ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βέλτιστη Επιλογή Εταιρείας Ηλεκτρικής Ενέργειας & Διαχείριση της Απόκρισης της Ζήτησης βασισμένη στη Μηχανική Μάθηση και στη Θεωρία Παιγνίων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΥ ΠΑΥΛΟΥ-ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

Επιβλέπων : Καθ. Συμεών Παπαβασιλείου

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ, ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ

Βέλτιστη Επιλογή Εταιρείας Ηλεκτρικής Ενέργειας & Διαχείριση της Απόκρισης της Ζήτησης βασισμένη στη Μηχανική Μάθηση και στη Θεωρία Παιγνίων

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΥ ΠΑΥΛΟΥ-ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ

Επιβλέπων : Καθ. Συμεών Παπαβασιλείου

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 31 Οκτωβρίου 2017

.....	.....	.....
Συμεών Παπαβασιλείου	Θεοδώρα Βαρβαρίγου	Ιωάννα Ρουσσάκη
Καθηγητής Ε.Μ.Π.	Καθηγήτρια Ε.Μ.Π	Επίκουρη Καθηγήτρια Ε.Μ.Π

Αθήνα, Οκτώβριος 2017

.....

ΑΠΟΣΤΟΛΟΠΟΥΛΟΣ ΠΑΥΛΟΣ-ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ

Διπλωματούχος Ηλεκτρολόγος Μηχανικός και Μηχανικός Υπολογιστών Ε.Μ.Π.

Copyright © Αποστόλοπουλος Παύλος-Αθανάσιος, 2017

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς τον συγγραφέα. Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να

ερμηνευθεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου και επιβλέποντα της διπλωματικής εργασίας κ. Συμεών Παπαβασιλείου, ο οποίος εμπιστεύθηκε στο πρόσωπο μου την ανάθεση ενός ιδιαίτερα ενδιαφέροντος και απαιτητικού επιστημονικού έργου, διευρύνοντας τους πνευματικούς μου ορίζοντες μετά την πενταετή φοίτηση μου στο Ε.Μ.Π.

Επιπλέον, θα ήθελα ιδιαίτερα να ευχαριστήσω την καθηγήτρια του Πανεπιστήμιου Νέου Μεξικού κ. Ειρήνη-Ελένη Τσιροπούλου, η οποία σε ολόκληρη την διάρκεια της διπλωματικής εργασίας, υπήρξε πολύτιμος καθοδηγητής, παρέχοντας μου συμβουλές και υποστήριξη σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή.

Τέλος, θα ήθελα να δηλώσω την ευγνωμοσύνη μου στην οικογένεια μου, η οποία στην δημιουργική αυτή περίοδο, όπως και σε όλη την μέχρι τώρα ζωή μου υπήρξε πάντα δίπλα μου στις καλές και στις δύσκολες στιγμές.

Αφιερώνεται στην

οικογένεια μου

Περίληψη

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η μελέτη του σύνθετου προβλήματος βέλτιστης επιλογής εταιρείας ηλεκτρικής ενέργειας σε συνδυασμό με τη διαχείριση της απόκρισης της ζήτησης σε ένα έξυπνο δίκτυο διανομής που αποτελείται από πολλαπλές εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής και πολλαπλούς χρήστες - καταναλωτές, με την εν λόγω διαχείριση να είναι βασισμένη στην μηχανική μάθηση και στη θεωρία παιγνίων.

Στα πλαίσια αυτής της εργασίας, κάθε εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας χαρακτηρίζεται από τη φήμη και την ανταγωνιστικότητα της. Οι πελάτες που ενεργούν ως αυτοματοποιημένα συστήματα εκμάθησης προσπαθούν ανεξάρτητα να μεγιστοποιήσουν το όφελος τους, το οποίο εκφράζεται με μία συνάρτηση ευχαρίστησης. Από την άλλη πλευρά οι εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας προσπαθούν εξίσου ανεξάρτητα να μεγιστοποιήσουν τη δική τους συνάρτηση ευχαρίστησης, η οποία είναι άμεσα συνδεδεμένη με το κέρδος που επιτυγχάνουν από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως, οι καταναλωτές επιλέγουν την πιο κατάλληλη εταιρεία παροχής ηλεκτρικού ρεύματος σύμφωνα με την προσφερόμενη τιμή και τις ανάγκες τους σε ηλεκτρική ενέργεια. Η βέλτιστη επιλογή αυτή επιτυγχάνεται με την εφαρμογή τεχνικής μάθησης.

Δεδομένης της επιλογής της εταιρείας της ηλεκτρικής ενέργειας των πελατών, το πρόβλημα διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης (Demand Response Management - DRM) διατυπώνεται ως ένα πλαίσιο θεωρητικής βελτιστοποίησης παιγνίου δύο σταδίων, όπου στο πρώτο στάδιο προσδιορίζεται η βέλτιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τους πελάτες και στο δεύτερο στάδιο υπολογίζεται η βέλτιστη τιμολόγηση από την πλευρά των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας. Η έξοδος του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης τροφοδοτεί το σύστημα εκμάθησης με σκοπό τη δημιουργία γνώσης και την ολοκλήρωση της βέλτιστης επιλογής της εταιρείας ηλεκτρικής ενέργειας.

Για το σκοπό αυτό προτείνεται ένας επαναληπτικός αλγόριθμος για την εκμάθηση της μάθησης της βέλτιστης επιλογής από την πλευρά των πελατών καθώς επίσης και για την βέλτιστη διαχείριση της ζήτησης του δικτύου από την πλευρά των εταιρειών. Ο αλγόριθμος αυτός προτείνει ένα βέλτιστο πλάνο κατανάλωσης για τους πελάτες το οποίο μεγιστοποιεί την συνάρτηση ευχαρίστησης τους, ενώ συγχρόνως προσδιορίζει την πιο επωφελούμενη τιμολόγηση της ηλεκτρικής ενέργειας από την πλευρά των εταιρειών. Η απόδοση της προτεινόμενης προσέγγισης αξιολογείται μέσω μοντελοποίησης και προσομοίωσης .

Λέξεις κλειδιά: <<συνάρτηση ευχαρίστησης, σύστημα εκμάθησης, μοντελοποίηση του DRM προβλήματος ως παίγνιο δύο σταδίων, βέλτιστο πλάνο κατανάλωσης πελατών και τιμολόγησης ηλεκτρικής ενέργειας.>>

Abstract

In this diploma thesis, the combined problem of power company selection and Demand Response Management in a smart grid network consisting of multiple power companies and multiple customers is studied via adopting a machine learning and game-theoretic technique.

Each power company is characterized by its reputation and competitiveness. The customers who act as learning automata select the most appropriate power company to be served, in terms of price and electricity needs' fulfillment, via a machine learning based mechanism. Given customer's power company selection, the Demand Response Management problem is formulated as a two-stage game theoretic optimization framework, where at the first stage the optimal customer's electricity consumption is determined and at the second stage the optimal power companies' pricing is calculated. The output of the DRM problem feeds the learning system in order to build knowledge and conclude to the optimal power company selection.

A two-stage Power Company learning selection and Demand Response Management (PC-DRM) iterative algorithm is proposed in order to realize the machine learning power company selection and the two-stage distributed Demand Response Management framework. The performance of the proposed approach is evaluated via modeling and simulation and its superiority against other state of the art approaches is illustrated.

Keywords: << Power Company Selection, Demand Response Management, Competitiveness, Machine Learning, Game Theory >>

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΡΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο 15

ΕΙΣΑΓΩΓΗ 16

1.1 Έξυπνα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας 17

1.2 Συναρτήσεις Ευχαρίστησης 18

1.3 Σχετικές εργασίες στα έξυπνα δίκτυα διανομής ενέργειας 20

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο 22

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ (Demand Response Management - DRM) 23

2.1 Περιγραφή του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης (Demand Response Management - DRM) και σχετικές εργασίες 24

2.2 Μοντελοποίηση του Συστήματος 26

2.2.1 Μοντελοποίηση του Συστήματος από την πλευρά των καταναλωτών 27

2.2.2 Μοντελοποίηση του Συστήματος από την πλευρά των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας 31

2.3 Μοντελοποίηση του “Έξυπνου Δικτύου” ως Σύστημα Μάθησης 33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο 36

ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ 37

3.1 Διατύπωση του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης 38

3.2 Στάδιο καθορισμού της βέλτιστης κατανάλωσης των χρηστών 39

3.3 Στάδιο καθορισμού της βέλτιστης τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας από τις εταιρείες 43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο 46

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ 47

4.1 Αλγόριθμος της εκμάθησης της επιλογής εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής και διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης 48

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο 51

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ 52

5.1 Μελέτη του Συστήματος Εκμάθησης 53

5.2 Σύγκλιση του αλγορίθμου για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα 55

5.3 Σύγκλιση του Αλγορίθμου για το σύνολο των χρονικών διαστημάτων 61

5.4 Βαθύτερη μελέτη του τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου και της βέλτιστης προτεινόμενης λύσης 64

5.5 Τελικά Συμπεράσματα 72

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο 74

ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΕΠΟΜΕΝΟΙ ΣΤΟΧΟΙ 75

6.1 Σύνοψη του αλγορίθμου και επόμενοι στόχοι 76

REFERENCES 78

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Έξυπνα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας
1.2 Συναρτήσεις ευχαρίστησης
1.3 Σχετικές εργασίες στα έξυπνα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

1.1 Έξυπνα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας

Είναι γεγονός ότι στις μέρες μας πραγματοποιείται μια επανάσταση στα δίκτυα διανομής ενέργειας. Η αύξηση των χρηστών και των απαιτήσεων τους καθώς και το όλο αυξανόμενο ανταγωνιστικό περιβάλλον στο οποίο καλούνται να συνυπάρξουν οι εταιρείες παροχής ηλεκτρικής ενέργειας μαρτυρούν ότι νέα έξυπνα δίκτυα διανομής θα πρέπει να μελετηθούν και να αναπτυχθούν. Το υπάρχον δίκτυο λοιπόν, βρίσκεται υπό μεγάλη πίεση από τις διάφορες προκλήσεις και ανάγκες που προκύπτουν από το περιβάλλον, τους καταναλωτές, την αγορά αλλά και από θέματα της υπάρχουσας υποδομής. Αυτές οι προκλήσεις και ανάγκες είναι περισσότερο σημαντικές και επείγουσες από ποτέ και έχουν οδηγήσει το δίκτυο σε επέκταση αλλά και σε ενίσχυση των λειτουργιών του προς εξυπνότερα χαρακτηριστικά, με τη βοήθεια των ταχύτατα αναπτυσσόμενων τεχνολογιών. Η στροφή στην ανάπτυξη των δικτύων μεταφοράς ώστε να είναι πιο έξυπνα έχει συνοπτικά οριστεί ως "Έξυπνο Δίκτυο". Μερικοί από τους βασικούς στόχους των νέων αυτών έξυπνων δικτύων διανομής ενέργειας είναι η βέλτιστη εξυπηρέτηση των αναγκών των καταναλωτών καθώς επίσης και η υγιή κερδοφόρα επιβίωση των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας [1].

Ο όρος “Έξυπνο Δίκτυο” χρησιμοποιείται ήδη από τα τέλη του 2003 ενώ η πρώτη εμφάνιση του όρου χρονολογείται αρκετά νωρίτερα. Υπάρχουν αρκετοί ορισμοί για το “Έξυπνο Δίκτυο” που εστιάζουν είτε στην λειτουργία του, είτε στην τεχνολογία του. Το κοινό σημείο όλων είναι η εφαρμογή της ψηφιακής επεξεργασίας και των επικοινωνιών στο ηλεκτρικό δίκτυο, με τη ροή των δεδομένων και τη διαχείριση τους να γίνεται από ένα κεντρικό σύστημα που λέγεται “Έξυπνο Δίκτυο” [2].

Η ιδέα του έξυπνου δικτύου, αφορά ένα δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας το οποίο μπορεί να ενσωματώσει ευφυώς τις δράσεις όλων των χρηστών που είναι συνδεδεμένοι με αυτό, παραγωγούς ή καταναλωτές, προκειμένου να παρέχει αποτελεσματικά βιώσιμο, οικονομικό και ασφαλή εφοδιασμό ηλεκτρικής ενέργειας. Ένα έξυπνο δίκτυο, χρησιμοποιεί καινοτόμα προϊόντα και υπηρεσίες, σε συνδυασμό με ευφυή παρακολούθηση και έλεγχο της κατάστασης του δικτύου [3].

Το “Έξυπνο Δίκτυο” συνδέει την προσφορά και τη ζήτηση επιτρέποντας και στους παραγωγούς και στους καταναλωτές να ορίζουν τις λειτουργικές τους συνήθειες πιο ευέλικτα και εξελιγμένα. Έτσι για παράδειγμα, οι καταναλωτές έχουν την δυνατότητα να καταναλώσουν σε υψηλές τιμές μόνο για εξαιρετικά σημαντικούς λόγους και να διαμορφώσουν τον τρόπο κατανάλωσης τους ανάλογα με τις πληροφορίες που έχουν για την

παρούσα τιμή κατανάλωσης. Από την άλλη πλευρά οι παραγωγοί με μεγάλη ευελιξία μπορούν να διαμορφώσουν την τιμή πώλησης ώστε να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους, ενώ συγχρόνως ανάλογα με τα εκάστοτε κόστη παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν την δυνατότητα να προσφέρουν χρονικές περιόδους εκπτώσεων στους καταναλωτές, επεκτείνοντας έτσι την διαφημιστική τους επιρροή και κερδίζοντας περισσότερους χρήστες.

Σε συνδυασμό με τις προσφερόμενες ιδιότητες του έξυπνου δικτύου, η απελευθέρωση της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας η οποία ξεκίνησε την προηγούμενη δεκαετία, ή και ακόμα νωρίτερα, ιδιαίτερα στις Ηνωμένες Πολιτείες της Αμερικής, έχει οδηγήσει στην όλο και περισσότερη εγκαθίδρυση των έξυπνων δικτύων. Οι καταναλωτές έχουν πλέον την δυνατότητα να επιλέξουν την εταιρεία από την οποία αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια. Στη Μασαχουσέτη, η αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας απελευθερώθηκε το 1997 [4], στο Μέριλαντ το 1999 και στο Τέξας το 2002 [5]. Η απελευθέρωση της αγοράς της ηλεκτρικής ενέργειας αναγκάζει τους ισχυρούς της αγοράς να δημιουργήσουν ένα φθηνότερο, καθαρότερο και πιο αξιόπιστο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας.

1.2 Συναρτήσεις Ευχαρίστησης

Οι συναρτήσεις ευχαρίστησης έχουν χρησιμοποιηθεί σε μεγάλη κλίμακα στην πρόσφατη βιβλιογραφία, έτσι ώστε να μοντελοποιήσουν διάφορα προβλήματα κατανομής πόρων και να απεικονίσουν την λαμβανόμενη ευχαρίστηση των χρηστών/καταναλωτών. Μονοπαραμετρικά προβλήματα κατανομής πόρων έχουν μελετηθεί με τη χρήση της θεωρίας παιγνίων [6] – [12], καθώς επίσης και πολυπαραμετρικά προβλήματα κατανομής πόρων τα οποία προϋποθέτουν διαφορετική μαθηματική προσέγγιση [13] – [18]. Επιπρόσθετα, οι συναρτήσεις ευχαρίστησης έχουν χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσουν πολύπλοκες και πολυεπίπεδες δομές δικτύων, όπως και στην περίπτωση των έξυπνων δικτύων καθώς θα αναλυθεί στα επόμενα κεφάλαια [19] – [29]. Επιπλέον, οι πόροι ενός δικτύου που πρόκειται να δια- μοιραστούν στους καταναλωτές μπορεί να διαφέρουν στη φύση τους και στις ιδιότητές τους, π.χ., συνεχείς και διακριτοί πόροι. Για το λόγο αυτό κατάλληλα μοντέλα έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία ώστε οι συναρτήσεις ευχαρίστησης να συσχετίζουν τα χαρακτηριστικά των πόρων του δικτύου με τη λαμβανόμενη ευχαρίστηση των καταναλωτών [30] – [38]. Οι συναρτήσεις ευχαρίστησης έχουν χρησιμοποιηθεί για να μοντελοποιήσουν ακόμα και τη συμπεριφορά των καταναλωτών και να απεικονίσουν τις ψυχολογικές παραμέτρους που τους χαρακτηρίζουν [39]-[41].

Με βάση την παραπάνω ανάλυση εξάγεται το συμπέρασμα ότι οι συναρτήσεις χρησιμότητας είναι ένας τρόπος απεικόνισης του βαθμού ικανοποίησης τόσο των καταναλωτών όσο και των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας. Από την πλευρά των καταναλωτών ο βαθμός ικανοποίησης έχει να κάνει με την αντιλαμβανόμενη ποιότητα υπηρεσίας που λαμβάνει ο χρήστης σε σχέση με αυτή που απαιτείται, ενώ όσον αφορά τις εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας η συνάρτηση ευχαρίστησης αντιπροσωπεύει την ικανοποίηση των εταιρειών σε σχέση με το κέρδος που επιφέρει ένα συγκεκριμένο πλάνο τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας. Οι συναρτήσεις ευχαρίστησης προέρχονται κυρίως από την μελέτη οικονομικών συστημάτων αλλά λόγω της ευρείας χρήσης τους και της αποτελεσματικότητας τους αποτελούν πλέον ένα εργαλείο αρκετά διαδεδομένο, έχοντας εφαρμογή σε αρκετά ερευνητικά πεδία.

Στην [42] η εφαρμογή οικονομικών συναρτήσεων χρησιμότητας συμβάλλει στην αντιμετώπιση προκλήσεων σχετικά με τη διαχείριση και την ανάπτυξη επιχειρήσεων, την ασφάλεια συστημάτων και λογισμικού, ενώ στην [43] οι συναρτήσεις ευχαρίστησης χρησιμοποιούνται για την ανάλυση ρίσκου και για την περιγραφή του ποσοστού επένδυσης σε οικονομικά επενδυτικά μοντέλα τα οποία βασίζονται σε πολλαπλές στοχαστικές διαδικασίες.

Τελείως διαφορετική χρήση των εν λόγω συναρτήσεων γίνεται στην [44] όπου η αποτελεσματικότητα τους χρησιμοποιείται για σκοπούς αναγνώρισης προσώπων, καθώς από ένα σύνολο ταξινομητών (classifiers) γίνεται επιλογή των κατάλληλων σύμφωνα με την τιμή των συναρτήσεων ευχαρίστησης τους, έτσι ώστε με την χρήση αυτών να αντιμετωπιστούν οι δυσκολίες αναγνώρισης προσώπων σε μεγάλο όγκο δεδομένων και σε εικόνες χαμηλής ανάλυσης.

Επιπρόσθετα, ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα στο κόσμο της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί η κυβερνοασφάλεια (cyber security) και πως μπορεί να προστατευτεί η εθνική ηλεκτρική υποδομή με εξασφάλιση της ιδιωτικότητάς των χρηστών. Η χρήση των συναρτήσεων ευχαρίστησης σε σχετική αξιοσημείωτη έρευνα [45] μαρτυρά τη σημασία του ρόλου των συναρτήσεων ευχαρίστησης στον τομέα αυτόν. Παρόμοια εφαρμογή των συναρτήσεων ευχαρίστησης επιτυγχάνεται στην [46], στην οποία σχεδιάζονται κατάλληλες συναρτήσεις ευχαρίστησης για λόγους ασφαλής χρήσης των πόρων του υπολογιστικού σύννεφου.

Τέλος, αρκετά σημαντική είναι η χρήση των συναρτήσεων ευχαρίστησης για την σχεδίαση ανθεκτικών συστημάτων ως προς τη λειτουργικότητα και την ασφάλεια τους. Χρήση

των συναρτήσεων για το σκοπό αυτό γίνεται στην [47], όπου χρησιμοποιούνται με εκφράσεις οικονομικού χαρακτήρα ώστε να σχεδιαστούν ανθεκτικά συστήματα για Ασύρματου Προσωπικής Περιοχής Δικτύου (Wireless Personal Area Network - WPAN) συσκευές σύμφωνα με το πρωτόκολλο IEEE 802.15.4.

1.3 Σχετικές εργασίες στα έξυπνα δίκτυα διανομής ενέργειας

Η ανάγκη ανάπτυξης νέων έξυπνων δικτύων διανομής ενέργειας για την κάλυψη των όλων και αυξανόμενων αναγκών έχει γίνει πλέον επιτακτική ανάγκη στη σύγχρονη κοινωνία. Οι στόχοι και οι ανάγκες είναι πλέον άμεσα συνδεδεμένα με τα έξυπνα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας, όπου η χρήση συναρτήσεων ευχαρίστησης και η διαχείριση της απόκρισης της ζήτησης με νέα θεωρητικά μοντέλα, έχουν πρωταγωνιστικό ρόλο.

Σε τέτοια λοιπόν έξυπνα δίκτυα τα χαρακτηριστικά διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης (Demand Response Management - DRM), της οικονομίας του δικτύου (Network Economics - NE) και της επιλογής της εταιρείας ηλεκτρισμού διαμορφώνουν την αγορά [48]. Η θεωρία της οικονομίας του δικτύου αποσκοπεί στον καθορισμό της τιμής της ηλεκτρικής ενέργειας ώστε να επιτευχθεί επιτυχής διείσδυση στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας [50] . Η διαδικασία επιλογής εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας στοχεύει στη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ των εταιρειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των πελατών, επιτρέποντας ταυτόχρονα στη βέλτιστη επιλογή από την πλευρά των καταναλωτών ώστε να εξοικονομήσουν χρήματα και στην εκπλήρωση της ζήτησης της ηλεκτρικής ενέργειας από την πλευρά των εταιρειών [51].

Στο [52], το πρόβλημα διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης εξετάζεται μόνο από την άποψη των πελατών, καθώς οι συγγραφείς μελετούν το πρόβλημα του ελέγχου φορτίου εφαρμόζοντας έναν διανεμημένο προγραμματισμό κατανάλωσης ενέργειας για τους πελάτες και μία δυναμική στρατηγική τιμολόγησης από τις εταιρείες. Ο προγραμματισμός ισχύος σε πραγματικό χρόνο υπολογίζεται με την υιοθέτηση ενός μοντέλου παιχνιδιών Stackelberg, όπου η εταιρία παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ο ηγέτης, ορίζοντας την τιμή σε πραγματικό χρόνο και τους πελάτες να προγραμματίζουν την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των συσκευών τους. Μια παρόμοια προσέγγιση εξετάζεται στο [53]. Το πρόβλημα της εξισορρόπησης φορτίου και της αποφυγής αιχμών μελετάται στο [54], όπου προτείνεται

ένας αλγόριθμος που βασίζεται σε κίνητρα για τη διαχείριση του οικιακού φορτίου μειώνοντας το συνολικό ενεργειακό κόστος και λαμβάνοντας υπόψη την άνεση και την εξοικονόμηση του χρήστη. Στοχεύοντας επίσης στην εξισορρόπηση του φορτίου, οι συγγραφείς στο [55] προτείνουν μια βέλτιστη στρατηγική τιμολόγησης παιγνίων για έξυπνα δίκτυα, βελτιστοποιώντας την τιμή ανά χρονική περίοδο της ημέρας ώστε το φορτίο καθ' όλη τη διάρκεια της ημέρας να είναι σε ισορροπία και όχι σε καταστάσεις αιχμών.

Το οικιακό πρόβλημα διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης μελετάται στο [56], λαμβάνοντας υπόψη το υποκείμενο δίκτυο διανομής ενέργειας και τους συναφείς περιορισμούς . Το πρόβλημα DRM διατυπώνεται ως πρόβλημα ροής ισχύος και προτείνεται ένας κατανεμημένος αλγόριθμος για τον προσδιορισμό του βέλτιστου προγραμματισμού της ζήτησης, επιτρέποντας ταυτόχρονα τις επικοινωνίες μεταξύ της οντότητας παροχής ηλεκτρικής ενέργειας και των νοικοκυριών. Η άμεση αλληλεπίδραση μεταξύ της εταιρίας ηλεκτρικής ενέργειας και του πελάτη μελετάται στο [57], όπου εξετάζεται το πρόβλημα της κατανομής ενός ορισμένου ποσού προσαρμογής φορτίου από την εταιρία ηλεκτρικής ενέργειας στους πελάτες, με στόχο την ελαχιστοποίηση της συνολικής ζημίας του καταναλωτή.

Στο [58], οι συγγραφείς μελετούν την αλληλεπίδραση μεταξύ ενός παρόχου ενέργειας και πολλών πελατών μέσω μια προσέγγισης παιχνιδιών Stackelberg και προτείνουν έναν αλγόριθμο που στοχεύει στον έλεγχο φορτίων των συσκευών των πελατών. Μια παρόμοια προσέγγιση μελετάται σε [59] και [60], που αφορά πολλαπλές εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας και πολλαπλούς πελάτες, όπου ο στόχος του παιχνιδιού Stackelberg είναι να μεγιστοποιήσει τα έσοδα κάθε εταιρείας ηλεκτρικής ενέργειας και να ελαχιστοποιήσει την ποσό πληρωμής του κάθε πελάτη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΚΑΙ ΜΟΝΤΕΛΟΠΟΙΗΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ (Demand Response Management - DRM)

2.1 Περιγραφή του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης (Demand Response Management - DRM) και σχετικές εργασίες

2.2 Μοντελοποίηση του Συστήματος

a. Μοντελοποίηση του Συστήματος από την πλευρά των καταναλωτών

b. Μοντελοποίηση του Συστήματος από την πλευρά των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας

2.3 Μοντελοποίηση του "Έξυπνου Δικτύου" ως Σύστημα Μάθησης (Learning System)

2.1 Περιγραφή του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης (Demand Response Management - DRM) και σχετικές εργασίες

Με τις όλο και πιο απαιτητικές προκλήσεις της αυξανόμενης ζήτησης, της γήρανσης των υποδομών και της ενσωμάτωσης των ανανεώσιμων πηγών πράσινης ενέργειας, ένας νέος τρόπος αντιμετώπισης των απαιτήσεων αυτών θα πρέπει να αναπτυχθεί από τα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα νέα έξυπνα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας αντιμετωπίζουν τις προκλήσεις αυτές μέσω της διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης. Ουσιαστικά η διαχείριση της απόκρισης της ζήτησης αναφέρεται στην εφαρμογή προγραμμάτων - ρουτινών για τον έλεγχο της κατανάλωσης ενέργειας από την πλευρά των καταναλωτών και τη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης και μείωσης του κόστους από την πλευρά των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας [61] - [64]. Ένας από τους βασικούς στόχους της διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης είναι να μειώσει τις διαφορές μεταξύ των αιχμών κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας και της μέσης κατανάλωσης στο δίκτυο, έτσι ώστε να υπάρχει ισορροπία και ομαλότητα μεταξύ της ζήτησης και της παροχής ηλεκτρικής ενέργειας [48], [65].

Η μοντελοποίηση του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης είναι πολύ σημαντική για την επίτευξη των στόχων του "Έξυπνου Δικτύου". Πιο συγκεκριμένα υπάρχουν αρκετές διαφορετικές μοντελοποιήσεις του εν λόγω προβλήματος, το κοινό σημείο όλων όμως είναι η προσπάθεια ισορρόπησης της ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας από την πλευρά των καταναλωτών αλλά και η εύρεση του καλύτερου πλάνου παροχής και τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας από την πλευρά των εταιρειών για την μείωση του κόστους και την αύξηση του κέρδους.

Στο [66] γίνεται εξέταση και θεώρηση μοντέλων από το χώρο της αγοράς με σκοπό το σχεδιασμό της διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης ώστε να ταιριάζει με την παροχή ενέργειας και να ικανοποιεί τη ζήτηση ισχύος των πελατών. Οι συγγραφείς στο [67] προτείνουν κατανεμημένους αλγόριθμους για τις εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας και για τους καταναλωτές, με στόχο τη μεγιστοποίηση της κοινωνικής ευημερίας. Στο [68] παρουσιάζεται ένας νέος αλγόριθμος για την εύρεση του βέλτιστου χρόνου χρήσης της ηλεκτρικής ενέργειας.

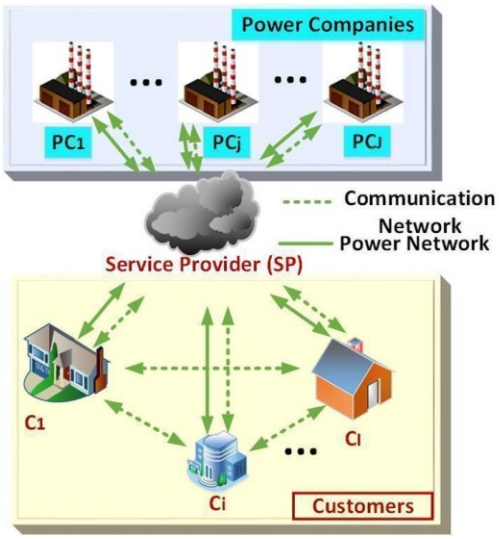
Επιπρόσθετα, εξίσου σημαντική είναι η εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων στη μοντελοποίηση του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης καθώς έχει αποδειχθεί αρκετά αποτελεσματική στην αντιμετώπιση πολύπλοκων αλληλεπιδράσεων. Οι συγγραφείς στο [48] διατύπωσαν το πρόβλημα ως ένα κοίλο (concave) μη συνεργατικό (non-cooperative) παιχνίδι N- ατόμων και μια κατανεμημένη στρατηγική διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης προτείνεται με σκοπό την επίτευξη του ελάχιστου ενεργειακού κόστους. Επίσης στο [52] μελετάται η συμφόρηση του δικτύου και προτείνεται στρατηγική διαχείρισης του φορτίου μοντελοποιημένη ως παίγνιο σε "Έξυπνο Δίκτυο". Οι συγγραφείς στο [69] μελέτησαν το προγραμματισμό της οικιακής κατανάλωσης ενέργειας μέσω του Stackelberg παιγνίου στο οποίο οι εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας είναι οι ηγέτες του δικτύου και οι καταναλωτές είναι οι ακόλουθοι.

Το βασικό σημείο όλων των παραπάνω ερευνών είναι ότι στα έξυπνα δίκτυα διανομής ηλεκτρικής ενέργειας υπάρχει μία μόνο εταιρεία που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια στους καταναλωτές. Παρόλα αυτά όπως έχουμε ήδη επισημάνει η απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας προσδίδει πλέον την δυνατότητα στους καταναλωτές να επιλέξουν μεταξύ πολλών παρόχων ενέργειας [59],[70],[71], κάτι το οποίο επιφέρει νέες προκλήσεις στην αλληλεπίδραση μεταξύ εταιρειών και καταναλωτών. Για αυτό το λόγο είναι επιτακτική πλέον η ανάγκη μελέτης του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης σε ένα περιβάλλον όπου συνυπάρχουν πολλές εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας. Μία πρώτη έρευνα στο εν λόγω περιβάλλον πολλαπλών εταιρειών και πολλαπλών καταναλωτών παρουσιάζεται στο [68], στο οποίο όμως δεν λαμβάνονται υπόψη οι συναρτήσεις ευχαρίστησης των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας.

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής μελετάμε το πρόβλημα διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης στην περίπτωση όπου στο "Έξυπνο Δίκτυο" υπάρχουν πολλαπλές εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας και πολλαπλοί καταναλωτές. Για την πλήρη ανάλυση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των εταιρειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και των πελατών, το πρόβλημα διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης μοντελοποιείται ως ένα παίγνιο δύο σταδίων, το στάδιο των καταναλωτών και το στάδιο των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας. Στο στάδιο των πελατών, κάθε πελάτης επιθυμεί να μεγιστοποιήσει τη συνάρτηση ευχαρίστησης του κάτι το οποίο εξαρτάται άμεσα από την τιμή κατανάλωσης, η οποία εκφράζεται με κατάλληλα κριτήρια δικαιοσύνης σε σχέση με τους υπόλοιπους καταναλωτές του δικτύου. Αξίζει να σημειώσουμε ότι στο προτεινόμενο πλαίσιο έχει αντιμετωπιστεί με διαφορετική προτεραιότητα η μη μεταβαλλόμενη ζήτηση σε σχέση με την μεταβαλλόμενη Όσον αφορά τις εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας, λαμβάνοντας υπόψη την απαιτούμενη κατανάλωση

ηλεκτρικής ενέργειας των πελατών που καθορίστηκε στο πρώτο στάδιο, κάθε εταιρεία καθορίζει την τιμή που θα προσφέρει στους καταναλωτές για να μεγιστοποιήσει την ευημερία της. Ύστερα από το πλαίσιο θεωρητικής βελτιστοποίησης δύο σταδίων, οι πελάτες μπορούν να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και τελικά να επιτευχθεί ισορροπία εφόσον επιλέγονται κατάλληλες στρατηγικές και από τις δύο πλευρές.

2.2 Μοντελοποίηση του Συστήματος



Σχήμα 1: Μοντέλο Συστήματος "Έξυπνου Δικτύου"

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 1 το "Έξυπνο δίκτυο" που μελετάμε αποτελείται από πολλαπλούς χρήστες και πολλαπλές εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας. Μεταξύ των εταιρειών και των καταναλωτών υπάρχει αμφίδρομη επικοινωνία οι οποία επιτυγχάνεται μέσω ενός κεντρικού συστήματος διαχείρισης του "Έξυπνου Δικτύου" (Service Provider - SP). Ουσιαστικά το κεντρικό αυτό σύστημα διαχείρισης λειτουργεί ως ενδιάμεση σύνδεση μεταξύ των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας και των πελατών, με το οποίο οι πελάτες και οι εταιρείες συνδέονται μέσω δικτύων ισχύος (σταθερή γραμμή) και μεταξύ τους μέσω αμφίδρομης επικοινωνίας (διακεκομμένη γραμμή).

Το κεντρικό σύστημα διαχείρισης επιτρέπει την ανταλλαγή πληροφοριών, συμπεριλαμβανομένων των τιμών των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας και της ζήτησης φορτίου από τους πελάτες. Επιπρόσθετα, κάθε πελάτης είναι εξοπλισμένος με έναν Ελεγκτή Διαχείρισης Ενέργειας (Energy Management Controller - EMC), ο οποίος συντονίζει την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας μεταξύ των έξυπνων συσκευών του πελάτη και γνωρίζει την μεταβαλλόμενη ζήτηση και την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των συσκευών.

Ένα αρκετά σημαντικό στοιχείο που διαφοροποιεί την εργασία αυτή από άλλες παρόμοιες μελέτες είναι πως κάθε καταναλωτής μέσω του κεντρικού συστήματος διαχείρισης γνωρίζει την συνολική απαιτούμενη ενέργεια του δικτύου και με αυτό τον τρόπο διατηρείται η ιδιωτικότητα κατανάλωσης του κάθε χρήστη. Μέσω της πληροφορίας της συνολικής ενέργειας του δικτύου είναι δυνατόν να εφαρμόζονται κριτήρια δικαιοσύνης ως προς την τιμή κατανάλωσης του κάθε χρήστη και έτσι στο "Έξυπνο Δίκτυο" είναι δυνατόν να συνυπάρχουν αρμονικά καταναλωτές διαφορετικών οικονομικών επιπέδων.

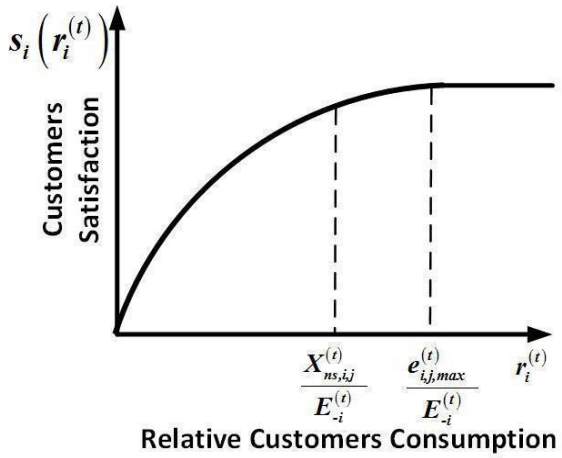
Απεικονίζουμε με $\mathcal{J} = \{1, \ldots, \mathrm{j}, \ldots, \mathrm{J}\}$ το σύνολο των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας και με $\mathcal{I} = \{1, \ldots, i, \ldots, I\}$ το σύνολο των καταναλωτών του "Έξυπνου Δικτύου". Επίσης η συνολική χρονική διάρκεια της ημέρας διασπάται σε T διακριτά χρονικά διαστήματα και ορίζουμε με $\mathcal{T} = \{1, \ldots, t, \ldots, \mathrm{T}\}$ το σύνολο των χρονικών αυτών διαστημάτων. Όσον αφορά τις συσκευές ηλεκτρικής ενέργειας του καταναλωτή απεικονίζουμε με $A_{s,i}$ και με $A_{ns,i}$ το σύνολο των συσκευών του χρήστη $i, i \in \mathcal{I}$ που χαρακτηρίζονται από την απαίτηση μεταβαλλόμενης και μη μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχα. Επομένως το σύνολο των συσκευών ηλεκτρικής ενέργειας του χρήστη ορίζεται ως $A_s = A_{s,i} \cup A_{ns,i}$.

2.2.1 Μοντελοποίηση του Συστήματος από την πλευρά των καταναλωτών

Το " Έξυπνο Δίκτυο " που μελετάμε στο πλαίσιο της εργασίας αποτελείται από πολλαπλούς χρήστες - καταναλωτές και από πολλαπλές εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας. Κάθε χρήστης $i,\ i \in \mathcal{I}$, χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη απαίτηση ηλεκτρικής ενέργειας $d_i^{(t)}\ [KWh]$ για κάθε χρονικό διάστημα t, η οποία απαίτηση προκύπτει από τις συσκευές $a, a \in A_i$ του χρήστη. Όσον αφορά τη κατανάλωση $e_{i,j}^{(t)}\ [KWh]$ του χρήστη $i, i \in \mathcal{I}$ από την επιλεγμένη ως παροχέα εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας $j,\ j \in \mathcal{J}$ προκύπτει άμεσα από τις απαιτήσεις των συσκευών του χρήστη στο χρονικό διάστημα $t, t \in T$ και από το σύνολο της ενέργειας που

μπορεί να εξυπηρετηθεί από τον παροχέα. Επιπρόσθετα, σε κάθε χρονικό διάστημα $t, t \in T$ ο καταναλωτής $i, i \in \mathcal{I}$ εξυπηρετείται μονάχα από μία εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας $j,\ j \in \mathcal{J}$ για το σύνολο του χρονικού διαστήματος, ενώ κατά την διάρκεια της ημέρας οι εταιρείες που εξυπηρετούν τον χρήστη μπορεί να είναι διαφορετικές για ξεχωριστά χρονικά διαστήματα.

Με $x_{a,i,j}^{(t)}$ απεικονίζεται το συνολικό ποσό κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των συσκευών $a, a \in A_i$ του χρήστη $i, i \in I$ από την εταιρεία $j,\ j \in \mathcal{J}$ ηλεκτρικής ενέργειας. Επομένως η μεταβαλλόμενη και η μη - μεταβαλλόμενη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του χρήστη $i, i \in I$ στο χρονικό διάστημα $t, t \in T$ από την $j,\ j \in \mathcal{J}$ εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας ορίζονται ως : $X_{s,i,j}^{(t)} = \sum_{a \in A_{s,i}} x_{a,i,j}^{(t)}$ και $X_{ns,i,j}^{(t)} = \sum_{a \in A_{ns,i}} x_{a,i,j}^{(t)}$ αντίστοιχα. Η μέγιστη κατανάλωση του χρήστη $i, i \in I$ ορίζεται ως $e_{i,j,\max}^{(t)} = \sum_{a \in A_i} x_{a,i,j}^{(t)} = \sum_{a \in A_{s,i}} x_{a,i,j}^{(t)} + \sum_{a \in A_{ns,i}} x_{a,i,j}^{(t)}$. Σε κάθε χρονικό διάστημα t κάθε καταναλωτής προσπαθεί να μεγιστοποιήσει την ικανοποίηση των αναγκών του ηλεκτρικής ενέργειας δίνοντας προτεραιότητα στις μη - μεταβαλλόμενες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας $X_{ns,i,j}^{(t)}$. Συγχρόνως, καθώς ο χρήστης επιθυμεί να αγοράσει ηλεκτρική ενέργεια για την ικανοποίηση των αναγκών του από έναν πάροχο $j,\ j \in \mathcal{J}$ θα πρέπει να λάβει υπόψη του το σύνολο των απαιτήσεων ηλεκτρικής ενέργειας των υπολοίπων καταναλωτών του "Εξυπνου Δικτύου" που ορίζεται ως $E_{-i}^{(t)} = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{\substack{i' \in \mathcal{I} \\ i' \neq i}} e_{i',j}^{(t)}$ στο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα t καθώς η πληροφορία αυτή συμβάλλει άμεσα στον προσδιορισμό των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας που ανακοινώνονται από τις εταιρείες. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία της εργασίας αυτής το οποίο την διαφοροποιεί από παρόμοιες ερευνητικές εργασίες όπου εξετάζουν την μεγιστοποίηση των συναρτήσεων ευχαρίστησης μόνο από την προσωπική πλευρά του κάθε χρήστη - καταναλωτή χωρίς καμία γνώση των απαιτήσεων των άλλων χρηστών. Στο πλαίσιο του δικού μας μοντέλου συστήματος κάθε χρήστης ενημερώνεται για το συνολικό απαιτούμενο ποσό ηλεκτρικής ενέργειας του δικτύου $E^{(t)} = \sum_{j \in \mathcal{J}} \sum_{i \in \mathcal{I}} e_{i,j}^{(t)}$ μέσω του κεντρικού συστήματος διαχείρισης του "Εξυπνου Δικτύου" και του δικτύου επικοινωνίας . Με αυτό τον τρόπο ο χρήστης έχει την δυνατότητα να προσδιορίσει το πόσο ενέργειας που απαιτείται από τους υπόλοιπους καταναλωτές ως $E_{-i}^{(t)} = E^{(t)} - e_{i,j}^{(t)}$.



Σχήμα 2: Συνάρτηση Ικανοποίησης Καταναλωτών

Η ικανοποίηση του καταναλωτή $s_i\left(r_i^{(t)}\right)$ μοντελοποιείται ως μία κοίλη αύξουσα συνάρτηση, συναρτήσει της σχετικής κατανάλωσης του χρήστη $r_i^{(t)}$ σε σχέση με την κατανάλωση των υπόλοιπων χρηστών του δικτύου $E_{-i}^{(t)}$, δηλαδή $r_i^{(t)} = \frac{e_{i,j}^{(t)}}{E_{-i}^{(t)}}$. Όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 2 η ικανοποίηση των καταναλωτών αυξάνει ραγδαία μέχρι το σημείο όπου ικανοποιείται το απαιτούμενο ποσό της σχετικής μη - μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής ενέργειας $\frac{X_{ns,i,j}^{(t)}}{E_{-i}^{(t)}}$, ενώ στη συνέχεια αυξάνεται αρκετά αργά ώσπου να ικανοποιηθεί πλήρως η σχετική μεταβαλλόμενη ηλεκτρική ενέργεια $\frac{X_{s,i,j}^{(t)}}{E_{-i}^{(t)}}$. Επίσης, είναι προφανές ότι για τιμές μεγαλύτερες της συνολικής σχετικής απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας του χρήστη $\frac{e_{i,j,\max}^{(t)}}{E_{-i}^{(t)}}$ η ικανοποίηση του δεν αυξάνει αλλά παραμένει σταθερή, καθώς δεν υπάρχουν άλλες απαιτήσεις ηλεκτρικής ενέργειας για να ικανοποιηθούν .

Στο πλαίσιο της εργασίας αυτής υιοθετούμε ένα λογαριθμικό μοντέλο έκφρασης της ικανοποίησης του χρήστη συναρτήσει της σχετικής κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, ως

$$s_i\left(r_i^{(t)}\right) = s_i\left(e_{i,j}^{(t)}, \boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}\right) = k \cdot \log\left(1 + l \cdot r_i^{(t)}\right) \quad (1)$$

όπου με $e_{-i}^{(t)}$ απεικονίζεται το διάνυσμα κατανάλωσης όλων των χρηστών εκτός του χρήστη $i, i \in I$, ενώ οι παράμετροι $k, l \in R^{+}$ καθορίζουν την κλίση της γραφικής παράστασης, η οποία μαρτυρά το πόσο ισχυρή είναι η επιθυμία των χρηστών να ικανοποιήσουν το σύνολο των απαιτήσεων της μη - μεταβαλλόμενης ηλεκτρικής ενέργειας.

Επιπρόσθετα, στην εργασία αυτή μοντελοποιούμε την χρέωση των χρηστών με κριτήρια δικαιοσύνης ως προς το σύνολο των καταναλωτών του "Έξυπνου Δικτύου". Πιο συγκεκριμένα, η χρέωση των καταναλωτών γίνεται με βάση τη σχετική τους κατανάλωση $r_i^{(t)} = \frac{e_{i,j}^{(t)}}{E_{-i}^{(t)}}$ και όχι λαμβάνοντας υπόψη μονάχα την προσωπική κατανάλωση $e_{i,j}^{(t)}$ του κάθε χρήστη. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα οι εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας να προβάλλουν κίνητρα για την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας ακόμα και σε καταναλωτές χαμηλής οικονομικής δυνατότητας και συγχρόνως να μειώνουν την άπληστη στρατηγική κατανάλωσης των ισχυρά οικονομικών καταναλωτών. Επομένως τα αποτελέσματα από τη δίκαιη χρέωση των χρηστών είναι πρώτον ότι οι χρήστες αισθάνονται ικανοποιημένοι ως προς τον τρόπο χρέωσης των εταιρειών και δεύτερον οι εταιρείες με αυτό τον τρόπο έχουν την δυνατότητα να κερδίζουν περισσότερους καταναλωτές αυξάνοντας μακροχρόνια το κέρδος τους και την συγκέντρωση τους στην αγορά.

Η δίκαιη χρέωση των καταναλωτών σύμφωνα με τη σχετική τους κατανάλωση μοντελοποιείται ως

$$FPP_i\left(r_i^{(t)}\right) = FPP_i\left(e_{i,j}^{(t)}, \boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}\right) = a_i^{(t)} \cdot r_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \tag{2}$$

όπου $p_j^{(t)} \left[\frac{\$}{KWh}\right]$ είναι η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας που ανακοινώνει η εταιρεία $j,\ j \in \mathcal{J}$ στο χρονικό διάστημα $t, t \in T$ και $a_i^{(t)}$ είναι μεταβλητή παράμετρος ως προς τα χρονικά διαστήματα και απεικονίζει την δυναμική συμπεριφορά των καταναλωτών να ξοδέψουν περισσότερα χρήματα για την κατανάλωση περισσότερης ηλεκτρικής ενέργειας ή αντίστροφα.

Τέλος, η συνάρτηση ευχαρίστησης του καταναλωτή προκύπτει άμεσα από την ικανοποίηση του και από την χρέωση της ηλεκτρικής ενέργειας που καταναλώνει. Η συνάρτηση ευχαρίστησης επομένως μοντελοποιείται ως

$$U_i^{(t)}\left(e_{i,j}^{(t)}, \boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}, \boldsymbol{p}^{(t)}\right) = s_i\left(r_i^{(t)}\right) - FPP_i\left(r_i^{(t)}\right) = s_i\left(e_{i,j}^{(t)}, \boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}\right) - FPP_i\left(e_{i,j}^{(t)}, \boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}\right) = k \cdot \log\left(1 + l \cdot r_i^{(t)}\right) - a_i^{(t)} \cdot r_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \tag{3}$$

όπου $\boldsymbol{p}^{(t)} = \left\{ p_1^{(t)}, \ldots, p_j^{(t)}, \ldots, p_J^{(t)} \right\}$ είναι το διάνυσμα των τιμών της ηλεκτρικής ενέργειας που ανακοινώνουν οι εταιρείες.

2.2.2 Μοντελοποίηση του Συστήματος από την πλευρά των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας

Κάθε εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας $j,\ j \in \mathcal{J}$ παράγει $g_j^{(t)}\ [KWh]$ ποσό ηλεκτρικής ενέργειας σε κάθε χρονικό διάστημα $t, t \in T$, καθώς το κόστος παραγωγής μίας μονάδας ηλεκτρικής ενέργειας από την εταιρεία $j,\ j \in \mathcal{J}$ είναι $c_j^{(t)}\ \left[\frac{\$}{KWh}\right]$. Στο πλαίσιο της εργασίας θεωρούμε πώς κάθε εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας έχει την δυνατότητα να παράξει το σύνολο των απαιτήσεων ηλεκτρικής ενέργειας των καταναλωτών του δικτύου, δηλαδή $g_j^{(t)} = E_j^{(t)} = \sum_{i \in \mathcal{I}} e_{i,j}^{(t)}$. Η μέγιστη ηλεκτρική ενέργεια που παρέχεται από την εταιρεία στους καταναλωτές κατά της διάρκειας της ημέρας είναι $E_{P_j} = \max_{t \in \mathcal{T}} E_j^{(t)} = \max_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{I}} e_{i,j}^{(t)}$, ενώ η μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο T των χρονικών διαστημάτων είναι $E_{avg_j} = \frac{\sum_{t \in \mathcal{T}} E_j^{(t)}}{T} = \frac{\sum_{t \in \mathcal{T}} \sum_{i \in \mathcal{I}} e_{i,j}^{(t)}}{T}$. Έτσι ορίζουμε τον ρυθμό μέγιστη - προς - μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας (peak - to - average ratio - PAR) της κάθε εταιρείας ως $PAR_j = \frac{E_{P_j}}{E_{avg_j}}$.

Στόχος λοιπόν της κάθε εταιρείας είναι να επιτυγχάνει χαμηλή τιμή του ρυθμού μέγιστη - προς - μέση κατανάλωση ενέργειας έτσι ώστε να εξομαλύνει το ποσό της παραγόμενης ενέργειας κατά την διάρκεια της ημέρας. Επίσης, οι καταναλωτές προτιμούν να εξυπηρετούνται από εταιρείες που διατηρούν χαμηλές τιμές του εν λόγω ρυθμού, καθώς με αυτό τον τρόπο “αισθάνονται” περισσότερο “ασφαλείς” ότι θα ικανοποιηθούν στο σύνολο και αποτελεσματικά οι απαιτήσεις τους για ηλεκτρική ενέργεια.

Ένας αρκετά αποτελεσματικός τρόπος έτσι ώστε οι εταιρείες να καταφέρνουν να διατηρούν χαμηλές τιμές του ρυθμού είναι να προβάλλουν κίνητρα στους καταναλωτές ώστε να μεταβάλλουν το ρυθμό κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από υψηλά επίπεδα κατανάλωσης σε χαμηλά για συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα κατά τη διάρκεια της ημέρας. Επίσης οι εταιρείες μπορούν να επωφεληθούν μακροπρόθεσμα μέσω της στρατηγικής προσφοράς εκπτώσεων στις τιμές πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές. Με

αυτό τον τρόπο επιτυγχάνεται ισορροπία στο ποσό κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας των χρηστών, με αποτέλεσμα οι εταιρείες να διατηρούν χαμηλές τιμές του ρυθμού μέγιστη - προς - μέση συνολική κατανάλωση και ταυτόχρονα οι προσφορές λειτουργούν ως διαφήμιση της εταιρείας κερδίζοντας όλο και περισσότερους καταναλωτές - πελάτες.

Η στρατηγική προσφοράς εκπτώσεων είναι μια αρκετά διαδεδομένη τεχνική με την οποία οι εταιρείες καταφέρνουν να κερδίσουν περισσότερους πελάτες και να επωφεληθούν μακροπρόθεσμα. Η αποτελεσματικότητα της τεχνικής αυτής έχει ήδη μελετηθεί στη βιβλιογραφία και έχει επιβεβαιωθεί από την υλοποίηση της σε αρκετά διαφορετικά πεδία, όπως στον τουρισμό. Οι εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας του "Εξυπνου Δικτύου" μελετώντας και αναλύοντας τις συνήθειες κατανάλωσης των χρηστών είναι σε θέση να καθορίσουν τις πιο κατάλληλες και αποτελεσματικές προσφορές στις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας.

Κάθε εταιρεία προσπαθεί να "χτίσει" καλή φήμη και προφίλ προς το σύνολο των καταναλωτών και να διατηρεί υψηλή ανταγωνιστικότητα σε σχέση με τις υπόλοιπες εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας. Η φήμη της εταιρείας μεγαλώνει εφόσον το σύνολο των προσφερόμενων εκπτώσεων $\sum_{t\in\mathcal{T}} f_j^{(t)}$ ως προς τους καταναλωτές αυξάνει κατά τη διάρκεια της ημέρας και διατηρώντας χαμηλές τιμές του ρυθμού μέγιστη - προς - μέση κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Όσον αφορά την ανταγωνιστικότητα της εταιρείας $j,\ j\in\mathcal{J}$ στην αγορά, μοντελοποιείται μέσω στης συγκέντρωσης της σε αυτήν. Πιο συγκεκριμένα εκφράζεται ως το ποσό της ηλεκτρικής ενέργειας που εξυπηρετείται από την εταιρεία j προς το συνολική ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται από το σύνολο των καταναλωτών, $Comp = \frac{\sum_{t\in T} E_j^{(t)}}{E^{(t)}} = \frac{\sum_{t\in T}\sum_{i\in I} e_{i,j}^{(t)}}{\sum_{j\in J}\sum_{t\in T}\sum_{i\in I} e_{i,j}^{(t)}}$.

Βασισμένοι στην προηγούμενη ανάλυση θεωρούμε πως κάθε εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας $j,\ j\in\mathcal{J}$ του "Εξυπνου Δικτύου" συνδέεται και διατηρεί ένα σκορ φήμης και ανταγωνιστικότητας (reputation and competitiveness score - RC Score) το οποίο ορίζεται ως

$$RC_j = \left(\sum_{t\in\mathcal{T}} f_j^{(t)}\right)\cdot\frac{1}{PAR_j}\cdot\frac{\sum_{t\in\mathcal{T}} E_j^{(t)}}{E^{(t)}} \quad (4)$$

Όσον αφορά τη συνάρτηση ευχαρίστησης της εταιρείας ηλεκτρικής ενέργειας, προκύπτει άμεσα ως το κέρδος της εταιρείας από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγει. Πιο συγκεκριμένα, η συνάρτηση ευχαρίστησης δίνεται ως

$$W_j^{(t)}\left(\boldsymbol{e}_i^{(t)}, \boldsymbol{p}^{(t)}\right) = P_j^{(t)}\left(\boldsymbol{e}_i^{(t)}, \boldsymbol{p}^{(t)}\right) - C_j^{(t)}\left(\boldsymbol{e}_i^{(t)}\right) \tag{5}$$

όπου τα $P_j^{(t)}(\cdot)$ και $C_j^{(t)}(\cdot)$ εκφράζουν το ποσό των εσόδων και το ποσό του κόστους της εταιρείας από την πώληση της ηλεκτρικής ενέργειας αντίστοιχα. Το ποσό εσόδων της εταιρείας $j,\ j \in \mathcal{J}$ κατά το χρονικό διάστημα t εξαρτάται από το σύνολο της ηλεκτρικής ενέργειας που πούλησε αλλά και το αντίστοιχο ποσοστό προσφοράς που προτάθηκε από την εταιρεία, δηλαδή

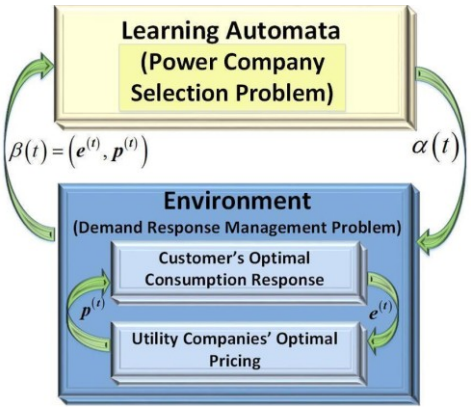
$$P_j^{(t)}\left(\boldsymbol{e}_i^{(t)}, \boldsymbol{p}^{(t)}\right) = \left(1 - f_j^{(t)}\right) \cdot p_j^{(t)} \cdot \sum_{i \in \boldsymbol{I}} e_{i,j}^{(t)} == \left(1 - f_j^{(t)}\right) \cdot p_j^{(t)} \cdot \sum_{i \in \boldsymbol{I}} \sum_{a \in A_i} x_{a,i,j}^{(t)} \tag{6}$$

Από την άλλη μεριά το αντίστοιχο κόστος της εταιρείας $C_j^{(t)}$ κατά το χρονικό διάστημα $t, t \in T$ δίνεται ως

$$C_j^{(t)}\left(\boldsymbol{e}_i^{(t)}\right) = c_j^{(t)} \cdot g_j^{(t)} = c_j^{(t)} \cdot \sum_{i \in \boldsymbol{I}} e_{i,j}^{(t)} \tag{7}$$

2.3 Μοντελοποίηση του "Εξυπνου Δικτύου" ως Σύστημα Μάθησης

Οι εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής οικοδομούν τη φήμη και την ανταγωνιστικότητα τους για μεγάλο χρονικό διάστημα, ώστε να προσελκύσουν περισσότερους πελάτες και να αυξήσουν τα κέρδη τους. Από την άλλη πλευρά η φήμη και η ανταγωνιστικότητα των εταιρειών ηλεκτροπαραγωγής αποτελούν τους θεμελιώδεις παράγοντες που επηρεάζουν τις επιλογές των καταναλωτών ως προς τις εταιρείες από όπου θα εξυπηρετηθούν . Έτσι, το "Εξυπνο Δίκτυο" μπορεί να μελετηθεί ως σύστημα εκμάθησης, όπου οι πελάτες ενεργούν ως αυτοματοποιημένα συστήματα εκμάθησης που αντιδρούν με το περιβάλλον προκειμένου να αποφασίσουν ποια εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής θα επιλέξουν για να αγοράσουν ηλεκτρική ενέργεια.



Σχήμα 3: Το "Έξυπνο Δίκτυο" ως Σύστημα Μάθησης

Το Σχήμα 3 παρουσιάζει την αναπαράσταση του "Έξυπνου Δικτύου" ως σύστημα μάθησης και τη σχέση μεταξύ των αυτομάτων μάθησης. Πιο συγκεκριμένα, κάθε πελάτης - αυτόματο μάθησης σε κάθε χρονικό διάστημα t, έχει ένα σύνολο ενεργειών που αντιπροσωπεύει τις διαφορετικές επιλογές εταιρείας ηλεκτρικής ενέργειας ως τον πάροχο εξυπηρέτησης. Προκειμένου να διαμορφώσουν την απόφαση τους τα αυτοματοποιημένα συστήματα μάθησης θεωρούν υπόψη τους το περιβάλλον ηλεκτροπαραγωγής, το οποίο καθορίζεται μέσω της επίλυσης του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης. Η λύση του προβλήματος είναι η βέλτιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και οι τιμές πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από τις εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής αντίστοιχα. Με βάση τις επιλογές του συστήματος μάθησης και τις αντίστοιχες αντιδράσεις του περιβάλλοντος, η πιθανότητας ανταμοιβής της δράσης ορίζεται ως $r_j(t)=\dfrac{RC_j}{\sum_{j\in\mathcal{J}} RC_j}$, όπου $0\le r_j(t)\le 1$.

Ουσιαστικά η πιθανότητα ανταμοιβής δράσης αυξάνει ή ελαττώνει την πιθανότητα διατήρησης της ίδιας στρατηγικής όσον αφορά την επιλογή της εταιρείας παρόχου από τον καταναλωτή. Το διάνυσμα των πιθανοτήτων του καταναλωτή $i,\ i\in\mathcal{N}$ είναι $\boldsymbol{Pr}_i(t)=\left\{\Pr_{i,1}(t),\ldots,\Pr_{i,j}(t),\ldots,\Pr_{i,J}(t)\right\}$, όπου με $\Pr_{i,j}(t)$ συμβολίζεται η πιθανότητα επιλογής της $j,\ j\in\mathcal{J}$ εταιρείας. Η ανανέωση των πιθανοτήτων γίνεται σύμφωνα με το παραδοσιακό μοντέλο των συστημάτων εκμάθησης :

$$\Pr_{i,j}(t+1)=\Pr_{i,j}(t)-b\cdot\frac{RC_j}{\sum_{j\in\mathcal{J}} RC_j}\cdot\Pr_{i,j}(t),\quad j^{(t+1)}\neq j^{(t)} \tag{8a}$$

$$\Pr_{i,j}(t+1) = \Pr_{i,j}(t) + b \cdot \frac{RC_j}{\sum_{j \in \mathcal{J}} RC_j} \cdot \left(1 - \Pr_{i,j}(t)\right), \quad j^{(t+1)} = j^{(t)} \tag{8b}$$

όπου $b,\ 0 < b < 1$ είναι η παράμετρος βήματος για την σύγκλιση του του αλγορίθμου μάθησης των καταναλωτών. Η σχέση $(8a)$ δείχνει την πιθανότητα δράσης του καταναλωτή να επιλέξει διαφορετική εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής για το χρονικό διάστημα $(t+1)$ σε σχέση με εκείνη που επέλεξε το χρονικό διάστημα t (αλλαγή στρατηγικής), ενώ η σχέση (8b) αποτελεί την πιθανότητα επιλογής της ίδιας εταιρείας ως πάροχο (διατήρηση στρατηγικής). Επιπρόσθετα, το σύστημα εκμάθησης αρχικά δεν έχει κάποια γνώση για τις πιθανότητες ανταμοιβής $\frac{RC_j}{\sum_{j \in \mathcal{J}} RC_j}$ και για τις πιθανότητες επιλογής των εταιρειών $Pr_i(t)$ για κάθε χρήστη, επομένως οι πιθανότητες επιλογής αρχικοποιούνται ως $\Pr_{i,j}(t) = \frac{1}{J}$. Οι καταναλωτές με το πέρασμα του χρόνου συγκλίνουν τις επιλογές τους ως προς συγκεκριμένες εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής, μεγιστοποιώντας τις συναρτήσεις ευχαρίστησης τους, εφόσον η πολιτική των εταιρειών ως προς τις προσφερόμενες προσφορές, τα κόστη παραγωγής και οι τιμές πώλησης μακροπρόθεσμα δεν μεταβάλλονται ραγδαία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΚΑΙ ΕΠΙΛΥΣΗ ΤΟΥ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΟΣ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΑΠΟΚΡΙΣΗΣ ΤΗΣ ΖΗΤΗΣΗΣ

3.1 Διατύπωση του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης

3.2 Στάδιο καθορισμού της βέλτιστης κατανάλωσης των χρηστών

3.3 Στάδιο καθορισμού της βέλτιστης τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας από τις εταιρείες

3.1 Διατύπωση του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης

Στην εργασία αυτή το πρόβλημα της διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης διατυπώνεται λαμβάνοντας υπόψη τις επαναλήψεις τόσο των εταιρειών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας όσο και των πελατών. Θεωρείται ότι οι πελάτες έχουν ήδη επιλέξει την εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας από την οποία θα εξυπηρετηθούν με βάση τη μεθοδολογία μηχανικής μάθησης. Οι εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας στοχεύουν στη μεγιστοποίηση της ευημερίας τους, λαμβάνοντας υπόψη την κατανάλωση των πελατών και στοχεύουν σε σύγκλιση ως προς τις βέλτιστες τιμές πώλησης της ενέργειας ανά χρονικό διάστημα $t, t \in T$. Από την άλλη πλευρά, ο στόχος κάθε πελάτη είναι να μεγιστοποιήσει την προσωπική του συνάρτηση ευχαρίστησης λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και να καθορίσει με ένα κατανεμημένο τρόπο το βέλτιστο πλάνο κατανάλωσης. Ο κατανεμημένος τρόπος καθορισμού τόσο των βέλτιστων τιμών όσο και των καταναλώσεων των πελατών, αποτελεί βασική συνιστώσα στη διαμόρφωση και επίλυση του προτεινόμενου προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης. Η επίλυση αυτή είναι σύμφωνη με το πρότυπο των ελεύθερων και ανεξάρτητων αγορών ηλεκτρικής ενέργειας, όπου δεν υπάρχει κεντρική οντότητα που λαμβάνει αποφάσεις.

Το πρόβλημα βελτιστοποίησης της διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης διατυπώνεται ως εξής:

$$\boldsymbol{p}^{(t)*} = \underset{\boldsymbol{p}}{argmax} \begin{bmatrix} W_j^{(t)}\left(\boldsymbol{e}_i^{(t)}, \boldsymbol{p}^{(t)}\right) = P_j^{(t)}\left(\boldsymbol{e}_i^{(t)}, \boldsymbol{p}^{(t)}\right) - C_j^{(t)}\left(\boldsymbol{e}_i^{(t)}\right) \\ = \left(1 - f_j^{(t)}\right) \cdot p_j^{(t)} \cdot \sum_{i \in \mathcal{S}} e_{i,j}^{(t)} - c_j^{(t)} \cdot \sum_{i \in \mathcal{S}} e_{i,j}^{(t)} \end{bmatrix} \tag{9a}$$

$$\boldsymbol{e}^{(t)*} = \underset{\boldsymbol{e}}{argmax} \begin{bmatrix} U_i^{(t)}\left(e_{i,j}^{(t)}, \boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}, \boldsymbol{p}^{(t)}\right) = s_i\left(r_i^{(t)}\right) - FPP_i\left(r_i^{(t)}\right) \\ = s_i\left(e_{i,j}^{(t)}, \boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}\right) - FPP_i\left(e_{i,j}^{(t)}, \boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}\right) \\ = k \cdot \log\left(1 + \lambda \cdot r_i^{(t)}\right) - a_i^{(t)} \cdot r_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \end{bmatrix}, \; e_{i,j,\min}^{(t)} \le e_{i,j}^{(t)} \le e_{i,j,\max}^{(t)} \tag{9b}$$

Όπως διαπιστώνεται από τις σχέσεις (9a) και (9b), οι αποφάσεις για τις βέλτιστες τιμές και η βέλτιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τους καταναλωτές αλληλοσυνδέονται,

οπότε η απόφαση του ενός (καταναλώσεις πελατών) αποτελεί παράμετρος εισόδου για το άλλο (καθορισμός τιμών εταιρειών). Επομένως το πρόβλημα διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης θεωρείται ως παίγνιο δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο, η βέλτιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας των πελατών προσδιορίζεται μέσω της διαμόρφωσης του προβλήματος μεγιστοποίησης των συναρτήσεων ευχαρίστησης ως ένα μη συνεργατικό παίγνιο μεταξύ των πελατών. Στο δεύτερο στάδιο, οι εταιρείες ηλεκτρικής ενέργειας μεγιστοποιούν την ευημερία τους, καθορίζοντας τις βέλτιστες τιμές, λαμβάνοντας υπόψη τη βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας των πελατών όπως καθορίστηκε στο προηγούμενο στάδιο.

Η αλληλεπίδραση και η ανατροφοδότηση μεταξύ των εταιρειών και των καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας παραμένουν μέχρι να ολοκληρωθούν - συγκλίνουν και οι δύο βέλτιστες αποφάσεις / στρατηγικές, δηλαδή οι τιμές και οι καταναλώσεις αντίστοιχα.

3.2 Στάδιο καθορισμού της βέλτιστης κατανάλωσης των χρηστών

Το πρώτο στάδιο του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης είναι υπεύθυνο για τον προσδιορισμό της κατανάλωσης των πελατών κατά το χρονικό διάστημα t, λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και την επιλογή της εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής από κάθε πελάτη όπως αυτές έχουν διαμορφωθεί από το σύστημα μάθησης. Ορίζουμε με $G = \left[\mathcal{I}, \left\{\boldsymbol{e}_{i,j}^{(t)}\right\}, \left\{U_i^{(t)}\right\}\right]$ το μη συνεργατικό παιχνίδι καθορισμού της βέλτιστης κατανάλωσης των χρηστών, το οποίο αποτελείται από τρία βασικά στοιχεία:

1. ένα πεπερασμένο σύνολο καταναλωτών $\mathcal{I} = \{1, \ldots, i, \ldots, I\}$ που λειτουργούν ως παίχτες
2. το σύνολο των δυνατών στρατηγικών $\boldsymbol{e}_{i,j}^{(t)} = \left[e_{i,j,min}^{(t)}, e_{i,j,max}^{(t)}\right]$ για κάθε καταναλωτή $i,\ i \in \mathcal{I}$
3. η συνάρτηση ευχαρίστησης $U_i^{(t)}$ του καταναλωτή $i,\ i \in \mathcal{I}$

Το μη συνεργατικό παιχνίδι καθορισμού της βέλτιστης κατανάλωσης $G = \left[\mathcal{I}, \left\{\boldsymbol{e}_{i,j}^{(t)}\right\}, \left\{U_i^{(t)}\right\}\right]$ μπορεί να εκφραστεί τυπικά ως εξής:

$$\max_{\boldsymbol{e}} \begin{bmatrix} U_i^{(t)}\left(e_{i,j}^{(t)}, \boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}, \boldsymbol{p}^{(t)}\right) = s_i\left(r_i^{(t)}\right) - FPP_i\left(r_i^{(t)}\right) \\ = k \cdot \log\left(1 + \lambda \cdot r_i^{(t)}\right) - a_i^{(t)} \cdot r_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \end{bmatrix} \quad (10)$$

με $e_{i,j,\min}^{(t)} \le e_{i,j}^{(t)} \le e_{i,j,\max}^{(t)}$

Η συνήθης ιδέα στην επίλυση προβλημάτων θεωρητικών παιχνιδιών είναι η ισορροπία Nash (Nash Equillibrium), στην οποία κανένας πελάτης - χρήστης δεν μπορεί να βελτιώσει την συνάρτηση ευχαρίστησης του αλλάζοντας μονομερώς την δική του κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Ορισμός 1:

Ένα διάνυσμα κατανάλωσης $\boldsymbol{e}_i^{(t)*} = \left[e_{1,j}^{(t)*}, \ldots, e_{i,j}^{(t)*}, \ldots, e_{1,j}^{(t)*} \right]$, $j \in \mathcal{J}$ αποτελεί ισορροπία Nash για το παίγνιο $G = \left[\mathcal{N}, \left\{ \boldsymbol{e}_{i,j}^{(t)} \right\}, \left\{ U_i^{(t)} \right\} \right]$, αν για κάθε καταναλωτή $i,\ i \in \mathcal{N}$ ισχύει ότι $U_i^{(t)} \left(e_{i,j}^{(t)*}, \boldsymbol{e}_{-i}^{(t)*} \right) \ge U_i^{(t)} \left(e_{i,j}^{(t)}, \boldsymbol{e}_{-i}^{(t)*} \right)$, $\forall\, e_{i,j}^{(t)} \in e_{i,j}^{(t)}$.

Για την απόδειξη της ύπαρξης και της μοναδικότητας του σημείου ισορροπίας Nash για το παίγνιο $G = \left[\mathcal{N}, \left\{ \boldsymbol{e}_{i,j}^{(t)} \right\}, \left\{ U_i^{(t)} \right\} \right]$, θα πρέπει να δειχθεί ότι $i,\ i \in \mathcal{N}$, το $\boldsymbol{e}_{i,j}^{(t)}$ είναι ένα μη κενό, κυρτό και συμπαγές υποσύνολο του Ευκλείδειου χώρου R^I και η συνάρτηση $U_i^{(t)} \left(\boldsymbol{e}^{(t)}, \boldsymbol{p}^{(t)} \right)$ είναι συνεχής στο διάστημα $\boldsymbol{e}^{(t)}$ και σχεδόν κοίλη ως προς το $e_{i,j}^{(t)}$.

Θεώρημα 1: Στο μη συνεργατικό παίγνιο βελτιστοποίησης $G = \left[\mathcal{N}, \left\{ \boldsymbol{e}_{i,j}^{(t)} \right\}, \left\{ U_i^{(t)} \right\} \right]$, η βέλτιστη στρατηγική κατανάλωσης του χρήστη $i,\ i \in \mathcal{N}$ λαμβάνοντας υπόψη το διάνυσμα κατανάλωσης $\boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}$ είναι $BR_i \left(\boldsymbol{e}_{-i}^{(t)} \right) = e_{i,j}^{(t)*}$ όπως δίνεται στη σχέση, (11) όπου $s_i^{\prime -1}$ είναι η αντίστροφη συνάρτηση της πρώτης παραγωγού της συνάρτησης ικανοποίησης του καταναλωτή και $\tau = \lim_{r_i^{(t)} \to \infty} s^{\prime -1} \left(r_i^{(t)} \right)$.

$$BR_i \left(\boldsymbol{e}_{-i}^{(t)} \right) = e_{i,j}^{(t)*} = \begin{cases} e_{i,j,\max}^{(t)}, & \text{if } \ 0 \le a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \le \tau \\ \min \left\{ e_{i,j,\max}^{(t)}, E_{-i}^{(t)} \cdot s_i^{\prime -1} \left(a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \right) \right\}, & \\ \quad \text{if } \ \tau < a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \le s_i^{\prime}(0) & \\ 0, \ \text{if } \ a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} > s_i^{\prime}(0) & \end{cases} \tag{11}$$

Απόδειξη: Για τον προσδιορισμό της βέλτιστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας $BR_i \left(\boldsymbol{e}_{-i}^{(t)} \right) = e_{i,j}^{(t)*}$ η πρώτη και η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης ευχαρίστησης $U_i^{(t)} \left(r_i^{(t)} \right)$ χρησιμοποιούνται

$$\frac{\partial U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)}{\partial e_{i,j}^{(t)}} = \frac{1}{E_{-i}^{(t)}} \cdot \left[s_i{}'\left(r_i^{(t)}\right) - a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \right] \quad \text{(A1)}$$

$$\frac{\partial^2 U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)}{\partial e_{i,j}^{(t)2}} = \frac{1}{E_{-i}^{(t)2}} \cdot s_i{}''\left(r_i^{(t)}\right) \quad \text{(A2)}$$

Όπως έχει επισημανθεί ήδη η συνάρτηση ικανοποίησης $s_i\left(r_i^{(t)}\right)$ είναι μία αύξουσα κοίλη συνάρτηση συναρτήσει της σχετικής κατανάλωσης $r_i^{(t)}$, έτσι ισχύει ότι $s_i{}''\left(r_i^{(t)}\right) < 0$ και $\frac{\partial^2 U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)}{\partial e_{i,j}^{(t)2}} < 0$. Ορίζουμε ότι $\tau = \lim_{r_i^{(t)} \to \infty} s'^{-1}\left(r_i^{(t)}\right)$ και αφού η συνάρτηση $s_i{}'\left(r_i^{(t)}\right)$ είναι γνησίως φθίνουσα (λόγω του $s_i{}''\left(r_i^{(t)}\right) < 0$) ισχύει ότι $s_i{}'\left(r_i^{(t)}\right) > 0$, επομένως γνωρίζουμε ότι $\tau < s_i{}'\left(r_i^{(t)}\right) \le s_i{}'(0)$ και $0 \le \tau < s_i{}'(0)$. Ως εκ τούτου, για $0 \le a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \le \tau$ έχουμε ότι $\frac{\partial U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)}{\partial e_{i,j}^{(t)}} > 0$ και έτσι η συνάρτηση $U_i^{(t)}$ είναι μια αύξουσα συνάρτηση σε σχέση με την κατανάλωση $e_{i,j}^{(t)}$. Σε αυτή την περίπτωση η βέλτιστη στρατηγική κατανάλωσης για τον καταναλωτή $i,\ i \in \mathcal{N}$ είναι να απαιτήσει τη μέγιστη κατανάλωση $e_{i,j,\max}^{(t)}$. Άρα για $0 \le a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \le \tau$ έχουμε ότι $BR_i\left(\boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}\right) = e_{i,j,\max}^{(t)}$ για όλα τα $i,\ i \in \mathcal{N}$. Για $\tau < a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \le s_i{}'(0)$ η εξίσωση $\frac{\partial U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)}{\partial e_{i,j}^{(t)}} = 0$ είναι ανάλογη της εξίσωσης $s_i{}'\left(r_i^{(t)}\right) = a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \Leftrightarrow \quad \hat{r}_i^{(t)} = s_i^{r-1}\left(a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)}\right), \forall i,\ i \in \mathcal{N}$. Πρέπει να σημειωθεί ότι εφόσον η συνάρτηση $s_i{}'\left(r_i^{(t)}\right)$ είναι γνησίως φθίνουσα, η αντίστροφή της s_i^{r-1} υπάρχει και η σχετική κατανάλωση $\hat{r}_i^{(t)}$ είναι φθίνουσα συνάρτηση ως προς το $a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)}$. Επειδή $s_i{}''\left(r_i^{(t)}\right) < 0$ για όλα τα $r_i^{(t)}$ και $\frac{\partial^2 U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)}{\partial e_{i,j}^{(t)2}} < 0$ οι ρίζες της εξίσωσης $\frac{\partial U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)}{\partial e_{i,j}^{(t)}} = 0$ μεγιστοποιούν το $U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)$ δεδομένης της κατανάλωσης των άλλων χρηστών του δικτύου $E_{-i}^{(t)}$. Μία προς μια μία σχέση υπάρχει μεταξύ $r_i^{(t)}$ και $e_{i,j}^{(t)}$ και επομένως η βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση $U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)$ είναι επίσης μοναδική και ίση με $e_{i,j}^{(t)*} = E_{-i}^{(t)} \cdot \hat{r}_i^{(t)} = E_{-i}^{(t)} \cdot s_i^{r-1}\left(a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)}\right)$. Εάν $e_{i,j}^{(t)*} > e_{i,j,\max}^{(t)}$ ο καταναλωτής $i,\ i \in \mathcal{N}$ δεν απαιτεί ενέργεια ίση με $e_{i,j}^{(t)*}$. Σε αυτή την περίπτωση καθώς το $e_{i,j}^{(t)*}$ είναι η μοναδική λύση που μεγιστοποιεί τη $U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)$, τότε η $U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)$ είναι μια αύξουσα

συνάρτηση ως προς το $e_{i,j}^{(t)}$ στο διάστημα $e_{i,j}^{(t)} \le e_{i,j,\max}^{(t)} \le e_{i,j}^{(t)*}$ για σταθερή τιμή του $\boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}$. Ως εκ τούτου, η καλύτερη κατανάλωση που μπορεί να επιλέξει ο χρήστης είναι ίση με τη μέγιστη - συνολική ηλεκτρική ενέργεια που απαιτεί για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, δηλαδή $BR_i\left(\boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}\right) = e_{i,j,\max}^{(t)}$. Αυτό σημαίνει ότι για $\tau < a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \le s_i{}'(0)$, $BR_i\left(\boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}\right) = \min\left\{e_{i,j,\max}^{(t)}, E_{-i}^{(t)} \cdot s_i^{\prime -1}\left(a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)}\right)\right\}$. Για $a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} > s_i{}'(0)$ έχουμε ότι $\dfrac{\partial U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)}{\partial e_{i,j}^{(t)}} < 0$ και επομένως η συνάρτηση $U_i^{(t)}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)$ είναι μια φθίνουσα συνάρτηση του $e_{i,j}^{(t)}$. Σε αυτή την περίπτωση η επιβαλλόμενη τιμή από τις εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής είναι αρκετά υψηλή για τους πελάτες ώστε να την αντέξουν οικονομικά, για αυτό $BR_i\left(\boldsymbol{e}_{-i}^{(t)}\right) = 0$ για όλα τα $i,\ i \in \mathcal{N}$. ■

Με βάση το Θεώρημα 1 που καθορίζει τη βέλτιστη στρατηγική κατανάλωσης του πελάτη και λαμβάνοντας υπόψη την ιδιότητα της σχεδόν κοιλότητας με τη σχετική κατανάλωση $r_i^{(t)}$ της συνάρτησης ευχαρίστησης $U_i^{(t)}\left(r_i^{(t)}\right)$, προκύπτει η ύπαρξη και η μοναδικότητα της ισορροπίας Nash του παιγνίου.

Θεώρημα 2: Η ισορροπία Nash του μη συνεργατικού παιγνίου καθορισμού της βέλτιστης κατανάλωσης των πελατών $G = \left[\mathcal{N}, \left\{\boldsymbol{e}_{i,j}^{(t)}\right\}, \left\{U_i^{(t)}\right\}\right]$ υπάρχει και είναι μοναδική.

Απόδειξη:

Η ισορροπία Nash είναι εξ' ορισμού το σταθερό σημείο στο σύνολο της βέλτιστης απόκρισης της ζήτησης που ικανοποιεί την εξίσωση $\boldsymbol{e}^{(t)*} = \boldsymbol{BR}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)$. Στις δύο περιπτώσεις όπου $0 \le a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \le \tau$ και $a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} > s_i{}'(0)$, το σταθερό σημείο του συνόλου της βέλτιστης απόκρισης της ζήτησης είναι μοναδικό, $e_{i,j,\max}^{(t)}$ είτε 0 . Στην τρίτη περίπτωση, όπου $\tau < a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \le s_i{}'(0)$ η μοναδικότητα του σημείου ισορροπίας Nash μπορεί να αποδειχθεί μέσω της υιοθέτησης της έννοιας της κλασικής συνάρτησης [72]. Μία συνάρτηση f χαρακτηρίζεται ως κλασική εάν ικανοποιεί τις παρακάτω ιδιότητες [72],

- Θετικές Τιμές : $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) > \boldsymbol{0}$
- Μονοτονικότητα : εάν $\boldsymbol{x} \ge \boldsymbol{x}'$ τότε $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) \ge \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}')$
- Επεκτασιμότητα : για όλα τα $a > 1$, $a \cdot \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}) \ge \boldsymbol{f}(a \cdot \boldsymbol{x}')$

Εάν ένα σταθερό σημείο υπάρχει σε μια τυπική συνάρτηση, τότε είναι μοναδικό, όπως φαίνεται στο [72]. Επίσης όπως φαίνεται στο [73], $\boldsymbol{e}^{(t)*} = \boldsymbol{BR}\left(\boldsymbol{e}^{(t)}\right)$ για $\tau < a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \le s_i{}'(0)$ και σύμφωνα με την (11) μπορεί εύκολα να δειχθεί ότι αποτελεί τυπική συνάρτηση. Επομένως, στην περίπτωση που $\tau < a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)} \le s_i{}'(0)$ το σημείο ισορροπίας Nash υπάρχει και είναι μοναδικό.
■

Η βέλτιστη κατανάλωση ηλεκτρικού ρεύματος από τους πελάτες, όπως καθορίζεται στην εξίσωση (11), θα αποτελέσει είσοδο για το δεύτερο στάδιο καθορισμού της βέλτιστης τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας από τις εταιρείες του "Εξυπνου Δικτύου".

3.3 Στάδιο καθορισμού της βέλτιστης τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας από τις εταιρείες

Στο πρώτο στάδιο του παιγνίου καθορίστηκε η βέλτιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας από τους πελάτες, ενώ σε αυτό το στάδιο στόχος είναι η μεγιστοποίηση της ευημερίας - συνάρτησης ευχαρίστησης των εταιρειών ηλεκτροπαραγωγής με κατανεμημένο τρόπο, προσδιορίζοντας τις βέλτιστες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας στην κατανάλωση των πελατών. Συνδυάζοντας τις εξισώσεις $(9a)$ και (11), το βέλτιστο πρόβλημα της τιμολόγησης με βάση την απόκριση της κατανάλωσης των πελατών μπορεί να γραφτεί ως εξής:

$$\boldsymbol{p}^{(t)*} = \underset{\boldsymbol{p}}{argmax} \left[\begin{array}{l} W_j^{(t)}\left(\boldsymbol{p}^{(t)}\right) = \\ \left(1 - f_j^{(t)}\right) \cdot p_j^{(t)} \cdot \sum_{i \in \mathcal{S}} \left[E_{-i}^{(t)} \left(\dfrac{k}{a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)}} - \dfrac{1}{\lambda} \right) \right] \\ - c_j^{(t)} \cdot \sum_{i \in \mathcal{S}} \left[E_{-i}^{(t)} \left(\dfrac{k}{a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)}} - \dfrac{1}{\lambda} \right) \right] \end{array} \right] \tag{12}$$

Το βέλτιστο πρόβλημα τιμολόγησης στην απόκριση κατανάλωσης των πελατών, όπως αναδιατυπώνεται στην εξίσωση (12), αποτελεί συνάρτηση μονάχα των τιμών που ανακοινώνονται από τις εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής.

Θεώρημα 3: Η βέλτιστη τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας από κάθε εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής που μεγιστοποιεί τη συνάρτηση ευχαρίστησης της εταιρείας, με δεδομένες τις βέλτιστες καταναλώσεις των χρηστών, είναι

$$p_j^{(t)*} = \left\lceil \frac{k \cdot \lambda \cdot c_j^{(t)}}{a_i^{(t)} \cdot \left(1 - f_j^{(t)}\right)} \right\rceil^{1/2} \tag{13}$$

Απόδειξη: Δεδομένης της κατανάλωσης των χρηστών, η συνάρτηση ευχαρίστησης της κάθε εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής μπορεί να γραφτεί ως

$$W_j^{(t)}\left(\boldsymbol{p}^{(t)}\right) = \left(1 - f_j^{(t)}\right) \cdot p_j^{(t)} \cdot \sum_{i \in \mathcal{S}} \left\lceil E_{-i}^{(t)} \left(\frac{k}{a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)}} - \frac{1}{\lambda} \right) \right\rceil$$
$$- c_j^{(t)} \cdot \sum_{i \in \mathcal{S}} \left\lceil E_{-i}^{(t)} \left(\frac{k}{a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)}} - \frac{1}{\lambda} \right) \right\rceil \tag{B1}$$

Παίρνοντας υπόψη την πρώτη παράγωγο της συνάρτησης $W_j^{(t)}$ συναρτήσει του $p_j^{(t)}$ έχουμε ότι:

$$\frac{\partial W_j^{(t)}\left(\boldsymbol{p}^{(t)}\right)}{\partial p_j^{(t)}} = -\frac{1}{l} \cdot \left(1 - f_j^{(t)}\right) \cdot E_{-i}^{(t)} + c_j^{(t)} \cdot E_{-i}^{(t)} \cdot \frac{k}{a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)2}} \tag{B2}$$

Επομένως τα κρίσιμα σημεία της συνάρτησης $W_j^{(t)}\left(\boldsymbol{p}^{(t)}\right)$ είναι :

$$p_j^{(t)*} = \left\lceil \frac{k \cdot \lambda \cdot c_j^{(t)}}{a_i^{(t)} \cdot \left(1 - f_j^{(t)}\right)} \right\rceil^{1/2} \tag{B3}$$

Η δεύτερη παράγωγος της συνάρτησης $W_j^{(t)}\left(\boldsymbol{p}^{(t)}\right)$ είναι $\frac{\partial^2 W_j^{(t)}\left(\boldsymbol{p}^{(t)}\right)}{\partial p_j^{(t)2}} = -2 \cdot c_j^{(t)} \cdot E_{-i}^{(t)} \cdot \frac{k}{a_i^{(t)} \cdot p_j^{(t)3}}$ (B4). Όπως φαίνεται από την (B4) έχουμε ότι $\frac{\partial^2 W_j^{(t)}\left(\boldsymbol{p}^{(t)}\right)}{\partial p_j^{(t)2}} < 0$, επομένως το $p_j^{(t)*}$ όπως καθορίζεται στην (B3) μεγιστοποιεί τη συνάρτηση ευχαρίστησης της εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής.

Συμπληρώνοντας αυτή την ενότητα, σημειώνεται ότι το αρχικό πρόβλημα βελτιστοποίησης της διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης, όπως ορίζεται στις εξισώσεις (9a) και (9b), μελετήθηκε ως παίγνιο δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο, η βέλτιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας του πελάτη καθορίζεται λαμβάνοντας υπόψη τις τιμές των εταιρειών ηλεκτρικής ενέργειας μέσω της θεωρητικής προσέγγισης των παιγνίων. Στο δεύτερο στάδιο, κάθε εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζει τη βέλτιστη τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας δεδομένης της κατανάλωσης των πελατών από το πρώτο στάδιο, μέσω ενός κατανεμημένου προβλήματος βελτιστοποίησης .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο

ΑΛΓΟΡΙΘΜΟΣ

4.1 Αλγόριθμος της εκμάθησης της επιλογής εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής και διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης

4.1 Αλγόριθμος της εκμάθησης της επιλογής εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής και διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης

Στην ενότητα αυτή προτείνουμε έναν αλγόριθμο εκμάθησης της επιλογής της εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής από την πλευρά των καταναλωτών και διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης σε δύο στάδια. Το πρώτο μέρος του αλγορίθμου βασίζεται στο πλαίσιο της μηχανικής μάθησης, που περιγράφεται στην Ενότητα 2.3 και είναι υπεύθυνο για τον προσδιορισμό της εταιρείας ηλεκτρικής ενέργειας που επιλέγει ο κάθε χρήστης - πελάτης από την οποία θα εξυπηρετηθεί. Σημειώνεται ότι ο αλγόριθμος επιλογής της εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής εκτελείται μία φορά στην αρχή κάθε χρονικού διαστήματος λειτουργίας. Από την άλλη πλευρά, το δεύτερο μέρος του προτεινόμενου αλγόριθμου υλοποιεί το ζήτημα της διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης. Πιο συγκεκριμένα, είναι υπεύθυνο για τον καθορισμό της βέλτιστης τιμής που ανακοινώνεται από κάθε εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας και τη βέλτιστη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας κάθε πελάτη. Το βασικό σημείο του αλγορίθμου είναι πως εκτελείται σε κάθε χρονικό διάστημα $t, t \in T$, μέχρις ότου να υπάρχει σύγκλιση τόσο ως προς τις βέλτιστες τιμές των εταιρειών όσο και ως προς τις βέλτιστες καταναλώσεις των καταναλωτών.

Αλγόριθμος:

Βήμα 1 (Αρχικοποίηση) : Στην αρχή του πρώτου χρονικού διαστήματος, δηλαδή $t = 0$, ρυθμίζονται οι τιμές των αρχικών πιθανοτήτων επιλογής των εταιρειών για κάθε καταναλωτή.

$$\Pr_{i,j}(t=0) = \frac{1}{J}, \forall\, i, j : i \in I \;\&\; j \in J$$

Βήμα 2 (Επιλογές εταιρειών ηλεκτροπαραγωγής) :

Κάθε καταναλωτής ανανεώνει τις πιθανότητες επιλογής των εταιρειών σύμφωνα με τις σχέσεις (8a) και (8b) και επιλέγει μια εταιρεία παροχής ηλεκτρικής ενέργειας Εάν $\Pr_{i,j}(t) \geq 0.999$ για μια τουλάχιστον εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής $j,\ j \in \mathcal{J}$, τότε ο αλγόριθμος επιλογής συγκλίνει και τερματίζει.

Βήμα 3 (Αρχικοποίηση αριθμού επαναλήψεων) :

Αρχικοποιείται ο αριθμός των επαναλήψεων του αλγορίθμου διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης ίσος με 0. Ο μετρητής αυτός στο τέλος του αλγορίθμου δείχνει τον αριθμό των επαναλήψεων που χρειάστηκαν έως ότου συγκλίνει ο αλγόριθμος.

Βήμα 4 (Καθορισμός της βέλτιστης κατανάλωσης από τους χρήστες) :

Δεδομένου ότι όλοι οι πελάτες έχουν επιλέξει μια εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας για να εξυπηρετηθούν, οι εταιρείες ανακοινώνουν τις τιμές ηλεκτρικής ενέργειας και τη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στο "Έξυπνο Δίκτυο". Κάθε πελάτης καθορίζει την βέλτιστη απόκριση κατανάλωσης βάσει της εξίσωσης (11), ως $e_{i,j}^{(t)*}\Big|_{ite}$.

Βήμα 5 (Καθορισμός της βέλτιστης τιμολόγησης ηλεκτρικής ενέργειας από τις εταιρείες) :

Δεδομένη της βέλτιστης κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας από τους πελάτες, κάθε εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής καθορίζει την βέλτιστη τιμή πώλησης της ενέργειας από την εξίσωση (13) και την ανακοινώνει στους πελάτες, ως $p_j^{(t)*}\Big|_{ite}$.

Βήμα 6 (Έλεγχοι σύγκλισης του αλγορίθμου διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης) :

Εάν $\left| e_{i,j}^{(t)*}\Big|_{ite+1} - e_{i,j}^{(t)*}\Big|_{ite} \right| \le \varepsilon_1$ και $\left| p_{i,j}^{(t)*}\Big|_{ite+1} - p_{i,j}^{(t)*}\Big|_{ite} \right| \le \varepsilon_2$, όπου ε_1 και ε_2 είναι μικρές σταθερές, τότε οι βέλτιστες καταναλώσεις των χρηστών και οι βέλτιστες τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας των εταιρειών έχουν συγκλίνει και ο αλγόριθμος τερματίζει. Αλλιώς, γίνεται επιστροφή στο Βήμα 4.

Βήμα 7 (Ανανέωση πιθανοτήτων επιλογής ηλεκτρικής ενέργειας) :

Δεδομένης της σύγκλισης του αλγορίθμου διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης, κάθε εταιρεία μπορεί να υπολογίσει την πιθανότητα ανταμοιβής της και να την μεταδώσει στους πελάτες. Επιστροφή στο Βήμα 2.

Τέλος, θα πρέπει να διευκρινιστεί ότι ο αλγόριθμος εκμάθησης της επιλογής της εταιρείας παρόχου και διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης μπορεί να χαρακτηριστεί ως ένας αλγόριθμος χαμηλής πολυπλοκότητας (όπως θα παρουσιαστεί λεπτομερώς στα αριθμητικά αποτελέσματα), λόγω της απλότητας των υπολογισμών (δηλαδή των κλειστών

μορφών των τύπων καθορισμού της βέλτιστης κατανάλωσης και της βέλτιστης τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας) που εκτελεί. Επιπλέον όπως θα φανεί και από τα αριθμητικά αποτελέσματα οι πιθανότητες επιλογής των εταιρειών συγκλίνουν σχετικά γρήγορα από άποψη των απαιτούμενων χρονικών διαστημάτων, δηλαδή $\exists j,\ j \in J : \Pr_{i,j}(t) \geq 0.999$.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Μελέτη του συστήματος εκμάθησης

5.2 Σύγκλιση του αλγορίθμου για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα

5.3 Σύγκλιση του αλγορίθμου για το σύνολο των χρονικών διαστημάτων

5.4 Βαθύτερη μελέτη του τρόπου λειτουργίας τους αλγορίθμου και της βέλτιστης προτεινόμενης λύσης

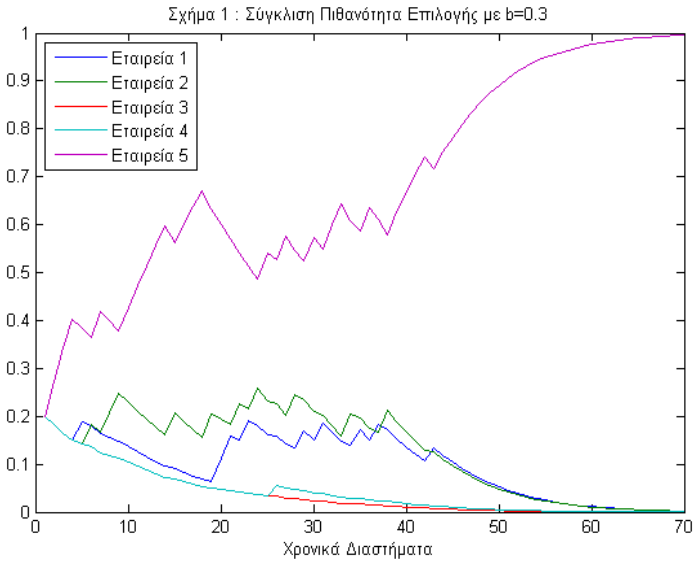
5.5 Τελικά συμπεράσματα

5.1 Μελέτη του Συστήματος Εκμάθησης

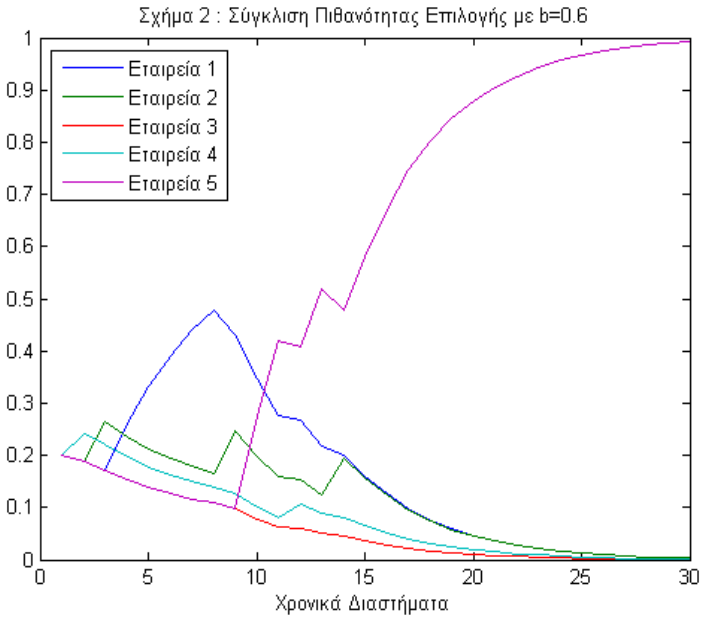
Όπως έχουμε ήδη επισημάνει το "Έξυπνο Δίκτυο" λειτουργεί ως Σύστημα Εκμάθησης στο οποίο κάθε χρήστης ως αυτοματοποιημένο σύστημα συγκλίνει ως προς την επιλογή της βέλτιστης για αυτόν εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής. Ο τρόπος με τον οποίο επιτυγχάνεται η σύγκλιση της επιλογής είναι αρκετά ορατός από την τρόπο μοντελοποίησης του συστήματος εκμάθησης στην Ενότητα 2.3, καθώς σε κάθε χρονικό διάστημα η πιθανότητα της επιλεγμένης εταιρείας αυξάνεται σύμφωνα με την πιθανότητα ανταμοιβής ενώ οι πιθανότητες επιλογής των άλλων εταιρειών μειώνονται. Στην εξέλιξη του αλγορίθμου υπάρχει όπως δείξαμε κάποιο χρονικό διάστημα στο οποίο η επιλογή του χρήστη συγκλίνει ως προς συγκεκριμένη εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής με πιθανότητα $\Pr_{i,j}(t) \geq 0.999$. Επίσης θα πρέπει να επισημάνουμε πως η παράμετρος b όπου εμφανίζεται στις σχέσεις (8a) και (8b) είναι σημαντική ως προς τον καθορισμό του χρονικού διαστήματος στο οποίο επιτυγχάνεται η εν λόγω σύγκλιση όπως φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.

Σενάριο Εκτέλεσης Αλγορίθμου: Χρήστες = 100, Εταιρείες = 5

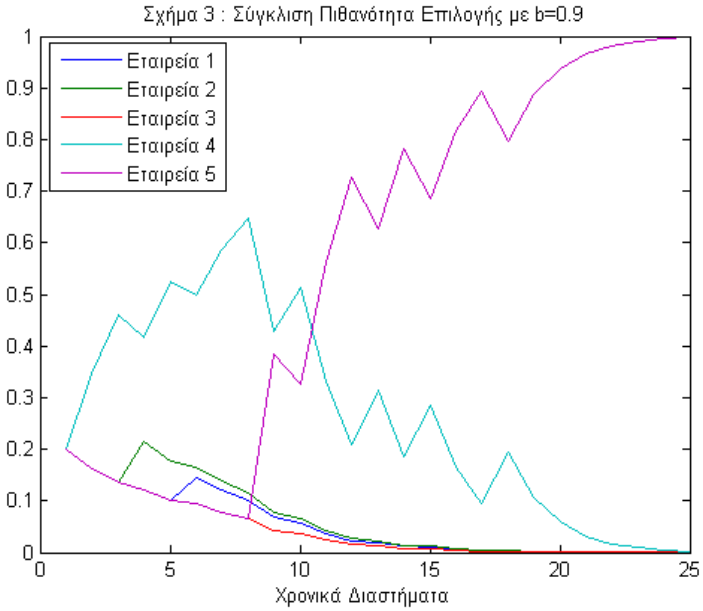
- $b = 0.3$



- $b = 0.6$


Σχήμα 2 : Σύγκλιση Πιθανότητας Επιλογής με b=0.6
Εταιρεία 1
Εταιρεία 2
Εταιρεία 3
Εταιρεία 4
Εταιρεία 5
Χρονικά Διαστήματα

- $b = 0.9$


Σχήμα 3 : Σύγκλιση Πιθανότητα Επιλογής με b=0.9
Εταιρεία 1
Εταιρεία 2
Εταιρεία 3
Εταιρεία 4
Εταιρεία 5
Χρονικά Διαστήματα

Όπως βλέπουμε από τα προηγούμενα διαγράμματα ο ρόλος της παραμέτρου b είναι καθοριστικός στην σύγκλιση του αλγορίθμου επιλογής της εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής. Πιο συγκεκριμένα καθώς ο η παράμετρος αυξάνει το απαιτούμενο πλήθος των χρονικών διαστημάτων για την επίτευξη της σύγκλισης ελαττώνεται. Το φαινόμενο αυτό είναι απολύτως λογικό και αναμενόμενο καθώς με μεγαλύτερη τιμή της παραμέτρου b οι πιθανότητες επιλογής των εταιρειών αυξάνονται ή μειώνονται πιο ραγδαία σε σχέση με μικρότερες τιμές της παραμέτρου, επομένως ο αλγόριθμος φτάνει νωρίτερα στο σημείο όπου ο συγκεκριμένος χρήστης συγκλίνει ως προς την επιλογή της βέλτιστης εταιρείας παρόχου.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η αύξηση της τιμής της παραμέτρου b δεν συνδέεται πάντα με πιο ταχύτατα και το ίδιο βέλτιστα αποτελέσματα, καθώς για αρκετά μεγάλες τιμές της παραμέτρου η μετάβαση του αλγορίθμου στο σημείο σύγκλισης είναι αρκετά απότομη, με αποτέλεσμα να υπάρχει πάντα η περίπτωση στη μεγάλο αυτό "άλμα" του αλγορίθμου να χαθεί το βέλτιστο της επιλογής για κάποιους χρήστες. Για το σκοπό αυτό προτιμάται κατά την εκτέλεση του αλγορίθμου να χρησιμοποιούνται μεσαίες τιμές της παραμέτρου b όπως 0.5 ή 0.6.

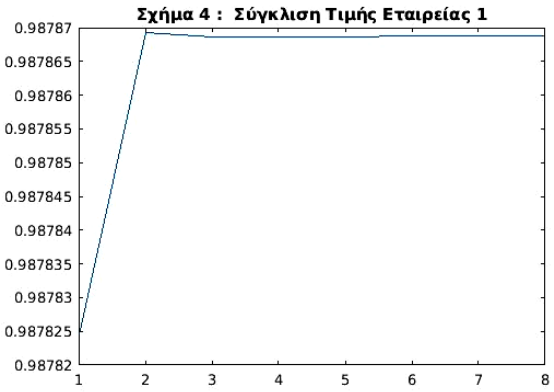
Τέλος αξίζει να σημειώσουμε πως η εν λόγω μοντελοποίηση του συστήματος εκμάθησης για κάθε χρήστη πετυχαίνει το στόχο της όπου είναι η σύγκλιση ως προς την επιλογής εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής, της οποίας η βελτιστότητα εξετάζεται σε ακόλουθη Ενότητα.

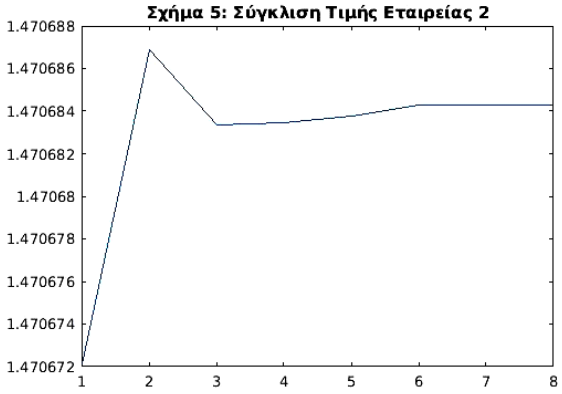
5.2 Σύγκλιση του αλγορίθμου για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα

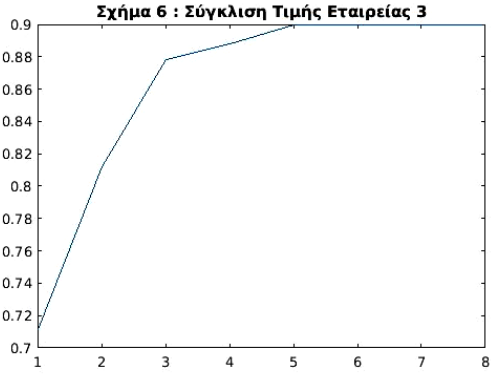
Μέχρι στιγμής έχουμε εξετάσει την σύγκλιση του αλγορίθμου ως προς την επιλογή της εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής για κάθε χρήστη του "Έξυπνου Δικτύου". Ομοίως το πρόβλημα διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης όπως αυτό έχει μοντελοποιηθεί θα πρέπει να επιτυγχάνει σύγκλιση τόσο ως προς την κατανάλωση των χρηστών όσο και ως προς τις τιμές που ανακοινώνουν οι εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής, έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι συνθήκες σύγκλισης και να τερματίζει ο αλγόριθμος. Παρόλ'αυτά θα πρέπει να γίνει κατανοητό πως ο αλγόριθμος ουσιαστικά εξελίσσεται σε δύο διαφορετικές διαστάσεις, με τη μία να είναι στο εσωτερικό ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος και την δεύτερη να είναι στο σύνολο

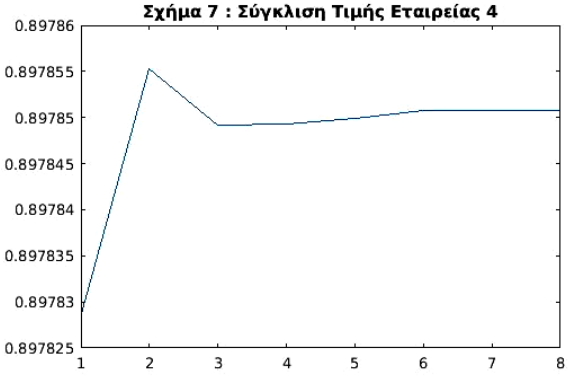
των χρονικών διαστημάτων. Στην Ενότητα αυτή μελετάμε την συμπεριφορά του αλγορίθμου στο εσωτερικό ενός συγκεκριμένου χρονικού διαστήματος.

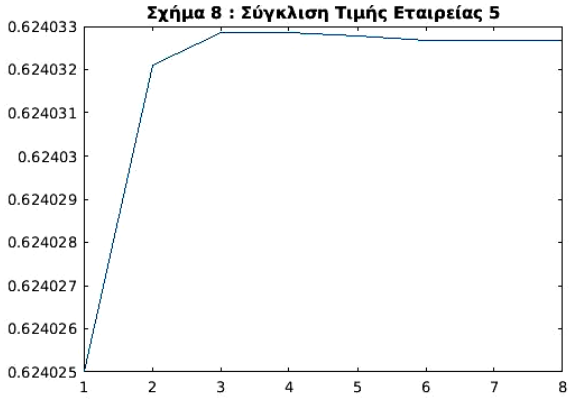
Αρχικά θα πρέπει να επισημάνουμε ότι μελετώντας την συμπεριφορά του αλγορίθμου για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα θα πρέπει πρωτίστως να αναζητήσουμε σύγκλιση τόσο ως προς τις καταναλώσεις των χρηστών όσο και ως προς τις τιμές των εταιρειών ώστε να έχουμε τερματισμό του αλγορίθμου. Στην συνέχεια η μελέτη των υπολοίπων μεγεθών είναι ανάλογα συνδεδεμένη με την συμπεριφορά των τιμών των εταιρειών και των καταναλώσεων των χρηστών.



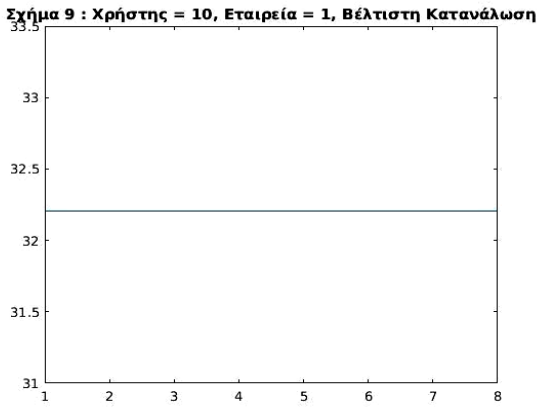


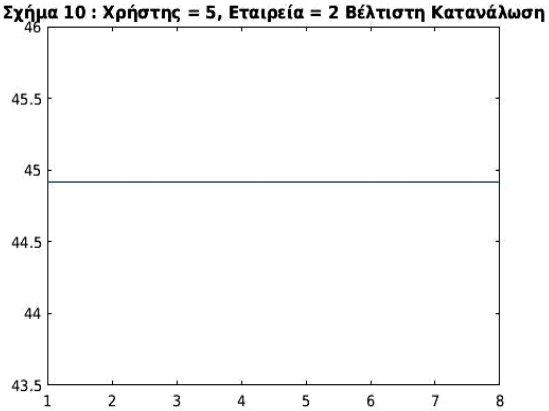


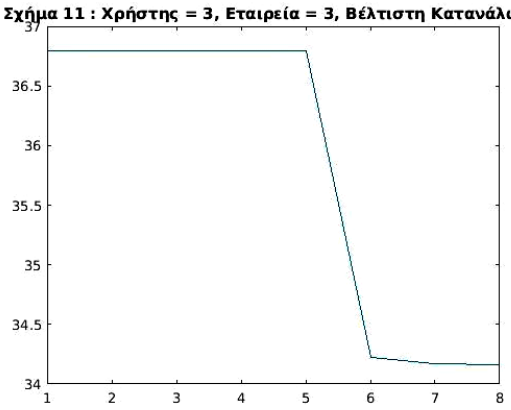


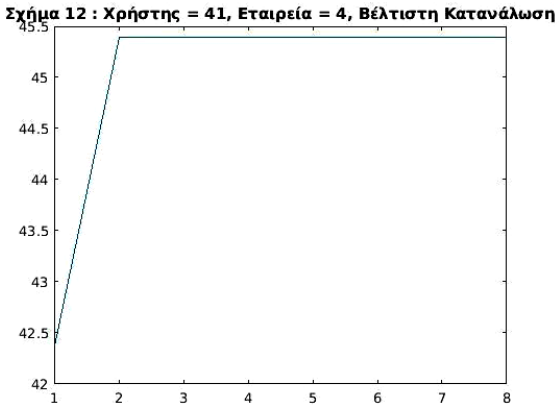


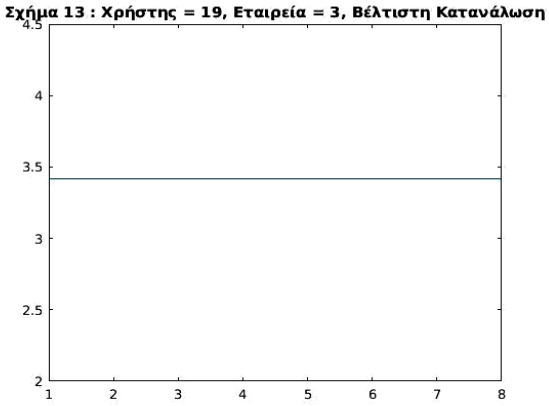
Είναι ορατό από τα παραπάνω διαγράμματα πως η σύγκλιση ως προς τις τιμές που ανακοινώνει η κάθε εταιρεία για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα επιτυγχάνεται αρκετά γρήγορα, δηλαδή για μικρό πλήθος επαναλήψεων. Επίσης, κάθε εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής ξεκινώντας από μια αρχική τιμή πώλησης μέσω του προβλήματος διαχείρισης της απόκρισης και του τρόπου μοντελοποιήσης του, φθάνει στην τελική βέλτιστη τιμή που ανακοινώνει για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Ακολουθούν τα διαγράμματα σύγκλισης των καταναλώσεων των χρηστών.











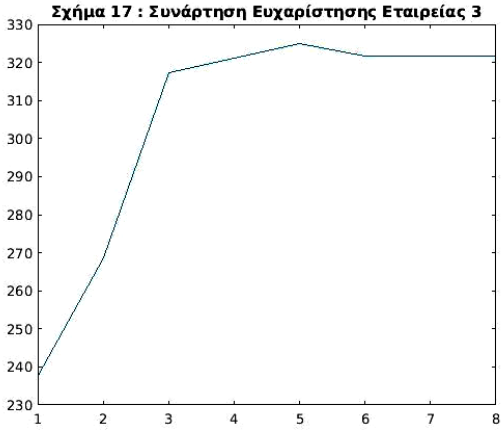
Οι καταναλώσεις των χρηστών συγκλίνουν σε σταθερές τιμές μέσα σε λίγες επαναλήψεις του αλγορίθμου διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης όπως φαίνεται από τα διαγράμματα. Επίσης αξίζει να σημειώσουμε ότι για ορισμένους καταναλωτές δεν υπάρχουν μεταβολές μεταξύ των καταναλώσεων των διαφορετικών επαναλήψεων καθώς η βέλτιστη κατανάλωση παραμένει η ίδια, επομένως η σύγκλιση και σε αυτή την περίπτωση έχει επιτευχθεί.

Δεδομένης της σύγκλισης των τιμών ηλεκτρικής ενέργειας από τις εταιρείες και της σύγκλισης των καταναλώσεων των χρηστών, αναμένουμε σύγκλιση και στις συναρτήσεις ευχαρίστησης των χρηστών και των εταιρειών. Όπως έχουμε ήδη ορίσει οι συναρτήσεις ευχαρίστησης εξαρτώνται εξολοκλήρου από τις τιμές των εταιρειών και τις καταναλώσεις των χρηστών, για αυτό το λόγο έχουμε τα ακόλουθα διαγράμματα.

Σχήμα 15 : Συνάρτηση Ευχαρίστησης Εταιρείας 1

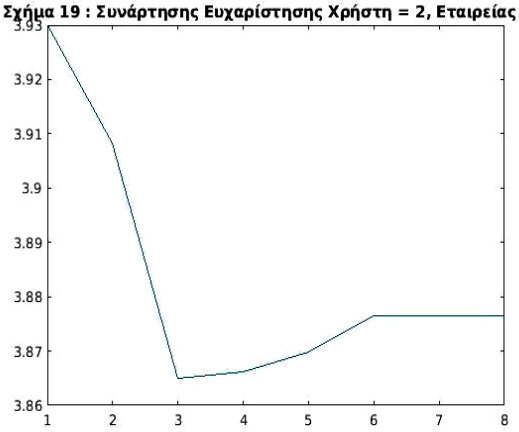
Σχήμα 16 : Συνάρτηση Ευχαρίστησης Εταιρείας 2

Σχήμα 17 : Συνάρτηση Ευχαρίστησης Εταιρείας 3

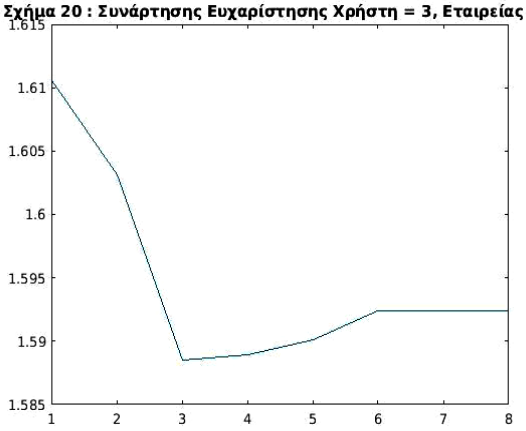


Σχήμα 18 : Συνάρτηση Ευχαρίστησης Εταιρείας 4

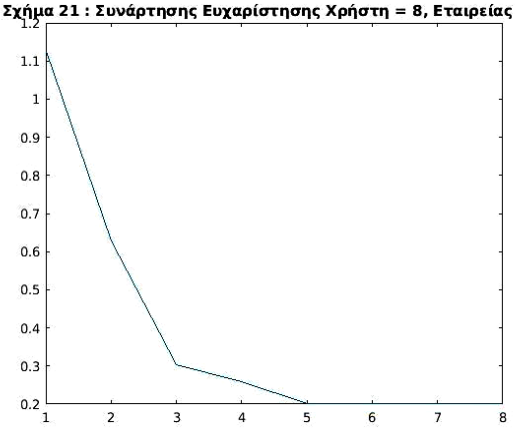
Σχήμα 19 : Συνάρτησης Ευχαρίστησης Χρήστη = 2, Εταιρείας = 1



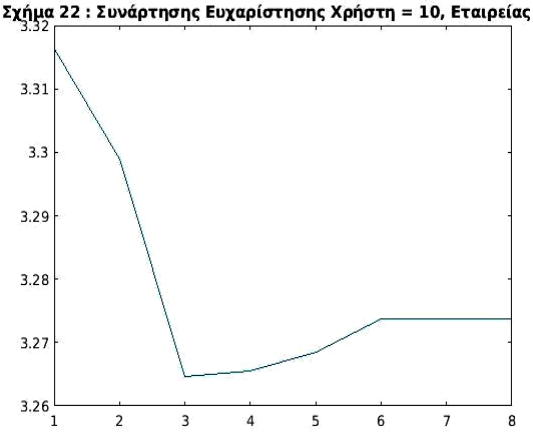
Σχήμα 20 : Συνάρτησης Ευχαρίστησης Χρήστη = 3, Εταιρείας = 2



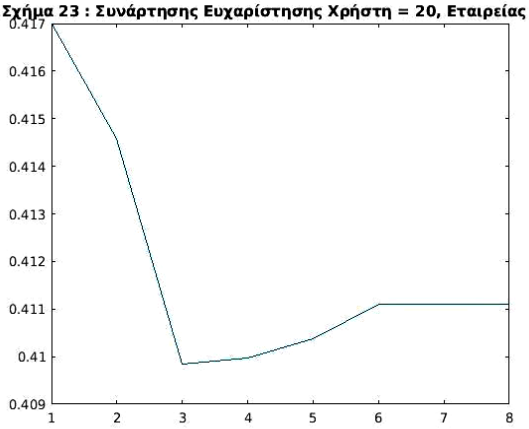
Σχήμα 21 : Συνάρτησης Ευχαρίστησης Χρήστη = 8, Εταιρείας = 3



Σχήμα 22 : Συνάρτησης Ευχαρίστησης Χρήστη = 10, Εταιρείας = 4



Σχήμα 23 : Συνάρτησης Ευχαρίστησης Χρήστη = 20, Εταιρείας = 5



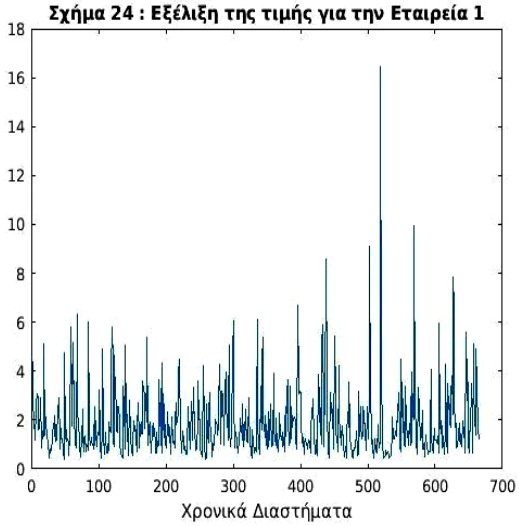
Πράγματι όπως αναμενόταν έχουμε σύγκλιση για τις συναρτήσεις ευχαρίστησης τόσο των πελατών όσο και εταιρειών ηλεκτροπαραγωγής, καθώς οι εν λόγω συναρτήσεις εξαρτώνται μονάχα από τις τιμές της ενέργειας και τις καταναλώσεις των χρηστών. Επιπρόσθετα, οι τελευταίες συγκλίσεις μαρτυρούν πως η συγκεκριμένη μοντελοποίηση της διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης του αλγορίθμου, μέσω του κατάλληλου πλάνου κατανάλωσης από την πλευρά των καταναλωτών και μέσω της κατάλληλης τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας από την πλευρά των εταιρειών, μπορεί να οδηγήσει τις εταιρείες και τους χρήστες στην επίτευξη τιμής σύγκλισης για τις συναρτήσεις ευχαρίστησης τους, οι οποίες τιμές όπως θα δειχθεί και αργότερα είναι βέλτιστες.

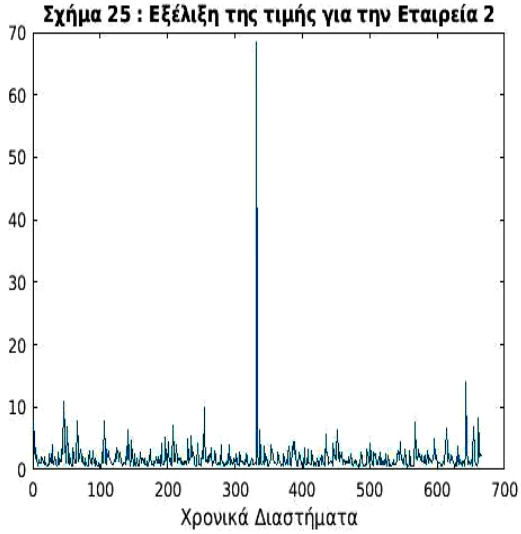
5.3 Σύγκλιση του Αλγορίθμου για το σύνολο των χρονικών διαστημάτων

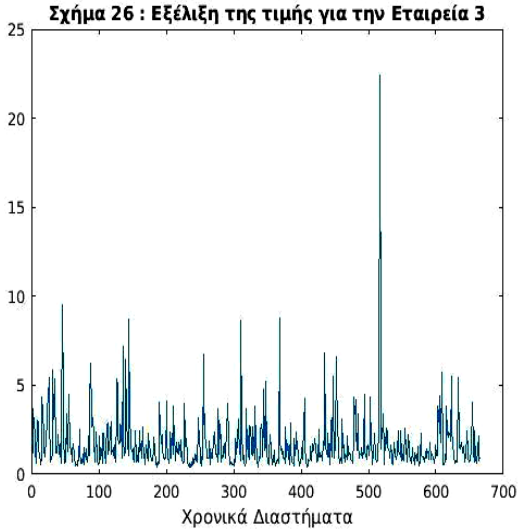
Η εξέλιξη και η μελέτη του αλγορίθμου είναι εξίσου σημαντική ως προς το σύνολο των χρονικών διαστημάτων, καθώς έτσι μελετάται η γενικότερη συμπεριφορά του αλγορίθμου κατά την διάρκεια της ημέρας. Αυτό που θα πρέπει να τονίσουμε εδώ είναι ότι στη συγκεκριμένη μελέτη δεν αναμένουμε κάποια σύγκλιση ως προς τις τιμές των εταιρειών ηλεκτροπαραγωγής. Αυτό συμβαίνει διότι οι απαιτήσεις των χρηστών αλλάζουν ανά χρονικό διάστημα, επομένως είναι λογικό να μην έχουμε σύγκλιση ως προς μία τιμή ηλεκτρικής ενέργειας για όλα τα χρονικά διαστήματα από κάποια εταιρεία. Η μελέτη κάθε χρονικού διαστήματος είναι ανεξάρτητη και άρα δεν υπάρχει κάποια σύγκλιση μεγεθών ως προς το σύνολο των χρονικών διαστημάτων. Παρόλ'αυτά μελετώντας τις μέσες τιμές των μεγεθών παρατηρούμε πως υπάρχει σύγκλιση σε συγκεκριμένες τιμές, γεγονός που οφείλεται στο ότι οι εταιρείες στη συγκεκριμένη μοντελοποίηση διατηρούν τις πολιτικές τους ως προς το κόστη παραγωγής και τα μεγέθη των προσφερόμενων προσφορών. Επίσης η σύγκλιση αυτή δείχνει την συνάφεια του αλγορίθμου καθώς τα βέλτιστα πλάνα τιμολόγησης και κατανάλωσης παραμένουν αρκετά παρόμοια όταν υπάρχουν μικρές διαφορές στις απαιτήσεις των χρηστών συναρτήσει των διαφορετικών χρονικών διαστημάτων, χαρακτηριστικό το οποίο ήταν εξαρχής αναγκαίο για την επιβεβαίωση της σωστής λειτουργίας του αλγορίθμου. Επιπρόσθετα, οι γνώσεις του αλγορίθμου για την μέχρι τώρα εξέλιξη του "Έξυπνου Δικτύου" συμβάλλουν ώστε να καθοριστούν ταχύτερα οι νέες βέλτιστες τιμές του νέου χρονικού διαστήματος, γεγονός που αναδεικνύει πως μεταξύ των διαφορετικών χρονικών διαστημάτων υπάρχει συσχέτιση την οποία εκμεταλλεύεται ο αλγόριθμος.

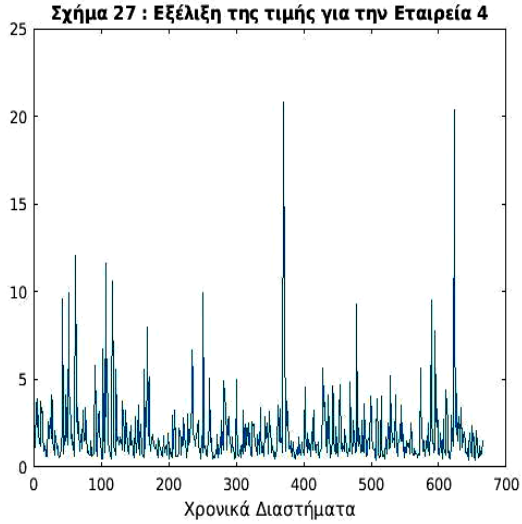
Αρχικά για συγκεκριμένο σενάριο παρουσιάζουμε τα διαγράμματα που δείχνουν την εξέλιξη των τιμών για την κάθε εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής αναδεικνύοντας αυτό που αναφέραμε προηγουμένως, πως είναι αναμενόμενο να μην παρουσιάζεται σύγκλιση ως προς κάποια τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας συναρτήσει των χρονικών διαστημάτων για την κάθε εταιρεία. Στην συνέχεια απεικονίζεται η σύγκλιση ως προς τις μέσες τιμές των μεγεθών, γεγονός που επιβεβαιώνει την συνάφεια του αλγορίθμου αφού καταλήγει σε παρόμοια πλάνα τιμολόγησης και κατανάλωσης όταν οι διαφορές των απαιτήσεων των χρηστών είναι μικρές.

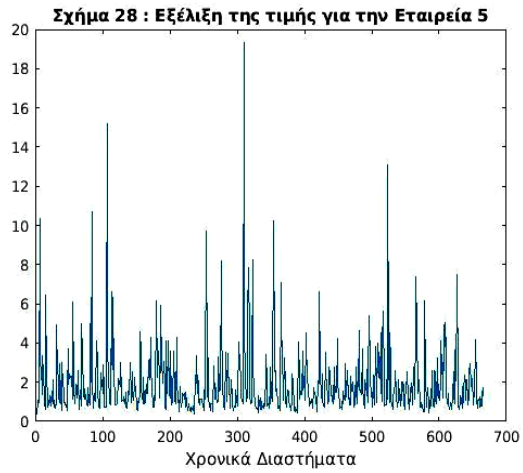
Σενάριο Εκτέλεσης Χρήστες = 100, Εταιρείες = 5



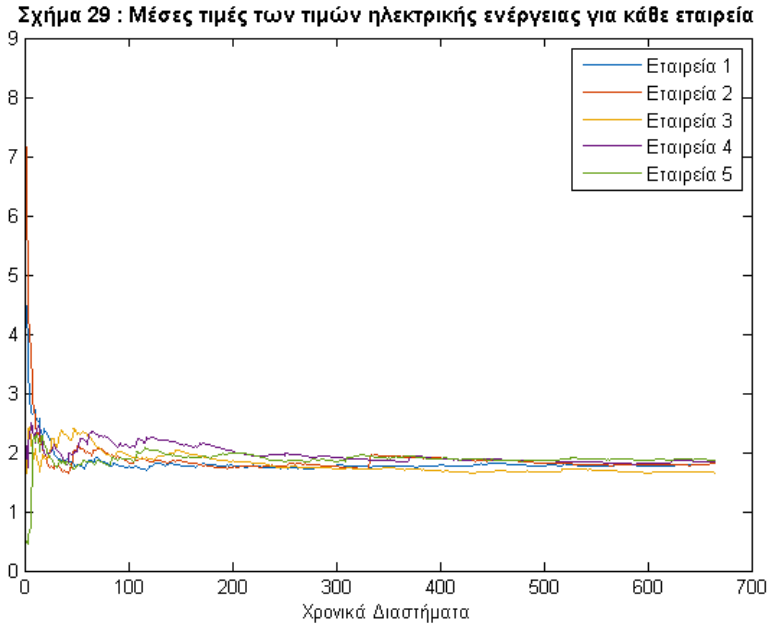




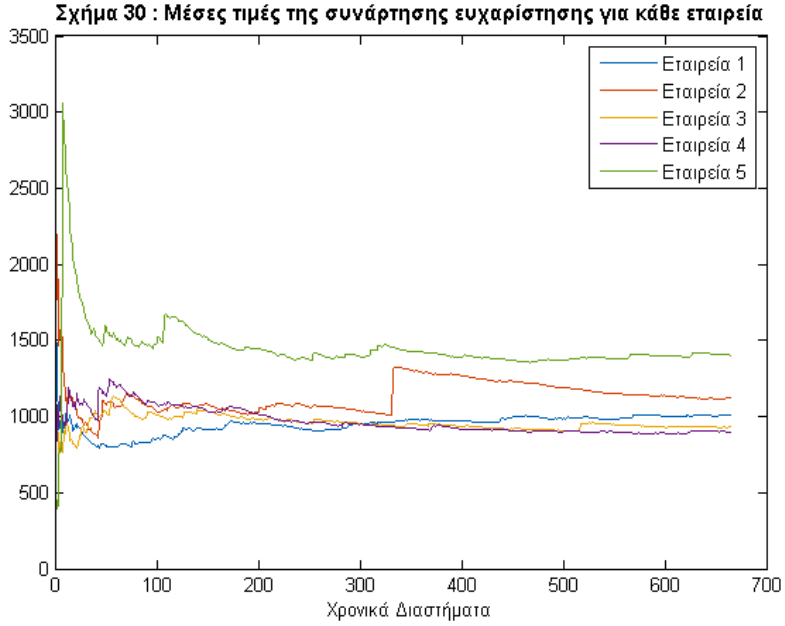




Όπως φαίνεται χαρακτηριστικά από τα διαγράμματα δεν υπάρχει σύγκλιση ως προς συγκεκριμένη τιμή για καμία εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής, όπως αναμέναμε. Από την άλλη μεριά οι μεταβολές των τιμών μεταξύ των διαφορετικών χρονικών διαστημάτων τις περισσότερες φορές είναι αρκετά μικρές. Ακολουθούν οι αναπαραστάσεις των μέσων τιμών των μεγεθών.



Σχήμα 30 : Μέσες τιμές της συνάρτησης ευχαρίστησης για κάθε εταιρεία



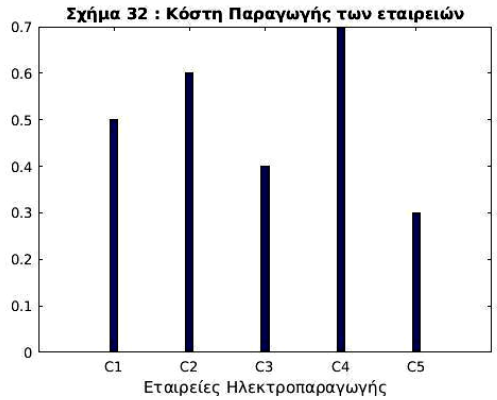
Επομένως όπως παρατηρούμε πράγματι οι μέσες τιμές των μεγεθών συγκλίνουν σε συγκεκριμένες τιμές, καθώς ο αλγόριθμος εξελίσσεται στο σύνολο των χρονικών διαστημάτων. Τέλος εκείνο που αξίζει να τονίσουμε είναι πως επιτυγχάνεται σύγκλιση και στις μέσες τιμές της συνάρτησης ευχαρίστησης των χρηστών όπως φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα, γεγονός που δείχνει ότι λόγω της σταθερής πολιτικής των εταιρειών και λόγω των μικρών διαφορών μεταξύ των απαιτήσεων των χρηστών, οι τιμές της συνάρτησης ευχαρίστησης που πετυχαίνουν οι χρήστες στα διαφορετικά χρονικά διαστήματα είναι αρκετά κοντά μεταξύ τους.

5.4 Βαθύτερη μελέτη του τρόπου λειτουργίας του αλγορίθμου και της βέλτιστης προτεινόμενης λύσης

Στην ενότητα αυτή μελετάμε και αναλύουμε την συνολική συμπεριφορά και τα συνολικά αποτελέσματα του αλγορίθμου για ένα συγκεκριμένο σενάριο εφαρμογής (Χρήστες = 300, Εταιρείες = 5, Χρονικά διαστήματα = 100). Η συνολική ανάλυση του αλγορίθμου μπορεί να γίνει μονάχα στο σύνολο των χρονικών διαστημάτων καθώς μόνο έτσι είναι δυνατόν να

απεικονιστεί το πως λειτουργεί ο αλγόριθμος και αν το πλάνο κατανάλωσης και τιμολόγησης είναι βέλτιστα. Από την άλλη μεριά όπως έχουμε ήδη δείξει η μελέτη για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα χρησιμοποιείται ώστε να απεικονιστεί η σύγκλιση του αλγορίθμου ως προς τις τιμές πώλησης και τα μεγέθη κατανάλωσης των χρηστών, έτσι ώστε να αναδειχθεί ο τρόπος με τον οποίο αντιμετωπίζεται το πρόβλημα διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης. Ο τελευταίος τρόπος μελέτης είναι ο επικρατέστερος στις περισσότερες παρόμοιες έρευνες της βιβλιογραφίας, ενώ ο πρώτος αποτελούσε πάντα έναν περαιτέρω στόχο.

Τα ακόλουθα διαγράμματα ερμηνεύουν τις επιλογές που κάνουν οι χρήστες ως προς τις εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής και τους παράγοντες που τις διαμορφώνουν, καθώς επίσης και την σημασία των πολιτικών των εταιρειών ως προς την αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας. Επιπρόσθετα, αφού η μελέτη γίνεται στο σύνολο των χρονικών διαστημάτων όλα τα μεγέθη που ακολουθούν αφορούν τις μέσες τιμές αυτών.

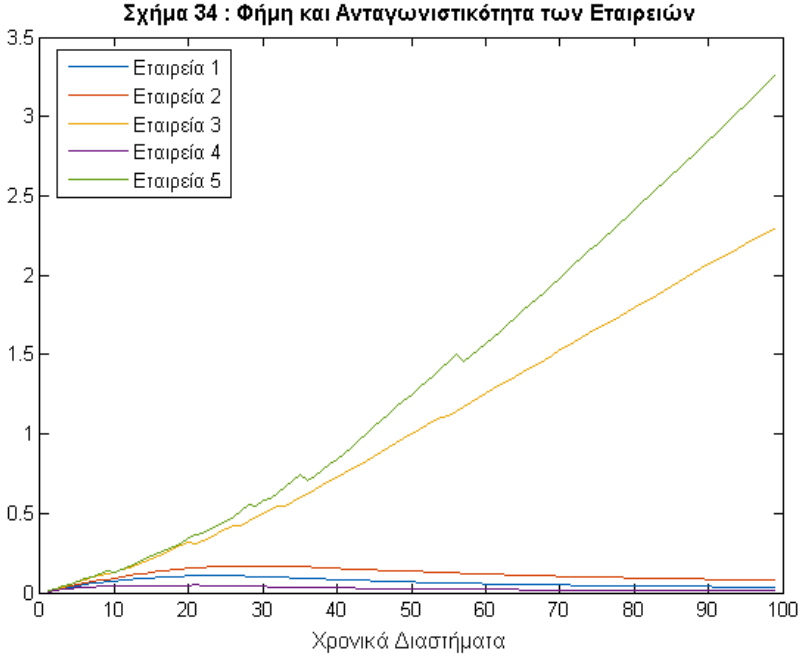


Είναι ορατό από τα Σχήματα 32 και 33 πως οι εταιρείες 3 και 5 παρέχουν τις υψηλότερες προσφορές των τιμών πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας, με την διαφορά όμως ότι η εταιρεία 5 έχει χαμηλότερο κόστος παραγωγής ενέργειας. Τέλος η εταιρεία 4 έχει το υψηλότερο κόστος και συγχρόνως τη χαμηλότερη προσφορά της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας.

Οι εταιρείες κατά την διάρκεια του αλγορίθμου προσπαθούν να χτίσουν "καλό - υψηλό" προφίλ φήμης και ανταγωνιστικότητας στην αγορά, έτσι ώστε να κερδίζουν όσους περισσότερους καταναλωτές - πελάτες γίνεται. Με τον ίδιο ο τρόπο οι καταναλωτές προσπαθούν να επιλέγουν εταιρείες με ισχυρό προφίλ καθώς τους προσφέρουν υψηλές προσφορές και εμπιστοσύνη πως οι απαιτήσεις τους θα μπορούν να ικανοποιηθούν καθ' όλη

την διάρκεια της ημέρας. Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα φήμης και ανταγωνιστικότητας των εταιρειών.

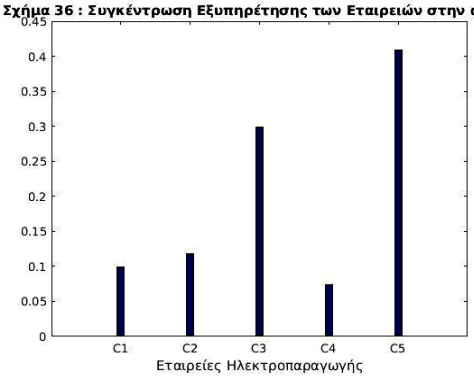
Σχήμα 34 : Φήμη και Ανταγωνιστικότητα των Εταιρειών



Οι εταιρείες 5 και 3 όπως είναι ορατό διαμορφώνουν το καλύτερο προφίλ φήμης και ανταγωνιστικότητας ως προς την αγορά στο σύνολο των χρονικών διαστημάτων. Οι δύο αυτές εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής προσφέρουν τις υψηλότερες προσφορές στις τιμές πώλησης τους και η εταιρεία 5 με το χαμηλότερο κόστος παραγωγής είναι αυτή που έχει την μεγαλύτερη φήμη και ανταγωνιστικότητα. Επίσης, είναι σημαντικό να σημειώσουμε πως το "καλό" προφίλ των εταιρειών "χτίζεται" με χαμηλές τιμές του ρυθμού μέγιστη - προς - μέση κατανάλωση και με υψηλή συγκέντρωση εξυπηρέτησης στην αγορά της ηλεκτρικής ενέργειας.

Σχήμα 35 : Ρυθμός μέγιστης - προς - μέσης κατανάλωσης

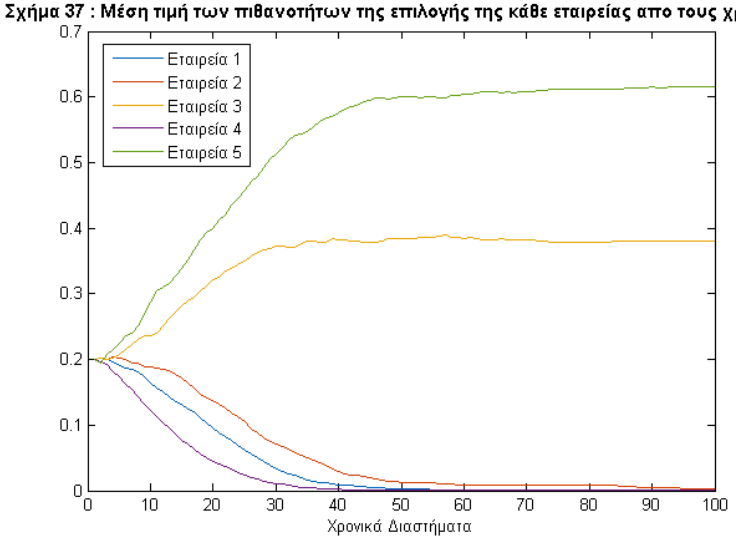
Σχήμα 36 : Συγκέντρωση Εξυπηρέτησης των Εταιρειών στην αγορά



Όπως ήταν αναμενόμενο είναι ορατό πως οι εταιρείες 3 και 5 έχουν τις χαμηλότερες τιμές για τον ρυθμό μέγιστη - προς - μέση κατανάλωση και συγχρόνως την υψηλότερη συγκέντρωση εξυπηρέτησης στην αγορά.

Οι χρήστες κάνουν επιλογή μια εταιρεία ηλεκτρικής ενέργειας και επιθυμούν να επιλέγουν εκείνους που έχουν καλό προφίλ φήμης και ανταγωνιστικότητας στην αγορά. Άρα σύμφωνα με τα προηγούμενα διαγράμματα περιμένουμε οι εταιρείες 3 και 5 να επιλέγονται τις περισσότερες φορές και από τους περισσότερους χρήστες. Παρακάτω απεικονίζεται η μέση τιμή των πιθανοτήτων επιλογής της κάθε εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής από τους χρήστες για κάθε χρονικό διάστημα.

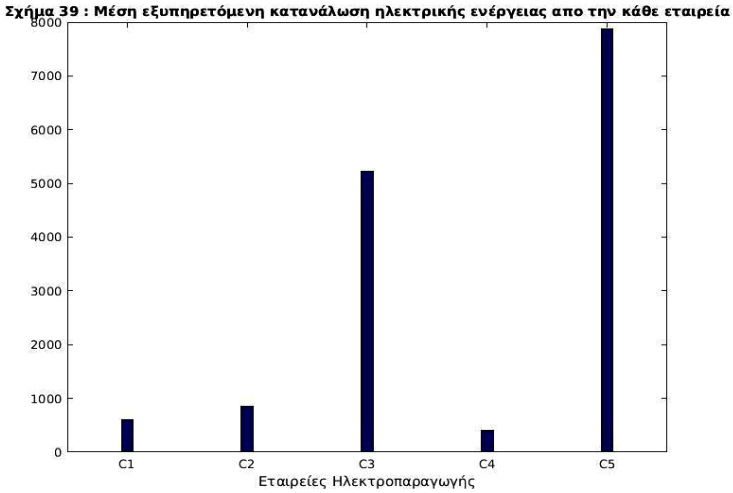
Σχήμα 37 : Μέση τιμή των πιθανοτήτων της επιλογής της κάθε εταιρείας απο τους χρήστες



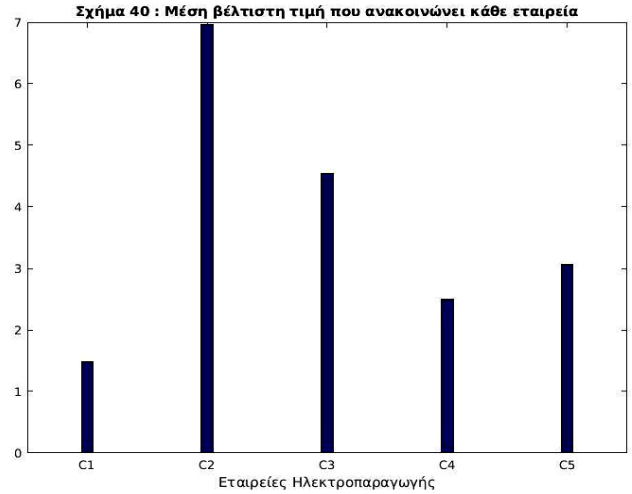
Πράγματι βλέπουμε πως τελικά οι εταιρείες 3 και 5 είναι εκείνες οι οποίες καταφέρνουν να "χτίσουν" τις υψηλότερες πιθανότητες επιλογής ώστε να επιλεχθούν από τους περισσότερος χρήστες. Επομένως όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα οι εταιρείες αυτές εξυπηρετούν τους περισσότερους καταναλωτές.

Αξίζει να τονίσουμε ότι οι δύο αυτές εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής εξυπηρετούν σε κάθε χρονικό διάστημα περίπου το 86% των χρηστών του "Έξυπνου Δικτύου". Η εταιρεία 5 κερδίζει περισσότερους πελάτες σε σχέση με την εταιρεία 3, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι η πρώτη έχει χαμηλότερο κόστος παραγωγής και επομένως την δυνατότητα να παρέχει χαμηλότερες τιμές όπως θα δούμε και παρακάτω.

Στο ακόλουθο διάγραμμα απεικονίζουμε την μέση συνολική κατανάλωση ενέργειας που εξυπηρετεί η κάθε εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής, σύμφωνα πάντα με τους πελάτες που την έχουν επιλέξει ως πάροχο ηλεκτρικής ενέργειας.



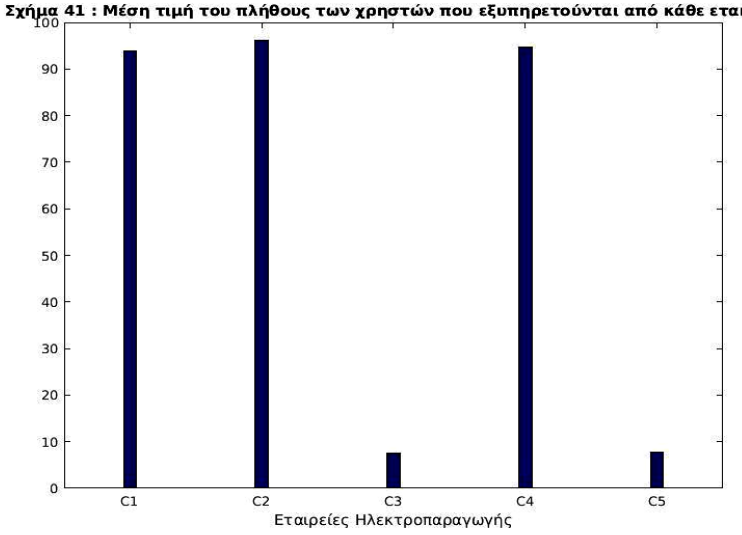
Οι εταιρείες 3 και 5 εξυπηρετούν το μεγαλύτερο μερίδιο ενέργειας που απαιτείται από το "Έξυπνο Δίκτυο". Αυτό είναι απολύτως αναμενόμενο διότι όπως δείξαμε στο προηγούμενο διάγραμμα, οι εταιρείες αυτές έχουν τους περισσότερους χρήστες σε κάθε χρονικό διάστημα. Παρακάτω παρουσιάζεται το διάγραμμα της μέσης βέλτιστης τιμής ηλεκτρικής ενέργειας της κάθε εταιρείας.



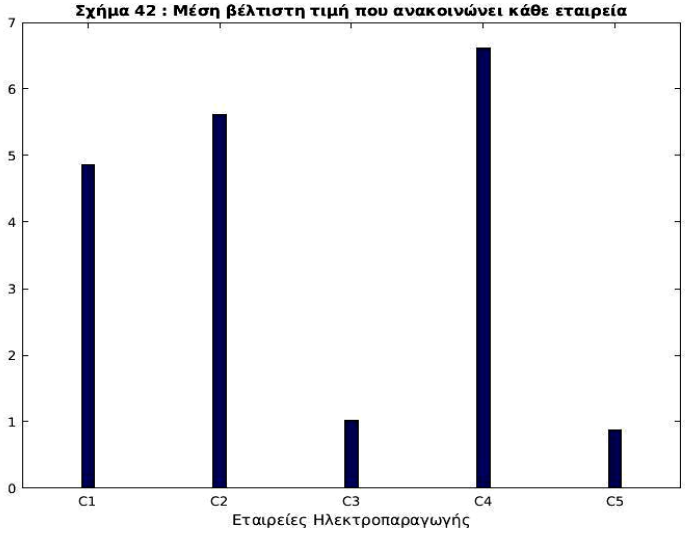
Από το παραπάνω διάγραμμα βλέπουμε πως οι εταιρείες 3 και 5 δεν ανακοινώνουν τις χαμηλότερες τιμές ηλεκτρικής ενέργειας. Παρόλ'αυτά επιλέγονται από τους περισσότερους πελάτες διότι προσφέρουν τις υψηλότερες προσφορές σε συνδυασμό με χαμηλά κόστη παραγωγής. Επομένως οι εταιρείες αυτές έχοντας ισχυρά προφίλ φήμης και ανταγωνιστικότητας επιλέγονται από τους περισσότερους πελάτες και κερδίζουν το μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Επίσης αξίζει εδώ να προσθέσουμε ότι μεταξύ των εταιρειών 3 και 5 βλέπουμε πως η δεύτερη ανακοινώνει χαμηλότερες τιμές. Αυτό συμβαίνει διότι έχει χαμηλότερο κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με αποτέλεσμα η εταιρεία 5 να κερδίζει περισσότερους χρήστες από την εταιρεία 3. Από την άλλη μεριά οι υπόλοιπες εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής ανακοινώνουν χαμηλότερες τιμές εκτός της εταιρείας 2. Κάτι τέτοιο είναι απολύτως λογικό διότι οι εταιρείες αυτές έχουν χαμηλές προσφορές και τις επιλέγουν λίγοι χρήστες, παράγοντες που επηρεάζουν άμεσα την τιμή ηλεκτρικής ενέργειας.

Είναι αξιοσημείωτος ο τρόπος λειτουργίας του αλγορίθμου καθώς σκοπός του δεν είναι να οδηγήσει τους χρήστες να επιλέγουν με μοναδικό παράγοντα τις χαμηλές τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειάς αλλά να επιλέγουν βάσει των προφίλ των εταιρειών και των τιμών που ανακοινώνουν. Το σημείο αυτό ακριβώς είναι που βελτιστοποιεί τα πλάνα κατανάλωσης και τιμολόγησης που προτείνει ο αλγόριθμος. Πιο συγκεκριμένα για να αποδείξουμε το βέλτιστο της προτεινόμενης λύσης εξετάζουμε το εναλλακτικό σενάριο όπου οι περισσότεροι χρήστες επιλέγουν τις υπόλοιπες εταιρείες από αυτές που προτείνει ο αλγόριθμος μας. Ουσιαστικά εξαναγκάζουμε τους χρήστες να διατηρούν υψηλότερες πιθανότητες για τις εταιρείες 1,2 και 4 αφαιρώντας το κομμάτι εκμάθησης των επιλογών εταιρειών του αλγορίθμου μας. Παρακάτω ακολουθούν τα διαγράμματα του πλήθους των χρηστών που εξυπηρετεί η κάθε εταιρεία αλλά και οι τιμές που ανακοινώνουν σύμφωνα με τον εναλλακτικό αλγόριθμο.

Σχήμα 41 : Μέση τιμή του πλήθους των χρηστών που εξυπηρετούνται από κάθε εταιρεία

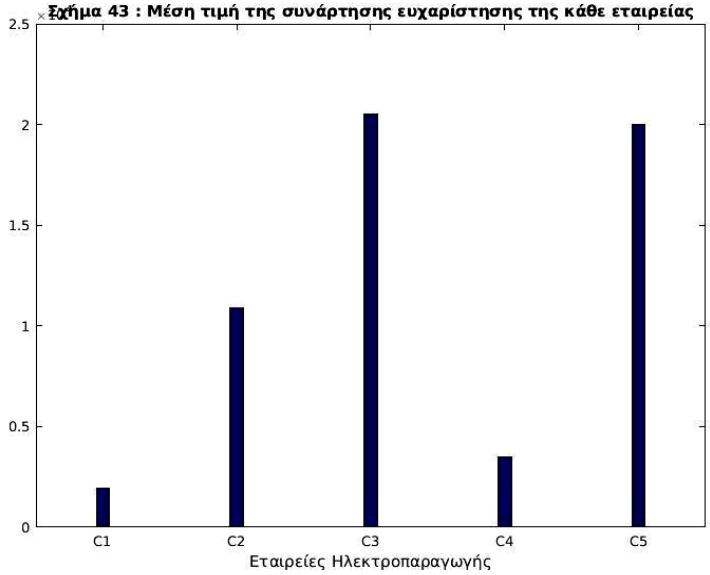


Σχήμα 42 : Μέση βέλτιστη τιμή που ανακοινώνει κάθε εταιρεία



Πράγματι λοιπόν όπως βλέπουμε παραπάνω στο εναλλακτικό σενάριο όπου οι χρήστες επιλέγουν τις εταιρείες 1, 2 και 4 με μεγαλύτερη πιθανότητα, τελικά οι εταιρείες αυτές καταλήγουν στο να ανακοινώνουν υψηλότερες τιμές από αυτές που ανακοίνωναν οι εταιρείες 3 και 5 στην υλοποίηση του δικού μας αλγόριθμου. Άρα όπως γίνεται κατανοητό τόσο από το μαθηματικό θεωρητικό πλαίσιο των προηγούμενων ενοτήτων όσο και μέσω των αριθμητικών αποτελεσμάτων, ο αλγόριθμος πράγματι μας οδηγεί στη βέλτιστη λύση που συνδυάζει χαμηλές τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας και ως βασικούς παρόχους

ηλεκτρικής ενέργειας τις εταιρείες με ισχυρά προφίλ φήμης και ανταγωνιστικότητα στην αγορά. Τέλος ακολουθούν τα διαγράμματα της συνάρτησης ευχαρίστησης όπως αυτά προέκυψαν από τον αλγόριθμο μας.



Από το παραπάνω διάγραμμα συμπεραίνουμε ότι οι τιμές των συναρτήσεων ευχαρίστησης για τις εταιρείες 3 και 5 είναι αρκετά παρόμοιες μεταξύ τους και αρκετά μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες τιμές των υπολοίπων εταιρειών που δεν αποτελούν τους βασικούς παρόχους ηλεκτρικής ενέργειας του "Έξυπνου Δικτύου".

5.5 Τελικά Συμπεράσματα

Στην ενότητα αυτή είδαμε πως υπάρχουν δύο διαφορετικές διαστάσεις ώστε να μελετηθεί το πρόβλημα και ο αλγόριθμος μας. Από την μία μεριά, εστιάζοντας σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, μελετάμε το πρόβλημα διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης και πως αυτό αντιμετωπίζεται από τον αλγόριθμο μας με βάσει την μοντελοποίηση του ως παίγνιο δύο σταδίων και με στόχο τον καθορισμό του σημείου ισορροπίας Nash. Επίσης, με την μελέτη αυτή αναδεικνύεται το ζήτημα σύγκλισης του αλγορίθμου ως προς το πλάνο τιμολόγησης και κατανάλωσης έτσι ώστε να τερματίσει το εν λόγω παίγνιο και να καθοριστούν οι βέλτιστες τιμές από την πλευρά των εταιρειών και οι βέλτιστες καταναλώσεις

από την πλευρά των χρηστών. Από την άλλη μεριά η μελέτη του αλγορίθμου ως προς το σύνολο των χρονικών διαστημάτων μαρτυρά την γενική συμπεριφορά του αλγορίθμου και επιβεβαιώνει την συνάφεια του καθώς τα προτεινόμενα πλάνα τιμολόγησης και κατανάλωσης είναι βέλτιστα και αρκετά παρόμοια μεταξύ τους όταν οι απαιτήσεις των χρηστών έχουν μικρές διαφορές μεταξύ διαφορετικών χρονικών διαστημάτων και όταν οι πολιτικές των εταιρειών δεν αλλάζουν ραγδαία μακροπρόθεσμα. Επιπρόσθετα, είδαμε ότι σκοπός του αλγορίθμου δεν είναι να τείνει τους πελάτες να επιλέγουν εταιρείες με χαμηλές τιμές αλλά προτείνει ένα βέλτιστο πλάνο κατανάλωσης και τιμολόγησης στο οποίο οι τιμές που πληρώνουν οι περισσότεροι καταναλωτές είναι οι μικρότερες σε σχέση με τις τιμές που θα πληρώνανε σε οποιαδήποτε άλλο εναλλακτικό σενάριο διαφορετικών επιλογών εταιρειών. Τέλος στο βέλτιστο αυτό πλάνο επωφελούνται οι εταιρείες με ισχυρό προφίλ φήμης και ανταγωνιστικότητας, οι οποίες ανακοινώνουν χαμηλές τιμές με υψηλές προσφορές και χαμηλά κόστη παραγωγής, παρέχοντας εξασφάλισή και εμπιστοσύνη στους καταναλωτές ότι θα καλυφθούν οι ανάγκες τους χωρίς φαινόμενα υπερφόρτωσης και απώλειας ενέργειας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6ο

ΣΥΝΟΨΗ ΚΑΙ ΕΠΟΜΕΝΟΙ ΣΤΟΧΟΙ

6.1 Σύνοψη του αλγορίθμου και επόμενοι στόχοι

6.1 Σύνοψη του αλγορίθμου και επόμενοι στόχοι

Έχουμε μελετήσει το πρόβλημα της βέλτιστης επιλογής εταιρείας ηλεκτροπαραγωγής από την πλευρά των καταναλωτών και το καθορισμό της βέλτιστης τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας από την πλευρά των εταιρειών. Για το σκοπό αυτό ορίσαμε και μοντελοποιήσαμε δύο θεμελιώδη ζητήματα, το πρόβλημα της επιλογής των εταιρειών με την εφαρμογή μηχανικής μάθησης και το πρόβλημα της διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης το οποίο το μελετήσαμε ως παίγνιο δύο σταδίων.

Η μηχανική μάθηση μοντελοποιεί τους καταναλωτές ως αυτούσια συστήματα εκμάθησης, τα οποία κατά την εξέλιξη του αλγορίθμου επαναπροσδιορίζουν τις πιθανότητες επιλογής της κάθε εταιρείας σύμφωνα με την μέχρι τώρα "γνώση" τους. Σκοπός του συστήματος επιλογής του κάθε καταναλωτή είναι να συγκλίνει στην βέλτιστη εταιρεία ηλεκτροπαραγωγής μέσω της οποίας μεγιστοποιεί την συνάρτηση ευχαρίστησης του και "νοιώθει" ασφάλεια για την βέλτιστη δυνατή εξασφάλιση της εξυπηρέτησης των απαιτήσεων του. Όπως δείξαμε λεπτομερώς, ο προτεινόμενος αλγόριθμος καταφέρνει να οδηγήσει κάθε καταναλωτή σε σύγκλιση ως προς την επιλογή του παρόχου ηλεκτρικής ενέργειας.

Από την άλλη μεριά, για τον καθορισμό της βέλτιστης κατανάλωσης και τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας, ο αλγόριθμος κατασκευάζει ένα παίγνιο δύο σταδίων. Στο πρώτο στάδιο ορίζεται ένα μη συνεργατικό παίγνιο μεταξύ των καταναλωτών, με σκοπό τον καθορισμό της βέλτιστης κατανάλωσης, με δεδομένες τις βέλτιστες τιμές που ανακοινώνουν οι εταιρείες. Οι καταναλωτές για να καθορίσουν τις βέλτιστες καταναλώσεις τους παίρνουν υπόψιν τους όχι μονάχα τις δικές τους απαιτήσεις αλλά και τις υπόλοιπες απαιτήσεις του "Έξυπνου Δικτύου", σημείο το οποίο διαφοροποιεί αρκετά τον αλγόριθμο από παρόμοιες ερευνητικές προσεγγίσεις . Στο δεύτερο στάδιο, αφού οι πελάτες έχουν καθορίσει τις βέλτιστες καταναλώσεις τους, οι εταιρείες ηλεκτροπαραγωγής συμμετέχοντας επίσης σε ένα μη συνεργατικό παιχνίδι καθορίζουν τις τιμές πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας που μεγιστοποιούν τις συναρτήσεις ευχαρίστησης τους. Το παίγνιο δύο σταδίων εξελίσσεται μέχρις ότου επιτευχθεί ισορροπία Nash και το σύστημα σταθεροποιείται για το συγκεκριμένο χρονικό διάστημα λειτουργίας.

Η μελέτη του αλγορίθμου γίνεται σε δύο διαστάσεις καθώς στην πρώτη μελετάται η σύγκλιση των τιμών και των καταναλώσεων στο πρόβλημα της διαχείρισης της απόκρισης της ζήτησης, ενώ στην δεύτερη εξετάζεται η βελτιστότητα του αλγορίθμου στο σύνολο των χρονικών διαστημάτων. Όπως δείξαμε με την χρήση του εναλλακτικού σεναρίου το πλάνο που προτείνει ο αλγόριθμος είναι βέλτιστο ως προς τις τιμές που πληρώνουν οι καταναλωτές και ως προς τις τιμές ευχαρίστησης τόσο των πελατών όσο και των εταιρειών.

Βασισμένοι στο προτεινόμενο πλαίσιο, είναι ενδιαφέρον να επεκτείνουμε την έρευνα μας μελετώντας εξίσου την δυναμική των σύγχρονων οικιακών φορτίων και την επίδραση των περιβαλλοντικών μεταβλητών στα σύγχρονα "Έξυπνα Δίκτυα". Επίσης, αρκετά ενδιαφέρουσα αποτελεί η σύγκριση του προτεινόμενου αλγορίθμου με άλλους αλγορίθμους από την πρόσφατη βιβλιογραφία ως προς την αποτελεσματικότητα των προτεινόμενων πλάνων κατανάλωσης και τιμολόγησης. Η μελέτη μας θα επεκταθεί στη χρήση της θεωρίας της Προοπτικής με σκοπό τη μοντελοποίηση της συμπεριφοράς των καταναλωτών σε πραγματικές αγορές ενέργειας και τηλεπικοινωνιών. Με βάση την προαναφερθείσα μοντελοποίηση, θα εισαχθούν και μελετηθούν προβλήματα κατανομής πόρων με σκοπό τη βελτιστοποίηση της ποιότητας της εμπειρίας των καταναλωτών.

REFERENCES

[1] X. Fang, S. Misra, G. Xue and D. Yang, "Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 4, pp. 944-980, Fourth Quarter 2012.

[2] V. C. Gungor *et al*., "A Survey on Smart Grid Potential Applications and Communication Requirements," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 9, no. 1, pp. 28-42, Feb. 2013.

[3] Wenye Wang, Yi Xu, Mohit Khanna, A survey on the communication architectures in smart grid, In Computer Networks, Volume 55, Issue 15, 2011, Pages 3604-3629, ISSN 1389-1286, https://doi.org/10.1016/j.comnet.2011.07.010.

[4] J. Swift, J. D. Carey, D. L. O'Connor, “2000 Market Monitor: Electric Industry Restructuring,” Division of Energy Resources, Office of Consumer Affairs and Business Regulation, MA, USA, 2002, pp. 1-6.

[5] D.L. Nelson, K.W. Anderson, B.M. Marquez, “Report to the 84th Texas Legislature: Scope of Competition in Electric Markets in Texas,” Public Utility Commission of Texas, TX, USA, 2015, pp. 1-142.

[6] T. Kastrinogiannis, E. E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "Utility-Based Uplink Power Control in CDMA Wireless Networks with Real-Time Services," in Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS) Sprigner, vol. 5198, p.p. 307-320, September, 2008.

[7] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "QoS-Driven Uplink Power Control in Multi- Service CDMA Wireless Networks - A Game Theoretic Framework," Journal of Communications, Academy Publisher, vol. 4, No 9, pp. 654-668, Oct. 2009.

[8] E.E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "A Utility-based Power Allocation Non-cooperative Game for the Uplink in Multi-Service CDMA Wireless Networks," Proc. of IEEE International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, pp. 365-370, Leipzig, Germany, June, 2009.

[9] E. E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis, and S. Papavassiliou, "Realization of QoS Provisioning in Autonomic CDMA Networks under Common Utility-Based Framework," in Proc.

of IEEE WoWMoM workshop on Autonomic and Opportunistic Communications (AOC), June, 2009.

[10] E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, and S. Papavassiliou, "Utility-based Power Control via Convex Pricing for the Uplink in CDMA Wireless Networks," European Wireless 2010, pp. 200-206, April, 2010.

[11] E. E. Tsiropoulou, G. Katsinis and S. Papavassiliou, "Distributed Uplink Power Control in Multi-Service Wireless Networks via a Game Theoretic Approach with Convex Pricing ," in IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, Vol. 23, Issue 1, pp. 61-68, 2012.

[12] E. E. Tsiropoulou, A. Kapoukakis, S. Papavassiliou, "Uplink Resource Allocation in SC-FDMA Wireless Networks: A Survey and Taxonomy," Computer Networks, Elsevier, vol. 96, pp. 1-28, 2016.

[13] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, G. Katsinis, S. Papavassiliou, "Combined Power and Rate Allocation in Self- Optimized Multi-Service Two-Tier Femtocell Networks," Computer Communications, Elsevier, vol. 72, pp. 38-48, 2015.

[14] E.E. Tsiropoulou, I. Gialagkolidis, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Resource Allocation in Visible Light Communication Networks: NOMA vs OFDMA Transmission Techniques," in International Conference on Ad Hoc Networks (LNCS) Sprigner, pp. 32-46, July, 2016.

[15] E.E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Joint Utility-based Uplink Power and Rate Allocation in Wireless Networks: A Non-cooperative Game Theoretic Framework," Elsevier Physical Communications Journal, vol. 9, pp. 299-307, 2012.

[16] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, S. Papavassiliou, "Joint Customized Price and Power Control for Energy-Efficient Multi-Service Wireless Networks via S-Modular Theory," in IEEE Transactions on Green Communications and Networking, vol. 1, no. 1, pp. 17-28, 2017.

[17] E.E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Energy Efficient Uplink Joint Resource Allocation Noncooperative Game with Pricing," in Proc. of IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC 2012), pp. 2352-2356,April, 2012.

[18] E. E. Tsiropoulou and S. Papavassiliou, "Utility-based Uplink Joint Power & Subcarrier Allocation in SCFDMA Wireless Networks," in International Journal of Electronics, Taylor & Francis, Vol. 98, Issue 11, pp. 1581-1587, 2011.

[19] E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, P. Vamvakas, and S. Papavassiliou, "Efficient Uplink Power Control in Multi- Service Two-Tier Femtocell Networks via a Game Theoretic Approach," IEEE International Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), pp. 104-108, Berlin, 2013.

[20] E.E. Tsiropoulou, G. Katsinis, A. Filios, and S. Papavassiliou, "On the Problem of Optimal Cell Selection & Uplink Power Control in Open Access Multi-Service Two-Tier Femtocell Networks," in Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS) Sprigner, pp. 114-127, June, 2014.
[21] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, S. Papavassiliou,"Supermodular Game-based Distributed Joint Uplink Power & Rate Allocation in Two-Tier SC-FDMA Femtocell Networks," in IEEE Transactions on Mobile Computing, 2016. doi: 10.1109/TMC.2016.2622263
[22] G. Katsinis, E.E. Tsiropoulou and S. Papavassiliou, "A Game Theoretic Approach to the Power Control in D2D Communications Underlay Cellular Networks," IEEE International Workshop on Computer-Aided Modeling Analysis and Design of Communication Links and Networks (CAMAD),pp. 208-212, Athens, Greece, 2014.
[23] G. Katsinis, E. E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou, " Joint Resource Block and Power Allocation for Interference Management in Device to Device Underlay Cellular Networks: A Game Theoretic Approach," in Mobile Networks and Applications, Springer, pp. 1-13, 2016.
[24] G. Katsinis, E.E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "On the Problem of Resource Allocation and System Capacity Evaluation via a Blocking Queuing Model in D2D enabled Overlay Cellular Networks," in Ad-hoc, Mobile and Wireless Networks (LNCS) Sprigner, pp. 76-89, June, 2015.
[25] G. Katsinis, E. E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou, "Multicell Interference Management in Device to Device Underlay Cellular Networks," Future Internet, MDPI, vol. 9, no. 3, pp. 1- 20, 2017.
[26] E.E. Tsiropoulou, J. Baras, S. Papavassiliou, S. Sinha, "RFID-based Smart Parking Management System," Cyber-Physical Systems, Taylor & Francis, pp. 1-20, 2017 (doi: 10.1080/23335777.2017.1358765).
[27] P. Vamvakas, E. E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou, "Dynamic Provider Selection & Power Resource Management in Competitive Wireless Communication Markets," in Mobile Networks and Applications, Springer, pp.1-14, 2017. DOI: 10.1007/s11036-017-0885-y.
[28] E. E. Tsiropoulou, P. Vamvakas, S. Papavassiliou, "Resource Allocation in Multi-tier Femtocell and Visible- Light Heterogeneous Wireless Networks, " Book Chapter in "Resource Allocation in Next-Generation Broadband Wireless Access Networks" Book, Editors: Chetna Singhal and Swades De, 2016.
[29] G. Katsinis, E.E. Tsiropoulou, and S. Papavassiliou, "On the Performance Evaluation of Distributed Resource Block and Power Allocation in D2D-enabled Multi-Cell Networks," in Proceedings of ACM International Symposium on Performance Evaluation of Wireless Ad Hoc, Sensor, and Ubiquitous Networks, November, 2017. (to appear)

[30] P. Vamvakas, E.E. Tsiropoulou, S. Papavassiliou, J. Baras, "Optimization and Resource Management in NOMA Wireless Networks Supporting Real and Non-real Time Service Bundling," 22nd IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC),pp. 697-703, July, 2017.

[31] E. E. Tsiropoulou, A. Kapoukakis and S. Papavassiliou, "Energy-efficient Subcarrier Allocation in SC-FDMA Wireless Networks based on Multilateral Model of Bargaining," IFIP Networking 2013,pp. 1-9, Brooklyn, 2013.

[32] E.E. Tsiropoulou, I. Ziras and S. Papavassiliou, "Service Differentiation and Resource Allocation in SC-FDMA Wireless Networks through User-Centric Distributed Non-Cooperative Multilateral Bargaining," in 7th International Conference on Ad Hoc Networks (LNCS) Sprigner, pp. 42-54, September, 2015.

[33] E. E. Tsiropoulou, I. Ziras, S. Papavassiliou, "A Non-Cooperative Approach to the Joint Subcarrierand Power Allocation Problem in Multi-Service SCFDMA Networks," EAI Endorsed Transactions on Mobile Communications and Applications, 2015.

[34] E.E. Tsiropoulou, S.T. Paruchuri, J. Baras, "Interest, Energy and Physical-Aware Coalition Formation and Resource Allocation in Smart IoT Applications," 51st Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS), pp. 1-6, March, 2017.

[35] E.E. Tsiropoulou, J. Baras, S. Papavassiliou, G. Qu, " On the Mitigation of Interference Imposed by Intruders in Passive RFID Networks," Conference on Decision and Game Theory for Security (GameSec), pp. 62-80, Nov., 2016.

[36] P. Vamvakas, E.E. Tsiropoulou, M. Vomvas, S. Papavassiliou "Adaptive Power Management in Wireless Powered Communication Networks: A User-Centric Approach," IEEE 38th Sarnoff Symposium, Sept., 2017. (to appear)

[37] E. E. Tsiropoulou, G. Mitsis, S. Papavassiliou, "Interest-aware Energy Collection & Resource Management in Machine to Machine Communications," in Elsevier, Ad Hoc Networks, 2017. ISSN 1570-8705, https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2017.09.003

[38] E.E. Tsiropoulou, T. Kastrinogiannis and S. Papavassiliou, "Non-cooperative Power Control in CDMAWireless Networks," in "Game Theory for Wireless Communications and Networking" book, Auerbach Publications, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010.

[39] E.E. Tsiropoulou, A. Thanou, S. Papavassiliou,"Quality of Experience-based museum touring: a human in the loop approach," in Social Network Analysis and Mining, Springer, vol. 7, no 1, pp. 1-33, 2017.

[40] E.E. Tsiropoulou, A. Thanou, S. Papavassiliou, "Modelling Museum Visitors Quality of Experience," 11th International Workshop on Semantic and Social Media Adaptation and Personalization (SMAP), pp. 77-82, Oct. 2016.

[41] E.E. Tsiropoulou, A. Thanou, S.T. Paruchuri, S. Papavassiliou, "Self-organizing Museum Visitor Communities: A Participatory Action Research based Approach," 12th International Workshop on Semantic and Social Media Adaptation and Personalization (SMAP),pp. 101-105, July, 2017

[42] C. Heitzenrater and A. Simpson, "Misuse, Abuse and Reuse: Economic Utility Functions for Characterising Security Requirements," *2016 11th International Conference on Availability, Reliability and Security (ARES)*, Salzburg, 2016, pp. 572-581.

[43] J. E. Navarro-Barrientos, "Risk propensity and proportion of investment for agents using power utility functions," *2016 International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT)*, St. Julian's, 2016, pp. 444-449.

[44] M. Dolecki, P. Karczmarek, A. Kiersztyn and W. Pedrycz, "Utility functions as aggregation functions in face recognition," *2016 IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, Athens, 2016, pp. 1-6.

[45] W. M. Bateman, A. Amaya and J. Fenstermaker, "Securing the Grid and Your Critical Utility Functions," *2017 IEEE Rural Electric Power Conference (REPC)*, Columbus, OH, 2017, pp. 29-37.

[46] L. Maghrabi, E. Pfluegel and S. F. Noorji, "Designing utility functions for game-theoretic cloud security assessment: a case for using the common vulnerability scoring system," *2016 International Conference On Cyber Security And Protection Of Digital Services (Cyber Security)*, London, 2016, pp. 1-6.

[47] C. Heitzenrater, J. King-Lacroix and A. Simpson, "Motivating Security Engineering with Economics: A Utility Function Approach," *2016 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C)*, Vienna, 2016, pp. 352-359.

[48] H. Mohsenian-Rad, V. W. S. Wong, J. Jatskevich, R. Schober and A. Leon-Garcia, “Autonomous Demand-Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid,” in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 1, no. 3, Dec. 2010, pp. 320-331.

[49] N. Li, L. Chen and M. A. Dahleh, “Demand Response Using Linear Supply Function Bidding,” in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 6, no. 4, 2015, pp. 1827-1838

[50] Chai, J. Chen, Z. Yang and Y. Zhang, "Demand Response Management With Multiple Utility Companies: A Two-Level Game Approach," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 2, 2014, pp. 722-731.

[51] P. Palensky and D. Dietrich, “Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads,” in IEEE Transactions on Industrial Informatics, vol. 7, no. 3, 2011, pp. 381-388.

[52] Ibars, M. Navarro and L. Giupponi, “Distributed Demand Management in Smart Grid with a Congestion Game,” 2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications, Gaithersburg, MD, 2010, pp. 495-500.
[53] M. Erkoc, E. Al-Ahmadi, N. Celik and W. Saad, “A game theoretic approach for load-shifting in the smart grid,” 2015 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Miami, FL, 2015, pp. 187-192.
[54] N. Yaagoubi and H. T. Mouftah, “A Comfort Based Game Theoretic Approach for Load Management in the Smart Grid,” 2013 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), Denver, CO, 2013, pp. 35-41.
[55] P. Yang, G. Tang and A. Nehorai, “A game-theoretic approach for optimal time-of-use electricity pricing,” in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, no. 2, 2013, pp. 884-892.
[56] W. Shi, N. Li, X. Xie, C. C. Chu and R. Gadh, “Optimal Residential Demand Response in Distribution Networks,” in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 32, no. 7, 2014, pp. 1441-1450.
[57] Y. Xu, N. Li and S. Low, “Demand response with capacity constrained supply function bidding,” 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, 2016, pp. 1-1.
[58] M. Yu and S. H. Hong, “A Real-Time Demand-Response Algorithm for Smart Grids: A Stackelberg Game Approach,” in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 7, no. 2, 2016, pp. 879-888.
[59] S. Maharjan, Q. Zhu, Y. Zhang, S. Gjessing and T. Basar, “Dependable Demand Response Management in the Smart Grid: A Stackelberg Game Approach,” in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 4, no. 1, 2013, pp. 120-132
[60] K. Alshehri, J. Liu, X. Chen and T. Başar, “A Stackelberg game for multi-period demand response management in the smart grid,” 2015 54th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), 2015, pp. 5889-5894.
[61] A. H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia, "Optimal Residential Load Control with Price Prediction in Real-Time Electricity Pricing Environments," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 2, pp. 120-133, Sept. 2010.
[62] A. J. Conejo, J. M. Morales and L. Baringo, "Real-Time Demand Response Model," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 1, no. 3, pp. 236-242, Dec. 2010.
[63] S. Shao, M. Pipattanasomporn and S. Rahman, "Demand Response as a Load Shaping Tool in an Intelligent Grid with Electric Vehicles," in *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 624-631, Dec. 2011.

[64] M. Zugno, J. M. Morales, P. Pinson, and H. Madsen, “A bilevel model for electricity retailers’ participation in a demand response market environment,” Energy Econ., vol. 36, pp. 182–197, Mar. 2013.
[65] P. Samadi, A. H. Mohsenian-Rad, R. Schober, V. W. S. Wong and J. Jatskevich, "Optimal Real-Time Pricing Algorithm Based on Utility Maximization for Smart Grid," *2010 First IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, Gaithersburg, MD, 2010, pp. 415-420.
[66] L. Chen, N. Li, S. H. Low, and J. C. Doyle, “Two market models for demand response in power networks,” in Proc. IEEE SmartGridComm, 2010, pp. 397–402.
[67] N. Li, L. Chen, and S. H. Low, “Optimal demand response based on utility maximization in power networks,” in Proc. IEEE PES, 2011, pp.1–8.
[68] S. Datchanamoorthy, S. Kumar, Y. Ozturk, and G. Lee, “Optimal time-of-use pricing for residential load control,” in Proc. IEEE Smart GridComm, 2011, pp. 375–380.
[69] Chen, S. Kishore and L. V. Snyder, “An innovative RTP-based residential power scheduling scheme for smart grids,” 2011 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Prague, 2011, pp. 5956-5959.
[70] Z. Fan, P. Kulkarni, S. Gormus, C. Efthymiou, G. Kalogridis,M. Sooriyabandara, S. L. Z. Zhu, and W. H. Chin, “Smart grid communications: Overview of research challenges, solutions, and standardization activities,” IEEE Commun.
[71] P. Vytelingum, S. D. Ramchurn, T. D. Voice, A. Rogers, and N. R.Jennings, “Trading agents for the smart electricity grid,” in Proc. Autonomous Agents Multiagent Syst., 2010, pp. 897–904.
[72] R. D. Yates, “A framework for uplink power control in cellular radio systems,” IEEE Journal on Selected Areas of Communications, vol. 13, 1995, pp. 1341-1347
[73] C. U. Saraydar, N. B. Mandayam and D. J. Goodman, "Efficient power control via pricing in wireless data networks," in IEEE Transactions on Communications, vol. 50, no. 2, pp. 291-303, Feb 2002.