



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ**

**"ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΣΕ ΕΞΥΠΝΟ ΣΠΙΤΙ"**

**"SIMULATION OF SMART HOME ENERGY CONSUMPTION"**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΤΗΣ**

**ΦΟΥΡΤΖΙΟΥ ΙΩΑΝΝΑ**

ΒΟΛΟΣ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2017

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή.



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

**"ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΗΣ ΚΑΤΑΝΑΛΩΣΗΣ ΣΕ ΕΞΥΠΝΟ ΣΠΙΤΙ"**

**"SIMULATION OF SMART HOME ENERGY CONSUMPTION"**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΗΣ

**ΦΟΥΡΤΖΙΟΥ ΙΩΑΝΝΑ**

**Επιβλέποντες :**

ΤΣΟΜΠΑΝΟΠΟΥΛΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ	ΤΣΟΥΚΑΛΑΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Π.Θ	ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Θ

Εγκρίθηκε από διμελή εξεταστική επιτροπή την

2017

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

.....  
ΤΣΟΜΠΑΝΟΠΟΥΛΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ  
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΡΙΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ Π.Θ.

.....  
ΤΣΟΥΚΑΛΑΣ ΕΛΕΥΘΕΡΙΟΣ  
ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Π.Θ

(Υπογραφή)

.....

**ΦΟΥΡΤΖΙΟΥ ΙΩΑΝΝΑ**

Διπλωματούχος Μηχανικός Ηλεκτρονικών Υπολογιστών, Τηλεπικοινωνιών και Δικτύων του Τμήματος  
Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών, Πανεπιστημίου Θεσσαλίας

© 2017 – All rights reserved

Η σελίδα αυτή είναι σκόπιμα λευκή

## Ευχαριστίες

Πρώτα από όλους θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την Κα. Τσομπανοπούλου Παναγιώτα, Αναπληρώτρια Καθηγήτρια του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών και τον Κ. Τσουκαλά Ελευθέριο, Καθηγητή του Τμήματος Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών για την καθοδήγηση και την υπομονή που μου έδειξαν κατά τη διάρκεια υλοποίησης της διπλωματικής εργασίας. Η πνευματική και ηθική υποστήριξη που μου παρείχαν ήταν πολύτιμη για τη λογική ροή και δομή της εργασίας.

Σε μια πράξη ευγνωμοσύνης, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια και τους φίλους μου που με στήριξαν με διάφορους τρόπους και ήταν παρόντες στις ευχάριστες και δυσάρεστες στιγμές.



## Περίληψη

Καθώς η παγκόσμια ζήτηση ενέργειας αυξάνεται ραγδαία, η ικανοποίηση της μελλοντικής ενεργειακής ζήτησης αποτελεί μείζον θέμα για όλους. Η μεγαλύτερη ευελιξία στο σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας κρίνεται απαραίτητη τα επόμενα χρόνια ώστε να συνεχίσουν οι αγορές να παρέχουν αποτελεσματικές και αξιόπιστες υπηρεσίες ηλεκτρικής ενέργειας. Η αποτελεσματική ανάπτυξη της ανταπόκρισης στη ζήτηση καθώς και η ενσωμάτωση 'έξυπνων' τεχνολογιών στο ηλεκτρικό δίκτυο θα μπορούσε να αυξήσει σημαντικά την ευελιξία του συστήματος, παρέχοντας μεγαλύτερη ασφάλεια και αποτελεσματικότητα στην αγορά.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας παρουσιάζεται μια εφαρμογή προσομοίωσης ενός σπιτιού με ελεγχόμενη κατανάλωση και έξυπνο χρονοπρογραμματισμό, εφόσον χρησιμοποιείται τιμολόγηση που ποικίλει μέσα στη μέρα με σκοπό τη μείωση του μέγιστου φόρτου και την εξομάλυνση της καμπύλης φορτίου. Κατ' αυτόν τον τρόπο παρέχεται αναβαθμισμένη ευελιξία φορτίου καθώς η ζήτηση ανταποκρίνεται στην τιμή με αποτέλεσμα η ενσωμάτωση του έξυπνου δικτύου στο έξυπνο σπίτι να έχει αντίκτυπο και στον λογαριασμό του καταναλωτή.

Παρατίθενται αναλυτικά οι μελέτες και οι τεχνολογίες που συντέειναν στην υλοποίηση της εφαρμογής καθώς και αναλυτικοί ορισμοί των κυρίαρχων εννοιών του έξυπνου συστήματος, της βελτιστοποιημένης λειτουργία της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και των πολυπρακτορικών συστημάτων.

Εν κατακλείδι, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα συγκεκριμένων σεναρίων καθώς και μελλοντικές επεκτάσεις που μπορούν να ενσωματωθούν στην εφαρμογή.

## Abstract

As global energy demand is growing rapidly, meeting future energy demand is a major issue for everyone. Greater flexibility in the electricity system is needed in the years to come, so markets can continue to provide efficient and reliable electricity services. Effective development of demand response and the integration of 'smart' grid technologies could significantly increase the flexibility of the system, providing greater security and market efficiency.

In the context of this paper we present a simulation application of a house with controlled consumption and intelligent scheduling, since a billing that varies within the day is used in order to reduce the maximum load and normalize the load curve. In this way, increased load flexibility is provided as demand is in line with the price, resulting in the integration of the smart grid into the smart home and also having an impact on the consumer's account.

The analyzes of the studies and technologies that contributed to the implementation of the application as well as the detailed definitions of the predominant concepts of the intelligent system, the optimized operation of the electricity market and the multi-agent systems are presented.

In conclusion, the results of specific scenarios and future extensions that can be integrated into the application are presented.

# Πίνακας Περιεχομένων

## **1 Εισαγωγή**

- 1.1 Υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας
- 1.2 Έξυπνο δίκτυο (smart grid)/ χαρακτηριστικά
  - 1.2.1 Αρχιτεκτονική επικοινωνίας έξυπνου δικτύου
  - 1.2.2 Microgrid/ Έξυπνο σπίτι (smart home)

## **2 Αγορά ηλεκτρικής ενέργειας**

- 2.1 Βελτιστοποιημένο μοντέλο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας
  - 2.1.1 Στρατηγικές διαχείριση ζήτησης – απόκρισης (Demand Response (DR))
- 2.2 Προφίλ βελτιστοποιημένης ‘smart home’ κατανάλωσης

## **3 Agent-Based μοντελοποίηση (Agent Based Modeling(ABM))**

- 3.1 Σύγκριση ABM με άλλες μεθόδους
- 3.2 Πολυπρακτορικά συστήματα (Multi Agent systems(MAS))
  - 3.2.1 Μέθοδοι υλοποίησης
  - 3.2.2 Περιορισμοί
- 3.3 Αρχιτεκτονική JADE
  - 3.3.1 Υλοποίηση

## **4 Σχεδιασμός της εφαρμογής**

- 4.1 Διατήρηση ασφάλειας καταναλωτή

## **5 Υλοποίηση της εφαρμογής SmartEC με JADE**

- 5.1 Περιγραφή

- 5.1.1 Τύποι πρακτόρων (Agent types)
- 5.1.2 Αλληλεπιδράσεις (Interactions)
- 5.1.3 Συμπεριφορά πρακτόρων (Agent behavior)
- 5.2 Σενάρια (case study)
  - 5.2.1 Θερινή περίοδος
  - 5.2.2 Χειμερινή περίοδος
- 5.3 Εκτιμήσεις – Απλουστεύσεις

## **6 Μελλοντικές Προοπτικές**

- 6.1 Συμπεράσματα
- 6.2 Επεκτασιμότητα

## **7 Βιβλιογραφία**

## Λίστα εικόνων

Εικόνα 1. Πολλαπλές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σημαντικότερων στοιχείων του έξυπνου δικτύου

Εικόνα 2. Πιθανά οφέλη από την ανάπτυξη των έξυπνων μετρητών

Εικόνα 3. Peer-to-peer επικοινωνία

Εικόνα 4. Προφίλ φορτίου οικιακού τομέα

Εικόνα 5. Αριστερά: τιμολόγηση, δεξιά: αποτελέσματα φορτίου για RTP τιμολόγηση σε οικιακό τομέα

Εικόνα 6. Συνοπτικά οι επιλογές μεθόδου για DR

Εικόνα 7. Καμπύλες ζήτησης για συγκεκριμένα φορτία εντός ενός 24ώρου

Εικόνα 8. Τυπικός κύκλος λειτουργίας ενός πλυντηρίου ρούχων και μέσος καθημερινός τρόπος χρήσης

Εικόνα 9. Τυπικός κύκλος λειτουργίας ενός στεγνωτηρίου ρούχων και μέσος καθημερινός τρόπος χρήσης

Εικόνα 10. Αρχιτεκτονική ενός JADE συστήματος πρακτόρων

Εικόνα 11. Αρχιτεκτονική ενός πράκτορα JADE

Εικόνα 12. Δημιουργία νέου πράκτορα

Εικόνα 13. Αρχιτεκτονική του νοικοκυριού. Το υποσύστημα δημιουργίας μοντέλου είναι υπεύθυνο για την κατασκευή μοντέλων καταναλωτών, ενώ το υποσύστημα διαμόρφωσης προσομοιώνει τη συμπεριφορά τελικής χρήσης και την ανταπόκριση στα κίνητρα διαμόρφωσης φορτίου.

Εικόνα 14. Δημιουργία πράκτορα retailer τύπου Retailer

Εικόνα 15. Δημιουργία πράκτορα User τύπου user

Εικόνα 16. Αλληλεπιδράσεις των διαφορετικών τύπων πρακτόρων στο MAS

Εικόνα 17. Δεδομένα τιμολόγησης που χρησιμοποιούνται

Εικόνα 18. Δεδομένα τιμολόγησης που χρησιμοποιούνται σε μορφή πίνακα

Εικόνα 19. Output-Jade Project (run)

Εικόνα 20. Οθόνη (πράκτορα Appliances) συσκευών

Εικόνα 21. Output-Jade Project (run)

Εικόνα 22. Οθόνη χρήστη (agent User)

Εικόνα 23. Οθόνη συσκευών

Εικόνα 24. Output-Jade Project (run)

Εικόνα 25. Οθόνη χρήστη για best price

Εικόνα 26. Οθόνη χρήστη για max price

Εικόνα 27. Output-Jade Project (run)

Εικόνα 28. Δεδομένα τιμολόγησης που χρησιμοποιούνται σε μορφή πίνακα (χειμερινή περίοδος)

Εικόνα 29. Output-Jade Project (run)

Εικόνα 30. Οθόνη συσκευών

Εικόνα 31. Output-Jade Project (run)

Εικόνα 32. Οθόνη χρήστη (agent User)

Εικόνα 33. Οθόνη συσκευών

Εικόνα 34. Output-Jade Project (run)

Εικόνα 35 . Οθόνη χρήστη για best price

Εικόνα 36. Οθόνη χρήστη για max price

Εικόνα 37. Κόστος κατανάλωσης κάθε συσκευής μέσα στη μέρα για μέγιστη και ελάχιστη τιμή (θερινή περίοδος)

Εικόνα 38. Συνολικό κόστος κατανάλωσης συσκευών για μέγιστη και ελάχιστη τιμή μέσα στη μέρα (θερινή περίοδος)

Εικόνα 39. Κόστος κατανάλωσης κάθε συσκευής μέσα στη μέρα για μέγιστη και ελάχιστη τιμή (χειμερινή περίοδος)

Εικόνα 40. Συνολικό κόστος κατανάλωσης συσκευών για μέγιστη και ελάχιστη τιμή μέσα στη μέρα (χειμερινή περίοδος)

Εικόνα 41. Aggregator

# 1 Εισαγωγή

Με την αυξανόμενη διείσδυση των τεχνολογιών στα ενεργειακά συστήματα, τα παραδοσιακά ενεργειακά συστήματα ψηφιοποιούνται. Η προηγμένη ανάλυση των δεδομένων παραγωγής και κατανάλωσης ενέργειας και η λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων μπορούν να συνδυαστούν για την προώθηση του σχηματισμού και της ανάπτυξης έξυπνων ενεργειακών συστημάτων. Τα έξυπνα δίκτυα αποτελούν μια ειδική εφαρμογή των έξυπνων ενεργειακών συστημάτων.

## 1.1 Υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας

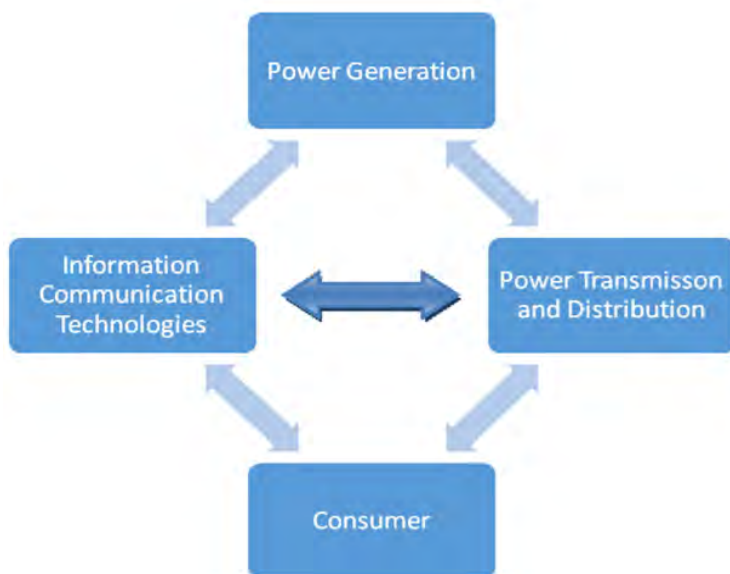
Το δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιείται σήμερα αναπτύχθηκε βάση μιας κεντρικοποιημένης προσέγγισης. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιούνται AC μονάδες υψηλής ισχύος της τάξης των MVA που λειτουργούν σε συχνότητα 50 με 60 Hz, διασυνδεδεμένες με συστήματα μετάδοσης που λειτουργούν σε πολύ υψηλές τάσεις, για παράδειγμα στα 400 kV. Χρησιμοποιούνται διάφοροι υποσταθμοί στους οποίους η υψηλή αυτή τάση πέφτει σε επίπεδο διανομής, για παράδειγμα στα 20 kV. Στη συνέχεια, αν δεν πρόκειται για φορτία υψηλής τάσης, γίνεται μείωση της τάσης στα 400 V και άμεση τροφοδότηση των φορτίων μέσω ενός μεγάλου αριθμού γραμμών διανομής.

Εφόσον το τρέχον δίκτυο έχει κεντρικοποιημένη υλοποίηση και η ροή της ηλεκτρικής ενέργειας είναι μονοκατευθυντική διαμέσου των γραμμών διανομής και μεταφοράς, συνεπάγεται πως όλη η πληροφορία συγκεντρώνεται στην παραγωγή και τα απομακρυσμένα φορτία αποτελούν παθητικοί δέκτες.

Συμπεραίνεται λοιπόν πως το υφιστάμενο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας επηρεάζεται αρνητικά από την έλλειψη αμφίδρομης επικοινωνίας παραγωγού – καταναλωτή, την έλλειψη διαλειτουργικότητας μεταξύ των συνιστωσών του συστήματος και την αδυναμία χειρισμού του αυξανόμενου όγκου δεδομένων της εποχής από έξυπνες συσκευές. [1]

## 1.2 Έξυπνο δίκτυο (smart grid)/ χαρακτηριστικά

Η προσθήκη νοημοσύνης στο υπάρχων ηλεκτρικό δίκτυο θα επέτρεπε τον έλεγχο παραγωγής και κατανάλωσης της ενέργειας μέσω αμφίδρομης επικοινωνίας μεταξύ όλων των τμημάτων του δικτύου προσφέροντας έναν νέο τρόπο χειρισμού και χρήσης της ενέργειας που αναφέρεται ως 'έξυπνο δίκτυο'. [2] Στοιχεία κλειδιά του έξυπνου δικτύου είναι οι έξυπνοι μετρητές, οι αισθητήρες, συστήματα καταγραφής και διαχείρισης δεδομένων που ελέγχουν τη ροή της πληροφορίας μεταξύ των διαφορετικών φορέων του συστήματος. Αυτές οι πολλαπλές και ενισχυμένες αλληλεπιδράσεις αποτυπώνονται στην Εικόνα 1. [3]



Εικόνα 1. Πολλαπλές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σημαντικότερων στοιχείων του έξυπνου δικτύου [3].

Κάποια χαρακτηριστικά και προϋποθέσεις που οφείλει να πληρεί ένα ‘έξυπνο δίκτυο’ ικανοποιώντας τις απαιτήσεις του 21<sup>ου</sup> αιώνα είναι αρχικά να επιτρέπει στους πελάτες να αλληλεπιδρούν με το δίκτυο, να ενημερώνονται και να συμμετέχουν. Το ‘έξυπνο δίκτυο’ θα πρέπει να ξεπερνά τα μειονεκτήματα του απλού δικτύου, όπως οι απώλειες ενέργειας και η αναποτελεσματικότητα της περιορισμένης αγοράς και να προσφέρει νέες επιλογές όπως μία αναβαθμισμένη αγορά που βασίζεται στην απόκριση φορτίου και επικεντρώνεται στην πρόληψη [4]. Θα πρέπει να ανιχνεύει, να αναλύει, να προβλέπει και να ανταποκρίνεται στις ανάγκες, για παράδειγμα μετατοπίζοντας τη ροή και τις απαιτήσεις μέσω ελέγχου ροής ισχύος και βάση απόκρισης φορτίου. [5]

### 1.2.1 Αρχιτεκτονική επικοινωνίας έξυπνου δικτύου

Εφόσον το ‘smart grid’ μπορεί να θεωρηθεί ως ένα δίκτυο επικοινωνίας δεδομένων που επιτυγχάνει ευέλικτα σχήματα διασύνδεσης μεταξύ των διαφορετικών προηγμένων στοιχείων του συστήματος, μπορεί να γίνει ανάλυση των επιπέδων που χρησιμοποιούνται σε αυτό.

Τα κύρια μέρη της αρχιτεκτονικής της επικοινωνίας των ‘smart grid’ είναι το επίπεδο εφαρμογής το οποίο περιλαμβάνει προηγμένες εφαρμογές που μέσω της μεταξύ τους διαλειτουργικότητας παρέχουν διαχείριση προσφοράς – ζήτησης και προηγμένες υποδομές μετρήσεων, το επίπεδο της ενέργειας που περιλαμβάνει την παραγωγή ενέργειας, τα συστήματα μετάδοσης και διανομής καθώς και τις εγκαταστάσεις των πελατών. Τελευταίο είναι το επίπεδο της επικοινωνίας που παρέχει τις διασυνδέσεις

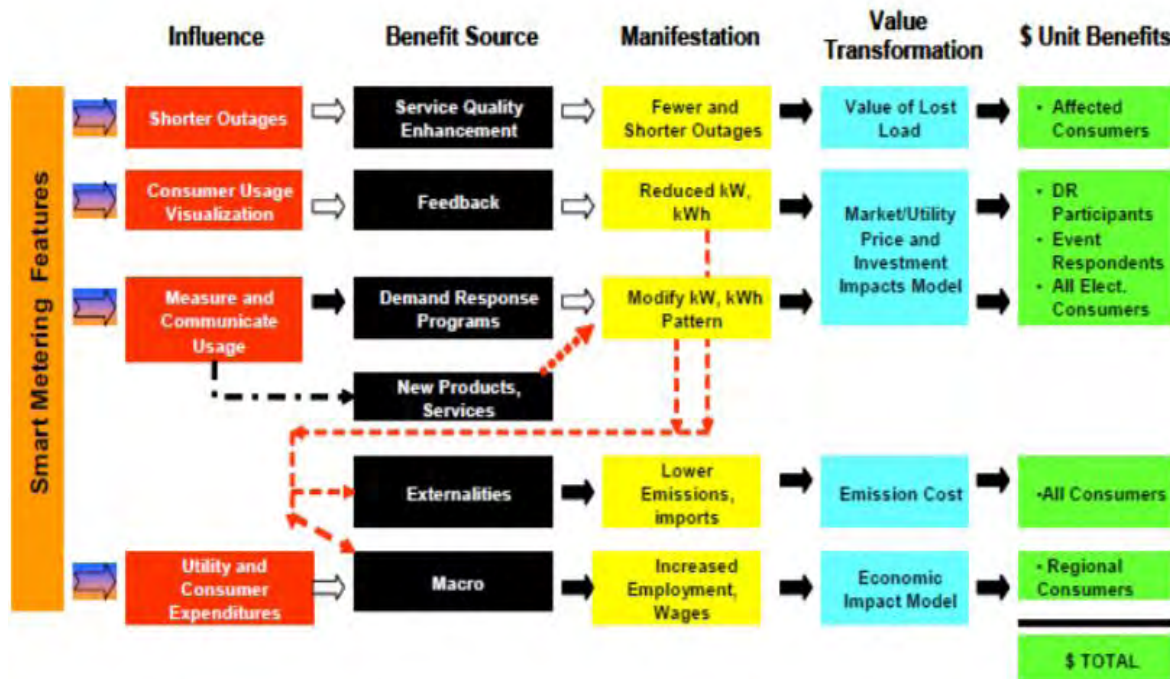


σε όλο το σύστημα και τις συσκευές με το οποίο ενεργοποιείται η ψηφιοποίηση των δεδομένων ενώ ταυτόχρονα αυξάνεται η αξιοπιστία. [1]

Μια κατηγορία μετάδοσης αυτού του επιπέδου είναι το οικιακό δίκτυο (home-area network (HAN)), το οποίο υποστηρίζει την επικοινωνία μεταξύ οικιακών ηλεκτρικών συσκευών και ‘έξυπνου μετρητή’. [1]

Ο ‘έξυπνος μετρητής’ ηλεκτρικής ενέργειας λαμβάνει τακτικά τις τρέχουσες τιμές ενέργειας από το έξυπνο δίκτυο και αποτελεί βασικό στοιχείο ενός ολοκληρωμένου ‘smart grid’ πάνω από τον οποίο υπάρχει αμφίδρομη επικοινωνία των κέντρων συλλογής, επεξεργασίας και διαχείρισης δεδομένων με τον καταναλωτή προσφέροντάς του μειωμένες χρεώσεις κιλοβατώρας στα πλαίσια μιας απελευθερωμένης αγοράς για την οποία γίνεται αναφορά παρακάτω. Η ανάλυση των δεδομένων του ‘έξυπνου μετρητή’ προσφέρει μέσω αυτοματοποιημένων πληροφοριακών συστημάτων ταχύτερη και ευφυέστερη λήψη αποφάσεων. [1], [6]

Πιθανά οφέλη της ανάπτυξης των έξυπνων μετρητών φαίνονται στην Εικόνα 2.



ce: Electric Power Research Institute, 2008.

Εικόνα 2. Πιθανά οφέλη από την ανάπτυξη των έξυπνων μετρητών [6].

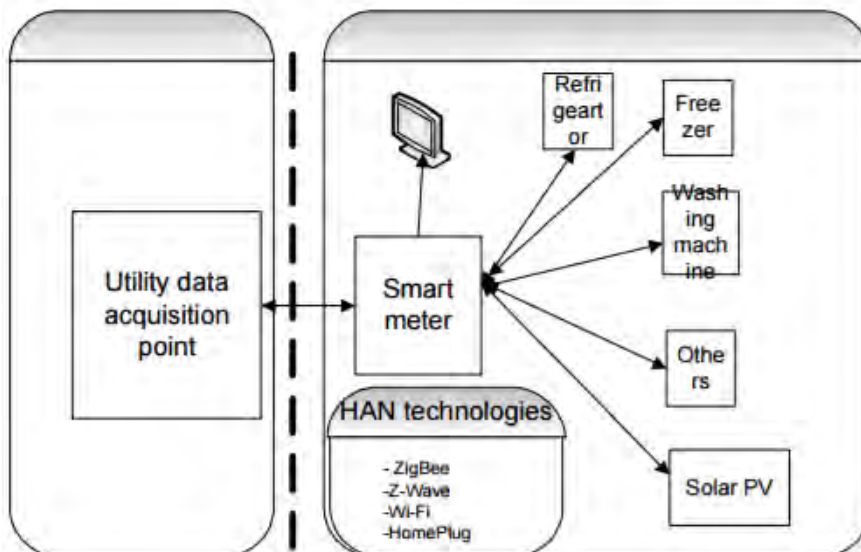
## 1.2.2 Microgrid/ Έξυπνο σπίτι (smart home)

Το Microgrid διαδραματίζει βασικό ρόλο στην έννοια του έξυπνου δικτύου εφόσον πρόκειται για ένα κομμάτι του μεγαλύτερου πλέγματος, το οποίο περιλαμβάνει σχεδόν όλα τα στοιχεία του δικτύου σε μικρότερη κλίμακα. Με την έννοια ‘microgrid’ απευθυνόμαστε σε ένα παράδειγμα νέας τοπολογίας, ένα

μικρό τμήμα του δικτύου που μπορεί να λειτουργήσει είτε είναι συνδεδεμένο στο υπόλοιπο δίκτυο, είτε είναι απομονωμένο. ‘Microgrid’ μπορεί να αποτελέσει μια επιχείρηση, ένα βιομηχανικό πάρκο, μία κατοικία ή οποιοδήποτε άλλο απομονωμένο σύστημα. [4]

Ένα έξυπνο σπίτι προσφέρει μια έξυπνη διεπαφή διαχείρισης κατοικίας και ένα άνετο περιβάλλον διαβίωσης. [7] Μια έξυπνη κατοικία λοιπόν είναι ένα σπίτι που είναι συνδεδεμένο με το έξυπνο δίκτυο, μέσω του έξυπνου μετρητή και μπορεί να προσαρμόσει την κατανάλωση βάσει εξωτερικών παραμέτρων όπως ο φόρτος δικτύου εφόσον παρακολουθεί την κατανάλωση του σπιτιού καθώς και την παραγωγή ενέργειας. Η πληροφορία αυτή στέλνεται πίσω στο δίκτυο, στις εταιρείες κοινής ωφέλειας και στη συνέχεια επιστρέφονται ποικίλες τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας είτε σε έξυπνες ηλεκτρικές συσκευές οι οποίες αποτελούν αυτοελεγχόμενες μονάδες που επικοινωνούν απευθείας με τον έξυπνο μετρητή ώστε να αποφασίσουν, είτε σε έναν ελεγκτή που αφού επικοινωνήσει με τον μετρητή, κρίνει το πότε είναι πιο ωφέλιμο για τον καταναλωτή και στέλνει στις συσκευές να αρχίσουν τη λειτουργία τους με τη χρήση ανάλογης τηλεπικοινωνιακής επικοινωνίας. [2]

Στην περίπτωση της peer-to-peer επικοινωνίας, δηλαδή την πρώτη προσέγγιση επίλυσης του HAN που είναι η απευθείας επικοινωνία του μετρητή με τις συσκευές, οι συσκευές αυτές οφείλουν να είναι έξυπνες, να επικοινωνούν μεταξύ τους, να διεξάγουν υπολογισμούς και να ανήκουν γενικότερα στο Internet of Things (IoT) που αποτελεί υποδομή δικτύου φυσικών αντικειμένων που περιέχουν ενσωματωμένη τεχνολογία και τους επιτρέπει να επικοινωνούν και να αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσα από ένα ενιαίο πλαίσιο, αναπτύσσοντας μια κοινή Εικόνα λειτουργίας για διάφορες εφαρμογές. Διάφορες διασυνδεδεμένες έξυπνες συσκευές μπορούν να προσφέρουν υπηρεσίες στο έξυπνο σπίτι. [8], [9]



Εικόνα 3. Peer-to-peer επικοινωνία [10].

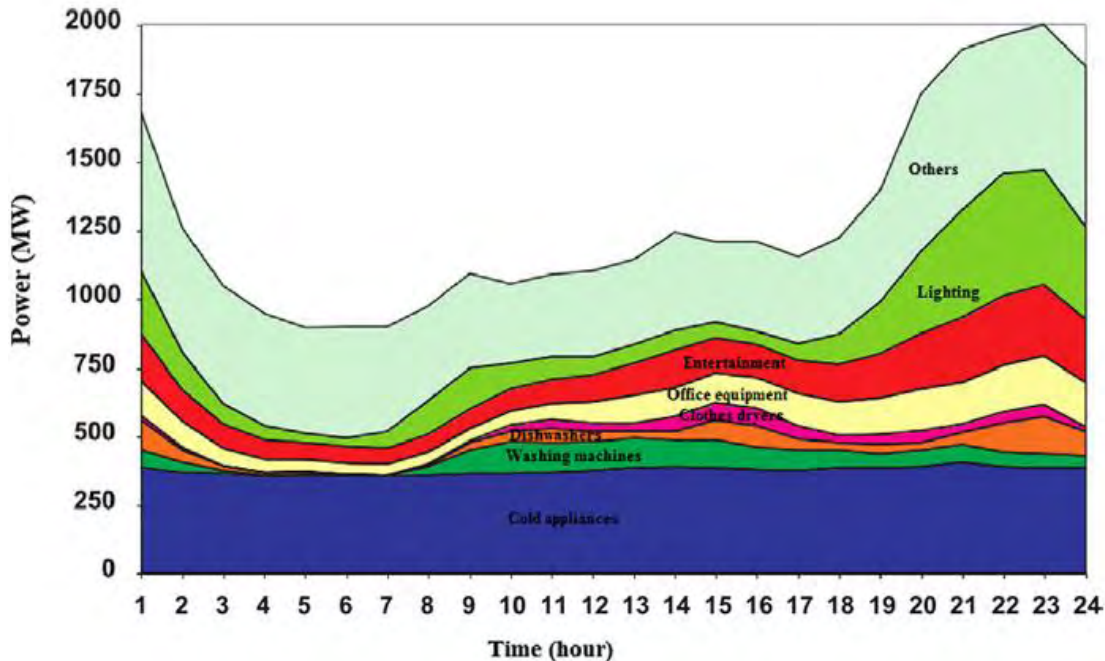
## 2 Αγορά ηλεκτρικής ενέργειας

Σε ένα έξυπνο δίκτυο διαφορετικά μοντέλα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας μπορούν να ανακαλυφθούν. Μέσω της ανάλυσης ενός συνόλου δεδομένων κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας που συλλέγονται από διάφορους τερματικούς σταθμούς λήψης δεδομένων μπορούν να μελετηθούν τα καθημερινά πρότυπα κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας οικιακών χρηστών.

### 2.1 Βελτιστοποιημένο μοντέλο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας

Με βάση τη θεωρία του Hogan, μια βελτιστοποιημένα αγορά ηλεκτρικής ενέργειας βασίζεται στα κίνητρα που εμφανίζονται μέσω της εθελοντικής αλληλεπίδρασης των συμμετεχόντων στην αγορά. Το κύριο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης αγοράς είναι ότι οι πραγματικές τιμές της εξαρτώνται από τη συμπεριφορά των συμμετεχόντων, δηλαδή τη ζήτηση. [11] Ο στόχος της πρόβλεψης της ζήτησης είναι να προβλέψει με ακρίβεια τις μελλοντικές ενεργειακές απαιτήσεις του συστήματος για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα βοηθώντας τις στρατηγικές δέσμευσης μονάδων ώστε να ταιριάζουν με τις απαιτήσεις παραγωγής δεδομένου ότι οι απαιτήσεις εξαρτώνται από τις καιρικές συνθήκες και τις δραστηριότητες των πελατών. Η πρόβλεψη αυτών των τιμών θα είναι κινητήριος μοχλός για τη λήψη αποφάσεων, τη βελτίωση στην επάρκεια της ενέργειας και την αξιοπιστία. Προϋπόθεση για τη λειτουργία της αποτελεί το 'spot-pricing', μια προβλεπόμενη τιμολόγηση καθοδηγούμενη από την αγορά με ρεαλιστικές τιμές σε πραγματικό χρόνο. [12]

Οι ώρες που χρησιμοποιούνται τακτικά από τους τελικούς καταναλωτές, παρέχουν πληροφορίες για τις συνήθειες και την πιθανότητα χρήσης κάποιων συσκευών με διαφορετικά χρονοδιαγράμματα. [13]



Εικόνα 4. Προφίλ φορτίου οικιακού τομέα [13].

Σε μια μεταρρυθμισμένη αγορά, οι προηγουμένως αμέτοχοι τελικοί χρήστες με ελάχιστες ή καθόλου επιλογές γίνονται πελάτες που μπορούν να επιλέξουν πότε και πόσο θα καταναλώσουν, ανταποκρίνονται στα οικονομικά κίνητρα που δημιουργούν οι αγορές οι οποίες αξιοποιούν την ευελιξία της ζήτησης. Η ευελιξία αυτή αναφέρεται ως ανταπόκριση στη ζήτηση (demand response). [6] Η χρήση ηλεκτρικής ενέργειας μετατοπίζεται χρονικά εγκαίρως σε απόκριση μίας τιμής.

Ο αυτοματισμός μέσω έξυπνων συσκευών έχει προταθεί ως μια πολλά υποσχόμενη στρατηγική έγκαιρης μετατόπισης της ζήτησης. Οι έξυπνες συσκευές μπορούν να λειτουργήσουν (ημι-) αυτόνομα και έτσι μπορούν να βοηθήσουν τους χρήστες να επιλέξουν αυτόματα την πιο επιθυμητή χρονική στιγμή για κατανάλωση με σκοπό μια πιο οικονομική και αποδοτική αξιοποίηση των υποδομών παραγωγής ενέργειας.

### 2.1.1 Στρατηγικές διαχείριση ζήτησης – απόκρισης (Demand Response)

Η διαχείριση ζήτησης – απόκρισης συνεπάγεται τον έλεγχο της ζήτησης ενέργειας και των φορτίων κατά τη διάρκεια κρίσιμων καταστάσεων αιχμής βρίσκοντας ένα σημείο ισορροπίας μεταξύ της προσφοράς και της ζήτησης με αποτέλεσμα την αξιοποίηση της διαθέσιμης ενέργειας και την πιο αξιόπιστη και φθηνότερη λειτουργία ολόκληρου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Οι DR στρατηγικές χρησιμοποιούν σήματα τιμών και συστήματα κινήτρων, ανταμοιβών και κυρώσεων για να επηρεάσουν τη χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας και να προκαλούν χαμηλότερη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας σε περιόδους υψηλών τιμών αγοράς ή όταν τίθεται σε κίνδυνο η αξιοπιστία του δικτύου. [14]

Οι μέθοδοι διαχείρισης DR χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Στην πρώτη ανήκουν τα προγράμματα διαχείρισης με απόκριση βάσει κινήτρου (incentive-based programs (IBP)).

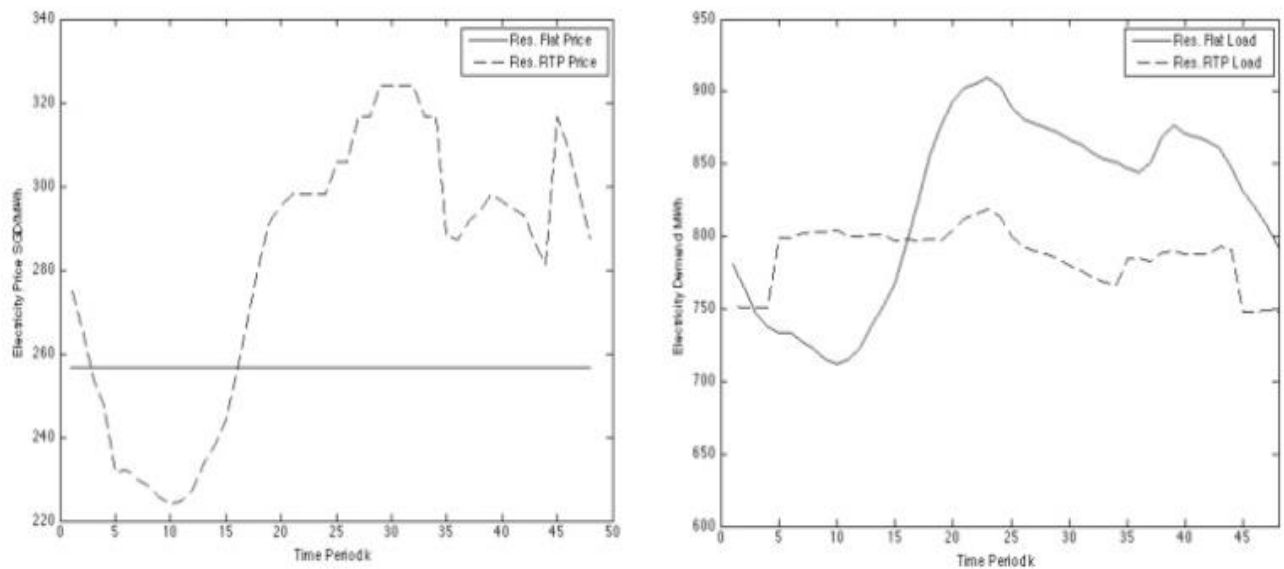
Ένα πρόγραμμα διαχείρισης DR είναι ο άμεσος έλεγχος φορτίου (Direct Load Control) όπου ο διαχειριστής του δικτύου μπορεί να ελέγχει απομακρυσμένα τα φορτία των καταναλωτών και να επέμβει περικόπτοντας φορτίο.

Στο πρόγραμμα περικοπής/διακοπής (Interruptible/ curtailable service) οι χρήστες συμφωνούν στη μείωση της κατανάλωσής τους σε επιλεγμένο όριο με αντάλλαγμα κάποια έκπτωση ενώ στο πρόγραμμα πλειοδοσίας/επαναγοράς (Demand Bidding/ Buyback) οι καταναλωτές ορίζουν την τιμή στην οποία θα κάνουν περικοπές, μετά από πλειοδοσία ο διαχειριστής, δίνει σήμα για περικοπή φορτίου. [1]

Στη δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι μέθοδοι διαχείρισης DR με απόκριση βάσει τιμολόγησης (priced based programs (PBP)).

Με την αλλαγή της τιμής ηλεκτρικής ενέργειας μέσα στη μέρα, μεταβάλλεται η καμπύλη κατανάλωσης συνεπώς και η καμπύλη ζήτησης εξομαλύνεται ενώ ταυτόχρονα οι χρήστες εξοικονομούν χρήματα.

Μέσω του προγράμματος τιμολόγησης βάσει της ώρας χρήσης (Time Of Use / TOU) η ενέργεια τιμολογείται διαφορετικά σε διαφορετικές χρονικές περιόδους της ημέρας ή της εποχής του χρόνου όπως το νυχτερινό τιμολόγιο. Άλλη μια μέθοδος είναι η τιμολόγηση πραγματικού χρόνου (Real Time Pricing / RTP) όπου η τιμή του ρεύματος αλλάζει κάθε ώρα, οι καταναλωτές προειδοποιούνται για τις αλλαγές στην τιμολόγηση την προηγούμενη ημέρα (day – ahead prediction) ή την προηγούμενη ώρα και έχουν τη δυνατότητα να προγραμματίσουν την κατανάλωσή τους.



Εικόνα 5. Αριστερά: τιμολόγηση, δεξιά: αποτελέσματα φορτίου για RTP τιμολόγηση σε οικιακό τομέα [15].

Με τιμολόγηση κρίσιμης αιχμής (Critical Peak Pricing / CPP) ο πάροχος καθορίζει μια κρίσιμη περίοδο στην οποία ισχύει υψηλή τιμολόγηση της κατανάλωσης με σκοπό την αξιοπιστία του συστήματος και ην ισορροπία. [1], [16]



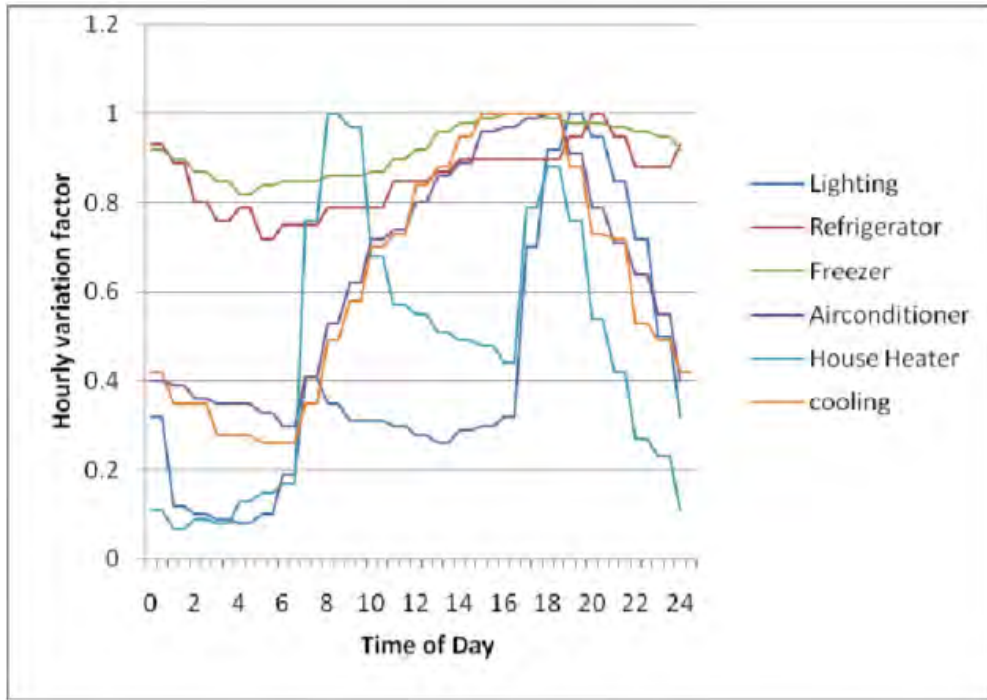
Εικόνα 6. Συνοπτικά οι επιλογές μεθόδου για DR [1].

## 2.2 Προφίλ βελτιστοποιημένης ‘smart home’ κατανάλωσης

Οι συσκευές μιας κατοικίας χωρίζονται σε ελεγχόμενες και μη ελεγχόμενες. Οι ελεγχόμενες συσκευές ενεργοποιούνται από τον χρήστη οποιαδήποτε στιγμή της ημέρας και λειτουργούν για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, κάποιες από τις οποίες είναι το πλυντήριο πιάτων, το πλυντήριο ρούχων, το στεγνωτήριο, κλπ. Αντιθέτως, στις μη ελεγχόμενες ανήκουν οι συσκευές που λειτουργούν καθ’ όλη τη διάρκεια της ημέρας ή βάση περιβαλλοντικών συνθηκών όπως το ψυγείο και τα φώτα. [17]

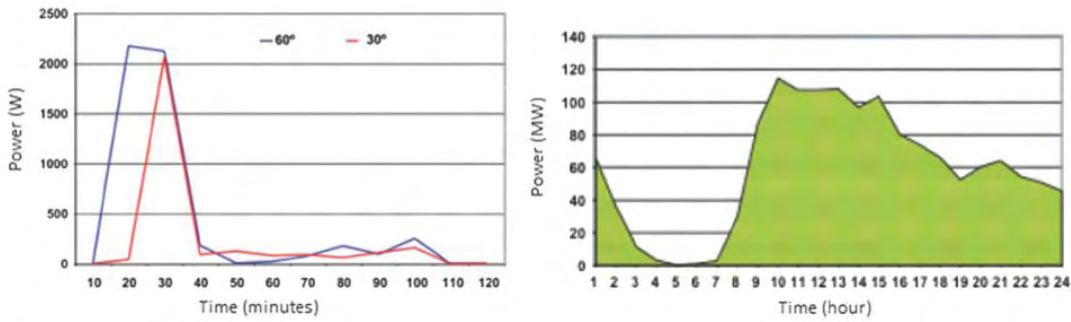
Σε πρόγραμμα διαχείρισης ζήτησης έχουν τη δυνατότητα να ενταχθούν οι ελεγχόμενες συσκευές καθώς είναι ευέλικτες και η λειτουργία τους μπορεί να μετατεθεί χρονικά κατά βούληση του χρήστη χωρίς τη μείωση της άνεσής του ή τη μείωση της ποιότητας των υπηρεσιών που προσφέρονται. Μπορούν να επαναπρογραμματιστούν από ώρες αιχμής σε ώρες εκτός αιχμής (όταν η ενέργεια κοστίζει λιγότερο), έτσι ώστε να εξομαλυνθεί η καμπύλη ζήτησης καθώς και το τελικό κόστος της κατανάλωσης ηλεκτρικού ρεύματος του πελάτη. [13]

Ένα παράδειγμα καμπύλης ζήτησης για κάποια φορτία μέσα στη μέρα, φαίνεται στην Εικόνα 7 όπου γίνεται αντιληπτό πως η θέρμανση και το σύστημα ψύξης έχουν τη μεγαλύτερη συνεισφορά (μεγαλύτερο συντελεστή) στην ανάπτυξη της ζήτησης αιχμής.



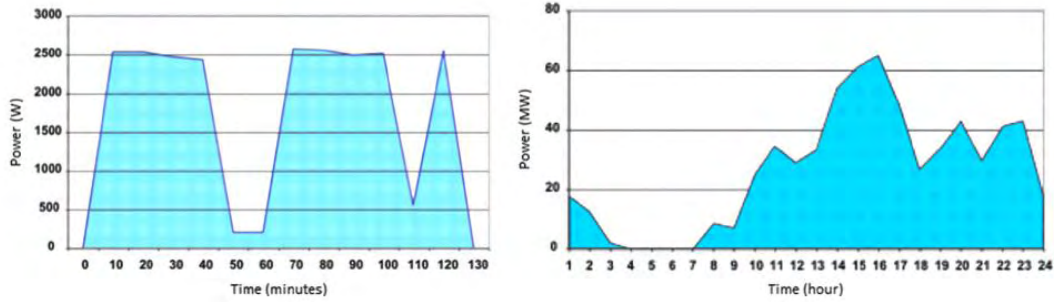
Εικόνα 7 . Καμπύλες ζήτησης για συγκεκριμένα φορτία εντός ενός 24ώρου [10].

Υπάρχουν όμως μεταβλητά φορτία - συσκευές που συμβάλουν σημαντικά στο peak demand όπως είναι το στεγνωτήριο, το πλυντήριο ρούχων / πιάτων, ο θερμοσίφωνας. Για παράδειγμα στην Εικόνα 8 παρουσιάζεται ο τυπικός κύκλος λειτουργίας ενός πλυντηρίου ρούχων και ο μέσος καθημερινός τρόπος χρήσης και στην Εικόνα 9 αντίστοιχα για ένα στεγνωτήριο ρούχων. [13]



Εικόνα 8. Τυπικός κύκλος λειτουργίας ενός πλυντηρίου ρούχων και μέσος καθημερινός τρόπος χρήσης [13].





Εικόνα 9. Τυπικός κύκλος λειτουργίας ενός στεγνωτηρίου ρούχων και μέσος καθημερινός τρόπος χρήσης [13].

Τιμολογώντας διαφορετικά την ηλεκτρική ενέργεια μέσα στη μέρα, για παράδειγμα με τη μέθοδο RTP που ανταποκρίνεται στο κόστος παραγωγής, οι καταναλωτές βάσει αυτού του πλαισίου χρονοπρογραμματίζουν κατάλληλα τις συσκευές τους με αποτέλεσμα τη μείωση του φόρτου σε ώρες αιχμής, συνεπώς και της κατανάλωσης, αποφεύγοντας την υψηλότερη χρέωση.

### 3 Agent-Based μοντελοποίηση

Ο σχεδιασμός της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας πρέπει να εξετάζει πολλές παραμέτρους του συστήματος όπως τον τρόπο δημιουργίας της προσφοράς και της ζήτησης και την υποβολή προσφορών στους καταναλωτές. Εκτός αυτού η ενσωμάτωση ενός μεγάλου αριθμού καταναλωμένων στοιχείων και συσκευών στο σύστημα που περιγράφηκε οδηγεί σε ένα περίπλοκο και σύνθετο σύστημα, συνεπώς υπάρχει ανάγκη για εργαλεία και λογισμικό που θα παρέχουν μια ρεαλιστική μοντελοποίηση. Αυτά τα εργαλεία και οι αναλύσεις του συστήματος μπορούν να αντιπροσωπεύονται από μοντέλα που βασίζονται σε πράκτορες (Agents) και επιτρέπουν τη μελέτη ρεαλιστικών σεναρίων με τη μορφή υπολογιστικών εικονικών κόσμων. [18]

#### 3.1 Σύγκριση ABM με άλλες μεθόδους

Ένα είδος είναι η Equation-Based μοντελοποίηση που βασίζεται στη συσχέτιση ενός συνόλου εξισώσεων που συλλαμβάνει τη μεταβλητότητα ενός συστήματος με την πάροδο του χρόνου. Η μέθοδος αυτή δεν στοχεύει στην εκπροσώπηση της συμπεριφοράς των μεμονωμένων στοιχείων ενός συστήματος, αλλά στη γενική του συμπεριφορά. Εφόσον αφορά ένα σύστημα στο σύνολό του και δεν υποστηρίζει μια ρητή αναπαράσταση των στοιχείων (πρακτόρων) εφαρμόζεται σε συστήματα που μπορούν να μοντελοποιηθούν κεντρικά και στα οποία η αλλαγή και η πρόοδος επέρχεται από φυσικούς νόμους και όχι από επεξεργασία πληροφοριών. Η συσσώρευση υψηλού επιπέδου προτιμήσεων μπορεί να είναι προβληματική τόσο από πλευράς απαιτήσεων δεδομένων όσο και υπολογιστικής πολυπλοκότητας εφόσον η μέθοδος λειτουργεί πρωτίστως σε συγκεντρωτικό επίπεδο. Επιπροσθέτως, τα μοντέλα που βασίζονται σε εξίσωση, είναι δύσκολο να περιγραφεί ο τρόπος και ο λόγος με τον οποίο λαμβάνεται μια απόφαση. [19]

Αντιθέτως, η ABM διερευνά πώς οι ομάδες ατόμων δημιουργούν αναδυόμενα πρότυπα και πώς αλληλεπιδρούν μεταξύ τους όταν λαμβάνουν αποφάσεις αντιμετωπίζοντας τους περιορισμούς της παραπάνω μεθόδου. Το αντικείμενο της μοντελοποίησης πλέον είναι ο πράκτορας, γεγονός που προσφέρει ένα επιπλέον επίπεδο επικύρωσης καθώς επιτρέπει να λαμβάνονται υπόψη οι μεμονωμένες αποφάσεις και κλίσεις, να εξετάζονται οι τοπολογικές ιδιαιτερότητες της αλληλεπίδρασης και της μεταφοράς πληροφοριών. Γενικά, φαίνεται καταλληλότερη σε τομείς που χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό ετερογένειας πληθυσμού και διανομής και κυριαρχούνται από διακριτές αποφάσεις, επιτρέπει τη τμηματική εξέταση ενός συστήματος, αλλά απαιτεί περισσότερες τεχνικές γνώσεις και εμπειρία. [20]

## 3.2 Πολυπρακτορικά συστήματα (Multi Agent systems(MAS))

Μια πολλά υποσχόμενη λύση είναι η χρήση τεχνολογίας πολλαπλών πρακτόρων για το σχεδιασμό και τη διαχείριση του συστήματος. Ένα MAS αποτελείται από πολλαπλούς πράκτορες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω μηνυμάτων και ο καθένας έχει τις δικές του λειτουργίες ενώ συνολικά δημιουργούν ένα δυναμικό σύστημα.

Ένας πράκτορας είναι μια ανεξάρτητη μονάδα, η οποία μπορεί να κατανοήσει την κατάσταση και να ανταποκριθεί σε ερεθίσματα σύμφωνα με προκαθορισμένες ατομικές συμπεριφορές. Σε συνεργασία με τους υπόλοιπους ο καθένας μοιράζεται αυτόματα πληροφορίες και συνεργάζεται για να επιτευχθεί ένας κοινός στόχος. Κάθε πράκτορας διαθέτει μια μηχανή κατάστασης συμπεριφοράς και μια βιβλιοθήκη συμπεριφοράς. Επιλέγει μια συγκεκριμένη συμπεριφορά σύμφωνα με τους στόχους του και τις συμπεριφορές άλλων πρακτόρων. [21]

Κύριο χαρακτηριστικό ενός πράκτορα (Agent) είναι η αυτονομία του, κανένας πράκτορας δεν έχει μια συνολική εικόνα του συστήματος και δεν μπορεί να έχει ρόλο ελέγχου του συστήματος. [22]

### 3.2.1 Μέθοδοι υλοποίησης

Πληθώρα από πλατφόρμες και γλώσσες προγραμματισμού χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση των MAS με αποτέλεσμα την διευκόλυνση της υλοποίησης τέτοιων συστημάτων.

Η 3APL(Abtract Agent Programming Language) είναι μια γλώσσα προγραμματισμού για την εφαρμογή πολυπρακτορικών συστημάτων και την αντιμετώπιση των πεποιθήσεων, των στόχων, των βασικών δυνατοτήτων των πρακτόρων (όπως ενημερώσεις πεποιθήσεων, εξωτερικές ενέργειες ή δράσεις επικοινωνίας). Η 3APL είναι ενσωματωμένη σε ένα IDE που βοηθάει έναν προγραμματιστή να γράφει τα προγράμματα που υλοποιούν τους μεμονωμένους πράκτορες, να τα εκτελεί είτε βήμα προς βήμα είτε με συνεχή τρόπο και να παρακολουθεί την εκτέλεσή τους με πρόσβαση στην εσωτερική κατάσταση του πράκτορα και τον εντοπισμό των μηνυμάτων που ανταλλάσσονται.

Το JACK είναι ένα εμπορικό λογισμικό για την υλοποίηση συστημάτων που βασίζονται στο BDI (Belief–desire–intention). Αντί να χρησιμοποιεί λογική γλώσσα, επεκτείνει τη γλώσσα Java μέσω ενός συνόλου συντακτικών κατασκευών για την αντιμετώπιση της συμπεριφοράς και των πεποιθήσεων των πρακτόρων. Παρέχει ένα σύνολο εργαλείων ανάπτυξης που επιτρέπουν, για παράδειγμα, την επεξεργασία κώδικα του πράκτορα μέσω ενός αποκλειστικού editor και ενός γραφικού επεξεργαστή που επιτρέπει την κατασκευή ενός σχεδίου μέσω οπτικών στοιχείων παρόμοια με τα διαγράμματα κατάστασης. [23]

### 3.2.2 Περιορισμοί

Πολλές από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται για MAS υλοποιήσεις δεν βασίζονται πλήρως στις προδιαγραφές του FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agent), που αποτελεί ένα τυπικό πρότυπο

επικοινωνίας IEEE μεταξύ των πρακτόρων και προορίζεται για βιομηχανικά και εμπορικά MAS καθώς επικεντρώνεται στη διευκόλυνση της διαλειτουργικότητας πρακτόρων σε διάφορες πλατφόρμες λογισμικού.

Για την απλούστευση της ανάπτυξης συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων, οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται οφείλουν να παρέχουν ένα σωστό σύνολο λειτουργιών χωρίς περιορισμούς στον κώδικα και χωρίς την επιβολή συγκεκριμένης αρχιτεκτονικής πράκτορα. Στις μεθόδους 3APL και JACK που αναφέρθηκαν παραπάνω απαιτείται ο χρήστης να κατανοήσει την BDI αρχιτεκτονική, που αναφέρεται στην βιβλιογραφία αλλά δεν έχει ακόμη γίνει αποδεκτή στην κοινότητα των μηχανικών λογισμικού. [22], [23]

### 3.3 Αρχιτεκτονική JADE

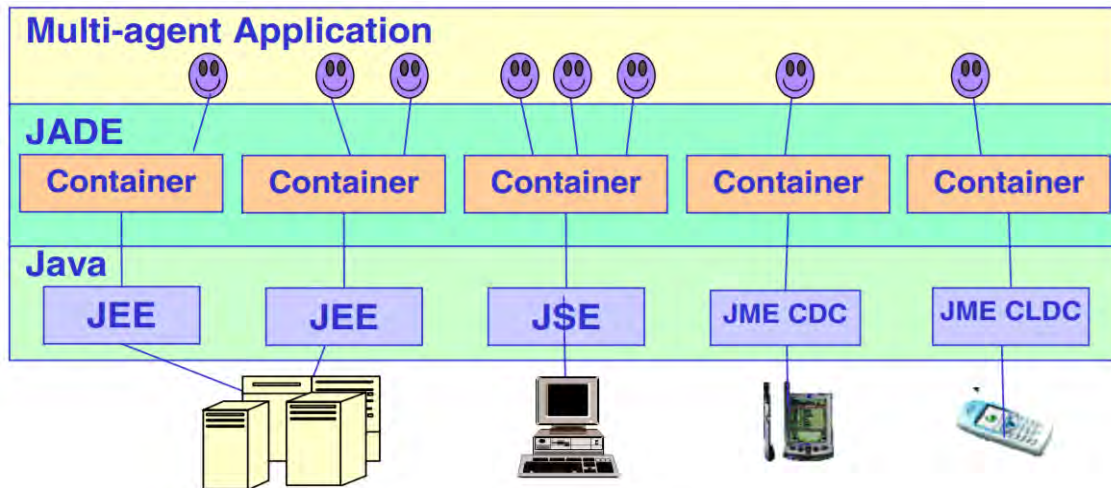
Η πλατφόρμα JADE (JAVA Agent Development Framework) προσπερνά τους παραπάνω περιορισμούς και είναι δημοφιλής μέθοδος υλοποίησης MAS λόγω της χρήσης γλώσσας προγραμματισμού Java και της συμμόρφωσής της με τα πρότυπα IEEE, συνδυάζετε συχνά με γλώσσες προγραμματισμού προσανατολισμένες προς τους πράκτορες, οι οποίες χρησιμοποιούνται για την υλοποίηση της συμπεριφοράς των πρακτόρων στο σύστημα. Είναι μια πλατφόρμα που χρησιμοποιείται για τη διευκόλυνση της ανάπτυξης διαλειτουργικών ευφυών συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων ως εργαλείο, τόσο για την υποστήριξη ερευνητικών δραστηριοτήτων όσο και για την δημιουργία πραγματικών εφαρμογών. Περιλαμβάνει ένα περιβάλλον εκτέλεσης όπου οι πράκτορες JADE μπορούν να "ζουν" και αυτό πρέπει να είναι ενεργό σε έναν συγκεκριμένο κεντρικό υπολογιστή, πριν να εκτελεστεί ένας ή περισσότεροι πράκτορες σε αυτόν τον κεντρικό υπολογιστή. Παρέχει μια βιβλιοθήκη μαθημάτων που οι προγραμματιστές πρέπει να μπορούν να χρησιμοποιήσουν (άμεσα ή με εξειδίκευση τους) για να αναπτύξουν τους πράκτορές τους και γραφικά εργαλεία που επιτρέπουν τη διαχείριση και την παρακολούθηση της δραστηριότητας των πρακτόρων που τρέχουν. [24]

Η αρχιτεκτονική του JADE βασίζεται στα πρότυπα επικοινωνίας μεταξύ ομότιμων (peer-to-peer). Το περιβάλλον εξελίσσεται δυναμικά με τους πράκτορες να εμφανίζονται στο σύστημα σύμφωνα με τις ανάγκες και τις απαιτήσεις της εφαρμογής. Τα στοιχεία δόμησης μιας εφαρμογής είναι είτε πράκτορες, που αυτόνομα επικοινωνούν μέσω ασύγχρονη αποστολή μηνυμάτων, είτε υπηρεσίες που λειτουργούν αφού ενεργοποιηθούν από τους πράκτορες.

Διακρίνεται για την διαλειτουργικότητα, την ομοιομορφία και τη φορητότητα καθώς παρέχει ένα ομοιογενές σύνολο API που είναι ανεξάρτητες από το υποκείμενο δίκτυο και την έκδοση Java, είναι εύκολο στη χρήση και ο προγραμματιστής δεν χρειάζεται να ξέρει και να χρησιμοποιήσει όλες τις δυνατότητες που παρέχει το middleware. [23]

Εκτός αυτού, η JADE χρησιμοποιεί Java και κάθε πράκτορας τρέχει σε διαφορετικό νήμα, οπότε είναι πιο γρήγορο, ενημερώνεται συχνά, είναι δωρεάν και open source, διαθέτει GUI με πολλά χρήσιμα

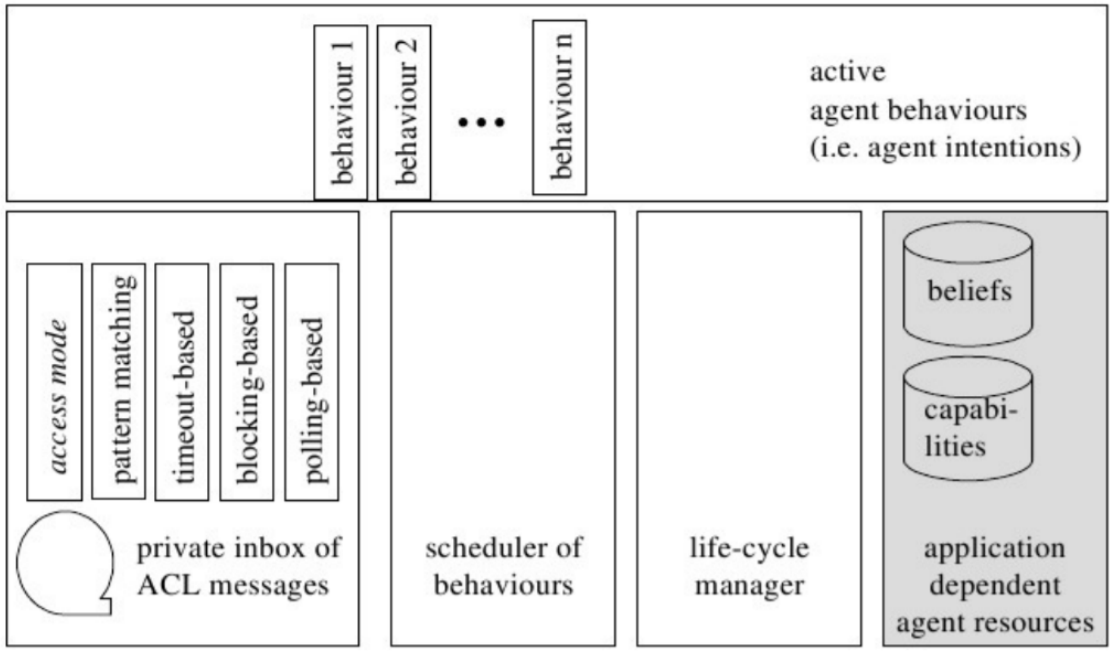
χαρακτηριστικά και εργαλεία και έχει μεγάλη γκάμα επεκτάσεων και βιβλιοθηκών για πρόσθετη ασφάλεια, η αρχιτεκτονική ενός JADE συστήματος πρακτόρων φαίνεται στην Εικόνα 10. [22]



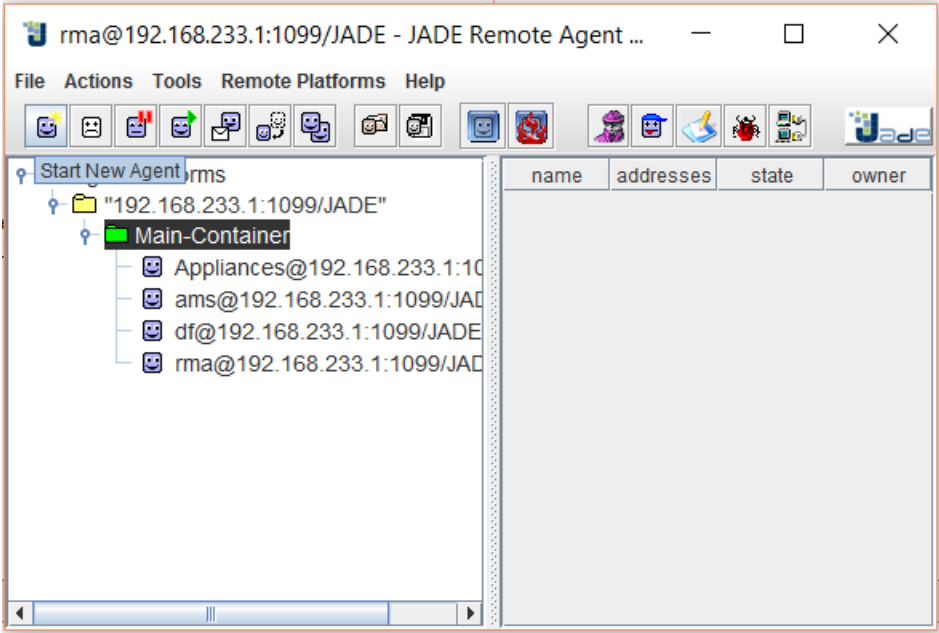
Εικόνα 10. Αρχιτεκτονική ενός JADE συστήματος πρακτόρων [22].

Η πλατφόρμα JADE είναι ένα κατακεντρωμένο σύστημα που μπορεί να εξαπλωθεί σε πολλούς κεντρικούς υπολογιστές όπου εκεί υπάρχουν ένας ή περισσότεροι Containers (που αποτελούνται από πράκτορες), καθένας από τους οποίους ζει σε ξεχωριστή Java Virtual μηχανή και επιτρέπει την ανεξαρτησία της πλατφόρμας. Ένας πράκτορας ζει σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον και επομένως το JADE παρέχει ένα, όπως φαίνεται στην Εικόνα 11. Όλοι οι πράκτορες επικοινωνούν μέσω της μετάδοσης μηνυμάτων, χρησιμοποιώντας FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agents) ACL (Agent Communication Language). Για την υποστήριξη της επικοινωνίας με τον πράκτορα, κάθε πράκτορας έχει ένα δημόσιο μοναδικό αναγνωριστικό (GUID) με τη μορφή: <όνομα πράκτορα> @ <διεύθυνση πλατφόρμας>. Αυτός ο GUID χρησιμοποιείται για την αποστολή μηνυμάτων ACL σε πράκτορες και κάθε πράκτορας αποστολής στέλνει επίσης το GUID του, για να διευκολύνει την απάντηση.

Το έργο που εκτελεί κάθε ένας από τους πράκτορες τοποθετείται σε Συμπεριφορές (Behaviours). Κάθε πράκτορας μπορεί να έχει πολλαπλές συμπεριφορές. Κάθε πράκτορας προγραμματίζει τις διαφορετικές συμπεριφορές με συνεργατική χρονοδρομολόγηση που σημαίνει ότι όλες οι συμπεριφορές τρέχουν μέσα σε ένα ενιαίο πλαίσιο στοίβας που δημιουργείται από τον πράκτορα, ο οποίος είναι επί του παρόντος στο πάνω μέρος της στοίβας όπως φαίνεται στην Εικόνα 11. [22]



Εικόνα 11. Αρχιτεκτονική ενός πράκτορα JADE [22].



Εικόνα 12. Δημιουργία νέου πράκτορα.

### 3.3.1 Υλοποίηση

Τα MAS μπορούν να δημιουργηθούν χρησιμοποιώντας οποιαδήποτε αντικειμενοστρεφή γλώσσα προγραμματισμού, εφόσον οι πράκτορες όπως και τα αντικείμενα μοιράζονται πολλές ιδιότητες όπως είναι η κληρονομικότητα η μετάδοση μηνυμάτων η ενθυλάκωση κλπ. Οι γλώσσες προγραμματισμού προσανατολισμένες σε πράκτορες είναι μια νέα κατηγορία προγραμματιστικών γλωσσών που επικεντρώνονται στα κύρια χαρακτηριστικά των συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων και έχουν δομή που αντιστοιχεί σε έναν πράκτορα παρέχοντας επίσης μηχανισμούς υποστήριξης πεποιθήσεων, στόχων, ρόλων και κανόνων.

Στόχος του JADE είναι να παρέχει λειτουργίες συμβατές με το FIPA για την υποστήριξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών συστημάτων πολλαπλών πρακτόρων όπως και βασικές λειτουργίες στο στρώμα middleware ανεξάρτητες από τη συγκεκριμένη εφαρμογή που απλοποιούν την υλοποίηση καταναμημένων εφαρμογών. Κατά την ανάπτυξη του συστήματος με το JADE δημιουργούνται και υλοποιούνται κατηγορίες κλάσεων για να περιγράψουμε διάφορους τύπους παραγόντων, κλάσεις διεπαφής χρήστη για την αλληλεπίδραση πρακτόρων, κλάσεις δραστηριότητας πράκτορα για συμπεριφορές, κλάσεις βάσεων δεδομένων για τη διαχείριση της βάσης δεδομένων του συστήματος, κλάσεις επικοινωνίας για τη διαχείριση των διαπραγματεύσεων μεταξύ των πρακτόρων και οντολογικές κλάσεις για τον ορισμό εννοιών, κατηγοριοποιήσεων και ενεργειών του πράκτορα.

Όσον αφορά την επικοινωνία του πράκτορα, αυτή βασίζεται στην αποστολή (ενέργεια) και τη λήψη μηνυμάτων (αντίληψη). Ένας πράκτορας μπορεί να επικοινωνήσει με άλλον πράκτορα με το να στείλει μήνυμα. Ένας πράκτορας που θέλει να επικοινωνήσει με έναν άλλο πράκτορα πρέπει πρώτα να δημιουργήσει ένα μήνυμα αντικείμενο και στη συνέχεια να το στείλει στον πράκτορα που τον ενδιαφέρει. Οι πράκτορες πρέπει να διαθέτουν πληροφορίες για την επεξεργασία των μηνυμάτων. Ένα μήνυμα κειμένου έχει έναν τύπο argument αντικειμένου και ο πράκτορας παραλήπτης προσδιορίζει τη δράση του, ελέγχοντας τον τύπο του μηνύματος που έλαβε και παίρνει παραμέτρους όπως το argument αντικείμενο.

Ένα μήνυμα έχει δύο μέρη, όπου το πρώτο είναι η κεφαλίδα μηνύματος, που περιέχει τις πληροφορίες σχετικά με τον αποστολέα, τον παραλήπτη, το θέμα, την ημερομηνία, το χρόνο και την προτεραιότητα και το δεύτερο είναι το περιεχόμενο του μηνύματος που περιέχει χαρακτηριστικά όπως το ρήμα δράσης, ένα αντικείμενο, προϋποθέσεις και περιορισμούς. Το ρήμα δράσης χρησιμοποιείται για να υποδείξει τον τύπο της ενέργειας που πρέπει να λάβει ο παραλήπτης, όπως αίτημα (request), πρόταση (propose), ερώτημα (query). [25]

## 4 Σχεδιασμός της εφαρμογής

Η ιδέα σχεδιασμού μιας εφαρμογής για την προσομοίωση της ενεργειακής κατανάλωσης σε έξυπνο σπίτι βασίζεται ισχυρά στον διαχωρισμό σε ενότητες (modules) ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ευελιξία και επεκτασιμότητα της εφαρμογής. Μέσω της διαίρεσης της λύσης σε υποσυστήματα, καθίσταται σαφέστερο ποιος είναι ο ρόλος και η λειτουργικότητα του κάθε τμήματος, επίσης διευκολύνεται η πρόσβαση για περαιτέρω επεξεργασία δεδομένων και υπάρχει δυνατότητα αφαίρεσης ή αντικατάστασης μιας ενότητας υπεύθυνης για κάποιο συγκεκριμένο μέρος της εφαρμογής χωρίς να δημιουργηθεί πρόβλημα στη συνολική λειτουργικότητα της εφαρμογής. [2]

Το πρώτο module αφορά τη μελέτη και τη σχεδίαση μιας μονάδας ανίχνευσης και μέτρησης των γεγονότων, ενός έξυπνου μετρητή στον οποίο καταγράφεται πληροφορία όπως η κατανάλωση διάφορων συσκευών, η ισχύς και οι περιβαλλοντικές συνθήκες που αφορούν το σπίτι καθώς και πληροφορίες για την τοπική παραγωγή ενέργειας. Οι πληροφορίες αυτές μπορεί να δίνονται για παράδειγμα σε ένα xls αρχείο, ή κατευθείαν από τις έξυπνες συσκευές μέσω Wi-Fi ή Bluetooth.

Το δεύτερο module αφορά την ανάλυση των μετρήσεων των γεγονότων, την επικοινωνία των έξυπνων συσκευών και του μετρητή με τον χρήστη. Πάνω από τον μετρητή και τις συσκευές βρίσκεται ένας ελεγκτής που ελέγχει αυτόματα τα διάφορα μεγέθη και διαχειρίζεται τα ηλεκτρικά φορτία εξασφαλίζοντας την ικανοποίηση των καταναλωτών καθώς και την εξοικονόμηση ενέργειας. Αυτός ο ελεγκτής θα πρέπει να μπορεί να συλλέγει τις πληροφορίες από τους μετρητές αλλά και να μπορεί να ελέγξει διακόπτοντας ή ενεργοποιώντας τις έξυπνες συσκευές. Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω ο ενεργειακός ελεγκτής θα πρέπει να χρονοπρογραμματίζει τις έξυπνες συσκευές σε πραγματικό χρόνο μεγιστοποιώντας το όφελος του καταναλωτή σύμφωνα με την τιμολόγηση και τα όρια ισχύος που λαμβάνει από τον aggregator. Βάση αυτών των πληροφοριών θα μπορεί να σχηματιστεί το προφίλ της ενεργειακής ζήτησης του κάθε σπιτιού ώστε ο διαχειριστής του δικτύου να καταφέρει να προβλέψει το φορτίο που ενδέχεται να καταναλωθεί την επόμενη μέρα και να διαμορφώσει ανάλογα την τιμολόγησή.

Ο ελεγκτής πρέπει να επικοινωνεί με τον καταναλωτή μέσω μίας εξωτερικής συσκευής στην οποία ο χρήστης θα μπορεί να δηλώνει τις επιθυμητές ώρες λειτουργίας των φορτίων μέσα στη μέρα. Μια τέτοια συσκευή μπορεί να τρέχει ένα απλό για τον χρήστη γραφικό περιβάλλον και η επικοινωνία είναι εφικτή μέσω ασύρματης μετάδοσης και λήψης πληροφοριών πραγματικού χρόνου π.χ. από webserver.

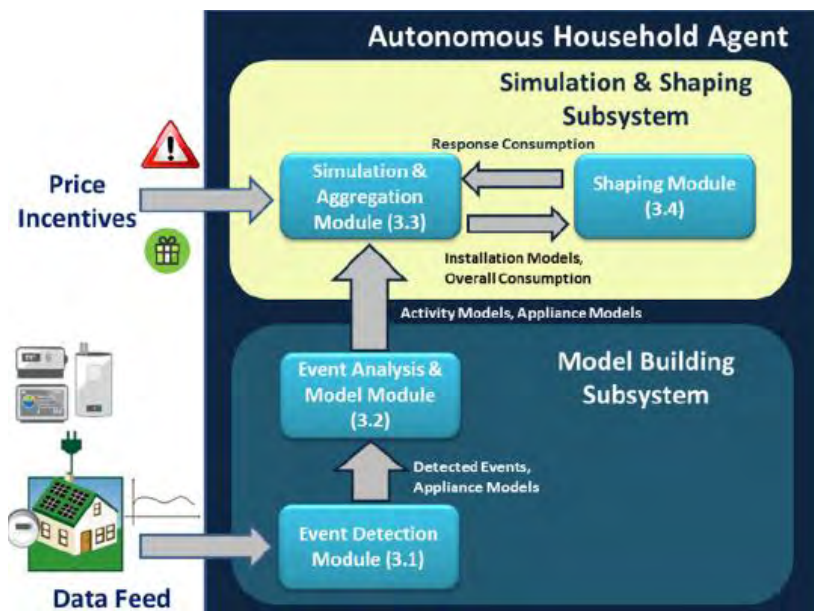
Ένα τρίτο module είναι ένας διαμεσολαβητής, ο aggregator που κρίνεται κρίσιμος για την βελτιστοποίηση της κατανομής των ορίων ισχύος καθώς και την μεταφορά των δεδομένων για την εφαρμογή DR προγραμμάτων. Αποτελεί μέσο συμμετοχής ενός καταναλωτή στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας. Ο ρόλος του είναι να συλλέγει πληροφορίες κατανάλωσης από τα έξυπνα σπίτια και από την αγορά και να φροντίζει να εκτελούνται τα προγράμματα διαχείρισης ζήτησης. Ο διαχειριστής συλλέγει τα δεδομένα από όλους τους aggregators, χρησιμοποιεί τα οικονομικά του εργαλεία και δίνει σε κάθε aggregator ένα όριο ισχύος που πρέπει να καταναλωθεί στους καταναλωτές.



Σαν τέταρτο module μπορεί να θεωρηθεί η μονάδα διαμόρφωσης της κατανάλωσης που επιτρέπει στον καταναλωτή να ανταποκρίνεται στα κίνητρα τιμολόγησης, οδηγώντας σε αλλαγή στην τελική χρήση των συσκευών και τελικά στην αλλαγή της καμπύλη φορτίου ισχύος. Αιτήσεις για μείωση φόρτου τις ώρες αιχμής και κίνητρα (ανταμοιβές και / ή κυρώσεις) μπορούν να παρέχονται στους μικρούς καταναλωτές για να διαφοροποιηθεί η καταναλωτική τους συμπεριφορά. Τα κίνητρα διαμορφώνονται ως διακυμάνσεις τιμών (αυξήσεις ή πτώσεις) μέσα σε ένα χρονικό παράθυρο , ενώ ο χρήστης αποκρίνεται μετατοπίζοντας την κατανάλωσή του. Τα ενδεχόμενα μοντέλα απόκρισης του καταναλωτή είναι τα εξής:

- Βέλτιστο σενάριο: Οι ηλεκτρικές συσκευές βάση γνωστής τιμής μπορούν να μεταφέρουν τη λειτουργία τους (αυτόματα ή με το χέρι) σε εναλλακτικές ζώνες ώρας σύμφωνα με την πολιτική τιμολόγησης.
- Σενάριο με βάση την άνεση: Ελάχιστη μετατόπιση της λειτουργίας της συσκευής επιτυγχάνεται, ώστε να μην θυσιάζεται η άνεση των καταναλωτών. Για παράδειγμα, οι καταναλωτές μπορούν να σταματήσουν τις δραστηριότητές τους για 10-15 λεπτά, ενώ η πρόταση μιας καθυστέρησης 2 ωρών για κάποιες δραστηριότητες πιθανώς να μην είναι αποδεκτή. Σε περίπτωση που υπάρχουν κίνητρα ποινής ή πρόσθετα κίνητρα ανταμοιβής ένα ποσοστό της ενεργειακής κατανάλωσης την ώρα αιχμής μεταφέρεται ακριβώς πριν ή μετά το χρονικό παράθυρο αιχμής.
- Χειρότερη περίπτωση: Στη χειρότερη περίπτωση, οι καταναλωτές ανταποκρίνονται στα κίνητρα κυρώσεων με τη μετατόπισή της δραστηριότητάς τους τις επόμενες προτιμώμενες ώρες της ημέρας. Για έναν καταναλωτή που συνήθως εκτελεί μια δραστηριότητα δύο φορές την ημέρα (μία φορά το μεσημέρι και μία φορά το βράδυ), υπερβολική κατανάλωση ενέργειας μεταφέρεται το βράδυ. Αυτή η συμπεριφορά μετατόπισης υπερφορτίζει τις μικρότερες κορυφές της αναμενόμενης κατανάλωσης ισχύος. [26]

Μία παρεμφερής προτεινόμενη αρχιτεκτονική παρουσιάζεται στην Εικόνα 13 και περιλαμβάνει τέσσερα στοιχεία που οργανώνονται σε δύο υποσυστήματα.



Εικόνα 13. Αρχιτεκτονική του νοικοκυριού. Το υποσύστημα δημιουργίας μοντέλου είναι υπεύθυνο για την κατασκευή μοντέλων καταναλωτών, ενώ το υποσύστημα διαμόρφωσης προσομοιώνει τη συμπεριφορά τελικής χρήσης και την ανταπόκριση στα κίνητρα διαμόρφωσης φορτίου.

#### 4.1 Διατήρηση ασφάλειας καταναλωτή

Εκτός από την ευεργετικότητα της ενσωμάτωσης αναβαθμισμένων τεχνολογιών στο έξυπνο δίκτυο που προσφέρουν την αυτοματοποίηση της παραγωγής, την κατανομή και τη διαχείριση της ηλεκτρικής ενέργειας, υπάρχουν μειονεκτήματα που αφορούν την ιδιωτικότητα των χρηστών. Όπως περιγράφηκε παραπάνω, πληθώρα διάφορων έξυπνων αντικειμένων συνδέονται με το διαδίκτυο για να επικοινωνήσουν.

Υπηρεσίες όπως η εξισορρόπηση του φορτίου και ο έλεγχος της ασφάλειας του δικτύου μπορούν να επωφεληθούν από την αρχιτεκτονική της κατανεμημένης επεξεργασίας της Fog, μιας σταθερής πλατφόρμας για εφαρμογές επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο, που παρέχει επικοινωνία με μικρή καθυστέρηση. Υπάρχει συνεχής ανάγκη για μεταφορά υπηρεσιών και δεδομένων όπως η τιμολόγηση και για αναπληροφόρηση τόσο του καταναλωτή όσο και του παρόχου.

Εν τούτοις, τα δεδομένα που υποβάλλονται μπορεί να αξιοποιηθούν για την εξαγωγή συμπερασμάτων για την ιδιωτική ζωή των ατόμων. Μια μέθοδος για την απόκρυψη του προφίλ κατανάλωσης των κατοίκων είναι η ομαδοποίηση των δεδομένων ενός συνόλου καταναλωτών σε ένα μόνο σήμα. Έτσι, μπορεί να προστατευτεί το απόρρητο για παράδειγμα με Fog computing που επιτρέπει τη συγκέντρωση δεδομένων στους τελικούς συλλέκτες.

Συνεπώς για την προστασία του καταναλωτή, αρχικά ο έξυπνος μετρητής στέλνει κρυπτογραφημένα τα δεδομένα μέσω αξιόπιστης υπηρεσίας (αντιπροσωπείας). Οι τεχνικές κρυπτογράφησης εφαρμόζουν

σχήματα μυστικής μεταφοράς δεδομένων, οπότε ο πάροχος μπορεί μόνο να αποκρυπτογραφήσει το σύνολο των δεδομένων κατανάλωσης και όχι μεμονωμένα στοιχεία δεδομένων. [27] Η υπηρεσία της αντιπροσωπείας είναι υπεύθυνη για τη συγκέντρωση των δεδομένων που έχει λάβει και συνθέτει την εικονική ομάδα (γειτονιά) εξασφαλίζοντας την ιδιωτικότητα των κατοίκων. Τα δεδομένα του έξυπνου μετρητή παρακολουθούνται σε πραγματικό χρόνο από την υπηρεσία ελέγχου ασφάλειας για την ανίχνευση σφαλμάτων και μόνον τα συγκεντρωμένα δεδομένα μεταδίδονται στο νέφος συμβάλλοντας στη διατήρηση της ιδιωτικής ζωής και τη μείωση του κόστους επικοινωνίας. [28]

## 5 Υλοποίηση της εφαρμογής SmartEC με JADE

Για την υλοποίηση της εφαρμογής χρησιμοποιήθηκε Java συνδυαστικά με την πλατφόρμα JADE. Πιο συγκεκριμένα η ανάπτυξη έγινε με χρήση NetBeans IDE 8.2, JADE 4.4.0, JDK 8.

### 5.1 Περιγραφή

Η εφαρμογή αποτελείται από τον χρήστη, τις συσκευές και τον πάροχο. Ο πάροχος επικοινωνεί με τις έξυπνες συσκευές και αυτές με τη σειρά τους επικοινωνούν με τον χρήστη. Σε αυτό το MAS ο χρήστης δεν επικοινωνεί με τον πάροχο για την εύρεση της πιο ωφέλιμης τιμής και ώρας κατανάλωσης παρά μόνο με τις συσκευές.

#### 5.1.1 Τύποι πρακτόρων (Agent types)

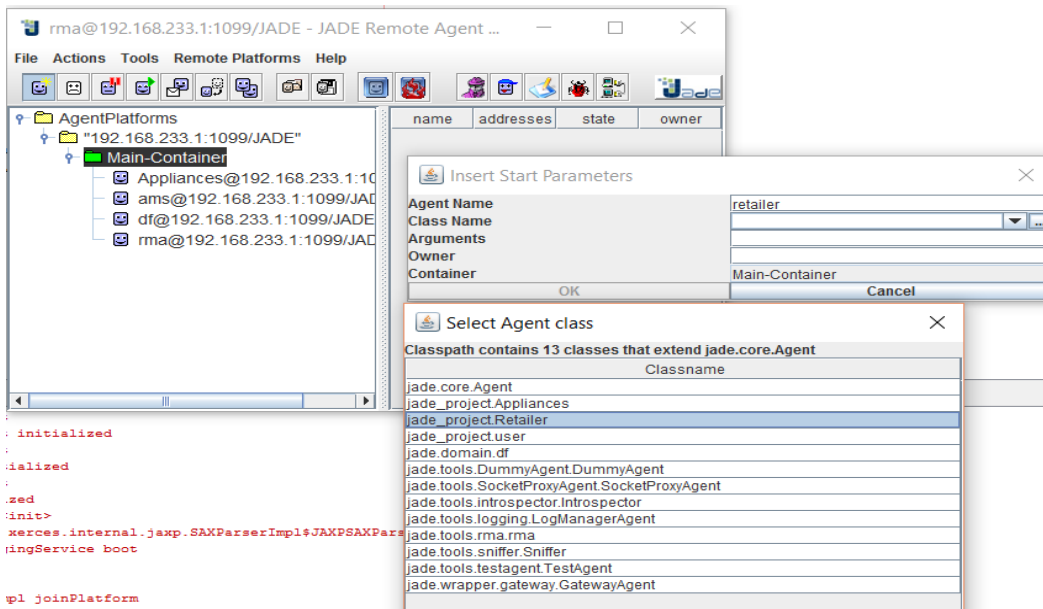
Υπάρχουν τρεις global τύποι πρακτόρων, ο agent Retailer, ο agent user και ο agent appliances. Κάθε τύπος πράκτορα αντιπροσωπεύει έναν συγκεκριμένο πράκτορα στο σύστημα.

Ο πράκτορας retailer τύπου Retailer είναι ο πάροχος της ηλεκτρικής ενέργειας που ακολουθώντας το DR μοντέλο κοστολογεί την ενέργεια και στέλνει την πληροφορία στις έξυπνες συσκευές.

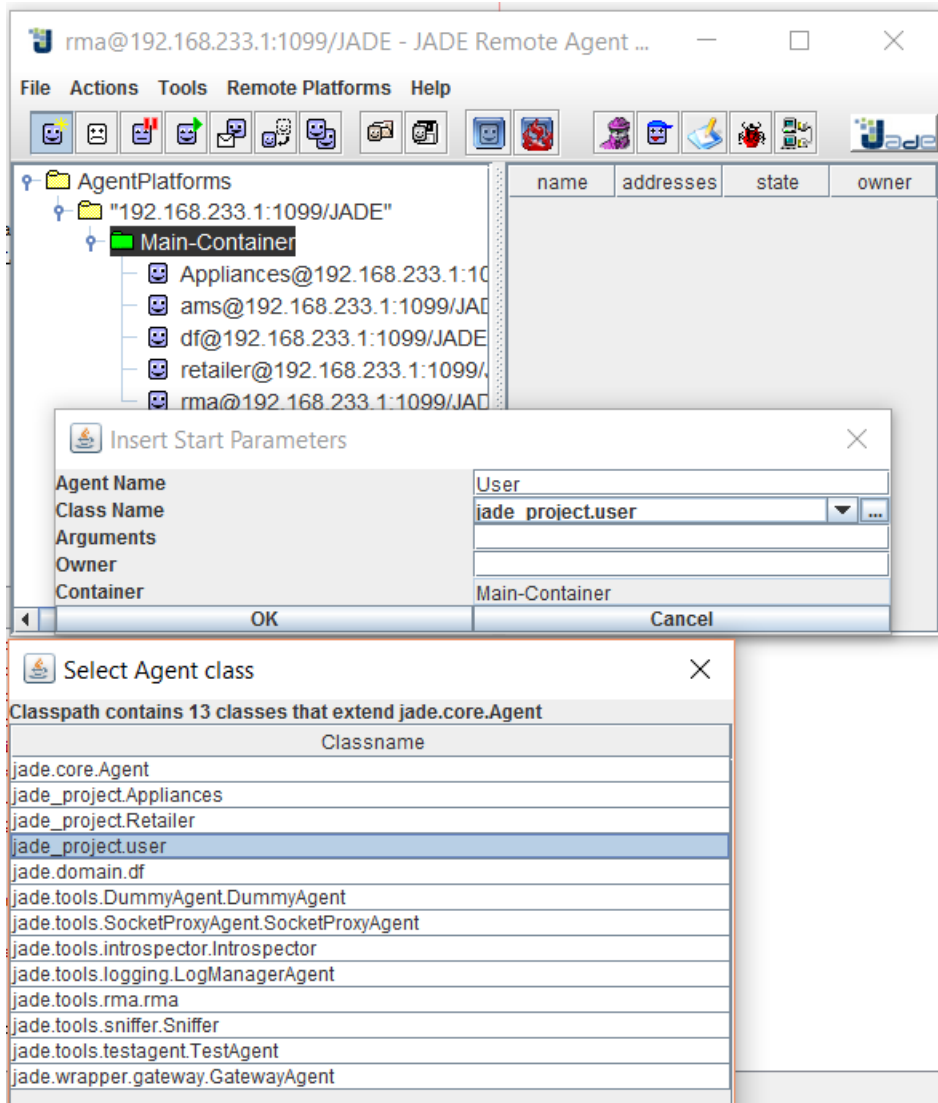
Ο πράκτορας User τύπου user είναι ο αγοραστής της ενέργειας του συστήματος καθώς αγοράζει ενέργεια από τον πάροχο (retailer).

Ο πράκτορας Appliances τύπου appliances αντιπροσωπεύει τις συσκευές που καταναλώνουν ενέργεια στην καλύτερη προσφορά μέσα στη μέρα.

Η προσομοίωση ξεκινά με την εκκίνηση ενός από κάθε τύπο πράκτορα και ο τρόπος δημιουργίας των πρακτόρων φαίνεται στα παρακάτω σχήματα.



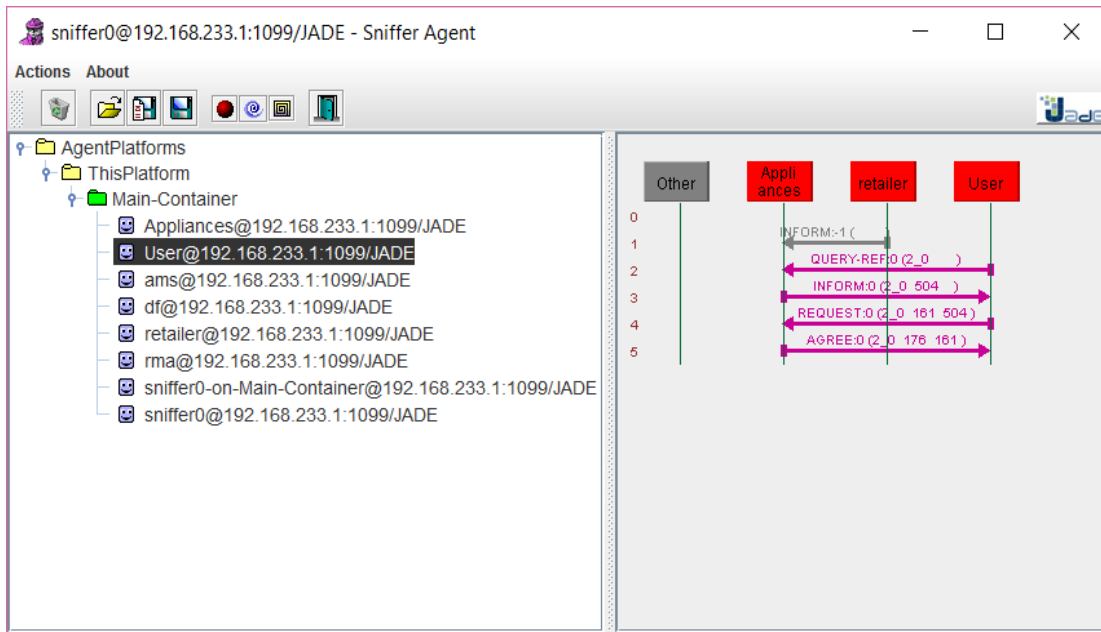
Εικόνα 14. Δημιουργία πράκτορα retailer τύπου Retailer.



Εικόνα 15. Δημιουργία πράκτορα User τύπου user.

### 5.1.2 Αλληλεπιδράσεις (Interactions)

Οι διάφοροι τύποι πρακτόρων που εξηγούνται στην προηγούμενη ενότητα αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μόλις ξεκινήσει το σύστημα. Η αλληλεπίδρασή τους φαίνεται στο σχήμα αφού κληθεί ο Sniffer Agent με την επιλογή Start Sniffer, που δείχνει τα μηνύματα και τις επιβεβαιώσεις τους μεταξύ των πρακτόρων.



Εικόνα 16. Αλληλεπιδράσεις των διαφορετικών τύπων πρακτόρων στο MAS.

### 5.1.3 Συμπεριφορά πρακτόρων (Agent behavior)

Οι πρώτοι πράκτορες που ξεκινούν είναι ο Appliances και στη συνέχεια ο Retailer. Ο Retailer αφού έχει την λίστα της ημερήσιας τιμολόγησης της ηλεκτρικής ενέργειας για κάθε ώρα της ημέρας ενημερώνει τον Appliances για τη χαμηλότερη τιμή της ημέρας. Αφού ξεκινήσει ο User βλέπει την καλύτερη τιμή, την ώρα και στέλνει (στον Appliances) στις συσκευές να αρχίσουν να λειτουργούν την συγκεκριμένη ώρα που προσφέρετε η χαμηλότερη τιμή. Ο πράκτορας Appliances συμφωνεί και οι συσκευές λειτουργούν. Ο User τελικά μπορεί να έχει πρόσβαση στον υπολογισμό της κατανάλωσης και του κόστους των συσκευών.

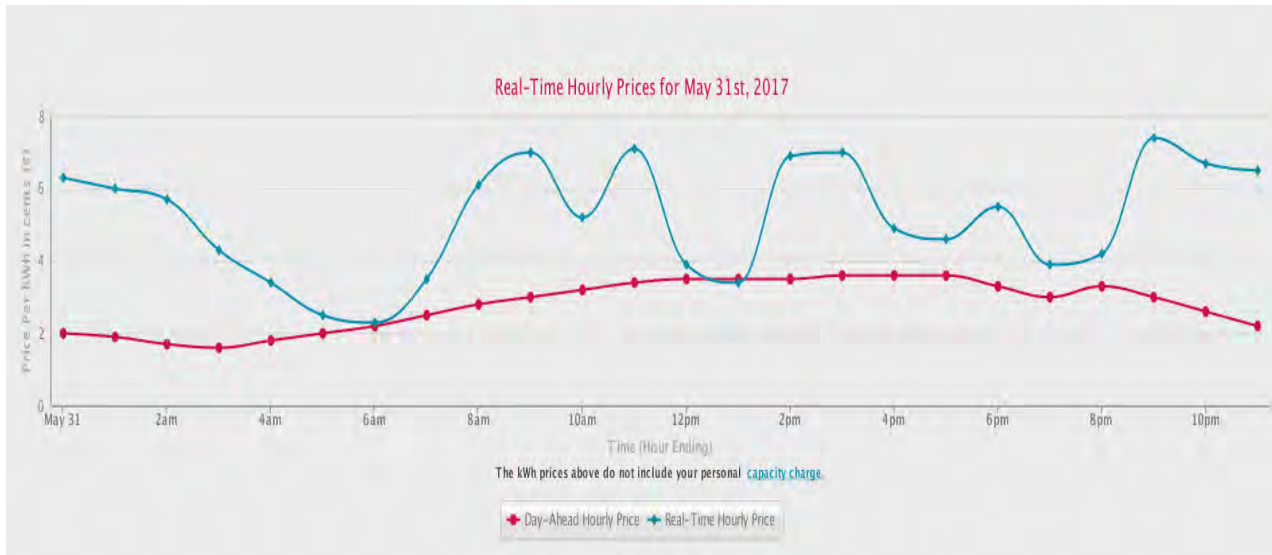
### 5.2 Σενάρια (case study)

Όπως περιγράφηκε παραπάνω, σκοπός της διπλωματικής είναι η εφαρμογή να βοηθήσει στην κατανόηση των πιθανών επιπτώσεων του έξυπνου δικτύου, το οποίο αποτελεί προϋπόθεση για την υλοποίησή του. Για να φανεί το πώς μπορεί να χρησιμοποιηθεί η εφαρμογή για το σκοπό αυτό έχουν δημιουργηθεί δύο μελέτες βασισμένες σε δύο διαφορετικές περιπτώσεις.

Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν προέρχονται από μια εταιρία [29], που δίνει το ωριαίο πρόγραμμα τιμολόγησης που ποικίλλει από ώρα σε ώρα ανάλογα τις καιρικές συνθήκες, τις συνθήκες της αγοράς και τις συνήθειες των καταναλωτών. Συνεπώς η εταιρεία λειτουργεί βάσει RTP μεθόδου τιμολόγησης.

## 5.2.1 Θερινή περίοδος

Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιούνται τα δεδομένα που ανακτήθηκαν από την ιστοσελίδα [29] της εταιρείας και φαίνονται στο σχήμα 16 και 17 για την 31<sup>η</sup> Μαΐου 2017.



Εικόνα 17. Δεδομένα τιμολόγησης που χρησιμοποιούνται [29].



Real-Time Prices (/pricing-table-today/)

Tomorrow's Prices (/pricing-table-tomorrow/)



*This table represents the Real-Time and Day-Ahead Hourly Prices for **May 31st, 2017.***

*All times are Central Time*

Time (Hour Ending)	Day-Ahead Hourly Price	Real-Time Hourly Price
12:00 AM	2.0¢	6.3¢
1:00 AM	1.9¢	6.0¢
2:00 AM	1.7¢	5.7¢
3:00 AM	1.6¢	4.3¢
4:00 AM	1.8¢	3.4¢
5:00 AM	2.0¢	2.5¢
6:00 AM	2.2¢	2.3¢
7:00 AM	2.5¢	3.5¢
8:00 AM	2.8¢	6.1¢
9:00 AM	3.0¢	7.0¢
10:00 AM	3.2¢	5.2¢
11:00 AM	3.4¢	7.1¢
12:00 PM	3.5¢	3.9¢

1:00 PM	3.5¢	3.4¢
2:00 PM	3.5¢	6.9¢
3:00 PM	3.6¢	7.0¢
4:00 PM	3.6¢	4.9¢
5:00 PM	3.6¢	4.6¢
6:00 PM	3.3¢	5.5¢
7:00 PM	3.0¢	3.9¢
8:00 PM	3.3¢	4.2¢
9:00 PM	3.0¢	7.4¢
10:00 PM	2.6¢	6.7¢
11:00 PM	2.2¢	6.5¢

Εικόνα 18. Δεδομένα τιμολόγησης που χρησιμοποιούνται σε μορφή πίνακα [29].

Τα φορτία που χρησιμοποιούνται για τη διεξαγωγή της εφαρμογής είναι το στεγνωτήριο, το πλυντήριο πιάτων και ο θερμοσίφωνας εφόσον αποτελούν συσκευές που καταναλώνουν μεγάλο ποσοστό ενέργειας σε ένα σπίτι [30]. Η κατανάλωσή τους είναι αντίστοιχα 3000 W, 1600 W και 4000 W. Υπολογίζεται πως η λειτουργία τους είναι μία ώρα για το στεγνωτήριο, το πλυντήριο πιάτων και μισή ώρα λειτουργίας για τον θερμοσίφωνα.

Η ενέργεια  $E$  σε κιλοβατώρες (kWh) ανά ημέρα ισούται με την ισχύ  $P$  σε W (W) επί τον αριθμό των ωρών χρήσης ανά ημέρα  $t$  διαιρούμενος με 1000 watt ανά κιλοβάτ με τύπο :

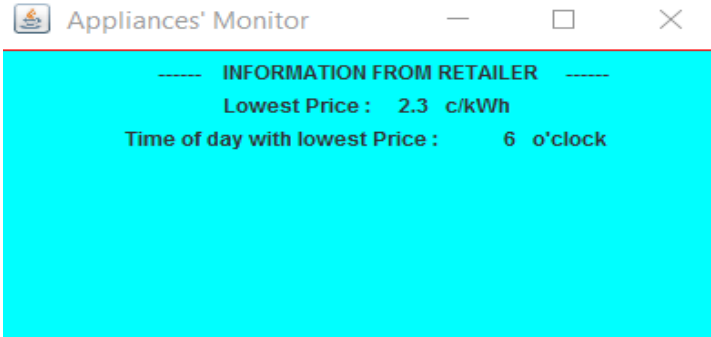
$E(\text{kWh}/\text{day}) = P(\text{W}) \times t(\text{h}/\text{day}) / 1000(\text{W}/\text{kW})$ , ενώ το ενεργειακό κόστος ανά ημέρα σε δολάρια είναι ίσο με την κατανάλωση ενέργειας  $E$  σε kWh ανά ημέρα με το κόστος ενέργειας 1 kWh σε σεντ / kWh διαιρούμενο κατά 100 σεντ ανά δολάριο:  $\text{Cost} (\$ / \text{day}) = E(\text{kWh}/\text{day}) \times \text{Cost}(\text{cent}/\text{kWh}) / 100(\text{cent}/ \$)$ . [31]

Για το σενάριο θερινής περιόδου με βελτιστοποίηση ο retailer στέλνει στις συσκευές (Appliances) την ώρα της χαμηλότερης προσφοράς της ηλεκτρικής ενέργειας για την 31<sup>η</sup> Μαΐου 2017 όπως φαίνεται παρακάτω. Στην Εικόνα 20 παρουσιάζεται το μήνυμα που εμφανίζεται στην οθόνη των έξυπνων συσκευών.

```
INFO: -----  
Agent container Main-Container@192.168.233.1 is ready.
```

```
-----  
Lowest Price: 2.3c/kWh at 6 o'clock  
retailer sends lowest price to appliances
```

Εικόνα 19. Output-Jade Project (run).



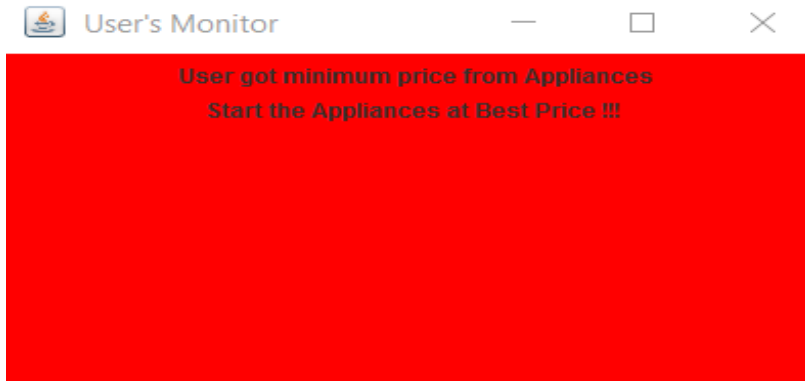
Εικόνα 20. Οθόνη (πράκτορα Appliances) συσκευών.

Εφόσον δημιουργηθεί και ο πράκτορας User, στέλνεται από τις συσκευές (τον πράκτορα Appliances) η καλύτερη προσφορά τιμής και ο χρήστης με τη σειρά του στέλνει στις συσκευές μήνυμα για να αρχίσουν να λειτουργούν. Στην Εικόνα 22 φαίνεται το μήνυμα στην οθόνη του χρήστη (User agent).

```
INFO: -----  
Agent container Main-Container@192.168.233.1 is ready.
```

```
-----  
Lowest Price: 2.3c/kWh at 6 o'clock  
retailer sends lowest price to appliances  
Agent User gets minimum price from Appliances.  
- Appliances <- QUERY to start operating at specific time and price User  
Got quote c2.3 from Appliances  
SWITCH APPLIANCES TO ON  
ORDER 62 == AGREE  
AGREE from Appliances to operate
```

Εικόνα 21. Output-Jade Project (run).



Εικόνα 22. Οθόνη χρήστη (agent User).

Οι συσκευές εφόσον στάλθηκε μήνυμα από τον χρήστη ξεκινούν να λειτουργούν όπως φαίνεται στην Εικόνα 23.



Εικόνα 23. Οθόνη συσκευών.

Εν κατακλείδι, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να δει στην οθόνη του την κατανάλωση των συσκευών του στην καλύτερη τιμή και το συνολικό τους κόστος κατανάλωσης όπως φαίνεται στην Εικόνα 25.

```

Calculate consumption and cost based on Best Price c2.3 from Appliances
-----
- dryerTCons: 3.0 (kWh/day) - dishwTCons: 1.0 (kWh/day) - wHeaterTCons: 2.0 (kWh/day)
- dryercost: 0.06899999999999999 ($/day) - dishwcost: 0.023 ($/day) - wHeatercost: 0.046 ($/day)
Total consumption: 6.0 (kWh/day) ----- Total cost: 0.138 ($/day)
-----!---- Finished ----!-----

```

Εικόνα 24. Output-Jade Project (run).

```

User's Monitor
-----
Calculate consumption and cost based on Best Price c : 2.3 using E(kWh/day) = P(W) * t(h/day) / 1000(W/KW)
dryer Consumption : 3.0 (kWh/day) __ dishwasher Consumption : 1.0 (kWh/day) __ water Heater Consumption : 2.0 (kWh/day)
--- TOTAL Consumption : 6.0 (kWh/day)
Cost($/day) = E(kWh/day) * Cost(cent/kWh) / 100(cent/$) --- TOTAL COST : 0.138 ($/day)

```

Εικόνα 25. Οθόνη χρήστη για best price.

Για το σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση, στην περίπτωση που επιλεχθεί η λειτουργία για παράδειγμα στη μέγιστη τιμή που προσφέρεται στις 9:00 PM της ημερομηνίας που ορίσαμε προηγουμένως, παρατηρούμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στην οθόνη του χρήστη στην Εικόνα 26.



Εικόνα 26. Οθόνη χρήστη για max price.

```
Calculate consumption and cost based on Max Price c 7.4 from Appliances
-----
- dryerTCons: 3.0(kWh/day) - dishwTCons: 1.0(kWh/day) - wHeaterTCons: 2.0(kWh/day)
- dryercost: 0.22200000000000003($/day) - dishWcost: 0.07400000000000001($/day) - wHeatercost: 0.14800000000000002($/day)
Total consumption: 6.0(kWh/day)----- Total cost: 0.44400000000000006($/day)
-----!---- Finished ----!-----
```

Εικόνα 27. Output-Jade Project (run).

## 5.2.2 Χειμερινή περίοδος

Για την 3η Ιανουαρίου 2017 οι τιμές που χρησιμοποιούνται δίνονται στην Εικόνα 28.

Real-Time Prices (/pricing-table-today/)

Tomorrow's Prices (/pricing-table-tomorrow/)

**ComEd** powering lives

*This table represents the Real-Time and Day-Ahead Hourly Prices for **January 3rd, 2017.***

*All times are Central Time*

Time (Hour Ending)	Day-Ahead Hourly Price	Real-Time Hourly Price
12:00 AM	2.3¢	2.4¢
1:00 AM	2.2¢	2.3¢
2:00 AM	2.1¢	2.3¢
3:00 AM	2.1¢	2.3¢
4:00 AM	2.1¢	2.4¢
5:00 AM	2.2¢	2.5¢
6:00 AM	3.0¢	3.0¢
7:00 AM	3.2¢	5.2¢
8:00 AM	3.2¢	3.9¢
9:00 AM	3.3¢	3.8¢
10:00 AM	3.5¢	3.8¢
11:00 AM	3.6¢	3.1¢
12:00 PM	3.2¢	3.7¢

1:00 PM	3.0¢	3.0¢
2:00 PM	2.8¢	2.5¢
3:00 PM	2.8¢	2.2¢
4:00 PM	3.0¢	2.1¢
5:00 PM	3.9¢	2.7¢
6:00 PM	3.9¢	3.1¢
7:00 PM	3.7¢	4.1¢
8:00 PM	3.1¢	2.9¢
9:00 PM	2.7¢	2.5¢
10:00 PM	2.5¢	2.4¢
11:00 PM	2.3¢	2.2¢

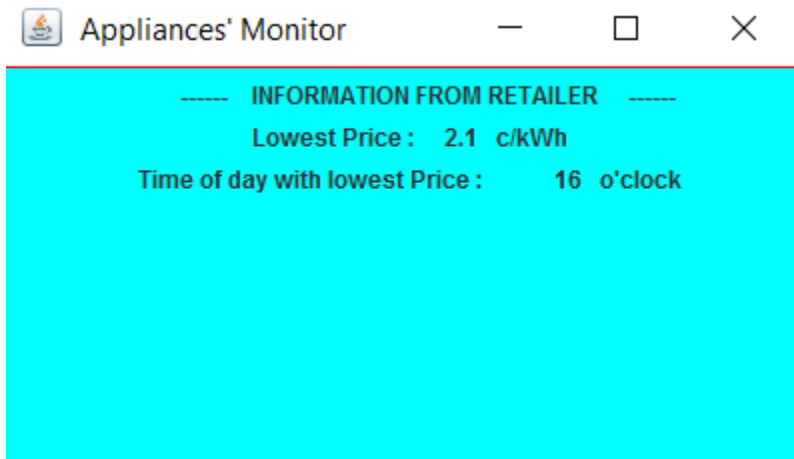
Εικόνα 28. Δεδομένα τιμολόγησης που χρησιμοποιούνται σε μορφή πίνακα (χειμερινή περίοδος) [29].

Για το σενάριο χειμερινής περιόδου με βελτιστοποίηση, αντίστοιχα με το παραπάνω παράδειγμα, η εφαρμογή βρίσκει την καλύτερη τιμή για κατανάλωση και τελικά υπολογίζει το κόστος και την κατανάλωση όπως φαίνεται στις παρακάτω εικόνες.

```
INFO: -----
Agent container Main-Container@192.168.233.1 is ready.
-----
Lowest Price: 2.1c/kWh at 16 o'clock
retailer sends lowest price to appliances
```

Εικόνα 29. Output-Jade Project (run).

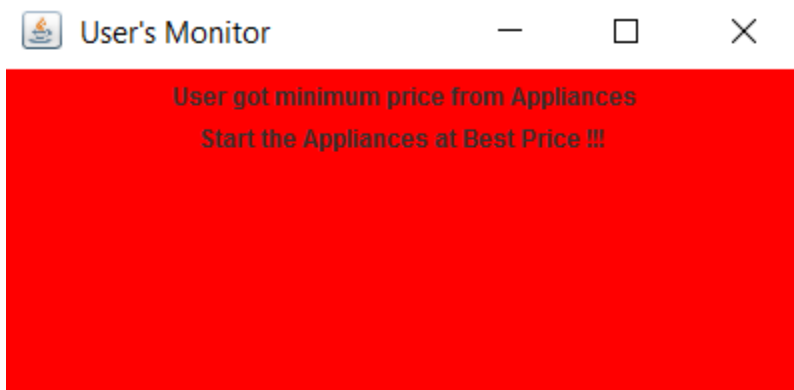




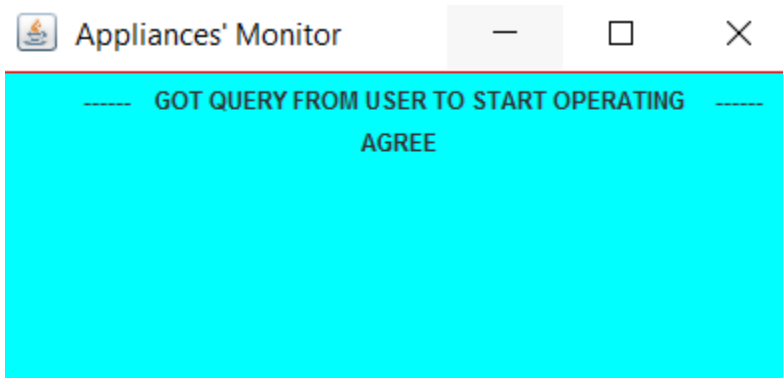
Εικόνα 30. Οθόνη συσκευών.

```
Agent container Main-Container@192.168.233.1 is ready.  
-----  
Lowest Price: 2.1c/kWh at 16 o'clock  
retailer sends lowest price to appliances  
Agent User gets minimum price from Appliances.  
- Appliances <- QUERY to start operating at specific time and price User  
Got quote c2.1 from Appliances  
SWITCH APPLIANCES TO ON  
ORDER 43 == AGREE  
AGREE from Appliances to operate
```

Εικόνα 31. Output-Jade Project (run).



Εικόνα 32. Οθόνη χρήστη (agent User).



Εικόνα 33. Οθόνη συσκευών.

```
Calculate consumption and cost based on Best Price c2.1 from Appliances
-----
- dryerTCons: 3.0(kWh/day) - dishwTCons: 1.0(kWh/day) - wHeaterTCons: 2.0(kWh/day)
- dryercost: 0.063($/day) - dishWcost: 0.021($/day) - wHeatercost: 0.042($/day)
Total consumption: 6.0(kWh/day)----- Total cost: 0.126($/day)
-----!----- Finished -----!-----
```

Εικόνα 34. Output-Jade Project (run).



Εικόνα 35 . Οθόνη χρήστη για best price.

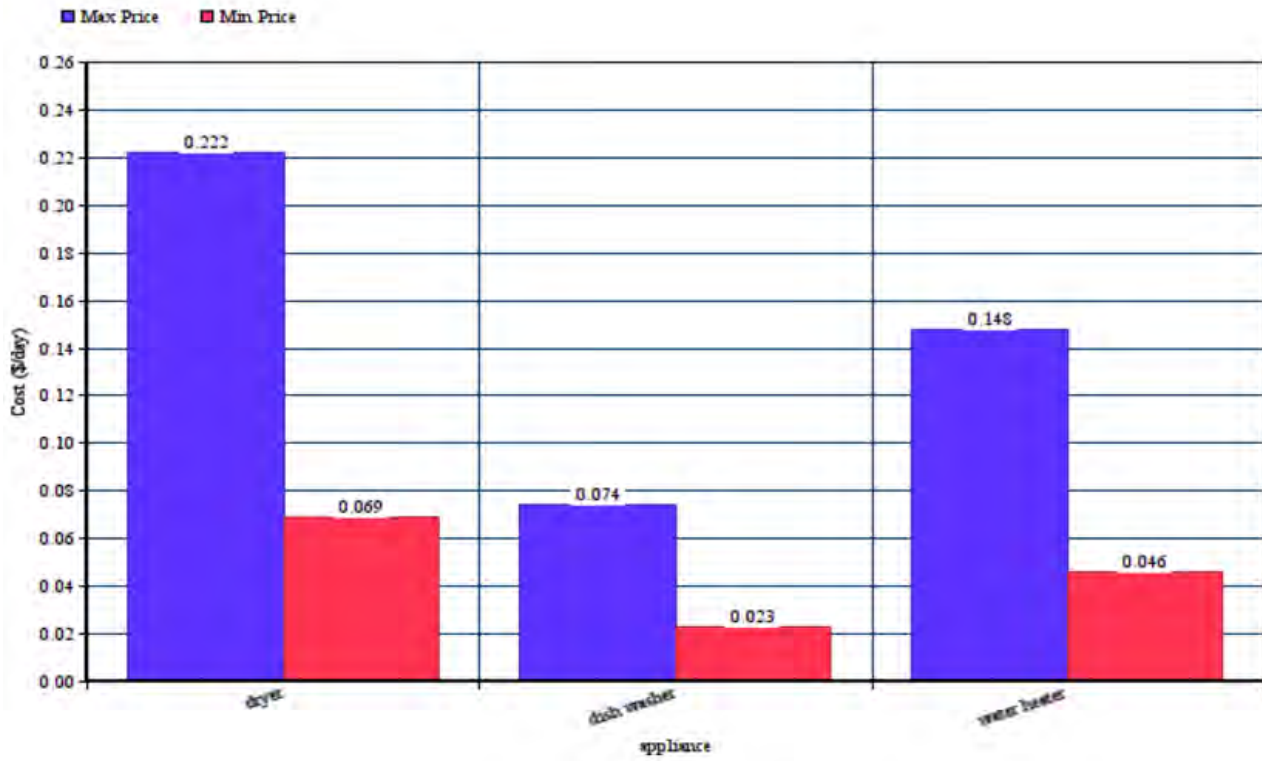
Για το σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση, στην περίπτωση που επιλεγθεί η λειτουργία για παράδειγμα στη μέγιστη τιμή που προσφέρεται στις 7:00 AM της ημερομηνίας που ορίσαμε προηγουμένως για τη χειμερινή περίοδο, παρατηρούμε τα αποτελέσματα που φαίνονται στην οθόνη του χρήστη στην Εικόνα 36.



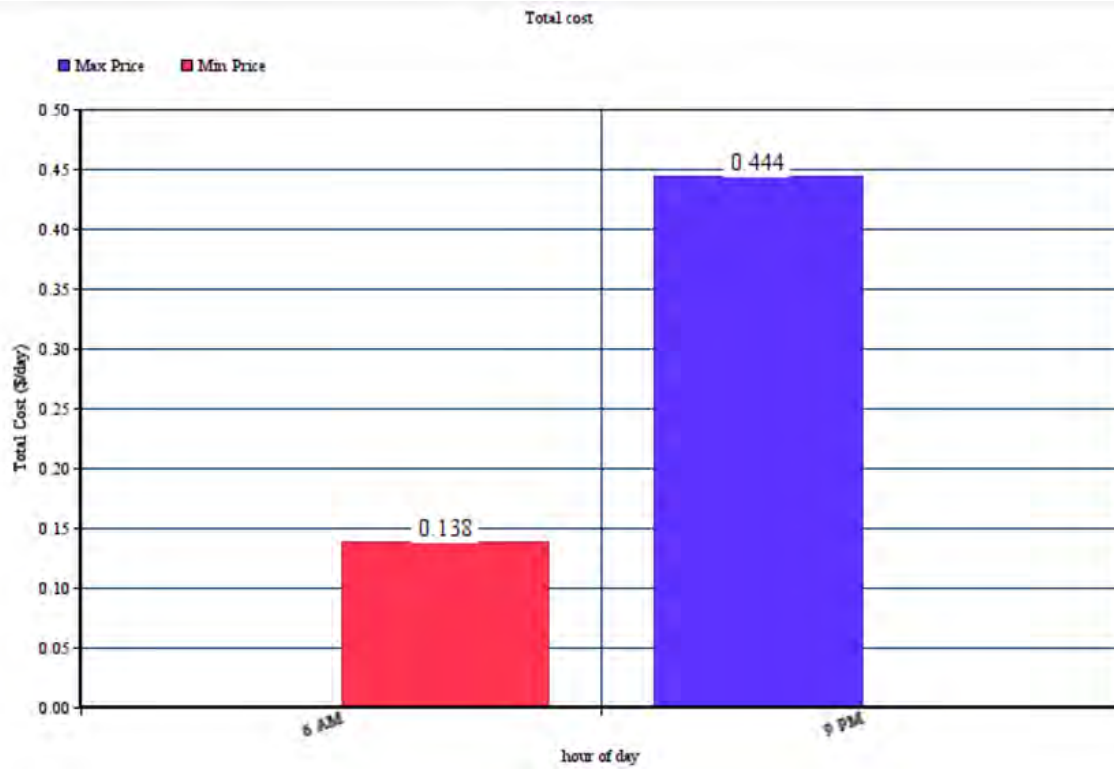
Εικόνα 36. Οθόνη χρήστη για max price.

### 5.3 Εκτιμήσεις – Απλουστεύσεις

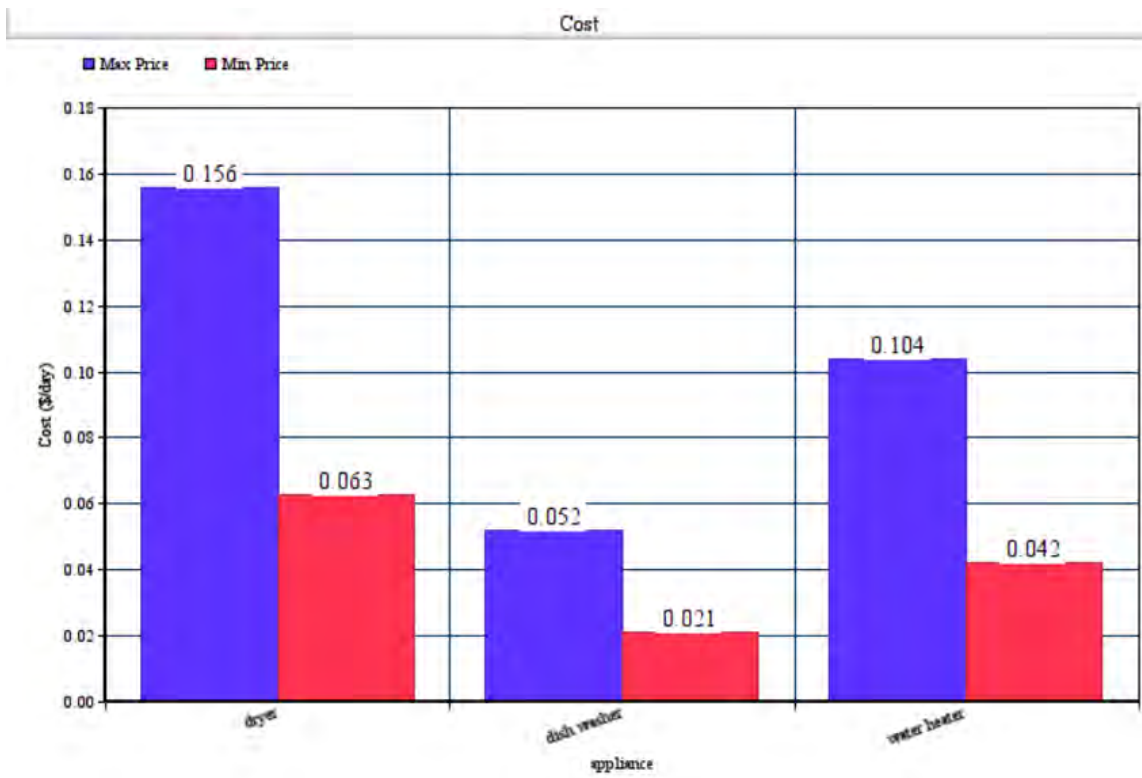
Στο σενάριο χωρίς βελτιστοποίηση τα φορτία του σπιτιού είναι τα ίδια όπως και στο σενάριο με βελτιστοποίηση. Το χρονικό παράθυρο μέσα στο οποίο μπορεί να μπαίνει κάθε φορτίο για να ισχύει η ίδια τιμή είναι μία ώρα και στις δύο περιπτώσεις. Παρακάτω φαίνονται οι διαφορές στην τιμή που κοστίζει κάθε συσκευή στο έξυπνο σπίτι για μέγιστη και ελάχιστη τιμή, καθώς και το συνολικό κόστος κατανάλωσης των συσκευών για μέγιστη και ελάχιστη τιμή μέσα στη μέρα.



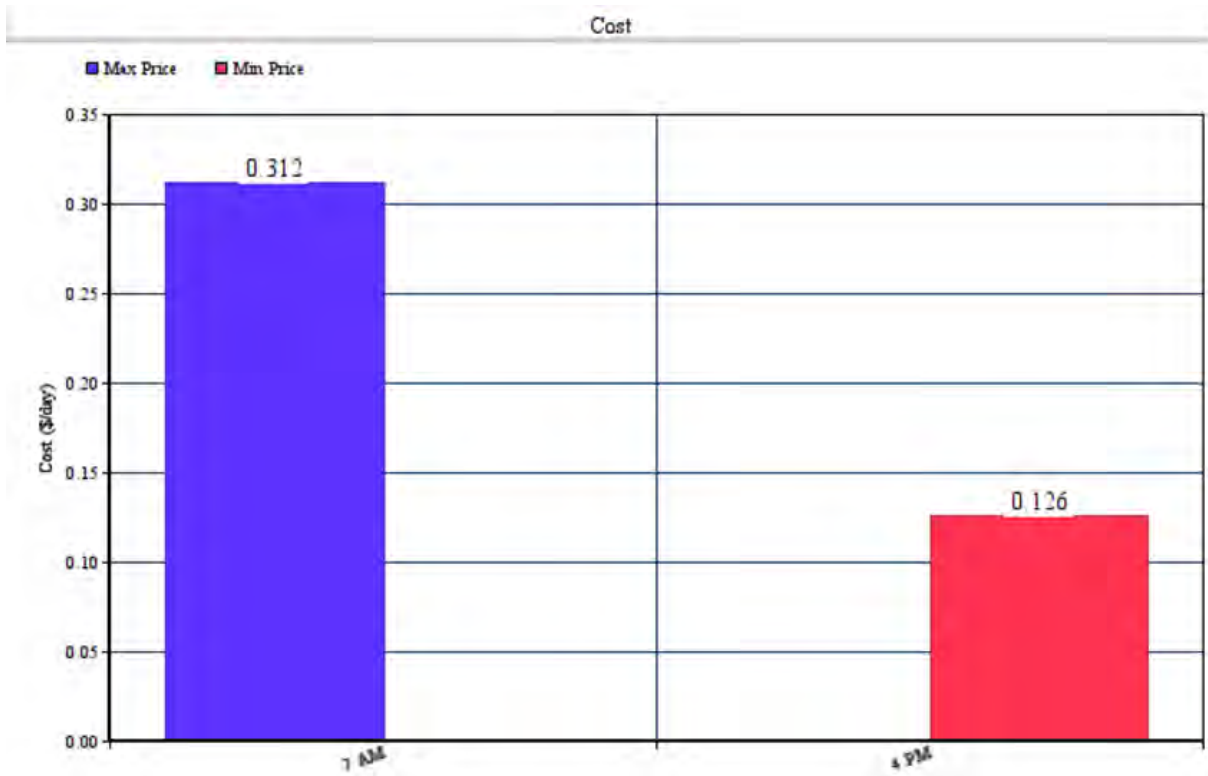
Εικόνα 37. Κόστος κατανάλωσης κάθε συσκευής μέσα στη μέρα για μέγιστη και ελάχιστη τιμή (θερινή περίοδος).



Εικόνα 38. Συνολικό κόστος κατανάλωσης συσκευών για μέγιστη και ελάχιστη τιμή μέσα στη μέρα (θερινή περίοδος).



Εικόνα 39. Κόστος κατανάλωσης κάθε συσκευής μέσα στη μέρα για μέγιστη και ελάχιστη τιμή (χειμερινή περίοδος).



Εικόνα 40. Συνολικό κόστος κατανάλωσης συσκευών για μέγιστη και ελάχιστη τιμή μέσα στη μέρα (χειμερινή περίοδος).

Από τα διαγράμματα είναι εμφανής η σημαντική διαφορά του κόστους κατανάλωσης των συσκευών που αναφέρονται για τα δύο διαφορετικά σενάρια. Εύκολα παρατηρεί κανείς πως σε μεγαλύτερη κλίμακα με περισσότερες συσκευές και με την ενσωμάτωση των σταθερών φορτίων η συνολική απόκλιση του συνολικού κόστους θα ήταν αρκετά μεγάλη όπως και η επίδραση στο φορτίο του δικτύου.

Οι παραδοχές – απλουστεύσεις που έγιναν στα πλαίσια της διπλωματικής κατά την υλοποίηση είναι αρχικά ότι δεν ξεπερνιούνται τα όρια ισχύος με την ταυτόχρονη λειτουργία των συσκευών που σε αντίθετη περίπτωση λόγω υπερφόρτωσης γραμμών και μετασχηματιστών θα επέφεραν αντίθετα αποτελέσματα. Εκτός αυτού, ισχύει η παραδοχή ότι ο χρήστης δέχεται και συναινεί στην ευελιξία του προγράμματος και δεν δυσαρεστείται από το πολυποίκιλο ωράριο. Επίσης, οι τιμές της ηλεκτρικής ενέργειας επιστρέφονται στις έξυπνες ηλεκτρικές συσκευές και όχι σε κάποιον ελεγκτή που θα έπαιρνε αποφάσεις βάση των δυναμικών τιμών που θα έστελνε ένας έξυπνος μετρητής και απαιτεί τη σχεδίαση νευρωνικών δικτύων. Οι τιμές που χρησιμοποιούνται είναι οι πραγματικού χρόνου (Real Time Hourly Price) και η εργασία δεν επικεντρώνεται στις προβλέψεις φορτίου και της τοπικής παραγωγής.

## 6 Συμπεράσματα - Μελλοντικές Προοπτικές

### 6.1 Συμπεράσματα

Με την παραπάνω μελέτη γίνεται κατανοητό ότι ένα έξυπνο σπίτι για να λειτουργήσει οφείλει να έχει ένα έξυπνο δίκτυο από έξυπνες μονάδες, καθώς και μία λειτουργική υποδομή ενεργειακού αυτοματισμού.

Το γεγονός της ενημέρωσης ενός χρήστη που συμμετέχει σε ένα DR πρόγραμμα, για το συνολικό κόστος που χρεώνεται έχει ως αποτέλεσμα την υιοθέτηση ωφέλιμων συνηθειών τόσο για τον ίδιο όσο και για το δίκτυο. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής τεχνολογιών και πρωτοβουλιών για έξυπνα δίκτυα σε ένα σπίτι, όπως η μετατόπιση της κατανάλωσης ενέργειας με βάση τις διακυμάνσεις των τιμών της ενέργειας, βοηθά στην επίτευξη της κάλυψης ενός συγκεκριμένου ποσοστού της παραγωγής, χωρίς σπατάλη ή ανεπάρκεια ενέργειας. Εντούτοις, για την εμφανέστερη επίδραση της εφαρμογής αυτών των προγραμμάτων πρέπει να υπάρχει κλιμάκωση για την συμμετοχή πολλών έξυπνων σπιτιών.

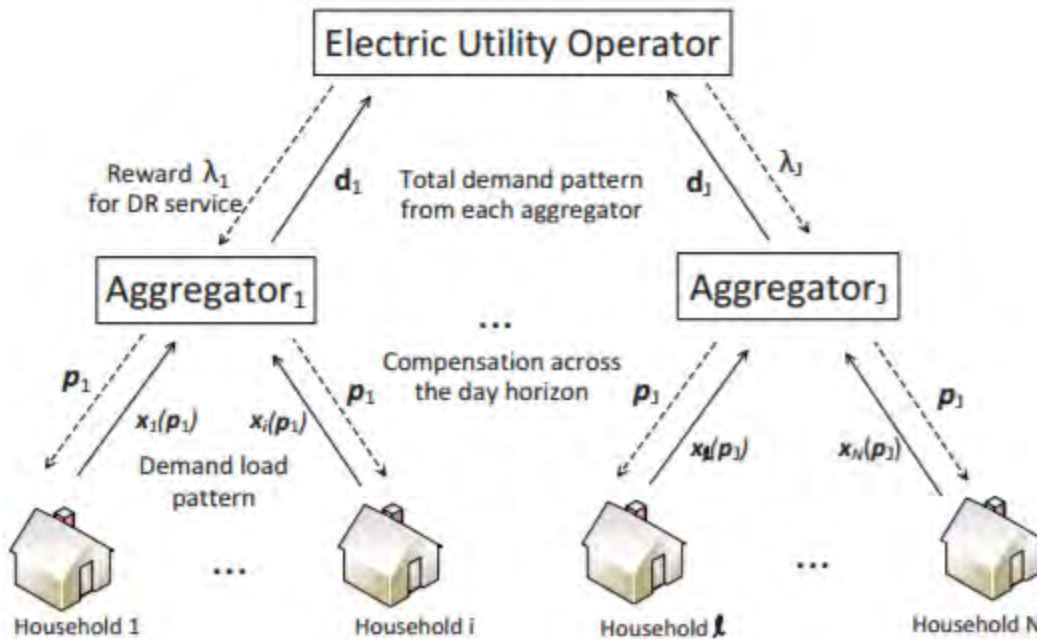
Η σχεδίαση του συστήματος που περιγράφεται χρειάζεται περαιτέρω εξέταση καθώς απαιτεί ειδικευμένη μελέτη όσον αφορά τους αυτοματισμούς και στο τηλεπικοινωνιακό υπόβαθρο για να λειτουργήσει αποτελεσματικά ένα έξυπνο πρόγραμμα κατανάλωσης σε ένα έξυπνο σπίτι, αλλά προκειμένου να πληρούνται όλες οι προδιαγραφές υλοποίησης θα πρέπει να επέλθει αναβάθμιση τόσο των οικιακών συσκευών όσο και του Συστήματος Ηλεκτρικής Ενέργειας(ΣΗΕ) και της αγοράς του.

### 6.2 Επεκτασιμότητα

Το υφιστάμενο δίκτυο της αγοράς ενέργειας είναι αρκετά μονοπωλιακό με αποτέλεσμα η ανταγωνιστικότητα στον τομέα να είναι πολύ μικρή, γεγονός που προδίδει πως η εφαρμογή προγραμμάτων για συμμετοχή των καταναλωτών σε προγράμματα διαχείρισης ζήτησης – απόκρισης είναι εφικτή μόνο στην περίπτωση που γίνουν αλλαγές στην τρέχουσα αγορά ενέργειας. Υπάρχει ανάγκη για μια πιο απελευθερωμένη αγορά που θα έχει τη δυνατότητα να εισάγει καινοτόμες τεχνολογίες στη λειτουργία της.

Ο μόνος τρόπος για να πλησιάσει κανείς ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο είναι η προσομοίωση με MAS που προσφέρει την αυτονομία και την μοντελοποίηση συμπεριφοράς που απαιτεί ένα τέτοιο σύστημα. Για να προσομοιώνει ένα πιο ρεαλιστικό μοντέλο η εφαρμογή που υλοποιήθηκε, θα μπορούσε να δημιουργηθεί μια ξεχωριστή οντότητα ελεγκτή που θα συλλέγει πληροφορίες για τις συνήθειες κατανάλωσης του κάθε χρήστη και θα ελέγχει το ισοζύγιο ισχύος ώστε να εντάξει τα φορτία σε ένα πρόγραμμα λειτουργίας. Επίσης, σημαντική θα ήταν η προσθήκη μιας ενδιάμεσης οντότητας data aggregator που μπορεί να διαπραγματευτεί αποτελεσματικότερα, για λογαριασμό των οικιακών χρηστών, με τον φορέα διαχειριστή και να στέλνει πληροφορίες συμμετέχοντας στο RTP όπως φαίνεται στην Εικόνα 41. [32]





Εικόνα 41. Στο χαμηλότερο επίπεδο, οι χρήστες τροποποιούν το μοντέλο της ζήτησης ανάλογα τις ανακοινώσεις του aggregator, στο μεσαίο ο aggregator καθορίζει την πιο ωφέλιμη στρατηγική λειτουργίας, στο ανώτερο επίπεδο ο διαχειριστής υπολογίζει την ανταμοιβή ανά μονάδα μείωσης του κόστους για κάθε aggregator ώστε να ελαχιστοποιεί το λειτουργικό του κόστος [32].

Επιπροσθέτως, η εφαρμογή θα μπορούσε να επεκταθεί με την προσθήκη περισσότερων συσκευών, συμπεριλαμβανομένων και των μη ελεγχόμενων σταθερών φορτίων ώστε η απόκλιση στο κόστος και γενικότερα η αποτελεσματικότητα διαφορετικών έξυπνων μεθόδων στην διαχείριση της κατανάλωσης να είναι περισσότερο αισθητή.

## Bibliography

- [1] V. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati and e. al., "A survey on smart grid potential applications and communication requirements," *IEEE Trans Industr Inf*, vol. 9, no. 1, pp. 28-42, (2013).
- [2] M. Mynderup and H. Nysteen, "A Smart Home Simulation Tool," Technical University of Denmark, Denmark, 2012.
- [3] M. Anzar, J. Nadeem and R. Sohail, "A review of wireless communications for smart grid," *ELSEVIER*, vol. 41, no. Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 248-260, 2015.
- [4] Energy, Reliability, Office, of, Electricity and Delivery, "Smart Grid Research & Development," U.S. Department of Energy, 2010.
- [5] C. L. Strategic, "THE SMART GRID : AN INTRODUCTION," U.S. Department of Energy.
- [6] D. COOKE, "EMPOWERING CUSTOMER CHOICE IN ELECTRICITY MARKETS," International Energy Agency, 2011.
- [7] W. Lee, S. Cho, P. Chu, H. Vu, S. Helal and W. Song, "AutomaticagentgenerationforIoT-basedsmarthousesimulator," *ELSEVIER*, vol. 209, no. Neurocomputing, pp. 14-24, 2016.
- [8] "A review of Internet of Things for smart home: Challenges and solutions," *ELSEVIER*, Vols. Volume 140, Part 3, no. Journal of Cleaner Production, p. 1454–1464, 2017.
- [9] H.-J. Yima, D. Seoa, H. Jung, M.-K. Back, I. Kim and K.-C. Lee, "Description and classification for facilitating interoperability of heterogeneous data/events/services in the Internet of Things," *ELSEVIER*, vol. 256, no. Neurocomputing, p. Pages 13–22, 2017.
- [10] S. Islam and Z. Huq, "HOME AREA NETWORK TECHNOLOGY ASSESSMENT FOR DEMAND RESPONSE IN SMART GRID ENVIRONMENT," Curtin University of Technology, Perth.
- [11] W. W. Hogan, "ON AN "ENERGY ONLY" ELECTRICITY MARKET DESIGN FOR RESOURCE ADEQUACY," Harvard University , Massachusetts, 2005 .

- [12] Y. Yoldaş, A. Önen, S. Muyeen, A. V. Vasilakos and İ. Alan, "Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities," *ELSEVIER*, vol. 72, no. Renewable and Sustainable Energy Reviews, pp. 205-214, 2017.
- [13] A. Soares, Á. Gomes and C. H. Antunes, "Categorization of residential electricity consumption as a basis for the assessment of the impacts of demand response actions," *ELSEVIER*, vol. 30, no. Renewable and Sustainable Energy Reviews, p. 490–503, 2014.
- [14] A. M. Carreiroa, H. M. Jorgea and C. H. Antunes, "Energy management systems aggregators: A literature survey," *ELSEVIER*, vol. 73, no. Renewable and Sustainable Energy Reviews, p. 1160–1172, 2017.
- [15] D. Srinivasan, S. Rajgarhia, B. M. Radhakrishnan, A. Sharma and H. Khinchab, "Game-Theory based dynamic pricing strategies for demand side management in smart grids," *ELSEVIER*, vol. 126, no. Energy, p. 132–143, 2017.
- [16] C. Cecati, C. Citro and a. P. Siano, "Combined Operations of Renewable Energy Systems and Responsive Demand in a Smart Grid," *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 2, pp. 468 - 476, November 2011.
- [17] S. H. Hong, M. Yu and X. Huang, "A real-time demand response algorithm for heterogeneous devices in buildings and homes," *ELSEVIER*, vol. 80, no. Energy, pp. 123-132, 2015.
- [18] G. Gallo, "Electricity market games: How agent-based modeling can help under high penetrations of variable generation," *The Electricity Journal*, vol. 29, no. 2, pp. 39-46, 2016.
- [19] I. f. S. Sciences, Innovation and S. R. a. t. U. o. Graz, "Equation-based versus agent-based modeling," [Online]. Available: [http://systems-sciences.uni-graz.at/etextbook/sysmod/ebm\\_vs\\_abm.html](http://systems-sciences.uni-graz.at/etextbook/sysmod/ebm_vs_abm.html).
- [20] M. Mogliaa, S. Cooka and J. McGregor, "A review of Agent-Based Modelling of technology diffusion with special reference to residential energy efficiency," *ELSEVIER*, vol. 31, no. Sustainable Cities and Society, p. 173–182, 2017.
- [21] Q. Sun, W. Yu, N. Kochurov, Q. Hao and a. F. Hu, "A Multi-Agent-Based Intelligent Sensor and Actuator Network Design for Smart House and Home Automation," *JSAN*, vol. 2, no. 3, pp. 557-588, 2013.

- [22] M. Koster, "Reliable Multi-agent System for a large scale distributed energy trading network," Faculty of Mathematics and Natural sciences, Groningen, 2010/2011.
- [23] F. Bellifemine, G. Caire, A. Poggi and G. Rimassa, "JADE: A software framework for developing multi-agent applications. Lessons learned," *ELSEVIER*, vol. 50, no. Information and Software Technology, p. 10–21, 2008.
- [24] G. Caire, "Jade," 30 June 2009. [Online]. Available: <http://jade.tilab.com/doc/tutorials/JADEProgramming-Tutorial-for-beginners.pdf>.
- [25] A. V. Sanditaa and C. I. Popirlan, "Developing A Multi-Agent System in JADE for Information Management in Educational Competence Domains," *ELSEVIER*, vol. 23, no. Procedia Economics and Finance , p. 478 – 486, 2015.
- [26] A. Chrysopoulos, C. Diou, A. Symeonidis and P. Mitkas, "Bottom-up modeling of small-scale energy consumers for effective Demand Response Applications," *ELSEVIER*, vol. 35, no. Engineering Applications of Artificial Intelligence, p. 299–315, 2014.
- [27] J. E. Rubio, C. Alcaraz and J. Lopez, "Recommender system for privacy-preserving solutions in smart metering," *ELSEVIER*, no. Pervasive and Mobile Computing, 2017.
- [28] F. Beligianni, M. Alamaniotis, A. Fevgas, P. Tsompanopoulou, P. Bozanis and L. H. Tsoukalas2, "AN INTERNET OF THINGS ARCHITECTURE FOR PRESERVING PRIVACY OF ENERGY CONSUMPTION," 2016.
- [29] "ComEd," Exelon, 2017. [Online]. Available: <https://hourlypricing.comed.com/live-prices/>.
- [30] J. DESJARDINS, "VISUAL CAPITALIST," 14 November 2016. [Online]. Available: <http://www.visualcapitalist.com/what-uses-the-most-energy-home/>.
- [31] "RapidTables," [Online]. Available: <http://www.rapidtables.com/calc/electric/energy-consumption-calculator.htm>. [Accessed 2017].
- [32] L. Gkatzikis, I. Koutsopoulos and T. Salonidis, "The Role of Aggregators in Smart Grid Demand Response Markets," [Online]. Available: <http://www.cs.aueb.gr/~jordan/PAPERS/JSAC-2013.pdf>. [Accessed 2017].

