

Αλγόριθμος Uniform Price Δημοπρασίας Ηλεκτρικής Ενέργειας

Μ. Φ.: Αριστοτέλης Τσίμτσιος, Δημήτριος Βουδριάς

Διδάσκων: Καθηγητής Γεώργιος Μπάκος

Περίληψη- Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για uniform price δημοπρασία ηλεκτρικής ενέργειας. Ο αλγόριθμος αυτός υλοποιείται σε MATLAB προκειμένου να προκύψει ένα πρόγραμμα που δίνει την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς και την πωλούμενη ενέργεια σε κάθε δημοπρασία. Με χρήση του κώδικα που αναπτύσσεται, μελετώνται οι διάφορες στρατηγικές που μπορούν να ακολουθήσουν οι συμμετέχοντες μιας uniform price δημοπρασίας, καθώς και η επίδραση των Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας (ΑΠΕ) στην αγορά. Από την ανάλυση που πραγματοποιείται προκύπτει ότι η πιο ορθολογική στρατηγική από πλευράς παραγωγών αφορά την υποβολή προσφορών στο οριακό κόστος παραγωγής των μονάδων τους, ενώ σε κάθε περίπτωση ευνοούνται κυρίως οι μικροεπενδυτές. Επίσης, προκύπτει ότι το ποσό της ενέργειας από ΑΠΕ που εισάγεται κάθε φορά στην αγορά παίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στη διαμόρφωση της τιμής εκκαθάρισης.

1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, πολλές χώρες προχώρησαν στην αναδόμηση της βιομηχανίας ηλεκτρικής ενέργειας με την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας, την αποδέσμευση των υπηρεσιών ηλεκτρισμού και την ελεύθερη πρόσβαση στα ηλεκτρικά δίκτυα. Θεωρείται ότι περισσότερες επιλογές και ελευθερίες για τους συμμετέχοντες της αγοράς μπορούν να ενισχύσουν τον ανταγωνισμό στην αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, προκειμένου να επιτευχθούν χαμηλότερες τιμές, βελτίωση της απόδοσης του συστήματος και επιπλέον κίνητρα για τους επενδυτές [1-3].

Κάθε χώρα ακολουθεί το δικό της μοντέλο αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας ανάλογα με τις κοινωνικοοικονομικές και πολιτικές τις ιδιαιτερότητες. Επομένως, ο βαθμός στον οποίο επιτρέπεται ο ανταγωνισμός στη βιομηχανία ηλεκτρικής ενέργειας εξαρτάται από τις επιλογές κάθε χώρας [4].

Η αγορά ηλεκτρικής ενέργειας, όπως και κάθε άλλη αγορά, έχει σαν στόχο τον καθορισμό μιας τιμής για τον ηλεκτρισμό, στην οποία η προσφορά μπορεί να καλύψει τη ζήτηση. Αντίθετα όμως από τις υπόλοιπες αγορές, παρουσιάζει ορισμένες ιδιομορφίες που απορρέουν από τις ιδιαιτερότητες του ηλεκτρισμού. Συγκεκριμένα, η ηλεκτρική ενέργεια πρέπει να παράγεται σχεδόν την ίδια στιγμή που καταναλώνεται, λόγω της έλλειψης δυνατότητας αποθήκευσης, και άρα είναι αναγκαία η ύπαρξη ενός μηχανισμού συνεχούς εξισορρόπησης προσφοράς και ζήτησης ενέργειας. Στα πλαίσια αυτού του μηχανισμού δημοπρασίας, οι συμμετέχοντες καλούνται να υποβάλλουν τις προσφορές τους, ενώ ο διαχειριστής αναλαμβάνει να ορίσει το κοινό σημείο των καμπυλών προσφοράς και ζήτησης, το οποίο θα καθορίσει την τιμή της ηλεκτρικής ενέργειας [5].

Οι συμμετέχοντες της αγοράς μπορεί να είναι κάτοχοι μονάδων παραγωγής ενέργειας, πωλητές λιανικής, ή εξουσιοδοτημένοι αντιπρόσωποι εταιρειών [8].

Τα πιο διαδεδομένα συστήματα δημοπρασίας ηλεκτρικής ενέργειας είναι η uniform price δημοπρασία και η discriminatory δημοπρασία. Ενώ στη discriminatory δημοπρασία οι συμμετέχοντες πληρώνουν ή πληρώνονται σε τιμή ίση με αυτήν της προσφοράς τους, στη uniform price δημοπρασία οι συμμετέχοντες πληρώνουν ή πληρώνονται στην ίδια τιμή, η οποία είναι ίση με την τιμή της τελευταίας προσφοράς που έγινε δεκτή, ανεξάρτητα από την τιμή των προσφορών τους. Ο διαχειριστής του συστήματος, καλεί τους παραγωγούς με αύξουσα σειρά τιμής πωλούμενης ενέργειας και ικανοποιεί τη ζήτηση με το χαμηλότερο κόστος σε κάθε χρονική περίοδο [6].

Σύμφωνα με την [7], και τα δύο προαναφερθέντα συστήματα παρουσιάζουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα και η σύγκριση ανάμεσα στις δύο αυτές δομές δημοπρασιών είναι αρκετά πολύπλοκη, αν και η discriminatory δημοπρασία έχει αρχίσει να αμφισβητείται τα τελευταία χρόνια. Ωστόσο, η uniform price δημοπρασία έχει το πλεονέκτημα ότι ενισχύει τους μικρότερους επενδυτές, καθώς τα κέρδη τους συνήθως είναι αυξημένα σε σχέση με την τιμή της προσφοράς τους χωρίς να χρειάζεται να προβλέψουν την τιμή της αγοράς, κάτι που συνήθως γίνεται από τους μεγαλύτερους επενδυτές. Επιπλέον, οποιοδήποτε φαινόμενο άσκησης εξουσίας από τους μεγαλύτερους επενδυτές είναι εκμεταλλεύσιμο και από τους μικρότερους επενδυτές, αφού η τιμή της αγοράς είναι ενιαία για όλους. Έτσι, είναι πιθανότερο οι μικρές εταιρείες να επεκταθούν αλλά και να δημιουργηθούν νέες εταιρείες, κάτι που έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερο ανταγωνισμό, χαμηλότερες τιμές για τους καταναλωτές και περισσότερα κίνητρα για νέους επενδυτές.

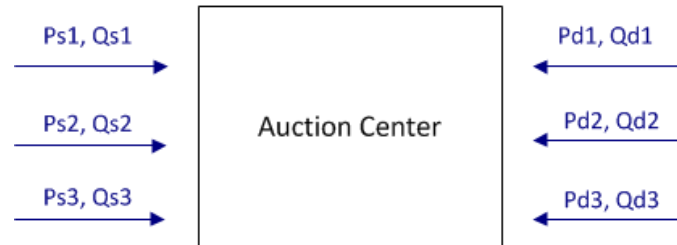
Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζεται ένας αλγόριθμος για uniform price δημοπρασία ηλεκτρικής ενέργειας. Ο λόγος που επιλέχθηκε το συγκεκριμένο σύστημα δημοπρασίας είναι ότι τα πλεονεκτήματα του κρίθηκαν επίκαιρα, δεδομένης της οικονομικής κρίσης που μαστίζει τις περισσότερες χώρες και έχει μειώσει στο ελάχιστο τα κίνητρα για νέες επενδύσεις στον τομέα της παραγωγής ενέργειας. Στη συνέχεια, ο αλγόριθμος αυτός υλοποιείται σε MATLAB. Τέλος, με χρήση του κώδικα που αναπτύχθηκε, παρουσιάζονται κάποια σενάρια τα οποία δείχνουν τις πιθανές στρατηγικές που μπορούν να ακολουθήσουν οι συμμετέχοντες μιας uniform price δημοπρασίας ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ μελετάται και η επίδραση της εισαγωγής στην αγορά ενέργειας από ΑΠΕ, στην τιμή εκκαθάρισης της αγοράς.

2. Αλγόριθμος uniform price δημοπρασίας

Το σύστημα που αναλύεται αναφέρεται στην Day-ahead αγορά, δηλαδή τη βραχυπρόθεσμη αγορά όπου οι προσφορές των συμμετεχόντων κατατίθενται μια ημέρα πριν από την ημέρα συναλλαγών. Το πλεονέκτημα της αγοράς αυτής είναι ότι δίνει την ευκαιρία στους συμμετέχοντες να διαχειριστούν τις βραχυπρόθεσμες αλλαγές στην αγορά και τη ζήτηση και να δράσουν προς το συμφέρον τους. Συνήθως υιοθετείται το μοντέλο της μοναδικής ημερήσιας δημοπρασίας όπου λαμβάνονται οι προσφορές αγοράς και ζήτησης ολόκληρης της ημέρας σε ωριαία βάση και καθορίζονται οι αντίστοιχες τιμές της αγοράς [5].

Το σύστημα της uniform price δημοπρασίας ηλεκτρικής ενέργειας που αναλύεται λειτουργεί ως εξής [4, 10]:

- 1) Αρχικά όλοι οι συμμετέχοντες (πωλητές και αγοραστές) υποβάλλουν τις προσφορές τους. Κάθε προσφορά περιλαμβάνει ένα ζεύγος τιμών που αποτελείται από την ποσότητα της ενέργειας προς αγορά ή προς πώληση (Q) και την τιμή της ανά μονάδα (P) όπως φαίνεται στην Εικ. 1.



Εικ. 1 Υποβολή προσφορών πωλητών και αγοραστών.

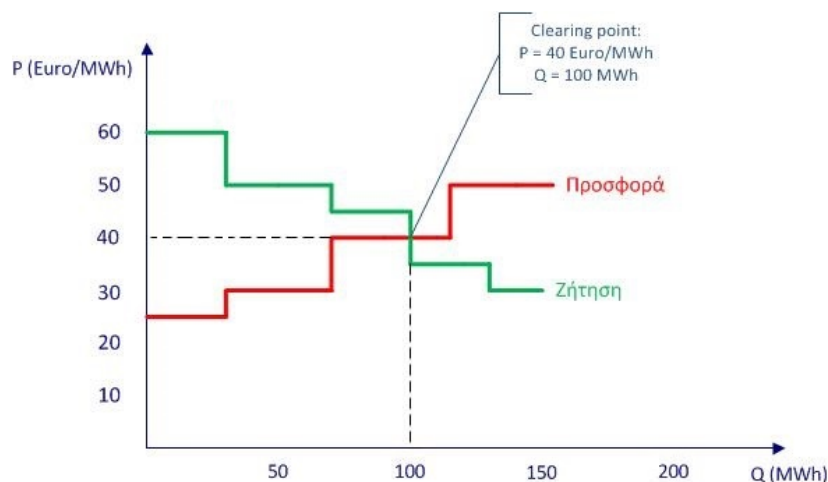
- 2) Οι προσφορές των πωλητών ταξινομούνται κατά αύξουσα σειρά τιμής ενώ οι προσφορές των αγοραστών ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά τιμής.
- 3) Μετά την ταξινόμηση, τα ποσά της ενέργειας των προσφορών σε κάθε επίπεδο τιμής αθροίζονται και προκύπτουν οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης.
- 4) Το σημείο τομής των δύο καμπυλών (clearing point) δίνει την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς (clearing price). Ουσιαστικά η τιμή στην οποία κλείνει η αγορά είναι η τιμή της τελευταίας αποδεκτής προσφοράς. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί και στη συνολική ποσότητα ενέργειας που αγοράζεται και πωλείται.
- 5) Σε περίπτωση που στο ίδιο επίπεδο τιμής υπάρχουν περισσότεροι του ενός συμμετέχοντες, μπορεί να τηρηθεί σειρά προτεραιότητας σύμφωνα με κριτήρια που θα οριστούν, ή αλλιώς, σε περίπτωση που η αγορά κλείνει στο επίπεδο αυτό, η ενέργεια μπορεί να κατανεμηθεί αναλογικά στους συμμετέχοντες με βάση το μέγεθος της προσφοράς τους, όπως συμβαίνει και στην παρούσα ανάλυση.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παράδειγμα εφαρμογής της uniform price δημοπρασίας. Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι προσφορές των αγοραστών και των πωλητών (τιμή ανά μονάδα και ποσότητα ενέργειας) του παραδείγματος. Οι προσφορές των πωλητών έχουν ταξινομηθεί κατά αύξουσα σειρά τιμής, ενώ των αγοραστών κατά φθίνουσα σειρά τιμής. Με Α, Β, Γ συμβολίζονται οι διάφοροι παραγωγοί και αγοραστές που συμμετέχουν. Όπως φαίνεται, κάθε συμμετέχοντας μπορεί να καταθέσει περισσότερες από μία προσφορές (μία για κάθε μονάδα του).

Πίνακας 1: Προσφορές πωλητών και αγοραστών του παραδείγματος.

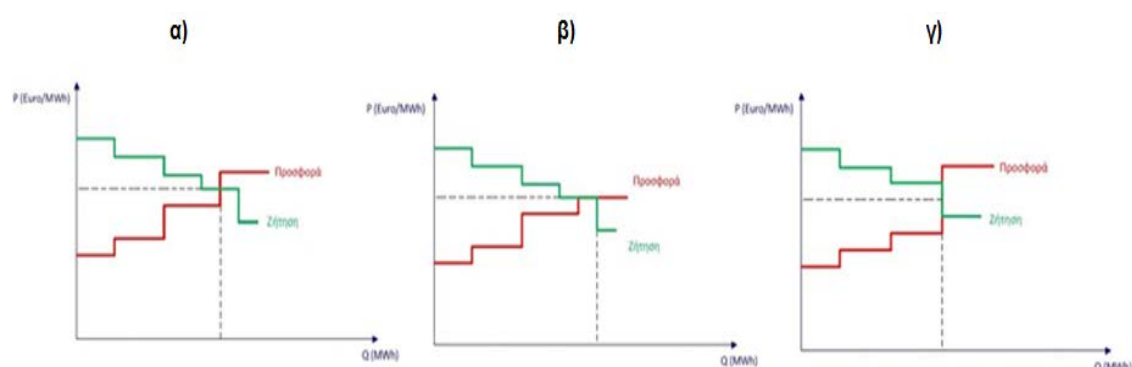
Πωλητές		Αγοραστές	
P (Euro/MWh)	Q (MWh)	P (Euro/MWh)	Q (MWh)
A 25	30	A 60	30
B 30	40	Γ 50	40
B 40	20	B 45	30
Γ 40	25	Γ 35	30
A 50	40	A 30	20

Με βάση τα παραπάνω δεδομένα, σχεδιάζονται οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης όπως φαίνεται στην Εικ. 2.



Εικ. 2 Καμπύλες προσφοράς και ζήτησης του παραδείγματος.

Με βάση τις καμπύλες προσφοράς και ζήτησης της Εικ. 2 προκύπτει ότι το clearing point αντιστοιχεί σε τιμή 40 Euro/MWh και ενέργεια 100 MWh. Ο παραγωγός Α θα πουλήσει 30 MWh και θα έχει κέρδος (σε σχέση με αυτό που αντιστοιχεί στην τιμή της προσφοράς του) $30(40-25) = 450$ Euro, ο παραγωγός Β θα πουλήσει 40 MWh + 13.33 MWh = 53.33 MWh με κέρδος $40(40-30) + 13.33(40-40) = 400$ Euro και ο παραγωγός Γ θα πουλήσει 16.66 MWh με κέρδος $16.66(40-40) = 0$ Euro. Λόγω του ότι στο επίπεδο της τιμής εκκαθάρισης υπάρχουν περισσότεροι του ενός συμμετέχοντες και υπάρχει πλεόνασμα ενέργειας προς πώληση, το πλεόνασμα αυτό αφαιρείται αναλογικά από τα ποσά ενέργειας του επιπέδου. Ανάλογα προκύπτουν και οι αντίστοιχες τιμές για τους αγοραστές. Στην Εικ. 3 παρουσιάζονται και οι υπόλοιπες περιπτώσεις εκκαθάρισης της αγοράς πέρα από αυτήν του παραδείγματος. Στην περίπτωση γ) η τιμή εκκαθάρισης αντιστοιχεί στο μέσο του κοινού τμήματος των καμπυλών προσφοράς και ζήτησης.



Εικ. 3. Περιπτώσεις εκκαθάρισης της αγοράς.

3. Ανάπτυξη κώδικα για uniform price δημοπρασία

Στα πλαίσια της εργασίας, ο αλγόριθμος της uniform price δημοπρασίας ηλεκτρικής ενέργειας που αναλύθηκε παραπάνω υλοποιήθηκε σε περιβάλλον MATLAB. Ο κώδικας που αναπτύχθηκε φαίνεται στην Εικ. 4, ενώ στα σχόλια του κώδικα εξηγείται η λειτουργία του. Ο χρήστης εισάγει της προσφορές των πωλητών και των

αγοραστών σε δύο διαφορετικά αρχεία Excel (“seller” και “buyer” αντίστοιχα) σε κατάλληλα διαμορφωμένους πίνακες. Το πρόγραμμα διαβάζει τα δύο αρχεία και υπολογίζει το clearing point (τιμή εκκαθάρισης και πωλούμενη ενέργεια), το οποίο εμφανίζει στην οθόνη, ενώ στην οθόνη εμφανίζονται και οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης.

```
%{ Το πρόγραμμα διαβάζει τα δύο αρχεία Excel "seller" και "buyer"
    που περιέχουν τις προσφορές των πωλητών και των αγοραστών αντίστοιχα.
%}
sell = xlsread('seller.xlsx');
buy = xlsread('buyer.xlsx');

%{ Γίνεται ταξινόμηση των προσφορών. Οι προσφορές των πωλητών ταξινομούνται
    με αύξουσα σειρά τιμής και οι προσφορές των αγοραστών με φθίνουσα σειρά τιμής.
%}
A=sortrows(sell,2);
B=sortrows(buy,-2);

%{ Δημιουργούνται τα κατάλληλα διακριτά ζεύγη για τον σχεδιασμό των καμπυλών
    προσφοράς και ζήτησης.
%}
x1=cumsum(A(:,1));
y1=A(:,2);
x2=cumsum(B(:,1));
y2=B(:,2);

...
x1=[0 ; x1 ];
d=size( y1, 1 );
y1=[y1 ; y1(d) ];
x2=[0 ; x2 ];
s=size( y2, 1 );
y2=[y2 ; y2(s)];

...
% Σχηματίζονται οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης.

stairs(x1,y1);
hold on
stairs(x2,y2);

grid on;
xlabel('MWh')
ylabel('Euro/MWh')
axis([0 200 0 80]);

%{ Με τη χρήση της συνάρτησης 'intersections' [11] προκύπτει
    το σημείο τομής μεταξύ των καμπυλών προσφοράς και ζήτησης.
%}
[x3,y3] = stairs(x1,y1);
[x4,y4] = stairs(x2,y2);
[x0,y0] = intersections(x3,y3,x4,y4);
M=[x0,y0];
```

Εικ. 4. Κώδικας για uniform price δημοπρασία ηλεκτρικής ενέργειας σε περιβάλλον MATLAB.

```

% Επιλογή σημείου εκκαθάρισης της αγοράς για κάθε πιθανό τρόπο τομής των καμπυλών.
%{ Αν η τομή των καμπυλών έχει τη μορφή της Εικ. 3(α) το παρακάτω τμήμα του
   κώδικα παρακάμπτεται.
%}
w=size(M, 1);
if w>1
    if M(1,1)~= M(w,1)
        x0= M(w,1);      % Η συνθήκη αυτή αντιστοιχεί στην περίπτωση τομής της Εικ. 3(β).
        y0=M(w,2);
    else
        x0= M(w,1);      % Η συνθήκη αυτή αντιστοιχεί στην περίπτωση τομής της Εικ. 3(γ).
        y0= (M(1,2)+M(w,2))/2;
    end
end

%{ Εμφάνιση στην οθόνη της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς και της πωλούμενης
   ενέργειας (clearing point).
%}
fprintf('Clearing point: \n Energy = %1.2f MWh      Price = %1.2f Euro/MWh', x0,y0);

```

Εικ. 4. (Συνέχεια)

4. Ανάλυση στρατηγικών σε uniform price δημοπρασία

Στη συνέχεια θα αναλυθούν πιθανές στρατηγικές που μπορούν να ακολουθήσουν οι συμμετέχοντες μιας uniform price δημοπρασίας ηλεκτρικής ενέργειας, μέσα από τρία διαφορετικά σενάρια και με τη βοήθεια του κώδικα που αναπτύχθηκε παραπάνω. Τα σενάρια που θα παρουσιαστούν πραγματοποιήθηκαν για μια συγκεκριμένη σταθερή καμπύλη ζήτησης, ενώ η καμπύλη προσφοράς περιλαμβάνει δύο παραγωγούς ΑΠΕ, οι οποίοι διαθέτουν ένα σταθμό ο καθένας (έστω αιολικό και φωτοβολταϊκό) και δύο παραγωγούς οι οποίοι διαθέτουν τέσσερις θερμικές μονάδες ο καθένας (έστω λιγνιτικές). Στον Πίνακα 2 φαίνονται οι προσφορές των αγοραστών οι οποίες μένουν αμετάβλητες σε όλα τα παρακάτω σενάρια ενώ στους Πίνακες 3, 4 και 5 φαίνονται οι προσφορές των παραγωγών για το πρώτο, το δεύτερο και το τρίτο σενάριο αντίστοιχα, οι οποίες μεταβάλλονται προκειμένου να αναλυθούν οι πιθανές στρατηγικές από πλευράς παραγωγών. Ο κάθε παραγωγός υποβάλλει μία προσφορά για την κάθε μονάδα του, επομένως οι παραγωγοί ΑΠΕ υποβάλλουν από μία προσφορά, ενώ οι παραγωγοί των λιγνιτικών μονάδων από τέσσερις.

Όπως φαίνεται και στα παρακάτω σενάρια, γενικά οι παραγωγοί ΑΠΕ πραγματοποιούν προσφορές σε πολύ χαμηλή (ή και μηδενική) τιμή, προκειμένου να εξασφαλίσουν ότι οι προσφορές τους θα εκκαθαριστούν. Αυτό συμβαίνει διότι δεν έχουν τη δυνατότητα να καθορίζουν την ενέργεια που παράγουν, ενώ δεν υπάρχει δυνατότητα αποθήκευσης. Παρά τη χαμηλή προσφορά, συνήθως οι παραγωγοί ΑΠΕ αποζημιώνονται μέσω κάποιου πριμ το οποίο είναι ίσο ή υψηλότερο από την τιμή της αγοράς. Αντίθετα, οι θερμικές μονάδες έχουν τη δυνατότητα να καθορίζουν το ποσό της ενέργειας που παράγουν ανάλογα με το οικονομικό τους συμφέρον και άρα μπορούν να ακολουθούν διάφορες στρατηγικές [8].

Πίνακας 2: Προσφορές αγοραστών και για τα τρία σενάρια

Energy (MWh)	Price (Euro/MWh)
20	70
20	70
30	65
30	65
20	60
30	60
15	55
20	55
10	45
10	45

Πίνακας 3: Προσφορές παραγωγών για το Σενάριο 1.

Σενάριο 1		
Παραγωγοί	Energy (MWh)	Price (Euro/MWh)
ΑΠΕ 1	20	5
ΑΠΕ 2	20	5
Λιγνιτικός 1 Α	20	35
Λιγνιτικός 1 Β	10	50
Λιγνιτικός 1 Γ	15	45
Λιγνιτικός 1 Δ	35	40
Λιγνιτικός 2 Α	20	40
Λιγνιτικός 2 Β	10	55
Λιγνιτικός 2 Γ	15	50
Λιγνιτικός 2 Δ	35	45

Πίνακας 4: Προσφορές παραγωγών για το Σενάριο 2.

Σενάριο 2		
Παραγωγοί	Energy (MWh)	Price (Euro/MWh)
ΑΠΕ 1	20	5
ΑΠΕ 2	20	5
Λιγνιτικός 1 Α	20	35
Λιγνιτικός 1 Β	10	55
Λιγνιτικός 1 Γ	15	45
Λιγνιτικός 1 Δ	35	40
Λιγνιτικός 2 Α	20	40
Λιγνιτικός 2 Β	10	55
Λιγνιτικός 2 Γ	15	50
Λιγνιτικός 2 Δ	35	45

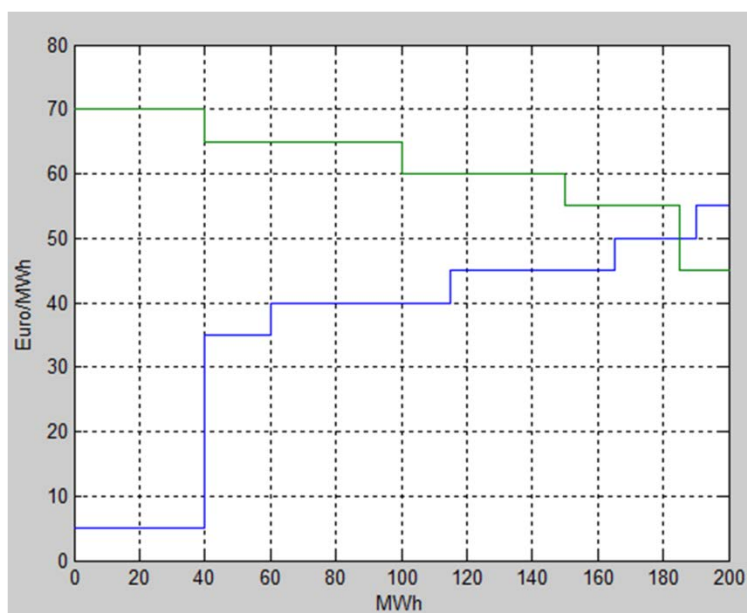
Πίνακας 5: Προσφορές παραγωγών για το Σενάριο 3.

Σενάριο 3		
Παραγωγοί	Energy (MWh)	Price (Euro/MWh)
ΑΠΕ 1	20	5
ΑΠΕ 2	20	5
Λιγνιτικός 1 Α	20	35
Λιγνιτικός 1 Β	10	60
Λιγνιτικός 1 Γ	15	45
Λιγνιτικός 1 Δ	35	40
Λιγνιτικός 2 Α	20	40
Λιγνιτικός 2 Β	10	55
Λιγνιτικός 2 Γ	15	50
Λιγνιτικός 2 Δ	35	45

4.1 Σενάριο 1

Στο Σενάριο 1, οι παραγωγοί ΑΠΕ υποβάλλουν προσφορές σε πολύ χαμηλή τιμή ώστε να εξασφαλίσουν ότι η προσφορά τους θα εκκαθαριστεί. Η λογική αυτή ακολουθείται και στα υπόλοιπα σενάρια. Όσον αφορά τους παραγωγούς των λιγνιτικών μονάδων, θεωρείται ότι οι προσφορές τους αντιστοιχούν στα οριακά κόστη παραγωγής των μονάδων τους, το οποίο αποτελεί και το πιο συνηθισμένο και ορθολογικό σενάριο. Οι παραγωγοί έχουν κάθε κίνητρο να ακολουθήσουν αυτή τη στρατηγική, καθώς η αγορά θα δέχεται την προσφορά τους αν και μόνο αν η τιμή της προσφοράς αυτής είναι μεγαλύτερη ή ίση από τα οριακά τους κόστη. Έτσι εξασφαλίζουν ότι η προσφορά τους γίνεται δεκτή κάθε φορά που είναι δυνατό να κερδίσουν παράγοντας και απορρίπτεται κάθε φορά που θα έχαναν χρήματα αν παρήγαγαν [9].

Στην Εικ. 5 φαίνονται οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης για το Σενάριο 1, οι οποίες προέκυψαν με τη χρήση του κώδικα που αναπτύχθηκε. Όπως προκύπτει από τον κώδικα, το clearing point αντιστοιχεί σε τιμή 50 Euro/MWh και πωλούμενη ενέργεια 185 MWh. Ο 2^{ος} παραγωγός λιγνιτικών μονάδων δεν πουλάει τις 10 MWh που αντιστοιχούν σε 55 Euro/MWh, ωστόσο δεδομένης της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς, η συναλλαγή αυτή δεν θα ήταν συμφέρουσα γι' αυτόν εφόσον η τιμή της προσφοράς του αντιστοιχεί στο οριακό κόστος παραγωγής της μονάδας.



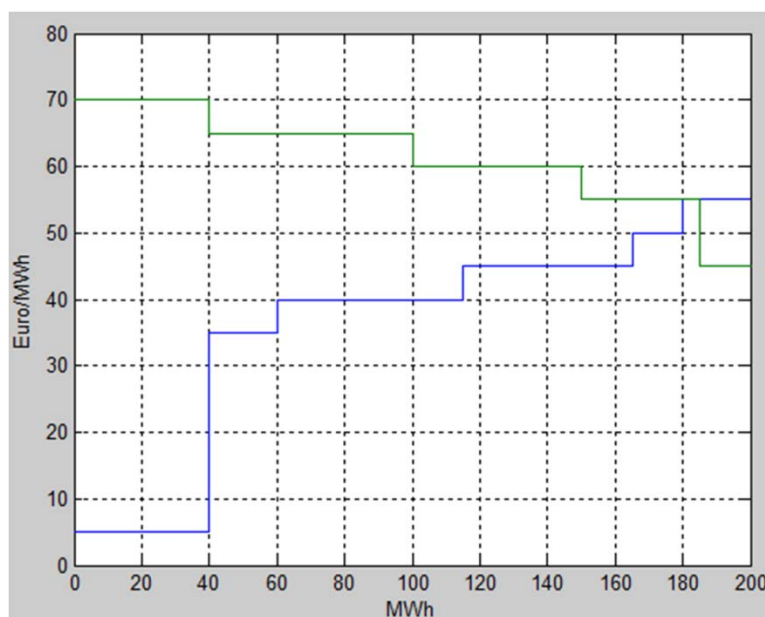
Εικ. 5. Καμπύλες προσφοράς και ζήτησης για το Σενάριο 1.

4.2 Σενάριο 2

Στο Σενάριο 2, ο 2^{ος} παραγωγός λιγνιτικών μονάδων ακολουθεί τη στρατηγική του Σεναρίου 1. Από την άλλη, ο 1^{ος} παραγωγός λιγνιτικών μονάδων αυξάνει την τιμή της προσφοράς για τη Β μονάδα του από 50 Euro/MWh σε 55 Euro/MWh. Η στρατηγική που ακολουθεί έχει την εξής λογική: Αυξάνοντας την τιμή της προσφοράς για τη συγκεκριμένη μονάδα σε σχέση με την τιμή οριακού κόστους παραγωγής, λαμβάνει το ρίσκο η τιμή της προσφοράς να είναι αρκετά υψηλή ώστε η συγκεκριμένη μονάδα να μην κληθεί. Ωστόσο, αν η εκτίμηση του παραγωγού είναι σωστή, τότε η προσφορά αυτή ενδέχεται να κλείσει την αγορά αυξάνοντας το κέρδος και για όλες τις άλλες

μονάδες του. Σε διαφορετική περίπτωση θα χάσει απλά την μικρότερη μονάδα του. Αξίζει να σημειωθεί ότι η συγκεκριμένη στρατηγική, σε περίπτωση που πετύχει, είναι κερδοφόρα και για τους υπόλοιπους παραγωγούς των οποίων οι προσφορές έχουν εκκαθαριστεί, και κυρίως για τους μικρότερους παραγωγούς [7].

Στην Εικ. 6 φαίνονται οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης για το Σενάριο 2. Το clearing point αντιστοιχεί σε τιμή 55 Euro/MWh και πωλούμενη ενέργεια 185 MWh. Όπως προκύπτει, ο 1^{ος} παραγωγός καταφέρνει με τη στρατηγική που ακολουθεί να κλείσει την αγορά στα 55 Euro/MWh και έτσι να αυξήσει το κέρδος όλων των μονάδων του σε σχέση με το Σενάριο 1. Επίσης, το κέρδος αυξάνεται και για τους υπόλοιπους παραγωγούς, ενώ όπως διαμορφώνεται η αγορά, ο 2^{ος} παραγωγός πουλάει και ένα μέρος των 10 MWh οι οποίες δεν είχαν εκκαθαριστεί στο Σενάριο 1.



Εικ. 6. Καμπύλες προσφοράς και ζήτησης για το Σενάριο 2.

4.3 Σενάριο 3

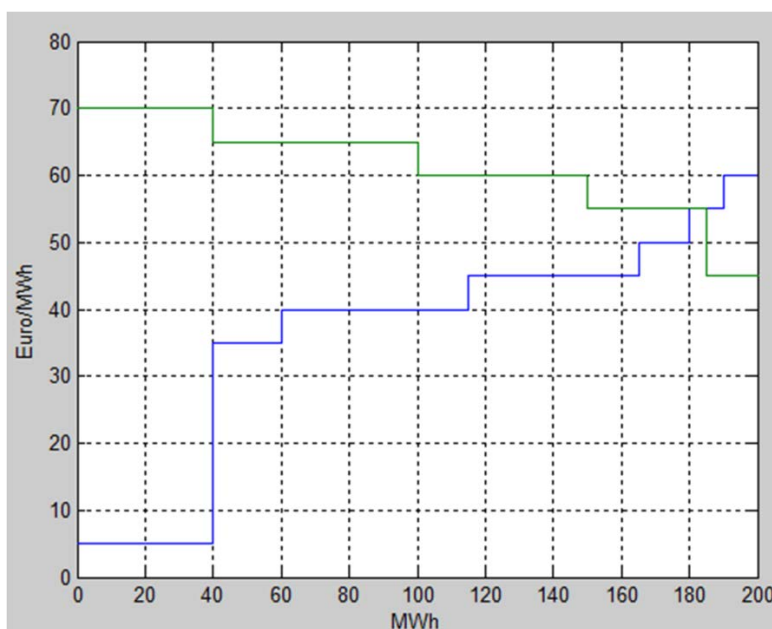
Στο Σενάριο 3, ο 2^{ος} παραγωγός λιγνιτικών μονάδων δεν μεταβάλλει τις προσφορές του. Ο 1^{ος} παραγωγός λιγνιτικών μονάδων αυξάνει την τιμή της προσφοράς για τη Β μονάδα του στα 60 Euro/MWh. Η στρατηγική αυτή έχει δύο εκδοχές:

- 1) Ο 1^{ος} παραγωγός ακολουθεί τη στρατηγική του Σεναρίου 2, αυξάνοντας ακόμα περισσότερο την τιμή της προσφοράς ώστε να έχει ακόμα μεγαλύτερο κέρδος.
- 2) Ο 2^{ος} παραγωγός ακολούθησε ενδεχομένως τέτοια στρατηγική τις προηγούμενες ημέρες, ώστε να δώσει στον 1^ο παραγωγό την εντύπωση πως θα καταθέσει προσφορά μεγάλης τιμής και να τον παρασύρει να ανεβάσει κι αυτός την προσφορά του, πιστεύοντας πως θα έχει το περιθώριο να το πράξει χωρίς η προσφορά του να μείνει εκτός. Στην πραγματικότητα, ο 2^{ος} παραγωγός δεν ανεβάζει την προσφορά του έτσι ώστε ο ανταγωνιστής του να πέσει στην «παγίδα» και να χάσει την ευκαιρία να πουλήσει κάποια από την ενέργειά του.

Στην Εικ. 7 φαίνονται οι καμπύλες προσφοράς και ζήτησης για το Σενάριο 3. Το clearing point αντιστοιχεί σε τιμή 55 Euro/MWh και πωλούμενη ενέργεια 185 MWh. Όσον αφορά την 1^η εκδοχή του σεναρίου, ο 1^{ος} παραγωγός αύξησε την τιμή της

προσφοράς του περισσότερο από όσο έπρεπε, με αποτέλεσμα η προσφορά να μην εκκαθαριστεί και άρα η στρατηγική του απέτυχε. Όσον αφορά την 2^η εκδοχή του σεναρίου, ο 2^{ος} παραγωγός παρέσυρε τον 1^ο παραγωγό να αυξήσει την προσφορά του για τη Β μονάδα στα 60 Euro/MWh ενώ αυτός τελικά διατήρησε τις προσφορές του σε τιμή οριακού κόστους παραγωγής. Έτσι όχι μόνο ο ανταγωνιστής του έχασε την ευκαιρία να πουλήσει 10 MWh, αλλά με την κίνησή του του έδωσε και την ευκαιρία να πουλήσει ένα μέρος από τις 10 MWh που δεν είχε πουλήσει στο Σενάριο 1 και μάλιστα σε υψηλότερη τιμή.

Αξίζει να σημειωθεί ότι γενικά η uniform price δημοπρασία δεν ευνοεί στρατηγικές σαν αυτήν της 2^{ης} εκδοχής, οι οποίες εμπεριέχουν μεγάλο ρίσκο για τους συμμετέχοντες. Ωστόσο η εκδοχή αυτή είναι ενδεικτική της στρατηγικής που μπορεί να ακολουθήσει ένας παραγωγός στην περίπτωση που επιθυμεί όχι μόνο να πετύχει οικονομικά συμφέροντες συναλλαγές γι' αυτόν, αλλά και να οδηγήσει σε απώλειες τους ανταγωνιστές του.



Εικ. 7. Καμπύλες προσφοράς και ζήτησης για το Σενάριο 3.

5. Επίδραση των ΑΠΕ στην αγορά

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, οι παραγωγοί ΑΠΕ υποβάλλουν πάντα προσφορές σε πολύ χαμηλή (ή και μηδενική) τιμή προκειμένου να εξασφαλίσουν ότι η προσφορά τους θα εκκαθαριστεί. Το γεγονός αυτό δίνει την εντύπωση πως οι παραγωγοί ΑΠΕ δεν διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση της αγοράς, καθώς δεν χρειάζεται να προβλέπουν την τιμή εκκαθάρισης, ενώ τα κέρδη τους εξαρτώνται πάντα από τη στρατηγική των υπόλοιπων παραγωγών.

Ωστόσο, στην πραγματικότητα οι παραγωγοί ΑΠΕ καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό την τιμή εκκαθάρισης της αγοράς. Αυτό οφείλεται στο ότι οι προσφορές τους τοποθετούνται πάντα στο χαμηλότερο επίπεδο τιμής της καμπύλης προσφοράς και έτσι η μεταβολή της ενέργειας που προσφέρεται από παραγωγούς ΑΠΕ μετατοπίζει την καμπύλη προσφοράς προς τα δεξιά ή προς τα αριστερά, επηρεάζοντας το clearing point. Αν ληφθεί υπόψη και το γεγονός πως οι υπόλοιποι παραγωγοί υποβάλλουν

συνήθως προσφορές που αντιστοιχούν στο οριακό κόστος παραγωγής των μονάδων τους, δηλαδή η τιμή των προσφορών τους καθώς και το ποσό της ενέργειας που προσφέρουν δεν παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές, τότε φαίνεται ακόμα περισσότερο η σημαντική επίδραση των παραγωγών ΑΠΕ στη διαμόρφωση της αγοράς, καθώς η ενέργεια που προσφέρουν σε κάθε χρονική περίοδο παρουσιάζει σημαντικές μεταβολές και εξαρτάται από φυσικούς παράγοντες.

Στα πλαίσια της εργασίας αυτής, ο κώδικας που αναπτύχθηκε παραπάνω για την υλοποίηση του αλγορίθμου της uniform price δημοπρασίας τροποποιήθηκε έτσι ώστε να δίνει ως αποτέλεσμα την καμπύλη μεταβολής της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς σε συνάρτηση με την ενέργεια που προσφέρεται από τους παραγωγούς ΑΠΕ. Ο τροποποιημένος κώδικας φαίνεται στην Εικ. 8. Ουσιαστικά, στο πρόγραμμα αυτό, το ποσό της ενέργειας που προσφέρουν οι ΑΠΕ ορίστηκε σαν άγνωστη μεταβλητή. Ο κώδικας εισήχθη σε μια ανακύκλωση η οποία δίνει κάθε φορά διαφορετικές τιμές στη μεταβλητή αυτή, μέσα σε ένα ορισμένο εύρος που ορίζεται από τον χρήστη, και έτσι προκύπτει σε κάθε επανάληψη μια νέα τιμή εκκαθάρισης. Έτσι, το πρόγραμμα δίνει ως αποτέλεσμα την καμπύλη της τιμής εκκαθάρισης συναρτήσει της ενέργειας από ΑΠΕ.

```
sell = xlsread('seller.xlsx');
buy = xlsread('buyer.xlsx');

A=sortrows(sell,2);
B=sortrows(buy,-2);

%{ Εισαγωγή ανακύκλωσης που δίνει σε κάθε επανάληψη νέα τιμή (από 1-100 με βήμα 1)
στη μεταβλητή "x" που αντιπροσωπεύει την προσφερόμενη ενέργεια (MWh) από ΑΠΕ.
%}
for x=1:100
    A(1)=x;
    x1=cumsum(A(:,1));
    y1=A(:,2);
    x2=cumsum(B(:,1));
    y2=B(:,2);

    x1=[0 ; x1 ];
    d=size( y1, 1 );
    y1=[y1 ; y1(d) ];
    x2=[0 ; x2 ];
    s=size( y2, 1 );
    y2=[y2 ; y2(s) ];

    [x3,y3] = stairs(x1,y1);
    [x4,y4] = stairs(x2,y2);

    [x0,y0] = intersections(x3,y3,x4,y4);

    M=[x0,y0];
```

Εικ. 8. Κώδικας που δίνει ως αποτέλεσμα την καμπύλη μεταβολής της τιμής εκκαθάρισης σε συνάρτηση με την προσφερόμενη ενέργεια από ΑΠΕ.

```

w=size(M, 1);
if w>1
    if M(1,1)~= M(w,1)
        x0= M(w,1);
        y0=M(w,2);
    else
        x0= M(w,1);
        y0= (M(1,2)+M(w,2))/2;
    end
end

%{ Σε κάθε επανάληψη οι τιμές του x (προσφερόμενη ενέργεια από ΑΠΕ) και του y0
(τιμή εκκαθάρισης) αποθηκεύονται στους πίνακες q(x) και p(x) αντίστοιχα.
%}
p(x)=y0;
q(x)=x;
end

%{ Σχεδιασμός της καμπύλης μεταβολής της τιμής εκκαθάρισης σε συνάρτηση με την
προσφερόμενη ενέργεια από ΑΠΕ.
%}
plot(q,p)
grid on;
xlabel('Προσφερόμενη Ενέργεια από ΑΠΕ (MWh)')
ylabel('Τιμή Εκκαθάρισης (Euro/MWh)')
axis([0 100 0 100]);

```

Εικ. 8. (Συνέχεια)

Στη συνέχεια παρουσιάζεται ένα παράδειγμα χρήσης του παραπάνω κώδικα. Στον Πίνακα 6 και στον Πίνακα 7, φαίνονται οι προσφορές των πωλητών και των αγοραστών του παραδείγματος αντίστοιχα. Η πρώτη προσφορά στον πίνακα των παραγωγών αντιστοιχεί σε όλους τους παραγωγούς ΑΠΕ. Η τιμή της ενέργειας από ΑΠΕ ορίστηκε 0 Euro, ενώ το ποσό της ενέργειας ορίστηκε αρχικά 0 Euro/MWh προκειμένου το πρόγραμμα να εισάγει σε κάθε επανάληψη μια νέα τιμή.

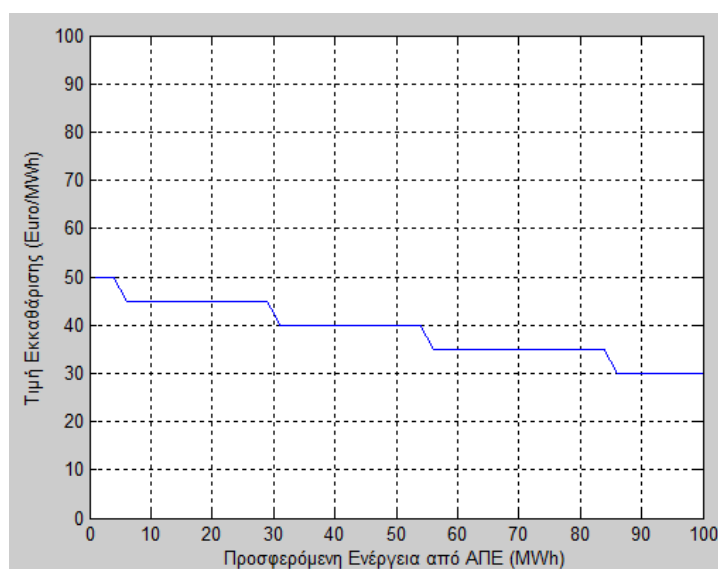
Πίνακας 6: Προσφορές παραγωγών του παραδείγματος.

Παραγωγοί	Energy (MWh)	Price (Euro/MWh)
ΑΠΕ	0	0
Υπόλοιποι Παραγωγοί	20	25
	10	40
	15	45
	15	35
	20	30
	10	50
	15	70
	15	55
	20	65
	20	60

Πίνακας 7: Προσφορές αγοραστών του παραδείγματος.

Energy (MWh)	Price (Euro/MWh)
20	70
20	65
30	55
15	50
10	45
15	35
15	30
10	25
10	20
10	25
15	40

Στην Εικ. 9 φαίνεται η καμπύλη μεταβολής της τιμής εκκαθάρισης σε συνάρτηση με την προσφερόμενη ενέργεια από ΑΠΕ που προκύπτει με χρήση του κώδικα για το συγκεκριμένο παράδειγμα. Όπως ήταν αναμενόμενο, η τιμή εκκαθάρισης μειώνεται με την αύξηση της ενέργειας από ΑΠΕ που εισάγεται στην αγορά, καθώς η καμπύλη προσφοράς μετατοπίζεται προς τα δεξιά. Η καμπύλη που προκύπτει ως αποτέλεσμα του κώδικα που αναπτύχθηκε, μπορεί να αποτελέσει ένα χρήσιμο εργαλείο για τους συμμετέχοντες μιας uniform price δημοπρασίας ηλεκτρικής ενέργειας, καθώς έχοντας εκτιμήσει τις προσφορές των υπόλοιπων παραγωγών εκτός των παραγωγών ΑΠΕ (οι οποίες δεν παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των ημερήσιων δημοπρασιών και είναι σχετικά εύκολο να εκτιμηθούν) μπορούν να εκτιμήσουν το εύρος στο οποίο θα κυμανθεί η τιμή εκκαθάρισης με βάση την αναμενόμενη ενέργεια από ΑΠΕ (η οποία βασίζεται κυρίως στην πρόγνωση του καιρού). Αξίζει να σημειωθεί πως σε πραγματικές συνθήκες όπου οι προσφορές είναι πολύ περισσότερες και οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των τιμών των προσφορών πολύ μεγαλύτερες, τα επίπεδα τιμής της καμπύλης έχουν πολύ μικρότερο μήκος, δηλαδή η τιμή εκκαθάρισης διαφοροποιείται με πολύ μικρότερη συχνότητα. Επομένως, σε πραγματικές συνθήκες η χρησιμότητα της καμπύλης αυτής είναι εμφανέστερη.



Εικ. 9. Καμπύλη μεταβολής της τιμής εκκαθάρισης σε συνάρτηση με την προσφερόμενη ενέργεια από ΑΠΕ.

6. Συμπεράσματα

Τα τελευταία χρόνια, πολλές χώρες έχουν προχωρήσει σε κινήσεις για την απελευθέρωση της αγοράς ηλεκτρικής ενέργειας, με το σύστημα της uniform price δημοπρασίας να είναι ευρέως διαδεδομένο ως σύστημα συναλλαγών στις βραχυπρόθεσμες αγορές, λόγω των σημαντικών πλεονεκτημάτων του όσον αφορά την τόνωση του ανταγωνισμού.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας αναλύεται ο αλγόριθμος λειτουργίας της uniform price δημοπρασίας ηλεκτρικής ενέργειας, ο οποίος στη συνέχεια υλοποιείται σε MATLAB. Με χρήση του κώδικα που αναπτύσσεται, παρουσιάζονται τρία διαφορετικά σενάρια τα οποία δείχνουν τις διάφορες στρατηγικές που μπορούν να ακολουθήσουν οι συμμετέχοντες μιας uniform price δημοπρασίας ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ μελετάται και η μεταβολή της τιμής εκκαθάρισης της αγοράς σε σχέση με το ποσό της ενέργειας από ΑΠΕ που εισάγεται σε κάθε δημοπρασία.

Από τα σενάρια που παρουσιάζονται προκύπτει πως το σύστημα της uniform price δημοπρασίας ευνοεί την υποβολή προσφορών από πλευράς παραγωγών στο οριακό κόστος παραγωγής των μονάδων τους και όχι τόσο άλλου είδους στρατηγικές. Ωστόσο, οποιαδήποτε στρατηγική με σκοπό την αύξηση του κέρδους, ή γενικά οποιοδήποτε φαινόμενο άσκησης εξουσίας, κυρίως από τους μεγαλύτερους παραγωγούς, είναι εκμεταλλεύσιμο και από τους υπόλοιπους παραγωγούς και ιδιαίτερα από τους μικρότερους. Επομένως το σύστημα της uniform price δημοπρασίας ευνοεί τους μικροεπενδυτές και άρα την τόνωση του ανταγωνισμού.

Επίσης, το ποσό της ενέργειας που προσφέρεται σε κάθε δημοπρασία από τους παραγωγούς ΑΠΕ παίζει πολύ σπουδαίο ρόλο στη διαμόρφωση της αγοράς, δεδομένου ότι μπορεί να παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις από μέρα σε μέρα, σε αντίθεση με τις προσφορές των υπόλοιπων παραγωγών οι οποίες συνήθως κυμαίνονται σε ένα σχετικά μικρό εύρος τιμής και ενέργειας. Επομένως, η εκτίμηση του ποσού της ενέργειας από ΑΠΕ που εισάγεται σε κάθε δημοπρασία, πρέπει να αποτελεί πρωταρχικό μέλημα για έναν συμμετέχοντα προκειμένου να αποφασίσει τη στρατηγική που θα ακολουθήσει. Αυτή η αβεβαιότητα που εισάγει η προσφερόμενη ενέργεια από ΑΠΕ αποτυπώνεται στο σχετικό κώδικα που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της εργασίας.

Αξίζει να σημειωθεί πως ο αλγόριθμος που αναπτύχθηκε στην παρούσα εργασία αφορά τη βασική δομή της uniform price δημοπρασίας ηλεκτρικής ενέργειας. Οι όποιοι περιορισμοί μπορούν να υπάρξουν εξαρτώνται από τις ιδιαιτερότητες και τις επιλογές κάθε χώρας και μπορούν να εισαχθούν εύκολα στον αλγόριθμο αυτό.

Αναφορές

- [1] L. Philipson and H. Lee Willis, “Understanding Electric Utilities and Deregulation,” Marcel Dekker Inc., 1999.
- [2] H. Chao and H.G. Huntington, “Designing competitive electricity market,” Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [3] S. Hunt and G. Shuttleworth, “Competition and choice in Electricity,” Wiley, 1996.

- [4] M. Dicorato, A. Minoia, R. Sbrizzai and M. Trovato, "A simulation tool for studying the day-ahead energy market: the case of Italy," in *Proc. Power Engineering Society Winter Meeting*, New York, NY, USA, 2002.
- [5] Τελλίδου Α., "Δημοπρασίες ηλεκτρικής ενέργειας," Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη, 2003.
- [6] Bower J., Bunn D., "Experimental analysis of the efficiency of uniform-price versus discriminatory auctions in the England and Wales electricity market," *Journal of Economic Dynamics & Control*, vol. 25, pp. 561-592, 2001.
- [7] Wolfram C., "Electricity markets: Should the rest of the world adopt the United Kingdom's reforms?," *Regulation*, vol. 22, 1999.
- [8] Γιαννακουλάκου Σ., "Ανάλυση αγορών ηλεκτρικής ενέργειας στην Ισπανία," Διπλωματική Εργασία, Θεσσαλονίκη, 2013.
- [9] Kahn A., Cramton P., Porter R., Tabors R., "Uniform pricing or pay-as-bid pricing: A dilemma for California and beyond," *The electricity Journal*, vol. 14(6), pp. 70-79, July 2001.
- [10] Bernal-Agustin J., Contreras J., Martin-Flores R. and Conejo A., "Realistic electricity market simulator for energy and economic studies," *Electric Power Systems Research*, vol. 77, pp. 46-54, 2007.
- [11] Matlab Central, "Fast and Robust Curve Intersections," Available: <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11837-fast-and-robust-curve-intersections> (accessed May 2014).