



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ  
ΤΜΗΜΑ ΗΛΕΚΤΡΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ & ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΤΟΜΕΑΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΗΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ  
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ

## Σχεδίαση και Ανάπτυξη Αλγορίθμων Δημοπρασιών με Εφαρμογή στο Διαγωνισμό Power TAC



Διπλωματική εργασία του

**Θεμιστοκλή Διαμαντόπουλου**

A.E.M.: 6354

υπό την επίβλεψη του Λέκτορα

**κ. Ανδρέα Συμεωνίδη**

και του υποψήφιου Διδάκτορα

**κ. Αντώνη Χρυσόπουλου**

## Ευχαριστίες

Εφόσον μου δίνεται η ευκαιρία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τα άτομα που χωρίς την άμεση και έμμεση βοήθεια τους δε θα μπορούσα να ολοκληρώσω αυτή τη διπλωματική εργασία.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω το Λέκτορα κ. Ανδρέα Συμεωνίδη για την εμπιστοσύνη που μου επέδειξε αναθέτοντας μου αυτή την εργασία, αλλά και για τη συνεχή καθοδήγηση που μου παρείχε σε όλα τα στάδια της εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου στον Υποψήφιο Διδάκτορα Αντώνη Χρυσόπουλο για τη συνεχή βοήθειά που μου προσέφερε τόσο σε θεωρητικά όσο και πρακτικά προβλήματα της εργασίας, τη στήριξη και τη συμπαράσταση σ' αυτή τη διπλωματική εργασία.

Εκτός των παραπάνω, αισθάνομαι την ανάγκη να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην κοπέλα μου, Ρία, για την πολύτιμη συμπαράστασή της τις δύσκολες ώρες της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ τους φίλους μου καθώς και τους γονείς μου για την στήριξη που μου παρείχαν με το δικό τους τρόπο σε όλο το χρονικό διάστημα που χρειάστηκε για να ολοκληρωθεί η εργασία.

## Περίληψη

### Σχεδίαση και Ανάπτυξη Αλγορίθμων Δημοπρασιών με Εφαρμογή στο Διαγωνισμό Power TAC

Το αντικείμενο αυτής της εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός πράκτορα λογισμικού ικανού να συναλλαχθεί επιτυχώς σε αγορές Διμερών Δημοπρασιών. Ο κλάδος των Διμερών Δημοπρασιών παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον καθώς από την έως σήμερα έρευνα δεν έχει προκύψει κάποια βέλτιστη λύση· συνεπώς αποτελεί ανοικτό ορίζοντα για το μέλλον. Ένα κλασικό παράδειγμα μιας αγοράς Διμερών Δημοπρασιών αποτελεί η αγορά ενέργειας, που με τη σύγχρονη μορφή της χαρακτηρίζεται ως μια ελεύθερη και αποκεντρωμένη αγορά. Στην αγορά αυτή, η οποία μελετάται εκτενώς, παραγωγοί και καταναλωτές ενέργειας συναλλάσσονται με τη βοήθεια μεσαζόντων. Οι τελευταίοι έχουν ως καθήκον την εύρυθμη ροή της ενέργειας στο σύνολο των παραγωγών και καταναλωτών με τους οποίους έχουν συνάψει συμβόλαια. Για την καλύτερη κατανόηση άλλα και μοντελοποίηση της σύγχρονης αγοράς ενέργειας, αναπτύσσεται για πρώτη φορά το 2011 ο διαγωνισμός Power TAC. Στα πλαίσια του διαγωνισμού, ενθαρρύνεται επίσης η ανάπτυξη νέων καινοτόμων στρατηγικών, «έξυπνων» πρακτόρων και λήψης αποφάσεων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η υλοποίηση ενός πράκτορα-μεσάζοντα που θα επιτυγχάνει το μέγιστο δυνατό κέρδος τηρώντας τους κανόνες της αγοράς. Προς το σκοπό αυτό, κατόπιν ερμηνείας των αγορών Διμερών Δημοπρασιών ως μικροοικονομικά συστήματα και έρευνας ως προς τις υπάρχουσες στρατηγικές διαμόρφωσης της τιμής, σχεδιάζονται για τον πράκτορα οι ακόλουθες στρατηγικές: μια στρατηγική διαμόρφωσης τιμής που λειτουργεί προσαρμοστικά και προγνωστικά, δύο στρατηγικές ενημέρωσης προσφορών εκ των οποίων η μία δρα επιπόλαια ενώ η άλλη ακολουθεί τα μοντέλα της Ασαφούς Λογικής και τέλος μια στρατηγική πρόβλεψης της ενέργειας που πρόκειται να καταναλωθεί μέσω γνωστής διαδικασίας της Ανάλυσης Χρονοσειρών. Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ενθαρρυντικά ενώ είναι βέβαιο ότι δίνεται τροφή για μελλοντική έρευνα.

Λέξεις-Κλειδιά: Διμερείς Δημοπρασίες, Trading Agent Competition (TAC), Αγορά ενέργειας, Ασαφής Λογική, Ανάλυση Χρονοσειρών.

## **Abstract**

### **Design and Development of Auction Algorithms Applied in the Power TAC Competition**

The objective of this thesis is the development of a software agent capable of transacting successfully in Double Auction markets. The scientific field of Double Auctions is of particular interest since the research so far has not arisen any optimal solution; therefore it is considered as an open problem for the future. A classic example of Double Auction market is Energy Markets, which in their modern form are characterized as free and decentralized markets. In these markets, which are studied excessively, the energy producers and consumers transact with each other via brokers. The brokers are responsible for the task of proper energy flowing among the producers and the consumers with whom they have signed contracts. In 2011, for the first time, the Power TAC Competition is developed in order to achieve a better understanding and modeling of the modern energy market. The competition also encourages the development of new innovative strategies of “intelligent” agents and decision making. The purpose of this paper is the implementation of an agent-broker able to obtain the maximum profit while respecting the rules of the market. To this end, after interpreting the Double Auction markets as microeconomic systems and researching the current bibliography for the existing price formation strategies, the following strategies are designed for the agent: a price formation strategy that is adaptive and predictive, two shout update strategies of which the first acts rather hastily whereas the second is designed according to the theory of Fuzzy Logic, and finally a strategy for forecasting energy to be consumed using well known methods of the Time Series Analysis theory. The results are quite encouraging and will certainly call for future research.

**Keywords:** Double Auctions, Trading Agent Competition (TAC), Energy market, Fuzzy Logic, Time Series Analysis.

## Πίνακας Περιεχομένων

|  |           |
|--|-----------|
| Ευχαριστίες.....   | 2         |
| Περίληψη.....  | 3         |
| Abstract.....  | 4         |
| Πίνακας Περιεχομένων.....  | 5         |
| Λίστα σχημάτων.....  | 9         |
| Λίστα πινάκων.....   | 11        |
| <b>1. Εισαγωγή.....</b>  | <b>12</b> |
| 1.1. Γενικά .....  | 12        |
| 1.2. Ορισμός του προβλήματος .....                                 | 12        |
| 1.3. Σκοπός και στόχος της διπλωματικής .....                      | 13        |
| 1.4. Συνοπτική περιγραφή της διπλωματικής .....                    | 14        |
| 1.5. Οργάνωση κεφαλαίων .....                                      | 14        |
| <b>2. Διμερείς Δημοπρασίες.....</b>                                | <b>16</b> |
| 2.1. Γενικά .....  | 16        |
| 2.2. Βασικές έννοιες και ορισμοί .....                             | 16        |
| 2.3. Μικροοικονομική θεωρία .....                                  | 18        |
| 2.3.1. Καμπύλες προσφοράς και ζήτησης .....                        | 18        |
| 2.3.2. Λειτουργία και αξιολόγηση της αγοράς.....                   | 21        |
| 2.4. Δομικά στοιχεία .....   | 25        |
| 2.4.1. Είδος συστήματος διαπραγμάτευσης .....                      | 25        |
| 2.4.2. Επαναληπτικότητα αγοράς.....                                | 26        |
| 2.4.3. Διακριτότητα ρόλων των εμπορευόμενων .....                  | 26        |
| 2.4.4. Μορφοποίηση μηνυμάτων των εμπορευόμενων.....                | 26        |
| 2.4.5. Δικαιώματα πρόσβασης των εμπορευόμενων σε πληροφορίες ..... | 27        |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| 2.4.6.    | Δυνατότητα τροποποίησης μιας υποβληθείσας προσφοράς.....        | 27        |
| 2.4.7.    | Κριτήριο αποδοχής προσφορών .....                               | 27        |
| 2.4.8.    | Κριτήριο επιλογής ζευγών αγοραστών και πωλητών για συναλλαγή .. | 28        |
| 2.4.9.    | Προσδιορισμός τιμής συναλλαγής για ζεύγη αγοραστή και πωλητή... | 28        |
| 2.4.10.   | Χρονική στιγμή εκκαθάρισης αγοράς.....                          | 28        |
| 2.4.11.   | Κανόνες αποδοχής προσφορών .....                                | 29        |
| 2.4.12.   | Κανόνες τιμολόγησης.....  | 31        |
| 2.5.      | Στοιχεία συμπεριφοράς .....                                     | 34        |
| 2.5.1.    | Φιλαλήθης στρατηγική .....                                      | 38        |
| 2.5.2.    | Στρατηγική Kaplan .....   | 38        |
| 2.5.3.    | Στρατηγική Μηδενικής Ευφυΐας.....                               | 38        |
| 2.5.4.    | Στρατηγική Επιπρόσθετης Μηδενικής Ευφυΐας.....                  | 39        |
| 2.5.5.    | Στρατηγική Roth-Erev .....                                      | 45        |
| 2.5.6.    | Στρατηγική Gjerstad-Dickhaut .....                              | 48        |
| 2.5.7.    | Στρατηγική Ασαφούς Λογικής .....                                | 52        |
| 2.5.8.    | Risk-Based στρατηγική.....                                      | 57        |
| 2.5.9.    | Στρατηγική Προσαρμοστικής Συμπεριφοράς.....                     | 62        |
| 2.5.10.   | Στρατηγική Q.....   | 64        |
| <b>3.</b> | <b>Ανάλυση διαγωνισμού Power TAC .....</b>                      | <b>66</b> |
| 3.1.      | Γενικά .....  | 66        |
| 3.2.      | Αρχιτεκτονική του συστήματος .....                              | 67        |
| 3.3.      | Οι φάσεις του διαγωνισμού .....                                 | 68        |
| 3.3.1.    | Η φάση των συμβολαίων .....                                     | 68        |
| 3.3.2.    | Η φάση της εκτέλεσης .....                                      | 69        |
| 3.4.      | Αρχή διανομής .....   | 71        |

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| 3.5.      | Χονδρική αγορά .....   | 73         |
| 3.6.      | Πληροφόρηση .....  | 74         |
| 3.6.1.    | Έναρξη παιχνιδιού .....  | 74         |
| 3.6.2.    | Βασικό σενάριο .....   | 75         |
| 3.7.      | Κατηγοριοποίηση πελατών .....                                  | 77         |
| 3.7.1.    | Παραγωγοί ενέργειας .....                                      | 77         |
| 3.7.2.    | Καταναλωτές ενέργειας .....                                    | 78         |
| 3.8.      | Πελάτες προκαθορισμένων προσφορών .....                        | 79         |
| 3.8.1.    | Δομή μιας προκαθορισμένης προσφοράς .....                      | 79         |
| 3.8.2.    | Αξιολόγηση μιας προκαθορισμένης προσφοράς .....                | 80         |
| 3.8.3.    | Επιλογή μιας προκαθορισμένης προσφοράς .....                   | 82         |
| 3.9.      | Αξιολόγηση .....   | 82         |
| <b>4.</b> | <b>Περιγραφή Περιβάλλοντος Πειραμάτων και Υλοποίησης .....</b> | <b>84</b>  |
| 4.1.      | Γενικά .....   | 84         |
| 4.2.      | Περιβάλλον Πειραμάτων .....                                    | 84         |
| 4.3.      | Ο πράκτορας .....  | 85         |
| 4.3.1.    | Στρατηγική διαμόρφωσης τιμής .....                             | 86         |
| 4.3.2.    | Στρατηγική ενημέρωσης προκαθορισμένων προσφορών .....          | 91         |
| 4.3.3.    | Στρατηγική παραγωγής ενέργειας .....                           | 101        |
| <b>5.</b> | <b>Αποτελέσματα .....</b>                                      | <b>103</b> |
| 5.1.      | Γενικά .....   | 103        |
| 5.2.      | Πειράματα στρατηγικών ενημέρωσης προσφορών .....               | 104        |
| 5.3.      | Πειράματα παραμέτρων στρατηγικής διαμόρφωσης τιμής .....       | 108        |
| 5.4.      | Πειράματα στρατηγικών διαμόρφωσης τιμής .....                  | 113        |
| <b>6.</b> | <b>Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία .....</b>               | <b>119</b> |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 6.1. Συμπεράσματα .....       | 119        |
| 6.2. Μελλοντική εργασία ..... | 120        |
| <b>Βιβλιογραφία .....</b>     | <b>122</b> |



## Λίστα σχημάτων

|   |    |
|---|----|
| Σχήμα 2.1 Καμπύλες προσφοράς και ζήτησης με σήραγγα ποσότητας .....                       | 19 |
| Σχήμα 2.2 Καμπύλες προσφοράς και ζήτησης με σήραγγα τιμής .....                           | 20 |
| Σχήμα 2.3 Σχεδιάγραμμα των κυριότερων στρατηγικών πλειοδοσίας.....                        | 37 |
| Σχήμα 2.4 Αλγόριθμος στρατηγικής ZIP πωλητών .....  | 41 |
| Σχήμα 2.5 Αλγόριθμος στρατηγικής ZIP αγοραστών.....                                       | 41 |
| Σχήμα 2.6 Αλγόριθμος στρατηγικής CP πωλητών (α) και αγοραστών (β) .....                   | 44 |
| Σχήμα 2.7 Αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού για τον υπολογισμό του $V(m, n)$ .....     | 52 |
| Σχήμα 2.8 Ευριστικοί κανόνες πωλητών (α) και αγοραστών (β) .....                          | 53 |
| Σχήμα 2.9 Ασαφείς κανόνες πωλητών για $b_0 \leq P_R \leq a_o$ .....                       | 54 |
| Σχήμα 2.10 Ασαφή σύνολα για $b_0 \leq P_R \leq a_o$ .....                                 | 55 |
| Σχήμα 2.11 Κανόνες εκμάθησης στρατηγικής A-FL.....  | 56 |
| Σχήμα 2.12 Ασαφές σύνολο για τους κανόνες εκμάθησης της στρατηγική A-FL .....             | 56 |
| Σχήμα 2.13 Αλγόριθμος εκμάθησης στρατηγικής RB πωλητών.....                               | 59 |
| Σχήμα 2.14 Αλγόριθμος εκμάθησης στρατηγικής RB αγοραστών .....                            | 59 |
| Σχήμα 2.15 Στρατηγική τιμολόγησης RB πωλητών (α) και αγοραστών (β) .....                  | 60 |
| Σχήμα 2.16 Αλγόριθμος υπολογισμού τιμής στόχου AAT πωλητών (α) και αγοραστών (β).....     | 63 |
| Σχήμα 2.17 Αλγόριθμος δημιουργίας προσφορών στρατηγικής Q .....                           | 64 |
| Σχήμα 3.1 Πρόχειρο μοντέλο ρόλων και σχέσεων του Power TAC από την όψη του πράκτορα ..... | 67 |
| Σχήμα 3.2 Βασικό σενάριο διαγωνισμού .....  | 75 |
| Σχήμα 4.1 Μοντέλο του πράκτορα.....   | 86 |
| Σχήμα 4.2 Συνάρτηση πειραματισμού του πράκτορα .....                                      | 90 |

|  |     |
|--|-----|
| Σχήμα 4.3 Αλγόριθμος βασικής στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών πώλησης ....                                     | 92  |
| Σχήμα 4.4 Αλγόριθμος βασικής στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών αγοράς .....                                     | 93  |
| Σχήμα 4.5 Ασαφές σύνολο των πελατών του πράκτορα .....   | 95  |
| Σχήμα 4.6 Ασαφές σύνολο της ισορροπίας χαρτοφυλακίου του πράκτορα .....  | 97  |
| Σχήμα 4.7 Αλγόριθμος υποβολής νέων προσφορών πώλησης της στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής..... | 98  |
| Σχήμα 4.8 Αλγόριθμος υποβολής νέων προσφορών αγοράς της στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής.....  | 99  |
| Σχήμα 4.9 Αλγόριθμος ενημέρωσης προσφορών πώλησης της στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής.....    | 100 |
| Σχήμα 4.10 Αλγόριθμος ενημέρωσης προσφορών αγοράς της στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής.....    | 100 |

## Λίστα πινάκων

|  |     |
|--|-----|
| Πίνακας 2.1 Στρατηγικές πλειοδοσίας .....  | 36  |
| Πίνακας 3.1 Βασικό σενάριο διαγωνισμού .....   | 76  |
| Πίνακας 5.1 Πειράματα στρατηγικών ενημέρωσης προσφορών για 4 παραγωγούς και 8 καταναλωτές .....                            | 105 |
| Πίνακας 5.2 Πειράματα στρατηγικών ενημέρωσης προσφορών για 4 παραγωγούς και 16 καταναλωτές .....                           | 106 |
| Πίνακας 5.3 Πειράματα στρατηγικών ενημέρωσης προσφορών για 8 παραγωγούς και 16 καταναλωτές .....                           | 107 |
| Πίνακας 5.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στρατηγικών ενημέρωσης προσφορών .....  | 108 |
| Πίνακας 5.5 Πειράματα παραμέτρου πειραματισμού στρατηγικής διαμόρφωσης της τιμής για 4 παραγωγούς και 8 καταναλωτές .....  | 110 |
| Πίνακας 5.6 Πειράματα παραμέτρου πειραματισμού στρατηγικής διαμόρφωσης της τιμής για 4 παραγωγούς και 16 καταναλωτές ..... | 111 |
| Πίνακας 5.7 Πειράματα παραμέτρου πειραματισμού στρατηγικής διαμόρφωσης της τιμής για 8 παραγωγούς και 16 καταναλωτές ..... | 112 |
| Πίνακας 5.8 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα παραμέτρου πειραματισμού στρατηγικής διαμόρφωσης της τιμής .....                    | 113 |
| Πίνακας 5.9 Πειράματα στρατηγικών διαμόρφωσης της τιμής για 4 παραγωγούς και 8 καταναλωτές .....                           | 115 |
| Πίνακας 5.10 Πειράματα στρατηγικών διαμόρφωσης της τιμής για 4 παραγωγούς και 16 καταναλωτές .....                         | 116 |
| Πίνακας 5.11 Πειράματα στρατηγικών διαμόρφωσης της τιμής για 8 παραγωγούς και 16 καταναλωτές .....                         | 117 |
| Πίνακας 5.12 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στρατηγικών διαμόρφωσης της τιμής .....  | 118 |

## Εισαγωγή

### 1.1. Γενικά

Μια δημοπρασία ονομάζεται *διμερής* όταν σε αυτή μετέχουν πολλοί πωλητές αλλά και πολλοί αγοραστές. Οι διμερείς δημοπρασίες (ΔΔ) (double auctions – DA) έχουν μεγάλο ερευνητικό ενδιαφέρον καθώς η πολλαπλότητα των συμμετεχόντων έχει ως συνέπεια απρόβλεπτες μεταβολές τιμών των προϊόντων. Στο αντικείμενο των ΔΔ, μέχρι σήμερα, δεν έχει σχεδιαστεί καμία «άριστη» λύση. Υπάρχει πλήθος αλγορίθμων που επιτυγχάνουν κέρδος σε διάφορα είδη δημοπρασιών, που διέπονται από συγκεκριμένους κανόνες, χωρίς όμως καμία λύση να θεωρείται βέλτιστη για το σύνολο του προβλήματος. Η έρευνα, λοιπόν, στις ΔΔ αποτελεί έναν ανοικτό ορίζοντα για το μέλλον.

Οι ΔΔ μελετήθηκαν πρώτα από τους Friedman και Rust το 1992 [1], μετά από συνέδρια που έλαβαν χώρα το 1990 και το 1991. Μια αγορά ΔΔ περιέχει αλληλεπιδράσεις μεταξύ πρακτόρων, αγαθών και χρημάτων. Τα αγαθά θεωρούνται συνήθως διακριτό μέγεθος ενώ τα χρήματα συνεχές. Η ΔΔ ουσιαστικά αποτελεί ένα μικροοικονομικό σύστημα και ως τέτοιο θα αναλυθεί στα πλαίσια της διπλωματικής αυτής εργασίας.

### 1.2. Ορισμός του προβλήματος

Ο διαγωνισμός Power TAC, που πρόκειται να πραγματοποιηθεί στις 17 και στις 19 Ιουλίου του 2011, αποτελεί μια ενδιαφέρουσα και πολύπλευρη υλοποίηση αγοράς ΔΔ. Προσομοιώνει μια αγορά ενέργειας αποτελούμενη από διαφορετικής κλίμακας μοντέλα παραγωγών και καταναλωτών με σκοπό την όσο το δυνατόν πιστότερη αναπαράσταση μιας πραγματικής αγοράς [37]. Σε πολλές χώρες, η αγορά ενέργειας είναι πια ελεύθερη ενώ, κατά τη στιγμή της εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας, πολλές αγορές, όπως αυτή της Ελλάδας, βρίσκονται σε ένα ενδιάμεσο στάδιο προς την απελευθέρωσή τους. Έτσι, είναι εμφανές ότι, το ενδιαφέρον για τον διαγωνισμό αυτό αναμένεται μεγάλο.

Οι διαγωνιζόμενοι στο Power TAC θα πρέπει να υλοποιήσουν την δική τους έκδοση ενός πράκτορα-μεσάζοντα. Οι μεσάζοντες αποτελούν οντότητες που παρεμβάλλονται μεταξύ των παραγωγών και καταναλωτών ενέργειας και αναλαμβάνουν την αγορά ενέργειας από τους πρώτους και την πώλησή της ενέργειας στους δεύτερους. Προφανώς, οι μεσάζοντες προσπαθούν να επιτύχουν το μεγαλύτερο δυνατό κέρδος στην αγορά και προς επίτευξη αυτού αναζητείται η βελτιστοποίηση ενός συνόλου παραμέτρων, οι σημαντικότερες εκ των οποίων παρατίθενται στη συνέχεια.

Κατ' αρχάς, ο μεσάζων χρειάζεται να αποκτήσει ένα όσο το δυνατό μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς τόσο των καταναλωτών όσο και των παραγωγών. Προς το σκοπό αυτό, είναι απαραίτητη μια στρατηγική διαμόρφωσης της τιμής των προσφορών που πρόκειται να κάνει ο πράκτορας, καθώς και μια στρατηγική ενημέρωσης των προσφορών του. Έχει, όμως, μεγάλη σημασία τα μερίδια αυτό να συνδράμουν κάθε φορά σε μια ισορροπία μεταξύ της ποσότητας ενέργειας που επιθυμούν να καταναλώσουν οι καταναλωτές και της ποσότητας ενέργειας που πρόκειται να παράγουν οι παραγωγοί. Με κατάλληλους μηχανισμούς, όπως ο μηχανισμός ζήτησης ενέργειας από τους παραγωγούς, αλλά και η ισορροπία μεταξύ των δύο προαναφερθέντων μεριδίων, ο μεσάζων καλείται να επιτύχει την ισορροπία του χαρτοφυλακίου του, των ενεργών του συμβολαίων. Σε αντίθετη περίπτωση, υποβάλλεται σ' αυτόν πρόστιμο ανάλογο της ανισορροπίας.

Αναλύοντας, έστω και ακροθιγώς, μια τέτοια αγορά, είναι βέβαιο ότι παρουσιάζει αρκετό ενδιαφέρον η δημιουργία μιας στρατηγικής ικανής να ενσωματωθεί σε έναν πράκτορα-μεσάζοντα. Με βάση τη θεωρία των ΔΔ, στην παρούσα διπλωματική επιχειρείται η σχεδίαση και υλοποίηση ενός πράκτορα ικανού να έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα στη συγκεκριμένη αγορά.

### **1.3. Σκοπός και στόχος της διπλωματικής**

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής είναι η εις βάθος ανάλυση της θεωρίας των ΔΔ και ιδιαίτερα των στρατηγικών συμπεριφοράς των συμμετεχόντων σε μια δυναμική και διαδραστική αγορά, όπως αυτή της Ενέργειας. Επίσης, επιθυμείται η όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση του προβλήματος που ορίστηκε παραπάνω.

Συνεπώς, στόχος είναι η δημιουργία μιας στρατηγικής που θα έχει ικανοποιητικά αποτελέσματα σε αγορές ΔΔ όπως αυτή του Power TAC. Η στρατηγική αυτή πρέπει να σχεδιαστεί αρκετά πολύπλοκα ώστε να καλύπτει όλες τις πτυχές του διαγωνισμού.

#### **1.4. Συνοπτική περιγραφή της διπλωματικής**

Η εργασία αυτή είναι δομημένη κατάλληλα ώστε να χαρακτηρίζεται από συνοχή καθώς τα διάφορα κεφάλαια έχουν μια λογική συνέχεια. Έτσι, είναι εύλογο να πούμε ότι χωρίζεται σε δύο κυρίως τμήματα, την ανάλυση της αγοράς και των στρατηγικών, και την παράθεση της στρατηγικής που υλοποιήθηκε μαζί και με τα όποια αποτελέσματα και συμπεράσματα.

Οι αγορές ΔΔ αναλύονται με σκοπό την αναγνώριση των ομοιοτήτων με το διαγωνισμό Power TAC. Κατά αυτόν τον τρόπο χαρακτηρίζεται εύλογη η έμπνευση από γνωστές στρατηγικές ΔΔ για τη σχεδίαση στρατηγικής για το διαγωνισμό.

#### **1.5. Οργάνωση κεφαλαίων**

Για την καλύτερη κατανόηση της δομής της εργασίας αναφέρονται στη συνέχεια κάποια εισαγωγικά σχόλια για τα κεφάλαια που θα ακολουθήσουν.

Το κεφάλαιο 2 αποτελεί τη γενικότερη έρευνα που πραγματοποιήθηκε με αντικείμενο μελέτης τις ΔΔ. Έτσι, στο κεφάλαιο αυτό οι αγορές ΔΔ αντιμετωπίζονται ως μικροοικονομικά συστήματα ενώ στη συνέχεια παρατίθενται βιβλιογραφικά κάποιες αξιοσημείωτες στρατηγικές.

Στο κεφάλαιο 3 γίνεται μια ανάλυση του διαγωνισμού Power TAC. Αρχικά απλώς παρατίθενται πληροφορίες που αφορούν το σύνολο του διαγωνισμού, και μετά η ανάλυση επικεντρώνεται στην αγορά προκαθορισμένων προσφορών, που είναι και αυτή που αποτελεί το κυρίως αντικείμενο μελέτης.

Το κεφάλαιο 4 αφορά τη στρατηγική του πράκτορα που υλοποιήθηκε. Αναλύονται οι μηχανισμοί που υλοποιήθηκαν με σκοπό ο πράκτορας να λειτουργεί

«έξυπνα» εντός της αγοράς και εξηγούνται οι λόγοι για τους οποίους η στρατηγική σχεδιάστηκε με αυτόν τον τρόπο καθώς και οι πηγές έμπνευσής της.

Στο κεφάλαιο 5 παρατίθενται τα αποτελέσματα που προέκυψαν μετά από την εκτέλεση των πειραμάτων. Τα πειράματα είναι ποικίλα και αφορούν όλες τις πτυχές του πράκτορα, ο οποίος δοκιμάζεται έναντι διαφορετικών εκδόσεων του καθώς και έναντι γνωστών στρατηγικών.

Τέλος, στο κεφάλαιο 6 παρουσιάζονται τα συμπεράσματα της εργασίας με βάση τα αποτελέσματα που είχε η στρατηγική. Ακόμα, αναφέρονται ιδέες για μελλοντικές επεκτάσεις των διαφόρων μηχανισμών που υλοποιήθηκαν.

## 2. Διμερείς Δημοπρασίες

### 2.1. Γενικά

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι ΔΔ αποτελούν ένα αρκετά ενδιαφέρον πεδίο με πολλές εφαρμογές, όπως αυτή που μελετάται στην παρούσα διπλωματική. Καθώς οι ΔΔ αποτελούν ένα μικροοικονομικό σύστημα, στη συνέχεια του κεφαλαίου αρχικά αναλύονται τα διάφορα μεγέθη της αγοράς, οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ αυτών των μεγεθών, όπως επίσης και η σημασία τους για τους εμπορευόμενους.

Η αδυναμία εύρεσης μιας «βέλτιστης» λύσης για έναν εμπορευόμενο που θα κερδίζει πάντα σε μια αγορά ΔΔ έχει προκαλέσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον στους ερευνητές του αντικειμένου, συμβάλλοντας έτσι στην ύπαρξη μεγάλου πλήθους αλγορίθμων ικανών να επιτύχουν καλά αποτελέσματα σε τέτοιες αγορές. Οι κυριότερες εξ αυτών των στρατηγικών αναλύονται σε αυτό το κεφάλαιο, ενώ επιχειρείται και μια κατηγοριοποίησή τους όσο αυτό καθίσταται εφικτό.

### 2.2. Βασικές έννοιες και ορισμοί

Για την πλήρη κατανόηση της θεωρίας των ΔΔ, είναι απαραίτητο να οριστούν συγκεκριμένες έννοιες οι οποίες θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια.

Όπως αναφέρθηκε, σε ένα σύστημα ΔΔ, οι συναλλασσόμενοι οι οποίοι αγοράζουν και πωλούν αγαθά υλοποιούνται από πράκτορες. Ως εκ τούτου, η προσφορά ενός πράκτορα μπορεί να είναι:

- *Προσφορά αγοράς (bid)*: Είναι η προσφορά από έναν αγοραστή που περιλαμβάνει την ποσότητα του αγαθού και την τιμή στην οποία επιθυμεί να το αγοράσει.
- *Προσφορά πώλησης (ask)*: Είναι η προσφορά από έναν πωλητή που περιλαμβάνει την ποσότητα του αγαθού και την τιμή στην οποία επιθυμεί να το πουλήσει.



Να σημειωθεί ότι τα παραπάνω εμφανίζονται επίσης με την κοινή ονομασία *προσφορές (shouts ή offers)*.

Στη συνέχεια, ακολουθούν κάποιες επιπρόσθετες έννοιες που αφορούν στο σύνολο του συστήματος, δηλαδή όλο το πλήθος των πρακτόρων:

- *Εξέχουσα προσφορά αγοράς (outstanding bid)*: Είναι η μέγιστη ενεργή προσφορά αγοράς.
- *Εξέχουσα προσφορά πώλησης (outstanding ask)*: Είναι η ελάχιστη ενεργή προσφορά πώλησης.
- *Εύρος προσφορών αγοράς και πώλησης (bid-ask spread)*: Είναι η διαφορά μεταξύ της εξέχουσας προσφοράς αγοράς και της εξέχουσας προσφοράς πώλησης.
- *Μέγιστη τιμή (Maximum price)*: Είναι η μέγιστη τιμή για την οποία επιτρέπεται η υποβολή προσφορών.
- *Ελάχιστη αύξηση (Minimum increment)*: Είναι η ελάχιστη τιμή για την οποία επιτρέπεται η τροποποίηση μιας ήδη υπάρχουσας προσφοράς.

Αξίζει να αναφερθεί ότι μπορεί να υπάρξει σύστημα ΔΔ χωρίς περιορισμούς μέγιστης τιμής. Συνήθως όμως αυτό αποφεύγεται επειδή η λειτουργία της αγοράς επιβραδύνεται από μεγάλες προσφορές.

Τέλος, παρατίθενται οι παρακάτω χρονικές έννοιες, σύμφωνα με τις οποίες ουσιαστικά λειτουργεί το σύστημα:

- *Ημέρα εμπορίου (trading day)*: Είναι η χρονική περίοδος κατά την οποία δίνεται στους εμπορευόμενους το δικαίωμα υποβολής προσφορών. Μετά το τέλος της περιόδου αυτής, το δικαίωμα αίρεται και η αγορά «κλείνει»..
- *Γύρος εμπορίου (trading round)*: Είναι η χρονική περίοδος που μεσολαβεί μεταξύ δύο επιτυχημένων συναλλαγών.

Συνιστάται προσοχή καθώς ο όρος «ημέρα» συγχέεται πολλές φορές με τον όρο «γύρος» (round). Ο δεύτερος χρησιμοποιείται ευρέως για την επίτευξη συγχρονισμού στις στιγμές κατά τις οποίες οι εμπορευόμενοι δικαιούνται να

υποβάλουν προσφορές. Όπως είναι λογικό, μια ημέρα μπορεί να αποτελείται από πολλούς γύρους.

Οι παραπάνω ορισμοί καθίστανται αρκετά χρήσιμοι για τη συνέχεια της εργασίας. Παρόλα αυτά, δεν καλύπτουν το σύνολο των εννοιών, οι οποίες θα αναλυθούν παρακάτω, και για το λόγο αυτό θα αναγράφονται με πλάγια γράμματα

## 2.3. Μικροοικονομική θεωρία

### 2.3.1. Καμπύλες προσφοράς και ζήτησης

Η *μικροοικονομία (microeconomics)* είναι ο κλάδος της οικονομικής επιστήμης που απευθύνεται σε αγορές στις οποίες λαμβάνουν χώρα αγοραπωλησίες αγαθών σε επίπεδο πωλητών και αγοραστών που συνήθως αποτελούν νοικοκυριά ή επιχειρήσεις. Η μικροοικονομική θεωρία εξετάζει πως οι αποφάσεις των αγοραστών και πωλητών επιδρούν στην *προσφορά (supply)* και στη *ζήτηση (demand)* των εκάστοτε αγαθών. Η προσφορά και η ζήτηση καθορίζουν την *τιμή (price)* των αγαθών και οι τελευταία την *ποσότητα (quantity)* που προσφέρεται ή ζητείται.

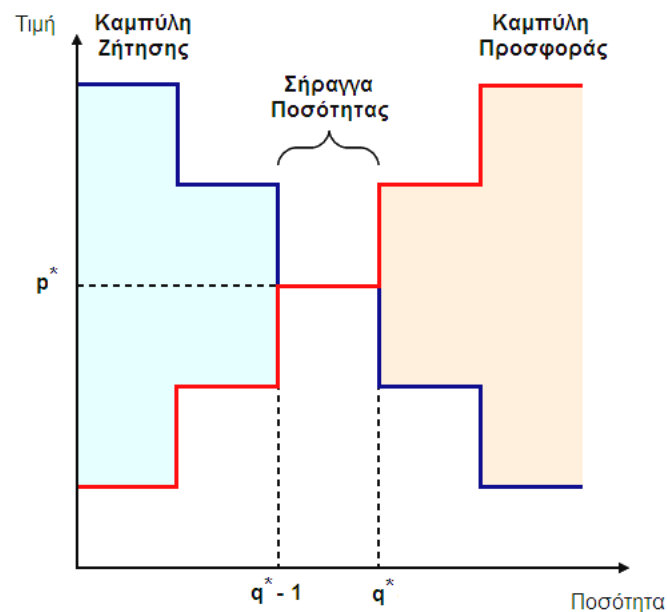
Κάθε αγοραπωλησία μεταξύ εμπορευόμενων του συστήματος αποτελεί μια *συναλλαγή (exchange)*. Όπως είναι λογικό, η τιμή των αγαθών της συναλλαγής πρέπει να βρίσκεται εντός των ορίων που ο εμπορευόμενος θεωρεί ότι τον συμφέρει. Γι' αυτό το λόγο κάθε εμπορευόμενος έχει μια *οριακή τιμή (limit price)* ή *ιδιωτική αξία (private value)* για ένα αγαθό. Η τελευταία για έναν αγοραστή αποτελεί τη μέγιστη προσφορά προς αγορά που επιθυμεί να υποβάλει και για έναν πωλητή την ελάχιστη προσφορά προς πώληση.

Όλες οι συναλλαγές γίνονται υπό την επίβλεψη ενός *μηχανισμού αγοράς (market institution)* για να πληρούνται και να ελέγχονται οι εκάστοτε κανόνες της δημοπρασίας. Εκτός αυτού, έπειτα από κάθε συναλλαγή πραγματοποιείται μια *εκκαθάριση της αγοράς (market clearing)*.

Ένας αποδεκτός κανόνας της μικροοικονομικής θεωρίας είναι ότι η τιμή του αγαθού είναι μέγεθος αντιστρόφως ανάλογο με τη ζήτηση και ανάλογο με την προσφορά για το συγκεκριμένο αγαθό. Έτσι, όσο υψηλότερη είναι η τιμή του

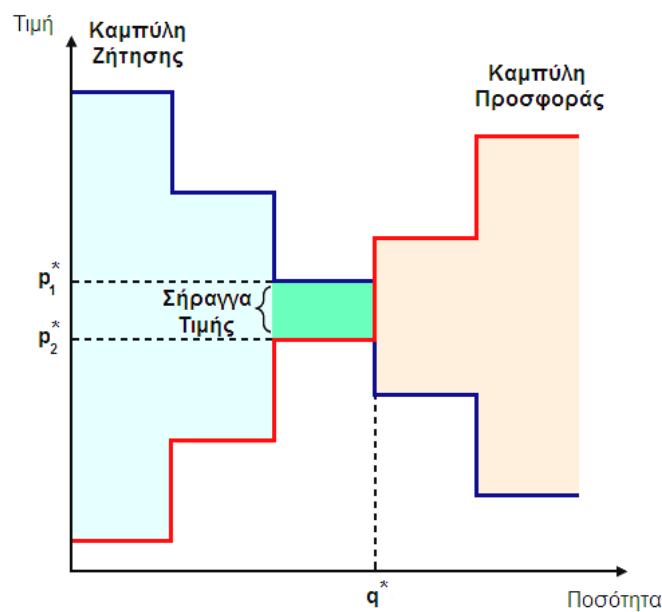
αγαθού τόσο χαμηλότερη είναι η ζήτηση, ενώ όσο χαμηλότερη είναι η τιμή τόσο χαμηλότερη θα είναι και η προσφορά. Τα παραπάνω είναι εύκολα κατανοητά με βάση το Σχήμα 2.1 που ακολουθεί.

Στο Σχήμα 2.1 διακρίνονται η καμπύλη προσφοράς και η καμπύλη ζήτησης όπου φαίνεται η απόδειξη του κανόνα που αναφέρθηκε προηγουμένως. Το σημείο τομής των καμπυλών αυτών ονομάζεται *ανταγωνιστικό σημείο ισορροπίας (competitive equilibrium – CE)* και στη γενική μορφή αποτελείται από το ζεύγος της τιμής ισορροπίας  $p^*$  και της ποσότητας ισορροπίας  $q^*$ . Η σημασία του σημείου ισορροπίας έγκειται στο γεγονός ότι εάν η ζήτηση είναι μεγαλύτερη από την προσφορά, η τιμή του αγαθού αυξάνεται, άρα γίνεται ασύμφορο για κάποιους αγοραστές, με συνέπεια τη μείωση της ζήτησης καθώς και συμφέρον για κάποιους πωλητές με συνέπεια την αύξηση της προσφοράς. Αντίστοιχα, εάν η προσφορά είναι μεγαλύτερη από την ζήτηση, η τιμή του αγαθού μειώνεται, άρα γίνεται συμφέρον για κάποιους αγοραστές, με συνέπεια τη αύξηση της ζήτησης καθώς και ασύμφορο για κάποιους πωλητές, με συνέπεια την μείωση της προσφοράς. Ως τελικό συμπέρασμα, είναι αντιληπτό ότι η αγορά, ο ανταγωνισμός δηλαδή των εμπορευόμενων, τείνει να οδηγήσει την αλληλουχία των συναλλαγών στο ανταγωνιστικό σημείο ισορροπίας.



Σχήμα 2.1 Καμπύλες προσφοράς και ζήτησης με σήραγγα ποσότητας

Ουσιαστικά η τιμή ισορροπίας  $p^*$  αποτελεί την ιδανική τιμή για την εξασφάλιση της μεγιστοποίησης του κέρδους όλων των εμπορευόμενων. Αντίστοιχα, η ποσότητα ισορροπίας  $q^*$  αποτελεί την ιδανική ποσότητα προς αυτόν τον σκοπό. Είναι όμως δυνατό η αγορά να επιτυγχάνει τέτοια «ευημερία» για περισσότερες από μία τιμές των προαναφερθέντων μεγεθών. Ως εκ τούτου είναι δυνατό να υπάρχει μια *σήραγγα ποσότητας (volume tunnel)*, όπως στο Σχήμα 2.1 ή μια *σήραγγα τιμής*, όπως στο Σχήμα 2.2:



Σχήμα 2.2 Καμπύλες προσφοράς και ζήτησης με σήραγγα τιμής

Καθώς τα αγαθά είναι διακριτό μέγεθος η ποσότητα ισορροπίας μπορεί να είναι  $q^* - 1$  ή  $q^*$ , ενώ αφού τα χρήματα είναι συνεχές μέγεθος η τιμή ισορροπίας μπορεί να πάρει τιμές από το διάστημα  $[p_1^*, p_2^*]$ .

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, όλοι οι εμπορευόμενοι έχουν μια οριακή τιμή, με βάση την οποία συναλλάσσονται οπότε είναι λογικό να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με αυτή. Έτσι, οι αγοραστές με οριακές τιμές μεγαλύτερες ή ίσες από την τιμή ισορροπίας και οι πωλητές με οριακές τιμές μικρότερες ή ίσες από την τιμή ισορροπίας λέγονται *ενδοπεριθωριακοί εμπορευόμενοι (intra-marginal ή infra-marginal traders)*. Αντίθετα, οι αγοραστές με οριακές τιμές μικρότερες ή ίσες από την τιμή ισορροπίας και οι πωλητές με οριακές τιμές μεγαλύτερες ή ίσες από την τιμή ισορροπίας λέγονται *εξωπεριθωριακοί εμπορευόμενοι (extra-marginal*

*traders*). Τέλος, οι εμπορευόμενοι με οριακές τιμές ίσες με την τιμή ισορροπίας λέγονται *περιθωριακοί εμπορευόμενοι (marginal traders)*.

### 2.3.2. Λειτουργία και αξιολόγηση της αγοράς

Στα μικροοικονομικά συστήματα όπως οι ΔΔ, υπάρχει πάντα ένα *δημοπράτης (auctioneer)* που διαθέτει πλήρη και τέλεια πληροφορία του συστήματος [5]. Στις πραγματικές αγορές είναι συνήθως ένα πρόσωπο ή οργανισμός μεγάλου κύρους, έμπιστος στους εμπορευόμενους. Ο δημοπράτης έχει γνώση των οριακών τιμών όλων των εμπορευόμενων και καθορίζει πλήρως τις συναλλαγές που θα διεξαχθούν, με κύριο μέλημα την *κοινωνική ευημερία (social welfare)*.

Μεταφράζοντας σε μαθηματικούς όρους, στόχος του δημοπράτη είναι να βρει το σύνολο των βέλτιστων ζευγών όλων των συναλλαγών, για να επιτύχει την όσο το δυνατόν αποτελεσματικότερη λειτουργία της αγοράς. Η αγορά εκτιμάται ως προς την αποτελεσματικότητά της με βάση κάποια κριτήρια. Προς επίδειξη αυτών θεωρούμε μια αγορά η οποία θα μελετηθεί στη συνέχεια.

Έστω μια συναλλαγή  $i$  μεταξύ ενός αγοραστή με οριακή τιμή  $v_{b_i}$  και ενός πωλητή με οριακή τιμή  $v_{s_i}$ . Θέτοντας ως τιμή του αγαθού για τη συγκεκριμένη συναλλαγή τη μεταβλητή  $p_i$ , προκύπτουν το πλεόνασμα του αγοραστή:

$$pr_{b_i} = v_{b_i} - p_i \quad (2.1)$$

και αντίστοιχα το πλεόνασμα του πωλητή:

$$pr_{s_i} = p_i - v_{s_i} \quad (2.2)$$

Να σημειωθεί ότι οι εμπορευόμενοι που δε συμμετέχουν στη συναλλαγή έχουν πλεόνασμα ίσο με 0. Το συνολικό, λοιπόν, πλεόνασμα όλων των συναλλαγών  $n$  αγοραστών και  $m$  πωλητών προκύπτει:

$$S_{total} = \sum_{i=1}^n pr_{b_i} + \sum_{j=1}^m pr_{s_j} = \sum_{i=1}^n (v_{b_i} - p_i) + \sum_{j=1}^m (p_j - v_{s_j}) \quad (2.3)$$

ή, για  $n = m$ :

$$S_{total} = \sum_{i=1}^n (pr_{b_i} + pr_{s_i}) = \sum_{i=1}^n (v_{b_i} - v_{s_i}) \quad (2.4)$$

Ως μέτρο σύγκρισης, είναι χρήσιμο να υπολογιστεί το μέγιστο δυνατό (θεωρητικό) πλεόνασμα όλων των εμπορευόμενων. Έστω, λοιπόν, το σύνολο των διατεταγμένων σε αύξουσα σειρά οριακών τιμών των αγοραστών:

$$V_b = \{v_{b_1}, v_{b_2}, \dots, v_{b_n}\} \quad y_{b_i} \leq v_{b_j} \quad \forall i < j \quad (2.5)$$

και το σύνολο των διατεταγμένων σε φθίνουσα σειρά οριακών τιμών των πωλητών:

$$V_s = \{v_{s_1}, v_{s_2}, \dots, v_{s_n}\} \quad y_{s_i} \geq v_{s_j} \quad \forall i < j \quad (2.6)$$

Καθώς οι τιμές είναι διατεταγμένες, ορίζονται δύο νέα σύνολα, λαμβάνοντας τα στοιχεία από τα δύο σύνολα για τα οποία οι οριακές τιμές των αγοραστών είναι μεγαλύτερες από αυτές των πωλητών. Το σύνολα αυτά ορίζονται ως εξής:

$$\begin{aligned} M_b &= \{v_{b_1}, v_{b_2}, \dots\} \\ M_s &= \{v_{s_1}, v_{s_2}, \dots\} \end{aligned} \quad \text{όπου} \quad v_{s_i} \geq v_{b_i}, \forall i \quad (2.7)$$

Η σημασία αυτών των συνόλων έγκειται στο γεγονός ότι ουσιαστικά οι συναλλαγές των ζευγών που ανήκουν σε αυτά αποτελούν όλες τις προσοδοφόρες συναλλαγές<sup>1</sup>. Με βάση τα παραπάνω αποδεικνύεται [6] ότι το μέγιστο δυνατό πλεόνασμα είναι:

$$S_{total, \max} = \sum_{i=1}^{\min(|M_b|, |M_s|)} (v_{b_i} - v_{s_i}) \quad (2.8)$$

Όπως είναι λογικό, για τον παραπάνω καταμερισμό, τα κέρδη των αγοραστών και των πωλητών μεγιστοποιούνται.

Με βάση τα μεγέθη που υπολογίστηκαν στις σχέσεις (2.4) και (2.8), ορίζεται το πρώτο κριτήριο της αγοράς:

---

<sup>1</sup> Θα μπορούσε να πει κανείς ότι παρατηρείται μια ομοιότητα της παραπάνω διαδικασίας με τον αλγόριθμο διτονικής ταξινόμησης (*bitonic sort*).

$$e\neq \frac{S_{total}}{S_{total,max}} = \frac{\sum_{i=1}^n (v_{b_i} - v_{s_i})}{\min(|M_1|, |M_2|) \sum_{i=1}^{\min(|M_1|, |M_2|)} (v_{b_i} - v_{s_i})} \quad (2.9)$$

Το παραπάνω μέγεθος λέγεται *αποδοτικότητα της αγοράς (market efficiency)* ή *αποδοτικότητα καταμερισμού (allocative efficiency)* και εκφράζει το λόγο του πλεονάσματος όλων των εμπορευόμενων προς το μέγιστο δυνατό πλεόνασμα.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι η αποδοτικότητα της αγοράς είναι ξεχωριστό μέγεθος από την κοινωνική ευημερία. Για την επίτευξη κοινωνικής ευημερίας είναι απαραίτητο οι συναλλαγές να πραγματοποιηθούν στην ίδια τιμή ισορροπίας. Η κοινωνική ευημερία ορίζεται ως εξής:

$$SW(p) = \sum_{i=1}^n v_{b_i} + \sum_{j=1}^m v_{s_j} = \sum_{i=1}^n \max(0, v_{b_i} - p) + \sum_{j=1}^m \max(0, p - v_{s_j}) \quad (2.10)$$

Η τιμή ισορροπίας είναι η τιμή για την οποία ισχύει  $SW(p) = e$ , οπότε υπολογίζεται:

$$p^* = \arg \max \left\{ \sum_{i=1}^n \max(0, v_{b_i} - p) + \sum_{j=1}^m \max(0, p - v_{s_j}) \right\} \quad (2.11)$$

Αντικαθιστώντας την τιμή αυτή στις σχέσεις (2.1) και (2.2), βρίσκονται το πλεόνασμα ενός αγοραστή και ενός πωλητή αντίστοιχα στο σημείο ισορροπίας:

$$epr_{b_i} = v_{b_i} - p^* \quad (2.12)$$

$$epr_{s_i} = p^* - v_{s_i} \quad (2.13)$$

Πραγματοποιώντας όμοιους συλλογισμούς με παραπάνω, και συνυπολογίζοντας τη διαφορά στο πλήθος των αγοραστών και των πωλητών, οδηγούμαστε σε ένα δεύτερο, πιο γενικό, τρόπο ορισμού της αποδοτικότητας της αγοράς:

$$e\neq \frac{S_{total}}{S_{total,max}} = \frac{\sum_{i=1}^n (v_{b_i} - p_i) + \sum_{j=1}^m (p_j - v_{s_j})}{\sum_{i=1}^n (v_{b_i} - p^*) + \sum_{j=1}^m (p^* - v_{s_j})} \quad (2.14)$$

Η αποδοτικότητα της αγοράς δε δείχνει προς τα πού «γέρνει» η αγορά, αν τελικά δηλαδή οι κυρίως κερδισμένοι της αγοράς είναι οι αγοραστές ή οι πωλητές. Γ' αυτό το λόγο ορίζεται η έννοια της *αγοραστικής δύναμης (market power)*, τόσο για τους αγοραστές:

$$mp_b = \frac{\sum_{i=1}^n pr_{b_i} - \sum_{i=1}^n epr_{b_i}}{\sum_{i=1}^n epr_{b_i}} \quad (2.15)$$

όσο και για τους πωλητές:

$$mp_s = \frac{\sum_{i=1}^m pr_{s_i} - \sum_{i=1}^m epr_{s_i}}{\sum_{i=1}^m epr_{s_i}} \quad (2.16)$$

Ουσιαστικά, ως αγοραστική δύναμη ορίζεται ο λόγος της διαφοράς του πραγματικού κέρδους από το κέρδος στο σημείο ισορροπίας προς αυτό. Στο σημείο αυτό, κρίνεται χρήσιμο να αναφερθεί η ύπαρξη ενός παρόμοιου μέγεθους, η *στρατηγική αγοραστική δύναμη (strategic market power)* των αγοραστών και των πωλητών. Η στρατηγική αγοραστική δύναμη ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς του πραγματικού κέρδους από το κέρδος του εμπορευόμενου εάν προσέφερε στην οριακή τιμή του προς το κέρδος στο σημείο ισορροπίας.

Παρόμοια με την αγοραστική δύναμη, χρησιμοποιείται η *διασπορά του κέρδους (profit dispersion)*, μέγεθος που προτάθηκε από τους Gode και Sunder [7]. Ορίζεται για το σύνολο των εμπορευόμενων ως:

$$pd = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (pr_i - epr_i)^2} \quad (2.17)$$

όπου  $pr_i$  το πραγματικό πλεόνασμα και  $epr_i$  το πλεόνασμα στο σημείο ισορροπίας για κάθε εμπορευόμενο. Το κύριο πλεονέκτημα του παραπάνω μεγέθους έγκειται στο εξής: εάν το πλεόνασμα ενός εμπορευόμενου είναι άνω του πλεονάσματος στην τιμή ισορροπίας και ενός δεύτερου εμπορευόμενου κάτω απ' αυτό, η συνολική αγοραστική δύναμη των εμπορευόμενων είναι πιθανό να λάβει μια μέση τιμή,



ανίκανη να αναδείξει τις προαναφερθέντες αποκλίσεις. Αντίθετα, οποιαδήποτε απόκλιση από το πλεόνασμα στο σημείο ισορροπίας προκαλεί αύξηση της διασποράς του κέρδους.

Εκτός όμως από τα παραπάνω, είναι πολλές φορές απαραίτητο να ανιχνευτεί η απόλυτη διαφορά από την τιμή ισορροπίας της αγοράς. Η ανάγκη αυτή έγινε επιτακτική καθώς υπάρχουν στρατηγικές εμπορευόμενων (π.χ. πράκτορες ZI-C) που επιτυγχάνουν υψηλή αποτελεσματικότητα αγοράς με συναλλαγές όμως που δεν πραγματοποιούνται κοντά στην τιμή ισορροπίας. Έτσι, χρησιμοποιείται συχνά το μέγεθος που είχε εισάγει ο Smith [8], ο *συντελεστής σύγκλισης (coefficient of convergence)* που ουσιαστικά εκφράζει την αστάθεια των τιμών στην αγορά:

$$\alpha = \frac{100\sigma^*}{p^*} \quad (2.18)$$

όπου  $\sigma^*$  η τυπική απόκλιση των τιμών που πραγματοποιούνται οι συναλλαγές από το σημείο ισορροπίας:

$$\sigma^* = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - p^*)^2} \quad (2.19)$$

## 2.4. Δομικά στοιχεία

Οι ΔΔ δύνανται να κατηγοριοποιηθούν με βάση συγκεκριμένα κριτήρια, τα οποία πολλές φορές ορίζουν ουσιαστικά το είδος της ΔΔ. Ουσιαστικά, το δομικά στοιχεία συνιστούν το πρωτόκολλο της αγοράς σύμφωνα με το οποίο η αγορά σχεδιάζεται και λειτουργεί για όλους τους εμπορευόμενους. Στη συνέχεια του κεφαλαίου θα αναλυθούν τα βασικά κριτήρια περιγραφής των αγορών ΔΔ.

### 2.4.1. Είδος συστήματος διαπραγμάτευσης

Υπάρχουν δύο είδη συστημάτων διαπραγμάτευσης. Το σύστημα *quote-driven* και το σύστημα *order-driven* [11]. Το σύστημα *quote-driven* αποτελεί ένα σύστημα κατά το οποίο ο δημοπράτης γνωστός και ως *market maker* αποτελεί κι αυτός εμπορευόμενο συμμετέχοντα σε αγοραπωλησίες. Χαρακτηριστικά παραδείγματα

αποτελούν η παγκόσμια αγορά NASDAQ ή το Χρηματιστήριο του Λονδίνου (London Stock Exchange – LSE), που έχουν έναν *εξειδικευμένο (specialist) market maker*. Αντίθετα, το Χρηματιστήριο του Σικάγο (Chicago Board of Options Exchange – CBOE) έχει *πολλαπλούς διακινητές (multiple dealer market makers)*.

Τα παραπάνω αναφέρονται βιβλιογραφικά, καθώς το σύστημα order-driven είναι αυτό που θα μας απασχολήσει περισσότερο στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής εργασίας. Σύμφωνα με αυτό, ο δημοπράτης δεν αποτελεί εμπορευόμενος και αντ' αυτού περιορίζεται στο να ελέγχει τις συναλλαγές και να παρέχει διάφορες πληροφορίες ανάλογα με τον τρόπο που σχεδιάστηκε η αγορά.

#### **2.4.2. Επαναληπτικότητα αγοράς**

Μια ΔΔ είναι πιθανό να διεκπεραιωθεί μόνο μια φορά (*one-way double auction*). Προφανώς τότε τα πράγματα είναι κάπως πιο απλά, καθώς τα δεδομένα κάθε αγαθού της δημοπρασίας είναι πολύ πιο συγκεκριμένα. Από την άλλη, οι δυνατότητες εκπαίδευσης των πρακτόρων δεν είναι ικανοποιητικές, ενώ προφανώς το μοντέλο αυτό δεν είναι αρκετά ρεαλιστικό. Σε αντιδιαστολή με τα προηγούμενα, υπάρχουν οι *επαναλαμβανόμενες (repeated) ΔΔ*.

#### **2.4.3. Διακριτότητα ρόλων των εμπορευόμενων**

Οι εμπορευόμενοι είναι πιθανό να έχουν διακριτούς ρόλους, δηλαδή να είναι είτε αγοραστές είτε πωλητές. Επίσης είναι εφικτό οι ρόλοι να μην είναι διακριτοί, δίνοντας έτσι τη δυνατότητα μεταπώλησης στους εμπορευόμενους, καθιστώντας τους δηλαδή ταυτόχρονα αγοραστές και πωλητές.

#### **2.4.4. Μορφοποίηση μηνυμάτων των εμπορευόμενων**

Τα μηνύματα των συναλλασσόμενων σε μια δημοπρασία συνήθως περιλαμβάνουν την τιμή και την ποσότητα του αγαθού της συναλλαγής που επιθυμούν. Η προσφορά για ένα πλήθος τεμαχίων των αγαθών, λέγεται *προσφορά πολλαπλών τεμαχίων (multiple-unit offer)*. Υπάρχει περίπτωση οι εμπορευόμενοι να είναι υποχρεωμένοι να συναλλάσσονται για *ένα τεμάχιο του αγαθού (single-item offers)* κάθε φορά. Η εν λόγω περίπτωση συναντάται συνήθως στη μικροοικονομική

θεωρία των ΔΔ [8] και σε εφαρμογές πρακτόρων [7,9,10], κυρίως για τη μελέτη του συστήματος αλλά και της συμπεριφοράς των πρακτόρων σε ένα πιο απλουστευμένο περιβάλλον συναλλαγών.

#### **2.4.5. Δικαιώματα πρόσβασης των εμπορευόμενων σε πληροφορίες**

Αποτελεί ένα από τα βασικότερα κριτήρια της αγοράς. Εκφράζει ποια δεδομένα προσφορών ή συναλλαγών θα είναι γνωστά στους εμπορευόμενους.

Οι επιλογές σχεδίασης είναι αρκετές. Σε κάποια συστήματα οι εμπορευόμενοι γνωρίζουν το σύνολο των προσφορών καθώς και την προέλευσή τους. Τις περισσότερες φορές προτιμάται μια πιο «κρυφή» λογική, αποκρύπτοντας είτε μόνο την προέλευση των προσφορών είτε τις προσφορές στο σύνολό τους, παρέχοντας μόνο την εξέχουσα τιμή των προσφορών. Στην πλειονότητα των περιπτώσεων χρησιμοποιούνται διάφορα ιεραρχικά μοντέλα, όπου οι διάφοροι τύποι εμπορευόμενων έχουν διαφορετικά δικαιώματα πρόσβασης. Είναι προφανές ότι ο εμπορευόμενος έχει απεριόριστη πρόσβαση στις προσφορές και στις συναλλαγές στις οποίες συμμετέχει άμεσα.

#### **2.4.6. Δυνατότητα τροποποίησης μιας υποβληθείσας προσφοράς**

Το συγκεκριμένο κριτήριο ουσιαστικά επιτρέπει ή απαγορεύει στους εμπορευόμενους να αλλάξουν την τιμή ή την ποσότητα του αγαθού για μια προσφορά που έχουν ήδη υποβάλλει. Η προσφορά αυτή δε θα πρέπει να έχει εκκαθαριστεί ή καταλήξει σε συναλλαγή. Η δυνατότητα αυτή έχει μεγάλη σημασία τόσο για τους εμπορευόμενους όσο και για την αγορά. Προτιμάται στα σύγχρονα συστήματα γιατί εξασφαλίζει μεγαλύτερη αποδοτικότητα αγοράς με βραδύτερη όμως σύγκλιση στο σημείο ισορροπίας.

#### **2.4.7. Κριτήριο αποδοχής προσφορών**

Για την επίτευξη σταθερότητας της αγοράς και για την ταχύτερη σύγκλιση στο σημείο ισορροπίας, είναι χρήσιμο να αποφεύγονται προσφορές και συναλλαγές με υπερβολικά υψηλές ή χαμηλές τιμές. Υπάρχουν μάλιστα παραδείγματα διαγωνισμών (π.χ. TAC SCM), όπου αυτό καθώς και το προηγούμενο κριτήριο

συνεισέφεραν στη δυνατότητα δέσμευσης μεγάλων ποσοτήτων αγαθών σε ακριβή τιμή, και στη συνέχεια απόσυρση της προσφοράς! Προς την αποφυγή ασταθειών, πολλές φορές ορίζεται μια μέγιστη και μια ελάχιστη τιμή για τα αγαθά με τα οποία συναλλάσσονται οι εμπορευόμενοι.

#### **2.4.8. Κριτήριο επιλογής ζευγών αγοραστών και πωλητών για συναλλαγή**

Το συγκεκριμένο κριτήριο είναι αρκετά σημαντικό καθώς συνδέεται άρρηκτα με τον τρόπο που γίνονται οι συναλλαγές στην αγορά, με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση διαφόρων μεγεθών, όπως π.χ. το συνολικό πλεόνασμα. Προφανώς, επηρεάζονται αντίστοιχα η αποδοτικότητα της αγοράς αλλά και η αγοραστική δύναμη των αγοραστών και των πωλητών. Ιδιαίτερα όσον αφορά τις προσφορές πολλαπλών τεμαχίων, είναι σημαντικό να οριστεί εάν είναι εφικτό να γίνει μερική εκκαθάριση της αγοράς, κάτι που ουσιαστικά επιτρέπει την πραγματοποίηση συναλλαγών από προσφορές διαφορετικής ποσότητας.

#### **2.4.9. Προσδιορισμός τιμής συναλλαγής για ζεύγη αγοραστή και πωλητή**

Κάθε συναλλαγή πραγματοποιείται σε μια συγκεκριμένη τιμή (συναλλαγής). Η τιμή αυτή μπορεί να είναι ίδια για όλες τις συναλλαγές της ίδιας ημέρας εμπορίου (*uniform price*) ή να διαφέρει από συναλλαγή σε συναλλαγή (*discriminatory price*). Η αγορά πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε όλες οι συναλλαγές να είναι μη επιζήμιες τόσο για τους αγοραστές όσο και για τους πωλητές. Εφόσον η τιμή της προσφοράς του πωλητή είναι μικρότερη από την τιμή στην οποία προτίθεται να αγοράσει ο αγοραστής, λαμβάνεται μια τιμή εντός του κλειστού διαστήματος που ορίζουν οι δύο τιμές. Σε αντίθετη περίπτωση δεν πραγματοποιείται η συναλλαγή.

#### **2.4.10. Χρονική στιγμή εκκαθάρισης αγοράς**

Η εκκαθάριση της αγοράς ουσιαστικά περιλαμβάνει την εκτέλεση όλων των συναλλαγών οι οποίες έχουν προκύψει από ζεύγη προσφορών καθώς και τη διαχείριση των υπόλοιπων εξωπεριθωριακών προσφορών. Η χρονική στιγμή κατά την οποία θα γίνει η εκκαθάριση αποτελεί έναν τρόπο χρονικού διαχωρισμού ανάμεσα στις ΔΔ. Διακρίνονται δύο βασικά είδη ΔΔ, οι *συνεχείς διμερείς*

δημοπρασίες (ΣΔΔ) (*Continuous Double Auctions – CDA* ή *Open-Outcry Double Auctions*) και οι διμερείς δημοπρασίες οργανισμού εκκαθάρισης (*Clearing House – CH* ή *Call Market*).

### **Διμερείς Δημοπρασίες Οργανισμού Εκκαθάρισης**

Σε μια ΔΔ οργανισμού εκκαθάρισης, οι προσφορές που γίνονται από τους εμπορευόμενους συγκεντρώνονται και όλες οι δυνατές συναλλαγές πραγματοποιούνται στο τέλος μιας ημέρας ή περιόδου εμπορίου. Η συγκεκριμένη στρατηγική αγγίζει υψηλότερες τιμές αποδοτικότητας (έως και 100%), κάτι που συμβαίνει αφού κατόπιν συλλογής των προσφορών, υπολογίζεται η κατάλληλη τιμή ισορροπίας και όλες οι συναλλαγές γίνονται σε αυτήν την τιμή. Οι ΔΔ οργανισμού εκκαθάρισης έχουν μελετηθεί αρκετά ενώ ακόμα και σήμερα βρίσκουν ευρεία εφαρμογή σε διάφορες αγορές, με κάποιες ίσως τροποποιήσεις στους βασικούς τους κανόνες.

### **Συνεχείς Διμερείς Δημοπρασίες**

Οι ΣΔΔ χαρακτηρίζονται από μια «ανυπομονησία», αφού οι συναλλαγές αρχίζουν να πραγματοποιούνται με την έναρξη της υποβολής προσφορών. Οποιαδήποτε στιγμή εμφανιστούν δύο τουλάχιστον προσφορές που διασταυρώνονται κατάλληλα ώστε η συναλλαγή να μην είναι ζημιογόνα και για τις δύο πλευρές, τότε η συναλλαγή πραγματοποιείται. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα μια σαφώς πιο δύσκολη στη σχεδίαση αγορά, αφού για την επίτευξη καλής αποδοτικότητας πρέπει να ληφθούν πολύ σοβαρά τα κριτήρια που αναφέρθηκαν παραπάνω, καθώς οι συναλλαγές δε πραγματοποιούνται όλες στην ίδια τιμή.

Οι ΣΔΔ έχουν πολύ πιο σύνθετο χαρακτήρα από τις ΔΔ οργανισμού εκκαθάρισης, όμως και οι δύο εμφανίζονται στις σύγχρονες αγορές. Προφανώς, υπάρχουν και άλλων ειδών ΔΔ, οι οποίες όμως μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σε μία από τις δύο αυτές κατηγορίες, αποτελώντας ουσιαστικά υβριδικές υλοποιήσεις τους.

#### **2.4.11. Κανόνες αποδοχής προσφορών**

Μετά τη διεκπεραίωση μιας ή περισσότερων συναλλαγών, υπάρχουν αρκετοί παράγοντες που πρέπει να ληφθούν υπόψη. Εκτός από την εκκαθάριση της αγοράς,

υπάρχει δυνατότητα θέσπισης κάποιων κανόνων, με σκοπό πάντα την ευημερία της αγοράς. Η αναγκαιότητα αυτών των κανόνων προκύπτει από τη δυσκολία ελέγχου μιας αγοράς ΣΔΔ και την προσπάθεια επίτευξης της καλύτερης δυνατής αποτελεσματικότητάς της. Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, είναι «επικίνδυνο» μια αγορά ΣΔΔ να αφεθεί χωρίς κανόνες καθώς καθίσταται δυνατή η απομάκρυνση από το σημείο ισορροπίας της αγοράς.

### **Ο κανόνας του Χρηματιστηρίου της Νέας Υόρκης**

Το πρόβλημα αυτό ανιχνεύτηκε όταν το Χρηματιστήριο της Νέας Υόρκης μετέβη από τις ΔΔ οργανισμού εκκαθάρισης στις ΣΔΔ το 1864. Ερευνώντας το ζήτημα, οι οικονομολόγοι συμπέραναν ότι χρειάζεται με κάποιον τρόπο οι προσφορές να συγκλίνουν με το χρόνο στην τιμή ισορροπίας. Έτσι αναπτύχθηκε ο *κανόνας βελτίωσης εύρους προσφορών αγοράς και πώλησης (bid-ask spread improvement rule)*. Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα, κάθε προσφορά αγοράς πρέπει να είναι αυστηρά μεγαλύτερη από την εξέχουσα προσφορά αγοράς ενώ κάθε προσφορά πώλησης πρέπει να είναι αυστηρά μεγαλύτερη από την εξέχουσα προσφορά πώλησης. Κατά αυτόν τον τρόπο, επιτυγχάνονται (συνήθως αργά) μια διαρκής αύξηση της τιμής της εξέχουσας προσφοράς αγοράς και ταυτόχρονη μείωση της εξέχουσας προσφοράς πώλησης. Ως αποτέλεσμα αυτού, υπάρχει η επιθυμητή σύγκλιση στην τιμή ισορροπίας.

Ο κανόνας αυτός, χάριν ιστορικών λόγων, είναι γνωστός και ως *κανόνας του Χρηματιστηρίου της Νέας Υόρκης (NYSE rule)*.

### **Ο κανόνας του Εκτιμώμενου Σημείου Ισορροπίας**

Ο κανόνας του *Εκτιμώμενου Σημείου Ισορροπίας (Estimated Equilibrium)* εισήχθη από τον Parsons και τους συνεργάτες του [20] με σκοπό τη μείωση της ρευστότητας των τιμών, την αποφυγή δηλαδή μεγάλων διακυμάνσεων στις τιμές των προσφορών των εμπορευόμενων. Ο κανόνας, που ουσιαστικά αποτελεί βελτίωση του κανόνα του Χρηματιστηρίου της Νέας Υόρκης, στηρίζεται στον ορισμό ενός «κυλιόμενου» παραθύρου που διατηρεί τις  $m$  τελευταίες επιτυχημένες συναλλαγές. Ο κανόνας περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$\tilde{p} = \frac{1}{m} \sum_{i=T-m+1}^T p_i \quad (2.20)$$

όπου  $p_i$  η τιμή της συναλλαγής  $i$  και  $\tilde{p}$  μια εκτίμηση του ανταγωνιστικού σημείου ισορροπίας για την τρέχουσα χρονική στιγμή  $T$ .

Εκτός των παραπάνω, εισήχθη η σταθερά  $\delta$  για να «χαλαρώσει» κάπως το εύρος των αποδεχομένων προσφορών, καθώς παρατηρήθηκαν προβλήματα στην αρχή των δημοπρασιών όπου οι τιμές προσφορών απείχαν αρκετά από το σημείο ισορροπίας. Έτσι, μια προσφορά αγοράς γίνεται δεκτή όταν η τιμή της είναι μικρότερη από  $\tilde{p} - \delta$  και μια προσφορά πώλησης γίνεται δεκτή όταν η τιμή της είναι μεγαλύτερη από  $\tilde{p} + \delta$ .

#### 2.4.12. Κανόνες τιμολόγησης

Κάθε συναλλαγή πραγματοποιείται σε μια συγκεκριμένη τιμή συναλλαγής. Η τιμή αυτή μπορεί να είναι ίδια για όλες τις συναλλαγές της ίδιας ημέρας εμπορίου (*uniform price*) ή να διαφέρει από συναλλαγή σε συναλλαγή (*discriminatory price*). Η αγορά πρέπει να είναι έτσι σχεδιασμένη ώστε όλες οι συναλλαγές να είναι μη επιζήμιες τόσο για τους αγοραστές όσο και για τους πωλητές. Εφόσον η τιμή της προσφοράς του πωλητή είναι μικρότερη από την τιμή στην οποία προτίθεται να αγοράσει ο αγοραστής, λαμβάνεται μια τιμή εντός του κλειστού διαστήματος που ορίζουν οι δύο τιμές. Σε αντίθετη περίπτωση δεν πραγματοποιείται η συναλλαγή.

#### Ο κανόνας k-τιμολόγησης

Ο κυριότερος κανόνας τιμολόγησης είναι αυτός της *k-τιμολόγησης* (*k-pricing rule*), που μελετήθηκε για πρώτη φορά από τους K. Chatterjee και W. Samuelson [13]. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι το όνομα του κανόνα λήφθηκε και ως είδος δημοπρασιών *k-ΔΔ* (*k-DA*). Σύμφωνα με αυτόν τον κανόνα, η τιμή συναλλαγής τοποθετείται στο κλειστό διάστημα  $[p_b, p_s]$ , όπου  $p_b$  και  $p_s$  η τιμή της προσφοράς αγοράς και πώλησης αντίστοιχα. Ο κανόνας για την απλουστευμένη περίπτωση δύο εμπορευόμενων περιγράφεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$p = k \cdot p_b + (1-k)p_s \quad [0,1] \quad k \in \quad (2.21)$$

Θεωρητικά το  $k$  μπορεί να λάβει οποιαδήποτε τιμή εντός του κλειστού διαστήματος  $[0,1]$ , στην πράξη όμως χρησιμοποιείται συνήθως η τιμή 0.5, μετά από έρευνα που την ανέδειξε ως βέλτιστη [12], η οποία θα παρατεθεί παρακάτω.

Όταν υπάρχει πλήθος αγοραστών και πωλητών η  $k$ -τιμολόγηση περιγράφεται και πάλι από τη σχέση (2.21), μόνο που αυτή τη φορά ως  $p_b$  ορίζεται η ελάχιστη εκ των προσφορών αγοράς και ως  $p_s$  η μέγιστη εκ των προσφορών πώλησης, για τις οποίες είναι δυνατή η διεκπεραίωση συναλλαγής. Από τη μαθηματική εξίσωση είναι προφανές ότι τιμές του  $k$  κοντά στο 0 ωθούν τους αγοραστές να προσφέρουν στην πραγματική τους τιμή ενώ τιμές που τείνουν στο 1 ωθούν τους πωλητές να προσφέρουν στην πραγματική τους τιμή. Συγκεκριμένα, για την τιμή 1 ορίζονται οι 1-ΔΔ (1-DA), γνωστές και ως ΔΔ Προσφοράς του Αγοραστή (*Buyer's Bid Double Auctions – BBDA*). Οι τελευταίες έχουν αξιόλογο ερευνητικό ενδιαφέρον, καθώς σύμφωνα με τον McAfee [14], εφόσον οι πωλητές είναι πάντα «ειλικρινείς», είναι σαφώς πιο εύκολο να αναλυθούν απ' ό,τι π.χ. μια ΣΔΔ.

Οι ΔΔ προσφοράς του αγοραστή αναλύθηκαν ευρέως, αρχικά από τον Williams που έδειξε την ύπαρξη σημείου ισορροπίας στις συγκεκριμένες ΔΔ για δύο εμπορευόμενους [15], ενώ ο ίδιος σε συνεργασία με τον Satterthwaite επέκτεινε την απόδειξή του για πλήθος εμπορευόμενων [16]. Οι συγκεκριμένες ΔΔ χρησιμοποιήθηκαν ως βήμα για την απόδειξη διάφορων θεωριών, με σκοπό τη μετέπειτα γενίκευση στο σύνολο των  $k$ -ΔΔ. Έτσι, αποδείχτηκε αρχικά, με τη βοήθεια ενός Bayesian Nash μοντέλου, ότι στις ΔΔ προσφοράς του αγοραστή οποιαδήποτε απόκλιση των προσφορών πωλητών από την οριακή τιμή τους είναι αντιστρόφως ανάλογη από τον αριθμό των εμπορευόμενων [17]. Στη συνέχεια η απόδειξη αυτή γενικεύτηκε για όλες τις  $k$ -ΔΔ [18]. Αυτό έχει μεγάλη σημασία, καθώς ουσιαστικά καταλήγει στην πρόταση ότι οι  $k$ -ΔΔ έχουν αποτελεσματικότητα όχι μικρότερη από 99%!

Αξίζει ακόμα να αναφερθούν οι *Τροποποιημένες ΔΔ Προσφοράς του Αγοραστή* (*Modified Buyer's Bid Double Auctions – MBBDA* ή *Modified Double Auctions – MDA*). Στις τελευταίες, η τιμή δεν καθορίζεται ως η ελάχιστη εκ των προσφορών αγοράς



που οδηγεί σε συναλλαγή, αλλά ως η ελάχιστη εκ των προσφορών αγοράς η οποία βρίσκεται εξ αριστερών του σημείου τομής των καμπύλων προσφοράς και ζήτησης [19].

Τέλος, ο Phelps και οι συνεργάτες του [12], διερευνούν με δύο μεθόδους τη βελτιστοποίηση του κανόνα αναζητώντας τη βέλτιστη τιμή του  $k$  λαμβάνοντας υπόψη την αποδοτικότητα της αγοράς και την αγοραστική δύναμη (στρατηγική και μη) των αγοραστών και των πωλητών. Αρχικά, πραγματοποιούν πειράματα με διάφορα  $k$  και υπολογίζονται τα προαναφερθέντα μεγέθη. Στη δεύτερη μέθοδο η βέλτιστη τιμή του  $k$  υπολογίζεται με χρήση τεχνικών γενετικού προγραμματισμού του Koza. Αποτέλεσμα της ανάλυσης ήταν μια σχέση ισοδύναμη με την (2.21), θέτοντας στην τελευταία όπου  $k$  το 0.5.

### **Ο κανόνας N-τιμολόγησης**

Ο κανόνας *N-τιμολόγησης* (*N-pricing rule*) είναι ένας εξίσου σημαντικός κανόνας που αποτελεί ουσιαστικά γενίκευση του κανόνα *k-τιμολόγησης*. Ο εν λόγω κανόνας στοχεύει ουσιαστικά στη μείωση της ρευστότητας των τιμών συναλλαγών στις ΣΔΔ, με σκοπό την αποτελεσματικότερη σύγκλιση των τιμών των εμπορευόμενων στο σημείο ισορροπίας. Σύμφωνα με τον κανόνα, που εισήχθη από τον Parsons και τους συνεργάτες του [20], ορίζεται ένα «κυλιόμενο» παράθυρο μεγέθους  $N$  εντός του οποίου βρίσκεται τα τελευταία ζεύγη προσφορών αγοράς και πώλησης που οδήγησαν σε συναλλαγές. Υπολογίζεται, έτσι, η τιμή της επόμενης συναλλαγής.

Ο κανόνας περιγράφεται πλήρως από την παρακάτω εξίσωση:

$$p = \frac{1}{2N} \sum_{i=T-N+1}^T (p_{b_i} + p_{s_i}) \quad \text{όπου} \quad p_{b_T} \leq p \leq p_{s_T} \quad (2.22)$$

όπου έστω  $i$  μια συναλλαγή εξ' αυτών που πραγματοποιήθηκαν, ενώ τα  $p_{b_i}$  και  $p_{s_i}$  είναι οι τιμές της προσφοράς αγοράς και πώλησης αντίστοιχα για την εν λόγω συναλλαγή. Το  $T$  αντιπροσωπεύει την τρέχουσα συναλλαγή, της οποίας η τιμή προφανώς ανήκει στο διάστημα που ορίζουν η τρέχουσα προσφορά αγοράς και η τρέχουσα αγορά πώλησης. Είναι χαρακτηριστικό ότι για τιμή του  $N$  ίση με 1, συνίσταται μια αγορά ΣΔΔ, συμπίπτοντας ουσιαστικά με τον κανόνα *k-τιμολόγησης* για τιμή του  $k$  ίση με 0.5. Αντίθετα, όταν το  $N$  ισούται με το συνολικό πλήθος των

επιτυχημένων προσφορών, τότε η αγορά αντιστοιχεί σε ΔΔ Οργανισμού Εκκαθάρισης. Δηλαδή, το  $N$  βρίσκεται εντός ενός συνεχούς χώρου ΔΔ με τις ΣΔΔ να αποτελούν το ένα άκρο και τις ΔΔ Οργανισμού Εκκαθάρισης το άλλο.

Τέλος, είναι αξιοσημείωτο ότι ο κανόνας  $N$ -τιμολόγησης επιτυγχάνει μείωση της ρευστότητας των τιμών των συναλλαγών, χωρίς να συνίσταται αντίστοιχη μείωση της αποδοτικότητας της αγοράς. Αντί αυτού, τροποποιούνται οι αγοραστικές δυνάμεις των εμπορευόμενων καθώς τα κέρδη τους απλά αναδιανέμονται.

## 2.5. Στοιχεία συμπεριφοράς

Η συμπεριφορά των εμπορευόμενων αποτελεί ίσως το πιο ενδιαφέρον τμήμα μιας αγοράς ΣΔΔ και όπως είναι λογικό αφορά άμεσα την αγορά. Σύμφωνα με τους Satterthwaite και Williams [16], δεν υπάρχει κάποια άριστα ανεπτυγμένη θεωρία που να εξηγεί την είσοδο των πρακτόρων στην αγορά και την εκμάθηση των στρατηγικών ισορροπίας. Για να περιγραφεί η συμπεριφορά των πρακτόρων, έχει σημασία ο τρόπος με τον οποίο οι πράκτορες καθορίζουν την τιμή της επόμενης προσφοράς που πρόκειται να υποβάλουν. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται *διαδικασία διαμόρφωσης της τιμής (price formation process)*.

Σύμφωνα με διάφορες δημοσιεύσεις (όπως π.χ. η [21]), είναι δυνατή η κατηγοριοποίηση των στρατηγικών πλειοδοσίας των πρακτόρων με βάση τα παρακάτω κύρια κριτήρια:

- Προσαρμοστικότητα (Adaptiveness)

Μια στρατηγική χαρακτηρίζεται *προσαρμοστική (adaptive)* όταν ο πράκτορας λαμβάνει υπόψη δεδομένα παλαιότερων γύρων εμπορίου για τη διαμόρφωση της τιμής, κάτι που συνδράμει σε πιο σύνθετες υλοποιήσεις αλλά και πιο αποτελεσματικές. Αντίθετα μια *μη προσαρμοστική (non-adaptive)* στρατηγική βασίζεται μόνο στα παρόντα δεδομένα, κάτι που ασφαλώς την κάνει πιο απλή. Ειδική περίπτωση αποτελούν οι στρατηγικές ενισχυτικής μάθησης (reinforcement learning) που χειρίζονται μεν δεδομένα παρελθόντων γύρων εμπορίου, βασίζονται δε μόνο στα δικά τους δεδομένα. Για το παρόν κείμενο, θα οριστούν ως *αυτό-προσαρμοστικές (self-adaptive)*.

- Προγνωστικότητα (Predictivity)

Μια στρατηγική είναι δυνατό να αποκαλείται *προγνωστική (predictive)* ή *μη προγνωστική (non-predictive)*. Ένα πράκτορας μη προγνωστικής στρατηγικής βασίζεται μόνο στα παρόντα δεδομένα για να υποβάλει τις προσφορές του. Αντίθετα, σε μια προγνωστική υλοποίηση, ο πράκτορας αποπειράται να κατασκευάσει ένα είδος πρόβλεψης της μελλοντικής κατάστασης της αγοράς με σκοπό να συναλλαχθεί «έξυπνα» προς όφελός του στο (βραχυχρόνιο συνήθως) μέλλον. Συνήθως, για να το επιτύχει αυτό είναι απαραίτητο να χρησιμοποιήσει δεδομένα του παρελθόντος, κάτι που σημαίνει ότι μια προγνωστική στρατηγική είναι σίγουρα προσαρμοστική. Όσον αφορά τις αυτό-προσαρμοστικές στρατηγικές, θα ληφθεί αυθαίρετα η μη προγνωστικότητά τους.

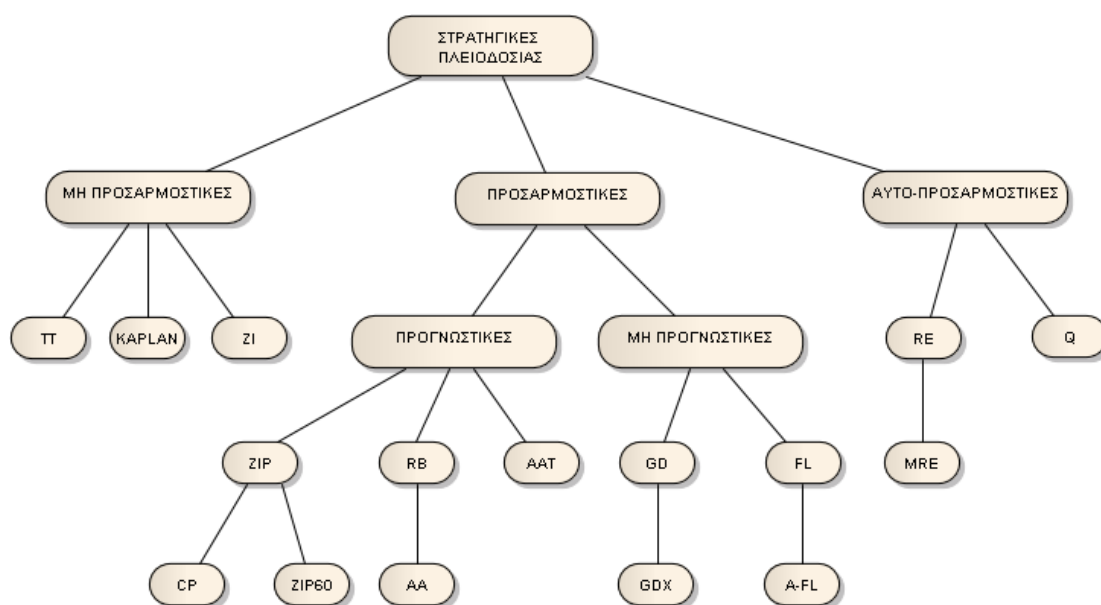
Οι στρατηγικές πλειοδοσίας που έχουν αναπτυχθεί παρατίθενται επιγραμματικά στον παρακάτω πίνακα συμπεριλαμβάνοντας χρήσιμα στοιχεία προς διευκόλυνση του αναγνώστη:

Πίνακας 2.1 Στρατηγικές πλειοδοσίας

| ΟΡΟΛΟΓΙΑ | ΣΤΡΑΤΗΓΙΚΗ   | ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΕΣ                                      | ΕΤΟΣ ΔΗΜΟΣΙΕΥΣΗΣ |
|----------|--|--|------------------|
| TT       | Φιλαλήθης (Truth Telling)  | -  | -                |
| Kaplan   | Kaplan / sniping   | T. Kaplan  | 1990             |
| ZI       | Μηδενικής Ευφυΐας (Zero Intelligence)                                    | D. Gode and S. Sunder                            | 1993             |
| ZIP      | Επιπρόσθετης Μηδενικής Ευφυΐας (Zero Intelligence Plus)                  | D. Cliff and J.Bruten                            | 1997             |
| CP       | Chris Preist   | C. Preist and M.Tol                              | 1998             |
| ZIP60    | Επιπρόσθετης Μηδενικής Ευφυΐας 60 παραμέτρων (Zero Intelligence Plus 60) | D. Cliff   | 2005             |
| RE       | Roth-Erev  | A. Roth and I. Erev                              | 1995             |
| MRE      | Τροποποιημένη Roth-Erev (Modified Roth-Erev)                             | J. Nicolaisen, V. Petrov and L. Tesfatsion       | 2001             |
| GD       | Gjerstad-Dickhaut  | S. Gjerstad and J. Dickhaut                      | 1998             |
| GDX      |  | G. Tesauero and J. Bredin                        | 2002             |
| FL       | Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic based)                                      | M. He and H. Leung & N. Jennings                 | 2003             |
| A-FL     | Προσαρμοστική Ασαφούς Λογικής (Fuzzy Logic based)                        | M. He and H. Leung & N. Jennings                 | 2003             |
| RB       | Risk-Based   | P. Vytelingum, R. Dash, E. David and N. Jennings | 2004             |
| AA       | Προσαρμοστικής Επιθετικότητας (Adaptive-Aggressiveness)                  | P. Vytelingum and D. Cliff & N. Jennings         | 2008             |
| AAT      | Προσαρμοστικής συμπεριφοράς (Adaptive ATtitude)                          | H. Ma and H. Leung                               | 2005             |
| Q        | Q-strategy   | N. Borissov and N. Wirström                      | 2008             |

Οι παραπάνω στρατηγικές αποτελούν ένα αντιπροσωπευτικό δείγμα διαδικασιών διαμόρφωσης της τιμής. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι πολλές από τις παραπάνω στρατηγικές έχουν ομοιότητες μεταξύ τους, ενώ σίγουρα δεν αποτελούν τις μοναδικές που υπάρχουν. Στη συνέχεια θα αναλυθούν εκτενώς κάποιες εξ αυτών, κυρίως οι πρωτοποριακές μέθοδοι πάνω στις οποίες στηρίζονται και οι παρεμφερείς στρατηγικές.

Πριν όμως από την ανάλυση των στρατηγικών, κρίνεται χρήσιμη μια κατηγοριοποίησή τους, αυτή τη φορά σε μεγάλες «οικογένειες» στρατηγικών, έτσι ώστε αποσαφηνιστούν οι διάφορες μέθοδοι που ακολουθούν οι στρατηγικές, καθώς και να διευκολυνθεί η έρευνα πάνω σ' αυτές. Στο παρακάτω σχήμα διακρίνονται οι κυριότερες στρατηγικές, μαζί με τις διάφορες βελτιώσεις τους (παρεμφερείς στρατηγικές), κατηγοριοποιημένες με βάση το αν είναι προσαρμοστικές ή όχι (ή αυτό-προσαρμοστικές) και στη συνέχεια με βάση την προγνωστικότητά τους.



Σχήμα 2.3 Σχεδιάγραμμα των κυριότερων στρατηγικών πλειοδοσίας

Τα παραπάνω είναι ενδεικτικά, καθώς οι στρατηγικές βελτιώνονται συνέχεια και είναι πιθανό να αλλάξει η φύση μιας στρατηγικής π.χ. μια μη προσαρμοστική στρατηγική να επιδέχεται βελτιώσεις που την κάνουν προσαρμοστική.

### 2.5.1. Φιλαλήθης στρατηγική

Η *φιλαλήθης στρατηγική* (*Truth Telling – TT*) αποτελεί την απλούστερη όλων, τυγχάνει όμως εκτεταμένης χρήσης για έρευνα σε διαφορετικές αγορές. Σύμφωνα με αυτή, ο πράκτορας προσφέρει πάντα στην οριακή τιμή του. Η φιλαλήθης στρατηγική είναι μη προσαρμοστική, μη προγνωστική ενώ κάνει συνήθως χρήση μόνον εσωτερικής πληροφόρησης. Με δεδομένη την ανυπαρξία κάποιου ιδιαίτερου αλγόριθμου στην εν λόγω στρατηγική, δεν υπάρχει πνευματικός ιδιοκτήτης της.

### 2.5.2. Στρατηγική Karlan

Μια από τις πρώτες στρατηγικές πλειοδοσίας που αναπτύχθηκαν είναι η στρατηγική *Karlan* που πήρε το όνομα της από τον δημιουργό της, τον Todd Karlan [22]. Η βασική ιδέα της «πονηρής» αυτής στρατηγικής είναι ότι ο πράκτορας παραμένει αδρανής στην αρχή κάθε γύρου εμπορίου και προσπαθεί να αρπάξει μια επικερδή προσφορά τελευταία στιγμή, κυριολεκτικά μέσα από τα χέρια των υπόλοιπων πρακτόρων. Προφανώς, η στρατηγική *Karlan* λειτουργεί με έναν *παράγοντα χρόνου* (*time factor*) ο οποίος είναι η χρονική στιγμή υποβολής νέας προσφοράς από τον πράκτορα. Λόγω αυτού αντιλαμβάνεται κανείς τη «sniping» λειτουργία της στρατηγικής *Karlan*.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ένας πράκτορας με στρατηγική *Karlan* δεν έχει κάποιο ιδιαίτερο τρόπο υπολογισμού της τιμής της προσφοράς του, κάτι που σημαίνει ότι προφέρει απλώς στην οριακή τιμή του. Το γεγονός, όμως, ότι κέρδισε όλες τις στρατηγικές στο Τουρνουά Διμερών Δημοπρασιών το 1990 στο Santa Fe υποδεικνύει ότι μια σχετικά απλή στρατηγική μπορεί να είναι αρκετά ισχυρή.

### 2.5.3. Στρατηγική Μηδενικής Ευφυΐας

Η στρατηγική *Μηδενικής Ευφυΐας* (*Zero Intelligence – ZI*) αναπτύχθηκε το 1993 από τους D. Gode και S. Sunder [7]. Όπως άλλωστε φαίνεται και από την ονομασία της η στρατηγική δρα επιπόλαιο, υποβάλλοντας προσφορές με τυχαίο τρόπο. Ο πράκτορας που χρησιμοποιεί την εν λόγω στρατηγική δεν είναι προσαρμοστικός, δεν προβλέπει το μέλλον και γενικά δε χρησιμοποιεί πληροφορίες.

Προς τη μελέτη των διάφορων συμπεριφορών, ορίζονται δύο υποκατηγορίες της ΖΙ στρατηγικής, η στρατηγική *Μηδενικής Ευφυΐας Απεριόριστου Κεφαλαίου* (*Zero Intelligence Unconstrained – ZI-U*) και η στρατηγική *Μηδενικής Ευφυΐας Περιορισμένου Κεφαλαίου* (*Zero Intelligence Constrained – ZI-C*).

Ένας ZI-C πράκτορας ουσιαστικά περιορίζεται από το γεγονός ότι δεν του επιτρέπεται να κάνει μια συναλλαγή που θα τον οδηγήσει σε ζημία. Έτσι, ένας αγοραστής υποβάλλει προσφορές που λαμβάνονται τυχαία από μια ομοιόμορφη κατανομή μεταξύ της ελάχιστης αποδεκτής τιμής της αγοράς και της οριακής τιμής του. Αντίστοιχα, ένας πωλητής υποβάλλει προσφορές μεταξύ της οριακής τιμής του και της μέγιστης αποδεκτής τιμής της αγοράς.

Ένας ZI-U πράκτορας είναι ελεύθερος να υποβάλλει προσφορές μεταξύ της ελάχιστης και της μέγιστης τιμής της αγοράς, ακόμα κι αν αυτές οι προσφορές συντελούν στην ύπαρξη ζημίας, χρησιμοποιώντας και σε αυτήν την περίπτωση ομοιόμορφη κατανομή.

Παρά την τυχαιότητα της εν λόγω στρατηγικής, αποτελεί ουσιαστικά μια καλή αρχή για την ανάπτυξη περαιτέρω στρατηγικών ενώ είναι αξιοσημείωτο ότι μια αγορά ΖΙ πρακτόρων εμφανίζει ικανοποιητικά επίπεδα αποδοτικότητας και ταχύτατη σύγκλιση στο σημείο ισορροπίας [23]. Τέλος, θα πρέπει να αναφερθεί ότι στη βιβλιογραφία (π.χ. [29]) κάποιες φορές η στρατηγική ZI-C αναφέρεται καταχρηστικά ως στρατηγική ΖΙ.

#### **2.5.4. Στρατηγική Επιπρόσθετης Μηδενικής Ευφυΐας**

Το 1997, οι D. Cliff και J. Bruten δημοσίευσαν έρευνα [10] χαρακτηρίζοντας τη στρατηγική ΖΙ ως ανεπαρκή για τη βέβαιη οδήγηση της αγοράς στο σημείο ισορροπίας. Στα πλαίσια της εν λόγω έρευνας, ανέπτυξαν μια νέα στρατηγική, τη στρατηγική *Επιπρόσθετης Μηδενικής Ευφυΐας* (*Zero Intelligence Plus – ZIP*). Σύμφωνα με αυτή τη στρατηγική, ο πράκτορας έχει ένα *περιθώριο κέρδους* (*profit margin*), το οποίο ουσιαστικά καθορίζει τη διαφορά μεταξύ της οριακής τιμής του και της τιμής της προσφοράς που πρόκειται να υποβάλει. Το περιθώριο κέρδους αποτελεί και τον πυρήνα της στρατηγικής αφού με βάση της αυξομειώσεις του ο πράκτορας επιχειρεί να είναι πάντα ανταγωνιστικός.

Στην αρχή της ημέρας εμπορίου, ο πράκτορας εκκινεί με ένα μικρό περιθώριο κέρδους, το οποίο αυξάνεται ή μειώνεται σύμφωνα με συγκεκριμένες καταστάσεις, αναφερόμενοι πάντα στην περίπτωση όπου ο πράκτορας είναι ακόμη ενεργός, δεν έχει δηλαδή εξαντλήσει όλες τις συναλλαγές του. Έτσι, ένας ενεργός αγοραστής αυξάνει το περιθώριο κέρδους του εάν η τιμή του είναι μικρότερη από αυτή της προηγούμενης προσφοράς αγοράς που οδήγησε σε συναλλαγή επειδή διαπιστώνει ότι μπορεί να αποκτήσει ένα αγαθό σε μικρότερη τιμή. Αντίστοιχα, ένας ενεργός πωλητής αυξάνει το περιθώριο κέρδους του εάν η τιμή του είναι μικρότερη από αυτή της προηγούμενης προσφοράς πώλησης που οδήγησε σε συναλλαγή επειδή διαπιστώνει ότι μπορεί να προσφέρει το αγαθό σε μεγαλύτερη τιμή.

Από την άλλη, οι πράκτορες πρέπει να είναι σε θέση να μειώσουν το περιθώριο κέρδος τους για να παραμένουν ανταγωνιστικοί. Εάν κάθε φορά που απορρίπτεται μια προσφορά πώλησης οι αγοραστές μειώνουν το περιθώριο κέρδους, τότε δίνεται στους πωλητές η δυνατότητα να επηρεάσουν τη τάση των τιμών, με λίγα λόγια να «ακριβύνουν» τα προϊόντα. Αντίστοιχο πρόβλημα υπάρχει και με τη μείωση του περιθωρίου κέρδους των πωλητών, οπότε δίνεται αγοραστική δύναμη στους αγοραστές. Έτσι, κάθε φορά που ένας αγοραστής υποβάλλει μια προφορά αγοράς που δεν οδηγεί σε συναλλαγή είναι απαραίτητο όλοι οι αγοραστές που προσέφεραν σε τιμή μεγαλύτερη ή ίση με την αποτυχημένη προσφορά να μειώσουν το περιθώριο κέρδους τους. Αντίστοιχα, σε κάθε αποτυχημένη προσφορά πώλησης οι πωλητές με τιμή μεγαλύτερη ή ίση της τιμής προσφοράς πρέπει να μειώσουν το περιθώριο κέρδος τους.

Ακόμα, πρέπει να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της συμπεριφοράς του κάθε πράκτορα με τους ομοειδείς του, καθώς εάν ένας πωλητής διαπιστώσει ότι η τιμή της συναλλαγής είναι μικρότερη από αυτήν της προσφοράς του και δεν την αλλάξει, είναι πιθανό να μην είναι αρκετά ανταγωνιστικός ως προς τους συναδέλφους του. Έτσι κάθε πωλητής πρέπει να μειώνει το περιθώριο κέρδους του όταν είναι έτοιμος να προσφέρει σε μεγαλύτερη τιμή από αυτήν της τελευταίας συναλλαγής. Αντίστοιχα, ένας αγοραστής πρέπει να μειώνει το περιθώριο κέρδους του σε περίπτωση που η τιμή τελευταίας συναλλαγής είναι μεγαλύτερη από την τιμή προσφοράς του.



Σύμφωνα με τα παραπάνω προκύπτουν οι αλγόριθμοι της στρατηγικής ZIP για τους πωλητές (Σχήμα 2.4) και τους αγοραστές (Σχήμα 2.5), όπου  $s_i$  ο πωλητής  $i$  και  $p_i$  η τιμή που επρόκειτο να προσφέρει, ενώ  $q$  η τιμή της τελευταίας συναλλαγής. Αντίστοιχα ορίζονται οι μεταβλητές των αγοραστών.

```

Αν (τελευταία προσφορά έγινε αποδεκτή στην τιμή  $q$ ) τότε
{
    κάθε πωλητής  $s_i$  για τον οποίο  $p_i \leq q$  αυξάνει το περιθώριο κέρδους του
    Αν (τελευταία προσφορά ήταν προσφορά αγοράς) τότε
        κάθε ενεργός πωλητής  $s_i$  για τον οποίο  $p_i \geq q$  μειώνει το περιθώριο κέρδους του
    }
Αλλιώς
{
    Αν (τελευταία προσφορά ήταν προσφορά πώλησης) τότε
        κάθε ενεργός πωλητής  $s_i$  για τον οποίο  $p_i \geq q$  μειώνει το περιθώριο κέρδους του
    }

```

Σχήμα 2.4 Αλγόριθμος στρατηγικής ZIP πωλητών

```

Αν (τελευταία προσφορά έγινε αποδεκτή στην τιμή  $q$ ) τότε
{
    κάθε αγοραστής  $b_i$  για τον οποίο  $p_i \geq q$  αυξάνει το περιθώριο κέρδους του
    Αν (τελευταία προσφορά ήταν προσφορά αγοράς) τότε
        κάθε ενεργός αγοραστής  $b_i$  για τον οποίο  $p_i \leq q$  μειώνει το περιθώριο κέρδους του
    }
Αλλιώς
{
    Αν (τελευταία προσφορά ήταν προσφορά πώλησης) τότε
        κάθε ενεργός αγοραστής  $b_i$  για τον οποίο  $p_i \leq q$  μειώνει το περιθώριο κέρδους του
    }

```

Σχήμα 2.5 Αλγόριθμος στρατηγικής ZIP αγοραστών

Το περιθώριο κέρδους, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, είναι το μέγεθος που καθορίζει τη διαφορά μεταξύ της οριακής τιμής ενός πράκτορα και της τιμής της προσφοράς που πρόκειται να υποβάλει.

Αναλυτικότερα, έστω ότι τη χρονική στιγμή  $t$  ένας ZIP πωλητής  $s_i$  υπολογίζει την τιμή της επόμενης προσφοράς του  $p_i$  για ποσότητα αγαθού ίση με  $j$ . Έστω επίσης η οριακή τιμή του πωλητή  $\lambda_{i,j}$  καθώς και ένα μέγεθος  $\mu_i$  που σχετίζεται με το περιθώριο κέρδους. Τότε ισχύει η εξής σχέση:

$$p_i(t) = \lambda_{i,j} \cdot (1 + \mu_i(t)) \quad (2.23)$$

Σε αυτή τη σχέση, η τιμή του  $\mu_i$  είναι ανάλογη του περιθωρίου κέρδους του πωλητή με τη συνθήκη  $\mu_i \in [0, \infty)$ . Για την περίπτωση ενός αγοραστή, το  $\mu_i$  είναι αντιστρόφως ανάλογο του περιθωρίου κέρδους του και ισχύει η συνθήκη  $\mu_i \in [-1, 0]$ . Θα μπορούσε να πει κανείς (καταχρηστικά) ότι το περιθώριο κέρδους ορίζεται ως η απόλυτη τιμή του μεγέθους  $\mu_i$ . Στα πλαίσια του συγκεκριμένου κειμένου, χάριν απλότητας, ας θεωρηθεί η θετική περίπτωση ορίζοντας δηλαδή το  $\mu_i$  ως περιθώριο κέρδους. Η τιμή του  $\mu_i$  πρέπει να μεταβάλλεται δυναμικά, ανάλογα με συγκεκριμένες μεταβλητές της αγοράς.

Οι D. Cliff και J. Bruten χρησιμοποίησαν ως κανόνα προσαρμογής (ή ενημέρωσης) ή κανόνα εκμάθησης (*learning rule*) τον κανόνα δέλτα (*delta rule*) των Widrow-Hoff. Έτσι, κατέληξαν [10] ότι μεταβαίνοντας από τη χρονική στιγμή  $t$  στην  $t+1$ , το περιθώριο κέρδους ακολουθεί την παρακάτω σχέση:

$$\mu_i(t+1) = \frac{p_i(t) + \Gamma_i(t)}{\lambda_{i,j}} - 1 \quad (2.24)$$

όπου το  $\mu_i(0)$  λαμβάνεται από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[0.1, 0.5]$ . Σε αυτή τη σχέση, πέρα από τα γνωστά μεγέθη, ορίζεται το  $\Gamma_i$  αντί της γνωστής τιμής δέλτα  $\Delta_i$  των Widrow-Hoff.

Η  $\Delta_i$  ενημερώνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\Delta_i(t) = \beta_i \cdot (\tau_i(t) - p_i(t)) \quad (2.25)$$

όπου  $\beta_i$  ο συντελεστής εκμάθησης (*learning rate*) που προσδιορίζει το ρυθμό σύγκλισης της τιμής της προσφοράς προς την τιμή στόχου (*target price*)  $\tau_i$ .

Η τιμή του  $\tau_i$  υπολογίζεται ως εξής:

$$\tau_i(t) = R_i(t) \cdot q(t) + A_i(t) \quad (2.26)$$

όπου η τιμή της τελευταίας συναλλαγής πολλαπλασιάζεται με το  $R_i$ , έναν συντελεστή που παράγεται τυχαία και λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $(1, 1.05]$  για την αύξηση του περιθωρίου κέρδους ή στο διάστημα  $[0.95, 1)$  για την μείωσή του. Τέλος, το  $A_i$  ορίζεται ως ο *συντελεστής διαταραχής τιμής (price perturbation)* που παράγεται τυχαία από μια ομοιόμορφη κατανομή στο διάστημα  $[0, 0.05]$  για την αύξηση του περιθωρίου κέρδους ή στο διάστημα  $[-0.05, 0]$  για την μείωσή του.

Στη συνέχεια, παρατίθεται και η σχέση που ορίζει τις τιμές του  $\Gamma_i$ :

$$\Gamma_i(t+1) = \gamma_i \cdot \Gamma_i(t) + (1 - \gamma_i) \cdot \Delta_i(t) \quad (2.27)$$

όπου  $\Gamma_i(0) = 0$  για όλα τα  $i$ . Ακόμα, στη (2.27) συμμετέχει ο *συντελεστής ορμής (momentum coefficient)*  $\gamma_i$  που λαμβάνει τιμές ομοιόμορφα από το διάστημα  $[0, 1]$ .

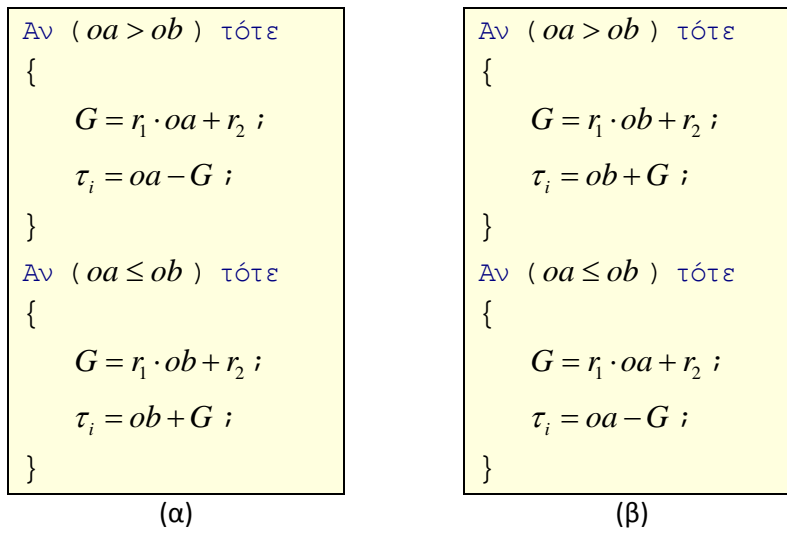
### **Στρατηγική Chris Preist**

Το 1998, οι C. Preist και M. Toi δημοσίευσαν [25] μια νέα στρατηγική βασιζόμενη στη στρατηγική ZIP η οποία συνήθως αναφέρεται στη βιβλιογραφία (π.χ. [29]) ως στρατηγική *Chris Preist (CP)*. Στην εν λόγω στρατηγική ορίζονται όμοια με παραπάνω το περιθώριο κέρδους  $\mu_i$ , η οριακή τιμή του πράκτορα  $\lambda_{i,j}$ , έτσι για την τιμή  $p_i$  ισχύει για ακόμη μια φορά η σχέση (2.23).

Για να διαπιστώσει ο πράκτορας αν χρειάζεται να αυξήσει ή να μειώσει το περιθώριο κέρδους του, ακολουθείται μια λογική που περιλαμβάνει τις εξέχουσες προσφορές πώλησης και αγοράς. Έτσι, αν στο γύρο εμπορίου δεν υπήρξε συναλλαγή, ο πράκτορας χρειάζεται να μειώσει το περιθώριο κέρδους του επιχειρώντας να είναι πιο ανταγωνιστικός ώστε να οδηγηθεί σε συναλλαγή. Αντίθετα, μετά από μια συναλλαγή, ο πράκτορας πρέπει να αυξήσει το περιθώριο κέρδους του δίνοντας μια προσφορά με τιμή ελαφρώς πιο συμφέρουσα γι' αυτόν

από αυτήν της εξέχουσας προσφοράς. Κατά αυτόν τον τρόπο, ο πράκτορας «δοκιμάζει» την αγορά, προσπαθώντας να «εκβιάσει» λίγο παραπάνω κέρδος.

Τα παραπάνω φαίνονται καλύτερα στους παρακάτω αλγόριθμους για τους πωλητές (Σχήμα 2.6α) και τους αγοραστές (Σχήμα 2.6β), όπου  $oa$  η εξέχουσα προσφορά πώλησης,  $ob$  η εξέχουσα προσφορά αγοράς και  $\tau_i$  η τιμή στόχου όπως παραπάνω. Ακόμα, οι  $r_1$  και  $r_2$  είναι τυχαίες ανεξάρτητες μεταβλητές, κατανεμημένες ομοιόμορφα στο διάστημα  $[0,0.2]$ .



Σχήμα 2.6 Αλγόριθμος στρατηγικής CP πωλητών (α) και αγοραστών (β)

Σε περίπτωση που ένας πράκτορας είναι ανενεργός αυξάνει το περιθώριο κέρδους του χωρίς βέβαια να υποβάλει προσφορές.

Για το ρυθμό με τον οποίο τείνουν οι προσφορές του πράκτορα στην τιμή στόχου χρησιμοποιείται ως κανόνας εκμάθησης τον κανόνα *Widrow-Hoff* με ορμή (*Widrow-Hoff with momentum*). Ορίζεται, όμοια με τη στρατηγική ZIP, ο συντελεστής εκμάθησης  $\beta_i$  και ο συντελεστής ορμής  $\gamma_i$ . Έτσι, δεδομένης της τιμής συναλλαγής  $p(t)$  και της υπολογισμένης τιμής στόχου  $\tau(t)$  για τη χρονική στιγμή  $t$ , υπολογίζεται η νέα τιμή στην οποία θα προσφέρει ο πράκτορας:

$$p_i(t+1) = \gamma_i \cdot p_i(t) + (1 - \gamma_i) \cdot \beta_i \cdot (\tau_i(t) - p_i(t)) \quad (2.28)$$

### **Στρατηγική ZIP60**

Το 2005 σε δημοσίευση του [24] ο D. Cliff προσδιορίζει τη στρατηγική ZIP ως μια στρατηγική 8 παραμέτρων και την ονομάζει *ZIP8*. Για έναν πράκτορα, 6 εκ των παραμέτρων είναι παράμετροι αρχικοποίησης του περιθωρίου κέρδους, του συντελεστή εκμάθησης και του συντελεστή ορμής και οι υπόλοιπες 2 παράμετροι αφορούν τις μεταβολές στην τιμή στόχου. Ο συγγραφέας λαμβάνει υπόψη του την ύπαρξη διαφορετικών παραμέτρων για την αύξηση και τη μείωση του περιθωρίου κέρδους και τις διακρίνει σε παραμέτρους αγοραστών και πωλητών. Ακόμα, ορίζει δύο νέες παραμέτρους που αφορούν την τιμή στόχου, καταλήγοντας σε συνολικά 60 παραμέτρους. Έτσι, το μοντέλο αυτό έγινε γνωστό ως στρατηγική *ZIP60*.

#### **2.5.5. Στρατηγική Roth-Erev**

Οι A. Roth and I. Erev πραγματοποίησαν σειρά ερευνών [26, 27] με στόχο να περιγράψουν τον τρόπο με τον οποίο οι άνθρωποι συμπεριφέρονται σε παιχνίδια όπως οι ΔΔ. Αποτέλεσμα της ερευνάς τους [26] ήταν η εισαγωγή μιας νέας στρατηγικής, βασισμένης σε τεχνικές *Ενισχυτικής Μάθησης (Reinforcement Learning)*. Η στρατηγική ονομάστηκε στρατηγική *Roth-Erev (RE)*.

Ως γνωστόν, ένας αλγόριθμος ενισχυτικής μάθησης βασίζεται σε δύο κύριες αρχές, το *νόμο του αποτελέσματος (law of effect)* και τον *ισχυρό νόμο της εξάσκησης (power law of practice)*. Σύμφωνα με τον πρώτο νόμο, η τάση διεκπεραίωσης μιας ενέργειας πρέπει να ενθαρρύνεται αν διαπιστωθεί ότι η ενέργεια παράγει θετικά αποτελέσματα και να αποθαρρύνεται αν διαπιστωθεί ότι παράγει αρνητικά αποτελέσματα. Ο δεύτερος νόμος, ο ισχυρός νόμος της εξάσκησης, αποτελεί νόμο ευρέως μελετημένο ακόμα και από τον τομέα της ψυχολογικής εκμάθησης. Σύμφωνα με αυτόν, ο λογάριθμος του χρόνου αντίδρασης για μια συγκεκριμένη εργασία μειώνεται γραμμικά με το λογάριθμο του αριθμού των προσπαθειών για τη συγκεκριμένη εργασία. Ποιοτικά, ο νόμος υποστηρίζει την απλή πεποίθηση ότι η εξάσκηση βελτιώνει την απόδοση.

Με βάση τη διμερή φύση του παιχνιδιού για το οποίο ενδιαφέρθηκαν, οι συντάκτες εισήγαγαν δύο ακόμα αρχές εκμάθησης, το *φαινόμενο του πειραματισμού (experimentation effect)* και το *φαινόμενο της αμεσότητας (recency*

*effect*). Σύμφωνα με το πρώτο φαινόμενο, εκτός από την επανάληψη επικερδών επιλογών (από το νόμο του αποτελέσματος), είναι χρήσιμο να επαναλαμβάνονται και παρόμοιες (αλλά όχι ίδιες) επιλογές με τις επικερδείς, κάτι που δικαιολογεί τον όρο «πειραματισμός». Σύμφωνα με το δεύτερο φαινόμενο, η χρονολόγηση των διάφορων πληροφοριών έχει μεγάλη σημασία. Έτσι, οι πρόσφατες πληροφορίες έχουν σαφώς μεγαλύτερη βαρύτητα από ότι οι παλαιότερες.

Με βάση τις παραπάνω αρχές, η στρατηγική RE χαρακτηρίζεται από τρεις βασικές παραμέτρους, την *παράμετρο διαβάθμισης (scaling parameter)*  $s$ , την *παράμετρο αμεσότητας (recency parameter)*  $r$  και την *παράμετρο πειραματισμού (experimentation parameter)*  $e$  οι οποίες ορίζονται για έναν πράκτορα  $i$ .

Έστω ένα σύνολο εφικτών τιμών προσφορών (αγοράς ή πώλησης)  $k$  για έναν RE πράκτορα, που καλείται ως «στρατηγική». Έστω  $K$  το μέγεθος του συνόλου όλων των δυνατών στρατηγικών. Στη συνέχεια για κάθε γύρο το σύνολο  $k$  αλλάζει, οπότε έστω στον γύρο  $n$  ότι ο πράκτορας ακολούθησε όντως τη στρατηγική  $k$ . Στην εκκίνηση του πρώτου γύρου της αγοράς, κάθε πράκτορας έχει μια αρχική *τάση (propensity)* που ορίζει τον τρόπο με τον οποίο θα υποβάλει προσφορές. Η αρχική τάση περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

$$q_{i,k_i}(1) = \frac{s}{K} \quad (2.29)$$

ενώ στη συνέχεια στο γύρο  $n+1$  της δημοπρασίας η τάση για να ακολουθήσει ο πράκτορας μια οποιαδήποτε στρατηγική  $j$  υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$q_{i,j}(n+1) = (1-r) \cdot q_{i,j}(n) + E_{i,j,k}(n+1) \quad (2.30)$$

όπου  $E_{i,j,k}$  η *συνάρτηση εμπειρίας (experience function)* της στρατηγικής RE που λαμβάνει τιμές σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$E_{i,j,k}(n+1) = \begin{cases} R_{i,j}(n) \cdot (1-e) & \alpha \nu \quad j = k \\ R_{i,j}(n) \cdot \frac{e}{K-1} & \alpha \nu \quad j \neq k \end{cases} \quad (2.31)$$

όπου  $R_{i,j}(n)$  το κέρδος για την κίνηση  $j$  του πράκτορα. Οι σχέσεις (2.30) και (2.31) αποτελούν τον πυρήνα της στρατηγικής. Ο πράκτορας έχει την τάση να ακολουθεί τις στρατηγικές που στο πρόσφατο παρελθόν του απέφεραν κέρδος.

Τέλος, το αποτέλεσμα της (2.30) κανονικοποιείται για την άμεση σύγκριση μεταξύ διαφόρων στρατηγικών:

$$p_{i,j}(n+1) = \frac{q_{i,j}(n+1)}{\sum_{m=1}^K q_{i,m}(n+1)} \quad (2.32)$$

Το μέγεθος  $p_{i,j}$  λέγεται *πιθανότητα επιλογής (choice probability)*. Υπολογίζεται για όλα τα δυνατά  $j$  και επιλέγεται η στρατηγική με τη μέγιστη πιθανότητα. Στον πρώτο γύρο ο πράκτορας για τις διάφορες στρατηγικές έχει ίσες πιθανότητες:

$$p_{i,j}(0) = \frac{1}{K} \quad (2.33)$$

Έτσι, θεωρώντας μια μεταβλητή  $\delta_i$  τέτοια ώστε  $P(\delta_i(n) = j) = p_{i,j}(n)$ , ορίζονται οι εκτιμήσεις τιμής για έναν πωλητή:

$$p_i(n) = \lambda_i + \delta_i(n) \quad (2.34)$$

και έναν αγοραστή αντίστοιχα

$$p_i(n) = \lambda_i - \delta_i(n) \quad (2.35)$$

όπου  $\lambda_i$  η οριακή τιμή του πράκτορα.

Όπως είναι προφανές, η στρατηγική RE χαρακτηρίζεται προσαρμοστική αφού χρησιμοποιεί πληροφορίες από γύρους του παρελθόντος. Είναι μια στρατηγική μη προγνωστική αλλά όσον αφορά την πληροφόρηση είναι αξιοσημείωτη μέθοδος καθώς δε χρειάζεται ουσιαστικά καμία πληροφορία από την αγορά πέραν από τις δικές του παρελθοντικές κινήσεις, που είναι προφανώς γνωστές. Αυτό καθιστά τη στρατηγική RE ιδανική για δημοπρασίες όπου δε δίνονται αρκετά στοιχεία της αγοράς στους πράκτορες, όπως π.χ. δημοπρασίες *κλειστού τύπου (sealed)*.

### **Τροποποιημένη στρατηγική Roth-Erev**

Το 2001 οι J. Nicolaisen, V. Petrov, και L. Tesfatsion [28] μελέτησαν τη στρατηγική RE και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι έχει περιθώρια βελτίωσης ως προς δύο κατευθύνσεις. Αρχικά παρατήρησαν ότι, σύμφωνα με το δεύτερο σκέλος της σχέσης (2.31), η ενημέρωση των πιθανοτήτων επιλογής είναι αρκετά αργή στην εκφυλισμένη περίπτωση που η παράμετρος πειραματισμού  $e$  πλησιάζει στην τιμή  $(K-1)/K$ . Κατά δεύτερον, στην ίδια σχέση, διαπιστώνεται η αδυναμία της στρατηγικής RE να διαχειριστεί καταστάσεις κατά τις οποίες ο πράκτορας μόλις ενεπλάκη σε μια συναλλαγή μηδενικού κέρδους (*zero-profit*).

Για την αντιμετώπιση των προαναφερθέντων προβλημάτων οι συντάκτες τροποποίησαν τη στρατηγική RE δημιουργώντας την *Τροποποιημένη στρατηγική Roth-Erev (Modified Roth-Erev – MRE)*, η οποία σπανιότερα συναντάται στη βιβλιογραφία και με το ακρωνύμιο των δημιουργών της (*NPT*). Σύμφωνα με αυτή τη στρατηγική, ο πράκτορας ακολουθεί τη λογική ενός πράκτορα RE με διαφορετική τη συνάρτηση εμπειρίας. Αντί, λοιπόν, της (2.31) χρησιμοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$E_{i,j,k}(n+1) = \begin{cases} R_{i,j}(n) \cdot (1-e) & \alpha\nu \quad j = k \\ q_{i,j}(n) \cdot \frac{e}{K-1} & \alpha\nu \quad j \neq k \end{cases} \quad (2.36)$$

Είναι προφανές από την παραπάνω σχέση ότι η συνάρτηση εμπειρίας ενημερώνεται για οποιαδήποτε τιμή της παραμέτρου πειραματισμού. Ακόμα, σε περίπτωση μηδενικού κέρδους, η σειρά των κινήσεων που την προκάλεσε λαμβάνει μικρότερη πιθανότητα επιλογής από τις υπόλοιπες κινήσεις, κάτι που διευκολύνει την αποθάρρυνση του πράκτορα από το να την ακολουθήσει ξανά.

### **2.5.6. Στρατηγική Gjerstad-Dickhaut**

Σύμφωνα με τους S. Gjerstad και J. Dickhaut [4], το πρόβλημα της εύρεσης μιας βέλτιστης διαδικασίας διαμόρφωσης της τιμής προσφοράς αντιμετωπίζεται με μια προσαρμοστική στρατηγική που αναφέρεται ως στρατηγική *Gjerstad-Dickhaut (GD)*. Οι δύο αυτοί ερευνητές αναλύοντας την αγορά ανάγουν το πρόβλημα της επιλογής της βέλτιστης τιμής για μια προσφορά στη μεγιστοποίηση του *αναμενόμενου*



κέρδους (*expected surplus*), Με βάση την εξέχουσα προσφορά πώλησης  $oa$  και αγοράς  $ob$ , το αναμενόμενο κέρδος ορίζεται όπως παρακάτω για έναν πωλητή:

$$a^* = \arg \max_{a \in (oa, ob)} (\pi(a) \cdot p(a)) \quad (2.37)$$

και έναν αγοραστή:

$$b^* = \arg \max_{b \in (oa, ob)} (\pi(b) \cdot q(b)) \quad (2.38)$$

όπου ορίζουν ως  $\pi(a)$ ,  $\pi(b)$  τις *συναρτήσεις χρησιμότητας (utility functions)* του αγοραστή και του πωλητή αντίστοιχα ενώ τα μεγέθη  $p(a)$  και  $q(b)$  αποτελούν τις *συναρτήσεις πεποίθησης (belief functions)* των πρακτόρων.

Η συνάρτηση χρησιμότητας ενός πράκτορα στη γενική της μορφή ορίζεται για κάθε προσφορά. Στις στρατηγικές πλειοδοσίας επιχειρείται η επιλογή μιας τιμής για το αγαθό η οποία τη μεγιστοποιεί. Στα πλαίσια της στρατηγικής GD, η συνάρτηση χρησιμότητας έχει την απλή παρακάτω μορφή για έναν πωλητή:

$$\pi(a) = \begin{cases} a - l_i & \alpha \nu \quad a > l_i \\ 0 & \alpha \nu \quad a \leq l_i \end{cases} \quad (2.39)$$

και έναν αγοραστή:

$$\pi(b) = \begin{cases} l_j - b & \alpha \nu \quad b < l_j \\ 0 & \alpha \nu \quad b \geq l_j \end{cases} \quad (2.40)$$

όπου  $l_i$ ,  $l_j$  οι οριακές τιμές ενός πωλητή  $i$  και ενός αγοραστή  $j$  αντίστοιχα,  $a$  η τιμή μιας προσφορά πώλησης και  $b$  μιας προσφορά αγοράς.

Για τον προσδιορισμό των συναρτήσεων πεποίθησης για όλες τις εφικτές τιμές προσφορών ακολουθείται μια συγκεκριμένη διαδικασία. Αρχικά, έστω μια εφικτή τιμή προσφοράς  $d$  που ανήκει στο σύνολο όλων των εφικτών τιμών προσφορών  $D$ . Ορίζονται επίσης ως  $A(d)$  και  $B(d)$  το πλήθος των προσφορών πώλησης και αγοράς που έχουν τη συγκεκριμένη τιμή. Ακόμα, για την ίδια τιμή, έστω το πλήθος των αποδεκτών προσφορών πώλησης  $TA(d)$  και αγοράς  $TB(d)$  καθώς και των αντίστοιχων απορριφθέντων προσφορών  $RA(d)$  και  $RB(d)$ . Οι προσφορές αυτές

αποτελούν ουσιαστικά τις παρελθούσες συναλλαγές που ορίζονται από το μέγεθος της μνήμης του πράκτορα με το συμβολισμό  $L$ . Προφανώς μια προσφορά πώλησης είναι αποδεκτή αν η τιμή της  $a$  είναι μικρότερη από μια τιμή  $d$  ενώ απορρίπτεται αν είναι μεγαλύτερη. Έτσι, προκύπτει η συνάρτηση πεποίθησης των πωλητών:

$$\hat{p}(a) = \frac{\sum_{d \geq a} TA(d) + \sum_{d \geq a} B(d)}{\sum_{d \geq a} TA(d) + \sum_{d \geq a} B(d) + \sum_{d \leq a} RA(d)} \quad (2.41)$$

Αντίστοιχα μια προσφορά αγοράς είναι αποδεκτή αν η τιμή της  $b$  είναι μεγαλύτερη από μια τιμή  $d$  ενώ απορρίπτεται αν είναι μικρότερη. Όμοια με παραπάνω, ορίζεται η συνάρτηση πεποίθησης των αγοραστών:

$$\hat{q}(b) = \frac{\sum_{d \leq b} TB(d) + \sum_{d \leq b} A(d)}{\sum_{d \leq b} TB(d) + \sum_{d \leq b} A(d) + \sum_{d \geq b} RB(d)} \quad (2.42)$$

Οι παραπάνω σχέσεις, για να συμβαδίζουν με τον κανόνα βελτίωσης εύρους προσφορών αγοράς και πώλησης, έχουν έναν ακόμα περιορισμό. Η σχέση (2.41) ορίζεται για  $a < oa$  και η σχέση (2.42) για  $b > ob$ . Σε όλες τις υπόλοιπες περιπτώσεις οι (2.41) και (2.42) λαμβάνουν την τιμή 0. Οι παραπάνω σχέσεις έχουν σύνολο τιμών το  $[0,1]$  ενώ το πεδίο ορισμού τους αποτελείται από διακριτές τιμές του συνόλου  $D$ .

Για τη μετατροπή των παραπάνω σχέσεων από διακριτές σε συνεχείς χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος κυβικής παρεμβολής με σφηνοειδείς συναρτήσεις (*cubic spline interpolation*), σύμφωνα με την οποία τελικά ορίζεται η νέα συνάρτηση πεποίθησης ενός πωλητή:

$$p(a) = a_3 \cdot a^3 + a_2 \cdot a^2 + a_1 \cdot a + a_0 \quad (2.43)$$

η οποία έχει τις εξής ιδιότητες:

$$\begin{aligned} p(a_k) &= \hat{p}(a_k) \\ p(a_k) &= \hat{p}(a_{k+1}) \\ p'(a_k) &= 0 \\ p'(a_{k+1}) &= 0 \end{aligned} \quad (2.44)$$

Οι ιδιότητες αυτές ανάγουν την εύρεση των συντελεστών της συνάρτησης πεποίθησης ενός πωλητή στη λύση του παρακάτω συστήματος εξισώσεων:

$$\begin{bmatrix} a_k^3 & a_k^2 & a_k & 1 \\ a_{k+1}^3 & a_{k+1}^2 & a_{k+1} & 1 \\ 3a_k^2 & 2a_k & 1 & 0 \\ 3a_{k+1}^2 & 2a_{k+1} & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_3 \\ a_2 \\ a_1 \\ a_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{p}(a_k) \\ \hat{p}(a_{k+1}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Αντίστοιχα υπολογίζονται οι συντελεστές για τη συνάρτηση των αγοραστών.

Τέλος, να σημειωθεί ότι οι συντάκτες αποδεικνύουν ότι η συνάρτηση πεποίθησης των πωλητών είναι φθίνουσα και των αγοραστών είναι αύξουσα.

### **Στρατηγική GDX**

Το 2002 οι G. Tesauro και J. Bredin σε δημοσίευση τους [32] υποστηρίζουν ότι η στρατηγική GD επιδέχεται βελτίωση με μεθόδους *δυναμικού προγραμματισμού* (*Dynamic Programming*). Αποτέλεσμα της έρευνάς του είναι η *στρατηγική GDX*, η οποία σε συνέχεια της GD υπολογίζει επίσης τη μεταβλητή του χρόνου  $T$  στη διαδικασία διαμόρφωσης της τιμής, λαμβάνοντας ουσιαστικά υπόψη τον αριθμό των ευκαιριών  $N$  που παρουσιάζονται στον πράκτορα για να υποβάλει προσφορά προτού λήξει η ημέρα εμπορίου. Οι συγγραφείς ορίζουν ως  $M$  την τρέχουσα κατάσταση ενός πράκτορα που αφορά πόσες συναλλαγές ακόμα θέλει να κάνει.

Έστω μια χρονική στιγμή (ευκαιρία)  $n$  όπου  $0 \leq n \leq N$  καθώς και μια κατάσταση  $m$  όπου  $0 \leq m \leq M$ . Τότε, ορίζεται η *αναμενόμενη τιμή* (*expected value*)  $V(m,n)$  του πράκτορα συναρτήσει των  $m$  και  $n$ . Κατόπιν, υπολογίζεται ένας δισδιάστατος πίνακας με όλες τις αναμενόμενες τιμές για όλα τα  $m$  και  $n$ . Με βάση ότι  $V(m,0) = V(0,n) = 0$  για όλα τα  $m$  και  $n$ , υπολογίζονται η πρώτη γραμμή και η πρώτη στήλη του πίνακα, ενώ οι υπόλοιπες βρίσκονται με τον εξής αλγόριθμο:

```

Για  $n$  από 1 μέχρι  $N$ 
{
  Για  $m$  από 1 μέχρι  $M$ 
  {
     $V(m,n) = \max_p \left( f(p, t_n) \cdot [s_m(p) + \gamma \cdot V(m-1, n-1)] + [1 - f(p, t_n)] \cdot \gamma \cdot V(m, n-1) \right)$ 
  }
}

```

Σχήμα 2.7 Αλγόριθμος δυναμικού προγραμματισμού για τον υπολογισμό του  $V(m, n)$

όπου, στον αλγόριθμο αυτό, το  $f(p, t_n)$  αποτελεί τη συνάρτηση πεποίθησης του πράκτορα, είτε είναι πωλητής οπότε υπολογίζεται όπως στη σχέση (2.41), είτε αγοραστής όπως στη (2.42), για τη χρονική στιγμή  $t_n$ . Ακόμα, το  $s_m(p)$  είναι η συνάρτηση χρησιμότητας του πράκτορα για την κατάσταση  $m$  και υπολογίζεται όπως στις σχέσεις (2.39) και (2.40). Τέλος το  $\gamma$  ορίζεται ως *παράμετρος έκπτωσης* (*discount parameter*) και ανήκει στο διάστημα  $[0, 1]$ .

Αφού υπολογιστεί ο πίνακας αναμενόμενων τιμών, υπολογίζεται η ιδανική προσφορά για τον πράκτορα σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$p^*(T) = \arg \max_p \left( f(p, T) \cdot [s_M(p) + \gamma \cdot V(M-1, N-1)] + [1 - f(p, T)] \cdot \gamma \cdot V(M, N-1) \right) \quad (2.46)$$

### 2.5.7. Στρατηγική Ασαφούς Λογικής

Το 2003 οι M. He, H. Leung και N. Jennings μελέτησαν [29] τις στρατηγικές πρακτόρων και, σε συνδυασμό με τη θεωρία της ασαφούς λογικής, σχεδίασαν μια νέα στρατηγική πλειοδοσίας που ονομάστηκε στρατηγική *Ασαφούς Λογικής* (*Fuzzy Logic based – FL*). Για την ανάπτυξη της, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν *ευριστικούς ασαφείς κανόνες* (*heuristic fuzzy rules*) καθώς και *μηχανισμούς ασαφούς συλλογισμού* (*fuzzy reasoning mechanisms*).

Αρχικά, ορίζονται τα σύνολα από τα οποία οι αγοραστές και οι πωλητές επιλέγουν τις τιμές των προσφορών τους. Έτσι, για έναν πωλητή  $i$  το σύνολο *έγκυρων προσφορών πώλησης* (*valid asks set*) ορίζεται από την παρακάτω σχέση

$$D_s = \{a \mid \max(b_0, l_i) \leq a < a_0\} \quad (2.47)$$

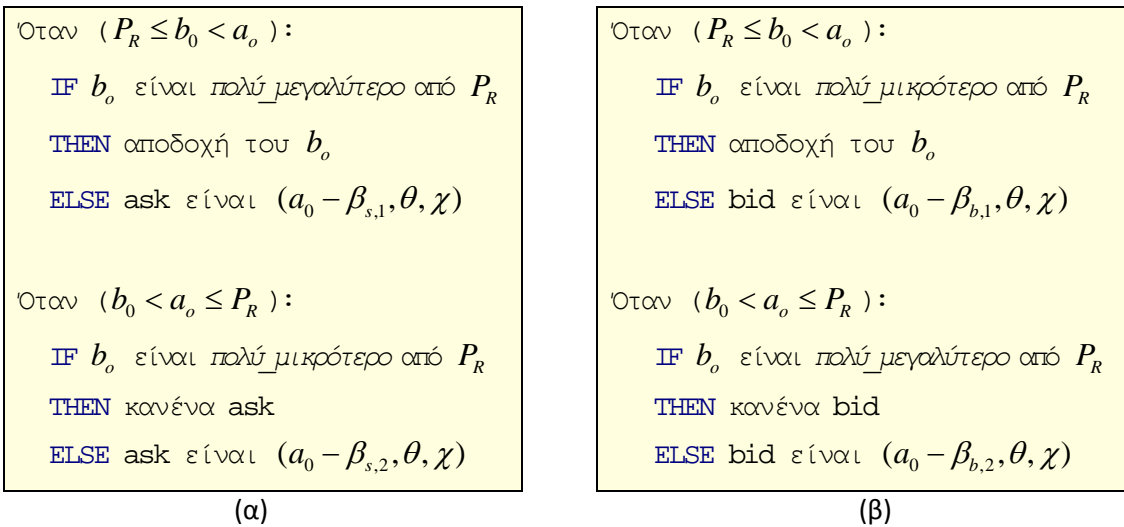
όπου το  $a$  είναι η τιμή της προσφοράς πώλησης και  $l_i$  η οριακή τιμή του πωλητή. Τα  $a_o$  και  $b_o$  είναι οι εξέχουσες προσφορές πώλησης και αγοράς αντίστοιχα. Για έναν αγοραστή  $j$  ορίζεται αντίστοιχα το σύνολο έγκυρων προσφορών αγοράς (*valid bids set*):

$$D_b = \{b | b_0 < b \leq \min(a_0, l_i)\} \quad (2.48)$$

όπου το  $b$  είναι η τιμή της προσφοράς πώλησης και  $l_j$  η οριακή τιμή του αγοραστή.

Στη συνέχεια, με βάση τις πρόσφατες συναλλαγές ορίζεται η τιμή αναφοράς (*reference price*)  $P_R$  για κάθε πράκτορα. Η τελευταία υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των τιμών των  $L$  τελευταίων συναλλαγών, όπου ουσιαστικά το  $L$  αποτελεί τις θέσεις «μνήμης» του πράκτορα. Η τιμή αναφοράς, όπως δηλώνει και η ονομασία της, αποτελεί ουσιαστικά και το σημαντικότερο σημείο αναφοράς σύμφωνα με το οποίο ο πράκτορας εκδηλώνει τη στρατηγική του. Η τιμή αναφοράς μπορεί να είναι μικρότερη ή ίση από την εξέχουσα προσφορά αγοράς, να είναι μεγαλύτερη ή ίση από την εξέχουσα προσφορά πώλησης ή τέλος να βρίσκεται ανάμεσα στις δύο εξέχουσες προσφορές.

Οι πρώτες δύο περιπτώσεις μοντελοποιούνται με τη χρήση ευριστικών κανόνων οι οποίοι παρατίθενται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.8 Ευριστικοί κανόνες πωλητών (α) και αγοραστών (β)

Σύμφωνα με τον πρώτο ευριστικό κανόνα των πωλητών, εάν η εξέχουσα προσφορά αγοράς είναι πολύ μεγαλύτερη από την τιμή αναφοράς, είναι λογικό ο πράκτορας-πωλητής να επιχειρήσει να συναλλαχθεί απλώς στην εξέχουσα προσφορά αγοράς, πουλώντας έτσι στη μεγαλύτερη τιμή που τον συμφέρει (και θα γίνει αποδεκτή). Σε αντίθετη περίπτωση, ο πράκτορας θα υποβάλει μια προσφορά (που θα γίνει η επόμενη εξέχουσα προσφορά αγοράς) που περιγράφεται από τον τριγωνικό ασαφή αριθμό (*triangular fuzzy number*)  $(a_0 - \beta_{s,1}, \theta, \chi)$ , όπου  $a_0 - \beta_{s,1}$  το κέντρο (*center*),  $\theta$  και  $\chi$  η αριστερή και η δεξιά εξάπλωση (*spread*) του αριθμού. Το μέγεθος  $\beta_{s,1}$  περιγράφει πόσο θα ήθελε ο πράκτορας να μειώσει την προσφορά του, με λίγα λόγια πόσο θέλει να «ρискάρει». Τέλος, προς ορισμό της έκφρασης *πολύ\_μεγαλύτερο* ανάμεσα στα μεγέθη  $b_o$  και  $P_R$ , ορίζεται ένα ασαφές σύνολο (*fuzzy set*)  $A_1(b_o)$  και ορίζεται ως όριο (*threshold*) της έκφρασης *πολύ\_μεγαλύτερο* ένα μέγεθος  $\gamma_{s,1}$ , έτσι ώστε το  $b_o$  να θεωρείται πολύ μεγαλύτερο από το  $P_R$ , όταν  $A_1(b_o) \geq \gamma_{s,1}$ . Ανάλογη είναι και η εξήγηση των υπόλοιπων ευριστικών κανόνων που φαίνονται στο Σχήμα 2.8.

Στην περίπτωση που η τιμή αναφοράς βρίσκεται ανάμεσα στις δύο εξέχουσες προσφορές, στο Σχήμα 2.9 περιγράφονται οι ασαφείς κανόνες των πωλητών:

IF ( $b_o$  είναι μακριά\_από OR μετρίως\_μακριά\_από  $P_R$ ) AND ( $a_o$  είναι μακριά\_από  $P_R$ )  
 THEN ask είναι  $(a_0 - \lambda_{s,1}, \theta, \chi)$

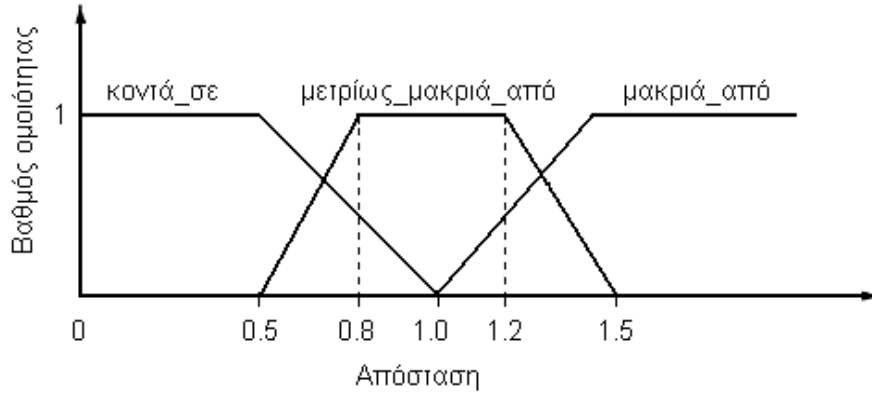
IF ( $b_o$  είναι μακριά\_από OR μετρίως\_μακριά\_από  $P_R$ ) AND ( $a_o$  είναι μέτρίως\_μακριά\_από  $P_R$ )  
 THEN ask είναι  $(a_0 - \lambda_{s,2}, \theta, \chi)$

IF ( $b_o$  είναι μακριά\_από OR μετρίως\_μακριά\_από  $P_R$ ) AND ( $a_o$  είναι κοντά\_σε  $P_R$ )  
 THEN ask είναι  $(a_0 - \lambda_{s,3}, \theta, \chi)$

IF  $b_o$  είναι κοντά\_σε  $P_R$   
 THEN ask είναι  $(a_0 - \lambda_{s,4}, \theta, \chi)$

Σχήμα 2.9 Ασαφείς κανόνες πωλητών για  $b_o \leq P_R \leq a_o$

Για τους αγοραστές οι κανόνες είναι αντίστοιχοι, αλλάζοντας ουσιαστικά τις μεταβλητές  $b_o$  και  $a_o$  μεταξύ τους. Το  $OR$  χρησιμοποιείται με την έννοια του μέγιστου. Για τον ορισμό των διάφορων εκφράσεων παρατίθεται το Σχήμα 2.10:



Σχήμα 2.10 Ασαφή σύνολα για  $b_o \leq P_R \leq a_o$

Έτσι, όλες οι διαφορετικές περιπτώσεις έχουν ως έξοδο έναν ασαφή αριθμό. Οι συγγραφείς ορίζουν τον αριθμό αυτό για έναν πωλητή ως εξής:

$$z_s(a) = (m_s, \theta_s, \chi_s) \quad (2.49)$$

Στη συνέχεια, ορίζεται το σύνολο απόφασης (*decision set*) του πωλητή:

$$DS_s = \{ \{a | a \in D_s\} \cap \{a | z_s(a) \geq \pi_s\} \} \quad (2.50)$$

όπου η παράμετρος  $\pi_s$  αποτελεί το όριο στο οποίο έγινε αναφορά παραπάνω. Από αυτό το σύνολο απόφασης επιλέγονται οι προσφορές που πρόκειται να κάνει ο πράκτορας σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$ask = \begin{cases} b_o & \text{αν } b_o \in DS_s \\ \arg \max_{a \in DS_s} \{z_s(a)\} & \text{αλλιώς} \end{cases} \quad (2.51)$$

Αντίστοιχη διαδικασία ακολουθείται και για έναν αγοραστή.

### Προσαρμοστική στρατηγική Ασαφούς Λογικής

Στη δημοσίευση των M. He, H. Leung και N. Jennings [29] που αναλύθηκε παραπάνω, οι συγγραφείς επιχειρούν τη βελτίωση της στρατηγικής τους και

καταλήγουν σε μια παραπλήσια στρατηγική με την ονομασία *Προσαρμοστική στρατηγική Ασαφούς Λογικής (Adaptive-Fuzzy Logic based – A-FL)*. Σύμφωνα με την τελευταία, η συμπεριφορά ενός πράκτορα  $i$  εκφράζεται με τη συνεχή μεταβλητή  $A_{attitude}^{(i)}$ , που λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[-1,1]$ . Η τιμή 1 εκφράζει διάθεση για ρίσκο, η τιμή -1 παθητική διάθεση και το 0 αντιπροσωπεύει μια ουδέτερη λογική.

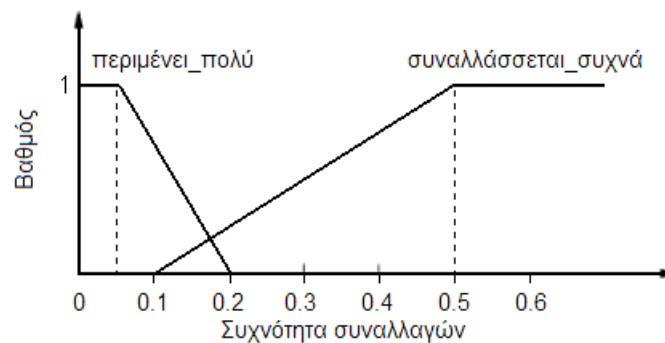
Με βάση τα προαναφερθέντα, κάθε πράκτορας  $i$  αποφασίζει για τη στρατηγική του με βάση τους παρακάτω κανόνες εκμάθησης:

IF πράκτορας  $i$  περιμένει\_πολύ για να συναλλαχθεί  
 THEN  $A_{attitude}^{(i)} = A_{attitude}^{(i)} - r\delta$

IF πράκτορας  $i$  συναλλάσσεται\_συχνά  
 THEN  $A_{attitude}^{(i)} = A_{attitude}^{(i)} + r\delta$

Σχήμα 2.11 Κανόνες εκμάθησης στρατηγικής A-FL

όπου το  $r$  είναι ένας *παράγοντας εκμάθησης (learning rate)* που προσδιορίζει την ταχύτητα με την οποία γίνεται η ενημέρωση και το  $\delta$  είναι το *ελάχιστο βήμα (minimum step)* για αύξηση ή μείωση. Για τον ορισμό των εκφράσεων *περιμένει\_πολύ* και *συναλλάσσεται\_συχνά* παρατίθεται το παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.12 Ασαφές σύνολο για τους κανόνες εκμάθησης της στρατηγικής A-FL



### 2.5.8. Risk-Based στρατηγική

Το 2004 οι P. Vytelingum, R. Dash, E. David και N. Jennings σε δημοσίευσή τους [30] πρότειναν την *Risk-Based* στρατηγική (RB). Όπως σχολιάζουν οι συντάκτες σε παρεμφερή δημοσίευση [31], η στρατηγική τους έχει ομοιότητες με τη στρατηγική ZIP, ενώ η κυριότερη διαφορά μεταξύ των δύο στρατηγικών είναι ότι αντί του περιθωρίου κέρδους του πράκτορα ενημερώνεται ο *παράγοντας ρίσκου* (*risk factor*) του, ή σύμφωνα με το [31] ο *δείκτης επιθετικότητάς* (*degree of aggressiveness*) του.

Κατ' αρχάς, ο πράκτορας λειτουργεί με βάση κάποιους κανόνες προσφοράς για να αποφασίσει να υποβάλει ή όχι προσφορά, καθώς και την τιμή αυτής. Η στρατηγική RB υπαγορεύει ότι οι κανόνες αυτοί εξαρτώνται άμεσα από την *τιμή στόχου* (*target price*)  $\tau$ , η οποία αντιπροσωπεύει την καλύτερη τιμή για την οποία ο πράκτορας θεωρεί ότι η προσφορά του πρόκειται να γίνει δεκτή. Ακόμα, έχει μεγάλη σημασία η απόκλιση αυτής της τιμής από το σημείο ισορροπίας της αγοράς. Το τελευταίο δεν είναι γνωστό, οπότε γίνεται μια εκτίμησή του με βάση την ιστορία των συναλλαγών, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο του *κινούμενου μέσου όρου* (*moving average*). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο η τιμή ισορροπίας εκτιμάται λαμβάνοντας τις τιμές των  $N$  τελευταίων συναλλαγών, όπου το  $N$  προσδίδει ουσιαστικά αμεσότητα. Τότε η τιμή δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$p^* = \frac{\sum_{i=T-N+1}^T w_i p_i}{\sum_{i=T-N+1}^T w_i} \quad (2.52)$$

όπου  $w_i$  το βάρος μιας προσφοράς  $i$  με τιμή  $p_i$ , ενώ αν  $T$  είναι η τελευταία συναλλαγή ισχύει  $w_T = 1$  και  $w_{i-1} = 0.9w_i$ .

Η εκτίμηση για το σημείο ισορροπίας συνδέεται με την τιμή στόχου, λαμβάνοντας υπόψη το δείκτη επιθετικότητας  $r$  του πράκτορα που λαμβάνει τιμές από το συνεχές διάστημα  $[-1,1]$ . Όταν το  $r$  είναι ίσο με 0 τότε ο πράκτορας λέγεται *ουδέτερος* (*neutral*), καθώς προσφέρει στην εκτιμώμενη τιμή ισορροπίας. Για την τιμή -1 ο πράκτορας θεωρείται *επιθετικός* (*aggressive*) και για την τιμή 1 *παθητικός* (*passive*). Ένας επιθετικός πωλητής προσφέρει στη μέγιστη τιμή  $p_{\max}$  της αγοράς ενώ ένας επιθετικός αγοραστής στην οριακή τιμή του. Αντίστοιχα, ένας παθητικός

πωλητής προσφέρει στην οριακή τιμή του ενώ ένας παθητικός αγοραστής στην τιμή 0. Για όλες τις υπόλοιπες τιμές του  $r$ , θεωρώντας έναν ενδοπεριθωριακό πωλητή  $j$  και την οριακή τιμή του  $c_j$ , η τιμή στόχου υπολογίζεται:

$$\tau = \begin{cases} p^* + (p_{\max} - p^*) \cdot re^{(r-1)\theta} & \alpha\nu \ r \in (-1,0) \\ p^* + (p^* + c_j) \cdot re^{(r+1)\theta} & \alpha\nu \ r \in (0,1) \end{cases} \quad \text{όπου} \quad \underline{\theta} = \log\left(\frac{p_{\max} - p^*}{p^* - c_j}\right) - \theta \quad (2.53)$$

ενώ για έναν ενδοπεριθωριακό αγοραστή  $i$  και την οριακή τιμή του  $l_i$ :

$$\tau = \begin{cases} p^* \cdot (1 - re^{\theta(r-1)}) & \alpha\nu \ r \in (-1,0) \\ (l_i - p^*) \cdot (1 - (r+1) \cdot e^{r\theta}) + p^* & \alpha\nu \ r \in (0,1) \end{cases} \quad \text{όπου} \quad \underline{\theta} = \frac{p^* \cdot e^{-\theta}}{l_i - p^*} - 1 \quad (2.54)$$

όπου το  $\theta$  προσδιορίζει το ρυθμό της ενημέρωσής της συνάρτησης και λαμβάνει τιμές από το διάστημα  $[-1, \infty)$ . Αντίστοιχα ορίζονται οι συναρτήσεις των εξωπεριθωριακών πρακτόρων, θέτοντας όπου  $p^*$  την οριακή τιμή του πράκτορα.

Όσον αφορά την προσαρμοστικότητα της στρατηγικής, ο δείκτης επιθετικότητας του πράκτορα τείνει στην επιθυμητή τιμή του  $\delta$ , σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$r(t+1) = r(t) + \beta \cdot (\delta(t) - r(t)) \quad (2.55)$$

όπου το  $\beta$  ορίζεται ως *συντελεστής εκμάθησης (learning rate)* και παίρνει τιμές από το διάστημα  $(0,1)$ . Η επιθυμητή τιμή του δείκτη επιθετικότητας ορίζεται ως:

$$\delta(t) = (1 + \lambda) \cdot risk_{shout} \quad \text{που} \quad \lambda = \{-0.05, 0.05\} \quad (2.56)$$

όπου με  $risk_{shout}$  συμβολίζεται ο δείκτης επιθετικότητας που αντιστοιχεί στην τελευταία συναλλαγή του πράκτορα. Έτσι το  $\lambda$  λαμβάνει την τιμή  $-0.05$  όταν ο πράκτορας πρόκειται να μειώσει το δείκτη επιθετικότητας του, και την τιμή  $0.05$  όταν πρόκειται να τον αυξήσει. Η λογική του πράκτορα ως προς αυτήν την απόφαση φαίνεται στο Σχήμα 2.13 για τους πωλητές και στο Σχήμα 2.14 για τους αγοραστές.

```

Αν (έγινε συναλλαγή στην τιμή  $q$ ) τότε
{
    Αν ( $\tau \leq q$ ) τότε
        ο πωλητής πρέπει να αυξήσει το δείκτη επιθετικότητάς του
    Αλλιώς
        ο πωλητής πρέπει να μειώσει το δείκτη επιθετικότητάς του
}
Αλλιώς_Αν (υποβλήθηκε προσφορά πώλησης  $a$ ) τότε
{
    Αν ( $\tau \geq a$ ) τότε
        ο πωλητής πρέπει να μειώσει το δείκτη επιθετικότητάς του
}

```

Σχήμα 2.13 Αλγόριθμος εκμάθησης στρατηγικής RB πωλητών

```

Αν (έγινε συναλλαγή στην τιμή  $q$ ) τότε
{
    Αν ( $\tau \geq q$ ) τότε
        ο αγοραστής πρέπει να αυξήσει το δείκτη επιθετικότητάς του
    Αλλιώς
        ο αγοραστής πρέπει να μειώσει το δείκτη επιθετικότητάς του
}
Αλλιώς_Αν (υποβλήθηκε προσφορά αγοράς  $b$ ) τότε
{
    Αν ( $\tau \leq b$ ) τότε
        ο αγοραστής πρέπει να μειώσει το δείκτη επιθετικότητάς του
}

```

Σχήμα 2.14 Αλγόριθμος εκμάθησης στρατηγικής RB αγοραστών

Είναι χαρακτηριστική η ομοιότητα των παραπάνω αλγορίθμων με αυτούς της στρατηγικής ZIP, που απαντώνται στο Σχήμα 2.4 και το Σχήμα 2.5, κάτι που άλλωστε επισημαίνουν και οι συγγραφείς [31].

Με βάση λοιπόν τα παραπάνω, οι συγγραφείς ορίζουν το μοντέλο πάνω στο οποίο στηρίζονται οι κανόνες προσφοράς των πωλητών και των αγοραστών. Για τον ορισμό των κανόνων προσφοράς ορίζεται ένας πωλητής  $j$ . Προφανώς αν η οριακή τιμή του πωλητή  $c_j$  είναι μεγαλύτερη από την εξέχουσα προσφορά πώλησης  $oask$  δεν υποβάλλει προσφορά και περιμένει την έναρξη του επόμενου γύρου εμπορίου.

Στην αρχή του πρώτου γύρου εμπορίου, η μόνη πληροφορία του πωλητή είναι η οριακή τιμή του, του είναι επομένως αδύνατο να υπολογίσει το σημείο ισορροπίας

της αγοράς. Γι' αυτό ο πωλητής υποβάλλει προσφορές που κατευθύνονται προς το μέγιστο της οριακής τιμής του  $c_j$  και της εξέχουσας προσφοράς πώλησης  $obid$ . Για κάθε επόμενο γύρο, ενημερώνεται το εκτιμώμενο σημείο ισορροπίας και υπολογίζεται η τιμή στόχου. Τότε οι προσφορές θα κατευθύνονται από το δείκτη επιθετικότητας. Έτσι, η διαδικασία διαμόρφωσης της τιμής μιας προσφοράς πώλησης περιγράφεται από την παρακάτω σχέση:

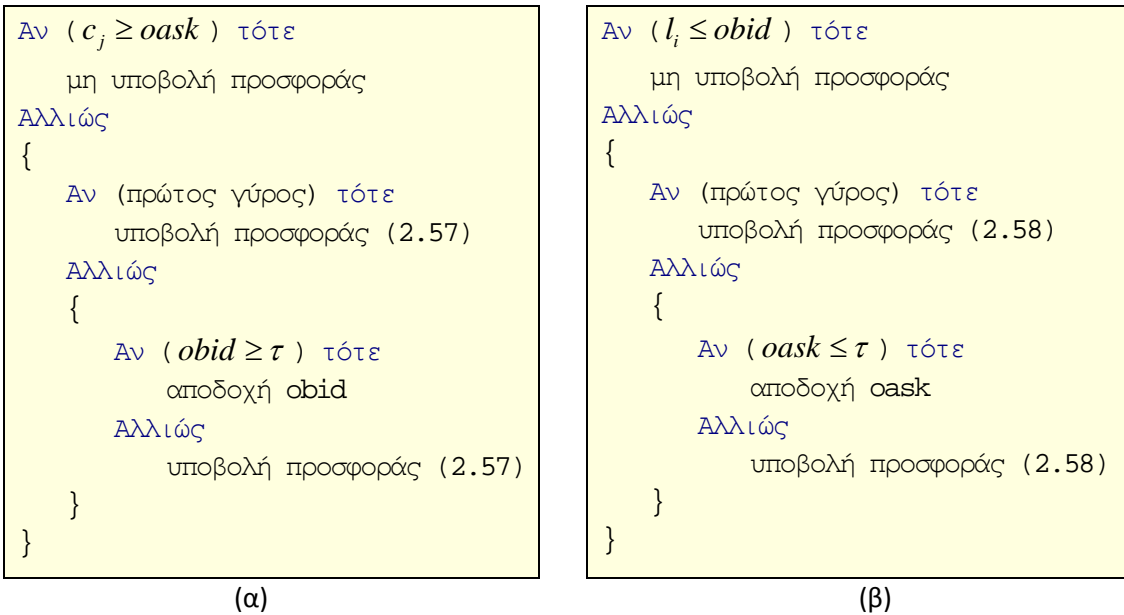
$$ask_j = \begin{cases} oask \dot{\omega} \frac{oask - \max\{c_j, obid\}}{\eta} & \text{αν } \text{πρ } \text{τος } \gamma \text{ ρος} \\ oask \dot{\omega} \frac{oask - \tau}{\eta} & \text{αλλι } \varsigma \end{cases} \quad (2.57)$$

ενώ για μια προσφορά αγοράς η αντίστοιχη σχέση είναι:

$$bid_j = \begin{cases} obid \dot{\omega} \frac{\min\{l_j, obid\} - obid}{\eta} & \text{αν } \text{πρ } \text{τος } \gamma \text{ ρος} \\ obid \dot{\omega} \frac{\tau - obid}{\eta} & \text{αλλι } \varsigma \end{cases} \quad (2.58)$$

όπου το  $\eta$  είναι μια μεταβλητή που ορίζει τη σύγκλιση των τιμών στην τιμή ισορροπίας.

Η στρατηγική τιμολόγησης του πράκτορα παρουσιάζεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 2.15 Στρατηγική τιμολόγησης RB πωλητών (α) και αγοραστών (β)

### Στρατηγική Προσαρμοστικής Επιθετικότητας

Το 2008 οι P. Vytelingum, D. Cliff και N. Jennings σε δημοσίευσή τους [31] επαναπροσδιορίζουν τη στρατηγική RB και προς βελτίωσή της προτείνουν τη στρατηγική *Προσαρμοστικής Επιθετικότητας (Adaptive Aggressiveness – AA)*. Η τελευταία ακολουθεί την ορολογία και τις σχέσεις της στρατηγικής RB με μια κρίσιμη διαφοροποίηση, τις τιμές της μεταβλητής  $\theta$  των σχέσεων (2.53) και (2.54). Οι συγγραφείς ονομάζουν τη διαδικασία «μακροπρόθεσμη εκμάθηση», τονίζοντας τη διαφορά με τις σχέσεις (2.55), (2.56) και τους αλγόριθμους εκμάθησης (Σχήμα 2.13 και Σχήμα 2.14) που λαμβάνουν την ονομασία «βραχυπρόθεσμη εκμάθηση».

Καθώς το  $\theta$  έχει βέλτιστες τιμές για συνθήκες της αγοράς που αδυνατούν να προσδιοριστούν από το σημείο ισορροπίας, λαμβάνεται ως νέο μέτρο σύγκρισης ο συντελεστή σύγκλισης. Έτσι, σε συμφωνία με τις (2.18) και (2.19) ο συντελεστής σύγκλισης εκτιμάται από τις τιμές των  $N$  τελευταίων συναλλαγών:

$$a = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=T-N+1}^T (p_i - p^*)^2}}{p^*} \quad (2.59)$$

όπου  $p_i$  η τιμή μιας προσφοράς  $i$ ,  $T$  η τελευταία συναλλαγή και  $p^*$  η εκτιμώμενη τιμή ισορροπίας. Έτσι, ο μηχανισμός εκμάθησης περιγράφεται από τη σχέση (2.60):

$$\theta(t+1) = \theta(t) + \beta_2 \cdot (\theta^*(a) - \theta(t)) \quad (2.60)$$

όπου το  $\beta_2$  είναι ο συντελεστής εκμάθησης και παίρνει τιμές από το διάστημα  $(0,1)$ , ενώ το  $\theta^*$  εκφράζει την επιθυμητή τιμή του  $\theta$  και βρίσκεται συναρτήσει των ορίων του  $\theta$  καθώς και των ορίων του συντελεστή σύγκλισης:

$$\theta^*(a) = (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \cdot \left(1 - \frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}}\right) \cdot e^{2 \cdot \left(\frac{a - a_{\min}}{a_{\max} - a_{\min}} - 1\right)} + \theta_{\min} \quad (2.61)$$

Με βάση λοιπόν τον μηχανισμό εκμάθησης του  $\theta$ , είναι εφικτό ο πράκτορας να προσαρμοστεί σε διάφορες απρόσμενες συνθήκες. Τέλος, ας αναφερθεί ότι το  $\theta$  επιταχύνει τη σύγκλιση στην τιμή στόχου (σχέσεις (2.53) και (2.54)) σε περίπτωση αύξησης του συντελεστή σύγκλισης και την επιβραδύνει στην αντίθετη περίπτωση.

### 2.5.9. Στρατηγική Προσαρμοστικής Συμπεριφοράς

Το 2005 οι H. Ma και H. Leung δημοσίευσαν [33] μια καινούργια στρατηγική, τη στρατηγική *Προσαρμοστικής Συμπεριφοράς* (*Adaptive Attitude – AA*), η οποία, για την αποφυγή σύγχυσης με τη στρατηγική Προσαρμοστικής Επιθετικότητας, θα αναφέρεται στο εξής με το ακρωνύμιο AAT (*Adaptive ATtitude*).

Οι συγγραφείς προσπάθησαν να προσεγγίσουν όσο γίνεται καλύτερα το ανθρώπινο μοντέλο, θεωρώντας πυρήνα της στρατηγικής τους την *προθυμία* (*eagerness*) που διακρίνει έναν πράκτορα. Αρχικά, ορίζεται η *συχνότητα συναλλαγών* (*transaction rate*) ενός πράκτορα  $i$  ως ο λόγος των επιτυχημένων συναλλαγών του πράκτορα προς το σύνολο των επιτυχημένων συναλλαγών της αγοράς. Η συνάρτηση αυτή είναι ανάλογη της *βραχυπρόθεσμης συμπεριφοράς* (*short-term attitude*)  $TR_i$  του πράκτορα. Η *μακροπρόθεσμη συμπεριφορά* (*long-term attitude*)  $TP_i$  του πράκτορα ορίζεται ως μέγεθος ανάλογο του *ποσοστού συναλλαγής* (*transaction percentage*) που είναι ο λόγος των αγαθών που εμπορεύτηκε ο πράκτορας προς τα αγαθά που είχε στόχο να εμπορευτεί.

Η παρακάτω συνάρτηση δείχνει την προθυμία ενός πράκτορα να συναλλαχθεί :

$$F_{eager}(TR_i, TP_i) = W_s(TR_i) \cdot W_L(TP_i) \quad (2.62)$$

όπου τα βάρη  $W_s(TR_i)$  και  $W_L(TP_i)$  υπολογίζονται από σταθερές ενώ το πρώτο είναι ανάλογο του  $TR_i$  και το δεύτερο αυξάνεται για  $TP_i = 1$  και μειώνεται για  $TP_i < 1$  ([33]). Έτσι, ένας πράκτορας πραγματοποιεί περισσότερες συναλλαγές αν η βραχυπρόθεσμη συμπεριφορά του δείχνει μικρό ποσοστό επιτυχημένων συναλλαγών ή η μακροπρόθεσμη συμπεριφορά του δείχνει μικρό ποσοστό συναλλασθέντων προϊόντων. Αντίθετα, για μεγάλο ποσοστό επιτυχημένων συναλλαγών ή συναλλασθέντων προϊόντων, η προθυμία του πράκτορα για περισσότερες συναλλαγές μειώνεται και αποζητά μεγαλύτερο κέρδος.

Οι αρχικές συνθήκες της στρατηγικής AAT είναι παρόμοιες με αυτές της στρατηγικής RB, γι' αυτό παραλείπονται [33]. Για έναν πωλητή  $i$ , η *βασική τιμή* (*basic price*) του δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$P_{basic} = C_i \cdot \gamma_1 \quad (2.63)$$

όπου  $C_i$  η οριακή τιμή του πωλητή και  $\gamma_1$  ένας τυχαίος πραγματικός αριθμός. Αντίστοιχη είναι η σχέση για έναν αγοραστή  $j$  για την οριακή τιμή του  $D_j$  :

$$P_{basic} = D_j \cdot \gamma_1 \quad (2.64)$$

Ορίζοντας ως  $n$  τον τρέχων γύρο εμπορίου, με βάση τις εξέχουσες προσφορές πώλησης  $OA$  και αγοράς  $OB$ , προκύπτει η τιμή στόχου στον παρακάτω αλγόριθμο:

|   |   |
|---|---|
| <p>Αν (έγινε συνολολλαγή στο γύρο <math>n-1</math>) τότε</p> $P_{target} = \max(P_{n-1} + \theta, OB_n)$ <p>Αλλιώς</p> $P_{target} = \max(OA_n - \beta, OB_n)$ <p style="text-align: center;">(α)</p> | <p>Αν (έγινε συνολολλαγή στο γύρο <math>n-1</math>) τότε</p> $P_{target} = \min(P_{n-1} - \theta, OA_n)$ <p>Αλλιώς</p> $P_{target} = \min(OB_n + \beta, OA_n)$ <p style="text-align: center;">(β)</p> |
|---|---|

Σχήμα 2.16 Αλγόριθμος υπολογισμού τιμής στόχου AAT πωλητών (α) και αγοραστών (β)

όπου τα  $\theta$  και  $\beta$  αποτελούν τα ποσά αύξησης ή μείωσης που δηλώνουν την επιθετικότητα του πράκτορα. Υπολογίζεται, λοιπόν, το μέγεθος του βήματος (*step*)  $S_{step}$ , που αποτελεί την προσαρμοστική λογική της στρατηγικής, για έναν πωλητή:

$$S_{step} = \begin{cases} (P_{target} - P_{basic}) \cdot F_{eager} & \alpha \nu \quad P_{target} \geq P_{basic} \\ (\max(P_{target}, C_i) - P_{basic}) \cdot (1 - F_{eager}) & \alpha \nu \quad P_{target} < P_{basic} \end{cases} \quad (2.65)$$

και για έναν αγοραστή:

$$S_{step} = \begin{cases} (P_{target} - P_{basic}) \cdot F_{eager} & \alpha \nu \quad P_{target} \leq P_{basic} \\ (\max(P_{target}, D_j) - P_{basic}) \cdot (1 - F_{eager}) & \alpha \nu \quad P_{target} > P_{basic} \end{cases} \quad (2.66)$$

Η τελική προσφορά ενός πράκτορα δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$shout = P_{basic} + S_{step} \quad (2.67)$$

### 2.5.10. Στρατηγική Q

Η στρατηγική  $Q$  ( $Q$ -strategy) αποτελεί μια στρατηγική ενισχυτικής μάθησης η οποία αναπτύχθηκε το 2008 από τους N. Borisson και N. Wirstrom [34]. Οι συγγραφείς βασίζονται στην τεχνική ενισχυτικής μάθησης  $Q$ -learning με χρήση μιας άπληστης ( $e$ -greedy) στρατηγικής. Ο πράκτορας είτε «εξερευνεί» το περιβάλλον του με πιθανότητα  $e$ , είτε εκμεταλλεύεται τη γνώση που έχει αποκτήσει με πιθανότητα  $1 - e$ . Η διαδικασία δημιουργίας προσφορών εξηγείται στο παρακάτω σχήμα:

```

Αν (  $e < SR(0,1)$  ) τότε
     $price = SR(s * val_{job}, val_{job})$ 
Αλλιώς
{
     $state := job.state$ 
     $action := bestAction(state)$ 
    Αν (  $action \neq null$  ) τότε
         $price := action.price$ 
    Αλλιώς
         $price = (s * val_{job}, val_{job})$ 
}

```

Σχήμα 2.17 Αλγόριθμος δημιουργίας προσφορών στρατηγικής Q

όπου  $s \in (0,1)$  μια μεταβλητή κλίμακας και  $SR$  μια συνάρτηση που επιστρέφει τυχαίες τιμές ανάμεσα στις δύο τιμές εισόδου της. Έτσι, σύμφωνα με τη λογική της τεχνικής  $Q$ -learning, η κατάσταση  $state$   $s$ , η ενέργεια  $action$   $a$  και η πληρωμή  $payoff$   $\rho$  είναι οι λεγόμενες τρεις διαστάσεις ( $dimensions$ ). Στα πλαίσια της στρατηγικής ΔΔ, ως κατάσταση ορίζεται μια εργασία που έχει αποτέλεσμα στον πράκτορα, ως ενέργεια μια προσφορά και ως πληρωμή ορίζεται η συνάρτηση χρησιμότητας [35].

Ο κανόνας ενημέρωσης του αλγόριθμου με τη μεταβλητή  $t$  να αντιπροσωπεύει την τρέχουσα χρονική στιγμή είναι ο παρακάτω:

$$Q(s_t, a_t) = Q(s_t, a_t) + \beta_t(s_t, a_t) \cdot \left[ \rho_t + \gamma \cdot \max_a (Q(s_{t+1}, a_t)) - Q(s_t, a_t) \right] \quad (2.68)$$



όπου  $\beta_t$  είναι ένας παράγοντας εκμάθησης (*learning rate*) που δηλώνει τη μεγαλύτερη ή μικρότερη σημασία των πληροφοριών, ενώ  $\gamma$  είναι ένας παράγοντας έκπτωσης (*discounting factor*) επηρεάζει το κατά πόσο στο μέλλον θα συνεχίσει να είναι σε ισχύ ένα αποτέλεσμα του κανόνα. Έτσι αν υπάρχει ενέργεια (παλαιότερη προσφορά) ώστε να «μάθει» ο πράκτορας, προκύπτουν οι εκτιμήσεις τιμής για έναν πωλητή:

$$p_i(t) = \lambda_i + \arg \max_a (Q(s_t, a_t)) \quad (2.69)$$

και έναν αγοραστή αντίστοιχα:

$$p_i(t) = \lambda_i - \arg \max_a (Q(s_t, a_t)) \quad (2.70)$$

όπου  $\lambda_i$  η οριακή τιμή του πράκτορα  $i$ . Προφανώς, αν δεν υπάρχει ενέργεια, ο πράκτορας προσφέρει τυχαία [35].

### 3. Ανάλυση διαγωνισμού Power TAC

#### 3.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό επιχειρείται μια αρχική ανάλυση του διαγωνισμού, κυρίως για την αναγνώριση των διαφόρων μεταβλητών που υπάρχουν με σκοπό την επιλογή κατάλληλων αλγορίθμων για τον πράκτορα λογισμικού που καλούμαστε να υλοποιήσουμε.

Σύμφωνα με τους εμπνευστές του διαγωνισμού [37], η βέλτιστη διαχείριση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί ένα επίκαιρο δύσκολο πρόβλημα. Ακόμα, είναι γνωστό ότι το μέλλον της αγοράς ενέργειας βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και γενικά σε μια πιο αποκεντρωμένη λογική της αγοράς, αφού μικρές επιχειρήσεις και νοικοκυριά μπορούν πλέον να συμπεριφέρονται ως ουσιαστικοί παραγωγοί ή καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας. Τα εγχειρήματα αυτά έχουν ως σημαντικό μειονέκτημα την αδυναμία εξαγωγής ασφαλών συμπερασμάτων όσον αφορά τα ποσά ενέργειας που παράγονται από έναν παραγωγό ή καταναλώνονται από έναν καταναλωτή ανά πάσα χρονική στιγμή.

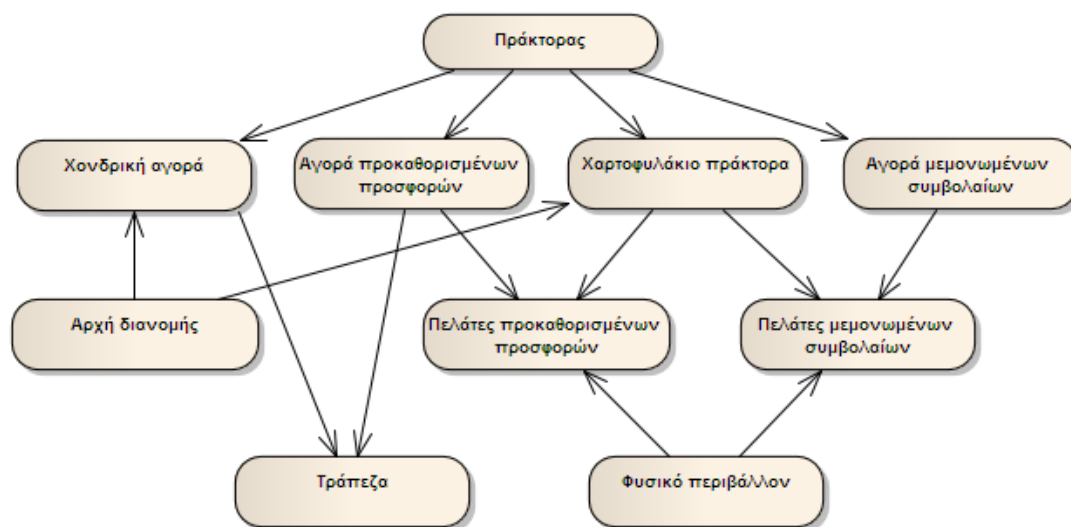
Έτσι, σύμφωνα και με τις δημοσιεύσεις του διαγωνισμού [36,37], το Power TAC (γνωστό αρχικά ως TAC Energy) αποτελεί μια προσομοίωση αυτής της νέας αγοράς ενέργειας με απώτερο σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη κατανόηση του νέου τύπου αγοράς αλλά και τη μοντελοποίηση του, όσο αυτό καθίσταται εφικτό. Ο διαγωνισμός αυτός προσομοιώνει την αγορά με την μέγιστη δυνατή πιστότητα και θα αποτελέσει γόνιμο έδαφος για έρευνα νέων στρατηγικών «έξυπνων» πρακτόρων και λήψης αποφάσεων.

Κάθε πράκτορας λογισμικού λειτουργεί ως *μεσάζων (broker)* και πραγματοποιεί τις κατάλληλες συναλλαγές μεταξύ παραγωγών και καταναλωτών ηλεκτρικής ενέργειας, με σκοπό το μέγιστο δυνατό κέρδος, που εξαρτάται από παράγοντες που αναλύονται παρακάτω (βλέπε 3.9).

### 3.2. Αρχιτεκτονική του συστήματος

Η πλατφόρμα του Power TAC είναι εξαιρετικά πολύπλοκη, κάτι που οφείλεται στο γεγονός ότι καταβάλλεται μεγάλη προσπάθεια ώστε να είναι όσο το δυνατόν πιο ρεαλιστική. Ως εκ τούτου, η πλήρης ανάλυση της αρχιτεκτονικής της ξεφεύγει από τα όρια αυτής της εργασίας. Στο παρόν κεφάλαιο αναλύεται η συνδεσιμότητα του μεσάζοντα με τα κυριότερα μέρη του συστήματος. Για μια πιο λεπτομερή αναφορά στις διάφορες οντότητες του διαγωνισμού, ο αναγνώστης παραπέμπεται στη σχετική βιβλιογραφία και ιδιαίτερα στα [38,39].

Ένα πρωταρχικό μοντέλο του διαγωνισμού από την όψη της σύνδεσης του πράκτορα με τις διάφορες οντότητες του συστήματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα [38]:



Σχήμα 3.1 Πρόχειρο μοντέλο ρόλων και σχέσεων του Power TAC από την όψη του πράκτορα. Κατά τη διάρκεια της φάσης των συμβολαίων, ο πράκτορας συναλλάσσεται κυρίως στην αγορά προκαθορισμένων προσφορών (*tariff market*) και στην αγορά μεμονωμένων συμβολαίων (*contract market*) με τους αντίστοιχους πελάτες. Επίσης, πουλά και αγοράζει ποσότητες ενέργειας για μελλοντική χρήση στη χονδρική αγορά. Κατά τη διάρκεια της φάσης της εκτέλεσης, οι αγορές προκαθορισμένων προσφορών και μεμονωμένων συμβολαίων παρέχουν στοιχεία των πελατών τους στους αντίστοιχους πράκτορες. Όπως είναι λογικό, η συμπεριφορά των πελατών

εξαρτάται από τις τιμές των συμβολαίων που τους παρέχονται (χαρτοφυλάκιο πράκτορα) καθώς και από τις καιρικές συνθήκες και τις υπόλοιπες παραμέτρους του φυσικού περιβάλλοντος.

### 3.3. Οι φάσεις του διαγωνισμού

Ο διαγωνισμός αποτελείται από δύο εξίσου σημαντικές φάσεις, τη *φάση των συμβολαίων* (*contracting phase*) και τη *φάση της εκτέλεσης* (*execution phase*) [37].

#### 3.3.1. Η φάση των συμβολαίων

Στη φάση των συμβολαίων, οι μεσάζοντες πράκτορες επιχειρούν να δεσμεύσουν ποσά ενέργειας που πρόκειται να παραχθούν από τους παραγωγούς και ταυτόχρονα να κλείσουν συμφωνία για τη διάθεση αυτής της ενέργειας στους καταναλωτές. Έτσι κάθε πράκτορας έχει ένα *χαρτοφυλάκιο* (*portfolio*) που περιέχει τους παραγωγούς και τους καταναλωτές με τους οποίους έχει συνάψει συμφωνία. Οι μεσάζοντες έχουν δύο διαφορετικούς μηχανισμούς για αγοραπωλησίες ενέργειας. Για τους περισσότερους πελάτες (νοικοκυριά, μικρές επιχειρήσεις, μικρούς παραγωγούς), κάθε μεσάζων ορίζει κάποιες *προκαθορισμένες προσφορές* (*tariffs*), ενώ για μεγάλους παραγωγούς ή καταναλωτές υπάρχει η δυνατότητα προσέγγισης με *μεμονωμένα συμβόλαια* (*individual contracts*).

Σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η υπηρεσία *Market Intelligence Service (MIS)* που λειτουργεί ως πληροφοριοδότης των μεσαζόντων πρακτόρων όσον αφορά τα προφίλ των παραγωγών και καταναλωτών (π.χ. ιστορικά αρχεία κατανάλωσης ενός νοικοκυριού). Ο πράκτορας καλείται να λειτουργήσει έξυπνα για την κατάθεση ικανοποιητικών προσφορών, με γνώμονα το μέγιστο δυνατό κέρδος.

#### Διαπραγμάτευση προκαθορισμένων προσφορών

Οι μεσάζοντες δικαιούνται να διαχειρίζονται προκαθορισμένες προσφορές σε ορισμένο αριθμό γύρων, των οποίων το πλήθος  $\mathcal{R}$  είναι απροσδιόριστο. Σε κάθε γύρο  $r \in \mathcal{R}$ , οι πράκτορες μπορούν να προσθέσουν ή να αφαιρέσουν προσφορές στη λίστα των προσφορών τους. Το σύνολο των προσφορών όλων των πρακτόρων

για ένα γύρο  $r$  ορίζεται ως  $\mathcal{U}_r$ . Το MIS παρέχει σε κάθε μεσάζοντα το πλήθος και το προφίλ των πελατών που συμφωνούν με τις υποβληθείσες προσφορές.

Έστω  $\mathcal{U}_{b,r}$  το σύνολο των ενεργών προσφορών ενός πράκτορα  $b$  για ένα γύρο  $r$ . Για κάθε υποβαλλόμενη προκαθορισμένη προσφορά ο πράκτορας χρεώνεται με *συνδρομή (fee)*  $p^{fee}$ . Έτσι, η συνολική συνδρομή για τις προσφορές του πράκτορα στο γύρο  $r$  ορίζεται ως:

$$p_b^{fee} = p^{fee} \max_{\mathcal{R}}(|\mathcal{U}_{b,r}|), \forall r \in \mathcal{R} \quad (3.1)$$

Αξιοσημείωτη είναι η συνεισφορά του MIS που ουσιαστικά κατασκευάζει τα προφίλ των πελατών, με όσο το δυνατό ρεαλιστικότερο τρόπο. Για παράδειγμα, είναι πιθανό κάποιοι πελάτες να είναι προσκολλημένοι στα παρόντα συμβόλαιά τους δίχως ουσιαστική επιθυμία να αλλάξουν μεσάζοντα.

#### **Διαπραγμάτευση μεμονωμένων συμβολαίων**

Οι μεγάλες επιχειρήσεις υποβάλλουν *εκκλήσεις/αιτήσεις προσφοράς (Requests for Quotes – RFQs)*. Εκτελείται μια διαδικασία RFQ που διαρκεί έναν ή περισσότερους γύρους μεταξύ ίσως αρκετών πρακτόρων και της μεγάλης επιχείρησης. Η διαδικασία έρχεται σε πέρας όταν το τρέχον συμβόλαιο υπογραφεί και από τις δύο πλευρές.

#### **3.3.2. Η φάση της εκτέλεσης**

Στην φάση της εκτέλεσης το κύριο καθήκον του πράκτορα είναι να εξασφαλίσει μια ισορροπία ποσών ενέργειας ανάμεσα στους παραγωγούς και τους καταναλωτές με τους οποίους έχει συμβόλαια για τον τρέχον γύρο. Τυχούσα απόκλιση από την παραπάνω ισορροπία αντιμετωπίζεται από την αγορά, αλλά ο πράκτορας χρεώνεται με χρηματική ποινή. Στους πράκτορες παρέχονται δεδομένα με χρονικό ορίζοντα πρόσβασης τις 7 επόμενες ημέρες προσομοίωσης.

Έστω  $\mathcal{C}_b$  το σύνολο των καταναλωτών και  $\mathcal{G}_b$  το σύνολο των παραγωγών ενέργειας στο χαρτοφυλάκιο του πράκτορα  $b$ . Για ένα χρονικό διάστημα  $s$  η *συνολική κατανάλωση ενέργειας (total energy consumption)* που υπάγεται στην ευθύνη του πράκτορα είναι:

$$e_c(b, s) = e_{ex}(b, s) + \sum_{i=1}^{|C_b|} e_i(s) \quad (3.2)$$

Ο πρώτος όρος της παραπάνω σχέσης αναφέρεται στην εξαγόμενη προς το δίκτυο ενέργεια. Ο δεύτερος όρος αποτελεί το άθροισμα των καταναλισκόμενων ποσών ενέργειας όλων των καταναλωτών στο χαρτοφυλάκιο του πράκτορα για το χρονικό διάστημα  $s$ . Αντίστοιχα ορίζεται η *συνολική παραγωγή ενέργειας (total energy production)* υπ' ευθύνη του πράκτορα:

$$e_g(b, s) = e_{in}(b, s) + \sum_{j=1}^{|G_b|} e_j(s) \quad (3.3)$$

όπου ο πρώτος όρος αναφέρεται στην εισαγόμενη στο δίκτυο ενέργεια και ο δεύτερος όρος αποτελεί το άθροισμα των παραγόμενων ποσών ενέργειας όλων των παραγωγών στο χαρτοφυλάκιο του πράκτορα για το χρονικό διάστημα  $s$ . Προφανώς, για κάθε πράκτορα  $b$ , η συνθήκη ισορροπίας μεταξύ παροχής και ζήτησης για ένα χρονικό διάστημα  $s$  είναι:

$$e_c(b, s) = e_g(b, s) \quad (3.4)$$

Η όποια απόκλιση από την παραπάνω ισορροπία αντιμετωπίζεται από έναν *ανεξάρτητο διαχειριστή συστήματος (Independent System Operator – ISO)*. Ο ISO φροντίζει ουσιαστικά για την ακριβή εξισορρόπηση παροχής και ζήτησης στο σύνολο του συστήματος σε πραγματικό χρόνο. Να σημειωθεί ότι ο ISO λειτουργεί ως ανεξάρτητη ρυθμιστική αρχή εξωτερικά του συστήματος [38].

Καθώς η απόλυτη ισορροπία είναι μάλλον αδύνατο να επιτευχθεί, ορίζονται για κάθε πράκτορα  $b$  το *συνολικό ελεγχόμενο φορτίο (total controllable load)*  $\varepsilon_c(b, s)$  και η *συνολική ελεγχόμενη χωρητικότητα παραγωγής (total controllable production capacity)*  $\varepsilon_g(b, s)$  στο χρονικό διάστημα  $s$ . Έτσι, αντί της (3.4), χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συνθήκες:

$$e_g(b, s) - \varepsilon_g(b, s) \leq e_c(b, s) \quad (3.5)$$

$$e_c(b, s) - \varepsilon_c(b, s) \leq e_g(b, s) \quad (3.6)$$

οι οποίες είναι σαφώς πιο «ανεκτικές» σε μικρές παρεκκλίσεις από την απόλυτη ισορροπία.

Ας σημειωθεί ότι τα μεγέθη που υπολογίζει ο πράκτορας είναι λογικό να έχουν ούτως ή άλλως αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές τους. Αυτό οφείλεται σε δύο βασικούς παράγοντες. Κατ' αρχάς, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, υπάρχουν παραγωγοί που χρησιμοποιούν μέσα ενέργειας που βασίζονται στις καιρικές συνθήκες (π.χ. ανεμογεννήτριες). Εκτός όμως αυτού, η κατανάλωση ενέργειας π.χ. ενός νοικοκυριού είναι αδύνατον να είναι απόλυτα ακριβής παρ' όλα τα ιστορικά δεδομένα.

Για την επίτευξη ισορροπίας, δίνεται στον πράκτορα η δυνατότητα να «παρακινήσει» (επηρεάσει) τον καταναλωτή για να καταναλώσει λιγότερη ή περισσότερη ενέργεια. Όπως είναι λογικό, αυτό επιτυγχάνεται μέσω διαφοροποιήσεων της τιμής της ενέργειας, εντός πάντα των ορίων του συμβολαίου.

### 3.4. Αρχή διανομής

Μια αρκετά σημαντική οντότητα του διαγωνισμού είναι η *αρχής διανομής* (*distribution utility – DU*). Η οντότητα αυτή είναι υπεύθυνη για την εξισορρόπηση της ενέργειας στην αγορά καθώς και για την καταβολή των διαφόρων αμοιβών και προστίμων της αγοράς. Έτσι, σύμφωνα με το wiki του TAC Energy [38], η λειτουργία της DU συνοψίζεται σε δύο άξονες, την *εξισορρόπηση* (*balancing*) και τη *λογιστική* (*accounting*).

#### Εξισορρόπηση

Για την εξισορρόπηση μεταξύ παραγόμενης και καταναλωθείσας ενέργειας, λαμβάνονται μέτρα αρχικά για κάθε μεσάζοντα ξεχωριστά και στη συνέχεια για το σύνολό τους. Κατόπιν επικοινωνίας με το χαρτοφυλάκιο και τη θέση ενός πράκτορα στη χονδρική αγορά, η ενέργεια του πράκτορα εξισορροπείται θέτοντας φυσικά τα κατάλληλα πρόστιμα. Στη συνέχεια, για την ισορροπία ολόκληρου του συστήματος, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τρόποι:

- Μειώνονται οι εισαγωγές ενέργειας των μεσαζόντων που καταλήγουν ως πλεόνασμα εφόσον δε συνδέονται με εξαγωγές άλλων μεσαζόντων.
- Επιτυγχάνεται εξισορρόπηση με ανταλλαγή ελλειμμάτων και πλεονασμάτων των διάφορων μεσαζόντων.
- Σε περίπτωση ελλείμματος στο σύνολο, η DU έχει τα μέσα για να το καλύψει, θέτοντας σε λειτουργία μια εφεδρική πηγή ενέργειας.

Να σημειωθεί ότι το δίκτυο είναι μάλλον απίθανο να πέσει σε συνολικό πλεόνασμα καθώς για τους επιμέρους μεσάζοντες χρησιμοποιείται η πρώτη διαδικασία από τις παραπάνω προς αποφυγή πλεονάσματος.

### Λογιστική

Όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.1, η DU επικοινωνεί άμεσα με μια τράπεζα, η οποία περιέχει τους λογαριασμούς των μεσαζόντων καθώς και ένα λογαριασμό για τη DU. Οι διάφορες οικονομικές συναλλαγές των μεσαζόντων και των πελατών συνοψίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- *Συνδρομές διανομής (distribution fees)*: Αποτελούν τα χρήματα που χρειάζονται για τη διανομή μιας ποσότητας ενέργειας, τα οποία εξοφλούνται από το μεσάζοντα που είναι υπεύθυνος για αυτή τη διανομή.
- *Πληρωμές για χρήση ή παραγωγή ενέργειας (Payments for energy use or production)*: Κάθε παραγωγός πρέπει να αμείβεται για την ενέργεια που παράγει και κάθε καταναλωτής να πληρώνει για την ενέργεια που καταναλώνει. Αντίστοιχα πραγματοποιείται κατάθεση ή ανάληψη από το λογαριασμό του συγκεκριμένου μεσάζοντα.
- *Συνδρομές εξισορρόπησης (balancing fees)*: Για κάθε μία από τις περιπτώσεις χρήσης μιας διαδικασίας μεμονωμένης εξισορρόπησης, ο μεσάζων που επηρεάζεται καλείται να καταβάλει χρηματικό ποσό αντίστοιχο με το κόστος της διαδικασίας, ή και να πληρώσει κάποιο πρόστιμο.
- *Μερίσματα (Dividends)*: Προς την ελκυστικότητα της αγοράς, κάθε μεσάζων καλείται να δίνει ένα μέρος των καθαρών κερδών του στη DU.



### 3.5. Χονδρική αγορά

Όπως είναι λογικό, τόσο λόγω της φύσης του προβλήματος όσο και λόγω της πολυπλοκότητας των διαφόρων παραμέτρων, οι πράκτορες δεν είναι σε θέση να επιτύχουν την απόλυτη ισορροπία μεταξύ της παραγόμενης και της καταναλισκόμενης ενέργειας που διαχειρίζονται. Έτσι, δίνεται στους πράκτορες η δυνατότητα να αγοράσουν το ποσό ενέργειας που ελλείπεται ή να πουλήσουν την πλεονάζουσα παραγόμενη ενέργεια στη *χονδρική αγορά (wholesale market)* [39].

Η αγορά αυτή δέχεται συνεχώς νέες προσφορές προς πώληση ή αγορά, ενώ η εκκαθάριση της αγοράς πραγματοποιείται κάθε φορά μετά την πάροδο μιας ώρας προσομοίωσης στην τιμή εκκαθάρισης που ορίζεται από τον κανόνα προσφοράς και ζήτησης από το διαχειριστή. Η τελευταία αποτελεί το μέσο των τιμών της μικρότερης επιτυχημένης προσφοράς αγοράς και της μεγαλύτερης επιτυχημένης προσφοράς πώλησης. Πρέπει να αναφέρουμε ότι καθώς κάθε προσφορά αποτελείται από το δίπτυχο τιμή-ποσότητα, είναι δυνατή η μερική εκκαθάρισή κάποιων προσφορών. Οι ανεπιτυχείς προσφορές παραμένουν ενεργές εκτός εάν τις ακυρώσουν οι αντίστοιχοι μεσάζοντες. Όσον αφορά την πληροφόρηση των συναλλασσόμενων της αγοράς, όλες οι προσφορές (εκκαθαρισμένες ή μη) γνωστοποιούνται στους πράκτορες έπειτα από κάθε εκκαθάριση, χωρίς να γίνεται γνωστή η προέλευση της κάθε προσφοράς.

Ας σημειωθεί ακόμα ότι στην αγορά συμμετέχει ένας *πάροχος ρευστότητας (Liquidity Provider)* για την εξασφάλιση της ύπαρξης συναλλαγών και του ύψους των τιμών. Στο Power TAC, ο πάροχος ρευστότητας αντιπροσωπεύει μια *υπηρεσία ρευστότητας αγοράς (Market Liquidity Service)*, που μοντελοποιεί εξωτερικές οντότητες ως προς την αγορά [40].

Βιβλιογραφικά ο όρος «χονδρική αγορά» αναφέρεται συνήθως σε αγορές όπου πραγματοποιούνται συναλλαγές με μεγάλη τιμή εκκαθάρισης και αμελητέες διαφορές στις τιμές αγοράς - πώλησης.

### 3.6. Πληροφόρηση

Οι πληροφορίες που γνωστοποιούνται σε κάθε μεσάζοντα είναι ένα πολύ σημαντικό στοιχείο περιγραφής της αγοράς και συνδέεται άρρηκτα με τις δυνατότητές του στην αγορά.

Αρχικά, παρατίθενται οι πληροφορίες που γίνονται γνωστές στον πράκτορα σε κάθε φάση του παιχνιδιού. Για μια ανάλυση ενός σεναρίου του διαγωνισμού [41], αναφέρεται ότι ο χρόνος χωρίζεται σε καθορισμένα χρονικά διαστήματα (timeslots) 1 ώρας παιχνιδιού σε αντιστοιχία με 5 δευτερόλεπτα πραγματικού χρόνου. Το περιβάλλον είναι πραγματικού χρόνου και σε κάθε χρονική στιγμή οι πελάτες έχουν συμβόλαιο με ένα μεσάζοντα. Οι μεσάζοντες και οι πελάτες εναποθέτουν και επιλέγουν αντίστοιχα προσφορές στη διάρκεια ενός timeslot.

#### 3.6.1. Έναρξη παιχνιδιού

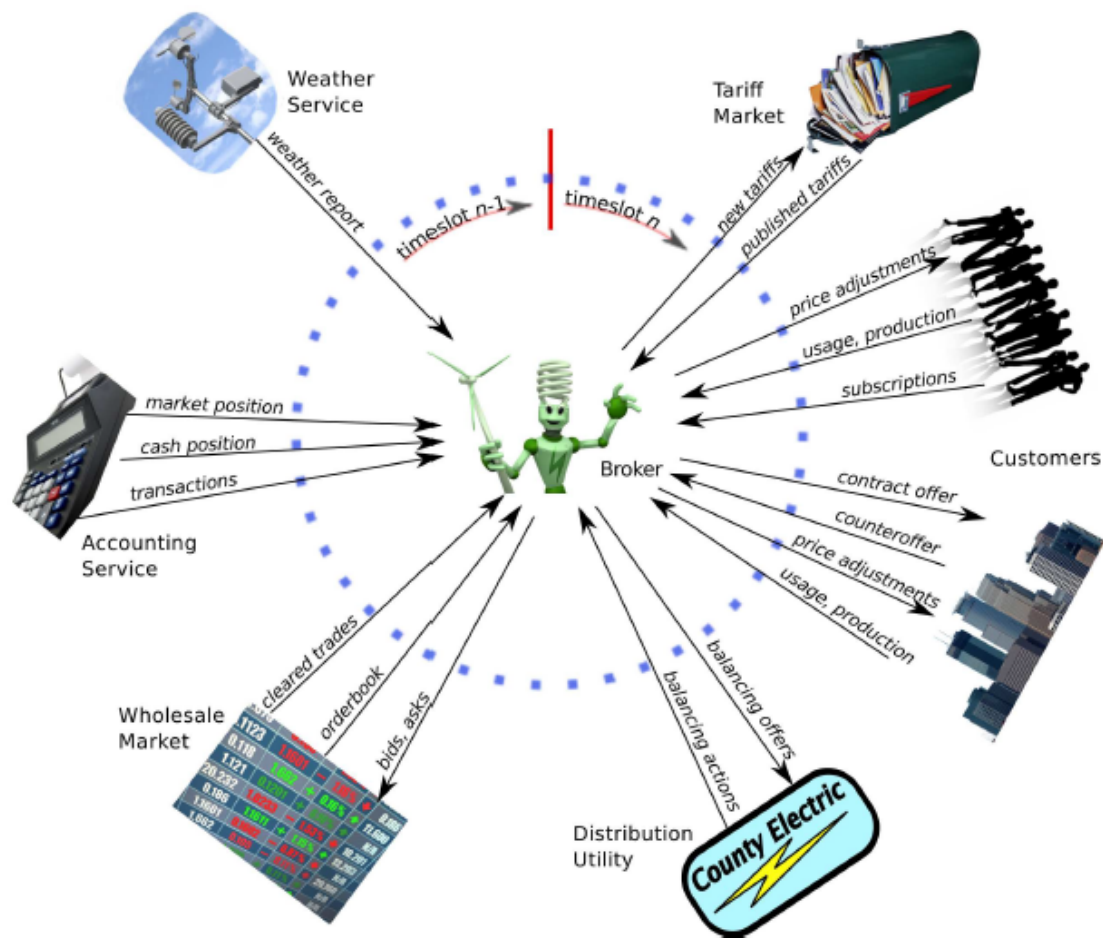
Κατά την έναρξη ενός παιχνιδιού, όλοι οι πελάτες έχουν συμβόλαια προκαθορισμένων προσφορών με έναν *προεπιλεγμένο μεσάζοντα* (*Default Broker*) σχεδιασμένο ώστε να μην προβάλλει αντίσταση όταν αρχίσουν οι προσφορές από τους υπόλοιπους παίκτες-μεσάζοντα. Εφόσον όλοι οι πράκτορες συνδεθούν στο server, γίνονται δημόσια (δηλαδή σε όλους εξ' αυτών) γνωστά τα εξής:

- *Παράμετροι παιχνιδιού – αρχικοποίησης*: Αρχικές παράμετροι του διαγωνισμού όπως π.χ. ο αριθμός των μεσαζόντων, η αναμενόμενη διάρκεια, η διάρκεια ενός timeslot, οι τιμές των διάφορων συνδρομών, τα επιτόκια της τράπεζας κτλ. Στα παραπάνω περιλαμβάνεται η δημοσιοποίηση των ταυτοτήτων των μεσαζόντων.
- *Προεπιλεγμένες προσφορές*: Τα συμβόλαια των πελατών με τον προεπιλεγμένο μεσάζοντα.
- *Πρόγνωση καιρού*: Ο τρέχων καιρός και η πρόβλεψη για τις επόμενες 48 ώρες.
- *Τιμές χονδρικής αγοράς*: Οι τιμές των προσφορών στη χονδρική αγορά (καθώς δεν έχουν ακόμα λάβει μέρος οι μεσάζοντες, αφορούν προσφορές των GenCos και της αρχής διανομής).

Σε περίπτωση σφάλματος που υποχρεώσει τον πράκτορα να επανασυνδεθεί στο σύστημα, αποστέλλονται εκ νέου οι παράμετροι παιχνιδιού-αρχικοποίησης.

### 3.6.2. Βασικό σενάριο

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, το παιχνίδι ακολουθεί μια συγκεκριμένη ροή-σενάριο το οποίο επαναλαμβάνεται σε κάθε timeslot. Στη διάρκεια, λοιπόν, ενός timeslot, για έναν πράκτορα ισχύει το σενάριο που φαίνεται στο Σχήμα 3.2:



Σχήμα 3.2 Βασικό σενάριο διαγωνισμού

Το σενάριο του παραπάνω σχήματος αναλύεται στον πίνακα που ακολουθεί, παραλείποντας τη διαδικασία RFQ των μεμονωμένων πελατών, καθώς οι τελευταίοι δεν υλοποιήθηκαν στα πλαίσια του πιλοτικού διαγωνισμού 2011.

Πίνακας 3.1 Βασικό σενάριο διαγωνισμού

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Αγορά προκαθορισμένων προσφορών | Ο πράκτορας υποβάλλει τις προκαθορισμένες προσφορές του στην αγορά προκαθορισμένων προσφορών.   |
|                                 | Ο πράκτορας λαμβάνει από την αγορά τα στοιχεία των τρεχόντων (ενεργών) προσφορών, εφόσον το ζητήσει.  |
| Πελάτες                         | Ο πράκτορας μεταβάλλει τις τιμές των ενεργών συμβολαίων του με σκοπό την εξισορρόπηση των μεγεθών ενέργειας που διαχειρίζεται.  |
|                                 | Οι πελάτες αποστέλλουν στον μεσάζοντά τους τα στοιχεία για τη χρήση ή την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι μετρήσεις αυτές αφορούν την παραγωγή και την κατανάλωση όλων των πελατών του πράκτορα οι οποίοι χωρίζονται με βάση τα συμβόλαια που έχουν επιλέξει. |
|                                 | Εφόσον το ζητήσει, ο μεσάζων λαμβάνει στατιστικά για την κατανάλωση ή την παραγωγή ενέργειας των πελατών για τις τελευταίες 7 ημέρες.   |
|                                 | Ο μεσάζων ενημερώνεται για τις αλλαγές στο χαρτοφυλάκιό του, δηλαδή για τα ενεργά συμβόλαιά του, τα νέα συμβόλαια καθώς και τα συμβόλαια που έπαψαν να είναι σε ισχύ.   |
|                                 | Ο πράκτορας ενημερώνεται συνδρομές ή τα bonus αποδοχής προσφοράς των πελατών του.   |
| Αρχή διανομής                   | Ο πράκτορας καταθέτει τις προσφορές του για την εξισορρόπηση ενέργειας στην αρχή διανομής.  |
|                                 | Η αρχή διανομής πραγματοποιεί τις απαραίτητες ενέργειες για την εξισορρόπηση του χαρτοφυλακίου του πράκτορα και τον ενημερώνει στέλνοντας μια αναφορά.  |
| Χονδρική αγορά                  | Ο πράκτορας υποβάλλει τις προσφορές του προς αγορά ή πώληση ενέργειας στη χονδρική αγορά.   |
|                                 | Αποστέλλεται στον πράκτορα ένα πλήρες βιβλίο παραγγελιών της χονδρικής αγοράς, το οποίο περιέχει όλες τις προσφορές όλων των μεσάζοντων για τις 23 επόμενες ώρες συναλλαγών.  |
|                                 | Αποστέλλονται στον πράκτορα πληροφορίες σε σχέση με τις εκκαθαρισμένες συναλλαγές της χονδρικής αγοράς στις οποίες ο ίδιος συμμετέχει.  |
| Λογιστική                       | Ο πράκτορας λαμβάνει αναφορά που περιέχει όλες τις συναλλαγές του πράκτορα, τα συμβόλαια προσφορών, τις συναλλαγές χονδρικής αγοράς, τις συνδρομές εξισορρόπησης.   |
|                                 | Ο πράκτορας λαμβάνει τα στοιχεία του τραπεζικού λογαριασμού του, που περιέχουν τη χρηματική του κατάσταση.  |
|                                 | Αποστέλλονται στον πράκτορα όλες οι δεσμεύσεις του για εισαγωγή/εξαγωγή ενέργειας για τις επόμενες 23 ώρες στη χονδρική αγορά.  |
| Μετεωρολογική υπηρεσία          | Ο πράκτορας λαμβάνει στοιχεία για τον τρέχοντα καιρό καθώς και την πρόβλεψη για τις επόμενες 48 ώρες.   |

### 3.7. Κατηγοριοποίηση πελατών

Στις επόμενες υποενότητες αναλύονται οι διάφοροι τύποι πελατών, παραγωγών και καταναλωτών. Οι πελάτες, αρχικά, μπορούν να διακριθούν σε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με τον τρόπο που κλείνουν συμφωνίες, βάσει των μεγεθών ενέργειας που διαπραγματεύονται. Διακρίνονται σε *πελάτες προκαθορισμένων προσφορών (tariff customers)*, όπως νοικοκυριά ή μικρές επιχειρήσεις, και σε *πελάτες συμβολαίων (contract customers)* όπως π.χ. μεγάλα βιομηχανικά συγκροτήματα ή κυβερνητικές οργανώσεις [39]. Με σκοπό την όσο το δυνατόν καλύτερη προσέγγιση της πραγματικότητας, το Power TAC προσομοιώνει ποικίλους παραγωγούς και καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας.

#### 3.7.1. Παραγωγοί ενέργειας

Σύμφωνα με τα πρωταρχικά στοιχεία που έχουν δημοσιευθεί [39], οι βασικότερες κατηγορίες παραγωγών που εμφανίζονται στο διαγωνισμό είναι οι εξής:

- *Ηλιακοί συλλέκτες (solar panels)*: Έχουν μια ονομαστική χωρητικότητα, ενώ η προσομοίωση λαμβάνει υπόψη την ηλιοφάνεια κατά τη διάρκεια της ημέρας.
- *Ανεμογεννήτριες (wind turbines)*: Έχουν μια ονομαστική χωρητικότητα, ενώ η προσομοίωση λαμβάνει υπόψη την ταχύτητα του ανέμου.
- *Συστήματα συνδυασμένης παραγωγής θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας (Combined heat and power systems – CHP systems)*: Είναι αεριοστρόβιλοι που παράγουν ηλεκτρική ενέργεια ενώ ο ατμός που παράγεται χρησιμοποιείται για σκοπούς θέρμανσης.

Οι παραπάνω τρόποι παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας είναι ευρέως διαδεδομένοι, όχι μόνο για την εύρυθμη παραγωγή αλλά και για την πολύ καλή οικονομική αποδοτικότητά τους. Ως προς την προσομοίωση, όσον αφορά τους ηλιακούς συλλέκτες και τις ανεμογεννήτριες, χρησιμοποιούνται ιστορικά δεδομένα για την πρόβλεψη παραγωγής ενέργειας, εισάγοντας ένα συντελεστή σφάλματος που αυξάνεται όσο περισσότερο απέχουμε χρονικά από το σημείο πρόβλεψης. Όσον

αφορά την πρόβλεψη του καιρού, οι πράκτορες είναι σε θέση να προμηθευτούν βραχυπρόθεσμα δεδομένα τα οποία όμως υπολογίζονται μέσω στοχαστικής διαδικασίας εισάγοντας μια αρκετά ρεαλιστική λογική [37].

### 3.7.2. Καταναλωτές ενέργειας

Σύμφωνα με το δημόσιο wiki του Power TAC [39], οι καταναλωτές ηλεκτρικής ενέργειας διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- *Νοικοκυριά (household consumers)*: Τα νοικοκυριά αποτελούν μια αρκετά σημαντική οντότητα, καθώς όταν γίνεται μια ομαδοποίηση αρκετών εξ' αυτών είναι πιθανό η ενέργεια που καταναλώνουν να φτάσει σε αρκετά υψηλά επίπεδα.
- *Επιχειρήσεις (business consumers)*: Αφορούν μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις ή και μικρές βιομηχανίες. Η ενέργεια που καταναλώνουν παρουσιάζεται αρκετά αυξημένη τα τελευταία χρόνια.
- *Δημόσιες υπηρεσίες (public services)*: Αποτελούν μια ιδιαίτερη κατηγορία καθώς στις περισσότερες περιπτώσεις, η κατανάλωση ενέργειας των δημόσιων υπηρεσιών διέπεται από ειδικές νομοθετικές ρυθμίσεις.
- *Βιομηχανίες (industry consumers)*: Περιέχουν τα βιομηχανικά συγκροτήματα που καταναλώνουν πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας, όπως εργοστάσια, αυτοκινητοβιομηχανίες κ.α.

Είναι απαραίτητο να επισημανθεί ότι η ένταξη μιας οντότητας σε μια από τις παραπάνω κατηγορίες δεν ορίζει αυστηρά τη φύση της. Έτσι, είναι πιθανό ένα νοικοκυριό να έχει τοποθετήσει φωτοβολταϊκά, όχι μόνο για τη μερική κάλυψη των αναγκών ηλεκτροδότησής του αλλά ίσως και για να πουλήσει ενέργειας στο ηλεκτρικό δίκτυο. Αντίστοιχο παράδειγμα αποτελούν και οι ιδιοκτήτες ηλεκτρικών οχημάτων, οι οποίοι, εκτός της φόρτισης του οχήματος με ηλεκτρική ενέργεια, είναι εφικτό να ελευθερώσουν την περίσσεια ενέργειας του οχήματός τους στο δίκτυο.

### 3.8. Πελάτες προκαθορισμένων προσφορών

Για τον προκαταρκτικό διαγωνισμό του 2011 δίνεται μόνο η δυνατότητα προσέγγισης πελατών με προκαθορισμένες προσφορές, ενώ δεν υπάρχουν πελάτες μεμονωμένων συμβολαίων. Στη συνέχεια αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο υποβάλλονται προκαθορισμένες προσφορές από τους μεσάζοντες, καθώς ο τρόπος με τον οποίο οι προσφορές αυτές γίνονται δεκτές ή απορρίπτονται από τους πελάτες.

#### 3.8.1. Δομή μιας προκαθορισμένης προσφοράς

Κάθε προκαθορισμένη προσφορά που σχεδιάζει και εναποθέτει στην αγορά ο πράκτορας έχει μια πολύπλοκη δομή, ικανή να περιγράψει βέλτιστα όλους τους δυνατούς συνδυασμούς τιμολόγησης καθώς και τις διάφορες συνδρομές. Έτσι, είναι δυνατό για μια προσφορά να οριστούν τα εξής:

- *Κλιμακωτή κοστολόγηση:* Η αξία της ηλεκτρικής ενέργειας που πληρώνουν οι πελάτες χωρίζεται σε κλίμακες, δηλαδή για παράδειγμα στον πελάτη δίνεται μια τιμή για τις πρώτες 20 kWh/ημέρα, μια άλλη τιμή για τις επόμενες κτλ.
- *Κοστολόγηση χρόνου χρήσης:* Αφορά αποκλειστικά το χρόνο κατά τον οποίο χρησιμοποιείται η ενέργεια.
- *Κοστολόγηση εργάσιμης ημέρας - σαββατοκύριακου:* Η αξία της ηλεκτρικής ενέργειας είναι δυνατό να διαφέρει ανάλογα με το αν καταναλώνεται κατά τη διάρκεια της εβδομάδας ή του σαββατοκύριακου.
- *Μικτή κοστολόγηση:* Έχει δύο σκέλη, μια σταθερή προκαθορισμένη ημερήσια αμοιβή (πάγιο), και μια αμοιβή για τη χρήση της ενέργειας.
- *Πληρωμές εγγραφής:* Αφορούν την εγγραφή ενός πελάτη σε μια προκαθορισμένη προσφορά και μπορεί να είναι αμφίπλευρες· είτε σε μορφή συνδρομής από τον πελάτη στο μεσάζοντα είτε σε μορφή bonus από το μεσάζοντα στον πελάτη.

- *Ποινές πρόωρης απόσυρσης:* Αφορούν τα χρηματικά ποσά που καλείται να πληρώσει ο πελάτης για του δοθεί το δικαίωμα να «σπάσει» το συμβόλαιο πριν από την προγραμματισμένη λήξη του.

Έτσι, με βάση τα παραπάνω, είναι δυνατό να κατασκευαστεί μια οποιαδήποτε προσφορά. Ένα τυπικό παράδειγμα μιας προσφοράς προς ένα καταναλωτή ενέργειας θα ήταν:

#### Προκαθορισμένη Προσφορά

Συνδρομή εγγραφής: 0€

Διάρκεια συμβολαίου: 30 ημέρες

Ποινή πρόωρης απόσυρσης: 15€

Ημερήσιο πάγιο: 1€

Κόστος κιλοβατώρας για 0-800 kWh: 0,056€/kWh

Κόστος κιλοβατώρας για 800-1600 kWh: 0,071€/kWh

Κόστος κιλοβατώρας για >1600 kWh: 0,082€/kWh

Όπως είναι εμφανές και από το παραπάνω παράδειγμα δεν είναι απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν όλες οι κοστολογήσεις που αναφέρθηκαν παραπάνω για μία προσφορά.

### **3.8.2. Αξιολόγηση μιας προκαθορισμένης προσφοράς**

Η στρατηγική επιλογής μιας προκαθορισμένης προσφοράς από έναν πελάτη χαρακτηρίζεται από μεγάλο ενδιαφέρον καθώς η επιτυχία ή όχι του πράκτορα έγκειται σε μεγάλο βαθμό στην ικανότητά του να ελκύει όσο το δυνατόν περισσότερους πελάτες. Σε κάθε περίοδο προσφορών ένας πελάτης λαμβάνει ένα σύνολο από προκαθορισμένες προσφορές. Ας σημειωθεί ότι το σύνολο αυτό μπορεί να περιλαμβάνει όλες τις υποβληθείσες προσφορές ή και υποσύνολο αυτών το οποίο λαμβάνεται τυχαία. Στη συνέχεια, ο πελάτης κρίνει τις προσφορές και επιλέγει αυτή που θεωρεί πιο συμφέρουσα.



Για την επιλογή μιας προσφοράς χρειάζεται κάθε μία εξ' αυτών να αξιολογηθεί με βάση πολλούς παράγοντες που απεικονίζονται μαθηματικά με μια συνάρτηση χρησιμότητας προκαθορισμένης προσφοράς (*tariff utility*). Η συνάρτηση αυτή παρατίθεται παρακάτω για μια προκαθορισμένη προσφορά  $i$ :

$$u_i = -(c_u + c_f) \cdot a_{cost} - e_i \cdot a_{energy} - r_i \cdot a_{risk} - I_i \cdot a_{inertia} \quad (3.7)$$

Στην παραπάνω σχέση οι παράμετροι  $a_{cost}$ ,  $a_{energy}$ ,  $a_{risk}$  και  $a_{inertia}$  είναι εσωτερικές παράμετροι κάθε πελάτη που ορίζουν τη σημασία (βαρύτητα) που δίνει στο κόστος, το είδος της ενέργειας (π.χ. από ανανεώσιμες πηγές), το ενδεχόμενο ρίσκο (από π.χ. ένα δυναμικό συμβόλαιο) και τη θέληση τους να παραμείνουν αδρανείς αντίστοιχα. Χαρακτηριστικό είναι το γεγονός ότι η ανθρώπινη συμπεριφορά προσεγγίζεται αρκετά επιτυχημένα καθώς ένα χαρακτηριστικό του ανθρώπου όπως η συνήθεια και συνεπώς εμμονή του σε μια προσφορά ερμηνεύεται ως παράγοντας αδράνειας

Ακόμα, στη (3.7) εμφανίζονται 5 μεγέθη που περιγράφουν την προσφορά και τα οποία μεταφράζονται ως κόστη δικαιολογώντας το αρνητικό σύμβολο. Τα μεγέθη είναι τα εξής:

- *Μεταβλητά κόστη  $c_u$* : Για τον υπολογισμό τους λαμβάνονται τα κόστη για τη βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας  $k$  τυχαίων ημερών εντός του διαστήματος της προσφοράς και υπολογίζεται ο μέσος όρος αυτών:

$$c_u = \frac{\sum_k c_k^*(k)}{k} \quad (3.8)$$

- *Πάγια κόστη  $c_f$* : Περιέχει τη συνδρομή ή το bonus αποδοχής προσφοράς  $c_{sign-up}$ , την ποινή πρόωρης απόσυρσης  $c_{exit}$  καθώς και το ημερήσιο πάγιο  $c_{daily}$ . Για την κανονικοποίηση ως προς μια ημέρα, τα δύο πρώτα διαιρούνται με την αναμενόμενη διάρκεια της προσφοράς  $\tilde{t}$ :

$$c_f = c_{daily} + \frac{c_{sign-up} + c_{exit}}{\tilde{t}} \quad (3.9)$$

- *Περιεχόμενο ενέργειας  $e_i$* : Είναι το ποσοστό της ενέργειας που αφορά την προσφορά το οποίο δεν προκύπτει από ανανεώσιμες πηγές ενέργειας.

- *Ρίσκο*  $r_i$ : Είναι η διακύμανση των πιθανών τιμών σε μια δυναμική προσφορά, προσφορά δηλαδή της οποίας οι τιμές ενδέχεται να αλλάξουν κατόπιν συμβολαίου.
- *Αδράνεια πελάτη*  $I_i$ : Δηλώνει την αδυναμία εγκατάλειψης μιας ήδη ισχύουσας προσφοράς  $j$  από τον πελάτη. Δίνεται από τη σχέση:

$$I_i = \begin{cases} 1 & \alpha \nu \quad i \neq j \\ 0 & \alpha \nu \quad i = j \end{cases} \quad (3.10)$$

Είναι χαρακτηριστικό ότι το τελευταίο μέγεθος εξαρτάται από την τρέχουσα προσφορά του πελάτη, επομένως η συνάρτηση χρησιμότητας δύναται να λαμβάνει διαφορετικές τιμές για μια προσφορά ακόμα και αν οι παράμετροι δύο πελατών είναι ίδιες.

### 3.8.3. Επιλογή μιας προκαθορισμένης προσφοράς

Εφόσον κατασκευαστεί η συνάρτηση χρησιμότητας όλων των προς μελέτη προσφορών, ο πελάτης δύναται να ταξινομήσει τις προσφορές κατά φθίνουσα σειρά, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι επιλέγει πάντα την προσφορά με τη μέγιστη χρησιμότητα. Αντίθετα, για κάθε προσφορά  $i$  υπολογίζεται μια πιθανότητα επιλογής της  $\mathbb{P}_i$  σύμφωνα με την παρακάτω σχέση:

$$\mathbb{P}_i = \frac{e^{\lambda u_i}}{\sum_{t \in \mathbb{T}} e^{\lambda u_t}} \quad (3.11)$$

όπου  $\mathbb{T}$  το σύνολο των προς μελέτη προσφορών και  $\lambda$  μια παράμετρος που ορίζει το κατά πόσο ο πελάτης ενεργεί με βάση τη λογική και παίρνει τιμές στο διάστημα  $[0, \infty)$ .

## 3.9. Αξιολόγηση

Σύμφωνα με την αναλυτική δημοσίευση του διαγωνισμού [37], για την ορθότερη αξιολόγηση των συμμετεχόντων είναι απαραίτητο να δοθεί βαρύτητα σε διάφορα κριτήρια, όπως όχι μόνο το καθαρό κέρδος του πράκτορα αλλά π.χ. και η

προτίμηση του στις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Μεταφράζοντας όλα αυτά τα κριτήρια με οικονομικά μεγέθη, προκύπτει το μοντέλο αξιολόγησης της απόδοσης ενός μεσάζοντα που βασίζεται στη μεγιστοποίηση των κερδών του  $p^{profit}$  που υπολογίζονται από την παρακάτω σχέση:

$$p^{profit} = p^{pay} - p^{cost} - p^{fee} \quad (3.12)$$

όπου  $p^{pay}$  είναι οι πληρωμές των καταναλωτών στο χαρτοφυλάκιο του μεσάζοντα και  $p^{cost}$  οι πληρωμές του μεσάζοντα στους παραγωγούς για την ενέργεια που παρήγαγαν. Ακόμα το μέγεθος  $p^{fee}$  αφορά τις διάφορες συνδρομές (βλέπε 3.3.1 και 3.4) καθώς και ένα φόρο στα καύσιμα (carbon tax) που αφορά μια τιμή σε ευρώ ανά κιλοβατώρα ενέργειας που παράγεται από μη ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Η αξιολόγηση προκύπτει ελέγχοντας το κέρδος που αναλύσαμε προηγουμένως σε κάποια χρονικά διαστήματα, τυχαία επιλεγμένα, τα οποία δε γίνονται προφανώς γνωστά εκ των προτέρων στους μεσάζοντες ώστε να αποφευχθούν φαινόμενα «sniping» στρατηγικών.

## 4. Περιγραφή Περιβάλλοντος Πειραμάτων και Υλοποίησης

### 4.1. Γενικά

Στο κεφάλαιο αυτό αναλύεται ο server πάνω στον οποίο εργαστήκαμε καθώς και το σύνολο του παραγωγικού μας έργου που αφορά τις διάφορες στρατηγικές που χρειάστηκε να υλοποιηθούν. Καθώς ο διαγωνισμός Power TAC τη στιγμή της εκπόνησης αυτής της εργασίας ήταν ακόμα στη διαδικασία της κατασκευής του server, χρησιμοποιήθηκε ένας παραπλήσιος server ο οποίος αναλύεται παρακάτω.

### 4.2. Περιβάλλον Πειραμάτων

Ο server που υλοποιήθηκε αποτελεί μια πολύ ικανοποιητική εκδοχή της αγοράς προκαθορισμένων προσφορών όπως αυτή αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Αναφέροντας τη βασική λειτουργία του, το σύστημα ενεργοποιεί τις κατάλληλες υπηρεσίες (*services*) και στη συνέχεια ορίζει τον default πράκτορα ενώ προαναγγέλλει τη συμμετοχή των πρακτόρων-μεσαζόντων που ο χρήστης επιλέγει.

Στη συνέχεια κατασκευάζεται η αγορά επιλέγοντας τον αριθμό των καταναλωτών και παραγωγών ηλεκτρικής ενέργειας. Οι καταναλωτές ενέργειας δίνονται μέσα από ένα πολύπλοκο μοντέλο το οποίο δεν είναι σκόπιμο να αναλυθεί στα πλαίσια της παρούσας εργασίας. Είναι χρήσιμο όμως να αναφερθεί ότι οι καταναλωτές-νοικοκυριά σχηματίζουν χωριά (*villages*) που συμπεριφέρονται ως μια οντότητα-καταναλωτής. Αντίθετα οι παραγωγοί είναι ανεξάρτητες οντότητες παραγωγής μεγάλων ποσοτήτων ενέργειας κάτι που δικαιολογεί το γεγονός ότι είναι ποσοτικά λιγότεροι.

Είναι ακόμα απαραίτητο να σημειωθεί ότι σε αντιπαράθεση με όσα αναφέρθηκαν στην παράγραφο 3.8, έγινε χρήση μόνο της δυνατότητας υποβολής προσφοράς μεταβλητού κόστους, εκφυλίζοντας έτσι τη συνάρτηση χρησιμότητας προκαθορισμένης προσφοράς (σχέση (3.7)) όπως παρακάτω:

$$u_i = -c_u \cdot a_{cost} \quad (4.1)$$

όπου υπενθυμίζουμε ότι η παράμετρος  $a_{cost}$  είναι εσωτερική παράμετρος κάθε πελάτη που προσδιορίζει τη βαρύτητα που προσδίδει σ' αυτό το κόστος ενώ τα μεταβλητά κόστη  $c_u$  υπολογίζονται ως ο μέσος όρος του κόστους για τη βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας  $k$  τυχαίων ημερών εντός του διαστήματος της προσφοράς.

Έπειτα από την αρχικοποίηση του server, ορίζεται ο αριθμός των timeslots και η προσομοίωση εκκινεί. Σε κάθε timeslot, που αντιστοιχεί σε μία ώρα παιχνιδιού, οι μεσάζοντες καλούνται να διαμορφώσουν τη γενικότερη στρατηγική τους που θα αναλυθεί σε ξεχωριστό κεφάλαιο. Ανά 6 timeslots πραγματοποιείται από τους παραγωγούς και τους καταναλωτές η επιλογή της προσφοράς που επιθυμούν να έχουν.

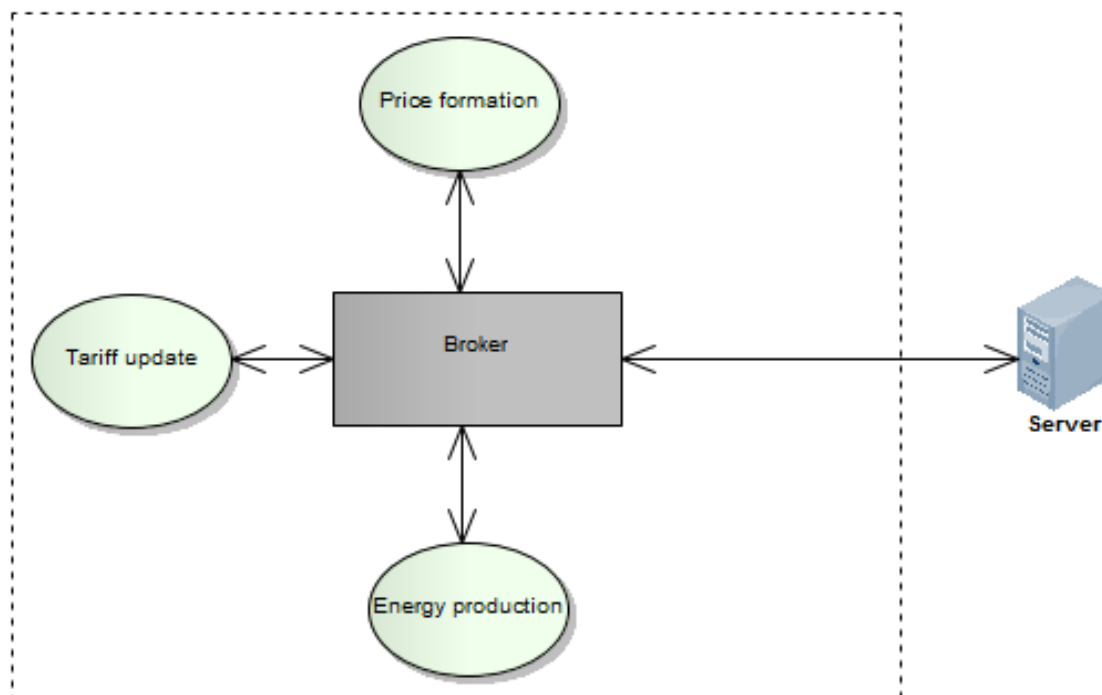
Ο server έχει κατάλληλες συναρτήσεις για τον υπολογισμό όλων των μεγεθών της αγοράς, όπως τις ενεργές προσφορές πώλησης και αγοράς, ιστορικά στοιχεία κατανάλωσης ενέργειας ή τις τρέχουσες συναλλαγές, καθώς επίσης και μετρικές όπως η οικονομική κατάσταση κάθε πράκτορα, η τιμή ισορροπίας κάθε πράκτορα και τα μερίδια αγοράς. Οι μετρικές αυτές αναλύονται περαιτέρω στο κεφάλαιο 5.

### 4.3. Ο πράκτορας

Καθώς η πολυπλοκότητα του προβλήματος είναι αξιοσημείωτη, προς την απλούστευσή του, ο πράκτορας-μεσάζων που υλοποιήθηκε ακολουθεί ένα μοντέλο ικανό να τεμαχίσει το πρόβλημα σε μικρότερα υπό-προβλήματα. Οι κύριοι τομείς πρόκλησης που περιγράφουν τις διαδικασίες του πράκτορα αναλύονται κι έτσι προκύπτει ότι ο πράκτορας καλείται να λάβει αποφάσεις για:

- τη διαμόρφωση τιμών αγοράς και πώλησης ενέργειας
- την ενημέρωση των προσφορών
- την παραγωγή ενέργειας

Έτσι, το γενικότερο μοντέλο του πράκτορα φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:



Σχήμα 4.1 Μοντέλο του πράκτορα

Έτσι, για κάθε πράκτορα ορίζονται μια στρατηγική διαμόρφωσης τιμής, μια στρατηγική ενημέρωσης προκαθορισμένων προσφορών και μια στρατηγική παραγωγής ενέργειας. Οι δύο πρώτες στρατηγικές καλούνται ανά 6 timeslots οπότε και είναι λογικό ο πράκτορας να ενημερώνει τις προσφορές του. Η στρατηγική παραγωγής ενέργειας αφορά τον υπολογισμό μιας εκτίμησης για την ενέργεια την οποία ο πράκτορας θεωρεί ότι θα χρειαστεί για το επόμενο timeslot ώστε να καλύψει τις ανάγκες των καταναλωτών του χαρτοφυλακίου του. Για τη λειτουργία του πράκτορα σχεδιάστηκε μία στρατηγική διαμόρφωσης τιμής, δύο στρατηγικές ενημέρωσης προκαθορισμένων προσφορών και μία στρατηγική παραγωγής ενέργειας.

#### 4.3.1. Στρατηγική διαμόρφωσης τιμής

Αρχικά, κρίνεται σκόπιμο να αναλυθούν τα βασικά στοιχεία που πρόκειται να συμβάλουν στην επιτυχία ή μη της στρατηγικής. Καθώς η αγορά παρέχει αρκετές πληροφορίες στον πράκτορα, σύμφωνα με την έρευνα που προηγήθηκε για τις υπάρχουσες στρατηγικές διαμόρφωσης τιμής, μια στρατηγική εκμάθησης, όπως π.χ. η RE, αναμένεται να μην έχει πολύ καλά αποτελέσματα. Αντιθέτως μια προσαρμοστική και προγνωστική στρατηγική, όπως η ZIP ή η AA, αναμένεται να

είναι αρκετά επιτυχής σε μια τέτοια αγορά. Παρόλα αυτά, λόγω της πολυπλοκότητας της αγοράς τα δεδομένα της αλλάζουν συνέχεια, κάτι που επιτάσσει ο πράκτορας να πειραματίζεται αναζητώντας διαρκώς καλύτερες τιμές.

Έτσι, αρχικά ο πράκτορας λαμβάνει το σύνολο όλων των τελευταίων συναλλαγών με βάση τις οποίες καλείται να υπολογίσει την τιμή επιτυχίας (*successful price*). Η τιμή αυτή ορίζεται ως ο μέσος όρος όλων των επικερδών συναλλαγών της αγοράς και υπολογίζεται με τη μέθοδο του *κινούμενου μέσου όρου* (*moving average*). Αν θεωρήσουμε ότι η μνήμη του πράκτορα περιορίζεται στις  $N$  τελευταίες συναλλαγές, η τιμή επιτυχίας δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$SP = \frac{\sum_{i=T-N+1}^T w_i s_i p_i}{\sum_{i=T-N+1}^T w_i s_i} \quad (4.2)$$

όπου  $w_i$  το βάρος μιας προσφοράς  $i$  με τιμή  $p_i$  και  $s_i$  η επιτυχία της προσφοράς με τιμή 1 για επιτυχημένη και 0 για αποτυχημένη προσφορά. Αν η τελευταία συναλλαγή είναι η συναλλαγή  $T$ , ορίζουμε  $w_T = 1$ , ενώ για όλα τα υπόλοιπα βάρη ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$w_{i-1} = r \cdot w_i \quad (4.3)$$

όπου  $r$  μια παράμετρος που ορίζει το κατά πόσο ο πράκτορας προσμετρά κάθε λιγότερο πρόσφατη προσφορά. Θεωρητικά, το  $r$  παίρνει τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ , πρακτικά όμως μια λογική τιμή είναι 0.95.

Προφανώς, οι σχέσεις (4.2) και (4.3) ισχύουν είτε σε περίπτωση προσφορών αγοράς είτε σε περίπτωση προσφορών πώλησης. Κρίνεται, επίσης, σκόπιμο να σχολιαστεί ότι η προαναφερόμενη μέθοδος υπολογισμού της τιμής επιτυχίας φέρει αρκετές ομοιότητες με τη μέθοδο της στρατηγικής AA, όπου όμως εκεί χρησιμοποιούμε για τον υπολογισμό προβλεπόμενης τιμής ισορροπίας τη σχέση (2.52).

Σύμφωνα, λοιπόν, με τα παραπάνω ο πράκτορας έχει πλέον υπολογίσει μια τιμή που εάν την υποβάλλει αναμένεται να έχει επιτυχία. Όπως, όμως, ήδη αναφέρθηκε,

είναι απαραίτητο να ληφθούν μέτρα για την προγνωστικότητα του πράκτορα. Προς την επίτευξη αυτού, για τον πράκτορα ορίζεται ένας παράγοντας ρίσκου (*risk factor*). Ο παράγοντας αυτός υπολογίζεται σε κάθε γύρο και προσδιορίζει την προθυμία του πράκτορα να ρισκάρει προσπαθώντας να αναζητήσει μεγαλύτερο κέρδος με πιθανότητα να χάσει κάποιο μερίδιο αγοράς, ή το αντίστροφο. Ο παράγοντας ρίσκου  $R$  παίρνει τιμές από το διάστημα  $[-c, c]$ , όπου  $c$  μια παράμετρος που ρυθμίζει τη μέγιστη απόκλιση της τελικής τιμής προσφοράς του πράκτορα από την τιμή επιτυχίας που υπολογίστηκε παραπάνω.

Για τον υπολογισμό του παράγοντα ρίσκου, αρχικά υπολογίζεται το ποσοστό επιτυχίας των  $M$  τελευταίων προσφορών του πράκτορα ως εξής:

$$k = \frac{\sum_{i=1}^M \text{acceptedShouts}(i)}{M} \quad (4.4)$$

όπου η συνάρτηση  $\text{acceptedShouts}(i)$  επιστρέφει τιμή 1 εάν η προσφορά  $i$  ήταν επιτυχημένη και 0 εάν ήταν αποτυχημένη. Είναι προφανές ότι το  $k$  λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $[0,1]$ . Καθώς όμως είναι απαραίτητο να τηρηθούν τα όρια του παράγοντα ρίσκου, το αποτέλεσμα της (4.4) κανονικοποιείται στο διάστημα  $[-c, c]$ :

$$\hat{k} = c \cdot (2k - 1) \quad (4.5)$$

Όπως είναι εμφανές, θα ήταν δυνατό για τον πράκτορα ο παράγοντας ρίσκου να ισούται με την τιμή του  $\hat{k}$ , αφού το τελευταίο είναι ένα μέγεθος που ουσιαστικά προσδιορίζει την επιθετική διάθεση του πράκτορα. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των  $M$  τελευταίων προσφορών πώλησης εάν το ποσοστό των επιτυχημένων προσφορών του πράκτορα είναι μεγαλύτερο από 50%, τότε το  $\hat{k}$  είναι θετικό ορίζοντας έτσι ότι ο πράκτορας μπορεί να ρισκάρει, αυξάνοντας την τιμή πώλησής του. Αντίθετα αν το εν λόγω ποσοστό ήταν μικρότερο από 50%, η τιμή του  $\hat{k}$  είναι αρνητική ορίζοντας ότι ο πράκτορας δεν πρέπει να ρισκάρει και μάλιστα πρέπει να μειώσει την τιμή πώλησής του.

Αντί όμως της εκχώρησης στον παράγοντα ρίσκου της απλής τιμής του  $\hat{k}$ , για τη δυνατότητα πειραματισμού του πράκτορα, ο παράγοντας ρίσκου προκύπτει από



μια κανονική κατανομή. Αρχικά, είναι απαραίτητο η κατανομή να βρίσκεται μεταξύ κάποιων ορίων, οπότε υπολογίζουμε την παράμετρο  $l$ :

$$l = \min \{ |\hat{k} - c|, |\hat{k} + c| \} \quad (4.6)$$

Έτσι, ουσιαστικά θεωρούμε μια κανονική κατανομή ως συνάρτηση πειραματισμού του πράκτορα που ορίζεται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.7)$$

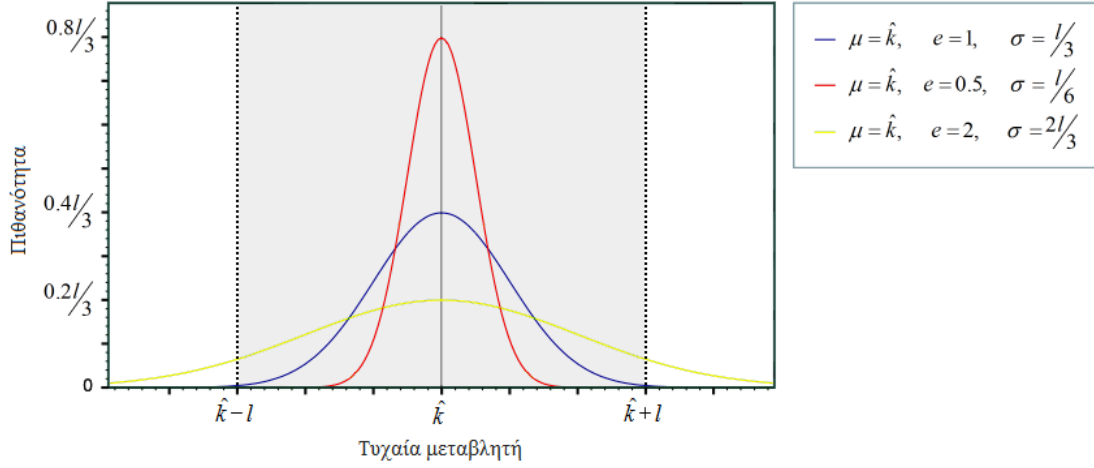
$$g(x) \in [-l, l] \quad (4.8)$$

Η κατανομή αυτή έχει προφανώς μέση τιμή ίση με την τιμή του  $\hat{k}$ , ενώ η τυπική απόκλιση της δίνεται από την παρακάτω σχέση:

$$\sigma = \frac{e \cdot l}{3} \quad (4.9)$$

όπου  $e$  μια παράμετρος που ορίζεται ως *παράμετρος πειραματισμού* (*experimentation parameter*).

Η παράμετρος πειραματισμού ουσιαστικά ορίζει τη σχέση της τυπική απόκλιση της κατανομής με το όριο  $l$  και θεωρητικά λαμβάνει τιμές στο διάστημα  $(0, +\infty)$ . Για την καλύτερη κατανόηση της παραμέτρου, δίνεται το παρακάτω σχήμα, όπου με διαφορετικά χρώματα διακρίνονται τα γραφήματα της συνάρτησης για διάφορες τιμές του  $e$ , και τις αντίστοιχες τιμές της τυπικής απόκλισης  $\sigma$ :



Σχήμα 4.2 Συνάρτηση πειραματισμού του πράκτορα

Οπότε, η τελική τιμή του παράγοντα ρίσκου του πράκτορα θα ληφθεί τυχαία από την κατάλληλη κατανομή που ορίζεται για την παράμετρο πειραματισμού του εντός της σκιασμένης περιοχής του σχήματος. Όπως φαίνεται και από αυτό το σχήμα, το  $e$  ορίζει ουσιαστικά το ύψος της κατανομής καθώς επίσης και το εύρος των τιμών της εντός του διαστήματος  $[\hat{k}-l, \hat{k}+l]$ . Όσο μικρότερη είναι η παράμετρος  $e$  τόσο πιο πιθανό είναι ο πράκτορας να επιλέξει μια τιμή πιο κοντά στη μέση τιμή της κατανομής, ενώ όσο η παράμετρος  $e$  αυξάνεται, αυξάνεται ταυτόχρονα και η πιθανότητα ο πράκτορας να επιλέξει μια οριακή τιμή. Είναι εμφανές ότι πρακτικά οι τιμές της παραμέτρου πειραματισμού είναι λογικό να βρίσκονται στο διάστημα  $[0.5, 2]$ .

Τελικά, αν έστω  $s_{ask}$  η οριακή τιμή πώλησης του πράκτορα τότε η τιμή της επόμενης προσφοράς πώλησης δίνεται από τη σχέση:

$$ask = \begin{cases} SP \cdot (1+R) & \alpha \nu \quad SP \cdot (1+R) > s_{ask} \\ s_{ask} & \alpha \nu \quad SP \cdot (1+R) \leq s_{ask} \end{cases} \quad (4.10)$$

ενώ αν έστω  $s_{bid}$  η οριακή τιμή αγοράς του πράκτορα τότε η τιμή της επόμενης προσφοράς αγοράς δίνεται από τη σχέση:

$$bid = \begin{cases} SP \cdot (1-R) & \alpha \nu \quad SP \cdot (1+R) < s_{bid} \\ s_{bid} & \alpha \nu \quad SP \cdot (1+R) \geq s_{bid} \end{cases} \quad (4.11)$$

όπου προφανώς στη σχέση (4.10) η μεταβλητή  $SP$  αφορά την τιμή επιτυχίας των προσφορών πώλησης ενώ στη σχέση (4.11) αφορά την τιμή επιτυχίας των προσφορών αγοράς.

#### **4.3.2. Στρατηγική ενημέρωσης προκαθορισμένων προσφορών**

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, για τη λειτουργία του πράκτορα σχεδιάστηκαν δύο στρατηγικές ενημέρωσης προκαθορισμένων προσφορών. Και οι δύο αυτές στρατηγικές έχουν απώτερο στόχο την ορθή και καίρια ενημέρωση των προσφορών με βάση την ισορροπία του χαρτοφυλακίου του πράκτορα. Ως βασικές, λοιπόν, παραμέτρους λαμβάνουν το μέγιστο επιτρεπτό πλήθος προσφορών καθώς και την τρέχουσα ισορροπία του χαρτοφυλακίου του πράκτορα. Οι στρατηγικές αυτές αναλύονται στη συνέχεια.

##### **Βασική στρατηγική ενημέρωσης προσφορών**

Η στρατηγική αυτή είναι σχετικά απλή καθώς ο πράκτορας αρχικά προσθέτει κάθε φορά μία προσφορά πώλησης και μία προσφορά αγοράς έως ότου φτάσει στο μέγιστο αριθμό επιτρεπτών προσφορών πώλησης και αγοράς αντίστοιχα. Με αυτόν τον τρόπο επιχειρείται μια γρήγορη «επίθεση» στην αγορά που πιθανώς να έχει καλά αποτελέσματα καθώς αναμένεται για περισσότερες προσφορές να υπάρχει μεγαλύτερη πιθανότητα ένας πελάτης να αποδεχτεί μία από τις προσφορές του πράκτορα. Από την άλλη, αυτός ο τρόπος υποβολής νέων προσφορών χαρακτηρίζεται και από μια επιπολαιότητα καθώς στην αρχή της προσομοίωσης είναι πιθανόν η στρατηγική διαμόρφωσης της τιμής του πράκτορα να μην έχει αρκετά στοιχεία (κυρίως λόγω μνήμης) ώστε να έχει αποφασίσει για μια αρκετά καλή τιμή προσφοράς.

Ο πράκτορας καλείται να αποφασίσει εάν θα ενημερώσει τις τρέχουσες προσφορές πώλησης και αγοράς, κάτι που αποφασίζεται με βάση την ισορροπία του χαρτοφυλακίου του. Κατ' αρχάς, ο πράκτορας γνωρίζει την τρέχουσα ισορροπία του χαρτοφυλακίου του καθώς επίσης και την τιμή για την οποία τιμωρείται με ποινή εφόσον την ξεπεράσει η ισορροπία του (κατά απόλυτη τιμή). Η τελευταία τιμή χάριν απλότητας ας ονομαστεί οριακή τιμή ισορροπίας. Με βάση την απόκλιση από αυτήν την τιμή, ο πράκτορας αποφασίζει την ενημέρωση διαφορετικών

προσφορών κάθε φορά. Συγκεκριμένα, όταν η τιμή ισορροπίας του πράκτορα υπερβαίνει κατά τα θετικά την οριακή τιμή, τότε ο πράκτορας ενημερώνει την ελάχιστη εκ των προσφορών πώλησής του. Αντίθετα, όταν η τιμή ισορροπίας του πράκτορα είναι μικρότερη από την αρνητική οριακή τιμή, τότε ο πράκτορας ενημερώνει τη μέγιστη εκ των προσφορών πώλησής του. Όσον αφορά τις προσφορές αγοράς, όταν η τιμή ισορροπίας του πράκτορα είναι μεγαλύτερη από την οριακή τιμή, τότε ο πράκτορας ενημερώνει την ελάχιστη εκ των προσφορών αγοράς του ενώ όταν η τιμή ισορροπίας είναι μικρότερη από την αρνητική οριακή τιμή, τότε ο πράκτορας ενημερώνει την μέγιστη εκ των προσφορών αγοράς του.

Να σημειωθεί ακόμη ότι ο πράκτορας αρχικά προσπαθεί να αλλάξει τις προσφορές που δεν είναι αποδεκτές από πελάτες, οπότε και αναζητά τη μέγιστη ή ελάχιστη προσφορά εξ αυτών για κάθε περίπτωση. Αν όλες οι προσφορές έχουν καταλήξει την τρέχουσα στιγμή σε συμβόλαια με πελάτες, ο πράκτορας απλώς αναζητά τη μέγιστη ή την ελάχιστη προσφορά εξ όλων των προσφορών.

```

Αν (Ισορροπία_Χαρτοφυλακίου > Οριακή_Τιμή) τότε
{
    Αν (υπάρχουν προσφορές πώλησης χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή ελάχιστης προσφοράς πώλησης χωρίς πελάτες
    Αλλιώς_Αν ( δεν υπάρχουν προσφορές πώλησης χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή ελάχιστης προσφοράς πώλησης
}
Αλλιώς_Αν (Ισορροπία_Χαρτοφυλακίου < - Οριακή_Τιμή) τότε
{
    Αν (υπάρχουν προσφορές πώλησης χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή μέγιστης προσφοράς πώλησης χωρίς πελάτες
    Αλλιώς_Αν ( δεν υπάρχουν προσφορές πώλησης χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή μέγιστης προσφοράς πώλησης
}

```

Σχήμα 4.3 Αλγόριθμος βασικής στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών πώλησης

```

Αν (Ισορροπία_Χαρτοφυλακίου > Οριακή_Τιμή) τότε
{
    Αν (υπάρχουν προσφορές αγοράς χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή ελάχιστης προσφοράς αγοράς χωρίς πελάτες
    Αλλιώς_Αν ( δεν υπάρχουν προσφορές αγοράς χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή ελάχιστης προσφοράς αγοράς
}
Αλλιώς_Αν (Ισορροπία_Χαρτοφυλακίου < - Οριακή_Τιμή) τότε
{
    Αν (υπάρχουν προσφορές αγοράς χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή μέγιστης προσφοράς αγοράς χωρίς πελάτες
    Αλλιώς_Αν ( δεν υπάρχουν προσφορές αγοράς χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή μέγιστης προσφοράς αγοράς
}

```

Σχήμα 4.4 Αλγόριθμος βασικής στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών αγοράς

Τα προαναφερθέντα γίνονται πιο σαφή παραθέτοντας τους παραπάνω αλγόριθμους για την ενημέρωση των προσφορών πώλησης (Σχήμα 4.3) και των προσφορών αγοράς (Σχήμα 4.4).

Σύμφωνα με τους αυτούς τους αλγόριθμους, δίνεται στον πράκτορα η δυνατότητα να συμπεριφερθεί «έξυπνα» καθώς αντιλαμβάνεται τις διαφορές πλήθους αγοραστών και πωλητών στο χαρτοφυλάκιο του. Συγκεκριμένα, όταν η ισορροπία του χαρτοφυλακίου του πράκτορα βρίσκεται πάνω από τη θετική οριακή τιμή, αυτό σημαίνει ότι έχει έλλειμμα ενέργειας δηλαδή περισσότερους καταναλωτές και λιγότερους παραγωγούς από όσους θα έπρεπε. Άρα, είναι λογικό να αλλάζει τις ελάχιστες προσφορές ώστε να μειώσει το μερίδιο αγοράς καταναλωτών και να αυξήσει το μερίδιο αγοράς παραγωγών του. Αντίθετα, όταν η ισορροπία του χαρτοφυλακίου είναι μικρότερη από την αρνητική οριακή τιμή, αυτό σημαίνει ότι έχει πλεόνασμα ενέργειας δηλαδή λιγότερους καταναλωτές και περισσότερους παραγωγούς από όσους πρέπει. Συνεπώς, αλλάζει τις ελάχιστες προσφορές ώστε να μειώσει το μερίδιο αγοράς παραγωγών και να αυξήσει το μερίδιο αγοράς καταναλωτών του.

### Στρατηγική ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής

Η στρατηγική αυτή βασίζεται στην ανάγκη ερμηνείας των διαφόρων μεταβλητών που λαμβάνει ο πράκτορας, όπως το πλήθος των καταναλωτών και των παραγωγών του πράκτορα καθώς και η τρέχουσα ισορροπία του χαρτοφυλακίου του. Για τη ερμηνεία αυτών των μεγεθών χρησιμοποιείται η θεωρία της ασαφούς λογικής. Η ασαφής λογική έχει αποδειχτεί ότι παρουσιάζει καλά αποτελέσματα σε πολλούς τομείς με έναν από αυτούς να είναι οι ΔΔ [29]. Καθίσταται χρήσιμη στη λήψη αποφάσεων καθώς δίνει δυνατότητες ανάλυσης αρκετά πολύπλοκων συστημάτων όπως το παρόν σύστημα. Σύμφωνα με τη θεωρία της ασαφούς λογικής, είναι απαραίτητη η κατασκευή ασαφών συνόλων ικανών να περιγράψουν τις διάφορες μεταβλητές, καθώς και ασαφών κανόνων που εμπεριέχουν τις αποφάσεις που χρειάζεται να ληφθούν. Τα ασαφή σύνολα θα προκύψουν από συναρτήσεις συμμετοχής.

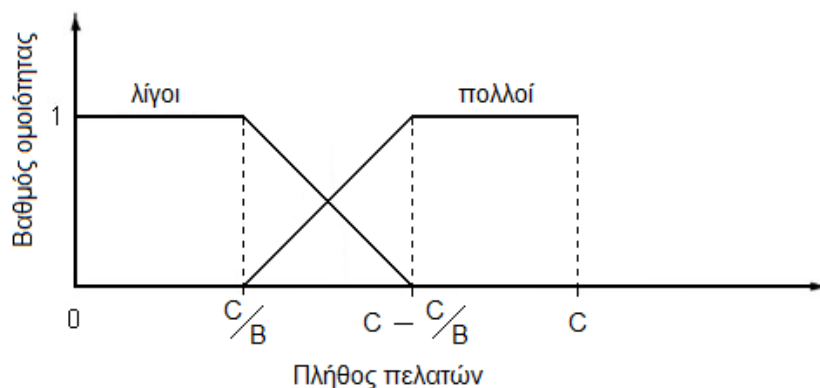
Αρχικά, λοιπόν, χρειάζεται να μοντελοποιηθεί σε σύνολα το πλήθος των πελατών του πράκτορα. Έτσι, για τον ορισμό του πλήθους των πελατών του πράκτορα, είτε είναι παραγωγοί είτε είναι καταναλωτές, χρησιμοποιούνται οι παρακάτω συναρτήσεις συμμετοχής:

$$\lambdaίγοι(x) = \begin{cases} 1 & \alpha\nu \ 0 \leq x \leq \frac{C}{B} \\ \frac{BC - C - x}{BC - 2C} & \alpha\nu \ \frac{C}{B} \leq x \leq C - \frac{C}{B} \\ 0 & \alpha\nu \ C - \frac{C}{B} \leq x \leq C \end{cases} \quad (4.12)$$

$$\πολλοί(x) = \begin{cases} 0 & \alpha\nu \ 0 \leq x \leq \frac{C}{B} \\ \frac{Bx - C}{BC - 2C} & \alpha\nu \ \frac{C}{B} \leq x \leq C - \frac{C}{B} \\ 1 & \alpha\nu \ C - \frac{C}{B} \leq x \leq C \end{cases} \quad (4.13)$$

όπου η μεταβλητή  $C$  ορίζεται ως ο συνολικός αριθμός μόνο των παραγωγών ή μόνο των καταναλωτών του συστήματος και η μεταβλητή  $B$  είναι ο συνολικός

αριθμός των μεσαζόντων του συστήματος. Οι συναρτήσεις αυτές κατασκευάζουν το εξής ασαφές σύνολο:



Σχήμα 4.5 Ασαφές σύνολο των πελατών του πράκτορα

Προφανώς η διαίρεση του συνολικού αριθμού π.χ. των καταναλωτών διά τον αριθμό των μεσαζόντων δίνει το πλήθος των καταναλωτών που υπό έναν απόλυτα δίκαιο διαμερισμό θα κατέληγαν στον πράκτορα. Ερμηνεύοντας το Σχήμα 4.5, είναι εύκολα αντιληπτό ότι ο πράκτορας θεωρεί «λίγους» αυτούς τους καταναλωτές που υποτίθεται ότι του «αναλογούν». Αντίθετα, αν ο πράκτορας κατορθώσει να αποκτήσει μερίδιο αγοράς ίσο με αυτό που «αναλογεί» σε όλους τους υπόλοιπους μεσαζόντες, τότε θεωρεί ότι έχει «πολλούς» καταναλωτές. Όπως είναι λογικό, εάν οι προσφορές του πράκτορα δεσμεύουν τους μισούς καταναλωτές τότε ο τελευταίος θεωρεί ότι δεν είναι ούτε «λίγοι» ούτε «πολλοί». Τέλος, ας σημειωθεί ότι η εκφυλισμένη περίπτωση  $B = 2$  δε μελετάται καθώς δεν έχει νόημα να υπάρχουν μόνο δύο μεσαζόντες στην αγορά· εφόσον ήδη προϋπάρχει ο default πράκτορας για να έχει νόημα η προσομοίωση θα υπάρχουν τουλάχιστον 3 πράκτορες στην αγορά.

Το δεύτερο σύνολο που είναι απαραίτητο να μοντελοποιηθεί είναι η ισορροπία του χαρτοφυλακίου του πράκτορα. Για τον ορισμό του κατάλληλου ασαφούς κανόνα χρησιμοποιείται η οριακή τιμή  $L$  της οποίας εάν η απόλυτη τιμή ξεπεραστεί, ο πράκτορας υποχρεούται να πληρώσει πρόστιμο. Έτσι, κατασκευάζονται οι παρακάτω συναρτήσεις συμμετοχής:

$$\text{πολύ-χαμηλή}(x) = \begin{cases} 1 & \alpha v \quad -\infty < x \leq -\frac{11L}{5} \\ \frac{-10L-5x}{L} & \alpha v \quad -\frac{11L}{5} \leq x \leq -2L \\ 0 & \alpha v \quad 2L \leq x < +\infty \end{cases} \quad (4.14)$$

$$\text{χαμηλή}(x) = \begin{cases} 0 & \alpha v \quad -\infty < x \leq -\frac{11L}{5} \\ \frac{5x+11L}{L} & \alpha v \quad -\frac{11L}{5} \leq x \leq -2L \\ 1 & \alpha v \quad -2L \leq x \leq -\frac{6L}{5} \\ \frac{-5L-5x}{L} & \alpha v \quad -\frac{6L}{5} \leq x \leq -L \\ 0 & \alpha v \quad -L \leq x < +\infty \end{cases} \quad (4.15)$$

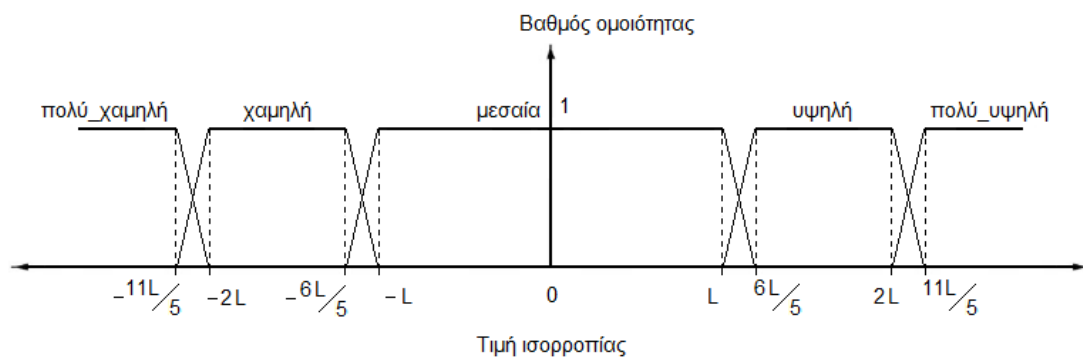
$$\text{μεσαία}(x) = \begin{cases} 0 & \alpha v \quad -\infty < x \leq -\frac{6L}{5} \\ \frac{5x+6L}{L} & \alpha v \quad -\frac{6L}{5} \leq x \leq -L \\ 1 & \alpha v \quad -L \leq x \leq L \\ \frac{6L-5x}{L} & \alpha v \quad L \leq x \leq \frac{6L}{5} \\ 0 & \alpha v \quad \frac{6L}{5} \leq x < +\infty \end{cases} \quad (4.16)$$

$$\text{υψηλή}(x) = \begin{cases} 0 & \alpha v \quad -\infty < x \leq L \\ \frac{5x-5L}{L} & \alpha v \quad L \leq x \leq \frac{6L}{5} \\ 1 & \alpha v \quad \frac{6L}{5} \leq x \leq 2L \\ \frac{11L-5x}{L} & \alpha v \quad 2L \leq x \leq \frac{11L}{5} \\ 0 & \alpha v \quad \frac{11L}{5} \leq x < +\infty \end{cases} \quad (4.17)$$



$$\text{πολύ\_υψηλή}(x) = \begin{cases} 0 & \text{αν } -\infty < x \leq 2L \\ \frac{5x-10L}{L} & \text{αν } 2L \leq x \leq \frac{11L}{5} \\ 0 & \text{αν } \frac{11L}{5} \leq x < \infty \end{cases} \quad (4.18)$$

Με βάση λοιπόν τις παραπάνω συναρτήσεις συμμετοχής, η ισορροπία του χαρτοφυλακίου του πράκτορα περιγράφεται από το παρακάτω ασαφές σύνολο:



Σχήμα 4.6 Ασαφές σύνολο της ισορροπίας χαρτοφυλακίου του πράκτορα

Ως γνωστόν, η ισορροπία χαρτοφυλακίου του πράκτορα λαμβάνει τόσο θετικές όσο και αρνητικές τιμές. Παρατηρώντας το Σχήμα 4.6, είναι αρχικά προφανές ότι ο πράκτορας θεωρεί «μεσαία» την τιμή ισορροπίας του εάν αυτή κυμαίνεται μεταξύ των ορίων που θέτει η οριακή τιμή  $L$ . Αν η τιμή ισορροπίας του πράκτορα υπερβεί το 120% ( $6/5 L$ ) της οριακής τιμής ο πράκτορας τη θεωρεί «υψηλή», ενώ εάν είναι μικρότερη από το -120% ( $-6/5 L$ ) τη θεωρεί «χαμηλή». Όμως, οι τιμές «υψηλή» και «χαμηλή» έχουν κι αυτές συγκεκριμένα όρια, έως το 200% ( $2L$ ) και το -200% ( $-2L$ ) αντίστοιχα. Έτσι, αν η τιμή ισορροπίας υπερβεί το 220% ( $11/5 L$ ) της οριακής τιμής θεωρείται «πολύ\_υψηλή», ενώ εάν είναι μικρότερη από το -220% ( $-11/5 L$ ) θεωρείται «πολύ\_χαμηλή». Κατά αυτόν τον τρόπο, ο πράκτορας είναι σε θέση να γνωρίζει σε αρκετά καλό βαθμό την «ποιότητα» της τιμής ισορροπίας του, κάτι του οποίου η χρησιμότητα θα φανεί στη συνέχεια.

Παρατηρώντας το Σχήμα 4.5 και το Σχήμα 4.6, είναι εύκολα αντιληπτό ότι τα αθροίσματα των επιμέρους τιμών κάθε σχήματος είναι σε κάθε σημείο του άξονα

των  $x$  ίσα με 1. Έτσι, προσδίδεται η δυνατότητα τα δύο αυτά ασαφή σύνολα να αντιμετωπιστούν πιθανοτικά. Έτσι, για παράδειγμα, στο Σχήμα 4.5 εάν οι παραγωγοί του πράκτορα ήταν  $C/2B$  τότε σίγουρα θα ήταν «λίγοι», αν όμως ήταν  $C/2$  τότε θα υπήρχαν δύο τιμές, μία που θα προέκυπτε από τη συνάρτηση (4.12) και θα προσδιόριζε το κατά πόσο οι παραγωγοί είναι «λίγοι» και μία από τη συνάρτηση (4.13) που θα προσδιόριζε κατά πόσο είναι «πολλοί». Στη συγκεκριμένη περίπτωση θα οριστεί μια ομοιόμορφη κατανομή από το 0 έως το 1 έτσι ώστε η τυχαία τιμή που θα επιστρέψει να προσδιορίσει σε ποιο από τα δύο σύνολα θα καταταχθεί τελικά η συγκεκριμένη τιμή. Ας σημειωθεί ότι πέραν της προηγούμενης λύσης η οποία και τελικά υλοποιήθηκε θα ήταν δυνατόν να υπάρξουν κι άλλες μέθοδοι, όπως μια διαδικασία με το γνωστό κανόνα σύνθεσης MAX, που απλώς θα επέστρεφε το μέγιστη μεταξύ των δύο τιμών.

Εφόσον, λοιπόν, ορίστηκαν τα ασαφή σύνολα καθώς και ο τρόπος χρήσης τους, στη συνέχεια αναλύεται η στρατηγική του πράκτορα.

Αρχικά, όσον αφορά τη στρατηγική υποβολής νέων προσφορών, ο πράκτορας βασιζόμενος στην ποσότητα των πελατών που έχει αποφασίζει να υποβάλει νέα προσφορά εάν τους θεωρεί «λίγους» ή να μην υποβάλει εάν τους θεωρεί πολλούς. Βεβαίως, τα παραπάνω ισχύουν μόνο για την περίπτωση που ο πράκτορας έχει δικαίωμα υποβολής νέας προσφοράς. Παρακάτω παρατίθενται οι αλγόριθμοι υποβολής νέων προσφορών πώλησης (Σχήμα 4.7) και αγοράς (Σχήμα 4.8).

```

Αν (Πλήθος_Προσφορών_Πώλησης < Επιτρεπτό_Πλήθος_Προσφορών_Πώλησης) τότε
{
    Αν (οι καταναλωτές είναι «λίγοι») τότε
        Προσθήκη νέας προσφοράς πώλησης
}
    
```

Σχήμα 4.7 Αλγόριθμος υποβολής νέων προσφορών πώλησης της στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής

```

Αν (Πλήθος_Προσφορών_Αγοράς < Επιτρεπτό_Πλήθος_Προσφορών_Αγοράς) τότε
{
    Αν (οι παραγωγοί είναι «λίγοι») τότε
        Προσθήκη νέας προσφοράς πώλησης
}

```

Σχήμα 4.8 Αλγόριθμος υποβολής νέων προσφορών αγοράς της στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής

Με βάση τους παραπάνω αλγόριθμους, είναι εμφανές ότι ο πράκτορας αποφασίζει «έξυπνα» για να υποβάλει νέες προσφορές. Έτσι, νέες προσφορές υποβάλλονται μόνο εάν ο πράκτορας θεωρεί ότι το μερίδιο αγοράς των πελατών του δεν είναι ικανοποιητικό.

Στη συνέχεια, για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ενημέρωση των ήδη υπαρχουσών προσφορών, χρησιμοποιείται μια αρκετά πολύπλοκη στρατηγική. Για την ενημέρωση προσφορών πώλησης στην αγορά των καταναλωτών, αν η τιμή ισορροπίας του πράκτορα είναι «χαμηλή» ή «πολύ\_χαμηλή» ή αν οι καταναλωτές του είναι «λίγοι», τότε ο πράκτορας ενημερώνει τη μέγιστη εκ των προσφορών πώλησής του. Αν, όμως, η τιμή ισορροπίας του είναι «πολύ\_υψηλή», τότε ενημερώνει την ελάχιστη εκ των προσφορών πώλησής του. Όσον αφορά τις προσφορές αγοράς, αν η τιμή ισορροπίας του πράκτορα είναι «υψηλή» ή «πολύ\_υψηλή» ή αν οι παραγωγοί του είναι «λίγοι», τότε ο πράκτορας ενημερώνει την ελάχιστη εκ των προσφορών αγοράς του, ενώ αν η τιμή ισορροπίας του είναι «πολύ\_χαμηλή», τότε ενημερώνει τη μέγιστη εκ των προσφορών αγοράς του.

Και σε αυτήν την στρατηγική, όμοια με την προηγούμενη που παρουσιάστηκε, ο πράκτορας επιχειρεί να αλλάξει πρώτα τις προσφορές που δεν έχουν πελάτες και σε περίπτωση που όλες οι προσφορές του είναι επιτυχημένες ενημερώνει λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των προσφορών. Τα παραπάνω αποσαφηνίζονται με τη βοήθεια των παρακάτω αλγορίθμων για την ενημέρωση των προσφορών πώλησης (Σχήμα 4.9) και των προσφορών αγοράς (Σχήμα 4.10).

```

Αν ( (η τιμή ισορροπίας είναι «χαμηλή») ή (η τιμή ισορροπίας είναι «πολύ_χαμηλή») ή
    (οι καταναλωτές είναι «λίγοι») ) τότε
{
    Αν (υπάρχουν προσφορές πώλησης χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή μέγιστης προσφοράς πώλησης χωρίς πελάτες
    Αλλιώς_Αν ( δεν υπάρχουν προσφορές πώλησης χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή μέγιστης προσφοράς πώλησης
}
Αλλιώς_Αν (η τιμή ισορροπίας είναι «πολύ_υψηλή») τότε
{
    Αν (υπάρχουν προσφορές πώλησης χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή ελάχιστης προσφοράς πώλησης χωρίς πελάτες
    Αλλιώς_Αν ( δεν υπάρχουν προσφορές πώλησης χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή ελάχιστης προσφοράς πώλησης
}

```

Σχήμα 4.9 Αλγόριθμος ενημέρωσης προσφορών πώλησης της στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής

```

Αν ( (η τιμή ισορροπίας είναι «υψηλή») ή (η τιμή ισορροπίας είναι «πολύ_υψηλή») ή
    (οι παραγωγοί είναι «λίγοι») ) τότε
{
    Αν (υπάρχουν προσφορές αγοράς χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή ελάχιστης προσφοράς αγοράς χωρίς πελάτες
    Αλλιώς_Αν ( δεν υπάρχουν προσφορές αγοράς χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή ελάχιστης προσφοράς αγοράς
}
Αλλιώς_Αν (η τιμή ισορροπίας είναι «πολύ_χαμηλή») τότε
{
    Αν (υπάρχουν προσφορές αγοράς χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή μέγιστης προσφοράς αγοράς χωρίς πελάτες
    Αλλιώς_Αν ( δεν υπάρχουν προσφορές αγοράς χωρίς πελάτες) τότε
        Αλλαγή μέγιστης προσφοράς αγοράς
}

```

Σχήμα 4.10 Αλγόριθμος ενημέρωσης προσφορών αγοράς της στρατηγικής ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής

Για την ερμηνεία των παραπάνω αλγορίθμων, αρκεί η κατανόηση της σύνδεσης του μεριδίου αγοράς του πράκτορα με την ισορροπία του χαρτοφυλακίου του. Όταν η ισορροπία αυτή είναι «χαμηλή» τότε ο πράκτορας θεωρεί πως για να εξισορροπήσει το έλλειμμα ενέργειας χρειάζεται να αλλάξει τη μέγιστη προσφορά του, μειώνοντας δηλαδή τις τιμές πώλησης ώστε να αυξήσει το μερίδιο αγοράς του

στους καταναλωτές. Είναι προφανές ότι το ίδιο ακριβώς συμβαίνει όταν γενικά ο πράκτορας θεωρεί ότι οι καταναλωτές που έχει είναι «λίγοι». Αν, όμως, ο πράκτορας θεωρεί ότι η ισορροπία του είναι «πολύ\_χαμηλή», αντιλαμβάνεται ότι χρειάζεται όχι μόνο να αυξήσει το μερίδιο αγοράς του στους καταναλωτές (Σχήμα 4.9) αλλά και να μειώσει το μερίδιο αγοράς του στους παραγωγούς (Σχήμα 4.10). Αντίθετα, όταν η ισορροπία του πράκτορα είναι «υψηλή» (οπότε ο πράκτορας έχει πλεόνασμα ενέργειας) ή οι παραγωγοί του είναι λίγοι, ο πράκτορας προσπαθεί να αυξήσει το μερίδιο αγοράς του στους παραγωγούς οπότε ενημερώνει την ελάχιστη προσφορά αγοράς του, αυξάνοντας δηλαδή τις τιμές αγοράς. Αν η ισορροπία, όμως, είναι «πολύ\_υψηλή», ο πράκτορας προσπαθεί αυξήσει το μερίδιο αγοράς του στους παραγωγούς (Σχήμα 4.10) και ταυτόχρονα να μειώσει το μερίδιο αγοράς του στους καταναλωτές (Σχήμα 4.9).

#### 4.3.3. Στρατηγική παραγωγής ενέργειας

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, η στρατηγική παραγωγής ενέργειας αποτελεί την προσπάθεια του πράκτορα να εκτιμήσει την ποσότητα ενέργειας που θα χρειαστεί στο επόμενο timeslot ώστε να καλύψει τις ανάγκες των καταναλωτών του χαρτοφυλακίου του. Καθώς οι καταναλωτές είναι όμοιοι, δηλαδή αναμένεται καθένας εξ αυτών να κάνει χρήση παρόμοιων ποσών ενέργειας, στον πράκτορα αποστέλλονται οι μετρικές κατανάλωσης ενέργειας του συνολικού πλήθους τους για όλα τα προηγούμενα timeslots.

Έτσι, ο πράκτορας έχει τη δυνατότητα να κατασκευάσει μια χρονοσειρά έστω την  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  όπου  $x_i$  η συνολική κατανάλωση ενέργειας της αγοράς για το timeslot  $i$  και  $n$  το πλήθος των προηγούμενων timeslots. Το πρόβλημα, λοιπόν, ανάγεται στην πρόβλεψη της μελλοντικής τιμής της εν λόγω χρονοσειράς. Για την πρόβλεψη της τιμής  $x_{n+1}$  χρησιμοποιείται η μέθοδος της *εκθετικής εξομάλυνσης* (*exponential smoothing*). Σύμφωνα με αυτή τη μέθοδο η πρόβλεψη της μελλοντικής τιμής της χρονοσειράς δίνεται από την αναδρομική σχέση:

$$\hat{x}_{n+1} = \alpha \cdot x_n + (1 - \alpha) \cdot \hat{x}_n \quad (4.19)$$

όπου  $\alpha$  η παράμετρος που ορίζει το κατά πόσο ο πράκτορας προσμετρά κάθε λιγότερο πρόσφατη τιμή κατανάλωσης και τίθεται στην τιμή 0.6 ενώ η αρχική τιμή της (4.19) είναι:

$$\hat{x}_1 = x_1 \quad (4.20)$$

Στη συνέχεια, υπολογίζεται η συνολική ενέργεια που θα χρειαστεί ο πράκτορας για το timeslot  $n+1$  από την παρακάτω σχέση:

$$E_{n+1} = \frac{C_{agent}}{C} \cdot \hat{x}_{n+1} \quad (4.21)$$

όπου  $C_{agent}$  το αριθμός των καταναλωτών του χαρτοφυλακίου του πράκτορα και  $C$  το συνολικό πλήθος των καταναλωτών της αγοράς. Τελικά, ο πράκτορας ελέγχει το χαρτοφυλάκιο του και ζητάει από κάθε παραγωγό που έχει συμβόλαιο μαζί του ενέργεια ίση με:

$$e_{n+1} = \frac{E_{n+1}}{P_{agent}} \quad (4.22)$$

όπου  $P_{agent}$  το αριθμός των παραγωγών του χαρτοφυλακίου του πράκτορα.

## 5. Αποτελέσματα

### 5.1. Γενικά

Το παρών κεφάλαιο αφορά τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν καθώς και κάποια πρώτα σχόλια επί αυτών. Πραγματοποιήθηκαν τρία σετ πειραμάτων. Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο του πράκτορα που αναλύθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, και το οποίο διακρίνεται στο σχήμα 4.1. Έτσι, αρχικά αναφέρεται ότι όλοι οι πράκτορες που δοκιμάζονται παρακάτω έχουν κοινή στρατηγική παραγωγής ενέργειας, αυτή της παραγράφου 4.3.3.

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν οι εξής μετρικές για κάθε μεσάζοντα:

- *Μέσο μερίδιο αγοράς καταναλωτών/παραγωγών (Mean market share of producers/consumers)*: Υπολογίζεται βρίσκοντας το μέσο όρο των μεριδίων αγοράς του μεσάζοντα στους καταναλωτές/παραγωγούς για όλα τα timeslots, όπου το μερίδιο αγοράς για κάθε timeslot προκύπτει από τη διαίρεση των πελατών του μεσάζοντα προς το συνολικό αριθμό των πελατών. Προφανώς μετράται ποσοστιαία επί τοις εκατό.
- *Μέση ισορροπία χαρτοφυλακίου (Mean portfolio equilibrium)*: Υπολογίζεται ως ο μέσος όρος των κατά απόλυτη τιμή αποκλίσεων της ισορροπίας του χαρτοφυλακίου του πράκτορα για κάθε timeslot.
- *Συνολικά κέρδη (Total profit)*: Αφορά το συνολικό κέρδος που αποκόμισε ο πράκτορας για το τρέχων πείραμα. Είναι δυνατό να λάβει αρνητικές τιμές, δηλώνοντας τότε ότι ο πράκτορας είχε ζημία.

Ακόμα, ας αναφερθεί ότι για καθένα εκ των τριών σετ πραγματοποιήθηκαν πειράματα για τους εξής τρεις συνδυασμούς πλήθους παραγωγών και καταναλωτών:

- 4 παραγωγοί – 8 καταναλωτές
- 4 παραγωγοί – 16 καταναλωτές

- 8 παραγωγοί – 16 καταναλωτές

Τέλος, κάθε πείραμα πραγματοποιήθηκε 10 φορές και λήφθηκαν οι μέσοι όροι των διάφορων μετρικών, εξασφαλίζοντας έτσι την ορθότητα των αποτελεσμάτων.

## **5.2. Πειράματα στρατηγικών ενημέρωσης προσφορών**

Το πρώτο σετ πειραμάτων αφορά τις στρατηγικές ενημέρωσης προκαθορισμένων προσφορών. Έτσι, η βασική και η ασαφούς λογικής στρατηγική δοκιμάστηκαν έχοντας ως στρατηγική διαμόρφωσης τιμής αυτή του πράκτορά μας με παράμετρο πειραματισμού ίση με 1. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται παρακάτω: ο Πίνακας 5.1 περιέχει τις μετρικές για 4 παραγωγούς και 8 καταναλωτές, ο Πίνακας 5.2 για 4 παραγωγούς και 16 καταναλωτές και ο Πίνακας 5.3 για 8 παραγωγούς και 16 καταναλωτές. Τέλος ο Πίνακας 5.4 περιέχει συγκεντρωμένους τους μέσους όρους των μετρικών για τις τρεις εκδοχές πλήθους παραγωγών και καταναλωτών.



Πίνακας 5.1 Πειράματα στρατηγικών ενημέρωσης προσφορών για 4 παραγωγούς και 8 καταναλωτές

| TARIFF UPDATE TEST<br>4 producers & 8 consumers |                   |      | Test Number |         |         |         |         |         |         |         |         |         | Mean     |
|---|-------------------|------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|   |                   |      | 1           | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |          |
| Default   | Mean market share | PROD | 3,125       | 1,25    | 0       | 0       | 7,5     | 0       | 5,625   | 0       | 0,625   | 0       | 1,8125   |
|   |                   | CONS | 16,5        | 4,25    | 7,25    | 6       | 3       | 4,5     | 7,5     | 13,5    | 21      | 3       | 8,65     |
|   | Mean equilibrium  |      | 9,51        | 5,08    | 1,87    | 1,97    | 21,19   | 1,97    | 16,49   | 2,1     | 3,42    | 2,01    | 6,561    |
|   | Total profit      |      | 518,4       | 292,68  | 101,14  | 106,53  | 1173,11 | 106,33  | 912,64  | 113,54  | 215,94  | 108,77  | 364,908  |
| Basic   | Mean market share | PROD | 6,75        | 9,75    | 30,75   | 21      | 41,75   | 54,5    | 9,75    | 27,75   | 7,5     | 43      | 25,25    |
|   |                   | CONS | 15          | 31,5    | 39      | 45      | 41,5    | 32,5    | 32,5    | 37,5    | 22,5    | 42,5    | 33,95    |
|   | Mean equilibrium  |      | 6,35        | 14,3    | 21,87   | 19,99   | 50,35   | 51,42   | 10,49   | 29,18   | 9,09    | 33,61   | 24,665   |
|   | Total profit      |      | 640,72      | 865,76  | 2407,57 | 1653,93 | 2666,59 | 3998,33 | 872,95  | 2014,84 | 711,14  | 3437,35 | 1926,918 |
| Fuzzy Logic                                     | Mean market share | PROD | 90,125      | 89      | 69,25   | 79      | 50,75   | 45,5    | 84,625  | 72,25   | 91,875  | 57      | 72,9375  |
|   |                   | CONS | 68,5        | 64,25   | 53,75   | 49      | 55,5    | 63      | 60      | 49      | 56,5    | 54,5    | 57,4     |
|   | Mean equilibrium  |      | 56,95       | 46,32   | 45,23   | 68,24   | 36,28   | 14,26   | 49,32   | 58,71   | 67,13   | 31,45   | 47,389   |
|   | Total profit      |      | 5366,34     | 4775,04 | 4257,9  | 4777,46 | 2722,87 | 3026,49 | 4557,75 | 4537,21 | 5451,73 | 3628,29 | 4310,108 |

Πίνακας 5.2 Πειράματα στρατηγικών ενημέρωσης προσφορών για 4 παραγωγούς και 16 καταναλωτές

| TARIFF UPDATE TEST<br>4 producers & 16 consumers |                   |      | Test Number |          |          |          |          |         |         |         |         |         | Mean     |
|--|-------------------|------|-------------|----------|----------|----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|  |                   |      | 1           | 2        | 3        | 4        | 5        | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |          |
| Default  | Mean market share | PROD | 7,5         | 0        | 3,44     | 0        | 3,25     | 5,31    | 7,19    | 0,625   | 3,9375  | 7,19    | 3,84425  |
|  |                   | CONS | 8,25        | 6        | 17,75    | 14,75    | 10,5     | 7,25    | 9       | 4,5     | 20,25   | 3       | 10,125   |
|  | Mean equilibrium  |      | 42,49       | 4,2      | 20,27    | 3,82     | 17,92    | 31,79   | 41,79   | 7,04    | 21,34   | 40,66   | 23,132   |
|  | Total profit      |      | 2312,81     | 226,65   | 1101,62  | 206,13   | 964,34   | 1724,12 | 2266,78 | 408,28  | 1134,39 | 2208,28 | 1255,34  |
| Basic  | Mean market share | PROD | 8,5         | 9        | 7,5      | 10,5     | 9        | 7,5     | 26,5    | 64,875  | 8,25    | 42      | 19,3625  |
|  |                   | CONS | 34,5        | 27       | 21       | 24       | 40       | 44,5    | 36      | 34,5    | 16,5    | 37,5    | 31,55    |
|  | Mean equilibrium  |      | 25,33       | 21,98    | 12,58    | 9,91     | 17,76    | 19,28   | 81,08   | 116,13  | 22,07   | 55,21   | 38,133   |
|  | Total profit      |      | 1527,57     | 1316,59  | 1422,46  | 1577,49  | 1410,16  | 1359,92 | 3186,79 | 9708,82 | 1510,21 | 5785,43 | 2880,544 |
| Fuzzy Logic                                      | Mean market share | PROD | 84          | 91       | 89,06    | 89,5     | 87,75    | 87,19   | 66,31   | 34,5    | 87,8125 | 50,81   | 76,79325 |
|  |                   | CONS | 57,25       | 67       | 61,25    | 61,25    | 49,5     | 48,25   | 55      | 61      | 63,25   | 59,5    | 58,325   |
|  | Mean equilibrium  |      | 96,74       | 108,93   | 111,51   | 100,93   | 148,24   | 151,61  | 110,05  | 32,36   | 89,29   | 43,55   | 99,321   |
|  | Total profit      |      | 9811,41     | 11352,46 | 10259,37 | 11082,78 | 10713,96 | 9831,89 | 7585,78 | 4357,79 | 9951,09 | 5703,54 | 9065,007 |

Πίνακας 5.3 Πειράματα στρατηγικών ενημέρωσης προσφορών για 8 παραγωγούς και 16 καταναλωτές

| TARIFF UPDATE TEST<br>8 producers & 16 consumers |                   |      | Test Number |         |          |         |          |         |         |         |         |         | Mean     |
|--|-------------------|------|-------------|---------|----------|---------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|  |                   |      | 1           | 2       | 3        | 4       | 5        | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |          |
| Default  | Mean market share | PROD | 0           | 0       | 3,75     | 8,4375  | 0        | 6,25    | 6,56    | 0       | 0       | 6,56    | 3,15575  |
|  |                   | CONS | 20,5        | 17,25   | 23,625   | 21,625  | 8,625    | 20,75   | 11      | 22,375  | 21,625  | 18,75   | 18,6125  |
|  | Mean equilibrium  |      | 4,16        | 3,74    | 22,02    | 44,54   | 4,1      | 36,62   | 38,34   | 4,09    | 3,94    | 37,82   | 19,937   |
|  | Total profit      |      | 224,62      | 202,05  | 1202,65  | 2419,86 | 221,32   | 1985,89 | 2076,71 | 221,02  | 212,63  | 2048,82 | 1081,557 |
| Basic  | Mean market share | PROD | 37,875      | 31,75   | 6,375    | 30,625  | 11,125   | 8,625   | 7,5     | 33      | 63,875  | 8,88    | 23,963   |
|  |                   | CONS | 46,75       | 41,25   | 29,75    | 35,75   | 38,25    | 32,75   | 43      | 44,25   | 39,25   | 45      | 39,6     |
|  | Mean equilibrium  |      | 33,65       | 26,2    | 13,31    | 60,85   | 19,33    | 22,92   | 20,84   | 50,07   | 100,26  | 18,57   | 36,6     |
|  | Total profit      |      | 5869,63     | 4954,17 | 1197,1   | 4104,76 | 1632,49  | 1592,29 | 1366,42 | 5112,39 | 9844,94 | 1669,06 | 3734,325 |
| Fuzzy Logic                                      | Mean market share | PROD | 62,125      | 68,25   | 89,875   | 60,9375 | 88,875   | 85,125  | 85,94   | 67      | 36,125  | 84,56   | 72,88125 |
|  |                   | CONS | 32,75       | 41,5    | 46,625   | 42,625  | 53,125   | 46,5    | 46      | 33,375  | 39,125  | 36,25   | 41,7875  |
|  | Mean equilibrium  |      | 121,83      | 98,93   | 155,61   | 125,27  | 142,31   | 136,6   | 146,31  | 129,71  | 30,62   | 160,3   | 124,749  |
|  | Total profit      |      | 8380,31     | 8826,02 | 10789,86 | 7385,18 | 10984,87 | 9812,14 | 9893,43 | 8525,27 | 4489,87 | 10084,9 | 8917,185 |

Πίνακας 5.4 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στρατηγικών ενημέρωσης προσφορών

|                  | Default           |         |              | Basic             |       |              | Fuzzy Logic       |                |                |
|------------------|-------------------|---------|--------------|-------------------|-------|--------------|-------------------|----------------|----------------|
|                  | Mean market share |         | Total profit | Mean market share |       | Total profit | Mean market share |                | Total profit   |
|                  | PROD              | CONS    |              | PROD              | CONS  |              | PROD              | CONS           |                |
| 4 cons & 8 prod  | 1,8125            | 8,65    | 364,91       | 25,25             | 33,95 | 1926,92      | <b>72,9375</b>    | <b>57,4</b>    | <b>4310,11</b> |
| 4 cons & 16 prod | 3,84425           | 10,125  | 1255,34      | 19,3625           | 31,55 | 2880,54      | <b>76,7933</b>    | <b>58,325</b>  | <b>9065,01</b> |
| 8 cons & 16 prod | 3,15575           | 18,6125 | 1081,56      | 23,963            | 39,6  | 3734,33      | <b>72,8813</b>    | <b>41,7875</b> | <b>8917,19</b> |

Από τα πειράματα των παραπάνω πινάκων, είναι εύκολα αντιληπτό ότι η στρατηγική ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής επιτυγχάνει πολύ καλύτερα αποτελέσματα σε σχέση με τη βασική στρατηγική. Συγκεκριμένα, το κέρδος της πρώτης είναι σαφώς μεγαλύτερο από της δεύτερης, ενώ η διαφορά των μεριδίων αγοράς είναι επίσης χαρακτηριστική. Τέλος, η μέση ισορροπία του χαρτοφυλακίου της στρατηγικής ασαφούς λογικής, αν και είναι μεγαλύτερη από αυτή της βασικής στρατηγικής, μπορεί να χαρακτηριστεί ανεκτή διότι είναι προφανές ότι όσο μεγαλύτερα μερίδια αγοράς συγκεντρώνει ο πράκτορας, τόσο δυσκολότερο είναι για αυτόν να διατηρήσει μια χαμηλή τιμή ισορροπίας.

### 5.3. Πειράματα παραμέτρων στρατηγικής διαμόρφωσης τιμής

Το δεύτερο σετ πειραμάτων αφορά τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων της στρατηγικής διαμόρφωσης της τιμής που σχεδιάστηκε. Ανακαλώντας τη στρατηγική, αντιλαμβάνεται κανείς ότι η παράμετρος της οποίας η τιμή ενδιαφέρει είναι η παράμετρος πειραματισμού. Πράγματι, οι υπόλοιπες παράμετροι είναι απλώς παράμετροι μνήμης και απλώς ορίζονται σε κάποιες συγκεκριμένες τιμές. Άλλωστε, καθώς ο υπολογισμός της τιμής επιτυχίας γίνεται με τη μέθοδο του κινούμενου μέσου, η τιμή της μνήμης του πράκτορα δεν παίζει ιδιαίτερο ρόλο εφόσον βέβαια δεν είναι πολύ μικρή.

Έτσι, στην αγορά συμμετέχουν τρεις πράκτορες με τη στρατηγική διαμόρφωσης της τιμής που αναπτύχθηκε ενώ η παράμετρος πειραματισμού τίθεται στις τιμές 0.5, 1.0 και 2.0 για καθέναν από τους τρεις πράκτορες αντίστοιχα. Ακόμα, οι τρεις αυτοί πράκτορες χρησιμοποιούν τη στρατηγική ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής. Ο Πίνακας 5.5, ο Πίνακας 5.6, και ο Πίνακας 5.7 περιέχουν τα αποτελέσματα για 4 παραγωγούς και 8 καταναλωτές, για 4 παραγωγούς και 16 καταναλωτές και για 8 παραγωγούς και 16 καταναλωτές αντίστοιχα. Ο Πίνακας 5.8 περιέχει τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των παραπάνω πινάκων.

Πίνακας 5.5 Πειράματα παραμέτρου πειραματισμού στρατηγικής διαμόρφωσης της τιμής για 4 παραγωγούς και 8 καταναλωτές

| EXPERIMENTATION PARAMETER TEST<br>4 producers & 8 consumers |                   |      | Test Number |         |         |         |         |         |         |         |         |         | Mean     |
|---|-------------------|------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|   |                   |      | 1           | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |          |
| Default   | Mean market share | PROD | 0           | 0       | 0,625   | 0       | 0,625   | 0,625   | 4,375   | 0       | 1,875   | 0       | 0,8125   |
|   |                   | CONS | 6           | 3       | 4,5     | 1,5     | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       | 1,5     | 3,15     |
|   | Mean equilibrium  |      | 1,87        | 2,02    | 3,47    | 2,08    | 3,5     | 2,56    | 12,64   | 1,94    | 6,66    | 2,08    | 3,882    |
|   | Total profit      |      | 87,87       | 94,79   | 205,86  | 97,61   | 207,64  | 135,02  | 767,27  | 91,07   | 441,66  | 97,91   | 222,67   |
| EXP 0.5   | Mean market share | PROD | 26,75       | 28,25   | 28,125  | 27,5    | 36,25   | 38,25   | 30,5    | 35,75   | 27,75   | 32      | 31,1125  |
|   |                   | CONS | 22          | 47,5    | 34,5    | 34      | 28,5    | 30      | 28,5    | 26,5    | 33      | 38      | 32,25    |
|   | Mean equilibrium  |      | 29,78       | 14,24   | 19,86   | 17,3    | 36,61   | 35,24   | 19,66   | 33,34   | 15,41   | 20,78   | 24,222   |
|   | Total profit      |      | 1522,62     | 1747,39 | 1293,69 | 1570,7  | 1737,5  | 1846,09 | 1530,5  | 2075,7  | 1277,22 | 1617,17 | 1621,858 |
| EXP 1.0   | Mean market share | PROD | 29,75       | 36,75   | 28      | 33,75   | 30      | 32,125  | 33,375  | 27,75   | 29,625  | 30,75   | 31,1875  |
|   |                   | CONS | 31          | 25      | 29,5    | 32      | 32,5    | 33      | 33,5    | 37      | 40,5    | 32,5    | 32,65    |
|   | Mean equilibrium  |      | 32,56       | 41,64   | 19,98   | 28,13   | 24,18   | 18,66   | 26,02   | 29,91   | 27,23   | 39,04   | 28,735   |
|   | Total profit      |      | 1377,56     | 1954,81 | 1638,05 | 1643,36 | 1644,16 | 1579,85 | 1747,22 | 1468,77 | 1455,81 | 1636,15 | 1614,574 |
| EXP 2.0   | Mean market share | PROD | 43,5        | 35      | 43,25   | 38,75   | 33,125  | 29      | 31,75   | 36,5    | 40,75   | 37,25   | 36,8875  |
|   |                   | CONS | 41          | 24,5    | 31,5    | 32,5    | 36      | 34      | 35      | 33,5    | 23,5    | 28      | 31,95    |
|   | Mean equilibrium  |      | 31,25       | 20,68   | 43,17   | 33,79   | 30,85   | 19,72   | 19,25   | 38,85   | 44,03   | 29,31   | 31,09    |
|   | Total profit      |      | 1501,35     | 1523,03 | 1864,31 | 1513,57 | 1269,47 | 985,51  | 1132,8  | 1889,08 | 1764,17 | 1463,32 | 1490,661 |

Πίνακας 5.6 Πειράματα παραμέτρου πειραματισμού στρατηγικής διαμόρφωσης της τιμής για 4 παραγωγούς και 16 καταναλωτές

| EXPERIMENTATION PARAMETER TEST<br>4 producers & 16 consumers |                   |      | Test Number |         |         |         |         |         |         |         |         |         | Mean     |
|--|-------------------|------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|  |                   |      | 1           | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |          |
| Default  | Mean market share | PROD | 0,625       | 1,44    | 0,31    | 1,125   | 0       | 0,625   | 0,625   | 0,625   | 1,875   | 0,94    | 0,819    |
|  |                   | CONS | 1,5         | 2,75    | 3       | 3       | 4,25    | 3       | 3       | 3       | 3       | 3       | 2,95     |
|  | Mean equilibrium  |      | 6,95        | 10,58   | 4,6     | 9,04    | 3,76    | 6,03    | 6,89    | 6,9     | 12,68   | 7,82    | 7,525    |
|  | Total profit      |      | 331,368     | 547,53  | 229,6   | 489,14  | 176,84  | 338,99  | 327,49  | 408,41  | 602,21  | 473,85  | 392,5428 |
| EXP 0.5  | Mean market share | PROD | 25,5        | 36,125  | 26,31   | 36,19   | 21,125  | 30,875  | 31,75   | 26,875  | 34,75   | 29,25   | 29,875   |
|  |                   | CONS | 38,5        | 22,75   | 31      | 30,5    | 25,5    | 29      | 29,5    | 37      | 46      | 33,5    | 32,325   |
|  | Mean equilibrium  |      | 35,64       | 80,9    | 40,88   | 83,53   | 46,19   | 57,38   | 49,22   | 38,92   | 40,14   | 35,07   | 50,787   |
|  | Total profit      |      | 2526,38     | 3695,85 | 2720,99 | 3459,63 | 2441,1  | 3279,45 | 3497,77 | 3159,17 | 3674,32 | 3189,27 | 3164,393 |
| EXP 1.0  | Mean market share | PROD | 30,625      | 30,375  | 34,38   | 31,685  | 28,5    | 34,875  | 28,5    | 38,19   | 32,875  | 29,75   | 31,9755  |
|  |                   | CONS | 22          | 40,5    | 29      | 38      | 37,75   | 23,5    | 26      | 31      | 26      | 26,5    | 30,025   |
|  | Mean equilibrium  |      | 64,93       | 32,52   | 70,74   | 36,46   | 42,07   | 80,24   | 65,68   | 73,7    | 55,21   | 57,88   | 57,943   |
|  | Total profit      |      | 3348,22     | 2762,93 | 3538,16 | 3153,74 | 3452,33 | 3357,84 | 3497,77 | 2931,74 | 3205,45 | 3249,47 | 3249,765 |
| EXP 2.0  | Mean market share | PROD | 43,25       | 32,06   | 39      | 31      | 50,375  | 33,625  | 39,125  | 34,31   | 30,5    | 40,06   | 37,3305  |
|  |                   | CONS | 38          | 34      | 37      | 28,5    | 32,5    | 44,5    | 41,5    | 29      | 25      | 37      | 34,7     |
|  | Mean equilibrium  |      | 59,86       | 51,61   | 59,3    | 49,84   | 92,65   | 25,35   | 54,35   | 70,42   | 36,43   | 47,93   | 54,774   |
|  | Total profit      |      | 2822,11     | 2138,25 | 2543,92 | 2042,75 | 4246,79 | 2203,75 | 3212,77 | 3002    | 1933,8  | 2568,1  | 2671,424 |

Πίνακας 5.7 Πειράματα παραμέτρου πειραματισμού στρατηγικής διαμόρφωσης της τιμής για 8 παραγωγούς και 16 καταναλωτές

| EXPERIMENTATION PARAMETER TEST<br>8 producers & 16 consumers |                   |      | Test Number |         |         |         |         |         |         |         |         |         | Mean     |
|--|-------------------|------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|  |                   |      | 1           | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |          |
| Default  | Mean market share | PROD | 3,435       | 0,94    | 0,31    | 0,94    | 0,94    | 1,56    | 0,625   | 3,125   | 2,825   | 1,25    | 1,595    |
|  |                   | CONS | 4,25        | 5,875   | 4,375   | 6       | 1,5     | 5,625   | 8,25    | 5,25    | 8,25    | 6       | 5,5375   |
|  | Mean equilibrium  |      | 20          | 8,43    | 5,63    | 6,78    | 8,71    | 10,52   | 7,06    | 18,57   | 18,28   | 10,18   | 11,416   |
|  | Total profit      |      | 1059,55     | 444,91  | 310,49  | 382,46  | 541,94  | 643,93  | 336,65  | 990,34  | 961,73  | 570,55  | 624,255  |
| EXP 0.5  | Mean market share | PROD | 25,375      | 30      | 27,63   | 29,435  | 32,31   | 30,69   | 29,05   | 28,125  | 28,925  | 31,44   | 29,298   |
|  |                   | CONS | 30,75       | 25,5    | 33,75   | 20,5    | 29      | 21,625  | 19,25   | 28,5    | 26,5    | 27,5    | 26,2875  |
|  | Mean equilibrium  |      | 35,66       | 50,55   | 31,61   | 54,05   | 41,14   | 52,4    | 51,93   | 53,25   | 41,72   | 47,1    | 45,941   |
|  | Total profit      |      | 2608,51     | 3032,1  | 3056,67 | 2990,98 | 2624,59 | 2829,14 | 2797,49 | 2707,26 | 2972,77 | 2683,41 | 2830,292 |
| EXP 1.0  | Mean market share | PROD | 32,69       | 29,31   | 33,5    | 33,625  | 27,625  | 32,375  | 30,05   | 34,31   | 32,5    | 28,185  | 31,417   |
|  |                   | CONS | 35,5        | 31,125  | 31,875  | 38,25   | 37,75   | 26,875  | 32,25   | 26,5    | 29,25   | 29,75   | 31,9125  |
|  | Mean equilibrium  |      | 44,72       | 37      | 70,65   | 49,43   | 35,74   | 68,65   | 34,98   | 51,75   | 51,87   | 53,16   | 49,795   |
|  | Total profit      |      | 2383,69     | 2858,11 | 3345,21 | 3367,88 | 2921,91 | 3392,04 | 2402,28 | 3524,35 | 2186,7  | 2789,08 | 2917,125 |
| EXP 2.0  | Mean market share | PROD | 38,5        | 39,75   | 38,56   | 36      | 39,125  | 35,375  | 40,275  | 34,44   | 35,75   | 39,125  | 37,69    |
|  |                   | CONS | 29,5        | 37,5    | 30      | 35,25   | 31,75   | 45,875  | 40,25   | 39,75   | 36      | 36,75   | 36,2625  |
|  | Mean equilibrium  |      | 55,71       | 46,27   | 46,22   | 47,84   | 44,85   | 44,25   | 64,31   | 49,11   | 59,08   | 70,8    | 52,844   |
|  | Total profit      |      | 2963,35     | 2811,46 | 2231,09 | 2648,68 | 2846    | 1959    | 3448,09 | 2225,42 | 2971,16 | 3176,81 | 2728,106 |



Πίνακας 5.8 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα παραμέτρου πειραματισμού στρατηγικής διαμόρφωσης της τιμής

|                  | Default           |        |              | EXP 0.5           |         |                | EXP 1.0           |              |                | EXP 2.0           |                |              |
|------------------|-------------------|--------|--------------|-------------------|---------|----------------|-------------------|--------------|----------------|-------------------|----------------|--------------|
|                  | Mean market share |        | Total profit | Mean market share |         | Total profit   | Mean market share |              | Total profit   | Mean market share |                | Total profit |
|                  | PROD              | CONS   |              | PROD              | CONS    |                | PROD              | CONS         |                | PROD              | CONS           |              |
| 4 cons & 8 prod  | 0,8125            | 3,15   | 222,67       | 31,1125           | 32,25   | <b>1621,86</b> | 31,1875           | <b>32,65</b> | 1614,57        | <b>36,8875</b>    | 31,95          | 1490,66      |
| 4 cons & 16 prod | 0,819             | 2,95   | 392,543      | 29,875            | 32,325  | 3164,39        | 31,9755           | 30,025       | <b>3249,77</b> | <b>37,3305</b>    | <b>34,7</b>    | 2671,42      |
| 8 cons & 16 prod | 1,595             | 5,5375 | 624,26       | 29,298            | 26,2875 | 2830,29        | 31,417            | 31,9125      | <b>2917,13</b> | <b>37,69</b>      | <b>36,2625</b> | 2728,11      |

Παρατηρούμε ότι οι διαφορές των μεγεθών είναι σχετικά μικρές, κάτι που είναι εν μέρει αναμενόμενο καθώς οι διαφορετικές τιμές της παραμέτρου πειραματισμού επηρεάζουν μεν τη στρατηγική διαμόρφωσης της τιμής, οι υπόλοιπες όμως στρατηγικές του πράκτορα επιτυγχάνουν να απορροφήσουν αυτήν την επιρροή. Παρόλ' αυτά, παρατηρείται ότι η τιμή 0.5 επιτυγχάνει αρκετά θετικά αποτελέσματα σε σχέση με τις άλλες τιμές όσον αφορά την τιμή ισορροπίας του πράκτορα. Αντίθετα η τιμή 2.0 συγκεντρώνει μεγαλύτερα μερίδια αγοράς. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν ο πράκτορας πειραματίζεται περισσότερο (βλέπε 4.3.1) προφανώς ρισκάρει να αφήσει λίγο μερίδιο αγοράς για το σκοπό του κέρδους. Καλούμενοι να επιλέξουμε μια τιμή της παραμέτρου, θεωρούμε ότι η τιμή 1.0 δίνει μια ικανοποιητική σχέση μεριδίων αγοράς και τιμής ισορροπίας επιτυγχάνοντας θετικά αποτελέσματα και στις δύο μετρικές.

#### 5.4. Πειράματα στρατηγικών διαμόρφωσης τιμής

Το τρίτο σετ πειραμάτων θέτει τη στρατηγική που δημιουργήθηκε στο κεφάλαιο 4 αντιμέτωπη με τις τέσσερις από τις στρατηγικές που αναλύθηκαν στο κεφάλαιο 2, τις ZI, ZIP, RE και GD. Αυτές οι συγκεκριμένες στρατηγικές επιλέχτηκαν όχι μόνο γιατί θεωρούνται οι πιο κλασικές στρατηγικές πρακτόρων ΔΔ αλλά και γιατί κάθε μία εξ αυτών εκπροσωπεί μια κατηγορία από αυτές του σχήματος 2.3. Συνεπώς,

είναι ενδιαφέρουσα η σύγκριση όχι μόνο με τον πράκτορα που υλοποιήθηκε αλλά και μεταξύ τους ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα σχετικά με τη σημασία που έχει η προσαρμοστικότητα και η προγνωστικότητα σε αγορές όπως αυτή που μελετάται.

Ας αναφερθεί ως παραδοχή ότι οι πράκτορες που υλοποιήθηκαν δεν αποτελούν ακριβέστατα μοντέλα των στρατηγικών που αναφέρθηκαν παραπάνω, κυρίως λόγω της φύσης της αγοράς, αφού οι τιμές των καταναλωτών και των παραγωγών προφανώς κινούνται εντός διαφορετικών ορίων. Παρόλ' αυτά, τα μοντέλα των πρακτόρων είναι ικανοποιητικά και σαφώς επαρκή για την εκτέλεση των πειραμάτων.

Και οι πέντε πράκτορες της αγοράς χρησιμοποιούν τη στρατηγική ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής ενώ η παράμετρος πειραματισμού της στρατηγικής διαμόρφωσης της τιμής που αναπτύχθηκε τίθεται στην τιμή 1.0. Ο Πίνακας 5.9 περιέχει τα αποτελέσματα για 4 παραγωγούς και 8 καταναλωτές, ο Πίνακας 5.10 για 4 παραγωγούς και 16 καταναλωτές και ο Πίνακας 5.11 για 8 παραγωγούς και 16 καταναλωτές. Τέλος, ο Πίνακας 5.12 περιέχει τα αποτελέσματα για όλα τα δυνατά πλήθη παραγωγών και καταναλωτών ως μέσους όρους των μετρικών.

Πίνακας 5.9 Πειράματα στρατηγικών διαμόρφωσης της τιμής για 4 παραγωγούς και 8 καταναλωτές

| PRICE FORMATION TEST<br>4 producers & 8 consumers |                   |      | Test Number |        |         |         |         |        |        |         |         |         | Mean    |
|---|-------------------|------|-------------|--------|---------|---------|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
|   |                   |      | 1           | 2      | 3       | 4       | 5       | 6      | 7      | 8       | 9       | 10      |         |
| Default   | Mean market share | PROD | 0,625       | 1,25   | 0       | 0       | 0,625   | 1,875  | 1,625  | 0       | 0,625   | 0       | 0,6625  |
|   |                   | CONS | 3           | 5,75   | 3       | 2,75    | 1,25    | 1,5    | 3      | 3       | 6       | 5,75    | 3,5     |
|   | Mean equilibrium  |      | 3,54        | 5      | 2,03    | 2,09    | 3,55    | 6,6    | 5,69   | 1,93    | 3,29    | 1,88    | 3,56    |
|   | Total profit      |      | 175,97      | 293,01 | 67      | 68,92   | 178,44  | 217,5  | 271,78 | 63,83   | 166,68  | 62,2    | 156,533 |
| ZI  | Mean market share | PROD | 9,75        | 7,5    | 24      | 2,25    | 2,25    | 2,25   | 21     | 26,5    | 17,25   | 3       | 11,575  |
|   |                   | CONS | 7,5         | 9      | 3       | 10,5    | 4       | 28,5   | 8,5    | 4,5     | 1,5     | 9       | 8,6     |
|   | Mean equilibrium  |      | 9,79        | 16,26  | 43,03   | 4,57    | 3,1     | 4,64   | 33,41  | 45,22   | 26      | 4,7     | 19,072  |
|   | Total profit      |      | 428,08      | 133,39 | 768,82  | 56,66   | 130,66  | 176,66 | 917,31 | 680,03  | 716,99  | 156,14  | 416,474 |
| ZIP   | Mean market share | PROD | 23,5        | 15,25  | 17      | 32,75   | 19,875  | 21     | 14     | 19,25   | 17      | 26,5    | 20,6125 |
|   |                   | CONS | 20          | 21     | 26,5    | 24,5    | 17,5    | 19     | 12     | 18      | 26      | 17      | 20,15   |
|   | Mean equilibrium  |      | 16,74       | 14,66  | 11,95   | 40,39   | 19,35   | 22,2   | 16,93  | 21,33   | 13,76   | 31,89   | 20,92   |
|   | Total profit      |      | 849,1       | 633,19 | 653,4   | 1308,05 | 488,5   | 942,33 | 490,53 | 834,47  | 937,36  | 1089,93 | 822,686 |
| RE  | Mean market share | PROD | 2,25        | 0,75   | 6       | 9       | 4,5     | 3,75   | 3      | 5,25    | 3,75    | 3       | 4,125   |
|   |                   | CONS | 1,5         | 9      | 3       | 1,5     | 13,5    | 3      | 10,5   | 7,5     | 7,5     | 1,5     | 5,85    |
|   | Mean equilibrium  |      | 4,59        | 0,18   | 5,23    | 13,7    | 1,34    | 7,75   | 3,74   | 6,86    | 4,81    | 3,48    | 5,168   |
|   | Total profit      |      | 71,9        | 55,6   | 330,54  | 599,6   | 231,49  | 214,83 | 155,73 | 309,36  | 392,44  | 180,12  | 254,161 |
| GD  | Mean market share | PROD | 12          | 22,625 | 9       | 15,75   | 18,25   | 22,25  | 11,75  | 23,5    | 17,75   | 30,75   | 18,3625 |
|   |                   | CONS | 13          | 6,5    | 10,5    | 15      | 8       | 17     | 10,5   | 1,5     | 4       | 19,5    | 10,55   |
|   | Mean equilibrium  |      | 11,37       | 30,35  | 8,79    | 18,8    | 18,9    | 32,81  | 14,5   | 38,54   | 29      | 27,04   | 23,01   |
|   | Total profit      |      | 585,49      | 342,18 | 232,11  | 685,59  | 568,99  | 741,66 | 333,02 | 1053,18 | 963,88  | 1021,1  | 652,72  |
| AGENT   | Mean market share | PROD | 51,875      | 52,625 | 44      | 40,25   | 54,5    | 48,875 | 48,625 | 25,5    | 43,625  | 36,75   | 44,6625 |
|   |                   | CONS | 55          | 48,75  | 54      | 45,75   | 55,75   | 31     | 55,5   | 65,5    | 55      | 47,25   | 51,35   |
|   | Mean equilibrium  |      | 30,72       | 29,69  | 34,18   | 36,93   | 35,2    | 48,4   | 23,29  | 12,5    | 25,62   | 23,08   | 29,961  |
|   | Total profit      |      | 827,43      | 763,79 | 1141,14 | 1319,6  | 1041,33 | 999,81 | 590,49 | 649,11  | 1021,21 | 1046,73 | 940,064 |

Πίνακας 5.10 Πειράματα στρατηγικών διαμόρφωσης της τιμής για 4 παραγωγούς και 16 καταναλωτές

| PRICE FORMATION TEST<br>4 producers & 16 consumers |                   |      | Test Number |         |         |         |         |         |         |         |         |         | Mean     |
|--|-------------------|------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
|  |                   |      | 1           | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      |          |
| Default  | Mean market share | PROD | 0           | 0       | 0,19    | 0       | 0       | 1,25    | 0,375   | 0       | 0,625   | 0       | 0,244    |
|  |                   | CONS | 6           | 1,25    | 11,125  | 7,25    | 1,5     | 4,5     | 4,5     | 1,5     | 2,75    | 3       | 4,3375   |
|  | Mean equilibrium  |      | 4,09        | 3,87    | 4,99    | 4,05    | 4,03    | 9,95    | 5,17    | 4,25    | 7,14    | 3,98    | 5,152    |
|  | Total profit      |      | 135,1       | 127,74  | 197,75  | 133,7   | 133,03  | 328,42  | 206,58  | 140,12  | 244,67  | 131,48  | 177,859  |
| ZI   | Mean market share | PROD | 29,125      | 23,25   | 4,75    | 3       | 22,625  | 1,5     | 28,5    | 4,5     | 19,5    | 7,125   | 14,3875  |
|  |                   | CONS | 14,5        | 1,5     | 0       | 4,5     | 10,5    | 10,5    | 0       | 0       | 15      | 1,5     | 5,8      |
|  | Mean equilibrium  |      | 77,13       | 71,5    | 16,78   | 12,29   | 84,21   | 2,14    | 90,64   | 17,44   | 45,7    | 11,43   | 42,926   |
|  | Total profit      |      | 1971,79     | 920,01  | 462,48  | 289,93  | 1178,6  | 298,42  | 1381,58 | 507,43  | 1600,91 | 289,98  | 890,113  |
| ZIP  | Mean market share | PROD | 17,125      | 14,375  | 19,56   | 19,375  | 15,125  | 18,625  | 20,25   | 29,25   | 24,75   | 15,125  | 19,356   |
|  |                   | CONS | 16          | 22      | 15      | 18      | 10,5    | 17,5    | 13,5    | 33,5    | 15      | 34      | 19,5     |
|  | Mean equilibrium  |      | 43,2        | 23,96   | 53,85   | 45,56   | 45,62   | 43,59   | 59,2    | 54,38   | 65,97   | 12,99   | 44,832   |
|  | Total profit      |      | 1659,17     | 1325,51 | 830,68  | 960,52  | 659,26  | 732,04  | 1193,61 | 2296,85 | 1658,37 | 1274,07 | 1259,008 |
| RE   | Mean market share | PROD | 8,625       | 6,75    | 4,5     | 2,625   | 7,125   | 5,25    | 7,125   | 8,625   | 10,625  | 3,375   | 6,4625   |
|  |                   | CONS | 3           | 10,5    | 15      | 0       | 10,5    | 12      | 10,5    | 4,5     | 3       | 3       | 7,2      |
|  | Mean equilibrium  |      | 27,45       | 6,48    | 9,09    | 10,41   | 9,42    | 3,04    | 16,73   | 14,05   | 26,31   | 8,24    | 13,122   |
|  | Total profit      |      | 444,76      | 851,6   | 427,29  | 269,83  | 632,84  | 647,2   | 673,58  | 743,98  | 696,06  | 364,46  | 575,16   |
| GD   | Mean market share | PROD | 23,375      | 22,125  | 14,375  | 22      | 14,625  | 16,875  | 9,875   | 14,625  | 29,25   | 12,875  | 18       |
|  |                   | CONS | 18          | 15,5    | 14,375  | 6       | 6,5     | 10      | 13,5    | 10      | 12,5    | 13      | 11,9375  |
|  | Mean equilibrium  |      | 46,34       | 57,02   | 13,5    | 60,16   | 40,73   | 32,26   | 21,11   | 39,9    | 76,77   | 16,62   | 40,441   |
|  | Total profit      |      | 1617,75     | 1595,44 | 22,15   | 966,14  | 1036,16 | 701,51  | 1044,68 | 1215,2  | 1794,42 | 815,69  | 1080,914 |
| AGENT  | Mean market share | PROD | 21,75       | 33,5    | 56,625  | 53      | 40,5    | 56,5    | 33,875  | 43      | 15,25   | 61,5    | 41,55    |
|  |                   | CONS | 42,5        | 49,25   | 44,5    | 64,25   | 60,5    | 45,5    | 58      | 50,5    | 51,75   | 45,5    | 51,225   |
|  | Mean equilibrium  |      | 32,58       | 41,15   | 123,49  | 75,87   | 39,54   | 106,58  | 26,34   | 81,6    | 12,45   | 91,92   | 63,152   |
|  | Total profit      |      | 1241,59     | 1860,26 | 1961,87 | 1749,14 | 1462,18 | 1948,95 | 909,59  | 2357,94 | 833,9   | 1721,36 | 1604,678 |

Πίνακας 5.11 Πειράματα στρατηγικών διαμόρφωσης της τιμής για 8 παραγωγούς και 16 καταναλωτές

| PRICE FORMATION TEST<br>8 producers & 16 consumers |                   |      | Test Number |         |         |         |        |         |        |         |         |         | Mean     |
|--|-------------------|------|-------------|---------|---------|---------|--------|---------|--------|---------|---------|---------|----------|
|  |                   |      | 1           | 2       | 3       | 4       | 5      | 6       | 7      | 8       | 9       | 10      |          |
| Default  | Mean market share | PROD | 1,5625      | 0,1875  | 0,3125  | 0,375   | 3,125  | 1,25    | 0      | 1,125   | 0,5625  | 0,1875  | 0,86875  |
|  |                   | CONS | 4,25        | 4       | 10,25   | 2,25    | 9      | 4,5     | 12,125 | 4,875   | 3,75    | 7,375   | 6,2375   |
|  | Mean equilibrium  |      | 11,72       | 4,98    | 5,41    | 5,26    | 19,26  | 9,8     | 4,08   | 9,24    | 6,16    | 4,93    | 8,084    |
|  | Total profit      |      | 456,16      | 197,08  | 239,76  | 210,86  | 794,5  | 396,22  | 134,49 | 461,45  | 198,05  | 193,54  | 328,211  |
| ZI   | Mean market share | PROD | 2,25        | 18,375  | 9       | 3,75    | 1,125  | 3,19    | 1,875  | 22,875  | 19,875  | 20,5    | 10,2815  |
|  |                   | CONS | 27,25       | 0,75    | 7,5     | 8       | 11     | 29,75   | 16,25  | 4,25    | 22      | 2,875   | 12,9625  |
|  | Mean equilibrium  |      | 3,39        | 74,66   | 17,25   | 8,42    | 1,66   | 7,42    | 2,06   | 70,46   | 58,53   | 61,37   | 30,522   |
|  | Total profit      |      | 454         | 1196,94 | 473,14  | 446,76  | 216,62 | 246,4   | 364,65 | 1211,63 | 1887,63 | 912,05  | 740,982  |
| ZIP  | Mean market share | PROD | 16,4375     | 19,4375 | 21,0625 | 24,375  | 37,5   | 17      | 14,625 | 16,8125 | 19,3125 | 19,0625 | 20,5625  |
|  |                   | CONS | 16,5        | 30      | 11,25   | 32,5    | 22,25  | 12      | 11,25  | 22,875  | 14,5    | 20,75   | 19,3875  |
|  | Mean equilibrium  |      | 36,58       | 29,06   | 44,09   | 41,39   | 74,94  | 46,38   | 27,99  | 24,69   | 37,76   | 37,03   | 39,991   |
|  | Total profit      |      | 917,64      | 1595,46 | 1180,82 | 1300,57 | 1579,2 | 782,95  | 916,86 | 1143,11 | 1318,78 | 1639,71 | 1237,51  |
| RE   | Mean market share | PROD | 3,375       | 6,375   | 2,25    | 6,75    | 3      | 6,75    | 7,125  | 6,75    | 10,875  | 7,875   | 6,1125   |
|  |                   | CONS | 15,125      | 4,5     | 22,5    | 3,75    | 12,75  | 6       | 18     | 4,5     | 9,75    | 14,25   | 11,1125  |
|  | Mean equilibrium  |      | 5,26        | 14,99   | 0,54    | 10,95   | 13,55  | 17,89   | 12,7   | 17,1    | 22,7    | 8,63    | 12,431   |
|  | Total profit      |      | 305,18      | 576,14  | 312,91  | 518,21  | 240,82 | 278,36  | 468,31 | 324,6   | 1112,06 | 713,08  | 484,967  |
| GD   | Mean market share | PROD | 22,875      | 15,875  | 5,125   | 8,875   | 10,875 | 17,625  | 22,75  | 11,25   | 22,375  | 15      | 15,2625  |
|  |                   | CONS | 11,75       | 21,25   | 23      | 19,5    | 18,5   | 8,25    | 12     | 6,75    | 17,25   | 23,25   | 16,15    |
|  | Mean equilibrium  |      | 46,77       | 29,35   | 4,54    | 6,9     | 16,29  | 41,14   | 57,88  | 36,4    | 47,66   | 13,57   | 30,05    |
|  | Total profit      |      | 914,12      | 996,17  | 483,45  | 688,43  | 673,77 | 762,19  | 805,39 | 605,03  | 1272,06 | 1043,08 | 824,369  |
| AGENT  | Mean market share | PROD | 53,5        | 39,75   | 62,25   | 55,875  | 44,375 | 54,185  | 53,625 | 41,1875 | 27      | 37,375  | 46,91225 |
|  |                   | CONS | 25,125      | 39,5    | 25,5    | 34      | 26,5   | 39,5    | 30,375 | 56,75   | 32,75   | 31,5    | 34,15    |
|  | Mean equilibrium  |      | 143,44      | 75,25   | 141,16  | 125,28  | 91,31  | 114,63  | 125,76 | 50,75   | 34,1    | 74,68   | 97,636   |
|  | Total profit      |      | 2000,03     | 1416,6  | 1622,23 | 2069,46 | 831,81 | 1915,31 | 1820,3 | 564,45  | 1028,48 | 2016,37 | 1528,504 |

Πίνακας 5.12 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα στρατηγικών διαμόρφωσης της τιμής

|                  | Default           |        |              | ZI                |         |              | ZIP               |         |              | RE                |         |              | GD                |         |              | AGENT             |               |                |
|------------------|-------------------|--------|--------------|-------------------|---------|--------------|-------------------|---------|--------------|-------------------|---------|--------------|-------------------|---------|--------------|-------------------|---------------|----------------|
|                  | Mean market share |        | Total profit | Mean market share |         | Total profit | Mean market share |         | Total profit | Mean market share |         | Total profit | Mean market share |         | Total profit | Mean market share |               | Total profit   |
|                  | PROD              | CONS   |              | PROD              | CONS    |              | PROD              | CONS    |              | PROD              | CONS    |              | PROD              | CONS    |              | PROD              | CONS          |                |
| 4 cons & 8 prod  | 0,6625            | 3,5    | 156,53       | 11,575            | 8,6     | 416,47       | 20,6125           | 20,15   | 822,69       | 4,125             | 5,85    | 254,16       | 18,3625           | 10,55   | 652,72       | <b>44,6625</b>    | <b>51,35</b>  | <b>940,06</b>  |
| 4 cons & 16 prod | 0,244             | 4,3375 | 177,86       | 14,3875           | 5,8     | 890,11       | 19,356            | 19,5    | 1259,01      | 6,4625            | 7,2     | 575,16       | 18                | 11,9375 | 1080,91      | <b>41,55</b>      | <b>51,225</b> | <b>1604,68</b> |
| 8 cons & 16 prod | 0,8687            | 6,2375 | 328,21       | 10,2815           | 12,9625 | 740,98       | 20,5625           | 19,3875 | 1237,51      | 6,1125            | 11,1125 | 484,97       | 15,2625           | 16,15   | 824,37       | <b>46,9123</b>    | <b>34,15</b>  | <b>1528,50</b> |

Παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αρκετά θετικά για τη στρατηγική διαμόρφωσης της τιμής που δημιουργήθηκε. Είναι επίσης εφικτή η εξαγωγή συμπερασμάτων για τη γενικότερη λειτουργία της αγοράς, καθώς είναι εύκολα αντιληπτό ότι ο πράκτορας με τη στρατηγική ZIP επιτυγχάνει σαφώς καλύτερα αποτελέσματα από τους ZI, RE και GD. Ακόμα, ο πράκτορας GD κερδίζει τους ZI και RE ενώ ο RE έχει απογοητευτικά αποτελέσματα αφού το τελικό κέρδος του είναι συγκρίσιμο και πολλές φορές ακόμη και μικρότερο από του τυχαίου πράκτορα ZI. Με βάση τα παραπάνω αποτελέσματα μεταξύ των πρακτόρων προκύπτει το βασικό συμπέρασμα ότι οι προσαρμοστικές στρατηγικές (ZIP, GD, AGENT) επιτυγχάνουν καλύτερα αποτελέσματα από τις μη προσαρμοστικές (ZI) ή τις αυτό-προσαρμοστικές (RE). Ακόμα, οι τιμές των μετρικών των προγνωστικών στρατηγικών (ZIP, AGENT) είναι καλύτερες όλων των υπολοίπων. Τα συμπεράσματα αυτά είναι αναμενόμενα καθώς η αγορά είναι μια αγορά ανοικτού τύπου που δίνει στους πράκτορες σημαντικό πλήθος πληροφοριών προς εκμετάλλευση.

Τέλος, ας αναφερθεί ως γενική παρατήρηση ότι στο τρίτο αυτό σενάριο πειραμάτων λόγω του αυξημένου πλήθους των μεσαζόντων παρατηρείται ότι σε αρκετά πειράματα ο παράγοντας τύχη διαδραματίζει σοβαρό ρόλο με συνέπεια κάποιες φορές ακόμα και μια τυχαία στρατηγική όπως η ZI να επιτυγχάνει. Παρόλ' αυτά, η επαναλαμβανόμενη εκτέλεση των πειραμάτων εξασφαλίζει ότι οι στρατηγικές κρίνονται από μία πιο λογική και λιγότερο τυχαία σκοπιά.

## 6. Συμπεράσματα και Μελλοντική Εργασία

### 6.1. Συμπεράσματα

Παρατηρώντας τα αποτελέσματα του παραπάνω κεφαλαίου, αντιλαμβάνεται κανείς τις δυνατότητες που δίνονται όσον αφορά τη σχεδίαση «έξυπνων» πρακτόρων για τη συμμετοχή τους σε πολύπλοκες αγορές ΔΔ όπως το Power TAC. Ένα πρόβλημα όπως αυτό της απελευθερωμένης αποκεντρωμένης αγοράς ενέργειας, ακόμα κι όταν περιορίζεται στα στενά όρια ενός διαγωνισμού, δίνει τροφή για έρευνα και σχεδίαση νέων στρατηγικών. Οι γνώσεις που αποκομίζονται από την έρευνα είναι εντυπωσιακές, ενώ το πλήθος των διαφορετικών υπό-προβλημάτων που τίθενται έχει ως αποτέλεσμα την ανάγκη περαιτέρω μελέτης σε πλήθος διαφορετικών επιστημονικών πεδίων. Ενδεικτικά, αναφέρουμε τα πεδία της ασαφούς λογικής και της ανάλυσης χρονοσειρών.

Όσον αφορά τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα πειράματα, υποδεικνύεται ότι στρατηγικές προσαρμοστικού και προγνωστικού τύπου έχουν ικανοποιητικά αποτελέσματα σε τέτοιου είδους αγορές. Αυτό οφείλεται κυρίως στο γεγονός ότι οι δημοπρασίες που πραγματοποιούνται στα πλαίσια του διαγωνισμού είναι ανοικτού τύπου, δίνουν δηλαδή σημαντικό όγκο πληροφοριών στους πράκτορες. Αντίθετα, είναι εμφανές ότι οι στρατηγικές ενισχυτικής μάθησης είναι κυρίως σχεδιασμένες για άλλου τύπου δημοπρασίες.

Ένα δεύτερο συμπέρασμα που προκύπτει από τα πειράματα, και αφορά τις στρατηγικές ενημέρωσης προσφορών, είναι ότι σε αγορές τέτοιου τύπου για τη σχεδίαση στρατηγικών χρειάζεται να λαμβάνονται υπόψη αρκετές παράμετροι, κάτι το οποίο έγινε πράξη με τη στρατηγική ασαφούς λογικής που υλοποιήθηκε. Αντίθετα, «επιπόλαιες» στρατηγικές που κυνηγούν το «γρήγορο» κέρδος δεν τυγχάνουν αντίστοιχης επιτυχίας.

Τέλος, μια σημαντική παρατήρηση είναι ότι η ικανότητα ενός πράκτορα να πειραματίζεται είναι αρκετά ουσιαστική σε αγορές όπως αυτή που χρησιμοποιήθηκε. Αυτό επιβεβαιώνεται τόσο από την επιτυχία των προγνωστικών στρατηγικών όσο και από τη βέλτιστη τιμή της παραμέτρου πειραματισμού που

επιλέχτηκε. Το παραπάνω συμπέρασμα είναι δυνατό να ερμηνευτεί λαμβάνοντας υπόψη την τυχαιότητα της αγοράς που αγγίζει υψηλά επίπεδα.

## 6.2. Μελλοντική εργασία

Όπως είναι εμφανές και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων, η σχεδίαση και υλοποίηση του πράκτορα είναι σίγουρα ένα καλό πρώτο βήμα προς την ανάπτυξη στρατηγικών για διαγωνισμούς όπως το Power TAC. Έτσι, ο πράκτορας αυτός θα μπορούσε να αποτελέσει τη βάση για τη σχεδίαση μιας ακόμα πιο ισχυρής και πολύπλοκης στρατηγικής, ενώ δίνονται και αρκετές δυνατότητες επέκτασης της ήδη υπάρχουσας στρατηγικής του.

Αρχικά, όσον αφορά τη στρατηγική διαμόρφωσης τιμής του πράκτορα, ας αναφερθεί ότι ίσως θα μπορούσε να υπήρχε κάποια διαδικασία πειραματισμού διαφορετική από την υπάρχουσα (ίσως μια διαφορετική συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας) που πιθανώς να έδινε και μεγαλύτερη ευαισθησία στην αντίστοιχη παράμετρο πειραματισμού. Αν και η εν λόγω παράμετρος δεν είχε αρκετά ουσιαστική επιρροή στα αποτελέσματα, δεν αποκλείεται μια μέθοδος ενημέρωσης της τιμής της σε κάθε γύρο να είχε θετικά αποτελέσματα.

Η στρατηγική ενημέρωσης προσφορών ασαφούς λογικής παρόλο που είχε ικανοποιητικά αποτελέσματα στα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, αυτό δε σημαίνει ότι δεν υπάρχουν περιθώρια βελτίωσης. Έτσι, θα ήταν δυνατό η στρατηγική να γίνει περισσότερο «έξυπνη» εάν τα όρια των κατανομών δεν ήταν απλώς σταθερά, αλλά μεταβάλλονταν σε σχέση με κάποιες άλλες παραμέτρους του διαγωνισμού.

Τέλος, όσον αφορά τη στρατηγική παραγωγής ενέργειας του πράκτορα, είναι προφανές ότι η μέθοδος της εκθετικής εξομάλυνσης που χρησιμοποιήθηκε είναι μία μόνο εκ των πιθανών μεθόδων πρόβλεψης της μελλοντικής τιμής της χρονοσειράς που κατασκευάζεται. Καθώς η εν λόγω χρονοσειρά προέρχεται από άγνωστη στον πράκτορα πηγή, θα πρέπει ίσως να χρησιμοποιηθούν τεχνικές ανίχνευσης της τυχούσας τάσης ή της περιοδικότητάς της. Στη συνέχεια, είναι δυνατό να αφαιρεθούν η τάση και η περιοδικότητα ώστε να είναι πλέον εξασφαλισμένη η στασιμότητα της χρονοσειράς και να καταστεί δυνατή η εφαρμογή πιο πολύπλοκων



μεθόδων πρόβλεψης της μελλοντικής τιμής, όπως π.χ. το *αυτό-παλινδρούμενο μοντέλο κινούμενου μέσου (AutoRegressive Moving Average - ARMA)*.

Καταλήγοντας, σε σχέση με όλα τα παραπάνω, αλλά και με το σύνολο της εργασίας, θα λέγαμε ότι η αγορά ενέργειας αποτελεί ένα επίκαιρο παράδειγμα αγοράς ΔΔ και οι δυνατότητες που προσφέρονται είναι πράγματι απίστευτες. Η έρευνά μας δε μπορεί παρά να χαρακτηριστεί μια καλή αρχή, κατάλληλη ώστε να πατήσουμε για να φτάσουμε ψηλότερα.

## Βιβλιογραφία

- [1] D. Friedman and J. Rust, editors. The Double Auction Market: Institutions, Theories and Evidence. Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity. Perseus Publishing, Cambridge, MA, 1993.
- [2] L. Harris, G. Sofianos, and J. E. Shapiro. Program trading and intraday volatility. The Review of Financial Studies, 10(4):1035{1064, Winter 1997.
- [3] A. Madhavan, M. Richardson, and M. Roomans. Why do security prices change? A transaction-level analysis of nyse stocks. The Review of Financial Studies, 10(4):1035{1064, Winter 1997.
- [4] S. Gjerstad and J. Dickhaut. Price formation in double auctions. Games and Economic Behaviour, 22:1{29, 1998.
- [5] A. Mas-Colell, W. Whinston and J. Green, Microeconomic Theory, Oxford University Press, 1995.
- [6] A. S. Phelps. Evolutionary Mechanism Design. PhD Thesis, University of Liverpool, July 2007.
- [7] D. K. Gode and S. Sunder. Allocative efficiency of markets with zero-intelligence traders: Market as a partial substitute for individual rationality. The Journal of Political Economy, 101(1):119{137, February 1993.
- [8] V. L. Smith. An experimental study of competitive market behaviour. The Journal of Political Economy, 70(2):111{137, April 1962.
- [9] R. Das, J. E. Hanson, J. O. Kephart, and G. Tesauero. Agent-human interactions in the continuous double auction. In Proceedings of the 17th International Joint Conference on Artificial Intelligence, Seattle, USA, 2001.
- [10] D. Cliff. Minimal-intelligence agents for bargaining behaviours in marketbased environments. Technical Report HP-97-91, Hewlett-Packard Research Laboratories, Bristol, England, 1997.
- [11] A. Madhavan. Trading mechanisms in securities markets. The Journal of Finance, 47(2):607{641, June 1992.

- [12] S. Phelps, S. Parsons, E. Sklar and P. McBurney. Using genetic programming to optimise pricing rules for a double auction market. In Proceedings of the workshop on Agents for Electronic Commerce, Pittsburgh, PA, October 2003.
- [13] S. K. Chatterjee and W. Samuelson. Bargaining under incomplete information. *Operations Research*, 31(5):835-851, 1983.
- [14] R. Preston McAfee. A dominant strategy double auction. *Journal of Economic Theory*, 56:434{450, 1992.
- [15] S. R. Williams. Existence and convergence of equilibria in the buyer's bid double auction. *The Review of Economic Studies*, 58:351{374, 1991.
- [16] M. A. Satterthwaite and S. R. Williams. The Bayesian theory of the k-double auction. In D. Friedman and J. Rust, editors, *The Double Auction Market: Institutions, Theories and Evidence*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, chapter 4, pages 99{123. Perseus Publishing, Cambridge, MA, 1993.
- [17] M. A. Satterthwaite and S. R. Williams. The rate of convergence to efficiency in the buyer's bid double auction as the market becomes large. *The Review of Economic Studies*, 56(4):477{498, 1989.
- [18] A. Rustichini, M. A. Satterthwaite, and S. R. Williams. Convergence to efficiency in a simple market with incomplete information. *Econometrica* 62(5):1041{1063, September 1994.
- [19] J. H. Kagel and W. Vogt. Buyer's bid double auctions: Preliminary experimental results. In D. Friedman and J. Rust, editors, *The Double Auction Market: Institutions, Theories and Evidence*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, chapter 10, pages 285{305. Perseus Publishing, Cambridge, MA, 1993.
- [20] S. Parsons, J. Niu, K. Cai, and E. Sklar. Reducing price fluctuation in continuous double auctions through pricing policy and shout improvement. *Proc. Fifth International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi Agent Systems*, pages 1143–1150, 2006.

- [21] J. Rust, J. H. Miller and R. Palmer. Characterizing effective trading strategies. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 18:61-96, 1994.
- [22] J. Rust, J. H. Miller, and R. G. Palmer. Behavior of trading automata in a computerized double auction market. In Friedman and Rust [1], pages 155–198.
- [23] D. K. Gode and S. Sunder. Lower bounds for efficiency of surplus extraction in double auctions. In D. Friedman and J. Rust, editors, *The Double Auction Market: Institutions, Theories and Evidence*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, chapter 7, pages 199-219. Perseus Publishing, Cambridge, MA, 1993.
- [24] D. Cliff. ZIP60: Further explorations in the evolutionary design of online auction market mechanisms. Technical Report HPL-2005-85, 2005.
- [25] C. Preist and M. van Tol. Adaptive agents in a persistent shout double auction. In *Proceedings of the 1st International Conference on Information and Computation Economies*, pages 11–18, New York, NY, USA, 1998.
- [26] A. E. Roth and I. Erev, “Learning in extensive form games: Experimental data and simple dynamic models in the intermediate term,” *Games Econom. Beh.*, vol. 8, pp. 164–212, 1995.
- [27] I. Erev and A. E. Roth, “Predicting how people play games with unique, mixed-strategy equilibria,” *Amer. Econom. Rev.*, vol. 88, pp. 848–881, 1998.
- [28] J. Nicolaisen, V. Petrov, and L. Tesfatsion. Market power and efficiency in a computational electricity market with discriminatory double-auction pricing *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 5(5):504–523, October 2001.
- [29] M. He, H. F. Leung, and N. R. Jennings. A fuzzy logic based bidding strategy for autonomous agents in continuous double auctions. *IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering*, 15 (6):1345–1363, 2003.
- [30] P. Vytelingum, R. K. Dash, E. David, and N. R. Jennings. A risk-based bidding strategy for continuous double auctions. In *Sixteenth European Conference on Artificial Intelligence*, pages 79–83, Valencia, Spain, 2004.

- [31] P. Vytelingum, D. Cliff, and N. R. Jennings. Strategic bidding in continuous double auctions. *Artificial Intelligence*, 172:1700–1729, 2008.
- [32] G. Tesauro and J. L. Bredin. Strategic sequential bidding in auctions using dynamic programming. *Proc. First International Joint Conference on Autonomous Agents and MultiAgent Systems*, pages 591–598, 2002.
- [33] H. Ma, H.-F. Leung, An adaptive attitude bidding strategy for agents in continuous double auctions, in: *EEE'05: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on E-Technology, E-Commerce and E-Service*, IEEE Computer Society, Washington, DC, USA, 2005, pp. 38–43.
- [34] N. Borissov, N. Wirstrom, Q-Strategy: A Bidding Strategy for Market-Based Allocation of Grid Services, *On the Move to Meaningful Internet Systems: OTM 2008*, p. 744–761.
- [35] Watkins, C., Dayan, P.: Q-learning. *Machine Learning* 8(3) (1992) 279–292.
- [36] W. Ketter, J. Collins and C. Block, Smart Grid Economics: Policy Guidance through Competitive Simulation, *ERIM Report Series Research in Management*, ERS-2010-043-LIS, December 2010.
- [37] C. Block, J. Collins, W. Ketter and C. Weinhardt, A Multi-Agent Energy Trading Competition, *ERIM Report Series Research in Management*, ERS-2009-054-LIS, May 2010.
- [38] TAC Energy Wiki, wikia, last accessed 13/03/2011, available online:  
[http://powertac.wikia.com/wiki/Power\\_TAC\\_Wiki](http://powertac.wikia.com/wiki/Power_TAC_Wiki)
- [39] Power TAC Wiki, MediaWiki, last accessed 13/03/2011, available online:  
[http://www.powertac.org/wiki/index.php/Main\\_Page](http://www.powertac.org/wiki/index.php/Main_Page)
- [40] Power TAC Server Wiki, github, last accessed 13/03/2011, available online:  
<https://github.com/powertac/powertac-server/wiki>
- [41] Ketter, Wolfgang, Collins, John, Reddy, Prashant and Flath, Christoph M., The Power Trading Agent Competition (May 10, 2011). *ERIM Report Series*

Reference No. ERS-2011-011-LIS. Available at SSRN:  
<http://ssrn.com/abstract=1839139>