



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΠΡΟΕΔΡΟΣ

Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80 Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου • ΤΗΛ.: 7721099, FAX: 7721057

Αρ.Πρωτ.: 4594

Αθήνα, 19-7-2012

Προς τα Μέλη ΔΕΠ της
Σχολής Μηχ/γων
Μηχ/κών

ΠΡΟΣΚΛΗΣΗ

Σας προσκαλούμε στην παρουσίαση της Διδακτορικής Διατριβής του κ. Γιαννόπουλου Δημητρίου, Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού ΕΜΠ, που θα πραγματοποιηθεί την Πέμπτη 30 Αυγούστου 2012, ώρα 11:00π.μ., στο Αμφιθέατρο Πολυμέσων του κτιρίου Βιβλιοθήκης του ΕΜΠ (Πολυτεχνειούπολη Ζωγράφου). Το Θέμα της Διδακτορικής Διατριβής είναι:

**«Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Πολυκριτηριακής Αξιολόγησης Καινοτόμων
Ενεργειακών Τεχνολογιών Σε Περιβάλλον Αβεβαιότητας»**

Επισυνάπτεται περίληψη της παραπάνω Διδακτορικής Διατριβής

Ο ΠΡΟΕΔΡΟΣ

Δ. Ε. Παπαντώνης
Καθηγητής Ε.Μ.Π

**Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών
Τομέας Θερμότητας
Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης**

**Περίληψη της Διδακτορικής Διατριβής του
Δημητρίου Χ. Γιαννόπουλου**

Επιβλέπουσα: Μ. Φούντη, Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Τίτλος Διατριβής:

**«Ανάπτυξη Μεθοδολογίας Πολυκριτηριακής Αξιολόγησης
Καινοτόμων Ενεργειακών Τεχνολογιών Σε Περιβάλλον
Αβεβαιότητας»**

Η διαρκώς αυξανόμενη κοινωνική ευαισθησία σε περιβαλλοντικά ζητήματα και η προφανής αντίθεση οικονομικών και περιβαλλοντικών στόχων αποτέλεσαν τις κυριότερες αιτίες που ώθησαν στη δεκαετία του '80 τους σχετιζόμενους με τον ενεργειακό σχεδιασμό στην αναζήτηση ολοκληρωμένων μεθόδων υποστήριξης των σχετικών αποφάσεων. Η επακόλουθη ταχεία εξέλιξη της αγοράς ενέργειας τις δυο επόμενες δεκαετίες, δημιούργησε νέες απαιτήσεις σε επίπεδο ενεργειακού σχεδιασμού. Η απελευθέρωση της ηλεκτροπαραγωγής αύξησε (ποσοτικά και ποιοτικά) τον εταιρικό ανταγωνισμό, ενώ η κοινωνική απαίτηση για ενεργειακή αειφορία εκφράστηκε εντονότερα, τόσο μέσω επίσημων πολιτικών, όσο και μέσω μη κυβερνητικών οργανώσεων. Η πολυπλοκότητα των αποφάσεων ενεργειακού σχεδιασμού εντείνεται αν ληφθεί υπόψη η εισαγωγή καινοτόμων τεχνολογιών κάλυψης ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων, που χαρακτηρίζονται κατά κανόνα από μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά υψηλά ρίσκα ως προς την τεχνική αποδοτικότητα και την οικονομική τους βιωσιμότητα. Οφείλει επίσης να επισημανθεί η ασάφεια που διακρίνει τα τεchnο-οικονομικά και περιβαλλοντικά δεδομένα/μοντέλα, τις μελλοντικές τεχνολογικές και κοινωνικοπολιτικές εξελίξεις, όπως και τις επιμέρους προτεραιότητες ενός μεγάλου αριθμού εμπλεκόμενων μερών. Τα παραπάνω

καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή ολοκληρωμένων μεθοδολογιών, προκειμένου τα προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού να επιλύονται κατά τρόπο βιώσιμο και ευρέως αποδεκτό.

Η περιβαλλοντική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) και η Πολυκριτηριακή Ανάλυση (ΠΑ) συνδέονται άμεσα – με διαφορετικό ωστόσο τρόπο – με την γενικότερη έννοια της ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών, εφαρμοζόμενες όλο και συχνότερα την τελευταία δεκαετία. Η ενσωμάτωσή τους σε μια συνολική μεθοδολογία συνδυασμένης αξιολόγησης είναι σε θέση να συνθέσει συνεργητικά τα επιμέρους οφέλη που συνεισφέρουν σε ένα πρόβλημα ενεργειακού σχεδιασμού. Η ΑΚΖ μπορεί να παρέχει περιβαλλοντική πληροφορία υψηλής ποιότητας, με τους δείκτες που παράγει ως αποτέλεσμα να χρησιμοποιούνται ευθέως ως περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης από την ΠΑ. Επιπλέον, η ΠΑ μπορεί να αποτελέσει το εργαλείο «επέκτασης» της ΑΚΖ, ενσωματώνοντας αντίστοιχα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια.

Το ερευνητικό πεδίο της διατριβής εντοπίζεται στην αναγκαιότητα υπέρβασης των καθιερωμένων τεχνο-οικονομικών μεθόδων αξιολόγησης και επιλογής ενεργειακών συστημάτων, μέσω ολοκληρωμένης προσέγγισης του προβλήματος αξιολόγησης. Στα πλαίσια του παρόντος διδακτορικού η έννοια της ολοκληρωμένης αξιολόγησης εντοπίζεται σε δυο κύρια σημεία: (α) την ενσωμάτωση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τόσο χρονικά (κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής), όσο και γεωγραφικά (εκπομπές εκτός σημείου λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος) και (β) τη δόμηση και εφαρμογή μιας συνολικής μεθοδολογίας υποστήριξης της επιλογής ενεργειακού συστήματος, λαμβάνοντας υπόψη εκτός από τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, την τεχνική αποδοτικότητα και την οικονομική βιωσιμότητα. Παράλληλα, η έννοια της ολοκληρωμένης αξιολόγησης συμπεριλαμβάνει την δυνατότητα μοντελοποίησης των υποκειμενικών προτεραιοτήτων που αποτελούν αναπόφευκτο τμήμα ενός εργαλείου υποστήριξης απόφασης, όπως και τη διαχείριση της αβεβαιότητας, τόσο των αντικειμενικών δεδομένων του προβλήματος απόφασης όσο και των υποκειμενικών προτεραιοτήτων των αποφασιζόντων.

Ο κύριος στόχος της προτεινόμενης προσέγγισης αφορά τη διατύπωση μιας μεθοδολογίας ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων με βάση τις απαιτήσεις που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, τα οποία καλύπτουν ηλεκτρικά ή/και θερμικά φορτία.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία βασίζεται μεν σε συνδυασμό δυο καθιερωμένων μεθοδολογιών (της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) και της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (ΠΑ)), ωστόσο μέσω της ενσωμάτωσης διαφόρων διεπιστημονικών εργαλείων (ανάλυση ενεργειακών συστημάτων σύμφωνα με τον 1ο και 2ο θερμοδυναμικό νόμο, περιβαλλοντική ανάλυση κύκλου ζωής, υποστήριξη απόφασης, διαχείριση αβεβαιότητας και θεωρία ασαφών αριθμών), υπερβαίνει τα όρια μιας επέκτασης συγκεκριμένης υπάρχουσας μεθοδολογίας.

Η μεθοδολογία συνδυασμένης αξιολόγησης που διατυπώνεται στο παρόν διδακτορικό αποτελείται από τρία σκέλη:

1. Τον καθορισμό του γενικού πλαισίου της αξιολόγησης, όπου τίθεται ο σκοπός της συνδυασμένης αξιολόγησης, καθώς και πιθανές μεθοδολογικές απαιτήσεις. Διασαφηνίζονται με βάση τις λειτουργικές απαιτήσεις της εφαρμογής οι ελάχιστες προδιαγραφές των επιλέξιμων

συστημάτων. Ακολούθως αναλύονται τα ανταγωνιστικά συστήματα που ενσωματώνουν διαφορετικές τεχνολογίες προκειμένου να ανταποκριθούν στις ενεργειακές απαιτήσεις που αποτελούν απαραίτητο δεδομένο.

2. Την επιμέρους αξιολόγηση της τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής συνιστώσας. Εντός του πλαισίου της εφαρμογής που ορίστηκε στο πρώτο σκέλος, αναζητούνται και επεξεργάζονται δεδομένα που αφορούν τις τρεις συνιστώσες της συνολικής αποδοτικότητας των ενεργειακών συστημάτων. Ως αποτέλεσμα, παράγονται τρεις κατηγορίες δεικτών – κριτηρίων αξιολόγησης. Τα κριτήρια αξιολόγησης δίδονται σε μορφή ασαφών αριθμών (εύρος διακύμανσης και κεντρική τιμή), έτσι ώστε να ενσωματώνουν την ασάφεια του υπολογισμού / καθορισμού τους.

3. Τη συνδυασμένη αξιολόγηση των ανταγωνιστικών συστημάτων. Το αποτέλεσμα του δεύτερου σκέλους χαρακτηρίζεται ως το αντικειμενικό σκέλος της αξιολόγησης, προκειμένου να καταστεί σαφής ο διαχωρισμός από το υποκειμενικό σκέλος που αφορά τις προτεραιότητες και τις επιδιώξεις των ατόμων/ομάδων που καλούνται να αποφασίσουν ως προς το επικρατέστερο ενεργειακό σύστημα. Ο βασικός στόχος εντοπίζεται στον συνδυασμό των τριών «ρών πληροφορίας» όπως καθορίστηκαν στο δεύτερο στάδιο μέσω των επιμέρους αξιολογήσεων, με ενσωμάτωση του υποκειμενισμού που αναπόφευκτα χαρακτηρίζει κάθε ανθρώπινη απόφαση. Παράλληλα, η μεθοδολογία στοχεύει στην διαχείριση της ασάφειας αφ' ενός του αποτελέσματος των επιμέρους αξιολογήσεων και αφετέρου του υποκειμενισμού των ατόμων/ομάδων που λαμβάνουν την απόφαση της επιλογής ενεργειακού συστήματος.

Η μορφή του τελικού αποτελέσματος της μεθοδολογίας εξαρτάται από το επίπεδο ασάφειας των υποκειμενικών προτεραιοτήτων των αποφασιζόντων. Όταν δεν είναι εφικτή η ποσοτικοποίηση των προτεραιοτήτων της απόφασης μέσω καθορισμού συντελεστών εφαρμόζεται η μεθοδολογία πολυκριτηριακής ανάλυσης για κάθε συνδυασμό (τριάδα) συντελεστών βαρών των τριών κατηγοριών κριτηρίων (τεχνικά, περιβαλλοντικά, οικονομικά) και παράγεται ένα τριγωνικό διάγραμμα που αποτυπώνει το επικρατών σύστημα για κάθε υποκειμενικό συνδυασμό. Αν είναι εφικτός ο προσδιορισμός του συντελεστή βαρύτητας κάθε κριτηρίου μέσω ασαφών αριθμών (κεντρική τιμή και εύρος διακύμανσης), εφαρμόζεται πρωτότυπη μεθοδολογία ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης. Τα κριτήρια αξιολόγησης εισάγονται με την ασαφή τους μορφή και το τελικό αποτέλεσμα αναπαριστά την κατάταξη της συνδυασμένης αξιολόγησης με ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας.

Εξετάστηκαν δυο μελέτες περιπτώσεων: (α) Αξιολόγηση τεχνολογιών βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής σε ναυτικές εφαρμογές και (β) Αξιολόγηση τεχνολογιών μικρο-συμπαγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για οικιακές εφαρμογές. Μέσω των εφαρμογών αυτών αναδείχθηκαν τα εξής συμπεράσματα για τη λειτουργικότητα της προτεινόμενης μεθοδολογίας:

- Επιτεύχθηκε πλήρης ενσωμάτωση της περιβαλλοντικής συνιστώσας στη διαδικασία ολοκληρωμένης αξιολόγησης.

- Αποφεύχθηκε η μονομέρεια της αξιολόγησης, μέσω του συνδυασμού της τεχνικής, της οικονομικής και της περιβαλλοντικής πληροφορίας των εξεταζόμενων συστημάτων.

- Κατά την περίπτωση όπου ήταν εφικτή η (έστω ασαφής) εκτίμηση των προτεραιοτήτων των (εν δυνάμει) αποφασίζόντων, αποτυπώθηκε το εύρος της ασάφειας τόσο των τιμών των κριτηρίων, όσο και των συντελεστών βαρύτητας στα τελικά αποτελέσματα, ενισχύοντας την παρεχόμενη πληροφορία προς τους αποφασίζοντες. Η εισαγωγή της έννοιας της αξιοπιστίας της ασαφούς κατάταξης και η αντίστοιχη ποσοτικοποίησή της αποτελούν επιπρόσθετα ισχυρά εργαλεία ανάλυσης του πολυκριτηριακού προβλήματος.

- Αντιμετωπίστηκαν με επιτυχία οι συνθήκες πλήρους αδυναμίας προσδιορισμού της υποκειμενικής συνιστώσας (συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων). Η σάρωση των πιθανών συνδυασμών αποτυπώθηκε στο σύνθετο διάγραμμα των αποτελεσμάτων, παρέχοντας μια πλήρη και συνοπτική «ακτινογραφία» του προβλήματος αξιολόγησης, αναδεικνύοντας τις περιοχές επικράτησης των ανταγωνιστικών συστημάτων στον τριγωνικό «χάρτη απόφασης».

Όσον αφορά τα ευρήματα της αξιολόγησης τεχνολογιών βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής σε ναυτικές εφαρμογές, διαπιστώθηκε ότι το σύστημα που βασίζεται στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου διαθέτει μεν σημαντικά θεωρητικά πλεονεκτήματα συγκρινόμενο με το συμβατικό σύστημα κινητήρα DE, όμως η ανεπάρκεια επίτευξης υψηλών βαθμών απόδοσης και το υπέρογκο κόστος εγκατάστασης καθιστούν σαφή την υστέρησή του, ακόμα και όταν η απόφαση λαμβάνεται με μεγαλύτερο συντελεστή βαρύτητας στα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα της μονάδας MCFC. Αν επαληθευτούν τα επόμενα 10-15 έτη οι πλέον αισιόδοξες προβλέψεις σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη μείωση του κόστους εγκατάστασης, διαφαίνεται ότι οι μονάδες βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής με συστοιχία MCFC είναι σε θέση να αντικαταστήσουν συμβατικές μονάδες. Ωστόσο, το γεγονός ότι οι μονάδες με κινητήρα diesel μπορούν να ενσωματώσουν πλήθος τεχνικών προκειμένου να μειώσουν τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις με ανεκτούς συμβιβασμούς ως προς το κόστος και την ενεργειακή αποδοτικότητα, αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα που δρα αρνητικά στην επέκταση της τεχνολογίας MCFC.

Η συνδυασμένη αξιολόγηση των τεχνολογιών μικροσυμπαγωγής ανέδειξε το συνολικό συμπέρασμα ότι το κύριο πλεονέκτημα του συστήματος μ-ΣΗΘ είναι η βελτιωμένη περιβαλλοντική επίδοση, η οποία ωστόσο είναι πιθανό να τεθεί υπό αμφισβήτηση σε συνθήκες μειωμένης ετήσιας χρήσης. Στον αντίποδα, στο παρόν στάδιο εξέλιξης των κυψελών καυσίμου δεν έχει δοθεί πειστική απάντηση σε σειρά τεχνικών ζητημάτων (ανθεκτικότητα, αξιοπιστία, χαμηλός χρόνος ζωής, απόκριση σε μεταβαλλόμενη απαίτηση), κάτι που έχει άμεσο αντίκτυπο στην επίδοση των αντίστοιχων τεχνικών κριτηρίων. Η οικονομική βιωσιμότητα της μονάδας SOFC κρίνεται κατά περίπτωση και βάσει πλήθους υποθέσεων σχετικά με την εξέλιξη του κόστους εγκατάστασης και χρήσης τα επόμενα χρόνια. Τα οικονομικά στοιχεία που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα αξιολόγηση χαρακτηρίζονται ως εξαιρετικά ευνοϊκά, καθώς υποθέτουν κόστος εγκατάστασης τάξης μεγέθους 3.000 €, τη στιγμή που τρέχουσες εκτιμήσεις κόστους υπερβαίνουν τα 50.000 € για σύστημα SOFC δυναμικότητας 1kW. Με δεδομένο ότι η τεχνική απόδοτικότητα και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός συστήματος μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC δεν αναμένεται να αλλάξουν δραματικά (τουλάχιστον τα επόμενα χρόνια), η εξέλιξη της οικονομικής βιωσιμότητας αναδεικνύεται ως καθοριστικός παράγοντας καθορισμού της εξάπλωσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας.