



## Πιλοτική εφαρμογή τεχνολογιών υδρογόνου σε αποκεντρωμένα συστήματα παραγωγής ενέργειας

Λέκτορας Ταξιάρχου Μ<sup>1</sup>, Δρ. Πέππας Α.<sup>1</sup>, Καθ. Πασπαλιάρης Ι<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Εργαστήριο Μεταλλουργίας, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Λέξεις-κλειδιά: Υδρογόνο, ενεργειακά αυτόνομα κτήρια, ενέργεια, ΑΠΕ

### 1. Περίληψη

Η διαλείπουσα παραγωγή των τεχνολογιών ΑΠΕ αποτελεί μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που θα κρίνει σε σημαντικό βαθμό τη μετάβαση σε ένα πιο «καθαρό» ενεργειακό και περιβαλλοντικό μέλλον, καθιστώντας επιβεβλημένη την ανάπτυξη καινοτόμων και φιλικότερων προς το περιβάλλον τεχνολογιών αποθήκευσης ενέργειας. Η διεθνής ερευνητική κοινότητα, κινούμενη σε αυτήν την κατεύθυνση, έχει δώσει ιδιαίτερη έμφαση τα τελευταία χρόνια στην εκμετάλλευση του υδρογόνου ως εναλλακτικού φορέα ενέργειας, εστιάζοντας κυρίως στη μελέτη και τη βελτιστοποίηση των επιμέρους τεχνολογιών παραγωγής και χρήσης του. Το ΕΜΠ, σε συνεργασία με ευρωπαϊκούς εταίρους και εστιάζοντας στη συνέργεια των τεχνολογιών υδρογόνου και ΑΠΕ, ανέπτυξε ένα καινοτόμο ολοκληρωμένο ενεργειακό υβριδικό σύστημα μηδενικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (CO<sub>2</sub>) για εφαρμογή σε κτήρια και κατ' επέκταση σε τοπικά δίκτυα. Η φιλοσοφία του συστήματος βασίζεται στη διαχείριση και εξισορρόπηση της ενεργειακής ροής μεταξύ των ΑΠΕ, των κτηριακών καταναλώσεων και του αποθηκευμένου υδρογόνου. Η παραγόμενη ενέργεια από τις ΑΠΕ χρησιμοποιείται για την άμεση κάλυψη των κτηριακών αναγκών, ενώ η πλεονασματική ενέργεια μετατρέπεται και αποθηκεύεται σε μορφή αερίου υδρογόνου. Υπό συνθήκες ελλειμματικής παραγωγής των ΑΠΕ, ενεργοποιείται κυψέλη καυσίμου για την εξισορρόπηση των ενεργειακών αναγκών του κτηρίου. Η μονάδα έχει ενσωματωθεί σε κτήριο του Τεχνολογικού και Πολιτιστικού Πάρκου Λαυρίου και βρίσκεται υπό συνεχή αξιολόγηση και βελτιστοποίηση, με απώτερο όραμα ένα «πράσινο» ενεργειακό σύστημα, το οποίο σε ευρεία κλίμακα εφαρμογής θα συνδράμει σημαντικά στον παγκόσμιο στόχο μείωσης των εκπομπών αερίου και εξάλειψης του φαινομένου του θερμοκηπίου.

### 2. Εισαγωγή

Η εύρυθμη λειτουργία και η ανάπτυξη της σύγχρονης κοινωνίας είναι καθ' όλα βασισμένες στην πρόσβαση και χρήση των ενεργειακών πόρων. Η διαρκής και επαρκής παροχή ενέργειας απαιτείται πλέον σε όλο το φάσμα των ανθρώπινων δραστηριοτήτων, από την εργασία έως την ψυχαγωγία, και είναι απαραίτητη προϋπόθεση όχι μόνο για οικονομική, αλλά και για κοινωνική ευημερία. Ως αποτέλεσμα οι ενεργειακές



απαιτήσεις της σύγχρονης κοινωνίας αυξάνονται συνεχώς, με ταχείς ρυθμούς. Συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή έκθεση «World Energy Technology and Climate Policy Outlook» (WETO) προβλέπει για την περίοδο 2000-2030 παγκόσμια ετήσια αύξηση σε ανάγκες πρωτογενούς ενέργειας της τάξεως του 1,8%. Το μεγαλύτερο μέρος της κατανάλωσης ενέργειας κατέχει ο τομέας των κτηρίων με ποσοστό 41% και ακολουθεί ο τομέας των μεταφορών με ποσοστό 39%.

Επιπροσθέτως, οι ανάγκες της κοινωνίας σε ενέργεια σήμερα, σε ευρωπαϊκό αλλά και σε ελληνικό επίπεδο, καλύπτονται σε μεγάλο βαθμό από ορυκτά καύσιμα. Τα βασικά προβλήματα που προκύπτουν από τη χρήση ορυκτών καυσίμων αφορούν κυρίως τη γεωπολιτική εξάρτηση από τις χώρες που τα διαθέτουν, τη μείωση των αποθεμάτων τους και συνεπώς την αύξηση του κόστους αγοράς τους, την ολοένα μεγαλύτερη δυσκολία προμήθειάς τους, καθώς και τις σημαντικές εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και άλλων ρύπων που προκύπτουν από την καύση τους (R. Gammon, 2011).

Η ανησυχητική αύξηση της συγκέντρωσης του CO<sub>2</sub> σε παγκόσμια κλίμακα, που σήμερα βρίσκεται στο επίπεδο των 370 ppm (280 ppm το 1700), και η οποία αναμένεται να αυξηθεί ακόμη περισσότερο, αγγίζοντας το επίπεδο των 480 ppm, καθώς και οι δυσάρεστες κλιματικές αλλαγές που αυτό συνεπάγεται, καθιστούν απαραίτητη την ανάπτυξη νέων ενεργειακών συστημάτων, φιλικότερων προς το περιβάλλον (N. Lymberopoulos, 2007). Η ανάπτυξη καινοτόμων ενεργειακών συστημάτων αναμένεται να αποτελέσει και λύση στο πρόβλημα της κοινωνικής και οικονομικής εξάρτησης από τις παραδοσιακές ορυκτές πηγές ενέργειας που οδεύουν σε εξάλειψη, όπως το πετρέλαιο.

Στην κατεύθυνση της μείωσης της εξάρτησης από τα ορυκτά καύσιμα κινούνται και οι οδηγίες της Ευρωπαϊκής Ένωσης αλλά και της Ελλάδας (πράσινη ενέργεια), που θέτουν ως σκοπό την αδιάλειπτη παροχή ενέργειας με ταυτόχρονη μείωση των εκπομπών αερίων που σχετίζονται με κλιματικές αλλαγές. Τα άμεσα μέτρα που προτείνονται για την αντιμετώπιση του προβλήματος περιλαμβάνουν βραχυπρόθεσμους στόχους, όπως την εξοικονόμηση ενέργειας, την αύξηση της ενεργειακής απόδοσης των συστημάτων και την προώθηση εναλλακτικών πηγών ενέργειας (ανανεώσιμων), και μακροπρόθεσμους, όπως τη μετάβαση στην αποκλειστική χρησιμοποίηση καθαρών τεχνολογιών και εναλλακτικών καυσίμων που δεν επιβαρύνουν το περιβάλλον με αέρια θερμοκηπίου. (C. Petersdorff, 2004)

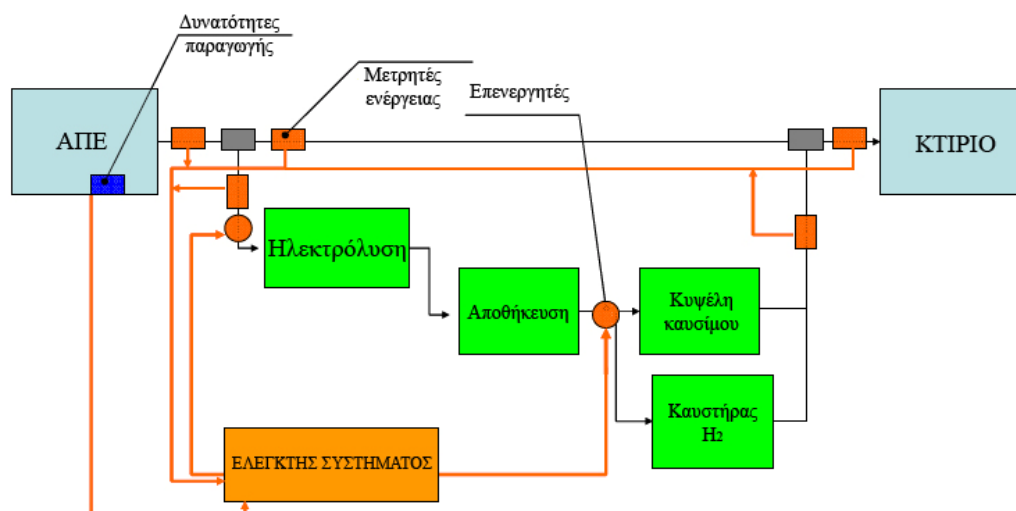
Ωστόσο, η μεγάλη ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, οι οποίες με βάση την Κοινοτική οδηγία θα πρέπει το 2020 να καλύπτουν το 20% του συνόλου της παραγόμενης ενέργειας στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οδηγούν σε ένα μοντέλο αποκεντρωμένης παραγωγής ενέργειας, που σε συνδυασμό με τις καιρικές μεταβολές, οι οποίες επηρεάζουν την απόδοσή τους, θέτουν μια πολύ σημαντική πρόκληση για τις ενεργειακές μας υποδομές. Συνεπώς, η ανάπτυξη οικονομικά και τεχνολογικά βιώσιμων τεχνολογιών

αποθήκευσης ενέργειας θεωρείται απαραίτητη προϋπόθεση της περαιτέρω διεύθυνσης των ΑΠΕ και της μετάβασης σε ένα «πράσινο» ενεργειακό μέλλον.

Στο πλαίσιο αυτό, η ερευνητική ομάδα του Εργαστηρίου Μεταλλουργίας, υπό την επίβλεψη των επιστημονικών υπευθύνων Καθ. Ι. Πασπαλιάρη και Λέκτορα Μ. Ταξιάρχου, συμμετέχοντας στο ερευνητικό πρόγραμμα H2SusBuild που χρηματοδοτήθηκε από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα, ανέπτυξε, αξιολογεί και βελτιστοποιεί ένα καινοτόμο υβριδικό ενεργειακό σύστημα μηδενικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με χρήση υδρογόνου. Βασικός στόχος της ομάδας είναι η λειτουργική και οικονομική αξιολόγηση μέσω μακροχρόνιας δοκιμής του συστήματος και η αποτίμηση των ποσοτικών και περιβαλλοντικών οφελών. Ιδιαίτερη μέριμνα δόθηκε στη θέσπιση κατάλληλων προδιαγραφών ασφαλείας που απαιτούνται για την εύρυθμη ένταξη του συστήματος στον πολεοδομικό ιστό και την παραγωγική δραστηριότητα.

### 3. Περιγραφή συστήματος

Η αρχιτεκτονική του συστήματος βασίζεται στη χρήση ΑΠΕ για την άμεση κάλυψη των ενεργειακών αναγκών του κτηρίου, αποθήκευση του ενεργειακού πλεονάσματος σε υδρογόνο και επαναχρησιμοποίησή του «ως πράσινο» καυσίμου σε κυψέλη καυσίμου ή καυστήρα υδρογόνου.



Εικόνα 1. Απεικόνιση συστήματος

Το υβριδικό σύστημα ενσωματώθηκε σε κτήριο βιομηχανικής χρήσης (συνολικού εμβαδού 530m<sup>2</sup>) στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου (ΤΠΠΛ), το οποίο διαμορφώθηκε κατάλληλα για τις ανάγκες του έργου. Για λόγους ασφαλείας, μέρος του εσωτερικού και του περιβάλλοντος χώρου, απομονώθηκε κατάλληλα από τους υπόλοιπους λειτουργικούς χώρους του κτηρίου για την υποδοχή του εξοπλισμού υδρογόνου. Η παραγωγή πρωτογενούς ενέργειας βασίζεται σε φωτοβολταϊκές συστοιχίες λεπτού υμενίου, συνολικής ισχύος 46,8 kW, και σε έξι ανεμογεννήτριες, συνολικής ισχύος 36 kW. Η όλη διάταξη είναι

διασυνδεδεμένη με το κτήριο στο οποίο καταμετρήθηκε ετήσια κατανάλωση της τάξης των 133kWh/m<sup>2</sup> και μέγιστη ζήτηση αιχμής 57kW, ακολουθώντας μοντέλο χρήσης γραφείων (I. Paspaliaris, 2013).



Εικόνα 2. Πανοραμική όψη εγκατάστασης

Το κύκλωμα υδρογόνου αποτελείται από μονάδα αλκαλικής ηλεκτρόλυσης, ισχύος 22 kW ονομαστικής παραγωγής 5 Nm<sup>3</sup>/h H<sub>2</sub> στα 12 bar, κυψέλη καυσίμου πολυμερικής μεμβράνης με ηλεκτρική ισχύ 20kW(αντίστοιχη θερμική 24kW<sub>th</sub>) και ένα λέβητα συμπίκνωσης καυσαερίων με καυστήρα υδρογόνου (60kW<sub>th</sub>). Το υδρογόνο διανέμεται μέσω δικτύου χαμηλής πίεσης και αποθηκεύεται μέσω συμπίεσης στα 180bar σε συστοιχία συμβατικών φιαλών μέγιστης χωρητικότητας 618Nm<sup>3</sup>H<sub>2</sub> (54kg). Η ωφέλιμη ηλεκτρική ενέργεια που αντιστοιχεί στο αποθηκευμένο υδρογόνο και δύναται να τροφοδοτηθεί στο κτήριο μέσω της κυψέλης καυσίμου είναι ίση με 1MWh, ισοδύναμης χρήσης συσσωρευτών μολύβδου – οξέος βάρους 56 τόνων. Η παραγόμενη θερμική ενέργεια από την κυψέλη καυσίμου και τον καυστήρα υδρογόνου αποθηκεύεται σε δοχείο αδρανείας ζεστού νερού χωρητικότητας 1m<sup>3</sup> και επανακτάται σε εναλλάκτη της μονάδας κλιματισμού του κτηρίου.

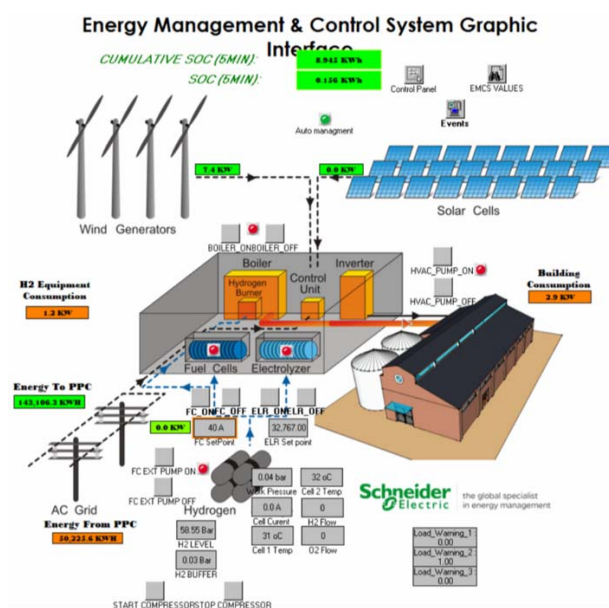
Ιδιαίτερη μέριμνα υπήρξε σε θέματα ασφάλειας χρήσης του υδρογόνου, σχετικά με τα οποία εντοπίστηκε απουσία ολοκληρωμένων κοινοτικών οδηγιών για εφαρμογή υδρογόνου σε κτηριακές εγκαταστάσεις. Για το λόγο αυτό έγινε εντατική αξιολόγηση των μέτρων που προτείνονται από τον Ευρωπαϊκό Σύνδεσμο Εταιρειών Βιομηχανικών Αερίων (EIGA) και τον Οργανισμό Προστασίας από τις Πυρκαγιές των Ηνωμένων Πολιτειών (NFPA). Το σύστημα ασφάλειας που εγκαταστάθηκε περιλαμβάνει πλήθος ανιχνευτών (ανιχνευτές H<sub>2</sub>, καπνού και υπέρυθρης ακτινοβολίας για τον εντοπισμό θερμικών εστιών), πνευματικές βαλβίδες απομόνωσης του δικτύου υδρογόνου, όπως και σύστημα καταιονισμού νερού για την προληπτική ψύξη των φιαλών αποθήκευσης (υπό συνθήκες θερμοκρασίας μεγαλύτερης των 53°C). Σε περίπτωση εντοπισμού πιθανού κινδύνου, ενεργοποιούνται δικλείδες ασφαλείας ανάλογα με το επίπεδο επικινδυνότητας όπως, οπτικοακουστικά μέσα για την απομάκρυνση του προσωπικού, παύση λειτουργίας του εξοπλισμού, απομόνωση του δικτύου και των φιαλών αποθήκευσης, καθώς και κατάσβεσης εστιών πυρκαγιάς με αδρανές αέριο.

Ένα εξελιγμένο σύστημα διαχείρισης (EMCS) ελέγχει σε πραγματικό χρόνο, μέσω κατάλληλων μετρητικών διατάξεων τη ροή ενέργειας μεταξύ των παραγωγών στοιχείων και των καταναλώσεων, ενώ ταυτόχρονα επιτηρεί και ελέγχει τις επιμέρους καταναλώσεις του κτηρίου (φωτισμό, σημείο ρύθμισης θερμοκρασίας ανά κλιματιζόμενη ζώνη κ.λπ.). Η όλη λειτουργία και αξιολόγηση του συστήματος έγινε με εφαρμογή αλγόριθμων προσαρμοζόμενου ελέγχου, που είχαν ως βασικούς στόχους την αδιάλειπτη τροφοδοσία του κτηρίου και τη διατήρηση των επιπέδων άνεσης των χρηστών σε ανεκτά επίπεδα.

Κατά την αρχική περίοδο των δοκιμών, το κτήριο παρέμεινε διασυνδεδεμένο στο τοπικό δίκτυο ηλεκτροδότησης, ώστε να εξασφαλιστεί η αδιάλειπτη λειτουργία των συστημάτων ασφαλείας και να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανοί κίνδυνοι που σχετίζονται με τη διαχείριση του υδρογόνου.



Εικόνα 3. Αίθουσα ελέγχου



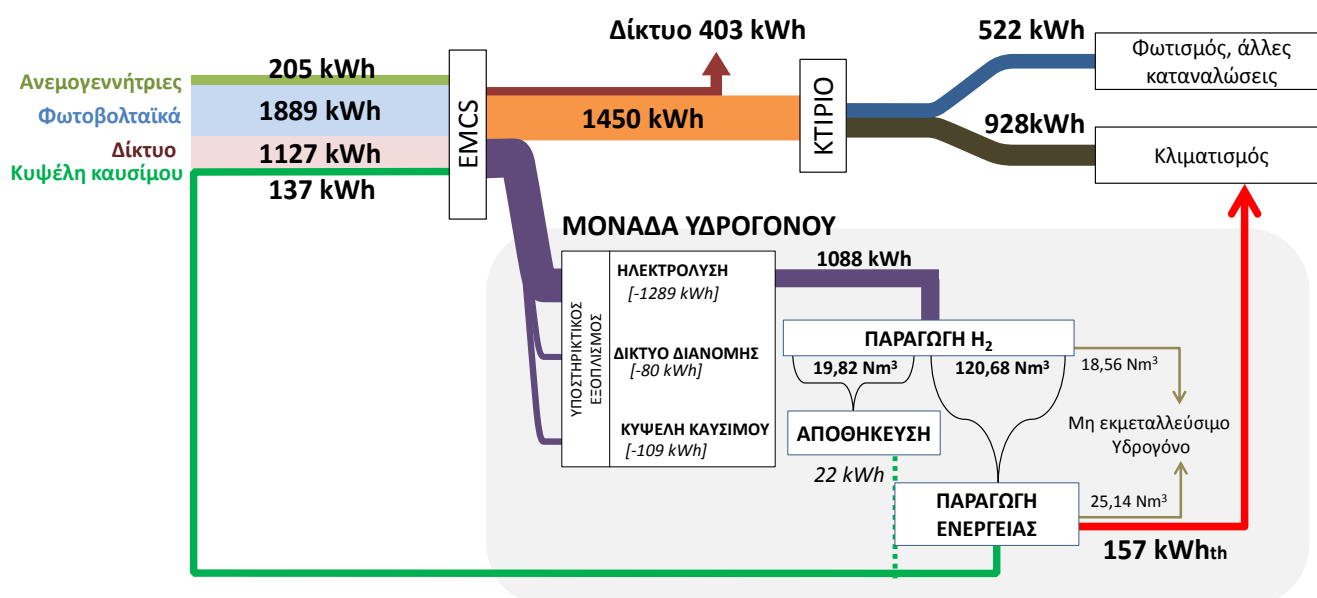
Εικόνα 4. Γραφική απεικόνιση συστήματος καταγραφής και ελέγχου

#### 4. Αξιολόγηση συστήματος

Το σύνολο των δοκιμών του συστήματος σε διάρκεια τριών ετών ανέδειξε την αξιοπιστία, την ασφαλή λειτουργία αλλά και το περιβαλλοντικό αποτύπωμα της νέας υβριδικής τεχνολογίας. Για παράδειγμα, στο παρακάτω γράφημα (Eικόνα *Error! Reference source not found.*) απεικονίζονται οι ροές ενέργειας, όπως καταμετρήθηκαν την πρώτη εβδομάδα του Μαΐου 2014. Στην υπό μελέτη περίοδο η ζήτηση για τη λειτουργία του κτηρίου ανήλθε σε 1450 kWh, η συνολική πρωτογενής παραγόμενη ενέργεια από τις ανεμογεννήτριες και τις φωτοβολταϊκές συστοιχίες ήταν ίση με 205 kWh και 1889 kWh αντίστοιχα, ενώ για την ασφαλή και αδιάλειπτη λειτουργία του εξοπλισμού απορροφήθηκαν 724kWh από το τοπικό δίκτυο. Η περίσσεια ενέργειας αξιοποιήθηκε για την παραγωγή 140,52Nm<sup>3</sup> υδρογόνου, εκ των οποίων 102,68 Nm<sup>3</sup>

τροφοδοτήθηκαν στην κυψέλη καυσίμου για 137 kWh ηλεκτρικής και 157 kWh<sub>th</sub> θερμικής ενέργειας. Ένα μεγάλο ποσοστό (27%) του παραχθέντος υδρογόνου απελευθερώθηκε ελεγχόμενα στην ατμόσφαιρα, λόγω κατασκευαστικών λειτουργικών περιορισμών, κυρίως κατά την εκκίνηση του εξοπλισμού.

Ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος υδρογόνου ισοδυναμεί με 22%, λαμβάνοντας υπ' όψιν και την ανακτώμενη θερμική ενέργεια που προσδίδεται στο σύστημα κλιματισμού, ενώ οι επιμέρους βαθμοί απόδοσης της μονάδας ηλεκτρόλυσης και της κυψέλης καυσίμου είναι ίση με 52% και 93,5% αντίστοιχα (συνυπολογίζοντας τη συμπαραγωγή θερμότητας). Η ενσωμάτωση του υβριδικού συστήματος στο κτήριο οδήγησε σε μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα κατά 50% (M. Taxiarchou, 2014). Κατά τη συγκεκριμένη περίοδο δεν ενσωματώθηκαν στους αλγόριθμους λειτουργίας μέτρα για τη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας μέσω του BMS, πολιτική που αξιολογήθηκε σε μεταγενέστερο χρόνο και οδήγησε σε μέγιστο βαθμό μείωσης εκπομπών CO<sub>2</sub> μέχρι και 100%.



Εικόνα Error! Reference source not found.. Διάγραμμα ροής ενέργειας

## 5. Συμπεράσματα

Η ανάγκη οικοδόμησης μιας πιο ανταγωνιστικής οικονομίας χαμηλών εκπομπών άνθρακα οδήγησε σε αναζήτηση νέων «πράσινων» τεχνολογιών για αποκεντρωμένα συστήματα παραγωγής και αποθήκευσης ενέργειας. Το ΕΜΠ, πρωτοπορώντας, ανέπτυξε και αξιολόγησε ένα υβριδικό ενεργειακό σύστημα με χρήση υδρογόνου, με δυνατότητα εφαρμογής σε κτήρια αλλά και σε επίπεδο τοπικού δικτύου. Η μονάδα έχει εγκατασταθεί στο Τεχνολογικό και Πολιτιστικό Πάρκο Λαυρίου, όπου μετά από τρία χρόνια συνεχούς λειτουργίας μελετήθηκε και βελτιστοποιήθηκε η λειτουργία της, ενώ ταυτόχρονα αναδείχθηκε η αξιόπιστη και ασφαλής λειτουργία της. Το έργο συναντά ευρεία αποδοχή από τον Ευρωπαϊκό και Διεθνή τύπο με



παρουσιάσεις στο Euronews, Rai, TV5 και σε έντυπα μέσα, ενώ αριθμεί άνω των 2.000 επισκεπτών, προωθώντας την επιστημονικά έρευνα του ΕΜΠ. Η ερευνητική ομάδα που συμμετέχει στο έργο απέκτησε σημαντική τεχνογνωσία και εμπειρία στις νέες ενεργειακές τεχνολογίες, αναπτύσσοντας εργαλεία για το σχεδιασμό και την προσομοίωση αντίστοιχων συστημάτων, ενώ ταυτόχρονα προχώρησε σε διαστασιολόγηση των τεχνολογιών για την πλήρη ενεργειακή αυτονόμηση του κτηρίου. Η μακροχρόνια μελέτη και ο εντοπισμός των σημείων που επιδέχονται βελτιστοποίηση έδωσαν νέα ώθηση στους βιομηχανικούς εταίρους του έργου για την παραγωγή νέου εξοπλισμού, σύμφωνα με τις απαιτήσεις του νέου υβριδικού ενεργειακού συστήματος, στοχεύοντας στην «πράσινη» επιχειρηματικότητα. Το υβριδικό σύστημα έχει ενσωματωθεί πλέον σε νέο ερευνητικό έργο, χρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Κοινότητα, αποσκοπώντας μέσω της διασύνδεσης πλήθος κτιρίων με κεντρικό έλεγχο την διεύρυνση των ερευνητικών προσπάθειών από κτιριακό επίπεδο σε επίπεδο τοπικού «έξυπνου» δικτύου (smart grid).

### Ευχαριστίες

Το πρόγραμμα H2SusBuild χρηματοδοτήθηκε από το έβδομο πρόγραμμα-πλαίσιο δραστηριοτήτων έρευνας, τεχνολογικής ανάπτυξης και επίδειξης της Ευρωπαϊκής Ένωσης (αριθ. σύμβασης επιδότησης 214395).

### Βιβλιογραφία

- I. Beausoleil-Morrison, M. Mottillo, A. Ferguson, H. Ribberink, L. Yang, K. Haddad, "The simulation of a renewable-energy-powered hydrogen-based residential electricity system", *2<sup>nd</sup> National IBPSA-USA Conference 2006*, pp. 67-74.
- R. Gammon, A. Roy, J. Barton, M. Little, "Hydrogen and Renewables Integration (HARI)", 2006. Available online at <http://ieahia.org/pdfs/HARI.pdf>, last accessed October 29<sup>th</sup>, 2011.
- N. Lymberopoulos, "Hydrogen Production from Renewables" chapter in "Assessment of Hydrogen Energy for Sustainable Development", *Springer*, 2007, pp. 51-57.
- I. Paspaliaris, M. Taxiarchou, A. Peppas, P.G. Benardos, S. Carosio, G. Urbano, A. Monero, R. De Laurentiis, "Application of a Hybrid Energy System Combining RES and H2 in an Office Building in Lavrion Greece", *Renewable Energy and Power Quality Journal*, ISSN 2172-038 X, No.11, March 2013.
- C. Petersdorff, T. Boermans, O. Stobbe, S. Joosen, W. Graus, E. Mikkers and J. Harnisch, "Mitigation of CO<sub>2</sub> emissions from the building stock", *ECOFYS*, 2004.
- PVGIS @ European Communities 2001-2007, available online at <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- M. Taxiarchou, A. Peppas, A. Merkoureas-Karras, K. Tsoukalas, "Evaluation of RES-H2 hybrid energy system limitations operated in an Office Building at Central Greece", *3rd International Conference on ENERGY in BUILDINGS 2014*, Athens, Hellas, November 15, 2014, ISSN: 2241-9748



M. Uzunoglu, O.C. Onar, M.S. Alam, "Modeling, control and simulation of a PV/FC/UC based hybrid power generation system for stand-alone applications", *Renewable Energy*, Vol. 34, 2009, pp. 509-520.

World Energy Technology and Climate Policy Outlook (WETO) @ European Communities 2001-2007, available online at [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/weto\\_final\\_report.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/weto_final_report.pdf)