



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

## Εφαρμογές της Θεωρίας Παιγνίων στα Μικροδίκτυα

Διπλωματική Εργασία

του

ΠΕΤΡΟΥ Χ. ΑΡΙΣΤΕΙΔΟΥ

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010





Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

## Εφαρμογές της Θεωρίας Παιγνίων στα Μικροδίκτυα

### Διπλωματική Εργασία

του

**ΠΕΤΡΟΥ Χ. ΑΡΙΣΤΕΙΔΟΥ**

**Επιβλέπων:** Νικόλαος Χατζηαργυρίου  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Εγκρίθηκε από την τριμελή εξεταστική επιτροπή την 5η Ιουλίου 2010.

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

(Υπογραφή)

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

.....  
Κωνσταντίνος Βουρνάς  
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

.....  
Σταυρούλα Καβατζά  
Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2010

*(Υπογραφή)*

.....  
**Πέτρος Χ. Αριστείδου**

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

© 2010 – All rights reserved



Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο  
Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών  
Τομέας Ηλεκτρικής Ισχύος

Copyright ©–All rights reserved Πέτρος Χ. Αριστείδου, 2010.  
Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

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



# Περίληψη

Η Θεωρία Παιγνίων είναι ένας κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών που χρησιμοποιείται, κυρίως, στα οικονομικά καθώς επίσης και σε άλλους κλάδους. Η Θεωρία Παιγνίων επιχειρεί να περιγράψει μαθηματικά συμπεριφορές σε στρατηγικές καταστάσεις, στις οποίες η επιτυχία ενός ατόμου στις επιλογές του βασίζεται στις επιλογές άλλων ατόμων. Τα Μικροδίκτυα είναι μοντέλα διαμόρφωσης του δικτύου χαμηλής τάσης που περιλαμβάνουν ένα ενιαίο σύνολο φορτίων και διεσπαρμένης παραγωγής. Με τη βοήθεια νέων τεχνολογιών γίνεται διαχείριση των φορτίων και της παραγωγής στο Μικροδίκτυο. Σε αυτό το κείμενο παρουσιάζουμε δυο πιθανά μοντέλα λειτουργίας του Μικροδικτύου και προσπαθούμε να τα αναλύσουμε χρησιμοποιώντας μεθόδους Θεωρίας Παιγνίων. Για αυτό το λόγο, μετασχηματίζουμε τα μοντέλα αυτά σε τυπικά παιχνίδια της Θεωρίας Παιγνίων και ερευνούμε τους *παίκτες*, τους *στόχους* τους, τις *στρατηγικές*, τα *κέρδη*, καθώς επίσης και την ύπαρξη σημείων ισορροπίας σε αυτά.

## Λέξεις Κλειδιά

Μικροδίκτυο, έξυπνα δίκτυα, Θεωρία Παιγνίων, διαχείριση φορτίου





# Abstract

Game theory is a branch of applied mathematics that is, most notably, used in economics as well as in engineering and other disciplines. Game theory attempts to mathematically capture behaviour in strategic situations, in which an individual's success in making choices depends on the choices of others. Microgrids introduce the coexistence of low voltage loads and distributed generation in a unified model. With the help of new technologies one can deploy generation management and demand dispatch techniques within the Microgrid. We introduce a possible model of operation for Microgrids with two variations and try to analyse them using Game Theory Methods. In this direction, we transform these models into formal games and investigate the *players*, their *objectives*, their *strategies* and their *revenues*, as well as, the existence of equilibrium points for a general class of games with application on the Microgrid model.

## Keywords

Microgrid, smart grid, Game Theory, demand dispatch, price responsive load



# Περιεχόμενα

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Περίληψη                                                                         | 1  |
| Abstract                                                                         | 3  |
| Περιεχόμενα                                                                      | 7  |
| Κατάλογος σχημάτων                                                               | 10 |
| Κατάλογος πινάκων                                                                | 11 |
| 1 Πρόλογος                                                                       | 13 |
| 2 Μικροδίκτυα                                                                    | 17 |
| 2.1 Περιγραφή Μικροδικτύων . . . . .                                             | 17 |
| 2.2 Λόγοι για την Ανάπτυξη Μικροδικτύων . . . . .                                | 20 |
| 2.3 Διαχείριση και έλεγχος Μικροδικτύου . . . . .                                | 21 |
| 2.3.1 Κεντρικός Έλεγχος . . . . .                                                | 22 |
| 2.3.2 Διεσπαρμένος Έλεγχος . . . . .                                             | 22 |
| 2.3.3 Διαφορές . . . . .                                                         | 23 |
| 3 Θεωρία Παιγνίων                                                                | 25 |
| 3.1 Ανταγωνιστική Θεωρία και Θεωρία Συνεργασίας . . . . .                        | 25 |
| 3.2 Ανάλυση των παιχνιδιών . . . . .                                             | 26 |
| 3.2.1 Περιγραφικός Ρόλος . . . . .                                               | 26 |
| 3.2.2 Καθοδηγητικός Ρόλος . . . . .                                              | 26 |
| 3.2.3 Μορφές αναπαράστασης παιχνιδιών . . . . .                                  | 26 |
| 3.3 Είδη παιχνιδιών Θεωρίας Παιγνίων . . . . .                                   | 29 |
| 3.4 Η Θεωρία Παιγνίων στα Οικονομικά . . . . .                                   | 32 |
| 3.5 Θεωρία Παιγνίων στην Ηλεκτρική Ενεργεία . . . . .                            | 32 |
| 4 Λειτουργία Μικροδικτύου                                                        | 35 |
| 4.1 DNO . . . . .                                                                | 37 |
| 4.2 Καταναλωτές . . . . .                                                        | 37 |
| 4.2.1 Μεταβαλλόμενη τιμή αγοράς και χρήση Τοπικών Ελεγκτών . . . . .             | 38 |
| 4.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή (DER/DG) . . . . .                                      | 38 |
| 4.3.1 Τοπικός Ελεγκτής και μεταβλητή τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας . . . . . | 39 |
| 4.4 ESCO/Aggregator . . . . .                                                    | 39 |
| 4.4.1 Πρόβλεψη φορτίων και Διεσπαρμένης Παραγωγής . . . . .                      | 42 |
| 4.4.2 Συμμετοχή στις αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας . . . . .                       | 42 |

|          |                                                                                                               |           |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.4.3    | Ελαστικότητα φορτίων και διαχείριση διεσπαρμένης παραγωγής με χρήση τοπικών ελεγκτών . . . . .                | 50        |
| <b>5</b> | <b>Ανάλυση Μοντελών</b>                                                                                       | <b>51</b> |
| 5.1      | Περιγραφή . . . . .                                                                                           | 51        |
| 5.2      | Παίκτες . . . . .                                                                                             | 52        |
| 5.3      | Στόχοι . . . . .                                                                                              | 52        |
| 5.4      | Στρατηγικές . . . . .                                                                                         | 52        |
| 5.5      | Συναρτήσεις Κέρδους . . . . .                                                                                 | 53        |
| 5.6      | Μέθοδος μελέτης και επίλυσης παιχνιδιού . . . . .                                                             | 54        |
| 5.6.1    | Εκτεταμένη Μορφή . . . . .                                                                                    | 54        |
| 5.6.2    | Σημείο Ισορροπίας Nash . . . . .                                                                              | 54        |
| 5.6.3    | Subgame Perfect Σημείο Ισορροπίας Nash . . . . .                                                              | 55        |
| 5.6.4    | Προς τα πίσω επαγωγή (Backwards Induction) . . . . .                                                          | 55        |
| 5.7      | DG . . . . .                                                                                                  | 56        |
| 5.7.1    | Συνάρτηση Κέρδους και Μεγιστοποίηση της . . . . .                                                             | 56        |
| 5.7.2    | Τοπικοί Ελεγκτές στη DG . . . . .                                                                             | 60        |
| 5.7.3    | Διεσπαρμένη Παραγωγή στο Μοντέλο Μικροδικτύου . . . . .                                                       | 61        |
| 5.8      | Καταναλωτές . . . . .                                                                                         | 62        |
| 5.8.1    | Ελαστικότητα Ζήτησης ως προς τη τιμή και επίδραση στην αγορά . . . . .                                        | 63        |
| 5.8.2    | Συνδέοντας τη χονδρεμπορική αγορά με την λιανική αγορά: Demand Dispatch και Price-Responsive Demand . . . . . | 65        |
| 5.8.3    | Τοπικοί Ελεγκτές στη Κατανάλωση . . . . .                                                                     | 66        |
| 5.8.4    | Καμπύλη Ζήτησης καταναλωτών . . . . .                                                                         | 68        |
| 5.8.5    | Κέρδος Καταναλωτή . . . . .                                                                                   | 73        |
| 5.8.6    | Συνάρτηση Κέρδους Καταναλωτή . . . . .                                                                        | 75        |
| 5.8.7    | Επιπλέον Κέρδος Καταναλωτή λόγω αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλες μορφές . . . . .                    | 76        |
| 5.8.8    | Ζήτηση στο Μοντέλο Μικροδικτύου . . . . .                                                                     | 79        |
| 5.9      | ESCO/ Aggregator . . . . .                                                                                    | 83        |
| 5.9.1    | Διαχείριση Μικροδικτύου από ESCO/ Aggregator . . . . .                                                        | 83        |
| 5.9.2    | Συνάρτηση κέρδους ESCO/ Aggregator . . . . .                                                                  | 84        |
| 5.9.3    | Μεγιστοποίηση Συνάρτησης κέρδους . . . . .                                                                    | 87        |
| 5.9.4    | Χρήση Μεθόδων Πρόβλεψης . . . . .                                                                             | 89        |
| 5.9.5    | Σύστημα επικοινωνίας στο Μικροδίκτυο . . . . .                                                                | 90        |
| 5.9.6    | Στοιχεία Συναρτήσεων Κέρδους ESCO . . . . .                                                                   | 92        |
| <b>6</b> | <b>Εφαρμογές</b>                                                                                              | <b>93</b> |
| 6.1      | Δεδομένα Εφαρμογής . . . . .                                                                                  | 93        |
| 6.1.1    | Μοντέλα και συναρτήσεις . . . . .                                                                             | 93        |
| 6.2      | Αρχικό Μοντέλο . . . . .                                                                                      | 96        |
| 6.2.1    | Αποτελέσματα και παρατηρήσεις . . . . .                                                                       | 96        |
| 6.3      | Πρώτο Μοντέλο . . . . .                                                                                       | 97        |
| 6.3.1    | Αποτελέσματα και παρατηρήσεις . . . . .                                                                       | 98        |
| 6.4      | Δεύτερο Μοντέλο . . . . .                                                                                     | 100       |
| 6.4.1    | Ρουτίνα προσομοίωσης . . . . .                                                                                | 101       |
| 6.4.2    | Αποτελέσματα και παρατηρήσεις . . . . .                                                                       | 101       |
| 6.5      | Συμπεράσματα . . . . .                                                                                        | 107       |

|                                                                              |            |
|------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Παράρτημα</b>                                                             | <b>108</b> |
| <b>A' Στατικά Παιχνίδια</b>                                                  | <b>109</b> |
| A'.1 Στατικά Παιχνίδια με πλήρη Πληροφορία . . . . .                         | 109        |
| A'.1.1 Δίλημμα του Φυλακισμένου (Prisoner's Dilemma) . . . . .               | 109        |
| A'.1.2 Παιχνίδι Διαπραγμάτευσης . . . . .                                    | 110        |
| A'.1.3 Μοντέλο Bertrand με πλήρη πληροφορία . . . . .                        | 114        |
| A'.2 Στατικά Παιχνίδια με ελλιπή Πληροφορία . . . . .                        | 117        |
| A'.2.1 Σημείο Ισορροπίας Bayesian Nash . . . . .                             | 117        |
| A'.2.2 Μοντέλο Bertrand με ελλιπή πληροφορία . . . . .                       | 118        |
| <b>B' Δυναμικά Παιχνίδια</b>                                                 | <b>121</b> |
| B'.1 Δυναμικά Παιχνίδια με πλήρη Πληροφορία . . . . .                        | 121        |
| B'.2 Δυναμικά Παιχνίδια με ελλιπή Πληροφορία . . . . .                       | 121        |
| B'.2.1 Τέλειο Σημείο ισορροπίας Bayesian Nash (Perfect Bayesian Equilibrium) | 121        |
| B'.2.2 Παιχνίδια Σινιάλων . . . . .                                          | 123        |
| <b>Βιβλιογραφία</b>                                                          | <b>125</b> |



# Κατάλογος σχημάτων

|      |                                                                                                                                           |    |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Τυπικό παράδειγμα Μικροδικτύου που περιλαμβάνει φορτία, διανεμημένους πόρους ενέργειας και εξυπηρετείτε από το δίκτυο μεταφοράς . . . . . | 18 |
| 2.2  | Πιλοτικό σύστημα Μικροδικτύου που λειτουργεί στη Κύθνο . . . . .                                                                          | 19 |
| 2.3  | Τοπολογία Smart Grid με Μικροδικτυα . . . . .                                                                                             | 21 |
| 2.4  | Κεντρικός Έλεγχος . . . . .                                                                                                               | 22 |
| 3.1  | Παιχνίδι σε εκτεταμένη μορφή . . . . .                                                                                                    | 27 |
| 3.2  | Κατηγοριοποίηση Παιχνιδιών . . . . .                                                                                                      | 28 |
| 4.1  | Βραχυπρόθεσμο μοντέλο λειτουργίας Μικροδικτύου . . . . .                                                                                  | 36 |
| 4.2  | Μακροπρόθεσμο μοντέλο λειτουργίας Μικροδικτύου . . . . .                                                                                  | 41 |
| 4.3  | Συμμετοχή στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας . . . . .                                                                                      | 43 |
| 4.4  | Καμπύλες Προσφοράς και Ζήτησης . . . . .                                                                                                  | 46 |
| 4.5  | Λειτουργία της αγοράς Managed Spot Market . . . . .                                                                                       | 49 |
| 5.1  | Το παιχνίδι σε εκτεταμένη μορφή . . . . .                                                                                                 | 54 |
| 5.2  | Καμπύλη κόστους προς παραγωγή . . . . .                                                                                                   | 58 |
| 5.3  | Καμπύλη οριακού κόστους προς παραγωγή . . . . .                                                                                           | 58 |
| 5.4  | Εύρεση παραγωγής από τιμή αγοράς . . . . .                                                                                                | 59 |
| 5.5  | Έσοδα και κέρδη παραγωγού . . . . .                                                                                                       | 59 |
| 5.6  | Λειτουργία τοπικού ελεγκτή σε DG . . . . .                                                                                                | 61 |
| 5.7  | Επίδραση πλήρους ανελαστικής Ζήτησης . . . . .                                                                                            | 64 |
| 5.8  | Τιμές χονδρεμπορικής αγοράς . . . . .                                                                                                     | 64 |
| 5.9  | Σύστημα αυτοματοποιημένου ελέγχου συσκευών με τοπικό ελεγκτή . . . . .                                                                    | 67 |
| 5.10 | Αξία Φορτίου συσκευών . . . . .                                                                                                           | 69 |
| 5.11 | Προφίλ κατανάλωσης ενέργειας ενός τυπικού πλυντηρίου πιάτων (πηγή: NREL)                                                                  | 70 |
| 5.12 | Προφίλ κατανάλωσης ενέργειας ενός τυπικού στεγνωτήρα ρούχων (πηγή: NREL)                                                                  | 70 |
| 5.13 | Αξία χρήσης συσκευών παραδείγματος . . . . .                                                                                              | 72 |
| 5.14 | Καμπύλες Ζήτησης παραδείγματος . . . . .                                                                                                  | 74 |
| 5.15 | Καμπύλη Ζήτησης καταναλωτή . . . . .                                                                                                      | 75 |
| 5.16 | Συνολική Αξία Φορτίου . . . . .                                                                                                           | 75 |
| 5.17 | Κέρδος Καταναλωτή . . . . .                                                                                                               | 76 |
| 5.18 | Μεταβλητή λειτουργία κλιματιστικού . . . . .                                                                                              | 77 |
| 5.19 | Ύδρευση στο Πισσούρι . . . . .                                                                                                            | 78 |
| 5.20 | Μεταβολή στάθμης αναφοράς ανάλογα με τιμή ηλεκτρικής ενέργειας . . . . .                                                                  | 79 |
| 5.21 | Λειτουργία τοπικού ελεγκτή Καταναλωτή του Μικροδικτυου . . . . .                                                                          | 81 |
| 5.22 | Λειτουργία τοπικού ελεγκτή Καταναλωτή στο Πρώτο Μοντέλο . . . . .                                                                         | 82 |
| 5.23 | Λειτουργία τοπικού ελεγκτή Καταναλωτή στο Δεύτερο Μοντέλο . . . . .                                                                       | 82 |
| 5.24 | Εξέλιξη του Smart Grid . . . . .                                                                                                          | 90 |

|                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.25 Καμπύλη Επιστροφής Επενδύσεων ανάλογα με τεχνολογία . . . . .                         | 92  |
| 6.1 Λειτουργία κλιματιστικού με μεταβλητή θερμοκρασία αναφοράς . . . . .                   | 95  |
| 6.2 Παράδειγμα μοντέλου χωρίς κανένα έλεγχο στη κατανάλωση (Αρχικό Μοντέλο)                | 96  |
| 6.3 Παράδειγμα μοντέλου με έλεγχο Demand Dispatch στη κατανάλωση (Πρώτο Μοντέλο) . . . . . | 98  |
| 6.4 Αθροιστική καμπύλη ζήτησης για $t=3$ (Πρώτο Μοντέλο) . . . . .                         | 99  |
| 6.5 Παράδειγμα μοντέλου με Price Responsive κατανάλωση (Δεύτερο Μοντέλο) .                 | 101 |
| 6.6 Καμπύλη ζήτησης για $t=1$ (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . .                                  | 103 |
| 6.7 Συνάρτηση Κέρδους ESCO για $t=1$ (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . .                           | 103 |
| 6.8 Καμπύλη ζήτησης για $t=2$ (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . .                                  | 103 |
| 6.9 Συνάρτηση Κέρδους ESCO για $t=2$ (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . .                           | 104 |
| 6.10 Καμπύλη ζήτησης για $t=3$ (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . .                                 | 104 |
| 6.11 Συνάρτηση Κέρδους ESCO για $t=3$ (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . .                          | 104 |
| 6.12 Καμπύλη ζήτησης για $t=4$ (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . .                                 | 105 |
| 6.13 Συνάρτηση Κέρδους ESCO για $t=4$ (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . .                          | 105 |
| 6.14 Καμπύλη ζήτησης για $t=5$ (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . .                                 | 105 |
| 6.15 Συνάρτηση Κέρδους ESCO για $t=5$ (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . .                          | 106 |
| 6.16 Διαγράμματα ροής . . . . .                                                            | 107 |
| A'.1 Παιχνίδι Διαπραγμάτευσης στα Μικροδίκτυα (Σχηματικά) . . . . .                        | 110 |
| A'.2 Παιχνίδι Διαπραγμάτευσης στα Μικροδίκτυα: Απλοποιημένη λειτουργία . . . .             | 111 |
| A'.3 Παιχνίδι Bertrand . . . . .                                                           | 115 |
| B'.1 Δυναμικό παιχνίδι ελλιπούς πληροφορίας . . . . .                                      | 122 |
| B'.2 Παιχνίδι Σιγιάλων σε Εκτεταμένη μορφή . . . . .                                       | 123 |



# Κατάλογος πινάκων

|      |                                                          |     |
|------|----------------------------------------------------------|-----|
| 4.1  | Πίνακας Προσφορών . . . . .                              | 45  |
| 4.2  | Πίνακας Προγραμματισμού και κερδών . . . . .             | 45  |
| 6.1  | Αποτελέσματα Προσομοίωσης (Αρχικό Μοντέλο) . . . . .     | 97  |
| 6.2  | Μεταβολή κέρδους με πρόβλεψη (Αρχικό Μοντέλο) . . . . .  | 97  |
| 6.3  | Αποτελέσματα Προσομοίωσης (Πρώτο Μοντέλο) . . . . .      | 99  |
| 6.4  | Μεταβολή κέρδους με πρόβλεψη (Πρώτο Μοντέλο) . . . . .   | 100 |
| 6.5  | Αποτελέσματα Προσομοίωσης (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . .    | 102 |
| 6.6  | Μεταβολή κέρδους με πρόβλεψη (Δεύτερο Μοντέλο) . . . . . | 102 |
| A'.1 | Πίνακας Παιχνιδιού Δίλημμα του φυλακισμένου . . . . .    | 110 |
| A'.2 | Παράμετροι Μικροδικτύων και αρχικές συνθήκες . . . . .   | 113 |
| A'.3 | Στοιχεία Παιχνιδιού . . . . .                            | 114 |



# Κεφάλαιο 1

## Πρόλογος

Από την εποχή του Edison (ενός από τους πρώτους αρχιτέκτονες του σημερινού δικτύου) μέχρι πρόσφατα, τα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας είχαν μια απλή δομή. Όλα τα ΣΗΕ ανήκαν σε μεγάλες, κρατικές, μονοπωλιακές εταιρίες και είχαν δομηθεί συγκεντρωτικά. Η σχέση παραγωγής και κατανάλωσης σε αυτά τα ΣΗΕ ήταν κάθετη και μιας κατεύθυνσης. Μεγάλα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας (θερμικά, πυρηνικά κλπ) ήταν συγκεντρωμένα σε συγκεκριμένα γεωγραφικά όρια (συνήθως μακριά από κατοικημένες περιοχές) και τροφοδοτούσαν τους καταναλωτές. Έτσι, τα συστήματα αυτά είχαν 3, διακριτούς τεχνικά, τομείς: τη παραγωγή, τη μεταφορά και τη διανομή.

Η τεχνολογική ανάπτυξη που έχει γνωρίσει ο κόσμος τις τελευταίες δεκαετίες έχει εκτοξεύσει τις ανάγκες των ατόμων για ηλεκτρική ενέργεια σε πρωτόγνωρα επίπεδα. Φωταγωγήση τεράστιων εκτάσεων κατοικημένων περιοχών, χρήση ηλεκτρικών κινητήρων στη βιομηχανική παραγωγή και σε μεταφορές (ηλεκτρικά τρένα, αυτοκίνητα κλπ), οικιακές συσκευές που σκοπό έχουν τη διευκόλυνση των χρηστών (Η/Υ, ψυγεία, πλυντήρια κλπ) και άλλα έχουν συμβάλει στη δημιουργία μιας ενεργοβόρου κοινωνίας.

Η ανάπτυξη, όμως, στους τομείς της παραγωγής και της μεταφοράς δε μπορεί πια να ακολουθήσει την εκθετική αύξηση στην ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας. Η περιβαλλοντική ευαισθητοποίηση του κόσμου έβαλε τέλος στη ραγδαία, και μερικές φορές ανεξέλεγκτη, ανάπτυξη που είχαν γνωρίσει οι δύο αυτοί τομείς τα πρώτα τους χρόνια. Έτσι, η επέκταση και ενίσχυση του δικτύου μεταφοράς, καθώς και η εγκατάσταση νέων μονάδων παραγωγής έχει εξελιχθεί σε μια πολύπλοκη και χρονοβόρα διαδικασία.

Οι αδυναμίες αυτές έχουν δημιουργήσει σημαντικά προβλήματα ευστάθειας, απόδοσης και αξιοπιστίας του συστήματος. Αυτά τα τεχνικά προβλήματα, σε συνδυασμό με την ανάγκη για πιο "πράσινη" ενέργεια έχουν οδηγήσει στην αναζήτηση λύσεων βασισμένων σε νέα μοντέλα και νέες τεχνολογίες. Αρχικά, το μοντέλο της διεσπαρμένης παραγωγής προτάθηκε με στόχο να φέρει τη παραγωγή πιο κοντά στη κατανάλωση. Το μοντέλο αυτό προτείνει την εγκατάσταση μικρών, ευέλικτων και οικονομικών μονάδων στο επίπεδο της διανομής για να ενισχύσουν το σύστημα και να μειώσουν τις απώλειες του. Η διεσπαρμένη παραγωγή, επίσης, μπορεί να συνεισφέρει στη μείωση των ρύπων, στη μείωση των απωλειών μεταφοράς, στη διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας και άλλα.

Επιπλέον, η προσπάθεια για ενσωμάτωση νέων τεχνολογιών στο δίκτυο ηλεκτρικής ενέργειας οδήγησε στη γέννηση του τομέα Smart Grids. Ένα μοντέλο του τομέα των Smart

Grids είναι τα Μικροδίκτυα. Η έννοια του Μικροδικτύου υποθέτει μία συστοιχία φορτίων και διανεμημένων μικροπηγών (σταθμοί διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης) που λειτουργούν σαν ένα ενιαίο, ελεγχόμενο, σύστημα που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα στους καταναλωτές του Μικροδικτύου. Σκοπός του κειμένου αυτού είναι η μελέτη κάποιων μοντέλων Μικροδικτύου σε συνδυασμό με εφαρμογή τεχνολογιών που επιτρέπουν τη διαχείριση της διεσπαρμένης παραγωγής, τη διαχείριση φορτίου και τη συμμετοχή των καταναλωτών στη λειτουργία του συστήματος.

Το πρώτο μοντέλο περιλαμβάνει τεχνολογίες διαχείρισης διεσπαρμένης παραγωγής και διαχείρισης φορτίου με τη χρήση τοπικών ελεγκτών. Σε αυτό το μοντέλο συμμετέχουν ενεργά οι καταναλωτές του Μικροδικτύου, οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και η εταιρία που δραστηριοποιείται στο Μικροδίκτυο (ESCO), η οποία αναλαμβάνει την προμήθεια ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές και την αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Ενώ, στο δεύτερο μοντέλο μεταβάλλεται η διαχείριση φορτίου σε συμμετοχή των καταναλωτών στη λειτουργία του συστήματος με την εφαρμογή μεταβλητής τιμολόγησης και της τεχνολογίας smart metering.

Η Θεωρία Παιγνίων είναι ένας κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών και συγγενικός της Θεωρίας Αποφάσεων (Decision Theory). Βρίσκει εφαρμογή στις κοινωνικές επιστήμες, κυρίως στα οικονομικά, αλλά επίσης και στη βιολογία, μηχανική, πολιτικές επιστήμες, διεθνείς σχέσεις, πληροφορική και φιλοσοφία. Η Θεωρία Παιγνίων επιχειρεί να μοντελοποιήσει αλληλεπιδράσεις στις οποίες τα άτομα που λαμβάνουν μέρος καλούνται να πάρουν κάποια απόφαση και που η επιτυχία των αποφάσεων ενός συμμετέχοντα εξαρτάται από τις αποφάσεις των υπολοίπων συμμετεχόντων.

Τα δυο μοντέλα του Μικροδικτύου τοποθετούνται και αναλύονται σε ένα πλήρως ανταγωνιστικό περιβάλλον. Υπό αυτό το πρίσμα, οι συμμετέχοντες στα δυο αυτά μοντέλα αποφασίζουν με σκοπό τη μεγιστοποίηση του ατομικού κέρδους. Αυτή η υπόθεση κάνει τα μοντέλα ιδανικά για ανάλυση με εργαλεία και μεθόδους της Θεωρίας Παιγνίων. Για την ανάλυση ενός μοντέλου με τις μεθόδους της Θεωρίας Παιγνίων πρέπει αρχικά το μοντέλο αυτό να μετατραπεί σε Παιχνίδι της Θεωρίας Παιγνίων. Για το σκοπό αυτό, αρχικά γίνεται η περιγραφή του παιχνιδιού και των κανόνων που το διέπουν (κεφάλαιο 4). Σε δεύτερο στάδιο, καθορίζονται οι συμμετέχοντες του παιχνιδιού (παίκτες), οι στόχοι του κάθε παίκτη και οι "κινήσεις" που έχει στη διάθεσή του για να επιτύχει αυτούς τους στόχους. Έπειτα, μαθηματικοποιούμε τους στόχους και τις πιθανές κινήσεις του κάθε παίκτη, κατατάσσουμε το παιχνίδι στη κατάλληλη κλάση παιχνιδιών της Θεωρίας Παιγνίων και επιχειρούμε να το επιλύσουμε για να βρούμε το σημείο ισορροπίας Nash του παιχνιδιού (κεφάλαιο 5).

Μια τέτοια ανάλυση μπορεί να χρησιμοποιηθεί από τους παίκτες για το καθορισμό της στρατηγικής τους ή από το Διαχειριστή του Συστήματος για να κάνει αλλαγές στο τρόπο λειτουργίας του Μικροδικτύου όταν χρειάζεται. Η έννοια του σημείου ισορροπίας Nash στη Θεωρία Παιγνίων χρησιμοποιείται για να αναλύσει την έκβαση της στρατηγικής αλληλεπίδρασης πολλών φορέων λήψης αποφάσεων. Με άλλα λόγια, είναι ένας τρόπος να προβλέψουμε τι θα συμβεί αν πολλά άτομα παίρνουν αποφάσεις και η απόφαση του κάθε ενός εξαρτάται από τις αποφάσεις των υπολοίπων. Η βάση της έννοιας είναι ότι δε μπορούμε να προβλέψουμε το αποτέλεσμα που θα βγει από τις αποφάσεις πολλών φορέων λήψης αποφάσεων εξετάζοντας τις αποφάσεις τους ατομικά! Αντιθέτως, πρέπει να "ρωτήσουμε" το κάθε παίκτη τι θα έκανε, λαμβάνοντας υπόψη τις αποφάσεις των υπολοίπων παιχτών.

Επεκτείνοντας την ανάλυση αυτή, μελετάμε διάφορες παραλλαγές που μπορούν να παρουσιαστούν (κεφάλαια Α' και Β') τις αναλύουμε, κατατάσσοντας τη κάθε μία σε κάποια από τις διάφορες κλάσεις παιχνιδιών της Θεωρίας Παιγνίων. Τέλος, χρησιμοποιώντας όλες τις αναλύσεις και τα μαθηματικά μοντέλα, κατασκευάζουμε προσομοιώσεις των μοντέλων αυτών και προσπαθούμε για συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας και παραμέτρους του Μικροδικτύου να προβλέψουμε πως θα συμπεριφερθούν οι συμμετέχοντες σε αυτό στη κάθε περίπτωση (κεφάλαιο 6).



## Κεφάλαιο 2

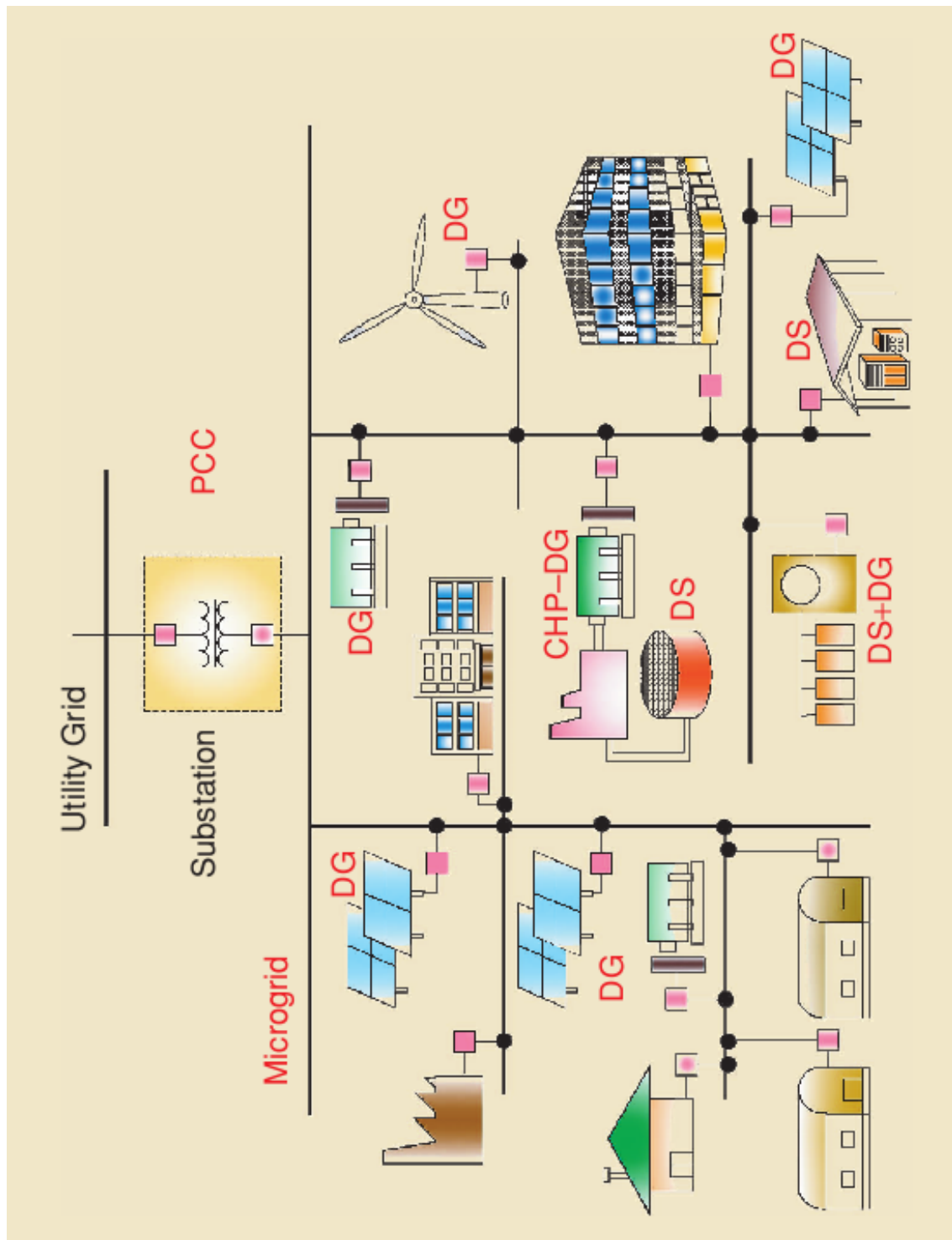
# Μικροδίκτυα

Πρόσφατες εξελίξεις στη βιομηχανία παραγωγής, μεταφοράς και διανομής ηλεκτρικής ενέργειας ενθαρρύνουν την εισαγωγή παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας στο επίπεδο της διανομής. Μαζί, χαρακτηρίζονται σαν διεσπαρμένες μονάδες παραγωγής. Διάφορες νέες τεχνολογίες έχουν αναπτυχθεί και διατεθεί στην αγορά για διεσπαρμένη παραγωγή, με ισχύ από λίγα  $kW$  μέχρι  $100 MW$ . Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής περιλαμβάνουν μικροτουρμπίνες, κυψέλες καυσίμων, φωτοβολταϊκά συστήματα, αιολικά συστήματα, μηχανές πετρελαίου και τουρμπίνες φυσικού αερίου. [14]

### 2.1 Περιγραφή Μικροδικτύων

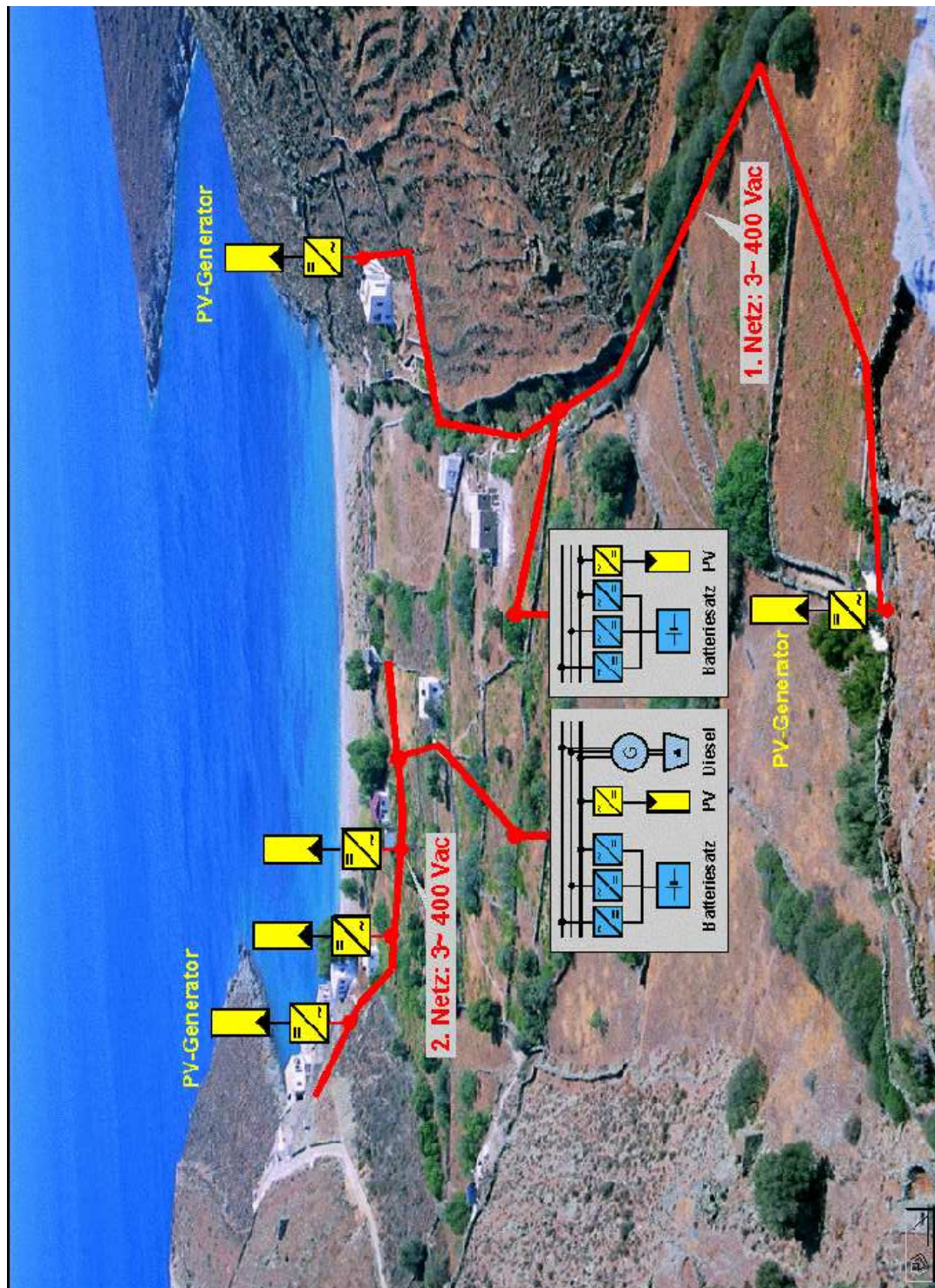
Το Μικροδίκτυο (σχήμα 2.1) αποτελείται από μία συστοιχία φορτίων και διεσπαρμένων μικροπηγών (σταθμών διεσπαρμένης παραγωγής και αποθήκευσης) που λειτουργούν σαν ένα ενιαίο, ελεγχόμενο, σύστημα που παρέχει ηλεκτρική ενέργεια και θερμότητα στους καταναλωτές του Μικροδικτύου. Σαν μέρος του δικτύου διανομής έχει ακτινική διαμόρφωση και συνδέεται με το δίκτυο μεταφοράς σε ένα σημείο (PCC). Σκοπός του Μικροδικτύου είναι, μέσω της σωστής διαχείρισης της διεσπαρμένης παραγωγής και του φορτίου, να φροντίζει για την αποδοτική και συνεχή τροφοδότηση των καταναλωτών.

Το Μικροδίκτυο περιλαμβάνει διεσπαρμένες μικροπηγές αποτελούμενες από συστήματα φωτοβολταϊκών (ΦΒ), ανεμογεννήτριες (ΑΓ), κυψέλες καυσίμων (FC), μικροτουρμπίνες (MT), γεννήτριες πετρελαίου (ΓΠ) και μπαταρίες. Καύσιμα χρειάζονται μόνο για τις MT, ΓΠ και FC ενώ τα ΦΒ και ΑΓ τροφοδοτούνται από τη Φύση. Το Μικροδίκτυο συνήθως λειτουργεί σε κατάσταση σύνδεσης με το δίκτυο. Παρόλα αυτά, αναμένεται να υπάρχουν οι κατάλληλες τεχνικές ελέγχου, οι σωστές στρατηγικές και ικανοποιητική παραγωγή για να μπορεί να τροφοδοτηθεί τουλάχιστον ένα μέρος του φορτίου σε συνθήκες νησιδοποίησης. Η κάλυψη της ζήτησης του φορτίου μπορεί να γίνει απευθείας από τις διανεμημένες μικροπηγές ή από το δίκτυο.



Σχήμα 2.1: Τυπικό παράδειγμα Μικροδικτύου που περιλαμβάνει φορτία, διασπασμένους πόρους ενέργειας και εξυπηρετείται από το δίκτυο μεταφοράς





Σχήμα 2.2: Πιλοτικό σύστημα Μικροδικτύου που λειτουργεί στη Κύθνο

## 2.2 Λόγοι για την Ανάπτυξη Μικροδικτύων

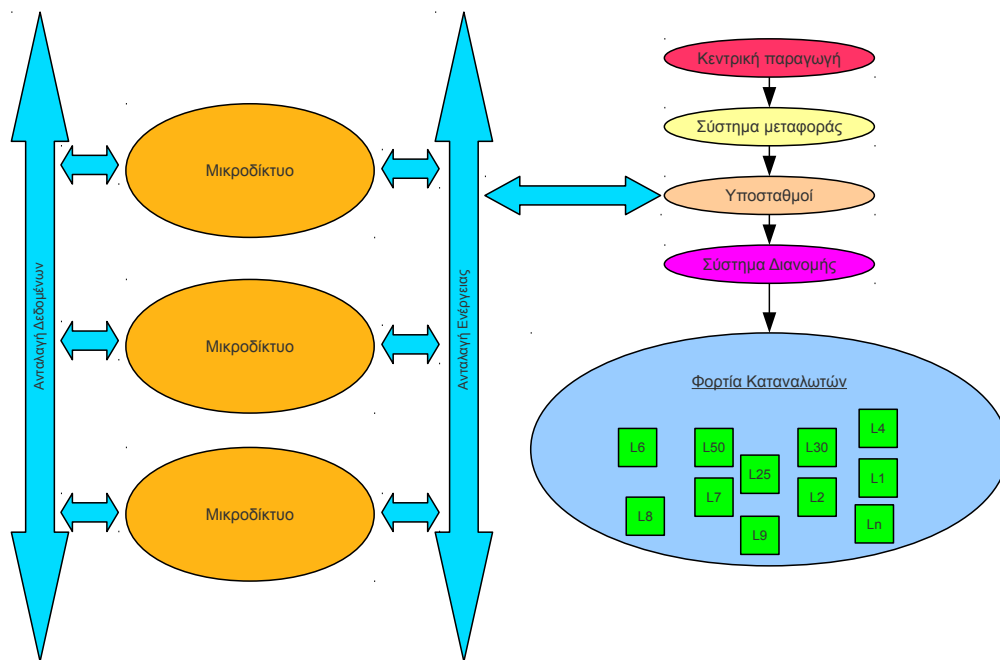
Η κλασική δομή των σύγχρονων, μεγάλων ΣΗΕ προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα. Μεγάλες ηλεκτροπαραγωγές μονάδες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ρυθμιζόμενες έτσι ώστε να έχουν υψηλή απόδοση και λίγες ανάγκες σε προσωπικό. Τα διασυνδεδεμένα δίκτυα μεταφοράς Υψηλής Τάσης επιτρέπουν τη μείωση για ανάγκη μεγάλης εφεδρείας γεννητριών, τη χρήση του πιο οικονομικού σταθμού παραγωγής κάθε στιγμή και τη μεταφορά μεγάλης ισχύος σε μακρινές αποστάσεις με περιορισμένες απώλειες. Το δίκτυο διανομής, έτσι, μπορεί να σχεδιαστεί ώστε να επιτρέπει τη μεταφορά ισχύος μόνο προς μια κατεύθυνση και οι τεχνικές του προδιαγραφές να περιλαμβάνουν την εξυπηρέτηση φορτίων κατανάλωσης μόνο.

Παρόλα αυτά, τα τελευταία χρόνια, διάφοροι λόγοι έχουν οδηγήσει στη μελέτη μοντέλων Μικροδικτύων για τη διαμόρφωση του ΣΗΕ. Κάποιοι από τους λόγους που ενισχύουν την ανάγκη για στροφή στα Μικροδίκτυα είναι:

1. **Ανάγκη διαθεσιμότητας ευέλικτων, μικρών μονάδων παραγωγής και αποδοτικότερης χρήσης ενέργειας** Λόγω της "τοπικότητας" του Μικροδικτύου, μπορεί να γίνεται αποτελεσματικότερη διαχείριση της ενέργειας. Μπορεί να μεγιστοποιηθεί η κατανάλωση ενέργειας από ανανεώσιμες πηγές του Μικροδικτύου ενώ μπορούμε να ελαχιστοποιήσουμε την ανάγκη για εφεδρείες, καθώς μικρές ευέλικτες μονάδες μπορούν να μουν σε λειτουργία πολύ γρήγορα.
2. **Μείωση των ρύπων (κυρίως CO<sub>2</sub>)** Με τη λειτουργία των Μικροδικτύων μπορούμε εύκολα να εισάγουμε τις κατάλληλες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής που, στο συγκεκριμένο σημείο λειτουργίας, αποφέρουν την ελάχιστη παραγωγή ρύπων. Κάτι τέτοιο είναι δυνατό λόγω του μικρού μεγέθους και του είδους των μονάδων αυτών. Με τα μεγάλα εργοστάσια παραγωγής ενέργειας δεν έχουμε τη δυνατότητα να κάνουμε γρήγορο έλεγχο και να εισάγουμε μονάδες κατά βούληση κάθε στιγμή λόγω τεχνικών και οικονομικών περιορισμών.
3. **Πολιτική ανταγωνισμού** Αν ο σχεδιασμός της οικονομικής λειτουργίας των Μικροδικτύων γίνει σωστά, τότε μπορεί να αναπτυχθεί οικονομική δραστηριότητα στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας από μικρές εταιρίες (οι οποίες υπό άλλες συνθήκες δε θα είχαν την οικονομική δυνατότητα να συμμετάσχουν στην αγορά). Οι εταιρίες αυτές μπορούν να εγκαταστήσουν μικρές μονάδες παραγωγής για τη δική τους εξυπηρέτηση ή για τη πώληση σε άλλους καταναλωτές στο Μικροδίκτυο.
4. **Διαφοροποίηση των πηγών ενέργειας** Ανάλογα με την περιοχή και το μέγεθος του Μικροδικτύου μπορούμε να συναντήσουμε διάφορες πηγές ενέργειας, όπως αιολική, ηλιακή, με χρήση φυσικού αερίου, πετρελαίου κ.α. Το κάθε είδος σταθμού έχει τα δικά του πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Έτσι, με το σωστό προγραμματισμό εγκατάστασης και λειτουργίας μπορούμε να έχουμε μια όσο το δυνατόν βέλτιστη λειτουργία του Μικροδικτύου.
5. **Αύξηση των εθνικών και διεθνών ενεργειακών αναγκών**
6. **Εύκολη εύρεση περιοχών εγκατάστασης μονάδων παραγωγής και γρήγορη κατασκευή με μικρότερο κόστος εγκατάστασης** Σε μικρές μονάδες παραγωγής, οι ανάγκες εγκαταστάσεων προστασίας είναι μικρές. Επίσης, το μέγεθος

των μονάδων αυτών, τους επιτρέπει να συνδέονται απευθείας σε δίκτυο Χ.Τ., απαλείφοντας έτσι την ανάγκη κατασκευής υποσταθμών κλπ Τέλος, η ανάγκη περιβαλλοντικών μελετών είναι περιορισμένη.

7. **Η παραγωγή να είναι πιο κοντά στο φορτίο** Μεταφέροντας τη παραγωγή πιο κοντά στους καταναλωτές μειώνουμε το κόστος μεταφοράς και την ανάγκη κατασκευής νέων γραμμών μεταφοράς. Επίσης, μπορούμε να αποφύγουμε εργασίες αναβάθμισης του δικτύου (αντικατάσταση ΜΣ, δημιουργία νέων υποσταθμών κλπ) σε αναπτυσσόμενες περιοχές.



Σχήμα 2.3: Τοπολογία Smart Grid με Μικροδικτυα

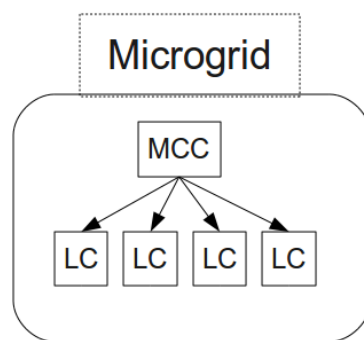
## 2.3 Διαχείριση και έλεγχος Μικροδικτύου

Σημαντική έρευνα γίνεται σε σχέση με τη λειτουργία και έλεγχο των Μικροδικτύων. Κύριοι παράγοντες που λαμβάνονται υπόψη στη σχεδίαση αυτή είναι:

- Βέλτιστη χρήση των τοπικών πηγών διεσπαρμένης παραγωγής
- Ικανοποίηση των τοπικών φορτίων
- Μείωση του κόστους λειτουργίας
- Αύξηση του κέρδους των συμμετεχόντων
- Μείωση των ρύπων

Για το πρόβλημα της βελτιστοποίησης της λειτουργίας ενός δικτύου ηλεκτρικής ενέργειας πολλοί αλγόριθμοι έχουν προταθεί, όπως τεχνική goal programming [18], κλασσική τεχνική [17], με χρήση λογικής fuzzy [13], γενετικοί αλγόριθμοι [4] και άλλα. Στις μεθόδους αυτές, οι υπολογισμοί και οι αποφάσεις παίρνονται κάπου κεντρικά (centralized) και ανακοινώνονται στους παραγωγούς και καταναλωτές. Μια δεύτερη προσέγγιση που έχει προταθεί [14] για τα Μικροδίκτυα είναι ο διεσπαρμένος έλεγχος, όπου οι αποφάσεις παίρνονται τοπικά από τα φορτία και τους παραγωγούς χωρίς την ύπαρξη κεντρικού ελεγκτή. Οι τοπικοί ελεγκτές παίρνουν κάποια είσοδο (σήμα) από το διαχειριστή του Μικροδικτύου, τον πάροχο ή την ESCO (Energy Service COmpany) με την οποία συνεργάζονται και με βάση αυτό το σήμα μεταβάλλουν την παραγωγή ή κατανάλωσή τους.

### 2.3.1 Κεντρικός Έλεγχος



Σχήμα 2.4: Κεντρικός Έλεγχος

Σε αυτή τη περίπτωση (δες Σχήμα 2.4) οι τοπικοί ελεγκτές των παραγωγών και των φορτίων (LC) λαμβάνουν εντολές ελέγχου από το κεντρικό ελεγκτή του Μικροδικτύου (MCC). Όλες οι πληροφορίες από τους LC μαζεύονται στον MCC. Εκεί γίνεται η επεξεργασία και βελτιστοποίηση με βάση τους συνολικούς στόχους του Μικροδικτύου και δίνονται εντολές στους LC. Έτσι, σε ένα κεντρικά ελεγχόμενο Μικροδίκτυο ο MCC έχει την ευθύνη για τη μείωση του κόστους λειτουργίας, τη μείωση των εκπομπών αερίου θερμοκηπίου, την αύξηση του συνολικού κέρδους του Μικροδικτύου κλπ. Ο MCC μπορεί να εκδώσει εντολές οι οποίες έχουν να κάνουν με τη παραγωγή του κάθε τοπικού παραγωγού, ποια φορτία θα εξυπηρετηθούν και ποια θα απορριφθούν κλπ. Οι LC είναι υποχρεωμένοι να ακολουθούν τις εντολές αυτές και έχουν περιορισμένες δυνατότητες αυτονομίας.

### 2.3.2 Διεσπαρμένος Έλεγχος

Ο διεσπαρμένος έλεγχος σκοπό έχει να προωθήσει την αυτονομία των παραγωγών και των καταναλωτών μέσα στο Μικροδίκτυο. Η αυτονομία αυτή υπονοεί ότι οι τοπικοί ελεγκτές (LC) έχουν κάποιο επίπεδο νοημοσύνης και μπορούν να επικοινωνούν μεταξύ τους διαμορφώνοντας έτσι μια μεγάλη νοήμονα οντότητα. Εισάγοντας την ιδέα της αυτονομίας στο Μικροδίκτυο, ο κάθε τοπικός ελεγκτής μπορεί να έχει το δικό του στόχο ο οποίος να μην είναι κατά ανάγκη ο ίδιος για όλους. Σε αυτό το είδος του ελέγχου, οι ελεγκτές αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, υπακούοντας σε κάποιους κανόνες και ακολουθώντας κάποια πρωτόκολλα, για να προσδιορίσουν τη λειτουργική κατάσταση του Μικροδικτύου.

Αυτές οι προδιαγραφές κάνουν το διεσπαρμένο σύστημα ελέγχου ιδανικό για την χρήση Multi-Agent πλατφόρμας. Δηλαδή, ενός συστήματος που ο κάθε τοπικός ελεγκτής αποτελείται από ένα πράκτορα (agent), ο οποίος είναι ένα πρόγραμμα που διαθέτει κάποιο επίπεδο νοημοσύνης. Ο πράκτορας αυτός παίρνει κάποιες μετρήσεις από το φορτίο ή τη παραγωγή, μπορεί να επικοινωνεί με άλλους πράκτορες ανταλλάσσοντας πληροφορίες και τελικά, με γνώμονα τους στόχους που του έχουμε θέσει (προγραμματίζει) εμείς, ασκεί κάποιο έλεγχο στη παραγωγή ή στη κατανάλωση. Ο κάθε πράκτορας, ανάλογα με το τι είδος τοπικού ελεγκτή αντιπροσωπεύει (καταναλωτή, παραγωγού, μπαταρίες κλπ) μπορεί να έχει τους δικούς του στόχους και να αντιδρά διαφορετικά στις όποιες αλλαγές ή γεγονότα συμβούν στο Μικροδίκτυο.

### 2.3.3 Διαφορές

Η κύρια διαφορά ανάμεσα στις δύο προσεγγίσεις (κεντρικό και διεσπαρμένο έλεγχο) έχει να κάνει με τον όγκο πληροφοριών που μεταφέρονται και επεξεργάζονται σε κάθε περίπτωση. Ένα κεντρικό σύστημα, απαιτεί ο MCC να ασκεί απευθείας έλεγχο στους τοπικούς ελεγκτές, να μπορεί να μαζεύει όλες τις πληροφορίες, να τις επεξεργάζεται και να βγάζει αποτελέσματα σε "λογικό χρόνο". Αυτό απαιτεί ένα πλήρες και γρήγορο σύστημα επικοινωνίας. Επίσης, πρέπει ο MCC να διαθέτει μεγάλη επεξεργαστική ισχύ ώστε να μπορεί να επεξεργάζεται τα δεδομένα και να δίνει εντολές ταχύτατα, έτσι ώστε να διορθώνει σφάλματα ασφάλειας του Μικροδικτύου και να μπορεί να κάνει σωστή οικονομική διαχείριση του. Αυτό όμως, γίνεται οικονομικά ανέφικτο καθώς ο αριθμός των τοπικών ελεγκτών στο Μικροδίκτυο αυξάνεται.

Από την άλλη πλευρά, ο διεσπαρμένος έλεγχος απαιτεί πιο απλό δίκτυο επικοινωνίας και το ποσό πληροφοριών που ανταλλάσσεται μπορεί είναι ελάχιστο. Οι ελεγκτές μπορούν να λαμβάνουν μαζικά κάποιο σήμα και με βάση αυτό και το τύπο του εκάστοτε ελεγκτή να παίρνουν κάποιες αποφάσεις τοπικά. Αυτή η προσέγγιση επίσης, προσφέρει τη δυνατότητα "plug and play". Δηλαδή, κάθε τοπικός ελεγκτής που εγκαθίσταται θα έχει τον ίδιο πράκτορα με έναν ήδη υπάρχων του ίδιου τύπου (π.χ. οικιακό καταναλωτή "τύπου Α"). Στο αντίστοιχο κεντρικό μοντέλο, κάθε νέα προσθήκη στο σύστημα θα απαιτούσε προγραμματιστικές αλλαγές στο όλο σύστημα. Περισσότερες και πιο συγκεκριμένες πληροφορίες για το μοντέλο διεσπαρμένου ελέγχου θα δούμε σε πιο κάτω κεφάλαιο.





## Κεφάλαιο 3

# Θεωρία Παιγνίων

Η θεωρία παιγνίων είναι ένας κλάδος των εφαρμοσμένων μαθηματικών και συγγενικός της Θεωρίας Αποφάσεων (Decision Theory). Βρίσκει εφαρμογή στις κοινωνικές επιστήμες, κυρίως στα οικονομικά, αλλά επίσης και στη βιολογία, στην μηχανική, στις πολιτικές επιστήμες, στις διεθνείς σχέσεις, στη πληροφορική και στη φιλοσοφία. Η θεωρία παιγνίων επιχειρεί να μοντελοποιήσει αλληλεπιδράσεις στις οποίες τα άτομα που λαμβάνουν μέρος καλούνται να πάρουν κάποια απόφαση και που η επιτυχία των αποφάσεων ενός συμμετέχοντα εξαρτάται από τις αποφάσεις των υπολοίπων συμμετεχόντων. Αρχικά, η ανάλυση περιοριζόταν σε καταστάσεις όπου ένας συμμετέχοντας μπορούσε να κερδίσει μόνο εις βάρος κάποιου άλλου (κλασικά παιχνίδια όπως σκάκι, checkers κλπ). Σήμερα όμως, έχει εξελιχθεί και καλύπτει μια ευρεία κλάση αλληλεπιδράσεων<sup>1</sup> οι οποίες κατηγοριοποιούνται με βάση διάφορα κριτήρια (δες Σχήμα 3.2) και μελετούνται ξεχωριστά.

Κάθε αλληλεπίδραση επιχειρείται να μετασχηματιστεί σε ένα "παιχνίδι" και κάθε άτομο που λαμβάνει μέρος σε αυτή ονομάζεται "παίκτης". Ο κάθε παίκτης έχει ένα ή περισσότερους "στόχους" και προσπαθεί να βελτιστοποιήσει τη θέση του σε ένα σύστημα, με περιορισμένους πόρους, που διέπεται από κανόνες. Με βάση τη Θεωρία Παιγνίων, σε κάθε σημείο του παιχνιδιού, ο κάθε παίκτης αναρωτιέται: «Ποιο είναι το βέλτιστο -πιο λογικό- πράγμα που μπορώ να κάνω;». Αυτή η αλληλουχία "κινήσεων" που ακολουθεί ένας παίκτης, κατά τη διάρκεια του παιχνιδιού, με σκοπό να αυξήσει το "κέρδος" του ονομάζεται "στρατηγική". Η έννοια κέρδος ενός παίκτη χρησιμοποιείται για να εκπροσωπήσει πόσο "καλύτερα ή χειρότερα" είναι ένας παίκτης μετά το πέρας του παιχνιδιού από ότι ήταν πριν. Συνήθως, σε περιπτώσεις μοντελοποίησης οικονομικών αλληλεπιδράσεων το κέρδος αντιπροσωπεύει χρήματα. Αλλά αυτό δε συμβαίνει πάντα (όπως θα δούμε και στα Μικροδίκτυα).

### 3.1 Ανταγωνιστική Θεωρία και Θεωρία Συνεργασίας

Οι μαθηματικοί και οι οικονομολόγοι, μελετώντας διάφορες αλληλεπιδράσεις, έχουν αναπτύξει θεωρίες για παιχνίδια που βρίσκουν άμεση εφαρμογή σε προβλήματα μηχανικών. Έχουν χρησιμοποιηθεί δύο θεωρίες για τη περιγραφή αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στους παίκτες, η ανταγωνιστική θεωρία βασισμένη στην έννοια του "σημείου ισορροπίας Nash" (Nash equilibrium) και η θεωρία συνεργασίας, βασισμένη στην έννοια της "Pareto ελάχιστης λύσης".

---

<sup>1</sup> «Η θεωρία παιγνίων είναι ένα είδος ομπρέλας ή 'ενοποιημένου πεδίου' θεωρίας για τα λογικά τμήματα των κοινωνικών επιστημών, όπου το 'κοινωνικές' παίρνει μια ευρεία έννοια, για να περιλαμβάνει ανθρώπους αλλά και μη (υπολογιστές, ζώα, φυτά)» (Aumann 1987) [7]

Σε ανταγωνιστικά παιχνίδια αυτή η ιδέα της ισορροπίας αναπαριστάται από το σημείο ισορροπίας Nash. Στο σημείο Nash, κάθε συμμετέχοντας στο παιχνίδι ακολουθεί μια στρατηγική που είναι η βέλτιστη δεδομένων των στρατηγικών των υπόλοιπων. Έτσι, αν όλοι οι συμμετέχοντες ακολουθούν τη στρατηγική του σημείου ισορροπίας, κανένας από αυτούς δεν έχει κίνητρο να αλλάξει τη στρατηγική του, αφού οποιαδήποτε μονομερής εκτροπή από το σημείο αυτό θα προκαλέσει μείωση των κερδών του.

Σε παιχνίδια συνεργασίας, κάποιοι παίκτες συμφωνούν σε μια κοινή στρατηγική που αυξάνει το συνολικό τους κέρδος και μοιράζονται τα επιπλέον κέρδη που προκύπτουν από αυτήν την συνεργασία. Για να υπάρξει σημείο ισορροπίας σε τέτοιου είδους παιχνίδια εισάγεται η έννοια της αποτρεπτικής τιμωρίας και εκτροπή από τη συμφωνηθείσα στρατηγική.

## 3.2 Ανάλυση των παιχνιδιών

Η συνήθης τακτική που ακολουθείται είναι να παρουσιάζεται ένα παιχνίδι που είναι αφαίρεση μιας συγκεκριμένης οικονομικής κατάστασης. Έπειτα, μία ή περισσότερες έννοιες επίλυσης εισάγονται στο παιχνίδι και ο αναλυτής επιδεικνύει ποιο σύνολο στρατηγικών είναι το σημείο ισορροπίας που αντιστοιχεί στο συγκεκριμένο είδος παιχνιδιού. Φυσικά, κάποιος μπορεί να διερωτηθεί, ποια η χρησιμότητα αυτής της πληροφορίας. Υπάρχουν δυο βασικά είδη χρήσης για τις πληροφορίες αυτές: περιγραφικός ή καθοδηγητικός.

### 3.2.1 Περιγραφικός Ρόλος

Η πιο παλιά χρήση της Θεωρίας είναι στη περιγραφή της ανθρώπινης συμπεριφοράς. Βρίσκοντας το σημείο ισορροπίας σε ένα παιχνίδι που μοντελοποιεί μια συγκεκριμένη περίπτωση αλληλεπίδρασης ανθρώπων, μπορούμε να προβλέψουμε πως θα συμπεριφερθούν οι άνθρωποι όταν έρθουν αντιμέτωποι με περιστάσεις ανάλογες με αυτές του παιχνιδιού που μελετάται. Η μοντελοποίηση αυτή προϋποθέτει πολλούς περιορισμούς. Όπως, για παράδειγμα, ότι όλοι οι άνθρωποι προσπαθούν να μεγιστοποιήσουν το κέρδος τους και ότι όλοι παίζουν με βάση τη λογική. Αυτό φυσικά δε συμβαίνει πάντα, διότι έννοιες όπως ο αλτρουισμός και ο παραλογισμός συχνά εμφανίζονται στις αλληλεπιδράσεις ανθρώπων. Έτσι, όταν αυτοί οι περιορισμοί παραβιάζονται τα μοντέλα αυτά αποκλίνουν αρκετά από τη πραγματικότητα. [5]

### 3.2.2 Καθοδηγητικός Ρόλος

Από την άλλη πλευρά, η Θεωρία παιγνίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν ένα εργαλείο για το πώς οι συμμετέχοντες σε ένα παιχνίδι θα έπρεπε να συμπεριφερθούν. Έτσι, αν ένας συμμετέχοντας αναμένει ότι οι υπόλοιποι συμμετέχοντες θα ακολουθήσουν τις στρατηγικές του σημείου ισορροπίας, η καλύτερη απάντησή του είναι να ακολουθήσει και αυτός τη δική του στρατηγική του σημείου ισορροπίας. Αυτό όμως δε συμβαίνει πάντα. Μερικές φορές, το σύνολο των στρατηγικών του σημείου ισορροπίας είναι αντιδιασθητικό, δηλαδή κάποιος με πρώτη επαφή, θα μπορούσε να το πει παράλογο.

### 3.2.3 Μορφές αναπαράστασης παιχνιδιών

Η παρουσίαση των παιχνιδιών προς επίλυση σε όρους Θεωρίας Παιγνίων μπορεί να γίνει με δύο μορφές: κανονική μορφή παιχνιδιού (normal form) και εκτεταμένη μορφή παιχνιδιού (extensive form). Το κάθε παιχνίδι μπορεί να παρουσιαστεί και στις δύο μορφές. Παρόλα



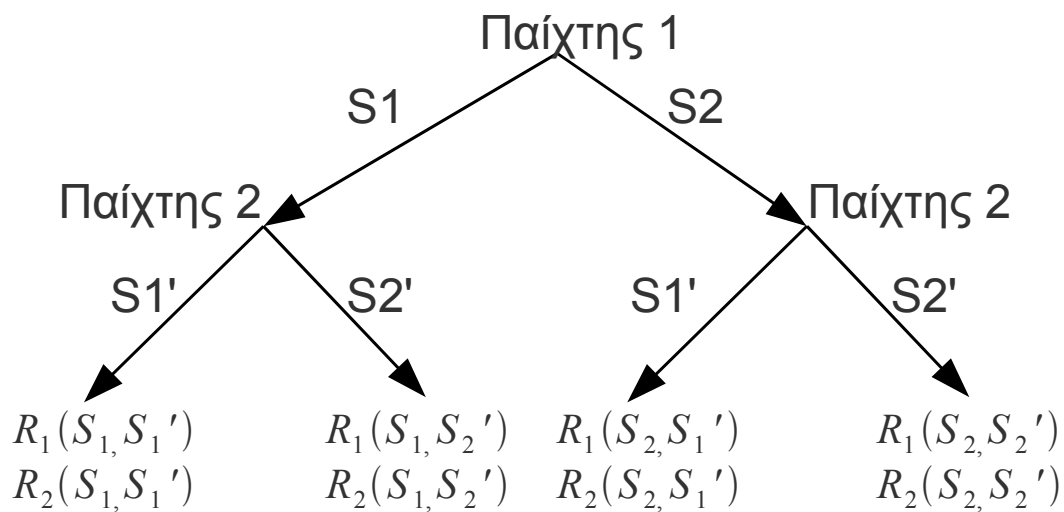
αυτά όμως, για ένα συγκεκριμένο παιχνίδι, η μία από τις δύο μορφές είναι πιο κατάλληλη για την επεξεργασία και επίλυσή του.

Στη κανονική μορφή, ορίζεται το κάθε παιχνίδι σαν

$$G = \{S_1, \dots, S_n; R_1, \dots, R_n\}$$

όπου:

1.  $n$  οι παίκτες του παιχνιδιού
2.  $S_1, \dots, S_n$  οι διαθέσιμες στρατηγικές του κάθε παίκτη
3.  $R_1, \dots, R_n$  οι συναρτήσεις κέρδους του κάθε παίκτη σαν συνάρτηση των στρατηγικών όλων των παικτών.

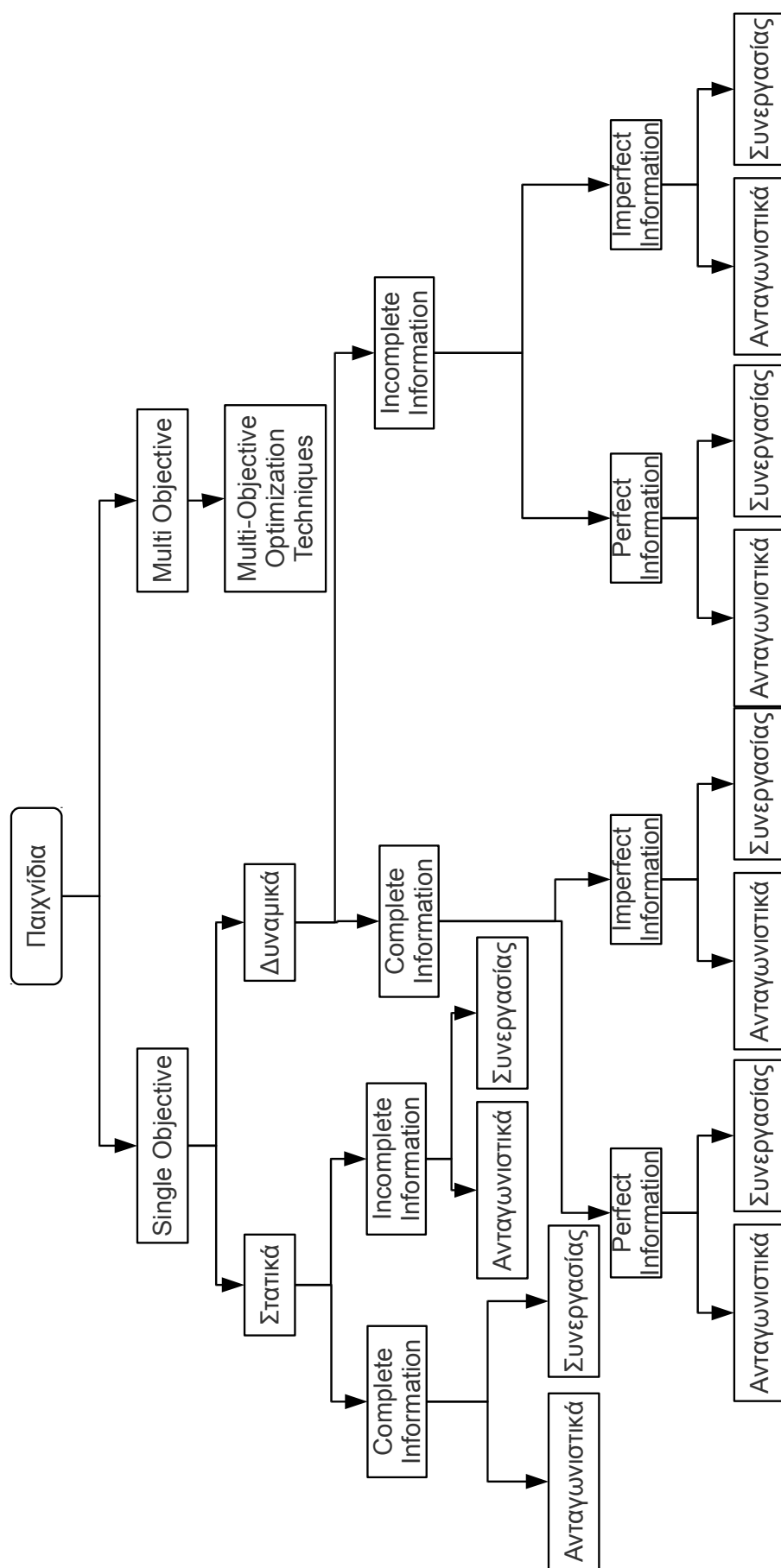


Σχήμα 3.1: Παιχνίδι σε εκτεταμένη μορφή

Στην εκτεταμένη μορφή, το κάθε παιχνίδι ορίζεται με τη χρήση δέντρων αναπαράστασης (δες Σχήμα 3.1) όπου το κάθε επίπεδο του δέντρου αναπαριστά ένα σημείο στην εξέλιξη του παιχνιδιού. Σε αυτό το δέντρο δείχνουμε κάποια χαρακτηριστικά του παιχνιδιού, όπως:

1. τους παίκτες του παιχνιδιού
2. τότε ο κάθε παίκτης μπορεί να κάνει κίνηση
3. τι μπορεί να κάνει ο παίκτης σε κάθε ευκαιρία του να κινηθεί
4. τι γνωρίζει ο κάθε παίκτης σε κάθε ευκαιρία του να κινηθεί
5. το κέρδος του κάθε παίκτη σαν συνάρτηση των στρατηγικών όλων των παικτών καθ' όλη τη διάρκεια του παιχνιδιού

Ο πρώτος κόμβος αντιπροσωπεύει την αρχή του παιχνιδιού. Οι τερματικοί κόμβοι αντιπροσωπεύουν το τέλος του παιχνιδιού και συνοδεύονται από τα κέρδη όλων των παικτών σαν αποτέλεσμα των στρατηγικών που ακολουθήθηκαν σε όλο το παιχνίδι από όλους τους παίκτες. Όλοι οι ενδιάμεσοι κόμβοι, ονομάζονται κόμβοι αποφάσεων. Δίπλα από κάθε κόμβο, βλέπουμε ποιος παίκτης έχει σειρά να παίξει όταν το παιχνίδι φτάσει σε αυτό το σημείο. Κόμβοι οι οποίοι βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο αντιπροσωπεύουν καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί ο παίκτης αυτός όταν κληθεί να παίξει και εξαρτώνται από τη στρατηγική που διάλεξε ο προηγούμενος από αυτόν παίκτης.



Σχήμα 3.2: Κατηγοριοποίηση Παιχνιδιών

### 3.3 Είδη παιχνιδιών Θεωρίας Παιγνίων

Ο καθορισμός του είδους του παιχνιδιού με βάση τη κατηγοριοποίηση που εισάγει η Θεωρία Παιγνίων είναι αναγκαίος για να γίνει η κατάλληλη επίλυση. Το διάγραμμα δέντρου στο Σχήμα 3.2 παρουσιάζει τις διάφορες πιθανές κατηγοριοποιήσεις. Φυσικά, δεν μπορεί να οριστεί ρεαλιστικό παιχνίδι στα Μικροδικτυα για κάθε υποκατηγορία παιχνιδιού. Στόχος μας είναι μία συγκεκριμένη αλληλεπίδραση να την κατατάξουμε σε ένα από τα φύλλα του δέντρου με σκοπό να χρησιμοποιήσουμε τα εργαλεία που μας προσφέρει η Θεωρία Παιγνίων για αυτή η υποκατηγορία και να αναλύσουμε το παιχνίδι. Ακολουθεί η εξήγηση των διάφορων κατηγοριών:

#### 1. *Single ή Multi Objective*

- (α') **Single Objective:** Στόχος του κάθε παίκτη είναι ένας και μόνο. Προσπαθεί να βελτιστοποιήσει μια συνάρτηση κέρδους όπως αυτή ορίζεται για κάθε παίκτη.
- (β') **Multi Objective:** Κάθε παίκτης μπορεί να έχει 2 ή και περισσότερους στόχους. Προσπαθεί να βελτιστοποιήσει τη συνδυασμένη συνάρτηση κέρδους του. Αυτού του είδους τα παιχνίδια ανήκουν στη κατηγορία όπου χρειάζεται η χρήση multi-objective τεχνικών βελτιστοποίησης όπως ορίζονται από τη Θεωρία Βελτιστοποίησης.

#### 2. *Ανταγωνιστικά ή Συνεργασίας*

- (α') **Ανταγωνιστικά (non cooperative):** Στην κατηγορία αυτή των παιχνιδιών ο κάθε παίκτης προσπαθεί να βελτιστοποιήσει τη δική του συνάρτηση κέρδους. Όπως υπονοεί και η ονομασία της κατηγορίας, η βελτιστοποίηση της συνάρτησης κέρδους του κάθε παίκτη μπορεί να γίνεται εις βάρος κάποιου άλλου παίκτη. Μια εκφυλισμένη κατηγορία αυτού του είδους παιχνιδιών είναι τα παιχνίδια "Μηδενικής άθροισης" (Zero Sum Games), στα οποία το κέρδος του κάθε παίκτη μεταφράζεται σε ζημιά κάποιων άλλων παικτών έτσι το άθροισμα Κέρδους και Ζημιάς να είναι ίσο με μηδέν.
- (β') **Συνεργασίας (cooperative):** Στην κατηγορία αυτή των παιχνιδιών παίκτες που έχουν τον ίδιο στόχο έχουν τη δυνατότητα να συνεργαστούν μεταξύ τους δημιουργώντας μια συνεργασία (coalition). Οποιαδήποτε κέρδη αποκομισθούν από αυτή τη συνεργασία μοιράζονται με κατάλληλο τρόπο ανάμεσα στους συμμετέχοντες. Είναι φυσικό πως κάθε παίκτης θα λάβει μέρος σε μια συνεργασία αν και μόνο αν με το να συνεργαστεί έχει μεγαλύτερα κέρδη από ότι να παίζει μόνος του. Έτσι, ο τρόπος διαμοιρασμού των κερδών στους συμμετέχοντες στη συνεργασία είναι πολύ σημαντικός και πρέπει να λαμβάνει υπόψη ότι κανένας παίκτης δε πρέπει είναι σε χειρότερη θέση (worse off) από ότι αν δεν ανήκε στη συνεργασία. Σε μια συνεργασία, όλοι οι συμμετέχοντες ακολουθούν την ίδια στρατηγική στο παιχνίδι.

#### 3. *Στατικά ή Δυναμικά*

- (α') **Στατικά:** Όλοι οι παίκτες ανακοινώνουν τη στρατηγική τους **ταυτόχρονα**. Σε αυτή τη κατηγορία **δε** λαμβάνουμε υπόψη προηγούμενα παιχνίδια, τις στρατηγικές και τα αποτελέσματα τους. Έτσι, ένας παίκτης δε μπορεί να "αντιδράσει" στη πραγματική στρατηγική κάποιου άλλου καθώς δεν τη γνωρίζει όταν αποφασίζει τη δική του.

(β') **Δυναμικά:** Η κατηγορία αυτή περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες παιχνιδιών.

- Παιχνίδια που συμβαίνουν σε γύρους: Κάθε παιχνίδι ολοκληρώνεται σε  $m$  γύρους. Για ένα παιχνίδι με 2 παίκτες αυτό παρουσιάζεται ως εξής: Ο 1<sup>ος</sup> παίκτης ανακοινώνει στο πρώτο γύρο τη στρατηγική του, αμέσως μετά, στο δεύτερο γύρο, ο 2<sup>ος</sup> παίκτης ανακοινώνει τη δική του στρατηγική πιθανότατα βασισμένος στη στρατηγική του 1<sup>ου</sup>. Στον επόμενο γύρο ο 1<sup>ος</sup> προσαρμόζει τη στρατηγική του και αυτό συνεχίζεται μέχρι το τέλος του παιχνιδιού ( $m$  φορές). Σε κάθε βήμα ο παίκτης μπορεί (δες υποκατηγορία 5β') να λάβει υπόψη του τους προηγούμενους γύρους του παιχνιδιού για να καθορίσει τη στρατηγική του. Στη θέση του παίκτη 1 μπορεί να είναι ομάδα παικτών που ανακοινώνουν ταυτόχρονα τις στρατηγικές τους και στη θέση του παίκτη 2 μια άλλη ομάδα που απαντάνε ταυτόχρονα στις στρατηγικές της 1<sup>ης</sup> ομάδας. Το κέρδος του παιχνιδιού για τον κάθε παίκτη (η ομάδα) αποτιμάται στο τέλος των  $m$  γύρων και είναι συνάρτηση όλων των γύρων.
- Επαναλαμβανόμενα παιχνίδια: Αυτά τα παιχνίδια μπορούν να οριστούν σαν μια σειρά από στατικά παιχνίδια. Σε κάθε παιχνίδι οι παίκτες ανακοινώνουν ταυτόχρονα τις στρατηγικές τους και αποτιμάται το κέρδος του παιχνιδιού για το κάθε παίκτη. Η διαφορά με τα στατικά παιχνίδια είναι ότι σε κάθε νέο παιχνίδι ( $m$ ) ο παίκτης μπορεί (δες υποκατηγορία 5β') να λάβει υπόψη τα προηγούμενα ( $m-1$ ) παιχνίδια, τις στρατηγικές και τα αποτελέσματα τους για να διαμορφώσει τη στρατηγική του στο συγκεκριμένο παιχνίδι.

#### 4. Πλήρης ή Ελλιπής Πληροφορίας

(α') **Πλήρους Πληροφορίας (Complete Information):** Σε αυτή τη κατηγορία παιχνιδιών ο κάθε παίκτης ξέρει κάθε στιγμή τη συνάρτηση κέρδους και τις διαθέσιμες στρατηγικές **όλων** των υπόλοιπων παικτών. Συνήθως αυτό μεταφράζεται σε πλήρη επικοινωνία και διάθεση πληροφοριών ανάμεσα στους παίκτες. Οι πληροφορίες αυτές μπορούν να περιλαμβάνουν πληθώρα δεδομένων. Είναι κατανοητό πως η πλήρης πληροφορία υπονοεί, συνήθως, την ύπαρξη ενός ισχυρού δικτύου επικοινωνίας, τη μετάδοση μεγάλου όγκου πληροφοριών και την επεξεργασία αυτών των πληροφοριών πριν από την επιλογή στρατηγικής από τον κάθε παίκτη. Επίσης, πρέπει όλοι οι συμμετέχοντες παίκτες να είναι διατεθειμένοι να μοιραστούν ευαίσθητα προσωπικά τους δεδομένα με τους υπόλοιπους παίκτες (αντιπάλους ή συνεργάτες).

(β') **Ελλιπούς Πληροφορίας (Incomplete Information):** Σε αυτή τη κατηγορία παιχνιδιών ο κάθε παίκτης δε γνωρίζει όλα τα δεδομένα για τους υπόλοιπους παίκτες. Ίσως γνωρίζει ορισμένα δεδομένα ίσως πάλι δε γνωρίζει τίποτα. Σε αυτού του είδους τα παιχνίδια η μεταφορά πληροφοριών είναι μικρή ή μηδαμινή. Σε αυτή τη κατηγορία παιχνιδιών εισέρχεται και η "φύση", η οποία αντιπροσωπεύει το παράγοντα της τυχαιότητας. Για παράδειγμα, η στρατηγική κάποιου παίκτη μπορεί να εξαρτάται από τον τύπο του παίκτη, τον οποίο όμως δε διαλέγει ο ίδιος και δε μπορεί να μεταβάλει. Έτσι, λέμε ότι η "φύση" επιλέγει τον τύπο του παίκτη και του τον ανακοινώνει στην αρχή του παιχνιδιού.

Όπως μπορεί κάποιος εύκολα να συμπεράνει, τα πιο πολύπλοκα και ενδιαφέροντα παιχνίδια είναι παιχνίδια Ελλιπούς Πληροφορίας. Η ύπαρξη αυτών των παιχνιδιών υπογορεύεται από την ίδια τη φύση των παιχνιδιών ή από τεχνικούς/οικονομικούς πε-

ριορισμούς. Οι παίκτες συνήθως δεν είναι διατεθειμένοι να μοιραστούν πληροφορίες με άλλους παίκτες (ανταγωνιστές ή και συνεργάτες) που μπορούν μετέπειτα να χρησιμοποιηθούν εναντίον τους. Μερικές φορές, η ταχύτητα και η μορφή των παιχνιδιών επιτρέπει μόνο την ανταλλαγή ουσιωδών πληροφοριών ενώ άλλες φορές το παιχνίδι επηρεάζεται από παράγοντες που δεν ελέγχονται από κανένα παίκτη (τυχαιότητα). Τέλος, τεχνικοί και οικονομικοί παράγοντες, όπως η εγκατάσταση ισχυρού και γρήγορου δικτύου επικοινωνίας όταν ο αριθμός των παικτών ή η απόσταση αυξάνεται πολύ και η επεξεργασία από το κάθε παίκτη τοπικά του φόρτου δεδομένων, κάνουν τη λειτουργία παιχνιδιών πλήρους πληροφoρίας μη εφικτή.

5. **Τέλειας ή Ατελούς Πληροφoρίας** Αυτές οι 2 υποκατηγορίες ορίζονται μόνο σε δυναμικά παιχνίδια καθώς αναφέρονται στη γνώση του ιστορικού του παιχνιδιού.

(α') **Τέλειας Πληροφoρίας (Perfect Information)**: Σε αυτή την υποκατηγορία παιχνιδιών ο κάθε παίκτης σε κάθε κίνησή του στο παιχνίδι γνωρίζει όλο το ιστορικό των προηγούμενων κινήσεων στο παιχνίδι. Δηλαδή γνωρίζει τις στρατηγικές που πραγματικά ακολούθησε ο κάθε παίκτης σε κάθε προηγούμενο γύρο ή παιχνίδι. Παρόλο που μοιάζουν, η πλήρης και η τέλεια πληροφoρία δεν είναι το ίδιο. Η πλήρης πληροφoρίας αναφέρεται στη γνώση της δομής του παιχνιδιού και των στόχων του κάθε παίκτη αλλά όχι κατ'ανάγκη γνώση των πραγματικών κινήσεων που έκανε ο κάθε παίκτης.

(β') **Ατελούς Πληροφoρίας (Imperfect Information)**: Σε αυτή την υποκατηγορία, τουλάχιστο ένας παίκτης σε κάποια κίνηση δε γνωρίζει όλο το ιστορικό των προηγούμενων γύρων ή παιχνιδιών.

Συνήθως, επικρατεί σύγχυση για τα παιχνίδια ελλιπούς αλλά τέλειας πληροφoρίας. Έτσι, θα παρουσιάσουμε ένα παράδειγμα τέτοιου παιχνιδιού. Σε μια παρτίδα σκάκι παίζουμε ενάντια σε έναν παίκτη ο οποίος θα πληρωθεί ένα χρηματικό ποσό αν συμβεί ένα συγκεκριμένο γεγονός στο παιχνίδι (π.χ. συγκεκριμένη τοποθέτηση κομματιών του σκακιού). Εμείς, σαν αντίπαλος του, δε γνωρίζουμε ποιο είναι αυτό το γεγονός. Σε αυτή τη περίπτωση έχουμε τέλεια πληροφoρία, αφού ξέρουμε κάθε κίνηση που έκανε ο αντίπαλος μας σε όλο το παιχνίδι. Παρόλα αυτά, αφού δε γνωρίζουμε τη συνάρτηση κέρδους του άλλου παίκτη, το παιχνίδι είναι ελλιπούς πληροφoρίας.

Γενικά, υπάρχουν 4 γενικές κλάσεις παιχνιδιών που συναντώνται συνήθως:

1. Στατικά παιχνίδια με πλήρη πληροφoρία
2. Στατικά παιχνίδια με ελλιπή πληροφoρία
3. Δυναμικά παιχνίδια με πλήρη πληροφoρία
4. Δυναμικά παιχνίδια με ελλιπή πληροφoρία

καθώς επίσης και τέσσερις έννοιες σημείου ισορροπίας Nash που αντιστοιχούν σε αυτές τις κλάσεις παιχνιδιών:

1. Σημείο ισορροπίας Nash
2. Σημείο ισορροπίας Bayesian Nash
3. Σημείο ισορροπίας subgame-perfect Nash
4. Σημείο ισορροπίας perfect Bayesian

Θα παρουσιάσουμε όσες έννοιες από αυτές χρειαστούν μέσα στο κείμενο καθώς θα τις συναντούμε. Στο παράρτημα θα παρουσιαστούν κάποια παιχνίδια από αυτές τις κλάσεις για τη καλύτερη κατανόησή τους.

### 3.4 Η Θεωρία Παιγνίων στα Οικονομικά

Οι οικονομολόγοι κάνουν χρήση της Θεωρίας Παιγνίων για να περιγράψουν ένα ευρύ φάσμα οικονομικών φαινομένων, όπως: δημοπρασίες, διαπραγματεύσεις, δίκαιη μοιρασιά, ολιγοπώλια, συστήματα ψηφοφορίας, προβλήματα προαγωγών σε εταιρίες, επιλογή φορολογιών από χώρες και πολλά άλλα. Η ανάλυση συνήθως επικεντρώνεται γύρω από το σημείο ισορροπίας σε ένα παιχνίδι. Ο τρόπος επίλυσης ενός προβλήματος βασίζεται στη λογική, στην ιδέα δηλαδή ότι κάθε συμμετέχοντας ακολουθεί μια στρατηγική που υποδηλώνεται από τους κανόνες της λογικής και δε θα κάνει κάποια επιλογή που να μειώνει το δικό του κέρδος. Έτσι, θεωρούμε ότι όλοι οι παίκτες θα ακολουθήσουν τη βέλτιστη στρατηγική εναντίον των αντιπάλων τους<sup>2</sup>.

### 3.5 Θεωρία Παιγνίων στην Ηλεκτρική Ενέργεια

Υποστηρίζεται ότι η αύξηση του ανταγωνισμού στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να βοηθήσει στην αύξηση των κερδών των καταναλωτών. Η ιδέα αυτή στηρίζεται σε αποτελέσματα από την εφαρμογή της θεωρίας παιγνίων. Η θεωρία Παιγνίων στην ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιείται κυρίως για δύο λόγους:

- **Αναγνώριση μη ανταγωνιστικών καταστάσεων στην αγορά ενέργειας (από τη πλευρά του διαχειριστή της αγοράς)** Τέτοιες μη ανταγωνιστικές καταστάσεις είναι αυτές που σε κάποιο συμμετέχοντα ή μια ομάδα έχει παραχωρηθεί από την αγορά σχετικό πλεονέκτημα συγκριτικά με τους υπόλοιπους παίκτες. Οι διαχειριστές αγορών ενέργειας πρέπει να αναγνωρίζουν και να διορθώνουν καταστάσεις στις οποίες κάποιες εταιρίες έχουν αποκτήσει "δύναμη αγοράς" (market power). Σε τέτοιες περιπτώσεις, οι εταιρίες (ή συνεργασίες εταιριών) αυτές, μπορούν να έχουν αρκετά μεγάλο μερίδιο στη παραγωγή (ή κατανάλωση) ώστε να συμπεριφέρονται σαν "καθοριστές τιμής" (price-setters). Έτσι, τα κέρδη αυτών των εταιριών υπερβαίνουν τα κέρδη σε κατάσταση τέλει ανταγωνισμού αλλά τα συνολικά κέρδη του συστήματος μειώνονται. Οι διαχειριστές πρέπει να μπορούν:
  - Αναγνωρίζουν πιθανές μυστικές συμφωνίες ανάμεσα σε συμμετέχοντες και τις στρατηγικές τους
  - Να υπολογίζουν τις συναλλαγές και τα κέρδη αυτών των μυστικών αυτών συμφωνιών
  - Να αποθαρρύνουν μυστικές συμφωνίες που μπορεί να μειώσουν τα συνολικά κέρδη της αγοράς
  - Να αναγνωρίζουν πιθανές συνεργασίες ανάμεσα στους συμμετέχοντες
  - Να ενθαρρύνουν συνεργασίες που θα αυξήσουν το συνολικό κέρδος της αγοράς
- **Παροχή υποστήριξης για την ελαχιστοποίηση ρίσκων στην επιλογή τιμών στην αγορά ενέργειας (από τη πλευρά του συμμετέχοντα στην αγορά)** Η αγορά ενέργειας σε πολλές χώρες βρίσκεται στο μεταβατικό στάδιο από μια πλήρως ελεγχόμενη αγορά ενέργειας (όπου η ρύθμιση είχε σαν κύριο στόχο τη μείωση του κόστους λειτουργίας του συστήματος), προς μία πλήρως απελευθερωμένη αγορά (όπου ο κάθε συμμετέχοντας έχει γνώμονα την αύξηση του κέρδους του, όπως

<sup>2</sup> «Δεν πρέπει να οικοδομούμε τις ελπίδες μας στην πεποίθηση ότι οι εχθροί θα κάνουν λάθη, αλλά στη δική μας Διορατικότητα». Αγόρευση Λακεδαιμόνιου Βασιλιά Αρχίδαμου, Θουκυδίδου Ιστορία

αυτό ορίζεται κάθε φορά). Σε μια τέτοια αγορά, οι συμμετέχοντες προσπαθούν να βρουν μια στρατηγική ή ένα σύνολο στρατηγικών που, λαμβάνοντας υπόψη τις στρατηγικές των υπόλοιπων συμμετεχόντων, να μεγιστοποιεί τα κέρδη τους ή τουλάχιστο να δίνει ένα "καλό αποτέλεσμα". Τη λύση ήρθε να δώσει η Θεωρία Παιγνίων, πάνω στην οποία βασίστηκαν πολλά μοντέλα προσομοίωσης της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας και της διαδικασίας προσφορών [9, 6, 23]. Με βάση τα μοντέλα αυτά γίνεται μια αρκετά καλή πρόβλεψη των στρατηγικών που πρέπει να ακολουθήσει ο κάθε συμμετέχοντας.

Στο παρελθόν, η Θεωρία Παιγνίων χρησιμοποιήθηκε επανειλημμένα στο τομέα της ηλεκτρικής ενέργειας:

- Λειτουργική ανάλυση μη εμπορικών μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας [16]
- Ανάλυση διαπραγματεύσεων ανάμεσα σε συμμετέχοντες στην αγορά ενέργειας [8]
- Μελέτη του προβλήματος συμπαραγωγής (cogeneration) με τη χρήση της κλάσης παιχνιδιών Stackelberg και εφαρμογής προσεγγιστικού αλγόριθμου για τον υπολογισμό του σημείου ισορροπίας[11]. Σκοπός της συμπαραγωγής είναι να ελαχιστοποιήσει το καθαρό κόστος της, δεδομένων των τιμών αγοράς και πώλησης
- Διαμοιρασμός του κόστους από μια συνεργασία σε ένα σύστημα ηλεκτρικής ενέργειας [3]
- Υπολογισμός βέλτιστων συναλλαγών ηλεκτρικής ενέργειας, σε διαφορετικές περιόδους, με σκοπό τη μείωση του κόστους λειτουργίας δικτύων [20]
- Χρήση στατικών μοντέλων συνεργασίας για πρόβλεψη πιθανών καταστάσεων σε βραχυπρόθεσμα "παιχνίδια" μεταφοράς ηλεκτρικής ενέργειας και καθορισμό τιμολογιακών πολιτικών [12]

Μια πιο λεπτομερής συζήτηση για τις μέχρι τώρα εφαρμογές της θεωρίας παιγνίων στα ΣΗΕ μπορεί να βρεθεί στα [21] και [22].





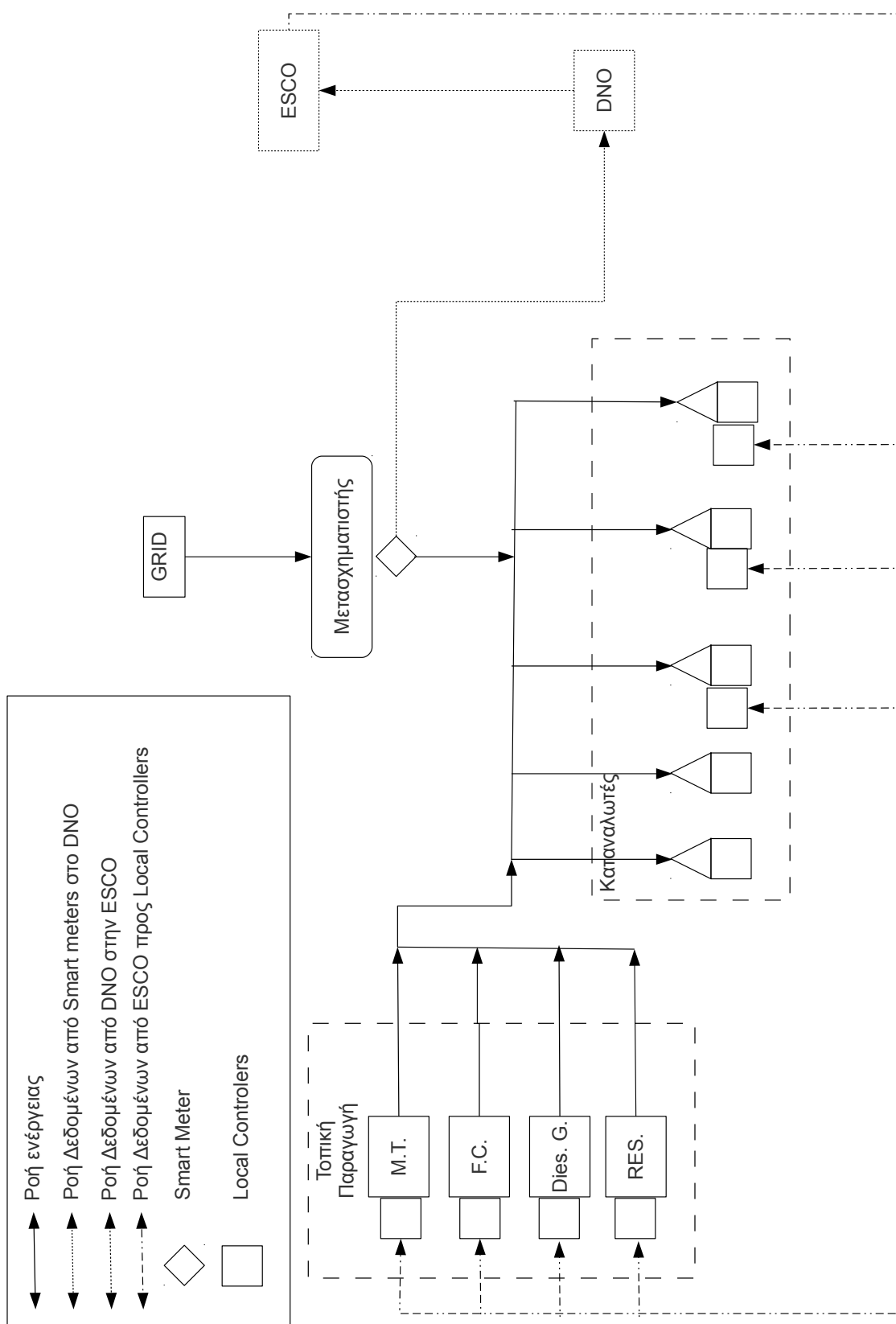
## Κεφάλαιο 4

# Λειτουργία Μικροδικτύου

Τα Μικροδίκτυα εμπίπτουν στη μεγαλύτερη κατηγορία των Smart Grids που σκοπό έχουν να ενσωματώσουν τη σύγχρονη ψηφιακή τεχνολογία στον αναλογικό κόσμο της ηλεκτρικής ενέργειας. Σκοπός των Smart Grids είναι η εξοικονόμηση ενέργειας, μείωση κόστους και αύξηση της αξιοπιστίας του δικτύου. Έτσι, υπερκαλύπτεται το δίκτυο διανομής ηλεκτρικής ενέργειας με ένα δίκτυο μεταφοράς δεδομένων και μετρήσεων που μας δίνει τη δυνατότητα εποπτείας και διαχείρισης του δικτύου. Με αυτό το τρόπο μπορούμε να επιτρέψουμε το χειρισμό συγκεκριμένων οικιακών συσκευών (όπως πλυντήρια) προγραμματίζοντας τη λειτουργία τους όταν η ζήτηση και η τιμή του ηλεκτρικού ρεύματος είναι χαμηλή, ενώ να απενεργοποιούνται κάποιες συσκευές σε ώρες αιχμής, όταν η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας είναι ακριβή. Τον ίδιο έλεγχο μπορούμε να επιτρέψουμε και στις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, δίνοντας τη δυνατότητα μεταβολής της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τις ανάγκες του Μικροδικτύου.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιαστούν δύο μοντέλα λειτουργίας του Μικροδικτύου. Αρχικά θα παρουσιαστεί η δομή των μοντέλων, οι συμμετέχοντες σε αυτό καθώς και οι διάφορες αλληλεπιδράσεις που έχουν μεταξύ τους. Θα γίνει προσπάθεια να εξηγηθούν όσο το δυνατόν καλύτερα τεχνικές και οικονομικές πτυχές των μοντέλων. Στα δύο αυτά μοντέλα καταλήξαμε μετά από έρευνα και έγινε προσπάθεια να είναι βιώσιμα. Το πρώτο μοντέλο σκοπό είναι το Βραχυπρόθεσμο μοντέλο λειτουργίας (Σχήμα 4.1) ενώ το δεύτερο το μακροπρόθεσμο (Σχήμα 4.2). Η κύρια τεχνική διαφορά ανάμεσα στα δύο μοντέλα είναι η ύπαρξη συστήματος Smart Metering που μεταφέρει τις μετρήσεις από τους πελάτες του μικροδικτύου (καταναλωτές ή DER) στον DNO και επιτρέπει την εφαρμογή συστήματος **μεταβλητής τιμής χρέωσης**.

Όπως βλέπουμε και στα δυο σχήματα (4.1 και 4.2), στα μοντέλα αυτά συμμετέχουν οι καταναλωτές, η τοπική παραγωγή (DG/ DER), η ESCO, το δίκτυο (GRID) και ο DNO. Η ESCO λειτουργεί σαν εταιρία διανομής ηλεκτρικής ενέργειας (retailer) αλλά ταυτόχρονα έχει και τη διαχείριση διεσπαρμένης παραγωγής (DG/ DER). Έτσι, έχει συμφωνία με καταναλωτές (οικιακούς ή βιομηχανικούς) για να τους παρέχει την απαιτούμενη ηλεκτρική ενέργεια αλλά και με μικρούς παραγωγούς (φωτοβολταϊκά σε στέγες, CHP, μικρές ανεμογεννήτριες, κυψέλες υδρογόνου κλπ) για να διαχειρίζεται τη λειτουργία των μονάδων αυτών και να αγοράζει ηλεκτρική ενέργεια από αυτούς. Ο DNO έχει τη γενική διαχείριση και εποπτεία του Μικροδικτύου. Σε αυτά τα μοντέλα και στο επίπεδο της μελέτης που κάνουμε, θεωρούμε ότι σε κάθε Μικροδίκτυο δραστηριοποιείται μόνο μία ESCO.



Σχήμα 4.1: Βραχυπρόθεσμο μοντέλο λειτουργίας Μικροδικτύου

Το κύριο χαρακτηριστικό των μοντέλων αυτών είναι η λειτουργία ενός συστήματος μεταβλητών τιμών αγοράς και πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στο Μικροδίκτυο από την ESCO. Χρησιμοποιώντας κάποιου είδους Τοπικούς Ελεγκτές οι οποίοι εγκαθίστανται στους καταναλωτές και τους παραγωγούς τους Μικροδικτύου και οι οποίοι είναι δέκτες αυτών των μεταβαλλόμενων τιμών, η ESCO έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει όταν χρειάζεται τη ροή ισχύος και τελικώς τη καταναλισκόμενη ενέργεια που εισέρχεται στο Μικροδίκτυο από το δίκτυο μεταφοράς ενέργειας μέσω του μετασχηματιστή. Με αυτό τον τρόπο, προσφέρεται στην ESCO ένα εργαλείο διαχείρισης του Μικροδικτύου αποδίδοντας σε αυτό ελαστικότητα και ευελιξία.

## 4.1 DNO

Ο DNO έχει την ευθύνη για την ασφαλή λειτουργία, ανάπτυξη και συντήρηση του Μικροδικτύου. Επιπλέον, ο DNO εγκαθιστά και διατηρεί ένα σύστημα Smart Metering στο Μικροδίκτυο. Στο βραχυπρόθεσμο μοντέλο ο μετασχηματιστής του Μικροδικτύου εφοδιάζεται με ένα σύστημα που μετράει σε πραγματικό χρόνο την ενέργεια που περνάει από το ΜΣ και μεταδίδει τα δεδομένα στο DNO. Στο μακροπρόθεσμο μοντέλο, όλοι οι πελάτες του Μικροδικτύου (καταναλωτές ή παραγωγοί) εφοδιάζονται με μια συσκευή Smart Meter (η οποία ανήκει στον DNO) ικανή να παίρνει κάποιες μετρήσεις που αφορούν τη κατανάλωση ή παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας και να τις μεταφέρει σε πραγματικό χρόνο στον DNO. Ο DNO μαζεύει τα δεδομένα αυτά και μπορεί να χειριστεί κατάλληλα τους μετρητές αυτούς, διακόπτοντας ή περιορίζοντας τη ροή ηλεκτρικής ενέργειας αν παραστεί ανάγκη. Ο DNO δεν έχει δικαίωμα και δε μπορεί να επέμβει στο εσωτερικό των εγκαταστάσεων των πελατών και να χειριστεί ή να επηρεάσει με οποιοδήποτε τρόπο συσκευές των καταναλωτών. Τέλος, ο DNO παραχωρεί πρόσβαση στα δεδομένα κάποιων πελατών του Μικροδικτύου (καταναλωτών ή παραγωγών) στην ESCO αν αυτή προσκομίσει συμβόλαια με τους πελάτες αυτούς που της το επιτρέπουν.

## 4.2 Καταναλωτές

Η μικροοικονομική θεωρία προτείνει ότι οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας, όπως οι καταναλωτές άλλων προϊόντων, αυξάνουν τη κατανάλωσή τους μέχρι το σημείο που το οριακό κέρδος τους από την ηλεκτρική ενέργεια είναι ίσο με τη τιμή που πρέπει να πληρώσουν. Για παράδειγμα, μια βιοτεχνία δε θα αυξήσει τη παραγωγή της πάνω από το σημείο που το κόστος σε ηλεκτρική ενέργεια κάνει τα προϊόντα της μη ανταγωνιστικά. Ή ακόμη, ένας οικιακός καταναλωτής, μπορεί να αποφασίσει το χειμώνα να φορέσει κάποια επιπλέον ρούχα παρά να δυναμώσει τη θέρμανση και να αντιμετωπίσει μια δυσάρεστη έκπληξη στο λογαριασμό του.

Αν αυτοί οι βιομηχανικοί, εμπορικοί και οικιακοί καταναλωτές πληρώνουν μια σταθερή τιμή για κάθε KWh καταναλώνουν τότε είναι προστατευμένοι απέναντι στις διακυμάνσεις της αγοράς, έτσι, η κατανάλωσή τους εξαρτάται μόνο από το κύκλο των δραστηριοτήτων τους και δεν έχουν κανένα λόγο να τη μεταβάλουν. Τι γίνεται όταν αυτή η σταθερή τιμή χρέωσης μεταβάλλεται πιο γρήγορα; Εμπειρικές μελέτες έχουν δείξει ότι η ελαστικότητα της ζήτησης έναντι βραχυπρόθεσμων μεταβολών της τιμής είναι μικρή. Σε ένα διάγραμμα τιμής με ζήτηση, η κλίση της ζήτησης είναι πολύ απότομη. Ο καθορισμός της καμπύλης ζήτησης με μεγάλη ακρίβεια είναι πολύ δύσκολος.

Δύο οικονομικοί και κοινωνικοί παράγοντες μπορούν να εξηγήσουν αυτή τη μικρή ελαστικότητα. Πρώτα, το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα μικρό ποσοστό του

συνολικού κόστους παραγωγής ενός βιομηχανικού ή εμπορικού καταναλωτή και επίσης αποτελεί μικρό ποσοστό του κόστους ζωής οικιακών καταναλωτών. Την ίδια στιγμή, η ηλεκτρική ενέργεια θεωρείται απαραίτητο αγαθό τόσο στη παραγωγή όσο και στη ποιότητα ζωής των καταναλωτών. Έτσι, λίγοι καταναλωτές θα αποφασίσουν να κόψουν κάποιο από το φορτίο τους θυσιάζοντας την άνεση και ευκολία τους με σκοπό τη μείωση του λογαριασμού τους κατά κάποια εκατοστά. Ο δεύτερος παράγοντας είναι ιστορικός. Από την πρώτες μέρες της εμπορικής παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας πριν ένα περίπου αιώνα, η ηλεκτρική ενέργεια διαφημιζόταν σαν ένα προϊόν «με εύκολη πρόσβαση και πάντα διαθέσιμο». Αυτή η ιδέα είναι τόσο ριζωμένη στις εντυπώσεις του κόσμου που μπορεί κανείς να πει ότι λίγοι άνθρωποι πια κάνουν ανάλυση κόστους/οφέλους κάθε φορά που ανάβουν τα φώτα! Μια σημαντική τιμή σε αυτές τις αναλύσεις είναι η «τιμή χαμένου φορτίου» (Value of Lost Load), η οποία υπολογίζεται μέσα από δημοσκοπήσεις ανάμεσα στους καταναλωτές και αναπαριστά τη μέση τιμή ανα MWh που οι καταναλωτές είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν για να αποφύγουν την αποσύνδεσή τους χωρίς προειδοποίηση.

#### 4.2.1 Μεταβαλλόμενη τιμή αγοράς και χρήση Τοπικών Ελεγκτών

Στα δύο μοντέλα, η εταιρία ESCO εγκαθιστά σε κάποιους καταναλωτές ένα τοπικό ελεγκτή ο οποίος δέχεται ένα σήμα από την εταιρία το οποίο αντιπροσωπεύει ένα σήμα ελέγχου του φορτίου (1<sup>ο</sup> μοντέλο) ή τη τρέχουσα τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας (2<sup>ο</sup> μοντέλο). Ο ελεγκτής αυτός με τη σειρά του έχει τον έλεγχο ορισμένων συσκευών ή μηχανημάτων του καταναλωτή. Επίσης, στη διάθεσή του ο τοπικός ελεγκτής έχει στοιχεία που έχουν να κάνουν με τη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και τη κατάσταση των συσκευών ή μηχανημάτων των οποίων έχει τη διαχείριση. Έτσι, δεχόμενος ο τοπικός ελεγκτής το σήμα και χρησιμοποιώντας τις επιπλέον πληροφορίες που έχει, μπορεί με χειρισμούς να ενεργοποιήσει ή απενεργοποιήσει κάποιες συσκευές μεταβάλλοντας ή προγραμματίζοντας έτσι τη κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας.

Σκοπός της εγκατάστασης των ελεγκτών αυτών είναι να βελτιώσουμε την απόκριση των καταναλωτών σε μεταβολές της τιμής. Με άλλα λόγια να αυξήσουμε (κατ'απόλυτη τιμή), τεχνητά στο πρώτο μοντέλο ή πραγματικά στο δεύτερο, την ελαστικότητα του φορτίου των καταναλωτών έναντι της τιμής και να δημιουργήσουμε "Price-Responsive Demand". Αναλυτικότερα θα δούμε τις πρακτικές και τους ελέγχους στους καταναλωτές στο υποκεφάλαιο 5.8.

### 4.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή (DER/DG)

Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής είναι μονάδες παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας μικρού μεγέθους (συνήθως 3 kW μέχρι 100 kW) που σκοπό έχουν να προσφέρουν μια εναλλακτική λύση ή να ενισχύσουν τα παραδοσιακά συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας. Διάφοροι λόγοι που ενισχύουν την εγκατάσταση τέτοιων μονάδων παρουσιάστηκαν στο 2.2 και έχουν να κάνουν με την ευελιξία, το χαμηλό κόστος συντήρησης, τη χαμηλή ρύπανση, υψηλή απόδοση κλπ. Το συνηθισμένο πρόβλημα με αυτές τις μονάδες στο παρελθόν ήταν το ψηλό κόστος. Σήμερα όμως, τα σύγχρονα ενσωματωμένα συστήματα (embedded systems) που προσφέρουν αυτοματοποιημένες λειτουργίες και η διάδοση τέτοιων μονάδων έχει μειώσει το κόστος, κάνοντας τες βιώσιμες. Παραδείγματα τέτοιων μονάδων είναι μονάδες συμπαραγωγής θερμότητας-ηλεκτρισμού (CHP), κυψέλες καυσίμου, μικροτουρμπίνες (που τροφοδοτούνται με φυσικό αέριο), μικρά φωτοβολταϊκά συστήματα, μικρά αιολικά συστήματα (μικρές ανεμογεννήτριες) κλπ

Τέτοιες μονάδες, συνήθως, εγκαθίσταντο για την ικανοποίηση αναγκών του ίδιου του ιδιοκτήτη της μονάδας ή με κάποια συμφωνία με τον DNO ώστε να πωλούν όλη τη παραγόμενη ενέργειά τους στο δίκτυο χωρίς τη δυνατότητα όμως κάποιου ελέγχου. Παράδειγμα είναι τα μικρά φωτοβολταϊκά στις στέγες που όλη τους η παραγωγή εγχέεται στο δίκτυο χωρίς να μπορεί ο διαχειριστής του δικτύου να κάνει οποιονδήποτε έλεγχο. Αυτή όμως η ρύθμιση εισήγαγε περιορισμούς στη ποσότητα εγκατεστημένης ισχύος από DG/ DER καθώς η μη δυνατότητα ελέγχου της παραγωγής οδηγεί σε προβλήματα ασφάλειας του δικτύου.

#### **4.3.1 Τοπικός Ελεγκτής και μεταβλητή τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας**

Με την εγκατάσταση των τοπικών ελεγκτών και με τη λειτουργία ενός συστήματος μεταβλητών τιμών πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας από τις DER στην ESCO μπορούμε να έχουμε διαχείριση και έλεγχο των μονάδων αυτών. Ο τοπικός ελεγκτής της κάθε μονάδας είναι προγραμματισμένος να λειτουργεί για τη συγκεκριμένη μονάδα. Λαμβάνοντας έτσι τη τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας, ο κάθε τοπικός ελεγκτής μπορεί να μεταβάλει τη παραγωγή της μονάδας κατάλληλα έτσι ώστε πετύχει κάποιους στόχους. Επίσης, δίνεται η δυνατότητα ανάπτυξης οικονομικής δραστηριότητας σε ιδιώτες ή μικρές επιχειρήσεις με την εγκατάσταση DG/ DER. Οι ιδιοκτήτες των μονάδων αυτών, ερχόμενοι σε συμφωνία με την ESCO/Aggregator μπορούν να πωλούν τη παραγωγή τους σε κερδοφόρες τιμές και με αυτοματοποιημένο τρόπο. Αναλυτικότερα θα δούμε τις πρακτικές και τους ελέγχους στις DER στο 5.7.

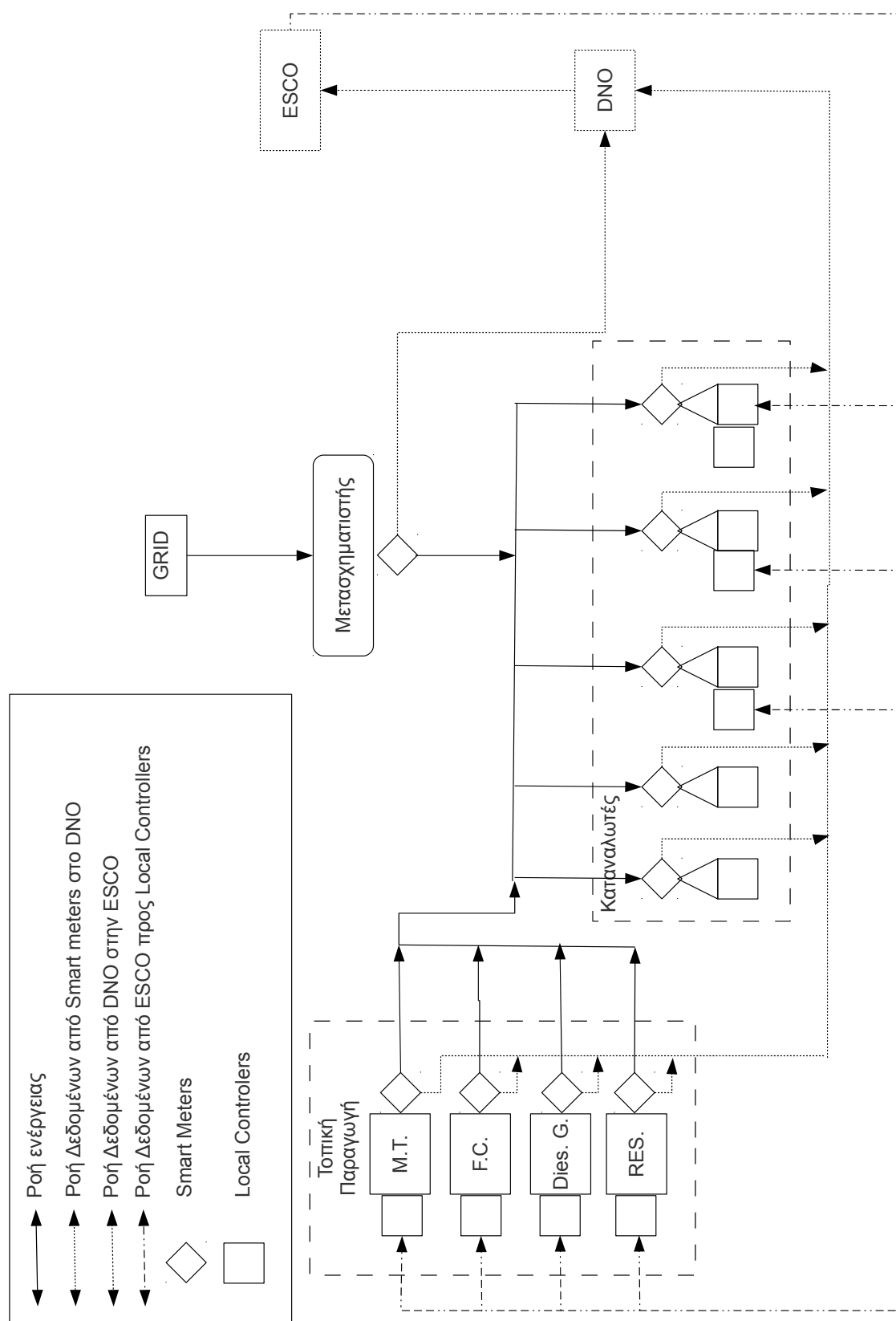
### **4.4 ESCO/Aggregator**

Καταναλωτές που το μέγιστο φορτίο τους είναι της τάξης των MW μπορούν να γλιτώσουν αρκετά χρήματα έχοντας το κατάλληλο προσωπικό και λογισμικό που να κάνει πρόβλεψη φορτίου και να συναλλάσσεται στις αγορές ενέργειας για να ικανοποιήσει το φορτίο σε χαμηλές τιμές. Τέτοιοι καταναλωτές μπορούν να συμμετέχουν απευθείας και ενεργά στις αγορές. Από την άλλη, τέτοιοι είδους συναλλαγές δεν είναι κερδοφόρες για μικρούς καταναλωτές αφού το κόστος πρόβλεψης και συμμετοχής στις διάφορες αγορές ηλεκτρικής ενέργειας θα ήταν καταστροφικό για αυτούς. Έτσι, οι εταιρίες ESCO, μεταξύ άλλων, αναλαμβάνουν να γεφυρώσουν αυτό το κενό μεταξύ των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και των μικρών καταναλωτών.

Η πρόκληση για τις εταιρίες αυτές είναι να αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια σε μεταβαλλόμενη τιμή στη χοντρική αγορά ενέργειας και να τη πουλάνε σε σταθερή ή ελαφρά μεταβαλλόμενη τιμή στη λιανική. Έτσι, τυπικά, θα χάνουν χρήματα σε περιόδους ψηλών τιμών στην αγορά και θα κερδίζουν σε περιόδους χαμηλών. Για να έχει κέρδος η ESCO πρέπει η μέση τιμή της τιμής αγοράς να είναι μικρότερη από τη τιμή που χρεώνει τους πελάτες της. Αυτό δεν είναι πάντα εύκολο, διότι παραδοσιακά η ESCO (λειτουργώντας σαν retailer) δεν είχε κάποιο έλεγχο, σε πραγματικό χρόνο, στη κατανάλωση ενέργειας των πελατών του. Αυτό έρχεται να διορθώσει το μοντέλο αυτό με την εγκατάσταση των τοπικών ελεγκτών στους καταναλωτές (δες 4.4.3).

Επίσης, παραγωγοί με μικρή εγκατεστημένη ισχύ, της τάξης των μερικών kW, δεν μπορούν να λάβουν μέρος στις μεγάλες αγορές ενέργειας (δες 4.4.2) όπου οι συναλλαγές που γίνονται είναι της τάξης των δεκάδων ή εκατοντάδων MW. Η αγορά κατάλληλου εξοπλισμού και λογισμικού για συμμετοχή στις αγορές αυτές είναι οικονομικά ασύμφορη για τους μικρούς

παραγωγούς. Η ESCO αναλαμβάνει έτσι τη διαχείριση και λειτουργία τέτοιων μικρών μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής αγοράζοντας την ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται η ίδια. Με αυτό το τρόπο έχει κάποιου είδους αυτονομία και ευελιξία την οποία της δίνουν οι μικρές αυτές ελεγχόμενες μονάδες παραγωγής.



Σχήμα 4.2: Μακροπρόθεσμο μοντέλο λειτουργίας Μικροδικτύου

#### 4.4.1 Πρόβλεψη φορτίων και Διεσπαρμένης Παραγωγής

Η ESCO προσπαθεί να προβλέψει με όσο το μεγαλύτερη ακρίβεια το φορτίο των καταναλωτών της. Έτσι, αγοράζει ενέργεια στις διάφορες αγορές για να καλύψει τη προβλεπόμενη κατανάλωση των πελατών του. Η ESCO έχει κίνητρο να καταλάβει όσο το δυνατόν καλύτερα τον κύκλο δραστηριότητας των καταναλωτών της. Με την εγκατάσταση των Smart Meters στους καταναλωτές του ΜΔ στο μακροπρόθεσμο μοντέλο (Σχήμα 4.2), μπορούν να γίνονται μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο στο καταναλωτή και να μεταδίδονται πίσω στην ESCO (μέσω του DNO). Επίσης, με την εγκατάσταση των τοπικών ελεγκτών μπορούν να καταγράφονται πιο λεπτομερή στοιχεία για τον καταναλωτή και μπορούν να ξεχωρίζουν κατηγορίες φορτίων καθώς και χρονικά διαστήματα κατανάλωσης. Τέλος, μπορούν να καταγράφονται και άλλα στοιχεία, όπως θερμοκρασία νερού, θερμοκρασία χώρου, επίπεδο νερού στο ντεπόζιτο κλπ. Αυτά τα δεδομένα σε συνδυασμό με μετεωρολογικά, αστρονομικά, οικονομικά και πολιτιστικά δεδομένα, μπορούν, με τη χρήση κατάλληλου λογισμικού, να βοηθήσουν στη πρόβλεψη του φορτίου με τεράστια ακρίβεια. Σε αυτή την ακρίβεια συμβάλει η μικρή γεωγραφική διασπορά ενός μικροδικτύου καθώς επίσης και η παραδοχή της λειτουργίας στο μικροδίκτυο μόνο μιας ESCO.

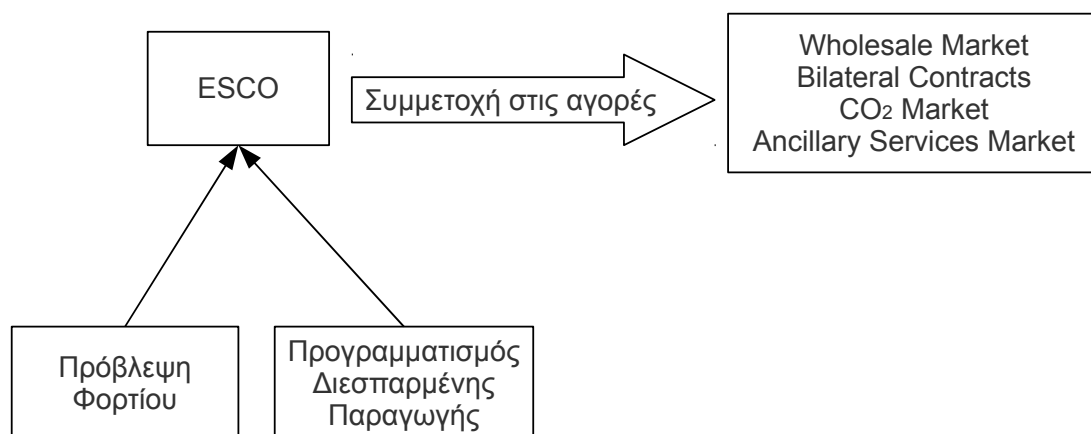
Επιπρόσθετα, πρέπει να γίνεται πρόβλεψη και της διεσπαρμένης παραγωγής. Σε κάποιες μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής, όπως: φωτοβολταϊκά, μικρές ανεμογεννήτριες, CHP κλπ η παραγόμενη ενέργεια εξαρτάται άμεσα από τις καιρικές συνθήκες. Πρέπει να γίνεται πρόβλεψη της παραγόμενης ενέργειας από αυτές τις μονάδες, καθώς επίσης και σχεδιασμός της λειτουργίας των υπόλοιπων μονάδων (μικροτουρμπίνες, fuel cell κλπ) έτσι ώστε να αφαιρείται η τοπική παραγωγή από τη συνολική προβλεπόμενη κατανάλωση του μικροδικτύου και μόνο το υπολειπόμενο φορτίο να αγοράζεται στις μεγάλες αγορές ενέργειας. Σκοπός του προγραμματισμού αυτού είναι η τοπική παραγωγή σε πραγματικό χρόνο να λειτουργεί σε ένα σημείο όπου η ESCO να έχει τη δυνατότητα μεταβολής της τοπικής παραγωγής (αύξηση ή μείωση) όταν αυτό χρειαστεί και επίσης ο συνολικός χρόνος λειτουργίας της εκάστοτε DER να καθιστά κερδοφόρα την εγκατάσταση και λειτουργία της.

#### 4.4.2 Συμμετοχή στις αγορές Ηλεκτρικής Ενέργειας

Όπως είπαμε, η ESCO κάνει πρόβλεψη φορτίου για τους καταναλωτές της και πρόβλεψη/σχεδιασμό για τις μονάδες DER στο Μικροδίκτυο. Έτσι, συνδυάζοντας κατάλληλα τα δεδομένα βρίσκει πόση ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να αγοράσει στις μεγάλες αγορές ενέργειας για να καλύψει τη κατανάλωση των πελατών της. Καθώς προς το παρόν δεν είναι οικονομικό να αποθηκεύουμε μεγάλες ποσότητες ηλεκτρικής ενέργειας, η ενέργεια που καταναλώνεται πρέπει να παράγεται τη στιγμή που καταναλώνεται. Οι συναλλαγές έτσι ηλεκτρικής ενέργειας αναφέρονται πάντα σε συγκεκριμένο ποσό MWh που πρέπει να παραδοθεί σε συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Το διάστημα αυτό που γίνεται ο προγραμματισμός είναι συνήθως μια ώρα, μισή ώρα ή δεκαπέντε λεπτά, ανάλογα με τη χώρα ή τη περιοχή στην οποία βρίσκεται η αγορά. Αφού η ηλεκτρική ενέργεια που παραδίδεται σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο δεν είναι το ίδιο αγαθό με την ηλεκτρική ενέργεια που παραδίδεται σε άλλη περίοδο, η τιμή συνήθως είναι διαφορετική σε κάθε περίοδο. Παρακάτω γίνεται μια μικρή περιγραφή των αγορών οι οποίες θεωρούμε ότι λειτουργούν στο μοντέλο που μελετάμε και στις οποίες λαμβάνει μέρος η ESCO.

1. **Διμερή Συμβόλαια (Bilateral Trading):** Στα διμερή συμβόλαια συμμετέχουν μόνο ο αγοραστής και ο πωλητής χωρίς την επίβλεψη ή επέμβαση τρίτων. Ανάλογα με το διαθέσιμο χρόνο και τις ποσότητες που ορίζει το συμβόλαιο έχουμε 3 είδη συμβολαίων:





Σχήμα 4.3: Συμμετοχή στις αγορές ηλεκτρικής ενέργειας

- **Μακροπρόθεσμα συμβόλαια (long-term contracts):** Αφορούν τη πώληση μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας κατά τη διάρκεια μεγάλων χρονικών περιόδων (αρκετούς μήνες ή χρόνια). Λόγο του ψηλού κόστους της συναλλαγής που συνδέεται με τις διαπραγματεύσεις ενός τέτοιου συμβολαίου, αυτό είναι βιώσιμο μόνο όταν και τα δυο μέρη είναι διατεθειμένα να αγοράσουν ή πωλήσουν τεράστιες ποσότητες ενέργειας.
- **Βραχυπρόθεσμα συμβόλαια (over the counter):** Αυτές οι συναλλαγές περιλαμβάνουν μικρότερες ποσότητες ενέργειας σε μικρότερη χρονική περίοδο. Συνήθως, καθορίζεται ένα προφίλ για το ποσό της ενέργειας που θα παραδοθεί σε διαφορετικές χρονικές περιόδους της ημέρας ή της βδομάδας.
- **Ηλεκτρονικό Εμπόριο (electronic trading):** Οι συμμετέχοντες εισάγουν σε ένα αυτοματοποιημένο ηλεκτρονικό σύστημα προσφορές για να αγοράσουν ή να πωλήσουν ενέργεια. Όλοι οι συμμετέχοντες μπορούν να παρατηρούν τις προσφορές αυτές αλλά δε γνωρίζουν τη ταυτότητα του συμμετέχοντα που κατέθεσε τη κάθε προσφορά. Όταν μια προσφορά αγοράς και μια προσφορά πώλησης ταιριαστούν από το σύστημα, σχηματίζεται αυτόματα μια συμφωνία και ενημερώνονται τα δυο μέρη για τις υποχρεώσεις τους. Το σύστημα αυτό είναι πολύ γρήγορο και φτηνό για συμμετοχή. Παραδείγματα αυτού του είδους είναι το European Energy Exchange AG, Energy Exchange Austria κλπ

Το πιο σημαντικό χαρακτηριστικό των διμερών συμβολαίων είναι ότι η τιμή της κάθε συναλλαγής τίθεται ανεξάρτητα από τους συμμετέχοντες. Δεν υπάρχει 'επίσημη' τιμή και οι λεπτομέρειες των συναλλαγών συνήθως δεν ανακοινώνονται.

2. **Pool Market:** Όταν ο ανταγωνισμός στις συναλλαγές ηλεκτρικής ενέργειας ήταν στα αρχικά του στάδια, τα διμερή συμβόλαια φαίνονταν πολύ απομακρυσμένα από το μέχρι τότε μοντέλο. Έτσι, ανταγωνιστικές αγορές ενέργειας δημιουργήθηκαν όπου όλοι οι παραγωγοί και αγοραστές μαζεύονται και οι συναλλαγές γίνονται με συγκεντρωτικό τρόπο. Οι αγορές αυτές έχουν τη ρίζα τους στα αρχικά μοντέλα που χρησιμοποιούσαν οι μονοπωλιακές εταιρίες για τον προγραμματισμό της παραγωγής.

Αντί να βασιζόμαστε στις αλληλεπιδράσεις των παραγωγών με τους καταναλωτές για να ισορροπήσει η αγορά, οι αγορές αυτές (pool) προσφέρουν ένα μηχανισμό για να

καθορίζεται αυτό το σημείο ισορροπίας με ένα συστηματικό τρόπο. Παρότι υπάρχουν πολλές παραλλαγές, η αγορά pool έχει πάντα τα εξής χαρακτηριστικά:

- Οι παραγωγοί υποβάλουν προσφορές (bids) για τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι προσφορές αποτελούνται από το συνδυασμό ποσού ενέργειας και τιμής στην οποία είναι διατεθειμένοι να πουλήσουν. Οι προσφορές αυτές κατατάσσονται σε αύξουσα σειρά με βάση τη τιμή πώλησης. Έτσι, δημιουργείται η καμπύλη της τιμής των προσφορών ως προς την αθροιστική ποσότητα ενέργειας που μπορεί να παραχθεί για την κάθε τιμή. Αυτή ονομάζεται **καμπύλη προσφοράς** της αγοράς.
- Παρόμοια, η καμπύλη ζήτησης μπορεί να σχηματιστεί ζητώντας από τους καταναλωτές να υποβάλουν προσφορές καθορίζοντας το ποσό της ενέργειας και τη τιμή που είναι διατεθειμένοι να δώσουν για αυτό, για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο υπό μελέτη. Αυτές τις προσφορές τις κατατάσσουμε σε φθίνουσα σειρά τιμής. Έτσι, μπορεί να δημιουργηθεί μια καμπύλη της τιμής των προσφορών ως προς την αθροιστική ποσότητα ενέργειας των καταναλωτών.
- Το σημείο τομής των δύο αυτών τεχνητών καμπύλων προσφοράς και ζήτησης αναπαριστά το σημείο ισορροπίας της αγοράς. Όλες οι προσφορές για παραγωγή μικρότερες από τη τιμή του σημείου ισορροπίας (οριακή τιμή εκκαθάρισης) γίνονται δεκτές και οι παραγωγοί ενημερώνονται να παράξουν το αντίστοιχο ποσό ενέργειας. Παρόμοια, όλες οι προσφορές από καταναλωτές με τιμή μεγαλύτερη ή ίση από την οριακή τιμή εκκαθάρισης ενημερώνονται να καταναλώσουν το αντίστοιχο ποσό ενέργειας.
- Η τιμή εκκαθάρισης της αγοράς ισούται με τη τιμή που θα χρειαζόταν για να παραχθεί μια επιπλέον MWh ηλεκτρικής ενέργειας και γιαυτό ονομάζεται οριακή τιμή συστήματος. Οι παραγωγοί πληρώνονται σε αυτή τη τιμή για κάθε MWh που παράγουν και οι καταναλωτές πληρώνουν αυτή τη τιμή για κάθε MWh που καταναλώνουν, ανεξάρτητα από τις προσφορές που έκαναν στην αγορά.

Ο καθορισμός της τιμής εκκαθάρισης σαν πληρωμή για τη παραγωγή και κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας ίσως φαίνεται παράλογος με πρώτη ματιά. Γιατί οι παραγωγοί που θα ήταν διατεθειμένοι να πληρωθούν λιγότερα για τη παραγωγή τους (με βάση τις προσφορές τους) να πληρωθούν σε μεγαλύτερη τιμή; Γιατί να μην πληρωθούν στη τιμή της προσφοράς τους μειώνοντας έτσι τη μέση τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας προς όφελος των καταναλωτών; Ο κύριος λόγος είναι ότι μια τέτοια διευθέτηση θα αποθάρρυνε τους παραγωγούς από το να κάνουν προσφορά κοντά στο οριακό κόστος παραγωγής τους. Όλοι οι παραγωγοί θα προσπαθούσαν να μαντέψουν τη τιμή εκκαθάρισης και να κάνουν προσφορά ελάχιστα κάτω από αυτή έτσι ώστε να αυξήσουν τα κέρδη τους. Στη καλύτερη περίπτωση έτσι η τιμή θα παρέμενε ανεπηρέαστη. Αλλά, ορισμένοι χαμηλού κόστους παραγωγοί κάνοντας λάθος στη πρόβλεψή τους θα έμεναν έξω από την αγορά μερικές φορές και στη θέση τους θα έμπαιναν παραγωγή πιο ψηλού κόστους. Έτσι, από τη μια η τιμή θα αυξανόταν ενώ από την άλλη ένας τέτοιος σχεδιασμός δεν θα ήταν αποδοτικός. Τέλος, οι παραγωγοί θα αύξαναν τις τιμές τους ελάχιστα έτσι ώστε να αποζημιωθούν για το ρίσκο λόγω αβεβαιότητας της τιμής.

**Παράδειγμα αγοράς Pool:** Έστω ότι σε μία αγορά Pool για ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μίας ώρας έγιναν οι προσφορές από παραγωγούς και καταναλωτές

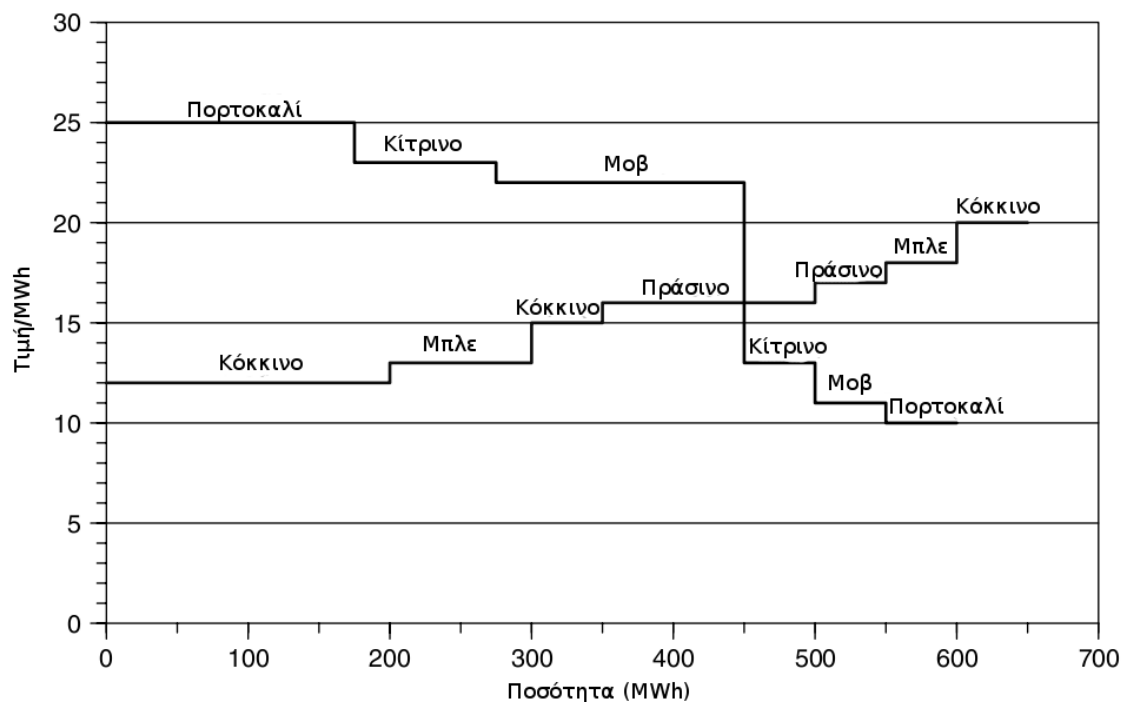
που φαίνονται στον πίνακα 4.1. Οι προσφορές αυτές αθροίζονται κατάλληλα και σχηματίζονται οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης που βλέπουμε στο σχήμα 4.4. Από το σχήμα έτσι βρίσκουμε την οριακή τιμή εκκαθάρισης και ποιοι παραγωγοί θα παράξουν και ποιοι θα καταναλωτές θα καταναλώσουν αυτό το διάστημα. Στον πίνακα 4.2 βλέπουμε τα αποτελέσματα από τη λειτουργία της αγοράς pool καθώς και τα αντίστοιχα ποσά ενέργειας και τις πληρωμές ή απολαβές κάθε εταιρίας.

| Προσφορές   | Εταιρία   | Ποσότητα | Τιμή     |
|-------------|-----------|----------|----------|
|             |           | MWh      | τιμή/MWh |
| Παραγωγοί   | Κόκκινος  | 200      | 12       |
|             | Κόκκινος  | 50       | 15       |
|             | Κόκκινος  | 50       | 20       |
|             | Πράσινος  | 150      | 16       |
|             | Πράσινος  | 50       | 17       |
|             | Μπλε      | 100      | 13       |
|             | Μπλε      | 50       | 18       |
| Καταναλωτές | Κίτρινος  | 50       | 13       |
|             | Κίτρινος  | 100      | 23       |
|             | Κίτρινος  | 100      | 23       |
|             | Μοβ       | 50       | 11       |
|             | Μοβ       | 150      | 22       |
|             | Πορτοκαλί | 50       | 10       |
|             | Πορτοκαλί | 200      | 25       |

Πίνακας 4.1: Πίνακας Προσφορών

| Εταιρία   | Παραγωγή | Κατανάλωση | Έσοδα | Έξοδα |
|-----------|----------|------------|-------|-------|
|           | MWh      | MWh        |       |       |
| Κόκκινος  | 250      |            | 4000  |       |
| Μπλε      | 100      |            | 1600  |       |
| Πράσινος  | 100      |            | 1600  |       |
| Πορτοκαλί |          | 200        |       | 3200  |
| Κίτρινος  |          | 100        |       | 1600  |
| Μοβ       |          | 150        |       | 2400  |
| Ολικό     | 450      | 450        | 7200  | 7200  |

Πίνακας 4.2: Πίνακας Προγραμματισμού και κερδών



Σχήμα 4.4: Καμπύλες Προσφοράς και Ζήτησης

3. **Αγορά επικουρικών υπηρεσιών (Ancillary Services Market):** Επικουρικές υπηρεσίες είναι αυτές λειτουργίες που επιτελούνται από συστήματα ηλεκτρικής παραγωγής, μεταφοράς, το σύστημα ελέγχου, και διανομής για να υποστηρίξουν τις βασικές υπηρεσίες του παροχής ηλεκτρικής ενέργειας. Τυπικά, οι επικουρικές υπηρεσίες ορίζονται σαν "οι υπηρεσίες που είναι απαραίτητες για την υποστήριξη της μετάδοσης της ηλεκτρικής ενέργειας από τον πωλητή στον τελικό αγοραστή που σκοπό έχουν τη διατήρηση της αξιόπιστης λειτουργίας του διασυνδεδεμένου συστήματος μεταφοράς". Υπάρχουν διάφορα είδη επικουρικών υπηρεσιών, όπως άεργος ισχύς και έλεγχος τάσης, προστασία συστήματος, εξισορρόπηση ενέργειας, αναπλήρωση απωλειών ενέργειας κλπ

Υπάρχουν 2 τρόποι για να εξασφαλιστούν αυτές οι υπηρεσίες. Ο πρώτος τρόπος είναι η **υποχρεωτική παροχή**. Με αυτόν το τρόπο, όλοι οι παραγωγοί και οι μεγάλοι βιομηχανικοί πελάτες υποχρεώνονται να προσφέρουν κάποιου είδους επικουρικές υπηρεσίες που ορίζονται από το νόμο. Ενώ αυτός ο τρόπος είναι απλός και εξασφαλίζει τη διάθεση αρκετών πόρων για την υγιή λειτουργία του συστήματος, έχει αρκετά μειονεκτήματα. Γίνονται υπερβολικές επενδύσεις σε υποδομή επικουρικών υπηρεσιών, περισσότερες από όσες χρειάζονται. Δεν επιτρέπει την ανάπτυξη τεχνολογικών και οικονομικών πρωτοβουλιών. Μερικές μονάδες λόγω ιδιαιτερότητάς τους δεν μπορούν να προσφέρουν αυτές τις υπηρεσίες (π.χ. οι πυρηνικοί σταθμοί δε μπορούν να κάνουν εξισορρόπηση φορτίου).

Από την άλλη σε ένα ανταγωνιστικό περιβάλλον, οι υπηρεσίες αυτές πληρώνονται και τιμολογούνται ξεχωριστά από τη παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Σε αυτό το περιβάλλον λειτουργεί η **αγορά επικουρικών υπηρεσιών**. Στην αγορά αυτή συμμετέχουν

παραγωγοί και μεγάλοι καταναλωτές οι οποίοι προσφέρουν επικουρικές υπηρεσίες για τη κατάλληλη τιμή. Ο διαχειριστής του συστήματος που σκοπό έχει την ασφάλη και αδιάκοπη λειτουργία του συστήματος, αγοράζει με μακροπρόθεσμα ή βραχυπρόθεσμα συμβόλαια τέτοιες υπηρεσίες από τους συμμετέχοντες.

Επικεντρώνοντας τώρα στην αγορά επικουρικών υπηρεσιών, η ESCO σαν μεγάλος καταναλωτής που έχει και τη διαχείριση διεσπαρμένης παραγωγής μπορεί να προσφέρει επικουρικές υπηρεσίες με τις κατάλληλες συμφωνίες. Μπορεί να αποκόψει φορτίο όταν είναι ανάγκη (με τη κατάλληλη αποζημίωση) ή να αυξήσει τη παραγωγή από τις DG μονάδες που διαχειρίζεται όταν της ζητηθεί.

4. **CO<sub>2</sub> Market (Emissions Trading):** Η αγορά CO<sub>2</sub> είναι μια οικονομική προσέγγιση στη προσπάθεια ελέγχου της μόλυνσης του περιβάλλοντος. Η λειτουργία της αγοράς αυτής σκοπό έχει να προσφέρει οικονομικά κίνητρα στις εταιρίες που μολύνουν για να μειώσουν τη μόλυνση. Μια κεντρική αρχή (συνήθως η κυβέρνηση) θέτει ένα όριο στη ποσότητα μόλυνσης που μπορεί να εκπνευθεί. Το ποσό αυτό του ορίου μοιράζεται ή πωλείται στις εταιρίες υπό τη μορφή "άδειας για μόλυνση" που αντιπροσωπεύει το δικαίωμα να εκπέμπει η εταιρία συγκεκριμένο όγκο ρύπων. Οι εταιρίες τότε υποχρεούνται να έχουν στα χέρια τους τόσες άδειες που να δικαιολογούν τη πραγματική εκπομπή ρύπων που εκπέμπουν. Εταιρίες που θέλουν να αυξήσουν την εκπομπή ρύπων τους πρέπει να αγοράσουν άδειες από άλλες εταιρίες που δεν τις χρησιμοποιούν. Με αυτό τον τρόπο ο αγοραστής της άδειας πληρώνει για τη ρύπανση που προκαλεί ενώ ο πωλητής ανταμείβεται για τη μείωση ρύπων που του επέτρεψε να μη χρησιμοποιήσει τη συγκεκριμένη άδεια.
5. **Ελεγχόμενη Στιγμιαία Αγορά (Managed Spot Market):** Μια αγορά είναι ένα περιβάλλον σχεδιασμένο να βοηθάει τους αγοραστές και πωλητές να αλληλεπιδρούν και να συνάπτουν συμφωνίες μεταξύ τους. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις οδηγούν την σε ένα σημείο ισορροπίας όπου η τιμή εκκαθαρίζει την αγορά, δηλαδή, η προσφορά είναι ίση με τη ζήτηση. Αν η ηλεκτρική ενέργεια αντιμετωπίζεται σύμφωνα με την ιδέα της ελεύθερης αγοράς, το σημείο ισορροπίας μεταξύ παραγωγής και κατανάλωσης καθορίζεται μέσω των απευθείας αλληλεπιδράσεων πωλητών και παραγωγών.

Σε αυτή την τέλεια αγορά, οι μεγάλοι καταναλωτές και διανομείς αγοράζουν ηλεκτρική ενέργεια από τις εταιρίες παραγωγής. Όπως όλοι οι λογικοί καταναλωτές, πρέπει να εκτιμήσουν πόσο θα αγοράσουν. Γιαυτό, κάνουν πρόβλεψη της κατανάλωσής τους ή της κατανάλωσης των πελατών τους για κάθε περίοδο της αγοράς (ώρα, μισή ώρα ή ένα τέταρτο της ώρας) πριν κάνουν τις συμφωνίες αγοράς. Από τη δική τους πλευρά, οι παραγωγοί προγραμματίζουν τη παραγωγή των μονάδων τους για να παραδώσουν στη συμφωνημένη ώρα την ενέργεια που πούλησαν. Ο κάθε παραγωγός, φυσικά, προσπαθεί να ελαχιστοποιήσει το κόστος παραγωγής αυτής της ενέργειας. Στη πράξη, παρόλα αυτά, τα πράγματα δεν είναι τόσο εύκολα. Κανένα από τα δύο μέρη (παραγωγοί ή καταναλωτές) δε μπορεί να ακολουθήσει τις συμφωνημένες υποχρεώσεις με τέλεια ακρίβεια. Πρώτα, η πραγματική ζήτηση μιας ομάδας καταναλωτών δεν είναι ποτέ ίση με τη τιμή που έχει προβλεφθεί. Δεύτερο, απρόβλεπτα προβλήματα συχνά εμποδίζουν τις μονάδες παραγωγής από το να παραδώσουν τη συμφωνημένη ενέργεια. Ένα ξαφνικό μηχανικό ή ηλεκτρικό σφάλμα μπορεί να οδηγήσει μια μονάδα στο κλείσιμο ή στη μείωση της παραγωγής.

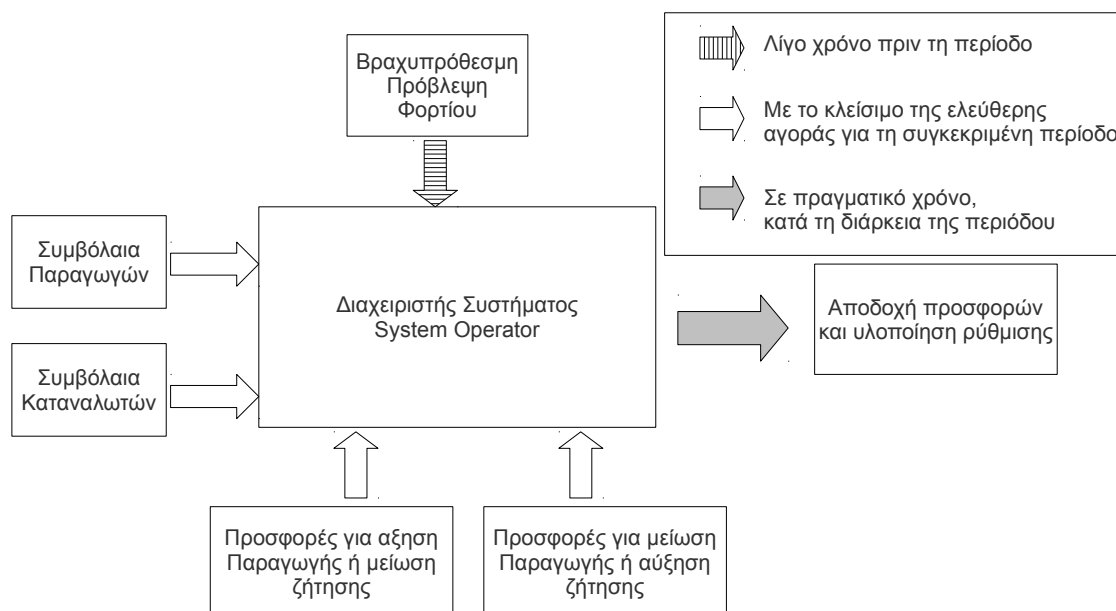
Αυτά τα απρόβλεπτα σφάλματα και συμβάντα δημιουργούν κενά ανάμεσα στο φορτίο και τη παραγωγή τα οποία πρέπει να γεφυρωθούν γρήγορα και με ακρίβεια για να διατηρηθεί η ακεραιότητα του συστήματος. Αν αυτά τα κενά μεταξύ παραγωγής και φορτίου αντιμετωπισθούν σαν διαφορά στην αγορά και τη ζήτηση και επιδιωχθεί η διόρθωσή τους μέσα από ένα μηχανισμό ελεύθερης αγοράς, οι παραγωγοί και καταναλωτές θα πρέπει να ενημερώνονται για τη κατάσταση της αγοράς (προσφορά, ζήτηση, τιμές) δευτερόλεπτο προς δευτερόλεπτο. Επίσης, ένας μεγάλος αριθμός από αυτούς θα πρέπει να είναι διατεθειμένοι να κάνουν συναλλαγές σε αυτή της βάση. Θα πρέπει να είναι σε θέση να μεταβάλλουν τη παραγωγή ή κατανάλωση ανά πάσα στιγμή και με μικρή προειδοποίηση να απορροφούν οποιαδήποτε πιθανή ανισορροπία. Με τη παρούσα κατάσταση της τεχνολογίας, είναι δύσκολο να δημιουργηθεί ένα σύστημα ικανό να παίρνει μετρήσεις και να μεταδίδει τις τεράστιες ποσότητες δεδομένων που χρειάζονται και να καταγράφει τις χιλιάδες συναλλαγών. Ακόμη και αν η υποδομή για κάτι τέτοιο κατασκευαζόταν, παραμένει ερώτημα αν ένα τέτοιο σύστημα θα ήταν αρκετά γρήγορο και αξιόπιστο για να εμποδίζει ανισορροπίες που μπορεί να οδηγήσουν στη κατάρρευση όλου του συστήματος ηλεκτρικής ενέργειας. Τέλος, τα κόστη συναλλαγών που συνδέονται με ένα τέτοιο σύστημα θα ήταν απαγορευτικά.

Μπορούμε έτσι να συμπεράνουμε ότι, παρόλο που ένα μεγάλο ποσοστό ηλεκτρικής ενέργειας μπορεί να πωλείται στην ελεύθερη αγορά, από μόνη της αυτή η αγορά δε μπορεί να διατηρήσει την αξιοπιστία του συστήματος. Μια Managed Spot Market που προσφέρει ένα μηχανισμό για την εξισορρόπηση του φορτίου και της παραγωγής πρέπει να έπεται της ελεύθερης αγοράς καθώς ο χρόνος παράδοσης πλησιάζει. Η λειτουργία της είναι να ταιριάζει το υπολειπόμενο φορτίο και παραγωγή, ρυθμίζοντας τη παραγωγή εύελικτων μονάδων ή τη κατανάλωση πρόθυμων πελατών. Πρέπει επίσης να είναι ικανή να αντιμετωπίζει προβλήματα αποσύνδεσης μονάδων παραγωγής λόγω τεχνικών προβλημάτων. Παρόλο που η ανάγκη για την αγορά αυτή έχει τις ρίζες της σε τεχνικά θέματα, η αγορά πρέπει να λειτουργεί με ένα οικονομικό και αποτελεσματικό τρόπο. Οι ανισορροπίες καταναλωτών και παραγωγών είναι αναπόφευκτες αλλά δε θα έπρεπε να είναι χωρίς κόστος. Για να ενθαρρύνεται η αποδοτική λειτουργία, οι παραγωγοί και καταναλωτές πρέπει να πληρώνουν το πραγματικό κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας που αγοράζεται ή πωλείται στην αγορά Managed Spot Market. Αυτός ο μηχανισμός είναι αγορά γιατί η ενέργεια που χρησιμοποιείται για την εξισορρόπηση προσφέρεται ελεύθερα από τους συμμετέχοντες σε τιμή που καθορίζουν οι ίδιοι. Παρόλα αυτά, είναι διαχειριζόμενη αγορά γιατί οι προσφορές επιλέγονται από το χειριστή του συστήματος (System Operator) αντί με απευθείας αλληλεπίδραση.

**Πόροι για εξισορρόπηση:** Όσο καλή και να είναι η πρόβλεψη φορτίων και ο προγραμματισμός, μικρές ανισορροπίες θα υπάρχουν πάντα και ο SO (System Operator) θα πρέπει να κάνει ρυθμίσεις στη παραγωγή ή κατανάλωση. Αυτές οι ρυθμίσεις πρέπει να μεταφραστούν σε αγορές και πωλήσεις ηλεκτρικής ενέργειας που διευθετούνται σε μια τιμή "Spot Price" η οποία αντιπροσωπεύει την προθυμία της αγοράς να κάνει αυτές τις ρυθμίσεις. Όποιος παραγωγός ή καταναλωτής θέλει να συμμετάσχει στη ρύθμιση μπορεί να προσφέρει τους πόρους, για μια συγκεκριμένη περίοδο ή σε μακροπρόθεσμη βάση, ονομάζοντας τη τιμή που θέλουν για να προσφέρουν αυτή τη ρύθμιση. Η προσφορά αυτή γίνεται συνήθως μετά το κλείσιμο της ελεύθερης αγοράς για τη συγκεκριμένη χρονική περίοδο.

Για να αποφύγει ο SO το ενδεχόμενο να μην έχει επαρκείς πόρους για να κάνει τη ρύθμιση, μπορεί να αγοράσει πόρους σε με μακροπρόθεσμα συμβόλαια. Με αυτά τα συμβόλαια, ο παραγωγός πληρώνεται ένα σταθερό ποσό για να έχει διαθέσιμη εφεδρεία για παραγωγή. Το συμβόλαιο επίσης καθορίζει και τη τιμή στην οποία θα πληρωθεί ο παραγωγός τη MWh σε περίπτωση που κληθεί τελικώς να παράξει.

Οι ανισορροπίες που προκαλούνται από σφάλματα πρόβλεψης φορτίων είναι μικρές, εμφανίζονται σταδιακά και μπορούν να προβλεφθούν ως ένα σημείο. Από την άλλη πλευρά, οι ανισορροπίες που εμφανίζονται από σφάλματα είναι συνήθως μεγάλες, μη προβλέψιμες και απότομες. Πολλές μονάδες παραγωγής μπορούν να αντιμετωπίσουν το πρώτο είδος ανισορροπιών μεταβάλλοντας τη παραγωγή τους σταδιακά. Ο χειρισμός του δεύτερου είδους ανισορροπιών, όμως, χρειάζεται μονάδες παραγωγής που μπορούν να αυξήσουν τη παραγωγή τους απότομα και να διατηρήσουν την αυξημένη αυτή παραγωγή για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα. Έτσι, όταν οι παραγωγοί ή καταναλωτές προσφέρουν τους πόρους για εξισορρόπηση, πρέπει να καθορίζουν όχι μόνο τη ποσότητα και τη τιμή αλλά πόσο γρήγορα μπορούν να μεταβάλουν τη παραγωγή ή κατανάλωσή τους (ρυθμό αύξησης ή μείωσης).



Σχήμα 4.5: Λειτουργία της αγοράς Managed Spot Market

**Λειτουργία της αγοράς Managed Spot Market:** Το σχήμα 4.5 δείχνει περιληπτικά τη λειτουργία της αγοράς. Μετά το κλείσιμο της ελεύθερης αγοράς, οι παραγωγοί και οι καταναλωτές πρέπει να ενημερώσουν το Χειριστή Συστήματος πόση ενέργεια έχουν συμφωνήσει να παράξουν ή να καταναλώσουν για την υπό μελέτη χρονική περίοδο. Ο SO συγκρίνει τα ποσά αυτά με τη δική του βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου και υπολογίζει πόσο περίπου θα είναι εκτός ισορροπίας το σύστημα. Επίσης, δέχεται τις προσφορές για αύξηση της παραγωγής και μείωση της κατανάλωσης από τους συμμετέχοντες στην αγορά. Σε πραγματικό χρόνο, κατά τη διάρκεια της υπό μελέτης περιόδου, ο SO προβαίνει σε ρυθμίσεις για να κρατήσει το σύστημα σε ισορροπία.

**Συμμετοχή ESCO:** Έτσι, αν σε κάποια συμφωνημένη περίοδο, η συνολική κατανάλωση των πελατών της ESCO υπερβαίνει το ποσό ενέργειας που αγόρασε στις ελεύθερες αγορές (και ενημέρωσε τον SO) τότε θεωρείται ότι αγόρασε τη διαφορά στη Spot Market σε όποια τιμή είναι στην αγορά εκείνη τη στιγμή ή της επιβάλλεται ένα προκαθορισμένο πρόστιμο που έχει αποτρεπτικό χαρακτήρα αλλά και σκοπό να καλύψει τα έξοδα των μεταβολών στην αγορά Spot. Επίσης, αν το συμφωνηθέν ποσό μικρότερο αυτό που πραγματικά καταναλώθηκε τότε θεωρείται ότι η ESCO πώλησε τη διαφορά στη Spot Market ή πάλι χρεώνεται κάποιο ανάλογο πρόστιμο. Επειδή η αγορά αυτή είναι απρόβλεπτη και οι τιμές της συνήθως υπερβαίνουν αρκετά τις τιμές των ελεύθερων αγορών (ιδιαίτερα σε περιόδους αιχμής) η ESCO έχεις προς συμφέρον της να προσπαθεί να συμμορφώνεται στις συμφωνίες που έχει κάνει και να μην καταναλώνει περισσότερη ή λιγότερη ενέργεια.

#### 4.4.3 Ελαστικότητα φορτίων και διαχείριση διεσπαρμένης παραγωγής με χρήση τοπικών ελεγκτών

Η χαμηλή ελαστικότητα του φορτίου των καταναλωτών (δες 4.2) μπορεί να έχει ανεπιθύμητα αποτελέσματα στην αγορά ενέργειας καθώς διευκολύνει την εξάσκηση αγοραστικής δύναμης από τους παραγωγούς (κάποιος παραγωγός ο οποίος έχει μεγάλο μερίδιο στη παραγωγή, εκμεταλλευόμενος την ανελαστικότητα του φορτίου, μπορεί να οδηγήσει σε αύξηση τις τιμές πώλησης). Η ανελαστικότητα αυτή μπορεί να επιφέρει πολλές ζημιές στην ESCO (σαν retailer) αν υπάρχουν αποκλίσεις στη πραγματική κατανάλωση από την αντίστοιχη που είχε προβλεφθεί. Η ESCO/ Aggregator, για τη κάλυψη των διαφορών της πραγματικής κατανάλωσης από αυτή που είχε προβλεφθεί, καλείται να συμμετάσχει στην αγορά Spot Market (δες 5) ή να υποστεί πρόστιμο για αυτές τις διαφορές. Κάτι τέτοιο μπορεί να αποφέρει μεγάλη ζημιά στην εταιρία. Με την εγκατάσταση τοπικών ελεγκτών στους καταναλωτές και στις DER, η ESCO μπορεί να ασκεί έλεγχο, σε πραγματικό χρόνο, στην ενέργεια που απορροφάται από το δίκτυο (συνολική κατανάλωση μείον τοπική παραγωγή) και έτσι να αποφεύγει σημαντικές αποκλίσεις από τις συμφωνίες που έχει κάνει για αγορά ηλεκτρικής ενέργειας στις μεγάλες αγορές ενέργειας. Σημαντικός παράγοντας είναι οι όποιες αποφάσεις της ESCO και ο έλεγχος που ασκεί μέσω των τοπικών ελεγκτών να μην επηρεάζουν σημαντικά τη ποιότητα ζωής και την άνεση των καταναλωτών ή αν την επηρεάζουν να προσφέρουν την ανάλογη, προσυμφωνημένη, αποζημίωση.

#### Κόστος

Για την εγκατάσταση και λειτουργία των τοπικών ελεγκτών στο ΜΔ ένα σημαντικό κόστος πρέπει να επενδυθεί σε υποδομές επικοινωνίας και διαχείρισης. Επίσης, ένα επιπλέον κόστος για την εγκατάσταση των ελεγκτών μαζί με τους αναγκαίους αισθητήρες και τις μετατροπές σε ηλεκτρικές εγκαταστάσεις των καταναλωτών και DER. Αυτό το κόστος, συγκρινόμενο με τα οφέλη που μπορεί ένα τέτοιο σύστημα να αποφέρει, μας επιτρέπει να αποφασίσουμε αν η εγκατάσταση και η λειτουργία του είναι βιώσιμη. Παρόλα αυτά, η μελέτη για το κόστος στη κάθε περίπτωση πρέπει να γίνει ξεχωριστά διότι εξαρτάται από πολλούς παράγοντες (τοπολογία και μέγεθος μικροδικτύου, διασπορά καταναλωτών και DER κλπ).



## Κεφάλαιο 5

# Ανάλυση Μοντέλων

Για την ανάλυση των μοντέλων θα χρησιμοποιήσουμε τεχνικές της Θεωρίας Παιγνίων. Όπως σε κάθε πρόβλημα που, πρέπει πρώτα να περιγράψουμε το παιχνίδι και να δηλώσουμε σε ποια κλάση παιχνιδιών της Θεωρίας Παιγνίων ανήκει. Μετά πρέπει να βρούμε τους παίχτες του παιχνιδιού, τις στρατηγικές που μπορεί να ακολουθήσει ο κάθε παίχτης και τους στόχους του κάθε παίχτη. Τέλος, με βάση τα προηγούμενα πρέπει να σχηματιστούν οι συναρτήσεις κέρδους του κάθε παίχτη.

Οι συναρτήσεις κέρδους τους κάθε παίχτη μας δίνουν το κέρδος του σαν συνάρτηση των στρατηγικών όλων των παικτών του παιχνιδιού. Χρησιμοποιώντας κάποια εργαλεία από τη κλάση παιχνιδιών στην οποία κατατάσσεται το παιχνίδι μπορούμε να βρούμε τα διάφορα σημεία ισορροπίας του παιχνιδιού και πιο συγκεκριμένα το σημείο Nash ή το ισοδύναμο με αυτό σημείο για τη συγκεκριμένη κλάση παιχνιδιών.

### 5.1 Περιγραφή

Το παιχνίδι που σχηματίζεται είναι ένα *δυναμικό παιχνίδι τέλειας πληροφορίας*. Δυναμικό είναι διότι παίζεται σε γύρους (δες 3β'), δηλαδή κάποιοι παίχτες δηλώνουν τη στρατηγική τους (παίζουν) αφού έχουν δει τη στρατηγική άλλων παικτών. Είναι τέλειας πληροφορίας (δες 5) διότι κάθε παίχτης γνωρίζει τι στρατηγική ακολούθησε κάθε παίχτης που έπαιξε πριν από αυτόν. Το Παιχνίδι μπορεί να χαρακτηριστεί σαν πλήρους πληρούς πληροφορίας (δες 4), αν θεωρήσουμε ότι οι συναρτήσεις κέρδους όλων των παικτών είναι *κοινή γνώση*, ή μη πλήρους πληροφορίας (δες 4), εάν οι συναρτήσεις αυτές δεν είναι τελείως γνωστές. Τι πρακτικά σημαίνει αυτό στο παιχνίδι θα το δούμε σε επόμενο υποκεφάλαιο.

Το παιχνίδι θεωρούμε ότι λαμβάνει χώρα ανά μία ώρα και οι στρατηγικές που ακολουθεί ο κάθε παίχτης παραμένουν σταθερές για αυτή την ώρα. Το παιχνίδι όμως μπορεί πολύ εύκολα να καθοριστεί και για πιο μικρό διάστημα. Η ροή του παιχνιδιού καθορίζεται σε δύο γύρους ως εξής:

#### Πρώτος Γύρος

Στο πρώτο γύρο του παιχνιδιού η ESCO/ Aggregator εκπέμπει μέσα στο Μικροδίκτυο, με τη μορφή σήματος, μία τιμή  $\pi_1$  με την οποία πληρώνονται οι διεσπαρμένοι παραγωγοί για την παραγωγή τους και μία τιμή  $\pi_2$ , η οποία στο πρώτο μοντέλο λειτουργίας (δες 4.1) σκοπό έχει για τη διαχείριση φορτίου των καταναλωτών (Demand Dispatch) ενώ

στο δεύτερο μοντέλο λειτουργίας (δες 4.2) αντιπροσωπεύει τη τιμή πώλησης ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές (Variable Pricing).

### Δεύτερος Γύρος

Στο δεύτερο γύρο, ο κάθε DG αφού έχει λάβει το σήμα  $\pi_1$  μεταβάλλει τη παραγωγή του  $P_{DG}$  (kW) έτσι ώστε να μεγιστοποιεί τη συνάρτηση κέρδους του. Όμοια και την ίδια στιγμή, ο κάθε καταναλωτής που είναι εξοπλισμένος με τοπικό ελεγκτή  $Cons - LC$ , έχοντας λάβει το σήμα  $\pi_2$  μεταβάλλει τη κατανάλωσή του  $Q_{Cons-LC}$  (kWh) για την επόμενη ώρα.

## 5.2 Παίχτες

Όπως μπορούμε να δούμε από τη περιγραφή του παιχνιδιού σε αυτό το παιχνίδι συμμετέχουν  $1 + m + n$  παίκτες: η ESCO/ Aggregator, οι  $m$  μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής και οι  $n$  καταναλωτές που είναι εξοπλισμένοι με τοπικό ελεγκτή. Ο κάθε παίκτης μπορεί να έχει το δικό του στόχο ο οποίος όμως να είναι ίδιος ή διαφορετικός από τους υπόλοιπους.

## 5.3 Στόχοι

Κάποιοι πιθανοί στόχοι που μπορούν να έχουν οι παίκτες είναι:

### Μεγιστοποίηση Χρηματικού Κέρδους

Ένας παίκτης που έχει αυτό το στόχο προσπαθεί να προσαρμόσει τη στρατηγική του με βάση τις στρατηγικές των υπολοίπων με μοναδικό του στόχο να αυξήσει το χρηματικό του κέρδος. Έτσι, η συνάρτηση κέρδους του παίκτη που έχει αυτό το στόχο πρέπει να αντιπροσωπεύει χρήματα τα οποία κερδίζει.

### Ελαχιστοποίηση εκπομπών $CO_2$

Ένας παίκτης που έχει αυτό το στόχο προσπαθεί να προσαρμόσει τη στρατηγική του με βάση τις στρατηγικές των υπολοίπων με μοναδικό του στόχο να μειώσει τις εκπομπές  $CO_2$  στην ατμόσφαιρα. Έτσι, η συνάρτηση κέρδους του παίκτη που έχει αυτό το στόχο πρέπει να αντιπροσωπεύει ποσότητα  $CO_2$  την οποία εξοικονομεί ή εκπέμπει.

### Μεγιστοποίηση Διείσδυσης ΑΠΕ

Ένας παίκτης που έχει αυτό το στόχο προσπαθεί να προσαρμόσει τη στρατηγική του με βάση τις στρατηγικές των υπολοίπων με μοναδικό του στόχο να αυξήσει τη κατανάλωση ενέργειας από ΑΠΕ. Έτσι, η συνάρτηση κέρδους του παίκτη που έχει αυτό το στόχο πρέπει να αντιπροσωπεύει ποσοστό ενέργειας από ΑΠΕ.

Φυσικά, αυτοί οι στόχοι δεν είναι οι μοναδικοί που μπορεί να έχει ο κάθε παίκτης. Επίσης, κάποιος παίκτης μπορεί να είναι συνδυασμός 2 ή περισσότερων στόχων και να προσπαθεί να βελτιστοποιήσει το συνδυασμό των συναρτήσεων κέρδους, κάτι το οποίο οδηγεί σε multi-objective συναρτήσεις κέρδους.

## 5.4 Στρατηγικές

Για το παιχνίδι που περιγράφεται πιο πάνω, οι δράσεις που έχει ο κάθε παίκτης για να πετύχει τους στόχους του είναι καθορισμένες:

**ESCO/ Aggregator**

Η ESCO/ Aggregator έχει στη διάθεσή της τη μεταβολή των τιμών των σημάτων  $(\pi_1, \pi_2)$  για να πετύχει τους στόχους της. Έτσι, καθορίζεται η στρατηγική

$$S_{ESCO} = \{\pi_1 \in (\pi_{1min}, \pi_{1max}), \pi_2 \in (\pi_{2min}, \pi_{2max})\}$$

**Διεσπαρμένοι Παραγωγοί**

Οι DG έχουν στη διάθεσή τους τη μεταβολή της παραγωγής τους  $P_{DG}$  για να πετύχουν τους στόχους τους. Έτσι, καθορίζεται η στρατηγική

$$S_{DGi} = \{P_{DGi} \in (P_{DGimin}, P_{DGimax})\}$$

**Καταναλωτές με τοπικό ελεγκτή**

Οι καταναλωτές έχουν στη διάθεσή τους τη μεταβολή της κατανάλωσης τους  $Q_{Cons-LC}$  για να πετύχουν τους στόχους τους. Έτσι, καθορίζεται η στρατηγική

$$S_{Cons-LCj} = \{Q_{Cons-LCj} \in (Q_{Cons-LCjmin}, Q_{Cons-LCjmax})\}$$

**5.5 Συναρτήσεις Κέρδους**

Οι συναρτήσεις κέρδους των παικτών (Revenue) αναπαριστούν το κέρδος κάθε παίκτη συναρτήσει των στρατηγικών όλων των παικτών. Έτσι, έχουμε τις συναρτήσεις:

**1. ESCO/ Aggregator:**

$$R_{ESCO} = f(\pi_1, \pi_2, P_{DG}, Q_{Cons})$$

όπου:

- $P_{DG} = \sum_{i=0}^m P_{DGi}$ : συνολική παραγωγή από μονάδες DG
- $Q_{Cons} = \sum_{j=0}^n Q_{Consj}$ : συνολική κατανάλωση όλων των καταναλωτών

**2. Διεσπαρμένη Παραγωγή:**

$$R_{DGi} = f(\pi_1, \pi_2, P_{DG}, Q_{Cons}) = f(\pi_1, P_{DGi})$$

Η συνάρτηση κέρδους του κάθε παραγωγού  $i$  εξαρτάται άμεσα μόνο από τη τιμή  $\pi_1$  στην οποία πουλάει την ενέργεια που παράγει και από τη τιμή  $P_{DGi}$  που είναι η ισχύς που διοχετεύει στο δίκτυο.

**3. Καταναλωτές με τοπικό ελεγκτή:**

$$R_{Cons-LCj} = f(\pi_1, \pi_2, P_{DG}, Q_{Cons}) = f(\pi_2, Q_{Cons-LCj})$$

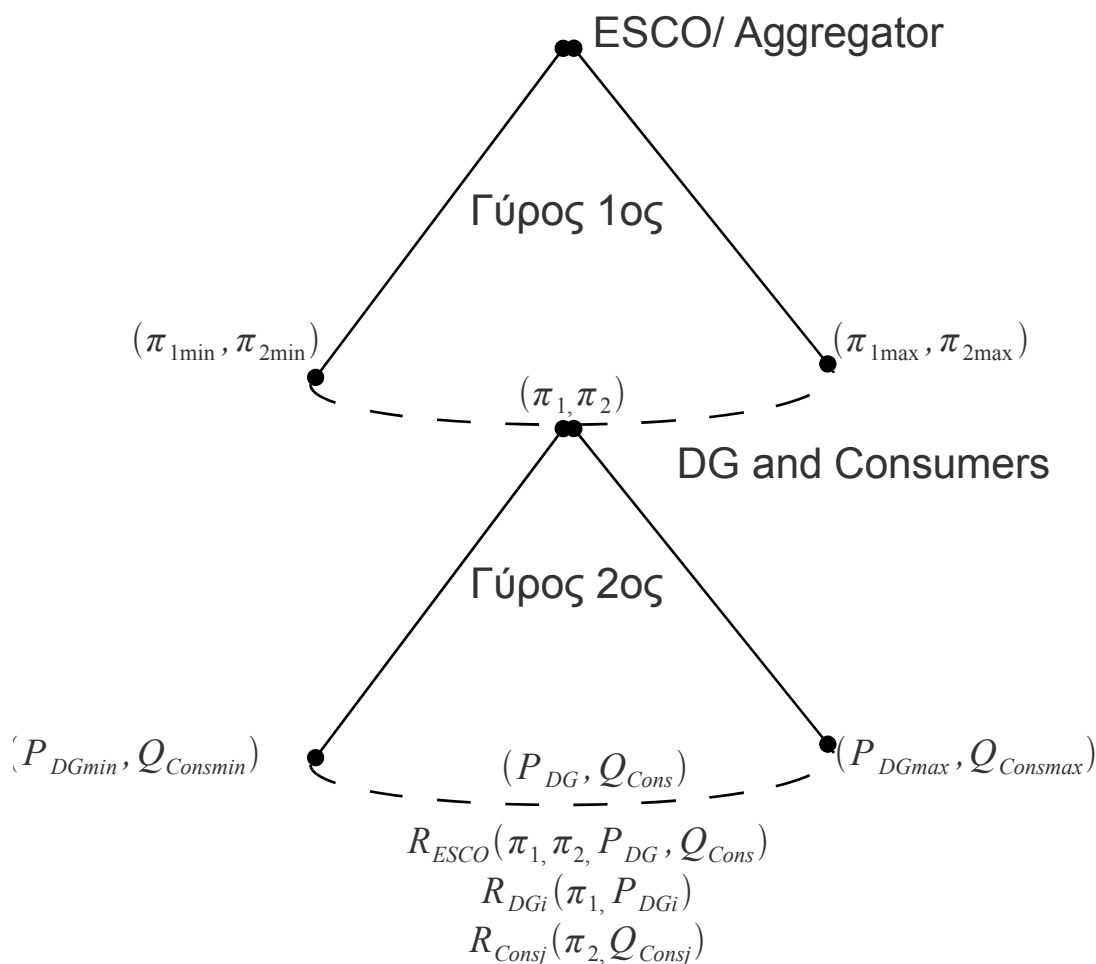
Η συνάρτηση κέρδους του κάθε καταναλωτή  $j$  που είναι εξοπλισμένος με τοπικό ελεγκτή εξαρτάται άμεσα μόνο από το σήμα  $\pi_2$  (ό,τι αν αντιπροσωπεύει αυτό σε κάθε μοντέλο) και από τη τιμή  $Q_{Cons-LCj}$  που είναι το φορτίο που καταναλώνει ο ίδιος.

Για να συνεχίσουμε με το σχηματισμό των συναρτήσεων κέρδους και την μελέτη του παιχνιδιού, πρέπει να επιλέξουμε τους στόχους του κάθε παίκτη. Για τη μελέτη αυτή θα επιλέξουμε ότι ο κάθε παίκτης έχει σαν στόχο τη **μεγιστοποίηση του χρηματικού του κέρδους**.

## 5.6 Μέθοδος μελέτης και επίλυσης παιχνιδιού

### 5.6.1 Εκτεταμένη Μορφή

Τα δυναμικά παιχνίδια είναι παιχνίδια που συνήθως μελετούνται σε εκτεταμένη μορφή (δες 3.2.3). Παρακάτω παρουσιάζεται το παιχνίδι που περιγράψαμε σε εκτεταμένη μορφή. Ο λόγος της ιδιομορφίας του σχήματος είναι ότι οι στρατηγικές που μπορούν να ακολουθήσουν οι παίκτες είναι συνεχείς, και αυτό αντιπροσωπεύεται με τη διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 5.1: Το παιχνίδι σε εκτεταμένη μορφή

Από το σχήμα 5.1 βλέπουμε πότε μπορεί να παίξει ο κάθε ένας, τις στρατηγικές που έχει και τι γνωρίζει όταν παίζει.

### 5.6.2 Σημείο Ισορροπίας Nash

Ένας τρόπος για τον ορισμό του σημείου ισορροπίας Nash σε στατικά παιχνίδια (δες 3) είναι να θεωρήσουμε ότι αν σκοπός της Θεωρίας Παιγνίων είναι να βρει ένα μοναδικό σημείο-λύση για το παιχνίδι που μελετάμε, τότε, το σημείο αυτό πρέπει να είναι σημείο ισορροπίας Nash. Για να εξηγήσουμε καλύτερα, υποθέστε ότι η Θεωρία Παιγνίων κάνει μία μοναδική πρόβλεψη για

τη στρατηγική που θα ακολουθήσει ο κάθε παίκτης. Για να είναι αυτή η πρόβλεψη σωστή, είναι αναγκαίο ο κάθε παίκτης να είναι διατεθειμένος να διαλέξει τη στρατηγική που προβλέφθηκε γι' αυτόν. Έτσι, η στρατηγική που προβλέφθηκε για κάθε παίκτη πρέπει να η καλύτερη απάντηση του παίκτη αυτού στις στρατηγικές που προβλέφθηκαν για τους υπόλοιπους παίκτες. Μια τέτοια πρόβλεψη μπορεί να ονομαστεί *στρατηγικά σταθερή* ή *αυτο-επιβαλλόμενη*, επειδή κανένας παίκτης, μονομερώς, δε θέλει να αποκλίνει από τη στρατηγική που έχει προβλεφθεί για αυτόν. Μια τέτοια πρόβλεψη καλείται σημείο ισορροπίας Nash:

**Ορισμός 1.** Οι στρατηγικές  $(s_1^*, s_2^*, \dots, s_i^*, \dots, s_n^*)$  ορίζουν σημείο ισορροπίας Nash αν, για κάθε παίκτη  $i$ , η στρατηγική  $s_i^*$  είναι η καλύτερη του απάντηση στις στρατηγικές των υπόλοιπων  $n - 1$  παικτών,  $(s_1^*, s_2^*, \dots, s_{i-1}^*, s_{i+1}^*, \dots, s_n^*)$ :

$$R_i(s_1^*, s_2^*, \dots, s_i^*, \dots, s_n^*) \geq R_i(s_1^*, s_2^*, \dots, s_i, \dots, s_n^*)$$

δηλαδή, η  $s_i^*$  λύνει την:

$$\max_{s_i \in S_i} \{R_i(s_1^*, s_2^*, \dots, s_i, \dots, s_n^*)\}$$

όπου το  $R_i$  δηλώνει το κέρδος του  $i$  παίκτη ως συνάρτηση των στρατηγικών που ακολουθήθηκαν από τους υπόλοιπους παίκτες.

### 5.6.3 Subgame Perfect Σημείο Ισορροπίας Nash

Όταν το παιχνίδι είναι δυναμικό (δες 3β'), τότε η έννοια του σημείου ισορροπίας Nash είναι αδύναμη και πρέπει να ενισχυθεί. Έτσι ορίζουμε το "Subgame Perfect Nash Equilibrium":

**Ορισμός 2. (Selten 1965)** Ένα σημείο ισορροπίας Nash είναι *subgame perfect* αν οι στρατηγικές των παικτών αποτελούν σημείο ισορροπίας Nash και για κάθε υπο-παιχνίδι (subgame) του αρχικού παιχνιδιού.

**Ορισμός 3.** Ένα υπο-παιχνίδι ορίζεται με βάση την εκτεταμένη μορφή αναπαράστασής του αρχικού παιχνιδιού από τους εξής κανόνες[10]:

1. Ξεκινάει από ένα κόμβο απόφασης, όχι τερματικό κόμβο, εκτός από τον πρώτο κόμβο
2. Περιλαμβάνει όλους τους κόμβους αποφάσεων και τερματικού κόμβους κάτω από αυτόν
3. Σε περίπτωση παιχνιδιού με ατελή πληροφορία, το κάθε υπο-παιχνίδι πρέπει να περιλαμβάνει όλες τις πιθανές, μη γνωστές στρατηγικές του ίδιου παίκτη. Δηλαδή, αν ένας παίκτης δεν γνωρίζει τις στρατηγικές των προηγούμενων από αυτόν παικτών, τότε πρέπει όλες οι πιθανές στρατηγικές αυτού του παίκτη να ανήκουν στο ίδιο υπο-παιχνίδι.

Παρατηρώντας το Σχήμα 5.1, και χρησιμοποιώντας τους πιο πάνω κανόνες μπορούμε να δούμε ότι υπάρχει μόνο 1 υπο-παιχνίδι στο δικό μας παιχνίδι που αναλύουμε. Το υπο-παιχνίδι αυτό είναι πρακτικά ο 2ος γύρος του παιχνιδιού.

### 5.6.4 Προς τα πίσω επαγωγή (Backwards Induction)

Στη θεωρία παιγνίων, η "προς τα πίσω επαγωγή" είναι μια μέθοδος που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του σημείου ισορροπίας "Subgame perfect Nash equilibrium" σε παιχνίδια τέλει πληροφορίας με πεπερασμένο αριθμό βημάτων ή πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων του ίδιου παιχνιδιού. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για την επίλυση παιχνιδιών από το καιρό της θεμελίωσης της Θεωρίας Παιγνίων σαν επιστημονικό κλάδο. Οι John von Neumann

και Oskar Morgenstern πρότειναν την επίλυση ορισμένων παιχνιδιών με τη μέθοδο αυτή στο βιβλίο τους "Theory of Games and Economic Behavior" (1953), το βιβλίο με το οποίο καθιερώθηκε η Θεωρία Παιγνίων.

**Ορισμός 4. (Zermelo's Theorem)** Κάθε πεπερασμένο παιχνίδι τέλειας πληροφορίας έχει τουλάχιστο ένα σύνολο στρατηγικών που ορίζουν σημείο ισορροπίας "Subgame perfect Nash" και το οποίο μπορεί να καθοριστεί με τη χρήση της μεθόδου "backward induction". Αν, επίσης, κανένας παίκτης δεν έχει το ίδιο κέρδος σε δύο διαφορετικούς τερματικούς κόμβους, τότε το σημείο ισορροπίας αυτό είναι μοναδικό.

Για τη μελέτη ενός παιχνιδιού με βήματα, όπου κάθε παίκτης παίζει σε ένα συγκεκριμένο βήμα, με αυτή τη μέθοδο, ξεκινάμε από το τελευταίο βήμα του παιχνιδιού. **Πρώτα, μελετάμε τι θα παίξει ο τελευταίος παίκτης, για κάθε πιθανή περίπτωση, με σκοπό να μεγιστοποιήσει το κέρδος του.** Μετά, θεωρούμε τις κινήσεις αυτές, του τελευταίου παίκτη, σαν δεδομένες και προσπαθούμε να βρούμε τις κινήσεις που θα κάνει ο προτελευταίος παίκτης για να μεγιστοποιήσει το δικό του κέρδος. Συνεχίζουμε έτσι μέχρι να φτάσουμε στο 1ο παίκτη στο 1ο βήμα του παιχνιδιού. Οι στρατηγικές που θα έχουν απομείνει είναι αυτές που ορίζουν το "Subgame perfect Nash equilibrium". Παρόλα αυτά, η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο σε παιχνίδια με τέλεια πληροφορία και πεπερασμένο αριθμό βημάτων.

Στα παρακάτω υποκεφάλαια θα σχηματίσουμε τις συναρτήσεις κέρδους των παικτών και θα προσπαθήσουμε να βρούμε τις στρατηγικές που βελτιστοποιούν τη συνάρτηση κέρδους του κάθε ενός. Τέλος, με τη χρήση αυτών των στρατηγικών και της μεθόδου της "προς τα πίσω επαγωγής" (backward induction), θα δείξουμε πως μπορεί να βρεθεί το σημείο ισορροπίας "Subgame perfect Nash" του κάθε ενός από τα 2 μοντέλα. Ξεκινάμε έτσι από τους παίκτες που παίζουν στο 2ο γύρο του παιχνιδιού (DG και καταναλωτές) και προσπαθούμε να βρούμε τις βέλτιστες στρατηγικές που θα ακολουθήσει ο καθένας τους για κάθε πιθανή τιμή που θα δεχθούν από την ESCO/ Aggregator και ακολούθως προχωράμε στην ESCO/ Aggregator.

## 5.7 DG

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα δούμε το παιχνίδι από τη σκοπιά της τοπικής παραγωγής που προσπαθεί να μεγιστοποιήσει το κέρδος που απορρέει από τη πώληση ηλεκτρικής ενέργειας. Λαμβάνουμε τη περίοδο μιας ώρας (την ίδια περίοδο που λαμβάνει το παιχνίδι μας) και υποθέτουμε ότι όλες οι ποσότητες παραμένουν σταθερές κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου.

### 5.7.1 Συνάρτηση Κέρδους και Μεγιστοποίηση της

Η συνάρτηση κέρδους του DG  $i$  κατά τη διάρκεια αυτής της ώρας μπορεί να εκφραστεί σαν η διαφορά μεταξύ των εσόδων που έχει από την πώληση της ενέργειας και του κόστους παραγωγής αυτής της ενέργειας:

$$R_{DGi} = [\pi * P_{DGi} - C_i(P_{DGi})] \quad (\text{euro/h}) \quad (5.1)$$

Όπου:

- $\pi$ : η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας σε (euro/kWh)

- $P_{DGi}$ : η ισχύς που παράγει κατά τη διάρκεια αυτής της ώρας ( $kW$ )
- $C_i(P_{DGi})$ : το κόστος παραγωγής  $P_{DGi}$

Για τη μεγιστοποίηση του κέρδους έχουμε:

$$\begin{aligned} \max R_{DGi} &= \max[\pi * P_{DGi} - C_i(P_{DGi})] \\ \Rightarrow \frac{dR_{DGi}}{dP_{DGi}} &= \frac{d(\pi * P_{DGi})}{dP_{DGi}} - \frac{dC_i(P_{DGi})}{dP_{DGi}} = 0 \end{aligned} \quad (5.2)$$

Ο πρώτος όρος αντιπροσωπεύει το οριακό έσοδο (Marginal Revenue) του παραγωγού, δηλαδή, το έσοδο που θα έπαιρνε για να παράξει 1 επιπλέον kw κατά τη διάρκεια της ώρας. Ο δεύτερος όρος αναπαριστά το κόστος για τη παραγωγή αυτού του επιπλέον kw, δηλαδή, το οριακό κόστος (Marginal Cost). Για τη μεγιστοποίηση του κέρδους, η παραγωγή πρέπει να ρυθμιστεί έτσι ώστε τα οριακά έσοδα να είναι ίδια με το οριακό κόστος:

$$MR_i = MC_i \quad (5.3)$$

Αν θεωρήσουμε ότι η τιμή  $\pi$  δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές στην ισχύ  $P_{DGi}$  τότε:

$$MR_i = \frac{d(\pi * P_{DGi})}{dP_{DGi}} = \pi \quad (5.4)$$

Έτσι, θεωρώντας ότι η συνάρτηση του οριακού κόστους είναι γνησίως αύξουσα, ο DG δέχεται τη τιμή αγοράς ανά kWh που πουλά και αυξάνει τη παραγωγή του μέχρι το σημείο που το οριακό κόστος να ισούται με αυτή τη τιμή:

$$\frac{dC_i(P_{DGi})}{dP_{DGi}} = \pi \quad (5.5)$$

Το οριακό κόστος περιλαμβάνει το κόστος καυσίμου, συντήρησης και κάθε άλλο παράγοντα κόστους που μεταβάλλεται με την παραγόμενη ισχύ. Κόστη τα οποία δεν είναι συνάρτηση της παραγόμενης ισχύς (όπως υπό απόσβεση κόστος κατασκευής, κόστος προσωπικού κλπ) δεν υπολογίζονται στο οριακό κόστος και έτσι δεν λαμβάνονται υπόψη στις βραχυπρόθεσμες αποφάσεις παραγωγής.

### Όρια Μονάδας

Κάθε μονάδα παραγωγής έχει ένα μέγιστο που μπορεί να παράξει,  $P_{DGimax}$  και ένα ελάχιστο  $P_{DGimin}$ . Αν η τιμή της αγοράς  $\pi$  είναι τέτοια ώστε:

$$\left. \frac{dC_i(P_{DGi})}{dP_{DGi}} \right|_{P_{DGimax}} \leq \pi$$

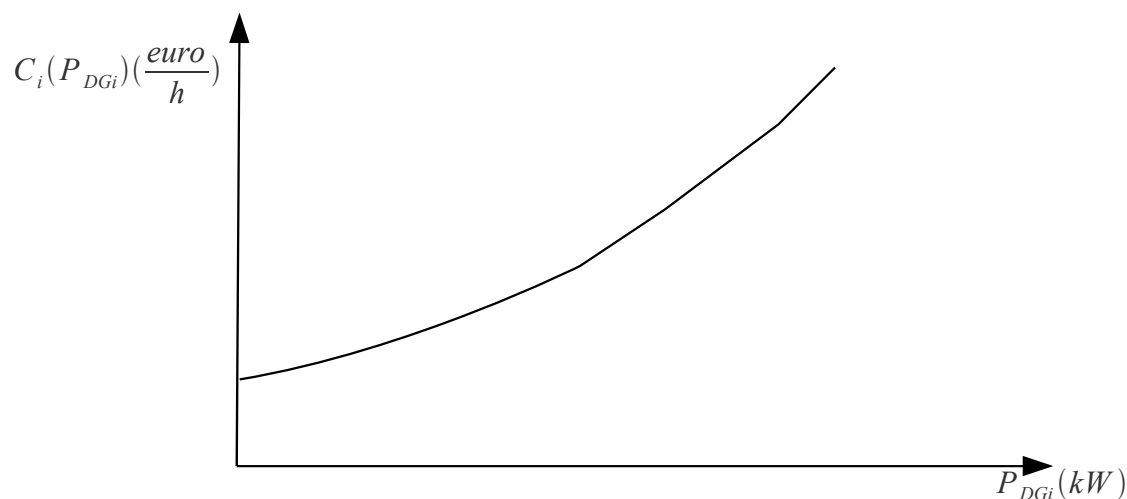
τότε η μονάδα πρέπει να παράγει  $P_{DGimax}$ . Αν από την άλλη η τιμή είναι τέτοια ώστε:

$$\left. \frac{dC_i(P_{DGi})}{dP_{DGi}} \right|_{P_{DGimin}} \geq \pi$$

τότε η μονάδα δε μπορεί να παράξει κερδοφόρα σε αυτή τη τιμή και ο μόνος τρόπος να αποφύγει τη ζημία είναι να σταματήσει τη παραγωγή.

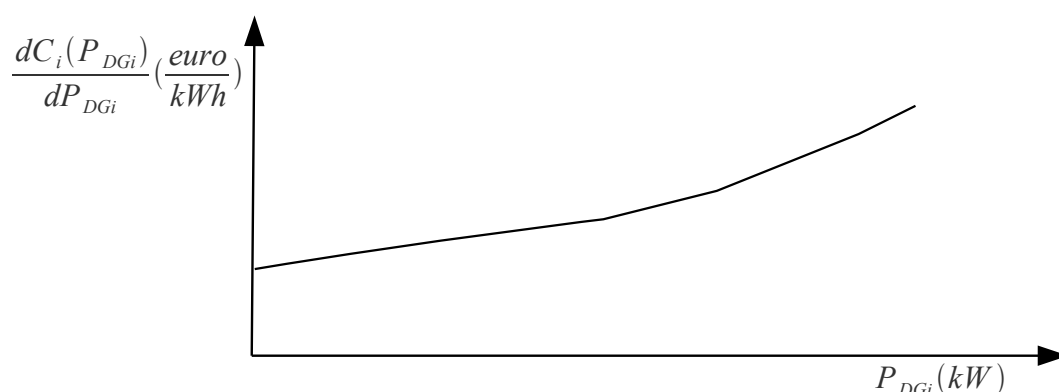
### Καθορισμός Βέλτιστης Στρατηγικής

Για το καθορισμό της βέλτιστης στρατηγικής που πρέπει να ακολουθήσει ο παραγωγός με σκοπό να αυξήσει τα κέρδη του, πρέπει ο ίδιος ο παραγωγός να γνωρίζει τη καμπύλη κόστους προς παραγωγή. Ένα παράδειγμα τέτοιας καμπύλης βλέπουμε στο Σχήμα 5.2. Παρατηρούμε



Σχήμα 5.2: Καμπύλη κόστους προς παραγωγή

ότι είναι μονοτονική και αύξουσα. Για την μεγιστοποίηση του κέρδους χρειαζόμαστε, με βάση την εξίσωση 5.7.1, τη παράγωγο αυτής της καμπύλης. Η καμπύλη στο Σχήμα 5.3 μας δίνει για



Σχήμα 5.3: Καμπύλη οριακού κόστους προς παραγωγή

κάθε παραγωγή  $P_{DGi}$  το οριακό κόστος του παραγωγού. Εξισώνοντας το οριακό κόστος με τη τιμή αγοράς  $\pi$  παίρνουμε για κάθε τιμή αγοράς τη παραγωγή που μεγιστοποιεί το κέρδος. Η καμπύλη που ορίζεται από τη συνάρτηση:

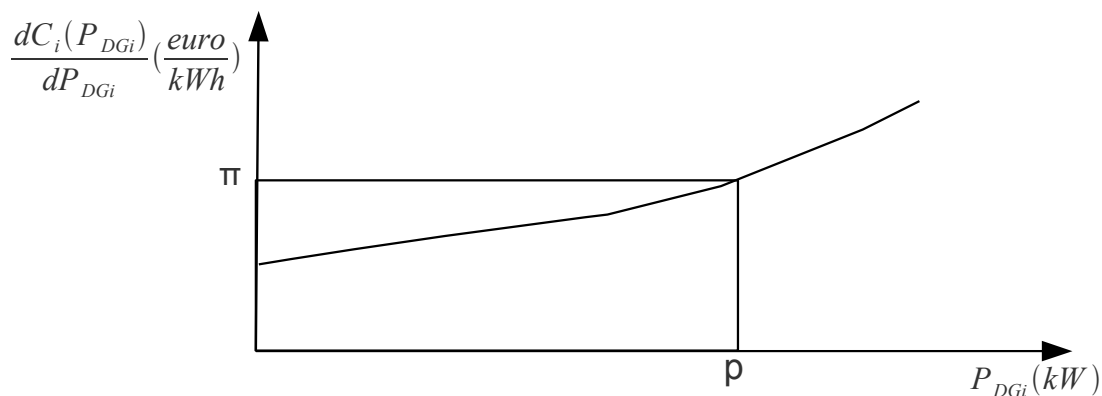
$$\pi = S_i^{-1}(P_{DGi}) = \frac{dC_i(P_{DGi})}{dP_{DGi}} \quad (5.6)$$

ονομάζεται "αντίστροφη καμπύλη προσφοράς" και ορίζει η κάθε δεδομένη τιμή  $P_{DGi}$  για ποια τιμή αγοράς  $\pi$  μεγιστοποιεί τα κέρδη.

Η αντίστροφη της καμπύλης αυτής, δηλαδή η καμπύλη που ορίζεται από τη συνάρτηση:

$$P_{DGi} = S_i(\pi) \quad (5.7)$$





Σχήμα 5.4: Εύρεση παραγωγής από τιμή αγοράς

ονομάζεται "καμπύλη προσφοράς" του παραγωγού και ορίζει για κάθε δεδομένη τιμή αγοράς  $\pi$ , ποια τιμή παραγωγής  $P_{DGi}$  μεγιστοποιεί το κέρδος του παραγωγού. Έτσι, η συνάρτηση 5.7 αποτελεί τη βέλτιστη στρατηγική του παραγωγού για κάθε τιμή αγοράς  $\pi$ .

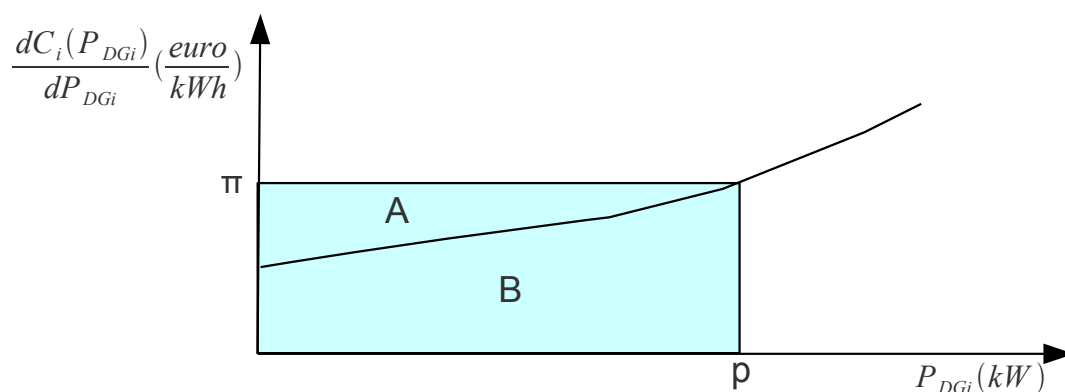
Η καμπύλη στο Σχήμα 5.5 μας δίνει γραφικά τα έσοδα του παραγωγού που ισούνται με τα εμβადά:

$$A + B = \pi * p$$

Για τη παραγωγή  $p$  όμως, το κόστος του παραγωγού το βρίσκουμε από τη καμπύλη κόστους και είναι ίσο με  $C_i(p)$ . Η τιμή αυτή, επιπλέον, ισούται με το εμβαδόν

$$B = \int_{P_{DGi}=0}^p S_i^{-1}(P_{DGi}) dP_{DGi} = C_i(p)$$

Τέλος, με την αφαίρεση των δύο, παραμένει το εμβαδόν  $A$  το οποίο ισούται με το κέρδος του παραγωγού όπως είχαμε δηλώσει στη 5.1.



Σχήμα 5.5: Έσοδα και κέρδη παραγωγού

### Ελαστικότητα προσφοράς ως προς τη τιμή αγοράς

Η αύξηση της τιμής αγοράς ανά kWh οδηγεί τους παραγωγούς να παράξουν περισσότερη ενέργεια. Η ελαστικότητα της προσφοράς ως προς τη τιμή ποσοτικοποιεί αυτή τη σχέση. Ο ορισμός της είναι:

$$\varepsilon = \frac{\% \text{ αλλαγής στη παραγωγή}}{\% \text{ αλλαγής στη τιμή}} = \frac{\frac{dP_{DG_i}}{P_{DG_i}}}{\frac{d\pi}{\pi}} \quad (5.8)$$

Η ελαστικότητα της προσφοράς είναι πάντα θετική. Όσο πιο μεγάλη είναι η ελαστικότητα ενός παραγωγού τόσο πιο ευαίσθητη είναι η παραγωγή του σε διακυμάνσεις της τιμής.

### Παράδειγμα υπολογισμού βέλτιστης στρατηγικής

Υποθέτουμε μια μονάδα διεσπαρμένης παραγωγής με συνάρτηση κόστους:

$$C_i(P_{DG_i}) = a + b * P_{DG_i} + c * P_{DG_i}^2$$

Το οριακό κόστος της είναι:

$$\frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} = b + 2 * c * P_{DG_i}$$

Για τη μεγιστοποίηση του κέρδους για τη τιμή  $\pi$  με βάση την εξίσωση 5.5:

$$\pi = \frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} = b + 2 * c * P_{DG_i} = S_i^{-1}(P_{DG_i})$$

Αντιστρέφοντας βρίσκουμε:

$$P_{DG_i} = \frac{\pi - b}{2 * c} = S_i(\pi)$$

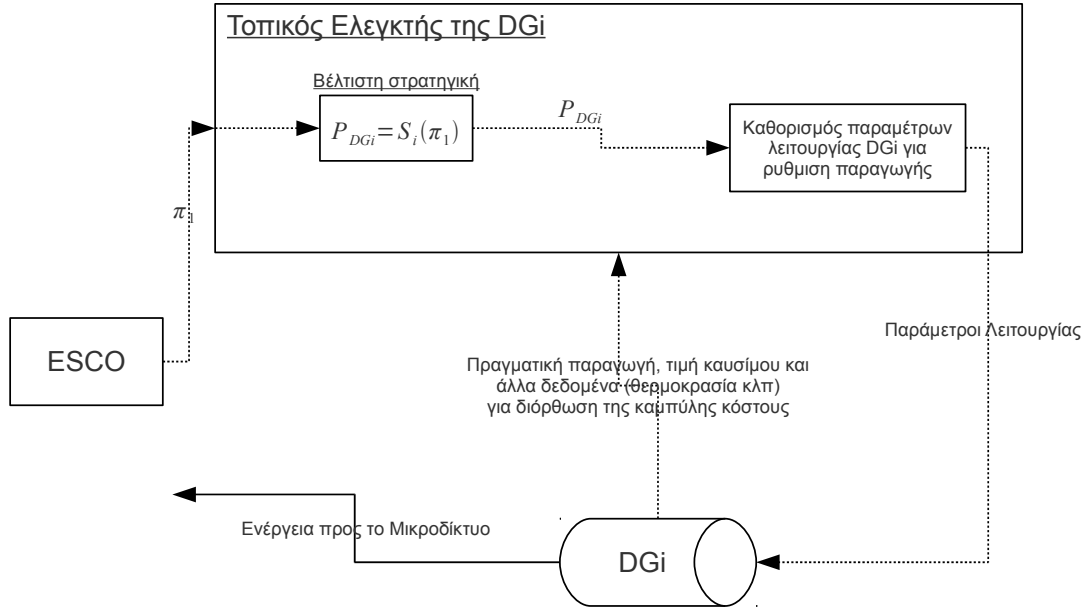
η οποία είναι και η καλύτερη στρατηγική του παραγωγού για κάθε τιμή  $\pi$ .

### 5.7.2 Τοπικοί Ελεγκτές στη DG

Κάθε χρονική περίοδο που παίζεται το παιχνίδι, οι DG του Μικροδικτύου λαμβάνουν ένα σήμα  $\pi_1$  από την ESCO. Με βάση αυτό το σήμα και τοπικά δεδομένα, οι DG αποφασίζουν ο καθένας ξεχωριστά την παραγωγή που θα τους αποφέρει τα μεγαλύτερα κέρδη (αφού θεωρήσαμε ότι ακολουθούν στρατηγική μεγιστοποίησης κέρδους). Τις αποφάσεις αυτές τις αναλαμβάνει ο τοπικός ελεγκτής της εκάστοτε DG.

Πρώτα, ο τοπικός ελεγκτής πρέπει να προσδιορίσει τη συνάρτηση κόστους της μονάδας DG. Ο υπολογισμός αυτός γίνεται με μετρήσεις στη μονάδα και σχηματισμό της καμπύλης εισόδου-εξόδου η οποία δίνει πόσα MJ/h χρειάζεται η μονάδα για κάθε τιμή παραγόμενης ισχύος. Στη συνέχεια, η καμπύλη αυτή πολλαπλασιασμένη με τη τιμή καυσίμου (euro/MJ) μας δίνει τη συνάρτηση κόστους. Έτσι, η συνάρτηση κόστους εξαρτάται άμεσα από τη τιμή του καυσίμου αλλά και από άλλους παράγοντες, όπως, θερμοκρασία, υγρασία κλπ

Ο τοπικός ελεγκτής παίρνει αυτά τα δεδομένα και σχηματίζει τη καμπύλη κόστους  $C_i(P_{DG_i})$ . Μετά, ακολουθώντας τα βήματα που δείξαμε στο παράδειγμα, υπολογίζει τη καμπύλη  $P_{DG_i} = S_i(\pi)$ . Έτσι, πριν από το παιχνίδι, ο τοπικός ελεγκτής πρέπει να συλλέξει τα δεδομένα που χρειάζεται και να σχηματίσει τη βέλτιστη στρατηγική του προς τη τιμή  $\pi$  που θα δεχτεί.



Σχήμα 5.6: Λειτουργία τοπικού ελεγκτή σε DG

### 5.7.3 Διεσπαρμένη Παραγωγή στο Μοντέλο Μικροδικτύου

Στο Μικροδίκτυο θεωρούμε ότι υπάρχουν 2 σχέδια πληρωμής των DG. Κάποιοι DG πληρώνονται με Feed In Tariff. Αυτό σημαίνει ότι πληρώνονται συνεχώς με κάποια σταθερή τιμή για την ενέργεια που παράγουν. Τέτοιοι παραγωγοί, συνήθως, είναι μικρά φωτοβολταϊκά, ανεμογεννήτριες και άλλες μονάδες ΑΠΕ. Σκοπός του σχεδίου αυτού είναι να ενισχύσει και να προωθήσει την εγκατάσταση μονάδων συγκεκριμένου τύπου οι οποίες αν παρήγαγαν με βάση τη κανονική τιμή της αγοράς θα ήταν μη κερδοφόρες. Το δεύτερο σχέδιο πληρωμών είναι με μεταβλητή τιμή. Οι DG δέχονται μια τιμή από την ESCO και με βάση αυτή τη τιμή πληρώνονται για τη παραγωγή τους.

#### Με FIT

Συνάρτηση κέρδους:

$$R_{DG_i} = FIT_i * P_{DG_i} - C_i(P_{DG_i}) \quad (5.9)$$

όπου:

- $FIT_i$ : feed in tariff που πληρώνεται η i DG (euro/kWh)
- $P_{DG_i}$ : παραγωγή της i DG (kW)
- $C_i(P_{DG_i})$ : κόστος παραγωγής  $P_{DG_i}$  (euro/h)

Μεγιστοποιώντας τη συνάρτηση κέρδους όπως δείξαμε πιο πάνω:

$$\begin{aligned} \max R_{DG_i} &= \max[FIT_i * P_{DG_i} - C_i(P_{DG_i})] \\ \Rightarrow \frac{dR_{DG_i}}{dP_{DG_i}} &= FIT_i - \frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} = 0 \end{aligned} \quad (5.10)$$

$$\Rightarrow FIT_i = \frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} = S_i^{-1}(P_{DG_i}) \quad (5.11)$$

Αντιστρέφοντας τη συνάρτηση και λαμβάνοντας υπόψη ότι η τιμή  $FIT_i$  θεωρείται σταθερή, βρίσκουμε:

$$P_{DG_i} = S_i(FIT_i) = \text{σταθερό}$$

Έτσι, μια DG η οποία πληρώνεται με σταθερή τιμή ίση με  $FIT_i$ , έχει ως καλύτερη στρατηγική να παράγει μια συγκεκριμένη, σταθερή τιμή ισχύος. Αυτή καθορίζεται από:

$$\begin{aligned} \frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} \Big|_{P_{DG_{imax}}} &\leq FIT_i && \rightarrow P_{DG_i} = P_{DG_{imax}} \\ \frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} \Big|_{P_{DG_{imin}}} &\leq FIT_i \leq \frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} \Big|_{P_{DG_{imax}}} && \rightarrow P_{DG_i} = S_i(FIT_i) \\ FIT_i &\leq \frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} \Big|_{P_{DG_{imin}}} && \rightarrow P_{DG_i} = 0 \end{aligned}$$

Συνήθως, η τιμή  $FIT_i$  είναι υπολογισμένη ώστε οι μονάδες αυτές να παράγουν το μέγιστο τους (π.χ. φωτοβολταϊκά στις στέγες).

### Μεταβλητή τιμή

Συνάρτηση κέρδους:

$$R_{DG_i} = \pi_1 * P_{DG_i} - C_i(P_{DG_i}) \quad (5.12)$$

όπου:

- $\pi_1$ : η τιμή που στέλνεται από την ESCO στη DG (euro/kWh)
- $P_{DG_i}$ : παραγωγή της i DG (kW)
- $C_i(P_{DG_i})$ : κόστος παραγωγής  $P_{DG_i}$  (euro/h)

Ακολουθώντας πάλι τα ίδια βήματα για καθορισμό της βέλτιστης στρατηγικής:

$$\begin{aligned} \pi_{1max} = \frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} \Big|_{P_{DG_{imax}}} &\leq \pi_1 && \rightarrow P_{DG_i} = P_{DG_{imax}} \\ \frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} \Big|_{P_{DG_{imin}}} &\leq \pi_1 \leq \frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} \Big|_{P_{DG_{imax}}} && \rightarrow P_{DG_i} = S_i(\pi_1) \\ \pi_1 &\leq \frac{dC_i(P_{DG_i})}{dP_{DG_i}} \Big|_{P_{DG_{imin}}} = \pi_{1min} && \rightarrow P_{DG_i} = 0 \end{aligned}$$

Η με τη χρήση Βηματικών Συναρτήσεων (Step Functions):

$$P_{DG_i}(\pi_1) = S_i(\pi_1) * SF(\pi_1 - \pi_{1min}) - S_i(\pi_1) * SF(\pi_1 - \pi_{1max}) + P_{DG_{imax}} * SF(\pi_1 - \pi_{1max}) \quad (5.13)$$

όπου:

$$SF(\pi - \pi_0) = \begin{cases} 0 & \text{αν } \pi \leq \pi_0 \\ 1 & \text{αν } \pi > \pi_0 \end{cases} \quad (5.14)$$

## 5.8 Καταναλωτές

Σε αυτό το υποκεφάλαιο θα δούμε το παιχνίδι από τη σκοπιά των καταναλωτών που προσπαθούν να ελαχιστοποιήσουν το κόστος για τη κατανάλωση ενέργειας. Θα μελετήσουμε την έννοια της ελαστικότητας της ζήτησης ως προς τη τιμή (Demand Price elasticity) και της διαχείρισης της ζήτησης (Demand Dispatch).

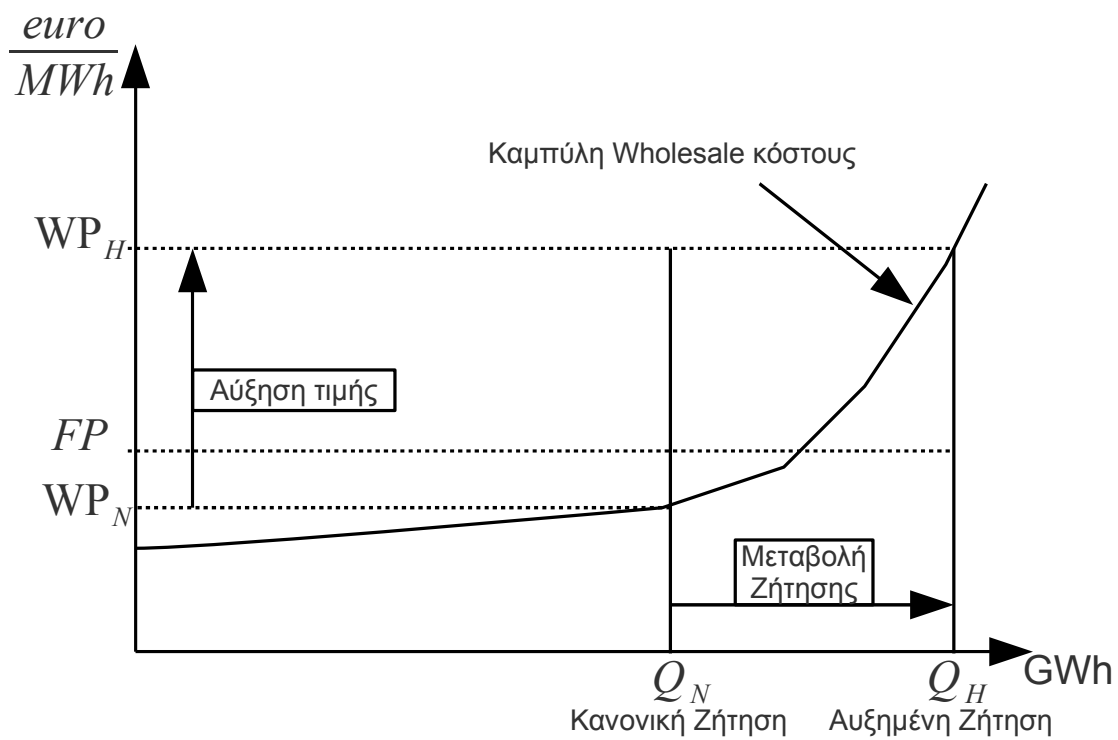
### 5.8.1 Ελαστικότητα Ζήτησης ως προς τη τιμή και επίδραση στην αγορά

Σήμερα, η χονδρεμπορική αγορά, από την οποία οι εταιρίες διανομής και aggregators αγοράζουν ενέργεια, με την Retail αγορά, από την οποία οι οικιακοί/εμπορικοί κλπ χρήστες αγοράζουν ενέργεια είναι σχεδόν αποσυνδεδεμένες. Από τη πλευρά της προσφοράς, η τιμή της ενέργειας στην χονδρεμπορική αγορά μεταβάλλεται σημαντικά κατά τη διάρκεια του χρόνου και από περιοχή σε περιοχή (λόγω περιορισμών στη μεταφορά σε ορισμένες περιοχές), και μερικές φορές αλλάζει δραματικά από μια μέρα στην επόμενη λόγω απρόσμενων αλλαγών στη ζήτηση ή στη διαθεσιμότητα μονάδων παραγωγής. Από τη πλευρά της ζήτησης, τα μοτίβα κατανάλωσης ενέργειας αλλάζουν κυρίως λόγω εποχιακών ή καθημερινών συνθηκών (π.χ. καιρός) που είναι ανεξάρτητες από το κόστος της ενέργειας στη χονδρεμπορική αγορά. Αυτό συμβαίνει διότι οι περισσότεροι καταναλωτές σήμερα αντιμετωπίζουν μια σταθερή τιμή retail και δεν έχουν κίνητρο να μεταβάλουν τη κατανάλωσή τους αν κάποια στιγμή έχει μεγάλο κόστος στη χονδρεμπορική αγορά ή μικρό. Έτσι, η ζήτηση των καταναλωτών παραμένει σε μεγάλο βαθμό ανεξάρτητη από τις συνθήκες στη χονδρεμπορική αγορά ενέργειας, πράγμα το οποίο οδηγεί σε μη αποδοτική και άσκοπη χρήση και επένδυση σε πόρους παραγωγής και μεταφοράς.

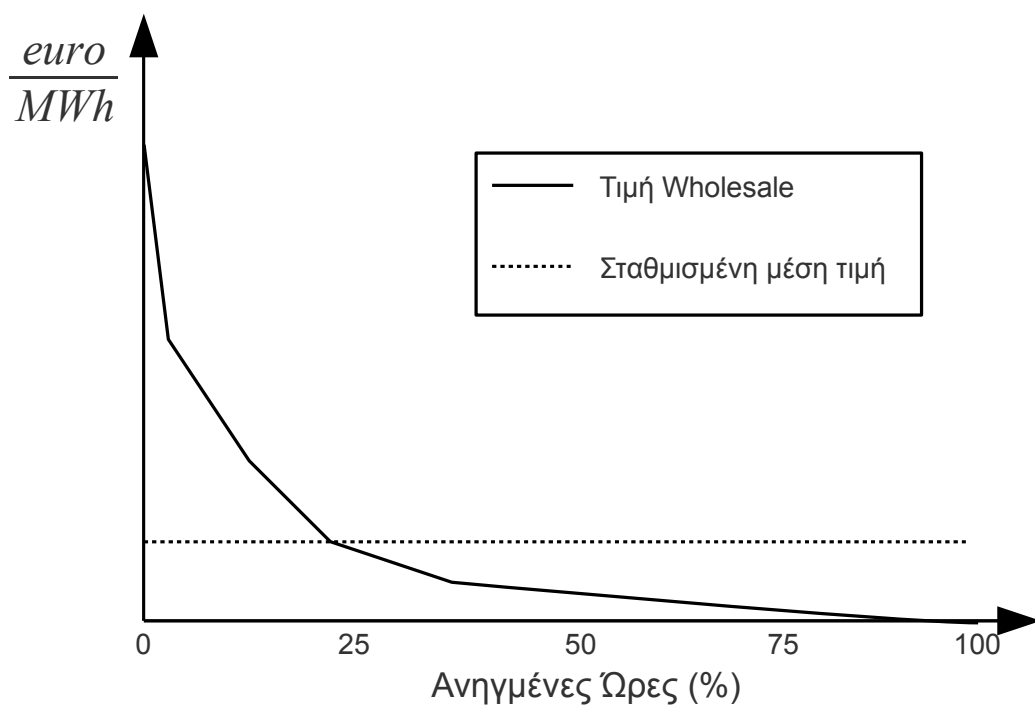
Αν αντί αυτού, οι καταναλωτές αντιμετώπιζαν τιμές που να αντανακλούσαν τη κατάσταση στη χονδρεμπορική αγορά θα προσφερόταν ένας μηχανισμός για τη μείωση του κόστους και αύξηση της αξιοπιστίας. Η μείωση της κατανάλωσης σε περιόδους που το κόστος στη χονδρεμπορική αγορά είναι μεγάλο μπορεί να λειτουργήσει σαν μια εικονική εφεδρεία, διότι αντικαθιστά την εφεδρεία σε παραγωγή που θα έπρεπε να υπάρχει διαθέσιμη για να καλύψει τη κατανάλωση αυτή και να κρατήσει το σύστημα σε ισορροπία.

Το Σχήμα 5.7 μας δείχνει πως η πλήρως ανελαστική ζήτηση μπορεί να πιέσει τη χονδρεμπορική αγορά και να οδηγήσει σε αύξηση του κόστους. Αναπαριστά μια χαρακτηριστική καμπύλη προσφοράς (δες 2) για μια συγκεκριμένη ώρα της μέρας. Η καμπύλη οριακού κόστους έχει θετική και αύξουσα κλίση διότι οι παραγωγοί με μικρότερο οριακό κόστος παραγωγής παράγουν πρώτοι, ενώ οι παραγωγοί με μεγαλύτερο οριακό κόστος παράγουν όταν η ζήτηση αυξηθεί πολύ. Το κόστος αυξάνει απότομα καθώς η παραγόμενη ενέργεια πλησιάζει τη μέγιστη δυνατότητα του συστήματος. Το σχήμα, επίσης, αναπαριστά 2 διαφορετικά επίπεδα ζήτησης,  $Q_N$  και  $Q_H$ , που αντιστοιχούν σε κανονικό και ζεστό καιρό αντίστοιχα. Οι καμπύλες ζήτησης αυτές αναπαριστούνται σαν κάθετες γραμμές καθώς οι καταναλωτές πληρώνουν σε μια σταθερή τιμή  $FP$  και έτσι δεν έχουν κίνητρο να μεταβάλουν τη κατανάλωσή τους σε διαφορετικές συνθήκες του συστήματος. Το σημείο τομής της καμπύλης οριακού κόστους και των καμπυλών ζήτησης μας δίνει τις αντίστοιχες τιμές της αγοράς στα δύο αυτά σενάρια.

Όπως φαίνεται στο σχήμα, σε κανονικά επίπεδα φορτίου η τιμή της αγοράς είναι σε σχετικά χαμηλά επίπεδα ( $WP_N$ ) ενώ όταν η ζήτηση αυξάνεται, η τιμή εκτοξεύεται σε πολύ ψηλότερα επίπεδα ( $WP_H$ ). Η εμφάνιση τέτοιων κορυφώσεων σηματοδοτεί την ανάγκη για ύπαρξη μεγαλύτερης εφεδρείας ώστε να μπορεί να καλυφθεί η επιπλέον ζήτηση από το ανελαστικό φορτίο αξιόπιστα. Αν όμως η χρέωση των καταναλωτών γινόταν με βάση τη τιμή της αγοράς ή αντιπροσώπευε τις διακυμάνσεις της, η καμπύλη ζήτησης θα μετασχηματιζόταν σε ευθεία με φθίνουσα τιμή (αρνητική κλίση), έτσι, η τιμή της ζήτησης θα έπεφτε σε τιμές μικρότερες του  $Q_H$ . Αυτή η μείωση στη ζήτηση θα οδηγούσε σε μια αντίστοιχη μείωση στην ανάγκη για επιπλέον παραγωγή, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για διατήρηση ή εγκατάσταση επιπλέον μονάδων παραγωγής.



Σχήμα 5.7: Επίδραση πλήρους ανελαστικής Ζήτησης



Σχήμα 5.8: Τιμές χονδρεμπορικής αγοράς

Στο Σχήμα 5.8 βλέπουμε μια χαρακτηριστική καμπύλη τιμών της χονδρεμπορικής αγοράς ενός συστήματος προς το ποσοστό ωρών που αυτές παρουσιάστηκαν για τη χρονική περίοδο του καλοκαιριού [1]. Η διακεκομμένη γραμμή μας δείχνει το σταθμισμένο μέσο όρο αυτών των τιμών, δηλαδή, τη σταθερή τιμή που θα έπρεπε να χρεώνεται σε αυτό το σύστημα έτσι ώστε τα έσοδα να είναι τα ίδια με το να χρεωνόταν το φορτίο με τη μεταβλητή τιμή της αγοράς. Βλέπουμε ότι περισσότερο από 70% του χρόνου το κόστος της ενέργειας στη χονδρεμπορική αγορά είναι μικρότερο από τη μέση τιμή, για περίπου 10% του χρόνου η τιμή είναι η διπλάσια ενώ για 3% του χρόνου το κόστος είναι τουλάχιστο τριπλάσιο από τη μέση τιμή!

Για ένα σημαντικό, αλλά μικρό σε αριθμό ωρών, χρονικό διάστημα, το κόστος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι πολύ περισσότερο από την αξία που οι καταναλωτές είναι διατεθειμένοι να πληρώσουν γι' αυτή. Η μείωση στην καταναλισκόμενη ενέργεια τις ώρες αυτές επιφέρει μειώσεις στο κόστος στην αγορά πολύ μεγαλύτερες από την αξία φορτίου (Value Of Power)[1] των καταναλωτών που χάνεται. Ενώ, η μεταφορά φορτίου στο μεγάλο ποσοστό του χρόνου που η μέση τιμή είναι μεγαλύτερη από το κόστος, αποφέρει μεγαλύτερο κέρδος στους καταναλωτές από ότι κόστος στους παραγωγούς. Συνολικά, μειώνοντας τη κατανάλωση σε περιόδους ψηλών τιμών (αιχμής) και μεταφέροντας κάποια φορτία σε περίοδο χαμηλών τιμών, τόσο οι παραγωγοί, όσο και οι καταναλωτές έχουν κέρδος.

### 5.8.2 Συνδέοντας τη χονδρεμπορική αγορά με την λιανική αγορά: Demand Dispatch και Price-Responsive Demand

Η λύση για τη σύνδεση των δύο αγορών έρχεται με την υλοποίηση ενός συστήματος στο οποίο η ζήτηση να αντιδρά στη πραγματική τιμή κόστους της ηλεκτρικής ενέργειας, δηλαδή, η ελαστικότητα ως προς τη τιμή της καμπύλης ζήτησης να αυξηθεί [2]. Για να γίνει κάτι τέτοιο, πρέπει να υπάρξει κάποια επικοινωνία και με κάποιο τρόπο να γνωστοποιείται στον καταναλωτή η κατάσταση στην αγορά και αυτός να μεταβάλλει ανάλογα τη κατανάλωσή του. Πριν εφαρμοστεί οποιοδήποτε σύστημα όμως, πρέπει να τηρούνται κάποιοι κανόνες:

- Το δικαίωμα του καταναλωτή στην επιλογή και στη διαχείριση των προσωπικών του στοιχείων. Δηλαδή, ο καταναλωτής κάνει τις επιλογές.
- Τα πρωτόκολλα επικοινωνίας του κάθε συστήματος να είναι ανοικτά, ευέλικτα, ασφαλή και πεπερασμένα στον αριθμό.
- Η τιμολόγηση πρέπει να δίνει κίνητρα για τη πιο αποδοτική διαχείριση της ενέργειας και ταυτόχρονα να επιτρέπει στους καταναλωτές να γλιτώνουν χρήματα.

Πρακτικά, με βάση τα τρία πιο πάνω κριτήρια, έχουν προταθεί τρία προγράμματα για τη λειτουργία ενός τέτοιου συστήματος:

#### Πρόγραμμα ειδοποίησης

Οι καταναλωτές πληρώνονται μια αποζημίωση ή πληρώνουν ένα πρόστιμο που υπολογίζεται με βάση τη μείωση φορτίου τους όταν το πρόγραμμα τους ειδοποιήσει, δηλαδή, κατά τη διάρκεια ενός γεγονότος. Ένα τέτοιο πρόγραμμα χρειάζεται τρόπους να υπολογίζει τη μείωση της κατανάλωσης κατά τη διάρκεια του γεγονότος. Συνήθως, ο υπολογισμός γίνεται συγκρίνοντας τη πραγματική κατανάλωση με μια υπολογισμένη κατανάλωση αναφοράς, η οποία είναι συγκεκριμένη για τον κάθε καταναλωτή για τη συγκεκριμένη στιγμή. Το πρόγραμμα αυτό ήταν από τα πρώτα που μπήκανε σε λειτουργία και συνήθως απευθυνόταν σε μεγάλους βιομηχανικούς καταναλωτές.

### Απευθείας Διαχείριση Φορτίου (Demand Dispatch)

Με βάση αυτό το πρόγραμμα, οι καταναλωτές δέχονται μια αποζημίωση ή μια έκπτωση στο τιμολόγιο και σαν αντάλλαγμα επιτρέπουν στο διαχειριστή του προγράμματος (που μπορεί να είναι ο διαχειριστής του συστήματος, ο aggregator, η εταιρία διανομής κλπ) να διαχειρίζεται (ανάβει/σβήνει) κάποιες από τις συσκευές του καταναλωτή υπό συγκεκριμένες συνθήκες.

### Μεταβλητή τιμολόγηση

Οι δομές μεταβλητής τιμολόγησης δεν είναι ακριβώς "πρόγραμμα" αλλά μπορεί να περιγραφεί σαν τέτοιο. Με αυτό το σύστημα, οι καταναλωτές κάθε ώρα πληρώνουν τη κατανάλωση τους με βάση κάποια τιμή. Δεν υπάρχει λόγος υπολογισμού του τι θα είχαν καταναλώσει υπό άλλες συνθήκες και του πόσο φορτίο έκοψαν για τον υπολογισμό του λογαριασμού.

### 5.8.3 Τοπικοί Ελεγκτές στη Κατανάλωση

Πρόσφατες μελέτες<sup>1</sup> έχουν δείξει ότι πολύ λίγοι άνθρωποι θα ήθελαν να ξοδεύουν χρόνο κάθε μέρα καταλαβαίνοντας και συντονίζοντας τις συσκευές τους με τα σήματα ελέγχου ή τιμών που δέχονται. Γι'αυτό το λόγω εμφανίζεται η ανάγκη για τη λειτουργία ενός αυτοματοποιημένου συστήματος, με τη χρήση ενός τοπικού ελεγκτή, που θα προσφέρει στο καταναλωτή το κέρδος χωρίς όμως τη ταλαιπωρία της χειροκίνητης ρύθμισης των συσκευών, και ταυτόχρονα θα προσδίδει στο προφίλ του καταναλωτή τη κατάλληλη καμπύλη ζήτησης που θα βοηθάει στην εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους παραγωγής. Ένας ευθύς τρόπος για να ελέγχουν οι καταναλωτές το βαθμό συμμετοχής τους, βασισμένο στις προσωπικές τους ανάγκες, είναι μέσω κάποιων προκαθορισμένων προφίλ. Με βάση τα κίνητρα και τις αποζημιώσεις που δίνονται από τους aggregators και τα προφίλ αυτά, οι καταναλωτές μπορούν να αποφασίσουν αν θα συμμετάσχουν πλήρως, δε θα συμμετάσχουν καθόλου ή σε κάποιο βαθμό (αν αυτό προσφέρεται).

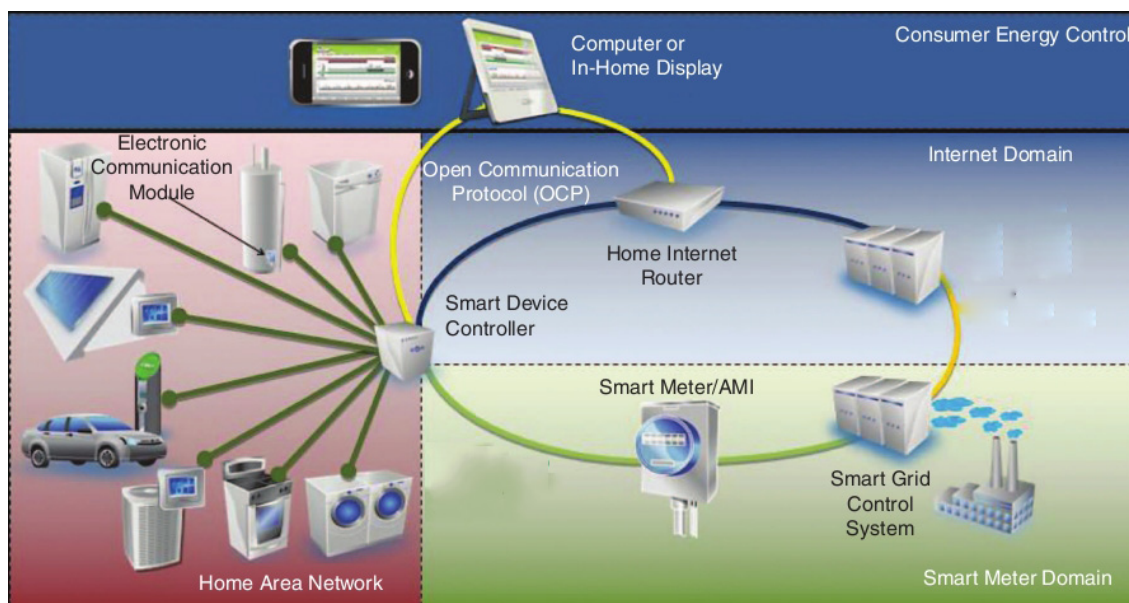
Στη ζήτηση ηλεκτρικής ενέργειας μεγάλο ρόλο παίζουν οι οικιακοί καταναλωτές που αντιστοιχούν στο 38% της συνολικής κατανάλωσης [15]. Ένα παράδειγμα αυτοματοποιημένου συστήματος ελέγχου συσκευών οικιακού χρήστη, με τη χρήση τοπικού ελεγκτή, που σκοπό έχει τη μεταβολή της ζήτησης με βάση κάποιο σήμα ελέγχου ή τιμής παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.9 [15].

Σημαντικό μέρος της διαδικασίας αυτής είναι η ύπαρξη αρκετών συσκευών με τη δυνατότητα ελέγχου ή ρύθμισης της κατανάλωσης τους. Μια λίστα τέτοιων πιθανώς ελεγχόμενων συσκευών είναι:

- πλυντήρια πιάτων
- πλυντήρια και στεγνωτήρια ρούχων
- ηλεκτρικοί θερμοσίφωνες
- κλιματιστικά (ζεστού ή κρύου αέρα)
- μερικές λειτουργίες ψυγείων (π.χ. κύκλος απόψυξης)
- φόρτιση μπαταριών σε οικιακές συσκευές
- φορτιζόμενα ηλεκτρικά ή υβριδικά αυτοκίνητα

<sup>1</sup>Litos Strategic Communication and Continental Automated Building Association [15]





Σχήμα 5.9: Σύστημα αυτοματοποιημένου ελέγχου συσκευών με τοπικό ελεγκτή

Ο τοπικός ελεγκτής μπορεί να ασκήσει τρία είδη ελέγχου στις διάφορες συσκευές:

#### Προγραμματισμός/Μετατόπιση φορτίων

Ο τοπικός ελεγκτής μπορεί να προγραμματίζει τη λειτουργία κάποιων συσκευών ανάβοντας τις όταν η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας είναι χαμηλή και σβήνοντας τις όταν η τιμή είναι ψηλή, αποφέροντας έτσι κάποιο κέρδος στον καταναλωτή. Παραδείγματα τέτοιων συσκευών είναι τα πλυντήρια πιάτων ή ρούχων, το ημερήσιο πότισμα κήπων, η φόρτιση συγκεκριμένων συσκευών (όπως ηλεκτρικό αυτοκίνητο) κλπ. Η κάθε συσκευή μπορεί να έχει, ανάλογα με τη κατάστασή της (status), μια "τιμή ικανοποίησης φορτίου". Δηλαδή, όταν η τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, που ανακοινώνει η ESCO στον τοπικό ελεγκτή, πέσει κάτω από τη τιμή ικανοποίησης φορτίου, τότε το φορτίο αυτό ικανοποιείται από τον ελεγκτή (ενεργοποιείται η αντίστοιχη συσκευή). Η τιμή αυτή μπορεί να είναι σταθερή ή μεταβαλλόμενη ανάλογα πάντα με τις ανάγκες του καταναλωτή, τη κατάσταση και το είδος των υπό έλεγχο συσκευών.

#### Μεταβολή κατανάλωσης

Κάποιες συσκευές μπορούν να μεταβάλλουν τη κατανάλωσή τους αλλάζοντας κάποιους στόχους σε αυτές. Για παράδειγμα, η αύξηση της επιθυμητής θερμοκρασίας στο θερμοστάτη ενός κλιματιστικού κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, οδηγεί σε λιγότερη κατανάλωση ενέργειας, καθώς η διαφορά θερμοκρασίας με τον εξωτερικό χώρο είναι μικρότερη και το κλιματιστικό χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για να καλύπτει τις απώλειες του χώρου.

#### Αποθήκευση ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλες μορφές

Τέλος, ο τοπικός ελεγκτής μπορεί να αποθηκεύει ηλεκτρική ενέργεια σε άλλες μορφές, όταν η τιμή είναι χαμηλή και να την ανακτά όταν η τιμή ανεβαίνει. Για τον έλεγχο αυτό πρέπει να υπάρχει ειδικός μετρητικός μηχανισμός. Χρησιμοποιώντας πάλι το παράδειγμα του κλιματιστικού το καλοκαίρι, ο ελεγκτής μπορεί να μεταβάλει τη θερμοκρασία του θερμοστάτη από  $\Theta_{\text{χαμηλή}}$  μέχρι  $\Theta_{\text{ψηλή}}$ . Όταν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας κατεβαίνει, ο ελεγκτής θα θέτει τον κλιματισμό στη χαμηλή θερμοκρασία, έτσι το κλιματιστικό θα

καταναλώνει ηλεκτρική ενέργεια προσπαθώντας να κατεβάσει τη θερμοκρασία. Όταν η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας ανέβει, τότε ο ελεγκτής θα θέσει τον κλιματισμό στη ψηλή θερμοκρασία, οδηγώντας το κλιματιστικό να σταματήσει να καταναλώνει ενέργεια και να περιμένει μέχρι η θερμοκρασία να φτάσει στη ψηλή θερμοκρασία (λόγω απωλειών) και τότε να ξεκινήσει πάλι να λειτουργεί για να κρατήσει τη θερμοκρασία εκεί καλύπτοντας τις απώλειες. Φυσικά, η ενέργεια που αποθηκεύεται με αυτό τον τρόπο εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως μέγεθος χώρου, θερμοδυναμικοί συντελεστές, είδος κλιματιστικού, τιμές θερμοκρασιών κλπ. Παρόμοιος έλεγχος μπορεί να γίνει σε συσκευές ψύξης (π.χ. ψυγεία), σε ντεπόζιτα (γεμίζοντας το νερό όταν η τιμή είναι χαμηλή και ανακτώντας το όταν ανεβαίνει), σε αφυγραντήρες κλπ.

#### 5.8.4 Καμπύλη Ζήτησης καταναλωτών

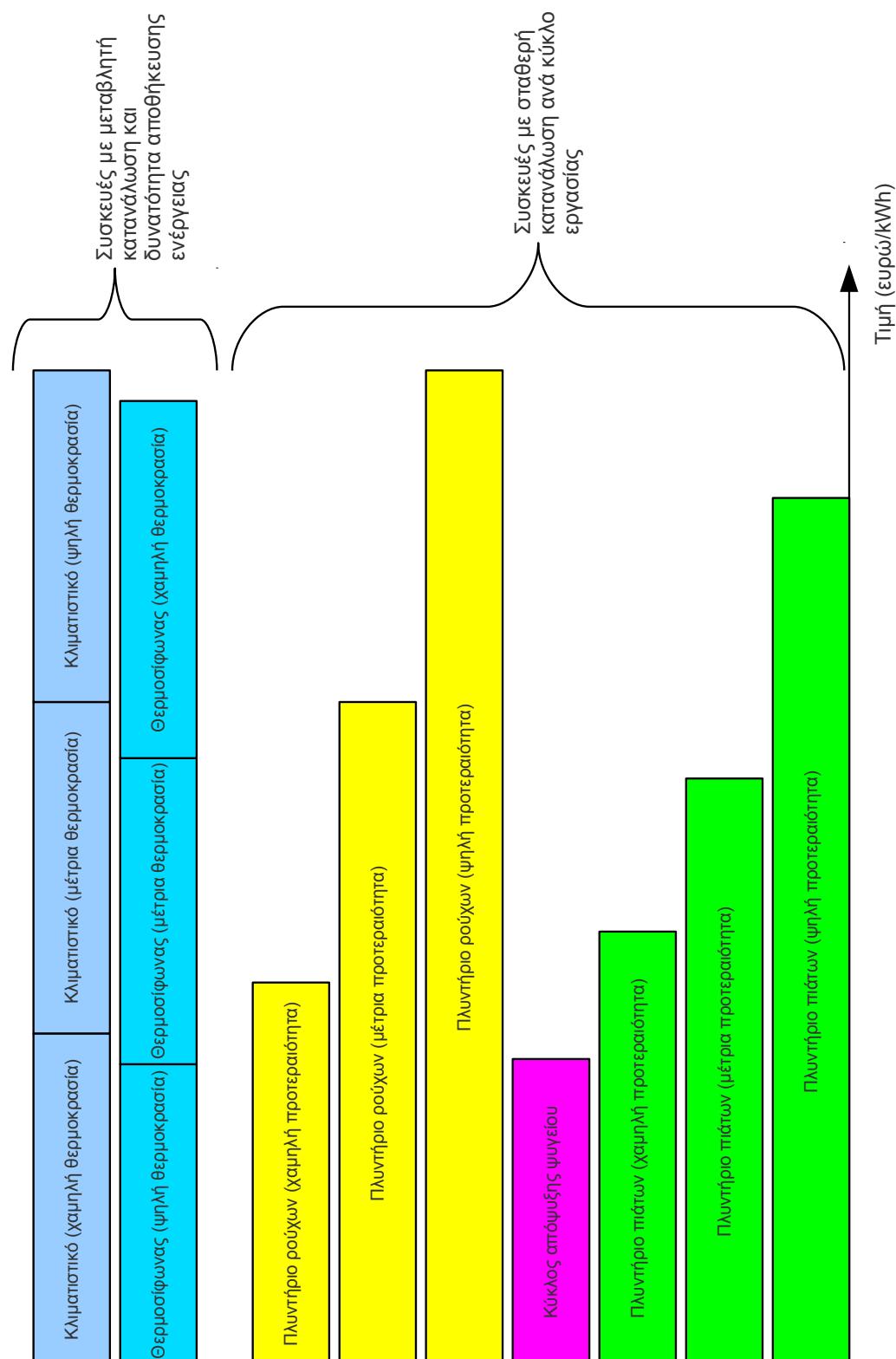
Η καμπύλη ζήτησης αναπαριστά τη διάθεση των καταναλωτών να καταναλώσουν ενέργεια σαν συνάρτηση της τιμής στην οποία την αγοράζουν. Δηλαδή, για κάθε τιμή πώλησης (ευρώ/kWh) βρίσκουμε από τη καμπύλη το φορτίο που είναι διατεθειμένος να ζητήσει ο καταναλωτής. Ο σχηματισμός τέτοιων καμπυλών είναι επίπονη και μακρά διαδικασία. Αρχικά πρέπει να καθοριστεί η αξία φορτίου της κάθε συσκευής για τον καταναλωτή. Μετά, για κάθε συσκευή πρέπει να καθορίσουμε το προφίλ κατανάλωσης και να βρούμε τη κατανάλωση που έχει αυτή η συσκευή. Χρησιμοποιώντας τα δυο αυτά στοιχεία καθορίζουμε τη καμπύλη Ζήτησης.

#### Καθορισμός Αξίας Φορτίου (Value of Power) συσκευών για καταναλωτές

Το πιο δύσκολο ίσως κομμάτι στο καθορισμό της Καμπύλης Ζήτησης έγκειται στο καθορισμό της αξίας που έχει η χρήση κάθε συσκευής για τον καταναλωτή. Δηλαδή, για κάθε συσκευή την οποία μπορούμε να χειριστούμε θέλουμε να βρούμε τη μέγιστη αξία (χρηματική) έχει η χρήση της, και επομένως η ενέργεια που καταναλώνει, για τον χρήστη. Αυτή η τιμή, αντιπροσωπεύει τη μέγιστη τιμή για την οποία ο καταναλωτής θα ήταν διατεθειμένος να χρησιμοποιήσει αυτή τη συσκευή. Για όλα τα υπόλοιπα αγαθά στο κόσμο, που οι αγορές λειτουργούν ελεύθερα και η τιμή ενός αγαθού που πωλείται αντιπροσωπεύει τη πραγματική του αξία, αυτό είναι δεδομένο.

Την ίδια ακριβώς λογική θέλουμε να εισάγουμε στην retail αγορά ενέργειας. Επειδή, όμως, η kWh συνδυάζεται πάντα με κάποια χρήση, πρέπει αντιστοιχήσουμε την αξία της με τη συσκευή που την καταναλώνει. Για παράδειγμα, μια kWh που καταναλώνεται για φωτισμό το βράδυ έχει μεγάλη αξία. Μια kWh που καταναλώνεται σε ένα χειρουργείο κατά τη διάρκεια μιας εγχείρησης έχει πολύ μεγαλύτερη αξία! Αλλά μια kWh που καταναλώνεται για την απόψυξη του ψυγείου δεν έχει τόση μεγάλη αξία όσο οι προηγούμενες. Πως όμως καθορίζεται η αξία αυτή και πως αυτή μεταβάλλεται από καταναλωτή σε καταναλωτή; Τα ερωτήματα αυτά μπορούν να απαντηθούν μόνο μέσα από έρευνα αγοράς και στατιστικές μεθόδους. Συνήθως, οι τιμές που εξάγονται δεν απευθύνονται σε όλους τους καταναλωτές αλλά οι καταναλωτές χωρίζονται σε ομάδες ανάλογα με το προφίλ και οι τιμές διαφοροποιούνται ανάλογα με αυτό.

Στο Σχήμα 5.10 βλέπουμε ένα παράδειγμα καθορισμού τέτοιων τιμών που αναλογεί σε ένα προφίλ χρήστη. Σε αυτό βλέπουμε συσκευές που εμπίπτουν στα τρία είδη ελέγχου (δες 5.8.3) και πως ενεργοποιούνται ανάλογα με τη τιμή.

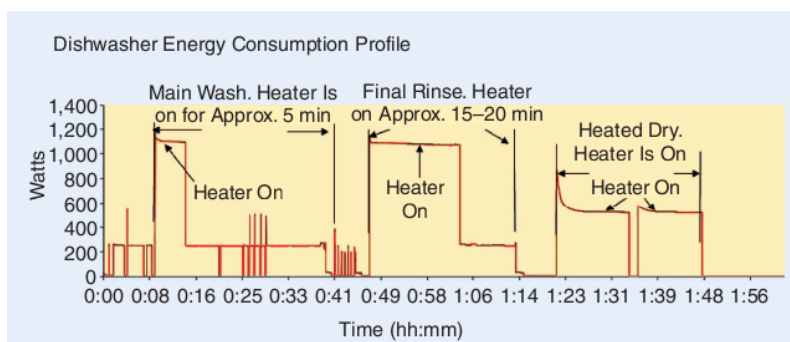


Σχήμα 5.10: Αξία Φορτίου συσκευών

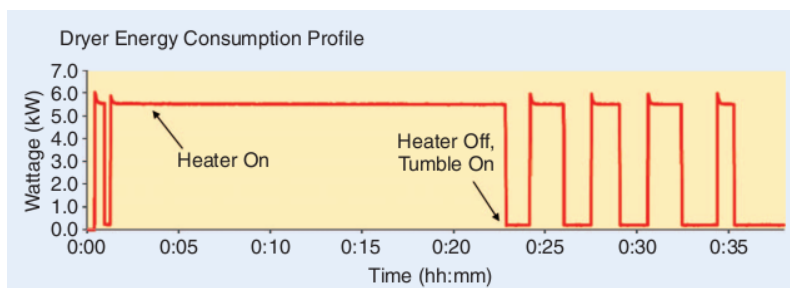
### Προφίλ κατανάλωσης ενέργειας ελεγχόμενων συσκευών

Οι τιμές αυτές που εξάγονται όμως από τη προηγούμενη διαδικασία από μόνες τους δεν αποτελούν τη καμπύλη Ζήτησης καθώς δε μας δίνουν καμία τεχνική πληροφορία για τη κατανάλωση παρά μόνο ποιοτική. Για να σχηματίσουμε τη καμπύλη χρειαζόμαστε να αντιστοιχίσουμε σε κάθε συσκευή τη κατανάλωση που αντιστοιχεί σε αυτή. Για το λόγω αυτό πρέπει πρώτα να σχηματιστεί το προφίλ κατανάλωσης των ελεγχόμενων συσκευών.

Το προφίλ αυτό αναπαρίσταται σε ένα διάγραμμα ισχύος (kW) προς χρόνο λειτουργίας και βγαίνει από μετρήσεις σε κάποια συγκεκριμένη συσκευή. Αρκετές συσκευές έχουν ήδη μετρηθεί από διάφορα εργαστήρια (όπως το NREL) και τα διαγράμματα τους είναι γνωστά. Για τη δημιουργία αυτών των προφίλ υπό διάφορες συνθήκες λειτουργίας χρειάζεται να τεθεί σε λειτουργία η συσκευή και να προστεθεί στη τροφοδοσία της συσκευής ένας μετρητικός μηχανισμός ο οποίος να δημιουργεί χρονοσειρά κατανάλωσης ισχύος. Ολοκληρώνοντας τη καμπύλη αυτή σε κάποιο διάστημα χρόνου μπορούμε να βρούμε τη κατανάλωση της συσκευής (kWh) για αυτό το χρονικό διάστημα. Αρκετές συσκευές έχουν κύκλους λειτουργίας που μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητοι (αν και η σειρά ολοκλήρωσης κύκλων της ίδιας συσκευής πρέπει να τηρείται). Τέτοια προφίλ βλέπουμε στα Σχήματα 5.11 και 5.12.



Σχήμα 5.11: Προφίλ κατανάλωσης ενέργειας ενός τυπικού πλυντηρίου πιάτων (πηγή: NREL)



Σχήμα 5.12: Προφίλ κατανάλωσης ενέργειας ενός τυπικού στεγνωτήρα ρούχων (πηγή: NREL)

### Σχηματισμός Καμπύλης Ζήτησης

Θεωρώντας ένα σπίτι στο οποίο υπάρχουν εγκατεστημένες  $N$  ελεγχόμενες συσκευές, ορίζουμε:

- $X_k(\pi)$  ως την συνάρτηση αξίας φορτίου της  $k$  συσκευής:

$$X_k(\pi) = \begin{cases} 1 & \text{αν η συσκευή θα ενεργοποιηθεί για τη τιμή } \pi \\ 0 & \text{αν η συσκευή δε θα ενεργοποιηθεί για τη τιμή } \pi \end{cases} \quad (5.15)$$

Δηλαδή, η συνάρτηση αυτή μας δίνει 1 για κάθε τιμή  $\pi$  που η συσκευή θα ενεργοποιηθεί και 0 αν η συσκευή δε θα ενεργοποιηθεί γι'αυτή τη τιμή. Κάποιες συσκευές μπορεί να έχουν διαφορετική συνάρτηση ανάλογα με τη προτεραιότητα της συσκευής (δες 5.10).

- $Q_k$  ως τη συνάρτηση κατανάλωση της  $k$  συσκευής:

$$Q_k = \begin{cases} \text{σταθερό} & \text{αν η συσκευή έχει σταθερή κατανάλωση για κάθε κύκλο λειτουργίας} \\ Q_k(\pi) & \text{αν η συσκευή έχει τη δυνατότητα μεταβολής της κατανάλωσης} \end{cases} \quad (5.16)$$

- $d_k$  ως τη συνάρτηση ετοιμότητας της  $k$  συσκευής για λειτουργία:

$$d_k = \begin{cases} 1 & \text{αν η συσκευή είναι έτοιμη και σε κατάσταση να ξεκινήσει να λειτουργεί} \\ 0 & \text{αν η συσκευή είναι εκτός λειτουργίας} \end{cases} \quad (5.17)$$

- Η συνάρτηση Ζήτησης συνάρτηση της τιμής  $\pi$  ορίζεται σαν:

$$Q(\pi) = \sum_{k=1}^N d_k * X_k(\pi) * Q_k(\pi) = D(\pi) \quad (5.18)$$

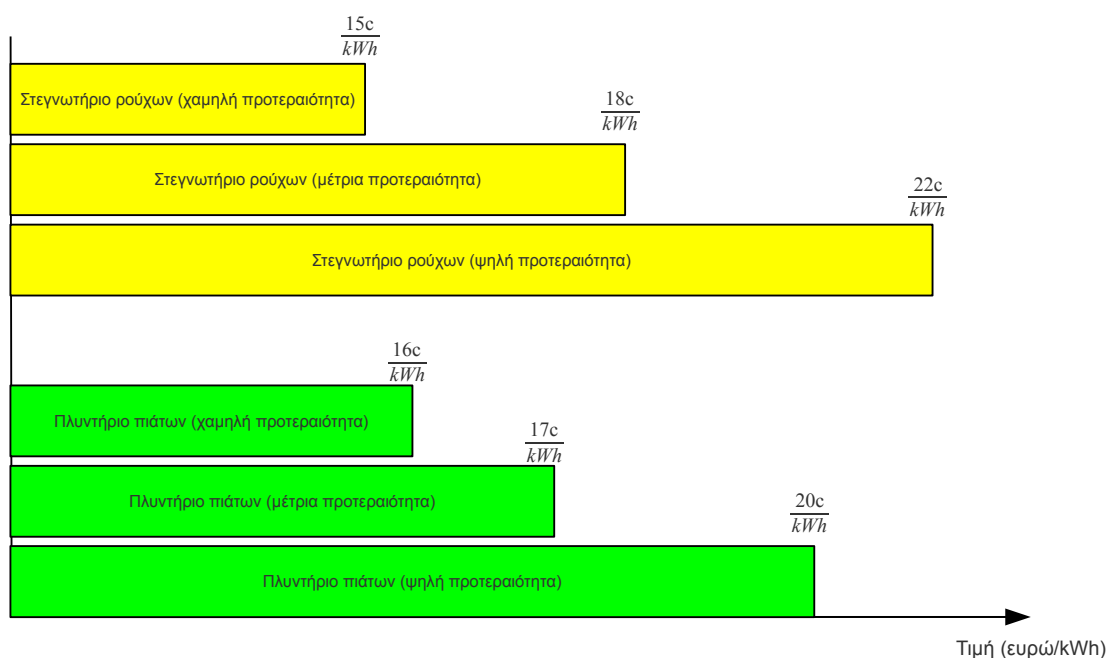
Με άλλα λόγια, η συνάρτηση ζήτησης  $Q = D(\pi)$  μας δίνει την **οριακή αξία** που οι καταναλωτές προσδίδουν σε ένα αγαθό. Τυπικά, η καμπύλη είναι φθίνουσα συνάρτηση της τιμής, κάτι που δείχνει ότι οι καταναλωτές είναι διατεθειμένοι να καταναλώσουν λιγότερο όταν η τιμή είναι μεγάλη και περισσότερο όσο μικραίνει η τιμή. Δηλαδή, η οριακή επιθυμία τους για κατανάλωση μικραίνει καθώς η τιμή αυξάνει.

### Παράδειγμα σχηματισμού καμπύλης

Ας υποθέσουμε ένα σπίτι το οποίο έχει 2 ελεγχόμενες συσκευές ( $N=2$ ) και θέλουμε να σχηματίσουμε τη καμπύλη ζήτησης για την επόμενη 1 ώρα:

1. Πλυντήριο πιάτων με προφίλ 5.11 ( $k=1$ )
2. Στεγνωτήριο με προφίλ 5.12 ( $k=2$ ).

Πρώτα σχηματίζουμε το διάγραμμα αξίας φορτίου:



Σχήμα 5.13: Αξία χρήσης συσκευών παραδείγματος

Ή με τη βοήθεια Step Functions (δες 5.14) για τις λειτουργίες μέτριας προτεραιότητας:

**k=1**

$$X_1 = 1 - SF(\pi - 17) \quad (5.19)$$

**k=2**

$$X_2 = 1 - SF(\pi - 18) \quad (5.20)$$

Ακολουθώντας από τα προφίλ κατανάλωσης βρίσκουμε τη κατανάλωση της κάθε συσκευής για την επόμενη 1 ώρα:

**k=1**

$$Q_1 = 0.5kWh \quad \text{μη μεταβλητό} \quad (5.21)$$

**k=2**

$$Q_2 = 2.22kWh \quad \text{μη μεταβλητό} \quad (5.22)$$

Τέλος, για τις 4 περιπτώσεις:

1.  $\{d_1, d_2\} = \{0, 0\}$  και οι δυο συσκευές εκτός λειτουργίας
2.  $\{d_1, d_2\} = \{0, 1\}$  η πρώτη συσκευή κλειστή και η δεύτερη σε λειτουργία
3.  $\{d_1, d_2\} = \{1, 0\}$  η πρώτη συσκευή σε λειτουργίας και η δεύτερη κλειστή
4.  $\{d_1, d_2\} = \{1, 1\}$  και οι δυο συσκευές σε λειτουργία

χρησιμοποιούμε τη συνάρτηση:

$$Q(\pi) = \sum_{k=1}^2 d_k * X_k(\pi) * Q_k = D(\pi) \quad (5.23)$$

και παίρνουμε τις καμπύλες τους Σχήματος 5.14 για τις συσκευές σε λειτουργία **κανονικής προτεραιότητας**.

Η με τη βοήθεια συναρτήσεων:

$$Q_{\{0,0\}}(\pi) = d_1 * (1 - SF(\pi - 17)) * Q_1 + d_2 * (1 - SF(\pi - 18)) * Q_2 = 0 \quad (kWh)$$

$$Q_{\{0,1\}}(\pi) = d_1 * (1 - SF(\pi - 17)) * Q_1 + d_2 * (1 - SF(\pi - 18)) * Q_2 = (1 - SF(\pi - 18)) * 2.22 \quad (kWh)$$

$$Q_{\{1,0\}}(\pi) = d_1 * (1 - SF(\pi - 17)) * Q_1 + d_2 * (1 - SF(\pi - 18)) * Q_2 = (1 - SF(\pi - 17)) * 0.5 \quad (kWh)$$

$$Q_{\{1,1\}}(\pi) = d_1 * (1 - SF(\pi - 17)) * Q_1 + d_2 * (1 - SF(\pi - 18)) * Q_2 = (1 - SF(\pi - 17)) * 0.5 + (1 - SF(\pi - 18)) * 2.22 = 2.77 - 0.5 * SF(\pi - 17) - 2.22 * SF(\pi - 18) \quad (kWh)$$

### 5.8.5 Κέρδος Καταναλωτή

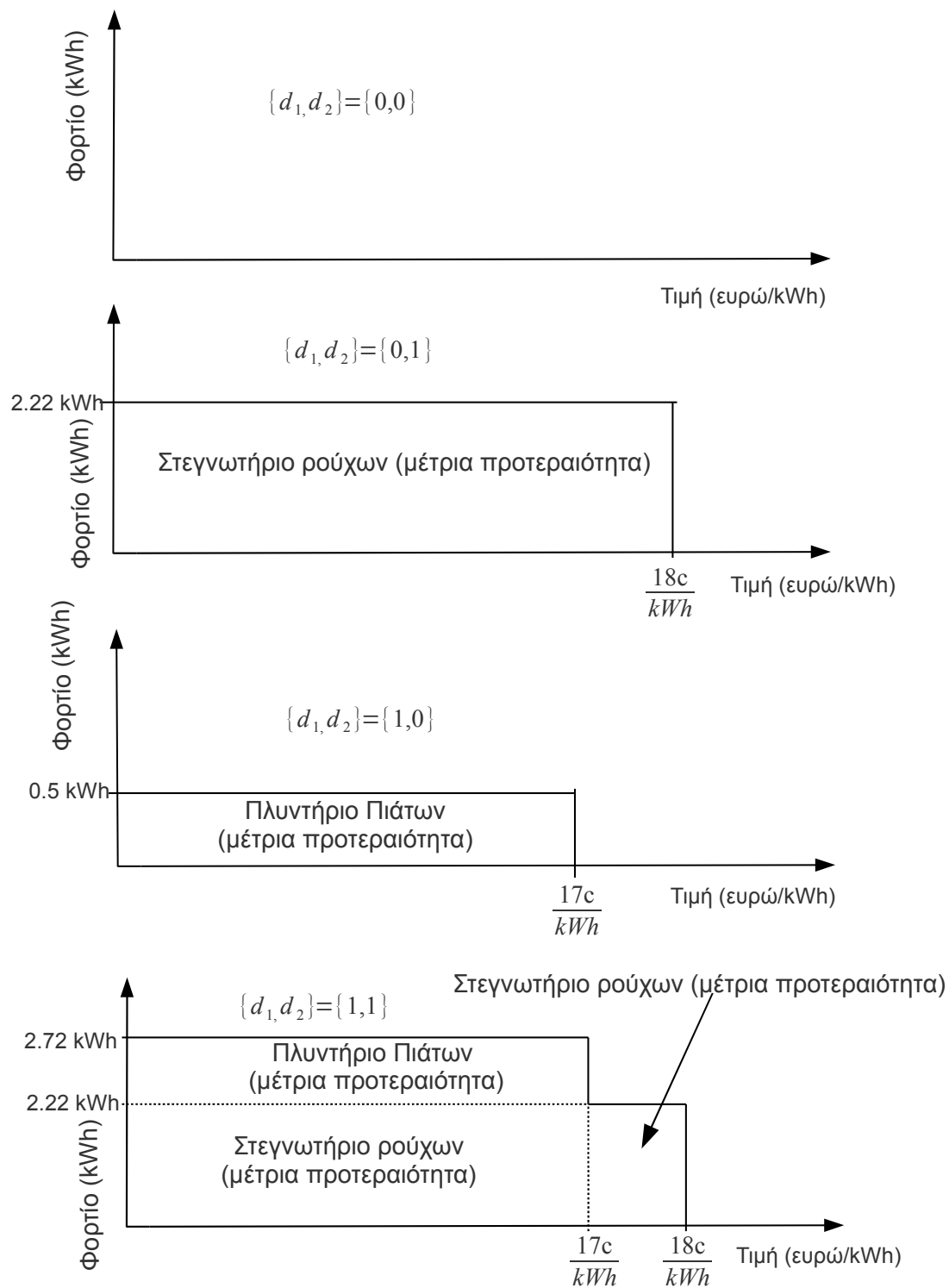
Για το κέρδος του καταναλωτή θεωρούμε τη καμπύλη ζήτησης του Σχήματος 5.15. Βλέπουμε ότι υπάρχει μια ποσότητα φορτίου  $q_1$  που θα ικανοποιηθεί για οποιαδήποτε τιμή κάτω από  $\pi_4$ , μια ποσότητα φορτίου  $q_2 - q_1$  που θα ικανοποιηθεί για οποιαδήποτε τιμή κάτω από  $\pi_3$ , μια ποσότητα φορτίου  $q_3 - q_2$  που θα ικανοποιηθεί για οποιαδήποτε τιμή κάτω από  $\pi_2$  και μια ποσότητα φορτίου  $q_4 - q_3$  που θα ικανοποιηθεί για οποιαδήποτε τιμή κάτω από  $\pi_1$ . Για τη τιμή αγοράς  $\pi^*$ , από τη καμπύλη βλέπουμε πως θα ικανοποιηθεί συνολικά φορτίο  $q_3$ . Τι αξία έχει όμως για τον καταναλωτή η ικανοποίηση του φορτίου αυτού;

Καθώς κάθε κομμάτι του φορτίου δεν έχει την ίδια αξία για τον καταναλωτή, για να υπολογίσουμε την αξία του φορτίου  $q_3$  πρέπει να σπάσουμε το φορτίο σε 3 κομμάτια. Έτσι, υπολογίζουμε την αξία του φορτίου αυτού για τον καταναλωτή στο πίνακα ???. Σχηματικά, η

|                            |                                                           |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------|
| Αξία φορτίου $q_1$ :       | $q_1 * \pi_4$                                             |
| Αξία φορτίου $q_2 - q_1$ : | $(q_2 - q_1) * \pi_3$                                     |
| Αξία φορτίου $q_3 - q_2$ : | $(q_3 - q_2) * \pi_2$                                     |
| Αξία φορτίου $q_3$ :       | $q_1 * \pi_4 + (q_2 - q_1) * \pi_3 + (q_3 - q_2) * \pi_2$ |

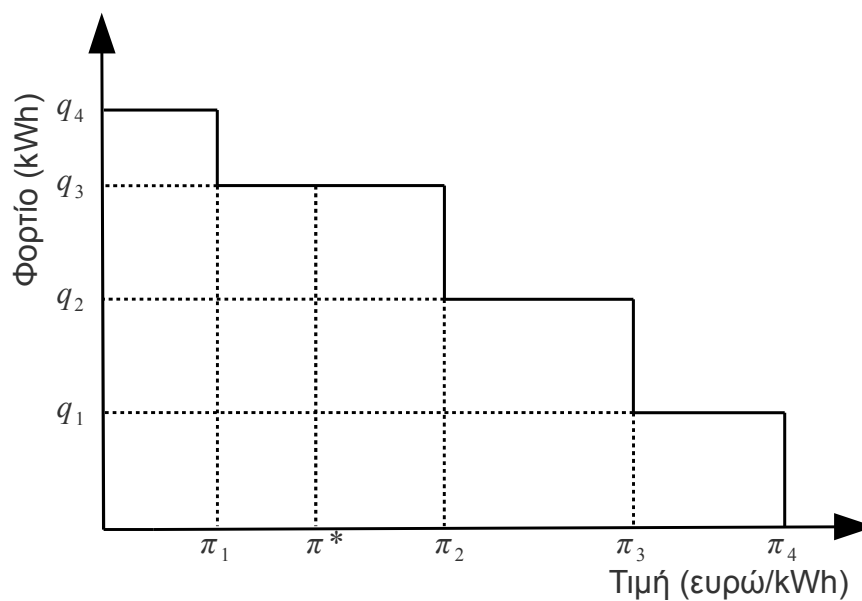
αξία αυτή φαίνεται στο 5.16 σαν το γραμμοσκιασμένο εμβαδό.

Ο καταναλωτής όμως, για το φορτίο αυτό πληρώνει  $q_3 * \pi^*$ . Αφαιρώντας τώρα από τη συνολική αξία του φορτίου το πόσο πληρώνει γι'αυτό, βρίσκουμε το κέρδος του καταναλωτή όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.17. Το κέρδος αυτό αναπαριστά την "επιπλέον αξία" που λαμβάνει ο καταναλωτής με το να έχει τη δυνατότητα να αγοράζει όλο το φορτίο στην ίδια τιμή αγοράς, ακόμη και αν η αξία που έχει αποδώσει στα επί μέρους κομμάτια του φορτίου (εκτός ίσως από το τελευταίο) είναι μεγαλύτερη από τη τιμή αγοράς.

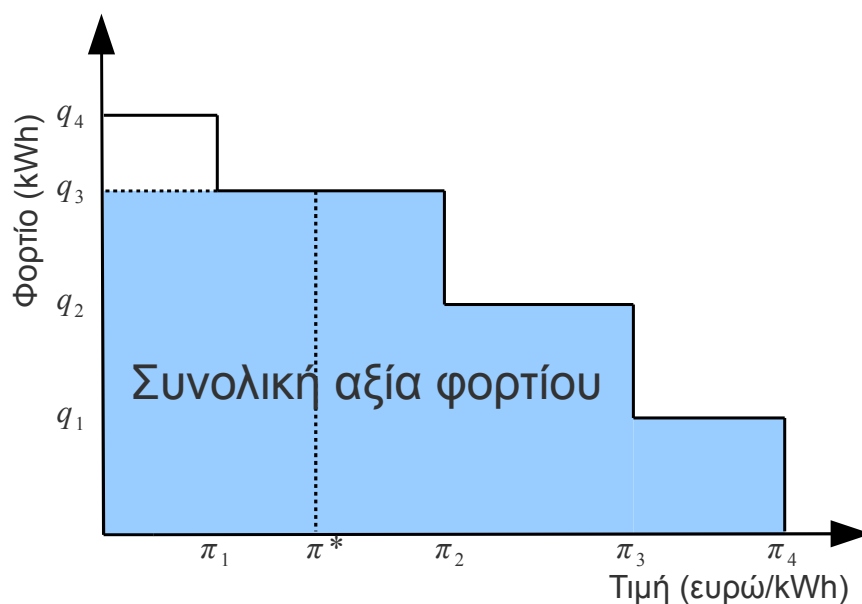


Σχήμα 5.14: Καμπύλες Ζήτησης παραδείγματος





Σχήμα 5.15: Καμπύλη Ζήτησης καταναλωτή



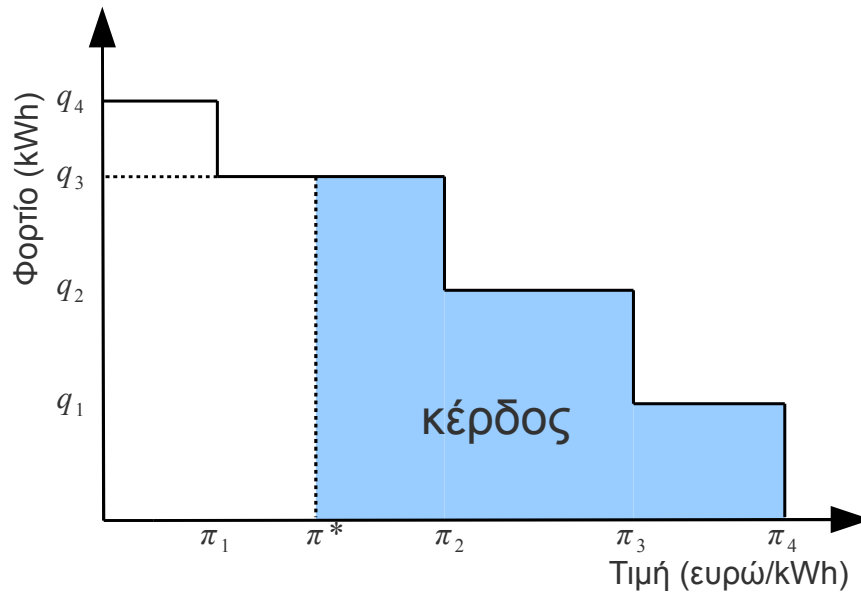
Σχήμα 5.16: Συνολική Αξία Φορτίου

### 5.8.6 Συνάρτηση Κέρδους Καταναλωτή

Ορίζουμε μαθηματικά τη συνάρτηση κέρδους του καταναλωτή, όπως αυτό φαίνεται στο Σχήμα 5.17:

$$R_{Cons} = VOL(Q) - \pi * Q \quad (5.24)$$

- $\pi$ : η τιμή αγοράς (euro/kWh)
- $Q$ : το φορτίο του καταναλωτή (kW)



Σχήμα 5.17: Κέρδος Καταναλωτή

- $VOL(Q) = \int_0^Q D^{-1}(Q)dQ$ : (Value of Load) αξία φορτίου  $Q$  για τον καταναλωτή (όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.16)
- $\pi = D^{-1}(Q)$ : αντίστροφη συνάρτηση ζήτησης

Για τη μεγιστοποίηση του κέρδους έχουμε:

$$\begin{aligned} \max R_{Cons} &= \max[VOL(Q) - \pi * Q] \\ \Rightarrow \frac{dR_{Cons}}{dQ} &= \frac{d(VOL(Q))}{dQ} - \frac{d(\pi * Q)}{dQ} = 0 \end{aligned} \quad (5.25)$$

Αν θεωρήσουμε ότι η τιμή  $\pi$  δεν επηρεάζεται από τις αλλαγές στην κατανάλωση  $Q$  τότε:

$$\frac{d(VOL(Q))}{dQ} = D^{-1}(Q) = \pi \quad (5.26)$$

Λύνοντας ως προς  $Q$  έχουμε τη βέλτιστη στρατηγική του καταναλωτή που μεγιστοποιεί τα κέρδη του για κάθε τιμή  $\pi$ :

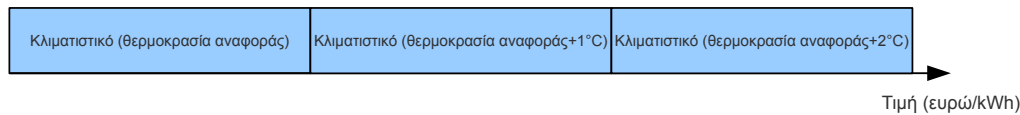
$$Q = D(\pi) \quad (5.27)$$

### 5.8.7 Επιπλέον Κέρδος Καταναλωτή λόγω αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε άλλες μορφές

Η αποθήκευση ενέργειας σε άλλες μορφές ενέργειας (δες 5.8.3) γίνεται είτε επηρεάζοντας ταυτόχρονα τη κατανάλωση της συσκευής στη κανονική λειτουργία είτε αυτόνομα χωρίς τη μεταβολή στη κατανάλωση ενέργειας.

#### Επηρεάζοντας ταυτόχρονα τη κατανάλωση στη μόνιμη λειτουργία

Ένα τέτοιο παράδειγμα παρουσιάστηκε περιληπτικά στο 5.8.3 με τη χρήση του κλιματιστικού. Ένα κλιματιστικό που χρησιμοποιείται το καλοκαίρι για ψύξη έχει την αξία φορτίου που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.18.



Σχήμα 5.18: Μεταβλητή λειτουργία κλιματιστικού

Ο ακριβής υπολογισμός της κατανάλωσης του κλιματιστικού είναι μια μακρά και περίπλοκη διαδικασία η οποία εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως: θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, θερμοκρασία εξωτερικού χώρου, θερμομονωτικοί συντελεστές χώρου, λανθάνοντα θερμικά φορτία (άνθρωποι εντός του κτηρίου, μηχανήματα κλπ), μέγεθος χώρου (kg αέρα), θερμικά φορτία από ηλιακή ακτινοβολία κλπ. Σε κανονική λειτουργία, μετά από ένα μεταβατικό χρόνο, η θερμοκρασία εσωτερικού χώρου είναι ίση με τη θερμοκρασία του θερμοστάτη (θερμοκρασία αναφοράς) και η κατανάλωση του κλιματιστικού είναι συνάρτηση των πιο πάνω παραγόντων. Το κλιματιστικό καταναλώνει ενέργεια, καλύπτοντας τις απώλειες, με σκοπό να κρατάει τη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου ίση με τη θερμοκρασία αναφοράς (με κάποια ζώνη ανοχής). Αν παραμείνουν οι υπόλοιποι παράγοντες σταθεροί και μεταβάλλουμε μόνο τη θερμοκρασία αναφοράς τότε θα παρατηρήσουμε μεταβολή στη κατανάλωση που θα είναι συνάρτηση μόνο της μεταβολής στη θερμοκρασία του θερμοστάτη.

Χρησιμοποιώντας τη προσέγγιση Θερμοκρασιακής Διαφοράς Ψυκτικού Φορτίου (CLTD)[24] βλέπουμε ότι:

$$\dot{q} \sim A + B * (25.5 - T_R) + C * (T_0 - 29.4) \quad (5.28)$$

όπου

- $\dot{q}$ : ψυκτικό φορτίο. Ρυθμός με τον οποίο η θερμότητα πρέπει να απομακρύνεται από το χώρο για να παραμένει σταθερή η θερμοκρασία (W)
- $T_R$ : θερμοκρασία εσωτερικού χώρου
- $T_0$ : μέση τιμή εξωτερικής θερμοκρασίας
- $A, B, C$ : Διάφορες σταθερές που έχουν αν κάνουν με το χώρο, τα υλικά, την επιφάνεια και όγκο του χώρου, ηλιακή ακτινοβολία τη συγκεκριμένη στιγμή κλπ

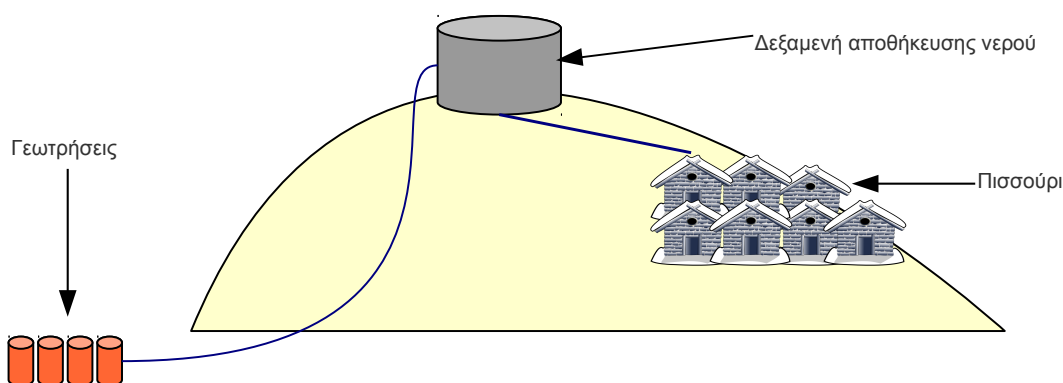
Στο παράδειγμα μας, θεωρώντας ότι όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες παραμένουν σταθεροί, αυξάνοντας τη θερμοκρασία εσωτερικού χώρου, μειώνεται η κατανάλωση του κλιματιστικού (που εξαρτάται από το ψυκτικό φορτίο με κάποιο συντελεστή απόδοσης που εξαρτάται από το είδος και μοντέλο του κλιματιστικού).

Τα κλιματιστικά έχουν διακοπτόμενη λειτουργία, δηλαδή όταν η θερμοκρασία του χώρου είναι πιο χαμηλή από τη θερμοκρασία του θερμοστάτη (έξω από τη περιοχή διακύμανσης) τότε το κλιματιστικό σταματάει να καταναλώνει ενέργεια και περιμένει τη θερμοκρασία να επανέλθει μέσα στα όρια για να ξεκινήσει πάλι να απομακρύνει θερμότητα. Το ανάποδο, αν η θερμοκρασία του χώρου είναι πιο ψηλή από τη θερμοκρασία του θερμοστάτη τότε καταναλώνει  $E_{max}$  (δηλαδή τη μέγιστη κατανάλωσή του) απομακρύνοντας με το μέγιστο δυνατό ρυθμό τη θερμότητα από το χώρο μέχρι η θερμοκρασία να επανέλθει μέσα στη περιοχή διακύμανσης.

Έτσι, στο παράδειγμά μας, αν με τη τωρινή τιμή το κλιματιστικό λειτουργεί στη μεσαία ζώνη (δες 5.18) και η τιμή της επόμενης ώρας πέφτει στα όρια της πρώτης ζώνης. Ο θερμοστάτης τότε θα τεθεί 1 βαθμό κελσίου πιο χαμηλά. Έτσι, το κλιματιστικό θα αυξήσει το ρυθμό απομάκρυνσης στο μέγιστο, ψύχοντας το χώρο 1 βαθμό πιο χαμηλά και μετά καταναλώνει ενέργεια κρατώντας σταθερή τη θερμοκρασία εκεί (η οποία είναι και η θερμοκρασία που έθεσε ο καταναλωτής αρχικά στο θερμοστάτη). Αν την επόμενη ώρα η τιμή επανέλθει στη μεσαία ζώνη, η θερμοκρασία αναφοράς θα πέσει 1 βαθμό. Έτσι, το κλιματιστικό θα σταματήσει να καταναλώνει ενέργεια μέχρι η θερμοκρασία του χώρου να πέσει στα όρια διακύμανσης της νέας τιμής. Άρα, σε αυτή την ώρα, με τη χρήση της διακοπτόμενης λειτουργίας, το κλιματιστικό εκμεταλλεύεται (αναγκά) την ενέργεια που κατανάλωσε τη προηγούμενη ώρα (σε χαμηλότερη από τη τωρινή τιμή) για να κατεβάσει τη θερμοκρασία.

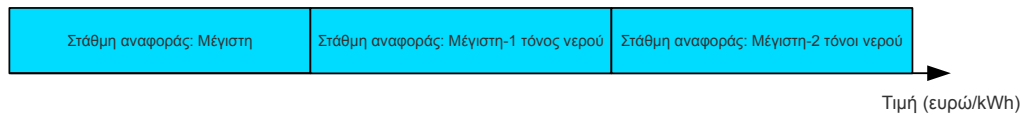
### Χωρίς να επηρεάζει τη κατανάλωση στη μόνιμη λειτουργία

Για να εξηγήσω τη κατηγορία αυτή θα χρησιμοποιήσω ένα παράδειγμα ύδρευσης ενός χωριού. Υπάρχει ένα χωριό που βρίσκεται στη πλαγιά ενός βουνού, το Πισσούρι, το οποίο για την ύδρευσή του βασίζεται σε μια δεξαμενή αποθήκευσης νερού στη κορυφή του βουνού. Κάποιες γεωτρήσεις στη βάση του βουνού γεμίζουν τη δεξαμενή φροντίζοντας να βρίσκεται πάντα σε κάποια συγκεκριμένη στάθμη αναφοράς (μέσα σε κάποια όρια διακύμανσης). Οι γεωτρήσεις λειτουργούν με ηλεκτρικές μηχανές και καταναλώνουν σταθερά  $X$  kWh για κάθε τόνο νερού που ανεβάζουν από τις γεωτρήσεις στη δεξαμενή του νερού, ανεξάρτητα από τη στάθμη του νερού (δες Σχήμα 5.19)



Σχήμα 5.19: Ύδρευση στο Πισσούρι

Το σύστημα των γεωτρήσεων πάλι δουλεύει με διακοπτόμενη λειτουργία. Αν η στάθμη της δεξαμενής είναι χαμηλότερη από τη στάθμη αναφοράς, τότε οι γεωτρήσεις δουλεύουν στο μέγιστο για να φέρουν τη στάθμη στο σημείο αναφοράς. Αν τώρα η στάθμη είναι μεγαλύτερη από το σημείο αναφοράς, τότε οι γεωτρήσεις σταματούν να δουλεύουν μέχρι το επίπεδο της στάθμης να πέσει στα όρια διακύμανσης. Ας θεωρήσουμε τώρα ότι το σύστημα λειτουργεί με μεταβλητή στάθμη αναφοράς. Δηλαδή, ένας τοπικός ελεγκτής μπορεί να μεταβάλει τη στάθμη αναφοράς ανάλογα με τη τιμή αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας όπως φαίνεται στο σχήμα 5.20. Το σύστημα αυτό έχει τη δυνατότητα αποθήκευσης ηλεκτρικής ενέργειας σε μορφή δυναμικής ενέργειας του νερού όταν η τιμή είναι χαμηλή και ανάκτησης της ενέργειας όταν η τιμή ανέβει.



Σχήμα 5.20: Μεταβολή στάθμης αναφοράς ανάλογα με τιμή ηλεκτρικής ενέργειας

Έτσι, στο παράδειγμά μας, μια στιγμή της μέρας το σύστημα λειτουργεί στη μεσαία ζώνη (δες 5.20) σε μια τιμή  $\pi_a(\frac{\text{ευρώ}}{\text{kWh}})$  και η τιμή της επόμενης ώρας πέφτει στα όρια της πρώτης ζώνης σε μια τιμή  $\pi_b$ . Η στάθμη τότε θα τεθεί στο μέγιστο, 1 τόνο νερού δηλαδή πιο ψηλά από πριν. Έτσι, οι γεωτρήσεις θα καταναλώσουν  $X$  kWh περισσότερες από ότι καταναλώνουν για την αναπλήρωση της κατανάλωσης για να ανεβάσουν αυτόν τον επιπλέον τόνο νερού στη δεξαμενή. Αν την επόμενη ώρα η τιμή επανέλθει στη τιμή  $\pi_a$ , η στάθμη αναφοράς θα τεθεί 1 τόνο νερού πιο χαμηλά. Έτσι, οι γεωτρήσεις θα σταματήσουν να λειτουργούν περιμένοντας να πέσει η στάθμη νερού στα όρια διακύμανσης της νέας τιμής και μετά συνεχίζουν να κρατούν τη στάθμη σε αυτό το επίπεδο αναπληρώνοντας τη κατανάλωση. Άρα, σε αυτή την ώρα, με τη χρήση της διακοπτόμενης λειτουργίας των γεωτρήσεων, οι κάτοικοι του χωριού απολαμβάνουν 1 τόνο νερού ο οποίος αποθηκεύτηκε στη δεξαμενή τη προηγούμενη ώρα και ανακτήθηκε τώρα. Συνολικά απολαμβάνουν κέρδος  $(\pi_a - \pi_b) * X$  (ευρώ).

Σε μεγαλύτερη κλίμακα, αν είχαμε τέτοια συστήματα σε πολλά χωριά ή και πόλεις, κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού, οι δεξαμενές αυτές θα γεμίζανε στο μέγιστο το βράδυ που η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας είναι πιο χαμηλή ενώ θα ανακτούσαν αυτή την ενέργεια κατά τη διάρκεια της μέρας όταν η κατανάλωση είναι στο μέγιστο και η τιμή (σε ένα σύστημα μεταβλητής τιμολόγησης) θα ανέβαινε στα ύψη. Το μοντέλο αυτό που παρουσιάστηκε, χωρίς τον μεταβλητό έλεγχο της στάθμης νερού, είναι πραγματικό και λειτουργεί στα περισσότερα χωριά της Κύπρου.

### Όρια αποθήκευσης και καθορισμός αξίας φορτίου

Φυσικά, τα όρια μεταβολής της θερμοκρασίας, της στάθμης του νερού κλπ πρέπει να είναι τέτοια ώστε να μην επηρεάζουν αισθητά τη ποιότητα ζωής των καταναλωτών. Δηλαδή, στη πρώτη περίπτωση να μην προκαλούν δυσφορία στο καταναλωτή και στη δεύτερη να μη κινδυνεύει το χωριό να μείνει χωρίς νερό! Για το λόγω αυτό, όπως και με τις απλές συσκευές, πρέπει μέσω ερωτηματολογίων να βρεθεί η αξία που δίνεται στη δυσφορία της αύξησης της θερμοκρασίας και στο ποσοστό κινδύνου που εισάγει η μείωση της στάθμης του νερού για τον καταναλωτή. Με τη σειρά τους αυτές οι αξίες θα χρησιμοποιηθούν για το καθορισμό της καμπύλης ζήτησης για χρήση στο τοπικό ελεγκτή.

### 5.8.8 Ζήτηση στο Μοντέλο Μικροδικτύου

Για τα δύο μοντέλα του Μικροδικτύου χρησιμοποιήσαμε τις 2 τελευταίες από τις 3 μεθόδους που παρουσιάζονται στο 5.8.2.

#### Πρώτο Μοντέλο

Στο πρώτο μοντέλο λειτουργίας 4.1, χρησιμοποιούμε τη 2η μέθοδο, δηλαδή Απευθείας Διαχείριση Φορτίου (Demand Dispatch). Οι καταναλωτές συμφωνούν για την εγκατάσταση ενός

τοπικού ελεγκτή από την ESCO/ Aggregator που να ελέγχει κάποια φορτία τους, με αντάλλαγμα κάποια έκπτωση πάνω στο λογαριασμό τους. Σε αυτό το πρόγραμμα όλοι οι καταναλωτές χρεώνονται σε μια σταθερή τιμή (Fixed Price) και απλά όσοι δεχτούν την εγκατάσταση του τοπικού ελεγκτή απολαμβάνουν μια έκπτωση. Αυτό το πρόγραμμα παρουσιάζει την ιδιαιτερότητα ότι ο καταναλωτής δε γνωρίζει τη τιμή στην αγορά εκείνη τη στιγμή, καθώς το σήμα  $p_2$  πηγαίνει απευθείας στο τοπικό ελεγκτή και χρησιμοποιείται αποκλειστικά και μόνο σαν σήμα ελέγχου της κατανάλωσης. Ο τοπικός ελεγκτής ανήκει στην ESCO/ Aggregator, η οποία και τον διαχειρίζεται. Ο καταναλωτής δεν έχει κάποιο τρόπο επηρεασμού του, παρά μόνο ίσως την επιλογή μεταξύ ενός πεπερασμένου αριθμού προφίλ λειτουργίας που αντιστοιχούν όμως και σε αντίστοιχο αριθμό διαφορετικών εκπτώσεων.

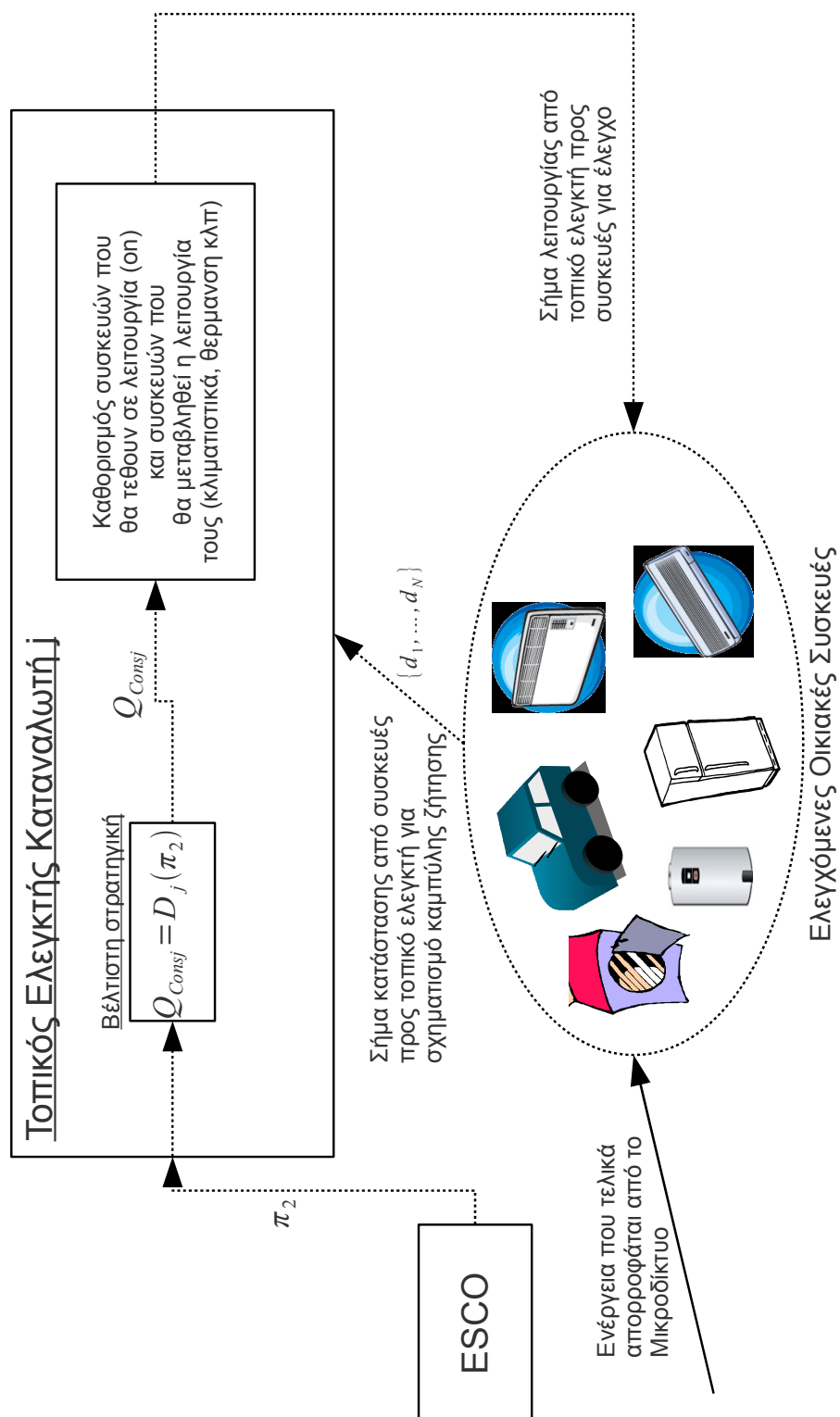
### Δεύτερο Μοντέλο

Στο Δεύτερο μοντέλο λειτουργίας 4.2, χρησιμοποιούμε τη 3η μέθοδο, δηλαδή Μεταβλητή Τιμή. Όλοι οι καταναλωτές, χρεώνονται για το φορτίο που καταναλώνουν στη τιμή που ανακοινώνεται κάθε ώρα  $p_2$ . Ο τοπικός ελεγκτής εγκαθίσταται από την ESCO/ Aggregator ή ακόμη και από τον ίδιο το καταναλωτή, καθώς σε αυτό το μοντέλο ο καταναλωτής κερδίζει άμεσα από την εγκατάσταση του ελεγκτή (λόγω του κέρδους όπως παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.17) και όχι έμμεσα μέσω έκπτωσης όπως στο προηγούμενο μοντέλο. Σε αυτό το μοντέλο, ο καταναλωτής μπορεί να έχει το δικαίωμα διαχείρισης του ελεγκτή θέτοντας ο ίδιος ή αλλάζοντας τις τιμές αξίας φορτίου (δες Σχήμα 5.13) που αναπαριστούν τις προσωπικές του ανάγκες.

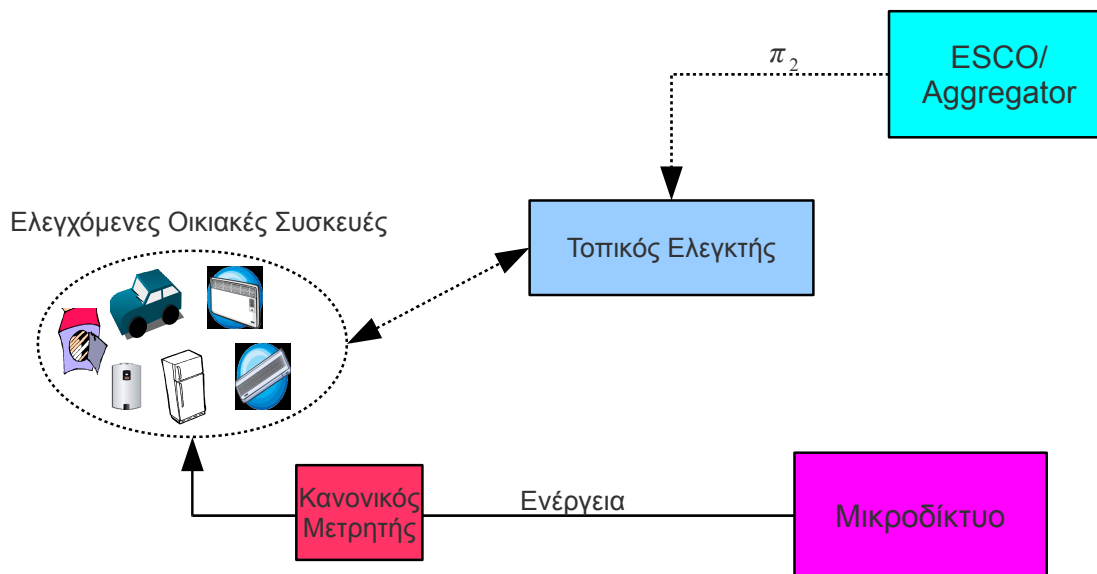
Και στα δυο μοντέλα, η λειτουργία του τοπικού ελεγκτή παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.21 και είναι ίδια. Η διαφορά είναι ότι στη πρώτη περίπτωση, η τιμή  $p_2$  που στέλνεται στους τοπικούς ελεγκτές από την ESCO/ Aggregator είναι για λόγους ελέγχου μόνο, δηλαδή, για "εσωτερική χρήση". Ενώ, στη δεύτερη περίπτωση είναι η πραγματική τιμή χρέωσης της κατανάλωσης.

### Ελαστικότητα φορτίου προς τιμή Καταναλωτών χωρίς τοπικό ελεγκτή

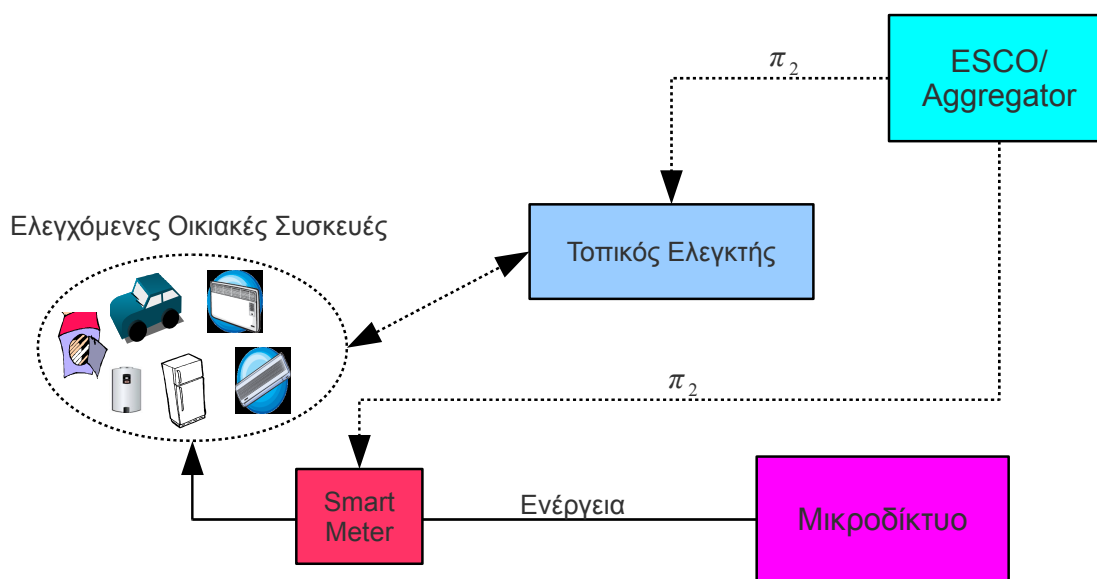
Στο πρώτο μοντέλο, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι οι καταναλωτές χωρίς τοπικό ελεγκτή έχουν μια πλήρως ανελαστική καμπύλη ζήτησης. Δηλαδή, το φορτίο τους δεν μεταβάλλεται με τη τιμή καθώς πληρώνουν μια σταθερή τιμή ανα kWh. Στο δεύτερο μοντέλο όμως, είναι λογικό να υποθέσουμε ότι ακόμη και οι καταναλωτές χωρίς τοπικό ελεγκτή θα έχουν κάποιας μικρή ελαστικότητα στις αλλαγές της τιμής. Αυτή η ελαστικότητα, συγκρινόμενη με την ελαστικότητα των καταναλωτών που είναι εξοπλισμένοι με τοπικό ελεγκτή θα είναι πολύ μικρότερη, καθώς, όπως είπαμε πολύ λίγοι καταναλωτές είναι διατεθειμένοι να ρυθμίζουν συνεχώς (ανά ώρα στη περίπτωσή μας) τη λειτουργία των συσκευών τους. Ειδικά αν το διάστημα γίνει πιο μικρό (π.χ. 15 λεπτά) τότε η ελαστικότητα αυτή από καταναλωτές χωρίς τοπικό ελεγκτή θα γίνει ακόμη πιο μικρή!



Σχήμα 5.21: Λειτουργία τοπικού ελεγκτή Καταναλωτή του Μικροδικτύου



Σχήμα 5.22: Λειτουργία τοπικού ελεγκτή Καταναλωτή στο Πρώτο Μοντέλο



Σχήμα 5.23: Λειτουργία τοπικού ελεγκτή Καταναλωτή στο Δεύτερο Μοντέλο



## 5.9 ESCO/ Aggregator

Η ESCO/ Aggregator σε αυτό το παιχνίδι αγοράζει ενέργεια από τη Διεσπαρμένη Παραγωγή και από τις μεγάλες αγορές ενέργειας και πουλάει στους καταναλωτές. Στόχος της, σε αυτή τη μελέτη, είναι η μεγιστοποίηση του κέρδους της. Τα έσοδα της εταιρίας έρχονται από τη πώληση ηλεκτρικής ενέργειας στους καταναλωτές και τα έξοδα της εταιρίας πηγάζουν στη πληρωμή των μονάδων διεσπαρμένης παραγωγής για την ενέργεια που παρέχουν, στις μεγάλες αγορές ενέργειας με βάση τις συμφωνίες που κάνει για κάθε χρονικό διάστημα και υπό τη μορφή προστίμου για τη παραβίαση των συμφωνιών που είχε κάνει στις μεγάλες αγορές.

### 5.9.1 Διαχείριση Μικροδικτύου από ESCO/ Aggregator

Τη προηγούμενη μέρα:

1. Η ESCO/ Aggregator κάνει ωριαία πρόβλεψη φορτίου των καταναλωτών του Μικροδικτύου για την επόμενη μέρα. Λόγω της εξάρτησης του φορτίου από τη τιμή  $\pi_2$ , η ESCO/ Aggregator χρησιμοποιεί μια μέση τιμή για το  $\pi_2$  για να κάνει τη πρόβλεψη φορτίου ή χρησιμοποιεί τις τιμές  $\{\pi_{2min}, \pi_{2max}\}$  για να κάνει πρόβλεψη στο μέγιστο και ελάχιστο της κατανάλωσης. Η πρόβλεψη αυτή έχει αρκετά περιθώρια σφάλματος.
2. Η ESCO/ Aggregator κάνει ωριαία πρόβλεψη παραγωγής από ΑΠΕ στο Μικροδίκτυο. Η πρόβλεψη αυτή έχει αρκετά όρια σφάλματος.
3. Η ESCO/ Aggregator προγραμματίζει τη λειτουργία των DG για κάθε ώρα. Πρακτικά, ορίζει μια τιμή έναρξης  $\pi_1$  που να της δίνει τη δυνατότητα ευελιξίας της παραγωγής, δηλαδή να μην είναι πολύ κοντά στα όρια  $\{P_{DGmin}, P_{DGmax}\}$ . Επίσης, η τιμή αυτή πρέπει να δίνει τη δυνατότητα στις μονάδες DG να έχουν, μακροπρόθεσμα, κερδοφόρα λειτουργία.
4. Χρησιμοποιώντας τα πιο πάνω δεδομένα, η ESCO/ Aggregator συμμετέχει στις μεγάλες αγορές ενέργειας αγοράζοντας την επιπλέον ενέργεια που πιστεύει ότι θα χρειαστεί για να καλύψει τις ανάγκες της κατανάλωσης για κάθε ώρα.

Την ίδια μέρα στην αρχή της κάθε ώρας:

1. Η ESCO/ Aggregator κάνει βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη φορτίου των καταναλωτών του Μικροδικτύου για την επόμενη ώρα με βάση τη τιμή  $\pi_2$  και τα δεδομένα της προηγούμενης ώρας.
2. Η ESCO/ Aggregator κάνει βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη παραγωγής από ΑΠΕ στο Μικροδίκτυο για την επόμενη ώρα με βάση τα δεδομένα της προηγούμενης ώρας και τη βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη καιρού.
3. Χρησιμοποιώντας τα πιο πάνω δεδομένα, καθώς και τις συμφωνίες για αγορά ενέργειας που έχει κάνει για τη συγκεκριμένη ώρα από τη προηγούμενη μέρα, καθορίζει τη στρατηγική του  $\{\pi_1, \pi_2\}$  ώστε να αυξήσει τα κέρδη του. Προσπαθεί δηλαδή, χρησιμοποιώντας την ευελιξία που του προσφέρει η διεσπαρμένη παραγωγή και η διαχείριση της ζήτησης, να απορροφήσει τα σφάλματα πρόβλεψης που είχε κάνει και να αποφύγει τυχόν πρόστιμο.

### 5.9.2 Συνάρτηση κέρδους ESCO/ Aggregator

Η συνάρτηση κέρδους της ESCO διαφοροποιείται ανάλογα με το μοντέλο λόγω της διαφορετικής τιμολογιακής πολιτικής που ακολουθείται στο καθένα (δες 5.8.8).

#### Πρώτο Μοντέλο

$$\begin{aligned}
 R_{ESCO}(\pi_1, \pi_2) = & Q_{Cons-NOLC} * F.P. + Q_{Cons-LC}(\pi_2) * (1 - a) * F.P. \\
 & - (Q_{Cons-NOLC} + Q_{Cons-LC}(\pi_2) - P_{DG}(\pi_1) * h - Q_0) * \\
 & FINE(Q_{Cons-NOLC} + Q_{Cons-LC}(\pi_2) - P_{DG}(\pi_1) * h - Q_0) \\
 & - \sum_{i=1}^l (FIT_i * P_{DGi}) * h \\
 & - \sum_{i=1}^m (\pi_1 * P_{DGi}(\pi_1)) * h \\
 & - (Q_{Cons-NOLC} + Q_{Cons-LC}(\pi_2)) * P_{op}
 \end{aligned} \tag{5.29}$$

όπου:

- $\pi_1$ : τιμή αγοράς ενέργειας από τις  $m$  μονάδες DG που πληρώνονται με μεταβλητή τιμή (ευρώ/ $kWh$ )
- $\pi_2$ : σήμα ελέγχου που στέλνεται σε όσους καταναλωτές έχουν τοπικό ελεγκτή για έλεγχο κατανάλωσης
- $Q_{Cons-LCi}, Q_{Cons-NOLCi}$ : κατανάλωση του  $i$  καταναλωτή (με ή χωρίς τοπικό ελεγκτή) ( $kWh$ )
- $Q_{Cons-NOLC} = \sum_{i=1}^n Q_{Cons-NOLCi}$ : η κατανάλωση των  $n$  καταναλωτών χωρίς τοπικό ελεγκτή. Θεωρούμε ότι η κατανάλωση τους δεν επηρεάζεται από τη τιμή καθώς πληρώνουν την ενέργεια που καταναλώνουν σε σταθερή τιμή ( $kWh$ )
- $Q_{Cons-LC}(\pi_2) = \sum_{i=1}^k Q_{Cons-LCi} = \sum_{i=1}^k (Q_{Constant} + Q_{Variable}(\pi_2) + \Delta E(\pi_2, \pi_{2old}))_{Cons-LCi}$ : η κατανάλωση των  $k$  καταναλωτών με τοπικό ελεγκτή ( $kWh$ )
  - $Q_{Constant}$ : Το μέρος της κατανάλωσης που δεν εξαρτάται άμεσα από τις μεταβολές στη τιμή  $\pi_2$ . Πρακτικά, η κατανάλωση των συσκευών που δεν ελέγχονται από τον τοπικό ελεγκτή ( $kWh$ )
  - $Q_{Variable}$ : Το μέρος της κατανάλωσης που εξαρτάται άμεσα από τις μεταβολές στη τιμή  $\pi_2$ . Πρακτικά, η κατανάλωση των συσκευών που ελέγχονται από τον τοπικό ελεγκτή ( $kWh$ )
  - $\Delta E$ : Ενέργεια που αποθηκεύεται ή ανακτάται σε/από άλλες μορφές ενέργειας (δες 5.8.3) ( $kWh$ )
- $F.P.$  (Fixed Price): Σταθερή τιμή που πληρώνουν οι καταναλωτές χωρίς τοπικό ελεγκτή (ευρώ/ $kWh$ )
- $a$ : η έκπτωση που απολαμβάνουν οι καταναλωτές που δέχτηκαν την εγκατάσταση τοπικού ελεγκτή και τη διαχείριση κάποιων φορτίων τους

- $FINE(X)$ : Το πρόστιμο που πληρώνει η ESCO για τη κατανάλωση  $X$  περισσότερης ή λιγότερης ενέργειας από το δίκτυο σε σχέση με τις συμφωνίες που είχε κάνει (ευρώ/ $kWh$ )
- $Q_0$ : Η ισχύς που έχει αγοράσει η ESCO από το δίκτυο για τη συγκεκριμένη ώρα μέσω συμφωνιών ( $kWh$ )
- $FIT_i$ : τιμή αγοράς ενέργειας από τις  $l$  μονάδες DG που πληρώνονται με Feed In Tariff (ευρώ/ $kWh$ )
- $P_{DG_i}$ : παραγωγή της  $i$  DG όπως φαίνεται στη στρατηγική του παραγωγού (δες 5.7.3) ( $kW$ )
- $P_{DG} = \sum_{i=0}^{m+l} P_{DG_i}$ : άθροισμα συνολικής παραγωγής από όλες τις DG ( $kW$ )
- $P_{op}$ : η τιμή στην οποία συμφώνησε η ESCO για την αγορά ενέργειας από τις μεγάλες αγορές ενέργειας

### Δεύτερο Μοντέλο

$$\begin{aligned}
 R_{ESCO}(\pi_1, \pi_2) = & [Q_{Cons-NOLC}(\pi_2) + Q_{Cons-LC}(\pi_2)] * \pi_2 \\
 & - (Q_{Cons-NOLC} + Q_{Cons-LC}(\pi_2) - P_{DG}(\pi_1) * h - Q_0) * \\
 & FINE(Q_{Cons-NOLC} + Q_{Cons-LC}(\pi_2) - P_{DG}(\pi_1) * h - Q_0) \\
 & - \sum_{i=1}^l (FIT_i * P_{DG_i}) * h \\
 & - \sum_{i=1}^m (\pi_1 * P_{DG_i}(\pi_1)) * h \\
 & - (Q_{Cons-NOLC} + Q_{Cons-LC}(\pi_2)) * P_{op}
 \end{aligned} \tag{5.30}$$

όπου:

- $\pi_1$ : τιμή αγοράς ενέργειας από τις  $m$  μονάδες DG που πληρώνονται με μεταβλητή τιμή (ευρώ/ $kWh$ )
- $\pi_2$ : τιμή χρέωσης ενέργειας σε όλους τους καταναλωτές (με ή χωρίς τοπικό ελεγκτή) (ευρώ/ $kWh$ )
- $Q_{Cons-LC_i}, Q_{Cons-NOLC_i}$ : κατανάλωση του  $i$  καταναλωτή (με και χωρίς τοπικό ελεγκτή) ( $kWh$ )
- $Q_{Cons-NOLC}(\pi_2) = \sum_{i=1}^n Q_{Cons-NOLC_i}(\pi_2)$ : η κατανάλωση των  $n$  καταναλωτών χωρίς τοπικό ελεγκτή. Σε αυτή τη περίπτωση όμως, μπορούμε να θεωρήσουμε μια μικρή μεταβολή στη κατανάλωση λόγω της τιμής  $\pi_2$  ( $kWh$ )
- $Q_{Cons-LC}(\pi_2) = \sum_{i=1}^k Q_{Cons-LC_i}(\pi_2) = \sum_{i=1}^k (Q_{Constant} + Q_{Variable}(\pi_2) + \Delta E(\pi_2, \pi_{2old}))_{Cons-LC_i}$ : η κατανάλωση των  $k$  καταναλωτών με τοπικό ελεγκτή ( $kWh$ )
  - $Q_{Constant}$ : Το μέρος της κατανάλωσης που δεν εξαρτάται άμεσα από τις μεταβολές στη τιμή  $\pi_2$ . Πρακτικά, η κατανάλωση των συσκευών που δεν ελέγχονται από τον τοπικό ελεγκτή ( $kWh$ )

- $Q_{Variable}$ : Το μέρος της κατανάλωσης που εξαρτάται άμεσα από τις μεταβολές στη τιμή  $\pi_2$ . Πρακτικά, η κατανάλωση των συσκευών που ελέγχονται από τον τοπικό ελεγκτή ( $kWh$ )
- $\Delta E$ : Ενέργεια που αποθηκεύεται ή ανακτάται σε/από άλλες μορφές ενέργειας (δες 5.8.3) ( $kWh$ )
- $FINE(X)$ : Το πρόστιμο που πληρώνει η ESCO για τη κατανάλωση  $X$  περισσότερης ή λιγότερης ενέργειας από το δίκτυο σε σχέση με τις συμφωνίες που είχε κάνει (ευρώ/ $kWh$ )
- $Q_0$ : Η ισχύς που έχει αγοράσει η ESCO από το δίκτυο για τη συγκεκριμένη ώρα μέσω συμφωνιών ( $kWh$ )
- $FIT_i$ : τιμή αγοράς ενέργειας από τις  $l$  μονάδες DG που πληρώνονται με Feed In Tariff (ευρώ/ $kWh$ )
- $P_{DG_i}$ : παραγωγή της  $i$  DG όπως φαίνεται στη στρατηγική του παραγωγού (δες 5.7.3) ( $kW$ )
- $P_{DG} = \sum_{i=0}^{m+l} P_{DG_i}$ : άθροισμα συνολικής παραγωγής από όλες τις DG ( $kW$ )
- $P_{or}$ : η τιμή στην οποία συμφώνησε η ESCO για την αγορά ενέργειας από τις μεγάλες αγορές ενέργειας

### Περιορισμοί Συναρτήσεων Κέρδους

- $\{\pi_1 \in (\pi_{1min}, \pi_{1max}), \pi_2 \in (\pi_{2min}, \pi_{2max})\}$   
Για τον υπολογισμό των συναρτήσεων αυτών θεωρούμε ότι οι μεταβλητές  $\{\pi_1, \pi_2\}$  έχουν κάποια όρια που μπορούν να κινούνται. Το κάτω όριο και για τις δύο τιμές μπορούμε να θεωρήσουμε το μηδέν. Για τη μεταβλητή  $\pi_1$ , η τιμή  $\pi_{1min} = 0$  σημαίνει τη μηδενική παραγωγή όλως των DG εκτός από τις DG που πληρώνονται με FIT, έτσι η ύπαρξη αρνητικών τιμών δεν έχει νόημα. Για τη μεταβλητή  $\pi_2$ , η τιμή  $\pi_{2min} = 0$  είναι ένα θεωρητικό ελάχιστο το οποίο θα ενεργοποιούσε όλη τη κατανάλωση. Αρνητικές τιμές  $\pi_2$  δεν έχουν νόημα καθώς αυτό θα σήμαινε η ESCO να πληρώνει τους καταναλωτές για να καταναλώσουν.

Σαν μέγιστη τιμή  $\pi_{1max}$  μπορεί η τιμή  $\pi_1$  για την οποία όλες οι μονάδες DG παράγουν το μέγιστό δυνατό ή αλλιώς είναι η τιμή για την οποία ισχύει

$$\left. \frac{dC_k(P_{DGk})}{dP_{DGk}} \right|_{P_{DGkmax}} = \pi_{1max}$$

όπου  $DG_k$  η **πιο ακριβή μονάδα DG**. Οποιαδήποτε τιμή μεγαλύτερη από αυτή δεν οδηγεί σε αύξηση της παραγωγής αλλά αυξάνει τα έξοδα της εταιρίας, έτσι, για την ESCO δεν υπάρχει νόημα να επιλέξει τιμή μεγαλύτερη από αυτή. Η μέγιστη τιμή  $\pi_{2max}$  θεωρητικά θα μπορούσε να είναι άπειρη. Αλλά, στη πραγματικότητα η τιμή αυτή δε μπορεί να πάρει πολύ μεγάλες τιμές διότι αυτό ίσως οδηγήσει τους πελάτες να αλλάξουν εταιρία ή θα επιφέρει πρόστιμο στην εταιρία για αισχροκέρδεια.

- **Τεχνικοί Περιορισμοί**  
Κάποιοι τεχνικοί περιορισμοί ίσως εμποδίζουν την επιλογή συγκεκριμένων τιμών. Ένας τέτοιος περιορισμός είναι η ικανότητα του μετασχηματιστή. Αν και στις συναρτήσεις

κέρδους λάβαμε υπόψη μας μόνο παράγοντες που έχουν να κάνουν με την ενέργεια που καταναλώνεται σε κάθε ώρα, πρέπει να γίνεται έλεγχος έτσι ώστε η ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο, μέσω του ΜΣ, να μην υπερβαίνει την ικανότητα του ΜΣ.

### 5.9.3 Μεγιστοποίηση Συνάρτησης κέρδους

Οι συναρτήσεις κέρδους της ESCO και στα δύο μοντέλα είναι 2 μεταβλητών. Σκοπός της εταιρίας είναι να βρει ένα ζεύγος τιμών  $\{\pi_1, \pi_2\}$  που να μεγιστοποιεί τη συνάρτηση αυτή με το περιορισμό  $\{\pi_1 \in (\pi_{1min}, \pi_{1max}), \pi_2 \in (\pi_{2min}, \pi_{2max})\}$ . Άρα, το πρόβλημα μετατρέπεται σε πρόβλημα βελτιστοποίησης με περιορισμούς.

$$\max_{(\pi_1, \pi_2)} R_{ESCO}(\pi_1, \pi_2)$$

Μαθηματικά, για την εύρεση του μέγιστου σημείου σε συνάρτηση δυο μεταβλητών ( $z = f(x, y)$ ) με περιορισμούς ακολουθούμε την εξής διαδικασία [25]:

1. Βρίσκουμε τα σημεία  $(x, y)$  που να ικανοποιούν τη συνθήκη  $\frac{dz}{dy} = \frac{dz}{dx} = 0$
2. Ακολουθώντας, για κάθε ένα από αυτά τα σημεία υπολογίζουμε τη τιμή  $D = \frac{d^2z}{dy^2} * \frac{d^2z}{dx^2} - \frac{d^2z}{dx dy}$ .  
Αν η τιμή αυτή είναι θετική τότε το σημείο που έδωσε αυτή τη τιμή είναι τοπικό μέγιστο.
3. Αν κανένα από τα σημεία του βήματος 1 δεν δώσουν θετικό D, τότε πρέπει να ψάξουμε στα όρια της συνάρτησης για το μέγιστο.

Ακολουθώντας τα πιο πάνω στη συνάρτησή μας:

1. Βρίσκουμε όλα τα σημεία  $\{\pi_1, \pi_2\}$  που να ικανοποιούν ταυτόχρονα:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dR_{ESCO}}{d\pi_1} = 0 \\ \frac{dR_{ESCO}}{d\pi_2} = 0 \end{array} \right\} \quad (5.31)$$

2. Αν κάποια από αυτά τα σημεία βρίσκονται μέσα στα όρια  $\{\pi_1 \in (\pi_{1min}, \pi_{1max}), \pi_2 \in (\pi_{2min}, \pi_{2max})\}$  τότε ελέγχουμε τη συνάρτηση  $D$  για κάθε ένα από αυτά τα σημεία:

$$D = \frac{d^2 R_{ESCO}}{d\pi_1^2} * \frac{d^2 R_{ESCO}}{d\pi_2^2} - \frac{d^2 R_{ESCO}}{d\pi_1 d\pi_2} \quad (5.32)$$

και αν:

$$\left\{ \begin{array}{l} D > 0 \quad \text{τότε το σημείο αυτό είναι τοπικό μέγιστο} \\ D < 0 \quad \text{τότε το σημείο αυτό είναι τοπικό ελάχιστο} \end{array} \right.$$

3. Αν δεν υπάρχει τοπικό μέγιστο στα όρια  $\{\pi_1 \in (\pi_{1min}, \pi_{1max}), \pi_2 \in (\pi_{2min}, \pi_{2max})\}$  αποδεικνύεται [25] ότι το μέγιστο είναι στα όρια της συνάρτησης, έτσι πρέπει να ψάξουμε εκεί για το μέγιστο της συνάρτησης:

$$\begin{aligned} & \max_{(\pi_1, \pi_2)} [\max_{\pi_2} R_{ESCO}(\pi_1 = \pi_{1min}, \pi_2), \max_{\pi_2} R_{ESCO}(\pi_1 = \pi_{1max}, \pi_2), \\ & \max_{\pi_1} R_{ESCO}(\pi_1, \pi_2 = \pi_{2min}), \max_{\pi_1} R_{ESCO}(\pi_1, \pi_2 = \pi_{2max})] \end{aligned} \quad (5.33)$$

Τέτοιοι υπολογισμοί, όμως, είναι επίπονοι και περιπλέκονται πολύ όταν οι συναρτήσεις δεν είναι γραμμικές/ πολυωνυμικές ή όταν υπάρχουν διακριτά στοιχεία μέσα. Έτσι, η επίλυσή τους γίνεται με τη χρήση υπολογιστικών πακέτων, όπως GAMS, Matlab κλπ

### Βέλτιστη Στρατηγική

Στις συναρτήσεις Κέρδους υπάρχουν επιμέρους στοιχεία τα οποία η ESCO γνωρίζει εκ των προτέρων, είναι σταθερά και δε θα αλλάξουν με οποιαδήποτε στρατηγική και να ακολουθήσει, όπως, η τιμή  $Q_0$  της ενέργειας που αγόρασε από τις μεγάλες αγορές ενέργειας, η συνάρτηση προστίμου  $FINE(X)$  και το γεγονός ότι οι παραγωγοί με FIT θα παράξουν το μέγιστο δυνατό. Κάποια άλλα στοιχεία των συναρτήσεων πάλι, όπως η κατανάλωση των καταναλωτών που δεν είναι εξοπλισμένοι με τοπικό ελεγκτή, μπορούν να θεωρηθούν ανεξάρτητα από τη στρατηγική που θα ακολουθήσει η ESCO. Τέλος, δύο στοιχεία των συναρτήσεων, η κατανάλωση των καταναλωτών με τοπικό ελεγκτή και η παραγωγή των DG που πληρώνονται με μεταβλητή τιμή, δεν μπορούν να θεωρηθούν σαν σταθερά, αφού η τιμή τους δεν είναι γνωστή εκ των προτέρων, αλλά εξαρτάται από τις τιμές που θα διαλέξει η ESCO. Τα δύο αυτά στοιχεία είναι αποτελέσματα των στρατηγικών που θα ακολουθήσουν οι καταναλωτές και οι DG. Έτσι, η συνάρτηση κέρδους της ESCO εμπεριέχει τις στρατηγικές των άλλων δύο παικτών.

Για να ορίσει τη βέλτιστη στρατηγική της, η ESCO, θεωρεί ότι οι δύο άλλοι παίκτες στον επόμενο γύρο θα παίξουν τις βέλτιστες στρατηγικές τους, και έτσι, χρησιμοποιεί αυτές τις στρατηγικές αντικαθιστώντας τις στη δική του συνάρτηση. Το παιχνίδι έτσι μετασχηματίζεται σε παιχνίδι 1 γύρου. Διότι, το αποτέλεσμα  $\{\pi_1^*, \pi_2^*\}$  που θα βρεθεί με τη μέθοδο αυτή, που ονομάζεται "προς τα πίσω επαγωγή" (δες 5.6.4), ορίζει μαζί με τα αποτελέσματα των στρατηγικών των δύο άλλων παικτών το **σημείο Subgame Perfect Nash**:

$$\{\pi_1^*, \pi_2^*, P_{DG}(\pi_1^*), Q_{Cons-LC}(\pi_2^*)\}$$

έτσι, η επιλογή που θα κάνει η ESCO χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο, καθορίζει όλο το υπόλοιπο παιχνίδι.

Μεγάλη συζήτηση μπορεί να γίνει γύρω από το τι γνωρίζει, τι προβλέπει και τι δε γνωρίζει η ESCO. Η ESCO έχει δύο τρόπους να βρει τα στοιχεία που χρειάζεται για να τα αντικαταστήσει στη συνάρτηση κέρδους και να βρει τις τιμές που τη βελτιστοποιούν. Ο πρώτος τρόπος είναι χρησιμοποιώντας στατιστικές μεθόδους. Με αυτές τις μεθόδους, η ESCO χρησιμοποιεί ιστορικά στοιχεία της κατανάλωσης, ερωτηματολόγια, στατιστικές έρευνες και μεθόδους εξαγωγής πληροφοριών (data mining) και σχηματίζει πιθανοτικές καμπύλες. Οι καμπύλες αυτές μετά χρησιμοποιούνται για τη πρόβλεψη των τιμών των αντίστοιχων στοιχείων. Ο δεύτερος τρόπος είναι μέσω επικοινωνίας με τους καταναλωτές και τις μονάδες DG. Το είδος και ο τρόπος επικοινωνίας εξαρτάται από την υποδομή επικοινωνίας του Μικροδικτύου (δες 5.9.5).

Μια λογική παραδοχή είναι ότι η ESCO μπορεί να γνωρίζει τις καμπύλες κόστους των DG και άρα γνωρίζει τόσο τις στρατηγικές που θα ακολουθήσουν οι μονάδες που πληρώνονται με μεταβλητή τιμή όσο και το ότι οι μονάδες που πληρώνονται με FIT θα παράξουν το μέγιστο δυνατό. Η παραδοχή αυτή γίνεται με βάση το ότι η ESCO έχει τη διαχείριση των μονάδων διασπαρμένης παραγωγής, ο αριθμός των οποίων είναι περιορισμένος και ελεγχόμενος. Επίσης, οι συναρτήσεις κόστους των DG κυρίως επηρεάζονται από το κόστος καυσίμου, το οποίο η ESCO μπορεί να γνωρίζει εύκολα. Το δύσκολο μέρος είναι η **πρόβλεψη της παραγωγής των μονάδων ΑΠΕ** (που συνήθως πληρώνονται με FIT) και η **πρόβλεψη της κατανάλωσης** (με και χωρίς τοπικό ελεγκτή). Στα υποκεφάλαια πιο κάτω, παρουσιάζουμε περιληπτικά τις δύο μεθόδους (χρήση πρόβλεψης και επικοινωνία) και πως επηρεάζουν τη γνώση της ESCO για τη κατανάλωση και παραγωγή στο Μικροδίκτυο για την επόμενη ώρα.

### 5.9.4 Χρήση Μεθόδων Πρόβλεψης

Διάφορα μοντέλα πρόβλεψης έχουν χρησιμοποιηθεί στα Συστήματα Ηλεκτρικής Ενέργειας για την επίτευξη της πρόβλεψης με ακρίβεια. Ανάμεσα σε αυτά, μέθοδοι παλινδρόμησης, στατιστικές και state-space μεθόδους. Επιπλέον, έχουν εισαχθεί αλγόριθμοι βασισμένοι στη τεχνητή νοημοσύνη, γενετικοί αλγόριθμοι, ασαφές συστήματα, τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ΤΝΔ), και ένα συνδυασμός αυτών των αλγορίθμων. Μεταξύ αυτών των αλγορίθμων, οι ANN έχει έλαβαν περισσότερη προσοχή, λόγω του κατανοητού μοντέλου της, της εύκολης εφαρμογής, και των καλών επιδόσεων.

#### Πρόβλεψη παραγωγής DG εκτός ΑΠΕ

Από τη πλευρά του παραγωγού, η συνάρτηση προσφοράς ηλεκτρικής ενέργειας για την επόμενη ώρα είναι γνωστή και εξαρτάται από τη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και τη συνάρτηση κόστους, δηλαδή  $P_{DG_i}(\pi_1)$ . Από τη πλευρά της ESCO, όμως, όταν δεν έχει τρόπο να γνωρίζει τη συνάρτηση αυτή (π.χ. μέσω επικοινωνίας) η συνάρτηση παίρνει τη μορφή  $P_{DG_i}(\pi_1, z_i, \varepsilon_i)$ , όπου  $\pi_1$  η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας,  $z$  τα χαρακτηριστικά της DG (όπως μια προσέγγιση της καμπύλης κόστους) που μπορούν να παρατηρηθούν (προφίλ DG) και  $\varepsilon$  ένας στοχαστικός όρος. Η ESCO, όμως, ενδιαφέρεται για την συνολική κατανάλωση στο Μικροδίκτυο  $P_{DG}(\pi_1) = \sum_{i=1}^M P_{DG_i}(\pi_1, z_i, \varepsilon_i)$ .

#### Πρόβλεψη παραγωγής DG από ΑΠΕ

Για τη πρόβλεψη της παραγωγής από ΑΠΕ στο Μικροδίκτυο για την επόμενη ώρα αναγκαία είναι η ύπαρξη πρόβλεψης καιρού. Πολλά μοντέλα πρόβλεψης καιρού και παραγωγής ΑΠΕ έχουν προταθεί και τα περισσότερα από αυτά μπορούν να προσφέρουν μεγάλη ακρίβεια για "πολύ βραχυπρόθεσμη" πρόβλεψη (30-60 λεπτά). Οι μέθοδοι αυτοί βασίζονται σε ιστορικά στοιχεία (πως εξελίχθηκε η κατάσταση υπό παρόμοιες συνθήκες στο παρελθόν), σε πρόβλεψη του καιρού αλλά και από πρόσφατα στοιχεία της παραγωγής (δηλαδή πόσο παρήγαγαν στο τέλος της προηγούμενης ώρας). Οι προβλέψεις αυτές έχουν μεγάλη ακρίβεια καθώς τα καιρικά φαινόμενα στην Ελλάδα, και ειδικά η ηλιοφάνεια, δεν έχουν γρήγορη εξέλιξη. Αν το διάστημα που μελετάμε το παιχνίδι, επιπλέον, ήταν μικρότερο (π.χ. 15 λεπτών) τότε η πρόβλεψη αυτή, ειδικά για την ενέργεια από φωτοβολταϊκά, θα ήταν ακόμη πιο ακριβής.

Δε θα προχωρήσουμε σε λεπτομέρειες γύρω από τη πρόβλεψη παραγωγής από ΑΠΕ, καθώς είναι ένα τεράστιο κεφάλαιο και δεν είναι μέρος αυτής της μελέτης. Στο επίπεδο που μας ενδιαφέρει, η ESCO χρειάζεται βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη (24 ωρών) για να προγραμματίσει την αγορά ενέργειας από τις μεγάλες αγορές και πολύ βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη (1 ώρας) για να καθορίσει τις τιμές στο Μικροδίκτυο την επόμενη ώρα.

#### Πρόβλεψη κατανάλωσης οικιακών καταναλωτών

[19] Από τη πλευρά του καταναλωτή, η συνάρτηση ζήτησης ηλεκτρικής ενέργειας για την επόμενη ώρα είναι γνωστή και εξαρτάται από τη τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας και τις ανάγκες του, δηλαδή  $Q_{Cons}(\pi_2)$ . Από τη πλευρά της ESCO, όμως, όταν δεν έχει τρόπο να γνωρίζει τη καμπύλη αυτή (π.χ. μέσω επικοινωνίας) η καμπύλη παίρνει τη μορφή  $Q_{Cons_i}(\pi_2, z_i, \varepsilon_i)$ , όπου  $\pi_2$  η τιμή ηλεκτρικής ενέργειας,  $z$  τα χαρακτηριστικά του καταναλωτή που μπορούν να παρατηρηθούν (προφίλ καταναλωτή) και  $\varepsilon$  ένας στοχαστικός όρος. Η ESCO όμως ενδιαφέρεται για την συνολική κατανάλωση στο Μικροδίκτυο  $Q_{Cons} = \sum_{i=1}^N Q_{Cons_i}(\pi_2, z_i, \varepsilon_i)$  ενώ για

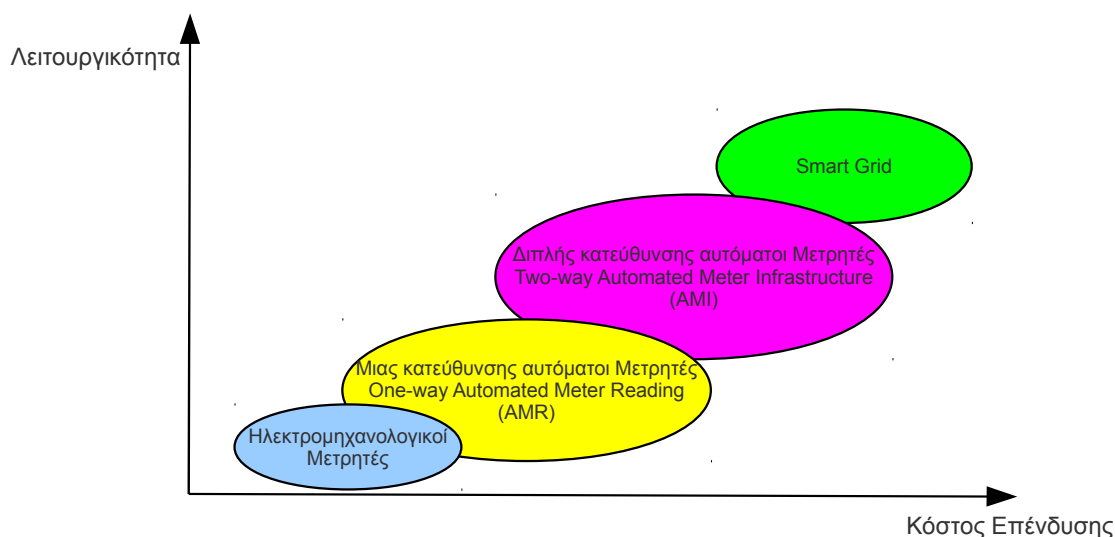
το πρώτο μοντέλο Μικροδικτύου ενδιαφέρεται επίσης για την επί μέρους κατανάλωση των καταναλωτών με τοπικό ελεγκτή και χωρίς.

Οι καμπύλες ζήτησης εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες, όπως οικονομικοί παράγοντες στη περιοχή, εποχικοί παράγοντες (Χριστούγεννα, γιορτές, αργίες κλπ), η ώρα της ημέρας, καιρικοί παράγοντες (καλοκαίρι, ζέστη, κρύο κλπ), τυχαίοι παράγοντες (π.χ. Champions League) και η τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας φυσικά. Η ESCO χρησιμοποιεί διάφορες μεθόδους, τις οποίες δε θα αναφέρουμε εδώ, για το σχηματισμό των καμπύλων αυτών οι οποίες περιέχουν και πιθανοτικά στοιχεία. Έπειτα, χρησιμοποιεί τις καμπύλες αυτές για να προβλέψει την αναμενόμενη κατανάλωση. Η αναμενόμενη κατανάλωση ισούται με τη μέση τιμή των καμπυλών αυτών  $E(Q_{Cons})$ .

Και εδώ, δε θα προχωρήσουμε σε λεπτομέρειες γύρω από τη πρόβλεψη φορτίου, καθώς είναι ένα τεράστιο κεφάλαιο και δεν είναι μέρος αυτής της μελέτης. Στο επίπεδο που μας ενδιαφέρει, η ESCO χρειάζεται βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη (24 ωρών) για να προγραμματίσει την αγορά ενέργειας από τις μεγάλες αγορές και πολύ βραχυπρόθεσμη πρόβλεψη (1 ώρας) για να καθορίσει τις τιμές στο Μικροδίκτυο την επόμενη ώρα.

### 5.9.5 Σύστημα επικοινωνίας στο Μικροδίκτυο

Ένα σημαντικό ζήτημα που εμφανίζεται και στα δύο μοντέλα είναι το θέμα της επικοινωνίας της ESCO/ Aggregator με τους υπόλοιπους συμμετέχοντες στο Μικροδίκτυο. Αυτό το πρόβλημα όμως είναι γενικότερο και δεν περιορίζεται μόνο στα Μικροδίκτυα ή μόνο στη μελέτη αυτή. Πολύ δουλειά γίνεται στο επίπεδο των Smart Grids για τα επίπεδα επικοινωνίας. Στο Σχήμα 5.24 βλέπουμε την εξέλιξη της επικοινωνίας ανάμεσα στους καταναλωτές και τα πιο ψηλά επίπεδα του δικτύου (ESCO, aggregator, utility companies etc).



Σχήμα 5.24: Εξέλιξη του Smart Grid

### Ηλεκτρομηχανολογικοί Μετρητές

Στη βάση του διαγράμματος βρίσκουμε τους απλούς ηλεκτρομηχανολογικούς μετρητές. Από τη πρώτη στιγμή που εμφανίστηκε η ανάγκη για μέτρηση της κατανάλωσης



ηλεκτρικής ενέργειας έκαναν την εμφάνιση τους και αυτοί οι μετρητές. Προσφέρουν το πιο χαμηλό επίπεδο λειτουργικότητας καθώς δε προσφέρουν στα πιο πάνω επίπεδα καμία πληροφορία σε πραγματικό χρόνο. Η καταγραφή της κατανάλωσης από τις εταιρίες διανομής γίνεται σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα (κάθε μήνα ή δίμηνο ή τρίμηνο κλπ). Συνδέονται άμεσα με το σύστημα τιμολόγησης με σταθερή τιμή (Fixed Price) καθώς καταγράφουν συσσωρευτικά τη κατανάλωση και δεν είναι δυνατό να ξεχωρίσουμε χρονικά διαστήματα κατανάλωσης. Οι μετρητές αυτοί επικρατούν αυτή τη στιγμή στα περισσότερα δίκτυα διανομής.

### **AMR**

Οι πρώτες προσπάθειες προς τη δημιουργία ενός έξυπνου συστήματος οδήγησαν στη δημιουργία AMR (automated meter system) συστημάτων. Τα συστήματα αυτά επιτρέπουν την ανάγνωση της κατανάλωσης από μακριά. Αν και αρχικά η τεχνολογία αυτή ήταν ελκυστική σύντομα εγκαταλείφθηκε. Αυτό διότι αν και έδινε πολλές πληροφορίες για τη κατάσταση των καταναλωτών και του δικτύου διανομής, η "μιας κατεύθυνσης" επικοινωνία δεν επέτρεπε να παρθούν διορθωτικές κινήσεις. Επίσης, δεν αντιμετώπιζε το πιο σοβαρό πρόβλημα: τη διαχείριση της ζήτησης (demand-side management).

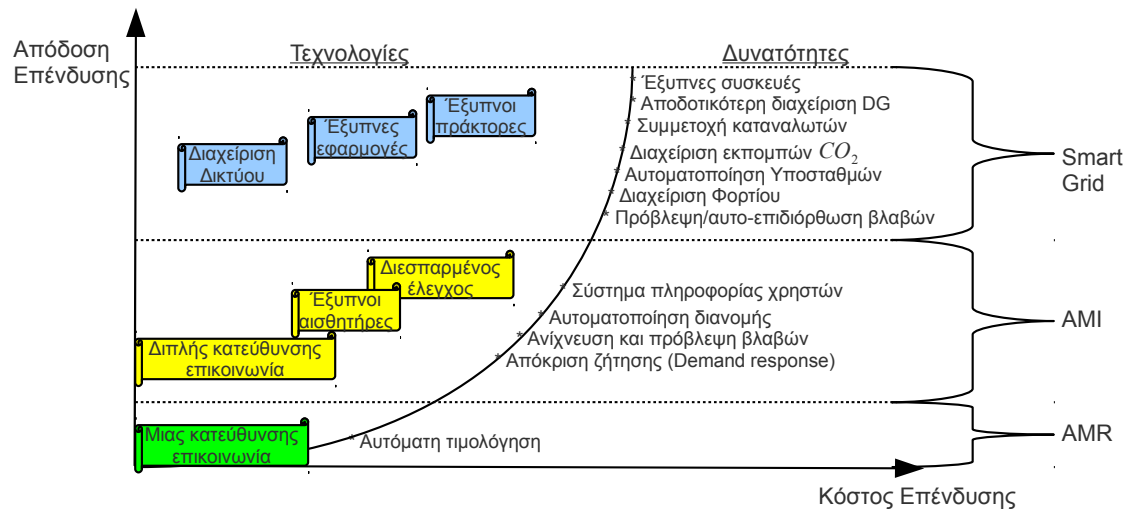
### **AMI**

Το σύστημα αυτό επιτρέπει τη "διπλής κατεύθυνσης" επικοινωνία. Επιτρέπει τη απομακρυσμένη ανάγνωση της κατανάλωσης καθώς επίσης και πραγματοποίηση απλών διορθωτικών κινήσεων με κάποια σήματα που στέλνονται στο καταναλωτή με σκοπό τη μεταβολή/περιορισμό της κατανάλωσης ή την ενημέρωση της τιμής ενέργειας σε αγορές διανομής με μεταβλητή τιμολόγηση.

### **Smart Grid**

Το σύστημα αυτό βασίζεται στη δομή των AMI και προσφέρει επιπλέον δυνατότητες (όπως φαίνονται στο σχήμα 5.25). Ο όγκος δεδομένων που διακινείται είναι πολύ μεγαλύτερος.

Στο Σχήμα 5.25 βλέπουμε τα τρία συστήματα με τις τεχνολογίες στις οποίες βασίζονται και τις δυνατότητες που προσφέρουν. Επίσης, από τη χαμπύλη, βλέπουμε την αναμενόμενη απόδοση σε σχέση με την επένδυση για κάθε τεχνολογία.



Σχήμα 5.25: Καμπύλη Επιστροφής Επενδύσεων ανάλογα με τεχνολογία

### 5.9.6 Στοιχεία Συναρτήσεων Κέρδους ESCO

Τα δυο μοντέλα Μικροδικτύου βασίζονται στη δυνατότητα της ESCO να επικοινωνεί με τους τοπικούς ελεγκτές για να τους ανακοινώνει τις τιμές  $\pi_1$  και  $\pi_2$ . Άρα, ξεκινάμε με δεδομένο την ανάγκη επικοινωνίας τουλάχιστο μιας κατεύθυνσης από την ESCO προς τους τοπικούς ελεγκτές. Η ύπαρξη επικοινωνίας και το επίπεδο επικοινωνίας διπλής κατεύθυνσης αλλάζει τα δεδομένα και την ακρίβειά τους, που έχει η ESCO στη διάθεσή της για να καθορίσει τις τιμές  $\pi_1$  και  $\pi_2$ , δηλαδή να καθορίσει τη στρατηγική της. Επίσης, η ύπαρξη επικοινωνίας από τον ESCO προς τους δύο άλλους παίκτες αμέσως κατατάσσει στο παιχνίδι σαν τέλειας πληροφορίας, καθώς οι επόμενοι παίκτες (DG και καταναλωτές) γνωρίζουν τη στρατηγική του προηγούμενου, και αυτό μας επιτρέπει να το επιλύσουμε με τη χρήση της μεθόδου "backwards induction".

Αν υπάρχει επικοινωνία διπλής κατεύθυνσης, τότε η ESCO χρησιμοποιεί τα δεδομένα που της δίνουν οι μονάδες DG (π.χ. καμπύλες κόστους) για να σχηματίσει τη συνάρτηση  $P_{DG}(\pi_1)$  και τα δεδομένα που της δίνουν οι καταναλωτές που είναι εξοπλισμένοι με τοπικό ελεγκτή (π.χ. ποιες συσκευές είναι online και περιμένουν να ικανοποιηθούν ή τις καμπύλες ζήτησης τους απευθείας) για να σχηματίσει τη συνάρτηση  $Q_{Cons-LC}(\pi_2)$ . Τα στοιχεία  $P_{DG-APE}$  (συνήθως οι μονάδες που πληρώνονται με FIT) και  $Q_{Cons-NOLC}$  πρέπει να προβλεφθούν με βάση τις τεχνικές πρόβλεψης.

Αν δεν υπάρχει επικοινωνία διπλής κατεύθυνσης, τότε η ESCO υποχρεώνεται να χρησιμοποιήσει μεθόδους πρόβλεψης για όλα τα στοιχεία.

## Κεφάλαιο 6

# Εφαρμογές

Σε αυτό το κεφάλαιο θα χρησιμοποιήσουμε την εφαρμογή MATLAB για να δούμε πως συμπεριφέρονται οι συμμετέχοντες στο Μικροδίκτυο ανάλογα με το μοντέλο που εφαρμόζεται κάθε φορά.

### 6.1 Δεδομένα Εφαρμογής

Η προσομοίωση γίνεται σε ένα απλοποιημένο Μικροδίκτυο με 4 οικιακούς καταναλωτές, 2 φωτοβολταϊκά στοιχεία εγκατεστημένης ισχύος 5kW και δύο Μικροτουρμπίνες 3 και 5 kW. Η προσομοίωση γίνεται για 5 συνεχόμενες ώρες  $t = 1 \dots 5$  κατά τις οποίες θεωρούμε δεδομένη την ενέργεια που έχει αγοράσει για το Μικροδίκτυο η ESCO από τις αγορές ενέργειας τη προηγούμενη μέρα και τη τιμή στην οποία πληρώνει αυτή την ενέργεια, που συμπεριλαμβάνει την οριακή τιμή του συστήματος, τα δικαιώματα χρήσης δικτύου κλπ. Επίσης, έχουμε καθορίσει τη καμπύλη ζήτησης των οικιακών καταναλωτών σε ωριαία βάση, τη καμπύλη προσφοράς των Μ.Τ. με βάση τη συνάρτηση κόστους τους και τη παραγωγή των φωτοβολταϊκών.

Στα παρακάτω μοντέλα θεωρούμε ότι η ESCO γνωρίζει τη καμπύλη ζήτησης των παραγωγών, τη καμπύλη προσφοράς των ΜΤ και τη παραγωγή των ΦΒ. Έτσι, απλοποιούμε το στάδιο της πρόβλεψης ή/και επικοινωνίας όπως το παρουσιάσαμε στα υποκεφάλαια 5.9.4 και 5.9.5. Η απλοποίηση αυτή γίνεται διότι σκοπός μας δεν είναι να δείξουμε τις μεθόδους πρόβλεψης ή επικοινωνίας καθώς αυτές επηρεάζουν μόνο την ακρίβεια των δεδομένων που έχει η ESCO στη διάθεσή της. Σκοπός μας είναι να δείξουμε τη λειτουργία ενός τέτοιου Μικροδικτύου και πώς αντιδρά σε διάφορες αλλαγές στις παραμέτρους του.

#### 6.1.1 Μοντέλα και συναρτήσεις

Παρακάτω παρουσιάζουμε τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν με διαγράμματα.

##### Μοντέλο καταναλωτή με τοπικό ελεγκτή

Η κατανάλωση του καταναλωτή με τοπικό ελεγκτή εξαρτάται από τη τιμή  $p_2$ . Χρησιμοποιήσαμε το ίδιο μοντέλο καταναλωτή για τα μοντέλα του Μικροδικτύου που υπάρχουν καταναλωτές με τοπικό ελεγκτή. Η τιμή  $p_2$  χρησιμοποιείται στο πρώτο μοντέλο σαν σήμα ελέγχου (για το Demand Dispatch) ενώ στο δεύτερο μοντέλο αντιπροσωπεύει τη τιμή χρέωσης για τον καταναλωτή (Price Responsive). Βλέπουμε το σχηματισμό της καμπύλης ζήτησης στο διάγραμμα 6.16γ'.

Για το σχηματισμό της καμπύλης ζήτησης χρησιμοποιήθηκε η μεθοδολογία του υποκεφαλαίου 5.8.4 ενώ οι τιμές για την ενεργοποίηση των ελεγχόμενων συσκευών και τη μεταβολή της θερμοκρασίας του κλιματιστικού επιλέχθηκαν ώστε να είναι λογικές κατά τη δική μου εκτίμηση. Επιπλέον, για τη λειτουργία του κλιματιστικού, θεωρούμε ότι λόγω της διακοπόμενης λειτουργίας του και τη μεταβλητή θερμοκρασία αναφοράς έχουμε αποθήκευση και ανάκτηση ενέργειας όπως εξηγήθηκε στο υποκεφάλαιο 5.8.7 και παρουσιάζεται στο σχήμα 6.1.

### **Μοντέλο καταναλωτή χωρίς τοπικό ελεγκτή**

Με βάση το προηγούμενο μοντέλο αλλά χωρίς ελεγχόμενα φορτία. Δηλαδή, τα φορτία όλων των συσκευών ικανοποιούνται όταν οι συσκευές ενεργοποιηθούν.

### **Μοντέλο Παραγωγού MT**

Η βέλτιστη στρατηγική των MT φαίνεται στο διάγραμμα 6.16β'.

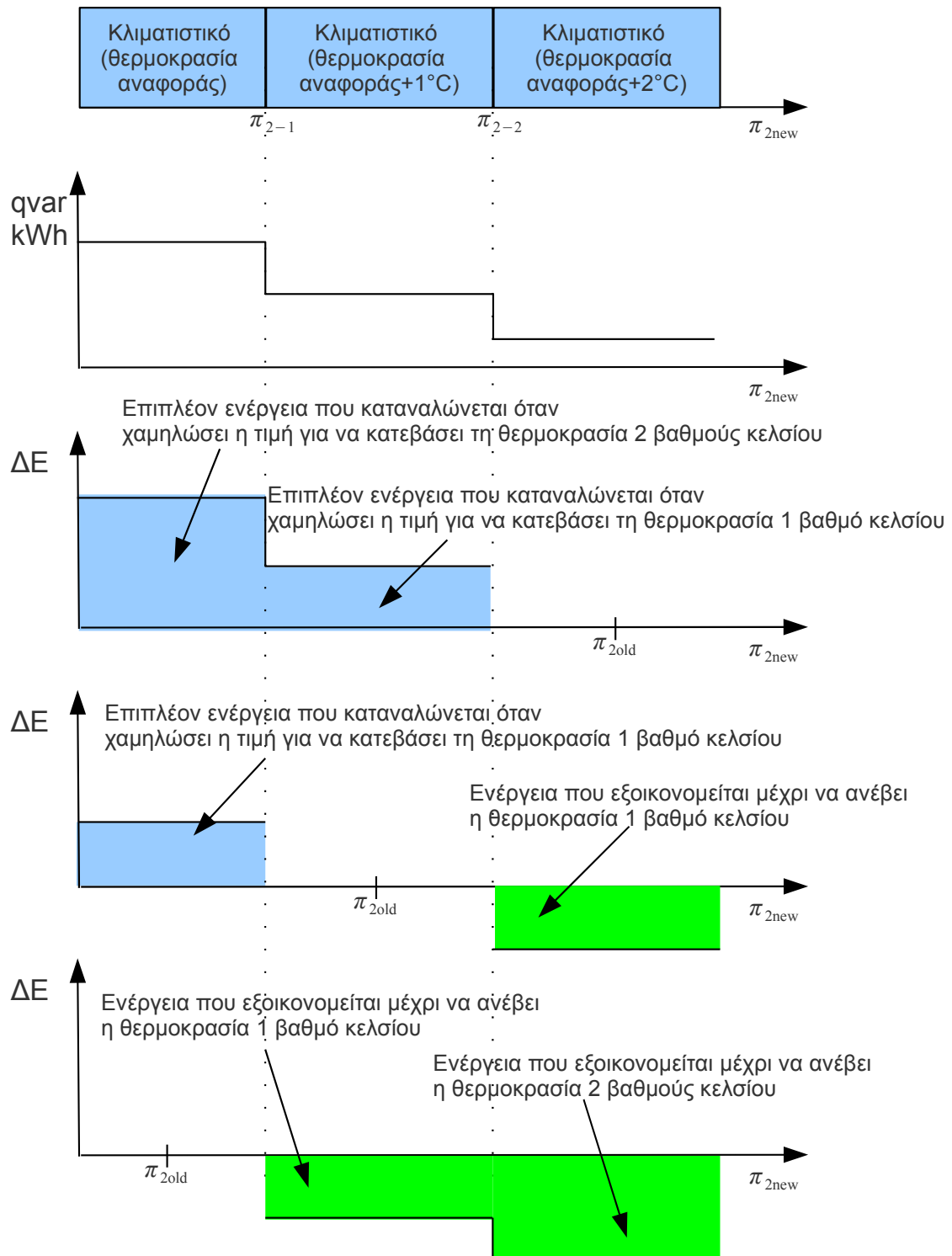
### **Καθορισμός τιμής επιπλέον ενέργειας που απορροφάται από το Δίκτυο**

Όταν η ESCO/ Aggregator απορροφήσει μεγαλύτερο ποσό ενέργειας από αυτό που έχει συμφωνία να απορροφήσει από το Δίκτυο για τη συγκεκριμένη ώρα τότε την επιπλέον αυτή ενέργεια τη πληρώνει σε διαφορετική τιμή από τη τιμή που αγοράζει τη προσυμφωνημένη ενέργεια. Ανάλογα με το μηχανισμό που χρησιμοποιεί ο διαχειριστής του συστήματος για να διορθώνει τις ανωμαλίες αλλάζει και ο τρόπος με τον οποίο πληρώνει η ESCO την επιπλέον αυτή ενέργεια. Αν ο μηχανισμός είναι Managed Spot Market, τότε η ESCO πληρώνει την επιπλέον ενέργεια στη Spot Price που επικρατεί εκείνη τη στιγμή στην αγορά (όπως αναφέραμε στο υποκεφάλαιο 5). Σε άλλες περιπτώσεις ο μηχανισμός είναι πιο πολύπλοκος και ο καθορισμός της τιμής αυτής εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Σε κάθε περίπτωση όμως, η επιπλέον αυτή ενέργεια προέρχεται από πιο ακριβή μονάδα από τη τελευταία που μπήκε στη παραγωγή για τη συγκεκριμένη ώρα, έτσι η τιμή αυτή είναι συνήθως μεγαλύτερη από την οριακή τιμή στην οποία είχε αγοράσει τη προσυμφωνημένη ενέργεια η ESCO. Επίσης, όταν η ESCO καταναλώνει λιγότερη ενέργεια από αυτή που είχε συμφωνηθεί, πληρώνει πάλι κάποιο πρόστιμο για αυτή την ενέργεια για να αποζημιώσει το διαφυγόν κέρδος.

Για να προσομοιώσουμε αυτή τη διαδικασία εισάγαμε τη συνάρτηση  $\text{fine}()$  (προστίμου). Η συνάρτηση αυτή, αν και πολύ απλή στη μορφή, αντιπροσωπεύει την ακριβότερη τιμή που καλείται να πληρώσει η ESCO για την επιπλέον ενέργεια που απορροφάει από το δίκτυο τη συγκεκριμένη ώρα. Έτσι, θέσαμε αν η ESCO καταναλώνει μέχρι 20% περισσότερη ενέργεια από τη συμφωνία της τότε πληρώνει αυτή την ενέργεια 20% πιο ακριβά από την οριακή τιμή. Για περισσότερη ενέργεια, πληρώνει 40% πιο ακριβά. Αν καταναλώνει λιγότερη ενέργεια τότε πάλι για μέχρι 20% λιγότερη ενέργεια από τη συμφωνία της τότε πληρώνει αυτή την ενέργεια στο 30% της οριακής τιμή ενώ για περισσότερη στο 50%.

### **Καθορισμός ορίων διακύμανσης τιμών $\pi_1$ και $\pi_2$**

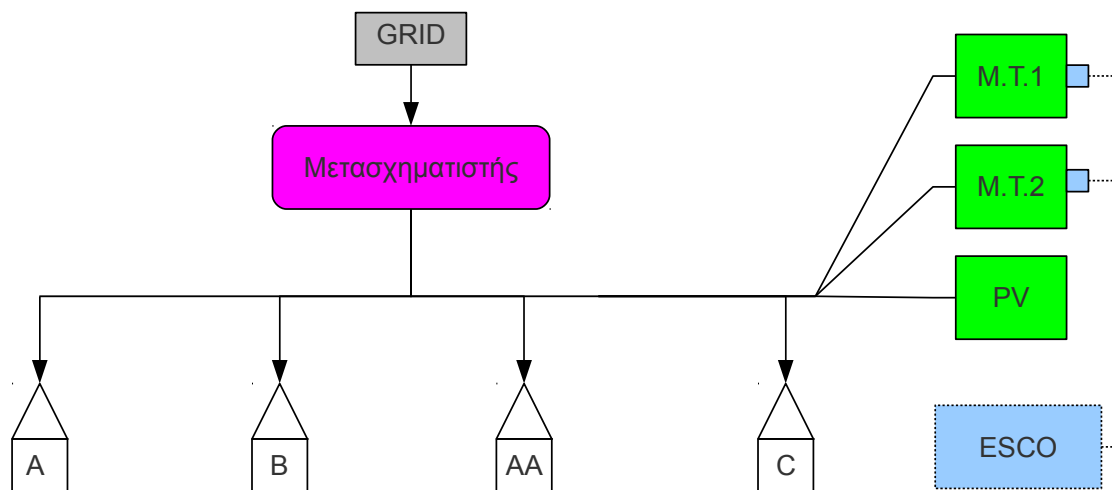
Για το καθορισμό της μέγιστης και ελάχιστης τιμής για το  $\pi_1$  χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος υπολογισμού ορίων όπως παρουσιάσαμε στο υποκεφάλαιο 5.7.1. Ενώ, για το καθορισμός των ορίων για τη τιμή  $\pi_2$ , όταν αυτή μεταβάλλεται, πήραμε μία μεταβολή 3 c/kWh πάνω και 5 c/kWh κάτω από τη τιμή που θεωρήσαμε για το μοντέλο με σταθερή τιμή.



Σχήμα 6.1: Λειτουργία κλιματιστικού με μεταβλητή θερμοκρασία αναφοράς

## 6.2 Αρχικό Μοντέλο

Το μοντέλο αυτό χρησιμοποιήθηκε για να χρησιμοποιηθεί σαν βάση αναφοράς για σύγκριση με τα επόμενα μοντέλα. Μας δείχνει το ενδεχόμενο που όλοι οι καταναλωτές πληρώνουν την ενέργεια που καταναλώνουν σε σταθερή τιμή και δεν υπάρχει αυτοματοποιημένος τρόπος επηρεασμού της κατανάλωσης. Η ESCO έχει στη διαχείρισή της τις μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής. Το μοντέλο αυτό φαίνεται στο σχήμα 6.2.



Σχήμα 6.2: Παράδειγμα μοντέλου χωρίς κανένα έλεγχο στη κατανάλωση (Αρχικό Μοντέλο)

Σε αυτό το μοντέλο, οι καταναλωτές δεν ακολουθούν κάποια στρατηγική καθώς η τιμή στην οποία αγοράζουν δεν αλλάζει από ώρα σε ώρα. Έτσι, για όλους τους καταναλωτές χρησιμοποιούμε το μοντέλο καταναλωτή χωρίς τοπικό ελεγκτή. Οι μονάδες διεσπαρμένης παραγωγής ακολουθούν το ίδιο μοντέλο με πριν. Η ESCO σε αυτό το μοντέλο μπορεί να καθορίσει μόνο τη τιμή  $\pi_1$ .

### 6.2.1 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις

Αυτό το μοντέλο μας δίνει:

Η ESCO όταν η οριακή τιμή ανεβαίνει και όταν έχει κάνει σφάλμα στη πρόβλεψή της, καταφεύγει στις μικροτουρμπίνες για να παράξει μέρος της ενέργειας που χρειάζεται. Αυτό συμβαίνει διότι, όταν η ESCO απορροφήσει περισσότερη ενέργεια από το Δίκτυο και η οριακή τιμή είναι πολύ ψηλή, τότε η τιμή στην οποία θα πληρώσει την ενέργεια αυτή είναι ακόμη μεγαλύτερη από την οριακή τιμή (αφού πιο ακριβές μονάδες από αυτές που παράγουν ήδη θα κληθούν να παράξουν αυτή την ενέργεια). Έτσι, γίνεται πιο συμφέρον να χρησιμοποιήσει τη τοπική παραγωγή.

Η κατανάλωση σε αυτό το μοντέλο είναι τελείως ανελαστική και όλες οι συσκευές απορροφούν το φορτίο τη ώρα που ενεργοποιούνται. Αυτό οδηγεί την ESCO, που είναι υποχρεωμένη να ικανοποιήσει αυτή τη ζήτηση, σε ζημιά. Όσο η οριακή τιμή γίνεται μεγαλύτερη από την τιμή στην οποία πουλά ενέργεια η ESCO και όσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα πρόβλεψης που έχει κάνει η ESCO τόσο αυξάνεται η ζημιά. Παρατηρώντας τώρα την ώρα  $t=3$  που αντιπροσωπεύει την ώρα με τη πιο ψηλή οριακή τιμή βλέπουμε πως μεταβάλλεται το κέρδος της εταιρίας και η χρήση των DG με πιο ακριβείς προβλέψεις στο πίνακα 6.2.

| t                               | 1    | 2    | 3    | 4     | 5    |
|---------------------------------|------|------|------|-------|------|
| Συμφωνημένη Ενέργεια (kWh)      | 10   | 11   | 06   | 11    | 10   |
| Οριακή τιμή (euro cent/kWh)     | 11   | 15   | 23   | 15    | 10   |
| Τοπική παραγωγή (kWh)           | 2.8  | 4.1  | 9    | 2.4   | 2.4  |
| Συνολική κατανάλωση (kWh)       | 13.6 | 15.2 | 15   | 10.9  | 9.6  |
| Καταναλωτής A (kWh)             | 2.96 | 3.85 | 3.3  | 3.1   | 2    |
| Καταναλωτής AA (kWh)            | 2.96 | 3.85 | 3.3  | 3.1   | 2    |
| Καταναλωτής B (kWh)             | 3.27 | 4.13 | 3.68 | 2.43  | 3.36 |
| Καταναλωτής C (kWh)             | 4.38 | 3.35 | 4.72 | 2.23  | 2.23 |
| Βέλτιστο $\pi_1$ (eurocent/kWh) | 12   | 13   | 17   | 10    | 10   |
| Κέρδος ESCO (ευρώ)              | 0.22 | -0.4 | -2.5 | -0.45 | 0.06 |
| Συνολικό Κέρδος ESCO (ευρώ)     | -3.1 |      |      |       |      |
| Κόστος Καταναλωτή A (ευρώ)      | 2.59 |      |      |       |      |
| Κόστος Καταναλωτή AA (ευρώ)     | 2.59 |      |      |       |      |
| Κόστος Καταναλωτή B (ευρώ)      | 2.86 |      |      |       |      |
| Κόστος Καταναλωτή C (ευρώ)      | 2.87 |      |      |       |      |

Πίνακας 6.1: Αποτελέσματα Προσομοίωσης (Αρχικό Μοντέλο)

|                                  |      |       |      |      |      |      |
|----------------------------------|------|-------|------|------|------|------|
| Οριακή τιμή (euro cent/kWh)      | 23   |       |      |      |      |      |
| Συνολική κατανάλωση (kWh)        | 15   |       |      |      |      |      |
| Προβλεπόμενη κατανάλωση (kWh)    | 6    | 10    | 11   | 12   | 13   | 15   |
| Κέρδος ESCO (ευρώ)               | -2.5 | -1.76 | -1.6 | -1.5 | -1.6 | -1.8 |
| Βέλτιστο $\pi_1$ (euro cent/kWh) | 17   | 13    | 12   | 10   | 10   | 10   |
| Τοπική παραγωγή (kWh)            | 9    | 5     | 4    | 3    | 3    | 3    |

Πίνακας 6.2: Μεταβολή κέρδους με πρόβλεψη (Αρχικό Μοντέλο)

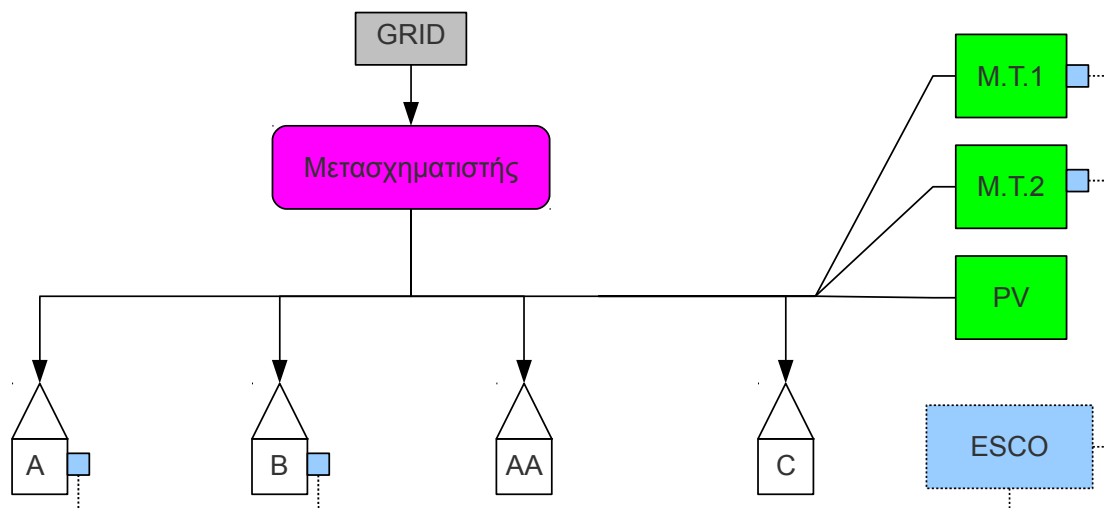
Η παραγωγή από ΦΒ είναι ίση με 3kWh αυτή την ώρα και η ESCO απορροφά αυτή την ενέργεια πάντα. Έτσι, παρατηρούμε ότι όταν η πρόβλεψη της κατανάλωσης είναι εσφαλμένη αρνητικά (δηλαδή μικρότερη από τη πραγματική κατανάλωση) τότε η ESCO πρέπει να καλύψει κάπως την ενέργεια αυτή. Μπορεί να απορροφήσει ενέργεια από το Δίκτυο ή από τις DG. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, λόγω της πολύ ψηλής οριακής τιμής και άρα της ακόμη ψηλότερης τιμής που θα αγόραζε την επιπλέον ενέργεια από το Δίκτυο, η ESCO συμπληρώνει την ενέργεια από τη τοπική παραγωγή. Βλέπουμε ότι με βάση το μοντέλο αυτό, η εταιρία έχει το βέλτιστο κέρδος όταν κάνει τέλεια πρόβλεψη, δηλαδή για πρόβλεψη 12 (+3 από ΦΒ).

Όταν αντιθέτως η πρόβλεψή του είναι εσφαλμένη θετικά (δηλαδή μεγαλύτερη από τη πραγματική κατανάλωση) τότε το κέρδος του μειώνεται πάλι λόγω του προστίμου που συζητήσαμε πιο πάνω (π.χ. πληρώνει τα διαφεύγοντα κέρδη των παραγωγών που τελικά δε θα παράξουν λόγω της εσφαλμένης πρόβλεψης της ESCO)

### 6.3 Πρώτο Μοντέλο

Στο μοντέλο αυτό έχουμε 2 καταναλωτές με τοπικό ελεγκτή (A και B) και 2 καταναλωτές χωρίς τοπικό ελεγκτή (AA και C). Ο τοπικός ελεγκτής χρησιμοποιείται για έλεγχο του φορτίου (Demand Dispatch) όταν αυτό χρειάζεται με τη χρήση του σήματος  $\pi_2$  σαν σήμα ελέγχου. Οι

καταναλωτές χωρίς τοπικό ελεγκτή πληρώνουν σταθερή τιμή FP και οι καταναλωτές με τοπικό ελεγκτή πληρώνουν πάλι σταθερή τιμή αλλά με έκπτωση  $a$  που τους προσφέρει η ESCO για τη δυνατότητα εγκατάστασης του τοπικού ελεγκτή. Το κόστος εγκατάστασης του τοπικού ελεγκτή το επωμίζεται η ESCO. Έτσι, στην αρχή ίσως η έκπτωση προς τους καταναλωτές να είναι μικρότερη (για να γίνει απόσβεση του εξοπλισμού) ενώ μετά να αυξάνεται.



Σχήμα 6.3: Παράδειγμα μοντέλου με έλεγχο Demand Dispatch στη κατανάλωση (Πρώτο Μοντέλο)

Για να μπορούμε να συγκρίνουμε καλύτερα τη λειτουργία του τοπικού ελεγκτή, οι δύο οικιακοί καταναλωτές A και AA έχουν πανομοιότυπη κατανάλωση και όλες οι συσκευές τους ενεργοποιούνται την ίδια στιγμή. Η διαφορά είναι ότι ο καταναλωτής A έχει εγκατεστημένο τοπικό ελεγκτή ενώ ο AA όχι.

### 6.3.1 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις

Αυτό το μοντέλο μας δίνει τα αποτελέσματα του πίνακα 6.3.

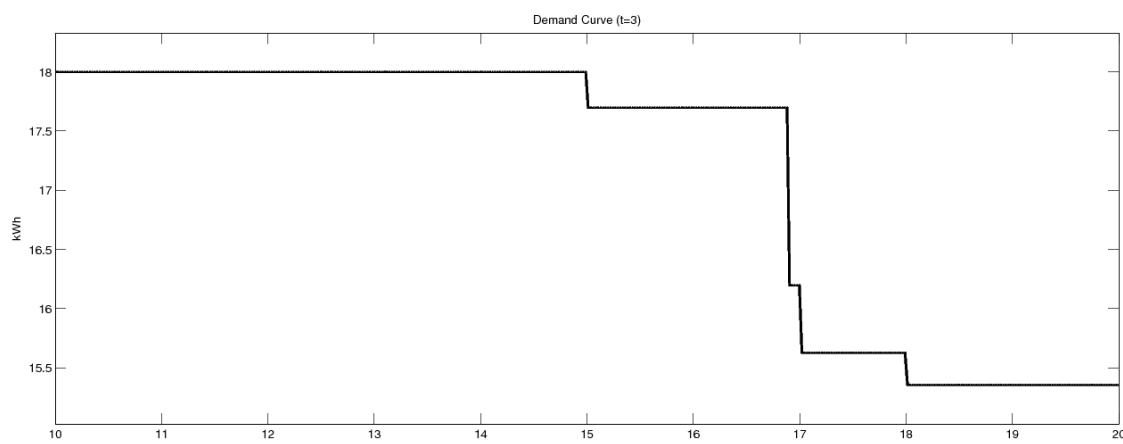
Με μια πρώτη ματιά, βλέπουμε αμέσως ότι το συνολικό κέρδος της ESCO έχει αυξηθεί (αν και ακόμη παραμένει αρνητικό) σε σχέση με το προηγούμενο μοντέλο. Ενώ ταυτόχρονα, οι καταναλωτές με τοπικό ελεγκτή έχουν αυξημένο κέρδος. Συγκεκριμένα, αν συγκρίνουμε το καταναλωτή A και AA (που όπως είπαμε είναι πανομοιότυποι καταναλωτές με μόνη διαφορά την ύπαρξη τοπικού ελεγκτή) βλέπουμε το κέρδος που αντιστοιχεί σε 5% (αφού τότε ορίσαμε την έκπτωση).

Παρατηρώντας τη κατανάλωση, βλέπουμε ότι έχουμε μειωμένη κατανάλωση (λόγο μεταβολής του κλιματιστικού) και μετατόπιση φορτίου από τις ώρες με ψηλό κόστος σε ώρες με χαμηλότερο. Στο σχήμα 6.4 βλέπουμε ένα παράδειγμα της αθροιστικής καμπύλης ζήτησης όλων των καταναλωτών για την ώρα  $t=3$ . Λόγω του ψηλού κόστους τη συγκεκριμένη ώρα, η ESCO επιλέγει μια τιμή για το σήμα  $\pi_2$  που να ελαχιστοποιεί τη κατανάλωση. Το σήμα 0.181 μας δίνει την ελάχιστη κατανάλωση για αυτή την ώρα (**προσοχή:** σε αυτό το μοντέλο το σήμα αυτό δεν αναπαριστά τιμή πληρωμής, απλά είναι ένα σήμα ελέγχου!).



| t                                | 1    | 2     | 3    | 4    | 5    |
|----------------------------------|------|-------|------|------|------|
| Συμφωνημένη Ενέργεια (kWh)       | 10   | 11    | 06   | 11   | 10   |
| Οριακή τιμή (euro cent/kWh)      | 11   | 15    | 23   | 15   | 10   |
| Τοπική παραγωγή (kWh)            | 2    | 2.4   | 8    | 2.4  | 2.4  |
| Συνολική κατανάλωση (kWh)        | 12   | 13.3  | 14   | 13.1 | 9.6  |
| Καταναλωτής A (kWh)              | 2.13 | 3.1   | 2.9  | 3.78 | 2    |
| Καταναλωτής AA (kWh)             | 2.96 | 3.85  | 3.3  | 3.1  | 2    |
| Καταναλωτής B (kWh)              | 2.48 | 2.96  | 3.14 | 3.99 | 3.36 |
| Καταναλωτής C (kWh)              | 4.38 | 3.35  | 4.72 | 2.23 | 2.23 |
| Βέλτιστο $\pi_1$ (euro cent/kWh) | 10   | 10    | 16   | 10   | 10   |
| Βέλτιστο $\pi_2$                 | 18   | 169   | 181  | 10   | 10   |
| Κέρδος ESCO (ευρώ)               | 0.28 | -0.27 | -2.2 | -0.3 | 0.02 |
| Συνολικό Κέρδος ESCO (ευρώ)      | -2.6 |       |      |      |      |
| Κόστος Καταναλωτή A (ευρώ)       | 2.24 |       |      |      |      |
| Κόστος Καταναλωτή AA (ευρώ)      | 2.59 |       |      |      |      |
| Κόστος Καταναλωτή B (ευρώ)       | 2.57 |       |      |      |      |
| Κόστος Καταναλωτή C (ευρώ)       | 2.87 |       |      |      |      |

Πίνακας 6.3: Αποτελέσματα Προσομοίωσης (Πρώτο Μοντέλο)

Σχήμα 6.4: Αθροιστική καμπύλη ζήτησης για  $t=3$  (Πρώτο Μοντέλο)

Παρατηρώντας τώρα τις DG βλέπουμε ότι ενεργοποιούνται μόνο την ώρα με τη ψηλότερη τιμή ( $t=3$ ) και μόνο αφού η ESCO έχει εξαντλήσει κάθε πιθανή μείωση στο φορτίο. Αυτό συμβαίνει διότι τη συγκεκριμένη ώρα η ESCO αγοράζει την ενέργεια πιο ακριβά από ότι πουλάει στους καταναλωτές. Αφού δεν έχει κάποιο τρόπο να αυξήσει τη τιμή πώλησης, καθώς όλοι οι καταναλωτές πληρώνουν σε σταθερή τιμή, προσπαθεί να μειώσει όσο το δυνατό την κατανάλωση. Όταν φτάσει στη μέγιστη δυνατή μείωση, τότε πρέπει να επιλέξει αν θα ικανοποιήσει το επιπλέον φορτίο από το δίκτυο (πληρώνοντας αυτή την ενέργεια σε τιμή ακριβότερη από την οριακή) ή από τις DG. Σε αυτή τη περίπτωση οι DG προσφέρουν μεγαλύτερο κέρδος έτσι ενεργοποιούνται. Στις υπόλοιπες ώρες οι DG μένουν απενεργοποιημένες καθώς η οριακή τιμή είναι αρκετά χαμηλή που η ESCO προτιμάει να απορροφήσει την επιπλέον ενέργεια από το Δίκτυο.

Η κατανάλωση σε αυτό το μοντέλο είναι ελαστική λόγω της εφαρμογής Demand Dispatch. Αυτό επιτρέπει στην ESCO, να χρησιμοποιεί το σήμα  $\pi_2$  έτσι ώστε να μειώνει τη κατανάλωση όταν το κόστος είναι πολύ ψηλό ενώ να την αυξάνει όταν το κόστος είναι χαμηλό. Καθώς επίσης μπορεί όπως και στο προηγούμενο μοντέλο να χειρίζεται τη τοπική παραγωγή (εκτός από τα ΦΒ) μεταβάλλοντας τη τιμή  $\pi_1$ . Παρατηρώντας τώρα την ώρα  $t=3$  που αντιπροσωπεύει την ώρα με τη πιο ψηλή οριακή τιμή βλέπουμε πως μεταβάλλεται το κέρδος της εταιρίας και η χρήση των DG με πιο ακριβείς προβλέψεις στο πίνακα 6.4.

| Οριακή τιμή (euro cent/kWh)      | 23   |      |       |       |       |
|----------------------------------|------|------|-------|-------|-------|
| Συνολική κατανάλωση (kWh)        | 14   | 14   | 14.85 | 15.5  | 16.82 |
| Προβλεπόμενη κατανάλωση (kWh)    | 6    | 10   | 12    | 13    | 15    |
| Κέρδος ESCO (ευρώ)               | -2.2 | -1.6 | -1.56 | -1.63 | -1.76 |
| Βέλτιστο $\pi_1$ (euro cent/kWh) | 16   | 12   | 10    | 10    | 10    |
| Βέλτιστο $\pi_2$                 | 18.1 | 18.1 | 16.6  | 16.5  | 10    |
| Τοπική παραγωγή (kWh)            | 8    | 4    | 3     | 3     | 3     |

Πίνακας 6.4: Μεταβολή κέρδους με πρόβλεψη (Πρώτο Μοντέλο)

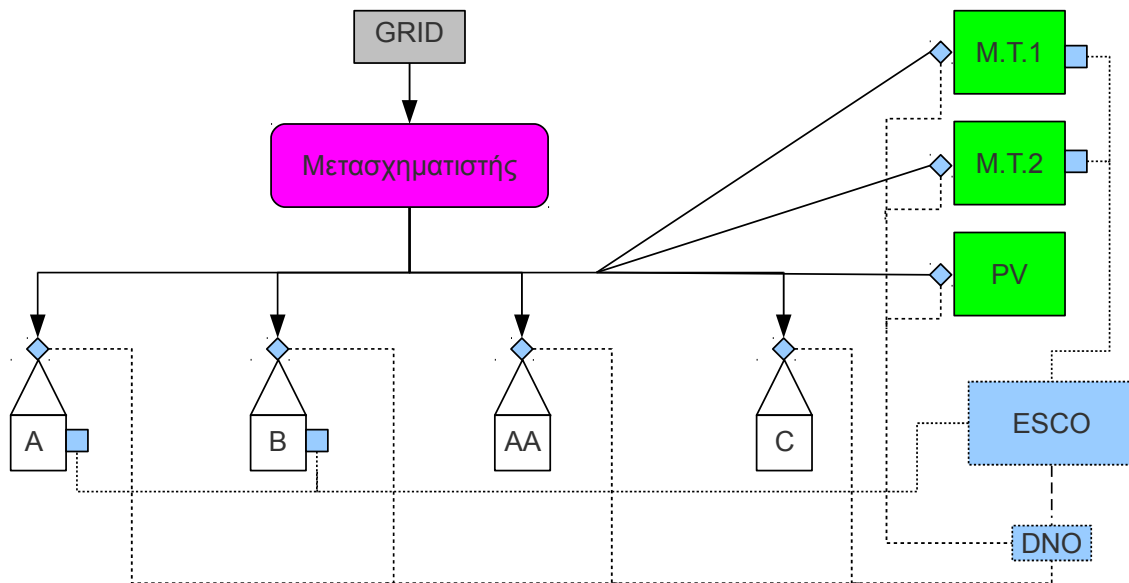
Παρατηρούμε τα πιο πάνω στοιχεία και τη καμπύλη ζήτησης αυτής της ώρα όπως φαίνεται στο σχήμα 6.4. Όταν η πρόβλεψη σε συνδυασμό με τη παραγωγή από ΦΒ είναι χαμηλή ( $6\text{kWh}+3\text{kWh}=9\text{kWh}$ ), το σήμα ελέγχου οδηγεί τη κατανάλωση στο πιο χαμηλό επίπεδο (που πάλι όμως είναι ψηλότερο από  $9\text{kWh}$ ). Έτσι, την επιπλέον ενέργεια, η ESCO καλείται να την ικανοποιήσει από το Δίκτυο ή τις μονάδες DG. Λόγω της ψηλής οριακής τιμής του Δικτύου και άρα της ακόμη ψηλότερης τιμής που θα πληρώσει την επιπλέον ενέργεια, η ESCO επιλέγει τις DG.

Καθώς όμως η πρόβλεψη και η παραγωγή από ΦΒ πλησιάζουν ή υπερβαίνουν το κάτω όριο της καμπύλης ζήτησης, η ESCO έχει τη δυνατότητα να αυξήσει τη κατανάλωση εφόσον αυτό τη συμφέρει. Επίσης, η χρήση DG γίνεται πια ασύμφορη και έτσι απορροφάται μόνο η ενέργεια των ΦΒ. Αν η ESCO γνώριζε τη προηγούμενη μέρα με ακρίβεια τη παραγωγή από ΦΒ, την οριακή τιμή και τη καμπύλη ζήτησης της συγκεκριμένης ώρας, θα έπρεπε να είχε κάνει συμφωνία για αγορά από το δίκτυο  $12\text{kWh}$ , καθώς αυτή μεγιστοποιεί το κέρδος της.

## 6.4 Δεύτερο Μοντέλο

Στο μοντέλο αυτό έχουμε πάλι 2 καταναλωτές με τοπικό ελεγκτή (Α και Β) και 2 καταναλωτές χωρίς τοπικό ελεγκτή (ΑΑ και C). Ο τοπικός ελεγκτής χρησιμοποιείται για έλεγχο του φορτίου (Price Responsive) όταν αυτό χρειάζεται με τη χρήση του σήματος τιμής  $\pi_2$  (ευρώ/kWh). Όλοι οι καταναλωτές πληρώνουν με βάση τη μεταβλητή τιμή  $\pi_2$  (ευρώ/kWh) που αλλάζει ανά ώρα. Αυτό είναι δυνατό λόγω της εγκατάστασης υποδομής Smart Metering στους καταναλωτές. Το κόστος εγκατάστασης των Smart Meters το επωμίζεται ο DNO (ίσως με κάποια συμβολή από την ESCO) ενώ το κόστος του τοπικού ελεγκτή η ESCO ή ακόμη και ο ίδιος ο καταναλωτής. Σε αυτό το μοντέλο το κέρδος του καταναλωτή προέρχεται από τη μετατόπιση φορτίου από ώρες με ψηλή τιμή  $\pi_2$  σε ώρες με χαμηλή.

Για να μπορούμε να συγκρίνουμε καλύτερα τη λειτουργία του τοπικού ελεγκτή, οι δύο οικιακοί καταναλωτές Α και ΑΑ έχουν πανομοιότυπη κατανάλωση και όλες οι συσκευές τους



Σχήμα 6.5: Παράδειγμα μοντέλου με Price Responsive κατανάλωση (Δεύτερο Μοντέλο)

ενεργοποιούνται την ίδια στιγμή. Η διαφορά είναι ότι ο καταναλωτής A έχει εγκατεστημένο τοπικό ελεγκτή ενώ ο AA όχι.

#### 6.4.1 Ρουτίνα προσομοίωσης

Η μεγιστοποίηση της συνάρτησης κέρδους της ESCO παρουσιάζεται στο διάγραμμα 6.16α'.

#### 6.4.2 Αποτελέσματα και παρατηρήσεις

Αυτό το μοντέλο μας δίνει τα αποτελέσματα του πίνακα 6.5.

Παρατηρούμε ότι αυτό το μοντέλο, όπως και το προηγούμενο οδηγεί στη μετατόπιση φορτίου από τις ώρες με ψηλό κόστος στις ώρες με χαμηλότερο. Επίσης, είναι το φορτίο που επιφέρει το μεγαλύτερο κέρδος στην ESCO. Η ESCO χρησιμοποιεί τη μεταβλητή τιμή χρέωσης για να μεγιστοποιήσει τα κέρδη της. Συγκρίνοντας τους καταναλωτές A και AA, βλέπουμε ότι ο καταναλωτής A κέρδος από τη χρήση του τοπικού ελεγκτή. Αυτό γίνεται διότι ο A ικανοποίησε κάποιο από το φορτίο του τις ώρες  $t=4$  και  $t=5$  που η τιμή ήταν χαμηλότερη. Παρόλα αυτά βλέπουμε αύξηση του συνολικού κόστους των καταναλωτών σε σχέση με τα υπόλοιπα μοντέλα.

Στο πίνακα 6.6 βλέπουμε τη μεταβολή του κέρδους της ESCO ανάλογα με τη τιμή κατανάλωσης που πρόβλεψε. Παρατηρούμε ότι καλύτερη πρόβλεψη που θα μπορούσε να είχε κάνει η ESCO είναι 6kWh. Έτσι, ελαχιστοποιεί τη κατανάλωση αυξάνοντας τη τιμή  $p_2$  ενώ ταυτόχρονα καλύπτει 8kWh από τη κατανάλωση με τις DG οι οποίες είναι πιο συμφέρουσες από το να απορροφήσει αυτή την ενέργεια από το δίκτυο εκείνη τη στιγμή.

Σημαντικός παράγοντας στις επιλογές της ESCO είναι η ελαστικότητα της καμπύλης ζήτησης. Μια σχετικά ανελαστική καμπύλη οδηγεί την ESCO να αυξήσει τη τιμή πολύ. Αυτό διότι το κέρδος που θα χάσει λόγω της μείωσης του φορτίου είναι πολύ μικρότερο από το

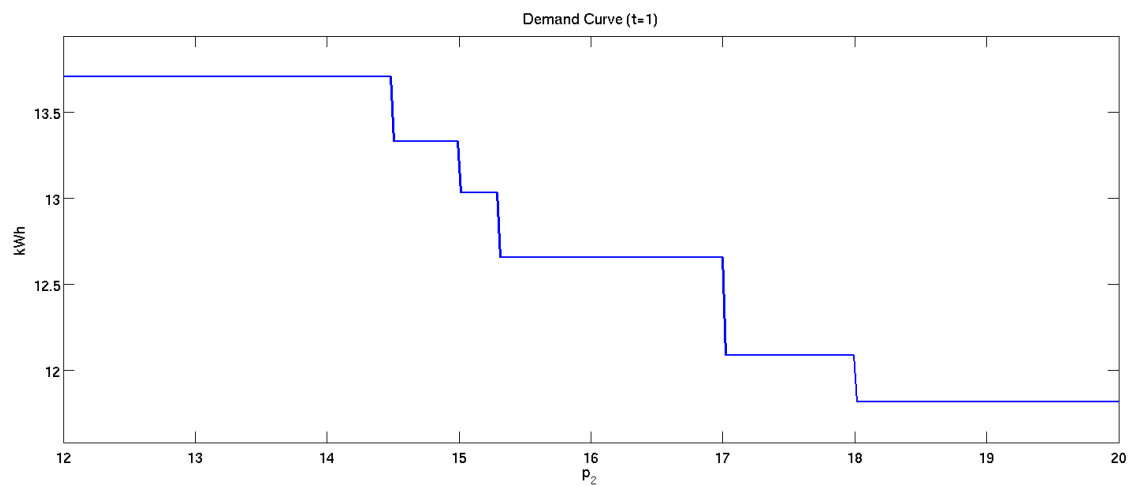
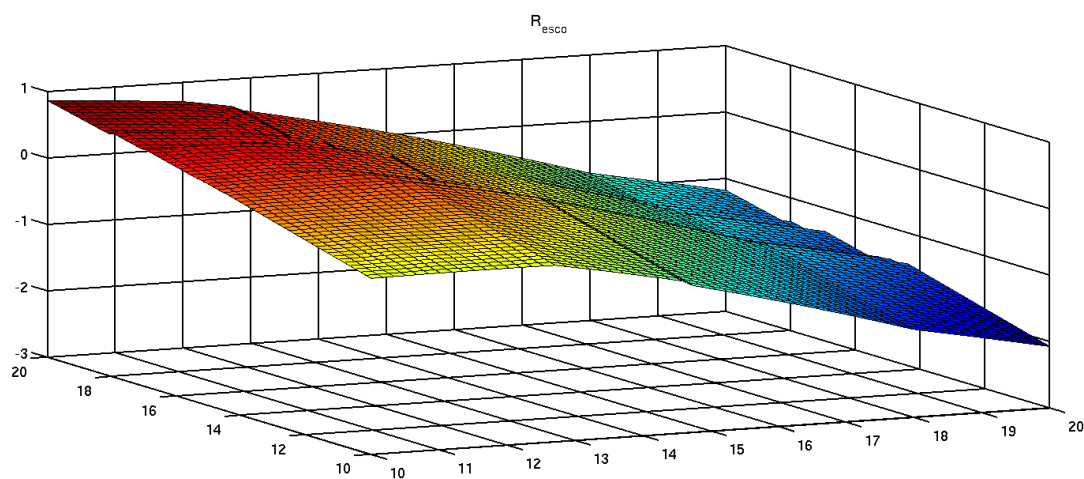
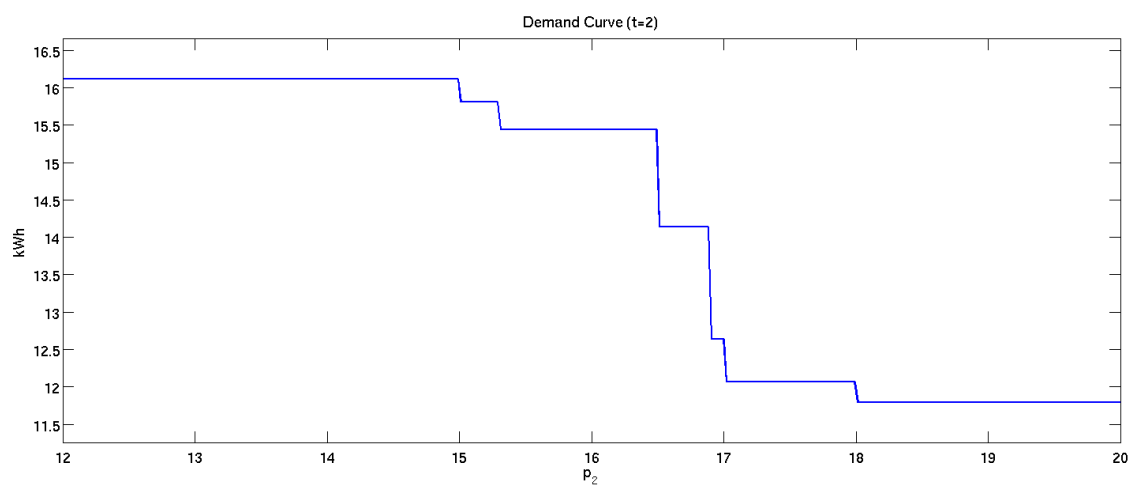
| t                                | 1     | 2     | 3    | 4     | 5     |
|----------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|
| Συμφωνημένη Ενέργεια (kWh)       | 10    | 11    | 06   | 11    | 10    |
| Οριακή τιμή (euro cent/kWh)      | 11    | 15    | 23   | 15    | 10    |
| Τοπική παραγωγή (kWh)            | 2     | 3.1   | 8    | 2.4   | 2.4   |
| Συνολική κατανάλωση (kWh)        | 11.81 | 14.14 | 14   | 12.42 | 10.17 |
| Καταναλωτής A (kWh)              | 2.13  | 3.85  | 2.85 | 3.1   | 2.56  |
| Καταναλωτής AA (kWh)             | 2.96  | 3.85  | 3.3  | 3.1   | 2     |
| Καταναλωτής B (kWh)              | 2.35  | 3.09  | 3.14 | 3.99  | 3.36  |
| Καταναλωτής C (kWh)              | 4.38  | 3.35  | 4.72 | 2.23  | 2.23  |
| Βέλτιστο $\pi_1$ (euro cent/kWh) | 10    | 11.4  | 16   | 10    | 10    |
| Βέλτιστο $\pi_2$ (euro cent/kWh) | 20    | 16.8  | 20   | 16.4  | 14.9  |
| Κέρδος ESCO (ευρώ)               | 0.86  | 0.16  | 0.02 | -0.14 | -0.08 |
| Συνολικό Κέρδος ESCO (ευρώ)      | 0.82  |       |      |       |       |
| Κόστος Καταναλωτή A (ευρώ)       | 2.53  |       |      |       |       |
| Κόστος Καταναλωτή AA (ευρώ)      | 2.71  |       |      |       |       |
| Κόστος Καταναλωτή B (ευρώ)       | 2.77  |       |      |       |       |
| Κόστος Καταναλωτή C (ευρώ)       | 3.08  |       |      |       |       |

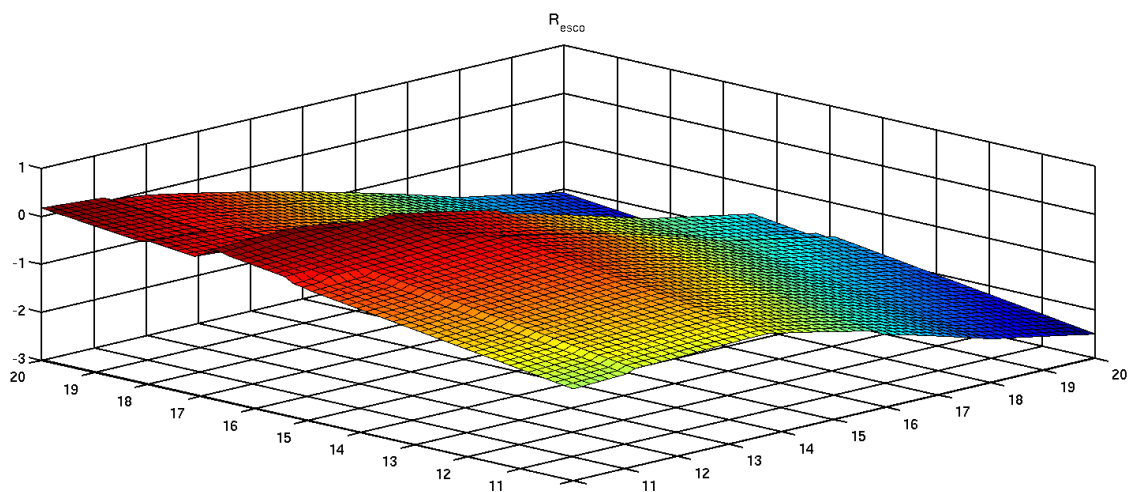
Πίνακας 6.5: Αποτελέσματα Προσομοίωσης (Δεύτερο Μοντέλο)

| Οριακή τιμή (euro cent/kWh)      | 23    |        |       |       |       |
|----------------------------------|-------|--------|-------|-------|-------|
| Συνολική κατανάλωση (kWh)        | 14.01 | 14.01  | 14.01 | 14.01 | 16.15 |
| Προβλεπόμενη κατανάλωση (kWh)    | 2     | 4      | 6     | 12    | 15    |
| Κέρδος ESCO (ευρώ)               | -0.16 | 0.0195 | 0.02  | -0.63 | -1.53 |
| Βέλτιστο $\pi_1$ (euro cent/kWh) | 18.1  | 18     | 16    | 10    | 10    |
| Βέλτιστο $\pi_2$ (euro cent/kWh) | 20    | 20     | 20    | 20    | 16.4  |
| Τοπική παραγωγή (kWh)            | 10.05 | 10     | 8     | 3     | 3     |

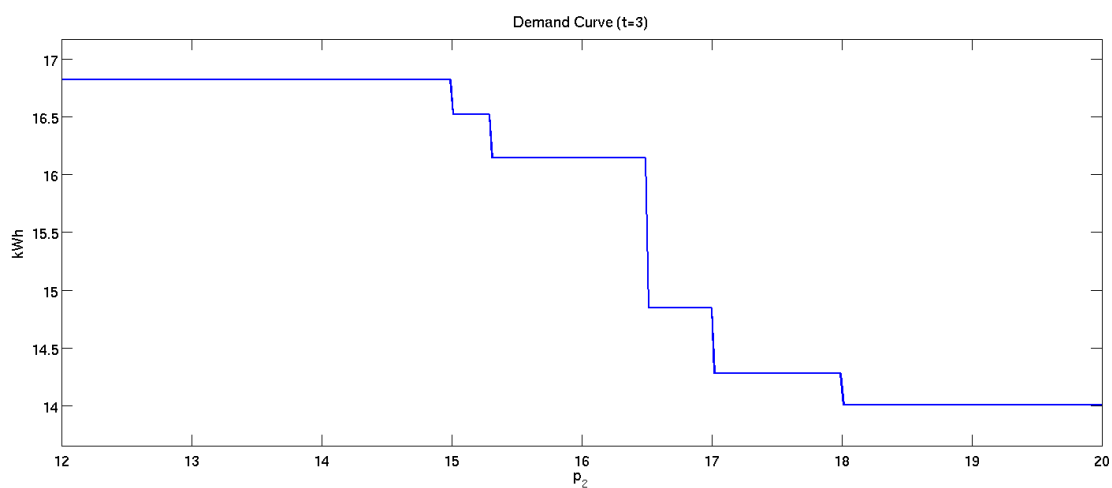
Πίνακας 6.6: Μεταβολή κέρδους με πρόβλεψη (Δεύτερο Μοντέλο)

κέρδος που παίρνει από το σταθερό φορτίο λόγω της αυξημένης τιμής. Σε ώρες που η κλίση της καμπύλης ζήτησης είναι μεγάλη, η ESCO υποχρεώνεται να χαμηλώσει τη τιμή καθώς η αύξησή της θα οδηγούσε σε μεγάλη μείωση του φορτίου που θα δημιουργούσε ζημιά στην εταιρία.

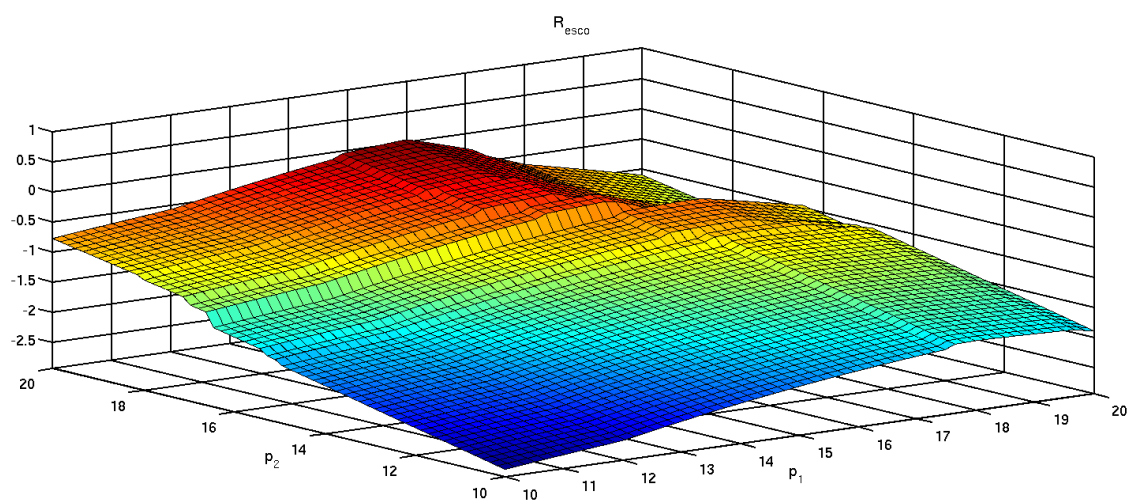
Σχήμα 6.6: Καμπύλη ζήτησης για  $t=1$  (Δεύτερο Μοντέλο)Σχήμα 6.7: Συνάρτηση Κέρδους ESCO για  $t=1$  (Δεύτερο Μοντέλο)Σχήμα 6.8: Καμπύλη ζήτησης για  $t=2$  (Δεύτερο Μοντέλο)



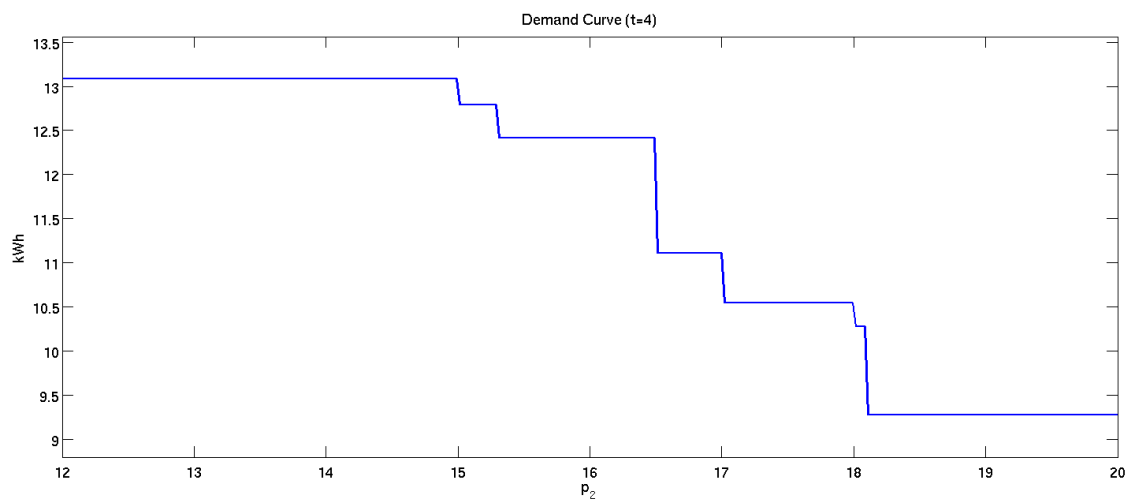
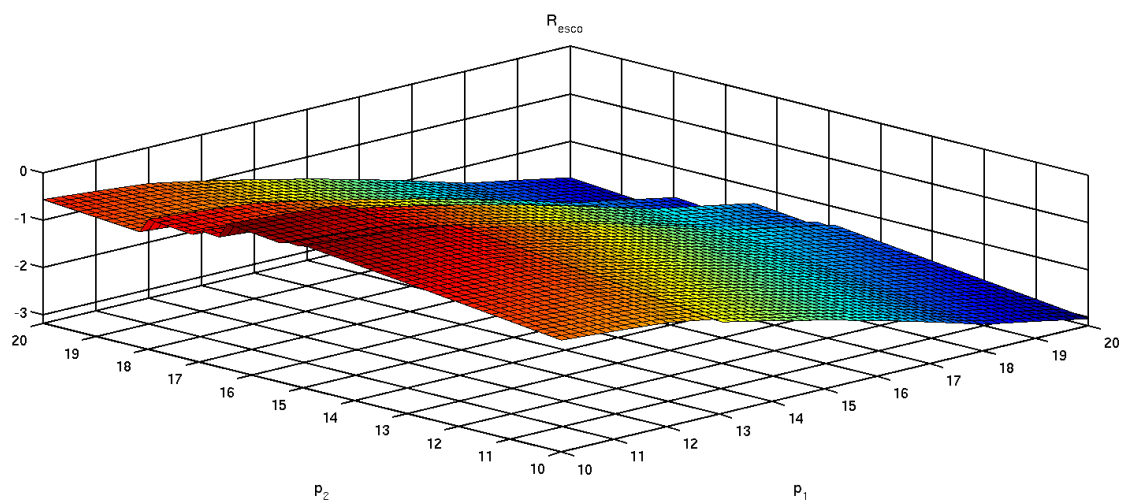
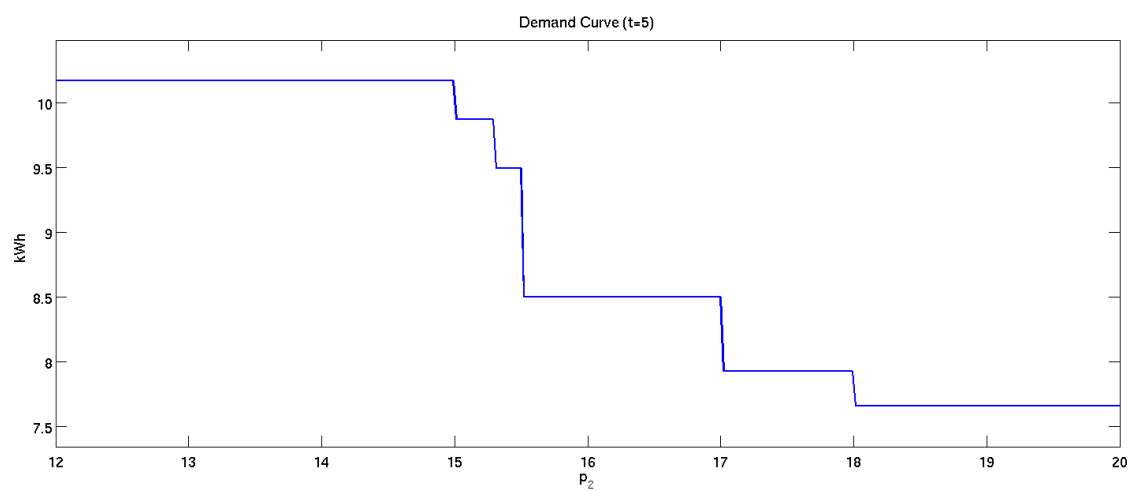
Σχήμα 6.9: Συνάρτηση Κέρδους ESCO για  $t=2$  (Δεύτερο Μοντέλο)

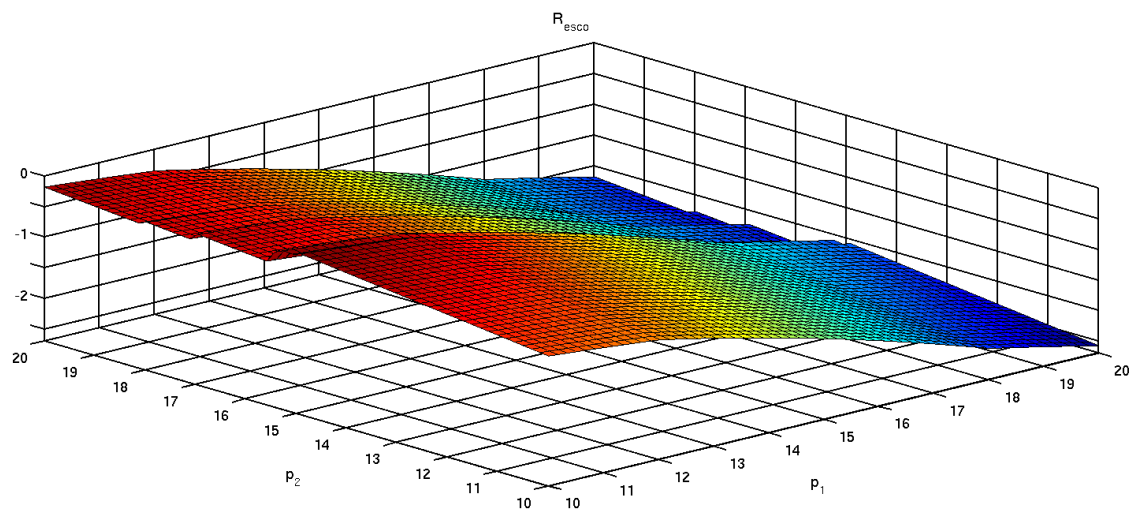


Σχήμα 6.10: Καμπύλη ζήτησης για  $t=3$  (Δεύτερο Μοντέλο)



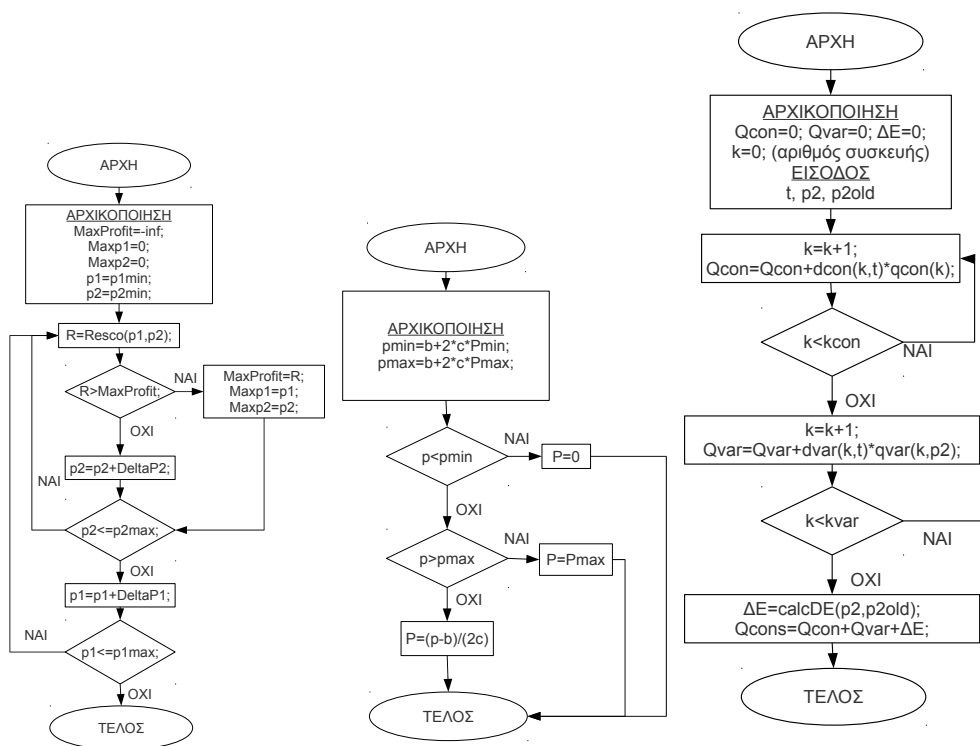
Σχήμα 6.11: Συνάρτηση Κέρδους ESCO για  $t=3$  (Δεύτερο Μοντέλο)

Σχήμα 6.12: Καμπύλη ζήτησης για  $t=4$  (Δεύτερο Μοντέλο)Σχήμα 6.13: Συνάρτηση Κέρδους ESCO για  $t=4$  (Δεύτερο Μοντέλο)Σχήμα 6.14: Καμπύλη ζήτησης για  $t=5$  (Δεύτερο Μοντέλο)



Σχήμα 6.15: Συνάρτηση Κέρδους ESCO για  $t=5$  (Δεύτερο Μοντέλο)





(α') Μεγιστοποίηση Κέρδους (β') Βέλτιστη στρατηγική MT (γ') Καμπύλη Ζήτησης Καταναλωτή

Σχήμα 6.16: Διαγράμματα ροής

## 6.5 Συμπεράσματα



## Παράρτημα Α΄

# Στατικά Παιχνίδια

Στατικά παιχνίδια είναι τα πιο απλά παιχνίδια που μπορούμε να αναλύσουμε: Πρώτα οι παίκτες επιλέγουν ταυτόχρονα τη κίνησή τους, μετά, λαμβάνουν το κέρδος τους ανάλογα με το συνδυασμό των κινήσεων που επιλέξανε.

### Α΄.1 Στατικά Παιχνίδια με πλήρη Πληροφορία

Στο πρώτο υποκεφάλαιο βλέπουμε τη κλάση των στατικών παιχνιδιών με πλήρη πληροφορία. Δηλαδή, η συνάρτηση κέρδους του κάθε παίκτη είναι γνωστή σε όλους τους υπόλοιπους παίκτες. Η πιο "βολική" μορφή για να αναπαραστήσουμε τα παιχνίδια αυτά είναι η κανονική μορφή (δες 3.2.3). Κλασικό παιχνίδι της κλάσης αυτής είναι το "Δίλημμα του Φυλακισμένου" και μέσα από αυτό θα προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε καλύτερα τη κλάση αυτή των παιχνιδιών.

#### Α΄.1.1 Δίλημμα του Φυλακισμένου (Prisoner's Dilemma)

Το δίλημμα του φυλακισμένου αναφέρεται σε ένα στατικό παιχνίδι με δύο παίκτες. Οι δύο αυτοί παίκτες πρέπει να αποφασίσουν ταυτόχρονα, και χωρίς να ξέρει ο ένας τι επέλεξε ο άλλος, μία από τις δύο διαθέσιμες στρατηγικές που έχει ο καθένας τους, δηλαδή να συνεργαστούν ή να μην συνεργαστούν. Ανάλογα με τις στρατηγικές των δύο παικτών υπολογίζεται στο κέρδος του κάθε παίκτη. Χαρακτηριστικό των παιχνιδιών αυτών είναι ότι ενώ η ταυτόχρονη επιλογή της συνεργασίας και από τους δύο παίκτες θα αποφέρει τα περισσότερα συνολικά κέρδη, ο κάθε παίκτης έχει το "πειρασμό" να αποκλίνει από τη συνεργασία για να πάρει περισσότερα κέρδη, μειώνοντας όμως έτσι τα συνολικά κέρδη εις βάρος του άλλου παίκτη.

Δύο εγκληματίες συλλαμβάνονται για ένα έγκλημα που έχουν διαπράξει και τοποθετούνται σε 2 διαφορετικά κελιά. Στους δύο αυτούς συνεργάτες, η αστυνομία προτείνει: "Αν κανένας από τους δύο δεν παραδεχτεί το έγκλημα, θα πάτε από 1 μήνα φυλακή για μια μικρότερη κατηγορία. Αν παραδεχτείτε και οι δύο το έγκλημα τότε θα πάτε και οι δύο από 6 μήνες φυλακή. Τέλος, αν ο ένας από τους δύο παραδεχτεί ενώ ο άλλος όχι, τότε αυτός που παραδέχτηκε φεύγει χωρίς φυλακή ενώ ο άλλος τιμωρείται με 9 μήνες". Αυτό φαίνεται στον πίνακα Α΄.1.

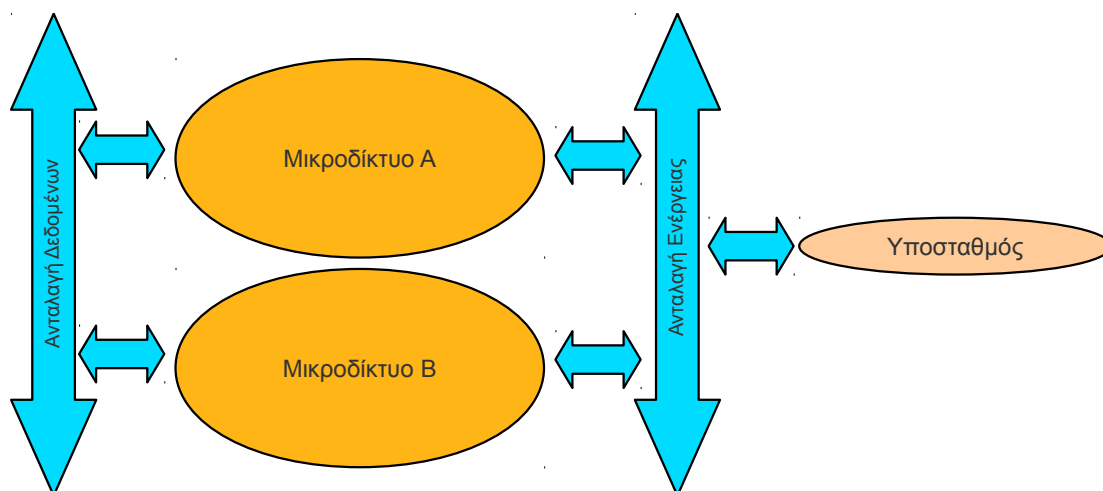
Βλέποντας τον πίνακα, μπορούμε να δούμε ότι το καλύτερο συνολικά είναι να μη παραδεχτεί κανένας τους. Αλλά, ο καθένας μπαίνει στο *δίλημμα* που προσφέρει η αστυνομία για τη πλήρη απελευθέρωση αν παραδεχτεί μόνος του.

|                |                 | Φυλακισμένος 2  |             |
|----------------|-----------------|-----------------|-------------|
|                |                 | Δεν παραδέχομαι | Παραδέχομαι |
| Φυλακισμένος 1 | Δεν παραδέχομαι | $(-1,-1)$       | $(-9,0)$    |
|                | Παραδέχομαι     | $(0,-9)$        | $(-6,-6)$   |

Πίνακας Α'.1: Πίνακας Παιχνιδιού Δίλημμα του φυλακισμένου

### Α'.1.2 Παιχνίδι Διαπραγμάτευσης

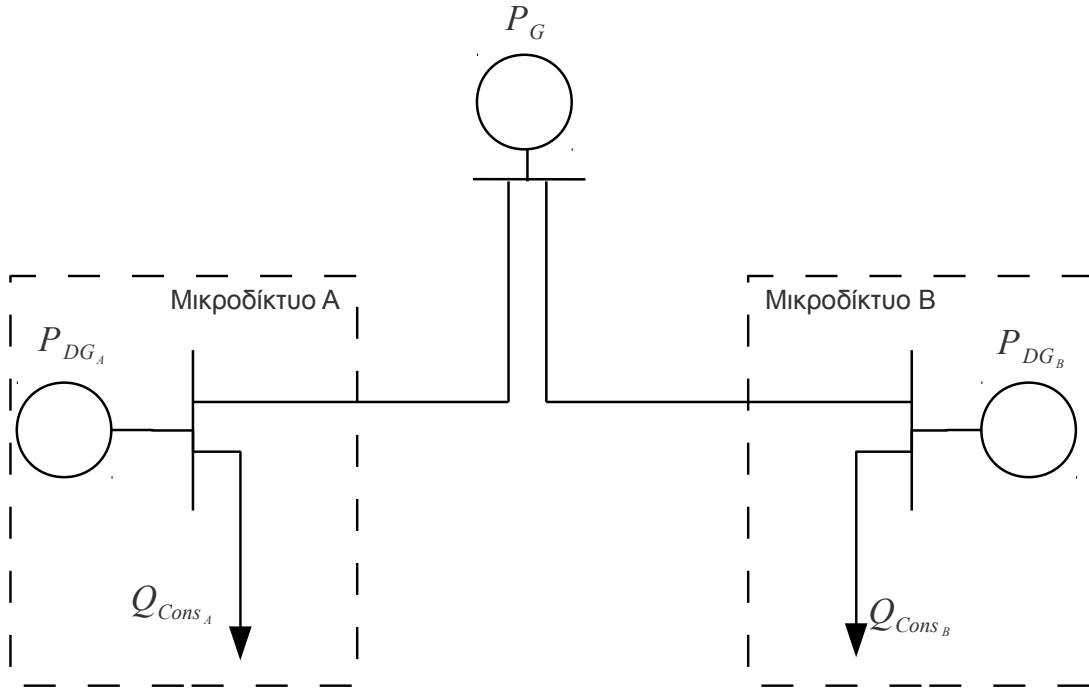
Μεταφέροντας τη κλάση των παιχνιδιών αυτών στα Μικροδίκτυα, μελετούμε τη πιθανότητα συνεργασίας δύο ή περισσότερων Μικροδικτύων για την πώληση ενέργειας από το ένα στο άλλο. Στο Σχήμα Α'.1 βλέπουμε σχηματικά δύο Μικροδίκτυα τα οποία εσωτερικά λειτουργούν όπως αυτά παρουσιάζονται στο κεφάλαιο 4. Απλοποιώντας τη λειτουργία των Μικροδικτύων, μπορούμε να αναπαραστήσουμε το κάθε Μικροδίκτυο όπως το σχήμα Α'.2.



Σχήμα Α'.1: Παιχνίδι Διαπραγμάτευσης στα Μικροδίκτυα (Σχηματικά)

### Δευτερεύων Παιχνίδι με βάση τις DG

Έτσι, μετά το τέλος του αρχικού παιχνιδιού στην αρχή κάθε ώρας, όπως το παρουσιάσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια, η κάθε εταιρία έχει βελτιστοποιήσει τη συνάρτηση κέρδους της με βάση τις DG και τους καταναλωτές του Μικροδικτύου της και έχει καταλήξει σε ένα ζεύγος τιμών  $\{\pi_1, \pi_2\}$ . Οι εταιρίες αυτές όμως θα έχουν αμοιβαίο κέρδος αν συνεργαστούν μεταξύ τους ανταλλάσσοντας ενέργεια που παράγεται από τις DG της κάθε μιας και να μειώσουν το συνολικό κόστος. Δηλαδή, οι εταιρίες των οποίων τα μικροδίκτυα έχουν χαμηλό οριακό κόστος παραγωγής από DG, άρα χαμηλό  $\pi_1$ , να αυξήσουν τη παραγωγή τους ενώ μονάδες με ψηλό να τη μειώσουν. Η συνολική παραγωγή από DG και η συνολική ισχύς που απορροφάται από το δίκτυο θα είναι η ίδια αλλά θα παράγεται με χαμηλότερο κόστος. Το κέρδος από τη μείωση του συνολικού κόστους το μοιράζονται εξίσου οι εταιρείες που αυξάνουν και που μειώνουν τη παραγωγή. Το μοντέλο αυτό συναλλαγών είναι διεσπαρμένο καθώς οι εταιρίες συμφωνούν μεταξύ τους για τη συναλλαγή και δεν αναμειγνύεται τρίτο μέρος.



Σχήμα Α'.2: Παιχνίδι Διαπραγμάτευσης στα Μικροδίκτυα: Απλοποιημένη λειτουργία

### Σημείο Ισορροπίας

Για να είναι διατεθειμένες οι εταιρίες όμως να συνεργαστούν πρέπει όχι μόνο να βγάζουν κέρδος αλλά το αποτέλεσμα να είναι δίκαιο. Για δεδομένη ισχύ που θέλουν να ανταλλάξουν, η εταιρία που πουλάει αυτή την ισχύ θέλει να ορίσει ψηλά τη τιμή, ενώ, η εταιρία που αγοράζει να την ορίσει χαμηλά. Το πιο δίκαιο σημείο, που προσφέρει τα μέγιστα συνολικά κέρδη, ορίζεται στο σημείο ισορροπίας Nash (δες 5.6.2). Για να βρεθεί το σημείο ισορροπίας χρησιμοποιούμε τεχνικές από τη θεωρία Παιγνίων και συγκεκριμένα από τα Παιχνίδια διαπραγμάτευσης. Έτσι, το σημείο Nash ορίζεται από τη λύση της σχέσης:

$$\max \sum_{k \in K} \prod R_{ij}^k(\pi_{ij}, T_{ij}) \quad (\text{Α'.1})$$

όπου:

- $R_{ij}^k(\pi_{ij}, T_{ij}) = \pi_{ij} * T_{ij} - C_i(P_{DG_i} + T_{ij}) + C_i(P_{DG_i})$ : συνάρτηση κέρδους για το συμβόλαιο  $k$
- $K$ : σύνολο συμβολαίων
- $T_{ij}$ : ισχύς που παράγεται από το Μικροδίκτυο  $i$  και μεταφέρεται στο Μικροδίκτυο  $j$
- $\pi_{ij}$ : τιμή στην οποία χρεώνεται αυτή η ισχύς
- $P_{DG_i}$ : ισχύς που παρήγαγε πριν τη συμφωνία το Μικροδίκτυο  $i$
- $C_i$ : συνάρτηση κόστους Μικροδικτύου  $i$

### Παιχνίδι διαπραγμάτευσης με δύο ESCO

Ας θεωρήσουμε πιο συγκεκριμένα ότι στο παιχνίδι αυτό λαμβάνουν μέρος μόνο 2 ESCO. Σε κάποιο σημείο του παιχνιδιού η ESCO του Μικροδίκτυου Α έχει τιμή για τις μονάδες DG  $\pi_{1A}$  και η ESCO του Μικροδίκτυου Β έχει  $\pi_{1B}$ . Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι η οριακή τιμή από DG του Μικροδίκτυου Α είναι  $\pi_{1A}$  ενώ του Β  $\pi_{1B}$ . Έστω τώρα ότι  $\pi_{1A} < \pi_{1B}$ . Αυτό σημαίνει ότι συμφέρει και τις δύο εταιρίες να έρθουν σε συμφωνία και το Μικροδίκτυο Α να πουλήσει κάποιο ποσό ενέργειας στο Μικροδίκτυο Β. Δηλαδή, το Μικροδίκτυο Α να αυξήσει τη παραγωγή του από DG κατά  $T_{AB}$  (kW) και το Μικροδίκτυο Β να μειώσει τη παραγωγή του από DG κατά  $T_{AB}$  (kW) για την επόμενη ώρα, την οποία αυτή ισχύ θα πληρωθεί/ πληρώσει σε τιμή  $\pi_{AB}$ . Αυτό δεν σημαίνει ότι η ισχύς αυτή θα μεταφερθεί από το Μικροδίκτυο Α στο Β, απλά ότι το Μικροδίκτυο Α θα απορροφάει  $T_{AB}$  λιγότερη ισχύ από το Δίκτυο και το Β  $T_{AB}$  περισσότερη και έτσι η συνολική ισχύς που απορροφάται από το Δίκτυο θα παραμείνει σταθερή.

Το ερώτημα είναι πόση ισχύ θα ανταλλάξουν και σε ποια τιμή; Για να απαντηθεί αυτό το ερώτημα πρέπει πρώτα να σχηματιστούν οι συναρτήσεις κέρδους του κάθε Μικροδικτύου:

$$R_A = \pi_{AB} * T_{AB} - [C_A(P_{DG_A} + T_{AB}) - C_A(P_{DG_A})] \quad (A'.2)$$

$$R_B = -\pi_{AB} * T_{AB} - [C_B(P_{DG_B} - T_{AB}) - C_B(P_{DG_B})] \quad (A'.3)$$

όπου:

- $\pi_{AB}$ : η τιμή στην οποία θα πληρωθεί η παραγόμενη ισχύς (ευρω/kWh)
- $T_{AB}$ : το ποσό ισχύος που θα ανταλλάξουν για την επόμενη ώρα (kW)
- $C_A, C_B$ : συναρτήσεις κόστους των Μικροδικτύων (ευρώ/h)
- $P_{DG_A}, P_{DG_B}$ : ισχύς που παράγουν τα Μικροδίκτυα πριν τη συμφωνία (kW)

Θέτοντας κάποιους λογικούς περιορισμούς στις συναρτήσεις αυτές, έχουμε:

- $R_A, R_B > 0$ : Δεν υπάρχει λόγος συνεργασίας για αρνητικά κέρδη
- $\pi_{AB} > 0$ : Η τιμή δε μπορεί να πάρει αρνητικές τιμές
- $|T_{AB}| > 0$ : Η λύση  $T_{AB} = 0$  μας δίνει το ενδεχόμενο να μη συνεργαστούν τα Μικροδίκτυα

Για να βρούμε το βέλτιστο σημείο λειτουργίας και για τα δυο Μικροδίκτυα, πρέπει να βρούμε το σημείο ισορροπίας Nash. Δηλαδή, ένα ζευγάρι τιμών  $(T_{AB}, \pi_{AB})$  το οποίο να μεγιστοποιεί τα κέρδη και των δυο Μικροδικτύων. Αυτό το βρίσκουμε μεγιστοποιώντας τη συνάρτηση:

$$\begin{aligned} L &= R_A * R_B & (A'.4) \\ \max L &= \max_{T_{AB}, \pi_{AB}} \{R_A * R_B\} \\ &= \max_{T_{AB}, \pi_{AB}} \{\pi_{AB} * T_{AB} - [C_A(P_{DG_A} + T_{AB}) - C_A(P_{DG_A})]\} * \\ &\quad \{-\pi_{AB} * T_{AB} - [C_B(P_{DG_B} - T_{AB}) - C_B(P_{DG_B})]\} \end{aligned}$$

Η συνάρτηση αυτή είναι δύο μεταβλητών  $(T_{AB}, \pi_{AB})$ , έτσι για τη μεγιστοποίηση της πρέπει να ισχύει ταυτόχρονα:

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \pi_{AB}} &= T_{AB} * [-\pi_{AB} * T_{AB} - C_B(P_{DG_B} - T_{AB}) + C_B(P_{DG_B}) \\ &\quad - T_{AB} * [\pi_{AB} * T_{AB} + C_A(P_{DG_A}) - C_A(P_{DG_A} + T_{AB})] = 0 \end{aligned} \quad (A'.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial T_{AB}} &= (\pi_{AB} - \frac{\partial C_A(P_{DG_A} + T_{AB})}{\partial T_{AB}}) * (-\pi_{AB} * T_{AB} + C_B(P_{DG_B}) - C_B(P_{DG_B} - T_{AB})) \\ &\quad + (-\pi_{AB} - \frac{\partial C_B(P_{DG_B} - T_{AB})}{\partial T_{AB}}) * (\pi_{AB} * T_{AB} + C_A(P_{DG_A}) - C_A(P_{DG_A} + T_{AB})) = 0 \end{aligned} \quad (A'.6)$$

Επιλυοντας την Α'.5 βρισκουμε:

$$\pi_{AB} = \frac{C_B(P_{DG_B}) - C_B(P_{DG_B} - T_{AB})}{2 * T_{AB}} + \frac{-C_A(P_{DG_A}) + C_A(P_{DG_A} + T_{AB})}{2 * T_{AB}} \quad (A'.7)$$

και αντικαθιστώντας στην Α'.6:

$$\frac{\partial C_B(P_{DG_B} - T_{AB})}{\partial T_{AB}} + \frac{\partial C_A(P_{DG_A} + T_{AB})}{\partial T_{AB}} = 0 \quad (A'.8)$$

Έτσι, χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση Α'.8 βρίσκουμε τη τιμή της μεταβλητής  $T_{AB}$  και αντικαθιστώντας στη συνάρτηση Α'.7 βρίσκουμε και τη τιμή  $\pi_{AB}$ . Οι δύο αυτές τιμές ορίζουν το σημείο ισορροπίας Nash. Κρατώντας σταθερή τη τιμή ισχύος, η εταιρία του Μικροδικτύου Β θα ήθελε να οριστεί μια τιμή μικρότερη από τη τιμή ισορροπίας, γιατί έτσι αυξάνει το κέρδος της, εις βάρος όμως του Μικροδικτύου Α και του συνολικού κέρδους. Όμοια, η εταιρία του Μικροδικτύου Α θα ήθελε να καθορίσει μια τιμή μεγαλύτερη της τιμή ισορροπίας, καθώς αυτό θα αυξήσει τα κέρδη της. Αυτός ο πειρασμός για να αποκλίνουν από το σημείο βέλτιστο σημείο είναι το ίδιο που είδαμε και στο δίλημμα του φυλακισμένου πιο πάνω. Στο σημείο ισορροπίας έχουμε τα μέγιστα συνολικά κέρδη.

### Παράδειγμα

Θεωρούμε ότι τα δύο Μικροδίκτυα έχουν καμπύλες κόστους της μορφής  $C_i(P_{DG_i}) = a + b * P_{DG_i} + C * P_{DG_i}^2$  (cent/h). Οι καμπύλες αυτές αναπαριστούν το κόστος της εταιρίας για την ισχύ αυτή. Δηλαδή, όπως είδαμε σε προηγούμενο κεφάλαιο,  $\sum_{i=1} \pi_1 * P_{DG_i}(\pi_1)$ . Στο πίνακα Α'.2 έχουμε τις παραμέτρους των δύο Μικροδικτύων και τις αρχικές συνθήκες λειτουργίας (πριν τη συμφωνία).

| Μικροδίκτυο | a | b  | c    | Αρχική παραγωγή DG (kw) | Μέγιστη Παραγωγή DG (kW) |
|-------------|---|----|------|-------------------------|--------------------------|
| A           | 0 | 20 | 0.05 | 10                      | 50                       |
| B           | 0 | 18 | 0.1  | 40                      | 50                       |

Πίνακας Α'.2: Παράμετροι Μικροδικτύων και αρχικές συνθήκες

Χρησιμοποιώντας την συνάρτηση Α'.8:

$$\begin{aligned} 20 + 0.1 * (10 - T_{AB}) &= 18 + 0.2 * (40 - T_{AB}) \\ T_{AB} &= 16.667 \text{ kW} \end{aligned}$$

και αντικαθιστώντας στη συνάρτηση Α'.7

$$\pi_{AB} = 23.083(\text{cent}/\text{kWh})$$

|                                                   |      | Παραγωγή<br>(kW) | $\pi_1$<br>$\frac{\text{cents}}{\text{kWh}}$ | Κόστος Λειτουργίας<br>$\frac{\text{cents}}{\text{h}}$ | Κέρδη<br>$\frac{\text{cents}}{\text{h}}$ |
|---------------------------------------------------|------|------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Πριν                                              | MG A | 10               | 21                                           | 205                                                   | -                                        |
|                                                   | MG B | 40               | 26                                           | 880                                                   | -                                        |
| Μετά                                              | MG A | 26.667           | 22.667                                       | 568.889                                               | 20.833                                   |
|                                                   | MG B | 23.333           | 22.667                                       | 474.445                                               | 20.833                                   |
| Ισχύς $T_{AB}$ (kW)                               |      | 16.667           |                                              |                                                       |                                          |
| Τιμή $\pi_{AB}$ $\frac{\text{cents}}{\text{kWh}}$ |      | 23.083           |                                              |                                                       |                                          |
| Πληρωμή cents                                     |      | 384.722          |                                              |                                                       |                                          |

Πίνακας Α'.3: Στοιχεία Παιχνιδιού

### Α'.1.3 Μοντέλο Bertrand με πλήρη πληροφορία

Μια άλλη ομάδα παιχνιδιών σε αυτή τη κλάση είναι τα παιχνίδια που περιγράφουν τον ανταγωνισμό ανάμεσα σε 2 εταιρίες που πουλούν το ίδιο προϊόν. Οι δύο εταιρίες ανακοινώνουν η κάθε μία τη τιμή πώλησης και ανάλογα με αυτή τη τιμή παίρνουν και το ποσοστό της αγοράς. Στο δεύτερο μοντέλο που αναλύσαμε στα πιο πάνω κεφάλαια θεωρήσαμε ότι η εταιρία ESCO ανακοίνωνε τιμή πώλησης αλλά είχε το μονοπώλιο μέσα στο Μικροδίκτυο, έτσι το σημείο ισορροπίας που βρίσκαμε ήτανε το μονοπωλιακό σημείο ισορροπίας. Έτσι, τώρα θα μελετήσουμε το ενδεχόμενο να λειτουργούν δύο ESCO μέσα στο Μικροδίκτυο και πως αυτό επηρεάζει τις τιμές.

#### Δευτερεύων Παιχνίδι με βάση τη Κατανάλωση

Για ευκολία στην ανάλυση του παιχνιδιού θα απλοποιήσουμε το μοντέλο σε σχέση με το τι παρουσιάσαμε στα προηγούμενα κεφάλαια. Σε αυτό το παιχνίδι δύο ESCO μέσα στο ίδιο Μικροδίκτυο ανταγωνίζονται για τους καταναλωτές. Κάθε ώρα, οι δύο εταιρίες ανακοινώνουν τη τιμή πώλησής τους και οι τοπικοί ελεγκτές του κάθε σπιτιού διαλέγουν από ποια εταιρία θέλουν να αγοράσουν ηλεκτρική ενέργεια. Φυσικά, κάποια σπίτια χωρίς τοπικό ελεγκτή δεν μπορούν να κάνουν αυτή την επιλογή κάθε ώρα. Έτσι, η κάθε εταιρία τώρα πρέπει να βελτιστοποιήσει το πρόβλημά της με βάση τη τα δικά της στοιχεία αλλά λαμβάνοντας υπόψη και τη λειτουργία της άλλης εταιρίας. Η συνάρτηση κέρδους της κάθε εταιρίας είναι:

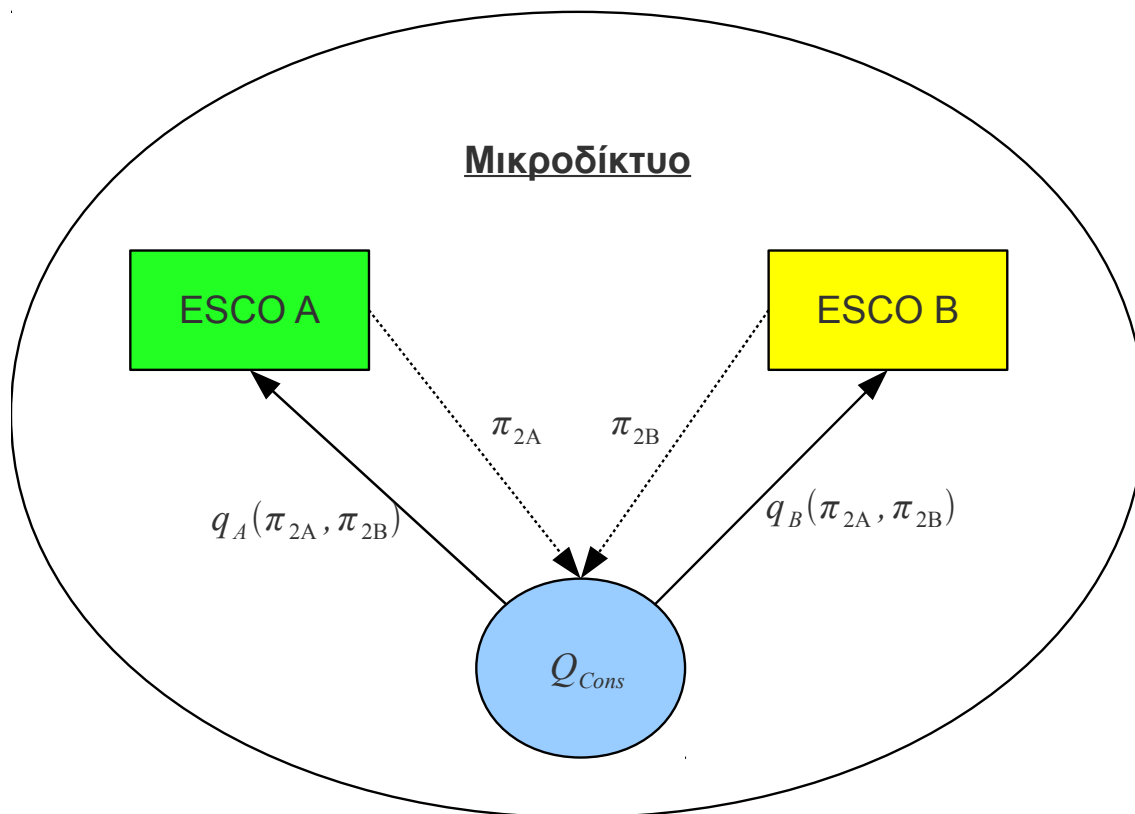
$$R_{ESCO_i}(\pi_{2i}, \pi_{2j}) = q_i(\pi_{2i}, \pi_{2j}) * \pi_{2i} - C_i(q_i(\pi_{2i}, \pi_{2j})) \quad (\text{Α'.9})$$

όπου:

- $\pi_{2i}$ : η τιμή πώλησης της εταιρίας  $i$
- $R_{ESCO_i}(\pi_{2i}, \pi_{2j})$ : το κέρδος της εταιρίας  $i$
- $q_i(\pi_{2i}, \pi_{2j})$ : η κατανάλωση ενέργειας από την εταιρία  $i$
- $C_i(q_i(\pi_{2i}, \pi_{2j}))$ : το κόστος της εταιρίας  $i$  για να ικανοποιήσει τη κατανάλωση  $q_i$



Μπορείτε να δείτε ότι στη συνάρτηση κέρδους απλοποιήσαμε τη συνάρτηση κόστους που, στα προηγούμενα κεφάλαια, θεωρούσαμε το κόστος για πληρωμή της ενέργειας που έρχεται από το δίκτυο, της παραγωγής από DG και του προστίμου. Για ευκολία, έχουμε αγνοήσει την επίδραση του προστίμου και έχουμε συγκεντρώσει το κόστος σε μια συνάρτηση.



Σχήμα Α'.3: Παιχνίδι Bertrand

### Σημείο Ισορροπίας

Η κάθε εταιρία τώρα, προσπαθεί να βρει το σημείο ισορροπίας, δηλαδή, λύνει το πρόβλημά της θεωρώντας ότι η αντίπαλη εταιρία θα διαλέξει τη βέλτιστη δυνατή τιμή για να αυξήσει το κέρδος της. Αν και οι δύο εταιρίες λύσουν με αυτό το τρόπο το πρόβλημά τους, τότε το σημείο  $(\pi_{2i}, \pi_{2j})$  που θα βρεθεί θα είναι σημείο ισορροπίας Nash (δες 5.6.2). Σαν τέτοιο σημείο, οποιαδήποτε εταιρία αποκλίνει από αυτό το σημείο μονομερώς, θα έχει ζημιά. Άρα το σημείο αυτό είναι "αυτο-επιβαλλόμενο".

### Παιχνίδι Bertrand με δύο ESCO

Στο Μικροδίκτυο δραστηριοποιούνται δύο εταιρίες ESCO A και B. Οι δύο αυτές εταιρίες έχουν συναρτήσεις κέρδους:

$$R_{ESCO_A}(\pi_{2A}, \pi_{2B}) = q_A(\pi_{2A}, \pi_{2B}) * \pi_{2A} - C_A(q_A(\pi_{2A}, \pi_{2B})) \quad (A'.10)$$

$$R_{ESCO_B}(\pi_{2A}, \pi_{2B}) = q_B(\pi_{2A}, \pi_{2B}) * \pi_{2B} - C_B(q_B(\pi_{2A}, \pi_{2B})) \quad (A'.11)$$

ενώ προσεγγίζουμε τη ποσότητα που ικανοποιούν με:

$$q_A(\pi_{2A}, \pi_{2B}) = A - \pi_{2A} + S * \pi_{2B} \quad (A'.12)$$

$$q_B(\pi_{2A}, \pi_{2B}) = A - \pi_{2B} + S * \pi_{2A} \quad (A'.13)$$

Αν και πολύ απλοποιημένες, διαισθητικά οι εξισώσεις αυτές είναι σωστές. Παρατηρούμε ότι για κάθε εταιρία, καθώς αυξάνεται η τιμή της ή μειώνεται η τιμή του αντιπάλου η κατανάλωση της (το ποσό της κατανάλωσης που ικανοποιεί) μειώνεται. Αντιθέτως, καθώς μειώνεται η τιμή της ή αυξάνεται η τιμή του αντιπάλου η κατανάλωση της αυξάνεται. Ο παράγοντας  $S$  αντιπροσωπεύει τη "διάθεση" των καταναλωτών να αλλάξουν εταιρία. Για παράδειγμα μια εταιρία μπορεί να προσφέρει περισσότερη ενέργεια από ΑΠΕ ή κάποιοι πελάτες που δεν έχουν ελεγκτή να προτιμούν να παραμένουν στην ίδια εταιρία για μικρές μεταβολές στη τιμή.

Τέλος, για τις συναρτήσεις κόστους, θεωρούμε ότι αυτές είναι γνωστές και στις δύο εταιρίες (αφού μελετάμε παιχνίδι με πλήρη πληροφόρηση) και ισούνται με:

$$C_A(q_A) = a_A + b_A * q_A \quad (A'.14)$$

$$C_B(q_B) = a_B + b_B * q_B \quad (A'.15)$$

οι συναρτήσεις αυτές αποτελούν υπερβολική απλούστευση για τη πραγματική συνάρτηση κόστους, αλλά για το παράδειγμά μας είναι αρκετές.

Έτσι, χρησιμοποιώντας τον ορισμό που δώσαμε στο 5.6.2, η ESCO A έχει να λύσει το πρόβλημα:

$$\begin{aligned} \max_{\pi_{2A}} R_{ESCO_A}(\pi_{2A}, \pi_{2B}^*) &= \max_{\pi_{2A}} [q_A(\pi_{2A}, \pi_{2B}^*) * \pi_{2A} - C_A(q_A(\pi_{2A}, \pi_{2B}^*))] \quad (A'.16) \\ &= \max_{\pi_{2A}} [(A - \pi_{2A} + S * \pi_{2B}^*) * \pi_{2A} - \\ &\quad (a_A + b_A * (A - \pi_{2A} + S * \pi_{2B}^*))] \\ &= \max_{\pi_{2A}} [(A - \pi_{2A} + S * \pi_{2B}^*) * \pi_{2A} - \\ &\quad (a_A + b_A * A - b_A * \pi_{2A} + b_A * S * \pi_{2B}^*)] \end{aligned}$$

Λύνοντας την Α'.16 βρίσκουμε:

$$\begin{aligned} \frac{dR_{ESCO_A}}{d\pi_{2A}} &= (A - \pi_{2A} + S * \pi_{2B}^*) - \pi_{2A} + b_A \\ &= A - 2 * \pi_{2A} + S * \pi_{2B}^* + b_A = 0 \\ \Rightarrow \pi_{2A}^* &= \frac{A + S * \pi_{2B}^* + b_A}{2} \quad (A'.17) \end{aligned}$$

Όμοια για την ESCO B:

$$\pi_{2B}^* = \frac{A + S * \pi_{2A}^* + b_B}{2} \quad (A'.18)$$

Τέλος, λύνοντας τις 2 εξισώσεις βρίσκουμε το σημείο ισορροπίας Nash ( $\pi_{2A}^*, \pi_{2B}^*$ ):

$$\pi_{2A}^* = \frac{\frac{A}{2} + S * \frac{A}{4} + S * \frac{b_B}{4} + \frac{b_A}{2}}{1 - \frac{S^2}{4}} \quad (A'.19)$$

$$\pi_{2B}^* = \frac{\frac{A}{2} + S * \frac{A}{4} + S * \frac{b_A}{4} + \frac{b_B}{2}}{1 - \frac{S^2}{4}} \quad (A'.20)$$

## Α'.2 Στατικά Παιχνίδια με ελλιπή Πληροφορία

Στο δεύτερο υποκεφάλαιο, βλέπουμε τη κλάση των στατικών παιχνιδιών με ελλιπή πληροφορία, ή αλλιώς Bayesian παιχνίδια. Σε αυτά τα παιχνίδια, τουλάχιστο ένας παίκτης είναι αβέβαιος για τη συνάρτηση κέρδους κάποιου άλλου παίκτη. Ένα κλασικό παράδειγμα στατικού παιχνιδιού με ελλιπή πληροφορία είναι η sealed-bid δημοπρασία: οι προσφορές γίνονται σε "κλειστούς φακέλους", έτσι μπορεί να θεωρηθεί ότι γίνονται ταυτόχρονα. Όλοι οι παίκτες μετά το τέλος της δημοπρασίας γνωρίζουν τη τιμή στην οποία πουλήθηκε το αγαθό και ποιος είναι ο νικητής. Δε μπορούν όμως να ξέρουν το κέρδος των άλλων παικτών, καθώς κάθε παίκτης γνωρίζει τη δική του εκτιμώμενη αξία για το προϊόν αλλά όχι των υπόλοιπων παικτών.

### Α'.2.1 Σημείο Ισορροπίας Bayesian Nash

Ο ορισμός του σημείου ισορροπίας Nash για στατικά παιχνίδια πλήρης πληροφορίας δε μπορεί να εφαρμοστεί σε αυτό το είδος παιχνιδιών. Αυτό είναι διότι ο κάθε παίκτης μπορεί να έχει 2 ή περισσότερους πιθανούς τύπους, τους οποίους οι υπόλοιποι παίκτες δε γνωρίζουν αλλά απλά εκτιμούν (με τη χρήση πιθανοτήτων). Έτσι, η στρατηγική που θα ακολουθηθεί ο κάθε παίκτης δεν εξαρτάται μόνο από το τι πιστεύει πως θα ακολουθηθεί ο αντίπαλος, αλλά εξαρτάται και από τον τύπο του ίδιου του παίκτη.

**Ορισμός 5.** Σε ένα στατικό Bayesian παιχνίδι  $G = \{A_1, \dots, A_n; T_1, \dots, T_n; p_1, \dots, p_n; R_1, \dots, R_n\}$ , η **στρατηγική** του παίκτη  $i$  είναι μια συνάρτηση  $s_i(t_i)$ , όπου για κάθε τύπο  $t_i \in T_i$ , η  $s_i(t_i)$  καθορίζει τη κίνηση που θα κάνει ο παίκτης από το σύνολο όλων των δυνατών κινήσεων  $A_i$  που ο τύπος παίκτη  $t_i$  έχει στη διάθεση του.  $p_i(t_{-i}|t_i)$ <sup>1</sup> είναι η πιθανότητα που εκφράζει το τι **πιστεύει** ο παίκτης  $i$  για τον τύπο των υπόλοιπων παικτών δεδομένου του δικού του τύπου ( $t_i$ )<sup>2</sup>. Ενώ,  $R_i(a_1, \dots, a_n; t_i)$  είναι η συνάρτηση κέρδους του  $i$  παίκτη που εξαρτάται από τις κινήσεις όλων των παικτών και τον τύπο του παίκτη  $i$ .

**Ορισμός 6. Σημείο Ισορροπίας Bayesian Nash** Σε ένα στατικό Bayesian παιχνίδι  $G = \{A_1, \dots, A_n; T_1, \dots, T_n; p_1, \dots, p_n; R_1, \dots, R_n\}$ , το σύνολο στρατηγικών  $s^* = (s_1^*, \dots, s_n^*)$  αποτελεί Σημείο Ισορροπίας Bayesian Nash αν για κάθε παίκτη  $i$  και για κάθε τύπο  $t_i \in T_i$  του παίκτη  $i$ , η στρατηγική  $s_i^*(t_i)$  λύνει την

$$\max_{a_i \in A_i} \sum_{t_i \in T_i} R_i(s_1^*(t_1), \dots, s_{i-1}^*(t_{i-1}), a_i, s_{i+1}^*(t_{i+1}), \dots, s_n^*(t_n); t) * p_i(t_{-i}|t_i)$$

<sup>1</sup> Συνήθως για την επίλυση αυτών των προβλημάτων χρειάζεται ο κανόνας του Bayes. Ο οποίος ορίζει ότι  $P(A|B) = \frac{P(A,B)}{P(B)}$ .  $P(A|B)$  είναι η πιθανότητα να συμβαίνει το A δεδομένου ότι συμβαίνει το B,  $P(A, B)$  είναι η πιθανότητα να συμβαίνουν ταυτόχρονα το A και το B ενώ  $P(B)$  είναι η πιθανότητα να συμβαίνει το B

<sup>2</sup> Με τον όρο  $t_{-i}$  ορίζουμε το τυπο όλων των υπολοίπων παικτών εκτός του παίκτη  $i$ . Δηλαδή,  $t_{-i} = (t_1, \dots, t_{i-1}, t_{i+1}, \dots, t_n)$

Δηλαδή, κανένας παίκτης δε θέλει να αλλάξει τη στρατηγική του, ακόμη και αν η αλλαγή επηρεάζει μόνο μια κίνηση ενός τύπου του παίκτη.

### Α'.2.2 Μοντέλο Bertrand με ελλιπή πληροφορία

Για να μελετήσουμε τη κλάση αυτή των παιχνιδιών ας δούμε ξανά το μοντέλο του Μικρο-δικτύου με 2 ESCO που ανταγωνίζονται για τους καταναλωτές (δες Α'.1.3). Στο νέο αυτό παιχνίδι, όμως, η ESCO A γνωρίζει τη συνάρτηση κόστους τη δική της  $C_A$  αλλά και του αντιπάλου της  $C_B$ . Η ESCO B όμως, αν και γνωρίζει τη δική της δεν γνωρίζει του αντιπάλου της. Αυτό οφείλεται στο ότι η ESCO A είναι στη διαδικασία να ανανεώσει τις μονάδες DG της με άλλες οι οποίες έχουν χαμηλότερο κόστος! Αλλά, η ESCO B δε γνωρίζει πότε αυτές θα μπουνε σε λειτουργία. Πιστεύει ότι, με πιθανότητα  $\theta$ , οι μονάδες αυτές δεν έχουν μπει ακόμη σε λειτουργία και έτσι η ESCO A έχει ακόμη συνάρτηση κόστους  $C_{AH}$ . Ενώ με πιθανότητα  $(1 - \theta)$  έχουν μπει σε λειτουργία και έτσι η ESCO A έχει ακόμη συνάρτηση κόστους  $C_{AL}$ . Δηλαδή,

$$\begin{aligned} p_B(C_{AH}|C_B) &= \theta \\ p_B(C_{AL}|C_B) &= 1 - \theta \\ p_A(C_B|C_{AH}) &= p_A(C_B|C_{AL}) = 1 \end{aligned}$$

Έτσι, χρησιμοποιώντας τον ορισμό για το Σημείο Ισορροπίας Bayesian Nash, η ESCO A έχει να λύσει το πρόβλημα:

$$\begin{aligned} \max_{\pi_{2A}} R_{ESCO_A}(\pi_{2A}, \pi_{2B}^*) &= \max_{\pi_{2A}} [q_A(\pi_{2A}, \pi_{2B}^*) * \pi_{2A} - C_{AL}(q_A(\pi_{2A}, \pi_{2B}^*))] \quad (A'.21) \\ &= \max_{\pi_{2A}} [(A - \pi_{2A} + S * \pi_{2B}^*) * \pi_{2A} - \\ &\quad (a_{AL} + b_{AL} * (A - \pi_{2A} + S * \pi_{2B}^*))] \\ &= \max_{\pi_{2A}} [(A - \pi_{2A} + S * \pi_{2B}^*) * \pi_{2A} - \\ &\quad (a_{AL} + b_{AL} * A - b_{AL} * \pi_{2A} + b_{AL} * S * \pi_{2B}^*))] \end{aligned}$$

αν η συνάρτηση κόστους της είναι χαμηλή, ενώ:

$$\begin{aligned} \max_{\pi_{2A}} R_{ESCO_A}(\pi_{2A}, \pi_{2B}^*) &= \max_{\pi_{2A}} [q_A(\pi_{2A}, \pi_{2B}^*) * \pi_{2A} - C_{AH}(q_A(\pi_{2A}, \pi_{2B}^*))] \quad (A'.22) \\ &= \max_{\pi_{2A}} [(A - \pi_{2A} + S * \pi_{2B}^*) * \pi_{2A} - \\ &\quad (a_{AH} + b_{AH} * (A - \pi_{2A} + S * \pi_{2B}^*))] \\ &= \max_{\pi_{2A}} [(A - \pi_{2A} + S * \pi_{2B}^*) * \pi_{2A} - \\ &\quad (a_{AH} + b_{AH} * A - b_{AH} * \pi_{2A} + b_{AH} * S * \pi_{2B}^*))] \end{aligned}$$

αν η συνάρτηση κόστους της είναι ψηλή.

Η ESCO B όμως έχει να λύσει το πρόβλημα:

$$\begin{aligned} \max_{\pi_{2B}} R_{ESCO_B}(\pi_{2A}^*, \pi_{2B}) &= \max_{\pi_{2B}} \{ \theta * [q_B(\pi_{2AH}^*, \pi_{2B}) * \pi_{2B} - C_B(q_B(\pi_{2AH}^*, \pi_{2B}))] + \\ &\quad (1 - \theta) * [q_B(\pi_{2AL}^*, \pi_{2B}) * \pi_{2B} - C_B(q_B(\pi_{2AL}^*, \pi_{2B}))] \} \quad (A'.23) \end{aligned}$$

όπου  $\pi_{2AH}^*$  και  $\pi_{2AL}^*$  είναι τα σημεία ισορροπίας της ESCO Α αν έχει ψήλη ή χαμηλή συνάρτηση κόστους αντίστοιχα.

Λύνοντας τις Α'.21 Α'.22 βρίσκουμε:

$$\pi_{2AL}^* = \frac{A + S * \pi_{2B}^* + b_{AL}}{2} \quad (Α'.24)$$

$$\pi_{2AH}^* = \frac{A + S * \pi_{2B}^* + b_{AH}}{2} \quad (Α'.25)$$

Λύνοντας την Α'.23:

$$\begin{aligned} \frac{\partial R_{ESCO_B}}{\partial \pi_{2B}} &= \theta * [(A - \pi_{2B} + S * \pi_{2AH}^*) - \pi_{2B} - (-b_B)] + \\ &\quad (1 - \theta)[(A - \pi_{2B} + S * \pi_{2AL}^*) - \pi_{2B} - (-b_B)] = 0 \\ \Rightarrow \theta * (A - 2 * \pi_{2B} + S * \pi_{2AH}^* + b_B) + (1 - \theta)(A - 2 * \pi_{2B} + S * \pi_{2AL}^* + b_B) &= 0 \\ \Rightarrow \pi_{2B}^* &= \frac{\theta * (A + S * \pi_{2AH}^* + b_B) + (1 - \theta) * (A + S * \pi_{2AL}^* + b_B)}{2} \quad (Α'.26) \end{aligned}$$

Τέλος, λύνοντας τις 3 εξισώσεις Α'.24, Α'.25 και Α'.26 βρίσκουμε το Σημείο Ισορροπίας Bayesian Nash  $(\pi_{2AH}^*, \pi_{2B}^*)$  ή  $(\pi_{2AL}^*, \pi_{2B}^*)$  αν η ESCO Α έχει καμπύλη ψηλού ή χαμηλού κόστους αντίστοιχα:

$$\begin{aligned} \pi_{2B}^* &= \frac{\theta * (\frac{A}{2} + \frac{S * A}{4} + \frac{S * b_{AH}}{4} + \frac{b_B}{2}) + (1 - \theta) * (\frac{A}{2} + \frac{S * A}{4} + \frac{S * b_{AL}}{4} + \frac{b_B}{2})}{1 - \frac{S^2}{4}} \\ \pi_{2AL}^* &= \frac{A + S * \pi_{2B}^* + b_{AL}}{2} \\ &= \frac{A + b_{AL}}{2} + \frac{S}{2} * \frac{\theta * (\frac{A}{2} + \frac{S * A}{4} + \frac{S * b_{AH}}{4} + \frac{b_B}{2}) + (1 - \theta) * (\frac{A}{2} + \frac{S * A}{4} + \frac{S * b_{AL}}{4} + \frac{b_B}{2})}{1 - \frac{S^2}{4}} \\ \pi_{2AH}^* &= \frac{A + S * \pi_{2B}^* + b_{AH}}{2} \\ &= \frac{A + b_{AH}}{2} + \frac{S}{2} * \frac{\theta * (\frac{A}{2} + \frac{S * A}{4} + \frac{S * b_{AH}}{4} + \frac{b_B}{2}) + (1 - \theta) * (\frac{A}{2} + \frac{S * A}{4} + \frac{S * b_{AL}}{4} + \frac{b_B}{2})}{1 - \frac{S^2}{4}} \end{aligned}$$

Βλέπουμε ότι αν  $\theta = 0$  ή  $\theta = 1$  τότε επανερχόμαστε στα αποτελέσματα του μοντέλου με πλήρη πληροφορία, όπως περιμέναμε.

### Παράδειγμα

Χρησιμοποιώντας τώρα τις τιμές  $S = 1$  και  $A = 100$  λύνουμε το πρόβλημα με πλήρη και με ελλιπή πληροφορία.

### Πλήρη Πληροφορία

$$\begin{aligned} \pi_{2A}^* &= 100 + \frac{b_B}{3} + \frac{2 * b_A}{3} \\ \pi_{2B}^* &= 100 + \frac{2 * b_B}{3} + \frac{b_A}{3} \end{aligned}$$

**Ελλειπή Πληροφορία**

$$\begin{aligned}\pi_{2AL}^* &= 100 + \frac{b_B}{3} + \frac{2 * b_{AL}}{3} + \frac{\Theta}{6} * (b_{AH} - b_{AL}) \\ \pi_{2AH}^* &= 100 + \frac{b_B}{3} + \frac{2 * b_{AH}}{3} - \frac{1 - \Theta}{6} * (b_{AH} - b_{AL}) \\ \pi_{2B}^* &= 100 + \frac{2 * b_B}{3} + \frac{b_{AL}}{3} + \frac{\Theta}{3} * (b_{AH} - b_{AL})\end{aligned}$$

Παρατηρώντας τις λύσεις στη κάθε περίπτωση, βλέπουμε ότι η τιμή της A για χαμηλό κόστος στο παιχνίδι ελλιπούς πληροφορίας είναι πιο ψηλή από ότι θα ήταν στο αντίστοιχο πλήρης ενώ για ψηλό κόστος είναι χαμηλότερη. Αυτό συμβαίνει διότι η A τροποποιεί τη τιμή της με βάση της συνάρτηση κόστους της αλλά εκμεταλλευόμενη επίσης το γεγονός ότι η ESCO B δε μπορεί να κάνει το ίδιο (καθώς δε ξέρει τη συνάρτηση κόστους της A). Δηλαδή, αν η ESCO A έχει χαμηλό κόστος, κατεβάζει τη τιμή της ανάλογα με το κόστος, αλλά επίσης την ανεβάζει κατά  $\frac{\Theta}{6} * (b_{AH} - b_{AL})$  καθώς η ESCO B θα δώσει τιμή ( $\pi_{2B}$ ) μεγαλύτερη από ότι θα έδινε αν ήξερε ότι η A ήταν χαμηλού κόστους.

## Παράρτημα Β'

# Δυναμικά Παιχνίδια

Η κλάση αυτή παιχνιδιών περιλαμβάνει 2 κατηγορίες παιχνιδιών. Τα παιχνίδια που ολοκληρώνονται σε γύρους και τα επαναλαμβανόμενα παιχνίδια. Η κύρια ιδέα πίσω από αυτά τα παιχνίδια είναι η διαδοχή των κινήσεων. Δηλαδή, οι παίκτες δεν παίζουν ταυτόχρονα αλλά διαδοχικά.

### Β'.1 Δυναμικά Παιχνίδια με πλήρη Πληροφορία

Τα παιχνίδια αυτά έχουν συζητηθεί αρκετά στο κεφάλαιο 5 καθώς σε αυτό βασίστηκε η ανάλυση των μοντέλων του Μικροδικτυού.

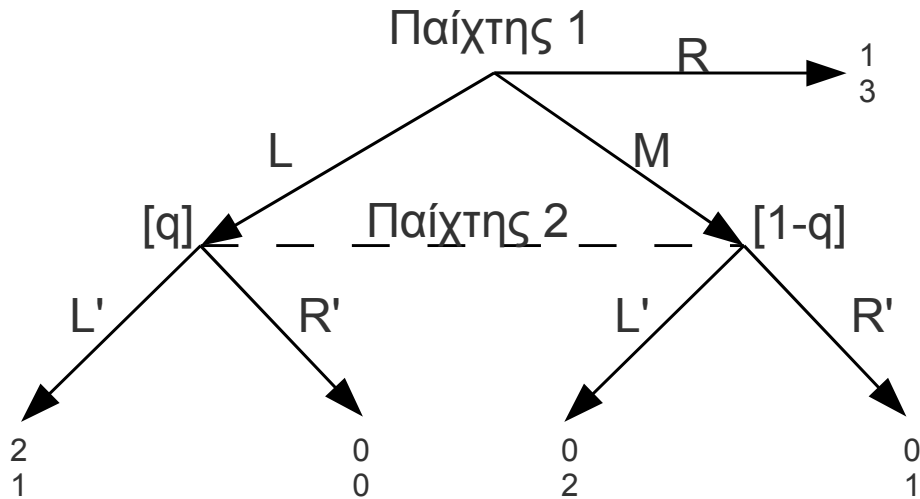
### Β'.2 Δυναμικά Παιχνίδια με ελλιπή Πληροφορία

Τα παιχνίδια αυτά είναι τα πιο περίπλοκα αλλά και τα πιο ενδιαφέροντα παιχνίδια. Η μεγαλύτερη εφαρμογή τους είναι στα παιχνίδια σιγνάλων (signaling games). Γενικά, τα παιχνίδια σιγνάλων περιλαμβάνουν 2 παίκτες (ο ένας με κάποιου είδους κρυφή πληροφορία και ο άλλος χωρίς) και δύο κινήσεων (πρώτα ένα σήμα στέλνεται από τον ενημερωμένο παίκτη, μετά έρχεται απάντηση από τον άλλο παίκτη). Το μοντέλο αυτό εφαρμόζεται σε αγορές εργασίας, σε επενδύσεις εταιριών κλπ

#### Β'.2.1 Τέλειο Σημείο Ισορροπίας Bayesian Nash (Perfect Bayesian Equilibrium)

Για τη μελέτη των παιχνιδιών αυτών χρειάζεται να ενισχύσουμε την έννοια του Subgame Perfect Σημείου Ισορροπίας Nash (δες 5.6.2) που ορίσαμε για τα δυναμικά παιχνίδια πλήρους πληροφορίας. Σε αυτού του είδους τα παιχνίδια, ένας παίκτης που παίζει ίσως δε γνωρίζει σε ποιο σημείο του παιχνιδιού βρίσκεται. Χρησιμοποιώντας την εκτεταμένη μορφή αναπαράστασης, βλέπουμε το δυναμικό παιχνίδι ελλιπούς πληροφορίας του σχήματος Β'.1. Στο παιχνίδι αυτό ο παίκτης 2, όταν έρθει η σειρά του γνωρίζει μόνο αν ο παίκτης 1 έπαιξε R (γιατί τότε έχει τελειώσει το παιχνίδι). Δεν έχει τρόπο να γνωρίζει αν ο παίκτης 1 έπαιξε L ή M (συμβολίζεται με τη διακεκομμένη γραμμή που συνδέει τους δύο κόμβους). Για να αντιμετωπίσουμε αυτό πρόβλημα απαιτούμε να ισχύουν 2 πράγματα σε κάθε τέτοιο παιχνίδι:

**Απαίτηση 1.** Σε κάθε σημείο του παιχνιδιού, ο παίκτης που έχει τη κίνηση πρέπει να **πιστεύει** σε ποιο κόμβο βρίσκεται (αν υπάρχει περίπτωση να βρίσκεται σε περισσότερο από 1 κόμβο). Δηλαδή, στο παράδειγμα πιο πάνω, ο παίκτης 2 πρέπει να τοποθετήσει μια πιθανότητα



Σχήμα Β'.1: Δυναμικό παιχνίδι ελλιπούς πληροφορίας

που πιστεύει σε κάθε κόμβο. Ο κόμβος στον οποίο είναι σίγουρος ότι βρίσκεται έχει πιθανότητα 1.

**Απαίτηση 2.** Δεδομένων των πιθανοτήτων που έχει συνάψει σε κάθε κόμβο (με βάση του τι πιστεύει), οι στρατηγικές του κάθε παίκτη πρέπει να είναι **διαδοχικά λογικές**. Δηλαδή, σε κάθε σημείο του παιχνιδιού που ο παίκτης έχει κίνηση, η κίνηση αυτή πρέπει να είναι η βέλτιστη με βάση τις πιθανότητες που έχει συνάψει σε κάθε κόμβο.

Με βάση την απαίτηση 2, βλέπουμε ότι αποκλείονται οι περιπτώσεις απειλής. Στο παράδειγμά μας, ο παίκτης 2 θα μπορούσε να απειλήσει τον παίκτη 1 ότι αν δεν παίζει R (και άρα ο παίκτης 2 να κερδίσει 3) τότε στον επόμενο γύρο αυτός θα παίζει R' (το οποίο θα έδινε κέρδος 0 στον παίκτη 1) ακόμη και αν αυτή η στρατηγική δεν είναι η βέλτιστη για τον παίκτη 2. Αλλά, εφαρμόζοντας την απαίτηση 2, ο παίκτης 2 δε μπορεί να παίζει R' καθώς η στρατηγική L' είναι η βέλτιστη του (δίνει καλύτερο ή ίσο κέρδος σε κάθε περίπτωση).

**Ορισμός 7.** Για ένα δεδομένο σημείο ισορροπίας σε ένα παιχνίδι σε εκτεταμένη μορφή, λέμε ότι ένας κόμβος βρίσκεται στο **μονοπάτι ισορροπίας** αν η πιθανότητα να φτάσει το παιχνίδι σε αυτό το κόμβο είναι θετική, δεδομένου ότι οι παίκτες παίζουν τις βέλτιστες στρατηγικές τους. Αντιθέτως, λέμε ότι βρίσκεται **εκτός του μονοπατιού**, αν δεν θα φτάσουμε ποτέ σε αυτό το κόμβο, δεδομένου ότι οι παίκτες παίζουν τις βέλτιστες στρατηγικές τους.

**Απαίτηση 3.** Σε κόμβους που βρίσκονται στο **μονοπάτι ισορροπίας**, η πιθανότητα να έφτασε το παιχνίδι ως εκείνον το κόμβο βρίσκεται χρησιμοποιώντας το κανόνα του Bayes<sup>1</sup>.

**Απαίτηση 4.** Σε κόμβους εκτός του **μονοπατιού ισορροπίας**, η πιθανότητα να έφτασε το παιχνίδι ως εκείνον το κόμβο βρίσκεται χρησιμοποιώντας το κανόνα του Bayes και τις βέλτιστες στρατηγικές του παίκτη.

**Ορισμός 8.** Το **Τέλειο Σημείο ισορροπίας Bayesian Nash** αποτελείται από τις στρατηγικές και τις πιθανότητες που ικανοποιούν τις 4 πιο πάνω απαιτήσεις.

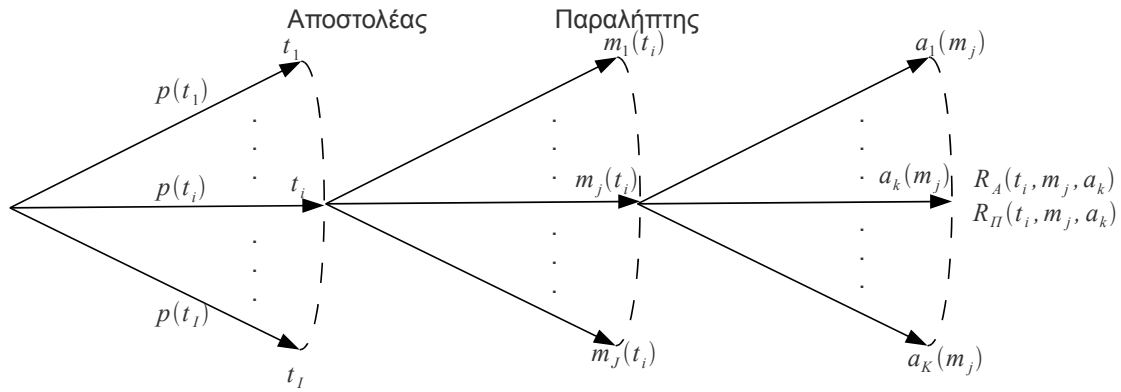
<sup>1</sup>Κανόνας Bayes:  $P(A|B) = \frac{P(A,B)}{P(B)}$  όπου  $P(A|B)$  είναι η πιθανότητα να συμβαίνει το A δεδομένου ότι συμβαίνει το B,  $P(A,B)$  είναι η πιθανότητα να συμβαίνουν ταυτόχρονα το A και το B ενώ  $P(B)$  είναι η πιθανότητα να συμβαίνει το B



### Β'.2.2 Παιχνίδια Σινιάλων

Η πιο γνωστή κατηγορία Δυναμικών παιχνιδιών ελλιπούς πληροφορίας είναι, όπως είπαμε πιο πριν, τα παιχνίδια σινιάλων. Θεωρούμε ένα απλό παιχνίδι με 2 παίκτες, ο πρώτος είναι ο αποστολέας ενώ ο δεύτερος είναι ο παραλήπτης. Το παιχνίδι έχει τα εξής στάδια:

1. Στην αρχή του παιχνιδιού ανακοινώνεται στον Αποστολέα ο τύπος του  $t_i \in T = \{t_1, \dots, t_I\}$ . Η επιλογή γίνεται τυχαία με βάση τη πιθανότητα  $p(t_i)$ , όπου  $p(t_1) + \dots + p(t_I) = 1$ .
2. Ο Αποστολέας παρατηρεί τον τύπο  $t_i$  και διαλέγει ένα μήνυμα  $m_j \in M = \{m_1, \dots, m_J\}$  το οποίο στέλνει στον Παραλήπτη.
3. Ο Παραλήπτης παρατηρεί το μήνυμα  $m_j$  αλλά όχι τον τύπο  $t_i$  και διαλέγει μια κίνηση  $a_k \in A = \{a_1, \dots, a_K\}$ .
4. Το κέρδος του Αποστολέα και του Παραλήπτη υπολογίζεται σαν  $R_A(t_i, m_j, a_k)$  και  $R_{\Pi}(t_i, m_j, a_k)$  αντίστοιχα.



Σχήμα Β'.2: Παιχνίδι Σινιάλων σε Εκτεταμένη μορφή

#### Παιχνίδι Σινιάλων στα Μικροδίκτυα

Το παιχνίδι όπως το έχουμε παρουσιάσει πιο πάνω μπορεί να εφαρμοστεί στο Μοντέλο Μικροδικτύων που έχουμε αναλύσει. Η ESCO παίρνει το ρόλο του Αποστολέα ενώ το ρόλο του Παραλήπτη παίρνουν οι καταναλωτές και οι μονάδες DG. Ο τύπος της ESCO καθορίζεται από τη κατάσταση του Μικροδικτύου. Δηλαδή, είναι συνάρτηση της κατανάλωσης για την επόμενη ώρα, των συμφωνιών που είχαν γίνει για αγορά ενέργειας εκείνη την ώρα και της παραγωγής για την επόμενη ώρα:

$$t_i = f(Q_{Cons}, Q_0, P_{DG})$$

Με βάση το τύπο της εταιρίας, αυτή στέλνει σινιάλα

$$m_j = (\pi_1(t_i), \pi_2(t_i))$$

στο Παραλήπτη. Ο κάθε παραλήπτης παρατηρεί αυτό το σινιάλο και κάνει μια κίνηση ανάλογα με αυτό

$$a_k = Q_{Cons}(m_j) = Q_{Cons}(\pi_2)$$

ή

$$a_k = P_{DG}(m_j) = P_{DG}(\pi_1)$$

Το ότι το σινιάλο αποτελείται από δύο τιμές και ο παραλήπτης είναι πολλαπλός (χωρισμένος σε 2 διαφορετικές ομάδες Παραληπτών) δεν μεταβάλλει το παιχνίδι παρά μόνο τη πολυπλοκότητα της ανάλυσης του.

Το παιχνίδι των Μοντέλων του Μικροδικτύου τοποθετημένο σε αυτή τη βάση μας απαλλάσσει από τις παραδοχές που είχαμε κάνει στα προηγούμενα κεφάλαια για "πεπερασμένο παιχνίδι τέλειας πληροφoρίας". Η επίλυσή του, όμως, για την εύρεση του σημείου ισορροπίας γίνεται πιο δύσκολη και πιο απαιτητική. Σε αυτή τη μελέτη δε θα προχωρήσουμε στην ανάλυση του παιχνιδιού σαν παιχνίδι σινιάλων.

# Βιβλιογραφία

- [1] S. Braithwait, *Behavior modification*, Power and Energy Magazine, IEEE **8** (2010), no. 3, 36 –45.
- [2] A. Brooks, E. Lu, D. Reicher, C. Spirakis, and B. Wehl, *Demand dispatch*, Power and Energy Magazine, IEEE **8** (2010), no. 3, 20 –29.
- [3] D. Chattopadhyay, *An energy brokerage system with emission trading and allocation of cost savings*, IEEE Transactions on Power Systems **10** (1995), no. 4, 1939–1945.
- [4] C.L. Chiang, J.H. Liaw, and C.T. Su, *New approach with a genetic algorithm framework to multi-objective generation dispatch problems*, European Transactions on Electrical Power **15** (2005), no. 4.
- [5] Camerer Colin, *Behavioral game theory: experiments in strategic interaction*, Russesll Sage Foundation, 2003.
- [6] S. de la Torre, J. Contreras, and A.J. Conejo, *Finding multiperiod Nash equilibria in pool-based electricity markets*, IEEE Transactions on Power Systems **19** (2004), no. 1, 643–651.
- [7] John Eatwell, Murray Milgate, and Peter Newman (eds.), *The new palgrave: A dictionary of economics*, ch. 2, p. 460–82, Palgrave Macmillan, 1987.
- [8] H. Ehtamo, J. Ruusunen, and RP Hamalainen, *A hierarchical approach to bargaining in power pool management*, IEEE Transactions on Automatic Control **34** (1989), no. 6, 666–669.
- [9] RW Ferrero, SM Shahidehpour, and VC Ramesh, *Transaction analysis in deregulated power systems using game theory*, IEEE transactions on power systems **12** (1997), no. 3, 1340–1347.
- [10] R. Gibbons, *Game theory for applied economists*, 1992.
- [11] A. Haurie, R. Loulou, and G. Savard, *A two-player game model of power cogeneration in New England*, IEEE Transactions on Automatic Control **37** (1992), no. 9, 1451–1456.
- [12] B.F. Hobbs and K.A. Kelly, *Using game theory to analyze electric transmission pricing policies in the United States*, European Journal of Operational Research **56** (1992), no. 2, 154–171.

- [13] C.M. Huang, H.T. Yang, and C.L. Huang, *Bi-objective power dispatch using fuzzy satisfaction-maximizing decision approach*, IEEE Transactions on Power Systems **12** (1997), no. 4, 1715–1721.
- [14] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou, and A. Dimeas, *MicroGrids Management, control and Operation Aspects of MicroGrids*, IEEE Power Energy Mag **6** (2008), no. 3, 54–65.
- [15] T.J. Lui, W. Stirling, and H.O. Marcy, *Get smart*, Power and Energy Magazine, IEEE **8** (2010), no. 3, 66–78.
- [16] A. Maeda and Y. Kaya, *Game theory approach to use of noncommercial power plants undertime-of-use pricing*, IEEE Transactions on Power Systems **7** (1992), no. 3, 1052–1059.
- [17] J. Nanda, L. Hari, and ML Kothari, *Economic emission load dispatch with line flow constraints using a classical technique*, IEE Proceedings. Generation, Transmission and Distribution **141** (1994), no. 1, 1–10.
- [18] J. Nanda, DP Kothari, and KS Lingamurthy, *Economic-emission load dispatch through goal programming techniques*, IEEE Transaction on Energy Conversion **3** (1988), no. 1, 26–32.
- [19] Peter C. Reiss and Matthew W. White, *Household electricity demand*, (2002).
- [20] J. Ruusunen, H. Ehtamo, and RP Hamalainen, *Dynamic cooperative electricity exchange in a power pool*, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics **21** (1991), no. 4, 758–766.
- [21] H. Singh, *Introduction to game theory and its application in electric powermarkets*, IEEE Computer Applications in Power **12** (1999), no. 4, 18–20.
- [22] S. Stoft, *Power system economics: designing markets for electricity*, IEEE press Piscataway, NJ, 2002.
- [23] D. Zhang, Y. Wang, and P.B. Luh, *Optimization based bidding strategies in the deregulated market*, IEEE Transactions on Power Systems **15** (2000), no. 3, 981–986.
- [24] ΚΙΜΩΝΟΣ Α. ΑΝΤΩΝΟΠΟΥΛΟΥ, *Κλιματισμός*, vol. A, Θωμάϊδιο Ίδρυμα, 2007.
- [25] Κ. ΚΑΔΙΑΝΑΚΗΣ, Σ. ΚΑΡΑΝΑΣΙΟΣ, and Α. ΦΕΛΛΟΥΡΗΣ, *ΑΝΑΛΥΣΗ II, Συναρτήσεις Πολλών Μεταβλητών, Αυτοέκδοση*, 2003.