5.125] [5.126]$$

$$0 \leq \pi - \delta_{n,t} \leq u_{n,t}^{10} M \Leftrightarrow \begin{cases} \delta_{n,t} \leq \pi \\ \pi - \delta_{n,t} \leq u_{n,t}^{10} M \end{cases} \quad [5.127] [5.128]$$

$$0 \leq \gamma_{n,t}^{\max} \leq (1 - u_{n,t}^{10})M \Leftrightarrow \begin{cases} \gamma_{n,t}^{\max} \geq 0 \\ \gamma_{n,t}^{\max} \leq (1 - u_{n,t}^{10})M \end{cases} \quad [5.129] [5.130]$$

Η δεύτερη παραδοχή σχετίζεται με το γεγονός ότι οι διεσπαρμένοι πόροι και συνεπώς η τοπική αγορά δεν αλληλοεπηρεάζονται. Αυτό σημαίνει ότι οι διεσπαρμένοι πόροι δεν λειτουργούν ανταγωνιστικά σε ό,τι έχει να κάνει με την αγοραπωλησία ενέργειας σε ολόκληρο το δίκτυο και συνάμα οι ποσότητες και οι τιμές που ορίζουν καθώς και οι αποφάσεις του διαχειριστή δεν μπορούν να επηρεάσουν την οριακή τιμή του γενικού συστήματος. Από την άλλη πλευρά θεωρείται ότι οι διεσπαρμένοι πόροι όντας οργανωμένοι σε ένα περιορισμένο τοπολογικά χώρο (ενεργειακή κοινότητα , μικροδίκτυο) δεν μπορούν να αγοράσουν ή να πουλήσουν ενέργεια προς το υπόλοιπο δίκτυο. Αυτό σημαίνει ότι ο διαχειριστής δεν έχει την δυνατότητα “εξωτερικής” αγοράς και πώλησης ενέργειας. Αυτό σε ό,τι αφορά το υπολογιστικό κομμάτι του προβλήματος σημαίνει ότι οι όροι $\overline{GP}_{t,d}$, $\overline{GQ}_{t,d}$, $\overline{LP}_{t,d}$, $\overline{LQ}_{t,d}$, $GP_{t,d}$, $GQ_{t,d}$, $LP_{t,d}$, $LQ_{t,d}$ δεν θα συμμετάσχουν στην συνάρτηση βελτιστοποίησης και στο ισοζύγιο ισχύος ενώ όπως είναι λογικό θα αποκοπούν και οι σχέσεις [5.5]-[5.13].

Σε ό,τι αφορά την γραμμικοποίηση της συνάρτησης βελτιστοποίησης η γραμμικοποιημένη μορφή της θα είναι η ακόλουθη

$$\begin{aligned}
\min \sum_d A_d \left\{ \sum_{pb,s,t} \gamma_{pb,s,t,d} \bar{Q}_{pb,s,t,d} + \bar{P}_{pb,s,t,d} Q_{pb,s,t,d} \right. \\
+ \sum_{dc,s,t} \varphi_{dc,s,t,d} \bar{Q}_{dc,s,t,d} + \bar{P}_{dc,s,t,d} Q_{dc,s,t,d} \\
+ \sum_{db,s,t} \psi_{db,s,t,d} \bar{Q}_{db,s,t,d} - \bar{P}_{db,s,t,d} Q_{db,s,t,d} \\
+ \sum_{dp,s} \xi_{dp,s} \bar{Q}_{dp,s,t,d} + \bar{P}_{dp,s,t,d} Q_{pd,s} - \sum_{dc,s,t} Q C_{dc,s,t,d} RP \\
- \sum_{df,t} w_{df,t,d}^{max} \bar{R}U_{df,d} \\
+ \sum_{df,t} w_{df,t,d}^{min} \bar{Q}_{df,t,d} \\
\left. - \sum_{df,t>1} (\pi_{df,t,d}^{max} + \pi_{df,t,d}^{max}) RU_{df,d} \right\} \quad [5.131]
\end{aligned}$$

Όπου ο όρος $\sum_{pb,s,t} \gamma_{pb,s,t,d} \bar{Q}_{pb,s,t,d} + \bar{P}_{pb,s,t,d} Q_{pb,s,t,d}$ προκύπτει από τον συνδιασμό των σχέσεων [5.29],[5.34] , ο όρος $\sum_{dc,s,t} \varphi_{dc,s,t,d} \bar{Q}_{dc,s,t,d} + \bar{P}_{dc,s,t,d} Q_{dc,s,t,d}$ από τον συνδιασμό των σχέσεων [5.31],[5.36] , ο όρος $\sum_{db,s,t} \psi_{db,s,t,d} \bar{Q}_{db,s,t,d} - \bar{P}_{db,s,t,d} Q_{db,s,t,d}$ από τον συνδιασμό των σχέσεων [5.32],[5.37] , όρος $\sum_{dp,s} \xi_{dp,s} \bar{Q}_{dp,s,t,d} + \bar{P}_{dp,s,t,d} Q_{pd,s}$ από τον συνδιασμό των σχέσεων [5.30], [5.35] και ο όρος $\sum_{df,t} w_{df,t,d}^{max} \bar{R}U_{df,d} + \sum_{df,t} w_{df,t,d}^{min} \bar{Q}_{df,t,d} - \sum_{df,t>1} (\pi_{df,t,d}^{max} + \pi_{df,t,d}^{max}) RU_{df,d}$ από τον συνδιασμό των σχέσεων [5.33] , [5.38]

Κεφάλαιο 6 : Προσομοίωση

6.1 Εισαγωγή

Μετά την μαθηματική ανάλυση του προβλήματος και την μετατροπή του διεπίπεδου προβλήματος γραμμικού προγραμματισμού σε πρόβλημα ενός επιπέδου μέσω των συνθηκών Karush-Kuhn-Tucker πρέπει να ελεγχθεί κατά πόσο το μοντέλο είναι ικανοποιητικό. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφονται τα σενάρια που επιλέχθηκαν για την εξέταση του μοντέλου μαζί με τα δεδομένα εισόδου τους ενώ ακολουθούν τα αποτελέσματα που έδωσε το πρόγραμμα GAMS μαζί με τον σχολιασμό τους. Κατά την διεξαγωγή των προσομοιώσεων χρησιμοποιήθηκε φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής με επεξεργαστή Intel i7 7500U 2.7GHz και μνήμη RAM 8Gb (7.81 usable). Ο μέσος χρόνος εκτέλεσης της κάθε προσομοίωσης υπολογίστηκε περίπου στα τέσσερα δευτερόλεπτα.

6.2 Γενικά Στοιχεία

Σε όλα τα σενάρια που θα ακολουθήσουν πραγματοποιήθηκαν παραδοχές τόσοι συμμετέχοντες στην αγορά όσο και στον χρονικό ορίζοντα ελέγχου. Έτσι σε όλες τις περιπτώσεις θεωρήθηκε ότι συμμετέχουν στην διαδικασία δέκα τοπικοί παραγωγοί (pb1-pb10), πέντε καταναλωτές που ακολουθούν συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης (dp1-dp5), τρεις καταναλωτές με δυνατότητα περικοπής του φορτίου (dc1-dc3), τέσσερις καταναλωτές χωρίς ευέλικτο φορτίο (db1-db4) και τρεις καταναλωτές με ευέλικτο φορτίο (df1-df3). Σε ό,τι αφορά τον χρονικό ορίζοντα επιλέχθηκε κατανομή σε έναν μήνα ο οποίος χωρίστηκε σε 22 καθημερινές ημέρες (d1) και σε 8 Σάββατα και Κυριακές (d2). Όπως είναι λογικό το μοντέλο μπορεί να επεκταθεί και για περισσότερους συμμετέχοντες και στα πλαίσια ενός διαφορετικού χρονικού διαστήματος (τετράμηνα του έτους ανάλογα με την εποχή ή και ολόκληρος χρόνος).

6.3 Σενάριο για τους τοπικούς παραγωγούς Pb

Η λειτουργία των μονάδων τοπικής παραγωγής περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4.1 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για τοπικούς παραγωγούς όπου δώθηκαν οι περιγραφές τόσο των μεταβλητών του επιμέρους προβλήματος όσο και των παραμέτρων οι οποίες εισέρχονται ως δεδομένα εισόδου στην επίλυση του προβλήματος. Παρότι, δεν μας ενδιαφέρει η φύση των παραγωγών καθώς το πρόβλημα αντιμετωπίζεται ως μια διαδικασία ένταξης στην αγορά, αξίζει να αναφερθεί ότι οι τοπικοί παραγωγοί pb1-pb5

χρησιμοποιούν φωτοβολταικά συστήματα για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας για αυτό και εμφανίζουν μηδενικές δηλώσεις σε κάποια διαστήματα της ημέρας.

6.3.1 Δεδομένα εισόδου σεναρίου τοπικών παραγωγών

Σε ό,τι αφορά τα σενάρια προσομοίωσης στην περίπτωση της τοπικής παραγωγής ελέγχθηκαν δύο. Οι μόνες διαφορές που παρατήρηθηκαν στα δεδομένα εισόδου αφορούν μόνο τους τοπικούς παραγωγούς και τις δηλώσεις τους. Τα δεδομένα που αφορούν τους καταναλωτές με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης, τους απλούς καταναλωτές, τους καταναλωτές με ευέλικτο φορτίο καθώς και τους καταναλωτές με δυνατότητα περικοπής παραμένουν σταθερά και στα δύο σενάρια. Ταυτόχρονα σταθερές παραμένουν και οι μέγιστες ποσότητες ενέργειας που υποβάλλουν οι τοπικοί παραγωγοί και οι οποίες φαίνονται παρακάτω (Πίνακας 4).

Πίνακας 4: Μέγιστες ποσότητες ενέργειας που υποβάλλουν οι τοπικοί παραγωγοί και στα δύο σενάρια τοπικών παραγωγών

"Pb	D	t1	t2	t3	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t22	t23	t24
Pb1	d1	0	0	0	0.9	1.3	1.2	1	1.2	1.4	1	0.6	0.2	0	0	0
	d2	0	0	0	1.2	1.3	1.5	1.5	1.7	2	1.5	1.3	0.3	0	0	0
Pb2	d1	0	0	0	2.8	3.8	3.5	3	3.6	4.2	3.1	1.8	0.6	0	0	0
	d2	0	0	0	3.6	3.9	4.4	4.5	5.1	6	4.4	3.9	0.9	0	0	0
Pb3	d1	0	0	0	0.5	0.6	0.6	0.5	0.6	0.7	0.5	0.3	0.1	0	0	0
	d2	0	0	0	0.6	0.7	0.7	0.8	0.9	1	0.7	0.7	0.2	0	0	0
Pb4	d1	0	0	0	2.4	3.2	2.9	2.5	3	3.5	2.6	1.5	0.5	0	0	0
	d2	0	0	0	3	3.3	4	3.8	4.3	5	3.6	3.3	0.8	0	0	0
Pb5	d1	0	0	0	1.4	2	2	2	2	2	2	1	0.3	0	0	0
	d2	0	0	0	1.8	2	2.2	2	3	3	2	2	0	0	0	0
Pb6	d1	11.1	10.5	9.9	7.4	7.7	8.4	9.5	10	10	11	10	10	10	11	11
	d2	10.8	11.3	11	17	17	17	17	17	17	17	17	18	15	13	11
Pb7	d1	7.4	7.01	6.6	4.9	5.2	5.6	6.3	6.8	7	7.1	6.9	6.8	7	7.6	7.4
	d2	7.21	7.56	7.2	11	12	12	11	11	11	11	11	12	10	8.8	7.6
Pb8	d1	4.94	4.68	4.4	3.3	3.4	3.7	4.2	4.5	4.7	4.8	4.6	4.6	4.7	5.1	4.9
	d2	4.81	5.04	4.8	7.6	7.7	7.7	7.6	7.6	7.6	7.4	7.5	7.9	6.6	5.8	5
Pb9	d1	1.23	1.17	1.1	0.8	0.9	0.9	1.1	1.1	1.2	1.2	1.2	1.1	1.2	1.3	1.2
	d2	1.2	1.26	1.2	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	1.9	2	1.7	1.5	1.3
Pb10	d1	5.55	5.26	5	3.7	3.9	4.2	4.7	5.1	5.2	5.4	5.2	5.1	5.2	5.7	5.5
	d2	5.41	5.67	5.4	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.6	8.4	8.5	8.9	7.5	6.6	5.7

Αυτά που αλλάζουν είναι οι τιμές πώλησης της ενέργειας. Στο πρώτο σενάριο οι τιμές των παραγωγών pb6-pb9 είναι αισθητά μικρότερες από τις αντίστοιχες του δεύτερου σεναρίου. Αντίθετα οι τιμές των παραγωγών pb1-pb5 και pb10 διατηρούνται σταθερές και στα δύο σενάρια, όπως φαίνεται και στους παρακάτω πίνακες (Πίνακας 5 και Πίνακας 6). Ιδιαίτερη αναφορά αξίζει να γίνει και για τον παραγωγό pb9 στο δεύτερο σενάριο ο οποίος την ημέρα d2 πουλάει σε μηδενική τιμή. Αυτό λοιπόν που περιμένουμε έπειτα από την εκτέλεση του κώδικα είναι ο παραγωγός pb9 την ημέρα d2 να εντάσσεται για όλες τις ώρες.

Πίνακας 5: Τιμές πώλησης ενέργειας που υποβάλλουν οι τοπικοί παραγωγοί στο πρώτο σενάριο τοπικών παραγωγών

Pb	D	t1	t2	t3	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t22	t23	t24
Pb1	d1	0	0	0	5	6	6	5	6	7	5	3	1	0	0	0
	d2	0	0	0	6	7	7	8	9	10	7	7	2	0	0	0
Pb2	d1	0	0	0	3	4	4	3	4	4	3	2	1	0	0	0
	d2	0	0	0	4	4	4	5	5	6	4	4	1	0	0	0
Pb3	d1	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0
	d2	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0
Pb4	d1	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0
	d2	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0
Pb5	d1	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	0
	d2	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	0
Pb6	d1	5	5	4	9	8.9	8.6	7.8	7.2	6.4	6.2	6.2	6.3	8.6	7.1	6.4
	d2	5	5	5	7	6.6	6.2	4.7	4.7	4.6	4.4	4.4	4.5	8.9	8.7	8.3
Pb7	d1	2	2	2	4	4.5	4.3	3.9	3.6	3.2	3.1	3.1	3.2	4.3	3.6	3.2
	d2	2	2	2	3	3.3	3.1	2.3	2.3	2.3	2.2	2.2	2.3	4.4	4.4	4.1
Pb8	d1	7	7	7	13	13	13	12	11	9.5	9.4	9.4	9.5	13	11	9.5
	d2	7	7	7	10	9.9	9.3	7	7	6.9	6.6	6.5	6.8	13	13	12
Pb9	d1	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
	d2	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12
Pb10	d1	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	d2	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

Πίνακας 6 : Τιμές πώλησης ενέργειας που υποβάλλουν οι τοπικοί παραγωγοί στο δεύτερο σενάριο τοπικών παραγωγών

Pb	D	t1	t2	t3	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t22	t23	t24
Pb1	d1	0	0	0	5	6	6	5	6	7	5	3	1	0	0	0
	d2	0	0	0	6	7	7	8	9	10	7	7	2	0	0	0
Pb2	d1	0	0	0	3	4	4	3	4	4	3	2	1	0	0	0
	d2	0	0	0	4	4	4	5	5	6	4	4	1	0	0	0
Pb3	d1	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0
	d2	0	0	0	12	12	12	12	12	12	12	12	12	0	0	0
Pb4	d1	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0
	d2	0	0	0	11	11	11	11	11	11	11	11	11	0	0	0
Pb5	d1	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	0
	d2	0	0	0	10	10	10	10	10	10	10	10	10	0	0	0
Pb6	d1	52	50	49	95	98	94	86	79	70	69	69	69	95	78	70
	d2	42	42	41	60	59	56	42	42	42	39	39	41	80	78	75
Pb7	d1	17	16	16	30	31	30	27	25	22	22	22	22	30	25	22
	d2	16	16	16	23	23	22	16	16	16	15	15	16	31	30	29
Pb8	d1	12	11	11	22	22	21	20	18	16	16	16	16	22	18	16
	d2	12	12	11	17	16	15	12	12	12	11	11	11	22	22	21
Pb9	d1	15	14	13	10	10	11	13	14	14	14	14	14	14	15	15
	d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pb10	d1	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
	d2	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11

6.3.2 Αποτελέσματα σεναρίου τοπικών παραγωγών

Με την εκτέλεση της προσομοίωσης παρατηρούμε διαφορές σε τρεις μεταβλητές εξόδου που αφορούν : την ποσότητα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο, την ενσωμάτωση τοπικών παραγωγών και τις λιανικές τιμές αποζημίωσης της παραγόμενης ενέργειας. Ξεκινώντας από την ένταξη των τοπικών παραγωγών παρατηρούμε στο σύνολο των καθημερινών ημερών εντάσσονται όλοι οι παραγωγοί με μη μηδενικές προσφορές στο πρώτο σενάριο ενώ στο δεύτερο σενάριο δεν ενσωματώνεται ο παραγωγός pb6. Αυτό συμβαίνει διότι ο παραγωγός pb6 υποβάλει δήλωση στην οποία η τιμή που θέλει να αποζημιωθεί κατ'ελάχιστο είναι μεγαλύτερη από την οριακή τιμή του συστήματος. Αντίθετα στο σύνολο των Σαββατοκύριακων , στο πρώτο σενάριο δεν εντάσσεται κανένας τοπικός παραγωγός ενώ στο δεύτερο έχουμε μερική ενσωμάτωση. Ενσωματώνονται δηλαδή όλοι οι τοπικοί παραγωγοί εκτός από τον pb6 για τον ίδιο λόγο που αναφέρθηκε και τον pb7 για τις τελευταίες ώρες των ημερών διότι η τιμή που επιθυμεί να αποζημιωθεί ξεπερνάει ένα ανώτατο όριο (40) το οποίο έχει οριστεί από τον διαχειριστή. Στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 7) παρουσιάζονται για κάθε τοπικό παραγωγό ημέρα και σενάριο η συνολική προσφορά ενέργειας για όλες τις χρονικές στιγμές κατανομής. Αυτά τα αποτελέσματα επηρεάζουν και τις άλλες δύο μεταβλητές εισόδου που αναφέρθηκαν. Σε ό.τι αφορά τις λιανικές τιμές αποζημίωσης αυτές ορίζονται ως η τιμή ένταξης του πιο ακριβού παραγωγού που επιλέγεται να λάβει μέρος στην διαδικασία (Πίνακας 8).

Πίνακας 7 : Ποσότητες ενσωμάτωσης τοπικών παραγωγών για τα σενάρια τοπικών παραγωγών

Pb	D	Case 1	Case 2
Pb1	d1	8.945	8.945
	d2	0	12.413
Pb2	d1	26.835	26.835
	d2	0	37.239
Pb3	d1	4.472	4.472
	d2	0	6.206
Pb4	d1	22.362	22.362
	d2	0	31.339
Pb5	d1	14.863	14.863
	d2	0	18.178
Pb6	d1	228.762	0
	d2	0	357.316
Pb7	d1	152.508	152.508
	d2	0	177.491

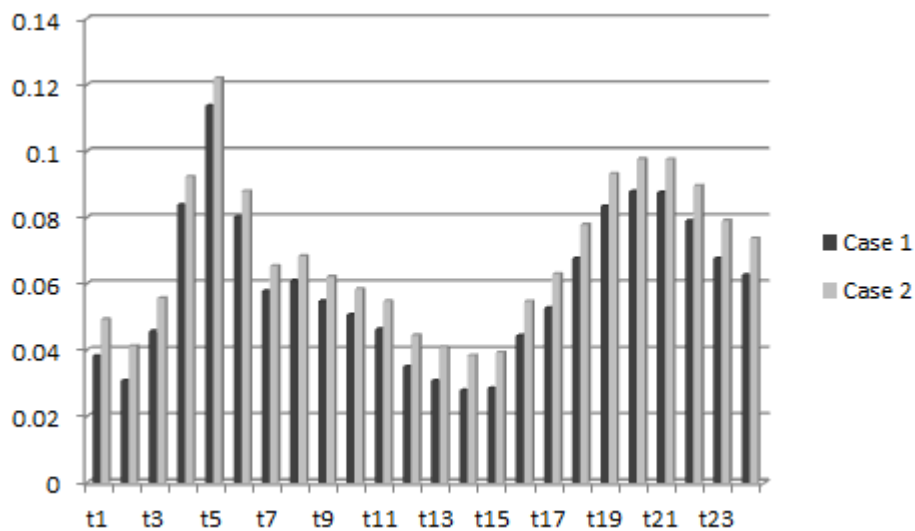
Pb8	d1	101.672	101.672
	d2	0	158.807
Pb9	d1	25.418	25.418
	d2	0	39.701
Pb10	d1	114.381	114.381
	d2	0	178.658

Πίνακας 8 : Λιανικές τιμές αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας από τους τοπικούς παραγωγούς για τα δύο σενάρια τοπικών παραγωγών

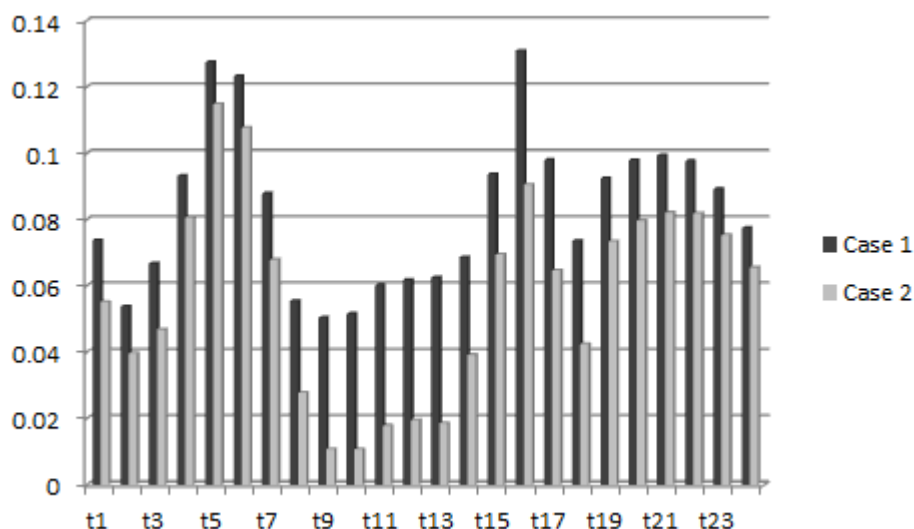
	d1	d2
Case 1	13.500	31.500
Case 2	0	23.205

Είναι αναμενόμενο , λοιπόν, να περιμένουμε μηδενική τιμή τα Σαββατοκύριακα στο πρώτο σενάριο και εν γένει μεγαλύτερες τιμές στο δεύτερο σενάριο εξαιτίας των πιο ακριβών τιμών στις δηλώσεις επιβεβαιώνοντας τις τιμές του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 8)

Τέλος , μιας και η ενσωμάτωση των τοπικών παραγωγών τις καθημερινές ημέρες στο πρώτο σενάριο είναι μεγαλύτερη αναμένουμε μικρότερη άντληση από το δίκτυο σε σχέση με το δεύτερο σενάριο , για να συνεχίσει να ικανοποιείται το ισοζύγιο ισχύος του διαχειριστή. Ακριβώς τα αντίθετα παρατηρούνται τα Σαββατοκύριακα όπως φαίνεται και από το Διάγραμμα 3 και το Διάγραμμα 4



Διάγραμμα 3 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τις καθημερινές ημέρες για τα σενάρια τοπικών παραγωγών



Διάγραμμα 4 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια τοπικών παραγωγών

Όπως είναι λογικό το πρώτο σενάριο είναι πιο κερδοφόρο για τον διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων διότι του δίνει την δυνατότητα να αγοράσει ενέργεια από τους τοπικούς παραγωγούς σε τιμή μικρότερη από το δεύτερο. Αυτό το αποτέλεσμα παρατηρείται και από την εκτέλεση των προσομοιώσεων όπου στο πρώτο σενάριο εμφανίζεται ζημία ίση με 29,556€ και στο δεύτερο 278,860€.

6.4 Σενάριο για καταναλωτές db χωρίς ευέλικτο φορτίο

Η λειτουργία των καταναλωτών με μη ευέλικτο φορτίο περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4.4 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για τους καταναλωτές χωρίς ευέλικτα φορτία όπου δώθηκαν οι περιγραφές τόσο των μεταβλητών του επιμέρους προβλήματος όσο και των παραμέτρων οι οποίες εισέρχονται ως δεδομένα εισόδου στην επίλυση του προβλήματος.

6.4.1 Δεδομένα εισόδου σεναρίου καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο

Σε ό,τι αφορά τα σενάρια που εξετάστηκαν προσομοιώθηκαν δύο διαφορετικές περιπτώσεις και εδώ. Στο πρώτο σενάριο όλοι οι καταναλωτές με μη ευέλικτο φορτίο (db1-db4) εμφανίζουν στις δηλώσεις τους διπλάσιες ποσότητες φορτίου σε σχέση με το δεύτερο σενάριο όπως απεικονίζεται και στον συγκριτικό πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 10 : Συγκριτικός πίνακας ποσοτήτων ζήτησης καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο για τα δύο σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει σε σχέση με τις τιμές ζήτησης στις οποίες το πρώτο σενάριο εμφανίζει μικρότερες τιμές σε σχέση με τις αντίστοιχες του δεύτερου όπως φαίνεται και στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 9). Όλες οι υπόλοιπες παράμετροι εισόδου παραμένουν σταθερές και στα δύο σενάρια.

Πίνακας 9 : Συγκρητικός πίνακας τιμών ζήτησης καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο για τα δύο σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο

Db	Case	D	t1	t2	t3	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t22	t23	t24
Db1	1°	d1	46	62	92	37	25	25	17	16	18	21	20	19	19	24	35
	2°	d1	77	103	154	62	42	42	28	26	30	35	33	32	31	40	58
	1°	d2	40	56	62	23	20	16	15	15	16	19	19	17	17	21	25
	2°	d2	66	93	103	39	33	27	25	25	26	31	31	28	29	35	42
Db2	1°	d1	41	49	68	39	26	23	19	17	14	14	17	18	21	54	135
	2°	d1	69	82	113	65	43	39	31	28	23	23	28	30	35	90	225
	1°	d2	27	36	60	22	21	19	15	14	14	14	16	17	16	17	21
	2°	d2	45	60	100	36	35	32	25	23	23	23	26	28	26	28	35
Db3	1°	d1	53	66	66	29	23	19	14	14	14	16	20	20	44	48	53
	2°	d1	88	110	110	49	38	32	24	23	23	26	33	33	73	80	88
	1°	d2	33	48	53	20	20	17	14	13	13	14	16	17	17	20	26
	2°	d2	55	80	88	33	33	28	23	22	22	23	27	28	28	33	44
Db4	1°	d1	40	64	73	28	27	20	19	18	19	20	20	17	15	18	34
	2°	d1	66	107	122	47	45	34	31	30	31	33	33	29	25	30	57
	1°	d2	26	51	73	30	20	17	16	16	16	16	17	17	14	15	16
	2°	d2	43	85	122	50	34	29	27	26	26	27	29	29	24	25	27

Πίνακας 10 : Συγκρητικός πίνακας ποσοτήτων ζήτησης καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο για τα δύο σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο

Db	Case	D	t1	t2	t3	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t22	t23	t24
Db1	1°	d1	12	9	6	15	22	22	33	36	31	27	28	29	30	23	16
	2°	d1	6	4.5	3	7.5	11	11	17	18	16	14	14	15	15	12	8
	1°	d2	14	10	9	24	28	35	37	37	36	30	30	33	32	27	22
	2°	d2	7	5	4.5	12	14	18	19	19	18	15	15	17	16	14	11
Db2	1°	d1	13	11	8	14	21	23	29	33	40	40	32	30	26	10	4
	2°	d1	6.5	5.5	4	7	11	12	15	17	20	20	16	15	13	5	2
	1°	d2	20	15	9	25	26	28	37	40	40	39	35	33	35	32	26
	2°	d2	10	7.5	4.5	13	13	14	19	20	20	20	18	17	18	16	13
Db3	1°	d1	10	8	8	18	23	28	37	38	38	34	27	27	12	11	10
	2°	d1	5	4	4	9	12	14	19	19	19	17	14	14	6	5.5	5
	1°	d2	16	11	10	27	27	32	39	40	40	38	33	32	32	27	20
	2°	d2	8	5.5	5	14	14	16	20	20	20	19	17	16	16	14	10
Db4	1°	d1	13	8	7	18	19	25	28	29	28	26	26	30	35	29	15
	2°	d1	6.5	4	3.5	9	9.5	13	14	15	14	13	13	15	18	15	7.5
	1°	d2	20	10	7	17	25	30	32	33	33	32	30	30	36	34	32
	2°	d2	10	5	3.5	8.5	13	15	16	17	17	16	15	15	18	17	16

6.4.2 Αποτελέσματα σεναρίου καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο

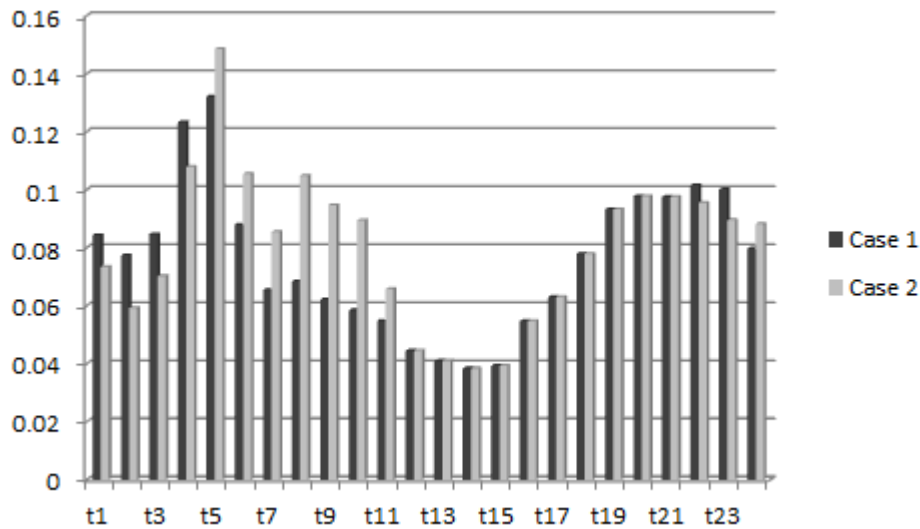
Λαμβάνοντας τα αποτελέσματα βλέπουμε διαφορές σε ό.τι έχει να κάνει με την ένταξη των καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο καθώς και στις ποσότητες άντλησης ενέργειας από το δίκτυο. Αυτό που αναμένουμε και τελικά παρατηρούμε είναι ότι στο δεύτερο σενάριο έχουμε μεγαλύτερη ενσωμάτωση καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο, μιας και έχουν μειωμένες ζητήσεις. Η μειωμένη ζήτηση του καθενός προσφέρει την δυνατότητα στον διαχειριστή να εντάξει περισσότερες μονάδες στην διαδικασία.

Πίνακας 11 : Ενσωμάτωση καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο τις καθημερινές ημέρες για τα δύο σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο

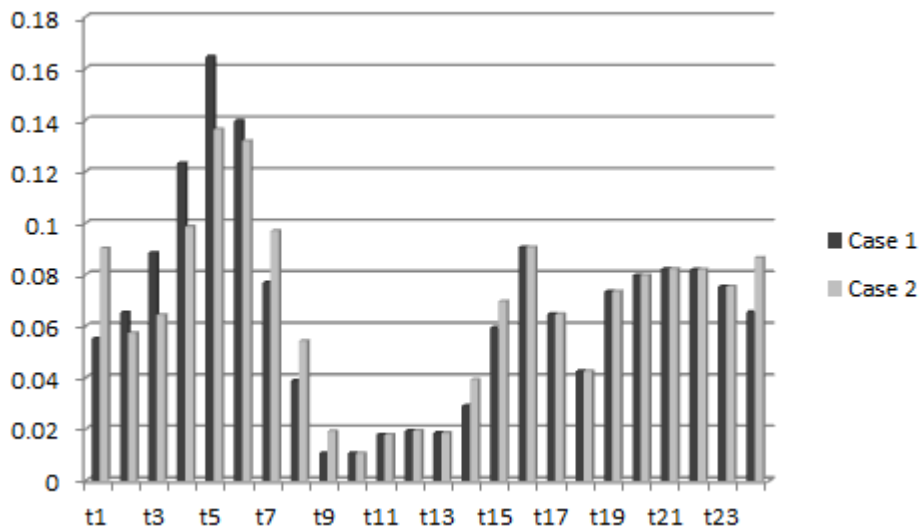
Case	DB	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t9	t10	t11	t22	t23	T24
2	Db1	1 6	1 4.5	1 3	1 3	1 7.5	0	0	0	1 7.5	1 11	1 11	0	0	1 8
2	Db2	1 6.5	1 5.5	1 4	1 4	1 7	1 8.5	1 10.5	1 7.5	1 7	1 0	0 0	0 0	1 5	1 2
2	DB3	1 5	1 4	1 4	1 4.5	1 15	0	0	1 9	1 9	1 11.5	0	1 6	1 5.5	1 5
2	DB4	1 6.5	1 4	1 3.5	1 4	1 5	1 9	1 9.5	1 9.5	1 9	1 9.5	0	0	0	1 7.5
2	Άθροισμα	24	18	14.5	15.5	48	17.5	20	26	32.5	32	11	6	10.5	22.5
1	DB1	1 12	1 9	1 6	1 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	DB2	1 13	1 11	1 8	1 8	0	0	0	0	0	0	0	0	1 10	1 4
1	DB3	1 10	1 8	1 8	1 9	1 10	0	0	0	0	0	0	1 12	1 11	1 10
1	DB4	0	1 8	1 7	1 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	Άθροισμα	35	36	29	31	10	0	0	0	0	0	0	12	21	14

Στον ανωτέρω πίνακα (Πίνακας 11) παρατηρούμε τα αποτελέσματα τις καθημερινές ημέρες για τα δύο σενάρια. Στον συγκεκριμένο πίνακα κάθε κελί περιλαμβάνει δύο τιμές. Η πάνω τιμή αφορά το ποσοστό ένταξης της συγκεκριμένης μονάδας σε σχέση με την δήλωση που έχει υποβάλει ενώ η κάτω την ακριβή τιμή. Στο τέλος του κάθε σεναρίου παρουσιάζονται οι αθροίσεις ανά ημέρα. Παρόμοιος είναι και ο πίνακας που προκύπτει για τα Σαββατοκύριακα για αυτό και δεν παρατίθεται. Αυτό συμβαίνει ώστε να βγάλουμε το απαραίτητο συμπέρασμα για την άντληση ενέργειας από το δίκτυο. Τις χρονικές στιγμές t1-t4 και t22-t23 το άθροισμα των τιμών ζήτησης στο πρώτο σενάριο είναι μεγαλύτερο από το αντίστοιχο του δεύτερου σεναρίου και επομένως αναμένουμε μεγαλύτερη άντληση ενέργειας από το δίκτυο ώστε να συνεχίζει να ικανοποιείται το ενεργειακό ισοζύγιο. Το ακριβώς αντίθετο συμβαίνει τις χρονικές περιόδους t5-t11 και t24. Τέλος, όπως είναι αναμενόμενο τις χρονικές στιγμές t12-t21 που δεν παρουσιάζονται στον πίνακα δεν έχουμε καθόλου ενσωμάτωση σε κανένα από τα δύο σενάρια και αναμένουμε ίδιες τιμές άντλησης

από το δίκτυο. Αυτά επιβεβαιώνονται και από το Διάγραμμα 5 άντλησης ενεργού ισχύος για τις καθημερινές ημέρες, ενώ ακολουθεί και το αντίστοιχο για τα Σαββατοκύριακα (Διάγραμμα 6).



Διάγραμμα 5: Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τις καθημερινές ημέρες για τα σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο



Διάγραμμα 6 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο

Αθροίζοντας τις ποσότητες άντλησης από το δίκτυο που παρουσιάζονται στα δύο διαγράμματα (Διάγραμμα 5, Διάγραμμα 6) για κάθε ημέρα παρατηρούμε ότι στο δεύτερο σενάριο έχουμε και τις δύο ημέρες μεγαλύτερη ποσότητα άντλησης ενέργειας από το

δίκτυο. Σύμφωνα με τον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 12) ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων εμφανίζει και στα δύο σενάρια ζημία η οποία είναι μεγαλύτερη στο δεύτερο σενάριο

Πίνακας 12: Κόστος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια καταναλωτών χωρίς ευέλικτο φορτίο

	Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων
Case 1	332,253€
Case 2	439,027€

Αυτό συμβαίνει διότι η ενέργεια που αγοράζει ο διαχειριστής από το δίκτυο χρεώνεται στην οριακή τιμή του συστήματος η οποία είναι μεγαλύτερη από την τιμή πώλησης της ενέργειας στους καταναλωτές χωρίς ευέλικτο φορτίο. Για τον λόγο αυτό το σενάριο ένα είναι λιγότερο ζημιογόνο από το σενάριο δύο για τον διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων.

6.5 Σενάριο για καταναλωτές df με ευέλικτο φορτίο

Η λειτουργία των καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4.5 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για καταναλωτές με ευέλικτα φορτία όπου δώθηκαν οι περιγραφές τόσο των μεταβλητών του επιμέρους προβλήματος όσο και των παραμέτρων οι οποίες εισέρχονται ως δεδομένα εισόδου στην επίλυση του προβλήματος.

6.5.1 Δεδομένα εισόδου σεναρίου καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο

Σε ό,τι αφορά αυτούς τους καταναλωτές εξετάστηκαν 3 σενάρια στα οποία όπως και παραπάνω διατηρήθηκαν σταθερά τα στοιχεία που αφορούν τους υπόλοιπους καταναλωτές και παραγωγούς. Έτσι, στο πρώτο σενάριο έχουμε ίδια ποσότητα διαφοράς μεταξύ διαδοχικών περιόδων και μικρότερη μέγιστη ποσότητα φορτίου σε σχέση με το δεύτερο σενάριο. Στο πρώτο σενάριο σε σχέση με το τρίτο έχουμε μεγαλύτερη ποσότητα διαφοράς μεταξύ διαδοχικών περιόδων και μικρότερη μέγιστη ποσότητα φορτίου. Τέλος, το τρίτο σενάριο εμφανίζει μικρότερη ποσότητα διαφοράς μεταξύ διαδοχικών περιόδων και ίδια μέγιστη ποσότητα φορτίου σε σχέση με το δεύτερο. Αυτά φαίνονται και στον πίνακα που ακολουθεί (Πίνακας 13).

Πίνακας 13 : Δεδομένα εισόδου καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο για τα τρία σενάρια καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο.

DF	D	Quantity energy Case 1°	Case 2°	Case 3°	Quantity ramp Case 1°	Case 2°	Case 3°	Quantity peak Case 1°	Case 2°	Case 3°
Df1	d1	30	30	30	7	7	1.5	1.25	3	3
	d2	50	50	50	7	7	2.5	2.083	5	5
Df2	d1	0	0	0	12	12	0	0	0	0
	d2	90	90	90	12	12	4.5	3.75	9	9
Df3	d1	40	40	40	8	8	2	1.667	4	4
	d2	110	110	110	8	8	5.5	4.583	11	11

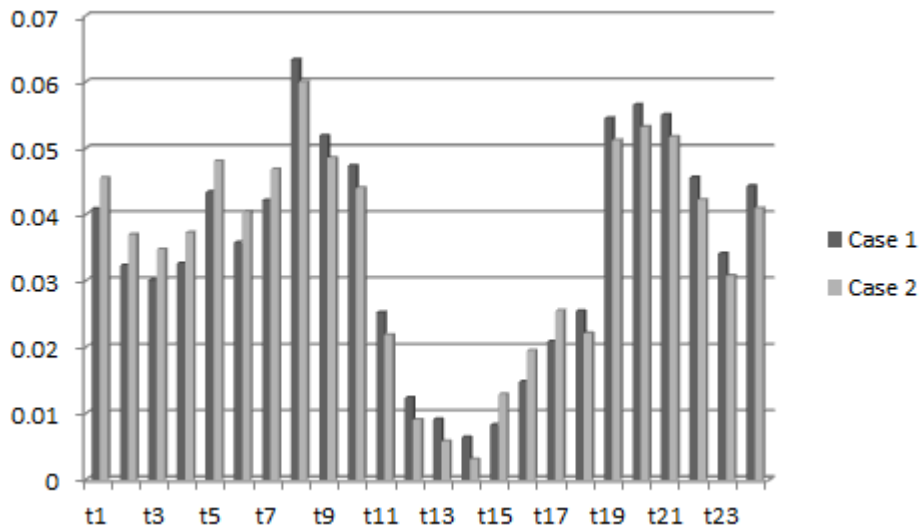
Df4	d1	10	10	10	9	9	0.5	0.417	1	1
	d2	40	40	40	9	9	2	1.667	4	4

6.5.2 Αποτελέσματα σεναρίου καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο

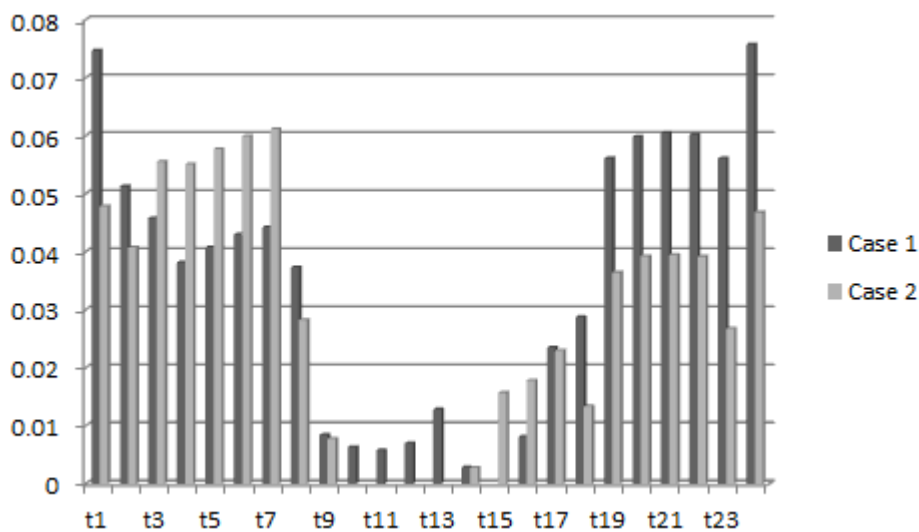
Σε ένα πρώτο επίπεδο θα εξετάσουμε τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από τα σενάρια ένα και δύο. Με την εκτέλεση της προσομοίωσης βλέπουμε διαφορές που σχετίζονται με : την ένταση καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής, την ένταση καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο, καθώς και την δυνατότητα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο. Αρχικά παρατηρούμε μεγαλύτερη ένταση καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής στο δεύτερο σενάριο. Από την άλλη πλευρά , παρατηρούμε μεγαλύτερη ένταση καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο στο πρώτο σενάριο. Αυτό είναι λογικό διότι έχοντας μειώσει τις ποσότητες ζήτησης ο διαχειριστής έχει το περιθώριο να εντάξει περισσότερες μονάδες(Πίνακας 14). Αποτέλεσμα της ένταξης περισσότερων μονάδων αποτελεί και η αύξηση που παρατηρείται στο περιθώριο κέρδους στο πρώτο σενάριο. Σε ό,τι αφορά την άντληση ενέργειας από το δίκτυο παρατηρούμε μεγαλύτερη άντληση στο πρώτο σενάριο(Διάγραμμα 7,Διάγραμμα 8)

Πίνακας 14 : Ενσωμάτωση καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο στα σενάρια 1 και 2 των καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο

DF	Case	D	t1	t2	t8	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t17	t18	t19	t20	t21	t22	t23	t24
Df1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	0	0.07	0	0	0	0.4		0.5	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Df2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	0	0	0	0	0.16	0	1	0	0.8	1	0	0	0	0	0	0	0
Df3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	0	0.4	0.3	0	0	0	0.3	1	0.3	0.7	0	0	0	0	0	0	0
Df4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0



Διάγραμμα 7 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τις καθημερινές ημέρες για τα σενάρια καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο



Διάγραμμα 8 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο

Η μεγαλύτερη άντληση ενέργειας στο πρώτο σενάριο που επιβεβαιώνεται και από τα διαγράμματα είναι λογική. Αυξανόμενης της ζήτησης ο διαχειριστής δύναται να αγοράσει μεγαλύτερες ποσότητες ενέργειας από το δίκτυο ώστε να ικανοποιήσει το ενεργειακό του ισοζύγιο.

Τέλος , σε ό,τι αφορά το κέρδος ή την ζημία του διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων παρατηρούμε ότι το ευνοϊκότερο σενάριο για αυτόν είναι το πρώτο σύμφωνα με τα αποτελέσματα του ακόλουθου πίνακα (Πίνακας 15).

Πίνακας 15: Κέρδος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια 1 και 2 καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο

	Κέρδος διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων
Case 1	17,666€
Case 2	-87,351€

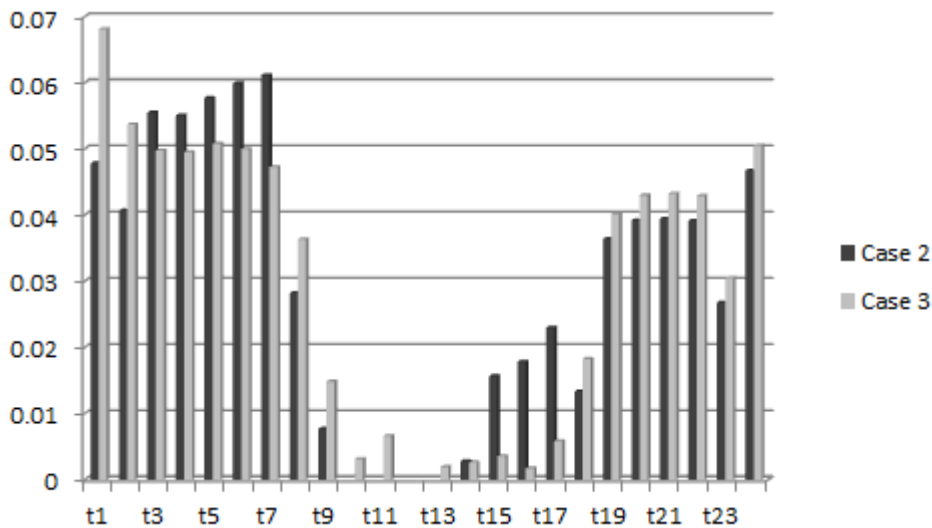
Αυτή η ζημία στο σενάριο δύο σε σχέση με το κέρδος στο σενάριο ένα είναι φυσιολογική. Ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων αγοράζει ενέργεια από το δίκτυο σε τιμή ίση με την οριακή τιμή του συστήματος ενώ πουλάει αυτή την ενέργεια στους καταναλωτές με ευέλικτο φορτίο σε μια τιμή η οποία είναι περίπου τριπλάσια από την οριακή τιμή του συστήματος.

Σε ένα δεύτερο επίπεδο θα εξετάσουμε τα αποτελέσματα που λαμβάνουμε από τα σενάρια δύο και τρία. Έχοντας μειώσει τον ρυθμό ανόδου και καθόδου στο τρίτο σενάριο, έχουμε μειώσει και τις απαιτήσεις των καταναλωτών σε ό,τι έχει να κάνει με τις ποσότητες ένταξης τους, μεταξύ διαδοχικών χρονικών περιόδων. Αυτό σημαίνει ότι ο διαχειριστής μπορεί να εντάσσει τους καταναλωτές για ποσότητες μικρότερες από αυτές που απαιτούσαν κατ'ελάχιστο στο δεύτερο σενάριο. Αυτό όπως είναι αναμενόμενο και επιβεβαιώνεται και στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 16, αφορά μόνο τις καθημερινές ημέρες, αλλά αντίστοιχα είναι και τα αποτελέσματα και τα Σαββατοκύριακα) οδηγεί σε μεγαλύτερη διείσδυση αυτών των καταναλωτών. Στον πίνακα που ακολουθεί κάθε κελί περιλαμβάνει δύο τιμές. Η πάνω τιμή αφορά το ποσοστό ένταξης της συγκεκριμένης μονάδας σε σχέση με την δήλωση που έχει υποβάλει ενώ η κάτω την ακριβή τιμή. Στο τέλος του πίνακα παρουσιάζονται οι αθροίσεις για τα δύο σενάρια ανά ημέρα. Αυτό συμβαίνει ώστε να βγάλουμε το απαραίτητο συμπέρασμα για την άντληση ενέργειας από το δίκτυο. Τις χρονικές στιγμές t1-t7 και t16 βλέπουμε ότι οι αθροίσεις είναι κοινές και στους δύο πίνακες. Αυτό σημαίνει ότι έχουμε κοινή ζήτηση για αυτούς του καταναλωτές και από την στιγμή που όλα τα υπόλοιπα δεδομένα σε ότι αφορά τις μονάδες που εντάσσονται είναι κοινά, σημαίνει ότι θα έχουμε και κοινή άντληση ενέργειας από το δίκτυο ώστε να ικανοποιείται το ενεργειακό ισοζύγιο του διαχειριστή. Τις χρονικές στιγμές t8 και t14 παρατηρούμε ότι οι αθροίσεις στο τρίτο σενάριο είναι μεγαλύτερες και ως αποτέλεσμα περιμένουμε μεγαλύτερη ποσότητα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο. Το ακριβώς αντίθετο αναμένουμε τις χρονικές περιόδους t15 και t17. Αυτά τα συμπεράσματα επαληθεύονται και από το διάγραμμα Διάγραμμα 9. Ανάλογη συλλογιστική ακολουθείται και για την επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων άντλησης τα Σαββατοκύριακα.

Πίνακας 16 : Ενσωμάτωση καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο στα σενάρια 2 και 3 των καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο

DF	Case	t1	t2	t3	t4	t5	t6	t7	t8	t14	t15	t16	t17
Df1	2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1

		3	3	3	3	3	3	3	0	0	3	3	3
	3	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.25	0.75	1	0.5
		3	3	3	3	3	3	3	1.5	0.75	2.25	3	1.5
Df2	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Df3	2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
		4	4	4	4	4	4	4	0	0	4	4	4
	3	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.25	0.75	1	0.5
		4	4	4	4	4	4	4	2	1	3	4	2
Df4	2	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
		1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
	3	1	1	1	1	1	1	1	0.5	0.25	0.75	1	0.5
		1	1	1	1	1	1	1	1	0.25	0.75	1	0.5
Άθροισμα2		8	8	8	8	8	8	8	0	0	8	8	8
Άθροισμα3		8	8	8	8	8	8	8	4.5	2	6	8	4



Διάγραμμα 9 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο

Αθροίζοντας τις τιμές της άντλησης του δικτύου παρατηρούμε ότι είναι κοινές και στα δύο σενάρια. Αυτό που καθιστά το τρίτο σενάριο πιο επικερδές για τον διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων είναι οι μεταβολές σε κάποια περιθώρια κέρδους και συγκεκριμένα η αύξηση τους στο τρίτο σενάριο. Όπως φαίνεται και στον παρακάτω πίνακα το σενάριο δύο εμφανίζει μικρότερα περιθώρια κέρδους μεταξύ των χρονικών περιόδων t10 και t13 τα Σαββατοκύριακα. Το συμφέρον του διαχειριστή στο τρίτο σενάριο επιβεβαιώνεται και από τις τιμές που λαμβάνει η συνάρτηση βελτιστοποίησης για τα δύο σενάρια (Πίνακας 18).

Πίνακας 17: Περιθώρια κέρδους στα υπό εξέταση σενάρια 2 και 3 καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο

	t10	t11	t12	t13
Case 2	1.109	1.242	1.980	1.980
Case 3	1.789	1.252	1.993	2

Πίνακας 18: Κέδος-Ζημία διαχειριστή διεσαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια 2 και 3 καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο

	Ζημία διαχειριστή διεσαρμένων πόρων
Case 2	87,351€
Case 3	64,185€

6.6 Σενάριο για καταναλωτές dc με δυνατότητα περικοπής φορτίου

Η λειτουργία των καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής του φορτίου περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4.3 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για την ζήτηση περικοπής ζώθηκαν οι περιγραφές τόσο των μεταβλητών του επιμέρους προβλήματος όσο και των παραμέτρων οι οποίες εισέρχονται ως δεδομένα εισόδου στην επίλυση του προβλήματος.

6.6.1 Δεδομένα εισόδου σεναρίου καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής φορτίου

Σε ό,τι αφορά αυτούς τους καταναλωτές εξετάστηκαν 3 σενάρια στα οποία όπως και παραπάνω διατηρήθηκαν σταθερά τα στοιχεία που αφορούν τους υπόλοιπους καταναλωτές και παραγωγούς. Σε ό,τι αφορά την ποσότητα ζήτησης χωρίς περικοπή στο πρώτο σενάριο είναι περίπου το 1/3 σε σχέση με τα αντίστοιχα του δεύτερου και του τρίτου σεναρίου, τα οποία είναι μεταξύ τους ίδια (Πίνακας 19) . Την ίδια αντιστοιχία ακολουθούν και οι ποσότητες ζήτησης περικοπής ούσες ίδιες στο δεύτερο και τρίτο σενάριο και τριπλάσια στο πρώτο (Πίνακας 20). Τέλος , σε ό,τι αφορά την τιμή αποζημίωσης , αυτή είναι ίδια στα δύο πρώτα σενάρια και περίπου η διπλάσια στο τρίτο (Πίνακας 21).

Πίνακας 19: Ποσότητα ζήτησης χωρίς περικοπή για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής

Dc	Case	D	T1	t2	t3	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t22	t23	t24
Dc1	1°	d1	6.9	6	6	8	8	8	7	7	7	7	7	8	9	8	8
Dc1	2°	d1	21	19	19	24	23	23	22	21	21	20	22	23	28	25	23
Dc1	3°	d1	21	19	19	24	23	23	22	21	21	20	22	23	28	25	23
Dc1	1°	d2	6.6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	8	7	7

Dc1	2°	d2	20	18	18	17	18	18	19	19	19	17	18	19	24	22	21
Dc1	3°	d2	20	18	18	17	18	18	19	19	19	17	18	19	24	22	21
Dc2	1°	d1	6	5	6	7	7	7	6	6	6	6	6	7	8	7	7
Dc2	2°	d1	18	16	17	21	20	20	19	19	18	18	19	20	24	22	21
Dc2	3°	d1	18	16	17	21	20	20	19	19	18	18	19	20	24	22	21
Dc2	1°	d2	5.8	5	5	5	5	5	6	6	6	5	5	6	7	6	6
Dc2	2°	d2	17	16	16	15	16	16	17	17	17	15	16	17	21	19	18
Dc2	3°	d2	17	16	16	15	16	16	17	17	17	15	16	17	21	19	18
Dc3	1°	d1	5.2	5	5	6	6	6	5	5	5	5	5	6	7	6	6
Dc3	2°	d1	16	14	14	18	18	17	16	16	16	15	16	17	21	19	18
Dc3	3°	d1	16	14	14	18	18	17	16	16	16	15	16	17	21	19	18
Dc3	1°	d2	5	5	4	4	5	5	5	5	5	4	5	5	6	6	5
Dc3	2°	d2	15	14	13	13	14	14	14	14	14	13	14	14	18	17	16
Dc3	3°	d2	15	14	13	13	14	14	14	14	14	13	14	14	18	17	16

Πίνακας 20: Ποσότητα ζήτησης περικοπής για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής

Dc	Case	D	t1	t2	t3	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t22	t23	t24
Dc1	1°	d1	2.7	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	4	3	3
Dc1	2°	d1	8.1	8	8	10	9	9	9	8	8	8	9	9	11	10	9
Dc1	3°	d1	8.1	8	8	10	9	9	9	8	8	8	9	9	11	10	9
Dc1	1°	d2	2.6	2	2	2	2	2	3	3	3	2	2	3	3	3	3
Dc1	2°	d2	7.8	7	7	7	7	7	8	8	8	7	7	8	10	9	8
Dc1	3°	d2	7.8	7	7	7	7	7	8	8	8	7	7	8	10	9	8
Dc2	1°	d1	2.4	2	2	3	3	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3
Dc2	2°	d1	7.2	7	7	8	8	8	8	8	7	7	8	8	10	9	8
Dc2	3°	d1	7.2	7	7	8	8	8	8	8	7	7	8	8	10	9	8
Dc2	1°	d2	2.3	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2
Dc2	2°	d2	6.9	6	6	6	6	6	7	7	7	6	6	7	8	8	7
Dc2	3°	d2	6.9	6	6	6	6	6	7	7	7	6	6	7	8	8	7
Dc3	1°	d1	2.1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3	2
Dc3	2°	d1	6.3	6	6	7	7	7	7	6	6	6	7	7	8	8	7
Dc3	3°	d1	6.3	6	6	7	7	7	7	6	6	6	7	7	8	8	7
Dc3	1°	d2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Dc3	2°	d2	6	5	5	5	5	5	6	6	6	5	5	6	7	7	6
Dc3	3°	d2	6	5	5	5	5	5	6	6	6	5	5	6	7	7	6

Πίνακας 21 : Τιμή αποζημίωσης ζήτησης περικοπής για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής

DC	Case	D	t1	t2	t3	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t22	t23	t24
Dc1	1°	d1	13	11	11	15	14	14	13	13	13	13	14	14	17	16	14

Dc1	2°	d1	13	11	11	15	14	14	13	13	13	13	14	14	17	16	14
Dc1	3°	d1	26	23	23	29	29	28	27	26	26	25	27	29	34	31	29
Dc1	1°	d2	12	11	11	11	11	11	12	12	12	11	11	12	15	14	13
Dc1	2°	d2	12	11	11	11	11	11	12	12	12	11	11	12	15	14	13
Dc1	3°	d2	24	22	22	22	22	23	23	24	23	22	23	24	30	27	26
Dc2	1°	d1	12	11	11	13	13	13	12	12	12	12	13	13	16	14	13
Dc2	2°	d1	12	11	11	13	13	13	12	12	12	12	13	13	16	14	13
Dc2	3°	d1	23	21	22	27	27	25	25	24	24	23	25	27	31	29	27
Dc2	1°	d2	11	10	10	10	10	10	11	11	11	10	10	11	14	13	12
Dc2	2°	d2	11	10	10	10	10	10	11	11	11	10	10	11	14	13	12
Dc2	3°	d2	23	21	20	20	20	21	22	22	22	20	21	22	28	25	24
Dc3	1°	d1	11	10	10	12	12	12	11	11	11	11	11	12	14	13	12
Dc3	2°	d1	11	10	10	12	12	12	11	11	11	11	11	12	14	13	12
Dc3	3°	d1	22	20	20	25	25	23	23	22	22	21	23	24	29	26	25
Dc3	1°	d2	10	9	9	9	9	9	10	10	10	9	10	10	13	12	11
Dc3	2°	d2	10	9	9	9	9	9	10	10	10	9	10	10	13	12	11
Dc3	3°	d2	21	19	18	18	19	19	20	20	20	18	19	20	26	23	22

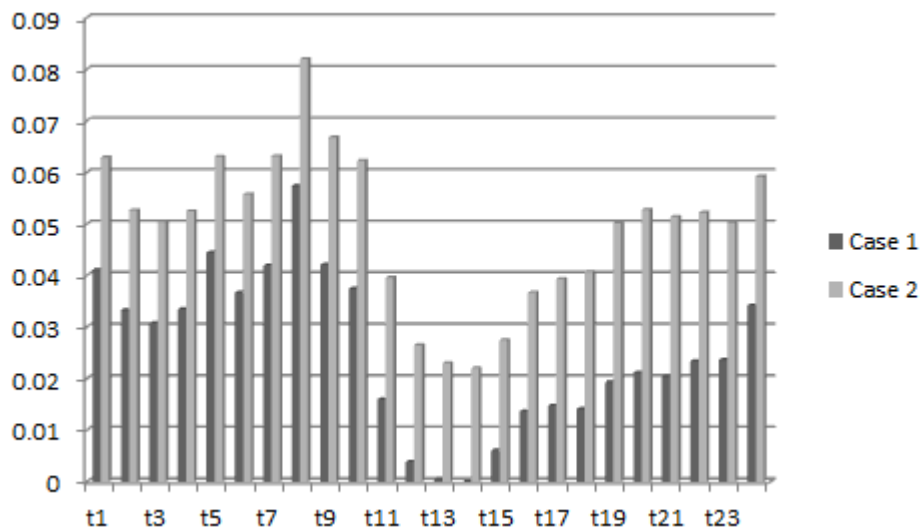
6.6.2 Αποτελέσματα σεναρίου καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής φορτίου

Σε ένα πρώτο επίπεδο εξετάζουμε τα αποτελέσματα των σεναρίων ένα και δύο. Αυτό που παρατηρούμε είναι ότι και στα δύο σενάρια εντάσσονται πλήρως όλοι οι καταναλωτές με δυνατότητα περικοπής του φορτίου τους. Πλήρης ένταξη σημαίνει και ολική περικοπή του φορτίου που έχουν δηλώσει. Σε ό,τι αφορά τους καταναλωτές που έχουν στην διάθεσή τους ευέλικτα φορτία την δεύτερη μέρα ενσωματώνονται περισσότερο στο δεύτερο σενάριο όπως φαίνεται και στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 22).

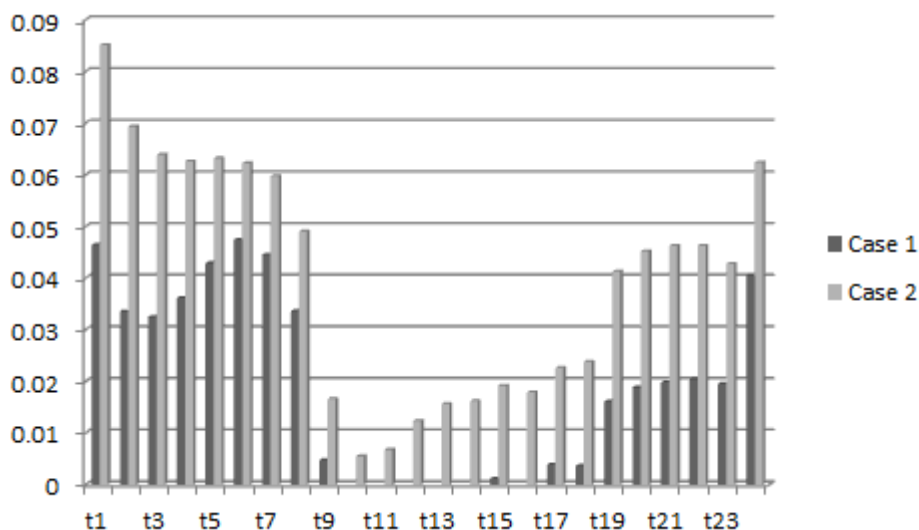
Πίνακας 22 : Ενσωμάτωση τοπικών παραγωγών στα σενάρια 1 και 2 καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής

	Df1 Case1	Df1 Case 2	Df2 Case 1	Df2 Case 2	Df3 Case 1	Df3 Case 2	Df4 Case 1	Df4 Case 2
t1	0	0.65	0.417	0.417	0	1	0.153	1
t2	0.1	0.95	0.417	0.417	0.124	1	0.278	1
t3	0.4	1	0.417	0.417	0.306	1	0.403	1
t4	0.7	1	0.417	0.417	0.487	1	0.528	0.946
t5	1	1	0.417	0.417	0.669	0.909	0.653	0.821
t6	1	0.9	0.417	0.417	0.851	0.727	0.778	0.696
t7	0.7	0.6	0.417	0.417	0.669	0.545	0.653	0.571
t8	0.4	0.3	0.417	0.417	0.487	0.363	0.528	0.446
t9	0.184216	0	0.417	0.417	0.576	0.181	0.653	0.321
t10	0.484216	0	0.417	0.417	0.758	0	0.778	0.196
t11	0.188645	0	0.417	0.417	0.897	0.090	0.903	0.25
t12	0.4	0.3	0.417	0.417	0.715	0.272	0.892	0.375
t13	0.7	0.6	0.417	0.417	0.727	0.454	0.767	0.5
t14	1	0.9	0.417	0.417	0.909	0.636	0.649	0.625
t15	1	0.9	0.417	0.417	0.727	0.727	0.524	0.5
t16	0.880974	0.6	0.417	0.417	0.545	0.545	0.399	0.375
t17	0.580974	0.3	0.417	0.417	0.363	0.363	0.274	0.25
t18	0.280974	0	0.417	0.417	0.181	0.181	0.149	0.125
t19	0	0	0.417	0.417	0	0	0.024	0

Τα παρακάτω διαγράμματα (Διάγραμμα 10 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τις καθημερινές ημέρες για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής και Διάγραμμα 11 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής) ακολουθούν δείχνουν ότι κατά το δεύτερο σενάριο έχουμε μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας προερχόμενη από το δίκτυο.



Διάγραμμα 10 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τις καθημερινές ημέρες για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής



Διάγραμμα 11 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής

Μια ενδεχόμενη αύξηση της ένταξης των ευέλικτων φορτίων όπως αναφέρθηκε και στην

παράγραφο 6.5.2 προσφέρει κέρδος στον διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων καθώς η ενέργεια πωλείται σε τριπλάσια τιμή από ότι αγοράζεται. Ωστόσο, αυτό που παρατηρείται εδώ είναι ότι σε ορισμένες περιπτώσεις το περιθώριο κέρδους των καταναλωτών με ευέλικτο φορτίο τείνει να μηδενιστεί. Αυτή η μεγάλη μείωση, μειώνει και τον συντελεστή που ορίζει το πολλαπλάσιο της οριακής τιμής του συστήματος στην οποία θα πουλήσει την ενέργεια του ο διαχειριστής. Αυτό όπως είναι λογικό τον ζημιώνει. Ταυτόχρονα ζημιώνεται και από την μεγάλη ένταξη των φορτίων περικοπής. Τα φορτία περικοπής όταν λειτουργούν σε κανονικές συνθήκες αγοράζουν ενέργεια σε τιμή μικρότερη από την οριακή τιμή του συστήματος. Αυξάνοντας λοιπόν την ζήτηση τους, αυξάνουμε και την ενέργεια άντλησης από το δίκτυο και συνεπώς ζημιώνεται παραπάνω ο διαχειριστής πράγμα που αντικατοπτρίζεται και στον επόμενο πίνακα (Πίνακας 23).

Πίνακας 23 : Κέρδος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια 1 και 2 καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής

	Κέρδος διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων
Case 1	333.358€
Case 2	150.538€

Σε ένα δεύτερο επίπεδο συγκρίνουμε τα αποτελέσματα των σεναρίων δύο και τρία. Αυτό που παρατηρούμε είναι ένταξη των ίδιων μονάδων και στα δύο σενάρια. Η μόνη διαφορά που βλέπουμε σχετίζεται με τις τιμές πώλησης της ενέργειας περικοπής (πίνακας Πίνακας 24). Έχοντας αυξήσει τις αντίστοιχες τιμές δήλωσης είναι λογικό να αυξάνονται και οι τιμές που ανακοινώνονται (Πίνακας 24). Ο διαχειριστής του συστήματος λοιπόν έχει να αγοράσει ενέργεια περικοπής σε μια τιμή η οποία είναι διπλάσια στο τρίτο σενάριο σε σχέση με το δεύτερο γεγονός το οποίο όπως είναι λογικό του δημιουργεί μεγαλύτερη ζημία και επιβεβαιώνεται και στον παρακάτω πίνακα (Πίνακας 25).

Πίνακας 24 : Λιανικές τιμές αποζημίωσης περικοπόμενης ενέργειας για τα σενάρια 2 και 3 καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής

	Case 2	Case 3
d1	19	37
d2	16	31

Πίνακας 25: Κέρδος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια 2 και 3 καταναλωτών με δυνατότητα περικοπής

	Κέρδος διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων
Case 2	150,538€
Case 3	-193,693€

6.7 Σενάριο για καταναλωτές dp με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης

Η λειτουργία των καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης περιγράφηκε στην παράγραφο 5.4.2 Μοντελοποίηση προβλήματος κάτω επιπέδου για καταναλωτές με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης όπου δώθηκαν οι περιγραφές τόσο των μεταβλητών του επιμέρους προβλήματος όσο και των παραμέτρων οι οποίες εισέρχονται ως δεδομένα εισόδου στην επίλυση του προβλήματος.

6.7.1 Δεδομένα εισόδου καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης

Σε ό,τι αφορά την συγκεκριμένη κατηγορία καταναλωτών εξετάστηκαν δύο σενάρια στα οποία όπως συνέβη και με όλα τα σενάρια τα στοιχεία των υπόλοιπων καταναλωτών και παραγωγών διατηρήθηκαν σταθερά. Η μόνη διαφορά που παρατηρείται στα δύο σενάρια σχετίζεται με τον καταναλωτή dp1 και μόνο στο σύνολο των καθημερινών ημερών. Έτσι, όπως φαίνεται και στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 26) η ποσότητα που υποβάλει στο πρώτο σενάριο είναι μικρότερη από την αντίστοιχη στο δεύτερο.

Πίνακας 26: Ποσότητα υποβολής καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης για τις δύο περιόδους κατανομής και τα δύο σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης

Dp	Case	D	t1	t2	t3	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t22	t23	t24
1	1	d1	3.3	3	3	3.9	4.1	4.1	4.1	4.2	4.4	4.4	4.6	4.7	4.5	4.1	3.8
1	2	d1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1	1,2	d2	5.5	5	4.9	4.9	5.5	6.1	6.4	6.5	6.5	6.1	6.3	6.4	7.1	6.5	6.1
2	1,2	d1	7.4	6.8	6.7	8.7	8.7	8.4	8.2	8	7.9	7.6	7.9	8.4	10	9.3	8.5
2	1,2	d2	6.3	5.7	5.6	5.6	5.8	5.9	6.1	6.3	6	5.6	5.9	6.2	8.2	7.6	7.1
3	1,2	d1	4.9	4	3.9	4.5	4.5	4.3	4.2	4.2	4.1	4	4.3	4.4	5.8	5.2	4.8
3	1,2	d2	3.5	3.2	3.1	2.7	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.5	2.7	2.8	4.3	4	3.7
4	1,2	d1	4	3.6	3.5	4.4	4.4	4.2	4.2	4.3	4.4	4.2	4	4.1	5.8	5.2	4.6
4	1,2	d2	3.7	3.4	3.3	3.5	3.6	3.5	3.5	3.5	3.5	3.3	3.3	3.3	5	4.5	4.1
5	1,2	d1	8.1	7.3	6.9	6.6	6.3	6.1	6	6.1	6.2	6.2	6.2	6.6	9	8.7	8.2
5	1,2	d2	8.6	8	7.5	6.2	6.2	6.2	5.9	5.4	4.7	4.3	4.5	5.2	9.3	8.8	8.2

6.7.2 Αποτελέσματα σεναρίου καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης

Μετά την εκτέλεση της προσομίωσης παρατηρούμε δύο διαφορές που σχετίζονται με τις

μεταβλητές εξόδου. Σε ό.τι αφορά τις ποσότητες ένταξης των καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης παρατηρούμε ότι στο πρώτο σενάριο εντάσσονται πλήρως οι καταναλωτές dp1, dp2 ,dp3 και dp5 με τιμή 1 ενώ στο δεύτερο σενάριο, ενώ στο δεύτερο σενάριο εντάσσονται οι πρώτοι τρείς (dp1,dp2,dp3) πλήρως ενώ ο dp5 δεν εντάσσεται καθόλου. Στον πίνακα που ακολουθεί φαίνονται οι πλήρεις τιμές ανά χρονική στιγμή ενώ στο Διάγραμμα 12 γίνεται φανερή η κατάσταση ένταξης των μονάδων καθόλη την διάρκεια της ημέρας μιας και επιθυμούν η ζήτηση τους να ικανοποιείται στο ακέραιο.

Πίνακας 27 : Πλήρεις ποσότητες ένταξης καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης που προκύπτουν από την εξέταση των σεναρίων καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης για αυτούς τους καταναλωτές

Dp	Case	D	t1	t2	t3	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t22	t23	t24
1	1°	d1	3.3	3	3	3.9	4.1	4.1	4.1	4.2	4.4	4.4	4.6	4.7	4.5	4.1	3.8
1	2°	d1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
1	1°,2°	d2	5.5	5	4.9	4.9	5.5	6.1	6.4	6.5	6.5	6.1	6.3	6.4	7.1	6.5	6.1
2	1°,2°	d1	7.4	6.8	6.7	8.7	8.7	8.4	8.2	8	7.9	7.6	7.9	8.4	10	9.3	8.5
2	1°,2°	d2	6.3	5.7	5.6	5.6	5.8	5.9	6.1	6.3	6	5.6	5.9	6.2	8.2	7.6	7.1
3	1°,2°	d1	4.9	4	3.9	4.5	4.5	4.3	4.2	4.2	4.1	4	4.3	4.4	5.8	5.2	4.8
3	1°,2°	d2	3.5	3.2	3.1	2.7	2.6	2.6	2.6	2.7	2.7	2.5	2.7	2.8	4.3	4	3.7
4	1°,2°	d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1°,2°	d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	1°	d1	8.1	7.3	6.9	6.6	6.3	6.1	6	6.1	6.2	6.2	6.2	6.6	9	8.7	8.2
5	1°	d2	8.6	8	7.5	6.2	6.2	6.2	5.9	5.4	4.7	4.3	4.5	5.2	9.3	8.8	8.2
5	2°	d1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	2°	d2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Διάγραμμα 12 : Κατάσταση ένταξης καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης στα σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης

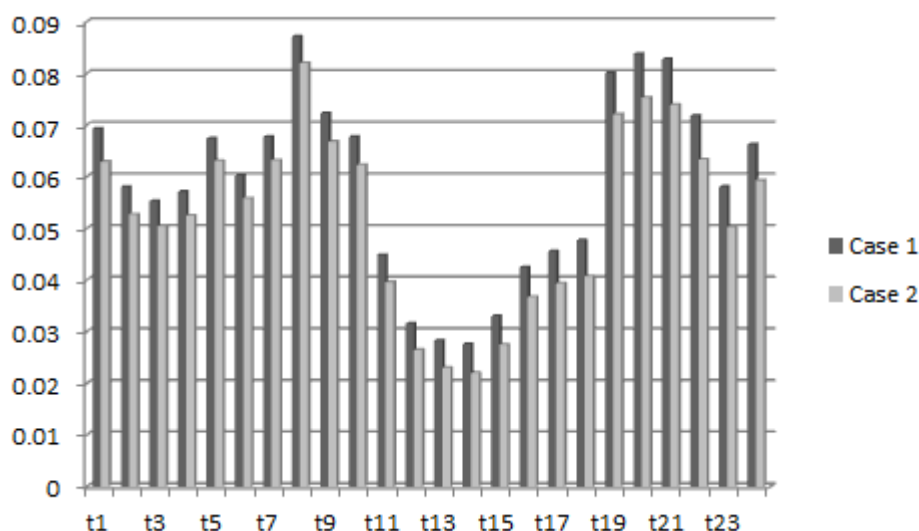
Τα αποτελέσματα αυτά κρίνονται αναμενόμενα διότι μειώνοντας την μέγιστη ποσότητα ζήτησης ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων έχει την δυνατότητα να αγοράσει ενέργεια από περισσότερους καταναλωτές με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης. Ειδικότερα στο δεύτερο σενάριο ο καταναλωτής dr5 δεν θα ενταχθεί και θα έχει την δυνατότητα να επιλέξει άλλο διαχειριστή ο οποίος θα του προσφέρει ευνοικότερες τιμές αγοράς ενέργειας.

Αθροίζοντας τις τιμές του παραπάνω πίνακα (Πίνακας 27) για όλους τους καταναλωτές dr για την κάθε χρονική περίοδο τις καθημερινές ημέρες λαμβάνουμε τον κάτωθι πίνακα (Πίνακας 28) για τα δύο εξεταζόμενα σενάρια

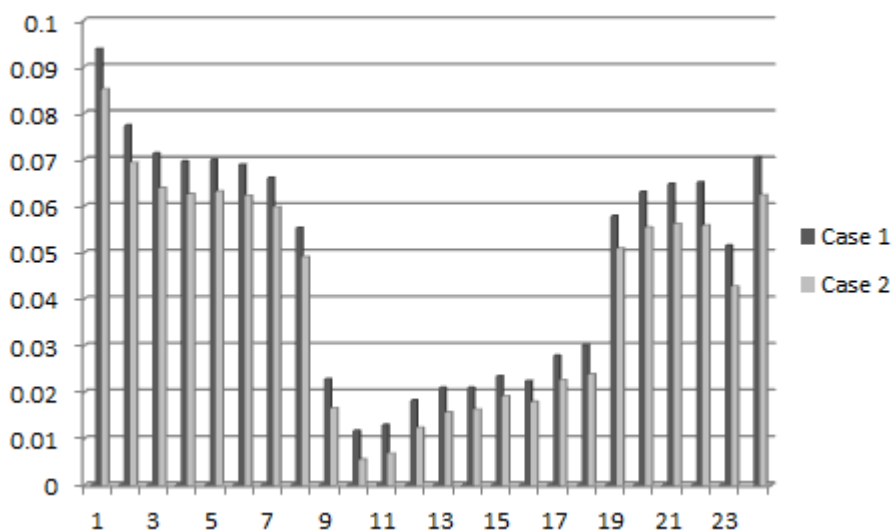
Πίνακας 28 : Άθροισμα των ποσοτήτων ενέργειας καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ που εντάχθηκαν στα δύο σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης για τις καθημερινές ημέρες

Case	t1	t2	t3	t9	t10	t11	t12	t13	t14	t15	t16	t17	t22	t23	t24
1	23.7	21.1	20.5	23.7	23.6	22.9	22.5	22.5	22.6	22.2	23	24.1	29.3	27.3	25.3
2	17.3	15.8	15.6	18.2	18.2	17.7	17.4	17.2	17	16.6	17.2	17.8	20.8	19.5	18.3

Αυτές οι τιμές υποδηλώνουν ότι στο πρώτο σενάριο τις καθημερινές ημέρες (Όμοια αποτελέσματα λαμβάνονται και για τα Σαββατοκύριακα) εντάσσεται μεγαλύτερη ποσότητα καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης και κατ'επέκταση έχουμε αύξηση του φορτίου το οποίο καλείται να ικανοποιήσει ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων. Έχοντας εντάξει όλους τους τοπικούς παραγωγούς που πληρούν τις προϋποθέσεις έχει ως επιλογή μόνο να αντλήσει την επιπλέον ενέργεια από το δίκτυο σε τιμή χρέωσης ίση με την οριακή τιμή του συστήματος .



Διάγραμμα 13: Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τις καθημερινές ημέρες για τα σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης



Διάγραμμα 14 : Διάγραμμα άντλησης ενέργειας από το δίκτυο τα Σαββατοκύριακα για τα σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης

Αυτό που παρατηρούμε στα αμέσως προηγούμενα διαγράμματα (Διάγραμμα 13, Διάγραμμα 14) και αναμένουμε είναι να έχουμε μεγαλύτερες ποσότητες άντλησης ενέργειας από το δίκτυο έτσι ώστε να συνεχίζει να ικανοποιείται το ισοζύγιο ισχύος του διαχειριστή.

Σε ό.τι αφορά το όφελος ή την ζημία του διαχειριστή παρατηρούμε και στα δύο σενάρια ζημία, η οποία είναι εμφανώς μεγαλύτερη στο πρώτο σενάριο εξέτασης (Πίνακας 29).

Πίνακας 29 : Κέρδος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ ζήτησης

	Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων
Case 1	507,096€
Case 2	386,760€

Οι αθροιστικά μεγαλύτερες ποσότητες άντλησης ενέργειας από το δίκτυο στο πρώτο σενάριο οδηγούν σε μικρότερο κέρδος τον διαχειριστή διεσπαρμένων καθώς αυτή η ενέργεια αποζημιώνεται στην οριακή τιμή του συστήματος η οποία είναι μεγαλύτερη από την τιμή πώλησης ενέργειας στους καταναλωτές dr.

Έτσι λοιπόν αναμένουμε μικρότερη κερδοφορία στο πρώτο σενάριο γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τον παραπάνω πίνακα (Πίνακας 29 : Κέρδος-Ζημία διαχειριστή διεσπαρμένων πόρων στα υπό εξέταση σενάρια καταναλωτών με συγκεκριμένο προφίλ

6.8 Γενικά Συμπεράσματα

Όντας μια οντότητα η οποία θέλει να υπερασπιστεί το συμφέρον της αλλά και το συμφέρον των πελατών της ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων αναγκάζεται να εξετάσει πολλές μεταβλητές απόφασης , πολλές παραμέτρους και διαφορετικά σενάρια. Αυτό που σίγουρα είναι λογικό είναι ότι το μέγεθος του χαρτοφυλακίου του διαχειριστή είναι ανάλογο και του κέρδους του. Με λίγα λόγια όσο μεγαλύτερο μέγεθος έχει το χαρτοφυλάκιο του διαχειριστή- όσο περισσότερους καταναλωτές και παραγωγούς εξυπηρετεί- τόσο μεγαλύτερο περιθώριο κέρδους έχει. Αυτό συμβαίνει διότι ο διαχειριστής έχει στην διάθεση του περισσότερες προσφορές ζήτησης και παραγωγής οπότε έχει την δυνατότητα να δημιουργήσει περισσότερα και διαφορετικά ενεργειακά μείγματα για να βρεί το πιο συμφέρον. Είναι λογικό ότι πέντε τοπικοί παραγωγοί (pb1-pb5) , τρεις καταναλωτές με δυνατότητα περικοπής (dc1-dc3), πέντε καταναλωτές με συγκεκριμένο προφίλ φορτίου (dp1-dp5) , τέσσερις καταναλωτές με ευέλικτο φορτίο (df1-df5) και πέντε καταναλωτές χωρίς ευέλικτο φορτίο (db1-db5) θα του προσφέρουν μικρότερη ευελιξία στο να κινηθεί στην διαδικασία εκκαθάρισης από τις διπλάσιες ή τριπλάσιες μονάδες. Άλλο ένα συμπέρασμα που εξάγουμε έχει να κάνει με το κέρδος του διαχειριστή και την ποσότητα άντλησης από το δίκτυο. Ο διαχειριστής διεσπαρμένων πόρων έχει μεγαλύτερο κέρδος όταν οι εκκαθαριζόμενες τιμές είναι μικρότερες από την οριακή τιμή του συστήματος για μικρότερη άντληση από το δίκτυο και αντίστροφα.

Κεφάλαιο 7 : Επεκτάσεις

7.1 Τελική Διαμόρφωση Προβλήματος

Όπως έγινε αναφορά και στο τέλος του προηγούμενου κεφαλαίου στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν χρησιμοποιήθηκε στο μοντέλο το δίκτυο του συστήματος. Ως συνέχεια αυτής της εργασίας θα πρέπει να ληφθούν υπόψη τα χαρακτηριστικά του δικτύου, οι γραμμές μεταφοράς, η αντοχή τους και η χωροθέτηση των διεσπαρμένων πόρων στους ζυγούς του συστήματος. Σε ένα επόμενο στάδιο το πρόβλημα του ημερήσιου ενεργειακού προγραμματισμού είναι ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Η συμμετοχή του δικτύου σε ένα τέτοιο πρόβλημα προϋποθέτει την εύρεση μιας εξίσωσης ροής ισχύος η οποία να είναι ακριβής και ταυτόχρονα κατάλληλη για να χρησιμοποιηθεί σε αυτές τις συνθήκες. Η DC ροή ισχύος που αναφέρθηκε συγκεντρώνει τα πλεονεκτήματα της γραμμικότητας και της ευκολίας αλλά δεν είναι ακριβής. Οι επαναληπτικές μέθοδοι όπως η Newton-Raphson και η Gauss-Seidel είναι πιο ακριβείς αλλά και μη γραμμικές. Απαιτείται λοιπόν μια βιβλιογραφική ανασκόπηση σε ότι αφορά την ροή ισχύος στα δίκτυα διανομής και στην χρήση της ως περιορισμός σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Από άποψη βιβλιογραφίας έχει ασχοληθεί αρκετά με τα προβλήματα διεπίπεδου προγραμματισμού στα συστήματα ηλεκτρικής ενέργειας ο καθηγητής A.J. Conejo οπότε η μελέτη θα μπορούσε να ξεκινήσει από τις δημοσιεύσεις του. Επιπλέον πληροφορίες μπορούν να αντληθούν από το paper “Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC” (39) και τις παραπομπές του.

7.2 Διεσπαρμένοι Πόροι

Οι διεσπαρμένοι πόροι είναι μια σύγχρονη τεχνολογία η οποία απαιτεί την εγκατάσταση νέων μονάδων κοντά στην κατανάλωση. Εκμεταλλεύομενοι φυσικά φαινόμενα όπως ο άνεμος, η ηλιοφάνεια και η ενέργεια των κυμάτων οι διεσπαρμένοι πόροι και εν γένει οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας λειτουργούν με βάση μια μορφή τυχαιότητας. Αυτό σημαίνει ότι μια ενεργειακή κοινότητα η οποία βασίζεται ως επί το πλείστον σε φωτοβολταϊκές εγκαταστάσεις θα αντιμετωπίζει προβλήματα επάρκειας σε συνθήκες αιχμής φορτίου σε

μέρες με χαμηλή ηλιοφάνεια. Για μια μελέτη πιο κοντά στα πραγματικά καθημερινά δεδομένα θα μπορούσε να κατασκευαστεί ένα μοντέλο φόρτιο καιρού. Σύμφωνα με αυτό σε μια δεδομένη περιοχή θα μπορούσαν να συγκεντρωθούν ιστορικές πληροφορίες για τις καιρικές συνθήκες που επικρατούσαν τα προηγούμενα έτη και με βάση αυτές να υπολογίζει το κατάλληλο ενεργειακό μίγμα δηλαδή ποιο θα ήταν το βέλτιστο ποσοστό κάθε είδους μονάδας ώστε να εξασφαλίζεται η επάρκεια της κοινότητας.

Σε επίπεδο πρόβλεψης είναι σημαντικό να υπάρχει σωστή πρόβλεψη του φορτίου ώστε να μην παράγονται πολύ μεγαλύτερα ή μικρότερα ποσά ενέργειας από αυτά που τελικά θα καταναλωθούν. Ένα μοντέλο πρόβλεψης φορτίου το οποίο πάλι χρησιμοποιώντας ιστορικά και μετεωρολογικά δεδομένα θα υπολογίζει δυναμικά την ζήτηση της κοινότητας. Αυτό θα βοηθούσε στην επίτευξη της ενεργειακής αυτονομίας της κοινότητας που αποτελεί και στόχο της ευρωπαϊκής ένωσης για το έτος 2050. Τα δύο αυτά μοντέλα θα μπορούσαν να χρησιμοποιούν τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης (AI-Artificial intelligence) , τεχνικές ARIMA , μεθόδους γραμμικής ή εκθετικής εξομάλυνσης (Linear or Exponential Regression) γενετικούς αλγόριθμους (Genetic Algorithms) κ.ά. Οι αρχικές αυτές πληροφορίες αντλήθηκαν από το έγγραφο “Forecasting Methods in Energy Planning”

7.3 Ενεργειακές κοινότητες και ανταγωνιστικό περιβάλλον

Στην παρούσα διπλωματική εργασία αναλύθηκε το μοντέλο της τοπικής αγοράς , θεωρήθηκε ότι μια ενεργειακή κοινότητα – εν γένει ένα μικροδίκτυο- παράγει την ενέργεια που χρειάζονται τα φορτία της για να ικανοποιήσουν τις απαιτήσεις της κατανάλωσης τους. Με την παραδοχή αυτή θεωρήθηκε ότι δεν μετέχουν συμβατικές μονάδες οι οποίες πουλάνε την ενέργεια τους στην κοινότητα με αποτέλεσμα να επηρεάζουν το ενεργειακό μείγμα. Ταυτόχρονα αμελήθηκε το σενάριο που μια ενεργειακή κοινότητα διαθέτει περίσσεια ενέργειας την οποία διαθέτει πίσω στο κεντρικό δίκτυο σε μια τιμή πώλησης. Με λίγα λόγια το περιβάλλον λειτουργίας των Διεσπαρμένων πόρων θεωρήθηκε μη ανταγωνιστικό. Ως βασική επέκταση αυτού του μοντέλου μπορούν να θεωρηθούν συμβατικές μονάδες παραγωγής οι οποίες μετέχουν στην διαδικασία εκκαθάρισης της τοπικής αγοράς υποβάλλοντας προσφορές παραγωγής. Αν οι προσφορές τους είναι πιο συμφέρουσες θα εντάσσονται έναντι των Διεσπαρμένων Πόρων. Οι συμβατικές μονάδες όντας αρκετές δεκαετίες λειτουργικές έχουν κάνει απόσβεση του αρχικού κεφαλαίου τους και προσφέρουν την ενέργεια τους σε σταθερές σχετικά τιμές. Το νέο μοντέλο θα τρέχει σενάρια με βάση τα οποία θα ορίζονται οι τιμές προσφοράς και αποζημίωσης των Διεσπαρμένων Πόρων ώστε να ελέγχεται το ενεργειακό μείγμα και να φανερώνεται το ποσοστό διεξόδου τους.

7.4 Συμπεράσματα

Σύμφωνα με τα τωρινά δεδομένα το βέλτιστο σενάριο είναι η οργάνωση σε μικροδίκτυα τα οποία θα είναι συνδεδεμένα σε ένα κεντρικό δίκτυο . Από ερευνητικής πλευράς θα μπορούσε να προσομοιωθεί ένα τέτοιο μικροδίκτυο . Αρχικά θα πρέπει να οριστεί μια περιοχή μελέτης , από την οποία θα αντληθούν πραγματικά ιστορικά δεδομένα ώστε να υλοποιηθούν τα μοντέλα της παραγράφου 6.2. Εν συνεχεία θα προστεθούν οι συμβατικές μονάδες του κεντρικού δικτύου καθώς και το δίκτυο . Θα εκτελεστεί ο ημερήσιος ενεργειακός προγραμματισμός και τα αποτελέσματα του θα δωθούν οι πληροφορίες για το κατά πόσο είναι εφικτό μια ενεργειακή κοινότητα μπορεί να είναι αυτόνομη .

Bibliography

1. Herzog, Antonia V. , Lipman, Timothy E. , Kammen, Daniel M. *Renewable Energy Sources*. Berkeley : s.n.
2. https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies_en.
3. *Εγχειρίδιο Κώδικα Συναλλαγών Ηλεκτρικής Ενέργειας*. 2.2, Αθήνα : Λειτουργός Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας, 2016.
4. Conejo, Antonio J. *Complementarity Modeling in Energy Markets* . s.l. : Springer, 2013.
5. Dempe, Stephan. *Foundations of Bilevel Programming*. s.l. : Springer, 2011.
6. Jacobs, Robert F. , Chase Richards B. *Operations and Supply Management* . s.l. : Broken Hill , 2011.
7. Κολέτσος, Ιωάννης , Στογιάννος, Δημήτρης. *Εισαγωγή στην Επιχειρησιακή Έρευνα*. Αθήνα : Συμewών, 2017.
8. Πρωτοπαπάς, Άγγελος. *Βελτιστοποίηση Τεχνικών Συστημάτων*. s.l. : ΣΕΑΒ, Καλλίπος, 2015.
9. YinYu, Ye. On the Finite Convergence of Interior Point Algorithms for Linear Programming. *Mathematical Programming*. 1992, Vol. 57.
10. Dempe, Stephan. *Bilevel Programming Problems Theory, Algorithms and Applications to Energy Networks*. Berlin : Springer , 2016.
11. Conejo, Antonio J. *Decomposition Techniques in Mathematical Programming : Engineering and Science Applications*. s.l. : Springer, 2011.
12. Vicente, Luis N. , Calamai , Paul H. Bilevel and Multilevel Programming : A Bibliography Review. *Journal of Global Optimization*. 1994, Vol. 5.
13. Sinha, Ankur , Malo, Pekka , Deb, Kalyanmoy. A Review on Bilevel Optimization: From Classical to Evolutionary Approaches and Applications. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2017, Vol. 22.
14. *Evaluation of Economic Benefits of DER Aggregation*. Asimakopoulou, Georgia E. , Hatziargyriou, Nikos D. s.l. : IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, Vol. 9.
15. Ozgur, Yeniay. Penalty Function Methods for Constrained Optimization with Genetic Algorithms. *Mathematical and Computational Applications*. 2005, Vol. 10.
16. *An Interior Point Technique for Solving Bilevel Programming Problems*. Herskovits J., Leontiev A. Rio de Janeiro : s.n.

17. *Distributed Energy Resources: Characteristics and its Integration Modes of Active Distribution Network*. **Zeng, Bo , Junqiang, Wen , Zhang, Yuying , Zhang, Jianhua , Yang, Xu , WenxiaLiu.** s.l. : Trans Tech Publications , 2014.
18. *Distributed Generation : A Definition .* **Ackermann, Thomas , Andersson, Goran , Soder, Lennart.** s.l. : Electric Power System Research, 2000, Vol. 57.
19. *Integrating Distributed Generation Into Electric Power Systems: A Review of Drivers, Challenges and Opportunities.* **Lopes, Pecos J.A. , Hatziargyriou, N. , Mutale, J. , Djapic, P. , Jenkins, N.** s.l. : Electric Power Systems Research, 2007, Vol. 77.
20. *Environmental Benefits of Distributed Generation with and without Emissions Trading.* **Tsikalakis, A.G. , Hatziargyriou, N.D.** s.l. : Energy Policy, 2007, Vol. 35.
21. *Discussion on Advantages and Disadvantages of Distributed Generation Connected to the Grid.* **Kuang, Hongai , Li, Shengqing , Wu, Zhengqiu.** 2011.
22. *Aggregator Service for PV and Battery Energy Storage Systems of Residential Building.* **Li, Jianing , Wu, Zhi , Zhou, Suyang , Fu, Hao , Zhang, Xiao-Ping.** s.l. : CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015, Vol. 1.
23. *Models for the Integration of Local Energy Communities in Energy Markets.* **Asimakopoulou, Georgia , Hatziargyriou, Nikos.** Ljubljana : CIRED Workshop, 2018.
24. *Review of Microgrid Technology .* **Hartono, BS , Budiyanto , Setiabudy, Rudy.** Depok : s.n., 2013.
25. *A Review on Distributed Energy Resources and MicroGrid.* **Jiayi, Huang , Chuanwen, Jiang , Rong, Xu.** s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007, Vol. 12.
26. *Νόμος υπ'Αριθμόν 4513: Ενεργειακές Κοινότητες και Άλλες Διατάξεις.* 1, Αθήνα : Εφημερίδα της Κυβερνήσεως της Ελληνικής Δημοκρατίας, 2018.
27. *The Value of Compressed Air Energy Storage for Enhancing Variable Renewable Energy Integration.* **Nikolakakis, Thomas , Fthenakis, Vasilis.** s.l. : Energy Technology , 2017, Vol. 5.
28. <https://www.gams.com/>.
29. **McCarl, Bruce A.** *McCarl GAMS User Guide.*
30. **Conejo, Antonio J. , Carrion, Miguel , Morales, Juan M.** *Decision Making Under Uncertainty in Electricity Markets.* s.l. : Springer, 2010.
31. *Wind Power Investment : A Benders Decomposition Approach.* **Barrigo, Luis , Conejo, Antonio J.** s.l. : IEEE Transactions on Power Systems, 2012, Vol. 27.
32. **Soroudi, Alireza.** *Power System Optimization Modeling in Gams.* Dublin : Springer, 2017.

33. *Electricity Producer Offering Strategies in Day-Ahead Energy Market With Step-Wise Offers.* **Bakirtzis, Anastasios G. , Ziogos, Nikolaos P. , Tellidou, Athina C. , Bakirtzis, Gregory A.** s.l. : IEEE Transactions on Power Systems, 2007, Vol. 22.
34. *Optimal Response of a Thermal Unit to an Electricity Spot Market.* **Arroyo, J.M. , Conejo, A.J.** s.l. : IEEE Transactions on Power Systems, 2000, Vol. 15.
35. *Pool Strategy of a Producer With Endogenous Formation of Locational Marginal Prices.* **Ruiz, Carlos , Conejo, Antonio J.** s.l. : IEEE Transactions on Power Systems, 2009, Vol. 24.
36. *A computationally Efficient Mixed Integer Linear Formulation for the Thermal Unit Commitment Problem.* **Carrion, Miguel , Arroyo, Jose M.** s.l. : IEEE Transactions on Power Systems, 2006, Vol. 21.
37. *Ramp Rate Constrained Unit Commitment by Improved Adaptive Lagrangian Relaxation.* **Ongaskul, W. , Petcharaks, N.** s.l. : International Energy Journal , 2005, Vol. 6.
38. *Optimal Unit Commitment Using Equivalent Linear Minimum Up and Down Time Constraints.* **Zendehdel, Nadia, Karimpour, Ali , Oloomi, Majid.** Baharu : IEEE International Conference on Power and Energy, 2008.
39. *Distributed Generation Hosting Capacity Evaluation for Distribution Systems Considering the Robust Optimal Operation of OLTC and SVC.* **Wang, Shouxiang , Leijiao, Sijia Chen , Wu Lei.** s.l. : IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, Vol. 3.
40. <https://www.vox.com/energy-and-environment/2017/12/15/16714146/greener-more-reliable-more-resilient-grid-microgrids?fbclid=IwAR0D4KRJ2dcQ8QNbpnL97a39Qa1CwBbUv9Ejgz1ELQzYhPaw1G3bSXxTgj0>.

