

**ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ**  
**ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ**



**ΟΙΚΟΝΟΜΟΤΕΧΝΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ**  
**ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ ΑΠΟ ΟΛΟΚΛΗΡΩΜΕΝΗ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ ΣΕ ΚΥΨΕΛΗ ΥΛΕΚΤΡΟΛΥΣΗΣ**  
**ΣΤΕΡΕΩΝ ΟΞΕΙΔΙΩΝ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**Δασόπουλος Κωνσταντίνος**  
**ΑΕΜ: 15917**

(ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ)

**ΞΑΝΘΗ 2017**

## Ευχαριστίες

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου για την δυνατότητα που μου πρόσφεραν να σπουδάσω σε άλλη πόλη και για την διαρκή στήριξή τους όλα αυτά τα χρόνια. Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επίκουρο καθηγητή Κωνσταντίνο Αθανασίου για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε προς το πρόσωπό μου αναθέτοντάς μου το πολύ ενδιαφέρον θέμα διπλωματικής, καθώς και για την συνεχή υποστήριξη, συνεργασία και επικοινωνία που πρόσφερε κατά την διάρκεια της συνεργασίας μας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους – συνεργάτες μου, για όλη αυτήν την άψογη σχέση που είχαμε όλα αυτά τα χρόνια και για την εμπιστοσύνη, συνεργασία, υποστήριξη, συμπαράσταση και φιλοξενία που μου πρόσφεραν.

Σας ευχαριστώ από τα βάθη της καρδιάς μου ...

## Περίληψη

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η παραγωγή υδρογόνου σε ολοκληρωμένη μονάδα βιοαερίου, που χρησιμοποιεί ανανεώσιμες πρώτες ύλες (ενεργειακός αραβόσιτος και ζωικά απόβλητα), για την ανανεώσιμη παραγωγή καθαρού υδρογόνου από υποβοηθούμενη (με βιοαέριο) ηλεκτρόλυση. Σκοπός της εργασίας ήταν η τεchnο-οικονομική ανάλυση και η εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας μίας τέτοιας μονάδας.

Για αυτό το σκοπό, σχεδιάστηκε το διάγραμμα ροής και υπολογίσθηκαν οι λειτουργικές παράμετροι μίας μονάδας παραγωγής υδρογόνου με υποβοηθούμενη ηλεκτρόλυση, η οποία θα μπορούσε να υποκαταστήσει το σύστημα συμπαραγωγής με κινητήρες diesel, των συμβατικών μονάδων συμπαραγωγής από βιοαέριο, για 9 διαφορετικές δυναμικότητες παραγωγής βιοαερίου. Στη συνέχεια, εξετάστηκε η οικονομική βιωσιμότητα του εγχειρήματος, μέσω της εκτίμησης των τιμών διάθεσης του παραγόμενου υδρογόνου, για τις οποίες η προτεινόμενη επί-τόπου παραγωγή του θα επεδείκνυε τις ίδιες δυνατότητες οικονομικής βιωσιμότητας, με τη συμβατική λύση της συμπαραγωγής από βιοαέριο, για τις ίδιες δυναμικότητες παραγωγής βιοαερίου. Σε αυτό το πλαίσιο, χρησιμοποιήθηκαν 3 οικονομικά κριτήρια (Καθαρή Παρούσα Αξία, Εσωτερικός Βαθμός Απόδοσης και Περίοδος Αποπληρωμής). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι, η προτεινόμενη λύση μπορεί να επιτύχει τις ίδιες εξαιρετικές τιμές των συμβατικών μονάδων συμπαραγωγής, στα παραπάνω οικονομικά κριτήρια, για τιμές διάθεσης υδρογόνου στην περιοχή που διαθέτουν το προϊόν τους οι μικρές μονάδες κατανεμημένης παραγωγής υδρογόνου από φυσικό αέριο και στην τιμή στην οποία θα ήταν λογικό να τιμολογείται το υδρογόνο ως καύσιμο μεταφορών.

**Λέξεις Κλειδιά:** βιοαέριο, υδρογόνο, τεchnο-οικονομική μελέτη, ανάλυση οικονομικής βιωσιμότητας

## Abstract

In the present thesis the hydrogen production in an integrated biogas plant, using renewable raw materials (energy maize and animal waste), for hydrogen production through biogas assisted electrolysis. The aim was the techno-economic analysis and the estimation of the economic feasibility of such a unit.

For this purpose, the flow diagram of a biogas-to-hydrogen unit was designed and the corresponding operational parameters were calculated, for 9 different biogas production capacities. Such a unit could replace the cogeneration system of the conventional biogas cogeneration plants. Flowingly, the economic viability of such a solution was examined, through the estimation of the hydrogen selling prices, for which the proposed in-situ hydrogen production could obtain the same prospects for economic viability with the conventional solution of biogas cogeneration, for the same biogas capacities. In this context, three economic criteria were used, i.e. the Net present Value (NPV), the Internal Rate of Return (IRR) and the Pay Out Time (POT). The results showed that the proposed solution can obtain the same excellent values, for these three criteria, with the conventional cogeneration plants, for hydrogen selling prices of the same order with the selling prices of small distributed hydrogen generation from natural gas and the prices at which hydrogen fuel could be commercialized.

**Keywords:** biogas, hydrogen, techno-economic study, economic feasibility analysis

## Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή .....	6
Γενικά για το υδρογόνο .....	6
Βιοαέριο .....	8
Κυψέλες Καυσίμου .....	10
Κυψέλες καυσίμου ηλεκτρόλυσης .....	12
Λειτουργία της SOEC για την παραγωγή υδρογόνου .....	14
Λειτουργία της SOFEC για την παραγωγή υδρογόνου .....	14
2. Περιγραφή προσομοίωση της διεργασίας .....	16
Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί .....	16
Μονάδα παραγωγής βιοαερίου .....	19
Διαχωρισμός βιοαερίου .....	20
Φυσητήρες .....	20
Προθερμαντής της ανόδου .....	21
Κυψέλη καυσίμου .....	21
Καυστήρας .....	23
Προθερμαντής της καθόδου .....	23
Εξατμιστής .....	24
Αντλία νερού .....	24
Προθερμαντής νερού .....	24
Εναλλάκτης συμπαραγωγής .....	25
Προθερμαντής αέρα .....	25
Ολοκληρωμένη διεργασία .....	25
3. Οικονομικά Δεδομένα .....	27
4. Αποτελέσματα και Συζήτηση .....	36
5. Συμπεράσματα .....	45
6. Βιβλιογραφία .....	49
Παράρτημα I .....	51
Παράρτημα II .....	69
Παράρτημα III .....	71

## Κατάλογος σχημάτων

- Σχήμα 1. Αρχή λειτουργίας SOFC (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ανοδική καύση  $H_2$ ) .....12
- Σχήμα 2. Αρχή λειτουργίας SOEC παραγωγή  $H_2$  από την καθοδική ηλεκτρόλυση του  $H_2O$  14
- Σχήμα 3. Αρχή λειτουργίας SOFEC .....15
- Σχήμα 4. Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για δυναμικότητα παραγωγής βιοαερίου από 100 έως 5.000  $m^3/h$  .....18
- Σχήμα 5. Μεταβολή της παραγωγής βιοαερίου και υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και αναμόρφωσης, με την αύξηση της δυναμικότητας της μονάδας, εκφρασμένης ως προς την ηλεκτρική δυναμικότητα της συμβατικής μονάδας συμπαραγωγής ..... 36
- Σχήμα 6. Μεταβολή (α) του κόστους αρχικής επένδυσης, της μονάδας παραγωγής υδρογόνου από αναμόρφωση και της μονάδας παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρόλυση και (β) της ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο επενδύσεων, με την αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου από 100  $m^3/h$  (240  $kW_e$ , για μονάδα συμπαραγωγής) έως 5.000  $m^3/h$  (12  $MW_e$ , για μονάδα συμπαραγωγής) ..... 37
- Σχήμα 7. Μεταβολή α) του αρχικού κόστους της ολοκληρωμένης μονάδας παραγωγής υδρογόνου μέσω αναμόρφωσης και του αντίστοιχου συστήματος μέσω ηλεκτρόλυσης και β) της ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο επενδύσεων με την αύξηση της δυναμικότητα παραγωγής βιοαερίου από 100  $m^3/h$  έως 5.000  $m^3/h$  ..... 38
- Σχήμα 8. Διάρθρωση του κόστους της μονάδας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για δυναμικότητα παραγωγής βιοαερίου 100  $m^3/h$  (240  $kW_e$ , για μονάδα συμπαραγωγής) ..... 39
- Σχήμα 9. Μεταβολή α) του ετήσιου λειτουργικού κόστους, της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με αναμόρφωση και με ηλεκτρόλυση και (β) της ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο επενδύσεων, με την αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου από 100  $m^3/h$  (240  $kW_e$ , για μονάδα συμπαραγωγής) έως 5.000  $m^3/h$  (12  $MW_e$ , για μονάδα συμπαραγωγής) ..... 40
- Σχήμα 10. Ανάλυση της αρχικής επένδυσης α) της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με αναμόρφωση για δυναμικότητα βιοαερίου 100  $m^3/h$  β) της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με αναμόρφωση για δυναμικότητα βιοαερίου 5000  $m^3/h$  γ) της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση για δυναμικότητα βιοαερίου 100  $m^3/h$  και δ) της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση για δυναμικότητα βιοαερίου 5000  $m^3/h$  ..... 41
- Σχήμα 11. Μεταβολή του κόστους της βενζίνης προ φόρων (στην έξοδο του διυλιστηρίου), από το 2005 έως σήμερα και το αντίστοιχο δυνητικό κόστος του υδρογόνου ως καύσιμο, με βάση το θερμικό περιεχόμενο των δύο καυσίμων ..... 43
- Σχήμα 12. Μεταβολή της τιμής διάθεσης του παραγόμενου υδρογόνου, έτσι ώστε η μονάδα παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση να παρουσιάζει τα ίδια οικονομικά αποτελέσματα με τη μονάδα παραγωγής με αναμόρφωση, όπως τα αποτελέσματα αυτά εκφράζονται από την Καθαρή παρούσα Αξία Εγχειρήματος (NPV) και τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR) ..... 44

## Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Θερμοδυναμικά δεδομένα [Cengel 2013] .....	16
Πίνακας 2. Δυναμικότητα βιοαερίου και τροφοδοσία πρώτων υλών .....	19
Πίνακας 3. Δυναμικότητα βιοαερίου και ηλεκτρική/θερμική παραγωγή της συμβατικής μονάδας .....	19
Πίνακας 4. Σύσταση βιοαερίου (Ρεύμα , Σχήμα) .....	19
Πίνακας 5. Κατώτερη Θερμογόνος Δύναμη Βιοαερίου για δυναμικότητες από 100 έως 5000 m <sup>3</sup> /h .....	20
Πίνακας 6. Ηλεκτρικές καταναλώσεις των Φυσητήρων στις δυναμικότητες που εξετάστηκαν .....	21
Πίνακας 7. Επιφάνεια Κυψέλης Καυσίμων για δυναμικότητες από 100 - 5000 m <sup>3</sup> /h .....	23
Πίνακας 8. Σύσταση Ατμοσφαιρικού Αέρα .....	23
Πίνακας 9. Θερμική Ισχύς του Καυστήρα για τις δυναμικότητες που εξετάστηκαν .....	23
Πίνακας 10. Ηλεκτρικές καταναλώσεις αντλίας για δυναμικότητα από 100 – 5000 m <sup>3</sup> /h ...	24
Πίνακας 11. Παραγωγή υδρογόνου για δυναμικότητα βιοαερίου από 100 – 5000 m <sup>3</sup> /h ....	25
Πίνακας 12. Θερμότητα συμπαραγωγής και θερμικές απαιτήσεις χωνευτή .....	25
Πίνακας 13. Λειτουργικά χαρακτηριστικά ολοκληρωμένης μονάδας παραγωγής υδρογόνου .....	26
Πίνακας 14. Επιμέρους επενδυτικά κόστη της μονάδας συμπαραγωγής ηλεκτρικής/θερμικής .....	27
Πίνακας 15. Μεταβολή του κόστους των φυσητήρων για τις διάφορες δυναμικότητες ....	28
Πίνακας 16. Κόστος αντλίας νερού με αύξηση της δυναμικότητας βιοαερίου .....	29
Πίνακας 17. Σχεδιαστικά χαρακτηριστικά και κόστη των εναλλακτών .....	30
Πίνακας 18. Κόστος καυστήρα για τις διάφορες δυναμικότητες .....	31
Πίνακας 19. Κόστη αναφοράς των επιμέρους διατάξεων .....	31
Πίνακας 20. Κοστολόγηση Κυψέλης Καυσίμων για τις διάφορες δυναμικότητες .....	31
Πίνακας 21. Μεταβολή του κόστους των επιμέρους διατάξεων της μονάδας παραγωγής υδρογόνου .....	31
Πίνακας 22. Αρχική επένδυση με την μεταβολή της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου .....	32
Πίνακας 23. Ετήσια έσοδα μονάδας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο .....	34
Πίνακας 24. Ετήσια έσοδα συμβατικής μονάδας συμπαραγωγής από βιοαέριο .....	35
Πίνακας 25. Σύγκριση του επιμέρους επενδυτικού κόστους (κ€) των δύο μονάδων παραγωγής υδρογόνου .....	41

## 1. Εισαγωγή

Οι αλληπάλληλες ενεργειακές χρήσεις και η υπερθέρμανση του πλανήτη έχουν επιτείνει τις έρευνες με επίκεντρο την ανάπτυξη πιο αποδοτικών διατάξεων και την χρήση ανανεώσιμων πηγών για την παραγωγή του ηλεκτρισμού. Τα ορυκτά καύσιμα όπως ο άνθρακας, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο είναι μη ανανεώσιμες πηγές και η αυξανόμενη κατανάλωσή τους οδηγεί στην εκτεταμένη εκπομπή του CO<sub>2</sub> που αποτελεί αέριο του θερμοκηπίου.

Συνεπώς, οι εκπομπές του άνθρακα πρέπει να μειωθούν και παράλληλα να αναπτυχθούν πηγές ενέργειας από ανανεώσιμη πρώτη ύλη. Α.Π.Ε. όπως ο άνεμος και ο ήλιος χρησιμοποιούνται εκτεταμένα στην παραγωγή ηλεκτρισμού αλλά απαιτούν μονάδες με μεγάλη χωρητικότητα για αποθήκευση της ηλεκτρικής ενέργειας. Έτσι γίνεται απαραίτητη η ανάπτυξη αποδοτικών τεχνολογιών για την αποθήκευση του ηλεκτρισμού.

Η ηλεκτρόλυση με ατμό και διοξείδιο του άνθρακα σε μια κυψέλη ηλεκτρόλυσης στερεών οξειδίων είναι μια υποσχόμενη μέθοδος αποθήκευσης ενέργειας. Το αέριο προϊόν της ηλεκτρόλυσης μπορεί να μετατραπεί σε υγρό συνθετικό καύσιμο που μπορεί εύκολα να αποθηκευτεί και να μεταφερθεί ως υδρογόνο (H<sub>2</sub>).

### Γενικά για το Υδρογόνο

Πολλοί επιστήμονες συμφωνούν ότι η λύση σε αυτά τα παγκόσμια προβλήματα είναι δυνατόν να προέλθει αν υποκατασταθεί, έστω και μερικώς, το υφιστάμενο σύστημα παραγωγής ενέργειας, το οποίο βασίζεται στα ορυκτά καύσιμα, από το υδρογόνο [Veziroglu and Sahin, 2008].

Το υδρογόνο μπορεί να μην αποτελεί πηγή ενέργειας, αλλά αδιαμφισβήτητα αποτελεί ένα σημαντικό ενεργειακό φορέα. Σήμερα η ετήσια παραγωγή υδρογόνου προσεγγίζει τους 0,1 Gt που προέρχεται από τη διεργασία αναμόρφωσης των ορυκτών καυσίμων και από την ηλεκτρόλυση του νερού.

Το κατά βάρος ποσό ενέργειας που παράγεται κατά την καύση του υδρογόνου, είναι το μεγαλύτερο σε σύγκριση με κάθε άλλο καύσιμο. Η κατώτερη θερμογόνο δύναμη του υδρογόνου ( $\Delta H = -29,15 \text{ kcal/gr}$ ) είναι 2,4, 2,8 και 4 φορές μεγαλύτερη από αυτήν του μεθανίου, της βενζίνης και του γαιάνθρακα, αντίστοιχα.

Το υδρογόνο είναι το πλέον άφθονο στοιχείο στον πλανήτη και θεωρείται ως μια βιώσιμη και καθαρή πηγή ενέργειας, καθώς κατά την διαδικασία της καύσης του εκπέμπει μόνο υδρατμούς με μηδενικές εκπομπές CO<sub>2</sub>. Το αέριο υδρογόνο είναι ελαφρύτερο από τον αέρα και κατά συνέπεια, διαχέεται πολύ γρήγορα στην ατμόσφαιρα. Αυτός είναι και ο λόγος, που το υδρογόνο ως αέριο, δεν βρίσκεται ελεύθερο στη φύση. Διαθέτει πολύ ευρύτερα όρια ανάφλεξης στον αέρα (4%-75% κ.ο) σε σχέση με το μεθάνιο (5.3%-15% κ.ο) και τη βενζίνη (1%-7,6% κ.ο) [Balat 2008].

Το υδρογόνο αποτελεί ένα κυρίαρχο εναλλακτικό καύσιμο σε σχέση με τα ορυκτά. Το υδρογόνο μπορεί να παραχθεί από μια τεράστια ποικιλία πηγών μειώνοντας το οικονομικό, το πολιτικό και το περιβαλλοντικό κόστος των ενεργειακών συστημάτων.

Μακροχρόνια το υδρογόνο από ανανεώσιμες πηγές θα αποτελεί το δυναμικό της βιώσιμης ενέργειας. Το υδρογόνο είναι ένας ενεργειακός φορέας όπως το ρεύμα και μπορεί να παραχθεί από ένα ευρύ πεδίο ενεργειακών πηγών όπως το φυσικό αέριο, ο άνθρακας, η βιομάζα, ο ήλιος, ο άνεμος, η υδροηλεκτρική ενέργεια καθώς και στερεά απόβλητα, λάστιχα και απορριπτόμενα έλαια.

Το υδρογόνο έχει το μεγαλύτερο ενεργειακό περιεχόμενο ανά μονάδα βάρους σε σχέση με οποιοδήποτε καύσιμο (121.000 kJ/kg) και μπορεί πολύ γρήγορα να διασκορπιστεί αν σε περίπτωση ατυχήματος χυθεί ή απελευθερωθεί. Είναι εφικτή επίσης και η καύση του σε συνθήκες υψηλής συμπίεσης και απόδοσης σε μηχανές εσωτερικής καύσης. Όταν συνδυάζεται με οξυγόνο σε ηλεκτροχημικά καύσιμα, το υδρογόνο μπορεί να παράγει ηλεκτρική ενέργεια απευθείας ξεπερνώντας τα όρια της απόδοσης μιας μηχανής Carnot που χρησιμοποιείται σήμερα στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής-θερμικής ενέργειας καθώς και των συμβατών μηχανών παραγωγής ενέργειας [Joel Martinez-Frias 2001].

Η ανάγκη για καύσιμο υδρογόνου αυξάνεται ειδικά σε αναπτυσσόμενες χώρες όπως η Ινδία και η Κίνα οι οποίες αντιμετωπίζουν το πρόβλημα της περιορισμένης τροφοδοσίας. Επιπλέον περιβαλλοντικά ζητήματα όπως η αύξηση της θερμοκρασίας, και η ατμοσφαιρική ρύπανση έχουν κάνει την χρήση τέτοιων καυσίμων πιο ελκυστική. Άλλοι λόγοι χρήσης του υδρογόνου σαν καύσιμο είναι πως το υδρογόνο αποτελεί μια άφθονη πηγή ενέργειας που μπορεί να παραχθεί από ανανεώσιμες πηγές και πως το υδρογόνο είναι φιλικό προς το περιβάλλον καθώς προέρχεται είτε από την οξείδωση είτε από την καύση του νερού.

Συνήθως το υδρογόνο παράγεται από την αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό, όμως αυτή η μέθοδος έχει ένα βασικό μειονέκτημα στο ότι δεν περιλαμβάνει ανανεώσιμες πηγές ενέργειας που είναι απαλλαγμένες από εκπομπές άνθρακα.

Μια άλλη εναλλακτική μέθοδος παραγωγής υδρογόνου είναι η ηλεκτρόλυση του νερού, που παράγει καθαρό υδρογόνο χωρίς να περιέχει μονοξείδιο του άνθρακα όπως η αναμόρφωση με ατμό. Η παραγωγή υδρογόνου από την υψηλής θερμοκρασίας ηλεκτρόλυση του νερού (ατμού) σε κυψέλη ηλεκτρόλυσης στερεών οξειδίων έχει καθιερωθεί σαν μια μέθοδος με υψηλή απόδοση. Το βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι η υψηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας καθώς και το κόστος της παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρόλυση είναι 2-3 φορές υψηλότερο από αυτό με αναμόρφωση του μεθανίου [Yiyang Wu, Yixian Shi, Yu Luo, Ningsheng Cai 2014].

Το υδρογόνο χρησιμοποιείται επίσης ως πρώτη ύλη στην χημική βιομηχανία (μεταποίηση τροφίμων, υδρογόνωση καυσίμων, παραγωγή αμμωνίας και μεθανόλης και στην φαρμακευτική βιομηχανία κ.α), η χρήση του όμως ως καύσιμο περιορίζεται σε πιλοτικά προγράμματα έρευνας και ανάπτυξης.

Σύμφωνα με την πρόσφατη βιβλιογραφία [Barbir 2009, Balat 2008 Holladay et al] οι εφαρμογές του υδρογόνου καλύπτουν κάθε τομέα της δραστηριότητας του ανθρώπου είτε πρόκειται για την βιομηχανία είτε για τις μεταφορές. Το υδρογόνο χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη κυρίως σε διυλιστήρια πετρελαίου για την παρασκευή λιπασμάτων, πλαστικών.

Επίσης το υδρογόνο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως καύσιμο σε σχεδόν οποιαδήποτε



εφαρμογή, όπου τα ορυκτά καύσιμα χρησιμοποιούνται σήμερα, ιδιαίτερα στην ηλεκτροκίνηση των οχημάτων με κυψέλες καυσίμου, συμβάλλοντας έτσι στη διατήρηση ενός καθαρού και βιώσιμου περιβάλλοντος.

Η παραγωγή υδρογόνου από ανανεώσιμες πηγές όπως το βιοαέριο συμβάλει στην καταπολέμηση του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς αποτρέπει την έκλυση μεθανίου στην ατμόσφαιρα (το μεθάνιο είναι 21 φορές πιο δραστικό από ότι το διοξείδιο του άνθρακα ως αέριο του θερμοκηπίου). Επίσης η παραγωγή του βιοαερίου οδηγεί στη μείωση των αποβλήτων, που προορίζονται για χώρους ταφής και ταυτόχρονα στη δημιουργία ενός οργανικού- εδαφοβελτιωτικού και λιπάσματος ως υποπροϊόν. Σε αυτό το πλαίσιο η παραγωγή υδρογόνου από βιοαέριο με τη χρήση κυψέλης καυσίμου αντιπροσωπεύει έναν νέο τρόπο παραγωγής καθαρής ενέργειας με υψηλή ενεργειακή απόδοση.

## **Βιοαέριο**

Το βιοαέριο είναι ένα προϊόν που αποτελείται από μεθάνιο και διοξείδιο του άνθρακα μαζί με μικρές ποσότητες άλλων αερίων όπως υδρόθειο, αμμωνία, υδρογόνο, άζωτο, οξυγόνο και υγρασία. Ο πίνακας 1 δείχνει την τυπική σύσταση του βιοαερίου [Alves et al]. Αυτό το μείγμα αερίων είναι αποτέλεσμα της μεταβολικής δράσης των αναερόβιων βακτηρίων, γνωστή ως αναερόβια χώνευση, μέσω της οποίας οι μικροοργανισμοί αποσυνθέτουν την οργανική ύλη, που προέρχεται από διάφορες πηγές (ζωικά απόβλητα, λυματολάσπη, χωματερές) σε ειδικά διαμορφωμένους αναερόβιους χωνευτές [Shinga et al 1998, Okubo et al 2010].

Η αναερόβια χώνευση είναι μια μικροβιολογική διεργασία αποσύνθεσης της οργανικής ουσίας, απουσία οξυγόνου, η οποία είναι συνήθης σε πολλά φυσικά περιβάλλοντα και εφαρμόζεται σήμερα για να παραχθεί το βιοαέριο σε αεροστεγείς δεξαμενές που λειτουργούν ως αντιδραστήρες, οι οποίες συνήθως ονομάζονται χωνευτές.

Ένα ευρύ φάσμα μικροοργανισμών εμπλέκεται στην αναερόβια διεργασία που έχει δύο κύρια τελικά προϊόντα, το βιοαέριο και το χωνεμένο υπόλειμμα. Το βιοαέριο είναι ένα αέριο καύσιμο που αποτελείται από μεθάνιο, διοξείδιο του άνθρακα και από μικρές ποσότητες άλλων αερίων και ιχνοστοιχείων. Το χωνεμένο υπόλειμμα είναι το αποδομημένο υπόστρωμα, πλούσιο σε θρεπτικές ουσίες και έτσι χρησιμοποιείται ως εδαφοβελτιωτικό για τα φυτά.

Σε ολόκληρη την Ευρώπη η αναερόβια χώνευση των αποβλήτων και των υπολειμμάτων αποτελεί τον καθιερωμένο τρόπο μείωσης των αποβλήτων με ταυτόχρονη παραγωγή, ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας με καύση του παραγομένου βιοαερίου σε μονάδες συμπαραγωγής (ΣΗΘ, Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού & Θερμότητας) και υψηλής ποιότητας λιπάσματος.

Η ηλεκτρική ενέργεια και η θερμότητα από τη συμπαραγωγή, όχι μόνον υπερκαλύπτουν τις ενεργειακές ανάγκες των ιδίων των μονάδων, αλλά η πώληση τους αποφέρει σημαντικά έσοδα στις μονάδες. Σημαντικά έσοδα μπορούν να εξασφαλιστούν και από την πώληση του λιπάσματος.

Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την χημική σύσταση αλλά και το ενεργειακό περιεχόμενο του βιοαερίου έχουν σχέση με την προέλευση και την ποιότητα της βιομάζας που χρησιμοποιείται, τον τύπο του αναερόβιου χωνευτή και τη σωστή διαχείριση της λειτουργίας όλης της διεργασίας της αναερόβιας χώνευσης.

Η παραγωγή βιοαερίου και η μετέπειτα μετατροπή της σε ενέργεια παρέχει πολλά περιβαλλοντικά και κοινωνικοοικονομικά οφέλη για την κοινωνία ως σύνολο και για τους εμπλεκόμενους κτηνοτρόφους/γεωργούς.

Η παραγωγή του βιοαερίου ενισχύει της τοπικές οικονομίες, εξασφαλίζει θέσεις εργασίας στις αγροτικές περιοχές και αυξάνει την αγοραστική δύναμη. Επίσης, βελτιώνει το βιοτικό επίπεδο και συμβάλλει στην οικονομική και κοινωνική ανάπτυξη.

Η παγκόσμια ενεργειακή τροφοδοσία εξαρτάται σήμερα ιδιαίτερα από τις ορυκτές πηγές ενέργειας (αργό πετρέλαιο, λιγνίτης, λιθάνθρακας, φυσικό αέριο). Οι πηγές αυτές είναι τα απολιθωμένα κατάλοιπα νεκρών φυτών και ζώων, που έχουν εκτεθεί σε θερμότητα και πίεση στο φλοιό της γης κατά τη διάρκεια εκατομμυρίων ετών. Για το λόγο αυτό, τα ορυκτά καύσιμα είναι μη ανανεώσιμοι πόροι και τα αποθέματα τους μειώνονται πολύ γρηγορότερα απ' ό,τι διαμορφώνονται νέα.

Οι οικονομίες σε όλο τον κόσμο σήμερα εξαρτώνται από το αργό πετρέλαιο. Υπάρχει σχετική διαφωνία μεταξύ των επιστημόνων για το πόσο θα διαρκέσει αυτό το ορυκτό καύσιμο. Σύμφωνα με κάποιους ερευνητές, έχει ήδη επέλθει η πετρελαϊκή αιχμή – δηλαδή το χρονικό σημείο κατά το οποίο έχει επιτευχθεί ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής αργού πετρελαίου παγκοσμίως, μετά από το οποίο ο ρυθμός παραγωγής αρχίζει να φθίνει – ή αναμένεται να επέλθει πολύ σύντομα.

Σε αντίθεση με τα ορυκτά καύσιμα, το βιοαέριο από την αναερόβια χώνευση αποτελεί ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, καθώς έχει παραχθεί από βιομάζα, η οποία είναι μία έμβια αποθήκη της ηλιακής ενέργειας μέσω της φωτοσύνθεσης. Το βιοαέριο δεν βελτιώνει μόνο το ενεργειακό ισοζύγιο μιας χώρας αλλά συμβάλλει σημαντικά στη διατήρηση των φυσικών πόρων και στην προστασία του περιβάλλοντος.

Η χρήση των ορυκτών καυσίμων, όπως είναι ο λιγνίτης, ο λιθάνθρακας, το αργό πετρέλαιο και το φυσικό αέριο, μετατρέπει τον άνθρακα που είναι αποθηκευμένος για εκατομμύρια έτη στο φλοιό της Γης και τον απελευθερώνει ως διοξείδιο του άνθρακα  $CO_2$  στην ατμόσφαιρα. Η αύξηση της υφιστάμενης συγκέντρωσης του  $CO_2$  στην ατμόσφαιρα προκαλεί την παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας δεδομένου ότι το διοξείδιο του άνθρακα είναι ένα αέριο του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Η καύση του βιοαερίου επίσης απελευθερώνει  $CO_2$ , αλλά η κύρια διαφορά, όταν συγκρίνεται με τα ορυκτά καύσιμα, είναι ότι ο άνθρακας στο βιοαέριο ελήφθη πρόσφατα από την ατμόσφαιρα, από τη φωτοσυνθετική δραστηριότητα των φυτών.

Έτσι, ο κύκλος άνθρακα του βιοαερίου είναι κλειστός σε ένα βραχύ χρονικό διάστημα (από ένα έως λίγα έτη). Η παραγωγή βιοαερίου μειώνει επίσης τις εκπομπές του μεθανίου ( $CH_4$ ) λόγω της αποθήκευσης και χρήσης της ζωικής στερεής κοπριάς ως εδαφοβελτιωτικό. Το μεθάνιο είναι 23 φορές πιο ρυπογόνο απ' ό,τι το διοξείδιο του άνθρακα. Η χρήση του βιοαερίου υποκαθιστά τα ορυκτά καύσιμα από την παραγωγή ενέργειας και τις μεταφορές και μειώνει έτσι τις εκπομπές του  $CO_2$  και του  $CH_4$  συμβάλλοντας στο να

μετριαστεί η παγκόσμια αύξηση της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου.

Τα ορυκτά καύσιμα είναι περιορισμένα και συγκεντρώνονται σε πολύ λίγες γεωγραφικές περιοχές του πλανήτη. Το γεγονός αυτό, δημιουργεί για τις χώρες που βρίσκονται εκτός αυτών των περιοχών ένα μόνιμο και μη ασφαλές αίσθημα εξάρτησης από τις εισαγωγές ενεργειακών πόρων. Οι περισσότερες ευρωπαϊκές χώρες έχουν σημαντική εξάρτηση από τις εισαγωγές ορυκτών καυσίμων από περιοχές πλούσιες σε αυτά, όπως είναι η Ρωσία ή η Μέση Ανατολή.

Η ανάπτυξη και υλοποίηση συστημάτων ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως είναι το βιοαέριο, στηριζόμενα σε εθνικούς και περιφερειακούς πόρους, αυξάνει την αειφορία και την ασφάλεια του εθνικού ενεργειακού εφοδιασμού και μειώνει την εξάρτηση από τις εισαγωγές ενέργειας.

Η αντιμετώπιση της παγκόσμιας αύξησης της θερμοκρασίας λόγω του φαινομένου του θερμοκηπίου είναι μια από τις κύριες προτεραιότητες της ενεργειακής και της περιβαλλοντικής πολιτικής της ΕΕ. Οι ευρωπαϊκοί στόχοι για την παραγωγή ενέργειας από ανανεώσιμους πόρους, τη μείωση των εκπομπών αερίου του φαινομένου του θερμοκηπίου και την αειφόρο διαχείριση των αποβλήτων στηρίζονται στη δέσμευση των χωρών μελών της ΕΕ να εφαρμόσουν τα κατάλληλα μέτρα για να τους επιτύχουν. Η παραγωγή και η χρήση του βιοαερίου ικανοποιούν και τους τρεις αυτούς στόχους συγχρόνως.

Στις χρήσεις του βιοαερίου περιλαμβάνονται:

- Η ηλεκτροπαραγωγή σε κινητήρες εσωτερικής καύσης, σε σύζευξη με ηλεκτροκινητήρες.
- Η συμπαραγωγή ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας.
- Η αποκλειστική παραγωγή θερμικής ενέργειας.
- Η αναβάθμισή του σε βιομεθάνιο, με την απομάκρυνση του πλεονάζοντος διοξειδίου του άνθρακα και των άλλων προσμίξεων καθώς και την απευθείας έκχυση του τελευταίου στο δίκτυο φυσικού αερίου ή την χρήση του ως καύσιμο κίνησης.

Ωστόσο παρά τις πολλές εφαρμογές του βιοαερίου, είναι αναγκαίο να σχεδιαστούν νέες τεχνολογίες έτσι ώστε να εδραιωθεί η σημασία του στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Μια πολλά υποσχόμενη δυνατότητα είναι η χρήση κυψελών καυσίμου με υδρογόνο, το οποίο θα λαμβάνεται από το βιοαέριο.

## **Κυψέλες Καυσίμου**

Οι κυψέλες καυσίμου είναι διατάξεις που χρησιμοποιούν ως καύσιμο κυρίως υδρογόνο. Ουσιαστικά είναι διατάξεις που μετατρέπουν την ηλεκτροχημική ενέργεια ενός καυσίμου και ενός οξειδωτικού σε ηλεκτρική ενέργεια, νερό και θερμότητα. Σε σύγκριση με τις παραδοσιακές τεχνολογίες παραγωγής ενέργειας, στις οποίες εμπλέκονται ενδιάμεσες

διεργασίες παραγωγής θερμότητας σε συνδυασμένες θερμικές μηχανές για την μετατροπή της θερμότητας σε έργο, οι κυψέλες καυσίμου είναι πιο αποδοτικές καθώς μετατρέπουν απευθείας την χημική ενέργεια του υδρογόνου σε ηλεκτρική με απόδοση μέχρι 60%.

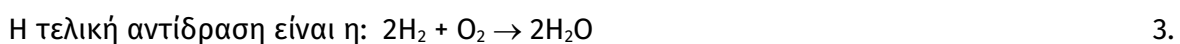
Την τελευταία δεκαετία οι κυψέλες καυσίμου έχουν σημειώσει μεγάλη πρόοδο τόσο στον τομέα των μεταφορών όσο και στην παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας σε κινητές και σταθερές εγκαταστάσεις. Συστήματα κυψελών καυσίμου περιλαμβάνονται σε διάφορες εφαρμογές όπως: μεγάλοι σταθμοί παραγωγής ενέργειας, γεννήτριες καταναεμημένης παραγωγής ενέργειας, που τροφοδοτούν κτίρια, σπίτια και άλλες κινητές μονάδες καθώς και βοηθητικές ηλεκτρικές μονάδες οχημάτων.

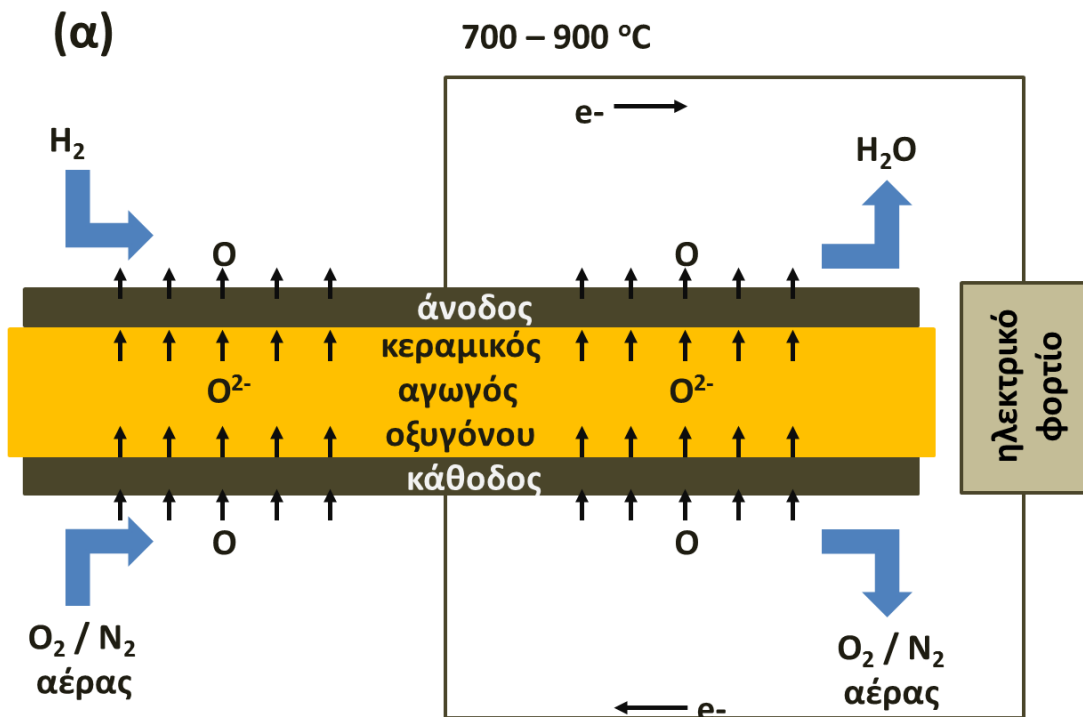
Η φυσική τους κατασκευή αποτελείται από έναν στερεό ηλεκτρολύτη σε επαφή με 2 πορώδη ηλεκτρόδια στην κάθε πλευρά. Η ευαισθησία τους και η αντοχή τους σε συνδυασμό με το υψηλό αρχικό τους κόστος είναι τα κύρια μειονεκτήματα τους στην διεθνή εμπορευματοποίηση.

Μια κυψέλη καυσίμου λειτουργεί σύμφωνα με το παρακάτω μοντέλο. Το υδρογόνο τροφοδοτεί την άνοδο της κυψέλης (το αρνητικό ηλεκτρόδιο) το οποίο ερχόμενο σε επαφή με τον καταλύτη διαχωρίζεται σε κατιόντα υδρογόνου και ηλεκτρόνια. Η άνοδος και ο καταλύτης είναι κατασκευής τέτοιας, ώστε η διάχυση των κατιόντων υδρογόνου να γίνεται με ομογενή τρόπο. Τα αρνητικά ηλεκτρόνια τα οποία ελευθερώθηκαν μεταφέρονται μέσω εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος προς την κάθοδο δημιουργώντας ηλεκτρισμό, αφού η μεμβράνη αποτρέπει τη διέλευσή τους μέσω αυτής.

Γι αυτό το λόγο η άνοδος και ο καταλύτης πρέπει να αποτελούνται από αγώγιμα υλικά. Τα θετικά φορτισμένα κατιόντα υδρογόνου διαπερνούν την μεμβράνη και ενώνονται με το οξυγόνο το οποίο τροφοδοτεί την κάθοδο (το θετικά φορτισμένο ηλεκτρόδιο) και έτσι παράγεται το νερό. Ο καταλύτης αναλαμβάνει την επιτάχυνση της δημιουργίας του νερού από τα συστατικά του.

Στο σχηματισμό του νερού συμμετέχουν εκτός των μορίων οξυγόνου και των κατιόντων υδρογόνου, τα ηλεκτρόνια τα οποία διοχετεύτηκαν μέσω του εξωτερικού ηλεκτρικού κυκλώματος στην κάθοδο:





### αρχή λειτουργίας SOFC

(παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ανοδική καύση  $H_2$ )

**Σχήμα 1.** Αρχή λειτουργίας SOFC (παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας από την ανοδική καύση  $H_2$ ).

Το δυναμικό που παράγεται από την κυψέλη είναι περίπου 0,7 volt. Για μεγαλύτερες τάσεις χρησιμοποιούνται κυψέλες σε σειρά (fuel cell stack).

### Κυψέλες καυσίμου και ηλεκτρόλυσης

Η ηλεκτρόλυση του νερού μέσω μιας ηλεκτροχημικής διεργασίας είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου επειδή χρησιμοποιεί μόνο το νερό ως αντιδρών. Η ηλεκτρόλυση του νερού η οποία χρησιμοποιεί ηλεκτρισμό για την αποσύνθεση του νερού σε υδρογόνο και οξυγόνο είναι η πιο καθαρή μέθοδος όταν χρησιμοποιείται κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας που προέρχεται από πυρηνική ή συνήθως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας.

Ανάμεσα στους διάφορους τύπους ηλεκτρόλυσης κυψελών η SOEC (solid oxide electrolysis cell) έχει αποσπάσει την προσοχή λόγω της υψηλής της θερμοκρασίας λειτουργίας (700-1000°C) που οδηγεί σε χαμηλή κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και σε υψηλές κινητικές των αντιδράσεων. Η ανάκτηση θερμότητας ως προϊόν στην SOEC εξαιτίας των απωλειών δυναμικού μπορεί να γίνει πηγή θερμότητας για τον ατμό που τροφοδοτείται στην κυψέλη.

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω η SOEC είναι μια ελκυστική μέθοδος για την παραγωγή υδρογόνου, όμως είναι γενικά μια ακριβή διεργασία για 2 λόγους. Πρώτον, η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας απαιτεί υλικά και καταλύτες με μεγάλη αντοχή, γεγονός που οδηγεί και σε υψηλό κόστος. Δεύτερον, η υψηλή απαίτηση της ολικής ενέργειας για να

λειτουργήσει η κυψέλη σε μεγάλη θερμοκρασία λειτουργίας αυξάνει το κόστος παραγωγής της μονάδας. Ενώ η SOEC δεν χρησιμοποιείται εμπορικά για την παραγωγή υδρογόνου, η ανάπτυξή της και η βελτίωσή της καθίστανται αναγκαίες και ενδιαφέρουσες.

Πολλές μελέτες για την ανάπτυξη της SOEC έχουν επικεντρωθεί στην μείωση του λειτουργικού της κόστους με την μείωση της ηλεκτρικής της κατανάλωσης. Οι Pham et al ανέπτυξαν την ιδέα της μείωσης της ηλεκτρικής ενέργειας με την προσθήκη φυσικού αερίου όπως το μεθάνιο για να αντιδράσει με το οξυγόνο στην άνοδο της SOEC. Οι Martínez Frias et al. πρότειναν μια καινοτομία για υψηλής απόδοσης κυψέλες ηλεκτρόλυσης. Στο πείραμά τους το φυσικό αέριο τροφοδοτείται στην άνοδο της SOEC στους 700°C.

Έχει βρεθεί ότι το φυσικό αέριο αντιδρά με το οξυγόνο που παράγεται στην άνοδο μέσω μερικής ή ολικής οξείδωσης, που προκαλεί μια πτώση δυναμικού στο 1 V. Παρόλα αυτά έχει βρεθεί και πως η αποσύνθεση του άνθρακα στην άνοδο μπορεί να λάβει χώρα όταν η SOEC λειτουργεί σε πολύ υψηλή θερμοκρασία της τάξης 900°C. Η αποφυγή της αποσύνθεσης του άνθρακα μπορεί να συμβεί αν τροφοδοτήσουμε ατμό μαζί με το φυσικό αέριο στην άνοδο.

Εκτός αυτού οι SOFEC (solid oxide fuel-assisted electrolysis cell) είναι το επίκεντρο της έρευνας και αναζήτησης. Το μείγμα από μεθάνιο και ατμό που τροφοδοτείται στην άνοδο της κυψέλης SOEC, ακολουθείται από την αναμόρφωση του μεθανίου με ατμό και την αντίδραση μετατόπισης υδραερίου. Το υδρογόνο που παράγεται αντιδρά με το οξυγόνο, και η ηλεκτροχημική αυτή αντίδραση οδηγεί στην παραγωγή ηλεκτρισμού. Ερμηνεύεται ότι η άνοδος της SOEC λειτουργεί σαν την άνοδο μιας SOFC. Οι Tao και Virkar ανέπτυξαν τα υλικά στην κάθοδο που χρησιμοποιούνται σε υβριδικές ηλεκτροχημικές συσκευές (SOFC, SOEC, SOFEC) που περιλαμβάνουν την παραγωγή υδρογόνου και ηλεκτρισμού απευθείας από φυσικό αέριο ή εναλλακτικά καύσιμα (βιοαέριο).

Οι Luo et al. μελέτησαν την απόδοση μιας SOFEC με καύσιμο μονοξείδιο του άνθρακα και μεθάνιο και βασιζόμενοι σε πειράματα που εκτέλεσαν βρήκαν πως η απόδοση με μεθάνιο είναι μεγαλύτερη από ότι με μονοξείδιο του άνθρακα. Ο μηχανισμός αυτός τους έδειξε πως το μεθάνιο δεν μπορεί να οξειδωθεί ηλεκτροχημικά αλλά μπορεί να μετατραπεί σε μονοξείδιο του άνθρακα και υδρογόνο πρώτα μέσω αναμόρφωσης με ατμό και μετέπειτα ακολουθείται η ηλεκτροχημική οξείδωση και η παραγωγή υδρογόνου. Σαν συνέπεια η SOFEC μπορεί να παράγει όχι μόνο υδρογόνο στην κάθοδο αλλά δημιουργεί και ηλεκτρική ενέργεια στην άνοδο.

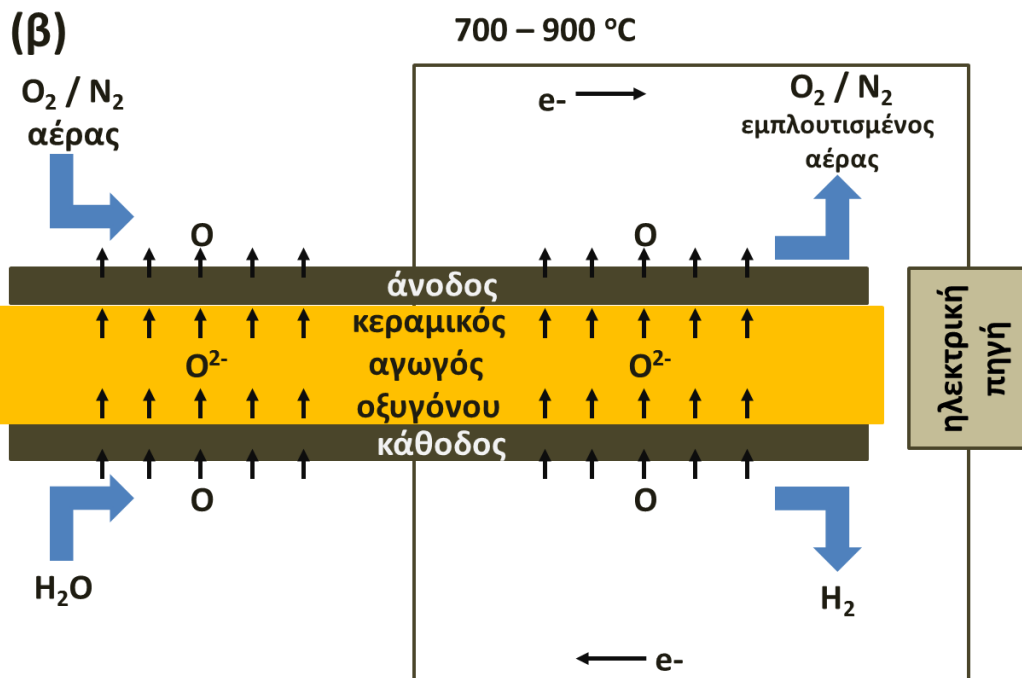
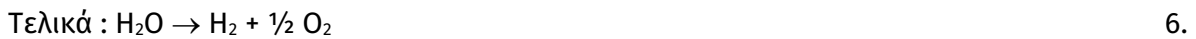
Από τις παραπάνω βιβλιογραφίες μπορεί να παρατηρηθεί ότι πολλές μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην αναβάθμιση των υλικών σε μια κυψέλη καυσίμου. Μια εφεύρεση στην SOFEC βασίζεται σε ένα μαθηματικό μοντέλο, που απαιτείται για να χαρακτηρίσει την ηλεκτρική απόδοση της κυψέλης που σχετίζεται με τις αντιδράσεις και τα φαινόμενα μεταφοράς μέσα σε αυτήν.

Το ηλεκτροχημικό μοντέλο της SOFEC περιγράφει την μετατροπή της ηλεκτρικής ενέργειας σε υδρογόνο παίζοντας σημαντικό ρόλο στο χαρακτηρισμό της ηλεκτρικής απόδοσης της κυψέλης. Στην μελέτη της απόδοσης της κυψέλης για την παραγωγή του υδρογόνου εγκαθίστανται τα ηλεκτροχημικά χαρακτηριστικά και ορισμένοι λειτουργικές

παράμετροι όπως πυκνότητα ρεύματος, κλάσμα ατμού, λόγος ατμού-άνθρακα, θερμοκρασία, πίεση, μετατροπή ατμού και μετατροπή καυσίμου.

### Λειτουργία της SOEC για την Παραγωγή Υδρογόνου

Η παρακάτω εικόνα μας εξηγεί την λειτουργία της κυψέλης για την παραγωγή υδρογόνου. Ο ατμός τροφοδοτείται στην κάθοδο και διαχέεται στους πόρους της καθόδου. Στη συνέχεια ο ατμός αποσυντίθεται λόγω της ηλεκτρικής ενέργειας προς τον σχηματισμό ιόντων υδρογόνου και οξυγόνου. Έπειτα τα ιόντα οξυγόνου μεταφέρονται διάμεσο του ηλεκτρολύτη στους πόρους της ανόδου και οξειδώνονται σε μοριακό οξυγόνο.



**αρχή λειτουργίας SOEC  
(παραγωγή  $\text{H}_2$  από την καθοδική ηλεκτρόλυση  $\text{H}_2\text{O}$ )**

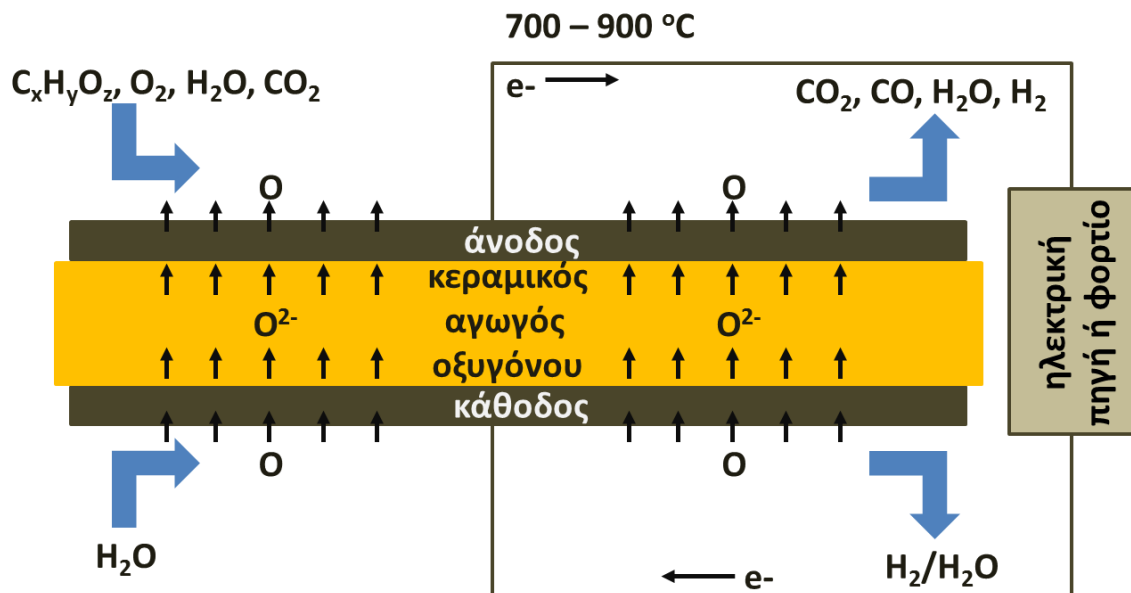
**Σχήμα 2.** Αρχή λειτουργίας SOEC παραγωγή  $\text{H}_2$  από την καθοδική ηλεκτρόλυση του  $\text{H}_2\text{O}$ .

### Λειτουργία της SOFEC για την Παραγωγή Υδρογόνου

Όπως και στην SOEC ο ατμός τροφοδοτείται στην κάθοδο και μετατρέπεται σε ιόντα υδρογόνου και οξυγόνου. Στην περίπτωση της SOFEC το μείγμα του μεθανίου με ατμό τροφοδοτείται στην άνοδο και λαμβάνουν χώρα οι αντιδράσεις αναμόρφωσης του μεθανίου και μετατόπισης υδραερίου. Σημειώνεται ότι ένας υψηλός λόγος ατμού-άνθρακα είναι απαραίτητος για την άνοδο για την αποφυγή της αποσύνθεσης του

άνθρακα στην επιφάνεια του ηλεκτροδίου.

Το υδρογόνο που παράγεται από αυτές τις αντιδράσεις διαχέεται στους πόρους της ανόδου και αντιδρά με τα ιόντα οξυγόνου που μεταφέρονται από την κάθοδο για να παράξουν και ρεύμα. Μπορεί επίσης να παρατηρηθεί ότι η λειτουργία της SOFEC είναι παρόμοια με αυτή της SOEC στην κάθοδο και της SOFC στην άνοδο.



αρχή λειτουργίας SOFEC

Σχήμα 3. Αρχή λειτουργίας SOFEC



## 2. Περιγραφή και Προσομοίωση της Διεργασίας

### Θερμοδυναμικοί υπολογισμοί

Οι υπολογισμοί της αισθητής θερμότητας των ρευμάτων της διεργασίας έγιναν με βάση τη σχέση:

$$c_p^i = (a + b \times T + c \times T^2 + d \times T^3)/1000 \quad [\text{kJ/molK}] \quad 12.$$

όπου το  $i$  δηλώνει τη χημική ένωση ή το στοιχείο ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{SO}_2$  – πιθανά ίχνη άλλων ενώσεων θεωρήθηκαν αμελητέα),  $T$  η απόλυτη θερμοκρασία [K] και  $a$ ,  $b$ ,  $c$  και  $d$  οι σχετικές σταθερές [Cengel, 2013]. Οι θερμοκρασίες, οι πιέσεις και οι μαζικές παροχές των ρευμάτων του Σχήματος 2, καθώς και η αισθητή θερμότητα του κάθε ρεύματος, για τις εννιά διαφορετικές παροχές βιοαερίου, στην είσοδο της διεργασίας, δίνονται στο Παράρτημα Ι.

Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι τιμές των συντελεστών της ειδικής θερμοχωρητικότητας για κάθε συστατικό του συστήματος, καθώς επίσης και οι αντίστοιχες πρότυπες ενθαλπίες σχηματισμού, οι πρότυπες εντροπίες σχηματισμού και η μεταβολή της πρότυπης ελεύθερης ενέργειας:

$$\Delta G^\circ = \Delta H^\circ - T\Delta S^\circ \quad [\text{kJ/kmol}] \quad 13.$$

Οι αισθητές θερμότητες των χημικών οντοτήτων της διεργασίας υπολογίστηκαν σύμφωνα με τη σχέση:

$$Q_s = F_i \times \int_{T_{\text{ref}}}^{T_m} c_{p_i} dT \quad [\text{kJ/sec}] \quad 14.$$

**Πίνακας 1.** Θερμοδυναμικά δεδομένα [Cengel, 2013].

	$c_p$ , kJ/kmolK				$\Delta H^\circ$ kJ/kmol	$\Delta S^\circ$ kJ/kmolK	$\Delta G^\circ$ kJ/kmol
	a	b	c	d			
$\text{CH}_4$	19,890	5,02E-02	1,27E-05	-1,10E-08	-74520	-80,94	-50400
$\text{CO}_2$	22,260	5,98E-02	-3,50E-05	7,47E-09	-393514	2,92	-394385
$\text{H}_2\text{O}_{(g)}$	32,240	1,92E-03	1,06E-05	-3,60E-09	-241826	-44,41	-228592
$\text{N}_2$	28,990	-1,57E-03	8,08E-06	-2,87E-09			
$\text{H}_2\text{S}$	34,200				-20100		
$\text{NH}_3$	27,568	2,56E-02	9,91E-06	-6,69E-09	-46200		
$\text{O}_2$	25,480	1,52E-02	-7,16E-06	1,31E-09			
$\text{H}_2$	29,110	-1,92E-03	4,00E-06	-8,70E-10			
$\text{CO}$	28,160	1,68E-03	5,37E-06	-2,22E-09	-110525	89,75	-137269
$\text{Ar}$	20,785						
$\text{SO}_2$	25,780	5,80E-02	-3,81E-05	8,61E-09	-296100		
$\text{H}_2\text{O}_{(l)}$	75.96						

όπου  $F_i$  η γραμμομοριακή παροχή του συστατικού  $i$  στο ρεύμα  $m$  [mol/s],  $T_{\text{ref}}$  η θερμοκρασία αναφοράς (298,15 K ή 25 °C) και  $T_m$  η θερμοκρασία στο ρεύμα  $m$ . Για τον υπολογισμό της θερμοκρασίας αλλά και των έργων συμπίεσης και εκτόνωσης σε μη αντιστρεπτές μεταβολές (συμπίεσης και εκτόνωσης) χρησιμοποιήθηκε η μεταβολή της εντροπίας ( $\Delta S$ ):

$$\Delta S = s_2 - s_1 - R \times \ln(P_2/P_1) = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p}{T} dT - R \times \ln(P_2/P_1) \quad [\text{kJ/kmolK}] \quad 15.$$

όπου  $s_2$  η τιμή της εντροπίας στη θερμοκρασία  $T_2$  της εξόδου της διάταξης συμπίεσης ή εκτόνωσης,  $s_1$  η τιμή της εντροπίας στη θερμοκρασία  $T_1$  της αντίστοιχης εισόδου,  $R$  η παγκόσμια σταθερά των αερίων (8,314 J/molK),  $T$  οι απόλυτες θερμοκρασίες (K) και  $P_2/P_1$  ο λόγος πιέσεων εξόδου/εισόδου στη διεργασία. Για τον υπολογισμό της μεταβολής της ενθαλπίας και της εντροπίας σχηματισμού χημικής ένωσης σε θερμοκρασία  $T$  [K] διαφορετική της πρότυπης χρησιμοποιήθηκαν οι σχέσεις:

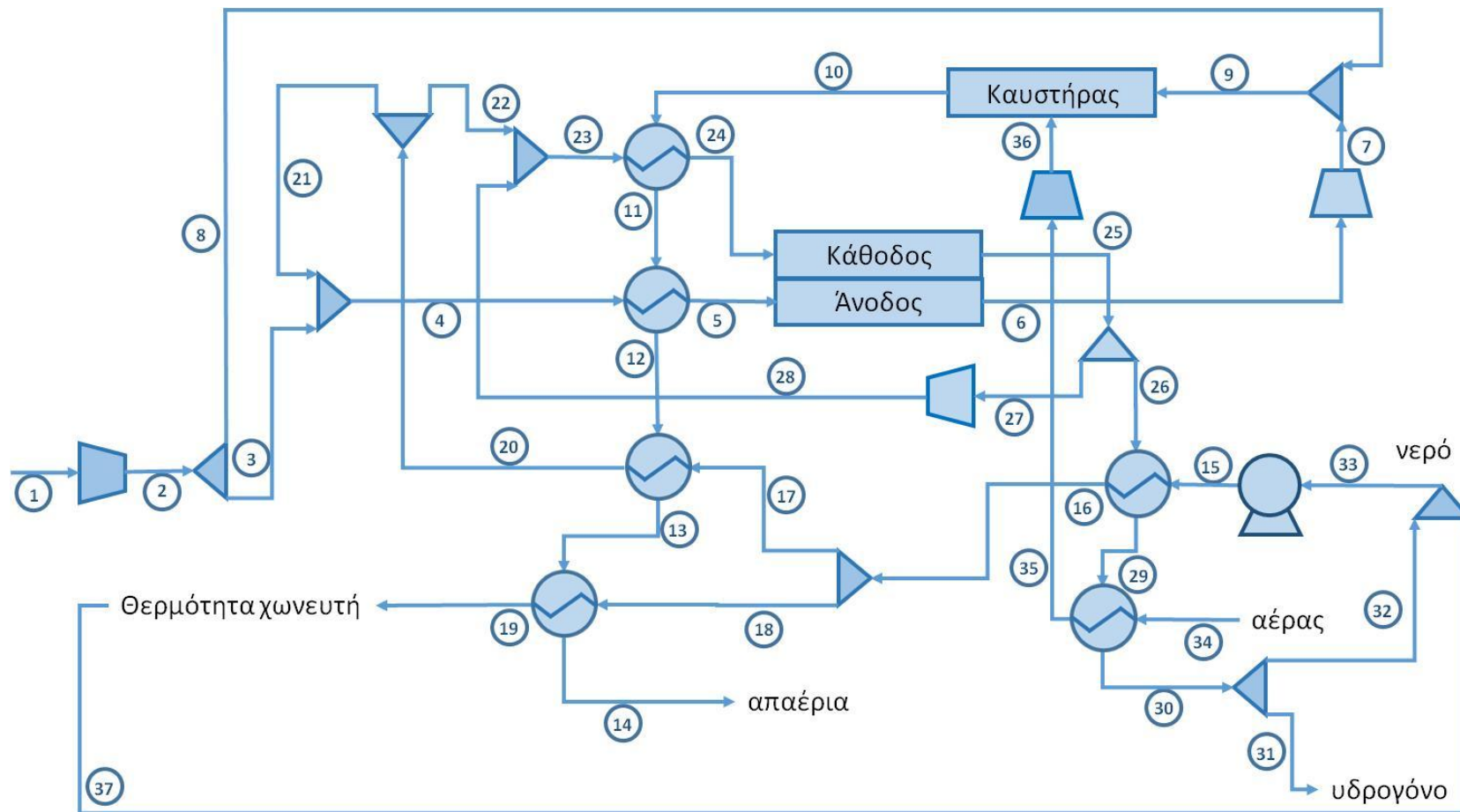
$$\Delta H_i^T = \Delta H^\circ + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p dT \quad [\text{kJ}/\text{kmol}] \quad 16.$$

$$\Delta S_i^T = \Delta S^\circ + \int_{T_{\text{ref}}}^T \frac{C_p}{T} dT \quad [\text{kJ}/\text{kmol}] \quad 17.$$

όπου  $\Delta H_i^T$  η γραμμομοριακή ενθαλπία της κάθε ένωσης στη θερμοκρασία της αντίδρασης,  $\Delta S_i^T$  η γραμμομοριακή εντροπία της ένωσης στη θερμοκρασία της αντίδρασης,  $\Delta H^\circ$  η πρότυπη ενθαλπία σχηματισμού ( $T^\circ = 298,15$  K και  $P = 101,325$  kPa) και  $\Delta S^\circ$  η πρότυπη εντροπία σχηματισμού. Ο υπολογισμός της ελεύθερης ενέργειας της κάθε χημικής ένωσης, σε θερμοκρασία  $T$  γίνεται με τη σχέση:

$$\Delta G_i^T = \Delta H_i^T - T \Delta S_i^T \quad [\text{kJ}/\text{kmol}] \quad 18.$$

ενώ για τον υπολογισμό της ελεύθερης ενέργειας της αντίδρασης αναμόρφωσης μεθανίου κα μετατόπισης υδραερίου χρησιμοποιείται η σχέση:



**Σχήμα 4.** Διάγραμμα ροής του προτεινόμενου ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για δυναμικότητα παραγωγής βιοαερίου από 100 –5.000m<sup>3</sup>/h.

$$\Delta G_{\text{αντίδρασης}} = \Delta G_{\text{(προϊόντων)}} - \Delta G_{\text{(αντιδρώντων)}} \quad [\text{kJ/kmol}] \quad 19.$$

Όπου  $\Delta G_{\text{(προϊόντων)}}$  το άθροισμα των ελεύθερων ενεργειών των συστατικών στα προϊόντα της αντίδρασης και  $\Delta G_{\text{(αντιδρώντων)}}$  το άθροισμα των ελεύθερων ενεργειών των συστατικών στα αντιδρώντα της αντίδρασης.

### Μονάδα παραγωγής βιοαερίου

Για τον προσδιορισμό των λειτουργικών χαρακτηριστικών της διεργασίας παραγωγής βιοαερίου, χρησιμοποιήθηκε το Υπολογιστικό Φύλλο Οικονομικής Αξιολόγησης Μονάδων Βιοαερίου [Bigeast 2008] και η διαδικασία επαναλήφθηκε εννέα φορές, για ρυθμό παραγωγής βιοαερίου 100, 250, 500, 750, 1.000, 1.500, 2.000, 3.000 και 5.000 m<sup>3</sup>/h. Για την παραγωγή βιοαερίου θεωρήθηκε μίγμα αποβλήτων βοοειδών και ενεργειακού ενσιρώματος με αναλογία 60/40, το οποίο αποτελεί μία διαδεδομένη πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοαερίου στην Ευρώπη [Αθανασίου, 2014]. Η ποσότητα αποβλήτων βοοειδών (10 % TS, 25 m<sup>3</sup> βιοαερίου ανά tn αποβλήτων) και ενεργειακού ενσιρώματος (32 % TS, 190 m<sup>3</sup> βιοαερίου ανά tn), που τροφοδοτούνται στην μονάδα, για κάθε δυναμικότητα παραγωγής βιοαερίου φαίνεται στον Πίνακα 2.

**Πίνακας 2.** Δυναμικότητα βιοαερίου και τροφοδοσία πρώτων υλών των μονάδων που εξετάστηκαν.

Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1.000	1.500	2.000	3.000	5.000
Απόβλ. Βοοειδ., tn/yr	5.775	11.551	28.879	43.318	57.758	86.637	115.516	173.274	288.791
Ενεργ. Ενσίρ., tn/yr	3.850	7.701	19.252	28.879	38.505	57.758	77.010	115.516	192.527

Για την συμβατική μονάδα συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας με παλινδρομική μηχανή diesel το παραπάνω πρότυπο θεωρεί ότι η συνολική απόδοση του συστήματος είναι 88% (40% ηλεκτρική απόδοση και 48% θερμική απόδοση). Επίσης, θεωρεί ότι το 30% και 7% της παραγόμενης θερμικής και ηλεκτρικής ενέργειας, αντίστοιχα, προορίζεται για την κάλυψη των εσωτερικών αναγκών του συστήματος (συμπεριλαμβανομένης και της χώνευσης βιομάζας), ανεξάρτητα της δυναμικότητάς του σε βιοαέριο. Η διαθέσιμη ηλεκτρική και θερμική ισχύς, που παράγεται από τη μονάδα συμπαραγωγής του προτύπου, σε συνάρτηση με τη δυναμικότητα σε παραγωγή βιοαερίου, φαίνεται στον Πίνακα 3.

**Πίνακας 3.** Δυναμικότητα βιοαερίου, και ηλεκτρικής/θερμικής παραγωγής, της συμβατικής μονάδας.

Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1.000	1.500	2.000	3.000	5.000
Ηλεκτρική ισχύς, kW	240	600	1.200	1.800	2.400	3.600	4.800	7200	12.000
Θερμική ισχύς, kW	288	720	1.440	2.160	2.880	4.320	5.760	8640	14.400

Για τη μελέτη της μονάδας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, χρησιμοποιήθηκε μία τυπική μέση σύσταση βιοαερίου από τη βιβλιογραφία [Alves et al, 2013], η οποία δίνεται στον Πίνακα 5 και βρίσκεται σε συμφωνία με την τυπική σύσταση του παραγόμενου βιοαερίου στο Υπολογιστικό Φύλλο Οικονομικής Αξιολόγησης Μονάδων Βιοαερίου. Όσον αφορά στον καθαρισμό του, αυτός θεωρήθηκε μέρος της διεργασίας παραγωγής του βιοαερίου και δεν διαστασιολογήθηκε (ούτε κοστολογήθηκε) στα πλαίσια της ανάλυσης του συστήματος του Σχήματος 2.

**Πίνακας 4.** Σύσταση βιοαερίου (Ρεύμα 1, Σχήμα 2), % [Alves et al, 2013].

CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	NH <sub>3</sub>	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>
60,00	35,91	2,34	0,50	0,20	0,05	0,50	0,50

Η θερμογόνος δύναμη του βιοαερίου υπολογίζεται από την αντίδραση καύσης του μεθανίου υπό κανονικές συνθήκες (STP):



Στον Πίνακα 5 φαίνεται η κατώτερη θερμογόνος δύναμη της τροφοδοσίας, στις δυναμικότητες που εξετάστηκαν.

**Πίνακας 5.** Κατώτερη Θερμογόνος δύναμη Βιοαερίου.

Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1.000	1.500	2.000	3.000	5.000
ΚΘΔ, MW	0,597	1,493	2,986	4,479	5,972	8,958	11,94	17,92	29,86

Ο τυπικός καθαρισμός του βιοαερίου για την τροφοδοσία του σε μονάδα συμπαραγωγής περιλαμβάνει τα διαδοχικά στάδια της αποθείωσης (απομάκρυνση H<sub>2</sub>S – de-H<sub>2</sub>S) και της αποσιλοξανίωσης (de-(RO<sub>3</sub>)Si). Για τις αποδόσεις των σχετικών διεργασιών χρησιμοποιήθηκαν βιβλιογραφικά δεδομένα. Έτσι, όσον αφορά στα σιλοξάνια, η συγκέντρωσή τους μετά τον καθαρισμό θεωρήθηκε αμελητέα, ενώ η συγκέντρωσή του H<sub>2</sub>S μετά την αποθείωση θεωρήθηκε ίση με την προδιαγραφή τροφοδοσίας βιοαερίου σε SOFC, δηλαδή 0,2 ppm [Trendewicz et al., 2013]

### Διαχωρισμός βιοαερίου

Κατά τον διαχωρισμό του βιοαερίου ένα μέρος του οδηγείται στην άνοδο της κυψέλης ώστε να γίνουν οι απαραίτητες αντιδράσεις αναμόρφωσης. Το υπόλοιπο τροφοδοτείται στον καυστήρα για την καύση κυρίως του μεθανίου και την παραγωγή της απαραίτητης θερμότητας για την κάλυψη των αναγκών της διεργασίας και για την σωστή λειτουργία της κυψέλης. Για την προσομοίωση επιλέχθηκε ένας λόγος διαχωρισμού (split ratio) ίσος με 0,27 δηλαδή το 27% του παραγόμενου βιοαερίου μετά τον καθαρισμό οδηγείται για καύση και το υπόλοιπο στην κυψέλη καυσίμου για την σωστή λειτουργία της ανόδου ως είσοδος καυσίμου (SOFC).

### Φυσητήρες

Η αντίδραση της καύσης διεξάγεται σε ατμοσφαιρική πίεση. Για την προσομοίωση επιλέχθηκε η πίεση 103,325 kPa ώστε να υπερνικηθούν οι μετέπειτα αντιστάσεις πίεσης μέχρι την έξοδο των αερίων στην ατμόσφαιρα.

Ο φυσητήρας του βιοαερίου αποσκοπεί στην αύξηση της πίεσης του εισερχόμενου αερίου από 1 bar σε 1,03 bar (103,325 kPa). Αρχικά υπολογίστηκε η θερμοκρασία και το έργο για ισεντροπικές συνθήκες λειτουργίας, θεωρώντας μια ισεντροπική απόδοση 71,3 % (Trendewicz et al, 2013), υπολογίστηκε το πραγματικό έργο :  $W=W_s/ns$ , ενώ η πραγματική θερμοκρασία στην έξοδο υπολογίστηκε με βάση το ισοζύγιο ενέργειας στον φυσητήρα:

$$\text{Φυσητήρας βιοαερίου (ΦΒ): } W_{\Phi B} + Q_1 - Q_2 = 0 \quad 21.$$

$$\text{Φυσητήρας ανόδου (ΦΑ): } W_{\Phi A} + Q_6 - Q_7 = 0 \quad 22.$$

$$\text{Φυσητήρας καθόδου (ΦΚ): } W_{\Phi K} + Q_{27} - Q_{28} = 0$$

23.

$$\text{Φυσητήρας αέρα (Φα): } W_{\Phi \alpha} + Q_{35} - Q_{36} = 0$$

24.

Όπου Q το άθροισμα της αισθητής θερμότητας των συστατικών των αναγραφόμενων ρευμάτων [kJ/s] και W το έργο συμπίεσης [kW]. Το ηλεκτρικό έργο που καταναλώνουν οι φυσητήρες φαίνεται στον

πίνακα 6. Οι φυσητήρες αποσκοπούνε στην αύξηση της πίεσης από 101,325 kPa σε 103,325 kPa.

**Πίνακας 6 . Ηλεκτρικές καταναλώσεις φυσητήρων στις δυναμικότητες που εξετάστηκαν.**

Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
W <sub>ΦB</sub> , kW	0	0.2	0.4	0.66	0.88	1.32	1.76	2.64	4.4
W <sub>ΦK</sub> , kW	0,01	0,03	0,06	0,09	0,12	0,17	0,23	0,34	0,57
W <sub>ΦA</sub> , kW	2.48	5.81	11.62	17.4	23.24	34.86	46.48	69.73	116.2
W <sub>Φα</sub> , kW	0,38	1,04	2,15	3,26	4,36	6,57	8,78	13,21	22,1

**Προθερμαντής ανόδου**

Πρόκειται για τον εναλλάκτη θερμότητας που δέχεται το ρεύμα μετά την μίξη του διαχωρισμένου βιοαερίου (78%) με τον ατμό (που τροφοδοτείται από την αντλία) με σκοπό να το οδηγήσει στην άνοδο της κυψέλης. Ο σκοπός αυτού του εναλλάκτη είναι η αύξηση της θερμοκρασίας και παράλληλα η αύξηση της αισθητής θερμότητας ώστε η κυψέλη να λειτουργήσει στις απαραίτητες συνθήκες λειτουργίας της. Η πτώση πίεσης σύμφωνα με την βιβλιογραφία είναι 1 kPa. Ο υπολογισμός της θερμοκρασίας και συνεπώς και της θερμότητας που θα τροφοδοτηθεί στην άνοδο της κυψέλης γίνεται με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο στον συγκεκριμένο εναλλάκτη :

$$Q_4 + Q_{11} - Q_5 - Q_{12} = 0 \quad 25.$$

**Κυψέλη καυσίμου SOFEC**

Για τον υπολογισμό της κυψέλης χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω βιβλιογραφικά δεδομένα [Patcharavorachot 2014] :

Θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης 800°C.

Λόγος μετατροπής καυσίμου και ατμού 0,8 ( $uf_{H_2O} = 0,8$  ,  $uf_{fuel} = 0,8$ ).

Πτώση πίεσης ( $\Delta P = 2$  kPa).

Νερό στην κάθοδο ( $H_2O_{cath} = 0,9$ ).

Μηδενική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας στα 6703,73 A/m<sup>2</sup>.

Η άνοδος της κυψέλης τροφοδοτείται με το μίγμα βιοαερίου και ατμού σε υψηλή θερμοκρασία από την έξοδο του προηγούμενου εναλλάκτη. Το μείγμα αυτό αποτελείται από CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, O<sub>2</sub> και H<sub>2</sub>. Με βάση το ισοζύγιο μάζας του στοιχείου του οξυγόνου υπολογίζεται το στοιχειομετρικό οξυγόνο που έρχεται από την κάθοδο της κυψέλης. Η έξοδος της ανόδου αποτελείται από τις ίδιες ενώσεις με αυτής της εισόδου και υπολογίζεται με βάση τον λόγο μετατροπής του καυσίμου που στην προκειμένη περίπτωση είναι το μεθάνιο. Η θερμοκρασία της εξόδου της ανόδου είναι αυτή από την βιβλιογραφία δηλαδή 800°C.

Η κάθοδος τροφοδοτείται από μίγμα ατμού με υδρογόνο όπου ο ατμός υπολογίζεται με βάση το στοιχειομετρικό οξυγόνο:

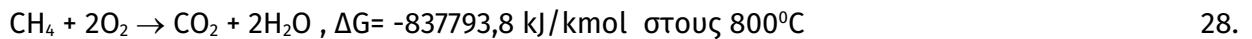
$$H_2O^{cath} = O^{from cath} / 0,8 \quad 26.$$

και το υδρογόνο αντιστοίχως :

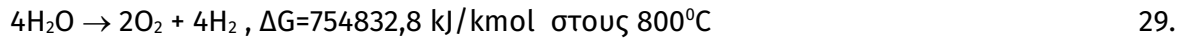
$$H_2^{cath} = H_2O^{cath} / (0,9/0,1) \quad 27.$$

με τον ατμό να είναι σε περίσσεια. Στην έξοδο της καθόδου ο ατμός είναι ίσος με αυτόν την εισόδου μείον το στοιχειομετρικό οξυγόνο και το υδρογόνο με αυτό της εισόδου συν το στοιχειομετρικό οξυγόνο.

Πρέπει να σημειωθεί πως η λειτουργία αυτής της κυψέλης μοιάζει με μια κυψέλη τύπου SOFC στην άνοδο με αντίδραση :



Και τύπου SOEC στην κάθοδο με αντίδραση:



Το ρεύμα που παράγεται από την ηλεκτρόλυση είναι:

$$I = O^{\text{from cath}} / 4 * F \quad 30.$$

Όπου F η σταθερά του Faraday 96484 Coulomb/mol και 4 τα ηλεκτρόνια που μεταφέρονται. Η επιφάνεια της κυψέλης υπολογίζεται :

$$A = I [\text{A}] / 6703,73 [\text{A/m}^2] \quad 31.$$

$$\text{Το δυναμικό } EMF_{\text{SOFC}} = \frac{\Delta G @ 800}{8 * 96484} \quad 32.$$

$$\text{Το δυναμικό } EMF_{\text{SOEC}} = \frac{\Delta G @ 800}{8 * 96484} \quad 33.$$

$$EMF = EMF_{\text{SOFC}} + EMF_{\text{SOEC}} + \frac{RT}{4F} \ln \frac{Y_{\text{aveH}_2, \text{an}}}{Y_{\text{aveH}_2\text{O}, \text{an}} \times Y_{\text{aveO}_2, \text{cath}}^{0.5}} \quad 34.$$

$$n = EMF - V_{\text{cell}} \quad 35.$$

$$V_{\text{cell}} = 0 \quad 36.$$

$$P_{\text{electric}} = 0 \quad 37.$$

$$Q_{\text{joule}} = n * I \quad 38.$$

Οι χημικές αντιδράσεις που λαμβάνουν χώρα στην κυψέλη SOFEC είναι οι παρακάτω:



Υπολογίζεται η θερμότητα που παράγεται από τις παραπάνω αντιδράσεις  $Q_{\text{react}}$  και με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο υπολογίζεται η θερμοκρασία στην είσοδο η οποία θα είναι ίδια τόσο για την άνοδο όσο και για την κάθοδο:

$$Q_{24} + Q_5 + Q_{\text{react}} - Q_6 - Q_{25} = 0 \quad 44.$$

**Πίνακας 7.** Επιφάνεια κυψέλης για δυναμικότητες από 100 – 5000 m<sup>3</sup>/h

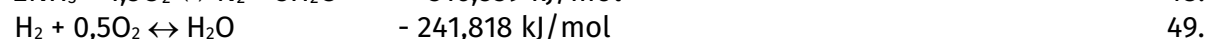
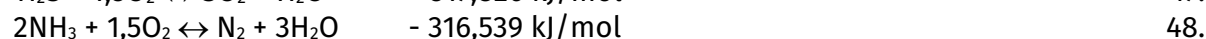
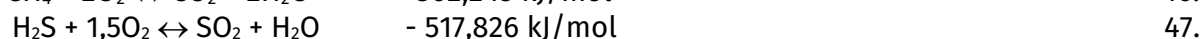
Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
Επιφάνεια (m <sup>2</sup> )	100.21	250.52	501	751.5	1002	1503	2004	3006	5010

**Καυστήρας**

Στον καυστήρα εισέρχεται το ρεύμα μετά τον διαχωρισμό του βιοαερίου (27%) και το ρεύμα από την έξοδο της ανόδου της κυψέλης. Η θερμότητα που εισέρχεται στον καυστήρα βρίσκεται από ισοζύγιο ενέργειας στον μείκτη πριν αυτόν:

$$Q_7 + Q_8 - Q_9 = 0 \quad 45.$$

Ο καυστήρας θεωρείται ένας αντιδραστήρας στον οποίο λαμβάνουν χώρα οι παρακάτω εξώθερμες αντιδράσεις :



Η θερμότητα που παράγεται από τις παραπάνω αντιδράσεις είναι  $Q_{\text{reac}}$ . Ο καυστήρας παρέχει την απαιτούμενη θερμότητα για την σωστή λειτουργία της κυψέλης στην απαραίτητη θερμοκρασία λειτουργίας της και ανεβάσει την θερμότητα των απαερίων ώστε να τροφοδοτήσουν τον χωνευτή με την απαραίτητη θερμότητα για την κάλυψη των αναγκών του [76,825 kW από Economic Calculation Tool CRES]. Η αντίδραση καύσης θεωρήθηκε ότι λαμβάνει χώρα με 20% περίσσεια αέρα. Η πτώση πίεσης στον καυστήρα θεωρήθηκε 2 kPa.

Αρχικά υπολογίζεται το οξυγόνο που απαιτείται για την πραγματοποίηση των αντιδράσεων της καύσης και με βάση αυτό και την τυπική σύσταση του ατμοσφαιρικού αέρα υπολογίζεται η τροφοδοσία του αέρα που απαιτείται για την καύση.

**Πίνακας 8.** Σύσταση ατμοσφαιρικού αέρα, (Ρεύμα 25, Σχήμα 4 ), %

N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	Ar
77,74	20,85	0,04	1,28	0,093

CH<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>S, NH<sub>3</sub> και H<sub>2</sub> καίγονται πλήρως, συνεπώς τα απαέρια του καυστήρα αποτελούνται από N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ar, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O και SO<sub>2</sub>. Η θερμοκρασία εξόδου του καυστήρα υπολογίζεται με βάση το ενεργειακό ισοζύγιο:

$$Q_9 + Q_{36} - Q_{10} - Q_{s,\text{reac}} = 0 \quad 50.$$

**Πίνακας 9.** Θερμική Ισχύς (kW ) του καυστήρα για δυναμικότητες από 100 – 5000 m<sup>3</sup>/h

Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
Θερμότητα αντίδρασης, Kw	-267.8	-	-1339	-	-268.4	-	-5357	-	-13392
		669.6		2008		4018		8035	

**Προθερμαντής καθόδου**

Αυτός ο εναλλάκτης θερμότητας δέχεται την θερμή έξοδο του καυστήρα στους 1358 °C καθώς και το ρεύμα του μείκτη ατμού με υδρογόνο. Ο σκοπός του είναι να τροφοδοτήσει την κάθοδο με την απαραίτητη θερμοκρασία λειτουργίας της κυψέλης όπως έγινε και στην άνοδο. Η γραμμομοριακή σύσταση της καθόδου υπολογίζεται στην κυψέλη με βάση την άνοδο. Η θερμοκρασία στην είσοδο της καθόδου υπολογίζεται με βάση το ισοζύγιο ενέργειας:

$$Q_{10} + Q_{23} - Q_{24} - Q_{11} = 0 \quad 51.$$



### Εξατμιστής

Ο εξατμιστής στη παρούσα διεργασία, αφορά έναν εναλλάκτη θερμότητας. Η λειτουργία του είναι να δέχεται το ρεύμα που προέρχεται από τον προθερμαντή του νερού με απώτερο σκοπό την παραγωγή ατμού. Ο ατμός αυτός στην προκειμένη περίπτωση προσομοιώθηκε στους 850°C, έτσι ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη θερμοκρασία για την κυψέλη καυσίμου όπως παρουσιάστηκε παραπάνω. Ο λόγος του ατμού προς άνθρακα που εισέρχεται στην κυψέλη είναι ίσος με 2 [Patcharanorachot, 2014]. Παράλληλα, από τον εξατμιστή μεταφέρεται συγκεκριμένη θερμοκρασία στον εναλλάκτη συμπαραγωγής, η οποία υπολογίζεται με βάση το ισοζύγιο ενέργειας του πρώτου:

$$Q_{12} + Q_{17} - Q_{13} - Q_{20} = 0 \quad 52.$$

### Αντλία νερού

Μια αντλία νερού τροφοδοτεί τη μονάδα με το απαιτούμενο νερό για την λειτουργία τόσο της κυψέλης καυσίμου όσο και για την τροφοδοσία της απαιτούμενης θερμότητας στον χωνευτή με ζεστό νερό το οποίο ανακυκλοφορείται. Η πίεση είναι της τάξης των 801,325 kPa έτσι ώστε να υπερνικηθούν οι πτώσεις πίεσης που προκαλούν ο προθερμαντής του νερού, ο εξατμιστής και ο χωνευτής. Η γραμμομοριακή παροχή του νερού της αντλίας που θα εισέλθει στην μονάδα καθορίζεται από τις ανάγκες της κυψέλης για νερό τόσο στην άνοδο όσο και στην κάθοδο καθώς και από την σύσταση των ρευμάτων της ανακυκλοφορίας. Το ισεντροπικό έργο της αντλίας υπολογίζεται από:

$$W_{\text{rump,ins}} = F_i \cdot v_i \cdot (P_1 - P_2) \quad 53.$$

Όπου  $F_i$  η μαζική παροχή του νερού [kg/s]

$v_i$  ο ειδικός όγκος του νερού στην δεδομένη θερμοκρασία [ $\text{m}^3/\text{kg}$ ]

$P_1, P_2$  οι πιέσεις στα ρεύματα εισόδου και εξόδου αντίστοιχα [kPa]

Η ισεντροπική απόδοση θεωρήθηκε 90%. Το έργο που καταναλώνει η αντλία με την μεταβολή της παραγωγής βιοαερίου φαίνεται στον Πίνακα.

**Πίνακας 10.** Ηλεκτρική κατανάλωση της αντλίας για δυναμικότητα από 100 – 5000  $\text{m}^3/\text{h}$

Δυναμικότητα, $\text{m}^3/\text{h}$	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
$W_{\text{rump}}$ , kW	0.608	1.509	3.022	4.533	6.045	9.123	12.214	18.433	30.973

### Προθερμαντής νερού

Ο προθερμαντής νερού είναι ένας άλλος εναλλάκτης θερμότητας, με διπλή ιδιότητα. Στην παρούσα διεργασία, δέχεται το ρεύμα τόσο από την έξοδο της καθόδου, σε πολύ υψηλή θερμοκρασία, όσο και το ρεύμα από την αντλία του νερού. Το ρεύμα που διέρχεται μέσω της καθόδου, είναι αυτό που μεταφέρει και το προϊόν υδρογόνο. Επιπλέον, προσομοιώνει το ρεύμα από την αντλία του νερού, ώστε να εκπληρωθούν οι θερμικές απαιτήσεις της χώνευσης. Ο υπολογισμός της μερικής πίεσης του ατμού γίνεται μέσω της σχέσης :

$$y_i \cdot P = P_{\text{H}_2\text{O}} \quad \text{όπου,} \quad 54.$$

$y_i$  το μοριακό κλάσμα του ατμού,  $P$  η ολική πίεση [kPa] και  $P_{\text{H}_2\text{O}}$  η μερική πίεση του ατμού στο ρεύμα [kPa]. Τα mol του νερού που θα παραμείνουν στην αέρια φάση (υδρατμοί) μετά τον εναλλάκτη θα είναι τόσα ώστε η μερική πίεση του ατμού να είναι ίση με την πίεση ισορροπίας του ατμού  $P_{\text{sat}}$ .

**Πίνακας 11 . Παραγωγή υδρογόνου για δυναμικότητα βιοαερίου από 100 – 5000 m<sup>3</sup>/h**

Δυναμικότητα m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
Παραγωγή υδρογόνου,kg/d	301	752	1504	2256	3008	4512	6015	9023	15039

**Εναλλάκτης συμπαγωγής θερμότητας**

Ο εναλλάκτης αυτός αξιοποιεί την έξοδο των απαερίων τα οποία βρίσκονται σε θερμοκρασία 252°C, μετά το πέρασμα τους από τον εξατμιστή. Σκοπός του είναι να αυξήσει την θερμοκρασία του νερού σε επίπεδο ώστε να τροφοδοτήσει τον χωνευτή με την απαραίτητη θερμότητα για την κάλυψη των αναγκών του. Σε συνδυασμό με αυτό ρυθμίζει τη θερμοκρασία του νερού, η οποία πρόκειται να περάσει από τον χωνευτή. Αυτή δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 70°C (βάση πλαισίου διατήρησης ζωής για τα αναερόβια βακτήρια). Τέλος, το ζεστό αυτό νερό ανακυκλοφορείται προς την αντλία και τα απαέρια εξέρχονται στο περιβάλλον σε θερμοκρασία πλέον 110° C. Η θερμοκρασία προς τον χωνευτή υπολογίζεται από το ισοζύγιο ενέργειας:

$$Q_{13} + Q_{18} - Q_{19} - Q_{14} = 0 \quad 55.$$

**Πίνακας 12 . Θερμότητα συμπαγωγής και θερμική απαίτηση χωνευτή**

Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
Θερμότητα συμπαγωγής, kW	79	198	396	576	791	1187	1582	2374	3956
Θερμική απαίτηση χωνευτή, kW	76,8	192	384	576	768	1152	1537	2305	3841

**Προθερμαντής αέρα**

Ο εναλλάκτης του προθερμαντή αέρα, έχει στόχο να λαμβάνει τον ατμοσφαιρικό αέρα, ο οποίος βρίσκεται σε συνθήκες περιβάλλοντος, αλλά και ότι εξέρχεται από τον προθερμαντή του νερού που βρίσκεται σε θερμοκρασία 60 °C. Προθερμάνει, έπειτα, τον αέρα και μεταβάλλει τη θερμοκρασία του προϊόντος, που αποτελείται από 95% υδρογόνο, στους 35°C. Μετά τη διαδικασία αυτή, ένας ειδικά διαμορφωμένος διαχωριστής τείνει να διαχωρίσει το νερό που περιέχεται στο μίγμα, προτού το προϊόν αποθηκευτεί στην τελική του μορφή. Η θερμοκρασία του αέρα κατά την έξοδο του από τον συγκεκριμένο εναλλάκτη βρίσκεται από το ισοζύγιο μάζας:

$$Q_{34} + Q_{29} - Q_{30} - Q_{35} = 0 \quad 56.$$

**Ολοκληρωμένη Διεργασία**

Στον Πίνακα 13 παρουσιάζονται τα λειτουργικά χαρακτηριστικά της ολοκληρωμένης μονάδας παραγωγής υδρογόνου για όλες τις δυναμικότητες τροφοδοσίας βιοαερίου, που μελετήθηκαν (100, 250, 500, 750, 1.000, 1.500, 2.000, 3.000 και 5.000 m<sup>3</sup>/h). Στα λειτουργικά χαρακτηριστικά της μονάδας περιλαμβάνονται:

- η κατώτερος θερμογόνος δύναμη του βιοαερίου (LHV<sub>biogas</sub> – είσοδος) και του υδρογόνου (LHV<sub>H2</sub> - προϊόν)
- η ενεργειακή κατανάλωση του φυσητήρα ατμοσφαιρικού αέρα, βιοαερίου και ανόδου και καθόδου ( $W_{\Phi B}, W_{\Phi \sigma}, W_{\Phi A}, W_{\Phi K}$ )
- η ενεργειακή κατανάλωση της αντλίας νερού ( $W_{\text{pump}}$ )
- η ενεργειακή και θερμική απαίτηση για τη χώνευση της βιομάζας
- η θερμότητα συμπαγωγής  $Q_{\text{cogen}}$
- Βαθμός απόδοσης της μονάδας παραγωγής υδρογόνου,  $\eta$  (LHV<sub>H2</sub>/LHV<sub>biogas</sub>)

Το συνολικό ηλεκτρικό έργο, που απαιτείται για την μονάδα παραγωγής υδρογόνου αποτελείται από το έργο των φυσητήρων, της αντλίας νερού και της μονάδας παραγωγής βιοαερίου.

**Πίνακας 13.** Λειτουργικά χαρακτηριστικά της μονάδας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο για τις δυναμικότητες που εξετάστηκαν.

Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
παραγωγή υδρογόνου, kg/d	301	752	1504	2256	3008	4512	6016	9023	15039
LHV H <sub>2</sub> , MW	0,42	1,04	2,09	3,13	4,18	6,27	8,37	12,55	20,92
LHV BIOGAS, MW	0,60	1,49	2,98	4,48	5,97	8,96	11,94	17,92	29,90
WΦB, kW	0	0.2	0.4	0.66	0.88	1.32	1.76	2.64	4.4
WΦΚ, kW	0,01	0,03	0,06	0,09	0,12	0,17	0,23	0,34	0,57
WΦΑ, kW	2.48	5.81	11.62	17.4	23.24	34.86	46.48	69.73	116.2
WΦα, kW	0,38	1,04	2,15	3,26	4,36	6,57	8,78	13,21	22,1
Wpump, kW	0,60	1,51	3,02	4,53	6,05	9,12	12,21	18,43	30,97
Ηλεκτρικές απαιτήσεις βιοαερίου, kW	34	85	100	170	340	510	680	1019	1699
Θερμικές απαιτήσεις, kW	77	192	384	576	768	1152	1537	2305	3841
Qcogen, kW	79	198	396	593	791	1187	1582	2374	3956
Απόδοση η, %	70	70	70	70	70	70	70	70	70
θερμότητα προς πώληση, kW	2	6	12	17	23	35	45	69	115
ηλεκτρική ενέργεια για αγορά, kW	38	94	117	196	375	562	750	1123	1873

Οι θερμικές απαιτήσεις της μονάδας παραγωγής υδρογόνου αφορούν αποκλειστικά την κάλυψη των αναγκών της χώνευσης και θεωρείται ότι αποτελούν το 95% της θερμικής ενέργειας, που παράγεται από τη συμβατική μονάδα συμπαραγωγής του Προτύπου. Από τον Πίνακα φαίνεται ότι οι θερμικές απαιτήσεις της μονάδας παραγωγής βιοαερίου ικανοποιούνται για όλες τις δυναμικότητες, που εξετάστηκαν, ενώ επιτυγχάνεται μικρή παραγωγή περίσσειας θερμότητας, η οποία μπορεί να διατεθεί στο δίκτυο προς πώληση. Αντίθετα, οι ηλεκτρικές απαιτήσεις της ολοκληρωμένης μονάδας δεν καλύπτονται γεγονός που καθιστά αναγκαία την αγορά συμπληρωματικής ηλεκτρικής ενέργειας.

### 3. Οικονομικά Δεδομένα

Η οικονομική ανάλυση περιλαμβάνει την κοστολόγηση της αρχικής επένδυσης της ολοκληρωμένης διεργασίας και την εφαρμογή 3 οικονομικών κριτηρίων, για την εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητάς της: της Καθαρής Παρούσας Αξίας (Net Present Value – NPV), του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης (Internal Rate of Return – IRR) και της Περιόδου Αποπληρωμής (Pay Out Time).

Τα παραπάνω αφορούν και εφαρμόστηκαν τόσο για τη συμβατική διεργασία συμπαραγωγής με κινητήρα Diesel όσο και για τη σύζευξη μονάδας παραγωγής βιοαερίου και υδρογόνου από ηλεκτρόλυση στερεών οξειδίων.

Η κοστολόγηση:

1. της μονάδας παραγωγής βιοαερίου
2. της ολοκληρωμένης μονάδας παραγωγής βιοαερίου και συμπαραγωγής ηλεκτρισμού / θερμότητας σε κινητήρα Diesel και
3. της ολοκληρωμένης μονάδας παραγωγής υδρογόνου

στηρίχθηκαν στο «Πρότυπο Φύλλο Εργασίας Οικονομικής Αξιολόγησης μονάδων συμπαραγωγής από βιοαέριο» του Κ.Α.Π.Ε.Ε. [[www.big-east.eu](http://www.big-east.eu)].

Στο ίδιο πρότυπο στηρίχθηκε και η εφαρμογή των κριτηρίων οικονομικής αξιολόγησης, που αναφέρθηκαν παραπάνω, για τις περιπτώσεις 2 και 3.

Για το συνολικό ύψος της Αρχικής Επένδυσης (Α.Ε.) της συμβατικής μονάδας βιοαερίου με κινητήρα Diesel χρησιμοποιήθηκε η συσχέτιση [ΑΘΑΝΑΣΙΟΥ 2014]:

$$A.E. = 1000 \times 4,671 \times W_{el}^{-0,92} \quad 57.$$

όπου  $W_{el}$ , η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται [kW]. Η συμβολή των επιμέρους τμημάτων της συμβατικής μονάδας συμπαραγωγής στο συνολικό ύψος της Α.Ε., σύμφωνα με το παραπάνω Πρότυπο, δίνεται στον Πίνακα 14.

#### **Πίνακας 14.** Επιμέρους επενδυτικά κόστη της μονάδας συμπαραγωγής από βιοαέριο (%)

Κατασκευαστικό κόστος / Κτίρια / Χωματουργικές εργασίες	34,15
Κόστος αγοράς Μηχανημάτων	26,83
Κόστος Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού	8,29
Κόστος σχεδιασμού και επίβλεψης του έργου	8,78
Κόστος συστήματος ΣΗΘ (CHP) και σύνδεση με το δίκτυο	21,95

Ο επιμερισμός του Πίνακα 14 διατηρήθηκε σταθερός με την κλιμάκωση της ισχύος της μονάδας, θεωρώντας ότι όλα τα επιμέρους κόστη ακολουθούν την ίδια σχέση αύξησης του κόστους με το μέγεθος της μονάδας.

Αυτή η κατανομή του κόστους επιτρέπει να υπολογιστούν ξεχωριστά το κόστος της μονάδας παραγωγής και καθαρισμού του βιοαερίου και ξεχωριστά το κόστος της μονάδας συμπαραγωγής (ΣΗΘ). Έτσι, για τη συμβατική μονάδα ΣΗΘ με κινητήρα diesel, το κόστος υπολογίστηκε βάσει των παραπάνω ποσοστών της αρχικής επένδυσης, ενώ ο υπολογισμός του κόστους της μονάδας

παραγωγής υδρογόνου και συμπαραγωγής θερμικής ενέργειας έγινε ξεχωριστά και εντάχθηκε στο Πρότυπο αντικαθιστώντας το κόστος του συμβατικού συστήματος ΣΗΘ.

Η αρχική επένδυση της μονάδας παραγωγής υδρογόνου υπολογίστηκε με αναλυτική κοστολόγηση της διεργασίας του Σχήματος 4.

Από την κοστολόγηση της ολοκληρωμένης διεργασίας εξαιρέθηκε το υποσύστημα καθαρισμού του βιοαερίου, θεωρώντας ότι το κόστος αυτό περιλαμβάνεται στο κόστος της μονάδας παραγωγής βιοαερίου του Προτύπου.

Συνεπώς, το κόστος της μονάδας παραγωγής υδρογόνου υπολογίστηκε ως το άθροισμα των διατάξεων:

- |                         |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| 1. Φυσητήρας βιοαερίου  | 10. Εναλλάκτης συμπαραγωγής |
| 2. Φυσητήρας ανόδου     | 11. Προθερμαντής αέρα       |
| 3. Φυσητήρας καθόδου    | 12. Προθερμαντής νερού      |
| 4. Φυσητήρας αέρα       | 13. Αντλία νερού            |
| 5. Κυψέλη καυσίμου      | 14. Καθαρισμός νερού        |
| 6. Καυστήρας            | 15. Συστήματα Ρύθμισης      |
| 7. Προθερμαντής ανόδου  | 16. Κατασκευαστικά          |
| 8. Προθερμαντής καθόδου | 17. Διάφορα                 |
| 9. Εξατμιστής           |                             |

Η εκτίμηση του κόστους του φυσητήρα αέρα (Φα), του φυσητήρα βιοαερίου (ΦΒ,) του φυσητήρα ανόδου (ΦΑ) και του φυσητήρα καθόδου (ΦΚ) έγινε με βάση τη συσχέτιση [Trendewicz et al., 2013]:

$$C_{\text{blower}} = -0,0011675 \times F^2 + 22,781498 \times F + 2041,2507 \quad [\text{€}] \quad 58.$$

όπου F οι παροχές του αέρα, βιοαερίου και αερίου μείγματος στην είσοδο του αντίστοιχου φυσητήρα [ft<sup>3</sup>/min] και δίνονται στον Πίνακα 15.

**Πίνακας 15.** Μεταβολή του κόστους των Φυσητήρων για τις διάφορες δυναμικότητες.

Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
Παροχή αέρα, ft <sup>3</sup> /min	170	425	852	1277	1703	2555	3407	5110	8517
Κόστος Φα, €	3887	11530	20596	29239	40844	52627	66102	87967	111381
Παροχή βιοαερίου, ft <sup>3</sup> /min	58.9	147	294	442	588	883	1177	1767	2945
Κόστος ΦΒ, €	3378	5370	8648	11876	15457	21255	27255	38647	59001
Παροχή ΦΑ, ft <sup>3</sup> /min	1634	409	819	1228	1638	2456	3275	4913	8188
Κόστος ΦΑ, €	5740	11172	19912	28261	39348	50959	64133	85786	110304
Παροχή ΦΚ, ft <sup>3</sup> /min	14	35	70	105	140	210	280	420	700
Κόστος ΦΚ, €	2360	2837	3630	4421	5231	6774	8329	11404	17417

Η κοστολόγηση του προθερμαντή της ανόδου, του προθερμαντή της καθόδου, του προθερμαντή του νερού, του εξατμιστή, του προθερμαντή αέρα και της αντλίας νερού έγινε με βάση τη διαδραστική εφαρμογή της εταιρείας Matches για εκτίμηση κόστους κεφαλαιουχικού εξοπλισμού [www.matche.com].

Η κοστολόγηση της αντλίας νερού έγινε με βάση την παροχή του νερού (gallons/min). Στον Πίνακα παρουσιάζεται το κόστος της αντλίας ανάλογα την παροχή του νερού και τη δυναμικότητα της μονάδας παραγωγής βιοαερίου.

**Πίνακας 16 .** Κόστος αντλίας νερού με την αύξηση της δυναμικότητας βιοαερίου από 100 – 5000 m<sup>3</sup>/h.

Δυναμικότητα m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
Παροχή, gal/min	12,1	30,3	60,6	90,9	121,2	182,8	245	369,4	620,8
Κόστος αντλίας, κ€	10,8	11,4	11,8	12,0	12,2	12,5	12,7	13,0	13,3

Η κοστολόγηση των εναλλακτών της διεργασίας (του προθερμαντή της ανόδου, του προθερμαντή της καθόδου, του εξατμιστή, του εναλλάκτη συμπαραγωγής, του προθερμαντή του νερού και του προθερμαντή του αέρα έγινε με βάση την συνολική επιφάνεια συναλλαγής του εναλλάκτη [m<sup>2</sup>], η οποία υπολογίζεται από την εξίσωση:

$$Q = U A \Delta T_{lm} \quad 59.$$

όπου Q η θερμότητα που μεταφέρεται στον εναλλάκτη από το θερμό στο ψυχρό [kW], U ο συνολικός συντελεστής θερμοπερατότητας του εναλλάκτη (θεωρήθηκε 30 W/m<sup>2</sup>K), A η συνολική επιφάνεια εναλλαγής [m<sup>2</sup>] και  $\Delta T_{lm}$  η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας:

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad 60.$$

όπου  $\Delta T_1$  η θερμοκρασιακή διαφορά στο ζεστό άκρο του εναλλάκτη και  $\Delta T_2$  η θερμοκρασιακή διαφορά στο ψυχρό άκρο του εναλλάκτη. Στον Πίνακα 18 παρουσιάζονται η εναλλασσόμενη θερμότητα, η επιφάνεια εναλλαγής, η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασίας και το κόστος των εναλλακτών της διεργασίας ανάλογα με την τροφοδοσία βιοαερίου στην μονάδα παραγωγής υδρογόνου. Η μέση λογαριθμική διαφορά θερμοκρασία ήταν σταθερή ανεξάρτητα της δυναμικότητας της μονάδας.

**Πίνακας 17.** Λειτουργικά χαρακτηριστικά των εναλλακτών και τα κόστη τους.

Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
Προθερμαντής της ανόδου									
Q, kW	316	791	1582	2373	3163	4745	6327	9491	15817
ΔΤlm	296	296	296	296	296	296	296	296	296
A, m <sup>2</sup>	35	88,8	178	266	3819	5734	7649	11468	19117
Κόστος, κ€	22,6	42,7	68,4	90	109,5	144,3	175,6	231,2	327,3
Προθερμαντής της καθόδου									
Q, kW	302	755	1510	2265	3020	4530	6041	9062	15102
ΔΤlm	426	426	426	426	426	426	426	426	426
A, m <sup>2</sup>	23	59	118	177	236	354	472	708	1179
Κόστος, κ€	17	32,3	51,8	68,2	82,9	109,3	132,9	175	247,3
Εξατμιστής									
Q, kW	297	744	1488	2232	2976	4463	5951	8927	14878
ΔΤlm	817	817	817	817	817	817	817	817	817
A, m <sup>2</sup>	12	30,5	60,7	91	121,4	182	243	364	607
Κόστος, κ€	17,8	29,6	43,4	54,2	63,5	79,3	93	116,2	153,9
Εναλλάκτης συμπαραγωγής									
Q, kW	45	111	222	333	444	665	887	1331	2219
ΔΤlm	94	94	94	94	94	94	94	94	94
A, m <sup>2</sup>	14	39,5	79	119	158	237	316	474	791
Κόστος, κ€	12,1	24,6	39,4	52,1	63,1	83,2	101,1	133,2	188,8
Προθερμαντής Νερού									
Q, kW	18	37	73	110	146	219	293	431	731
ΔΤlm	99	99	99	99	99	99	99	99	99
A, m <sup>2</sup>	5	12,3	24,7	37	49,3	74	98,6	148	246
Κόστος, κ€	6	11,1	17,8	23,5	28,6	37,7	45,8	60,4	85,3
Προθερμαντής Αέρα									
Q, Kw	2,78	7	13,9	21	28	42	55,5	83	139
ΔΤlm	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4	19,4
A, m <sup>2</sup>	4,77	12	24	36	47,7	72	95,5	146	243
Κόστος, κ€	11,7	18,9	27,3	35,8	39,2	48,6	56,4	70,5	92,2

Η κοστολόγηση του καυστήρα έγινε επίσης σύμφωνα με τον κανόνα 0,7 και τη σχέση :

$$C_{bur} = C_o \times \left(\frac{Q_r}{Q'_r}\right)^{0.7} \quad 61.$$

όπου  $C_{bur}$  το κόστος του καυστήρα [€], σύμφωνα με την θερμότητα, που παράγεται από τις αντιδράσεις καύσης στον καυστήρα ( $Q_r$  σε kW),  $C_o$  το κόστος αναφοράς του καυστήρα για παραγόμενη θερμότητα  $Q'_r = 199,58$  kW [Trendewicz et al., 2013].

**Πίνακας 18.** Κόστος καυστήρα για τις διάφορες δυναμικότητες

Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
Κόστος κ€	38,9	73,9	120,1	159,5	195,1	259,2	317	421	602

**Πίνακας 19.** Κόστη αναφοράς των επιμέρους διατάξεων της μονάδας παραγωγής υδρογόνου.

Καυστήρας	31.688 € [Trendewicz et al., 2013]
Καθαρισμός νερού	30.000 € [T. Ramsden and D. Steward]
Συστήματα Ρύθμισης	40.000 € [T. Ramsden and D. Steward]
Κατασκευή	230.000 € [T. Ramsden and D. Steward]
Διάφορα	90.000 € [T. Ramsden and D. Steward]

Η κοστολόγηση της κυψέλης έγινε σύμφωνα με την επιφάνεια με βάση την σχέση:

$$C_{\text{fuel cell}} = 2.5474 \cdot A - 0.06606 \quad [\text{Trendewicz et al., 2013}]$$

62.

όπου A η επιφάνεια της κυψέλης σε m<sup>2</sup>

**Πίνακας 20.** Κοστολόγηση κυψέλης για τις δυναμικότητες που εξετάστηκαν

Δυναμικότητα, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
Κόστος κ€	255	638	1258	1914	2552	3828	5105	7657	12763

Τα κόστη αναφοράς των επιμέρους διατάξεων της μονάδας παραγωγής υδρογόνου, που λήφθηκαν από βιβλιογραφία, φαίνονται στον Πίνακα 19.

Στον Πίνακα 22. παρουσιάζεται η συνολική αρχική επένδυση (σε εκατομμύρια €) της μονάδας παραγωγής βιοαερίου (χωρίς CHP), της μονάδας παραγωγής υδρογόνου και της μονάδας συμπαραγωγής με κινητήρα diesel, με τη μεταβολή της παραγωγής βιοαερίου.

**Πίνακας 21.** Μεταβολή του κόστους των επιμέρους διατάξεων παραγωγής υδρογόνου

Δυναμικότητα μονάδας, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1.000	1.500	2.000	3.000	5.000
Παραγωγή H <sub>2</sub> , kg/day	301	752	1504	2256	3008	4512	6015	9023	15039
<b>Καυστήρας</b>									
Θερμότητα αντιδράσεων, MW	-0,28	-0,71	-1,42	-2,13	-2,84	-4,26	-5,68	-8,53	-14,22
Κόστος Καυστήρα, Κ€	40,6	77,1	125,3	166,4	203,5	270,3	330,6	439	627,8
<b>Καθαρισμός νερού</b>									
Κόστος Καθαρισμού νερού, Κ€	9,87	17,1	25,9	33	39,3	50,1	59,5	75,9	103
<b>Συστήματα Ρύθμισης</b>									
Συστήματα Ρύθμισης, Κ€	13,2	22,8	34,5	44,1	52,4	66,8	79,4	101	138
<b>Κατασκευή</b>									
Κατασκευαστικά, Κ€	75,6	131	199	253	301	384	456	582	791
<b>Διάφορα</b>									
Διάφορα, Κ€	29,6	51,3	77,2	99,1	117,8	150,3	178,6	227,8	309,4



Τα ετήσια λειτουργικά κόστη της μονάδας συμπαραγωγής (ΣΗΘ) και της μονάδας παραγωγής υδρογόνου υπολογίστηκαν από το Κ.Α.Π.Ε. και διακρίνονται σε:

- Δαπάνες προσωπικού
- Δαπάνες για επισκευή και συντήρηση συμπεριλαμβανομένου και του (CHP)
- Κόστος ασφάλισης (ασφάλιση πυρκαγιάς, ασφάλιση μηχανημάτων)
- Κόστη κινήσεως μέσα στη μονάδα (καύσιμα, ελαστικά, ενοικίαση κλαρκ, κ.α.)
- Κόστος πρώτων υλών (κόστος αραβοσίτου ενσίρωσης)
- Επιπλέον ηλεκτρική Ενέργεια [kWh] (μόνο για τη μονάδα παραγωγής υδρογόνου)

Οι δαπάνες προσωπικού περιλαμβάνουν τα λειτουργικά κόστη (μισθοδοσία), το κόστος διοίκησης και τις λοιπές δαπάνες προσωπικού (έξοδα για μετακίνηση και σίτιση προσωπικού). Τα λειτουργικά κόστη προσωπικού υπολογίζονται με βάση τη σχέση:

$$15.000 \times \left( \frac{\text{Παραγόμενη Ηλεκτρική Ισχύς από ΣΗΘ}}{300} \right) \quad [€] \quad 63.$$

όπου θεωρούμε ότι η ετήσια αποζημίωση ανά εργαζόμενο είναι 15.000 € και ο ρυθμός αύξησης εργαζομένων στη μονάδα είναι 1 εργαζόμενος ανά 300 kW παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύς. Στην μονάδα παραγωγής υδρογόνου, όπου δεν έχουμε παραγόμενη ηλεκτρική ισχύ, ο υπολογισμός του λειτουργικού κόστους γίνεται με βάση το ποσοστό του ως προς το συνολικό κόστος της αρχικής επένδυσης της μονάδας συμπαραγωγής (CHP) επί το κόστος της αρχικής επένδυσης της ολοκληρωμένης μονάδας υδρογόνου.

Το διοικητικό κόστος είναι ίσο με 30.000 €, ανεξάρτητα της δυναμικότητας της μονάδας, ενώ οι λοιπές δαπάνες προσωπικού συναρτώνται από το ίδιο Πρότυπο με την παροχή πρώτης ύλης στη μονάδα (1€/tn) και μεταβάλλονται μόνο με αλλαγή στη δυναμικότητα της μονάδας.

Επίσης, στις δαπάνες προσωπικού συνυπολογίζεται το κόστος της απαιτούμενης ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας υδρογόνου.

**Πίνακας 22.** Αρχική Επένδυση με τη μεταβολή της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου

Δυναμικότητα μονάδας m <sup>3</sup> /h,	100	250	500	750	1.000	1.500	2.000	3.000	5.000
Μονάδα Παραγωγής Υδρογόνου, Μ€	0,57	1,19	2,1	3,01	3,87	5,53	7,16	10,28	16,36
Μονάδα Συμπαραγωγής, Μ€	0,15	0,37	0,69	1,01	1,32	1,92	2,5	3,63	5,8
Μονάδα Παραγωγής Βιοαερίου, Μ€	0,56	1,31	2,48	3,6	4,69	6,82	8,88	12,89	20,64

Συνολικά, οι Δαπάνες προσωπικού αυξάνονται με σταθερό ρυθμό 2 % (πληθωρισμός) κάθε χρόνο.

Στην βάση του ίδιου Προτύπου, υπολογίστηκαν οι Δαπάνες για επισκευή και συντήρηση συμπεριλαμβανομένου και του CHP, οι οποίες συναποτελούνται από τις δαπάνες για επισκευή και συντήρηση της μονάδας βιοαερίου και τις δαπάνες για επισκευή και συντήρηση του συστήματος

CHP. Οι πρώτες, υπολογίζονται ως το άθροισμα του: 2 % του κατασκευαστικού κόστους, 6 % του κόστους αγορά των μηχανημάτων και 4 % του κόστους ηλεκτρονικού εξοπλισμού ανεξαρτήτως του χρόνου και της δυναμικότητας, ενώ οι άλλες υπολογίζονται με βάση τη σχέση:

$$0,01 \text{ €/kWh} \times \text{ηλεκτρική ενέργεια προς πώληση [kWh]} \quad 64.$$

Το άθροισμα των επιμέρους αυτών δαπανών, λαμβάνοντας υπόψη και τον ετήσιο πληθωρισμό (2%), αποτελεί τις συνολικές δαπάνες για επισκευή και συντήρηση της μονάδας συμπαραγωγής συμπεριλαμβανομένου και του συστήματος ΣΗΘ. Στη μονάδα παραγωγής υδρογόνου, όπου δεν έχουμε ηλεκτρική ενέργεια προς πώληση, οι δαπάνες επισκευής και συντήρησης του συστήματος CHP αντικαθίστανται από αυτές για την επισκευή και συντήρηση του συστήματος παραγωγής υδρογόνου, που αναλύθηκε στην προσομοίωση.

Αυτές υπολογίζονται με βάση το ποσοστό της δαπάνης επισκευής και συντήρησης του CHP ως προς το κόστος συστήματος συμπαραγωγής επί το αντίστοιχο κόστος του συστήματος παραγωγής υδρογόνου του Σχήματος 2.

Στον Πίνακα 5 και 4 του Παραρτήματος II παρουσιάζονται οι δαπάνες για επισκευή και συντήρηση για το υποσύστημα της μονάδας υδρογόνου και της συμπαραγωγής, αντίστοιχα, με τη μεταβολή του χρόνου και της παραγωγής βιοαερίου. Το κόστος ασφάλισης της μονάδας, που είναι μία σταθερή δαπάνη και αποτελεί το 1 % της αρχικής χρηματικής επένδυσης, φαίνεται στον Πίνακα 8 του Παραρτήματος II. Το κόστος κίνησης, δηλαδή τα έξοδα ανεφοδιασμού και συντήρησης οχημάτων μεταφοράς (κλαρκ, γερανοί, κ.α.) μέσα στη μονάδα, υπολογίστηκαν με βάση την τροφοδοσία αραβοσίτου ενσίρωσης:

$$\frac{60 \text{ €}}{\text{tn αραβοσίτου ενσίρωσης}} \times (1/2) \times (3/60) \times \text{tn αραβοσίτου ενσίρωσης} \quad 65.$$

Στον Πίνακα 9 του Παραρτήματος II φαίνεται το κόστος κίνησης με τη μεταβολή της παραγωγής του βιοαερίου και για τις δύο μονάδες. Τέλος το κόστος πρώτων υλών θεωρείται ότι δεν μεταβάλλεται με το χρόνο παρά μόνο με την αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου:

$$\frac{28 \text{ €}}{\text{tn αραβοσίτου ενσίρωσης}} \times \text{tn αραβοσίτου ενσίρωσης} \quad 66.$$

Όσον αφορά την επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας υδρογόνου, το αναλυτικό κόστος της βασίστηκε πάνω στο βιομηχανικό τιμολόγιο της Δ.Ε.Η. του Πίνακα 1 του Παραρτήματος II. Το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από τη χρέωση ισχύος (Χ.ΙΣΧΥΟΣ, €/kW/έτος) και από την χρέωση ενέργειας (Χ.ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, €/kWh). Η χρέωση Ενέργειας είναι 0,06083 €/kWh για τις εργάσιμες μέρες όλο το έτος και για ζώνη ώρας από 7:00 έως 23:00, ενώ μεταβάλλεται στα 0,05003 €/kWh για όλες τις ώρες του Σαββατοκύριακου και των αργιών του έτους και για τις εργάσιμες για ζώνη ώρας από 23:00 έως 7:00. Η Χρέωση ισχύος υπολογίζεται επί της χρεωστέας ζήτησης (XZ):

$$XZ = MZ \times A \times \Sigma.ΠΡΣ \quad 67.$$

όπου MZ ωριαία μέγιστη ζήτηση στις εργάσιμες μεταξύ 7:00 και 23:00 (θεωρούμε ότι είναι σταθερή ανεξαρτήτως του χρόνου και ίση με την ηλεκτρική απαίτηση της μονάδας [kW] σε κάθε

δυναμικότητα) , A η αναλογική χρέωση των ημερών =  $\frac{\text{ημέρες πραγματικής κατανάλωσης}}{30}$  (θεωρείται ίση με 1) και Σ.ΠΡΣ είναι:

$$(1-\text{ΣΥΝΤ.ΧΡΗΣ/ΣΗΣ}) \times 1,7 + 0,1 \quad 68.$$

όπου:

$$\text{ΣΥΝΤ.ΧΡΗΣ/ΣΗΣ} = \frac{\text{Συνολική Κατανάλωση Περιόδου}}{\text{KMZ} \times 24 \times \text{ημέρες κατανάλωσης}} \quad 69.$$

και KMZ η ωριαία μέγιστη ζήτηση οποιαδήποτε ώρα ημέρας ή νύχτας της περιόδου κατανάλωσης (θεωρείται ίση με τη MZ).

### **Πίνακας 23.** Ετήσια έσοδα μονάδας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο.

Δυναμικότητα μονάδας, m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1.000	1.500	2.000	3.000	5.000
Υδρογόνο, Μ€	0.57	1.19	2.1	3.01	3.87	5.53	7.16	10.28	16.36

Τα ετήσια έσοδα της μονάδας συμπαραγωγής (ΣΗΘ) με κινητήρα diesel περιλαμβάνουν τα έσοδα από την πώληση της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας της παραγόμενης θερμικής ενέργειας.

Η τιμή πώλησης της θερμικής ενέργειας είναι 0,04 €/kWh, ενώ η τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας καθορίζεται από τη ηλεκτροπαραγωγική δυναμικότητα της συμβατικής μονάδας συμπαραγωγής: (α) από 0 – 1 MW : 0,22 €/kWh , (β) από 1 – 3 MW : 0,20 €/kWh και (γ) από 3 MW και περισσότερο : 0,18 €/kWh [N. 3851/2010].

Τα ετήσια έσοδα για τη συμβατική μονάδα συμπαραγωγής είναι σταθερά και ανεξάρτητα με το χρόνο. Στον Πίνακα 24 παρουσιάζονται τα έσοδα της μονάδας ΣΗΘ με τη μεταβολή της παραγωγής βιοαερίου.

Για τη μονάδα παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, τα έσοδα καθορίζονται από την ποσότητα (m<sup>3</sup>) και από την τιμή (€/m<sup>3</sup>) του υδρογόνου, που πωλείται καθώς και από την ποσότητα θερμικής ενέργειας συμπαραγωγής (η τιμή πώλησης θερμικής ενέργειας είναι 0,04 €/kWh και παραμένει σταθερή ανεξάρτητα της δυναμικότητας της μονάδας). Τα έσοδα από την πώληση του υδρογόνου υπολογίσθηκαν με βάση τα 2 οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης επενδύσεων που αναφέρθηκαν:

#### **1<sup>ο</sup> Κριτήριο : Καθαρή Παρούσα Αξία (Net Present Value)**

Υπολογίζεται η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης κατασκευής συμβατικής μονάδας συμπαραγωγής για τα επόμενα 15 έτη και για όλες τις δυναμικότητες παραγωγής βιοαερίου, με προεξοφλητικό επιτόκιο 5,5 %. Για την κάθε τιμή του NPV της συμβατικής μονάδας, εξάγεται η τιμή πώλησης του υδρογόνου στη μονάδα παραγωγής υδρογόνου για την αντίστοιχη δυναμικότητα.

Με αυτόν τον τρόπο υπολογίζουμε την τιμή υδρογόνου [€/m<sup>3</sup>], για την οποία η επένδυση της κατασκευής μονάδας παραγωγής υδρογόνου θα έχει το ίδιο οικονομικό αποτέλεσμα (σύμφωνα με το 1<sup>ο</sup> κριτήριο) με αυτήν της συμβατικής μονάδας συμπαραγωγής από βιοαέριο.

#### **2<sup>ο</sup> Κριτήριο : Εσωτερικός Επιτόκιο Επιστροφής (Internal Rate of Return)**

Υπολογίζεται το επιτόκιο, με το οποίο εξισώνεται η καθαρή παρούσα αξία των χρηματικών ροών με το αρχικό κεφάλαιο της συμβατικής μονάδας συμπαραγωγής για κάθε δυναμικότητα. Με βάση αυτό το επιτόκιο εξάγεται η τιμή πώλησης του υδρογόνου στη μονάδα παραγωγής

υδρογόνου από βιοαέριο.

**Πίνακας 24.** Ετήσια έσοδα συμβατικής μονάδας συμπαραγωγής από βιοαέριο (CHP).

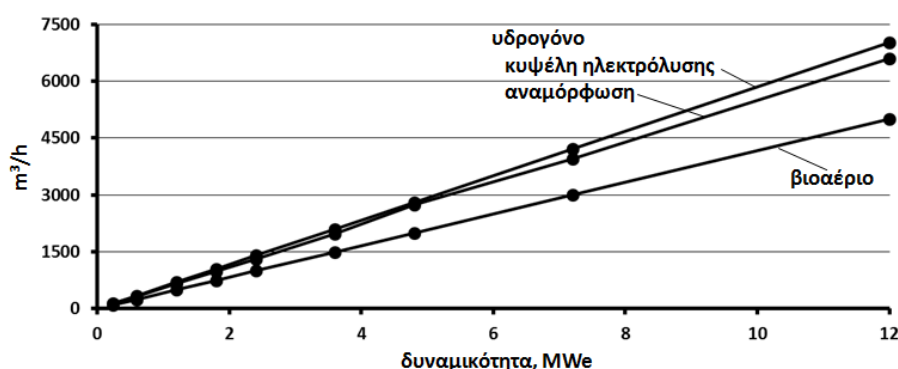
<b>Δυναμικότητα μονάδας, m<sup>3</sup>/h</b>	<b>100</b>	<b>250</b>	<b>500</b>	<b>750</b>	<b>1.000</b>	<b>1.500</b>	<b>2.000</b>	<b>3.000</b>	<b>5.000</b>
Ηλεκτρική Ενέργεια, Μ€	0,40	0,90	1,93	2,57	3,25	4,87	6,50	9,75	16,3
Θερμική Ενέργεια , Μ€	0,074	0,18	0,37	0,55	0,74	1,11	1,48	2,22	3,70

Στον Πίνακα 2 του Παραρτήματος II παρουσιάζονται αναλυτικά οι καθαρές αθροιστικές χρηματικές ροές της συμβατικής μονάδας συμπαραγωγής για 15 χρόνια και για δυναμικότητες από 100 – 5000 m<sup>3</sup>/h, καθώς και ο υπολογισμός του NPV, του POT και του IRR, κριτήρια, με τα οποία αξιολογήθηκε η οικονομική βιωσιμότητα της μονάδας παραγωγής υδρογόνου. Τα αναμενόμενα έσοδα της μονάδας παραγωγής υδρογόνου έγιναν με βάση το 2<sup>ο</sup> κριτήριο αξιολόγησης επενδύσεων (IRR). Στον Πίνακα του Παραρτήματος III παρουσιάζεται η τιμή πώλησης του υδρογόνου ανάλογα με τα οικονομικά κριτήρια, που εφαρμόστηκαν, ενώ στον Πίνακα 23 φαίνονται τα έσοδα της μονάδας υδρογόνου (σταθερά με το χρόνο) με τη μεταβολή παραγωγής βιοαερίου.

## 4. Αποτελέσματα και Συζήτηση

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε η τεχνικο-οικονομική μελέτη της παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο με ηλεκτρόλυση στερεών οξειδίων. Μια άλλη μέθοδος της παραγωγής υδρογόνου είναι η αναμόρφωση του μεθανίου, η μέθοδος αυτή έχει αναλυθεί σε προηγούμενη διπλωματική εργασία [Βασίλης Κουβίδης] και παρακάτω γίνεται μια σύγκριση των δύο αυτών μεθόδων.

Στο Σχήμα 5 φαίνεται η μεταβολή στην παραγωγή υδρογόνου και βιοαερίου ανάλογα με την αύξηση της δυναμικότητας ηλεκτροπαραγωγής της συμβατικής μονάδας συμπαραγωγής. Παρατηρείται ότι, για κάθε  $m^3$  βιοαερίου, που απαιτείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος παράγονται  $1,4 m^3$  υδρογόνου στη μονάδα παραγωγής υδρογόνου. Σύμφωνα με την αντίδραση  $CH_4 + 2H_2O \leftrightarrow CO_2 + 4H_2$  παράγονται 4 mol υδρογόνου, για κάθε mol μεθανίου. Λαμβάνοντας υπόψη ότι το 27 % του βιοαερίου τροφοδοτείται στον καυστήρα, ενώ το υπόλοιπο 73 % περιέχει 60 % μεθάνιο, καθώς και ότι οι μετατροπές στην κυψέλη καυσίμου είναι 80 %, αντίστοιχα, προκύπτουν τα αποτελέσματα του Σχήματος 5.



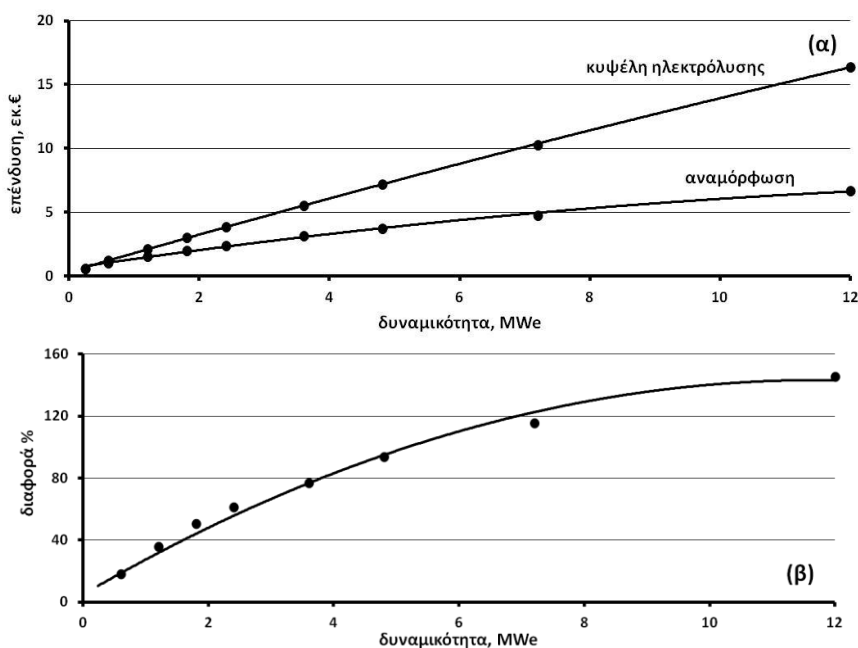
**Σχήμα 5.** Μεταβολή της παραγωγής βιοαερίου και υδρογόνου μέσω ηλεκτρόλυσης και αναμόρφωσης, με την αύξηση της δυναμικότητας της μονάδας, εκφρασμένης ως προς την ηλεκτρική δυναμικότητα της συμβατικής μονάδας συμπαραγωγής.

Από ενεργειακής άποψης η ΚΘΔ του παραγόμενου βιοαερίου της συμβατικής μονάδας είναι της τάξης των  $21,5 MJ/m^3$ , ενώ από κάθε  $m^3$  βιοαερίου παράγονται  $1,4 m^3 H_2$  με ΚΘΔ  $14,5 MJ$ . Αυτό σημαίνει ότι η διεργασία της επί τόπου μετατροπής του βιοαερίου σε υδρογόνο οδηγεί σε απώλειες ενεργειακού περιεχομένου του προϊόντος της τάξης του 30 %, λόγω της μερικής καύσης του παραγόμενου βιοαερίου και της μερικής μετατροπής του μεθανίου, που περιέχεται στο υπόλοιπο.

Στο Σχήμα 5 γίνεται επίσης μια σύγκριση της παραγωγής υδρογόνου μέσω της κυψέλης ηλεκτρόλυσης στερεών οξειδίων και μέσω αναμόρφωσης μεθανίου με τους αντίστοιχους αντιδραστήρες αναμόρφωσης και μετατόπισης υδραερίου. Η διεργασία της ηλεκτρόλυσης φαίνεται να είναι πιο αποδοτική από αυτήν της αναμόρφωσης καθώς όπως φαίνεται και στο σχήμα το υδρογόνο που παράγεται κατά την ηλεκτρόλυση είναι κατά 6 % περισσότερο.

Στο Σχήμα 6 (α) απεικονίζεται το κόστος της αρχικής επένδυσης της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με αναμόρφωση και της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση, με τη μεταβολή της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου από  $100 m^3/h$  ( $240 kW_e$ ) έως  $5.000 m^3/h$  ( $12MW_e$ ). Από το σχήμα φαίνεται ότι το επενδυτικό κόστος της μονάδας παραγωγής υδρογόνου

με ηλεκτρόλυση είναι μεγαλύτερο για όλες τις δυναμικότητες παραγωγής βιοαερίου. Η μονάδα με την κυψέλη ηλεκτρόλυσης έχει μεγαλύτερη αρχική επένδυση και όσο αυξάνεται η δυναμικότητα αυξάνεται και η διαφορά των δύο επενδύσεων. Η διαφορά αυτή οφείλεται στο γεγονός πως οι κυψέλες καυσίμου είναι διατάξεις με υψηλή απόδοση και υψηλό κόστος.

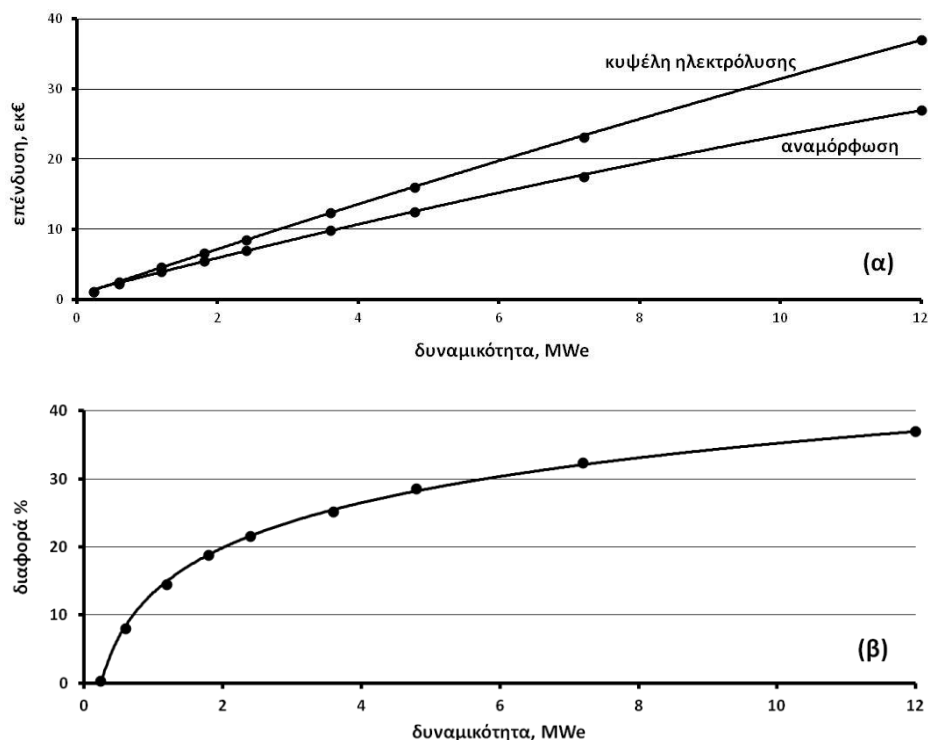


**Σχήμα 6.** Μεταβολή (α) του κόστους αρχικής επένδυσης, της μονάδας παραγωγής υδρογόνου από αναμόρφωση και της μονάδας παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρόλυση και (β) της ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο επενδύσεων, με την αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου από 100 m<sup>3</sup>/h (240 kW<sub>e</sub>, για μονάδα συμπαραγωγής) έως 5.000 m<sup>3</sup>/h (12 MW<sub>e</sub>, για μονάδα συμπαραγωγής).

Στο Σχήμα 7 παρουσιάζεται η μεταβολή στην αρχική επένδυση του ολοκληρωμένου συστήματος παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο μέσω αναμόρφωσης και μέσω ηλεκτρόλυσης με την αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου. Από το σχήμα φαίνεται ότι, για την ολοκληρωμένη μονάδα παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο η αρχική επένδυση του συστήματος με την ηλεκτρόλυση είναι μεγαλύτερη σε σχέση με αυτήν της αναμόρφωσης για όλες τις δυναμικότητες. Το ολοκληρωμένο σύστημα περιλαμβάνει την μονάδα παραγωγής βιοαερίου και την μονάδα παραγωγής υδρογόνου. Για το ολοκληρωμένο σύστημα η διαφορά των επενδύσεων είναι πολύ μικρότερη από ότι των συστημάτων παραγωγής υδρογόνου αφού και για τις δύο μονάδες το κόστος της μονάδας παραγωγής βιοαερίου είναι το ίδιο.

Το εύρος της αρχικής επένδυσης, για το σύστημα παραγωγής υδρογόνου με αναμόρφωση κυμαίνεται από 1,13 εκ. € έως 27 εκ. € για δυναμικότητες 100 m<sup>3</sup>/h και 5000 m<sup>3</sup>/h, ενώ για το σύστημα παραγωγής με ηλεκτρόλυση από 1,13 εκ. € έως 37 εκ. € για τις αντίστοιχες δυναμικότητες. Η διαφορά αυτή στην αρχική επένδυση οφείλεται στο γεγονός πως η κυψέλη καυσίμου καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της αρχικής επένδυσης από 22,5 % μέχρι 34,5 %.

Το υψηλό αυτό κόστος της κυψέλης καυσίμου δικαιολογείται για την υψηλή της απόδοση στην παραγωγή υδρογόνου.

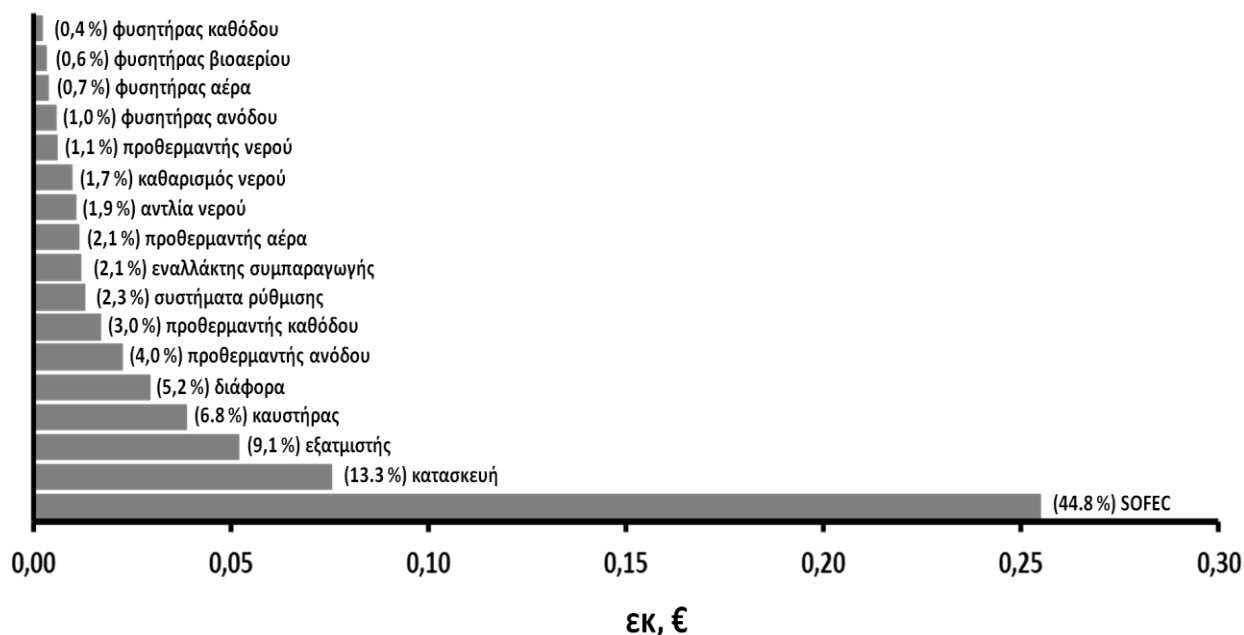


**Σχήμα 7.** Μεταβολή α) του αρχικού κόστους της ολοκληρωμένης μονάδας παραγωγής υδρογόνου μέσω αναμόρφωσης και του αντίστοιχου συστήματος μέσω ηλεκτρόλυσης και β) της ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο επενδύσεων με την αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου από 100 m<sup>3</sup>/h έως 5.000 m<sup>3</sup>/h.

Στο Σχήμα 8 φαίνεται η κατανομή αρχικού κόστους κατασκευής της ολοκληρωμένης διεργασίας του Σχήματος 4, για δυναμικότητα βιοαερίου 100 m<sup>3</sup>/h, ενώ η μεταβολή του αρχικού κόστους της ίδιας μονάδας με τη δυναμικότητα παριστάνεται στο Σχήμα 6α. Από το Σχήμα 8 φαίνεται ότι η κατασκευή αντιστοιχεί στο 13,3 % του ολικού κόστους, το κόστος της κυψέλης καυσίμων στο 44,8 % του συνολικού κόστους και το κόστος του συστήματος εναλλακτών, για τη διαχείριση της θερμότητας στη μονάδα (οι προθερμαντές ανόδου, καθόδου, νερού, αέρα και ο εξατμιστής με τον εναλλάκτη συμπαραγωγής) στο 19 %.

Στο Σχήμα 9 (α) φαίνεται το συνολικό ετήσιο λειτουργικό κόστος (για το 1<sup>ο</sup> έτος λειτουργίας<sup>1</sup>) της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση σε σχέση με την μονάδα της αναμόρφωσης με βάση την αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου, από 100 m<sup>3</sup>/h έως και 5000 m<sup>3</sup>/h. Τα λειτουργικά έξοδα των μονάδων αποτελούνται από το κόστος πρώτων υλών καθώς και από τις δαπάνες προσωπικού, το κόστος συντήρησης και επισκευής του, το κόστος ασφάλισης, το κόστος κίνησης και τις λοιπές δαπάνες προσωπικού. Η αύξηση των λειτουργικών δαπανών με την αύξηση της δυναμικότητας ηλεκτροπαραγωγής οφείλεται στη συνάρτηση των λειτουργικών εξόδων με την παραγόμενη ποσότητα βιοαερίου και την ηλεκτρική δυναμικότητα.

Το πρότυπο εκτίμησης της οικονομικής βιωσιμότητας μονάδων βιοαερίου, του Κ.Α.Π.Ε.Ε. [www.big-east.eu] ενσωματώνει μια κλιμάκωση με το χρόνο, των επιμέρους ετήσιων λειτουργικών εξόδων, με βάση μια τιμή ετήσιου πληθωρισμού ίση με 2 %.



**Σχήμα 8.** Διάρθρωση του κόστους της μονάδας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για δυναμικότητα παραγωγής βιοαερίου 100 m<sup>3</sup>/h (240 kW<sub>e</sub>, για μονάδα συμπαγωγής).

Συγκεκριμένα, το κόστος πρώτων υλών και οι λοιπές δαπάνες προσωπικού αυξάνονται με την παροχή του βιοαερίου, οι δαπάνες προσωπικού, οι δαπάνες για επισκευή και συντήρηση του συστήματος αυξάνονται με την παραγωγή υδρογόνου στη μονάδα, το κόστος κίνησης αυξάνεται με την παραγωγή βιοαερίου, ενώ το κόστος ασφάλισης συναρτάται μόνο με την αρχική επένδυση της μονάδας. Όσον αφορά τη μεταβολή των λειτουργικών δαπανών των μονάδων παραγωγής υδρογόνου του Σχήματος 9 (β), η μονάδα ηλεκτρόλυσης έχει μεγαλύτερο κόστος λειτουργικών από την μονάδα αναμόρφωσης.

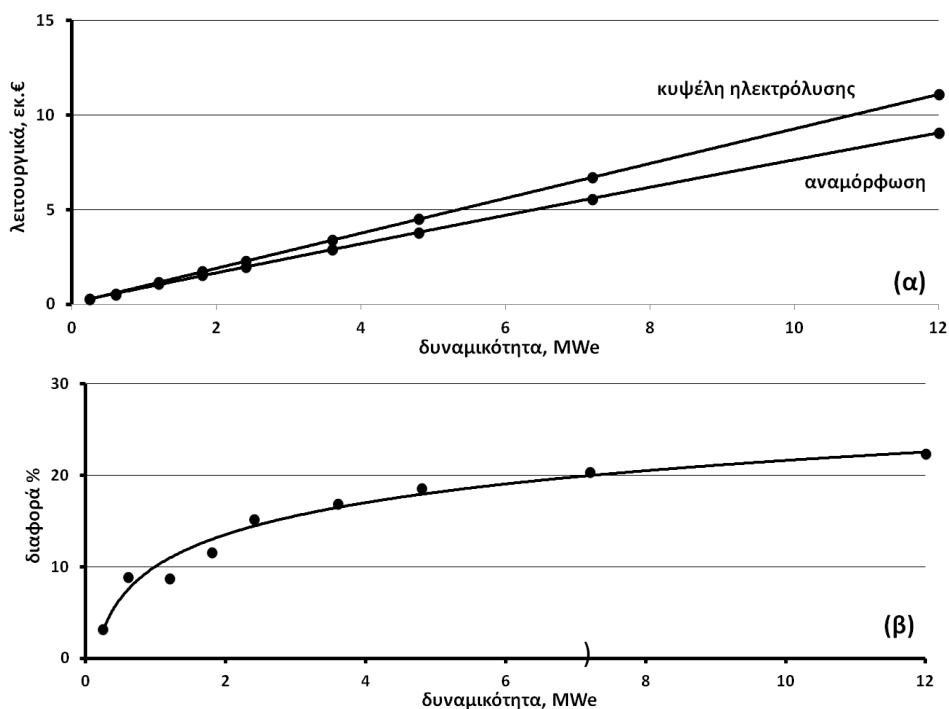
Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα λοιπά λειτουργικά έξοδα συγκαταλέγεται το επιπλέον κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας για την κάλυψη των αναγκών της μονάδας παραγωγής υδρογόνου, καθώς επίσης και στο γεγονός ότι το κόστος του συστήματος παραγωγής υδρογόνου επιβαρύνει το κόστος της αρχικής επένδυσης, με το οποίο συσχετίζονται οι δαπάνες προσωπικού, οι δαπάνες για συντήρηση και επισκευή και το κόστος ασφάλισης της μονάδας. Η μονάδα της αναμόρφωσης διαθέτει και έναν ατμοστρόβιλο ο οποίος παράγει ηλεκτρική ενέργεια και έτσι η επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια που αγοράζεται για την μονάδα της αναμόρφωσης είναι σαφώς λιγότερη από αυτήν της μονάδας ηλεκτρόλυσης.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει μια σύγκριση των δύο μεθόδων παραγωγής υδρογόνου όσον αφορά τα επιμέρους επενδυτικά κόστη. Όπως φαίνεται και στον πίνακα 25 το σύστημα των φουσητήρων κυμαίνεται στο ίδιο περίπου κόστος όπως και ο καυστήρας. Η κύρια διαφορά των δύο μεθόδων έχει να κάνει με την αντικατάσταση των αντιδραστήρων αναμόρφωσης και μετατόπισης υδραερίου και του συστήματος PSA από την κυψέλη καυσίμου. Η μέθοδος με την κυψέλη ηλεκτρόλυσης έχει μεγαλύτερο επενδυτικό κόστος αλλά οδηγεί και σε μεγαλύτερη παραγωγή υδρογόνου.

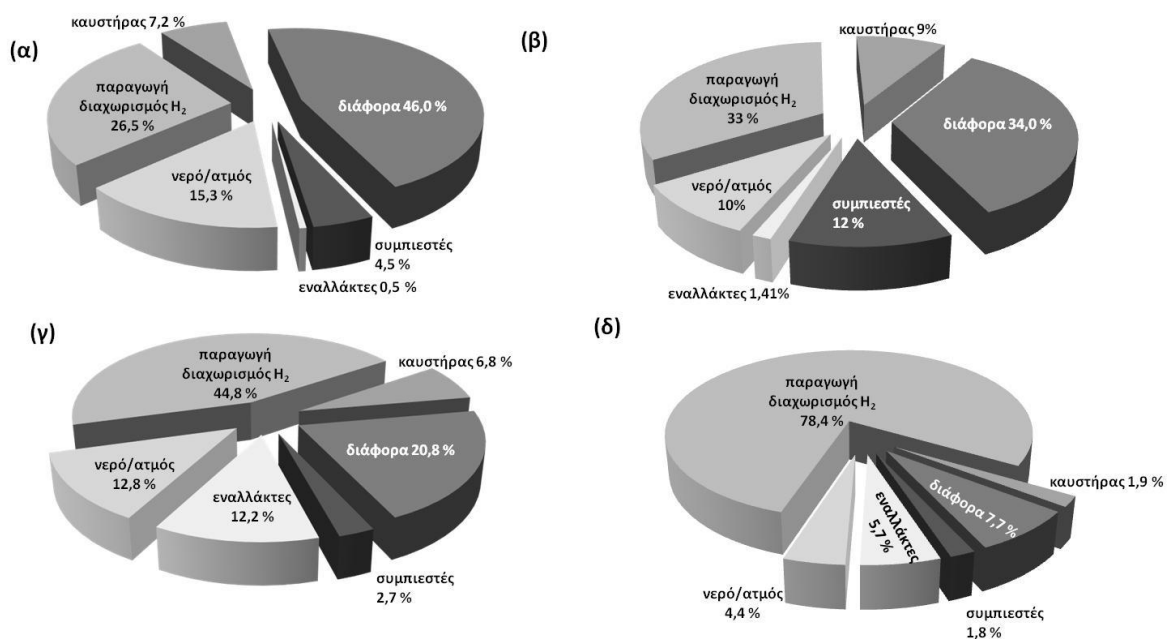


Η αντίδραση της αναμόρφωσης διεξάγεται σε υψηλή πίεση και για αυτό το λόγο χρησιμοποιείται στην πρώτη μέθοδο ένας συμπιεστής. Το σύστημα θέρμανσης της πρώτης μεθόδου αποτελείται μόνο από έναν εναλλάκτη ενώ της άλλης μεθόδου από πέντε. Στην διεργασία με αναμόρφωση μεθανίου έχουμε και έναν ατμοστρόβιλο για την παραγωγή ηλεκτρικής ισχύος ενώ στο σύστημα της ηλεκτρόλυσης όχι.

Το σύστημα αντλίας και εξάτμιση του νερού έχει περίπου την ίδια τιμή με μόνη διαφορά ότι στην διεργασία αναμόρφωσης χρησιμοποιείται ένας επιπλέον εξατμιστής. Τα υπόλοιπα επενδυτικά κόστη κατασκευή, συστήματα ρύθμισης, διάφορα και καθαρισμός του νερού είναι το ίδιο και για τις δύο μονάδες.



**Σχήμα 9.** Μεταβολή α) του ετήσιου λειτουργικού κόστους, της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με αναμόρφωση και με ηλεκτρόλυση και (β) της ποσοστιαίας διαφοράς μεταξύ των δύο επενδύσεων, με την αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου από 100 m<sup>3</sup>/h (240 kW<sub>e</sub>, για μονάδα συμπαραγωγής) έως 5.000 m<sup>3</sup>/h (12 MW<sub>e</sub>, για μονάδα συμπαραγωγής).



**Σχήμα 10.** Ανάλυση της αρχικής επένδυσης α) της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με αναμόρφωση για δυναμικότητα βιοαερίου 100 m<sup>3</sup>/h β) της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με αναμόρφωση για δυναμικότητα βιοαερίου 5000 m<sup>3</sup>/h γ) της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση για δυναμικότητα βιοαερίου 100 m<sup>3</sup>/h και δ) της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση για δυναμικότητα βιοαερίου 5000 m<sup>3</sup>/h

**Πίνακας 25.** Σύγκριση του επιμέρους επενδυτικού κόστους (κ€) των δύο μονάδων παραγωγής υδρογόνου.

Υδρογόνο από αναμόρφωση		Υδρογόνο από ηλεκτρόλυση	
Φυσητήρας βιοαερίου	2,04	Φυσητήρας βιοαερίου	3,37
Φυσητήρας αέρα	2,11	Φυσητήρας αέρα	3,88
Φυσητήρας ανακύκλωσης	2,06	Φυσητήρας ανόδου	5,74
		Φυσητήρας καθόδου	2,36
Συμπιεστής βιοαερίου	19,51		
Καυστήρας	40,60	Καυστήρας	38,93
Αναμορφωτής	69,43	SOFEC	255,00
αντιδραστήρας μετατόπισης	57,86		
PSA	23,01		
Υπερθερμαντής	2,95	Προθερμαντής ανόδου	22,60
		Προθερμαντής καθόδου	17,00
		Εναλλάκτης συμπαραγωγής	12,10
		Προθερμαντής αέρα	11,70
		Προθερμαντής νερού	6,00
1ος βραστήρας στροβίλου	63,18		
Ατμοστρόβιλος	33,53		

Εναλλάκτης ψύξης	45,64		
Αντλία νερού	9,30	Αντλία νερού	10,80
Εξατμιστής	17,45	Εξατμιστής	52,00
Ψύκτης βιοαερίου – εξατμιστής	49.941		
Καθαρισμός νερού	9,86	Καθαρισμός νερού	9,87
Συστήματα ρύθμισης	13,15	Συστήματα ρύθμισης	13,20
Κατασκευή	75,62	Κατασκευή	75,60
Διάφορα	29,59	Διάφορα	29,60
ΜΟΝΑΔΑΣ Η <sub>2</sub>	566,90	ΜΟΝΑΔΑΣ Η <sub>2</sub>	535,56
ΜΟΝΑΔΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ (εκτός CHP)	564,378	ΜΟΝΑΔΑ ΒΙΟΑΕΡΙΟΥ (εκτός CHP)	564,387

Όπως φαίνεται και στο σχήμα η κυψέλη καυσίμου καταλαμβάνει το μεγαλύτερο ποσοστό της αρχικής επένδυσης 44,8 % για την μικρότερη δυναμικότητα και 78,4 % για την μεγαλύτερη δυναμικότητα. Το σύστημα για την παραγωγή και τον διαχωρισμό του υδρογόνου στην μονάδα της αναμόρφωσης καταλαμβάνει από 26,8 % μέχρι 33 %. Τα διάφορα για την μονάδα της αναμόρφωσης κοστίζουν περισσότερο λόγω του ατμοστροβίλου που δεν υπάρχει στην μονάδα της ηλεκτρόλυσης. Το κόστος των συμπιεστών για την μονάδα της αναμόρφωσης είναι μεγαλύτερο διότι η μονάδα της ηλεκτρόλυσης περιλαμβάνει μόνο φυσητήρες. Για το σύστημα θέρμανσης των δύο μονάδων, το σύστημα της ηλεκτρόλυσης χρησιμοποιεί περισσότερους εναλλάκτες από αυτό της αναμόρφωσης οπότε έχει και μεγαλύτερο κόστος. Ο καυστήρας και το σύστημα νερού ατμού κυμαίνεται στο ίδιο περίπου επίπεδο και για τις δύο μονάδες.

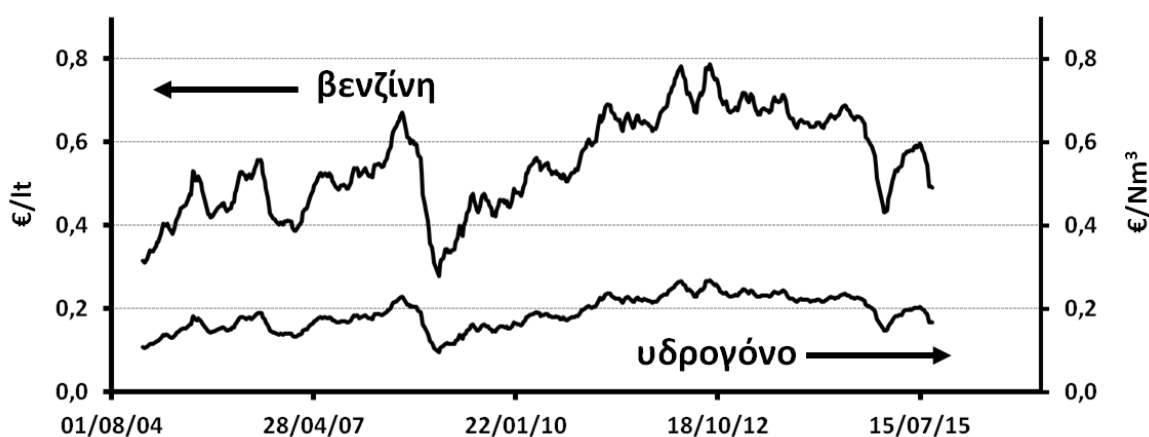
Με βάση όλα τα παραπάνω διαγράμματα καταλήγουμε στα εξής συμπεράσματα. Πρώτον η διεργασία της κυψέλης ηλεκτρόλυσης στερεών οξειδίων οδηγεί σε μεγαλύτερη απόδοση (70 %) έναντι της διεργασίας αναμόρφωσης με τους αντιδραστήρες αναμόρφωσης και μετατόπισης υδραερίου (66%). Το υδρογόνο που παράγεται με την ηλεκτρόλυση είναι 6 % παραπάνω από αυτό της αναμόρφωσης. Δεύτερον η αρχική επένδυση της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση είναι υψηλότερη από αυτήν της αναμόρφωσης για όλες τις δυναμικότητες εκτός από την πρώτη που είναι περίπου ίσες. Ένα επιπλέον έσοδο για την μονάδα παραγωγής υδρογόνου με αναμόρφωση είναι η πώληση της θερμικής ενέργειας, η οποία δεν διατίθεται στην μονάδα της ηλεκτρόλυσης.

Στο Σχήμα 11 παρουσιάζεται η μεταβολή του κόστους της βενζίνης (€/lt) προ φόρων από το 2005 έως σήμερα και το αντίστοιχο δυνητικό κόστος του υδρογόνου (€/Nm<sup>3</sup>) ως καύσιμο, με βάση τη θερμογόνο δύναμη των δύο καυσίμων (44,4 MJ/kg βενζίνης και 0,0108 MJ/lt υδρογόνου), έτσι ώστε το κόστος ανά MJ θερμογόνου δύναμης, να είναι το ίδιο και για τα δυο καύσιμα. Ο υπολογισμός του δυνητικού κόστους του υδρογόνου έγινε με βάση τη σχέση:

$$\frac{C_{\text{gas}}}{\rho \times \text{LHV}} \times \frac{\Delta H_{\text{react}}}{22,4 \text{ L}} \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} = C_{\text{H}_2} \quad 68.$$

Όπου  $C_{\text{gas}}$  η τιμή της βενζίνης [€/m<sup>3</sup>],  $\rho$  η πυκνότητα της βενζίνης [726 kg/m<sup>3</sup>], LHV η κατώτερη θερμογόνο δύναμη της βενζίνης,  $\Delta H_{\text{react}}$  η ενθαλπία σχηματισμού του νερού (0,2418 MJ/mol) και  $C_{\text{H}_2}$  η τιμή του υδρογόνου [€/m<sup>3</sup>].

Όπως προκύπτει από τα δεδομένα του Σχήματος 11 (Πίνακα ? του Παραρτήματος ΙΙΙ), το ισοδύναμο (με βάση το ενεργειακό του περιεχόμενο) εύρος της τιμής του υδρογόνου, για το οποίο θα μπορούσε να ανταγωνιστεί εμπορικά τη βενζίνη, κυμάνθηκε την τελευταία δεκαετία από 0,095 €/lt έως 0,27 €/lt, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη ότι οι κινητήρες υδρογόνου (με κυψέλες καύσιμου) αναμένεται να έχουν έως και διπλάσια απόδοση σε σχέση με τους συμβατικούς κινητήρες βενζίνης. Αν η αναμενόμενη αυτή διαφορά στην απόδοση ληφθεί υπόψη, τότε η τιμή του υδρογόνου ως καύσιμο μεταφορών θα μπορούσε να είναι ακόμη και διπλάσια.



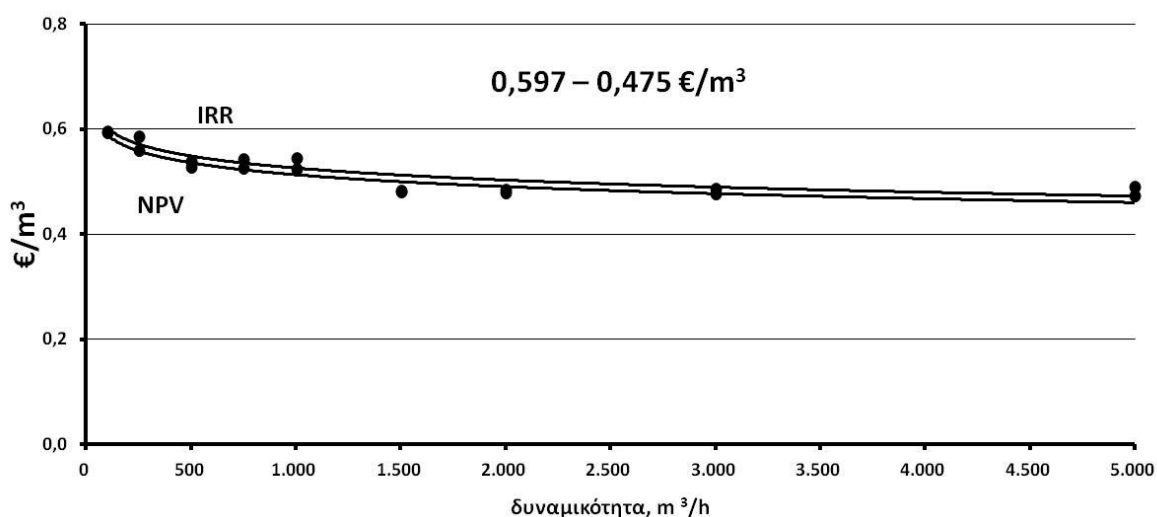
**Σχήμα 11.** Μεταβολή του κόστους της βενζίνης προ φόρων (στην έξοδο του διυλιστηρίου), από το 2005 έως σήμερα και το αντίστοιχο δυνητικό κόστος του υδρογόνου ως καύσιμο, με βάση το θερμικό περιεχόμενο των δύο καυσίμων.

Με βάση τα παραπάνω, το Σχήμα 12 δείχνει την μεταβολή στην τιμή διάθεσης του παραγόμενου υδρογόνου σε μονάδα επί τόπου παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο με ηλεκτρόλυση, έτσι ώστε η τελευταία να παρουσιάζει τα ίδια οικονομικά αποτελέσματα με την μονάδα παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο με αναμόρφωση σύμφωνα με τα τρία κριτήρια, με τα οποία αξιολογήθηκε η επένδυση, δηλαδή την Καθαρή Παρούσα Αξία (NPV), τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR) και τον Χρόνο Αποπληρωμής (POT). Όπως φαίνεται στο σχήμα, η τιμή διάθεσης του υδρογόνου μειώνεται με την αύξηση της δυναμικότητας, για όλα τα οικονομικά κριτήρια που χρησιμοποιήθηκαν. Αυτό συμβαίνει λόγω της αναλογικής μείωσης του ειδικού κόστους των παραγωγικών συντελεστών της μονάδας υδρογόνου (αρχικό κόστος επένδυσης, λειτουργικά κόστος) με την αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου (αύξουσες αποδόσεις κλίμακας).

Επίσης, παρατηρείται ότι για το κριτήριο του Εσωτερικού Βαθμού Απόδοσης, η τιμή διάθεσης του υδρογόνου είναι υψηλότερη σε σχέση με αυτήν, που υπολογίσθηκε από το κριτήριο της Καθαρής Παρούσας Αξίας. Αυτό οφείλεται στη διαφορετική φύση των κριτηρίων αξιολόγησης με τα οποία υπολογίσθηκαν οι τιμές του υδρογόνου, καθώς το IRR εξαρτάται από τα κέρδη, που αποφέρει η μονάδα ετησίως, λαμβάνοντας υπόψη την αύξηση του ύψους της αρχικής επένδυσης με την αύξηση της δυναμικότητας, ενώ το NPV εξαρτάται περισσότερο από τις ετήσιες κερδοφορίες, παρά το γεγονός ότι οι κερδοφορίες αυτές ενδέχεται να απαιτούν συγκριτικά πολύ υψηλή αρχική επένδυση. Συγκεκριμένα, το μέγιστο εύρος της τιμής διάθεσης υδρογόνου, λαμβάνοντας υπόψη αυτά τα κριτήρια, είναι από 0,597 (0,24 MW<sub>e</sub>) έως 0,475 €/m<sup>3</sup> (12 MW<sub>e</sub>).

Με εξαίρεση τις πολύ μικρές μονάδες (παραγωγή βιοαερίου έως 250 m<sup>3</sup>/h ή ισοδύναμη ηλεκτροπαραγωγή έως 600 Kw<sub>e</sub>), η τιμή διάθεσης του υδρογόνου έτσι ώστε η μονάδα επί-τόπου παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση να επιτυγχάνει τις ίδιες τιμές των κριτηρίων οικονομικής

βιωσιμότητας, με τη μονάδα παραγωγής υδρογόνου με αναμόρφωση, βρίσκεται μέσα στην περιοχή 0,6 – 0,50 €/m<sup>3</sup>, δηλαδή στην περιοχή, στην οποία σήμερα οι μικρές και κατακεκομμένες μονάδες παραγωγής υδρογόνου από φυσικό αέριο, διαθέτουν την παραγωγή τους. Αυτό σημαίνει ότι η επί-τόπου παραγωγή υδρογόνου από βιοαέριο είναι οικονομικά ανταγωνιστική με την κατακεκομμένη παραγωγή υδρογόνου από φυσικό αέριο, σύμφωνα με την βιβλιογραφία [SUDOE-INTEREG V, 2010].



**Σχήμα 12.** Μεταβολή της τιμής διάθεσης του παραγόμενου υδρογόνου, έτσι ώστε η μονάδα παραγωγής υδρογόνου με ηλεκτρόλυση να παρουσιάζει τα ίδια οικονομικά αποτελέσματα με τη μονάδα παραγωγής με αναμόρφωση, όπως τα αποτελέσματα αυτά εκφράζονται από την Καθαρή Παρούσα Αξία Εγχειρήματος (NPV) και τον Εσωτερικό Βαθμό Απόδοσης (IRR).

Από το σχήμα επίσης φαίνεται ότι η τιμή αυτή, από μικρές κατακεκομμένες μονάδες, είναι περίπου διπλάσια της ισοδύναμης (με βάση το ενεργειακό περιεχόμενο) τιμής του υδρογόνου ως καύσιμο, αν από την τελευταία δεν ληφθούν υπόψη οι ακραίες τιμές της (κυρίως οι ακραία χαμηλές – στην περιοχή των 0,10 – 0,15 €/N m<sup>3</sup> – οι οποίες και αντιστοιχούν, σύμφωνα με το σχήμα αυτό της βενζίνης στις πολύ χαμηλές τιμές βενζίνης και αργού, οι οποίες είναι δύσκολο να επαναληφθούν στο μέλλον). Φαίνεται δηλαδή ότι, λαμβάνοντας υπόψη το γεγονός ότι το υδρογόνο θα χρησιμοποιηθεί σε ηλεκτροκινητήρες με κυψέλες καύσιμου, διπλάσιας σχεδόν απόδοσης από αυτή των συμβατικών βενζινοκινητήρων, οι τιμές διάθεσης του υδρογόνου από μικρές κατακεκομμένες μονάδες (συμπεριλαμβανόμενες αυτές με βιοαέριο) θα ήταν ισοδύναμη με το κόστος της καύσιμης βενζίνης σήμερα.

## 5. Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία μελετήθηκε η τεχνική και η οικονομική βιωσιμότητα της επί-τόπου μετατροπής του βιοαερίου σε υδρογόνο, στις μονάδες παραγωγής του πρώτου. Η μελέτη αρχικά περιέλαβε το σχεδιασμό και την προσομοίωση του υποσυστήματος μετατροπής του βιοαερίου σε υδρογόνο και στη συνέχεια την αναλυτική κοστολόγηση του. Σε μια υποτιθέμενη μονάδα ένα τέτοιο σύστημα (Σχήμα 4) θα υποκαθιστούσε το σύστημα συμπαραγωγής ηλεκτρικής και θερμικής ισχύος, των συμβατικών μονάδων συμπαραγωγής από βιοαέριο αλλά και το σύστημα της παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο μέσω αναμόρφωσης. Έτσι, για την οικονομική αξιολόγηση χρησιμοποιήθηκε το πρότυπο αξιολόγησης της συμβατικής συμπαραγωγής από βιοαέριο [www.big-east.eu], στο οποίο το σύστημα συμπαραγωγής είχε υποκατασταθεί από το σύστημα μετατροπής του βιοαερίου σε υδρογόνο με τη μέθοδο της ηλεκτρόλυσης στερεών οξειδίων.

Όσον αφορά στα σχεδιαστικά χαρακτηριστικά της υπό-μονάδας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, η προσομοίωση έδειξε ότι, σύμφωνα με τη διαδεδομένη πρακτική, το 27 % του βιοαερίου θα πρέπει να καεί σε καυστήρα, προκειμένου να καλυφθούν οι ενεργειακές απαιτήσεις της κυψέλης ηλεκτρόλυσης για την παραγωγή του υδρογόνου. Σε συνθήκες ατμοσφαιρικής πίεσης και στις συνήθεις θερμοκρασίες λειτουργίας των εμπορικών κυψέλων (700 – 900°C), το 80 % του μεθανίου που τροφοδοτείται μετατρέπεται σε υδρογόνο (1,4 mol H<sub>2</sub> ανά mol βιοαερίου στην είσοδο της διεργασίας). Η άνοδος της κυψέλης τροφοδοτείται με ένα μίγμα του διαχωρισμένου βιοαερίου μαζί με κάποια ποσότητα ατμού. Η κάθοδος από ένα ρεύμα ατμού που περιέχει και λίγο υδρογόνο. Τα ρεύματα εισέρχονται σε 973°C και εξέρχονται στους 800°C. Από το ρεύμα της καθόδου και μετά από το πέρασμά του από έναν εναλλάκτη προκύπτει το προϊόν υδρογόνο στους 35 °C. Το υπόλοιπο μίγμα ανατροφοδοτείται στον καυστήρα για την καύση των συστατικών του και την ανάκτηση της θερμότητας δύναμης που περιέχουν. Η κυψέλη καυσίμου περιλαμβάνει περίπου το 50 % της αρχικής επένδυσης, το άλλο μισό κατανέμεται στον καυστήρα, στους εναλλάκτες και σε άλλα διάφορα.

Για την αύξηση της θερμοκρασίας του προϊόντος στα επίπεδα που απαιτείται για την λειτουργία της κυψέλης, η μονάδα του Σχήματος 4 περιλαμβάνει δίκτυο 4 εναλλακτών, το συνολικό κόστος των οποίων αντιστοιχεί επίσης στο 12,2 % του συνολικού της κόστους. Επίσης, η ίδια μονάδα περιλαμβάνει τους απαραίτητους φυσητήρες (για την αύξηση της πίεσης έτσι ώστε να υπερνικηθούν οι μετέπειτα πτώσεις πίεσης) και την αντλία παροχής του νερού για την ηλεκτρόλυση. Η θερμότητα των απερίων και η θερμότητα που απάγεται από τον προθερμαντή του νερού τροφοδοτείται για την κάλυψη των θερμικών αναγκών της αναερόβιας χώνευσης, για την παραγωγή του βιοαερίου.

Από την αναλυτική κοστολόγηση της υπό-μονάδας του Σχήματος 4, προέκυψε ότι το υποσύστημα μετατροπής του βιοαερίου σε υδρογόνο με ηλεκτρόλυση είναι από 0 έως 142 % ακριβότερο από το σύστημα παραγωγής υδρογόνου, το οποίο υποκαθιστά, με την απόκλιση στο κόστος των δυο συστημάτων να αυξάνεται με την αύξηση της δυναμικότητας, λόγω των ισχυρότερων οικονομιών κλίμακας, της μονάδας παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρόλυση σε σχέση με την αναμόρφωση.

Κάτι τέτοιο ήταν αναμενόμενο γιατί οι κυψέλες καυσίμου παρουσιάζουν σχεδόν γραμμική αύξηση του κόστους τους με τη δυναμικότητα, ενώ τα περισσότερα στοιχεία κόστους της μονάδας της αναμόρφωσης, ακολουθούν κλιμάκωση του κόστους τους με βάση τον κανόνα του 0,6 (ή του 0,7). Έτσι, για τη μικρότερη μονάδα που εξετάστηκε (100 m<sup>3</sup>/h βιοαερίου) η υποκατάσταση της παραγωγής από μονάδα παραγωγής υδρογόνου ηλεκτρόλυσης βρέθηκε να μειώνει το συνολικό κόστος της ολοκληρωμένης διεργασίας κατά 0,25% (από 1,14 εκ. € σε 1,134 εκ. € για επί-τόπου παραγωγή υδρογόνου), ενώ για τη μεγαλύτερη μονάδα που εξετάστηκε (5000 m<sup>3</sup>/h βιοαερίου) η ίδια υποκατάσταση επιβαρύνει την αρχική επένδυση κατά 37 % (από 27 εκ. € για συμβατική συμπαραγωγή σε 37 εκ. € για επί-τόπου παραγωγή υδρογόνου) – βλ. Σχήμα 6.

Για την αξιολόγηση της οικονομικής βιωσιμότητας της επένδυσης χρησιμοποιήθηκαν τρία οικονομικά κριτήρια: η Καθαρή Παρούσα Αξία, το Εσωτερικό επιτόκιο επιστροφής και η Περίοδος αποπληρωμής, όπως αυτά υπολογίζονται από το πρότυπο εκτίμησης της οικονομικής βιωσιμότητας μονάδας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο μέσω αναμόρφωσης, του Βασίλη Κουβίδη. Αρχικά, υπολογίστηκαν οι τιμές των κριτηρίων αυτών για τη συμβατική μονάδα συμπαραγωγής από βιοαέριο, σε όλο το εύρος δυναμικότητων παραγωγής βιοαερίου, που εξετάστηκε. Οι τιμές των κριτηρίων, για τις μονάδες συμπαραγωγής, επηρεάζονται καθοριστικά από το ύψος της τιμής πώλησης της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας, το οποίο καθορίζεται από το νόμο 3851/2010. Για το σύνολο των δυναμικότητων που εξετάστηκαν, οι τιμές των κριτηρίων του εσωτερικού βαθμού απόδοσης και του χρόνου αποπληρωμής ήταν ιδιαίτερα ενθαρρυντικές για σχετικές επενδύσεις.

Έτσι ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης κυμάνθηκε από 42,87 – 56% και ο χρόνος αποπληρωμής μεταξύ των 1,9 και των 2,5 ετών. Στα πλαίσια της γενικά πολύ καλής εικόνας, για την οικονομική αποτελεσματικότητα των σχετικών επενδύσεων, η εφαρμογή των παραπάνω κριτηρίων έδειξε ότι οι μικρές μονάδες (έως 1 MW<sub>e</sub>) είναι σχετικά πιο αποτελεσματικές των μονάδων μέσης (1 – 3 MW<sub>e</sub>) και μεγάλης (> 3 MW<sub>e</sub>) δυναμικότητας. Αυτό συμβαίνει γιατί στην πρώτη περιοχή μικρών δυναμικότητων, ο νόμος 3851/2010 καθορίζει την τιμή διάθεσης της παραγόμενης ενέργειας στα 220 €/MWh, ενώ στα δυο επόμενα διαστήματα δυναμικότητων, στα 200 και στα 180 € / MWh, αντίστοιχα. Έτσι, στις χαμηλές δυναμικότητες, η τιμή του εσωτερικού βαθμού απόδοσης κυμάνθηκε από 42,87 έως 56 % και στις δυο επόμενες από 49 έως 53,66 % και από 46,76 έως 53,63 %, ενώ, όσον αφορά το χρόνο αποπληρωμής, για τη περιοχή μικρών δυναμικότητων αυτό βρέθηκε να είναι μεταξύ 2,5 και 1,9 ετών και στις δυο επόμενες περιοχές από 2,18 έως 1,98 και από 2,28 έως 1,98 έτη. Σε κάθε περιοχή δυναμικότητας (ανάλογα με την τιμή πώλησης της ηλεκτρικής ενέργειας), οι τιμές των κριτηρίων βελτιώνονταν με την αύξηση της.

Όσον αφορά τις ολοκληρωμένες μονάδες παραγωγής βιοαερίου και επί-τόπου μετατροπής του σε υδρογόνο, η μελέτη εστίασε στην εκτίμηση της τιμής στην οποία μία τέτοια μονάδα θα έπρεπε να διαθέτει το παραγόμενο υδρογόνο, έτσι ώστε να επιτυγχάνει τις ίδιες τιμές των παραπάνω οικονομικών κριτηρίων με τη μονάδα συμπαραγωγής από βιοαέριο, της ίδιας δυναμικότητας (Σχήμα 12). Έτσι, για μονάδες μικρής δυναμικότητας (έως 1 MW<sub>e</sub>) οι τιμές διάθεσης του παραγόμενου υδρογόνου, για την επίτευξη των ιδίων οικονομικών αποτελεσμάτων με τις αντίστοιχες συμβατικές, ήταν από 0,593 €/m<sup>3</sup> έως 0,529 €/m<sup>3</sup>, με βάση το κριτήριο της καθαρής παρούσας αξίας, από 0,597 €/m<sup>3</sup> έως 0,540 €/m<sup>3</sup>, με βάση το κριτήριο του εσωτερικού βαθμού απόδοσης.

Αντίστοιχα, για τις μονάδες μέσης δυναμικότητας (1 – 3 MW<sub>e</sub>), οι τιμές αυτές ήταν από 0,526 €/m<sup>3</sup> έως 0,524 €/ m<sup>3</sup>, με βάση το κριτήριο της καθαρής παρούσας αξίας, από 0,543 €/ m<sup>3</sup> έως 0,545 €/ m<sup>3</sup>, με βάση το κριτήριο του εσωτερικού βαθμού απόδοσης. Για τις μονάδες μεγάλης δυναμικότητας (> 3 MW<sub>e</sub>) οι τιμές ήταν από 0,482 €/m<sup>3</sup> έως 0,475 €/m<sup>3</sup>, με βάση το κριτήριο της καθαρής παρούσας αξίας, από 0,484 €/ m<sup>3</sup> έως 0,492 €/m<sup>3</sup>, με βάση το κριτήριο του εσωτερικού βαθμού απόδοσης.

Γενικά οι τιμές διάθεσης του υδρογόνου, για την επίτευξη των ιδίων τιμών των οικονομικών κριτηρίων, με τη συμβατική παραγωγή μέσω αναμόρφωσης, ελαττώνονταν με τη δυναμικότητα (Σχήμα 12) λόγω, τόσο των οικονομικών κλίμακας για την αρχική επένδυση των εγκαταστάσεων, που είναι ισχυρότερες στην περίπτωση της επί-τόπου παραγωγής υδρογόνου (Σχήμα 6 και 7), όσο και του γεγονότος ότι ο νόμος 3851/2010 υποβαθμίζει τα οικονομικά των μεσαίων και μεγάλων μονάδων, εξαιτίας της βαθμιδωτής ελάττωσης της τιμής διάθεσης της ηλεκτρικής ενέργειας που επιφέρει. Επίσης, από το Σχήμα 12 φαίνεται ότι οι τιμές διάθεσης του υδρογόνου, που υπολογιστήκαν με βάση το κριτήριο του εσωτερικού βαθμού απόδοσης είναι υψηλότερες, με βάση το κριτήριο της καθαρής παρούσα αξίας, σε μικρές δυναμικότητες (σε μεγάλες δυναμικότητες οι τιμές που υπολογιστήκαν με βάση και τα δύο κριτήρια τείνουν να συμπίπτουν).

Οι τιμές αυτές, στο μεγαλύτερο μέρος των δυναμικοτήτων που εξεταστήκαν και με εξαίρεση μονό τις πολύ μικρές μονάδες, βρίσκονται μέσα στην περιοχή των 0,5 – 0,6 €/ m<sup>3</sup> υδρογόνου, τιμή στην οποία, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία [SUDOE-INTEREG V, 2010], διαθέτουν το υδρογόνο οι μικρές καταναμημένες μονάδες παραγωγής υδρογόνου από φυσικό αέριο, ισοσταθμίζοντας σε κάποια έκταση το κόστος αποθήκευσης και διανομής, των κεντρικών μονάδων παραγωγής υδρογόνου από φυσικό αέριο ή αέρια διυλιστηρίων, που κυριαρχούν στην παράγωγη του υδρογόνου, σήμερα. Το κόστος παραγωγής του υδρογόνου στις κεντρικές μονάδες παραγωγής του είναι 3 – 5 φορές χαμηλότερο (0,05 – 0,1 €/m<sup>3</sup>), κόστος που δεν φαίνεται να μπορούν άμεσα να το προσεγγίσουν τόσο οι μονάδες καταναμημένης παραγωγής υδρογόνου είτε από φυσικό αέριο είτε από βιοαέριο.

Στην προοπτική, όμως, μαζικής μελλοντικής χρήσης του υδρογόνου ως καύσιμο μεταφορών, και αντιστοιχίζοντας την τιμή του με την τρέχουσα τιμή της βενζίνης στην έξοδο των διυλιστηρίων και προ φορών, το υδρογόνο θα μπορούσε να διατίθεται στην τιμή 0,10 – 0,27 €/m<sup>3</sup>, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη το γεγονός ότι οι κινητήρες υδρογόνου, με βάση τις κυψέλες καύσιμου, μπορούν να παρουσιάζουν έως και διπλάσιες αποδόσεις σε σχέση με αυτές των συμβατικών βενζινοκινητήρων. Έτσι, αν και το παραπάνω διάστημα τιμών φαίνεται να υπολείπεται της τιμής που θα πρέπει να διαθέτουν το υδρογόνο οι μονάδες επιτόπου παραγωγής του από βιοαέριο, αν ληφθεί υπόψη η υψηλότερη απόδοση κινητήρων υδρογόνου, τότε οι μονάδες αυτές θα μπορούσαν να είναι μια οικονομικά ενδιαφέρουσα λύση, ενώ και το υδρογόνο από βιοαέριο θεωρείται ανανεώσιμο καύσιμο, σε αντίθεση με το υδρογόνο από φυσικό αέριο. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι, τα οικονομικά των μονάδων συμπαραγωγής από βιοαέριο (Σχήμα 3) είναι ιδιαίτερα θετικά, λόγω των τιμών που εξασφαλίζει ο νόμος 3851/2010 για την ηλεκτροπαραγωγή από βιοαέριο.

Αυτό, με βάση τη θεώρηση η επί-τόπου παράγωγη υδρογόνου να ανταγωνιστεί οικονομικά τη συμπαραγωγή, στο πλαίσιο του ίδιου νόμου, παρασύρει τις τιμές διάθεσης του υδρογόνου, από μια τέτοια μονάδα, προς τα επάνω. Έτσι, οι τιμές υδρογόνου του Σχήματος 13 είναι τέτοιες ώστε,



ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης να είναι της τάξης του 40 – 55 % (χρόνοι αποπληρωμής 2 – 3 έτη), ενώ οικονομικά βιώσιμη θα μπορούσε να χαρακτηριστεί μια επένδυση με βαθμό απόδοσης 20 – 30 % (χρόνο αποπληρωμής 5 – 6 έτη). Άρα, η απαιτούμενη τιμή διάθεσης του παραγόμενου υδρογόνου από βιοαέριο θα μπορούσε να είναι αισθητά (έως ακόμα και 50 %) χαμηλότερη, και να συνέπιπτε με τις τιμές του υδρογόνου ως καύσιμο μεταφορών (και των αντίστοιχων της βενζίνης), χωρίς μάλιστα να λαμβάνεται υπόψη η υψηλότερη αποδόσεων κινητήρων υδρογόνου με κυψέλες καυσίμου.

## 6. Βιβλιογραφία

- S. Giddey, A. Kulkarni, S.P.S. Badwal, "Low emission hydrogen generation through carbon assisted electrolysis" (2015).
- Srikanth Gopalan , Guosheng Ye, Uday B. Pal, "Regenerative, coal-based solid oxide fuel cell-electrolyzers"(2016).
- Joel Martinez-Frias, Ai-Quoc Pham, Salvador M. Aceves], "A natural gas-assisted steam electrolyzer for high-efficiency production of hydrogen "(2001).
- Libin Lei , Yao Wang, Shumin Fang , Cong Ren , Tong Liu, Fanglin Chen, "Efficient syngas generation for electricity storage through carbon gasification assisted solid oxide co-electrolysis" (2016).
- M.A. Laguna-Bercero, "Recent advances in high temperature electrolysis using solid oxide fuel cells: A review"(2012) .
- Wensheng Wang, Raymond J. Gorte, John M. Vohs, "Analysis of the performance of the electrodes in a natural gas assisted steam electrolysis cell" (2008).
- Alexander Buttler , Roman Koltun , Romano Wolf, Hartmut Spliethoff, "A detailed techno-economic analysis of heat integration in high temperature electrolysis for efficient hydrogen production"(2015) .
- Vikram Menon , Vinod M. Janardhanan , Olaf Deutschmann , "A mathematical model to analyze solid oxide electrolyzer cells(SOECs) for hydrogen production" (2014).
- Vikram Menon , Qingxi Fu, Vinod M. Janardhanan , Olaf Deutschmann, "A model-based understanding of solid-oxide electrolysis cells (SOECs) for syngas production by H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> co-electrolysis"(2015) .
- Meng Ni, Michael K.H. Leung, Dennis Y.C. Leung, "Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC)" (2013).
- Yaneeporn Patcharavorachot , Sirapa Thongdee , Dang Saebea , Suthida Authayanun , Amornchai Arpornwichanop, "Performance comparison of solid oxide steam electrolysis cells with/without the addition of methane" (2014).
- Liu Mingyi, Yu Bo, Xu Jingming, Chen Jing, "Thermodynamic analysis of the efficiency of high-temperature steam electrolysis system for hydrogen production" (2009) .
- Yu Luo, Yixiang Shi, Wenying Li, Ningsheng Cai, "Comprehensive modeling of tubular solid oxide electrolysis cell for co-electrolysis of steam and carbon dioxide" (2014).
- D. Klotz, A. Leonide, A. Weber , E. Ivers-Tiff, "Electrochemical model for SOFC and SOEC mode predicting performance and efficiency"(2016) .
- Yao Wang, Tong Liu, Shumin Fang, Guoliang Xiao, Huanting Wang, Fanglin Chen, "A novel clean and effective syngas production system based on partial oxidation of methane assisted solid oxide co-electrolysis process" (2014).
- G. Cinti, G. Bidini, K. Hemmes, "An experimental investigation of fuel assisted electrolysis as a function of fuel and reactant Utilization" (2008).
- Wensheng Wang Z John M. Vohs Z Raymond J. Gorte, "Hydrogen Production Via CH<sub>4</sub> and CO Assisted Steam Electrolysis" (2007).
- Yu Luo, Yixiang Shi, Wenying Li, Meng Ni, Ningsheng Cai, "Elementary reaction modeling and experimental characterization of solid oxide fuel-assisted steam electrolysis cells" (2014).

- BIGEAST (2008) Πρότυπο Υπολογιστικό Φύλλο Οικονομικής Αξιολόγησης Μονάδων Παραγωγής Βιοαερίου του Κ.Α.Π.Ε.Ε.
- [www.big-east.eu/downloads/IR-reports/\\_\\_\\_ANNEX%202-40\\_WP4\\_D4.1\\_Master-Handbook-Economy-Calculation-Tool.xls](http://www.big-east.eu/downloads/IR-reports/___ANNEX%202-40_WP4_D4.1_Master-Handbook-Economy-Calculation-Tool.xls)
- A.A. Trendewicz, R.J. Braun. “Techno-economic analysis of solid oxide fuel cell-based combined heat and power systems for biogas utilization at wastewater treatment facilities” in: Journal of Power Sources (2015).
- P. Kolbitsch, C. Pfeifer, H. Hofbauer, “Catalytic steam reforming of model biogas” (2008).
- D. Hotza, J.C.D. Da Costa, “Fuel cells development and hydrogen production from renewable resources in Brazil” (2008).

## Παράρτημα 1

Θερμοκρασίες, πιέσεις, μαζικές παροχές και αισθητές θερμότητες, των ρευμάτων του διαγράμματος ροής της διεργασίας του Σχήματος 4.

**Πίνακας Ι1 . Χαρακτηριστικά ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για παροχή 100 m<sup>3</sup>/h.**

	Ρεύμα 1	Ρεύμα 2	Ρεύμα 3	Ρεύμα 4	Ρεύμα 5	Ρεύμα 6	Ρεύμα 7	Ρεύμα 8	Ρεύμα 9
<b>P, kPa</b>	101,325	103,325	103,325	103,325	100,325	99,33	103,325	101,325	103,325
<b>T, °C</b>	37	37,91	37,91	509,12	973,8	800	801,2	37	722,6
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	0,744	0,744	0,543	0,543	0,543	-	-	0,201	0,201
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,445	0,445	0,325	0,325	0,325	0,868	0,868	0,12	0,988
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,029	0,029	0,021	1,48	1,48	2,14	2,14	0,008	2,148
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,002	0,006
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,002
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	0,001	0,001	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	-	-	0,002	0,002
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	0,434	0,434	0,002	0,435
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	1,24	1,24	0,905	2,364	2,364	3,448	3,448	0,335	3,783

	Ρεύμα 10	Ρεύμα 11	Ρεύμα 12	Ρεύμα 13	Ρεύμα 14	Ρεύμα 15	Ρεύμα 16	Ρεύμα 17	Ρεύμα 18
<b>P, kPa</b>	101,325	101,325	100,325	101,325	101,325	801,325	601,325	601,325	601,325
<b>T, °C</b>	1362,5	1321,5	1146,4	253	110	45,4	60,4	60,4	60,4
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	1,91	1,91	1,91	1,91	1,91	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	3,033	3,033	3,033	3,033	3,033	42,315	42,315	3,582	38,73
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	2,795	2,795	2,795	2,795	2,795	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,126	0,126	0,126	0,126	0,126	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	7,151	7,151	7,151	7,151	7,151	42,315	42,315	3,582	38,73
<b>Q, kW</b>	375,3	362,3	307,2	59,6	19,9	65,54	113,68	9,6	104

	Ρεύμα 19	Ρεύμα 20	Ρεύμα 21	Ρεύμα 22	Ρεύμα 23	Ρεύμα 24	Ρεύμα 25	Ρεύμα 26	Ρεύμα 27
<b>P, kPa</b>	401,325	591,325	591,325	591,325	103,325	101,325	99,325	99,325	99,325
<b>T, °C</b>	73,8	850	850	850	845,3	973,8	800	800	800
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	38,7	3,582	1,459	2,123	2,176	2,176	0,435	0,382	0,053
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	0,242	0,242	1,982	1,741	0,242
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	38,7	3,582	1,459	2,123	2,417	2,417	2,417	2,123	0,295
<b>Q, kW</b>	143	101,7	45,5	66,2	73,3	86,4	57,9	51	7,07

	Ρεύμα 28	Ρεύμα 29	Ρεύμα 30	Ρεύμα 31	Ρεύμα 32	Ρεύμα 33	Ρεύμα 34	Ρεύμα 35	Ρεύμα 36	Ρεύμα 37
<b>P, kPa</b>	103,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	103,325	401,325
<b>T, °C</b>	801,2	60	35	35	47	45	25	44,3	47,88	47
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,001	0,001	0,001	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,053	0,382	0,278	0,104	38,73	42,6	0,046	0,046	0,046	38,73
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	2,78	2,78	2,78	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,75	0,75	0,75	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,242	1,741	1,741	1,741	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,03	0,03	0,03	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	0,295	2,123	2,123	1,844	38,73	42,6	3,587	3,587	3,587	38,73
<b>Q, kW</b>	7,08	2,78	0,75	0,75	62	65	0	2,03	2,41	64,73

**Πίνακας Ι2. Χαρακτηριστικά ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για παροχή βιοαερίου 250 m<sup>3</sup>/h**

	<b>Ρεύμα 1</b>	<b>Ρεύμα 2</b>	<b>Ρεύμα 3</b>	<b>Ρεύμα 4</b>	<b>Ρεύμα 5</b>	<b>Ρεύμα 6</b>	<b>Ρεύμα 7</b>	<b>Ρεύμα 8</b>	<b>Ρεύμα 9</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	103,325	103,325	103,325	100,325	99,33	103,325	101,325	103,325
<b>T, °C</b>	37	37,91	37,91	509,12	973,8	800	801,2	37	722,6
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	1,86	1,86	1,36	1,36	1,36	0	0	0,502	0,502
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	1,11	1,11	0,813	0,813	0,813	2,17	2,17	0,301	2,471
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,073	0,073	0,053	3,7	3,7	5,35	5,35	0,02	5,37
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,016	0,016	0,011	0,011	0,011	0,012	0,012	0,004	0,016
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	-	-	0,002	0,006
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	0,002	0,002	0,001	0,002	0,002	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,016	0,016	0,011	0,011	0,011	-	-	0,004	0,004
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,016	0,016	0,011	0,011	0,011	1,084	1,084	0,004	0,004
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	0,005	0,005	-	-
<b>m, mol/s</b>	3,1	3,1	2,26	5,911	5,911	8,62	8,62	0,837	9,46
<b>Q, kW</b>	1,35	1,35	0,988	114,7	252,4	261,8	262,3	0,365	262,7

	<b>Ρεύμα 10</b>	<b>Ρεύμα 11</b>	<b>Ρεύμα 12</b>	<b>Ρεύμα 13</b>	<b>Ρεύμα 14</b>	<b>Ρεύμα 15</b>	<b>Ρεύμα 16</b>	<b>Ρεύμα 17</b>	<b>Ρεύμα 18</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	101,325	100,325	101,325	101,325	801,325	601,325	601,325	601,325
<b>T, °C</b>	1362,5	1321,5	1146,4	253	110	45,4	60,4	60,4	60,4
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	2,97	2,97	2,97	2,97	2,97	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	7,58	7,58	7,58	7,58	7,58	106	105,8	8,9	96,9
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,987	0,987	0,987	0,987	0,987	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,316	0,316	0,316	0,316	0,316	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	17,87	17,87	17,87	17,87	17,87	106	105,8	8,9	96,9
<b>Q, kW</b>	938,4	905,7	768	149,2	50	162	284	24	260

	<b>Ρεύμα 19</b>	<b>Ρεύμα 20</b>	<b>Ρεύμα 21</b>	<b>Ρεύμα 22</b>	<b>Ρεύμα 23</b>	<b>Ρεύμα 24</b>	<b>Ρεύμα 25</b>	<b>Ρεύμα 26</b>	<b>Ρεύμα 27</b>
<b>P, kPa</b>	401,325	591,325	591,325	591,325	103,325	101,325	99,325	99,325	99,325
<b>T, °C</b>	73,8	850	850	850	845,3	973,8	800	800	800
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	96,9	8,954	3,65	5,3	5,44	5,44	5,44	0,955	0,133
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	0,604	0,604	0,604	4,35	0,6
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	96,9	8,954	3,65	5,3	6,04	6,04	6,04	5,3	0,737
<b>Q, kW</b>	359	279	113	165	183	216	145	127	17,7

	<b>Ρεύμα 28</b>	<b>Ρεύμα 29</b>	<b>Ρεύμα 30</b>	<b>Ρεύμα 31</b>	<b>Ρεύμα 32</b>	<b>Ρεύμα 33</b>	<b>Ρεύμα 34</b>	<b>Ρεύμα 35</b>	<b>Ρεύμα 36</b>	<b>Ρεύμα 37</b>
<b>P, kPa</b>	103,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	103,325	401,325
<b>T, °C</b>	801,2	60	35	35	35	45	25	44,3	47,88	47
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,004	0,004	0,004	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,133	0,955	0,955	0,1	0,85	106	0,114	0,114	0,114	96,9
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,9	0,9	0,9	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	1,8	1,8	1,8	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,6	4,351	4,351	4,35	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,008	0,008	0,008	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	0,737	5,3	5,3	4,36	0,85	106	8,96	8,96	8,96	96,9
<b>Q, kW</b>	17,7	6,9	3,8	1,26	0,65	162	0	5	6	162

**Πίνακας Ι3. Χαρακτηριστικά ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για παροχή βιοαερίου 500 m<sup>3</sup>/h.**

	<b>Ρεύμα 1</b>	<b>Ρεύμα 2</b>	<b>Ρεύμα 3</b>	<b>Ρεύμα 4</b>	<b>Ρεύμα 5</b>	<b>Ρεύμα 6</b>	<b>Ρεύμα 7</b>	<b>Ρεύμα 8</b>	<b>Ρεύμα 9</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	103,325	103,325	103,325	100,325	99,33	103,325	101,325	103,325
<b>T, °C</b>	37	37,91	37,91	509,12	973,8	800	801,2	37	722,6
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	3,72	3,72	2,71	2,72	2,72			1	1
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	2,22	2,22	1,62	1,62	1,62	4,34	4,34	0,6	4,94
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,14	0,14	0,1	7,4	7,4	10,7	10,7	0,04	10,74
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,03	0,03	0,02	0,023	0,023	0,024	0,024	0,008	0,003
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	0,012	0,012	0,009	0,09	0,09	-	-	0,003	0,012
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	-	-	0,001	0,001
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,03	0,03	0,023	0,023	0,023	-	-	0,008	0,008
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,03	0,03	0,023	0,023	0,023	2,17	2,17	0,008	2,17
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	0,009	0,009	-	-
<b>m, mol/s</b>	6,2	6,2	4,52	11,82	11,82	17,24	17,24	1,67	18,92
<b>Q, kW</b>	2,7	2,7	1,97	229,5	504,8	524	524,7	0,73	525,43

	<b>Ρεύμα 10</b>	<b>Ρεύμα 11</b>	<b>Ρεύμα 12</b>	<b>Ρεύμα 13</b>	<b>Ρεύμα 14</b>	<b>Ρεύμα 15</b>	<b>Ρεύμα 16</b>	<b>Ρεύμα 17</b>	<b>Ρεύμα 18</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	101,325	100,325	101,325	101,325	801,325	601,325	601,325	601,325
<b>T, °C</b>	1362,5	1321,5	1146,4	253	110	45,4	60,4	60,4	60,4
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	5,95	5,95	5,95	5,95	5,95	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	15,17	15,17	15,17	15,17	15,17	211,8	211,8	17,9	194
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	13,97	13,97	13,97	13,97	13,97	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	0,017	0,017	0,017	0,017	0,017	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	35,75	35,75	35,75	35,75	35,75	211,8	211,8	17,9	194
<b>Q, kW</b>	1877	1811	1536	298,44	99,92	328,5	569,2	48,11	521



	<b>Ρεύμα 19</b>	<b>Ρεύμα 20</b>	<b>Ρεύμα 21</b>	<b>Ρεύμα 22</b>	<b>Ρεύμα 23</b>	<b>Ρεύμα 24</b>	<b>Ρεύμα 25</b>	<b>Ρεύμα 26</b>	<b>Ρεύμα 27</b>
<b>P, kPa</b>	401,325	591,325	591,325	591,325	103,325	101,325	99,325	99,325	99,325
<b>T, °C</b>	73,8	850	850	850	845,3	973,8	800	800	800
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	194	17,9	7,29	10,61	10,88	10,88	2,17	1,91	0,265
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	1,21	1,21	9,91	8,7	1,21
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	194	17,9	7,29	10,61	12,09	12,09	12,08	10,6	1,47
<b>Q, kW</b>	719,7	558,6	227,5	331	366,5	431,8	289,9	254,6	35,35

	<b>Ρεύμα 28</b>	<b>Ρεύμα 29</b>	<b>Ρεύμα 30</b>	<b>Ρεύμα 31</b>	<b>Ρεύμα 32</b>	<b>Ρεύμα 33</b>	<b>Ρεύμα 34</b>	<b>Ρεύμα 35</b>	<b>Ρεύμα 36</b>	<b>Ρεύμα 37</b>
<b>P, kPa</b>	103,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	103,325	401,325
<b>T, °C</b>	801,2	60	35	35	35	45	25	44,3	47,88	47
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,007	0,007	0,007	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,265	1,91	1,8	0,1	1,8	213,7	0,229	0,229	0,229	193,9
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	13,94	13,94	13,94	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	3,74	3,74	3,74	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	1,21	8,7	8,7	8,7	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,017	0,017	0,017	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	1,47	10,6	10,6	8,8	1,8	213,7	17,93	17,93	17,93	193,9
<b>Q, kW</b>	35,4	13,87	3,92	2,52	1,37	325,5	0	9,95	12,1	324,1

**Πίνακας Ι4. Χαρακτηριστικά ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για παροχή βιοαερίου 750 m<sup>3</sup>/h**

	<b>Ρεύμα 1</b>	<b>Ρεύμα 2</b>	<b>Ρεύμα 3</b>	<b>Ρεύμα 4</b>	<b>Ρεύμα 5</b>	<b>Ρεύμα 6</b>	<b>Ρεύμα 7</b>	<b>Ρεύμα 8</b>	<b>Ρεύμα 9</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	103,325	103,325	103,325	100,325	99,33	103,325	101,325	103,325
<b>T, °C</b>	37	37,91	37,91	509,12	973,8	800	801,2	37	722,6
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	5,58	5,58	4,07	4,07	4,07	-	-	1,51	1,51
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	3,34	3,34	2,44	2,44	2,44	6,51	6,51	0,9	7,41
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,22	0,22	0,16	11,1	11,1	16	16	0,06	16,11
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,047	0,047	0,034	0,03	0,03	0,036	0,036	0,013	0,048
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	0,02	0,02	0,014	0,014	0,014	-	-	0,005	0,019
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	0,005	0,005	0,003	0,003	0,003	-	-	0,001	0,001
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,047	0,047	0,03	0,034	0,034	-	-	0,013	0,013
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,047	0,047	0,03	0,034	0,034	3,25	3,25	0,013	3,26
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	0,014	0,014	-	-
<b>m, mol/s</b>	9,3	9,3	6,78	17,73	17,73	25,86	25,86	2,51	28,37
<b>Q, kW</b>	4,1	4,1	2,96	344,3	757,3	785,6	787	1,09	788,15

	<b>Ρεύμα 10</b>	<b>Ρεύμα 11</b>	<b>Ρεύμα 12</b>	<b>Ρεύμα 13</b>	<b>Ρεύμα 14</b>	<b>Ρεύμα 15</b>	<b>Ρεύμα 16</b>	<b>Ρεύμα 17</b>	<b>Ρεύμα 18</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	101,325	100,325	101,325	101,325	801,325	601,325	601,325	601,325
<b>T, °C</b>	1362,5	1321,5	1146,4	253	110	45,4	60,4	60,4	60,4
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	8,93	8,93	8,93	8,93	8,93	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	22,75	22,75	22,75	22,75	22,75	317,8	317,83	26,86	290,9
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	20,96	20,96	20,96	20,96	20,96	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	53,63	53,63	53,63	53,63	53,63	317,8	317,83	26,86	290,9
<b>Q, kW</b>	2815	2717	2304	447,7	149,9	492,87	853,9	72,2	781,7

	<b>Ρεύμα 19</b>	<b>Ρεύμα 20</b>	<b>Ρεύμα 21</b>	<b>Ρεύμα 22</b>	<b>Ρεύμα 23</b>	<b>Ρεύμα 24</b>	<b>Ρεύμα 25</b>	<b>Ρεύμα 26</b>	<b>Ρεύμα 27</b>
--	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

<b>P, kPa</b>	401,325	591,325	591,325	591,325	103,325	101,325	99,325	99,325	99,325	
<b>T, °C</b>	73,8	850	850	850	845,3	973,8	800	800	800	
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	290,9	26,86	10,94	15,92	16,32	16,3	3,26	2,86	0,4	
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	1,8	1,8	14,86	13,05	1,8	
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
<b>m, mol/s</b>	290,9	26,86	10,94	15,92	18,13	18,1	18,13	15,92	2,21	
<b>Q, kW</b>	1079,5	837,9	341,3	496,6	549,7	647,8	434,89	381,8	53	
	<b>Ρεύμα 28</b>	<b>Ρεύμα 29</b>	<b>Ρεύμα 30</b>	<b>Ρεύμα 31</b>	<b>Ρεύμα 32</b>	<b>Ρεύμα 33</b>	<b>Ρεύμα 34</b>	<b>Ρεύμα 35</b>	<b>Ρεύμα 36</b>	<b>Ρεύμα 37</b>
<b>P, kPa</b>	103,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	103,325	401,325
<b>T, °C</b>	801,2	60	35	35	35	45	25	44,3	47,88	47
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,011	0,011	0,011	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,4	2,86	2,76	0,1	2,76	320,6	0,34	0,34	0,34	290,9
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	20,9	20,9	20,9	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	5,61	5,61	5,61	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	1,8	13,05	13,05	13,05	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,025	0,025	0,025	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	2,21	15,92	15,9	13,15	2,76	320,6	26,9	26,9	26,9	290,9
<b>Q, kW</b>	53,12	20,8	5,9	3,8	2,1	488,3	0	14,91	18,16	486,2

**Πίνακας 15. Χαρακτηριστικά ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για παροχή βιοαερίου 1000 m<sup>3</sup>/h**

	<b>Ρεύμα 1</b>	<b>Ρεύμα 2</b>	<b>Ρεύμα 3</b>	<b>Ρεύμα 4</b>	<b>Ρεύμα 5</b>	<b>Ρεύμα 6</b>	<b>Ρεύμα 7</b>	<b>Ρεύμα 8</b>	<b>Ρεύμα 9</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	103,325	103,325	103,325	100,325	99,33	103,325	101,325	103,325
<b>T, °C</b>	37	37,91	37,91	509,12	973,8	800	801,2	37	722,6
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	7,44	7,44	5,43	5,43	5,43	-	-	2,01	2,01
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	4,45	4,45	3,25	3,25	3,25	8,68	8,68	1,2	9,88
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,29	0,29	0,21	14,8	14,8	21,4	21,4	0,078	21,5
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,06	0,06	0,045	0,045	0,045	0,048	0,048	0,017	0,064
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	0,025	0,025	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,07	0,025
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	0,006	0,006	0,005	0,005	0,005	-	-	0,002	0,02
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,062	0,062	0,045	0,045	0,045	-	-	0,017	0,017
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,062	0,062	0,045	0,045	0,045	4,33	4,33	0,017	4,35
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	12,4	12,4	9,05	23,64	23,64	34,48	34,48	3,35	37,8
<b>Q, kW</b>	5,4	5,4	3,95	459,1	1009,7	1047,5	1049,4	1,46	1051

	<b>Ρεύμα 10</b>	<b>Ρεύμα 11</b>	<b>Ρεύμα 12</b>	<b>Ρεύμα 13</b>	<b>Ρεύμα 14</b>	<b>Ρεύμα 15</b>	<b>Ρεύμα 16</b>	<b>Ρεύμα 17</b>	<b>Ρεύμα 18</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	101,325	100,325	101,325	101,325	801,325	601,325	601,325	601,325
<b>T, °C</b>	1362,5	1321,5	1146,4	253	110	45,4	60,4	60,4	60,4
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	11,91	11,91	11,91	11,91	11,91	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	30,33	30,33	30,33	30,33	30,33	423,7	423,7	35,82	387,9
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	27,95	27,95	27,95	27,95	27,95	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	1,26	1,26	1,26	1,26	1,26	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,025	0,025	0,025	0,025	0,025	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	71,5	71,5	71,5	71,5	71,5	423,7	423,7	35,82	387,9
<b>Q, kW</b>	3753	3622	3072	596,8	199,8	657,2	1138,6	96,2	1042

	<b>Ρεύμα 19</b>	<b>Ρεύμα 20</b>	<b>Ρεύμα 21</b>	<b>Ρεύμα 22</b>	<b>Ρεύμα 23</b>	<b>Ρεύμα 24</b>	<b>Ρεύμα 25</b>	<b>Ρεύμα 26</b>	<b>Ρεύμα 27</b>
<b>P, kPa</b>	401,325	591,325	591,325	591,325	103,325	101,325	99,325	99,325	99,325
<b>T, °C</b>	73,8	850	850	850	845,3	973,8	800	800	800
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	387,9	35,82	14,59	21,23	21,76	21,76	4,35	3,82	0,53
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	2,42	2,42	19,8	17,41	2,42
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	387,9	35,82	14,59	21,23	24,18	24,18	24,17	21,23	2,95
<b>Q, kW</b>	1439,4	1117	455	662	732,9	863,7	579,8	509,2	70,72

	<b>Ρεύμα 28</b>	<b>Ρεύμα 29</b>	<b>Ρεύμα 30</b>	<b>Ρεύμα 31</b>	<b>Ρεύμα 32</b>	<b>Ρεύμα 33</b>	<b>Ρεύμα 34</b>	<b>Ρεύμα 35</b>	<b>Ρεύμα 36</b>	<b>Ρεύμα 37</b>
<b>P, kPa</b>	103,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	103,325	401,325
<b>T, °C</b>	801,2	60	35	35	35	45	25	44,3	47,88	47
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,014	0,014	0,014	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,53	3,82	3,72	0,1	3,72	427,5	0,46	0,46	0,46	387,9
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	27,88	27,88	27,88	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	7,48	7,48	7,48	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	2,42	17,4	17,4	17,4	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,033	0,033	0,033	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	2,95	21,23	21,27	17,5	3,72	427,5	35,8	35,8	35,8	387,9
<b>Q, kW</b>	70,83	27,75	7,88	5,03	2,82	651	0	19,86	24,2	648,3

**Πίνακας Ι6. Χαρακτηριστικά ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για παροχή βιοαερίου 1500 m<sup>3</sup>/h**

	<b>Ρεύμα 1</b>	<b>Ρεύμα 2</b>	<b>Ρεύμα 3</b>	<b>Ρεύμα 4</b>	<b>Ρεύμα 5</b>	<b>Ρεύμα 6</b>	<b>Ρεύμα 7</b>	<b>Ρεύμα 8</b>	<b>Ρεύμα 9</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	103,325	103,325	103,325	100,325	99,33	103,325	101,325	103,325
<b>T, °C</b>	37	37,91	37,91	509,12	973,8	800	801,2	37	722,6
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	11,16	11,16	8,145	8,145	8,145	-	-	3,015	3,015
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	6,675	6,675	4,875	4,875	4,875	13,02	13,02	1,8	14,82
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,435	0,435	0,315	22,2	22,2	32,1	32,1	0,117	32,25
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,09	0,09	0,0675	0,0675	0,0675	0,072	0,072	0,0255	0,096
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	0,0375	0,0375	0,027	0,027	0,027	0,027	0,027	0,105	0,0375
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	0,009	0,009	0,0075	0,0075	0,0075	-	-	0,003	0,03
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,093	0,093	0,0675	0,0675	0,0675	-	-	0,0255	0,0255
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,093	0,093	0,0675	0,0675	0,0675	6,495	6,495	0,0255	6,525
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	18,6	18,6	13,575	35,46	35,46	51,72	51,72	5,025	56,7
<b>Q, kW</b>	8,1	8,1	5,925	688,65	1514,55	1571,25	1574,1	2,19	1576,5

	<b>Ρεύμα 10</b>	<b>Ρεύμα 11</b>	<b>Ρεύμα 12</b>	<b>Ρεύμα 13</b>	<b>Ρεύμα 14</b>	<b>Ρεύμα 15</b>	<b>Ρεύμα 16</b>	<b>Ρεύμα 17</b>	<b>Ρεύμα 18</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	101,325	100,325	101,325	101,325	801,325	601,325	601,325	601,325
<b>T, °C</b>	1362,5	1321,5	1146,4	253	110	45,4	60,4	60,4	60,4
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	17,865	17,865	17,865	17,865	17,865	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	45,495	45,495	45,495	45,495	45,495	635,55	635,55	53,73	581,85
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	41,925	41,925	41,925	41,925	41,925	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,0375	0,0375	0,0375	0,0375	0,0375	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	107,25	107,25	107,25	107,25	107,25	635,55	635,55	53,73	581,85
<b>Q, kW</b>	5629,5	5433	4608	895,2	299,7	985,8	1707,9	144,3	1563

	<b>Ρεύμα 19</b>	<b>Ρεύμα 20</b>	<b>Ρεύμα 21</b>	<b>Ρεύμα 22</b>	<b>Ρεύμα 23</b>	<b>Ρεύμα 24</b>	<b>Ρεύμα 25</b>	<b>Ρεύμα 26</b>	<b>Ρεύμα 27</b>
<b>P, kPa</b>	401,325	591,325	591,325	591,325	103,325	101,325	99,325	99,325	99,325
<b>T, °C</b>	73,8	850	850	850	845,3	973,8	800	800	800
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	581,85	53,73	21,885	31,845	32,64	32,64	6,525	5,73	0,795
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	3,63	3,63	29,7	26,115	3,63
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	581,85	53,73	21,885	31,845	36,27	36,27	36,255	31,845	4,425
<b>Q, kW</b>	2159,1	1675,5	682,5	993	1099,35	1295,55	869,7	763,8	106,08

	<b>Ρεύμα 28</b>	<b>Ρεύμα 29</b>	<b>Ρεύμα 30</b>	<b>Ρεύμα 31</b>	<b>Ρεύμα 32</b>	<b>Ρεύμα 33</b>	<b>Ρεύμα 34</b>	<b>Ρεύμα 35</b>	<b>Ρεύμα 36</b>	<b>Ρεύμα 37</b>
<b>P, kPa</b>	103,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	103,325	401,325
<b>T, °C</b>	801,2	60	35	35	35	45	25	44,3	47,88	47
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,021	0,021	0,021	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,795	5,73	5,58	0,15	5,58	641,25	0,69	0,69	0,69	581,85
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	41,82	41,82	41,82	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	11,22	11,22	11,22	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	3,63	26,1	26,1	26,1	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,0495	0,0495	0,0495	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	4,425	31,845	31,905	26,25	5,58	641,25	53,7	53,7	53,7	581,85
<b>Q, kW</b>	106,245	41,625	11,82	7,545	4,23	976,5	0	29,79	36,3	972,45

**Πίνακας 17. Χαρακτηριστικά ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για παροχή βιοαερίου 2000 m<sup>3</sup>/h.**

	<b>Ρεύμα 1</b>	<b>Ρεύμα 2</b>	<b>Ρεύμα 3</b>	<b>Ρεύμα 4</b>	<b>Ρεύμα 5</b>	<b>Ρεύμα 6</b>	<b>Ρεύμα 7</b>	<b>Ρεύμα 8</b>	<b>Ρεύμα 9</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	103,325	103,325	103,325	100,325	99,33	103,325	101,325	103,325
<b>T, °C</b>	37	37,91	37,91	509,12	973,8	800	801,2	37	722,6
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	14,88	14,88	10,86	10,86	10,86	-	-	4,02	4,02
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	8,9	8,9	6,5	6,5	6,5	17,36	17,36	2,4	19,76
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,58	0,58	0,42	29,6	29,6	42,8	42,8	0,156	43
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,12	0,12	0,09	0,09	0,09	0,096	0,096	0,034	0,128
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	0,05	0,05	0,036	0,036	0,036	0,036	0,036	0,14	0,05
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	0,012	0,012	0,01	0,01	0,01	-	-	0,004	0,04
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,124	0,124	0,09	0,09	0,09	-	-	0,034	0,034
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,124	0,124	0,09	0,09	0,09	8,66	8,66	0,034	8,7
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	24,8	24,8	18,1	47,28	47,28	68,96	68,96	6,7	75,6
<b>Q, kW</b>	10,8	10,8	7,9	918,2	2019,4	2095	2098,8	2,92	2102

	<b>Ρεύμα 10</b>	<b>Ρεύμα 11</b>	<b>Ρεύμα 12</b>	<b>Ρεύμα 13</b>	<b>Ρεύμα 14</b>	<b>Ρεύμα 15</b>	<b>Ρεύμα 16</b>	<b>Ρεύμα 17</b>	<b>Ρεύμα 18</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	101,325	100,325	101,325	101,325	801,325	601,325	601,325	601,325
<b>T, °C</b>	1362,5	1321,5	1146,4	253	110	45,4	60,4	60,4	60,4
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	38,2	38,2	38,2	38,2	38,2	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	60,66	60,66	60,66	60,66	60,66	846,3	846,3	71,64	774,6
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	55,9	55,9	55,9	55,9	55,9	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	2,52	2,52	2,52	2,52	2,52	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	143,02	143,02	143,02	143,02	143,02	846,3	846,3	71,64	774,6
<b>Q, kW</b>	7506	7246	6144	1192	398	1310,8	2273,6	192	2080

	<b>Ρεύμα 19</b>	<b>Ρεύμα 20</b>	<b>Ρεύμα 21</b>	<b>Ρεύμα 22</b>	<b>Ρεύμα 23</b>	<b>Ρεύμα 24</b>	<b>Ρεύμα 25</b>	<b>Ρεύμα 26</b>	<b>Ρεύμα 27</b>
<b>P, kPa</b>	401,325	591,325	591,325	591,325	103,325	101,325	99,325	99,325	99,325



T, °C	73,8	850	850	850	845,3	973,8	800	800	800
CH <sub>4</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO <sub>2</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H <sub>2</sub> O, mol/s	774	71,64	29,18	42,46	43,52	43,52	8,7	7,64	1,06
N <sub>2</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H <sub>2</sub> S, mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH <sub>3</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O <sub>2</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
H <sub>2</sub> , mol/s	-	-	-	-	4,84	4,84	39,64	34,82	4,84
Ar, mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
SO <sub>2</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m, mol/s	774	71,64	29,18	42,46	48,34	48,34	48,34	42,46	5,9
Q, kW	2860	2034	910	1324	1466	1728	1158	1020	141,4

	Ρεύμα 28	Ρεύμα 29	Ρεύμα 30	Ρεύμα 31	Ρεύμα 32	Ρεύμα 33	Ρεύμα 34	Ρεύμα 35	Ρεύμα 36	Ρεύμα 37
P, kPa	103,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	103,325	401,325
T, °C	801,2	60	35	35	47	45	25	44,3	47,88	47
CH <sub>4</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
CO <sub>2</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	0,02	0,02	0,02	-
H <sub>2</sub> O, mol/s	1,06	7,64	-	2,08	774,6	852	0,92	0,92	0,92	774,6
N <sub>2</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	55,6	55,6	55,6	-
H <sub>2</sub> S, mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
NH <sub>3</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
O <sub>2</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	15	15	15	-
H <sub>2</sub> , mol/s	4,84	34,82	34,82	34,82	-	-	-	-	-	-
Ar, mol/s	-	-	-	-	-	-	0,6	0,6	0,6	-
SO <sub>2</sub> , mol/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
m, mol/s	5,9	42,46	42,46	36,88	774,6	852	71,74	71,74	71,74	774,6
Q, kW	141,6	55,6	15	-	-	1300	-	40,6	48,2	1294,6

**Πίνακας 18. Χαρακτηριστικά ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για παροχή βιοαερίου 3000 m<sup>3</sup>/h.**

	Ρεύμα 1	Ρεύμα 2	Ρεύμα 3	Ρεύμα 4	Ρεύμα 5	Ρεύμα 6	Ρεύμα 7	Ρεύμα 8	Ρεύμα 9
P, kPa	101,325	103,325	103,325	103,325	100,325	99,33	103,325	101,325	103,325

<b>T, °C</b>	37	37,91	37,91	509,12	973,8	800	801,2	37	722,6
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	22,32	22,32	16,29	16,29	16,29	-	-	6,03	6,03
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	13,35	13,35	9,75	9,75	9,75	26,04	26,04	3,6	29,64
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	0,87	0,87	0,63	44,4	44,4	64,2	64,2	0,234	64,5
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,18	0,18	0,135	0,135	0,135	0,144	0,144	0,051	0,192
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	0,075	0,075	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,21	0,075
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	0,018	0,018	0,015	0,015	0,015	-	-	0,006	0,06
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,186	0,186	0,135	0,135	0,135	-	-	0,051	0,051
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,186	0,186	0,135	0,135	0,135	12,99	12,99	0,051	13,05
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	37,2	37,2	27,15	70,92	70,92	103,44	103,44	10,05	113,4
<b>Q, kW</b>	16,2	16,2	11,85	1377,3	3029,1	3142,5	3148,2	4,38	3153

	<b>Ρεύμα 10</b>	<b>Ρεύμα 11</b>	<b>Ρεύμα 12</b>	<b>Ρεύμα 13</b>	<b>Ρεύμα 14</b>	<b>Ρεύμα 15</b>	<b>Ρεύμα 16</b>	<b>Ρεύμα 17</b>	<b>Ρεύμα 18</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	101,325	100,325	101,325	101,325	801,325	601,325	601,325	601,325
<b>T, °C</b>	1362,5	1321,5	1146,4	253	110	45,4	60,4	60,4	60,4
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	35,73	35,73	35,73	35,73	35,73	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	90,99	90,99	90,99	90,99	90,99	1271,1	1271,1	107,46	1163,7
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	83,85	83,85	83,85	83,85	83,85	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	3,78	3,78	3,78	3,78	3,78	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>									
<b>Ar, mol/s</b>	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,075	0,075	0,075	0,075	0,075	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	214,5	214,5	214,5	214,5	214,5	1271,1	1271,1	107,46	1163,7
<b>Q, kW</b>	11259	10866	9216	1790,4	599,4	1971,6	3415,8	288,6	3126

	<b>Ρεύμα 19</b>	<b>Ρεύμα 20</b>	<b>Ρεύμα 21</b>	<b>Ρεύμα 22</b>	<b>Ρεύμα 23</b>	<b>Ρεύμα 24</b>	<b>Ρεύμα 25</b>	<b>Ρεύμα 26</b>	<b>Ρεύμα 27</b>
<b>P, kPa</b>	401,325	591,325	591,325	591,325	103,325	101,325	99,325	99,325	99,325
<b>T, °C</b>	73,8	850	850	850	845,3	973,8	800	800	800

<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	1163,7	107,46	43,77	63,69	65,28	65,28	13,05	11,46	1,59	
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	7,26	7,26	59,4	52,23	7,26	
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	1163,7	107,46	43,77	63,69	72,54	72,54	72,51	63,69	8,85	
<b>Q, kW</b>	4318,2	3351	1365	1986	2198,7	2591,1	1739,4	1527,6	212,16	

	<b>Ρεύμα 28</b>	<b>Ρεύμα 29</b>	<b>Ρεύμα 30</b>	<b>Ρεύμα 31</b>	<b>Ρεύμα 32</b>	<b>Ρεύμα 33</b>	<b>Ρεύμα 34</b>	<b>Ρεύμα 35</b>	<b>Ρεύμα 36</b>	<b>Ρεύμα 37</b>
<b>P, kPa</b>	103,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	103,325	401,325
<b>T, °C</b>	801,2	60	35	35	35	45	25	44,3	47,88	47
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,042	0,042	0,042	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	1,59	11,46	11,16	0,3	11,16	1282,5	1,38	1,38	1,38	1163,7
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	83,64	83,64	83,64	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	22,44	22,44	22,44	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	7,26	52,2	52,2	52,2	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,099	0,099	0,099	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	8,85	63,69	63,81	52,5	11,16	1282,5	107,4	107,4	107,4	1163,7
<b>Q, kW</b>	212,49	83,25	23,64	15,09	8,46	1953	0	59,58	72,6	1944,9

**Πίνακας 19. Χαρακτηριστικά των ρευμάτων της διεργασίας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο, για παροχή βιοαερίου 5000 m<sup>3</sup>/h.**

	<b>Ρεύμα 1</b>	<b>Ρεύμα 2</b>	<b>Ρεύμα 3</b>	<b>Ρεύμα 4</b>	<b>Ρεύμα 5</b>	<b>Ρεύμα 6</b>	<b>Ρεύμα 7</b>	<b>Ρεύμα 8</b>	<b>Ρεύμα 9</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	103,325	103,325	103,325	100,325	99,33	103,325	101,325	103,325
<b>T, °C</b>	37	37,91	37,91	509,12	973,8	800	801,2	37	722,6
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	37,2	37,2	27,15	27,15	27,15	-	-	10,05	10,05
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	22,25	22,25	16,25	16,25	16,25	43,4	43,4	6	49,4
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	1,45	1,45	1,05	74	74	107	107	0,39	107,5
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,3	0,3	0,225	0,225	0,225	0,24	0,24	0,085	0,32
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	0,125	0,125	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,35	0,125
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	0,03	0,03	0,025	0,025	0,025	-	-	0,01	0,1
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,31	0,31	0,225	0,225	0,225	-	-	0,085	0,085
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,31	0,31	0,225	0,225	0,225	21,65	21,65	0,085	21,75
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	62	62	45,25	118,2	118,2	172,4	172,4	16,75	189
<b>Q, kW</b>	27	27	19,75	2295,5	5048,5	5237,5	5247	7,3	5255

	<b>Ρεύμα 10</b>	<b>Ρεύμα 11</b>	<b>Ρεύμα 12</b>	<b>Ρεύμα 13</b>	<b>Ρεύμα 14</b>	<b>Ρεύμα 15</b>	<b>Ρεύμα 16</b>	<b>Ρεύμα 17</b>	<b>Ρεύμα 18</b>
<b>P, kPa</b>	101,325	101,325	100,325	101,325	101,325	801,325	601,325	601,325	601,325
<b>T, °C</b>	1362,5	1321,5	1146,4	253	110	45,4	60,4	60,4	60,4
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	59,55	59,55	59,55	59,55	59,55	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	151,65	151,65	151,65	151,65	151,65	2118,5	2118,5	179,1	1939,5
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	139,75	139,75	139,75	139,75	139,75	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	6,3	6,3	6,3	6,3	6,3	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	0,125	0,125	0,125	0,125	0,125	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	357,5	357,5	357,5	357,5	357,5	2118,5	2118,5	179,1	1939,5
<b>Q, kW</b>	18765	18110	15360	2984	999	3286	5693	481	5210

	<b>Ρεύμα 19</b>	<b>Ρεύμα 20</b>	<b>Ρεύμα 21</b>	<b>Ρεύμα 22</b>	<b>Ρεύμα 23</b>	<b>Ρεύμα 24</b>	<b>Ρεύμα 25</b>	<b>Ρεύμα 26</b>	<b>Ρεύμα 27</b>
<b>P, kPa</b>	401,325	591,325	591,325	591,325	103,325	101,325	99,325	99,325	99,325
<b>T, °C</b>	73,8	850	850	850	845,3	973,8	800	800	800
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	1939,5	179,1	72,95	106,15	108,8	108,8	21,75	19,1	2,65
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	12,1	12,1	99	87,05	12,1
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	1939,5	179,1	72,95	106,15	120,9	120,9	120,85	106,15	14,75
<b>Q, kW</b>	7197	5585	2275	3310	3664,5	4318,5	2899	2546	353,6

	<b>Ρεύμα 28</b>	<b>Ρεύμα 29</b>	<b>Ρεύμα 30</b>	<b>Ρεύμα 31</b>	<b>Ρεύμα 32</b>	<b>Ρεύμα 33</b>	<b>Ρεύμα 34</b>	<b>Ρεύμα 35</b>	<b>Ρεύμα 36</b>	<b>Ρεύμα 37</b>
<b>P, kPa</b>	103,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	101,325	103,325	401,325
<b>T, °C</b>	801,2	60	35	35	35	45	25	44,3	47,88	47
<b>CH<sub>4</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>CO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,07	0,07	0,07	-
<b>H<sub>2</sub>O, mol/s</b>	2,65	19,1	18,6	0,5	18,6	2137,5	2,3	2,3	2,3	1939,5
<b>N<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	139,4	139,4	139,4	-
<b>H<sub>2</sub>S, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>NH<sub>3</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>O<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	37,4	37,4	37,4	-
<b>H<sub>2</sub>, mol/s</b>	12,1	87	87	87	-	-	-	-	-	-
<b>Ar, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	0,165	0,165	0,165	-
<b>SO<sub>2</sub>, mol/s</b>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>m, mol/s</b>	14,75	106,15	106,35	87,5	18,6	2137,5	179	179	179	1939,5
<b>Q, kW</b>	354,15	138,75	39,4	25,15	14,1	3255	0	99,3	121	3241,5

## Παράρτημα II

**Πίνακας II 1.** Υπολογισμός της αξίας ηλεκτρικού ρεύματος που απαιτείται στη μονάδα παραγωγής υδρογόνου για εύρος δυναμικότητας από 100 – 5000 m<sup>3</sup>/h.

<b>Δυναμικότητα, m<sup>3</sup>/h</b>	100	250	500	750	1.000	1.500	2.000	3.000	5.000
<b>MWh/yr</b>	330,6	819,8	1.022,7	1.716,3	3.281,8	4.924,0	6.565,6	9.840,1	16.410,1
<b>Ωριαία ζήτηση, kW</b>	37,7	93,6	116,8	195,9	374,6	562,1	749,5	1.123,3	1.873,3
<b>ΣΥΝΤ. ΧΡΗΣΗΣ</b>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
<b>Σ.ΠΡΣ</b>	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>MZ, kW</b>	37,7	93,6	116,8	195,9	374,6	562,1	749,5	1.123,3	1.873,3
<b>A</b>	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
<b>ΧΖ</b>	3,8	9,4	11,7	19,6	37,5	56,2	75,0	112,3	187,3
<b>Χ. ΙΣΧΥΟΣ, €/ετος</b>	171 €	425 €	531 €	890 €	1.702 €	2.554 €	3.406 €	5.104 €	8.512 €
<b>Χ.ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ, €/ετος</b>	16.540 €	41.017 €	51.167 €	85.869 €	164.186 €	246.348 €	328.478 €	492.301 €	820.998 €
<b>ΣΥΝΟΛΟ, €/ετος</b>	16.712 €	41.442 €	51.698 €	86.759 €	165.889 €	248.902 €	331.884 €	497.405 €	829.510 €

**Πίνακας II 2.** Υπολογισμός NPV, POT και IRR στην μονάδα παραγωγής υδρογόνου με προεξοφλητικό επιτόκιο 5,5 % για παροχή βιοαερίου 100 – 5000 m<sup>3</sup>/h.

Δυναμικότητα m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
Έτος	-1,134	-2,502	-4,586	-6,611	-8,567	-12,348	-16,042	-23,186	-37,002
0	0,259	0,688	1,222	1,848	2,474	3,187	4,261	6,411	10,723
1	0,266	0,706	1,253	1,895	2,536	3,269	4,371	6,574	10,993
2	0,273	0,724	1,285	1,942	2,599	3,353	4,482	6,741	11,268
3	0,280	0,742	1,317	1,991	2,664	3,439	4,596	6,910	11,549
4	0,288	0,761	1,351	2,041	2,730	3,526	4,712	7,083	11,835
5	0,295	0,780	1,384	2,092	2,798	3,615	4,830	7,260	12,127
6	0,303	0,799	1,419	2,143	2,867	3,706	4,951	7,439	12,426
7	0,310	0,819	1,454	2,196	2,937	3,798	5,074	7,623	12,730
8	0,318	0,839	1,490	2,250	3,008	3,893	5,200	7,810	13,040
9	0,326	0,859	1,527	2,305	3,081	3,989	5,328	8,001	13,356
10	0,335	0,880	1,564	2,361	3,156	4,087	5,458	8,196	13,679
11	0,343	0,902	1,603	2,418	3,232	4,188	5,591	8,395	14,008
12	0,351	0,923	1,641	2,476	3,309	4,290	5,727	8,597	14,343
13	0,360	0,946	1,681	2,536	3,388	4,394	5,866	8,804	14,686
14	0,369	0,968	1,722	2,596	3,469	4,501	6,007	9,015	15,035
15	0,378	0,991	1,763	2,658	3,551	4,609	6,152	9,230	15,391
NPV (Μ€)	1,97	5,66	9,93	15,29	20,71	25,57	34,60	52,85	89,89
IRR (%)	42,87	52,04	49,00	51,75	53,66	46,76	48,37	50,66	53,63
POT (χρόνια)	2,45	2,00	2,13	2,01	1,94	2,24	2,16	2,06	1,94

## Παράρτημα III

### Δεδομένα σχημάτων

**Πίνακας III 1.** Μεταβολή της παραγωγής υδρογόνου ηλεκτρόλυσης & αναμόρφωσης με βάση την αύξηση της δυναμικότητας παραγωγής βιοαερίου. (Σχήμα 5)

Δυναμικότητα m <sup>3</sup> /h	100	250	500	750	1000	1500	2000	3000	5000
Υδρογόνο ηλεκτρόλυσης m <sup>3</sup> /h	140	351	702	1052	1403	2105	2807	4211	7018
Υδρογόνο αναμόρφωσης m <sup>3</sup> /h	132	330	660	989	1319	1979	2738	3958	6596

**Πίνακας III2.** Μεταβολή της αρχικής επένδυσης της μονάδας παραγωγής υδρογόνου με βάση την αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής. (Σχήμα 6α)

Ηλεκτροπαραγωγή ,Mwe	0,24	0,6	1,2	1,8	2,4	3,6	4,8	7,2	12
Μονάδα ηλεκτρόλυσης, Μ€	0,57	1,19	2,1	3,01	3,87	5,53	7,16	10,29	16,37
Μονάδα αναμόρφωσης Μ€	0,57	1,01	1,55	2,00	2,40	3,13	3,70	4,77	6,67

**Πίνακας III3.** Μεταβολή της αρχικής επένδυσης της ολοκληρωμένης μονάδας παραγωγής υδρογόνου από βιοαέριο. (Σχήμα 7α)

Ηλεκτροπαραγωγή, MWe	0,24	0,6	1,2	1,8	2,4	3,6	4,8	7,2	12
Μονάδα ηλεκτρόλυσης, Μ€	1,13	2,5	4,59	6,61	8,57	12,35	16,04	23,19	37
Μονάδα αναμόρφωσης, Μ€	1,13	2,32	4,01	5,56	7,04	9,87	12,47	17,51	27,01



**Πίνακας III4.** Διάρθρωση του κόστους της μονάδας παραγωγής υδρογόνου από ηλεκτρόλυση για δυναμικότητα παραγωγής βιοαερίου 100 m<sup>3</sup>/h. (Σχήμα 8)

Κυψέλη καυσίμου	255.000 €
Κατασκευαστικά	75.600 €
Εξατμιστής	52.000 €
Καυστήρας	38.934 €
Διάφορα	29.600 €
Προθερμαντής ανόδου	22.600 €
Προθερμαντής καθόδου	17.000 €
Συστήματα ρύθμισης	13.200 €
Εναλλάκτης συμπαραγωγής	12.100 €
Προθερμαντής αέρα	11.700 €
Αντλία νερού	10.800 €
Καθαρισμός νερού	9.870 €
Προθερμαντής νερού	6.000 €
Φυσητήρας ανόδου	5.740 €
Φυσητήρας αέρα	3.887 €
Φυσητήρας βιοαερίου	3.378 €
Φυσητήρας καθόδου	2.360 €

**Πίνακας III5.** Μεταβολή των ετήσιων λειτουργικών εξόδων της μονάδας παραγωγής υδρογόνου. (Σχήμα 9α)

Ηλεκτροπαραγωγή MWe	0,24	0,6	1,2	1,8	2,4	3,6	4,8	7,2	12
Μονάδα ηλεκτρόλυσης M€	0,27	0,55	1,16	1,71	2,27	3,38	4,48	6,69	11,1
Μονάδα αναμόρφωσης M€	0,26	0,51	1,07	1,54	1,98	2,89	3,78	5,56	9,07

**Πίνακας III6.** Τιμή διάθεσης του παραγόμενου υδρογόνου ανάλογα με το οικονομικό κριτήριο και την ηλεκτροπαραγωγή. (Σχήμα 12)

Ηλεκτροπαραγωγή, MWe	0.24	0.6	1.2	1.8	2.4	3.6	4.8	7.2	12
NPV €/m <sup>3</sup>	0.593	0.560	0.529	0.526	0.524	0.482	0.480	0.477	0.475
IRR €/m <sup>3</sup>	0.597	0.587	0.540	0.543	0.545	0.484	0.486	0.488	0.492

