



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

Πλατφόρμες Προσομοίωσης Συστημάτων  
Ενέργειας

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΦΑΙΝΤΙ ΡΑΦΙΚ

Επιβλέπων: Μανόλης Βάβαλης  
Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Βόλος, Φεβρουάριος 2013





Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας  
Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

## Πλατφόρμες Προσομοίωσης Συστημάτων Ενέργειας

### ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

**ΦΑΙΝΤΙ ΡΑΦΙΚ**

**Επιβλέπων:** Μανόλης Βάβαλης  
Καθηγητής Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 19η Δεκεμβρίου 2012.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....  
Μανόλης Βάβαλης  
Καθηγητής Π.Θ.

.....  
Λευτέρης Τσουκαλάς  
Καθηγητής Π.Θ.

.....  
Παπαβασιλόπουλος Γεώργιος  
Καθηγητής ΕΜΠ

Βόλος, Φεβρουάριος 2013

*(Υπογραφή)*

.....  
**ΦΑΙΝΤΙ ΡΑΦΙΚ**

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων

© 2013 – All rights reserved



Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας  
Πολυτεχνική Σχολή  
Τμήμα Μηχανικών Ηλεκτρονικών Υπολογιστών

Copyright ©–All rights reserved Φάντι Ραφίκ, .  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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.



# Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Εμμανουήλ Βάβαλη για τις συμβουλές του και τις διορθώσεις του καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της τριμελούς εξεταστικής επιτροπής κύριο Ελευθέριο Τσουκαλά και κύριο Γεώργιο Παπαβασιλόπουλο που δέχτηκαν να την κρίνουν. Ιδιαίτερες ευχαριστίες απευθύνω επίσης στους γονείς μου που όλα τα χρόνια της ακαδημαϊκής μου πορείας με στηρίζουν σε κάθε μου βήμα.





# Περίληψη

Η παρούσα εργασία αποτελεί μία πρόταση για τη δημιουργία μιας πλατφόρμας προσομοίωσης δικτύων ενέργειας. Στόχος της είναι η παροχή μιας πλατφόρμας μέσω της οποίας καταναλωτές και παραγωγοί θα μπορούν να συμμετέχουν σε μια ηλεκτρική αγορά όπου κατά διαστήματα τα οποία θα είναι προκαθορισμένα θα δηλώνουν πόση ενέργεια θέλουν και πόση μπορούν να προσφέρουν αντίστοιχα και σε ποια τιμή. Η δημιουργία της πλατφόρμας έγινε με την χρήση του GridLAB-D ,προσομοιωτή δικτύων ενέργειας ο οποίος προσφέρει την δυνατότητα αλληλεπίδρασης με πληθώρα εργαλείων τόσο για την δημιουργία και την διαχείριση μελετών περίπτωσης όσο και για την ανάλυση αποτελεσμάτων. Επίσης, διαθέτει μεγάλο εύρος χρήσιμων συνιστωσών που χρησιμοποιήθηκαν για την σωστή λειτουργία της πλατφόρμας. Δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην υλοποίηση της πλατφόρμας ώστε να είναι εξαιρετικά απλή και ταυτόχρονα ευέλικτη ώστε να λαμβάνει υπόψη όλες τις δυνατές περιπτώσεις που συναντώνται καθημερινά στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, παρέχοντας έτσι αποτελέσματα που ανταποκρίνονται στην πραγματικότητα. Ταυτόχρονα με την βασική υλοποίηση έγινε και επέκταση αυτής με στόχο την βελτιστοποίηση του κέρδους των παραγωγών. Ταυτόχρονα παρέχει και όλες τις απαραίτητες υποδομές ( script ) ώστε να δημιουργεί συνεχώς νέα μοντέλα προς προσομοίωση και να διατηρεί το ενδιαφέρον του εκάστοτε χρήστη. Παρουσιάζονται αναλυτικά όλες οι τεχνολογίες, μελέτες και τα εργαλεία που συντέλεσαν στη δημιουργία της πλατφόρμας καθώς και όλες οι αλλαγές που υφίστανται οι συνιστώσες του GridLAB-D . Παρέχεται ταυτόχρονα και ένα εγχειρίδιο χρήσης για μελλοντική συντήρηση και επέκταση των δυνατοτήτων αυτής. Εν κατακλείδι, παρουσιάζονται και μελλοντικές επεκτάσεις και τεχνολογίες που μπορούν να ενσωματωθούν στη βασική δομή της πλατφόρμας.

## Λέξεις Κλειδιά

GridLAB-D, ηλεκτρική αγορά,powerflow,auction



# Abstract

The aim of the present dissertation is to present the development of a simulation platform focused on a detailed study of energy networks. Its objective is to create a platform through which producers and consumers can participate in an electric market via auctions. We used GridLAB-D for our purposes. A simulation engine that offers the possibility for the creation and management of case studies and results analysis through a variety of interactive tools. Also contains a variety of useful components used for the proper operation of the platform. Special emphasis on the implementation to be extremely simple and flexible, taking into account all the different cases, providing results that correspond to reality. Along with the basic implementation we try to expand our platform in order to maximize the profit of producers. At the same time provides all the necessary infrastructure that constantly creates new models for simulation and maintain the interest of the user. The technologies, the studies and the tools that contributed to the development of the platform and all the changes that are the components of GridLAB-D are represented in this paper. It is also provided a manual for future maintenance and extension of platform's operation. Finally, future extensions and technologies are presented in order to be incorporated in the basic structure of the platform.

## Keywords

GridLAB-D, electricity market, powerflow, auction



# Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	1
Περίληψη	3
Abstract	5
Περιεχόμενα	8
Κατάλογος Σχημάτων	10
Κατάλογος Πινάκων	11
<b>1 Εισαγωγή</b>	<b>13</b>
1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής	13
1.2 Σχετιζόμενες Εργασίες	15
1.3 Οργάνωση του τόμου	17
<b>2 Θεωρητικό υπόβαθρο</b>	<b>19</b>
2.1 Θεωρητική προσέγγιση	19
2.1.1 Εισαγωγή	19
2.1.2 Βραχυπρόθεσμη Αγορά	20
2.2 Παραδείγματα	22
2.2.1 Χωρίς Ζητήματα Συμφόρησης	22
2.2.2 Με Ζητήματα Συμφόρησης	24
<b>3 Μελέτες Βελτιστοποίησης Ηλεκτρικής Αγοράς</b>	<b>27</b>
3.1 Πρόσφατες Μελέτες	27
3.2 Θεωρία παιγνίων	30
3.2.1 Η θεωρία παιγνίων στην αγορά ενέργειας	30
<b>4 Συστήματα προσομοίωσης μεγάλης κλίμακας</b>	<b>33</b>
4.1 Το λογισμικό σύστημα GridLAB-D	33
4.1.1 Powerflow Υποσύστημα	34
4.1.2 Market Υποσύστημα	35

---

<b>5 Βελτιστοποίηση</b>	<b>41</b>
5.1 Εισαγωγή . . . . .	41
5.2 Περιγραφή Προβλήματος . . . . .	42
5.2.1 Ορισμοί και Έννοιες . . . . .	42
<b>6 Υλοποίηση</b>	<b>57</b>
6.1 Σχεδιασμός και Υλοποίηση Πλατφόρμας Προσομοίωσης . . . . .	57
6.2 Πειραματικά Αποτελέσματα . . . . .	63
<b>7 Επίλογος</b>	<b>71</b>
7.1 Συμπεράσματα . . . . .	71
<b>8 Appendix</b>	<b>73</b>
<b>9 Μεταφράσεις Ξένων όρων</b>	<b>75</b>
<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>76</b>

# Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Εννοιολογικό διάγραμμα ευφυούς δικτύου . . . . .	14
2.1	Διαδικασία εύρεσης του σημείου ισορροπίας μιας αγοράς κατά τη διάρκεια μιας ημέρας (με διακεκομμένη γραμμή είναι η ζήτηση και με συμπαγή η προσφορά)	21
2.2	Διαδικασία εύρεση του σημείου ισορροπίας με συμμετοχή περισσότερων του ενός παραγωγών και χωρίς συμφόρηση κατά την μετάδοση της ενέργειας μεταξύ διαφορετικών περιοχών . . . . .	23
2.3	Διαδικασία εύρεση του σημείου ισορροπίας με συμμετοχή περισσότερων του ενός παραγωγών, με συμφόρηση κατά την μετάδοση της ενέργειας μεταξύ διαφορετικών περιοχών . . . . .	23
2.4	Εύρεση του σημείου ισορροπίας της αγοράς στην περίπτωση διακοπής παροχής ενέργειας από κάποιο εργοστάσιο . . . . .	24
2.5	Παρατήρηση της διακύμανσης της τιμής της ενέργειας ανά περιοχή λόγω loop flows . . . . .	25
4.1	Καμπύλες ζήτησης και προσφοράς . . . . .	37
4.2	Ικανοποίηση των παραγωγών που ζήτησαν ενέργεια με τιμή μεγαλύτερη (σχήμα στα αριστερά) και πρόσφεραν ενέργεια σε τιμή μικρότερη (σχήμα στα δεξιά) από την τιμή του σημείου ισορροπία της αγοράς . . . . .	38
4.3	Πλήρη ικανοποίηση τόσων των παραγωγών όσο και των καταναλωτών που πρόσφεραν σε τιμή μικρότερη και μεγαλύτερη αντίστοιχα από την τιμή του σημείου ισορροπίας . . . . .	39
4.4	Μη Ικανοποίηση των καταναλωτών λόγω περιορισμένης προσφοράς ενέργεια(σχήμα στα αριστερά) και αυξημένης τιμής (σχήμα στα δεξιά) με αποτέλεσμα την αποτυχία εύρεσης σημείου ισορροπίας . . . . .	39
5.1	Αλλαγές στην τιμή προκαλούν αλλαγές στην ελαστικότητα της ζήτησης . . . .	47
5.2	Αποτελέσματα παραδείγματος μέχρι την σύγκλιση του αλγορίθμου . . . . .	54
5.3	Ροή δεδομένων για την εύρεση ισορροπίας κατά Νας στο πρόβλημα βελτιστοποίησης για την μεγιστοποίηση του κέρδους των παραγωγών μιας ηλεκτρικής αγοράς . . . . .	55
6.1	Γραφική Απεικόνιση των τριών επιπέδων της λειτουργίας της πλατφόρμας . . . .	64

- 6.2 Παρατήρηση της βελτίωσης (διαφορά μεταξύ ζήτησης και προσφοράς της αγοράς της κάθε φάσης) στην ικανοποίηση της ζήτησης στις τρεις διαφορετικές φάσεις για τις τέσσερις πόλεις για την περίπτωση του 10% . . . . . 66
- 6.3 Παρατήρηση των τιμών της ζήτησης, της προσφοράς και των αποτελεσμάτων των τριών φάσεων για τις τέσσερις πόλεις για την περίπτωση του 10% . . . . . 66
- 6.4 Παρατήρηση της βελτίωσης (διαφορά μεταξύ ζήτησης και προσφοράς της αγοράς της κάθε φάσης) στην ικανοποίηση της ζήτησης στις τρεις διαφορετικές φάσεις για τις τέσσερις πόλεις για την περίπτωση του 15% . . . . . 67
- 6.5 Παρατήρηση των τιμών της ζήτησης, της προσφοράς και των αποτελεσμάτων των τριών φάσεων για τις τέσσερις πόλεις για την περίπτωση του 15% . . . . . 67
- 6.6 Παρατήρηση της ικανοποίησης της ζήτησης με την προσθήκη σε κάθε πόλη ενός επιπλέον εργοστασίου στην περίπτωση που η πόλη θέλει επιπλέον ζήτηση καθώς δεν στρέφεται στη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου . . . . . 68
- 6.7 Παρατήρηση της τιμής στις τρεις φάσεις στην περίπτωση που η προσφορά είναι το 10%(σχήμα στα αριστερά) και το 15% (σχήμα στα δεξιά) του μέσου όρου της ζήτησης. Η μη συνεχής γραμμή υποδηλώνει την αδυναμία καθορισμού σημείου ισορροπίας λόγω υψηλής τιμής. . . . . 69



# Κατάλογος Πινάκων

6.1	Τιμή και Κόστος της Ενέργειας για κάθε πόλη του δικτύου . . . . .	65
6.2	Χαρακτηριστικά της κάθε Πόλης . . . . .	65



# Κεφάλαιο 1

## Εισαγωγή

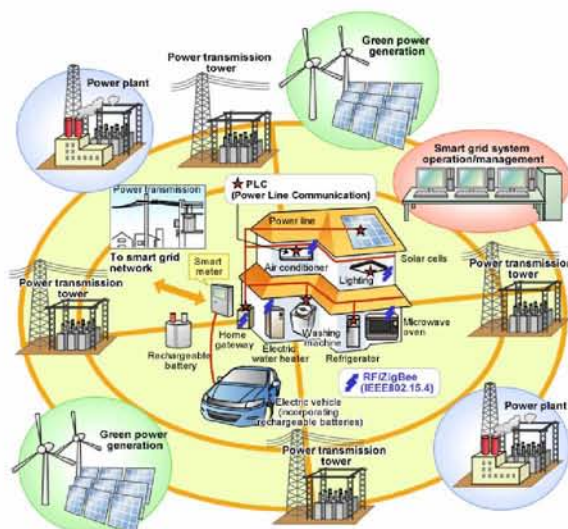
Οικονομικές, περιβαλλοντικές καθώς και γεωπολιτικές συγκυρίες, καθιστούν επιτακτική μία συζήτηση αναφορικά με την αναδιάρθρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η αναδιάρθρωση αυτή εστιάζει στην δυνατότητα εισαγωγής ανταγωνισμού σε διάφορα επίπεδα και κυρίως στο επίπεδο της λιανικής αγοράς με απώτερο σκοπό μια πιο δομημένη διαμόρφωση της παραγωγής. Η εν λόγω διαμόρφωση αποσκοπεί στη

- ελαχιστοποίηση των απωλειών ενέργειας όσον αφορά την παραγωγή ηλεκτρισμού,
- μείωση του κόστους αγοράς της ενέργειας για τους καταναλωτές μέσω μιας πιο ορθολογικής χρήσης με την μετακίνηση των ενεργειακών τους απαιτήσεων σε περιόδους εκτός ωρών αιχμής.

Η αλλαγή της αναδιάρθρωσης της αγοράς θα επιφέρει διάφορες αλλαγές. Για παράδειγμα, θα μας οδηγήσει ιδέα του έξυπνου σπιτιού (Εικόνα 1.1, όπου φαίνεται η αλληλεπίδραση του σπιτιού, δηλαδή οι έξυπνες συσκευές, με εξωτερικούς παράγοντες), οι συσκευές του οποίου θα έχουν ενεργό ρόλο στην διαμόρφωση της τιμής του ηλεκτρικού ρεύματος. Οι συσκευές αυτές θα συμμετέχουν σε έναν πλειστηριασμό - δημοπρασία που θα λαμβάνει χώρα ανά τακτά χρονικά διαστήματα και μέσω του οποίου θα καθορίζεται τόσο η τιμή, όσο και η προσφερόμενη ποσότητα της ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως είναι κατανοητό, οι συσκευές που θα έχουν πλειοδοτήσει σε τιμή μικρότερη αυτής που αποφάσισε ο πλειστηριασμός, θα αναγκαστούν να μετατοπίσουν τις ενεργειακές τους απαιτήσεις σε άλλες περιόδους εκτός ωρών αιχμής. Έτσι, επιτυγχάνεται η μείωση αφενός του ενεργειακού κόστους που αφορά τον τελικό χρήστη και αφετέρου η βελτίωση του περιβαλλοντικού κόστους που οφείλεται στις απώλειες ενέργειας λόγω της δυσαρμονίας μεταξύ παραγωγής και ζήτησης.

### 1.1 Αντικείμενο της διπλωματικής

Βασικός σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η δημιουργία μίας πλατφόρμας που βασίζεται σε μια θεωρητική μελέτη και στοχεύει στην συγκριτική μελέτη των προσεγγίσεων που αφορούν την ύπαρξη και λειτουργία μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Η εν λόγω αγορά



Σχήμα 1.1: Εννοιολογικό διάγραμμα ευφυούς δικτύου

[Source: [http://am.renesas.com/ecology/eco\\_society/smart\\_grid/](http://am.renesas.com/ecology/eco_society/smart_grid/)]

θα στηρίζεται στην ενεργό συμμετοχή τόσο των παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας, όσο και των καταναλωτών, μέσω των ηλεκτρικών συσκευών.

Το ηλεκτρικό ρεύμα να θεωρείται πλέον ένα χρηματιστηριακό αγαθό το οποίο εναρμονίζεται πλήρως με τους κανόνες της προσφοράς και της ζήτησης. Η θεώρηση της ηλεκτρικής ενέργειας σαν χρηματιστηριακό αγαθό οφείλει να συμπορευτεί με το γεγονός ότι η ηλεκτρική ενέργεια παραμένει ένα κοινωνικό αγαθό. Συνεπώς, απλοί και βασικοί χρηματιστηριακοί κανόνες και πρακτικές είναι συχνά άστοχες, ενδεχομένως ανέφικτες ή και επικίνδυνες. Επιπρόσθετα, κάποιες ανορθόδοξες τιμολογιακές πολιτικές για συμβατικές αγορές όπως η δωρεάν παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους (με βάση το γεγονός ότι η ενέργεια από την στιγμή που έχει παραχθεί δεν μπορεί να αποθηκευθεί και συνεπώς θα απολεσθεί) συχνά αποτελούν, για διάφορους λόγους, καλές επιχειρηματικές πρακτικές.

Παρόλο που η απελευθέρωση της αγοράς της ενέργειας δεν έχει ολοκληρωθεί στην χώρα μας (είναι λογικό να αναμένουμε κάτι τέτοιο να συμβεί σύντομα) σε άλλες χώρες έχει προχωρήσει σημαντικά. Δεν έχουν όμως ούτε κατανοηθεί ούτε και αναπτυχθεί πλήρως ευσταθή, ρωμαλέα και πρακτικά μοντέλα καθημερινής χρήσης όσον αφορά την χρηματιστηριακή συμπεριφορά του συστήματος όταν κάποιες από τις συσκευές μας αποκτήσουν ενεργό ρόλο στην διαμόρφωση της τιμής της ενέργειας. Αναγνωρίζοντας λοιπόν την αναγκαιότητα βαθύτερης κατανόησης των χαρακτηριστικών των προτεινόμενων θεωρητικών μοντέλων που διέπουν μια ευφυή ενεργειακή αγορά στην παρουσία εργασία επικεντρωνόμαστε τους εξής τέσσερις κυρίως άξονες

1. Ανασκόπηση και βαθύτερη μελέτη των σημαντικότερων θεωρητικών προσεγγίσεων όπως αυτές διατυπώθηκαν από τον Hogan και τον Sebastian de la Torre.
2. Αναγνώριση των σημαντικότερων πρακτικών λογισμικών προσομοιώσεων συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας και μελέτη των χαρακτηριστικών τους.

3. Συγκρασιμός διάφορων εργαλείων σε μια πλατφόρμα προσομοίωσης ικανή να μας βοηθήσει να μελετήσουμε με αξιοπιστία σενάρια μεγάλης κλίμακας.
4. Εκτέλεση μιας σειράς πειραμάτων που αφορούν την εκτενή μελέτη του Hogan όσον αφορά την λειτουργία μιας ηλεκτρικής αγοράς.

## 1.2 Σχετιζόμενες Εργασίες

- Οι ηλεκτρονικές αγορές αποτέλεσαν το επίκεντρο έντονης έρευνας τα τελευταία χρόνια στους τομείς της Οικονομίας και της Τεχνητής Νοημοσύνης [8]. Οι πράκτορες μπορούν να είναι ιδιαίτερα χρήσιμοι για την αυτοματοποίηση εμπορικών συναλλαγών, τη διαπραγμάτευση για τα αγαθά και τις υπηρεσίες για λογαριασμό των χρηστών τους. Παρά τους αυξημένη δημοτικότητα τους, ωστόσο, το τεράστιο δυναμικό των παραγόντων και τα πολυπρακτορικά συστήματα ηλεκτρονικού εμπορίου δεν έχουν αξιοποιηθεί πλήρως. Μία από τις δυσχέρειες οι δοκιμές σε πραγματικό χρόνο και συνθήκες λόγω του ότι δεν είναι πρακτικό και εμπεριέχει σοβαρούς κινδύνους. Μια προσέγγιση σε αυτό το πρόβλημα είναι μια είδους προσομοίωση των ηλεκτρονικές αγορών και δοκιμή στρατηγικών των συμμετεχόντων σε αυτή. Σε αυτό το σημείο στοχεύει η εν λόγω εργασία. Συγκεκριμένα, καθοδηγούμενη από τη θεωρία και μετά από μια λεπτομερή ανάλυση του τομέα της ενέργειας επιλέγει τα κατάλληλα πρωτόκολλα διαπραγμάτευσης, το σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός παιχνιδιού για την προσομοίωση της αγοράς. Τέλος, μπορεί κανείς να πειραματιστεί για να ελέγξει την καταλληλότητα των χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων. Επιπρόσθετα, η εν λόγω εργασία μελετά για εργαλεία που τυχόν μπορούν να υποστηρίξουν τον σχεδιασμό και την υλοποίηση της προσομοίωσης ηλεκτρονικών αγορών. Ωστόσο, στην έρευνα τους δεν βρήκαν κάποια πλατφόρμα ή εργαλείο που θα επιτρέψουν στους ερευνητές και προγραμματιστές να σχεδιάσουν και να εφαρμόσουν τις δικές τους αγορές. Για το σκοπό αυτό ανέλυσαν θεωρητικά μια τέτοια πλατφόρμα που παρέχει τις εγκαταστάσεις για την λειτουργία μιας τέτοιας αγοράς και την χρήση ποικιλίας πρωτοκόλλων πλειστηριασμού. Έτσι, ο σχεδιασμός και η υλοποίηση της προσομοίωσης των ηλεκτρονικών αγορών περιγράφεται με τη βοήθεια παιχνιδιών.
- Παρόμοια εργασία με την παραπάνω αναπτύχθηκε στο Πανεπιστήμιο του Πόρτο [20] η οποία παρουσιάζει ένα πρωτότυπο προσομοίωσης μιας ανταγωνιστικής αγοράς, συμπεριλαμβανομένης μιας αποθήκης ενέργειας και των διμερών συμβάσεων. Ο προσομοιωτής παρέχει στους χρήστες ένα μέσο για την καλύτερη κατανόηση της έννοιας της ανταγωνιστικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Στην εν λόγω πλατφόρμα συμμετέχοντες αλληλεπιδρούν ταυτόχρονα, μέσω ενός web-based interface. Ο προσομοιωτής έχει γραφτεί σε γλώσσα VB Σκριπτ και χρησιμοποιεί την τεχνολογία Active Server Pages. Ο χρήστης αλληλεπιδρά με ένα πρόγραμμα περιήγησης και συμμετέχει αναλαμβάνοντας το ρόλο του πωλητή, αγοραστή ή ISO (independent system operator). Πωλητές και αγοραστές καλούνται να δημοσιεύσουν τις προσφορές τους, αλλά χωρίς να έχουν πρόσβαση σε άλλες πληροφορίες, εκτός από ιστορικά δεδομένα και τα αποτελέσματα που αποστέλει ο

διαχειριστής της αγοράς. Ένας συμμετέχων μόνο μπορεί να αναλάβει και τον ρόλο του ISO, χωρίς να παρεμβαίνει όμως στη διαδικασία υποβολής προσφορών, εκτός εάν ο ίδιος αποφασίζει να αλλάξει τις παραμέτρους της προσομοίωσης. Η ποσότητα της ενέργειας που μπορεί να δίνει ο κάθε παραγωγός είναι προκαθορισμένη και δεν αλλάζει κατά την διάρκεια της προσομοίωσης. Αφού ο ISO κληθεί για να ελέγξει τις προσφορές και αν τηρούν τους περιορισμούς ανακοινώνει τα αποτελέσματα στους συμμετέχοντες.

- Μία εργασία με παρόμοιο προσανατολισμό [1] αλλά βασισμένης σε πράκτορες είναι η πλατφόρμα της εν λόγω εργασίας η οποία είχε ως σκοπό την εκτενή μελέτη της λειτουργίας της λιανικής, αλλά και της χονδρικής αγοράς ενέργειας σε δίκτυα διανομής και μετάδοσης με λειτουργικότητα «ευφυούς» δικτύου (smart grid). Το ευφύες δίκτυο αποτελεί θεμέλιο λίθο στην λειτουργία μιας οποιασδήποτε αγοράς καθώς χρησιμοποιεί κατάλληλη τεχνολογία πληροφοριών και επικοινωνιών για να συγκεντρώσει απαραίτητες πληροφορίες με αυτοματοποιημένο τρόπο για να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα, την αξιοπιστία, την οικονομία, και την βιωσιμότητα της παραγωγής και διανομής της ηλεκτρικής ενέργειας. Τέτοιες πληροφορίες μπορεί να είναι είτε η συμπεριφορά των καταναλωτών είτε των παραγωγών σε διάφορες συνθήκες.

Για τον σκοπό αυτό η εν λόγω εργασία χρησιμοποίησε δύο ήδη υλοποιημένες πλατφόρμες στις οποίες θα αναφερθούμε παρακάτω. Το στοιχείο κλειδί του όλου εγχειρήματος, ήταν η δημιουργία ενός συστήματος διπλής υπόστασης το οποίο θα ελέγχεται από μία κεντρική οντότητα (system operator). Σε γενικές γραμμές, όταν αναφερόμαστε σε ένα σύστημα διπλής υπόστασης αναφερόμαστε στις συντονισμένες εργασίες μιας αγοράς ενέργειας με χρονικό ορίζοντα τιμολόγησης την επόμενη μέρα (day-ahead) και μιας αγοράς ενέργειας με τιμολόγηση πραγματικού χρόνου η οποία λαμβάνει χώρα καθημερινά με επιπλέον όρους, τους γεωγραφικούς, κάτι που πρακτικά υποδηλώνει διαφορετικές τιμές σε διαφορετικά σημεία του δικτύου διανομής. Η day-ahead αγορά ενέργειας είναι δομημένη ως ένα σύστημα δημοπρασιών. Καταναλωτές (Load-Serving Entities(LSEs)) πλειοδοτούν κάθε μία ώρα με σταθερές απαιτήσεις που εξαρτώνται φυσικά από την τρέχουσα τιμή. Αντίστοιχα, οι εταιρίες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας (Generation Companies Gen-Cos) πλειοδοτούν την ελάχιστη τιμή ηλεκτρικής ενέργειας στην οποία είναι διατεθειμένοι να πουλήσουν την ενέργεια που παράγουν, με το system operator να επιλέγει την τιμή και την ποσότητα ισορροπίας (clearing price, clearing quantity), που αντιστοιχούν στην τιμή που θα αγοράζουν οι καταναλωτές και θα πουλάνε οι παραγωγοί, την ποσότητα ισορροπίας.

Για την υλοποίηση της πλατφόρμας χρησιμοποιήθηκαν δύο ήδη υπάρχουσες πλατφόρμες προσομοίωσης, το GridLAB-D και το AMES. Το πρώτο στοχεύει στο επίπεδο της λιανικής αγοράς ενώ το δεύτερο στο επίπεδο της χονδρικής. Τα βασικά χαρακτηριστικά του GridLAB-D θα αναλυθούν παρακάτω. Όσον αφορά τώρα το AMES είναι ένα ανοιχτού λογισμικού πακέτο υλοποιημένο σε Java που προσομοιώνει την λειτουργία μιας χονδρικής αγοράς ενέργειας, η οποία συντονίζεται από μία ανεξάρτητη κεντρική οντότητα (Independent System Operator(ISO)).

Πιο κοντά στο δικό μας στόχο είναι η τελευταία εργασία. Από την πλευρά μας έγινε χρήση της πλατφόρμας GridLab-D και μόνο. Η εν λόγω πλατφόρμα επεκτάθηκε ώστε να υποστηρίζει την επιθυμητή λειτουργικότητα και η λειτουργία της εστιάζεται κυρίως στην λιανική αγορά.

### 1.3 Οργάνωση του τόμου

Το υπόλοιπο της παρούσας εργασίας είναι οργανωμένο ως εξής: Στο επόμενο κεφάλαιο περιγράφουμε το απαιτούμενο θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Το τρίτο κεφάλαιο περιλαμβάνει την περιγραφή των θεωρητικών προσεγγίσεων, ενώ στο τέταρτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή της πλατφόρμας που θα χρησιμοποιηθεί για εκτέλεση των προσομοιώσεων, καθώς και η περιγραφή των βασικών συνιστωσών της. Στο πέμπτο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την βελτιστοποίηση της πλατφόρμας μας κάνοντας χρήση της θεωρίας παιγνίων ενώ στο έκτο κεφάλαιο παρατίθεται ο αρχιτεκτονικός σχεδιασμός του μοντέλου της προσομοίωσης, καθώς και τα πειραματικά αποτελέσματα και στοιχεία από τις μελέτες περίπτωσης. Στο πρότελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα κατ' αρχήν συμπεράσματά μας καθώς και μια σύντομη αναφορά σε περαιτέρω πεδία έρευνας ενώ στο τελευταίο κεφάλαιο (appendix) γίνεται αναφορά σε μαθηματικές έννοιες και σχέσεις που θα χρησιμοποιηθούν στο πέμπτο κεφάλαιο.





## Κεφάλαιο 2

# Θεωρητικό υπόβαθρο

Σε αυτό το κεφάλαιο έχοντας μελετήσει αρκετές από τις ερευνητικές εργασίες του William Hogan [11] και [10] ασχοληθούμε με την θεωρητική μελέτη [10] για τον τρόπο λειτουργίας και τις ιδιότητες μιας ανταγωνιστικής ηλεκτρικής αγοράς. Ταυτόχρονα, θα παρατεθούν διάφορα παραδείγματα για την καλύτερη κατανόηση του τρόπου λειτουργίας της εν λόγω αγοράς.

### 2.1 Θεωρητική προσέγγιση

#### 2.1.1 Εισαγωγή

Μία βραχυπρόθεσμη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας η οποία συντονίζεται μέσω μίας κεντρικής οντότητας (system operator) και βασίζεται σε ένα σύστημα πλειοδοσιών (bids), παρέχει το θεμέλιο για την δημιουργία μιας ανταγωνιστικής αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρόλος της κεντρικής οντότητας είναι η ρύθμιση και η εποπτεία της λειτουργίας της αγοράς με κανόνες οι οποίοι αποφασίζονται πριν την έναρξη της. Συνδυασμένη με μακροπρόθεσμα συμβόλαια, τα οποία έχουν ως στόχο την επίλυση ζητημάτων σχετικών με την παραγωγή κάθε επιχείρησης καθώς και την συμφόρηση κατά την μεταφορά της ενέργειας από μια γεωγραφική περιοχή σε άλλη, η τοπική αγορά με έναν ανταγωνιστικό τρόπο τιμολόγησης μπορεί να επιτρέψει την ανοιχτή πρόσβαση στο δίκτυο μετάδοσης, δηλαδή ικανοποίηση της ζήτησης σε ενέργεια και σε περιπτώσεις που η τοπική επιχείρηση δεν μπορεί να την ικανοποιήσει. Ο συντονισμός μέσω της κεντρικής οντότητας (καθώς και της ύπαρξης μιας τοπικής αγοράς βασισμένη σε ένα σύστημα πλειοδοσιών) δημιουργεί το σκελετό μιας χονδρικής αγοράς με βασικό γνώμονα τον ανταγωνισμό μεταξύ των συμμετεχόντων. Οι συμμετέχοντες στην αγορά βεβαίως μπορεί να μην ανήκουν στην ίδια τοποθεσία αλλά να μπορούν να συμμετέχουν στην ίδια αγορά. Έτσι, θα διαμορφώνονται διαφορετικές τοπικές τιμές οι οποίες θα διασφαλίζουν τα δικαιώματα μετάδοσης χωρίς να περιορίζουν την πραγματική χρήση του συστήματος.

Τα στοιχεία κλειδιά που θα επιτρέψουν την δημιουργία και λειτουργία μίας αγοράς ενέργειας όπως αυτή που περιγράφεται παραπάνω, είναι:

- Μία βραχυπρόθεσμη τοπική αγορά, βασισμένη σε ένα σύστημα πλειοδοσιών, η οποία θα συντονίζεται από μία κεντρική οντότητα (system operator).

- Συναλλαγές στα πλαίσια της τοπικής τιμής που αποφασίζεται από το σύστημα ώστε να περιλαμβάνονται οι απώλειες ενέργειας καθώς και η συμφόρηση.
- Διμερές συναλλαγές με βραχυπρόθεσμη χρέωση μετάδοσης ίση με την διαφορά των διαμορφωμένων τιμών στις τοπικές αγορές.
- Ένα σύστημα το οποίο θα χρησιμοποιεί πλειοδοσίες με ορίζοντα την επόμενη μέρα, τιμολόγηση και συμβόλαια, αλλά και εξισορρόπηση πραγματικού χρόνου σε πραγματικού χρόνου τιμές.
- Συμβόλαια που να επιλύουν ζητήματα σχετικά με την συμφόρηση κατά την μετάδοση (transmission congestion) ώστε να κατανέμονται τα οφέλη που προκύπτουν από τις διαφορετικές τοπικές τιμές.
- Χρεώσεις πρόσβασης στο δίκτυο οι οποίες θα καλύπτουν το ενσωματωμένο κόστος δικτύου (συντήρηση κ.τ.λ.), καθώς και άλλες καθορισμένες χρεώσεις.
- Χρεώσεις χρήσης φορτίου ώστε να ισοσκελιστούν τα ετήσια κόστη υπηρεσιών.

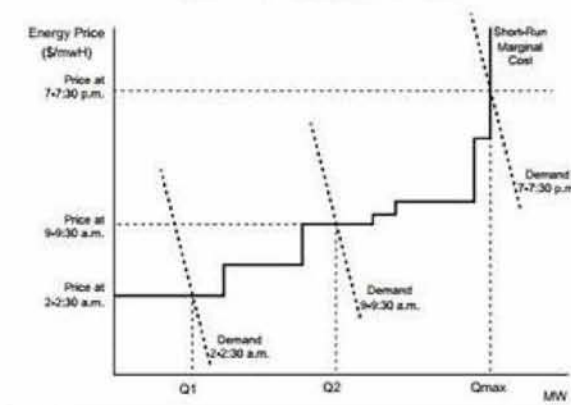
### 2.1.2 Βραχυπρόθεσμη Αγορά

#### Χωρίς ζητήματα συμφόρησης κατά την μετάδοση

Η βραχυπρόθεσμη αγορά, η οποία και μας ενδιαφέρει στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής, είναι σχετικά απλή τόσο στην κατανόηση, όσο και στην υλοποίηση. Ας ξεκινήσουμε την ανάλυση της με τις αρχικές συνθήκες που πρέπει να ικανοποιούνται. Αυτές μπορεί να είναι οι αποφάσεις για τις τοπικές επενδύσεις (κόστος παραγωγής, κόστος συντήρησης κτλ), οι οποίες πρέπει να ληφθούν πριν την έναρξη της αγοράς. Τα εργοστάσια ενέργειας, οι γραμμές μετάδοσης και διανομής είναι εγκατεστημένες. Παραγωγοί και καταναλωτές είναι έτοιμοι για να προσφέρουν και να ζητήσουν αντίστοιχα. Ωστόσο, η μόνη απόφαση που απομένει να ληφθεί είναι αυτή της μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

Εξεκινώντας με την διαδικασία λειτουργίας της αγοράς σε τακτά χρονικά διαστήματα • ως θεωρηθεί μισή ώρα • η αγορά λειτουργεί με ανταγωνιστικό τρόπο για να μεταφέρει ηλεκτρική ενέργεια από τους παραγωγούς στους καταναλωτές. Κάθε παραγωγός χαρακτηρίζεται από το κόστος παραγωγής ενέργειας το οποίο είναι διαφορετικό για τον καθένα ενώ οι καταναλωτές έχουν διαφορετικές απαιτήσεις που στηρίζονται στην ποσότητα που ζητούν καθώς και στην τιμή που διαμορφώνεται σε κάθε δεδομένο χρονικό διάστημα.

Για την έναρξη της λειτουργίας της αγοράς πρέπει να «δημιουργηθούν» οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης. Οι καμπύλες ζήτησης και προσφοράς είναι αναγκαίες για να προσδιοριστεί η τιμή και η ποσότητα ενέργειας στην αγορά. Η τομή των δύο αυτών καμπυλών δίνει το σημείο ισορροπίας της αγοράς (τιμή και ποσότητα ισορροπίας). Η τιμή και η ποσότητα ισορροπίας, δηλαδή η τιμή όπου οι αγοραστές και οι πωλητές του προϊόντος ή της υπηρεσίας αγοράζουν και πουλούν την ποσότητα, μεγιστοποιεί την χρησιμότητα των καταναλωτών αλλά και τα κέρδη των παραγωγών. Αν βρεθεί το σημείο ισορροπίας δεν υπάρχει λόγος μετατόπισης από αυτό εκτός εάν επέλθουν σημαντικές αλλαγές στις διάφορες μεταβλητές της αγοράς όπως το κόστος



Σχήμα 2.1: Διαδικασία εύρεσης του σημείου ισορροπίας μιας αγοράς κατά τη διάρκεια μιας ημέρας (με διακεκομμένη γραμμή είναι η ζήτηση και με συμπαγής η προσφορά)

παραγωγής, η ενδεχόμενη αυξημένη απαίτηση σε ενέργεια που επηρεάζουν είτε τη ζήτηση είτε τη προσφορά.

Όσον αφορά την καμπύλη προσφοράς, η τιμή προσφοράς της ενέργειας κάθε παραγωγού συσσωρεύεται με σειρά διάταξης από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη. Κατά τον ίδιο τρόπο, δημιουργείται και η καμπύλη ζήτησης με αντίστροφη όμως διάταξη. Με βάση αυτές τις γραφικές παραστάσεις λαμβάνονται οι αποφάσεις σχετικά με το ποια εργοστάσια θα λειτουργήσουν σε κάθε χρονικό διάστημα και ποια όχι. Όπως είναι εμφανές θεμέλιος λίθος του όλου εγχειρήματος, είναι το σύστημα πλειοδοσιών βάση του οποίου επιτυγχάνεται η ανταγωνιστικότητα. Κάθε πλειοδοσία αντιπροσωπεύει την ελάχιστη αποδεκτή τιμή στην οποία ο παραγωγός είναι διατεθειμένος να πουλήσει ενέργεια, καθώς και την μέγιστη αποδεκτή τιμή στην οποία ο καταναλωτής είναι πρόθυμος να αγοράσει ενέργεια. Η κεντρική οντότητα του συστήματος μπορεί να χειριστεί τις πλειοδοσίες συνθέτοντας την παραγωγή και την ζήτηση και με τον τρόπο αυτό να προσδιορίσει το σημείο ισορροπίας που μεγιστοποιεί το όφελος τόσο για τον παραγωγό, όσο και για τον καταναλωτή.

### Προβλήματα Συμφόρησης κατά την μετάδοση

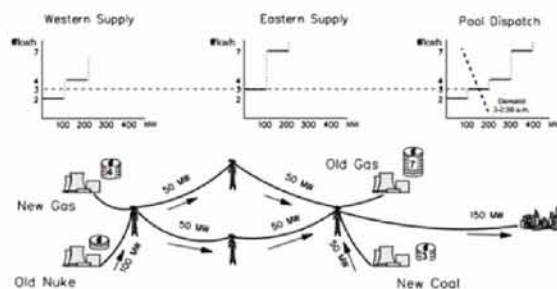
Η προσέγγιση της βραχυπρόθεσμης αγοράς, που αναλύθηκε παραπάνω, αποκρύπτει μία σημαντική λεπτομέρεια. Δεν παράγεται, ούτε καταναλώνεται όλο το ρεύμα στην ίδια τοποθεσία. Στην πραγματικότητα τα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και οι καταναλωτές είναι συνδεδεμένοι μέσω ενός δικτύου γραμμών διανομής και μετάδοσης. Στην μετάδοση λοιπόν του ρεύματος πρέπει να συνυπολογιστεί η αντίσταση που συναντάται κατά μήκος των γραμμών μετάδοσης, η οποία με τη σειρά της δημιουργεί απώλειες αρά και επιπλέον κόστος. Το επιπλέον αυτό κόστος πρέπει να συμπεριληφθεί στην όλη διαδικασία απόφασης του σημείου ισορροπίας της αγοράς. Παρόλο που πρακτικά αυτή η επιπλέον αντίσταση δεν φέρει μεγάλες αλλαγές στην υλοποίηση της ανταγωνιστικής αγοράς που περιγράφηκε πρέπει να ληφθούν υπ' όψιν τυχόν απώλειες που μπορεί να προκύψουν.

Επιπρόσθετα, η μετάδοση του ρεύματος επηρεάζεται και από την συμμόρφωση. Η συμμόρφωση χαρακτηρίζεται από διάφορους περιορισμούς κατά την μετάδοση της ενέργειας από περιοχή σε περιοχή. Υπάρχουν μεγάλες πιθανότητες να επιβληθεί μεγαλύτερο κόστος παραγωγής σε συγκεκριμένες περιοχές. Τέτοιοι περιορισμοί μπορεί να είναι η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να μεταδοθεί από μια γραμμή του δικτύου καθώς και η αφαίρεση μιας γραμμής λόγω ενδεχόμενων προβλημάτων. Με την παρουσία τέτοιων προβλημάτων, στην απλή περίπτωση το ρεύμα θα ρέει από την περιοχή χαμηλού κόστους προς την περιοχή υψηλού κόστους. Στην περίπτωση που υπάρχουν οι περιορισμοί ως προς την ικανότητα μεταφοράς, τα εργοστάσια τα οποία θα μπορούσαν να παράγουν ενέργεια σε χαμηλή τιμή θα χαρακτηριστούν ως «κλειστά» κάτι που πρακτικά σημαίνει ότι δεν θα πουλούν την ενέργεια που παράγουν. Συνεπώς, οι ενεργειακές απαιτήσεις στην περίπτωση αυτή θα πρέπει να καλυφθούν από ακριβότερα εργοστάσια τα οποία με την σειρά τους θα χαρακτηριστούν ως «ανοιχτά». Αυτή είναι και η περίπτωση που διαμορφώνονται διαφορετικές τιμές από περιοχή σε περιοχή. Παρά τις διαφορετικές τιμές που θα υπάρχουν μεταξύ διαφορετικών περιοχών το βασικό μοντέλο αγοράς που περιγράφηκε προηγουμένως διατηρείται. Οι παραγωγοί θα συνεχίσουν να πλειοδοτούν ακριβώς όπως πριν, με την τιμή, όπως είναι αντιληπτό, να αντιπροσωπεύει την ελάχιστη αποδεκτή τιμή στην οποία είναι διατεθειμένοι να πουλήσουν την ενέργεια στην δική τους περιοχή. Οι καταναλωτές πλειοδοτούν αντίστοιχα στην μέγιστη αποδεκτή τιμή στην οποία είναι διατεθειμένοι να αγοράσουν στην δική τους περιοχή. Θα δημιουργηθούν λοιπόν διαφορετικές τοπικές τιμές. Πρακτικά όμως οι παραγωγοί και οι καταναλωτές θα βλέπουν μόνο την τιμή της δικής τους περιοχής. Ταυτόχρονα, αν μια περιοχή χρειαστεί επιπλέον ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας προκειμένου να καλύψει τις απαιτήσεις των καταναλωτών της θα πρέπει να το προμηθευτεί από κάποια άλλη περιοχή. Απαιτείται έτσι μία τιμή «μετάδοσης» η οποία θα είναι η διαφορά των τιμών μεταξύ των διαφορετικών περιοχών.

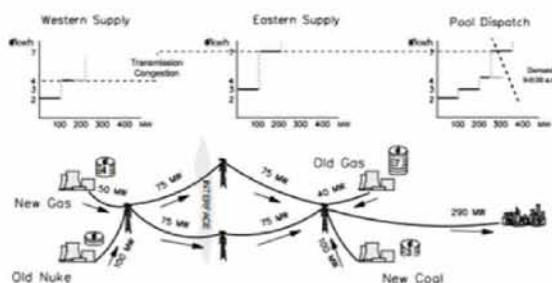
## 2.2 Παραδείγματα

### 2.2.1 Χωρίς Ζητήματα Συμμόρφωσης

Ας θεωρήσουμε για αρχή ένα σύστημα που δεν περιορίζεται από ζητήματα συμμόρφωσης, ενώ για ευκολία αγνοούνται οι τυχόν απώλειες ενέργειας κατά την μετάδοση. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα υπάρχει ένα μόνο σημείο κατανάλωσης ενέργειας, μία πόλη στην ανατολή, που τροφοδοτείται από παραγωγούς που εδρεύουν δυτικά, αλλά και από τοπικούς παραγωγούς. Τα εργοστάσια στα δυτικά είναι τα “OldNuke” και “NewGas” με κόστος παραγωγής 2 και 4 cents/kWh αντίστοιχα. Τα δύο αυτά εργοστάσια έχουν δυνατότητα παραγωγής 100 MW και μέσω ενός δικτύου μετάδοσης, έχουν την δυνατότητα να μεταφέρουν ηλεκτρικό ρεύμα στην ανατολή. Αντίστοιχα ανατολικά υπάρχουν άλλα δύο εργοστάσια παραγωγής, τα “NewCoal” και “OldGas” με δυνατότητα παραγωγής 100 MW το κάθε ένα και κόστος 3 και 7 cents αντίστοιχα. Τα δύο εργοστάσια στη δύση ορίζουν την καμπύλη “Westernsupply”, ενώ τα δύο εργοστάσια στην ανατολή την καμπύλη “EasternSupply” με βάση το σύστημα πλειοδοσιών που περιγράφηκε. Οι παραγωγοί δηλαδή έχουν πλειοδοτήσει στην ελάχιστη δυνατή τιμή

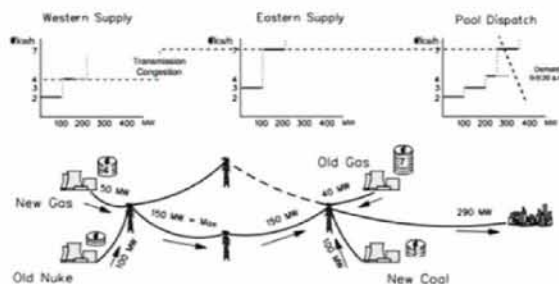


Σχήμα 2.2: Διαδικασία εύρεση του σημείου ισορροπίας με συμμετοχή περισσότερων του ενός παραγωγών και χωρίς συμφόρηση κατά την μετάδοση της ενέργειας μεταξύ διαφορετικών περιοχών



Σχήμα 2.3: Διαδικασία εύρεση του σημείου ισορροπίας με συμμετοχή περισσότερων του ενός παραγωγών, με συμφόρηση κατά την μετάδοση της ενέργειας μεταξύ διαφορετικών περιοχών

στην οποία είναι διατεθειμένοι να πουλήσουν την ενέργεια που παράγουν. Με τον ίδιο τρόπο σχηματίζεται η καμπύλη ζήτησης (η διακεκομμένη γραμμή στο σχήμα (2.2)). Οι καταναλωτές δηλαδή πλειοδοτούν στην μέγιστη δυνατή τιμή στην οποία είναι διατεθειμένοι να αγοράσουν την ενέργεια που επιθυμούν. Το σύστημα (system operator) πλέον και για το χρονικό διάστημα 2 – 2.30 πμ πρέπει να επιλέξει την τιμή και την ποσότητα ισορροπίας. Κάτι τέτοιο είναι εφικτό μέσω των καμπυλών προσφοράς - ζήτησης που σχηματίστηκαν προηγουμένως. Στο συγκεκριμένο παράδειγμα λοιπόν η τιμή ισορροπίας (clearing price) είναι 3 cents, ενώ η ποσότητα ισορροπίας (clearing quantity) είναι 150 MW. Πρακτικά κάτι τέτοιο σημαίνει ότι τα εργοστάσια που βρίσκονται δεξιά του σημείου τομής, δηλαδή τα “New Gas” και “Old Gas”, θα χαρακτηριστούν ως «κλειστά». Κάτι παρόμοιο συμβαίνει και με τους καταναλωτές. Όσοι έχουν πλειοδοτήσει σε τιμή κάτω των 3 cents δεν θα αγοράσουν ενέργεια και δε θα λειτουργήσουν στο συγκεκριμένο χρονικό παράθυρο. Όσον αφορά τα εργοστάσια που χαρακτηρίζονται ως «ανοιχτά», το “New Coal” αποζημιώνεται με το ποσό των 3 cents/kWh για τα 50 MW που παράγει κάτι που σημαίνει ότι απλώς θα καλύψει τις λειτουργικές του ανάγκες, ενώ το “Old Nuke” το οποίο λαμβάνει επίσης το ίδιο ποσό, αποκτά 1 cents/kWh κέρδος για τα 100 MW που παράγει αντίστοιχα.

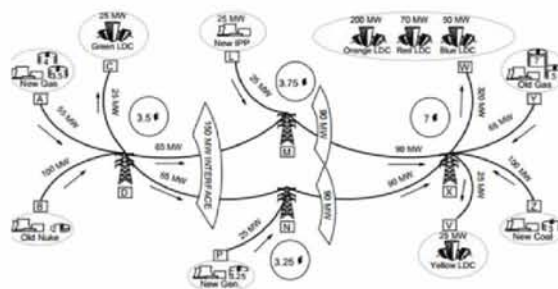


Σχήμα 2.4: Εύρεση του σημείου ισορροπίας της αγοράς στην περίπτωση διακοπής παροχής ενέργειας από κάποιο εργοστάσιο

### 2.2.2 Με Ζητήματα Συμφόρησης

Στην περίπτωση τώρα που έχουμε ένα σύστημα με ζητήματα συμφόρησης ως πάρουμε ως παράδειγμα τα εργοστάσια να λειτουργούν στο μέγιστο των δυνατοτήτων τους, τότε υπάρχει πιθανότητα να υπάρξουν περιορισμοί κατά την μετάδοση (όπως περιορισμένη χωρητικότητα γραμμής). Ας υποθέσουμε πως υπάρχει περιορισμός στο να μεταδοθούν άνω των 150 MW ταυτόχρονα από τα δυτικά προς τα ανατολικά, ενώ οι ενεργειακές απαιτήσεις της πόλης παραμένουν οι ίδιες (με το προηγούμενο παράδειγμα). Ο περιορισμός αυτός έχει σημαντικές επιπτώσεις τόσο στην τιμή ισορροπίας, όσο και στην ποσότητα ισορροπίας. Μόνο το μισό της ενέργειας (50 MW) που έχει την δυνατότητα να παράγει το εργοστάσιο “New Gas” μπορεί τελικά να μεταδοθεί. Αυτό έχει σαν συνέπεια οι καταναλωτές να πρέπει να αγοράζουν ενέργεια από το εργοστάσιο “Old Gas” ούτως ώστε να μπορέσουν να καλύψουν τις ενεργειακές απαιτήσεις τους.

Στο σχήμα (2.4), φαίνεται η αύξηση της τιμής ισορροπίας στα 7 cents/kWh με περαιτέρω μείωση της ζήτησης στα 290 MW. Στην περίπτωση αυτή τα εργοστάσια στην ανατολή αποζημιώνονται με 7 cents/kWh για τα 140 MW που παρέχουν, με το εργοστάσιο “New Coal” να έχει κέρδος 4 cents/kWh, ενώ το εργοστάσιο “Old Gas” καλύπτει απλώς το κόστος λειτουργίας του. Στη δύση τα πράγματα είναι διαφορετικά. Ο περιορισμός έθεσε εκτός αγοράς μέρος της παραγωγής του εργοστασίου “New Gas”. Η τιμή λοιπόν την οποία θα λάβουν ως αποζημίωση τα εργοστάσια στην δύση δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από το κόστος λειτουργίας αυτού του εργοστασίου. Συνεπώς το εργοστάσιο “NewGas” θα λάβει 4 cents/kWh καλύπτοντας με αυτόν τον τρόπο τα λειτουργικά του έξοδα, ενώ το εργοστάσιο “Old Nuke” θα λάβει το ίδιο ποσό έχοντας όμως κέρδος 2 cents/kWh. Τα 3 cents/kWh διαφορά στην τιμή ανάμεσα στην δύση και την ανατολή είναι το λεγόμενο κόστος ευκαιρίας (opportunity cost) εξαιτίας της συμφόρησης κατά την μετάδοση της ενέργειας. Παρόμοια αποτελέσματα εξαιτίας συμφόρησης θα μπορούσαμε να είχαμε αν για παράδειγμα υπήρχε πρόβλημα σε κάποια γραμμή μετάδοσης.



Σχήμα 2.5: Παρατήρηση της διακύμανσης της τιμής της ενέργειας ανά περιοχή λόγω loop flows

### Loop Flows

Όλα τα δίκτυα που παρουσιάστηκαν έως τώρα δεν αντιμετώπισαν το πρόβλημα των ροών σε βρόγχο (loop flow) κάτι το οποίο δημιουργεί προβλήματα όσον αφορά τον προσδιορισμό των τιμών και των ποσοτήτων ισορροπίας μιας και εισάγονται επιπλέον ζητήματα συμφόρησης. Ο όρος loop flow [5] αναφέρεται στον βρόγχο που δημιουργείται σε ένα κλειστό σύστημα μετάδοσης που συνδέεται με άλλα συστήματα. Η εμφάνιση ενός τέτοιου βρόγχου γίνεται όταν η ενέργεια μεταδίδεται πάνω σε γραμμές οι οποίες είναι παραπλεύρως συνδεδεμένες. Ας θεωρήσουμε το διάγραμμα στην εικόνα 2.5.

Με μόνο περιορισμό να λειτουργεί οπωσδήποτε το “NewIPP” εργοστάσιο, παρατηρούμε μια σημαντική διακύμανση τιμών από περιοχή σε περιοχή. Ο λόγος είναι ότι ενώ υπό φυσιολογικές συνθήκες για παράδειγμα τα εργοστάσια το “P” και “A” που παράγουν φθηνά ηλεκτρική ενέργεια, θα μπορούσαν να συμμετέχουν με μεγαλύτερη ποσότητα ενέργειας στην διαμόρφωση τιμής, εξαιτίας όμως των loop flows θα πρέπει να περιορίσουν την παραγωγή τους. Συνεπώς, στην περίπτωση που η προσφερόμενη ενέργεια δεν επαρκεί για να καλυφθεί η ζήτηση τότε το έλλειμμα ενέργειας θα αναζητηθεί στα πιο ακριβά εργοστάσια.

Τέλος, ένα παράδοξο που πρέπει να σημειωθεί και δείχνει με emphaticό τρόπο τις επιπλοκές που μπορεί να επιφέρουν τα loop flows, είναι τα αποτελέσματα όταν προστίθεται ένα επιπλέον εργοστάσιο με πολύ χαμηλό κόστος παραγωγής ενέργειας. Η εισαγωγή αυτού του εργοστασίου εισάγει επιπλέον επιπλοκές και αλληλεξαρτήσεις.





## Κεφάλαιο 3

# Μελέτες Βελτιστοποίησης Ηλεκτρικής Αγοράς

Σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με διάφορες μελέτες που έχουν πραγματοποιηθεί κατά καιρούς με στόχο την καλύτερη δυνατή λειτουργία μιας ηλεκτρικής αγοράς. Στο τέλος του κεφαλαίου θα κάνουμε μια μικρή εισαγωγή στη Θεωρία Παιγνίων που αποτελεί την πλέον πιο διαδεδομένη μέθοδο βελτιστοποίησης προβλημάτων σε πολλούς τομείς.

### 3.1 Πρόσφατες Μελέτες

Έχουν πραγματοποιηθεί αρκετές προσπάθειες βελτιστοποίησης, σε θεωρητικό επίπεδο, του τρόπου λειτουργίας των ηλεκτρικών αγορών. Με το συγκεκριμένο θέμα έχει ασχοληθεί εκτενώς ο Antonio J. Conejo και η ομάδα του. Συγκεκριμένα, η ερευνά του είχε ως επίκεντρο την μεγιστοποίηση του κέρδους των παραγωγών μιας ηλεκτρικής αγοράς είτε αυτοί είναι υπεύθυνοι για την τελική τιμή (price-makers) είτε είναι αυτοί που αποδέχονται τις τιμές (price-taker). Ασχολήθηκαν κυρίως με τέσσερα μοντέλα. Εν συντομία ορισμένες ιδιότητες των μοντέλων αυτών είναι:

- Ο λιανοπωλητής (retailer) αγοράζει ενέργεια μέσω προθεσμιακών συμβάσεων (συμβάσεις βασισμένες σε όρους που πρέπει να τηρούνται από τους εμπλεκόμενους) και της αποθήκης ενέργειας, με σκοπό την παροχή ηλεκτρικής ενέργειας σε πελάτες - καταναλωτές της ηλεκτρικής αγοράς σε σταθερές τιμές και την μεγιστοποίηση του κέρδους του με δεδομένο επίπεδο ρίσκου. Το ρίσκο σχετίζεται με το αν ο λιανοπωλητής θα καταφέρει να πουλήσει την ενέργεια που αγόρασε και να ικανοποιήσει τις ανάγκες των καταναλωτών.
- Ο λιανοπωλητής συνάπτει συμβάσεις με τους παραγωγούς και τους καταναλωτές ώστε να μεγιστοποιήσει το κέρδος του, διατηρώντας παράλληλα ένα αποδεκτό επίπεδο ρίσκου του διακανονισμού.
- Ο λιανοπωλητής έχοντας το ρόλο του price-maker έχει ως στόχο να επιτύχει το μέγιστο

δυνατό κέρδος σε ένα σταθμό αποθήκευσης ενέργειας που βασίζεται στην λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας.

- Ο παραγωγός συμμετέχει σε μια σειρά από αγορές όπως spot, day-ahead market και AGC (αυτόματη ρύθμιση παραγωγής) σαν price-taker, αλλά και σαν price-maker.

Το κοινό στοιχείο για αυτές τις περιπτώσεις είναι ο στόχος που επιθυμείτε να επιτευχθεί. Αυτός είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους του αντίστοιχου φορέα για κάθε περίπτωση. Κάθε περίπτωση επικεντρώνεται σε διαφορετική οντότητα. Επίσης, για την επίτευξη του στόχου κάθε μοντέλου γίνεται χρήση ενός μαθηματικού μοντέλου. Το κάθε μοντέλο προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του κάθε προβλήματος βελτιστοποίησης που καλείται να λύσει. Το μαθηματικό μοντέλο που χρησιμοποιείται βασίζεται είτε σε στοχαστικές διεργασίες είτε σε γραμμικό προγραμματισμό. Η τρίτη σε σειρά από τις παραπάνω περιπτώσεις χρησιμοποιεί γραμμικό προγραμματισμό.

Παρακάτω θα γίνει μια μικρή ανάλυση των παραπάνω περιπτώσεων.

**Πρώτη περίπτωση:** Ο λιανοπωλητής [4]

- τη στιγμή της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζει την αβεβαιότητα όσον αφορά την τιμή της ενέργειας στην αποθήκη ενέργειας και της τιμής της ενέργειας που προσφέρουν οι προθεσμιακές συμβάσεις.
- τη στιγμή της πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές αντιμετωπίζει την αβεβαιότητα της ζήτησης από την πλευρά των καταναλωτών καθώς και τον κίνδυνο ότι οι καταναλωτές μπορεί να στραφούν σε αγορές που προσφέρουν την ενέργεια σε χαμηλότερη τιμή.

Ο λιανοπωλητής, εκτός από τις συμβάσεις που υπογράφει με υπηρεσίες παροχής ενέργειας με σκοπό να αγοράσει ενέργεια, του δίνεται επίσης η δυνατότητα να υπογράφει συμβάσεις και με τους διάφορους καταναλωτές. Μια σύμβαση αυτού του τύπου αποφασίζεται αν θα υπογραφεί στην αρχή της λειτουργίας της αγοράς, προκειμένου να ικανοποιηθεί άμεσα τις απαιτήσεις τους κατά τη διάρκεια συγκεκριμένων περιόδων που συμφωνούνται σε αυτή. Η σύμβαση χαρακτηρίζεται από μια σταθερή τιμή για την πώληση συγκεκριμένης ποσότητας ενέργειας κατά τη διάρκεια μιας δεδομένης χρονικής περιόδου. Η τιμή βεβαίως δεν αλλάζει καθ' όλη την διάρκεια ισχύος του συμβολαίου.

Ταυτόχρονα, ο λιανοπωλητής έχει την δυνατότητα να λαμβάνει διαφορετικές αποφάσεις όσον αφορά τις κινήσεις που θα μπορούσε να ακολουθήσει ώστε να αγοράσει την ενέργεια που θέλει. Υπάρχουν δύο διαφορετικά είδη αποφάσεων που μπορεί να ληφθούν. Το πρώτο λαμβάνεται πριν την γνωστοποίηση των πραγματικών τιμών της ενέργειας και της ζήτησης του τελικού χρήστη ενώ το δεύτερο είδος αποφάσεων λαμβάνεται μετά την γνωστοποίηση των πραγματικών τιμών των παραμέτρων αυτών. Επίσης, το πρώτο σχετίζεται με τον καθορισμό των όρων της σύμβασης και την τιμή πώλησης, ενώ το δεύτερο επικεντρώνεται στην αβεβαιότητα όσον αφορά τις αποφάσεις που λαμβάνονται στην αρχή του έτους παρά στην αβεβαιότητα των αποφάσεων που λαμβάνονται με την γνώση των παραμέτρων.

Όσον αφορά τώρα τους τρόπους μέσω των οποίων ο λιανοπωλητής μπορεί να προμηθευτεί την ενέργεια που θα πουλήσει είναι οι εξής:

- Συμβάσεις: Ο λιανοπωλητής αγοράζει την ενέργεια, σύμφωνα με τη σύμβαση, η τιμή της οποίας είναι σταθερή μέσα στο χρονικό διάστημα που ισχύει η σύμβαση.
- Αποθήκη ενέργειας: Ο λιανοπωλητής χρησιμοποιεί την αποθήκη ενέργειας, προκειμένου να παρέχει στον τελικό χρήστη την ενέργεια που ζήτησε. Στην περίπτωση κατά την οποία η ενέργεια από την αποθήκη δεν είναι αρκετή, αγοράζει ενέργεια βασιζόμενος στις συμβάσεις.

**Δεύτερη περίπτωση:** Στην περίπτωση αυτή [9], ο λιανοπωλητής υπογράφει συμβάσεις με τους παραγωγούς, προκειμένου να αγοράσει την απαιτούμενη, για τις προβλεπόμενες ανάγκες, ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας και να ικανοποιήσει τις ανάγκες των καταναλωτών. Εκτός από τη σύμβαση με τους παραγωγούς, ο λιανοπωλητής μπορεί επίσης να συνάπτει συμβάσεις και με τους καταναλωτές. Σε αυτή την περίπτωση υπάρχει περιορισμός όσον αφορά το φορτίο το οποίο ο καταναλωτής μπορεί να αγοράσει. Για παράδειγμα, εάν ο καταναλωτής καταναλώνει ενέργεια μεγαλύτερη από το άνω όριο που έχει τεθεί στην σύμβαση και το οποίο μπορεί να λαμβάνει, τότε επιβαρύνεται με μία επιπλέον χρέωση. Σε αντίθεση με την αβεβαιότητα που υπήρχε όσον αφορά τη ζήτηση του καταναλωτή στην πρώτη περίπτωση, στην περίπτωση αυτή, ο λιανοπωλητής μπορεί να κάνει εκτιμήσεις όσον αφορά την ζήτηση των καταναλωτών και να βασιστεί σε αυτές για το ποσό της ενέργειας που θα προσφέρει. Επιπλέον, αντιμετωπίζει την αβεβαιότητα όσον αφορά την αστάθεια σε ωριαίες τιμές της αγοράς σε διαφορετικές περιοχές, με αποτέλεσμα να υπάρχουν πολλές πιθανότητες να μειώνεται το κέρδος του. Η χρονική περίοδος κατά την οποία ο λιανοπωλητής λειτουργεί είναι αυθαίρετη και μπορεί να περιλαμβάνει μεμονωμένες ώρες ή ακόμα και ένα συνεχές διάστημα ωρών.

**Τρίτη περίπτωση:** Σε αυτή την περίπτωση [7] ένας μηχανισμός δημοπρασίας χρησιμοποιείται για να καθοριστεί το σημείο ισορροπίας της αγοράς. Για κάποιο διάστημα, το οποίο καθορίζεται πριν αρχίσει η δημοπρασία, το σημείο ισορροπίας της αγοράς, καθώς και οι καμπύλες προσφοράς και της ζήτησης είναι διαθέσιμες. Όταν η αγορά έχει δεχθεί όλες τις προσφορές αποφασίζεται η τιμή και η ποσότητα ισορροπίας. Αυτές οι πληροφορίες βοηθούν τους μικρούς παραγωγούς όσο και τους price-makers να προβλέπουν την τιμή ισορροπίας της αγοράς καθώς και τις καμπύλες ζήτησης και προσφοράς. Ο τρόπος λειτουργίας μιας τέτοιας αγοράς είναι ο εξής: ο λιανοπωλητής επιλέγει έναν αλγόριθμο για να καθορίσει τη βέλτιστη ποσότητα που μπορεί να προσφέρει. Χρησιμοποιεί μια στρατηγική προσφορών για να καταφέρει να πάρει την βέλτιστη ποσότητα που είχε αποφασίσει με την βοήθεια του αλγορίθμου. Τέλος, ο διαχειριστής της δημοπρασίας θα είναι αυτός που θα αποφασίσει ποια θα είναι η ακριβής ποσότητα ενέργειας που μπορεί να προσφέρει ο λιανοπωλητής.

**Τέταρτη περίπτωση:** Η περίπτωση [17] αυτή επικεντρώνεται κυρίως στον παραγωγό και ιδιαίτερα στις στρατηγικές προσφορών που ακολουθεί, όπως και στην τρίτη περίπτωση. Η ακολουθία των αγορών αποφασίζει για το σημείο ισορροπίας της αγοράς μέσω ενός μηχανισμού δημοπρασίας. Δηλαδή, οι παραγωγοί πωλούν την ενέργειά τους, ενώ οι καταναλωτές αγοράζουν αυτή την ενέργεια σε προτεινόμενες τιμές. Κάθε αγορά αποφασίζει για το σημείο

ισορροπίας της σε διαφορετική χρονική στιγμή, αλλά σε διαδοχικό χρόνο. Πρώτα, η day-ahead αγορά, μετά το AGC και στο τέλος η αγορά εξισορρόπησης. Αυτές οι τρεις αγορές αποστέλλουν τις προσφορές στο φορέα που είναι υπεύθυνος για την εκκαθάριση της αγοράς λίγο πριν την ώρα υπολογισμού της τιμής ισορροπίας. Οι αποφάσεις που λαμβάνονται από την αγορά είναι γνωστές μετά τον υπολογισμό της τιμής ισορροπίας. Και σε αυτή την περίπτωση υπάρχει αβεβαιότητα η οποία όμως στηρίζεται σε ιστορικές πληροφορίες.

## 3.2 Θεωρία παιγνίων

### 3.2.1 Η θεωρία παιγνίων στην αγορά ενέργειας

Είναι γεγονός ότι η αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηριζόταν μέχρι πριν από δύο δεκαετίες από έντονα μονοπωλιακά στοιχεία. Μεγάλες εταιρίες που συνήθως τελούσαν υπό κρατικό έλεγχο της εκάστοτε χώρας αναλάμβαναν εξόλοκληρου την παραγωγή, την διαχείριση και τελικά την διανομή της ηλεκτρικής αγοράς. Από το 1990 και μετά συντελέστηκε σε πολλές χώρες της υφηλίου η απελευθέρωση της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας και η ανάθεση του έργου παραγωγής και διανομής της, σε πλήθος μικρότερων και ενίοτε περισσότερο ευέλικτων εταιριών [19]. Φυσική απόρροια της απελευθέρωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ήταν η ανάπτυξη τεχνικών μελέτης των βέλτιστων στρατηγικών που θα πρέπει να ακολουθήσει κάθε μια από τις εμπλεκόμενες στο χώρο εταιρίες (παραγωγοί - καταναλωτές) ώστε κατά πρώτον να επιβιώσει από τον ανταγωνισμό και κατά δεύτερον να οδηγηθεί σε πορεία βελτίωσης των οικονομικών της μεγεθών. Η πολυπλοκότητα του προβλήματος βελτιστοποίησης της εκάστοτε στρατηγικής αποδεικνύεται πως είναι εξαιρετικά μεγάλη και σίγουρα η μαθηματική επιστήμη παρέχει πλήθος εργαλείων για την επίλυση τους. Ωστόσο, είναι ευρύτερα αποδεκτό πως η προσέγγιση του προβλήματος υπό τη σκοπιά της θεωρίας παιγνίων είναι η πλέον αποδοτική και επιστημονικά θεμελιωμένη και τεκμηριωμένη.

Πιο γενικά η *θεωρία παιγνίων* (game theory) ξεκίνησε σαν κλάδος των οικονομικών με το βιβλίο των John von Neumann και Oskar Morgenstern *Theory of Games and Economic Behaviour* (Θεωρία Παιγνίων και Οικονομική Συμπεριφορά) πάνω σε παιχνίδια μηδενικού αθροίσματος. Το κύριο αντικείμενο της θεωρίας παιγνίων είναι η ανάλυση των αποφάσεων σε καταστάσεις (παιχνίδια) στρατηγικής αλληλεπίδρασης. Τα παίγνια είναι μία μέθοδος ανάλυσης προβλημάτων που έχουν σχέση με τον τρόπο λήψης αποφάσεων σε καταστάσεις σύγκρουσης και συνεργασίας. Ο παίκτης μπορεί να είναι ένα πρόσωπο, μία οργάνωση, ένα κράτος ή ένας συνασπισμός. Ως αντικείμενο έρευνας μπορούν να θεωρηθούν διάφορα προβλήματα πολιτικής, ψυχολογικής, κοινωνικής και οικονομικής μορφής. Για τη λύση των προβλημάτων αυτών θεωρείται προηγουμένως απαραίτητη η ανάλυση καταστάσεων, όπου δύο ή περισσότεροι δρώντες (παίκτες) βρίσκονται αντιμέτωποι και ακολουθούν συνεργατικές στρατηγικές. Κάθε παίκτης προσπαθεί να χρησιμοποιήσει όλα τα μέσα που διαθέτει, για να εμποδίσει τον αντίπαλό του να αποκτήσει πλεονεκτήματα που θα περιορίσουν τα κέρδη του. Επομένως, οι ενέργειές του εξαρτώνται άμεσα από τη θέση (στρατηγική) που θα επιλέξει ο αντίπαλος. Το κέρδος (payoff) κάθε παίκτη αναπαρίσταται με έναν αριθμό. Η θεωρία παιγνίων έχει επηρεάσει πολλούς τομείς,

από την οικονομία (ιστορικά ο πρώτος κλάδος που την χρησιμοποίησε) την πολιτική επιστήμη μέχρι και την βιολογία. Τα τελευταία χρόνια η παρουσία του στην επιστήμη των υπολογιστών έχει καταστεί αδύνατο να αγνοηθεί. Διαθέτει συνήθως πρωταρχικό ρόλο στα συνέδρια και περιοδικά της τεχνητής νοημοσύνης (artificial intelligence), σίγουρα στο ηλεκτρονικό εμπόριο, καθώς και στη δικτύωση και σε άλλους τομείς της επιστήμης των υπολογιστών. Υπάρχουν διάφοροι λόγοι για αυτό. Το Διαδίκτυο απαιτεί την ανάλυση και το σχεδιασμό συστημάτων που επεκτείνονται σε πολλούς φορείς με αποκλίνουσες πληροφορίες και συμφέροντα. Η Θεωρία Παιγνίων είναι μακράν η πιο ανεπτυγμένη θεωρία τέτοιων αλληλεπιδράσεων. Ένας άλλος λόγος είναι η ώθηση της τεχνολογίας. Τα μαθηματικά και η επιστημονική νοοτροπία της θεωρίας παιγνίων είναι παρόμοιες με εκείνες πολλών επιστημόνων της πληροφορικής. Πράγματι, είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι η σύγχρονη επιστήμη των υπολογιστών και της σύγχρονης θεωρίας παιγνίων σε μεγάλο βαθμό προέρχονται από τον ίδιο τόπο και χρόνο, δηλαδή στο Princeton υπό την ηγεσία του John von Neumann[18].

Εστιάζοντας στην προς υλοποίηση πλατφόρμα και εφόσον η υλοποίηση της βασίζεται στο GridLab-D, το οποίο είναι ένα σύστημα αποτελούμενο από πράκτορες, μπορούμε να θεωρήσουμε την πλατφόρμα ως ένα πολυπρακτορικό σύστημα και να γίνει χρήση της θεωρίας παιγνίων. Η πλατφόρμα θα προσομοιώνει την συμπεριφορά των καταναλωτών και των παραγωγών απέναντι στην ζήτηση και την προσφορά. Συνεπώς, η θεωρία παιγνίων θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την λήψη αποφάσεων όσον αφορά την τιμή ή την ποσότητα που θα ζητούν και θα προσφέρουν οι καταναλωτές και οι παραγωγοί αντίστοιχα με στόχο την μεγιστοποίηση του κέρδους των παραγωγών εφόσον οι ίδιοι προσφέρουν την απαιτούμενη ενέργεια. Τόσο οι παραγωγοί όσο και οι καταναλωτές είναι πράκτορες που αποφασίζουν για το ποια θα είναι η επόμενη κίνηση τους αντιμετωπίζοντας την αβεβαιότητα για το ποια θα είναι η κίνηση του αντιπάλου τους έτσι ώστε το σύστημα να μην καταρρεύσει και να ικανοποιηθούν. Για την θεμελίωση των μοντέλων και της υλοποίησης μας απαραίτητη είναι μια αρχική θεωρητική προσέγγιση της θεωρίας Παιγνίων για πλειστηριασμούς όπως η [23].



## Κεφάλαιο 4

# Συστήματα προσομοίωσης μεγάλης κλίμακας

Σε αυτό το κεφάλαιο θα γίνει μια μικρή ανάλυση για το σύστημα καθώς και για τις συνιστώσες αυτού που θα χρησιμοποιηθούν για την υλοποίηση της πλατφόρμας.

### 4.1 Το λογισμικό σύστημα GridLAB-D

Το κυριότερο εργαλείο προσομοίωσης που θα χρησιμοποιηθεί στο πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι το GridLAB-D. Είναι ένα ευέλικτος, βασισμένος σε πράκτορες, προσομοιωτής ο οποίος έχει τη δυνατότητα να μοντελοποιεί την συμπεριφορά αντικείμενων με την πάροδο του χρόνου. Αποτελεί ένα εργαλείο προσομοίωσης και ανάλυσης συστημάτων διανομής ενέργειας που παρέχει πολύτιμες πληροφορίες στους χρήστες που σχεδιάζουν και διαχειρίζονται συστήματα ενέργειας, καθώς και σε επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας που θέλουν να επωφεληθούν απ' τις τελευταίες ενεργειακές τεχνολογίες. Ενσωματώνει τις πιο προηγμένες τεχνικές μοντελοποίησης, με υψηλής απόδοσης αλγόριθμους για να πετύχει την βέλτιστη προσομοίωση κατά την τελική χρήση. Τα βασικά συστατικά από τα οποία αποτελείται, είναι οι ενότητες (module), οι κλάσεις και τα αντικείμενα, τα οποία αποτελούν τα δεδομένα εισαγωγής με τα οποία ο πυρήνας της μηχανής εκτελεί την προσομοίωση. Οι ενότητες αποτελούνται από κλάσεις και οι κλάσεις από αντικείμενα. Η πρόσβαση στις ενότητες γίνεται μέσω των κλάσεων ενώ στις κλάσεις μέσω των αντικειμένων. Η λειτουργία του GridLAB-D βασίζεται στην ύπαρξη ενός πυρήνα. Ο πυρήνας αυτός υλοποιεί την επικοινωνία και τον συντονισμό όλων των ενότητων, καθώς και όλων των συναρτήσεων υποστήριξης ώστε να λειτουργήσουν οι ενότητες αυτές. Διαθέτει έναν εξελιγμένο αλγόριθμο που συντονίζει ταυτόχρονα την κατάσταση εκατομμυρίων ανεξάρτητων συσκευών κάθε μία από τις οποίες περιγράφεται από πολλές διαφορετικές εξισώσεις. Η διαφορά του με προϋπάρχοντα εργαλεία προσομοίωσης είναι ότι χειρίζεται τόσο ασυνήθιστες καταστάσεις με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια όσο και μεγάλες χρονικές ανομοιογένειες που μπορεί να κυμαίνονται από μερικά δευτερόλεπτα, μέχρι πολλά χρόνια. Είναι τέλος πολύ εύκολο να ενσωματωθούν καινούριες ενότητες καθώς επίσης είναι εφικτή και η αλληλεπίδραση με άλλα συστήματα. Αναπτύχθηκε στο Pacific Northwest National Labora-

toxy του Υπουργείου Ενέργειας των Η.Π.Α. σε συνεργασία με την βιομηχανία και διάφορα Πανεπιστήμια. Περισσότερες πληροφορίες σχετικά με το λογισμικό σύστημα GridLAB-D είναι διαθέσιμες στο [13]. Η προς υλοποίηση πλατφόρμα θα βαζίζεται στο εν λόγω σύστημα και πιο συγκεκριμένα θα χρησιμοποιηθούν αρκετές από τις ενότητες τους δίνοντας περισσότερη έμφαση στις δυο παρακάτω:

- Powerflow module
- Market module

#### 4.1.1 Powerflow Υποσύστημα

Γενικά, το powerflow υποσύστημα αποτελεί ένα θεμελιώδες εργαλείο στην ανάλυση συστημάτων ενέργειας. Με δεδομένη την τάση των γεννητριών και του φορτίου καθορίζεται το μέγεθος της τάσης σε όλα τα σημεία του συστήματος. Η τάση αυτή χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των ρευμάτων και της ισχύος σε ολόκληρο το σύστημα. Το powerflow αποτελείται από δυο επιμέρους μέρη:

- το σύστημα μετάδοσης και
- το σύστημα διανομής

Η συνιστώσα του Gridlab-D που είναι πιο κοντά στην έννοια ενός powerflow υποσυστήματος είναι το powerflow module. Η διαφορά με τα συμβατικά powerflow υποσυστήματα είναι ότι το σύστημα μετάδοσης και το σύστημα διανομής υλοποιούνται σαν 2 ξεχωριστές οντότητες, το network module και powerflow module αντίστοιχα. Στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιηθεί μόνο το powerflow module.

**Powerflow Module** Το εν λόγω module έχει ως στόχο την παρατήρηση της ροής της ενέργειας σε ένα σύστημα. Ταυτόχρονα, προσδιορίζει τη τάση στους κόμβους ενός δικτύου ενέργειας και στους υποσταθμούς καθώς και το ρεύμα στις γραμμές σε κάθε σημείο του συστήματος δεδομένου του μοντέλου του συστήματος. Ο υπολογισμός της τάσης και του ρεύματος έχουν ως απώτερο σκοπό τον υπολογισμό είτε της ισχύος είτε της ενέργειας σε ένα συγκεκριμένο σημείο του συστήματος. Το πρόβλημα της ροής ενέργειας λύνεται με τη χρήση διάφορων μεθόδων. Όταν η τοπολογία του δικτύου είναι αυστηρά ακτινική από τον τροφοδότη ενέργειας στα φορτία, χρησιμοποιείται η προς τα εμπρός - πίσω μέθοδο σάρωσης, η οποία είναι η προεπιλεγμένη μέθοδος του Gridlab-D. Όταν τώρα η τοπολογία είναι τριφασική ασύμμετρη μη ακτινική χρησιμοποιούνται οι Gauss-Seidel ή Newton-Raphson μέθοδοι.

**Powerflow Αντικείμενα** Το powerflow module αποτελείται από πολλά αντικείμενα με το node και το link να έχουν πρωταρχικό ρόλο. Σχεδόν όλα τα αντικείμενα μέσα στο powerflow module προέρχονται από αυτά τα δύο αντικείμενα. Επομένως, οποιοσδήποτε ιδιότητες που ορίστηκαν για αυτά τα δύο αντικείμενα είναι επίσης διαθέσιμες σε οποιοδήποτε αντικείμενο που προέρχεται από αυτά. Για παράδειγμα, το αντικείμενο node έχει ως ιδιότητα την τάση, έτσι το αντικείμενο load που είναι παράγωγο του αντικειμένου node έχει αυτόματα αυτή την ιδιότητα, καθώς και αυτές που τι κάνουν να ξεχωρίζει από το αντικείμενο node. Στο



powerflow module εκτός των άλλων αντικειμένων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της τάσης και του ρεύματος υπάρχουν και αντικείμενα όπως ο meter και ο triplex meter που αποτελούν παράγωγα του αντικειμένου node με την διαφορά όμως ότι έχουν και τις δικές τους ιδιότητες. Κάποιες ιδιότητες από αυτές είναι ότι τα εν λόγω αντικείμενα αποτελούν σημείο μέτρησης είτε της ενέργειας είτε της ισχύος σε ένα συγκεκριμένο σημείο το συστήματος. Στην παρούσα διπλωματική εργασία τα αντικείμενα που θα χρησιμοποιηθούν από το powerflow module για την υλοποίηση της πλατφόρμας είναι τα node, load, overheadline, triplex\_line και triplex\_meter[21]. Περισσότερες λεπτομέρειες θα αναφερθούν στο κεφάλαιο του σχεδιασμού και υλοποίηση της πλατφόρμας (δες ενότητα 6).

#### 4.1.2 Market Υποσύστημα

Με οικονομικούς όρους, η ηλεκτρική ενέργεια (ισχύς και ενέργεια) είναι ένα αγαθό πώλησης και αγοράς και μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο διαπραγμάτευσης. Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας (market) μπορεί να θεωρηθεί ένα σύστημα για την πραγματοποίηση αγορών, μέσω προσφορών (bids). Οι προσφορές - πλειοδοσίες μπορεί να αποτελούν μέρος της ζήτησης ενέργειας αλλά και της πώλησης και ακολουθούν τους κανόνες της προσφοράς και της ζήτησης για τον καθορισμό της τιμής της αγοράς. Οι κανόνες αυτοί έχουν σχέση με την αύξηση της ποσότητας που αγοράζεται - πωλείται από τους καταναλωτές - παραγωγούς όταν μειώνεται - αυξάνεται η τιμή της ενέργειας. Οι συναλλαγές χονδρικής (αγοράς και πώλησης) στην ηλεκτρική ενέργεια συνήθως βρίσκονται στην αρμοδιότητα ενός διαχειριστή ή ενός ειδικού σκοπού φορέα, που είναι υπεύθυνος αποκλειστικά με την εν λόγω λειτουργία. Οι διαχειριστές της αγοράς δεν κάνουν συναλλαγές, αλλά πρέπει να είναι ενήμεροι για την κατάσταση της αγοράς, προκειμένου να διατηρήσουν την παραγωγή και την ζήτηση της ενέργειας σε μια ισορροπία. Τα εμπορεύματα μέσα σε μια αγορά γενικά είναι δύο ειδών: ισχύς και ενέργεια. Ισχύς είναι η δύναμη ανά πάσα στιγμή σε ένα σύστημα και μετράται σε (MW). Η ενέργεια είναι η ηλεκτρική ενέργεια που ρέει μέσα από ένα μετρητή για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και μετράται σε μεγαβατώρες (MWh).

#### Τύποι Αγοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας

Οι τύποι των αγορών περιλαμβάνουν την Αγορά της Ενέργειας (Energy Market), την Αγορά των Επιχειρηματικών Υπηρεσιών (Ancillary Services Market) και την Αγορά Δικαιωμάτων Μεταφοράς Ηλεκτρικής Ενέργειας (Transmission Market). Επίσης κατηγοριοποιούνται σε Προθεσμιακή Αγορά (Forward Market) και σε Αγορά Πραγματικού Χρόνου (Real-Time Market). Σημαντικό είναι το γεγονός ότι οι αγορές δεν είναι ανεξάρτητες, αλλά σχετίζονται μεταξύ τους. Από τις τέσσερις παραπάνω κατηγορίες θα ασχοληθούμε με τους 2 τελευταίους τύπους καθώς έχουν περισσότερα κοινά με τη δική μας αγορά.

**Προθεσμιακή Αγορά (Forward Market).** Στις περισσότερες αγορές ηλεκτρισμού, στην αγορά επόμενης μέρας (Day-ahead Market) πραγματοποιείται η κατανομή των πόρων για κάθε ώρα της επόμενης ημέρας. Οι συμμετέχοντες στην αγορά υποβάλλουν προσφορές για την παροχή και ζήτηση ενέργειας. Ο διαχειριστής της αγοράς αθροίζει τις προσφορές των

παραγωγών και των καταναλωτών και έτσι σχηματίζεται η καμπύλη προσφοράς και ζήτησης αντίστοιχα. Η τομή αυτών των δύο καμπυλών προσδιορίζει την οριακή τιμή και ποσότητα ενέργειας που μπορεί να αγοραστεί - πουληθεί σε ένα δίκτυο ενέργειας και λαμβάνοντας υπόψη τη συμφόρηση που μπορεί να υπάρχει στις γραμμές μεταφοράς υπολογίζεται το σημείο ισορροπίας. Η αγορά της επόμενης μέρας περιλαμβάνει μόνο οικονομικές και όχι φυσικές συναλλαγές μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών. Οι παραγωγοί πληρώνονται στην τιμή ισορροπίας που διαμορφώθηκε από την παραπάνω διαδικασία. Ταυτόχρονα, οι ίδιοι πρέπει να παράξουν την προκαθορισμένη ποσότητα ισχύος - ενέργειας, ή να αγοράσουν ισχύ-ενέργεια από την αγορά πραγματικού χρόνου ώστε να καλυφθεί η ποσότητα που είναι απαραίτητη για την κάλυψη των αναγκών της αγοράς. Κατ'αντιστοιχία με τους παραγωγούς, οι καταναλωτές πληρώνουν την ενέργεια που αγοράζουν στην τιμή ισορροπίας. Στην περίπτωση που η ποσότητα που αγοράζουν είναι μεγαλύτερη από κάποιο δεδομένο όριο έχουν επιπλέον χρέωση. Με άλλα λόγια για κάθε επιπλέον ενέργεια που αγοράζουν που είναι μεγαλύτερη από αυτή που αντιστοιχεί στο σημείο ισορροπίας πληρώνουν την επιπλέον ποσότητα στην τιμή ισορροπίας. Η αγορά επόμενης ώρας (hour-ahead forward market) είναι μια αγορά για διευθέτηση τυχόν παρεκκλίσεων από την αγορά επόμενης μέρας.

**Αγορά Πραγματικού Χρόνου (Real Time Market).** Για να διασφαλιστεί η αξιοπιστία των συστημάτων ηλεκτρικής ενέργειας, η παραγωγή όπως και η κατανάλωση ηλεκτρικής ισχύος - ενέργειας πρέπει να εξισορροπούνται σε πραγματικό χρόνο. Με άλλα λόγια η παραγωγή να ανταποκρίνεται στην ζήτηση και το αντίθετο. Είναι πολύ πιθανό, οι πραγματικές τιμές της παραγωγής και των φορτίων να διαφέρουν από τις τιμές που συναντώνται στην προθεσμιακή αγορά. Αυτό μπορεί να συμβεί λόγω αναπάντεχων διακοπών της ηλεκτροδότησης ή λόγω μεταβολών της πραγματικής από την προβλεπόμενη ζήτηση. Αυτή η μεταβολή στη ζήτηση έχει σαν αποτέλεσμα να διαφέρουν τα σημεία ισορροπίας που προέκυψαν στην αγορά επόμενης ημέρας από αυτά που προέκυψαν στην αγορά πραγματικού χρόνου. Επομένως, η αγορά πραγματικού χρόνου έχει σαν σκοπό την εξισορρόπηση της παραγωγής και της κατανάλωσης ισχύος - ενέργειας.

## Market Module

Το market module στο Gridlab-D χαρακτηρίζεται κυρίως από ένα σύστημα πλειοδοσιών (bidding) το οποίο οργανώνει την αγορά ενέργειας. Την επιφόρτιση οργάνωσης της αγοράς έχει το αντικείμενο auction. Ανήκει στο market module και δέχεται πλειοδοσίες από συσκευές που παρέχουν ή ζητούν ενέργεια ((sellers - buyers) αντίστοιχα). Με έννοιες που αναφέρθηκαν και παραπάνω (δες ενότητα 2) το αντικείμενο auction αποτελεί την κεντρική οντότητα της αγοράς. Όσον αφορά την λειτουργία της με το πέρασμα συγκεκριμένου χρόνου και αφού οι παραγωγοί και οι καταναλωτές κάνουν τις προσφορές τους θα υπολογιστεί η ποσότητα προσφοράς και ζήτησης, καθώς και η τιμή στην οποία θα πωλείται - αγοράζεται η συγκεκριμένη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας. Η τιμή που θα αποφασιστεί θα καταστεί ενεργή έπειτα από ένα προκαθορισμένο χρονικό διάστημα (latency interval). Πιο συγκεκριμένα, το αντικείμενο auction παρέχει σε διαφορετικά αντικείμενα του GridLAB-D τη βάση ώστε να



Σχήμα 4.1: Καμπύλες ζήτησης και προσφοράς

θέσουν την ενέργεια που προσφέρουν ή χρειάζονται - απαιτούν σε μία δυναμική ή πραγματικού χρόνου τιμή.

Λεπτομερέστερα, η τιμή και η ποσότητα ισορροπίας (clearing price, clearing quantity) είναι το σημείο τομής των καμπυλών προσφοράς και ζήτησης. Οι προσφορές των παραγωγών ταξινομούνται από την μικρότερη προς την μεγαλύτερη προσφορά, ενώ αυτές των καταναλωτών αντίστροφα (εικόνα 4.1). Υπάρχουν τρεις βασικές περιπτώσεις για την ερμηνεία του διαγράμματος οι οποίοι και θα παρουσιαστούν παρακάτω. Όλες οι υπόλοιπες περιπτώσεις είναι ειδικές περιπτώσεις αυτών, καθώς και άλλες δύο περιπτώσεις στις οποίες το σύστημα αποτυγχάνει να καθορίσει τιμές και ποσότητες ισορροπίας.

#### Παραδείγματα

##### Marginal seller

Στο συγκεκριμένο σενάριο το σημείο τομής των καμπυλών βρίσκεται στο όριο της ποσότητας για την οποία πλειοδοτεί ένας καταναλωτής, αλλά όχι στα όρια της ποσότητας που προσφέρει ένας παραγωγός. Στην περίπτωση αυτή η τιμή ισορροπίας είναι η τιμή στην οποία προσφέρει ο συγκεκριμένος παραγωγός, ενώ η ποσότητα ισορροπίας είναι το άθροισμα των ποσοτήτων των καταναλωτών που έχουν πλειοδοτήσει σε τιμή μεγαλύτερη από την τιμή ισορροπίας. Δηλαδή, εκείνοι οι καταναλωτές που βρίσκονται αριστερά του σημείου τομής.

**Marginal Buyer** Το δεύτερο σενάριο είναι ακριβώς το αντίστροφο του προηγούμενου. Το σημείο τομής βρίσκεται στο όριο της ποσότητας την οποία προσφέρει ένας παραγωγός, αλλά όχι στα όρια της ποσότητας για την οποία πλειοδοτεί ένας καταναλωτής. Στην περίπτωση αυτή, η τιμή ισορροπίας είναι η τιμή στην οποία πλειοδοτεί ο συγκεκριμένος καταναλωτής, ενώ η ποσότητα ισορροπίας είναι το άθροισμα των ποσοτήτων των παραγωγών οι οποίοι έχουν προσφέρει σε τιμή μικρότερη της τιμής ισορροπίας. Των παραγωγών δηλαδή που βρίσκονται αριστερά του σημείου τομής. Στην περίπτωση του σχήματος (4.3), σε αντίθεση με τις προηγούμενες περιπτώσεις, το σημείο τομής των καμπυλών βρίσκεται στο όριο τόσο της τιμής που προσφέρει ένας παραγωγός, όσο και στο όριο της τιμής για την οποία πλειοδοτεί ένας

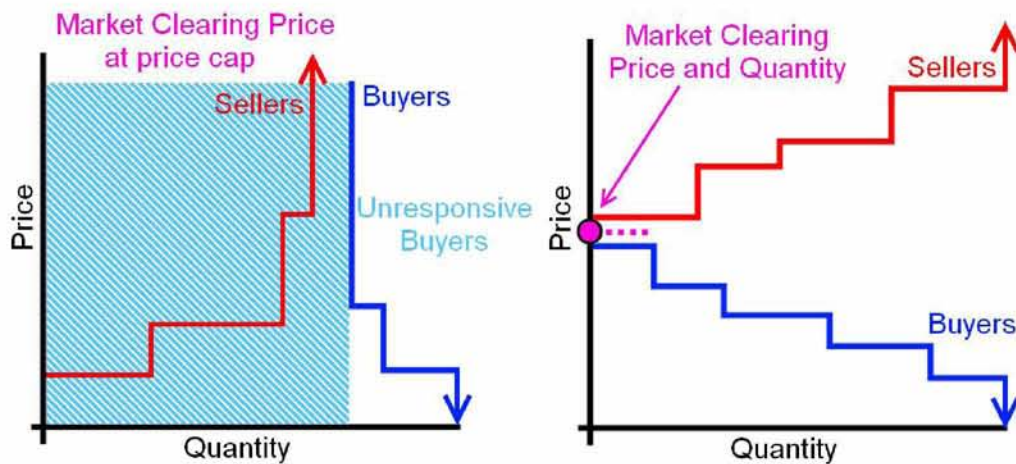


Σχήμα 4.2: Ικανοποίηση των παραγωγών που ζήτησαν ενέργεια με τιμή μεγαλύτερη (σχήμα στα αριστερά) και πρόσφεραν ενέργεια σε τιμή μικρότερη (σχήμα στα δεξιά) από την τιμή του σημείου ισορροπία της αγοράς

καταναλωτής. Στην περίπτωση αυτή, η ποσότητα ισορροπίας είναι ξεκάθαρα είτε αυτή την οποία προσφέρει ο παραγωγός, είτε αυτή για την οποία πλειοδοτεί ο καταναλωτής, ενώ η τιμή ισορροπίας είναι ο μέσος όρος των τιμών στις οποίες πλειοδοτούν ο παραγωγός και ο καταναλωτής. Τέλος υπάρχουν και περιπτώσεις (4.4) όπου το σύστημα αδυνατεί να καθορίσει το σημείο ισορροπίας. Στην περίπτωση αριστερά, κάτι τέτοιο μπορεί να συμβεί αν έχουμε ανεπαρκή προσφορά για να καλύψει τον καταναλωτή με την μέγιστη τιμή πλειοδοσίας, κι έτσι να μην προκύψει σημείο ισορροπίας. Στην δεύτερη περίπτωση τώρα οι παραγωγοί προσφέρουν πάντα σε τιμή μεγαλύτερη από αυτήν στην οποία οι καταναλωτές είναι διατεθειμένοι να αγοράσουν, οπότε και πάλι το σύστημα αποτυγχάνει να έρθει σε κατάσταση ισορροπίας [22].



Σχήμα 4.3: Πλήρη ικανοποίηση τόσο των παραγωγών όσο και των καταναλωτών που πρόσφεραν σε τιμή μικρότερη και μεγαλύτερη αντίστοιχα από την τιμή του σημείου ισορροπίας



Σχήμα 4.4: Μη Ικανοποίηση των καταναλωτών λόγω περιορισμένης προσφοράς ενέργειας (σχήμα στα αριστερά) και αυξημένης τιμής (σχήμα στα δεξιά) με αποτέλεσμα την αποτυχία εύρεσης σημείου ισορροπίας



## Κεφάλαιο 5

# Βελτιστοποίηση

Όπως αναφέρθηκε και στο τρίτο κεφάλαιο με στόχο την επέκταση της πλατφόρμας μας αλλά και της ικανοποίησης τόσο των παραγωγών όσο και των καταναλωτών με τον καλύτερο και πιο αποδοτικό τρόπο θα γίνει χρήση της θεωρίας παιγνίων. Έτσι, σε αυτό το κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με την επίλυση ενός προβλήματος βελτιστοποίησης που βασίζεται στην έννοια της θεωρίας παιγνίων και έχει ως στόχο την μεγιστοποίηση του συνολικού κέρδους των εργοστασίων παραγωγής και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας.

### 5.1 Εισαγωγή

Στην πρόσφατα αναπτυσσόμενη αγορά ηλεκτρικής ενέργειας οι αγοραστές και οι πωλητές μπορούν να ανταλλάσσουν ενέργεια μέσω πλειστηριασμών (auctions) ή μέσω αμφίδρομων συμφωνιών. Οι παραδοσιακές τεχνικές ελαχιστοποίησης του κόστους τείνουν πλέον να αντικατασταθούν από αποδοτικούς αλγόριθμους που βασίζονται στους πλειστηριασμούς. Στις μέρες μας, ο κύριος στόχος των επιχειρήσεων παροχής ηλεκτρικής ενέργειας είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους τους στα πλαίσια που αυτή καθορίζεται τόσο από τους ίδιους τους παραγωγούς όσο και από τους καταναλωτές οι οποίοι επιδρούν στην διαμόρφωση της τιμής της ενέργειας.

Η αγορά της ενέργειας είναι δύσκολο να λειτουργήσει ανταγωνιστικά λόγω του συνήθως μικρού αριθμού των παραγωγών. Από την άλλη μεριά οι περιορισμοί στο δίκτυο της ενέργειας επηρεάζουν την ανταγωνιστικότητα της αγοράς. Τέτοιοι περιορισμοί προκύπτουν τόσο από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του δικτύου όσο και από εποπτικούς οργανισμούς (π.χ. www.rae.gr) αλλά και με άλλους τρόπους. Στην εργασία αυτή θα επικεντρωθούμε στην συμφόρηση (δες ενότητα 2) που ενδεχομένως να παράγουν οι συμμετέχοντες στους πλειστηριασμούς της αγοράς ενέργειας η οποία συχνά μπορεί να οδηγήσει σε μια μεγάλη αύξηση των τιμών.

Με δεδομένα τα παραπάνω χαρακτηριστικά της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, ένας από τους πιο ενδεδειγμένους τρόπους [6] μεγιστοποίησης του κέρδους τόσο των επιχειρήσεων παροχής ενέργειας όσο και της ελαχιστοποίησης του κόστους των καταναλωτών είναι με χρήση μεθόδων Θεωρίας Παιγνίων (δες ενότητα 3). Πιο συγκεκριμένα, το παιχνίδι που θα «παίξουμε» θα αποτελείται από καταναλωτές και παραγωγούς. Στο τέλος του παιχνιδιού, κάθε παίκτης θα έχει επιλέξει και εκτελέσει την στρατηγική που του επιφέρει το μεγαλύτερο δυνατό

κέρδος. Με τον όρο **στρατηγική** ορίζουμε το σύνολο των κανόνων σχετικά με το, (α) ποιες είναι οι ενέργειες που μπορεί να εκτελέσει ο κάθε παίκτης στο παιχνίδι και (β) ποια ενέργεια πρέπει να ακολουθήσει ο παίκτης, έχοντας όμως υπόψη του και όλες τις ενέργειες του αντίπαλου παίκτη. Να σημειωθεί εδώ πως κάθε παίκτης ορίζει το κέρδος με διαφορετικό τρόπο. Με άλλα λόγια μπορεί ένας παίκτης να θεωρεί πως η στρατηγική  $x$  του αποφέρει μεγαλύτερο κέρδος από την στρατηγική  $y$  ενώ ένας άλλος παίκτης να πιστεύει το αντίθετο. Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε παίκτης βλέπει με διαφορετικό τρόπο τον «κόσμο» του παιχνιδιού. Ο συνδυασμός των στρατηγικών που επιλέχθηκαν από κάθε παίκτη, μας οδηγεί στην έννοια της ισορροπίας (equilibrium). Η ισορροπία στο παιχνίδι έρχεται όταν ο κάθε παίκτης επιλέξει εκείνη την στρατηγική που του αποφέρει κέρδος αντί ζημιά. Συγκεκριμένα, η εύρεση μιας τέτοιας ισορροπίας βασίζεται στις στρατηγικές των παικτών καθώς και των διάφορων περιορισμών που οι παίκτες πρέπει να λαμβάνουν υπόψη όταν επιλέγουν να εκτελέσουν μια συγκεκριμένη στρατηγική από το σύνολο των διαθέσιμων στρατηγικών που έχουν. Η ισορροπία αυτή ονομάζεται *coupled constraint equilibrium* και αποτελεί μια νέα μέθοδο επίλυσης προβλημάτων βασισμένη στη Θεωρία Παιγνίων.

Όσον αφορά τώρα τον τρόπο μοντελοποίησης μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να σημειωθεί πως το εύρος των πιθανών στρατηγικών τόσο των καταναλωτών όσο και των παραγωγών είναι περιορισμένο λόγω των συνθηκών/περιορισμών που πρέπει να ικανοποιούνται. Για παράδειγμα, η περιορισμένη χωρητικότητα των γραμμών σε ένα δίκτυο ενέργειας καθώς και οι νόμοι του Kirchoff αποτελούν κάποιες από τις συνθήκες/περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη από τους παίκτες του παιχνιδιού πριν επιλέξουν την στρατηγική που θα εκτελέσουν. Εν κατακλείδι, η ορθή λειτουργία μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται σε περιορισμούς οι οποίοι πρέπει να ικανοποιούνται από τους συμμετέχοντες στην αγορά.

## 5.2 Περιγραφή Προβλήματος

### 5.2.1 Ορισμοί και Έννοιες

Ας ξεκινήσουμε με μια μικρή εισαγωγή στα χαρακτηριστικά ενός παιχνιδιού. Μερικά από τα βασικά χαρακτηριστικά αυτά είναι το σύνολο των παικτών, το σύνολο των πιθανών ενεργειών κινήσεων που θα πραγματοποιήσουν οι παίκτες (δηλ. οι στρατηγικές τους), οι πληροφορίες που υπάρχουν κατά τη διάρκεια του παιχνιδιού, τα αποτελέσματα που μπορεί να αποκομίσει ο κάθε παίκτης για κάθε στρατηγική του, καθώς επίσης και οι προτιμήσεις των παικτών με βάσει τα ενδιάμεσα αποτελέσματα. Το αποτέλεσμα που μπορεί να αποκομίσει ο παίκτης, εξαρτάται από τις στρατηγικές που θα ακολουθήσει ο ίδιος αλλά και οι συμπαίκτες του καθώς και από τις αποδόσεις που μπορεί να λάβει. Η απόδοση (payoff), είναι η αριθμητική αποτίμηση των στόχων του παίκτη, η χρησιμότητα/κέρδος που θα αποκτήσει όταν το παιχνίδι θα έχει τελειώσει και θα έχει εκτελέσει την στρατηγική που επέλεξε. Προφανώς, το αποτέλεσμα εξαρτάται και από τους περιορισμούς που τίθενται στα πλαίσια του παιχνιδιού και οι οποίοι πρέπει να τηρούνται.

Στο δικό μας παιχνίδι ας υποθέσουμε πως υπάρχουν  $i = 1, \dots, n$  παίκτες. Κάθε παίκτης εκτελεί την στρατηγική που επιλέγει την οποία ας συμβολίζουμε με την μεταβλητή  $z_i$ . Όταν



όλοι οι παίχτες του παιχνιδιού δρουν μαζί τότε μπορούμε να πάρουμε το σύνολο των στρατηγικών, το οποίο συμβολίζουμε με  $\bar{z} = (z_1, \dots, z_n)$ . Ας θεωρήσουμε τώρα  $Z_i$  το σύνολο των ενεργειών που έχει επιλέξει ο παίκτης  $i$  καθ' όλη την διάρκεια του παιχνιδιού και έστω  $\bar{Z} = \bigcup_{i=1, \dots, n} Z_i$ . Επίσης, να αναφερθεί πως ο όρος  $w_i | \bar{z}$  σημαίνει πως ο  $i$ -στος παίκτης επιλέγει να εκτελέσει  $w_i$  ενώ όλοι οι υπόλοιποι  $z_j, j = 1, \dots, n, j \neq i$

Εν γένει το παιχνίδι μας, (όπως αναφέρθηκε και παραπάνω) εμπλέκει τόσο παραγωγούς όσο και καταναλωτές. Κυρίαρχο ρόλο όμως θα παίξουν οι παραγωγοί δηλαδή οι επιχειρήσεις παραγωγής και παροχής ενέργειας οι οποίοι θα τροφοδοτούν τους καταναλωτές με την ποσότητα ενέργειας που έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν. Ας κάνουμε την υπόθεση πως η προσφερόμενη ποσότητα ενέργειας είναι επαρκής για να ικανοποιήσει την συνολική ζήτηση σε ενέργεια των καταναλωτών. Συνεπώς, οι καταναλωτές θα έχουν δευτερεύον ρόλο στο παιχνίδι. Η συνεισφορά τους θα περιορίζεται στην τιμή μιας παραμέτρου της συνάρτησης ζήτησης που θα δούμε παρακάτω. Επομένως, οι παίχτες του παιχνιδιού μας θα είναι οι παραγωγοί. Δηλαδή, οι παραγωγοί θα είναι εκείνοι οι οποίοι θα εκτελούν τις στρατηγικές τους και για τους οποίους θα υπολογίζεται η απόδοση (payoff). Το payoff κάθε παραγωγού είναι το κέρδος που εξαρτάται τόσο από το κόστος παραγωγής της ποσότητας που προσφέρει ο ίδιος όσο και από την ζήτηση των καταναλωτών. Στο υπόλοιπο του κειμένου θα αναφερόμαστε στον όρο απόδοση του παραγωγού με τον όρο κέρδος / συνάρτηση κέρδους. Στην περίπτωση μας οι περιορισμοί που τίθενται είναι:

1. η μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να προσφέρει κάθε παραγωγός,
2. η ελάχιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να προσφέρει κάθε παραγωγός και
3. η μέγιστη ποσότητα ενέργειας που μπορεί να ζητήσουν οι καταναλωτές.

Η ζητούμενη λοιπόν ποσότητα της ενέργειας εξαρτάται άμεσα από την προσφερόμενη ποσότητα. Πιο συγκεκριμένα, στο παιχνίδι μας, ο κάθε παραγωγός θα προσφέρει την ποσότητα που παράγει έχοντας υπόψη το κόστος παραγωγής της προσφερόμενης ποσότητας αποσκοπώντας στην μεγιστοποίηση του κέρδους του. Ταυτόχρονα αξίζει να σημειωθεί πως το παιχνίδι εκτελείται σε διαδοχικά στάδια (γύρους) όπου σε κάθε στάδιο ο κάθε παίκτης επιλέγει να εκτελέσει μια διαφορετική στρατηγική από το σύνολο των στρατηγικών του. Τέλος το παιχνίδι τερματίζει όταν οι παίχτες δεν μπορούν να βελτιώσουν άλλο το κέρδος τους.

Η ζήτηση των καταναλωτών είναι μια γραμμική συνάρτηση. Η συνάρτηση αυτή βασίζεται σε αρχικές συνθήκες (την αρχική ποσότητα ζήτησης) και σε κάποιες άλλες παραμέτρους (π.χ. η ελαστικότητα ζήτησης) που θα δούμε παρακάτω.

Η αρχική ποσότητα ενέργειας μπορεί να προκύψει με πολλούς τρόπους. Ενδιαφέρον έχει για την μελέτη μας η περίπτωση όπου η αρχική ποσότητα ενέργειας προέρχεται από μια διαδικασία πλειστηριασμού. Με τον όρο πλειστηριασμό στον τομέα της ενέργειας εννοούμε εκείνη τη διαδικασία κατά την οποία τόσο οι παραγωγοί όσο και οι καταναλωτές κάνουν προσφορές για την τιμή και την ποσότητα της ενέργειας που μπορούν να προσφέρουν και να ζητήσουν αντίστοιχα (δες ενότητα 4). Συνεπώς, η ποσότητα που αποφασίζεται μετά το

πέρασ ενός κατάλληλα διαμορφωμένου (περίοδος προσφορών, αριθμός συμμετεχόντων κ.τ.λ) πλειστηριασμού αποτελεί την αρχική ποσότητα ζήτησης.

Για τον τερματισμό του παιχνιδιού μας όπου οι παίκτες θα έχουν μεγιστοποιήσει το κέρδος τους, είναι απαραίτητη η εύρεση ενός σημείου ισορροπίας κατά Νας (Nash equilibrium), όπου κάθε παίκτης προσπαθεί να ακολουθήσει μια στρατηγική η οποία μεγιστοποιεί το κέρδος του δεδομένων των στρατηγικών που ακολουθούν οι συμπαίκτες του οι οποίοι βεβαίως έχουν ακριβώς τον ίδιο στόχο. Στο τομέα της ενέργειας και πιο συγκεκριμένα στην λειτουργία μιας αγοράς υπάρχουν δυο είδη ισορροπιών κατά Νας, η Κουρνό και η Μπερνάρντ. Η μεταξύ τους διαφορά είναι ότι η πρώτη βασίζεται στην ποσότητα της ενέργειας για την εύρεση της ισορροπίας ενώ η δεύτερη στην τιμή της ενέργειας. Στην παρούσα εργασία, θα γίνει χρήση της ισορροπίας κατά Νας - Κουρνό (θα χρησιμοποιείται μόνο το Νας για συντομία) για το λόγο ότι η στρατηγική που επιλέγει κάθε παίκτης είναι αυτή που δίνει στον παίκτη το μεγαλύτερο κέρδος βασιζόμενο στην ποσότητα ενέργειας και όχι στην τιμή της ενέργειας (ισορροπία κατά Νας - Μπερνάρντ). Η χρήση και των δύο μοντέλων έχει ως στόχο την μοντελοποίηση του ανταγωνισμού μεταξύ επιχειρήσεων που πραγματεύονται το ίδιο προϊόν. Στο μοντέλο Κουρνό κάθε εταιρία επιλέγει την ποσότητα που θα παράγει - η τιμή καθορίζεται από την ζήτηση και την σχέση με την συνολική ποσότητα παραγωγής. Στην περίπτωση τώρα του Μπερνάρντ κάθε εταιρία επιλέγει μια τιμή για το προϊόν που παράγει ώστε να ικανοποιήσει την ζήτηση γνωρίζοντας φυσικά τις τιμές στις οποίες παράγουν οι υπόλοιπες εταιρίες.

Όσον αφορά το μοντέλο Μπερνάρντ [16], η ζήτηση δίνεται μέσω της συνάρτησης ζήτησης. Η συνάρτηση ζήτησης επιστρέφει την ποσότητα η οποία μπορεί να αγοραστεί με δεδομένη την τιμή του προϊόντος. Υποθέτοντας πως οι εταιρίες έχουν διαφορετικές τιμές τότε όλοι οι καταναλωτές θα στραφούν στην αγορά του προϊόντος από την εταιρία με την χαμηλότερη τιμή η οποία παράγει τόση ποσότητα του προϊόντος ώστε να ικανοποιείται η ζήτηση. Η τιμή πώλησης [12] του προϊόντος των άλλων παραγωγών που συμμετέχουν στο παιχνίδι είναι γνωστή. Αρχικά, όλοι οι παραγωγοί έχουν το ίδιο οριακό κόστος παραγωγής ενέργειας. Αν κάποιος παραγωγός θέσουν την τιμή προσφοράς της ενέργειας τους ίση με το οριακό κόστος, ενώ κάποιος άλλος αυξάνουν την τιμή τους πάνω από το οριακό κόστος, τότε δεν θα έχουν κάποιο κέρδος, αφού όλοι οι καταναλωτές θα αγοράσουν από τους «φθηνούς» παραγωγούς. Αν τώρα όλοι οι παραγωγοί έχουν την ίδια τιμή πάνω από το κόστος ανά μονάδα και μοιράζονται την αγορά, τότε κάθε παραγωγός έχει κίνητρο να μειώσει την τιμή της ενέργειας τους και έτσι να έχει αυτός το μεγαλύτερο κέρδος. Άρα, και σε αυτή την περίπτωση κάθε παραγωγός αποφασίζει την κάθε του κίνηση με βάση την κίνηση των υπολοίπων. Τέλος, οι παραγωγοί μπορούν να επιλέξουν τιμή ίση με το οριακό κόστος και έτσι κανείς δεν θα έχει κίνητρο να μειώσει την τιμή γιατί έτσι θα βγαίνει ζημιωμένος. Έτσι η ισορροπία κατά Νας - Μπερνάρντ επέρχεται όταν όλοι οι παραγωγοί προσφέρουν την ενέργεια που παράγουν στην τιμή του οριακού κόστους. Για το μοντέλο Κουρνό περισσότερες πληροφορίες θα αναφερθούν παρακάτω.

Κανένα μοντέλο δεν είναι καλύτερο από το άλλο. Η ακρίβεια των προβλέψεων του κάθε μοντέλου διαφέρει από κλάδο σε κλάδο, ανάλογα με την εγγύτητα του κάθε μοντέλου καθώς και τον σκοπό. Εάν η χωρητικότητα μιας γραμμής στο δίκτυο μπορεί εύκολα να αλλάξει, η

εύρεση της ισορροπίας Νας - Μπερνάρντ είναι γενικά ένα καλύτερο μοντέλο. Αν η ικανότητα παραγωγής είναι δύσκολο να προσαρμοστεί, τότε η εύρεση της ισορροπίας Νας - Κουρνό είναι γενικά ένα καλύτερο μοντέλο.

Η ισορροπία κατά Νας ανήκει στην ευρύτερη κατηγορία των coupled constrained ισορροπιών. Φυσικά, σε κάθε περίπτωση οι παίχτες θα πρέπει να ικανοποιούν τους περιορισμούς του παιχνιδιού. Πιο συγκεκριμένα, αν συμβολίσουμε [6] με  $F_i(\bar{z})$  το κέρδος του  $i$ -στου παίκτη τότε το  $\bar{z}^*$  θεωρείται το σημείο της ισορροπίας κατά Νας αν για κάθε παίκτη ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$F_i(\bar{z}^*) = \max_{z_i | \bar{z} \in \bar{Z}} F_i(z_i | \bar{z}), \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5.1)$$

όπου  $\bar{z}^*$  είναι το σύνολο των στρατηγικών των παιχτών που μεγιστοποιεί το κέρδος του καθενός, επομένως και το συνολικό. Με άλλα λόγια κάθε παίκτης επιλέγει να εκτελέσει την στρατηγική  $z_i$  η οποία του δίνει το μεγαλύτερο δυνατό κέρδος. Έτσι, εκτελώντας ο κάθε παίκτης το δικό του  $z_i$  παίρνουμε το σύνολο  $\bar{z}^*$  που μπορεί να εκφραστεί ως εξής:  $\bigcup_{i=1, \dots, n} z_i$  με  $z_i$  να είναι εκείνη η στρατηγική που μεγιστοποιεί το κέρδος του κάθε παίκτη. Ο ορισμός της συνάρτησης  $F_i(y)$  όπου το  $y$  θα είναι η ενέργεια του κάθε παίκτη ξεχωριστά θα γίνει παρακάτω που θα μιλήσουμε και για την συνάρτηση ζήτησης.

Στόχος μας είναι να βρούμε τις στρατηγικές εκείνες που πρέπει να ακολουθήσουν οι παίχτες για να αποκομίσουν το μεγαλύτερο δυνατό κέρδος. Γι αυτό θα χρησιμοποιήσουμε την συνάρτηση Nikaido-Isoda [6] η οποία μετατρέπει μια ισορροπία κατά Νας σε ένα πρόβλημα βελτιστοποίησης. Έτσι, προχωρώντας παρακάτω θα ασχοληθούμε με πιο συστηματικό τρόπο με τα δεδομένα και τα ζητούμενα του προβλήματος μας. Ξεκινώντας ας ορίσουμε την έννοια της **ελαστικότητας της ζήτησης** μιας και αυτή αποτελεί βασικό παράγοντα της συνάρτησης ζήτησης.

Η ζήτηση σε ορισμένα αγαθά και υπηρεσίες είναι πιο ευαίσθητη στις μεταβολές της τιμής ενώ σε άλλα είναι λιγότερο ευαίσθητη. Αυτός ο βαθμός της ευαισθησίας, της ζητούμενης ποσότητας ενός αγαθού, στις μεταβολές της τιμής ονομάζεται ελαστικότητα ζήτησης. Η ελαστικότητα της ζήτησης ενός αγαθού δίνεται από την σχέση (5.2) που δεν είναι άλλος παρά ο λόγος της ποσοστιαίας % μεταβολής της ζητούμενης ποσότητας προς την ποσοστιαία % μεταβολή της τιμής.

Όταν η ελαστικότητα αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο σημείο της καμπύλης της συνάρτησης ζήτησης τότε

$$\lambda = \frac{\% \Delta q}{\% \Delta p} = \frac{\Delta q}{\Delta p} * \frac{p}{q} \quad (5.2)$$

όπου  $\Delta q$  η μεταβολή της ποσότητας,  $\Delta p$  η μεταβολή της τιμής και  $p, q$  αρχικές ποσότητες.

Το πρόσημο της ελαστικότητας ζήτησης είναι αρνητικό εφόσον η συνάρτηση ζήτησης έχει αρνητική κλίση. Στην πράξη όμως συνηθίζεται να παραλείπεται. Επιπρόσθετα,

- Όταν  $\lambda > 1$  τότε η ζήτηση είναι ελαστική και σε αυτή την περίπτωση μια ποσοστιαία αύξηση ή μείωση της τιμής προκαλεί μεγαλύτερη ποσοστιαία μείωση ή αύξηση αντίστοιχα της ζητούμενης ποσότητας.

- Όταν  $0 < \lambda < 1$  τότε η ζήτηση είναι ανελαστική και σε αυτή την περίπτωση μια ποσοστιαία αύξηση ή μείωση της τιμής προκαλεί συγκριτικά μικρότερη ποσοστιαία μείωση ή αύξηση αντίστοιχα της ζητούμενης ποσότητας.
- Όταν  $\lambda = 1$  τότε η ζήτηση έχει μοναδιαία ελαστικότητα και σε αυτή την περίπτωση μια ποσοστιαία αύξηση ή μείωση της τιμής προκαλεί ισόποση ποσοστιαία μείωση ή αύξηση αντίστοιχα της ζητούμενης ποσότητας.

Γενικότερα η ελαστικότητα ζήτησης ενός αγαθού εξαρτάται, σε μεγάλο βαθμό, από το πόσο στενά υποκατάστατα έχει. Για παράδειγμα, αν η τιμή του πετρελαίου μειωθεί επειδή οι καταναλωτές δεν προτιμούν το πετρέλαιο θα στραφεί στην κατανάλωση φυσικού αερίου. Άρα, η ζήτηση για το πετρέλαιο είναι ελαστική αφού είναι τέλει υποκατάστατο του φυσικού αερίου.

Ας θεωρήσουμε τώρα πως στο πρόβλημα - παιχνίδι μας υπάρχουν  $n$  παραγωγοί που προσφέρουν ποσότητα  $q_i, i = 1, \dots, n$  ο καθένας την οποία τροφοδοτούν στους  $m$  καταναλωτές.

Ως **δεδομένα** για την εύρεση της ισορροπίας κατά Ναϋ (- Κουρνό) έχουμε

- το κόστος παραγωγής της ενέργειας για την  $i$ -στη επιχείρηση παραγωγής και παροχής ενέργειας το οποίο είναι

$$C_i(q_i) = c_i * q_i \quad (5.3)$$

όπου  $q_i$  η ποσότητα που προσφέρεται και  $c_i$  το κόστος παραγωγής μιας μονάδας ενέργειας της  $i$ -στης επιχείρησης.

- και την αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης της ενέργειας η οποία είναι

$$p(d) = \frac{d_0}{\lambda} - \frac{d}{\lambda} \quad (5.4)$$

όπου  $d_0$  είναι μια αρχική εκτιμώμενη ποσότητα της ζήτησης,  $\lambda \in \mathbb{R}$  με  $\lambda \in (0, \infty)$  είναι η ελαστικότητα της ζήτησης όπως αυτή ορίστηκε παραπάνω και  $d$  η συνολική ζήτηση των καταναλωτών. Η  $d_0$  μπορεί να προέρχεται είτε από ιστορικά δεδομένα είτε από την τιμή της ποσότητας που αποφασίστηκε μετά το πέρας του πλειστηριασμού.

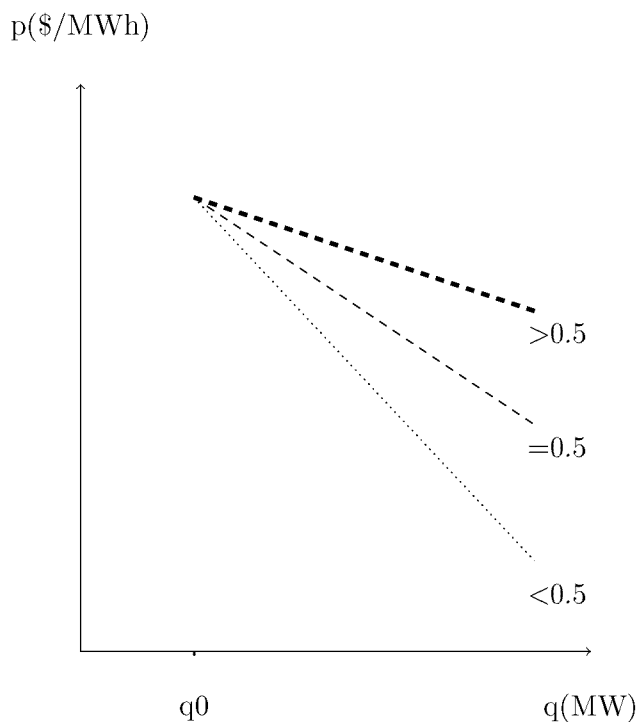
Να σημειωθεί εδώ πως υπάρχουν πολλές συναρτήσεις που μπορούν να αναπαραστήσουν το κόστος μιας επιχείρησης. Κάποιες από αυτές τις συναρτήσεις φαίνονται παρακάτω:

$$C_i(q_i) = a + b * q_i + c * q_i^2 \quad (5.5)$$

$$C_i(q_i) = a + b * q_i + c * q_i^2 + d * \sin^2(e(q_i - q_i')) \quad (5.6)$$

$$C_i(q_i) = a + b * q_i + c * q_i^2 + \sin(e(q_i - q_i')) \quad (5.7)$$

Οι παράμετροι  $a, b, c, d, e, q_i'$  είναι γνωστές και εξαρτώνται από τα χαρακτηριστικά του εργοστασίου παραγωγής ενέργειας. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιηθεί ο γραμμικός τύπος.



Σχήμα 5.1: Αλλαγές στην τιμή προκαλούν αλλαγές στην ελαστικότητα της ζήτησης

Στο σχήμα (5.1) παρουσιάζεται ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η ζήτηση συναρτήσει της τιμής της ενέργειας όταν η ελαστικότητα παίρνει τιμές  $>$ ,  $<$  και  $=$  με 0.5. Παρατηρείται πως όταν η ελαστικότητα της ζήτησης αυξάνεται (δηλαδή η κλίση της ευθείας αυξάνεται), αυξάνεται και η ζήτηση σε ενέργεια. Αυτό συμβαίνει επειδή όταν η τιμή της ενέργειας μειώνεται, που σημαίνει ότι περισσότεροι καταναλωτές θα αγοράσουν ενέργεια, η ελαστικότητα της ζήτησης αυξάνεται ούτως ώστε ο λόγος των μεταβολών της ενέργειας προς την τιμή να παραμένει σταθερός.

Έτσι με βάση τα παραπάνω και χρησιμοποιώντας τις σχέσεις (5.4) και (5.3) μπορούμε να καταλήξουμε στην παρακάτω συνάρτηση κέρδους για την  $i$ -στη επιχείρηση. Δηλ.,

$$F_i(q_i) = p(d) * q_i - C_i(q_i), \quad \forall i = 1, \dots, n \quad (5.8)$$

όπου  $d$  είναι η συνολική ποσότητα που μπορούν να δώσουν οι επιχειρήσεις παραγωγής και παροχής ηλεκτρικής ενέργειας (η οποία όπως υποθέσαμε ισούται με την ζήτηση) και  $q_i$  η ποσότητα που μπορεί να προσφέρει η  $i$ -στη επιχείρηση. Έχουμε βεβαίως  $d \leq \sum_{i=1}^n q_i$ . Επίσης να σημειωθεί εδώ πως η ποσότητα  $q_i$  δεν είναι η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να προσφερθεί από την  $i$ -στη επιχείρηση. Η μέγιστη ποσότητα που μπορεί να παράγει άρα και να προσφέρει η  $i$ -στη επιχείρηση θα συμβολίζεται με  $r_i$ .

Με σκοπό την εύρεση της καλύτερης δυνατής στρατηγικής για κάθε παίκτη και χρησιμοποιώντας την συνάρτηση Nikaido-Isoda και τις σχέσεις (5.4), (5.1) καταλήγουμε στην

παρακάτω σχέση (5.9):

$$K(\bar{q}, \bar{q}') = \sum_{(i=1)}^n [F_i(q'_i | \bar{q}) - F_i(\bar{q})] \quad (5.9)$$

η οποία δίνει το συνολικό κέρδος των επιχειρήσεων παραγωγής και παροχής ενέργειας όταν σε κάθε ένα από τα στάδια του παιχνιδιού η κάθε επιχείρηση  $i$  επιλέγει να εκτελέσει την στρατηγική  $q'_i$  αντί της  $q_i$  η οποία ανήκει στο σύνολο  $\bar{q}$ . Να σημειωθεί εδώ, πως η στρατηγική  $q'_i$  που επιλέγεται σε κάθε στάδιο είναι καλύτερη από αυτή του προηγούμενου σταδίου καθώς πηγαίνουμε από το ένα στάδιο στο άλλο. Η στρατηγική  $q'_i$  ανήκει στο σύνολο  $\bar{q}'$  που αποτελεί το σύνολο των ενεργειών των παικτών το οποίο δίνει σε κάθε παίκτη το μεγαλύτερο δυνατό κέρδος. Με άλλα λόγια η τιμή αυτής της συνάρτησης θα υπολογίζεται σε κάθε στάδιο στο οποίο κάθε παίκτης θα επιλέγει διαφορετική στρατηγική. Να σημειωθεί πως η τιμή της παραπάνω συνάρτησης Nikaido-Isoda μπορεί να είναι είτε θετική είτε αρνητική. Στην πρώτη περίπτωση σημαίνει πως οι παίκτες μπορούν να βελτιώσουν τις ενέργειες τους και να εκτελέσουν ο καθένας από μια ενέργεια που μεγιστοποιεί την συνάρτηση κέρδους τους. Ταυτόχρονα, στην περίπτωση που το αποτέλεσμα είναι αρνητικό σημαίνει πως η τρέχουσα στρατηγική δεν είναι καλύτερη από την προηγούμενη που είχε επιλέξει ο κάθε παίκτης να κάνει. Οι στρατηγικές που δίνουν στους παίκτες την καλύτερη δυνατή τιμή στην συνάρτηση κέρδους τους αποτελούν μέρος της ισορροπίας κατά Nash. Εν κατακλείδι, όταν η Nikaido-Isoda ικανοποιεί τις συνθήκες του προβλήματος και δεν μπορεί να δίνει θετικά αποτελέσματα δηλαδή η τιμή της συνάρτησης να είναι μικρότερη ή ίση με μηδέν, δηλαδή το  $q'_i$  για τον  $i$  παίκτη στο τρέχον στάδιο δίνει λιγότερο κέρδος από το  $q_i$  στο προηγούμενο στάδιο, τότε το παιχνίδι μας βρίσκεται στην ισορροπία κατά Nash. Αυτό που μένει τώρα να υπολογίσουμε όμως είναι αυτή καθ' αυτή την στρατηγική που μεγιστοποιεί το κέρδος του κάθε παίκτη ξεχωριστά. Αυτό επιτυγχάνεται παίρνοντας το  $\arg \max$  για την σχέση (5.9).

Πιο αναλυτικά, κάθε συνιστώσα της Nikaido-Isoda συνάρτησης αντιπροσωπεύει την βελτίωση στην συνάρτηση κέρδους κάθε παίκτη όταν ο ίδιος αλλάζει την στρατηγική που θα εκτελέσει την τρέχουσα στιγμή (δηλαδή το τρέχον στάδιο) ενώ οι υπόλοιποι συνεχίζουν να «παίζουν» εκτελώντας την στρατηγική της προηγούμενης χρονικής στιγμής. Δηλαδή, ένας παίκτης αλλάζει την στρατηγική που θα εκτελέσει ενώ οι υπόλοιποι όχι. Εδώ γίνεται αναφορά στον χρόνο μιας και το παιχνίδι εκτελείται σε διαδοχικά στάδια όπου ο κάθε παίκτης εκτελεί διαφορετική στρατηγική αλλά και επειδή το GridLAB-D, που χρησιμοποιείται στην προσομοίωση του μοντέλου μας, προσομοιώνει τα μοντέλα του στο χρόνο. Να σημειωθεί όμως εδώ πως ο χρόνος του παιχνιδιού δεν ταυτίζεται με τον χρόνο προσομοίωσης των μοντέλων στο Gridlab-D.

Εν τέλει, η συνάρτηση που δίνει την στρατηγική κάθε παίκτη η οποία μεγιστοποιεί το κέρδος του ξεχωριστά είναι η παρακάτω

$$M(\bar{q}) = \arg \max_{\bar{q}' \in Q} K(\bar{q}, \bar{q}') \Leftrightarrow \bar{q}, M(\bar{q}) \in Q. \quad (5.10)$$

Σύμφωνα με [2], [6] η σχέση (5.10) δίνει την στρατηγική  $q'_i$  κάθε παίκτη. Η  $\bigcup_{i=1, \dots, n} q'_i$  όλων αυτών των στρατηγικών αποτελεί την ισορροπία κατά Nash του προβλήματος. Για να

υπολογίσουμε τώρα αυτή την στρατηγική για τον  $i$  παίκτη αρκεί να παραγωγίσουμε την σχέση (5.9) ως προς την μεταβλητή  $q_i'$  και να θέσουμε το αποτέλεσμα της παραγώγου ίσο με το μηδέν, για το λόγο πως όταν η τιμή της σχέσης (5.9) είναι μηδέν τότε το παιχνίδι βρίσκεται στην ισορροπία κατά Νας. Έτσι, σύμφωνα με την σχέση (5.10) αν κάθε παίκτης επιλέξει σε κάθε στάδιο του παιχνιδιού  $M(\bar{q})$  αντί για  $\bar{q}$  το παιχνίδι φθάνει στην ισορροπία κατά Νας. Για τον υπολογισμό τώρα της ισορροπίας κατά Νας, πρέπει να σημειωθεί πως η στρατηγική κάθε παίκτη εξαρτάται από τις στρατηγικές των υπολοίπων. Με άλλα λόγια για την εύρεση της ισορροπίας κατά Νας αρκεί να λύσουμε ένα σύστημα εξισώσεων. Για την εύρεση αυτού του συστήματος των εξισώσεων ας ξεκινήσουμε με ένα μικρό παράδειγμα. Έστω πως έχουμε δύο παραγωγούς και η ζήτηση των καταναλωτών είναι το άθροισμα της προσφοράς ενέργειας των 2 παραγωγών (αυτή η παραδοχή θα χρησιμοποιηθεί και στην συνέχεια), δηλαδή  $q_1 + q_2$ . Επομένως η σχέση (5.9) γίνεται ως εξής :

$$K(\bar{q}, \bar{q}') = \left[ \frac{d_0}{\lambda} - \frac{1}{\lambda}(q_1' + q_2) \right] q_1' - c_1 q_1' - \left[ \frac{d_0}{\lambda} - \frac{1}{\lambda}(q_1 + q_2) \right] q_1 - c_1 q_1 \\ + \left[ \frac{d_0}{\lambda} - \frac{1}{\lambda}(q_1 + q_2') \right] q_2' - c_2 q_2' - \left[ \frac{d_0}{\lambda} - \frac{1}{\lambda}(q_1 + q_2) \right] q_2 - c_2 q_2 \quad (5.11)$$

Παραγωγίζοντας την παραπάνω σχέση ως προς  $q_1'$  και  $q_2'$  η σχέση 5.10 γίνεται

$$M(\bar{q}) = \frac{d_0}{2}(1, 1) - \lambda(c_1, c_2) - \frac{1}{2}(q_2, q_1) \quad (5.12)$$

Όταν η τιμή της παραπάνω συνάρτησης γίνει μηδέν όπως αναφέρθηκε και παραπάνω το παιχνίδι έχει φθάσει στην ισορροπία κατά Νας. Έτσι, θέτοντας την παραπάνω σχέση ίση με το μηδέν και πολλαπλασιάζοντας με το 2 παίρνουμε το παρακάτω σύστημα εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \end{bmatrix} = \frac{d_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \end{bmatrix}$$

Από το παραπάνω σύστημα βλέπουμε πως η στρατηγική του ενός παίκτη εξαρτάται από τις στρατηγικές των υπολοίπων. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση που συμμετέχουν στο παιχνίδι παραπάνω από 2 παίκτες. Έτσι, η λύση του παραπάνω συστήματος γραμμικών εξισώσεων αποτελεί το σημείο της ισορροπίας κατά Νας. Η λύση για την παραπάνω περίπτωση είναι  $q_i = \frac{d_0 - \lambda * c_i}{3}$ .

Για τον υπολογισμό όμως της βέλτιστης ενέργειας κάθε παίκτη λογικό θα ήταν να γίνει χρήση μιας επαναληπτικής μεθόδου επίλυσης προβλημάτων βελτιστοποίησης κάνοντας χρήση της προηγούμενης στρατηγικής με σκοπό την χρήση της βελτίωσης στην συνάρτηση κέρδους του κάθε παίκτη όταν επιλέγει διαφορετική ενέργεια από αυτή που επέλεγε στο παρελθόν. Η βελτίωση στην συνάρτηση κέρδους μπορεί να χρησιμοποιηθεί έτσι ώστε να βρεθεί τελικά ποια είναι η καλύτερη στρατηγική. Πως γίνεται αυτό ; Όταν η διαφορά των τιμών της συνάρτησης κέρδους μεταξύ της νέας στρατηγικής και της παλιάς είναι αρνητική σηματοδοτείται πως έχει βρεθεί η καλύτερη στρατηγική.

Η υλοποίηση μιας επαναληπτικής μεθόδου μπορεί να πραγματοποιηθεί με δύο τρόπους είτε με την επίλυση γραμμικού συστήματος [2] παρόμοιο με αυτό που αναφέρθηκε παραπάνω

είτε με την χρήση κατάλληλου αλγορίθμου [6]. Και οι δύο μέθοδοι κάνουν χρήση της ίδιας συνάρτησης κέρδους. Αρχικά θα προσπαθήσουμε να υλοποιήσουμε την επαναληπτική μέθοδο κάνοντας χρήση του πρώτου τρόπου. Ας υποθέσουμε πως το διάνυσμα  $\underline{x}$  έχει ως συνιστώσες τις βέλτιστες στρατηγικές των παιχτών. Για την εύρεση λοιπόν του διανύσματος  $\underline{x}$  αρκεί να λύσουμε το γραμμικό σύστημα που βλέπουμε παρακάτω:

$$A\underline{x} = \underline{b} \quad (5.13)$$

όπου  $A$  είναι ένας πίνακας  $n \times n$  και το  $\underline{b}$  ένα διάνυσμα  $n$  συνιστωσών.

Για  $n$  συμμετέχοντες στο παιχνίδι το σύστημα, η λύση του οποίου μας δίνει το σημείο ισορροπίας κατά Ναϋ, έχει την παρακάτω μορφή:

$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \end{bmatrix} = d_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

Η λύση του παραπάνω συστήματος για κάθε  $i$  σύμφωνα με το [2] είναι η εξής:

$$q_i = \frac{d_0 - n * \lambda * (c_i) + \lambda * \sum_{k=i, k \neq i}^n c_k}{(n + 1)} \quad (5.15)$$

Στο σημείο αυτό θα μπορούσαμε στο πρόβλημα μας να θέσουμε και κάποιους περιορισμούς. Στο κεφάλαιο (6) θα γίνει λόγος πως αν το τοπικό εργοστάσιο δεν ικανοποιεί μια πόλη στοχεύει στο να αγοράζει ενέργεια από τις γειτονικές της πόλεις. Έτσι στο πρόβλημα μας αν η ζήτηση των καταναλωτών δεν ικανοποιείται από τον κάθε παραγωγό στον οποίο ανήκει τότε καταφεύγει στους άλλους παραγωγούς. Κάθε παραγωγός μπορεί να προσφέρει ποσότητα μέχρι  $q_{max}$  και κάθε καταναλωτής να ζητήσει ποσότητα μέχρι  $d_i$ . Άρα το κόστος του  $k$ -οστού καταναλωτή - πόλη για να προμηθευτεί ποσότητα ενέργειας από τις γειτονικές πόλεις όταν  $d_i > q_{max}$  είναι  $\sum_{i=1, i \neq k}^n (q_{max} - d_i) C_{others_i} \leq c(d_k)$



$$\begin{bmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 & 0 & q_{max} - d_2 & \dots & q_{max} - d_n \\ 1 & 2 & \dots & 1 & q_{max} - d_1 & 0 & \dots & q_{max} - d_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & 1 & \dots & 2 & q_{max} - d_1 & q_{max} - d_2 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_n \\ Cothers_1 \\ Cothers_2 \\ \vdots \\ Cothers_n \end{bmatrix} = d_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ \vdots \\ 1 \\ c(d_1) \\ c(d_2) \\ \vdots \\ c(d_n) \end{bmatrix} - \lambda \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \vdots \\ c_n \\ c(d_1) \\ c(d_2) \\ \vdots \\ c(d_n) \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

### Επαναληπτική Μέθοδος με χρήση γραμμικού συστήματος

Ξεκινώντας, με την επίλυση γραμμικού συστήματος για την επαναληπτική μέθοδο ως θεωρήσουμε πως ο πίνακας  $A$  αποτελεί την διαφορά 2 άλλων πινάκων  $M$  και  $N$ , δηλαδή

$$A = M - N \quad (5.17)$$

Οι πίνακες  $M$  και  $N$  φαίνονται παρακάτω:

$$M = \begin{bmatrix} 2 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 2 \end{bmatrix} \quad N = \begin{bmatrix} 0 & -1 & \dots & -1 \\ -1 & 0 & \dots & -1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -1 & -1 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Κάνοντας αντικατάσταση την σχέση (5.17) στη σχέση (5.13) παίρνουμε το παρακάτω σύστημα:

$$M\underline{x} = N\underline{x} + \underline{b} \quad (5.18)$$

Ταυτόχρονα, πολλαπλασιάζοντας την σχέση (5.18) με τον αντίστροφο του  $M$  (αν υπάρχει) και θέτοντας  $B = M^{-1}N$  παίρνουμε την παρακάτω σχέση:

$$\underline{x}^{(k+1)} = B\underline{x}^{(k)} + M^{-1}\underline{b} \quad \forall k = 0, \dots \quad (5.19)$$

Στην παραπάνω σχέση (5.19) εισάγουμε την έννοια της επανάληψης κάνοντας χρήση της τιμής  $\underline{x}^{(k)}$  που είχε το  $\underline{x}$  την χρονική στιγμή  $k$  με σκοπό την εύρεση της τιμής  $\underline{x}^{(k+1)}$  του  $\underline{x}$  την χρονική στιγμή  $k + 1$ .

$$\underline{x}^{(k+1)} = B^{(k+1)}\underline{x}^{(0)} + \underline{c} \quad \forall k = 0, \dots \quad (5.20)$$

Ταυτόχρονα, με σκοπό την εύρεση του σημείου στο οποίο η επαναληπτική μέθοδος τερματίζει / συγκλίνει θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την έννοια της νόρμας. Η σύγκλιση της επαναληπτικής μεθόδου επέρχεται με την ικανοποίηση δεδομένων περιορισμών. Τέτοιοι περιορισμοί είναι η μέγιστη τιμή που μπορεί να λαμβάνει το  $k$  καθώς και η περίπτωση στην οποία η διαφορά μεταξύ της λύσης  $\underline{x}^{(k+1)}$  και της λύσης  $\underline{x}$  είναι μηδαμινή με αποτέλεσμα να μην έχει νόημα η συνέχιση των επαναλήψεων. Αξίζει να σημειωθεί σε αυτό το σημείο πως γίνεται χρήση της νόρμας με σκοπό να πάρουμε το σφάλμα μεταξύ της κατά προσέγγιση λύσης  $\underline{x}^{(k+1)}$  και της λύσης  $\underline{x}$  που προκύπτει από το σύστημα (5.13). Έτσι, αφαιρώντας την σχέση (5.20) από την σχέση  $\underline{x} = B\underline{x} + \underline{c}$  και παίρνοντας την νόρμα παίρνουμε την παρακάτω σχέση:

$$\|\underline{x}^{(k+1)} - \underline{x}\| \leq \|B\|^{(k+1)}\|\underline{x}^{(0)} - \underline{x}\| + \|\underline{c}\| \quad (5.21)$$

Η παραπάνω σχέση (5.21) δίνει το σφάλμα μεταξύ της κατά προσέγγιση λύσης  $\underline{x}^{(k+1)}$  και της λύσης  $\underline{x}$  του συστήματος (5.13). Όσον αφορά τώρα την σύγκλιση της επαναληπτικής μεθόδου μπορούμε να συμπεράνουμε πως όταν η νόρμα του πίνακα  $B$  είναι μικρότερη του 1 το  $\lim_{k \rightarrow \infty} B^{(k+1)}$  τείνει προς το μηδέν. Αυτή είναι και η ένδειξη που μας δείχνει πως φθάνουμε πιο κοντά και πιο γρήγορα στον τερματισμό της επαναληπτικής μεθόδου άρα και στην εύρεση της λύσης.

### Επαναληπτική Μέθοδος με χρήση κατάλληλου αλγορίθμου χαλάρωσης (relaxation algorithm)

Στην συγκεκριμένη περίπτωση θέλουμε να υπολογίσουμε την ισορροπία Κατς Νας κάνοντας χρήση ενός αλγορίθμου χαλάρωσης έχοντας φυσικά μια αρχική εκτίμηση  $x_0$  για τις ποσότητες ενέργειας των συμμετεχόντων στην αγορά. Ο αλγόριθμος χαλάρωσης που θα χρησιμοποιήσουμε έχει την εξής μορφή:

$$x^{k+1} = (1 - a_s)x^k + a_s M(x^k) \quad 0 < a_s \leq 1 \quad k = 0, 1, 2, \dots \quad (5.22)$$

Η επανάληψη στο βήμα  $k + 1$  δίνει το σταθμισμένο άθροισμα μεταξύ του διανύσματος που επιστρέφει η  $M(x_k)$  και του διανύσματος  $x_k$  που αποτελεί το αποτέλεσμα της προηγούμενης επανάληψης για  $k = 1, 2, 3, \dots$  ή την αρχική εκτίμηση  $x_0$  για  $k = 0$ . Σε κάθε επανάληψη, το αποτέλεσμα της συνάρτησης (5.10) υπολογίζεται έχοντας υπόψη ότι ο κάθε παίκτης επιλέγει ποια θα είναι η επόμενη του κίνηση δεδομένου ότι οι υπόλοιπες παίκτες δεν θα αλλάξουν την δική τους. Έτσι, μετά το πέρας ενός επαρκούς αριθμού επαναλήψεων, ο αλγόριθμος συγκλίνει στην ισορροπία κατά Νας. Το πρόβλημα μπορεί να θεωρηθεί είτε ένα συγκεντρωτικό πρόβλημα βελτιστοποίησης ή ως ένας υπολογισμός της διαδοχής των δράσεων από τους παίκτες σε κάθε

στάδιο, όπου οι παίχτες επιλέγουν τη βέλτιστη στρατηγική με την προϋπόθεση ότι οι υπόλοιποι παίχτες δεν αλλάζουν στρατηγική.

Για την σύγκλιση του αλγορίθμου απαιτείται να ικανοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες (περισσότερα στο Appendix):

1. το  $X$  να είναι κυρτό συμπαγές υποσύνολο στο  $\mathbb{R}_x$
2. η Nikaido-Isoda συνάρτηση να είναι κυρτή-κοίλη
3. η  $M(x)$  συνάρτηση να είναι συνεχής μονότονη στο  $X$
4. η παράμετρος  $a_s$  να ικανοποιεί τις εξής συνθήκες
5. ο όρος  $r(x, y; z)$  είναι συνεχής στο  $X$  ως προς  $z$
6. πρέπει να ικανοποιείται η σχέση

$$r(x, y; y) - \mu(y, x; x) \geq \beta(\|x - y\|)$$

με το  $\beta$  να είναι αύξουσα συνάρτηση

- a.  $a_s > 0$
- b.  $\sum_{s=0}^{\infty} a_s$
- c.  $a_{s-} > 0$  όταν  $s- > \infty$

όταν η τιμή της επιλέγεται από τον χρήστη. Ταυτόχρονα, ο υπολογισμός της τιμής της παραμέτρου μπορεί να γίνει και διαφορετικό τρόπο όπως είναι ο εξής:

$$a_s = \arg \min_{a \in [0,1]} \left\{ \max_{y \in X} K(x^{s+1}(a), y) \right\}$$

Η διαφορά μεταξύ των δύο τιμών είναι πως στην δεύτερη περίπτωση η σύγκλιση είναι πιο γρήγορη.

Να σημειωθεί εδώ πως οι συναρτήσεις που χρησιμοποιούνται στον παραπάνω αλγόριθμο είναι γραμμικές. Συγκεκριμένα η σχέση (5.10) είναι γραμμική. Υπάρχει όμως και η περίπτωση όπου μπορεί κάποια από τις συναρτήσεις να είναι μη γραμμικές. Τέτοια είναι η περίπτωση της συνάρτησης κόστους η οποία μπορεί να έχει και γραμμική και μη γραμμική μορφή. Στην περίπτωση που έχει μη γραμμική μορφή η σχέση (5.10) είναι μη γραμμική και μπορεί να γίνει χρήση της επαναληπτικής μεθόδου Newton για την εύρεση της ισορροπίας κατά Nας. Ο αλγόριθμος χαλάρωσης παρέχει ένα γραμμικό ρυθμό σύγκλισης για την εύρεση της ισορροπίας κατά Nας ενώ η μέθοδος Newton ασχολείται με τετραγωνικό ρυθμό σύγκλισης όταν οι συναρτήσεις είναι Lipschitz και συναρτήσεις οι οποίες χρησιμοποιούνται σε εφαρμογές οικονομικής ισορροπίας. Το δικό μας πρόβλημα ανήκει στην δεύτερη περίπτωση [14]. Άρα στην περίπτωση που το σύστημα μου είναι μη γραμμικό θα υπάρχουν παραπάνω από μια ισορροπίες κατά Nας καθώς η λύση (δηλαδή η ισορροπία κατά Nας) εξαρτάται από τις αστικοποιήσεις που θα γίνουν [15]. Έτσι, έχοντας ως συνάρτηση κόστους τη σχέση (5.6), το σύστημα το οποίο πρέπει να λυθεί

Iteration (s)	$\mathbf{x}_s$	$\alpha_s$
0	(10,5)	0.7309
1	(1.2849,-1.4668)	1.0000
2	(0.5639,-0.4942)	1.0000
3	(0.1901,-0.2169)	1.0000
4	(0.0834,-0.0731)	1.0000
5	(0.0281,-0.0321)	1.0000
6	(0.0123,-0.0108)	0.5001
7	(0.0082,-0.0078)	

Σχήμα 5.2: Αποτελέσματα παραδείγματος μέχρι την σύγκλιση του αλγορίθμου

είναι το ίδιο με το σύστημα (5.14) έχοντας όμως και τον επιπλέον όρο που φαίνεται παρακάτω, δηλαδή:

$$Ax = b + \begin{bmatrix} d_1 e_1 \sin(2e_1(q_1 - q_1')) \\ d_2 e_2 \sin(2e_2(q_2 - q_2')) \\ \vdots \\ d_n e_n \sin(2e_n(q_n - q_n')) \end{bmatrix} \quad (5.23)$$

όπου  $A$  ο πίνακας του συστήματος (5.14) και  $b$  το δεξί μέλος του ίδιου συστήματος.

Ας συνεχίσουμε με ένα παράδειγμα χρήσης του αλγορίθμου χαλάρωσης [3]. Έστω, πως οι συμμετέχοντες στο παιχνίδι είναι δύο με κοινή συνάρτηση κέρδους η οποία δίνεται από τη σχέση που ακολουθεί

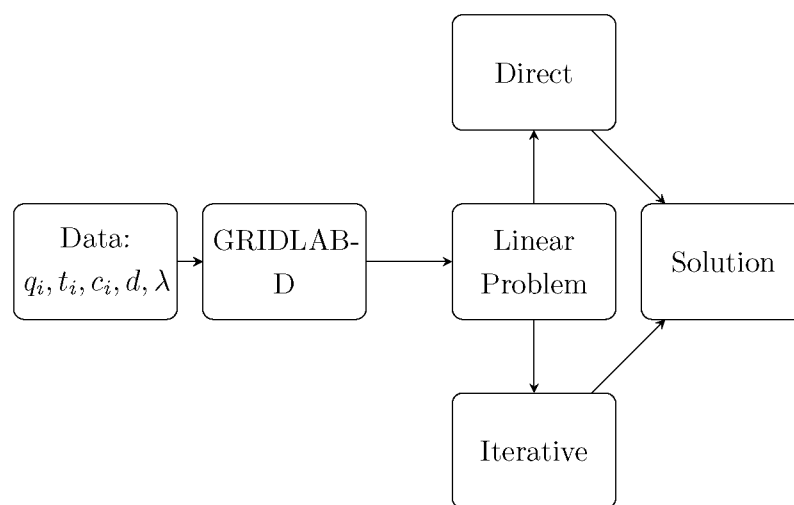
$$f_i(x) = -\frac{(x_1 + x_2)^2}{4} - \frac{(x_1 - x_2)^2}{9} \quad (5.24)$$

και η αντίστοιχη Nikaido-Isoda συνάρτηση είναι:

$$K(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 2 \left\{ \frac{(x_1 + x_2)^2}{4} + \frac{(x_1 - x_2)^2}{9} \right\} - \left\{ \frac{(y_1 + x_2)^2}{4} + \frac{(y_1 - x_2)^2}{9} \right\} - \left\{ \frac{(x_1 + y_2)^2}{4} + \frac{(x_1 - y_2)^2}{9} \right\} \quad (5.25)$$

Έτσι έχουμε  $M(x) = -\frac{5}{13}(x_2, x_1)$ . Για την παράμετρο  $a_s$  θα γίνει χρήση της βέλτιστης μεθόδου για τον υπολογισμό της εφόσον οι παίχτες του παιχνιδιού έχουν τον ίδιο τύπο για την συνάρτηση κέρδους τους (5.1). Στην εικόνα (5.2) φαίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της επαναληπτικής μεθόδου καθώς και οι τιμές που λαμβάνει η παράμετρος  $a_s$ .

Στο σχήμα (5.3) φαίνεται η αρχιτεκτονική της νέας πλατφόρμας στην οποία συμμετέχει και η θεωρία παιγνίων.



Σχήμα 5.3: Ροή δεδομένων για την εύρεση ισορροπίας κατά Nelder-Mead στο πρόβλημα βελτιστοποίησης για την μεγιστοποίηση του κέρδους των παραγωγών μιας ηλεκτρικής αγοράς



# Κεφάλαιο 6

## Υλοποίηση

Στο κεφάλαιο αυτό θα ασχοληθούμε με τον σχεδιασμό και την υλοποίηση της πλατφόρμας. Η βασική συνιστώσα για την υλοποίηση της πλατφόρμας μας είναι το GridLAB-D για το οποίο έγινε μια μικρή περιγραφή σε προηγούμενα κεφάλαια ενώ στο παρόν κεφάλαιο θα γίνει πιο εκτενής ανάλυση. Ταυτόχρονα, θα παρατεθούν και οι όποιες επεκτάσεις είναι απαραίτητες στις συνιστώσες του GridLAB-D με σκοπό να σχεδιαστεί η πλατφόρμα προσομοίωσης που έχει περιγραφεί σε προηγούμενα κεφάλαια.

### 6.1 Σχεδιασμός και Υλοποίηση Πλατφόρμας Προσομοίωσης

Ξεκινώντας, όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 2 στόχος μας είναι η υλοποίηση της λειτουργίας μιας βραχυπρόθεσμης αγοράς χρησιμοποιώντας την έννοια της δημοπρασίας (auction) για τον καθορισμό ενός σημείου ισορροπίας (τιμή και ποσότητα) αυτής της αγοράς. Με τον όρο σημείο ισορροπίας εννοείται η ποσότητα και η τιμή στην οποία μπορούν να αγοράσουν οι καταναλωτές και να πουλήσουν οι παραγωγοί οι οποίοι συμμετέχουν στην ίδια δημοπρασία. Σε ένα δίκτυο πόλεων παρόμοιο με αυτό των παραδειγμάτων της ενότητας 2 οι καταναλωτές μιας πόλης θα κάνουν προσφορές στην αγορά - δημοπρασία της πόλης τους. Σε ειδικές περιπτώσεις (είτε ζήτηση επιπλέον ενέργειας είτε προσφοράς της υπολειπόμενης ενέργειας) η πόλη θα κάνει και προσφορές σε μια δεύτερη δημοπρασία (θα γίνεται αναφορά σε αυτό με τον όρο δημοπρασία δευτέρου επιπέδου). Επίσης, θα υπάρχει και η επιλογή να μην γίνονται οι προσφορές στη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου όταν ζητείται επιπλέον ενέργεια αλλά να ανοίγει ένα εφεδρικό εργοστάσιο (second\_factory) το οποίο θα προσφέρει την επιπλέον ενέργεια που ζητείται στην αγορά της πόλης σε τιμή μεγαλύτερη ή ίση με την τιμή που πουλάει το τοπικό εργοστάσιο (town\_factory) την δική του ενέργεια .

Όσον αφορά τώρα τον σχεδιασμό του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν αρκετές από τις συνιστώσες του GridLAB-D. Αυτές είναι οι ενότητες `tape`, `powerflow`, `residential` και `market`. Πιο αναλυτικά:

**Tape module:** Υλοποιεί αντικείμενα που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την δημιουργία και την αλλαγή των ιδιοτήτων διαφόρων αντικειμένων ενός μοντέλου τηρώντας παρόλα

αυτά τις ιδιότητες των υπόλοιπων αντικειμένων. Τα αντικείμενα `player` και `shaper` χρησιμοποιούνται για την ενημέρωση ενός μοντέλου προσομοίωσης σε καθορισμένες ώρες. Οι τιμές διαβάζονται μέσω ενός αρχείου που έχει την κατάληξη `player` και `shaper`. Ταυτόχρονα τα αντικείμενα `recorder` και `collector` χρησιμοποιούνται για την συλλογή πληροφοριών από το μοντέλο στο οποίο δηλώνονται. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί τις περισσότερες φορές να είναι ισχύς, ενέργεια και ρεύμα. Στο μοντέλο μας χρησιμοποιείται το αντικείμενο `multi_recorder` το οποίο έχει την ιδιότητα να παρέχει την δυνατότητα συλλογής της τιμής **ενός ή περισσότερων** ιδιοτήτων ενός αντικειμένου σε χρονικό διάστημα που ορίζεται μέσα στο αντικείμενο `multi_recorder`. Συγκεκριμένα έγινε χρήση του αντικειμένου `multi_recorder` για την συλλογή του `clearing.price` και `clearing.quantity` ιδιοτήτων της δημοπρασίας των πόλεων και αυτής του δευτέρου επιπέδου έτσι ώστε να επαληθευτεί αν οι πόλεις ικανοποιούνται μερικώς ή πλήρως και σε ποια τιμή.

**Powerflow Module:** Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο (δες ενότητα 4) το συγκεκριμένο module χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους για την παρατήρηση των τιμών της τάσης και του ρεύματος σε ένα σύστημα. Με την χρήση του `powerflow` και του `residential module` δίνεται η δυνατότητα προσομοίωσης ενός δικτύου πόλεων. Από τα αντικείμενα του συγκεκριμένου module χρησιμοποιήσαμε το αντικείμενο `transformer`, `triplex_meter`, `node`, `load` και `triplex_line`

- **Load:** Παρέχει την μέθοδο άντλησης ισχύος έξω από ένα σύστημα. Το εν λόγω αντικείμενο δίνει την δυνατότητα ρύθμισης της ισχύς που θα παρέχεται σε κάθε φάση του. Κάθε πόλη θα συνδέεται με ένα αντικείμενο αυτού του είδους, το οποίο θα παρέχει όση ισχύ είναι απαραίτητη ώστε να καλυφθούν οι ανάγκες της πόλης. Η ποσότητα της ισχύς που θα παρέχεται σε κάθε φάση εξαρτάται από τον αριθμό των κατοικιών που θα «συνδέονται» σε κάθε συγκεκριμένη φάση. Αφαιρετικά το αντικείμενο `load` θα αποτελεί το σημείο σύνδεσης μιας πόλης με τις υπόλοιπες.
- **Triplex\_meter:** Παρέχει τον σημείο μέτρησης της ισχύ και της ενέργειας σε ένα σύστημα. Κάθε αντικείμενο `house` συνδέεται πάντα με έναν `triplex_meter`. Το σύνολο των κατοικιών θα ανήκουν στις τρεις διαφορετικές φάσεις (A,B,C) έτσι ώστε αν προκύψει μη ικανοποίηση της ζήτησης σε κάποια από αυτές να κοπεί η παροχή του ρεύματος στις κατοικίες που ανήκουν σε αυτή και μόνο.
- **Triplex\_line:** Αποτελεί ένα τύπο γραμμής που διατίθεται στη μονάδα `powerflow`. Το object `triplex_line` αντιπροσωπεύει το καλώδιο διανομής που προέρχεται από το μετασχηματιστή σε ένα τυπικό οικιακό σπίτι. Δηλαδή, αποτελούνται συνήθως από ένα ουδέτερο καλώδιο και δύο «hot» καλώδια.

Περισσότερες λεπτομέρειες για τα αντικείμενα του `powerflow module` μπορείτε να βρείτε στο [21].

**Residential Module:** Προσομοιώνει διάφορες συσκευές και ηλεκτρικά είδη που βρίσκονται μέσα σε μια κατοικία. Στην παρούσα διπλωματική χρησιμοποιήθηκε κατα κύριο λόγο το αντικείμενο `house`, ορίζοντας κάθε πόλη ως ένα σύνολο από τέτοια αντικείμενα. Κάθε



κατοικία θα κάνει προσφορά για την ενέργεια που χρειάζεται και την τιμή στην οποία προτιμά να την αγοράσει μέσω του object controller(αντικείμενο του market module) στο τοπικό market. Αυτό θα συμβαίνει μόνο για το κλιματιστικό και τον θερμοσίφωνα η λειτουργία των οποίων εξαρτάται από την θερμοκρασία του περιβάλλοντος και τίθενται όρια μη λειτουργίας και λειτουργίας. Για τις υπόλοιπες συσκευές για το λόγο ότι το Gridlab-D δεν παρέχει παρόμοια λειτουργικότητα οι προσφορές θα γίνονται μέσω του stub\_bidder (αντικείμενο του market module).

**Market Module:** Ορίζεται κατά κύριο λόγο από την ικανότητα που δημιουργείται σε ένα σύστημα να «προσφέρει» στην αγορά. Η πραγματική αγορά, δηλαδή αυτός που την διαχειρίζεται, έχει δημιουργηθεί μέσα στο αντικείμενο auction. Έτσι, market και auction ταυτίζονται. Το auction είναι ένα αντικείμενο εντός του market module το οποίο δέχεται πλειοδοσίες - προσφορές από τις διάφορες οντότητες που ανήκουν στο ίδιο σύστημα (πωλητές και αγοραστές). Μετά από ένα συγκεκριμένο διάστημα, το οποίο ορίζεται πριν την έναρξη της δημοπρασίας, ο «διαχειριστής» αυτής θα επιλύσει την προσφορά και τη ζήτηση των ποσοτήτων και των τιμών στη μορφή μιας διπλής δημοπρασίας για να καθορίσει το σημείο ισορροπίας της αγοράς. Το σημείο αυτό αποτελεί την σχετική τιμή ισορροπίας (clearing price) την αντίστοιχη ποσότητα ισορροπίας (clearing quantity). Το ζεύγος των δυο αυτών τιμών καθορίζεται μετά από ένα χρονικό διάστημα καθυστέρησης, το οποίο και αυτό ορίζεται πριν την έναρξη της δημοπρασίας. Το πέρας αυτού του διαστήματος σηματοδοτεί ότι η ποσότητα ισορροπίας μπορεί να αγοραστεί στην τιμή ισορροπίας από όλους τους καταναλωτές και να πουληθεί από όλους τους παραγωγούς. Τα αντικείμενα του συγκεκριμένου module που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της πλατφόρμας μας είναι τα εξής:

- **Auction:** Παρέχει ένα μέσο για διάφορα αντικείμενα εντός του GridLAB-D ώστε αυτά να μπορέσουν να στηρίξουν την προσφορά ή τη ζήτηση τους για μια δυναμική ή πραγματική τιμή του χρόνου. Η αγορά (market) υλοποιείται στο αντικείμενο auction ως μια αγορά διπλής δημοπρασίας, όπου οι παραγωγοί και οι καταναλωτές μπορούν να υποβάλουν τις πλειοδοσίες τους στην τιμή που επιθυμούν ταυτόχρονα. Μόλις η περίοδος υποβολής προσφορών λήξει, μέσω της δημοπρασίας αποφασίζεται η ποσότητα και η τιμή που θα μπορούν οι παραγωγοί να πουλάνε και οι καταναλωτές να αγοράζουν (η παραπάνω διαδικασία ονομάζεται clearing). Μετά το clearing και εφόσον ένα σχετικό διάστημα καθυστέρησης, που έχει οριστεί στην αρχή της διαδικασίας, λήξει η τιμή και η ποσότητα της αγοράς γίνεται ενεργή και μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους συμμετέχοντες σε αυτή. Σε αυτό το σημείο, παραγωγοί και καταναλωτές θα ανταποκριθούν κατάλληλα αφού πρώτα συγκρίνουν την τιμή της προσφοράς τους με την τιμή που αποφασίστηκε στη δημοπρασία ώστε είτε να πουλήσουν είτε να αγοράσουν ενέργεια αντίστοιχα. Κάθε πόλη πλειοδοτεί σε μία δημοπρασία. Το συγκεκριμένο αντικείμενο επεκτάθηκε ώστε να υποστηρίζει αντικείμενα τα οποία θα δείχνουν στο τοπικό εργοστάσιο της πόλης (town\_factory) καθώς και στον stub\_bidder (second\_bidder) ο οποίος θα κάνει προσφορές (όταν αυτό απαιτείται) στη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου. Στην περίπτωση που υπάρχει και το εφεδρικό εργοστάσιο, το οποίο ενεργοποιείται όταν η επιπλέον ζήτηση σε ενέργεια ζητείται από την ίδια την πόλη και όχι από τις γειτονικές τότε το αντικείμενο

auction θα υποστηρίζει και τη μεταβλητή `second_factory`.

- **Controller:** Είναι το αντικείμενο που παρέχει price-responsive σήματα σε συγκεκριμένα αντικείμενα του Gridlab-D (στο auction object). Ο controller συγκρίνει την τρέχουσα τιμή του σήματος με τη μέση τιμή της δημοπρασίας, που εξέδωσε η δημοπρασία, και προσφέρει την ζήτηση της συσκευής ως συνάρτηση της τιμής πίσω στη δημοπρασία. Η μέση τιμή μπορεί να υπολογίζεται παίρνοντας την μέση τιμή των τιμών ισορροπίας που είχε η δημοπρασία τις τελευταίες δύο, τρεις κ.τ.λ ώρες. Το διάστημα που θα χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της μέσης τιμής καθορίζεται από τον χρήστη. Μετά το clearing, ο controller τροποποιεί τα σημεία ρύθμισης της συσκευής ώστε η λειτουργία της να συμβαδίζει με την νέα τρέχουσα τιμή της ενέργειας. Δηλαδή, αν η τιμή ισορροπίας είναι μεγάλη σε σχέση με την τιμή που προσφέρει ο controller τότε η συσκευή κλείνει. Αυτό διαφορετικά σημαίνει πως εκείνη την στιγμή προσφέρεται λιγότερη ενέργεια γι' αυτό και η τιμή είναι αυξημένη. Το σημείο ρύθμισης εξαρτάται από το αντικείμενο το οποίο ο controller ελέγχει. Κατά το χρόνο αυτό, μόνο οι συσκευές με συνεχή σημεία ρύθμισης θερμοκρασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν από τον controller και όπως αναφέρθηκε και παραπάνω τέτοιες είναι το κλιματιστικό και ο θερμοσίφωνας του residential module.
- **Stub\_bidder:** Αυτό το αντικείμενο είναι ένας πλασματικός bidder στη δημοπρασία. Δεν είναι σε θέση να ελέγχει μια άλλη συσκευή ως απόκριση προς την τιμή, όπως ο controller. Αυτό το αντικείμενο χρησιμοποιείται γενικά για σκοπούς δοκιμής, ή για την ενίσχυση του market που δεν έχει αρκετούς αγοραστές ή πωλητές. Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω γίνεται χρήση αυτού του αντικειμένου ώστε να ενσωματωθούν στο μοντέλο μας και επιπλέον συσκευές εκτός από το κλιματιστικό και τον θερμοσίφωνα. Το συγκεκριμένο αντικείμενο θα χρησιμοποιείται επίσης για να γίνουν οι προσφορές στη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου. Κάθε πόλη μέσω της τοπικής αγοράς θα αποφασίζει αν έχει απαίτηση σε ενέργεια (demand) ή αν μπορεί να τροφοδοτήσει τις υπόλοιπες πόλεις με την ενέργεια που της περισσεύει (supply). Αυτές οι ποσότητες «κοινοποιούνται» στον `second_bidder` που επιλέγεται ότι θα συμμετέχει στη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου, έτσι ώστε με την σειρά του να εκτελέσει τις απαιτούμενες ενέργειες. Αυτές είναι να προσφέρει είτε το supply είτε το demand στη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου στην τιμή που πουλούσε την ενέργεια το τοπικό εργοστάσιο ή στην μέγιστη τιμή που ζητούσαν οι καταναλωτές αντίστοιχα.

Ξεκινώντας με μια περιγραφή του μοντέλου προσομοίωσης της πλατφόρμας μας, τα δεδομένα εισόδου αυτού θα είναι:

- τα χαρακτηριστικά των καταναλωτών και των παραγωγών (ποσότητα, τιμή, σε ποια αγορά ανήκουν),
- η περίοδος προσφορών, η οποία απαιτείται να είναι κοινή για όλους τους συμμετέχοντες σε μια αγορά,

- ο χρόνος που πρέπει να περάσει ώστε η ποσότητα να γίνει διαθέσιμη στην τιμή που αποφασίστηκε στη δημοπρασία,
- ο αριθμός των πόλεων και
- ο αριθμός των εργοστασίων ανά πόλη.

Η διαδικασία προσομοίωσης του μοντέλου χωρίζεται σε τρεις φάσεις :

**Πρώτη Φάση:** Είναι η φάση που εκτελείται ξεχωριστά για κάθε πόλη. Οι καταναλωτές και οι παραγωγοί μιας πόλης κάνουν προσφορές (πλειοδοσίες) στη τοπική δημοπρασία που διαθέτει η πόλη τους. Η ποσότητα που προσφέρουν οι παραγωγοί μπορεί να είναι είτε fixed (όπως και η τιμή) είτε συνάρτηση της ζήτησης ( 2%, 10% ή 15% του μέσου όρου της τρέχουσας ζήτησης). Οι παραγωγοί μπορεί να είναι είτε τοπικά εργοστάσια είτε συστήματα που προσφέρουν ενέργεια μέσω ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Οι καταναλωτές κάνουν προσφορές είτε μέσω αυτοματοποιημένων συσκευών (κλιματιστικό - θερμοσίφωνα που ελέγχονται από controllers) είτε μέσω μη αυτοματοποιημένων συσκευών οι οποίοι θα ζητούν σταθερή ποσότητα σε σταθερή τιμή καθ' όλη την διάρκεια της προσομοίωσης (κάνοντας χρήση των stub\_bidders).

Με το πέρας του χρόνου των προσφορών και εφόσον περάσει το σχετικό διάστημα καθυστέρησης (το οποίο είναι προκαθορισμένο) αποφασίζεται η ποσότητα και η τιμή ισορροπίας για κάθε τοπική δημοπρασία. Στην συνέχεια κάθε πόλη ελέγχει αν η ποσότητα ισορροπίας ικανοποιεί την συνολική ζήτηση των καταναλωτών της. Αν συμβαίνει αυτό τότε η περίσσεια ενέργειας που τυχόν υπάρχει από τα εργοστάσια προσφέρεται μέσω του second\_bidder στη δημοπρασία δεύτερου επιπέδου και κατέπχταση στις υπόλοιπες πόλεις (βλέπε Δεύτερη φάση). Στην περίπτωση αυτή το εργοστάσιο-α και κατ' επέχταση η πόλη θα έχουν ένα επιπλέον κέρδος λόγω του ότι όλη η ενέργεια (ή μέρος αυτής) τελικά θα πουληθεί. Αν τώρα δεν ικανοποιείται η συνολική ζήτηση τότε υπάρχουν δύο επιλογές:(α) προμήθεια της επιπλέον ενέργειας από άλλο τοπικό εργοστάσιο (second\_factory) της πόλης με άνοιγμα των φραγμάτων και (β) αίτηση απόκτησης της απαιτούμενης ενέργειας από τις γειτονικές πόλεις με τη βοήθεια της δημοπρασίας δεύτερου επιπέδου(βλέπε Δεύτερη Φάση).

**Δεύτερη Φάση:** Οι περιορισμοί σε αυτή τη φάση είναι η απουσία συμφόρησης, δηλαδή η σύνδεση μεταξύ των πόλεων είναι all to all. Η προσομοίωση μεταβαίνει σε αυτή τη φάση στην περίπτωση που (α) η ζήτηση (demand) κάποιας πόλης δεν ικανοποιείται από το τοπικό-α εργοστάσιο-α και (β) υπάρχει περίσσεια ενέργειας από τους παραγωγούς. Αυτή η φάση χωρίζεται σε δύο επιμέρους φάσεις. Στην πρώτη υπό-φάση οι προσφορές είτε για το demand είτε για το supply γίνονται στη δημοπρασία δεύτερου επιπέδου μέσω του second\_bidder. Στην περίπτωση της ζήτησης ενέργειας από τη δημοπρασία δεύτερου επιπέδου, δηλαδή από τις άλλες πόλεις, μετά το πέρας των προσφορών και όταν η ποσότητα ισορροπίας και η τιμή ισορροπίας είναι διαθέσιμες ελέγχεται κατά πόσο η ζήτηση μπορεί τώρα να ικανοποιηθεί. Στην δεύτερη υπό-φάση, οι προσφορές για το demand γίνονται μέσω του stub\_bidder second\_factory στη τοπική δημοπρασία ενώ οι πλειοδοσίες για το supply γίνονται στη δημοπρασία δεύτερου επιπέδου.

**Τρίτη Φάση:** Σε αυτή τη φάση οι περιορισμοί που υπάρχουν είναι ότι (α) η συνάρτηση κόστους μπορεί να είναι είτε γραμμική είτε μη γραμμική και (β) να υπάρχει ή να μην υπάρχει

συμφόρηση. Εδώ γίνεται χρήση της τεχνικής που παρουσιάζεται στην ενότητα 5 με σκοπό την βελτιστοποίηση του αποτελέσματος που βγάζει η κάθε δημοπρασία είτε αυτό είναι το τοπικό αν υπάρχουν παραπάνω από ένας παραγωγοί είτε αυτό είναι του δευτέρου επιπέδου.

Πιο αναλυτικά η λειτουργία της πλατφόρμας θα έχει τις εξής ιδιότητες: η σύνδεση μεταξύ των πόλεων όπως αναφέρθηκε θα είναι all to all. Κάθε πόλη θα έχει την δική της δημοπρασία - αγορά, όπου σε αυτή θα γίνονται προσφορές από το τοπικό εργοστάσιο (`stub_bidder` object) για την ενέργεια που προσφέρουν και από τις κατοικίες της πόλης (`house` object), μέσω των `controllers` για την ενέργεια που απαιτούν. Στην συνέχεια θα αποφασίζεται κατά πόσο το τοπικό εργοστάσιο μπορεί να ικανοποιήσει τις ανάγκες της πόλης του ή όχι. Οι κατοικίες όσον αφορά τον κλιματισμό και τον θερμοσίφωνα για να λειτουργήσουν απαιτούν κάποιου είδους αλληλεπίδραση με τις καιρικές συνθήκες. Το αντικείμενο `controller` είναι εκείνο που δίνει την δυνατότητα ρύθμισης της κατάστασης αυτών των δύο συσκευών καθώς στέλνει σήματα στην τοπική αγορά για να ζητήσει την απαιτούμενη ενέργεια. Κάθε σπίτι θα έχει τον δικό του `controller` ο οποίος βάσει των περιβαλλοντικών συνθηκών που επικρατούν καθώς και των περιορισμών που έχει θέσει ο χρήστης ζητά την αντίστοιχη ποσότητα η οποία συμφωνεί με αυτά που μπορούν να προσφερθούν. Οι περιορισμοί αυτοί έχουν σχέση με την θερμοκρασία για την οποία τόσο το κλιματιστικό όσο και ο θερμοσίφοντας θα αλλάζουν την κατάσταση λειτουργίας ανάλογα με την τιμή της. Για παράδειγμα, αν η θερμοκρασία είναι είτε πάνω είτε κάτω από το όριο που ρυθμίστηκε και που έχει τεθεί στον `controller` τότε η συσκευή θα μεταβαίνει στην αντίστοιχη κατάσταση λειτουργίας. Στο μέλλον θα υλοποιηθεί από την ομάδα του `Gridlab-D` και η χρήση του αντικειμένου `controller` και στις υπόλοιπες συσκευές που διαθέτει το `residential` module. Προς το παρόν για τις επιπλέον συσκευές που θα θέλαμε να συμμετέχουν στην διαδικασία της αγοράς, η προσθήκη τους είναι δυνατή μέσω του αντικειμένου `stub_bidder`. Η χρονική στιγμή καθώς και η ενέργεια που απαιτείται για να λειτουργήσει κάθε μία από τις επιπλέον συσκευές θα καθορίζεται από το αντικείμενο `schedule`. Το συγκεκριμένο αντικείμενο δίνει την δυνατότητα ώστε συγκεκριμένες μεταβλητές των αντικειμένων να παίρνουν διαφορετικές τιμές σε διαφορετικές περιόδους του χρόνου (χειμώνας, καλοκαίρι κ.τ.λ). Για παράδειγμα στην περίπτωση του πλυντηρίου πιάτων η πιο συχνή περίοδος που χρησιμοποιείται είναι είτε τις μεσημεριανές ώρες είτε τις βραδινές. Έτσι, η συγκεκριμένη συσκευή θα απαιτεί ενέργεια εκείνες τις ώρες. Στην περίπτωση τώρα που η απαίτηση της συσκευής σε ενέργεια δεν ικανοποιείται τότε αυτή περιμένει για την επόμενη περίοδο που έχει προγραμματιστεί να λειτουργήσει. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως υπάρχει και η δυνατότητα να δίνεται προτεραιότητα σε ποιες συσκευές πρέπει να δουλέψουν στην περίπτωση που η ενέργεια που παρέχεται από τα εργοστάσια είναι μικρότερη της ζήτησης.

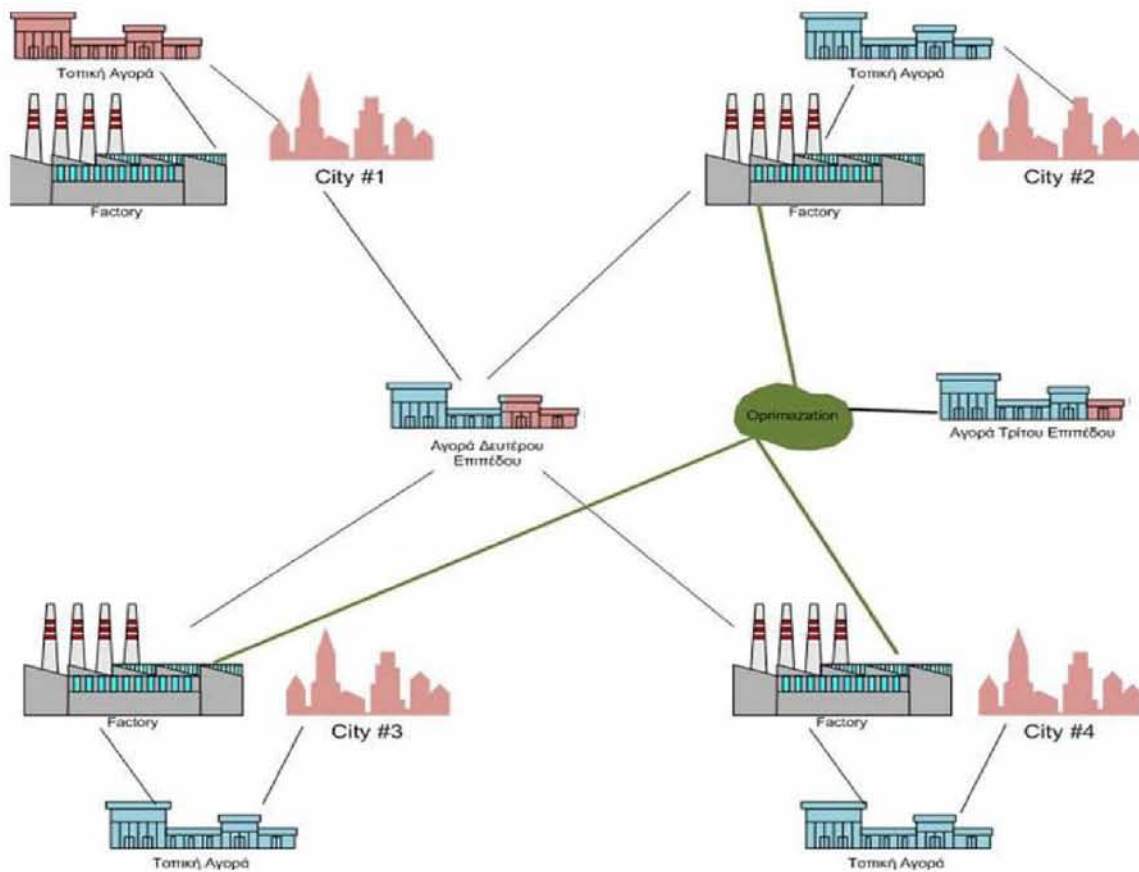
Από την πλευρά των εργοστασίων τώρα, αν το τοπικό εργοστάσιο της κάθε πόλης ικανοποιεί την ζήτηση της πόλης σε ενέργεια και σε περίπτωση που υπάρχει περίσσεια ενέργειας τότε αυτή μπορεί να προσφέρεται στις υπόλοιπες πόλεις. Να σημειωθεί εδώ πως οι ποσότητες είναι διαθέσιμες αφού τελειώσει η περίοδος προσφορών από τα τοπικά εργοστάσια και τις κατοικίες. Η παροχή της περίσσειας ενέργειας στις υπόλοιπες πόλεις επιτυγχάνεται μέσω του `second_bidder`. Η λειτουργικότητα και ενεργοποίηση του συγκεκριμένου `stub_bidder` (`second_bidder`) βασίζεται στην ύπαρξη ενέργειας (είτε για προσφορά είτε για ζήτηση) και στην

παροχή της προς τις υπόλοιπες πόλεις. Το συγκεκριμένο αντικείμενο θα κάνει την προσφορά της ενέργειας είτε για ζήτηση είτε για προσφορά στη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου στην τιμή προσφοράς του τοπικού εργοστασίου ή στην μέγιστη τιμή ζήτησης των καταναλωτών της πόλης αντίστοιχα. Επίσης, όσον αφορά την περίπτωση που η πόλη δεν ικανοποιείται από το τοπικό της εργοστάσιο, ο `second_bidder`, θα κάνει τις προσφορές τους στη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου, και συγκεκριμένα την ποσότητα που ζητά και δεν μπορεί να πάρει από το τοπικό εργοστάσιο στην τιμή του τοπικού εργοστασίου. Όταν τώρα η δημοπρασία δευτέρου επιπέδου, η οποία δέχεται προσφορές, αποφασίζει για την τιμή και την ποσότητα ισορροπίας τότε η πόλη, της οποίας το τοπικό εργοστάσιο δεν την ικανοποιεί, αγοράζει την ποσότητα που θέλει και είναι φυσικά μικρότερη ή ίση από την ποσότητα ισορροπίας στην τιμή ισορροπίας της δημοπρασίας δευτέρου επιπέδου. Με αυτό τον τρόπο θα αγοράσει την ποσότητα που της προσφέρει το τοπικό εργοστάσιο και την υπόλοιπη από τις γειτονικές πόλεις. Σε περίπτωση που και η ενέργεια από τις γειτονικές δεν επαρκεί τότε κάποιες κατοικίες θα μεταφέρουν τις ενεργειακές τους ανάγκες σε περιόδους εκτός ωρών αιχμής. Τέλος, υπάρχει η περίπτωση το τοπικό εργοστάσιο να δίνει την ενέργεια του πολύ ακριβά με αποτέλεσμα οι κατοικίες να μην αγοράζουν τίποτα από αυτό και να στρέφονται κατευθείαν στην αγορά ενέργειας από τις γειτονικές πόλεις. Σε αυτή την περίπτωση γίνεται πλειοδοσία της ζήτησης στη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου και η πόλη ικανοποιείται από μια γειτονική πόλη με τιμή μικρότερη από την τιμή του τοπικού της εργοστασίου. Σκοπός της προσομοίωσης της παραπάνω πλατφόρμας είναι η παρατήρηση της τιμής στην οποία αγοράζουν την ενέργεια οι καταναλωτές σε κάθε πόλη, το κέρδος κάποιων πόλεων όταν τα εργοστάσια τους παράγουν περισσότερη ενέργεια από την αυτή που ζητείται, καθώς και για το ποιες είναι εκείνες οι πόλεις που αγοράζουν από τη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου και σε ποια τιμή. Επίσης, η τρίτη φάση του μοντέλου χρησιμοποιείται ώστε να υπολογιστεί η βέλτιστη ποσότητα που μπορεί να δώσει η δημοπρασία δευτέρου επιπέδου ανά κατ' επέκταση οι πόλεις του δικτύου (αυτές δηλαδή που έχουν περίσσεια ενέργειας και καλούνται να ικανοποιήσουν την ζήτηση των υπόλοιπων πόλεων). Τέλος, η σύγκριση των τιμών μεταξύ δεύτερης και τρίτης φάσης στοχεύει στην επαλήθευση κατά πόσο συμφέρει ο κάθε παραγωγός να έχει ως στόχο την βελτιστοποίηση του κέρδους του. Στην εικόνα (6.1) φαίνεται μια απεικόνιση του τρόπου λειτουργίας της πλατφόρμας μας.

## 6.2 Πειραματικά Αποτελέσματα

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται μια πειραματική προσέγγιση της λειτουργίας μιας ηλεκτρικής αγοράς με τον τρόπο που παρουσιάστηκε προηγουμένως. Εκτελέστηκαν δύο είδη πειραμάτων με την μόνη διαφορά πως η ποσότητα της ενέργειας που προσφέρεται από τον παραγωγό της κάθε πόλης στην μία περίπτωση θα είναι αυξημένο ή μειωμένο κατά 10% του μέσου όρου της ζήτησης και στην άλλη περίπτωση κατά 15%.

Για την διεξαγωγή των πειραμάτων έγιναν προσομοιώσεις ειδικών μοντέλων τα οποία έχουν την μορφή των μοντέλων του GridLab-D. Τα μοντέλα κατασκευάστηκαν με την βοήθεια ειδικού script το οποίο δίνει την δυνατότητα δημιουργίας ενός μεγάλου σε κλίμακα δικτύου πόλεων. Πιο συγκεκριμένα, το μοντέλο μας απεικονίζει ένα δίκτυο πόλεων σε φυσικό επίπεδο.



Σχήμα 6.1: Γραφική Απεικόνιση των τριών επιπέδων της λειτουργίας της πλατφόρμας

Πίνακας 6.1: Τιμή και Κόστος της Ενέργειας για κάθε πόλη του δικτύου

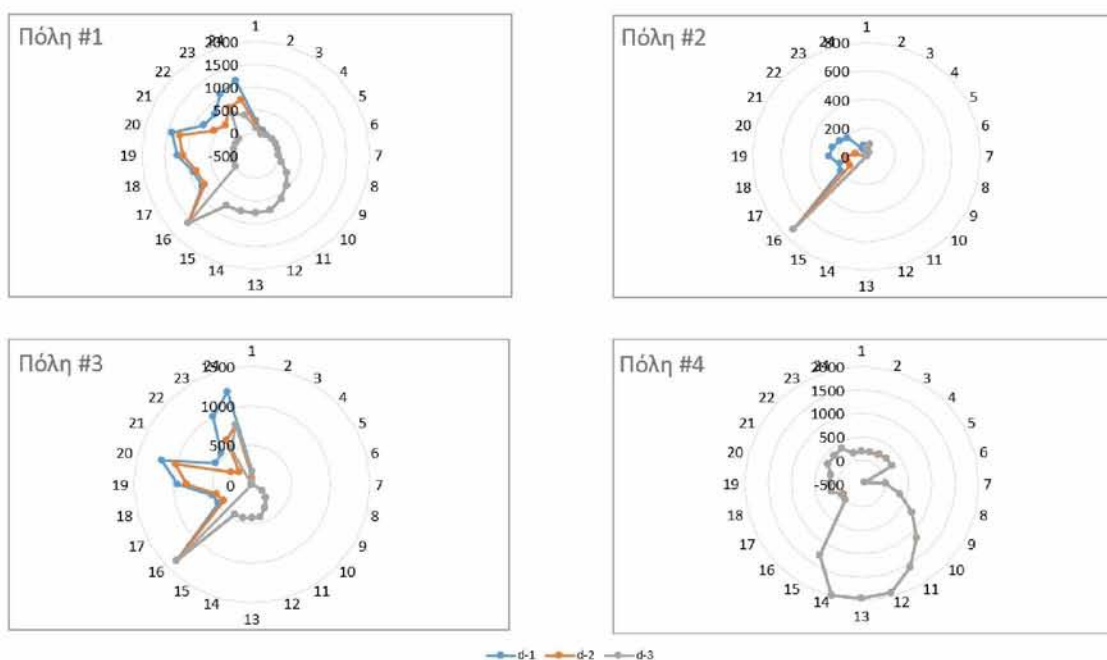
	Πόλη Νο1	Πόλη Νο2	Πόλη Νο3	Πόλη Νο4
Τιμή	50	100	80	60
Κόστος (/ Kw)	15	25	35	11

Δηλαδή, περιγράφεται ο τρόπος σύνδεσης των σπιτιών, η τάση σε κάθε σύνδεση, το φορτίο που πρέπει να υποστηρίζει ένας κόμβος έτσι ώστε να μπορεί να αντεπεξέλθει στην συνολική ισχύ που απαιτούν τα σπίτια που συνδέονται με αυτόν τον κόμβο κ.τ.λ. Περιγράφοντας πιο αναλυτικά το δίκτυο των πόλεων ως ξεκινήσουμε με τον αριθμό των πόλεων. Οι πόλεις θα είναι (βλέπε 6.2) τέσσερις με κάθε πόλη να αποτελείται από διαφορετικό αριθμό σπιτιών. Η πρώτη πόλη θα έχει 1200 κατοικίες, η δεύτερη 250, η τρίτη 1400 και τέλος η τέταρτη 3000. Κάθε κατοικία θα έχει κλιματισμό και θερμοσίφωνα ενώ στις κατοικίες της πρώτης και της τρίτης πόλης έχουν προστεθεί και επιπλέον συσκευές (ψυγείο, φούρνος μικροκυμάτων) με σκοπό να υπάρχει διαφορά στην ζήτηση ενέργειας και έτσι κάποιες πόλεις να προσφέρουν ενέργεια και άλλες να ζητούν ενέργεια. Κάθε πόλη έχει τη δική της τοπική αγορά όπου θα γίνονται οι προσφορές κάθε μια ώρα για ένα 24ώρο καθώς και το τοπικό της εργοστάσιο. Το εργοστάσιο της κάθε πόλης δίνει την ενέργεια που παράγει σε διαφορετική τιμή. Ο θερμοσίφωνα και το κλιματιστικό ρυθμίζουν την τιμή ζήτησης της ενέργειας με τον τρόπο που αναφέρθηκε παραπάνω. Οι επιπλέον συσκευές που θα προστεθούν θα ζητούν την ενέργεια στην τιμή που προσφέρει το εργοστάσιο της πόλης στην οποία ανήκουν. Πιο συγκεκριμένα, η τιμή στην οποία προσφέρεται η ενέργεια από το τοπικό εργοστάσιο της κάθε πόλης καθώς και το κόστος φαίνονται στον πίνακα 6.1. Ο στόχος των πειραμάτων ήταν να δούμε κατά πόσο βελτιώνεται η ικανοποίηση της ζήτησης στις τρεις φάσεις που περιγράφηκαν παραπάνω. Πιο συγκεκριμένα, η πρώτη φάση δίνει την πληροφορία κατά πόσο ικανοποιήθηκε η ζήτηση από το τοπικό-α εργοστάσιο-α. Παράλληλα, η δεύτερη φάση κατά πόσο η ζήτηση που δεν ικανοποιήθηκε από την πρώτη φάση ικανοποιείται εδώ και τέλος η τρίτη φάση, η οποία χρησιμοποιεί τα δεδομένα της δεύτερης φάσης (δηλαδή την περίσσεια ενέργειας που προσφέρουν οι πόλεις) και τα βελτιστοποιεί με σκοπό την μεγιστοποίηση του κέρδους των παραγωγών καθώς και της πλήρους ικανοποίησης των καταναλωτών.

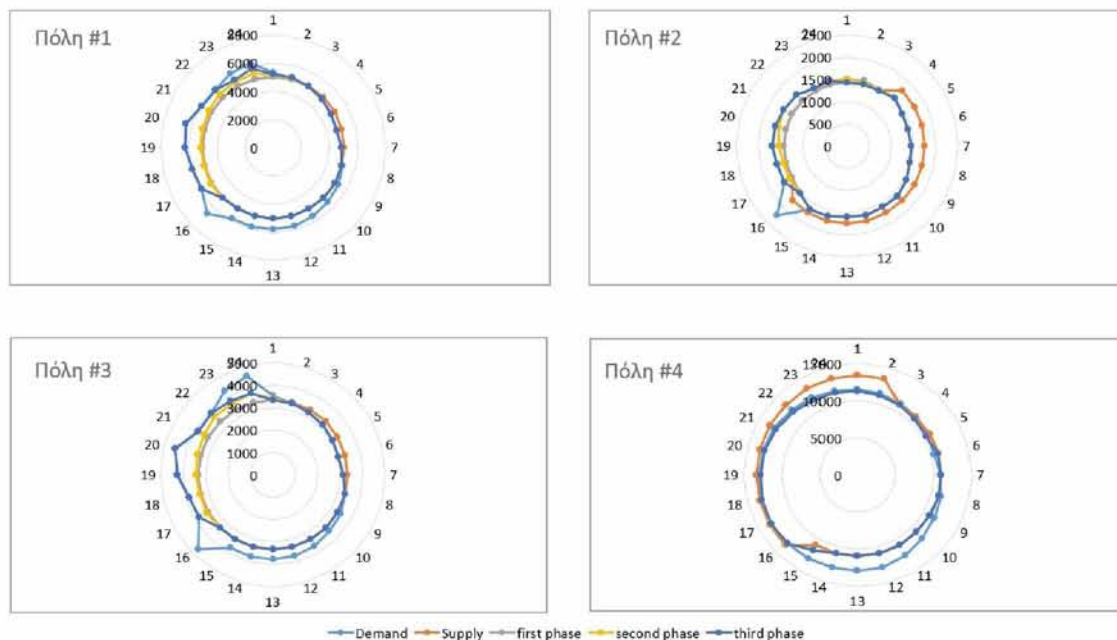
Πίνακας 6.2: Χαρακτηριστικά της κάθε Πόλης

Πόλη	Σπίτια	Κλιματισμός	Θερμοσίφωνα	Επιπλέον Συσκευές
1	1200	+	+	+
2	250	+	+	-
3	1400	+	+	+
5	3000	+	+	-

Στην περίπτωση που η ενέργεια που προσφέρει ο παραγωγός κάθε πόλης είναι συνάρτηση του 10% του μέσου όρου της ζήτησης, στην εικόνα (6.2), (6.3) φαίνονται τα αποτελέσματα ενώ για την περίπτωση του 15% τα αποτελέσματα φαίνονται στις εικόνες (6.4), (6.5).

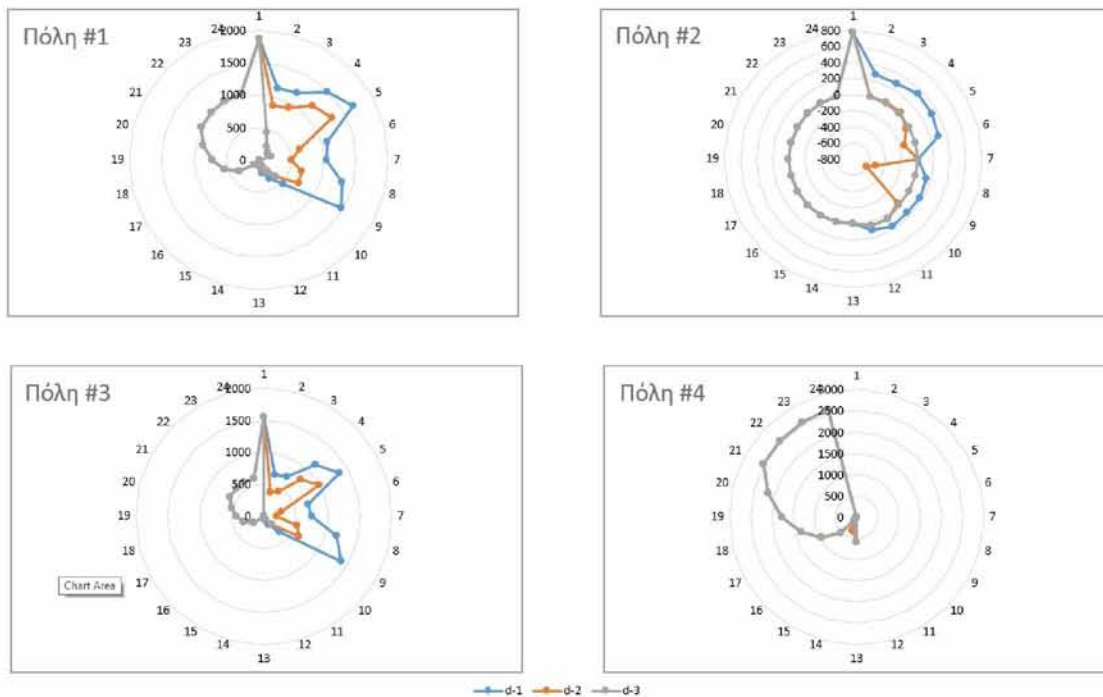


Σχήμα 6.2: Παρατήρηση της βελτίωσης (διαφορά μεταξύ ζήτησης και προσφοράς της αγοράς της κάθε φάσης) στην ικανοποίηση της ζήτησης στις τρεις διαφορετικές φάσεις για τις τέσσερις πόλεις για την περίπτωση του 10%

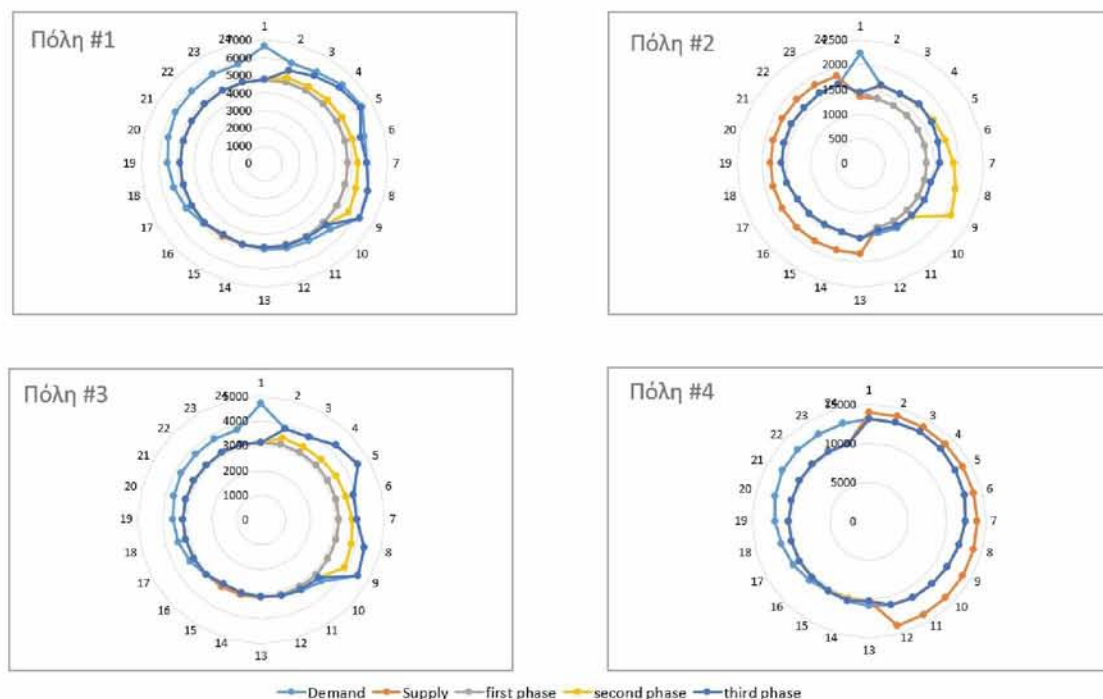


Σχήμα 6.3: Παρατήρηση των τιμών της ζήτησης, της προσφοράς και των αποτελεσμάτων των τριών φάσεων για τις τέσσερις πόλεις για την περίπτωση του 10%

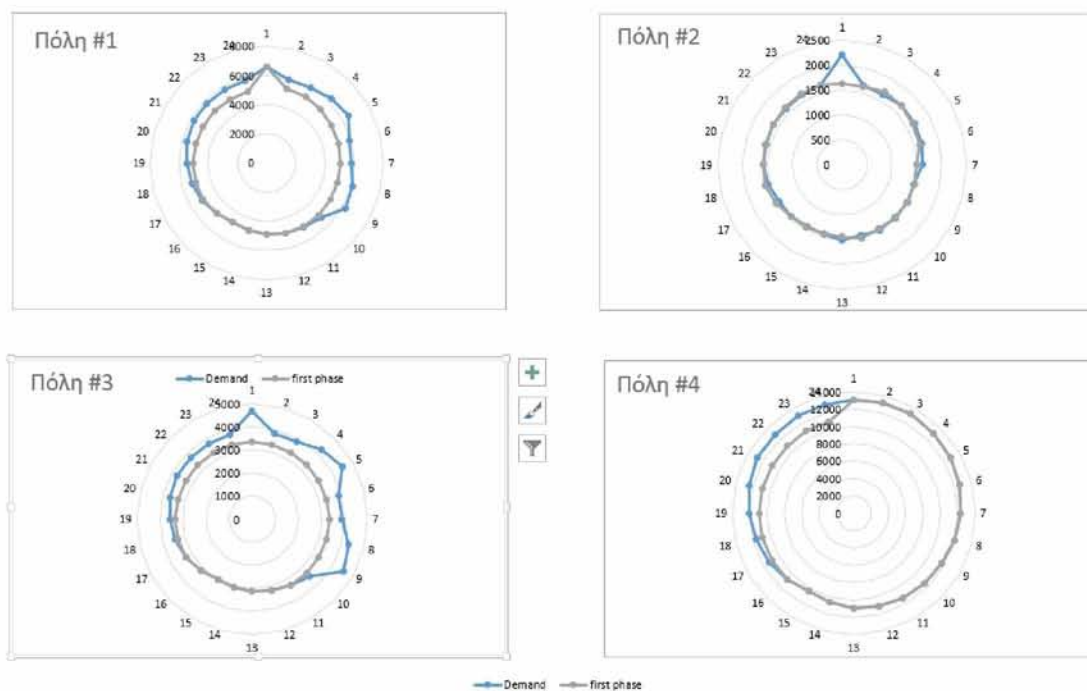




Σχήμα 6.4: Παρατήρηση της βελτίωσης (διαφορά μεταξύ ζήτησης και προσφοράς της αγοράς της κάθε φάσης) στην ικανοποίηση της ζήτησης στις τρεις διαφορετικές φάσεις για τις τέσσερις πόλεις για την περίπτωση του 15%



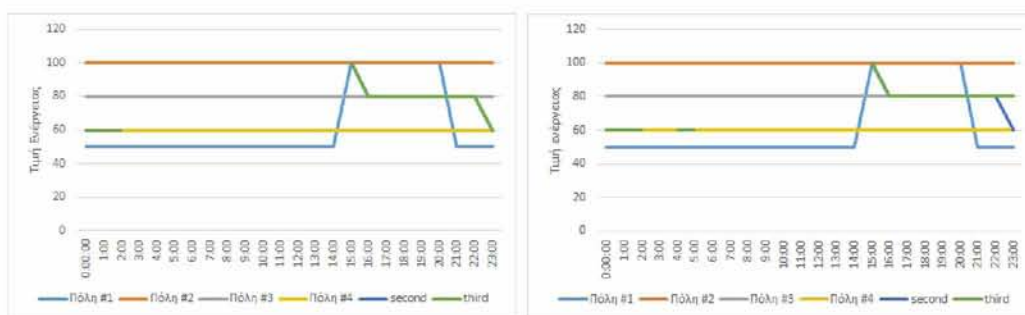
Σχήμα 6.5: Παρατήρηση των τιμών της ζήτησης, της προσφοράς και των αποτελεσμάτων των τριών φάσεων για τις τέσσερις πόλεις για την περίπτωση του 15%



Σχήμα 6.6: Παρατήρηση της ικανοποίησης της ζήτησης με την προσθήκη σε κάθε πόλη ενός επιπλέον εργοστασίου στην περίπτωση που η πόλη θέλει επιπλέον ζήτηση καθώς δεν στρέφεται στη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου

Στην συνέχεια θα παρουσιαστούν τα αποτελέσματα (βλέπε εικόνα 6.6) των πειραμάτων για την περίπτωση που όταν μια πόλη δεν ικανοποιείται από την τοπική της αγορά δεν στρέφεται στη δημοπρασία δευτέρου επιπέδου ώστε να ζητήσει την ποσότητα αλλά προς το εφεδρικό εργοστάσιο της πόλης. Η ποσότητα που θα προσφέρει το εν λόγω εργοστάσιο θα είναι μεγαλύτερη ή ίση της ποσότητας που θέλει η πόλη σε τιμή μεγαλύτερη ή ίση της τιμής που προσφέρει το τοπικό εργοστάσιο της πόλης. Σε αυτή την περίπτωση δεν θα υπάρχει σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των τριών φάσεων παρά μόνο επαλήθευση κατά πόσο ικανοποιείται η ζήτηση και την συνολική περίσσεια ενέργειας που μπορούν να δώσουν οι πόλεις.

Αξίζει να σημειωθεί εδώ πως και η τιμή της ενέργειας παίζει σημαντικό ρόλο στην λειτουργία της ηλεκτρικής αγοράς. Υπάρχουν περιπτώσεις που η υψηλή τιμή στην οποία προσφέρεται η ενέργεια να μην δίνει την δυνατότητα ικανοποίησης των καταναλωτών παρόλο που η ποσότητα ζήτησης είναι διαθέσιμη. Στις εικόνες βλέπουμε την τιμή στην οποία πωλείται η ενέργεια σε κάθε πόλη (τιμή πρώτης φάσης) καθώς στην δεύτερη και τρίτη φάση.



Σχήμα 6.7: Παρατήρηση της τιμής στις τρεις φάσεις στην περίπτωση που η προσφορά είναι το 10%(σχήμα στα αριστερά) και το 15% (σχήμα στα δεξιά) του μέσου όρου της ζήτησης. Η μη συνεχής γραμμή υποδηλώνει την αδυναμία καθορισμού σημείου ισορροπίας λόγω υψηλής τιμής.



# Κεφάλαιο 7

## Επίλογος

### 7.1 Συμπεράσματα

Στην παρούσα διπλωματική μελετήθηκε κατά πόσο είναι η δημιουργία μίας πλατφόρμας με στόχο την μελέτη των προσεγγίσεων που αφορούν την λειτουργία μιας αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας που θα στηρίζεται στην ενεργό συμμετοχή τόσο των παραγωγών όσο και των καταναλωτών εφόσον είναι τα δύο βασικά συστατικά ώστε να λειτουργήσει η αγορά .

Με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα που παρατίθενται παραπάνω συμπεράναμε πως η λειτουργία μιας ηλεκτρικής αγοράς με την προσφορά και την ζήτηση να είναι μεταβαλλόμενες κάθε χρονική στιγμή είναι εφικτή. Υπάρχουν φυσικά περιπτώσεις όπου κάποιες πόλεις δεν ικανοποιούνται πλήρως. Για αυτό το λόγο έγινε επέκταση της λειτουργίας της ηλεκτρικής αγοράς με την προσθήκη ενός επιπλέον εργοστασίου παραγωγής και προσφοράς ενέργειας για κάθε πόλη που θα προσφέρει την ενέργεια που παράγει όταν η πόλη δεν ικανοποιείται πλήρως από το πρωτεύων τοπικό εργοστάσιο. Σε αυτή την περίπτωση οι περιπτώσεις μη ικανοποίησης μιας πόλης είναι αισθητά λιγότερες χωρίς όμως να έχουν εξαλειφθεί πλήρως. Αυτό αποτελεί και κίνητρο για μελλοντική επέκταση της πλατφόρμας ώστε όλες οι πόλεις να ικανοποιούνται πλήρως. Στο τέταρτο κεφάλαιο έγινε μια αναφορά για την μέθοδο βελτιστοποίησης που βασίζεται στην Θεωρία Παιγνίων. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε στην πλατφόρμας προσομοίωσης σαν μέθοδος λήψης αποφάσεων όσον αφορά την τιμή και την ποσότητα που θα επιλέγει να αγοράζει ή να πουλάει κάθε συμμετέχων στην αγορά. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως εξαιτίας του γεγονότος ότι η ενέργεια είναι αγαθό το οποίο ακολουθεί τους κανόνες της προσφοράς και της ζήτησης, δηλαδή η τιμή της και η ποσότητα της ενέργειας εξαρτάται από εξωτερικούς παράγοντες, η καλύτερη μέθοδος βελτιστοποίησης θα ήταν η Θεωρία Παιγνίων Υπό Συνθήκες «Στιρλινγ, 2012». Τα αποτελέσματα της εν λόγω επέκτασης συγκρίθηκαν με αυτά της αρχικής πλατφόρμας και παρατηρήθηκε πως η ζήτηση των καταναλωτών ικανοποιείται περισσότερο.

Επιπρόσθετα, μακροπρόθεσμος στόχος της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί η απάντηση των ερωτημάτων που αφορούν τις αλληλεπιδράσεις και τις αλληλεξαρτήσεις μεταξύ τόσο των πόλεων, όσο και των παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας στην προσπάθειά τους να καλύψουν τις ενεργειακές απαιτήσεις των καταναλωτών για κάθε δεδομένη χρονική στιγμή

σε συνδυασμό με μία πληθώρα άλλων παραγόντων, όπως για παράδειγμα η ροή σε βρόχο (loop flow) και τα προβλήματα συμφόρησης (congestion). Επίσης, υπάρχει και η δυνατότητα για επιπλέον επέκταση των προσομοιώσεων, σε προσομοιώσεις ευρείας κλίμακας πραγματικών παραγωγών και καταναλωτών, οι οποίοι θα καθορίζουν σύμφωνα με τις δικές τους ανάγκες και απαιτήσεις τις προσφορές στην αγορά που θα συμμετέχουν. Ταυτόχρονα, θα υπάρχει και η δυνατότητα στην συμμετοχή παραγωγών και καταναλωτών που οι ιδιότητες τους (τιμή και ποσότητα ενέργειας) είναι προκαθορισμένες. Η προσομοίωση του μοντέλου μας θα είναι πραγματικού χρόνου και έτσι καταναλωτές και παραγωγοί θα πληροφορούνται για την τιμή της ενέργειας ανά kWh άμεσα και θα γνωρίζουν αν ικανοποιούνται ή όχι. Επίσης, στα άμεσα σχέδια μας είναι η ανακατανομή των κερδών. Η ιδέα είναι να διεξάγονται day-ahead δημοπρασίες οι οποίες θα αποτελούν κάποιο είδος δέσμευσης για την επόμενη μέρα, αλλά και δημοπρασίες πραγματικού χρόνου κατά την διάρκεια της ίδιας της μέρας. Όπως είναι προφανές υπάρχει περίπτωση να υπάρχει διαφορά στην ποσότητα που διαμορφώνεται ανάμεσα στις δύο δημοπρασίες. Όταν για μια μέρα η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια που προσφέρεται και κατά συνέπεια η τιμή διαφορετική τότε η επιπλέον ενέργεια θα αγοράζεται στην τιμή πραγματικού χρόνου, ενώ η υπόλοιπη στην τιμή για την οποία υπάρχει δέσμευση από την day-ahead δημοπρασία. Τα επιπλέον κέρδη θα ανακατανέμονται πίσω στους συμμετέχοντες δίνοντας έτσι την δυνατότητα σύναψης συμβολαίων, διαδικασία όχι τόσο προφανή κατά την προσπάθεια δημιουργίας ενός άκρως ανταγωνιστικού περιβάλλοντος, αλλά και την δυνατότητα ανακούφισης των καταναλωτών από πάγιες χρεώσεις, όπως για παράδειγμα για την συντήρηση του συστήματος.

## Κεφάλαιο 8

# Appendix

Στο παρόν κεφάλαιο σας παρουσιάζουμε διάφορους ορισμούς και παρατηρήσεις για την βαθύτερη κατανόηση την έννοια της Nikaido-Isoda και κυρίως την λειτουργία και την χρήση της στην οικονομία της ηλεκτρικής ενέργειας. Για τον αλγόριθμο χαλάρωσης για να συγκλίνει σε ένα μοναδικό ισορροπίας, η Nikaido-Isoda πρέπει να είναι μια συνάρτηση ασθενώς κυρτή-κοίλη. Οι έννοιες της αδύναμης κυρτότητας και κοιλότητας αποδυναμώνει την έννοια της αυστηρής κυρτότητας και κοιλότητας. Η οικογένεια των ασθενώς κυρτών-κοίλων συναρτήσεων περιλαμβάνει τις smooth συναρτήσεις. Οι συναρτήσεις κέρδους στην οικονομικά ενέργειας είναι ασθενώς κύρτεσ-κοίλες.

Πιο αναλυτικά: Η συνάρτηση  $f(x)$  είναι ασθενώς κυρτή αν για  $\forall x, y \in X$  ισχύει η παρακάτω ανισότητα

$$\begin{aligned} af(x) + (1-a)f(y) &\geq f(ax + (1-a)y) + a(1-a)r(x, y) \\ 0 \leq a \leq 1 \text{ και } \frac{r(x, y)}{\|x - y\|} &> 0 \text{ όταν } \|x - y\| > 0 \forall x \in X \end{aligned} \quad (8.1)$$

Αντίστοιχα μια συνάρτηση  $f(x)$  είναι ασθενώς κοίλη αν για  $\forall x, y \in X$  ισχύει η παρακάτω ανισότητα

$$\begin{aligned} af(x) + (1-a)f(y) &\leq f(ax + (1-a)y) + a(1-a)\mu(x, y) \\ 0 \leq a \leq 1 \text{ και } \frac{\mu(x, y)}{\|x - y\|} &> 0 \text{ όταν } \|x - y\| > 0 \forall x \in X \end{aligned} \quad (8.2)$$

Μια συνάρτηση τώρα δύο παραμέτρων είναι  $f(x, y)$  είναι ασθενώς κυρτή και κοιρτή ταυτόχρονα αν ικανοποιεί την συνθήκη για να είναι κυρτή ως προς την μια παράμετρο και την συνθήκη για να είναι κοίλη ως προς την άλλη παράμετρο. Δηλαδή, για  $z \in X$  ισχύει:

$$\begin{aligned} af(x, z) + (1-a)f(y, z) &\geq f(ax + (1-a)y, z) + a(1-a)r(x, y; z) \\ x, y \in X \text{ } 0 \leq a \leq 1 \text{ και } \frac{r(x, y; z)}{\|x - y\|} &> 0 \text{ όταν } \|x - y\| > 0 \forall x \in X \end{aligned} \quad (8.3)$$

και

$$af(z, x) + (1 - a)f(z, y) \leq f(z, ax + (1 - a)y) + a(1 - a)\mu(x, y; z)$$

$$x, y \in X \quad 0 \leq a \leq 1 \quad \text{και} \quad \frac{\mu(x, y; z)}{\|x - y\|} > 0 \quad \text{οταν} \quad \|x - y\| > 0 \quad \forall x \in X \quad (8.4)$$

όπου οι όροι  $\mu(x, y; z), r(x, y; z)$  αποτελούν το περιθώριο σφάλματος.

Η έννοια της ασθενούς κοιλότητας και κυρτότητας είναι μέρος της έννοιας της αυστηρής κοιλότητας και κυρτότητας. Η διαφορετική επιλογή των ορών σφάλματος αποδεικνύει πως υπάρχουν πολλές κοίλες συναρτήσεις που μπορεί να είναι ασθενώς κυρτές και το αντίθετο.

Στην περίπτωση μας οι όροι  $\mu(x, y; z), r(x, y; z)$  μπορούν να πάρουν την εξής μορφή:

$$r(x, y; y) = \frac{1}{2} \langle A(x, x)(x - y), x - y \rangle + o_1(\|x - y\|^2) \quad (8.5)$$

και

$$\mu(y, x; x) = \frac{1}{2} \langle B(x, x)(x - y), x - y \rangle + o_2(\|x - y\|^2) \quad (8.6)$$

όπου ο πίνακας  $A$  είναι η *Hessian* παραγωγή της σχέσης (5.9) ως προς  $x$  ενώ ο πίνακας  $B$  *Hessian* παραγωγή της ίδιας σχέσης ως προς  $y$ .



## Κεφάλαιο 9

# Μεταφράσεις Ξένων όρων

### Μετάφραση

ισορροπίας κατά Ναϋ

δημοπρασία - πλειστηριασμός

προσφορά - πλειοδοσία

κεντρική οντότητα

Πολυπαρακτορικό Σύστημα

### Αγγλικός όρος

Nash equilibrium

auction

bid

system operator

MAS



# Βιβλιογραφία

- [1] D. Aliprantis, S. Penick, L. Tesfatsion και Huan Zhao. Integrated retail and wholesale power system operation with smart-grid functionality. Στο *Power and Energy Society General Meeting, 2010 IEEE*, σελίδες 1 –8, 2010.
- [2] Luiz Augusto N. Barroso, Marcia Helena Costa Fampa, Rafael Kelman, Mario V. F. Pereira και Priscila Lino. Market Power Issues in Bid-Based Hydrothermal Dispatch. *Annals of Operations Research*, 117:247–270, 2002.
- [3] Steffan Berridge, , Steffan Berridge, Jacek και B. Krawczyk. Relaxation algorithms in finding nash equilibria. Στο *In Computational Economics from Economics Working Paper Archive at WUSTL*, 1997.
- [4] M. Carrion, A.J. Conejo και J.M. Arroyo. Forward contracting and selling price determination for a retailer. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 22(4):2105 – 2114, 2007.
- [5] C.Y. Choo, N. K.C. Nair και B. Chakrabarti. Impacts of loop flow on electricity market design. Στο *Power System Technology, 2006. PowerCon 2006. International Conference on*, σελίδες 1 –8, 2006.
- [6] Javier Contreras, Matthias Klusch και Jacek B. Krawczyk. Numerical solutions to Nash-Cournot equilibria in coupled constraint electricity markets. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19:195–206, 2004.
- [7] S. De La Torre, J.M. Arroyo, A.J. Conejo και J. Contreras. Price maker self-scheduling in a pool-based electricity market: a mixed-integer lp approach. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 17(4):1037 – 1042, 2002.
- [8] Maria Fasli. Simulated electronic markets: Design and implementation. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ., University of Essex, χ.χ.
- [9] S.A. Gabriel, A.J. Conejo, M.A. Plazas και S. Balakrishnan. Optimal price and quantity determination for retail electric power contracts. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 21(1):180 – 187, 2006.
- [10] William W. Hogan. Competitive Electricity Market Design: A Wholesale Primer. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ., Harvard University, 1998.

- [11] William W. Hogan. Multiple market-clearing prices electricity market design and price manipulation. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ., Harvard University, 2012.
- [12] R. S. Khemani και D. M. Shapiro. Glossary of industrial organisation economics and competition law. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ., OECD, 1993.
- [13] Rafik Fainti Manolis Vavalis, Lefteris Tsoukalas και Nasiakoy Antonia. "simulations for battery powered vehicles on fixed routes. σελίδες 1–57, 2012.
- [14] Lars Mathiesen. Regulation of pollution in a cournot equilibrium. Διςυσσιον Παπερ , Institution for Economics, , 2008.
- [15] Nguyen, Wong και Ilic. Determining the nash equilibrium of "black-box" electricity markets. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 2005.
- [16] Martin J. Osborne. *An Introduction to Game Theory*. Oxford University Press, USA, 2003.
- [17] M.A. Plazas, A.J. Conejo και F.J. Prieto. Multimarket optimal bidding for a power producer. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 20(4):2041 – 2050, 2005.
- [18] Yoav Shoham. Computer science and game theory. *Commun. ACM*, 51(8):74–79, 2008.
- [19] S. Stoft. *Power System Economics: Designing Markets for Electricity*. IEEE Press. IEEE Press, 2002.
- [20] Z. Vale T. Nogueira, A. Vale. An electricity day-ahead market simulation model. 2003.
- [21] GridLab D Team. Powerflow module. Διςυσσιον Παπερ , Institution for Economics, , 2012.
- [22] Gridlabd Team. Market module. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ., PNNL, 2012.
- [23] Ericvan Damme και Dave Furth. Game theory and the market. Τεχνική Αναφορά υπ. αριθμ., CentER, Tilburg University, 2003.

