ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Χ. ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ
Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ:
Μ. ΦΟΥΝΤΗ
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ ΠΟΛΥΚΡΙΤΗΡΙΑΚΗΣ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ ΚΑΙΝΟΤΟΜΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΩΝ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ Χ. ΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ
Διπλωματούχου Μηχανολόγου Μηχανικού Ε.Μ.Π.

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΣΥΜΒΟΥΛΕΥΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:
1. Μ. ΦΟΥΝΤΗ, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπουσα)
2. Εμ. ΡΟΓΔΑΚΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Δ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:
1. Μ. ΦΟΥΝΤΗ, Καθ. Ε.Μ.Π. (Επιβλέπουσα)
2. Εμ. ΡΟΓΔΑΚΗΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
3. Δ. ΧΟΥΝΤΑΛΑΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
4. Δ. ΔΙΑΚΟΥΛΑΚΗ, Καθ. Ε.Μ.Π.
5. Η. ΤΑΤΣΙΟΠΟΥΛΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
6. Χ. ΦΡΑΓΚΟΠΟΥΛΟΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.
7. Ι. ΨΑΡΡΑΣ, Καθ. Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012

Η έγκριση της Διδακτορικής Διατριβής από την Ανώτατη Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε. Μ. Πολυτεχνείου δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνωμών του συγγραφέα (Ν.5343/1932, Άρθρο 202)

Στη σύζυγό μου Άντα και την κόρη μου Μαργαρίτα.

Πρόλογος

Ο πρόλογος μιας διδακτορικής διατριβής διαθέτει κάποια ιδιαίτερα χαρακτηριστικά, τα οποία τον διαχωρίζουν σαφώς από το υπόλοιπο κείμενο. Ο συγγραφέας έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει το πρώτο πρόσωπο, μπορεί να εκφράσει συναισθήματα και (όπως είναι ευρύτερα γνωστό) ο πρόλογος αποτελεί ένα από τα τμήματα (αν όχι το μοναδικό...) που αναμένεται να επιλέξει να διαβάσει ο πιθανός αναγνώστης.

Η παρούσα διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Ετερογενών Μειγμάτων και Συστημάτων Καύσης του Τομέα Θερμότητας της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του Ε.Μ.Π. Ήδη πρίν τη συγγραφή είχα συνειδητοποιήσει τα ρίσκα του θέματος που είχα αναλάβει. Καταρχάς έπρεπε να δημιουργηθεί η «κρίσιμη μάζα» γνώσης σε τρια βασικά γνωστικά πεδία: Την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ), την Πολυκριτηριακή Ανάλυση (ΠΑ) και τις ενεργειακές τεχνολογίες που θα εστίαζε η διδακτορική διατριβή. Οι «βαθμοί ελευθερίας» έμοιαζαν υπερβολικά πολλοί: Η ΑΚΖ περιγράφονταν μεν στο πρότυπο ISO14040, αλλά η εφαρμογή της σε ενεργειακά συστήματα δεν ήταν σαφώς ορισμένη. Η εφαρμογή μεθοδολογιών ΠΑ απαιτούσε πλήθος στοιχείων, που αφορούσαν τόσο το αντικειμενικό σκέλος της αξιολόγησης, όσο και το υποκειμενικό. Επιπρόσθετα, οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμου και οι εφαρμογές που εξετάστηκαν χαρακτηρίζονται ως ιδιαίτερα καινοτόμες και μόνο μέσω της συμμετοχής σε ερευνητικά προγράμματα έγινε εφικτή η συλλογή των απαραίτητων δεδομένων. Το γεγονός ότι τα παραπάνω γνωστικά πεδία ήταν νέα στο εργαστήριο του οποίου ήμουν μέλος, δε συνεισέφερε στο να είναι απότομη η αντίστοιχη «καμπύλη μάθησης». Θεωρώ ότι το συνολικό αποτέλεσμα της διατριβής είναι παραπάνω από ικανοποιητικό, καθώς προτείνεται μια ολοκληρωμένη μεθοδολογία αξιολόγησης, με σημαντικά περιθώρια βελτίωσης, αλλά με θετική καινοτόμο συνεισφορά.

Η συγγραφή μιας διδακτορικής διατριβής αποτελεί μεν μια διαδικασία μοναχική, κατά την οποια καλείται κανείς να αντιμετωπίσει τους προσωπικούς του δαίμονες, ωστόσο κατά τη διαδρομή πάντα υπάρχουν άτομα που επηρεάζουν και επηρεάζονται, θετικά και αρνητικά. Είθισται να αναφέρονται μόνο οι θετικές επιδράσεις και επιρροές, ωστόσο οι αρνητικές που παραλείπονται είναι κατά συνθήκη πιο ενδιαφέρουσες... Η απαρίθμηση των ατόμων ή καταστάσεων που επέδρασαν αρνητικά στην παρούσα διατριβή δεν συγκαταλέγεται στις πρωτοτυπίες της.

Οφείλω να αρχίσω τις ευχαριστίες από την επιβλέπουσα Καθηγήτρια Μαρία Φούντη. Εκτός από την αδιάλειπτη επιστημονική καθοδήγηση, η Καθηγήτρια Φούντη παρείχε αμέριστη ηθική υποστήριξη, μέσω της προσωπικής σχέσης που η ίδια φρόντισε να αναπτυχθεί άμεσα. Η αμεσότητα της επικοινωνίας και το ιδιαίτερο χιούμορ της, διευκόλυναν τη διευθέτηση κάθε σημαντικού ή όχι θέματος. Η εμπιστοσύνη με την οποία με περιέβαλε και η ελευθερία

επιλογών που μου παρείχε, απαντώνται σπάνια, όχι μόνο στις σχέσεις επιβλέποντα-υποψήφιου, αλλά και στις διαπροσωπικές σχέσεις εν γένει.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους Καθηγητές Δημήτριο Χουντάλα και Εμμανουήλ Ρογδάκη για τη συμβολή τους στην περάτωση της διατριβής ως μέλη της τριμελούς επιτροπής , καθώς επίσης και τα μέλη της επταμελούς επιτροπής για την εποικοδομητική τους συνεισφορά. Ιδιαίτερως, απευθύνω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες στον Καθηγητή Χρίστο Φραγκόπουλο για τα εύστοχα και ουσιαστικά του σχόλια.

Σε αυτή τη διαδρομή είχα την τύχη να έχω τρεις εξαιρετικούς συνοδοιπόρους: τους φίλους και συναδέλφους Διδάκτορες Διονύση Κολαΐτη, Δημήτρη Κατσουρίνη και Δημήτρη Κονταξάκη. Ήταν δίπλα μου στα εύκολα και τα δύσκολα, συμμεριζόμενοι τα άγχη και τα προβλήματά μου. Οι απολαυστικές ομαδικές αναλύσεις επί παντός επιστητού (foundation...) έκαναν τη διαδρομή λιγότερο μοναχική και τις κάθε είδους ανασφάλειες αντιμετωπίσιμες. Τους ευχαριστώ και εύχομαι να συμπορευόμαστε για πολύ καιρό.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ οφείλω στους φίλους και συναδέλφους του εργαστηρίου Γιώργο Ζαννή, Δήμο Κοντογεώργο, Γιάννη Μανδηλαρά, Μαριάννα Σταματιάδου, Γιώργο Βουρλιωτάκη, Γιώργο Σκεύη, Χρήστο Κεραμιώτη, Ελένη Ασημακοπούλου, Μανώλη Μαλλιωτάκη και Μπάμπη Μαυράκη για το πνεύμα συναδελφικότητας και αλληλεγγύης που χαρακτήριζε την καθημερινότητα του εργαστηρίου. Ιδιαιτέρως ευχαριστώ τη Ρένα Φούντη, τόσο για τη βοήθεια με τα εκάστοτε διαδικαστικά, όσο και για την αμέριστη και έμπρακτη ηθική της υποστήριξη.

Η λέξη "ευχαριστώ" μοιάζει ελλιπής και τετριμμένη, όταν την απευθύνει κανείς στην οικογένειά του. Η συνεισφορά των γονιών μου Χαράλαμπου και Αθηνάς προφανώς και δεν είναι δυνατόν να συμπυκνωθεί σε λίγες λέξεις, ενώ το εύρος και η ποιότητά της υπερβαίνει τις εκφραστικές μου δυνατότητες. Ο παρών πρόλογος χρησιμεύει απλά ως αφορμή για να δηλώσω την ευγνωμοσύνη μου για όλα όσα μου προσέφεραν. Τα παραπάνω ισχύουν και για τα αδέλφια μου Κώστα και Βασιλική.

Ως ελάχιστο δείγμα ευγνωμοσύνης, η παρούσα διατριβή αφιερώνεται στη σύζυγό μου Άντα και την κόρη μου Μαργαρίτα. Το να επιδιώκει κανείς να χτίζει μια σχέση ζωής και να διαμορφώνει οικογένεια παράλληλα με το διδακτορικό είναι ανέφικτο, αν δεν υποστηρίζεται από ένα σύντροφο με κατανόηση, υπομονή, σεβασμό και αγάπη. Είχα την τύχη να μου προσφερθούν όλα αυτά σε άπλετη ποσότητα από την Άντα. Η Μαργαρίτα δε χρειάστηκε να προσπαθήσει ιδιαίτερα, καθώς η ύπαρξή της και μόνο ήταν και είναι Θείο δώρο. Κλείνοντας, εκφράζω τις ευχαριστίες και την εκτίμησή μου στην οικογένεια της συζύγου μου για την συμπαράσταση που μου προσέφερε και ειδικά στον πατέρα της Καθηγητή Ιωάννη Κωνσταντόπουλο για την πολύτιμη βοήθειά του.

Εκτεταμένη Περίληψη

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 υψηλή διακινδύνευση ως προς την τεχνική αποδοτικότητα και την οικονομική τους βιωσιμότητα. Οφείλει επίσης να επισημανθεί η ασάφεια που διακρίνει τα τεχνο-οικονομικά και περιβαλλοντικά δεδομένα/μοντέλα, τις μελλοντικές τεχνολογικές και κοινωνικοπολιτικές εξελίξεις, όπως και τις επιμέρους προτεραιότητες ενός μεγάλου αριθμού εμπλεκομένων 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 διαμόρφωσης μιας ολοκληρωμένης προσέγγισης του προβλήματος αξιολόγησης. Στα πλαίσια του παρόντος 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 $1^{ο}$ και $2^{ο}$ 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 στην παρούσα διατριβή 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 «ροών 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 επικρατούν 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-συμπαραγωγής 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) αποφασιζόντων, 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 μικροσυμπαραγωγής 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 οτι η τεχνική αποδοτικότητα 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.

Extended Abstract

The rising social sensitivity regarding environmental issues and the conflict between economic and environmental priorities have been recognized during the 80's as the major driving forces towards researching integrated decision support methodologies in the field of energy planning. Additional challenges were introduced in this field, caused by subsequent transformations in the energy market: the liberalization of the electricity production boosted competition, while the demand for sustainability was expressed more explicitly through relevant policies and NGOs. The complexity of energy planning decision making is intensified by the introduction of innovative heat and power technologies and systems, which in general have lower impact to the environment, but high risks regarding their technical efficiency and economic viability. Moreover, a crucial factor that should not be overlooked is the uncertainty concerning techno-economic and environmental data and models, the evolution of the socio-political context and the decision priorities of a growing number of parties involved in relevant decision problems. All the above justify the need for developing and implementing integrated assessment methodologies, in order to reach viable and widely acceptable energy planning decisions.

The methodologies of Life Cycle Analysis (LCA) and Multicriteria Analysis (MA) are directly related – in a different sense – with the general concept of integrated assessment of energy technologies and the frequency of their applications is growing in the last decade. Their potential incorporation in a holistic assessment methodology can combine the individual benefits they contribute to an energy planning problem. The output of the LCA can be utilized as high quality environmental criteria in the MA and vice versa, the MA can provide the methodological framework towards combining the economic and technical information and the LCA output.

The research field of the present thesis focuses on an integrated methodology framework for assessing and selecting energy technologies, which will overcome the limitations of the conventional techno-economic approach. The concept of integrated assessment is herewith located in two focal issues: (a) the integration of the total environmental impact of the systems examined, both in terms of time (throughout their total life cycle) and place (emissions not occurring in the vicinity of the system operation) and (b) the formulation and implementation of a holistic methodology, in order to support the selection of an energy technology, also considering – apart from the environmental impact – the technical performance and the economic viability. In parallel, the integrated assessment concept – as defined in the framework of the present thesis – encompasses the capability of modelling the subjective decision making priorities, which inevitably affect the technology selection. Last but not least, a crucial feature of the integrated assessment methodology is the

consideration of the overall data uncertainty (characterizing both the objective and the subjective information input) and the estimation of its influence.

The main objective of the proposed methodology lies on the formulation of an integrated assessment methodology aiming to support the selection of energy technologies, on the basis of the main features description of the previous paragraph. The cornerstone of the integrated approach proposed is the combination of LCA and MA; however through the incorporation of various interdisciplinary tools (energy systems analysis according to the 1st and 2nd Law of Thermodynamics, decision support methods, handling of uncertainty, fuzzy numbers theory), the method described exceeds the limits of an extension of a specific existing methodology.

The integrated assessment approach consists of three basic methodological stages:

1. Description of the general assessment framework.

It involves the definition of the overall scope and the minimum common specifications required in order the competitive systems to qualify as comparable. In the first stage, the energy demand is defined both in terms of quantity and time variation and also the operation and components of the systems examined are analysed.

2. Separate evaluation of technical, environmental and economic performance.

The second methodological stage refers to acquisition and elaboration of data regarding the three aspects of the overall performance. Assessment indexes/criteria are produced for each of the three corresponding aspects, formulated as fuzzy numbers, in order to incorporate the ambiguity of determining their corresponding values.

3. Combination of separate evaluations – Integrated assessment.

The output of the second stage is characterized as the objective part of the assessment problem, so as to distinguish it from the subjective part, which refers to the priorities of the decision making individuals/groups. In the final stage of the methodology, the three "flows" of objective information are integrated, alongside with the subjective part of the assessment problem. In parallel, the inability of strictly defining the subjective priorities is also modeled.

The final output is formulated according to the level of uncertainty regarding the determination of the criteria weight factors (which model the decision making priorities). In the case of total inability to set values to the weight factors, the multicriteria method is applied to every combination of group weight factors (technical, environmental and economic), producing a ternary diagram depicting the prevailing system for each of the subjective combinations. If the criteria weight factors can be determined – even in fuzzy terms – an innovative fuzzy multicriteria method is introduced and implemented. In this case, the final result represents the fuzzy ranking of the systems examined, alongside with the quantification of the ranking reliability.

The proposed integrated assessment methodology has been applied in two case studies: (a) Assessment of Auxiliary Power Unit (APU) technologies in marine applications and (b) Assessment of micro-cogeneration (m-CHP) technologies for domestic applications. As regards the functionality of the methodology, the following conclusions were drawn:

- The environmental impact was successfully integrated in the decision making approach.
- Through considering all three key aspects of the systems' performance (technical, environmental and economic), the assessment procedure has alleviated the limitation of a conventional one-sided approach.
- In the first case study, in which the fuzzy estimation of criteria weight factors was available, the influence of input uncertainty was represented in the final outcome, enhancing the information provided to a potential decision maker. The introduction of the fuzzy ranking reliability concept and its corresponding quantification proved to be powerful analysis tools of the multicriteria problem.
- The case of inability to estimate weight factors was also successfully handled. The output of recalculating the multicriteria algorithm for all possible group weight factor combinations was presented in a comprehensive diagram, providing a complete and concise overall picture of the assessment problem. On the resulting ternary diagram the "prevailing regions" of each alternative are highlighted.

Concerning the conclusions of the integrated assessment of the generating technologies in naval applications, the fuel cell APU has important theoretical advantages compared to the diesel APU, however the inability to achieve high efficiencies and its present costs are decisive factors justifying its inferior preference flow. This situation does not change even if higher importance is assigned to the environmental benefits of the MCFC APU. As regards the near future (in 10-15 years) scenario, in which the multicriteria model assumes the extremely optimistic provisions concerning efficiency raise and cost reduction of the fuel cell APU, a moderate preference potential is identified. However, the diesel engine APUs can incorporate a number of emission reduction techniques, accompanied with modest to low compromises regarding efficiency decrease and relevant costs. The statement of the previous sentence can prove decisive towards limiting the adoption fuel cell technology in marine applications.

The application of the proposed methodology in the case of m-CHP technologies has shown that the main advantage of the fuel cell m-CHP system is the improved environmental performance, which however may be compromised from low annual utilization conditions. As regards the technical performance of the SOFC unit, the present state of technological development has not yet provided convincing answers to a number of critical issues, such as

durability, reliability, stack lifetime and response in demand variance. The economic viability of the SOFC unit depends on the specific case and the inevitable assumptions regarding the decrease rate of the near future installation costs. The economic data used in the present analysis are considered as quite optimistic, assuming a system investment cost of 3000€, when recent estimations for similar actual systems exceed the limit of 50000€. Provided that the main technical and environmental attributes of SOFC m-CHP unit are not expected to change dramatically in the near future, the decrease rate of investment costs is crucial towards determining the preference potential of SOFC units for domestic cogeneration.

Περιεχόμενα

Πρόλογος ***i***

Εκτεταμένη Περίληψη ***iii***

Extended Abstract ***vii***

Περιεχόμενα ***xi***

Κατάλογος Σχημάτων ***xvi***

Κατάλογος Πινάκων ***xxi***

Κατάλογος Εικόνων ***xxvi***

Κατάλογος Συμβόλων ***xxvii***

Λατινικά Σύμβολα **xxvii**

Ελληνικά Σύμβολα **xxix**

Κεφάλαιο 1ο

Εισαγωγή ***2***

1.1 Ερευνητικό πεδίο διατριβής **3**

1.2 Αντικείμενο και στόχος **5**

1.3 Στοιχεία πρωτοτυπίας **6**

1.4 Διάρθρωση διατριβής **8**

1.5 Δημοσιεύσεις **10**

Διεθνή περιοδικά με κρίση: 10

Διεθνή συνέδρια με κρίση: 10

Ελληνικά συνέδρια με κρίση: 11

Συμμετοχή σε τεχνικές ημερίδες/εκθέσεις: 12

Κεφάλαιο 2ο

Ολοκληρωμένη Αξιολόγηση Ενεργειακών Τεχνολογιών ***14***

2.1 Περιβαλλοντική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) **15**

2.1.1 Η Μεθοδολογία της ΑΚΖ 17

2.1.2 Εφαρμογές ΑΚΖ στον ενεργειακό τομέα 20

2.2 Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων (ΠΚΛΑ) **23**

2.2.1 Πολυκριτηριακή Ανάλυση 24

2.2.2 Πολυκριτηριακή Ανάλυση και Ενεργειακός Σχεδιασμός 31

2.3 Συμπερασματικά σχόλια 34

Βιβλιογραφία 2ου Κεφαλαίου 36

Ελληνική 36

Ξενόγλωσση 36

Κεφάλαιο 3ο

Μεθοδολογία ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών 42

3.1 Εισαγωγή 43

3.1.1 Αδυναμίες κλασικής τεχνο-οικονομικής μεθοδολογίας αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων. 43

3.1.2 Αντιμετώπιση αδυναμιών τεχνο-οικονομικής μεθοδολογίας 44

3.1.3 Σύνοψη προτεινόμενης μεθοδολογίας ολοκληρωμένης αξιολόγησης. 46

3.2 Αναλυτική περιγραφή μεθοδολογίας 48

3.2.1 Καθορισμός πλαισίου συνδυασμένης αξιολόγησης 50

3.2.2 Επιμέρους αξιολογήσεις τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής συνιστώσας 50

3.2.3 Συνδυασμός επιμέρους αξιολογήσεων 63

3.3 Κριτική αποτίμηση μεθοδολογίας 80

Βιβλιογραφία 3ου κεφαλαίου 82

Κεφάλαιο 4ο

Αξιολόγηση τεχνολογιών βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής σε ναυτικές εφαρμογές 84

4.1 Παρουσίαση τρέχουσας κατάστασης και τεχνολογικών τάσεων 85

4.2 Τεχνολογίες βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής στη ναυτιλία 89

4.2.1 Κινητήρες Diesel 90

4.2.2 Συστήματα κυψελών καυσίμου 90

4.3 Προηγούμενες προσπάθειες αξιολόγησης 97

4.4 Εφαρμογή μεθοδολογίας 99

4.4.1 Καθορισμός πλαισίου συνδυασμένης αξιολόγησης 99

4.4.2 Επιμέρους αξιολογήσεις τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής συνιστώσας 105

4.4.3 Συνδυασμός επιμέρους αξιολογήσεων 117

4.5 Αποτελέσματα 122

4.5.1 Σενάριο παρούσας κατάστασης τεχνικής – οικονομικής – περιβαλλοντικής επίδοσης συστημάτων 122

4.5.2 Μελλοντικό σενάριο τεχνικής-οικονομικής-περιβαλλοντικής επίδοσης συστημάτων 124

4.6 Σύνοψη – κριτική αποτελεσμάτων 127

Βιβλιογραφία 4ου Κεφαλαίου 129

Ελληνική βιβλιογραφία 129

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία 129

Κεφάλαιο 5ο

Αξιολόγηση τεχνολογιών μικρο-συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για οικιακές εφαρμογές 134

5.1 Εισαγωγή 135

5.2 Παρουσίαση τρέχουσας κατάστασης και εκτιμήσεων για την ανάπτυξη εφαρμογών μικρο-ΣΗΘ 137

5.3 Τεχνολογίες οικιακής μικρο-συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας 142

5.3.1 Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) 144

5.3.2 Μικροστρόβιλοι 148

5.3.3 Κινητήρες Stirling 151

5.3.4 Κινητήρες κύκλου Rankine με οργανικό εργαζόμενο μέσο (Organic Rankine Cycle - ORC) 153

5.3.5 Κυψέλες καυσίμου 154

5.4 Προηγούμενες προσπάθειες αξιολόγησης 158

5.5 Εφαρμογή μεθοδολογίας 161

5.5.1 Καθορισμός πλαισίου συνδυασμένης αξιολόγησης 161

5.5.2 Επιμέρους αξιολογήσεις τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής συνιστώσας 166

5.5.3 Συνδυασμός επιμέρους αξιολογήσεων 184

5.6 Αποτελέσματα 188

5.6.1 Περίπτωση αξιολόγησης Α: Συγκριτική αξιολόγηση συστήματος μ-ΣΗΘ συστοιχίας SOFC με συμβατική περίπτωση κάλυψης και ηλεκτρικών αναγκών 188

5.6.2 Περίπτωση αξιολόγησης Β: Σύγκριση με ανταγωνιστικό σύστημα μ-ΣΗΘ (ΜΕΚ).....192

5.7 Σύνοψη – κριτική αποτελεσμάτων 196

Βιβλιογραφία 198

Ελληνική βιβλιογραφία 198

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία 198

Κεφάλαιο 6ο

Συμπεράσματα..... 202

6.1 Οφέλη και περιορισμοί των μεθοδολογιών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και Πολυκριτηριακής Ανάλυσης 203

6.2 Συμπεράσματα σχετικά με την προτεινόμενη μεθοδολογία..... 204

6.3 Συμπεράσματα σχετικά με τις εφαρμογές 206

6.3.1 Αξιολόγηση τεχνολογιών βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής σε ναυτικές εφαρμογές 206

6.3.2 Αξιολόγηση τεχνολογιών μικρο-συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για οικιακές εφαρμογές.....207

6.4 Προτάσεις μελλοντικής έρευνας 208

6.4.1 Ενίσχυση ποιότητας δεδομένων.....208

6.4.2 Επέκταση εφαρμογών και εξεταζόμενων τεχνολογιών 209

6.4.3 Εμβάθυνση επιμέρους μεθόδων.....209

Παραρτήματα

Παράρτημα Α - Η οικογένεια μεθόδων PROMETHEE (Brans et al, 1986) 2

Παράρτημα Β – Αναλυτική περιγραφή εξισώσεων προσομοίωσης σταθερής και μεταβαλλόμενης χρονικά λειτουργίας συστήματων κάλυψης θερμικών/ηλεκτρικών φορτίων 4

Παράρτημα Γ – Παράδειγμα αριθμητικής εφαρμογής ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης σε συνθήκες μερικής αβεβαιότητας (Giannopoulos and Founti, 2010)7

Παράρτημα Δ – Τεχνικά χαρακτηριστικά και τυπικές διαστάσεις ηλεκτροπαραγωγών ζευγών με κινητήρα Diesel (Wartsila, 2011)..... 10

Παράρτημα Ε – Βάση δεδομένων ΑΚΖ 4ου κεφαλαίου. 11

Παράρτημα ΣΤ – Συνολικές εισροές ενέργειας και υλικών, εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα, σε υδάτινο περιβάλλον και στο έδαφος κύκλων ζωής συστημάτων MCFC και DE 16

Παράρτημα Ζ - Συντελεστές αναγωγής των εισροών του κύκλου ζωής (ενέργεια – υλικά) σε κατηγορίες επιτώσεων. 25

Παράρτημα Η – Ερωτηματολόγιο εκτίμησης συντελεστών βαρύτητας. Εφαρμογή 4ου κεφαλαίου..... 29

Παράρτημα Ι – Ποσότητα και είδος απαιτούμενων υλικών κατασκευής μονάδας μ-ΣΗΘ με SOFC..... 31

Παράρτημα Κ – Περιγραφή τεχνικών και οικονομικών κριτηρίων 5ου κεφαλαίου 33

Παράρτημα Λ – Συνολικές εισροές ενέργειας και υλικών, εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα, σε υδάτινο περιβάλλον και στο έδαφος κύκλων ζωής συμβατικού συστήματος και μονάδων μ-ΣΗΘ 34

Παράρτημα Μ – Αναλυτικά αποτελέσματα ΑΚΖ 38

Κατάλογος Σχημάτων

Σχήμα 2.1 Απεικόνιση σταδίων κύκλου ζωής προϊόντος. Πηγή: http://www.solidworks.com 16
Σχήμα 2.2 Βασικά στάδια εφαρμογής AKZ (EPA, 2001) 17
Σχήμα 2.3 Διάγραμμα ροής απαιτήσεων σε στοιχεία μιας τυπικής AKZ (Λαζόγλου, 2009) 21
Σχήμα 2.4 Απεικόνιση βασικών κατηγοριών μεθόδων ΠΚΛΑ. Πηγή: (Μαυρωτάς, 2000; Πολατίδης, 2003) 24
Σχήμα 3.1 Συνολικό διάγραμμα ροής μεθοδολογίας 49
Σχήμα 3.2 Βασικοί δείκτες συστήματος σταθερής χρονικά λειτουργίας 55
Σχήμα 3.3 Απεικόνιση προσομοίωσης χρονικά μεταβαλλόμενης λειτουργίας 56
Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ροής εφαρμογής μεθόδου AKZ 60
Σχήμα 3.5 Απεικόνιση του τριγωνικού αριθμού $\tilde{M} = (m, a, b)$ 64
Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης σε συνθήκες πλήρους αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικότητας 70
Σχήμα 3.7 Τριγωνικό διάγραμμα απεικόνισης αποτελεσμάτων σε συνθήκες πλήρους αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικότητας 72
Σχήμα 3.8 Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης σε συνθήκες μερικής αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικότητας 74
Σχήμα 3.9 Απεικόνιση υπολογισμού ασαφούς προτίμησης 75
Σχήμα 4.1 Όρια εκπομπών NOx για ναυτικούς κινητήρες θεσμοθετημένα από τον οργανισμό IMO (Tier II: από 1/1/2011, Tier III: από 1/1/2016) (IMO, 2004). 86
Σχήμα 4.2 Χρονική εξέλιξη ναυπήγησης νέων πλοίων 1997-2003 (MC-WAP, 2005) 86
Σχήμα 4.3 Σύγκριση ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής. (Wuersig, 2009) 87
Σχήμα 4.4 Συντελεστές εκπομπής NOx, CO και HC για λειτουργία κινητήρα diesel (αριστερά), κυψέλης καυσίμου με τροφοδοσία MGO (Marine Gas Oil) (κέντρο) και κυψέλης καυσίμου με τροφοδοσία υδρογόνου (δεξιά). (HFO: Heavy Fuel Oil). (Wuersig, 2009) 87
Σχήμα 4.5 Εκτίμηση εξέλιξης κόστους εγκατάστασης συστήματος κυψέλης καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC). Σύγκριση με αντίστοιχο κόστος κινητήρα diesel. (Wuersig, 2009) 88
Σχήμα 4.6 Τυπική κατανομή ηλεκτρικών φορτίων οχηματαγωγού πλοίου (MCWAP, 2005). 89
Σχήμα 4.7 Διάταξη κινητήρων βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής (Wartsila, 2011). 90
Σχήμα 4.8 Αρχή λειτουργίας και δομικά στοιχεία κυψέλης τύπου PEM 92
Σχήμα 4.9 Αρχή λειτουργίας και δομικά στοιχεία κυψέλης τύπου SOFC 93

Σχήμα 4.10 Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας SOFC με καύσιμο μεθανόλη. (METHAPU, 2010) 94
Σχήμα 4.11 Αρχή λειτουργίας και δομικά στοιχεία κυψέλης τύπου MCFC. (USDOE, 2004)... 95
Σχήμα 4.12 Χωροθέτηση μονάδας βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής με συστοιχία MCFC (FellowSHIP, 2010)..... 96
Σχήμα 4.13 Παράλληλη διάταξη MBH 99
Σχήμα 4.14 Διάγραμμα απεικόνισης ορίων των εξεταζόμενων συστημάτων (Alkaner and Zhou, 2006)..... 99
Σχήμα 4.15 Διάγραμμα απεικόνισης των βασικών υποσυστημάτων της MBH με συστοιχία MCFC (MC-WAP, 2005). 100
Σχήμα 4.16 Κατανομή συνολικού βάρους σε υποσυστήματα..... 103
Σχήμα 4.17 Κατανομή συνολικού βάρους σε υλικά κατασκευής..... 103
Σχήμα 4.18 Διάγραμμα δικτύου εφοδιασμού για παραγωγή 1kg χάλυβα 107
Σχήμα 4.19 Εξεταζόμενα σενάρια ποσοστού ανακύκλωσης..... 108
Σχήμα 4.20 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλων ζωής συστημάτων MCFC και DE. Εξέταση τεσσάρων εναλλακτικών μεθόδων αναμόρφωσης καυσίμου για το σύστημα MCFC (Bensaid et al., 2009). Κατηγορία επιπτώσεων: Cumulative Energy Demand (CED)..... 112
Σχήμα 4.21 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλων ζωής συστημάτων MCFC και DE. Εξέταση τεσσάρων εναλλακτικών μεθόδων αναμόρφωσης καυσίμου για το σύστημα MCFC (Bensaid et al., 2009). Κατηγορία επιπτώσεων: Global Warming Potential (GWP). 112
Σχήμα 4.22 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλων ζωής συστημάτων MCFC και DE. Εξέταση τεσσάρων εναλλακτικών μεθόδων αναμόρφωσης καυσίμου για το σύστημα MCFC (Bensaid et al., 2009). Κατηγορία επιπτώσεων: Acidification Potential (AP). 113
Σχήμα 4.23 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλων ζωής συστημάτων MCFC και DE. Εξέταση τεσσάρων εναλλακτικών μεθόδων αναμόρφωσης καυσίμου για το σύστημα MCFC (Bensaid et al., 2009). Κατηγορία επιπτώσεων: Mineral Depletion Potential (MDP). 114
Σχήμα 4.24 Μείωση περιβαλλοντικών δεικτών λόγω ανακύκλωσης υλικών. Κατηγορίες επιπτώσεων: Acidification Potential (AP) και Mineral Depletion Potential (MDP). 115
Σχήμα 4.25 Αποτελέσματα ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης – Σενάριο παρούσας κατάστασης 122
Σχήμα 4.26 Αξιοπιστία ασαφούς κατάταξης – Σενάριο παρούσας κατάστασης – Στάθμιση κριτηρίων Α. 123
Σχήμα 4.27 Αξιοπιστία ασαφούς κατάταξης – Σενάριο παρούσας κατάστασης – Στάθμιση κριτηρίων Β. 124
Σχήμα 4.28 Αποτελέσματα ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης – Σενάριο μελλοντικής κατάστασης 125

Σχήμα 4.29 Αξιοπιστία ασαφούς κατάταξης – Σενάριο μελλοντικής κατάστασης – Στάθμιση κριτηρίων Α. 126
Σχήμα 4.30 Αξιοπιστία ασαφούς κατάταξης – Σενάριο μελλοντικής κατάστασης – Στάθμιση κριτηρίων Β. 126
Σχήμα 5.1 Ενεργειακό όφελος μικρο-συμπαραγωγής..... 135
Σχήμα 5.2 Κύρια στοιχεία συστήματος οικιακής μ-ΣΗΘ..... 136
Σχήμα 5.3 Σημαντικότερα πιλοτικά προγράμματα μ-ΣΗΘ εντός του 2010 (Morgado and Slowe, 2010) 137
Σχήμα 5.4 Ετήσιες πωλήσεις εμπορικών συστημάτων μ-ΣΗΘ. ROW: Rest of World, EU: European Union (Dwyer S. and Slowe J., 2011) 138
Σχήμα 5.5 Παράγοντες επίδρασης στην εξέλιξη της απαίτησης θερμότητας και του δυναμικού εφαρμογής μ-ΣΗΘ στο οικιακό τομέα. (Pehnt et al., 2006) 139
Σχήμα 5.6 Ενεργειακές τιμές βιομηχανίας (πλέον φόρων) - EU-15 (Brown, 2011) 139
Σχήμα 5.7 Καταγραφή κυριότερων υποστηρικτικών μηχανισμών για νέες τεχνολογίες (Enzensberger et al., 2002)..... 140
Σχήμα 5.8 Κυριότερες υποστηρικτικές πρωτοβουλίες για μ-ΣΗΘ (Morgado D. and Slowe, J, 2010) 141
Σχήμα 5.9 Κύριες τεχνολογίες συστημάτων μ-ΣΗΘ (Pehnt et al., 2006) 142
Σχήμα 5.10 Ταξινόμηση τεχνολογιών μ-ΣΗΘ βάσει θερμικού και ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης. (Dijkstra, 2009)..... 143
Σχήμα 5.11 Επίπεδο ανάπτυξης βασικών τεχνολογιών μ-ΣΗΘ (Lenz and Buechner, 2011) . 144
Σχήμα 5.12 Ετήσιες πωλήσεις εμπορικών συστημάτων μ-ΣΗΘ ανά τεχνολογία (Dwyer and Slowe, 2011) 144
Σχήμα 5.13 Τυπική δομή ενός συστήματος συμπαραγωγής με μια μηχανή εσωτερικής καύσης. 145
Σχήμα 5.14 Θερμικό ισοζύγιο μιας τυπικής παλινδρομικής μηχανής εσωτερικής καύσης (Onovwiona and Ugursal, 2006) 146
Σχήμα 5.15 Σχηματική αναπαράσταση ενός ολοκληρωμένου συστήματος συμπαραγωγής με μικροστρόβιλο. (Onovwiona and Ugursal, 2006)..... 149
Σχήμα 5.16 Διάταξη μηχανής Stirling. (Frangopoulos, 2001)..... 152
Σχήμα 5.17 Βασική αρχή λειτουργίας συστήματος ORC (http://www.transpacenergy.com) 153
Σχήμα 5.18 Γενική διάταξη συστήματος μ-ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου PEM (USDOE, 2004) 155
Σχήμα 5.19 Γενική διάταξη συστήματος μ-ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου SOFC (USDOE, 2004)156
Σχήμα 5.20 Απεικόνιση κύριων τμημάτων συστήματος οικιακής μ-ΣΗΘ (Bianchi et al., 2011) 161

Σχήμα 5.21 Ανάλυση υποσυστημάτων εξεταζόμενης μονάδας μ-ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου τύπου SOFC 163
Σχήμα 5.22 Κατανομή συνολικού βάρους σε υποσυστήματα 164
Σχήμα 5.23 Κατανομή συνολικού βάρους σε υλικά κατασκευής 164
Σχήμα 5.24α,β,γ Απεικόνιση των εξεταζόμενων περιπτώσεων αξιολόγησης 168
Σχήμα 5.25 Ετήσια ηλεκτρικά ισοζύγια μονάδας SOFC για τα σενάρια 1a και 1b, σύμφωνα με τις παραδοχές των πινάκων 5.17, 5.18 και 5.19. 170
Σχήμα 5.26 Ετήσια ηλεκτρικά ισοζύγια μονάδας SOFC για τα σενάρια 2a και 2b, σύμφωνα με τις παραδοχές των πινάκων 5.17, 5.18 και 5.19. 171
Σχήμα 5.27 Ετήσια ηλεκτρικά ισοζύγια μονάδας ΜΕΚ για όλα τα σενάρια, σύμφωνα με τις παραδοχές των πινάκων 5.20, 5.22 και 5.23 173
Σχήμα 5.28 Αποτελέσματα ΑΚΖ της μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC - Σενάριο 1a: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Πλήρης κάλυψη ετήσιου θερμικού φορτίου. 179
Σχήμα 5.29 Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ: Σύστημα μ-ΣΗΘ με SOFC και συμβατικό σύστημα – Χώρα αναφοράς: Γερμανία 180
Σχήμα 5.30 Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ: Συστήματα μ-ΣΗΘ με SOFC και ΜΕΚ. Σενάρια 1a, 2a 181
Σχήμα 5.31 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Μετριοπαθές» σενάριο 189
Σχήμα 5.32 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Δυσμενές» σενάριο 190
Σχήμα 5.33 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Ευνοϊκό» σενάριο 190
Σχήμα 5.34 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Μετριοπαθές» σενάριο 192
Σχήμα 5.35 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Δυσμενές» σενάριο 193
Σχήμα 5.36 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Ευνοϊκό» σενάριο 194

Σχήματα Παραρτήματος

Σχήμα Π.1 Εναλλακτικές μορφές συναρτήσεων προτίμησης μεθόδου PROMETHEE 3
Σχήμα Π.2 Απεικόνιση των ασαφών καθαρών ροών (Πίνακας Π.3) 8
Σχήμα Π.3 Αποτελέσματα εφαρμογής παραδείγματος και αντίστοιχη ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας της κατάταξης 9

Σχήμα Π.4 Συνεισφορά υλικών στο βάρος των υποσυστημάτων της μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC.....31
Σχήμα Π.5 Αποτελέσματα ΑΚΖ της μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC: 38
Σχήμα Π.6 Αποτελέσματα ΑΚΖ της μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC: 39
Σχήμα Π.7 Αποτελέσματα ΑΚΖ της μονάδας μ-ΣΗΘ με κινητήρα ΜΕΚ: 39
Σχήμα Π.8 Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ: Σύστημα μ-ΣΗΘ με SOFC και συμβατικό σύστημα: 39
Σχήμα Π.9 Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ: Σύστημα μ-ΣΗΘ με SOFC και συμβατικό σύστημα: 39
Σχήμα Π.10 Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ: Συστήματα μ-ΣΗΘ με SOFC και ΜΕΚ:.....39
Σχήμα Π.11 Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ: Σύστημα μ-ΣΗΘ με SOFC και ΜΕΚ: 39

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 3.1 Μεθοδολογικοί στόχοι προτεινόμενης μεθοδολογίας συνδυασμένης αξιολόγησης και αντίστοιχες μεθοδολογικές προσεγγίσεις 81
Πίνακας 4.1 Καταγραφή υποσυστημάτων και εξαρτημάτων ΜΒΗ με συστοιχία MCFC 101
Πίνακας 4.2 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά ΜΒΗ με συστοιχία MCFC. 104
Πίνακας 4.3 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά ΜΒΗ με κινητήρα diesel. 104
Πίνακας 4.4 Τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Σενάριο παρούσας κατάστασης. Πηγές: (Alkaner and Zhou, 2006), (Bensaid et al., 2009), (EPA, 2003), (MC-WAP, 2005), (Moreno et al., 2008), (Lunghi et al., 2001), (Wuersig, 2009). ... 106
Πίνακας 4.5 Τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Μελλοντικό σενάριο (2020-2025). Πηγές: (Alkaner and Zhou, 2006), (EPA, 2003), (MC-WAP, 2005), (Moreno et al., 2008), (Lunghi et al., 2001), (Wuersig, 2009), (Delta, 2006). 106
Πίνακας 4.6 Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Σενάριο παρούσας κατάστασης. Πηγές: (Alkaner and Zhou, 2006), (MC-WAP, 2005), (Wuersig, 2009), (Hengeveld and Revankar, 2007). 106
Πίνακας 4.7 Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Μελλοντικό σενάριο (2020-2025). Πηγές: (Alkaner and Zhou, 2006), (MC-WAP, 2005), (Wuersig, 2009), (Delta, 2006), (Hengeveld and Revankar, 2007). 107
Πίνακας 4.8 Κυριότερες εισροές ενέργειας και πρώτων υλών για τον κύκλο ζωής του συστήματος MCFC. 109
Πίνακας 4.9 Κυριότερες εισροές ενέργειας και πρώτων υλών για τον κύκλο ζωής του συστήματος DE. 110
Πίνακας 4.10 Κυριότερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα για τον κύκλο ζωής του συστήματος MCFC (ανά παραγόμενη kWh) 110
Πίνακας 4.11 Κυριότερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα για τον κύκλο ζωής του συστήματος DE (ανά παραγόμενη kWh). 110
Πίνακας 4.12 Μεθοδολογίες Εκτίμησης και αντίστοιχες κατηγορίες επιπτώσεων που χρησιμοποιήθηκαν. 111
Πίνακας 4.13 Περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Αποτελέσματα AKZ. Σενάριο παρούσας κατάστασης. 116
Πίνακας 4.14 Περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Γραμμικές παρεμβολές βάσει της ηλεκτρικής αποδοτικότητας επί των αποτελεσμάτων του πίνακα 4.13. Μελλοντικό σενάριο (2020-2025). 116
Πίνακας 4.15 Συντελεστές σημαντικότητας COI_i των κριτηρίων αξιολόγησης 119

Πίνακας 4.16 Κέντρο επιφάνειας *COA* και δείκτης αποτίμησης $E_V[\tilde{\varphi}(a_j)]$ των ασαφών ροών προτίμησης των εξεταζόμενων συστημάτων. 121
Πίνακας 5.1 Συνόψιση βασικών χαρακτηριστικών τεχνολογιών καύσης για μ-ΣΗΘ (Dijkstra, 2009) 143
Πίνακας 5.2 Συνόψιση βασικών χαρακτηριστικών τεχνολογιών κυψέλης καυσίμου για μ-ΣΗΘ (Dijkstra, 2009) 143
Πίνακας 5.3 Λειτουργικά χαρακτηριστικά μονάδων μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ (Onovwiona and Ugursal, 2006) 147
Πίνακας 5.4 Στοιχεία εκπομπών αερίων ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ (Onovwiona and Ugursal, 2006) *SI/NG: Spark ignition/Natural Gas, CR: Compression Ratio. [a]Διόρθωση εκπομπών για 15% O_2. 147
Πίνακας 5.5 Εκτιμώμενα κόστη ($/kW) μηχανών εσωτερικής καύσης. (Onovwiona and Ugursal, 2006). 148
Πίνακας 5.6 Λειτουργικά χαρακτηριστικά μικροστρόβιλων. (Onovwiona and Ugursal, 2006) 150
Πίνακας 5.7 Στοιχεία εκπομπών αερίων ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με μικροστρόβιλους. (Onovwiona and Ugursal, 2006) 150
Πίνακας 5.8 Εκτιμώμενα κόστη εγκατάστασης και συντήρησης. Πηγή: (Onovwiona and Ugursal, 2006) 151
Πίνακας 5.9 Στοιχεία αποδοτικότητας και εκπομπών αερίων ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με κινητήρες Stirling (Onovwiona and Ugursal, 2006) 153
Πίνακας 5.10 Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστημάτων μ-ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου PEM (Staffel, 2009). *Παραδοχή ετησίων ωρών λειτουργίας: 4000 h/y 156
Πίνακας 5.11 Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστημάτων μ-ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου SOFC (Staffel, 2009). *Παραδοχή ετησίων ωρών λειτουργίας: 4000 h/y 156
Πίνακας 5.12 Στοιχεία εκπομπών αερίων ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με κυψέλες καυσίμου (Onovwiona and Ugursal, 2006) 157
Πίνακας 5.13 Ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις και μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ανά χώρα υποτιθέμενης εγκατάστασης των μονάδων μ-ΣΗΘ (FlameSOFC, 2005) 162
Πίνακας 5.14 Τεχνικά δεδομένα συστήματος μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC 165
Πίνακας 5.15 Τεχνικά δεδομένα συμβατικού συστήματος θέρμανσης με λέβητα αερίου 166
Πίνακας 5.16 Τεχνικά δεδομένα συστήματος μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ 166
Πίνακας 5.17 Κύριες παραδοχές περίπτωσης αξιολόγησης Α (μονάδα μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC και λέβητας αερίου) 169
Πίνακας 5.18 Εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας συστήματος μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC – Περίπτωση αξιολόγησης Α 170

Πίνακας 5.19 Ετήσιες ώρες λειτουργίας και απαιτούμενες συστοιχίες SOFC για τα εξεταζόμενα σενάρια λειτουργίας – Περίπτωση αξιολόγησης Α 170
Πίνακας 5.20 Κύριες παραδοχές περίπτωσης αξιολόγησης Α (μονάδα μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC και μονάδα μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ) 171
Πίνακας 5.21 Εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας συστήματος μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ – Περίπτωση αξιολόγησης Β 172
Πίνακας 5.22 Ετήσιες ώρες λειτουργίας και απαιτούμενες συστοιχίες SOFC για τα εξεταζόμενα σενάρια λειτουργίας – Περίπτωση αξιολόγησης Β 172
Πίνακας 5.23 Ετήσιες ώρες λειτουργίας του συστήματος μ-ΣΗΘ με κινητήρα ΜΕΚ 172
Πίνακας 5.24 Τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Περίπτωση αξιολόγησης Α 173
Πίνακας 5.25 Τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Περίπτωση αξιολόγησης Β 173
Πίνακας 5.26 Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Περίπτωση αξιολόγησης Α 174
Πίνακας 5.27 Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Περίπτωση αξιολόγησης Β. 174
Πίνακας 5.28 Εξεργειακοί συντελεστές κατανομής επιπτώσεων σε ηλεκτρική και θερμική kWh 175
Πίνακας 5.29 Μάζα πρώτων υλών που θεωρείται οτι ανακυκλώνεται 177
Πίνακας 5.30 Μεθοδολογίες Εκτίμησης και αντίστοιχες κατηγορίες επιπτώσεων που χρησιμοποιήθηκαν. 178
Πίνακας 5.31 Περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Αποτελέσματα ΑΚΖ - Περίπτωση αξιολόγησης Α 183
Πίνακας 5.32 Περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Αποτελέσματα ΑΚΖ - Περίπτωση αξιολόγησης Β 184
Πίνακας 5.33 Συντελεστές σημαντικότητας COI_i των κριτηρίων αξιολόγησης 185
Πίνακας 5.34 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Μετριοπαθές» σενάριο 189
Πίνακας 5.35 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Δυσμενές» και «Ευνοϊκό» σενάριο 191
Πίνακας 5.36 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρες αναφοράς: Αγγλία, Ισπανία – «Μετριοπαθές» σενάριο. 191
Πίνακας 5.37 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Μετριοπαθές» σενάριο 193

Πίνακας 5.38 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Δυσμενές» και «Ευνοϊκό» σενάριο 194
Πίνακας 5.39 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρες αναφοράς: Αγγλία, Ισπανία – «Μετριοπαθές» σενάριο. 195

Πίνακες Παραρτήματος

Πίνακας Π.1 Δεδομένα ΠΑ εφαρμογής παραδείγματος 7
Πίνακας Π.2 Αποτελέσματα μεθόδου PROMETHEE II (Brans, Vincke, and Mareschal, 1986), της ασαφούς μεθόδους των Le Téno and Mareschal (1998) και της προτεινόμενης ασαφούς μεθοδολογίας 8
Πίνακας Π.3 Δείκτης αποτίμησης $E_N(\tilde{\varphi}(\alpha_j))$ 8
Πίνακας Π.4 Δείκτης αξιοπιστίας SF κατατάξεων της κλασικής μεθόδου PROMETHEE II, της ασαφούς μεθόδου των Le Téno and Mareschal (1998) και της προτεινόμενης μεθοδολογίας . 9
Πίνακας Π.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά και τυπικές διαστάσεις ηλεκτρογεννητριών diesel 10
Πίνακας Π.6 Απαιτούμενες ποσότητες υλικών κατασκευής ΜΒΗ συστοιχίας MCFC – Υποσυστήματα 1, 4 11
Πίνακας Π.7 Απαιτούμενες ποσότητες υλικών κατασκευής ΜΒΗ συστοιχίας MCFC – Υποσυστήματα 2,3,5 12
Πίνακας Π.8 Απαιτούμενες ποσότητες υλικών κατασκευής ΜΒΗ κινητήρα diesel 13
Πίνακας Π.9 Εξεταζόμενα σενάρια ποσοστού ανακύκλωσης ΜΒΗ με συστοιχία MCFC 14
Πίνακας Π.10 Εξεταζόμενα σενάρια ποσοστού ανακύκλωσης ΜΒΗ με μηχανή diesel 15
Πίνακας Π.11 Συνολικές εισροές ενέργειας και υλικών κύκλου ζωής συστήματος MCFC. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh. Παράμετρος: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης 16
Πίνακας Π.12 Συνολικές εισροές ενέργειας και υλικών κύκλου ζωής συστήματος DE. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh. 17
Πίνακας Π.13 Συνολικές εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα. Κύκλος ζωής συστήματος MCFC. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh.Παράμετρος: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης. 18
Πίνακας Π.14 Συνολικές εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα. Κύκλος ζωής συστήματος DE.. 19
Πίνακας Π.15 Συνολικές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον. Κύκλος ζωής συστήματος MCFC. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh. Παράμετρος: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης 20
Πίνακας Π.16 Συνολικές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον. Κύκλος ζωής συστήματος MCFC. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh. Παράμετρος: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης 21
Πίνακας Π.17 Συνολικές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον. Κύκλος ζωής συστήματος DE. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh. 22

Πίνακας Π.18 Συνολικές εκπομπές ρύπων στο έδαφος. Κύκλος ζωής συστήματος MCFC. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh. Παράμετρος: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης 23
Πίνακας Π.19 Συνολικές εκπομπές ρύπων στο έδαφος. Κύκλος ζωής συστήματος DE. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh. 24
Πίνακας Π.20 Συντελεστές αναγωγής στη μονάδα αναφοράς του δείκτη CED 25
Πίνακας Π.21 Συντελεστές αναγωγής στη μονάδα αναφοράς των δεικτών GWP και AP 26
Πίνακας Π.22 Συντελεστές αναγωγής στη μονάδα αναφοράς του δείκτη MDP 27
Πίνακας Π.23 Συντελεστές αναγωγής στη μονάδα αναφοράς του δείκτη FED 28
Πίνακας Π.24 Πηγές δεδομένων υλικών μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC 32
Πίνακας Π.25 Σχόλια και πηγές δεδομένων τεχνικών κριτηρίων αξιολόγησης 33
Πίνακας Π.26 Πηγές δεδομένων οικονομικών κριτηρίων αξιολόγησης 33
Πίνακας Π.27 Κυριότερες εισροές ενέργειας και πρώτων υλών για τον κύκλο ζωής του συμβατικού συστήματος. 34
Πίνακας Π.28 Κυριότερες εισροές ενέργειας και πρώτων υλών για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ. 34
Πίνακας Π.29 Κυριότερες εισροές ενέργειας και πρώτων υλών για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ. 34
Πίνακας Π.30 Κυριότερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα για τον κύκλο ζωής του συμβατικού συστήματος. 35
Πίνακας Π.31 Κυριότερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ. 35
Πίνακας Π.32 Κυριότερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ SOFC. 35
Πίνακας Π.33 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον για τον κύκλο ζωής του συμβατικού συστήματος. 36
Πίνακας Π.34 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ. 36
Πίνακας Π.35 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ SOFC. 36
Πίνακας Π.36 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων στο έδαφος για τον κύκλο ζωής του συμβατικού συστήματος. 37
Πίνακας Π.37 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων στο έδαφος για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ. 37
Πίνακας Π.38 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων στο έδαφος για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ. 37

Κατάλογος Εικόνων

Εικόνα 4.1 Ναυτική ηλεκτρογεννήτρια – Wartsila W20 (Wartsila, 2009)..... 90
Εικόνα 4.2 Υπολογιστικό εργαλείο αλγόριθμου «Π.Υ.Θ.Ι.Α.» - Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων – Περίπτωση σεναρίου παρόντος χρόνου με την στάθμιση κριτηρίων Α. 119
Εικόνα 4.3α,β Υπολογιστικό εργαλείο αλγόριθμου «Π.Υ.Θ.Ι.Α.» - Παράθυρα εισαγωγής δεδομένων κριτηρίου GWP – Περίπτωση σεναρίου παρόντος χρόνου με την στάθμιση κριτηρίων Α. 120
Εικόνα 4.4 Υπολογιστικό εργαλείο αλγόριθμου «Π.Υ.Θ.Ι.Α.» - Παράθυρο εισαγωγής ασαφών δεδομένων – Περίπτωση σεναρίου παρόντος χρόνου με την στάθμιση κριτηρίων Α. 120
Εικόνα 5.1 Υπολογιστικό εργαλείο αλγόριθμου «Π.Υ.Θ.Ι.Α.» - Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων – Περίπτωση αξιολόγησης Α – «Μετριοπαθές» σενάριο – Δεδομένα για Γερμανία. 186
Εικόνα 5.2α,β Υπολογιστικό εργαλείο αλγόριθμου «Π.Υ.Θ.Ι.Α.» - Παράθυρα εισαγωγής δεδομένων κριτηρίου «Τεχνικό Ελάχιστο» – Περίπτωση αξιολόγησης Α. 186

Κατάλογος Συμβόλων

Λατινικά Σύμβολα

a_j	(-)	Αξιολογούμενο σύστημα *j*
a_j^k	(-)	Σύστημα a_j που έχει καταταχθεί στην k θέση της κατάταξης.
C_{inst}	(€)	Κόστος εγκατάστασης
$COA(\tilde{M})$	(-)	Κέντρο επιφάνειας (Center of Area) ασαφούς αριθμού $\tilde{M}$
COI_i	(-)	Συντελεστής σημαντικότητας (Coefficient Of Importance) κριτηρίου *i*
$C_{op\_f\_L}$	(€)	Κόστος καυσίμου κύκλου ζωής
C_{op_L}	(€)	Κόστος λειτουργίας κύκλου ζωής
$C_{op\_maint\_L}$	(€)	Κόστος συντήρησης κύκλου ζωής
DM(i,j)	(-)	Πίνακας κριτηρίων αξιολόγησης
$\tilde{DM}(i,j)$	(-)	Πίνακας ασαφών κριτηρίων αξιολόγησης
$d_i^{j,j'}$	(...)	Διαφορά επιδόσεων των συστημάτων a_j και $a_{j'}$ στο κριτήριο *i*
$\tilde{d}_i^{j,j}$	(...)	Ασαφής διαφορά επιδόσεων των συστημάτων a_j και $a_{j'}$ στο κριτήριο *i.* [$\tilde{d}_i^{j,j'} = (d_{i,m}^{j,j'}, d_{i,\alpha}^{j,j'}, d_{i,b}^{j,j'})$]
E_{p_L}	(gr)	Εκπομπή αερίου ρύπου p συνολικού χρόνου λειτουργίας
e_{p_L}	(gr/kWh)	Ειδική εκπομπή αερίου ρύπου p συνολικού χρόνου λειτουργίας
e_{p_TD}	(gr/kWh)	Συντελεστής εκπομπής αερίου ρύπου p κατά την λειτουργία στο τεχνικό ελάχιστο (Turn Down ratio)
e_{p_NM}	(gr/kWh)	Συντελεστής εκπομπής αερίου ρύπου p κατά την ονομαστική λειτουργία
$E_V[\tilde{\varphi}(a_j)]$	(-)	Δείκτης αποτίμησης της ροής $\tilde{\varphi}(a_j)$
f	(-)	Συντελεστής φόρτισης συστήματος
f_i	(-)	Κριτήριο αξιολόγησης *i*
$f_i(a_j)$	(...)	Επίδοση συστήματος *j* στο κριτήριο *i*
$\tilde{f}_i(a_j)$	(...)	Ασαφής επίδοση συστήματος *j* στο κριτήριο *i* $\tilde{f}_i(a_j) = (f_{i,m}(a_j), f_{i,\alpha}(a_j), f_{i,b}(a_j))$, όπου $f_{i,m}(a_j)$ η κεντρική τιμή και $f_{i,\alpha}(a_j), f_{i,b}(a_j)$ το αρνητικό και θετικό εύρος διακύμανσης, αντίστοιχα.
H_u	(kJ/kg ή kJ/Nm^3)	Θερμογόνος δύναμη καυσίμου
i	(-)	Αύξοντας αριθμός κριτηρίων αξιολόγησης
I	(-)	Πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης
I_{Ec}	(-)	Πλήθος οικονομικών κριτηρίων
I_{En}	(-)	Πλήθος περιβαλλοντικών κριτηρίων
I_T	(-)	Πλήθος τεχνικών κριτηρίων
j	(-)	Αύξοντας αριθμός αξιολογούμενου συστήματος
J	(-)	Πλήθος κριτηρίων αξιολόγησης

M_{f_L}	(kg ή Nm^3)	Κατανάλωση καυσίμου συνολικού χρόνου λειτουργίας
m_{f_L}	(kg/kWh ή Nm^3/kWh)	Ειδική κατανάλωση καυσίμου συνολικού χρόνου λειτουργίας
$\tilde{M}$	(-)	Γενική μορφή τριγωνικού ασαφούς αριθμού $\tilde{M}=(m,a,b)$, όπου m: κεντρική τιμή, a και b: εύρη διακύμανσης (Σχήμα 3.5)
n	(-)	Αύξοντας αριθμός δεδομένων ενεργειακής απαίτησης
N	(-)	Πλήθος δεδομένων ενεργειακής απαίτησης για το χρόνο ζωής του συστήματος.
N_w	(-)	Πλήθος υπολογιστικών επαναλήψεων για τη σάρωση των πιθανών συνδυασμών (w_T, w_{En}, w_{Ec})
ORR	(-)	Δείκτης συνολικής αξιοπιστίας κατάταξης – (Overall Ranking Reliability)
$PHR_{\_TD}$	(-)	Λόγος ηλεκτρισμού-θερμότητας κατά την λειτουργία στο τεχνικό ελάχιστο (Turn Down ratio)
$PHR_{\_NM}$	(-)	Λόγος ηλεκτρισμού-θερμότητας κατά την ονομαστική λειτουργία
p_i	(-)	Κατώφλιο προτίμησης κριτηρίου *i*
$P_i(d_i^{j,j'})$	(-)	Συνάρτηση προτίμησης (preference function) κριτηρίου *i*
$P_i^{j,j'}$	(-)	Υπεροχή του συστήματος a_j έναντι του $a_{j'}$ όσον αφορά το κριτήριο *i*
$P_i^{j',j}$	(-)	Υστέρηση του συστήματος a_j έναντι του $a_{j'}$ όσον αφορά το κριτήριο *i*
$\tilde{P}_i(d_i^{j,j'})$	(-)	Ασαφής συνάρτηση προτίμησης (preference function) κριτηρίου *i*
$\tilde{P}_i^{j,j'}$	(-)	Ασαφής υπεροχή του συστήματος a_j έναντι του $a_{j'}$ όσον αφορά το κριτήριο *i*. $[\tilde{P}_i^{j,j'}=(P_{i,m}^{j,j'},P_{i,\alpha}^{j,j'},P_{i,b}^{j,j'})]$
$\tilde{P}_i^{j',j}$	(-)	Ασαφής υστέρηση του συστήματος a_j έναντι του $a_{j'}$ όσον αφορά το κριτήριο *i*. $[\tilde{P}_i^{j',j}=(P_{i,m}^{j',j},P_{i,\alpha}^{j',j},P_{i,b}^{j',j})]$
Q_{f_L}	(kWh)	Εισερχόμενη ενέργεια καυσίμου συνολικού χρόνου λειτουργίας
q_i	(-)	Κατώφλιο αδιαφορίας κριτηρίου *i*
Q_{th_load}	(kWh)	Θερμική απαίτηση ενέργειας
$Q_{th\_out\_L}$	(kWh)	Παραγόμενη θερμική ενέργεια συνολικού χρόνου λειτουργίας
$q_{th\_out\_L}$	(-)	Ειδική συμπαραγωγή θερμότητας συνολικού χρόνου λειτουργίας
$\dot{Q}_{th\_out}$	(kW)	Παραγόμενη θερμική ισχύς
$\dot{Q}_{th\_load}$	(kW)	Θερμική απαίτηση ισχύος
RR	(kW/min)	Δείκτης ικανότητας κάλυψης των διακυμάνσεων του φορτίου (Ramp Rate)
$SF(\tilde{\varphi}(a_j^k)>\tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1}))$	(-)	Συνάρτηση ποσοτικοποίησης της αξιοπιστίας του ζεύγους κατάταξης a_j^k και $a_{j'}^{k+1}$ - (Satisfaction function).

Δt	(h)	Χρονικό βήμα δεδομένων ενεργειακής απαίτησης
T_R	(K)	Θερμοκρασία επιστροφής εργαζόμενου μέσου κάλυψης θερμικών φορτίων
T_E	(K)	Θερμοκρασία περιβάλλοντος
T_O	(K)	Θερμοκρασία εξόδου εργαζόμενου μέσου κάλυψης θερμικών φορτίων
$\tilde{V}$	(-)	Ασαφές σύνολο αναφοράς προς σύγκριση των $\tilde{\varphi}(a_j)$
Δw	(-)	Υπολογιστικό βήμα σάρωσης πιθανών συνδυασμών (w_T, w_{En}, w_{Ec})
w_{Ec}	(-)	Ομαδικός συντελεστής βαρύτητας οικονομικών κριτηρίων
W_{el_load}	(kWh)	Ηλεκτρική απαίτηση ενέργειας
$W_{el\_out\_L}$	(kWh)	Παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια συνολικού χρόνου λειτουργίας
w_{En}	(-)	Ομαδικός συντελεστής βαρύτητας περιβαλλοντικών κριτηρίων
w_i	(-)	Συντελεστής βαρύτητας κριτηρίου *i*
w_T	(-)	Ομαδικός συντελεστής βαρύτητας τεχνικών κριτηρίων
$\dot{W}_{el\_out}$	(kW)	Παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς
$\dot{W}_{el\_load}$	(kW)	Ηλεκτρική απαίτηση ισχύος
$\tilde{w}_i = (w_{i,m}, w_{i,\alpha}, w_{i,b})$	(-)	Ασαφείς συντελεστές βαρύτητας κριτηρίου *i*
$\dot{W}_{el\_out\_TD}$	(kW)	Ελάχιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς (τεχνικό ελάχιστο – Turn Down ratio)
$\dot{W}_{el\_out\_NM}$	(kW)	Μέγιστη (ονομαστική – Nominal) παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς

Ελληνικά Σύμβολα

η_{el_NM}	(%)	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συστήματος κατά την ονομαστική λειτουργία
η_{el_TD}	(%)	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συστήματος κατά την λειτουργία στο τεχνικό ελάχιστο (Turn Down ratio)
$\mu(x)$	(-)	Γενική μορφή συνάρτησης συμμετοχής (membership function) ασαφούς αριθμού.
$\Pi^{j,j'}$	(-)	Σταθμισμένο άθροισμα των υπεροχών $P_i^{j,j'}$ για το σύνολο των I κριτηρίων βάσει των συντελεστών βαρύτητας w_i
$\Pi^{j',j}$	(-)	Σταθμισμένο άθροισμα των υστερήσεων $P_i^{j',j}$ για το σύνολο των I κριτηρίων βάσει των συντελεστών βαρύτητας w_i
$\tilde{\Pi}^{j,j'}$	(-)	Ασαφές σταθμισμένο άθροισμα των υπεροχών $P_i^{j,j'}$ για το σύνολο των I κριτηρίων βάσει των συντελεστών βαρύτητας w_i. [$\tilde{\Pi}^{j,j'} = (\Pi_m^{j,j'}, \Pi_\alpha^{j,j'}, \Pi_b^{j,j'})$]
$\tilde{\Pi}^{j',j}$	(-)	Ασαφές σταθμισμένο άθροισμα των υστερήσεων $P_i^{j,j'}$ για το σύνολο των I κριτηρίων βάσει των συντελεστών βαρύτητας w_i. [$\tilde{\Pi}^{j',j} = (\Pi_m^{j',j}, \Pi_\alpha^{j',j}, \Pi_b^{j',j})$]

σ_i	(-)	Εκθετικός συντελεστής προτίμησης κριτηρίου *i*
$\varphi(a_j)$	(-)	Συνολική ροή προτίμησης συστήματος a_j
$\varphi^+(a_j)$	(-)	Ροή υπεροχής του συστήματος a_j έναντι του συνόλου των *J-1* ανταγωνιστικών συστημάτων
$\varphi^-(a_j)$	(-)	Ροή υστέρησης του συστήματος a_j έναντι του συνόλου των *J-1* ανταγωνιστικών συστημάτων
$\tilde{\varphi}(a_j)$	(-)	Συνολική ασαφής ροή προτίμησης συστήματος a_j
$\tilde{\varphi}^+(\alpha_j)$	(-)	Ασαφής ροή υπεροχής του συστήματος a_j έναντι του συνόλου των *J-1* ανταγωνιστικών συστημάτων. $\tilde{\varphi}^+(a_j) = [\varphi_m^+(a_j), \varphi_\alpha^+(a_j), \varphi_b^+(a_j)]$
$\tilde{\varphi}^-(\alpha_j)$	(-)	Ασαφής ροή υστέρησης του συστήματος a_j έναντι του συνόλου των *J-1* ανταγωνιστικών συστημάτων. $\tilde{\varphi}^-(a_j) = [(\varphi_m^-(a_j), \varphi_\alpha^-(a_j), \varphi_b^-(a_j)]\,]$
Ω	(h)	Συνολικός χρόνος λειτουργίας (ζωής) συστήματος

Κεφάλαιο 1ο

Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, καταρχήν οριοθετείται το ερευνητικό πλαίσιο εντός του οποίου εντάσσεται η παρούσα διατριβή. Στη συνέχεια καθορίζεται το αντικείμενο και οι στόχοι και περιγράφονται τα στοιχεία πρωτοτυπίας της διατριβής. Ακολούθως περιγράφεται η δομή της διατριβής και παρατίθενται οι δημοσιεύσεις που προέκυψαν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης.

1.1 Ερευνητικό πεδίο διατριβής

Το ερευνητικό πεδίο της παρούσας διατριβής εντοπίζεται στην αναγκαιότητα υπέρβασης των καθιερωμένων τεχνο-οικονομικών μεθόδων αξιολόγησης και επιλογής ενεργειακών συστημάτων, μέσω ολοκληρωμένης προσέγγισης του προβλήματος αξιολόγησης. Η έννοια της ολοκληρωμένης αξιολόγησης επιδέχεται πλήθος ερμηνειών και κατά συνέπεια αποτελεί το αντικείμενο αντίστοιχου αριθμού μεθοδολογιών. Στα πλαίσια του παρόντος 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.

Η πλέον καθιερωμένη μεθοδολογία εκτίμησης του συνόλου των περιβαλλοντικών επιπτώσεων ενός ενεργειακού συστήματος είναι η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ). Η ΑΚΖ είναι μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα, προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Σε επόμενο στάδιο υπολογίζονται οι επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας και των υλικών καθώς και των αποβλήτων και εκτιμώνται οι δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων. Η ανάλυση περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, μιας διεργασίας ή μίας δραστηριότητας, δηλαδή την εξαγωγή και επεξεργασία πρώτων υλών, την κατασκευή, μεταφορά, διανομή, χρήση, συντήρηση και διαχείριση των αποβλήτων. Οι ρίζες της ΑΚΖ επεκτείνονται πίσω στη δεκαετία του ‘70 όταν αναπτύχθηκαν τεχνικές για ενεργειακούς και περιβαλλοντικούς υπολογισμούς κατά το στάδιο του σχεδιασμού προϊόντων. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '80 τα οφέλη της τεχνικής έγιναν αισθητά στη βιομηχανία, ενώ στις αρχές της δεκαετίας του '90 ένα κύμα ερευνητικών προγραμμάτων έδωσε ιδιαίτερη ώθηση στην ΑΚΖ. Εντούτοις, θεωρείται ότι η καθιέρωσή της ως περιβαλλοντικό εργαλείο έγινε μόλις στα τέλη της δεκαετίας του ‘90 με την έκδοση της σχετικής σειράς διεθνών προτύπων ISO 14040 – 14049. Η σειρά προτύπων ανανεώθηκε το 2006 (ISO 14040:2006 – 14049:2006).

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 υιοθέτηση πολυκριτηριακών μεθόδων υποστήριξης απόφασης. 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 τεχνο-οικονομικά και περιβαλλοντικά δεδομένα/μοντέλα, τις μελλοντικές τεχνολογικές και κοινωνικοπολιτικές εξελίξεις, όπως και τις επιμέρους προτεραιότητες ενός μεγάλου αριθμού εμπλεκομένων μερών. Τα παραπάνω καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθοδολογιών, προκειμένου τα προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού να επιλύονται κατά τρόπο βιώσιμο και αμοιβαία αποδεκτό.

Η Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων (ΠΚΛΑ) (Multiple Criteria Decision Making, MCDM) είναι ο κλάδος εκείνος της Επιχειρησιακής Έρευνας που ασχολείται με την επίλυση προβλημάτων λαμβάνοντας υπόψη περισσότερα του ενός κριτήρια απόφασης. Η Πολυκριτηριακή Ανάλυση (ΠΑ) αποτελεί μεθοδολογικό υποσύνολο της ΠΚΛΑ, όπου το σύνολο των εναλλακτικών επιλογών είναι διακριτό και ρητά καθορισμένο – με συγκεκριμένες επιλογές που χαρακτηρίζονται από την επίδοσή τους σε κάποια κριτήρια. Οι διάφορες μεθοδολογίες ΠΑ έχουν ως κύριο σκοπό τον συνδυασμό της πληροφορίας που περιέχεται στις επιδόσεις των κριτηρίων με τις προτεραιότητες που καθορίζει ο αποφασίζων, προκειμένου να επιτευχθεί ταξινόμηση ή επιλογή από το σύνολο των εναλλακτικών δράσεων. Η μοντελοποίηση της ασάφειας προσεγγίζεται κατά κύριο λόγο μέσω εφαρμογής είτε της πιθανοθεωρίας είτε της θεωρίας ασαφών συνόλων. Η θεωρία πιθανοτήτων εστιάζει στην στοχαστική φύση της διαδικασίας απόφασης, ενώ η χρήση ασαφών αριθμών αφορά την υποκειμενικότητα της ανθρώπινης συμπεριφοράς.

1.2 Αντικείμενο και στόχος

Το αντικείμενο της προτεινόμενης μεθοδολογίας εντοπίζεται στην παροχή υποστήριξης σε προβλήματα επιλογής συστημάτων/τεχνολογιών κατά τον ενεργειακό σχεδιασμό σε επίπεδο μακροκλίμακας (διαμόρφωση ενεργειακής πολιτικής) και μέσης κλίμακας (αξιολόγηση ενεργειακών επενδύσεων).

Ο κύριος στόχος της προτεινόμενης προσέγγισης αφορά τη διατύπωση μιας μεθοδολογίας ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων, τα οποία καλύπτουν ηλεκτρικά ή/και θερμικά φορτία. Η γενική στόχευση αναλύεται στις παρακάτω επιμέρους επιδιώξεις (κατά σειρά εφαρμογής μεθοδολογίας):

- Αποσαφήνιση του πλαισίου λειτουργίας των ανταγωνιστικών συστημάτων, προκειμένου να καταστεί σαφές ότι είναι συγκρίσιμα (κάλυψη της ίδιας ενεργειακής απαίτησης ποιοτικά και ποσοτικά).
- Καθορισμός της τεχνικής αποδοτικότητας, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της οικονομικής βιωσιμότητας των εξεταζόμενων συστημάτων μέσω δεικτών – κριτηρίων αξιολόγησης.
- Κάλυψη του συνολικού κύκλου ζωής (παραγωγή πρώτων υλών – κατασκευή/συναρμολόγηση συστημάτων – λειτουργία – απόσυρση) των συστημάτων.
- Συνδυασμός των τριών «ροών πληροφορίας» (τεχνική – περιβαλλοντική – οικονομική) μέσω μεθοδολογίας πολυκριτηριακής ανάλυσης.
- Μοντελοποίηση της υποκειμενικής συνιστώσας του προβλήματος αξιολόγησης (προτεραιότητες αποφασιζόντων)
- Ενσωμάτωση στο πολυκριτηριακό μοντέλο τόσο της αβεβαιότητας καθορισμού των κριτηρίων αξιολόγησης, όσο και της μερικής ή ολικής αδυναμίας καθορισμού της υποκειμενικής συνιστώσας.
- Ανάδειξη του επικρατέστερου συστήματος, ανεξάρτητα από το αν είναι εφικτός ή όχι ο – έστω και ασαφής – προσδιορισμός των προτεραιοτήτων απόφασης (συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων).

1.3 Στοιχεία πρωτοτυπίας

Η πρωτοτυπία της παρούσας διατριβής πηγάζει κατ' αρχάς από τη γενικευμένη μεθοδολογία αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών που διατυπώνει. Η προτεινόμενη προσέγγιση βασίζεται μεν στο συνδυασμό της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) και της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (ΠΑ), ωστόσο μέσω της ενσωμάτωσης διαφόρων διεπιστημονικών εργαλείων (ανάλυση ενεργειακών συστημάτων σύμφωνα με τον $1^{ο}$ και $2^{ο}$ θερμοδυναμικό νόμο, περιβαλλοντική ανάλυση κύκλου ζωής, υποστήριξη απόφασης, διαχείριση αβεβαιότητας και θεωρία ασαφών αριθμών) προκειμένου να επιτεύξει τους επιμέρους στόχους της, υπερβαίνει τα όρια μιας επέκτασης συγκεκριμένης υπάρχουσας μεθοδολογίας.

Η καινοτομία της προσέγγισης αξιολόγησης επιβεβαιώνεται από την επίτευξη του **συνόλου** των παρακάτω επιδιώξεων:

- Υπολογισμός της ενεργειακής αποδοτικότητας μέσω προσομοίωσης λειτουργίας σε μεταβαλλόμενο φορτίο, προκειμένου να αποτυπωθεί η επίδραση των δυναμικών χαρακτηριστικών των συστημάτων (§3.2.2.1 – Σχ. 3.3).
- Συνολική εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής των εξεταζόμενων συστημάτων (§3.2.2.2 – Σχ. 3.4).
- Καθορισμός της οικονομικής βιωσιμότητας μέσω αντίστοιχων δεικτών – κριτηρίων αξιολόγησης (§3.2.2.3).
- Διαμόρφωση εργαλείου υποστήριξης της διαδικασίας ανάδειξης του επικρατέστερου συστήματος (Αλγόριθμος πολυκριτηριακής αξιολόγησης «Π.Υ.Θ.Ι.Α» - Πολυκριτηριακή Υποστηρικτική Θεωρία αποφάσεων σε περΙβάλλον Ασάφειας) (§3.2.3.3 – Σχ. 3.6 και 3.8).

Η πρωτότυπη μεθοδολογία υποστήριξης απόφασης αποτελεί γενίκευση της πολυκριτηριακής μεθόδου PROMETHEE, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ευέλικτη αντιμετώπιση της αδυναμίας καθορισμού της υποκειμενικότητας του προβλήματος αξιολόγησης. Οι δυο εναλλακτικές μεθοδολογικές κατευθύνσεις που διατυπώνονται είναι σε θέση να αναδείξουν το επικρατέστερο ενεργειακό σύστημα υπό συνθήκες είτε μερικής (ασαφείς – fuzzy συντελεστές βαρύτητας) είτε πλήρους αδυναμίας καθορισμού των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων αξιολόγησης:

- Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η περίπτωση πλήρους αβεβαιότητας, ενσωματώνεται αλγόριθμος σάρωσης των πιθανών συντελεστών βαρύτητας (Σχ. 3.6).
- Κατά την περίπτωση μερικής αβεβαιότητας, επεκτείνεται η πολυκριτηριακή μέθοδος με στόχο τη χρήση ασαφών δεδομένων (Σχ. 3.6). Αποφεύγεται η απώλεια πληροφορίας μέσω αποασαφοποίησης (defuzzification) και εφαρμόζεται κατάλληλα προσαρμοσμένος

αλγόριθμος ασαφούς κατάταξης (fuzzy ranking algorithm). Επιπλεόν, εισάγεται η έννοια της αξιοπιστίας της ασαφούς κατάταξης (που προκύπτει ως αποτέλεσμα) και επιτυγχάνεται η ποσοτικοποίησή της.

Σημαντικό τμήμα της συνεισφοράς της διατριβής αποτελούν και οι μελέτες περιπτώσεων (Κεφάλαια 4 και 5). Οι εφαρμογές που παρουσιάζονται αφορούν μη συμβατικά ενεργειακά συστήματα, η αξιολόγηση των οποίων ακόμα και με τις υπάρχουσες μεθοδολογίες χαρακτηρίζεται ως μη τετριμμένη.

1.4 Διάρθρωση διατριβής

Στο εισαγωγικό πρώτο κεφάλαιο ορίζεται το ερευνητικό πεδίο που εντάσσεται η παρούσα διατριβή και παρουσιάζονται το αντικείμενο, οι επιδιώξεις και τα στοιχεία πρωτοτυπίας της.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο δυο μεθοδολογιών (Ανάλυση Κύκλου Ζωής - ΑΚΖ και Πολυκριτηριακή Ανάλυση - ΠΑ) που συνδέονται άμεσα – με διαφορετικό ωστόσο τρόπο – με την έννοια της ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών. Καταγράφηκαν επίσης οι σημαντικότερες αντίστοιχες δημοσιεύσεις και μελέτες κατά την δεκαετία 2000-10. Ο συνδυασμός των δυο μεθοδολογιών αποτελεί τον κορμό της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνδυασμένης αξιολόγησης που παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Στο τρίτο κεφάλαιο αρχικά αναλύονται οι περιορισμοί της κλασικής τεχνο/οικονομικής αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων και παρουσιάζονται συνοπτικά οι προτεινόμενοι μέθοδοι αντιμετώπισης. Επίσης, συνοψίζονται οι επιμέρους επιδιώξεις, τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα, η πρωτοτυπία και η συνεισφορά της προτεινόμενης μεθοδολογίας ολοκληρωμένης αξιολόγησης. Στο κύριο μέρος παρουσιάζεται αναλυτικά η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών, η οποία συνδυάζει βασικά χαρακτηριστικά των δυο μεθοδολογιών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο τελευταίο υποκεφάλαιο συνοψίζονται τα οφέλη, η συνεισφορά και οι περιορισμοί της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

Ακολουθεί το τέταρτο κεφάλαιο, όπου εφαρμόζεται η μεθοδολογία που διατυπώθηκε σε μελέτη περίπτωσης αξιολόγησης τεχνολογιών βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής σε ναυτικές εφαρμογές. Στις αρχικές παραγράφους παρατίθενται γενικά στοιχεία για τις τεχνολογικές τάσεις στον τομέα των ναυτικών συστημάτων βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής και καταγράφονται τα γενικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων τεχνολογιών. Ακολουθεί μια σύντομη ανασκόπηση των προσπαθειών αξιολόγησης τεχνολογιών/συστημάτων στη ναυτιλία. Στο κύριο μέρος του κεφαλαίου εφαρμόζεται η μεθοδολογία ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων, όπως διατυπώθηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εξετάζονται δυο ανταγωνιστικά συστήματα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής σε ναυτιλιακές εφαρμογές με τελικό σκοπό την ανάδειξη του επικρατέστερου βάσει του συνδυασμού της τεχνικής – οικονομικής – περιβαλλοντικής αποδοτικότητας και εναλλακτικών προσεγγίσεων όσον αφορά την απόφαση επιλογής. Στην κατακλείδα του κεφαλαίου, συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα και συμπεράσματα, ενώ παρατίθεται και η αντίστοιχη βιβλιογραφία.

Στην εισαγωγική παράγραφο του πέμπτου κεφαλαίου ορίζεται η έννοια της μικρο-συμπαραγωγής και παρατίθενται τα γενικά οφέλη που τη χαρακτηρίζουν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η τρέχουσα κατάσταση όσον αφορά το επίπεδο ανάπτυξης και τις βασικές τεχνολογίες των σχετικών εφαρμογών σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ παρουσιάζονται και οι κυριότερες προσπάθειες αξιολόγησης αντίστοιχων συστημάτων. Στο κύριο μέρος εφαρμόζεται η μεθοδολογία ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων, όπως διατυπώθηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3. Εξετάστηκαν δυο εναλλακτικά συστήματα μικροσυμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (μ-ΣΗΘ) για οικιακές εφαρμογές, όπως και συμβατικό σύστημα αναφοράς με λέβητα αερίου. Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα και συμπεράσματα. Στο τέλος παρατίθεται η σχετική ελληνική και ξενόγλωσση βιβλιογραφία.

Στο έκτο κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που συνάγονται από την ολοκλήρωση της μελέτης και την κριτική αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας και των σχετικών αποτελεσμάτων. Η αρχική παράγραφος εστιάζει στις δυο βασικές μεθόδους των οποίων ο συνδυασμός αποτελεί τον πυρήνα της προτεινόμενης προσέγγισης. Ακολουθεί ο σχολιασμός της μεθοδολογίας συνδυασμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα και ευρήματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας σε συστήματα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής και οικιακής συμπαραγωγής. Στην κατακλείδα του κεφαλαίου προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

Στα παραρτήματα έχουν καταχωρηθεί αποδείξεις τύπων, αριθμητικά παραδείγματα τμημάτων της μεθοδολογίας, λεπτομερή δεδομένα εισόδου και αποτελέσματα και άλλα στοιχεία, τα οποία θεωρήθηκαν οτι δεν συνεισφέρουν στην οικονομία και τη ροή του κυρίως κειμένου της διατριβής.

1.5 Δημοσιεύσεις

Κατά την εκπόνηση της διατριβής προέκυψαν οι εξής δημοσιεύσεις/ανακοινώσεις:

Διεθνή περιοδικά με κρίση:

Giannopoulos D. and Founti M.A. "A fuzzy approach to incorporate uncertainty in the PROMETHEE multicriteria method" International Journal of Multicriteria Decision Making 1(1) (2010) 80 – 102.

Giannopoulos D., Kolaitis D.I., Togkalidou A., Skevis G and Founti M.A. "Quantification of Emissions from the Co-Incineration of Cutting Oil Emulsions in Cement Plants – Part I: NOx, CO and VOC". Fuel, 86(7-8) (2007) 1144-1152.

Giannopoulos D., Kolaitis D.I., Togkalidou A., Skevis G and Founti M.A. "Quantification of Emissions from the Co-Incineration of Cutting Oil Emulsions in Cement Plants – Part II: Trace species". Fuel, 86(16) (2007) 2491-2501.

Διεθνή συνέδρια με κρίση:

Giannopoulos D. and Founti M. "Parametric comparative analysis of lifetime energy demand and CO2-eq savings of a SOFC m-CHP unit". Proceedings of the European Fuel Cell Forum 2011, Lucerne, Switzerland.

Bargigli S., Barbir F., Fiorentino G., Founti M., **Giannopoulos D.**, Kettl K.H., Masoni P., Moreno A., Mubbala R., Narodoslawsky M., Steinberger-Wilckens R., Ulgiati S., Vukman A., Zamagni A., Zucaro A. "An LCA evaluation of MCFCs, SOFCs and PEMFCs, towards Product Category Rules and Environmental Product Declaration". Proceedings of EFC2011 European Fuel Cell - Piero Lunghi Conference & Exhibition, 2011, Rome, Italy.

Vourliotakis G., **Giannopoulos D.** and Founti M. "Potentials of Fuel Cells as μ-CHP Systems for Domestic Applications in the Framework of Energy Efficient and Sustainable Districts". Proceedings of the 24th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems (ECOS), 2011, Belgrade, Serbia.

Giannopoulos D. and Founti M. "Life Cycle Assessment of a SOFC micro CHP unit", Proceedings of the European SOFC Forum 2010, Lucerne, Switzerland.

Founti M.A., **Giannopoulos D.** and Laskaridis K. "Environmental management aspects for energy saving in natural stone quarries", Proceedings of the Global Stone Congress 2010, Alicante, Spain.

Konstantopoulou, P., **Giannopoulos D.**, and Founti, M. "Multicriteria Analysis Of Hydrogen Production Technologies" Proceedings of the International Hydrogen Energy Congress and Exhibition IHEC 2005, Istanbul, Turkey.

Giannopoulos D. and Founti M. "Assessment of biomass thermochemical conversion technologies through a novel synergetic decision support approach combining LCA with Multicriterial Analysis", World Renewable Energy Congress 2005 Aberdeen, Great Britain.

Giannopoulos D., Tolis, A.J., Redizelas, A., Tatsiopoulos I.P., and Founti M. "Potentials and Perspectives of Logistics and Multi-criteria Assessment Methodologies for Exploitation of Agricultural Biomass", 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate protection, 2004, Rome, Italy.

Hansen, M.W., Founti M, and **Giannopoulos D.** "Results from an environmental assessment with a life cycle approach as input to a multicriteria analysis of LIFTOFF gasifiers in Europe", 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate protection, 2004, Rome, Italy.

Kolaitis D., **Giannopoulos D.**, and Founti, M., "Development Of A Decision Support Tool For Sustainability Assessment Of Energy Recovery Systems", Proceedings of the International Conference on New and Renewable Technologies for Sustainable Development, 2002 Azores, Portugal.

Ελληνικά συνέδρια με κρίση:

Γιαννόπουλος Δ. και Φούντη Μ. «Ανάλυση κύκλου ζωής καινοτόμων μονάδων οικιακής συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού», 11ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΙΔΙΠ ΠΥ, ΕΕΔΕ, Αθήνα, 2010.

Γιαννόπουλος Δ. και Φούντη Μ. «Ανάπτυξη και εφαρμογή πολυκριτηριακής μεθόδου για την τεχνο-οικονομική αξιολόγηση τεχνολογιών θερμικής αξιοποίησης βιομάζας», 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μηχανολόγων – Ηλεκτρολόγων, Αθήνα 2005.

Λεωνιδόπουλος Ι., Κολαΐτης Δ., **Γιαννόπουλος Δ**. και Φούντη Μ. «Συγκριτική αξιολόγηση συστημάτων κυψελών καυσίμου για εφαρμογές στον κτιριακό τομέα», 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Μηχανολόγων – Ηλεκτρολόγων, Αθήνα 2005.

Συμμετοχή σε τεχνικές ημερίδες/εκθέσεις:

Vourliotakis G., **Giannopoulos D**. and Founti M. "Innovative technologies in networking m-CHP units for energy efficient and sustainable districts", 4th Annual RENES Conference, 2010, Athens, Greece.

Tsormpatzis – Tsormpatzoglou N., **Giannopoulos D.** and Founti M. "Potential of implementing the Solid Oxide Fuel Cell technology for exploitation of landfill gas in Attiki, Greece", "Energy 2007" - 2nd International Exhibition, 2007 , Athens, Greece.

Σταματιάδου Μ., **Γιαννόπουλος Δ**., Παπαρσένος Γ. και Φούντη Μ. «Επιλογή αλυσίδας παραγωγής υγρών βιοκαυσίμων στην Ελλάδα μέσω μεθοδολογίας πολυκριτηριακής υποστήριξης αποφάσεων». Ημερίδα ΙΕΝΕ: «Υγρά Βιοκαύσιμα – Από το χωράφι στο αυτοκίνητο», 2006, Αθήνα.

Γιαννόπουλος Δ. και Φούντη Μ. «Αξιολόγηση Μεθοδολογιών Θερμικής Αξιοποίησης Αστικών Απορριμμάτων με χρήση Μεθόδων Πολυκριτηριακής Ανάλυσης» Ημερίδα: «Χρήση μοντέλων σχεδιασμού συστημάτων διαχείρισης στερεών αποβλήτων», 2005, Αθήνα

Kolaitis D. **Giannopoulos D**., and Founti M., "Evaluation of Methodologies for the Thermal Treatment of Municipal Solid Waste using Multicriteria Methods", poster presentation for the 4th international exhibition on Environmental Technology "HELECO '03", 2003, Athens, Greece

Κεφάλαιο 2ο

Ολοκληρωμένη Αξιολόγηση Ενεργειακών Τεχνολογιών

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το γενικό πλαίσιο δυο μεθοδολογιών (Ανάλυση Κύκλου Ζωής - ΑΚΖ και Πολυκριτηριακή Ανάλυση - ΠΑ) που συνδέονται άμεσα – με διαφορετικό ωστόσο τρόπο – με την έννοια της ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών. Η συγκεκριμένη έννοια επιδέχεται πλήθος ερμηνειών με συνέπεια να αποτελέσει το αντικείμενο αντίστοιχου αριθμού μεθοδολογιών (Allen et al., 2008). Στα πλαίσια της διατριβής 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 τη 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. Παρατίθεται επίσης ανασκόπηση των σημαντικότερων αντίστοιχων δημοσιεύσεων και μελετών κατά την δεκαετία 2000-10. Ο συνδυασμός των δυο μεθοδολογιών αποτελεί τον κορμό της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνδυασμένης αξιολόγησης που παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

2.1 Περιβαλλοντική Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ)

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) είναι μια τεχνική εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που συνδέονται με προϊόν, διεργασία ή δραστηριότητα, προσδιορίζοντας και ποσοτικοποιώντας την ενέργεια και τα υλικά που χρησιμοποιούνται, καθώς και τα απόβλητα που απελευθερώνονται στο περιβάλλον. Σε επόμενο στάδιο υπολογίζονται οι επιπτώσεις από τη χρήση της ενέργειας και των υλικών καθώς και των αποβλήτων και εκτιμώνται οι δυνατότητες περιβαλλοντικών βελτιώσεων (SETAC, 1993).

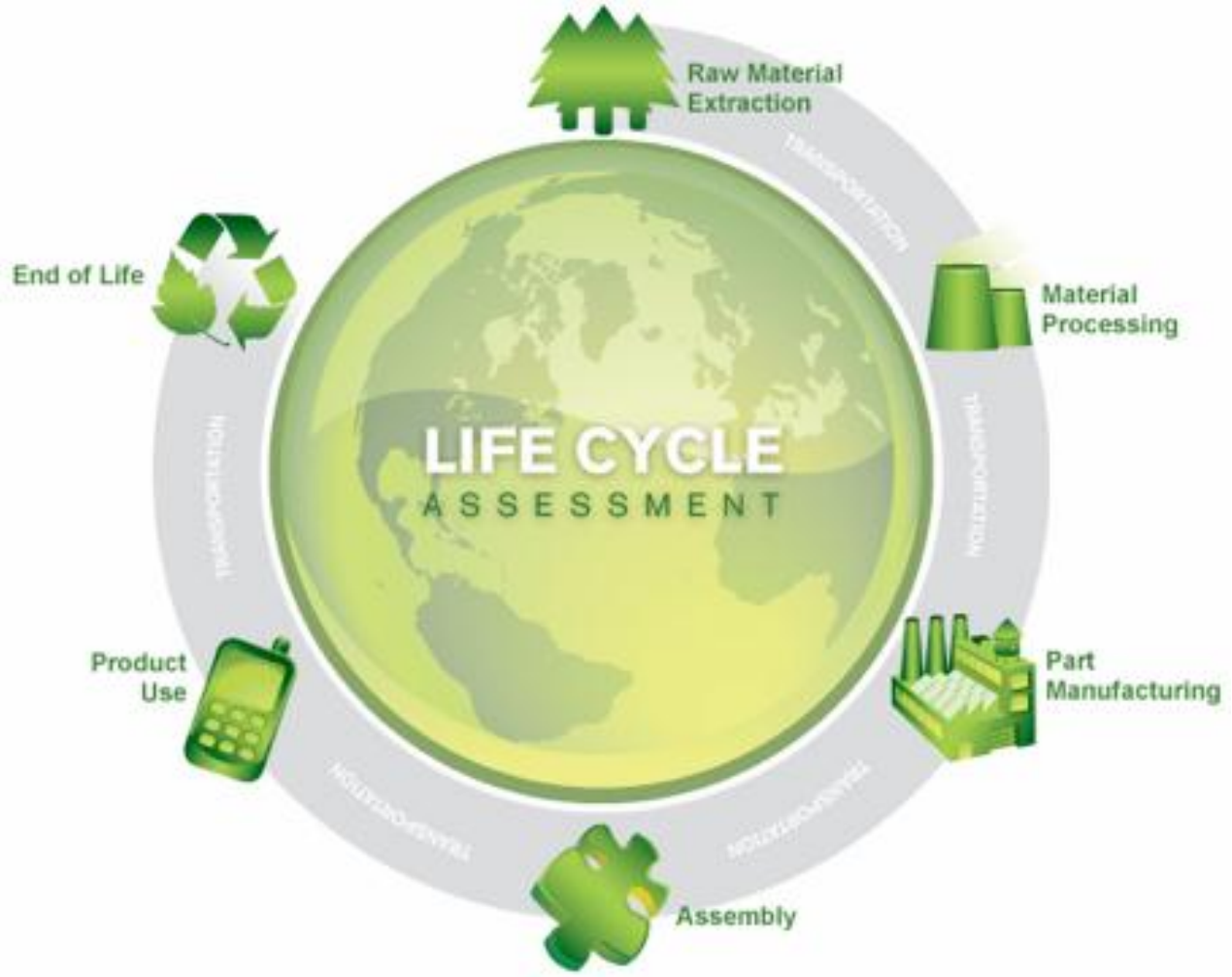
Η ανάλυση περιλαμβάνει ολόκληρο τον κύκλο ζωής (Σχήμα 2.1) ενός προϊόντος, μιας διεργασίας ή μίας δραστηριότητας, δηλαδή την εξαγωγή και επεξεργασία πρώτων υλών, την κατασκευή, μεταφορά, διανομή, χρήση, συντήρηση και διαχείριση των αποβλήτων (SETAC, 1993).

Ο οργανισμός SETAC (Society of Environmental Toxicology And Chemistry) ορίζει τη διαδικασία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής ως εξής (SETAC, 1993): *«Η ανάλυση του κύκλου ζωής είναι μια αντικειμενική μέθοδος για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών φορτίων που συνδέονται με ένα προϊόν, μια διεργασία ή μια δραστηριότητα με αναγνώριση και υπολογισμό της ενέργειας και των υλικών που χρησιμοποιούνται και των εκπομπών τους στο περιβάλλον και η αξιολόγηση και η εκμετάλλευση ευκαιριών για επίτευξη περιβαλλοντικών βελτιώσεων. Η εκτίμηση καλύπτει ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, της διεργασίας ή της δραστηριότητας, συμπεριλαμβάνοντας την παραλαβή και επεξεργασία πρώτων υλών, τη μεταποίηση, τη μεταφορά και τη διανομή, τη χρήση ή την επαναχρησιμοποίηση, τη συντήρηση, την ανακύκλωση και την τελική απόθεση».*

Το κίνητρο ανάπτυξης της ΑΚΖ συγκεντρώνεται γύρω από την ανάγκη για σύγκριση υλικών και διεργασιών προκειμένου να προσδιοριστεί το βέλτιστο από περιβαλλοντικής άποψης, καταγράφοντας και ελέγχοντας όλα τα στάδια της ζωής τους. Με δεδομένο οτι όλα τα στάδια της ζωής ενός προϊόντος/συστήματος συνεισφέρουν στους συνολικούς ρύπους, οποιαδήποτε αλλαγή σε κάποιο από τα στάδια αυτά είναι πιθανόν να έχει θετικές ή αρνητικές συνέπειες στα υπόλοιπα στάδια τόσο στις εκπομπές ρύπων, όσο και στην κατανάλωση ενέργειας και πρώτων υλών. Η πρακτική που συνήθως ακολουθείται αφορά την εστίαση σε συγκεκριμένο μέσο (αέρα, ύδατα ή έδαφος) με αποτέλεσμα να παραβλέπεται η «μεταφορά ρύπων» από ένα μέσο σε άλλο (π.χ. δέσμευση αέριων ρύπων μέσω καταιονιστήρων) (Καρβούνης και Γεωργακέλλος, 2003).

Γενικός σκοπός της ΑΚΖ είναι να αποτιμήσει τις επιδράσεις από τη χρήση ενέργειας και την επεξεργασία υλικών, συμπεριλαμβανομένης της απόρριψης αποβλήτων στο περιβάλλον και να εκτιμήσει τις δυνατότητες επίτευξης περιβαλλοντικών βελτιώσεων σε συνδυασμό με την

ορθολογική χρήση πρώτων υλών και ενέργειας σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ενός προϊόντος.



Σχήμα 2.1 Απεικόνιση σταδίων κύκλου ζωής προϊόντος. Πηγή: http://www.solidworks.com

Οι ρίζες της ΑΚΖ επεκτείνονται πίσω στη δεκαετία του '70 όταν αναπτύχθηκαν τεχνικές για ενεργειακούς και περιβαλλοντικούς υπολογισμούς κατά το στάδιο του σχεδιασμού προϊόντων. Μέχρι τα τέλη της δεκαετίας του '80 τα οφέλη της τεχνικής έγιναν αισθητά στη βιομηχανία, ενώ στις αρχές της δεκαετίας του '90 ένα κύμα ερευνητικών προγραμμάτων έδωσε ιδιαίτερη ώθηση στην ΑΚΖ. Εντούτοις, θεωρείται ότι η καθιέρωσή της ως περιβαλλοντικό εργαλείο έγινε μόλις στα τέλη της δεκαετίας του '90 με την έκδοση της σχετικής σειράς διεθνών προτύπων ISO 14040 – 14049 (Curran, 1996). Η σειρά προτύπων ανανεώθηκε το 2006 (ISO 14040:2006 – 14049:2006).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα της ΑΚΖ αποτελεί η συστηματική προσέγγιση του αντικειμένου της μελέτης, που έχει ως συνέπεια την αποφυγή της μετάθεσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από το ένα στάδιο του κύκλου ζωής σε άλλο, όπως και τον συνυπολογισμό των έμμεσων επιπτώσεων εκτός τοπικών-εθνικών ορίων (WEC, 2004). Στον αντίποδα, το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι απαιτεί μεγάλο αριθμό λεπτομερών

δεδομένων, χρόνο και εξειδικευμένη γνώση για την εφαρμογή της. Επίσης, βασικό περιορισμό της ΑΚΖ αποτελεί το ότι δεν λαμβάνει υπόψη στοιχεία σχετικά με κόστη ή τεχνική αποδοτικότητα. Κατά συνέπεια, εντός ενός πλαισίου συνολικής αξιολόγησης, καθίσταται αναγκαίος ο συνδυασμός της ΑΚΖ με μεθοδολογίες/πηγές που συνεισφέρουν την αντίστοιχη πληροφορία (WEC, 2004).

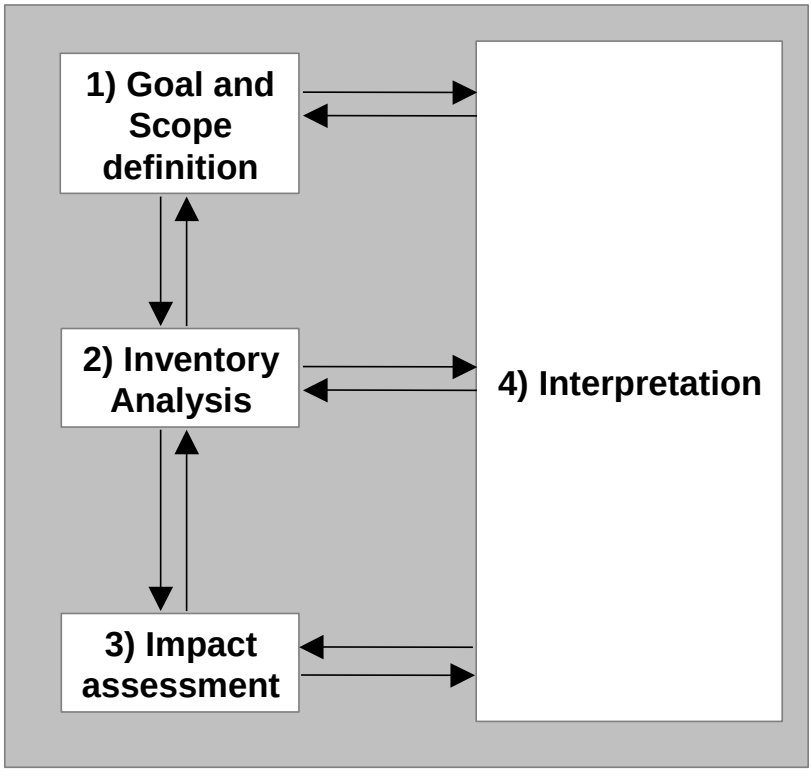
Η τεχνική εφαρμογής της ΑΚΖ βασίζεται στη δημιουργία ενός είδους μοντέλου ρεαλιστικής καταγραφής των ενδιάμεσων σταδίων του κύκλου ζωής ενός συστήματος. Το στατικό μοντέλο προσομοίωσης της ΑΚΖ αποτελείται από διεργασίες, η κάθε μια από τις οποίες αντιπροσωπεύει μια ή περισσότερες δραστηριότητες. Στην ακόλουθη ενότητα περιγράφονται τα βασικά στάδια εφαρμογής της μεθοδολογίας της ΑΚΖ όπως και οι αλληλοσυσχέτισή τους.

2.1.1 Η Μεθοδολογία της ΑΚΖ

Η εφαρμογή της ΑΚΖ χωρίζεται σε τέσσερα βασικά στάδια (SETAC, 1993; EPA, 2001) (Σχήμα 2.2):

- Προσδιορισμός του σκοπού και του αντικειμένου της μελέτης (Goal and scope definition)

  Περιγράφεται το προϊόν, η διαδικασία ή η υπηρεσία η οποία θα αναλυθεί, ορίζεται το πλαίσιο στο οποίο θα κινηθεί η ανάλυση και καθορίζονται τα όρια αυτής όπως και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που θα ληφθούν υπόψη.



Σχήμα 2.2 Βασικά στάδια εφαρμογής ΑΚΖ (EPA, 2001)

- Απογραφή δεδομένων (Life Cycle Inventory Analysis).

  Στο στάδιο αυτό αναγνωρίζονται και ποσοτικοποιούνται η ενέργεια, το νερό και οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται, καθώς και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από τον κύκλο ζωής του προϊόντος/διαδικασίας/υπηρεσίας που αναλύεται.

- Εκτίμηση επιπτώσεων κύκλου ζωής (Life Cycle Impact Assessment).

Αποτιμώνται οι επιπτώσεις των παραμέτρων που απογράφησαν στον άνθρωπο και το περιβάλλον. Η εκτίμηση των επιπτώσεων αποτελείται από τρία μέρη: i) ταξινόμηση ii) χαρακτηρισμό iii) αξιολόγηση.

- Ερμηνεία αποτελεσμάτων - Εκτίμηση βελτιώσεων (Interpretation)
  Αξιολογούνται τα αποτελέσματα των δύο προηγούμενων σταδίων, ώστε να επιλεγεί το βέλτιστο προϊόν, διαδικασία ή υπηρεσία, με πλήρη κατανόηση των αβεβαιοτήτων και υποθέσεων που οδηγούν στο συγκεκριμένο αποτέλεσμα. Βάσει της ανάλυσης που έχει προηγηθεί προτείνονται επεμβάσεις που θα βελτιώσουν τη συνολική περιβαλλοντική επίδοση.

2.1.1.1 Σκοπός και Πλαίσιο της ΑΚΖ

Ο καθορισμός του σκοπού και πλαισίου της ανάλυσης είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό στάδιο στην εφαρμογή της τεχνικής γιατί από αυτό εξαρτώνται οι απαιτήσεις σε χρόνο, ανθρώπινο δυναμικό και οικονομικούς πόρους. Επιπρόσθετα, το μοντέλο του κύκλου ζωής αναπόφευκτα περιέχει πλήθος απλοποιήσεων και παραδοχών. Ο ξεκάθαρος ορισμός του σκοπού και πλαισίου της ανάλυσης είναι για τον χρήστη ένα κομβικό σημείο κατά το οποίο θα πρέπει να βεβαιωθεί ότι οι παραδοχές και απλοποιήσεις αυτές θα είναι τέτοιες που δεν θα επιφέρουν σημαντική αλλοίωση στο τελικό αποτέλεσμα.

Σημαντικά ζητήματα που συνδέονται με το σκοπό και το πλαίσιο της ΑΚΖ, είναι (Curran, 1996; Λαζόγλου, 2009):

- Η ακριβής αποτύπωση του σκοπού εφαρμογής της ΑΚΖ
- Ο λεπτομερής καθορισμός του κύκλου ζωής και της χρήσης του προϊόντος
- Ο καθορισμός της λειτουργικής μονάδας
- Ο ορισμός και περιγραφή των ορίων του συστήματος
- Καθορισμός του σκοπού και του πλαισίου της μελέτης
- Συλλογή και καταγραφή δεδομένων (εισροές & εκροές)
- Αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων
- Ερμηνεία και κατανόηση πληροφοριών, δεδομένων και αποτελεσμάτων ΑΚΖ
- Καθορισμός των ποιοτικών προδιαγραφών για τα στοιχεία που θα χρησιμοποιηθούν
- Οι υποθέσεις, περιορισμοί και απαιτήσεις για την επακόλουθη ερμηνεία
- Το ακροατήριο στο οποίο τα αποτελέσματα θα διαχυθούν και ο τρόπος που θα εφαρμοστούν
- Ο τύπος και η μορφή της έκθεσης για τη μελέτη

Ο καθορισμός του σκοπού και του πλαισίου προκύπτει από την ανάγκη για συνέπεια κατά τη διάρκεια της εφαρμογής της ΑΚΖ. Στην πράξη, το πλαίσιο της μελέτης είναι ο προσδιορισμός του επιπέδου λεπτομέρειας που απαιτείται για την εφαρμογή των αποτελεσμάτων. Το

αποτέλεσμα της μελέτης εξαρτάται κυρίως από την ακρίβεια των στοιχείων που εισάγονται (EPA, 2006).

2.1.1.2 Λειτουργική Μονάδα

Η λειτουργική μονάδα αποτελεί το μέτρο της λειτουργίας του συστήματος υπό μελέτη και παρέχει μια αναφορά τόσο για τα εισαγόμενα στοιχεία όσο και για τα αποτελέσματα, επιτρέποντας τη σύγκριση δύο διαφορετικών συστημάτων. Ο καθορισμός μιας λειτουργικής μονάδας πιθανό να είναι δύσκολος, καθώς αυτή πρέπει να είναι ακριβής και συγκρίσιμη έτσι ώστε να μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ολόκληρη τη μελέτη (EPA, 2006).

2.1.1.3 Όρια Συστήματος

Τα όρια του συστήματος καθορίζουν ποιες διεργασίες θα πρέπει να συμπεριληφθούν στη μελέτη ΑΚΖ. Ο καθορισμός των ορίων του συστήματος, είναι εν μέρει υποκειμενικός και γίνεται συνήθως κατά τον ορισμό του πλαισίου. Όρια που πρέπει να ληφθούν υπόψη είναι για παράδειγμα τα όρια μεταξύ τεχνόσφαιρας (διεργασίες, υλικά και άλλα είδη που προκύπτουν ως αποτέλεσμα της ανθρώπινης δραστηριότητας) και οικόσφαιρας (διεργασίες και υλικά που δεν προκύπτουν από κάποια ανθρώπινη δραστηριότητα), γεωγραφικά και χρονικά όρια και τα όρια μεταξύ του κύκλου ζωής υπό μελέτη και των κύκλων ζωής άλλων συστημάτων (π.χ. παραγωγή κεφαλαιουχικών αγαθών) (Curran, 1996).

2.1.1.4 Ποιότητα δεδομένων

Η εγκυρότητα των αποτελεσμάτων από τις μελέτες ΑΚΖ, εξαρτάται από την ποιότητα των δεδομένων που εισάγονται. Οι παράμετροι που θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη είναι: χρονική, γεωγραφική και τεχνολογική κάλυψη, ακρίβεια και αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων, συνέπεια και επαναληψιμότητα των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για συλλογή των δεδομένων, και τέλος το σφάλμα και τα κενά δεδομένων. Επιπρόσθετα, θα πρέπει να καθορίζονται όρια (threshold points) σχετικά με την πληρότητα των δεδομένων (Λαζόγλου, 2009).

2.1.1.5 Συλλογή Δεδομένων: Καταγραφή Κύκλου Ζωής

Για την ολοκλήρωση του μοντέλου είναι αναγκαία η συλλογή δεδομένων για κάθε διεργασία που βρίσκεται εντός των ορίων του συστήματος. Τα δεδομένα που χρειάζονται είναι συνδυασμός εισροών και εκροών σε κάθε διεργασία που περιλαμβάνεται στα όρια του συστήματος. Για τη συλλογή δεδομένων πρέπει, μεταξύ άλλων, να σχεδιάζονται κατάλληλα έντυπα συλλογής δεδομένων. Στη συνέχεια τα δεδομένα επαληθεύονται και σχετίζονται με τη λειτουργική μονάδα προκειμένου να επιτραπεί η συνάθροιση των αποτελεσμάτων. Ένα κρίσιμο βήμα σε αυτήν τη διαδικασία υπολογισμού είναι η κατανομή των ροών στο

περιβάλλον π.χ. Οι εκπομπές στον αέρα, νερό και έδαφος. Επίσης, ένα άλλο πρόβλημα προκύπτει από το γεγονός ότι αρκετές διεργασίες παράγουν περισσότερα από ένα προϊόντα, που πιθανόν να μην βρίσκονται εντός των ορίων του συστήματος. Επομένως, τόσο οι εξαγωγές πρώτων υλών όσο και οι περιβαλλοντικές εκπομπές που σχετίζονται με τη συνολική διεργασία, θα πρέπει να καταμερίζονται στα διαφορετικά προϊόντα της διεργασίας. Η συλλογή δεδομένων είναι το στάδιο με τις μεγαλύτερες απαιτήσεις σε πόρους και χρόνο σε μία ΑΚΖ.

Στο Σχήμα 2.3 απεικονίζονται οι απαιτήσεις σε στοιχεία κατά τη διάρκεια μίας ΑΚΖ, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14041 (ISO, 2006). Κατά την εφαρμογή της ΑΚΖ, εμφανίζονται συχνά κοινές διεργασίες, όπως, η προμήθεια ενέργειας, οι μεταφορές, οι υπηρεσίες επεξεργασίας αποβλήτων και η παραγωγή χημικών ουσιών. Οι διεργασίες αυτές ονομάζονται διεργασίες υποδομών (background processes). Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί και είναι διαθέσιμες βάσεις δεδομένων με στοιχεία για πολλές από αυτές. Η επαναχρησιμοποίηση στοιχείων από προηγούμενες μελέτες μπορεί να απλοποιήσει την εργασία συλλογής δεδομένων, εντούτοις αυτό πρέπει να γίνεται με προσοχή έτσι ώστε τα δεδομένα να είναι αντιπροσωπευτικά. Τα δεδομένα που αφορούν το συγκεκριμένο εξεταζόμενο σύστημα αναφέρονται ως «foreground data».

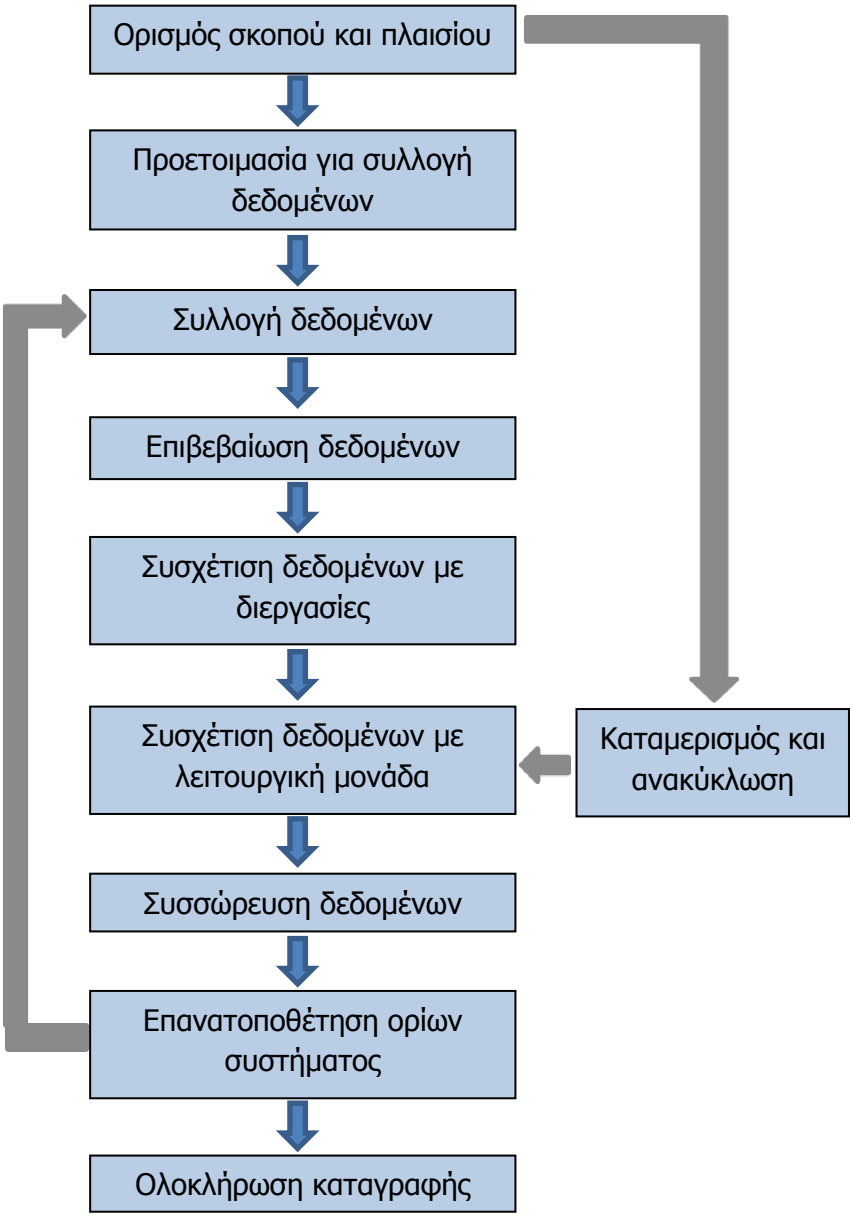
2.1.2 Εφαρμογές ΑΚΖ στον ενεργειακό τομέα

Οι κυριότερες εφαρμογές της μεθοδολογίες της ΑΚΖ στον ενεργειακό τομέα αφορούν κατά κύριο λόγο τη συγκριτική περιβαλλοντική αποτίμηση συστημάτων/τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής (και συμπαραγωγής θερμότητας-ηλεκτρισμού), την αξιολόγηση συστημάτων θέρμανσης χώρων και το χαρακτηρισμό της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς εναλλακτικών καυσίμων στις μεταφορές (WEC, 2004). Η παρούσα συνοπτική ανασκόπηση καταγράφει εργασίες με σημαντική σχετική συνεισφορά κατά τη δεκαετία 2000-10. Πιο αναλυτικές ανασκοπήσεις αποτελούν η μελέτη του Παγκόσμιου Συμβουλίου Ενέργειας (WEC, 2004) και σχετικό παραδοτέο του ερευνητικού προγράμματος NaturalHy (2004).

Σε συμβατικά συστήματα ηλεκτροπαραγωγής με ορυκτά καύσιμα εστιάζει σειρά μελετών του NREL (Spath and Mann, 2000; 2004), μέρος των αποτελεσμάτων των ερευνητικών προγραμμάτων ECLIPSE (Briem, 2003) και NEEDS (2008), όπως και η αντίστοιχη μελέτη του Οργανισμού Άνθρακα της Αυστραλίας (Nunn, 2001). Τα αποτελέσματα που αφορούν συμβατικά συστήματα λειτουργούν και ως επίπεδο αναφοράς για «μη συμβατικά» συστήματα ανανεώσιμων πηγών ή πυρηνικής ενέργειας.

Σημαντικές πηγές πληροφορίας για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του κύκλου ζωής ανανεώσιμων τεχνολογιών αποτελούν οι μελέτες των Spath and Mann (2004) για βιομάζα και οι δηλώσεις περιβαλλοντικού προϊόντος (EPD – Environmental Product Declaration) της

εταιρίας ηλεκτροπαραγωγής Vattenfall για αιολική (Vattenfall, 2003), υδροηλεκτρική (Vattenfall, 2002) και πυρηνική ενέργεια (Vattenfall, 2001).



Σχήμα 2.3 Διάγραμμα ροής απαιτήσεων σε στοιχεία μιας τυπικής ΑΚΖ (Λαζόγλου, 2009)

Σε επίπεδο ερευνητικών προγραμμάτων καταγράφονται οι μελέτες του ECLIPSE (Chataignere and Le Boulch, 2003; Frankl et al., 2004) για ΑΚΖ σε ανεμογεννήτριες και φωτοβολταϊκά, όπως και του NEEDS (2008) σε πληθώρα συστημάτων. Η δημοσίευση των Varun et al. (2009) παραθέτει μια αναλυτική ανασκόπηση των δημοσιεύσεων σχετικών με ΑΚΖ σε συστήματα ηλεκτροπαραγωγής από ανανεώσιμες πηγές, ενώ αντίστοιχες πρόσφατες ανασκοπήσεις (Davidsson, 2012; Sherwani et al., 2010) επικεντρώνονται σε αιολικά και φωτοβολταϊκά συστήματα, αντίστοιχα.

Τα συστήματα συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού (συμβατικά και μη - π.χ. κυψέλες καυσίμου) αποτελούν το επίκεντρο στις ΑΚΖ που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια των ήδη

αναφερθέντων προγραμμάτων ECLIPSE (Viebahn and Krewitt, 2003; Briem, 2003; Setterwall et al., 2003) και NEEDS (2008). Οι εναλλακτικές επιλογές ως προς την κάλυψη θερμικών φορτίων θέρμανσης και οι αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις καλύπτονται από τις μελέτες των Delucchi (2001) και Dones et al. (2004).

Ο τομέας των μεταφορών συγκεντρώνει έντονο ενδιαφέρον ως προς την ποσοτικοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων εναλλακτικών αλυσίδων παραγωγής καυσίμων. Η τάση για εισαγωγή υγρών βιοκαυσίμων στην αγορά αποτέλεσε την αιτία για σχετικές συγκριτικές αξιολογήσεις μεταξύ συμβατικών και εναλλακτικών. Η εφαρμογή ΑΚΖ στις μεταφορές διακρίνεται σε δυο κατηγορίες, ανάλογα με το όριο του εξεταζόμενου συστήματος: η προσέγγιση «well-to-tank», η οποία περιλαμβάνει τα στάδια της εξόρυξης, μεταφοράς, διύλισης και διανομής του καυσίμου και η προσέγγιση «tank-to-wheel» όπου εξετάζονται το στάδιο της μετατροπής σε κινητική ενέργεια του οχήματος. Ιδιαίτερα σημαντική χαρακτηρίζεται η συνεισφορά της σειράς σχετικών μελετών του JRC (Joint Research Centre), με την πιο πρόσφατη (EU-JRC, 2007) να συμπεριλαμβάνει πλήθος συμβατικών και μη καυσίμων. Αντίστοιχου εύρους είναι και η μελέτη του LBST για λογαριασμό της GM (LBST, 2002). Η δημοσίευση των Gnanounsou et al. (2009) περιέχει αναλυτική ανασκόπηση των δημοσιεύσεων σχετικών με εφαρμογή ΑΚΖ σε υγρά βιοκαύσιμα.

2.2 Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων (ΠΚΛΑ)

Η Πολυκριτηριακή Λήψη Αποφάσεων (ΠΚΛΑ) (Multiple Criteria Decision Making, MCDM) είναι ο κλάδος εκείνος της Επιχειρησιακής Έρευνας που ασχολείται με την επίλυση προβλημάτων λαμβάνοντας υπόψη περισσότερα του ενός κριτήρια απόφασης. Η διαδικασία λήψης απόφασης είναι η διαδικασία εκείνη που αποβλέπει στην επιλογή μίας λύσης (δράσης) από ένα σύνολο εναλλακτικών επιλογών (Μαυρωτάς, 2000). Η λήψη απόφασης γίνεται από τον αποφασίζοντα ο οποίος συγκρίνει και αξιολογεί τις εναλλακτικές λύσεις (επιλογές) ώστε να επιλεχθεί τελικά η καταλληλότερη λύση για κάποιο συγκεκριμένο πρόβλημα.

Η ΠΚΛΑ αποσκοπεί – βάσει αναγνωρισμένων επιστημονικών μεθόδων και με αναφορά σε σαφείς υποθέσεις – στη διαμόρφωση ενός πλαισίου υποστήριξης απόφασης, την οποία καλούνται να λάβουν οι εκάστοτε εμπλεκόμενοι (Roy, 2005). Η συνεισφορά της συνοψίζεται στα εξής γενικά σημεία (Roy, 2005):

- Ανάλυση του περιβάλλοντος λήψη απόφασης, μέσω καταγραφής των εμπλεκομένων πλευρών, των πιθανών εναλλακτικών δράσεων, των επιπτώσεων τους, κ.α.
- Οργάνωση/δόμηση της διαδικασίας λήψης απόφασης, προκειμένου να εξασφαλιστεί η επιδιωκόμενη συνοχή μεταξύ των προτεραιοτήτων και της τελικής απόφασης.
- Ενθάρρυνση της συνεργασίας και της αμοιβαίας κατανόησης των διαφόρων προτεραιοτήτων των αποφασιζόντων.
- Ανάδειξη κατευθύνσεων προς τη λύση, υπό το πρίσμα των αναγκαίων υποθέσεων.
- Συμμετοχή των αποφασιζόντων στη «νομιμοποίηση» της τελικής επιλογής.

Ενσωματώνοντας περισσότερα του ενός κριτήρια στη διαδικασία λήψης απόφασης, υιοθετείται μια ρεαλιστικότερη απεικόνιση των πραγματικών προβλημάτων. Ακόμα και στην περίπτωση κατά την οποία υπάρχει μόνο ένα αποφασίζον άτομο, θεωρείται ασύνηθες να λαμβάνει υπόψη μόνο ένα κριτήριο (Roy, 2005). Πόσω μάλλον, όταν διαπιστώνονται ομάδες που επηρεάζουν την τελική απόφαση και διαθέτουν κατά τεκμήριο διαφορετικές προτεραιότητες. Οι εν λόγω προτεραιότητες είναι δυνατόν να αφορούν πλήθος ετερόκλητων ή μη διαστάσεων του προβλήματος (οικονομία, περιβάλλον, ασφάλεια, ποιότητα, ηθική, κ.α.). Η μονοκριτηριακή προσέγγιση θα προϋπέθετε μια κοινή κλίμακα στην οποία θα αναχθεί η πληροφορία των επιμέρους διαστάσεων. Συμπεριλαμβανόμενης της δυσκολίας καθορισμού μιας τέτοιας κλίμακας, διαπιστώνονται οι εξής αδυναμίες/κίνδυνοι της μονοκριτηριακής προσέγγισης (Roy, 2005):

- Τάση για λανθασμένη παραμέληση συγκεκριμένων διαστάσεων του προβλήματος
- Τάση δόμησης «θεωρητικής φύσης» ισοδυναμιών μεταξύ των διαστάσεων του προβλήματος

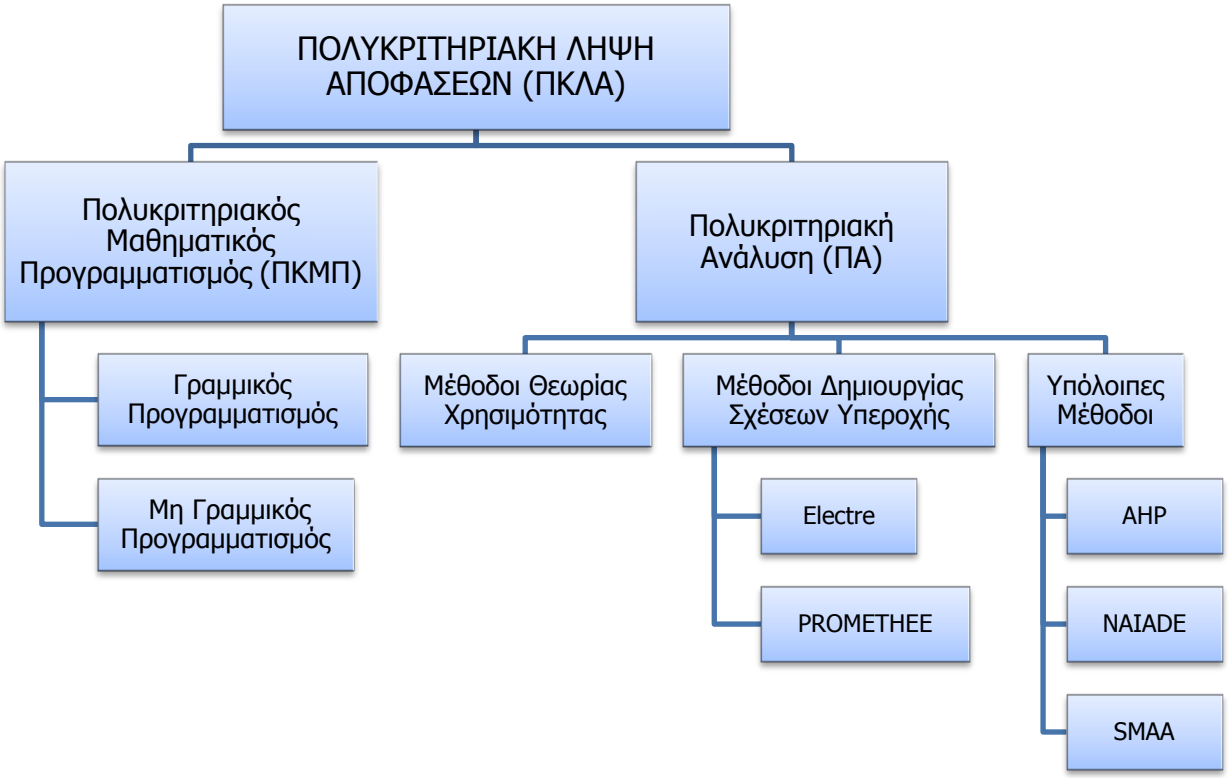
- Παραπλανητική παρουσίαση συγκεκριμένου συστήματος αξιών (προτεραιοτήτων) ως αντικειμενικού

Στον αντίποδα, η πολυκριτηριακή προσέγγιση προλαμβάνει τους παραπάνω μεθοδολογικούς κινδύνους, καθώς (Roy, 2005; Gregory and Keeney, 1994; Rauschmayer, 2001):

- Συνθέτει ένα ευρύ φάσμα διαστάσεων του προβλήματος, πάνω στις οποίες δομείται η διαδικασία απόφασης των εμπλεκομένων πλευρών.
- Συγκεντρώνει ένα σύνολο κριτηρίων, τα οποία διατηρούν την αρχική πληροφορία της διάστασης που αντιπροσωπεύουν, αποφεύγοντας θεωρητικές μετατροπές σε κοινή κλίμακα κριτηρίων.
- Προωθείται η συνδιαλλαγή των εμπλεκόμενων μερών, σχετικά με το ρόλο και τη λειτουργία κάθε κριτηρίου.

2.2.1 Πολυκριτηριακή Ανάλυση

Οι δυο βασικές προσεγγίσεις της ΠΚΛΑ είναι ο Πολυκριτηριακός Μαθηματικός Προγραμματισμός (ΠΚΜΠ) και η Πολυκριτηριακή Ανάλυση (ΠΑ) (Σχήμα 2.4) (Μαυρωτάς, 2000; Πολατίδης, 2003). Εναλλακτικά, η ονοματολογία που χρησιμοποιεί ο Kahraman (2008) είναι αντίστοιχα Λήψη Αποφάσεων Πολλαπλών Στόχων (Multiple Objective Decision Making – MODM) και Λήψη Αποφάσεων Πολλαπλών Ιδιοτήτων (Multiple Attribute Decision Making – MADM).



Σχήμα 2.4 Απεικόνιση βασικών κατηγοριών μεθόδων ΠΚΛΑ. Πηγή: (Μαυρωτάς, 2000; Πολατίδης, 2003)

Κατά την πρώτη προσέγγιση, το σύνολο των δυνατών επιλογών δεν δίδεται ρητά αλλά έμμεσα μέσω των τιμών των μεταβλητών απόφασης ενός προβλήματος μαθηματικού προγραμματισμού. Οι μαθηματικές σχέσεις μεταξύ των μεταβλητών απόφασης που πρέπει να ικανοποιούνται αποτελούν τους περιορισμούς του προβλήματος, ενώ οι συναρτήσεις εκείνες των μεταβλητών απόφασης που πρέπει να αριστοποιηθούν ονομάζονται αντικειμενικές συναρτήσεις. Με τον όρο πιθανή λύση του προβλήματος εννοείται κάθε συνδυασμός τιμών που μπορούν να λάβουν οι μεταβλητές απόφασης (Μαυρωτάς, 2000).

Αντίθετα, στην Πολυκριτηριακή Ανάλυση (ΠΑ), το σύνολο των εναλλακτικών επιλογών είναι διακριτό και ρητά καθορισμένο – με συγκεκριμένες επιλογές που χαρακτηρίζονται από την επίδοσή τους σε κάποια κριτήρια (Μαυρωτάς, 2000). Οι διάφορες μεθοδολογίες ΠΑ έχουν ως κύριο σκοπό τον συνδυασμό της πληροφορίας που περιέχεται στις επιδόσεις των κριτηρίων με τις προτεραιότητες που καθορίζει ο αποφασίζων, προκειμένου να επιτευχθεί ταξινόμηση ή επιλογή από το σύνολο των εναλλακτικών δράσεων (Kahraman, 2008).

2.2.1.1 Ομαδοποίηση μεθόδων ΠΑ

Τα τελευταία 30 χρόνια οι μέθοδοι ΠΑ έχουν επιδείξει σημαντική ανάπτυξη η οποία ανακλάται στην πρόοδο των τριών κυρίων θεωρητικών τάσεων και των άλλων μεθόδων (Πολατίδης, 2003; Siskos and Spyridakos, 1999) (Σχήμα 2.4):

- Προσέγγιση θεωρίας χρησιμότητας
- Προσέγγιση δημιουργίας σχέσεων υπεροχής (outranking relations)
- Υπόλοιπες μέθοδοι

Ως κατηγορία μεθόδων ΠΑ αναφέρονται και οι μέθοδοι αλληλεπίδρασης (interactive methods), ωστόσο χρησιμοποιούνται κατά τεκμήριο σε γραμμικά πολυκριτηριακά μοντέλα βελτιστοποίησης και αποσκοπούν στην επίλυση προβλημάτων που δεν περιλαμβάνουν διακριτές/ασυνεχείς εναλλακτικές επιλογές (Πολατίδης, 2003). Για τον παραπάνω λόγο, δεν συμπεριλαμβάνονται στην παρούσα ανασκόπηση.

Πολυκριτηριακή θεωρία χρησιμότητας (Multi Attribute Utility Theory - MAUT)

Η συγκεκριμένη κατηγορία μεθόδων αναφέρεται ως η «Αμερικάνικη» σχολή ΠΑ (Keeney and Raiffa, 1976; Edwards, 1977; Von Winterfeldt and Edwards, 1986). Η βασική υπόθεση της θεωρίας χρησιμότητας συνοψίζεται ως εξής: Σε κάθε πρόβλημα απόφασης υπάρχει μία πραγματική συνάρτηση U (real valued function) ορισμένη σε ένα σύνολο Α, την οποία ο αποφασίζων επιθυμεί, συνειδητά ή όχι, να μεγιστοποιήσει. Στη συνάρτηση αυτή (την οποία διαμορφώνει ο εκάστοτε αναλυτής) συναθροίζονται οι επιδόσεις των εναλλακτικών δράσεων στα κριτήρια επιλογής $g_1, g_2, \ldots, g_n$ και λαμβάνει τη μορφή: $U = U(g_1, g_2, \ldots, g_n)$.

Ορίζονται επίσης οι συναρτήσεις w_{ij} που μετρούν την ποσότητα του κριτηρίου g_j που ο αποφασίζων δέχεται να «παραχωρήσει» για να «κερδίσει» μία μονάδα του κριτηρίου g_i. Η ποσότητα αυτή αποτελεί την αντιστάθμιση (tradeoff) μεταξύ των κριτηρίων i και j.

Η πιο απλή (και περισσότερο χρησιμοποιούμενη) αναλυτική μορφή της συνάρτησης U είναι η σταθμισμένη προσθετική συνάθροιση των κριτηρίων: $U(a) = \sum U_j[g_j(a)]$, όπου οι παράγοντες Uj αποτελούν γνησίως αύξουσες πραγματικές συναρτήσεις. Οι συναρτήσεις αυτές έχουν ως μοναδικό στόχο την μετατροπή των κριτηρίων στις ίδιες μονάδες. Έτσι αποφεύγονται προβλήματα συνάθροισης ανόμοιων μεγεθών και επιτυγχάνεται η ενοποίηση των κριτηρίων (Keeney, 1992). Η τελική απόφαση λαμβάνεται μέσω της μεγιστοποίησης της τιμής της συνάρτησης U. Η επιλογή που δίνει στην U τη μέγιστη τιμή, αποτελεί και την περισσότερο προτιμητέα λύση.

Η προσέγγιση αυτή έχει μεν το πλεονέκτημα της κατάληξης σε ένα πλήρως ορισμένο μαθηματικά πρόβλημα (Weber and Borcherding, 1993), ωστόσο συγκεντρώνει και μια σειρά από μεθοδολογικές αδυναμίες. Στην πράξη είναι δύσκολο να προσδιοριστούν με ακρίβεια οι αντισταθμίσεις μεταξύ των κριτηρίων, ιδιαίτερα όταν τα κριτήρια μετρούνται σε μονάδες εμφανιζόμενες χωρίς κοινό μέτρο (Martinez-Alier et al., 1998). Επίσης, οι μη ρεαλιστικές υποθέσεις στις οποίες στηρίζεται η θεωρία (ύπαρξη σαφώς ορισμένης συνάρτησης χρησιμότητας του αποφασίζοντα, δυνατότητα αποκάλυψής της και θεώρηση πλήρους αντιστάθμισης μεταξύ των κριτηρίων επιλογής) (Bouyssou, 1986; Weber and Borcherding, 1993), περιορίζουν αναπόφευκτα το πεδίο εφαρμογών της (Vincke, 1992).

Μέθοδοι δημιουργίας Σχέσεων Υπεροχής (Outranking Techniques)

Σε αντιστοιχία με την προηγούμενη ομάδα, οι μεθοδολογίες δημιουργίας σχέσεων υπεροχής χαρακτηρίζονται ως η «Γαλλική» ή «Ευρωπαϊκή» σχολή ΠΑ. Βασίζονται στη δημιουργία σχέσεων υπεροχής-υστέρησης μεταξύ των εναλλακτικών αποφάσεων, λαμβάνοντας υπόψη όλα τα κριτήρια επιλογής (Roy and Hugonnard, 1982; Roy et al., 1986; Roy, 1990; Roy, 1996). Οι τεχνικές αυτές προέκυψαν με σκοπό την αντιμετώπιση των αδυναμιών των μεθόδων MAUT και επιτρέπουν σε κάποιες δράσεις να παραμένουν μη συγκρίσιμες, όταν δεν υπάρχει επαρκής πληροφορία για την ακριβή κατάταξή τους.

Η εφαρμογή μίας μεθόδου υπεροχής αποτελείται από δύο ξεχωριστά στάδια που περιλαμβάνουν την κατασκευή μίας σχέσης υπεροχής και την μετέπειτα ανάλυσή της. Για την κατασκευή της σχέσης υπεροχής μεταξύ των δράσεων χρησιμοποιούνται συγκρίσεις των εναλλακτικών σεναρίων κατά ζεύγη. Οι μεθοδολογίες σχέσεων υπεροχής περιλαμβάνουν δύο οικογένειες τεχνικών, την ELECTRE (Roy, 1968) και την PROMETHEE (Brans et al., 1986).

Η προσέγγιση των μεθόδων ELECTRE ξεκινά από τη διαισθητική προϋπόθεση ότι ο αποφασίζων είναι σε θέση να επιτύχει μόνο προσεγγιστικές συγκρίσεις μεταξύ των

αποδόσεων των εναλλακτικών δράσεων (Πολατίδης, 2003). Η έννοια της υπεροχής (outranking) στερείται αξιωματικής βάσης, αλλά βασίζεται στην εκτίμηση διαφόρων παραμέτρων και στην εφαρμογή ενός αλγόριθμου απόφασης (Hokkanen, Salminen, 1997a; Mousseau and Slowinski, 1998; Miettinen and Salminen, 1999). Ο αποφασίζων, σε συνεργασία με τον αναλυτή, προσδιορίζουν κάποια όρια – κατώφλια, σύμφωνα με τα οποία επιτελείται η συγκριτική αξιολόγηση των εναλλακτικών σεναρίων (Rogers and Bruen, 1998b). Καταγράφονται πέντε παραλλαγές της βασικής μεθοδολογίας (Figueira et al., 2005).

Οι μέθοδοι ELECTRE (η σημαντικότερη κατηγορία των τεχνικών υπεροχής) χαρακτηρίζονται ως τεχνικές που κάνουν λιγότερες υποθέσεις σχετικά με την ιδιοσυγκρασία του αποφασίζοντα και την συγκρισιμότητα (comparability) των κριτηρίων, όμως δεν καταλήγουν πάντα σε σαφές αποτέλεσμα (Roy and Vincke, 1981; Salminen et al, 1998).

Η πολυπλοκότητα των μεθοδολογιών ELECTRE ώθησε τους ερευνητές στην αναζήτηση απλούστερων τεχνικών που να γίνονται ευκολότερα κατανοητές από αποφασίζοντες όχι ιδιαίτερα εξοικειωμένους με την ΠΑ. Έτσι αναπτύχθηκε η οικογένεια των μεθόδων PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations). Το μεγαλύτερο πλεονέκτημά τους αποτελεί η ενοποίηση όλων των σύγχρονων απόψεων μοντελοποίησης της προτίμησης σε ένα απλό και προσβάσιμο μεθοδολογικό πλαίσιο. Ωστόσο, όπως και στην οικογένεια μεθόδων ELECTRE, λείπει μία στιβαρή θεωρητική βάση που θα επέτρεπε την βαθύτερη κατανόηση των υποθέσεων, πάνω στις οποίες στηρίζεται (Keyser, Peeters, 1996). Οι κυριότερες μέθοδοι της οικογένειας PROMETHEE, είναι οι PROMETHEE I και II, οι οποίες παρουσιάζονται αναλυτικά στο Παράρτημα Α.

Η σύγκριση με τις μεθόδους MAUT αναδεικνύει οτι οι τεχνικές δημιουργίας σχέσεων υπεροχής δεν απαιτούν τόσο ισχυρές υποθέσεις και συχνά καταλήγουν σε μερική κατάταξη των πιθανών δράσεων. Οι μέθοδοι MAUT επιβάλουν άμεση δυνατότητα σύγκρισης μεταξύ των κριτηρίων (γεγονός που αποτελεί ισχυρά αμφίβολη θεώρηση) και καταλήγουν σε πλήρη κατάταξη των δράσεων.

Στις μεθόδους ELECTRE και PROMETHEE δεν είναι επιτρεπτή η πλήρης αντιστάθμιση μεταξύ των κριτηρίων, καθώς θεωρείται ότι η πληροφορία που χάνεται μέσω των ανταλλαγών, μεταξύ μεγεθών διαφορετικής φύσης, είναι σημαντική (Hokkanen and Salminen, 1994). Οι τεχνικές αυτές δεν περιορίζονται από τις «φιλόδοξες» υποθέσεις των μαθηματικών μοντέλων των μεθόδων MAUT, αλλά παρέχουν διαδικασίες περαιτέρω εξερεύνησης των σχέσεων μεταξύ των εναλλακτικών δράσεων, καταλήγοντας πιθανότατα στην μερική κατάταξή τους (Brans et al., 1986).

Υπόλοιπες μέθοδοι

Η Αναλυτική Ιεραρχική Διεργασία (Analytic Hierarchy Process - AHP) (Saaty, 1980), αποτελεί προσπάθεια τυποποίησης της διαισθητικής κατανόησης του αποφασίζοντα επάνω στο

πρόβλημα. Κύριο μέλημα της μεθόδου αποτελεί η διευκόλυνση του αποφασίζοντα στο να κατορθώσει να δομήσει το πρόβλημα μέσω του σχηματισμού μίας ιεραρχίας χαρακτηριστικών (εναλλακτικών επιλογών– κριτηρίων αξιολόγησης) (Ramanathan and Ganesh, 1995a; 1995b; Lootsma and Schuijt, 1997; Ramanathan, 2001).

Η μέθοδος NAIADE (Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments) αποτελεί μία πολυκριτηριακή τεχνική αξιολόγησης ασυνεχών εναλλακτικών (Munda, 1995). Το μητρώο απόφασης (decision matrix) που θεωρεί, δύναται να περιλαμβάνει σαφείς, στοχαστικές, ή ασαφείς μετρήσεις των αποδόσεων των εναλλακτικών στα κριτήρια επιλογής, γεγονός που την καθιστά κατάλληλη για εφαρμογή σε ζητήματα αξιολόγησης ενεργειακών και περιβαλλοντικών έργων (Brand et al., 2002).

Η μέθοδος SMAA (Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis) (Lahdelma et al., 1998) αποτελεί μία πολυκριτηριακή τεχνική ομαδικής λήψης απόφασης (group decision-making), που βασίζεται στην εξερεύνηση του διαστήματος των δυνατών τιμών των βαρών των κριτηρίων επιλογής. Ανακριβή ή αβέβαια δεδομένα αναπαρίστανται μέσω κατανομών πιθανότητας. Η μέθοδος δεν απαιτεί την απόσπαση της προτίμησης του εκάστοτε αποφασίζοντα, καθώς αποκαλύπτει ποιο είναι το εύρος της προτίμησης που αναδεικνύει κάποια συγκεκριμένη δράση ως την προτιμητέα. Επίσης κατασκευάζεται, για κάθε εναλλακτική λύση, ένας δείκτης αποδοχής που μετράει την ποικιλία των διαφορετικών προτιμήσεων που υποστηρίζει τη συγκεκριμένη δράση. Επιπλέον παράγεται ένα κεντρικό διάνυσμα βαρών που αντιπροσωπεύει την τυπική προτίμηση που καταλήγει στο συγκεκριμένο σενάριο και ένας παράγοντας εμπιστοσύνης, που εκτιμά το κατά πόσο τα δεδομένα εισαγωγής είναι αρκετά αξιόπιστα για να προτείνουν μία ενημερωμένη απόφαση (Lahdelma et al., 2002).

2.2.1.2 Βασικά στοιχεία-έννοιες μεθοδολογιών ΠΑ

Εναλλακτικές δράσεις

Οι εναλλακτικές δράσεις αποτελούν το αντικείμενο του πολυκριτηριακού προβλήματος, τις οποίες καλούνται να λάβουν υπόψη οι αποφασίζοντες. Δεν θεωρείται απαραίτητο να είναι εφαρμόσιμες (Roy, 2005), καθώς αρκεί απλά να συγκεντρώνουν ενδιαφέρον εντός της διαδικασίας λήψης απόφασης. Επίσης, κατά τεκμήριο θεωρούνται αποκλειστικές (η εν δυνάμει πραγματοποίηση της μιας να αποκλείει τις υπόλοιπες), χωρίς ωστόσο να είναι απόλυτα δεσμευτικό (Roy, 1996). Το σύνολο των εναλλακτικών δράσεων συνηθίζεται να συμβολίζεται με το γράμμα A [$A = \{a_1,\ldots,a_J\} : a_j\ (j = 1,\ldots,J)$].

Κριτήρια

Τα κριτήρια που επιλέγονται αποτελούν φορείς πληροφορίας για τις επιδόσεις των εναλλακτικών δράσεων. Είναι εργαλεία αξιολόγησης και σύγκρισης, τα οποία οφείλουν να

είναι – κατά το δυνατόν – σαφώς ορισμένα (Roy, 2005). Ο ορισμός κάθε κριτηρίου συνοδεύεται από τον αντίστοιχο καθορισμό της κλίμακας στην οποία μετρώνται οι επιδόσεις των δράσεων. Οι κλίμακες μέτρησης των κριτηρίων είναι είτε ποιοτικές είτε ποσοτικές (όπου ορίζεται μονάδα μέτρησης των αντίστοιχων επιδόσεων). Η επιλογή του συνόλου των κριτηρίων επιτελείται βάσει λογικών προαπαιτούμενων (Roy, 2005), όπως η πληρότητα, η συνάφεια και η αποφυγή υπεράριθμων, μη λειτουργικών (redundant) κριτηρίων. Η ανεξαρτησία των κριτηρίων αποτελεί μια πολύπλοκη έννοια, η οποία πρέπει να οριστεί σαφώς, αν επιδιώκεται η τήρησή της. Σε κάθε περίπτωση, δεν θεωρείται ότι συγκαταλέγεται μεταξύ των προαπαιτούμενων προδιαγραφών, σύμφωνα με τους Roy (1996) και Keeney and Raiffa (1976). Αντίθετα, οι Wang et al. (2009) συμπεριλαμβάνουν την ανεξαρτησία στις αρχές επιλογής κριτηρίων αξιολόγησης, με τις υπόλοιπες να είναι οι εξής: (α) Πληρότητα (Systemic principle) – η επιδίωξη πλήρους κάλυψης των σημαντικών πλευρών των εναλλακτικών δράσεων , (β) Συνέπεια (Consistency principle) – η συνέπεια των κριτηρίων ως προς το σκοπό εφαρμογής της ΠΑ, (γ) Μετρησιμότητα (Mensurability principle) – η επιδίωξη ποσοτικών κριτηρίων και (δ) Συγκρισιμότητα (Comparability principle) – το να είναι δυνατή η ευθεία σύγκριση της πληροφορίας των κριτηρίων υποβοηθά την εφαρμογή – ορισμένων – μεθόδων ΠΑ. Στην ίδια δημοσίευση (Wang et al., 2009) παρατίθενται και οι συνηθέστερες μέθοδοι καθορισμού συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων.

Αντικειμενικότητα - Υποκειμενικότητα

Στην καθημερινότητα η έννοια της αντικειμενικότητας είναι θετική και επιδιωκόμενη, σε αντιδιαστολή με την υποκειμενικότητα, η οποία έχει αρνητικό περιεχόμενο. Κατά την αρχική επαφή με τις μεθοδολογίες ΠΑ, είναι πιθανό να υποτεθεί ότι ευνοούν τις «αντικειμενικές» αποφάσεις. Κατά την συγκεκριμένη όμως διαπίστωση, έχει εκ των προτέρων διαμορφωθεί μια «κυρίαρχη υπόθεση», η οποία επιδιώκεται να δικαιολογηθεί (Roy, 2005; Armstrong, 1979). Καταγράφονται επίσης μια σειρά από λόγους για τους οποίους διαφαίνεται ότι είναι μάταια η επιδίωξη εξασφάλισης της αντικειμενικότητας σε διαδικασίες λήψης απόφασης. Ως οι πιο σημαντικοί αναφέρονται (Roy, 2005; Roy, 1999) η αδυναμία σαφούς καθορισμού των προτεραιοτήτων των αποφασιζόντων και η ασάφεια που αναπόφευκτα χαρακτηρίζει τις επιδόσεις των κριτηρίων. Εν κατακλείδι, συμπεραίνεται ότι η υποκειμενικότητα δεν είναι «αναγκαίο κακό» στη διαδικασία απόφασης, αλλά αντίθετα, αποτελεί δομικό της στοιχείο και ως τέτοιο τυγχάνει αντίστοιχης μοντελοποίησης.

Ασάφεια

Η πολυπλοκότητα των πολυκριτηριακών προβλημάτων εντείνεται από το γεγονός οτι το περιβάλλον εντός του οποίου λαμβάνονται οι περισσότερες – αν όχι όλες – οι αποφάσεις χαρακτηρίζεται από αδυναμία σαφούς καθορισμού των απαιτούμενων δεδομένων και παραμέτρων (Bellman and Zadeh, 1970). Διαπιστώνονται περιπτώσεις κατά τις οποίες, η

διαχείριση των ασαφειών συγκεντρώνει ισοδύναμη κρισιμότητα με τη βασική λειτουργία της ΠΑ (Stewart, 2005). Ως πιθανές γενικές κατηγορίες ελλιπούς πληροφορίας καταγράφονται (Yeh, Deng, and Pan, 1999; Yeh and Deng, 2004; Deng, 1999; Benetto, Dujet, and Rousseaux, 2008) η αδυναμία ποσοτικοποιήσης, η μη διαθεσιμότητα και η μερική άγνοια.

Η αναγκαιότητα και τα οφέλη της ενσωμάτωσης της ασάφειας στη διαδικασία λήψης απόφασης έχουν τονιστεί σε πληθώρα δημοσιεύσεων (Ribeiro, 1996; Kahraman, 2008; Geldermann, Spengler and Rentz, 2000; Bellman and Zadeh, 1970; Stewart, 2005; Hyde, Maier and Colby, 2003; Klauer, Dreschler and Messner, 2002; Deng, 2009; Chen, Hwang and Hwang, 1992; Ölcer and Odabasi, 2008).

Η μοντελοποίηση της ασάφειας προσεγγίζεται κατά κύριο λόγο μέσω εφαρμογής είτε της πιθανοθεωρίας είτε της θεωρίας ασαφών συνόλων (Deng, 2009). Η θεωρία πιθανοτήτων εστιάζει στη στοχαστική φύση της διαδικασίας απόφασης, ενώ η χρήση ασαφών αριθμών αφορά την υποκειμενικότητα της ανθρώπινης συμπεριφοράς (Yeh, Deng, and Pan, 1999; Dubois and Prade, 1994; Deng and Yeh, 2006). Ο Deng (2009) και οι Petrovic and Petrovic (2002) υποστηρίζουν οτι στοχαστικές μέθοδοι, όπως η στατιστική ανάλυση δεν επιτυγχάνουν να διαχειριστούν την υποκειμενικότητα και έλλειψη ακρίβειας της διαδικασίας απόφασης του ανθρώπου. Επιπρόσθετα, οι Le Téno and Mareschal (1998) επιχειρηματολογούν υπέρ της εφαρμογής της ασαφούς θεωρίας, καθώς οι στοχαστικές μέθοδοι τύπου "Monte Carlo" επιτείνουν αναίτια την πολυπλοκότητα, καθώς παράγουν ένα υπέρμετρα μεγάλο αριθμό κατατάξεων, δυσχεραίνοντας τη λειτουργία της συνάθροισης (aggregation).

Ο Zadeh (1965) εισήγαγε τη χρήση ασαφών αριθμών ως εργαλείο μοντελοποίησης συστημάτων, των οποίων ο ακριβής ορισμός θεωρείται μη εφικτός. Η ασαφής θεωρία εφαρμόστηκε στην ΠΚΛΑ από τους Bellman and Zadeh (1970) και τον Zimmermann (1978), ενώ η ασαφής ΠΑ εμφανίστηκε στην εργασία των Baas and Kwakernaak (1977). Τα επόμενα χρόνια καταγράφονται σημαντικές εξελίξεις στην ασαφή ΠΑ μέσω της ανάπτυξης πλήθους σχετικών μεθοδολογιών και αντίστοιχων εφαρμογών σε προβλήματα λήψης απόφασης (Ribeiro, 1996; Deng, 2009; Deng and Yeh, 2006; Zimmermann, 2000; Ölcer and Odabasi, 2008; Munda, Nijkamp, and Rietveld, 1995).

Συνάθροιση (aggregation) επιδόσεων κριτηρίων

Ο συγκερασμός των επιδράσεων των κριτηρίων στην τελική απόφαση αποτελεί θεμελιώδες ζήτημα της ΠΑ. Το συγκεκριμένο πρόβλημα αναφέρεται ως «πρόβλημα συνάθροισης» (aggregation problem) και προσεγγίζεται μέσω διαδικασιών πολυκριτηριακής συνάθροισης (Multicriteria Aggregation Procedures - MCAP) (Roy, 2005; Roy. 1996). Καταγράφονται δυο κύριες κατευθύνσεις αντιμετώπισης του προβλήματος συνάθροισης, οι οποίες αντιστοιχούν στις δυο κύριες ομάδες μεθόδων ΠΑ, τις μεθόδους χρησιμότητας και τις μεθόδους δημιουργίας σχέσεων υπεροχής (βλ. §2.2.1.1 «Ομαδοποίηση μεθόδων ΠΑ) (Roy, 2005).

Η πρώτη προσέγγιση αφορά τον υπολογισμό ενός «συνθετικού κριτηρίου» (synthesizing criterion) μέσω σαφούς ορισμένου μαθηματικού τύπου που λαμβάνει υπόψη το σύνολο των επιδόσεων των εναλλακτικών δράσεων. Σε αυτήν την περίπτωση ναι μεν αποφεύγονται οι κίνδυνοι της μονοκριτηριακής μεθοδολογίας (§ 1.2.1), αλλά απαιτεί την αναγωγή όλων των κριτηρίων σε κοινή κλίμακα (χρηματική, χρησιμότητας, κ.α.) (Bouyssou, 1986). Η προσέγγιση που αντιστοιχεί στις μεθόδους δημιουργίας σχέσης υπεροχής επικεντρώνεται στο συνδυασμό της υπεροχής-υστέρησης που προκύπτει από τις διαφορές και όχι στις απόλυτες επιδόσεις των δράσεων. Το πρόβλημα της συνάθροισης τίθεται πλέον σε όρους όχι απόλυτους, αλλά σχετικούς (Roy, 2005). Στην ανασκόπηση των Wang et al. (2009) οι μεθοδολογίες συνάθροισης διακρίνοται σε μεθόδους «ψήφου» (voting methods) και μαθηματικές (mathematical methods), ανάλογα με το αν γίνεται χρήση μαθηματικού τύπου ή όχι.

2.2.2 Πολυκριτηριακή Ανάλυση και Ενεργειακός Σχεδιασμός

Η διαρκώς αυξανόμενη κοινωνική ευαισθησία σε περιβαλλοντικά ζητήματα και η συχνά απαντώμενη αντίθεση οικονομικών και περιβαλλοντικών στόχων αποτέλεσαν τις κυριότερες αιτίες που ώθησαν στη δεκαετία του ‘80 τους σχετιζόμενους με τον ενεργειακό σχεδιασμό στην υιοθέτηση πολυκριτηριακών μεθόδων υποστήριξης απόφασης (Diakoulaki et al., 2005). 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 υψηλή διακυνδύνευση ως προς την τεχνική αποδοτικότητα και την οικονομική τους βιωσιμότητα. Οφείλει επίσης να επισημανθεί η ασάφεια που διακρίνει τα τεχνο-οικονομικά και περιβαλλοντικά δεδομένα/μοντέλα, τις μελλοντικές τεχνολογικές και κοινωνικοπολιτικές εξελίξεις, όπως και τις επιμέρους προτεραιότητες ενός μεγάλου αριθμού εμπλεκομένων μερών. Τα παραπάνω καθιστούν αναγκαία την εφαρμογή πολυκριτηριακών μεθοδολογιών, προκειμένου τα προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού να επιλύονται κατά τρόπο βιώσιμο και αμοιβαία αποδεκτό.

Τα προβλήματα ενεργειακού σχεδιασμού στα οποία εφαρμόζονται μεθοδολογίες ΠΚΛΑ κατατάσσονται ανάλογα με το αν το πεδίο απόφασης είναι συνεχές ή διακριτό, κάτι που έχει ευθεία αντιστοιχία με την πολυκριτηριακή προσέγγιση που ακολουθείται (Σχήμα 2.4). Η εφαρμογή μεθοδολογιών ΠΚΜΠ αποτελούν φυσική εξέλιξη των μεθόδων μονοκριτηριακής βελτιστοποίησης, όπου παραδοσιακά χρησιμοποιούνται για την εξασφάλιση της απαιτούμενης

ενέργειας σε συγκεκριμένο χρονικό σημείο, αριστοποιώντας μια αντικειμενική συνάρτηση σε χρηματικούς, κατά τεκμήριο, όρους (Diakoulaki et al., 2005). Οι μέθοδοι ΠΑ στον ενεργειακό σχεδιασμό, παρότι ενσωματώνουν απλούστερες μαθηματικές προσεγγίσεις, είναι σε θέση να αντιμετωπίσουν ένα ευρύτερο φάσμα ζητημάτων. Η κύρια συνεισφορά τους εντοπίζεται στην ικανότητα προσέγγισης προβλημάτων με ελλιπή διατύπωση και δεδομένα, παρέχοντας υποστήριξη όσον αφορά τη δόμηση και την αποσαφήνιση των συνιστωσών του προβλήματος (Diakoulaki et al., 2005).

Εστιάζοντας στις κατηγορίες προβλημάτων που βρίσκουν εφαρμογή οι μεθοδολογίες ΠΑ, διακρίνονται οι εξής τέσσερις ομάδες (Diakoulaki et al., 2005; Pohekar and Ramachandran, 2004; Bezhadian et al., 2010; Wang et al., 2009):

- Κατηγορία Α: Συγκριτική αξιολόγηση τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής.

Κύριος στόχος είναι να αναδειχθούν οι επικρατέστερες τεχνολογικές επιλογές, ενώ η «υποβόσκουσα» πρόθεση είναι να υποστηριχθούν αναπτυξιακά σχέδια και αντίστοιχα εργαλεία ενεργειακής πολιτικής. Ωστόσο, δεν είναι απαραίτητο το αποτέλεσμα (η πολυκριτηριακή κατάταξη των εναλλακτικών) να συνδεέται άμεσα με επενδυτικά σχέδια ή σαφείς αναπτυξιακές δράσεις. Βασικός περιορισμός στην ερμηνεία των σχετικών αποτελεσμάτων των μεθοδολογιών ΠΑ αποτελεί το γεγονός οτι αντανακλούν το γεωγραφικό και χρονικό πλαίσιο εντός του οποίου παράγονται, τόσο από άποψη τεχνολογικής εξέλιξης, όσο και από απόψη προτεραιοτήτων των αποφασιζόντων.

Οι αρχικές σχετικές δημοσιεύσεις ΠΑ (Siskos and Hubert, 1983; Hämäläinen, 1990) αφορούσαν τη συγκριτική αξιολόγηση εφαρμογών πυρηνικής ενέργειας. Οι πολυκριτηριακές αξιολογήσεις τεχνολογιών που σχετίζονται με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας και οι αντίστοιχες συγκρίσεις με συμβατικά συστήματα εμφανίζονται όλο και πιο συχνά σε δημοσιεύσεις τα επόμενα χρόνια (Beccali et al., 1998; Kablan, 1997; Georgopoulou et al., 1997; Mamlook et al., 2001, Afgan, 2008, Chatzimouratidis and Pilavachi, 2009; Doukas et al., 2006; Hyde et al., 2003; Madlener and Stagl, 2005). Η νεότερη τάση για αξιολόγηση τεχνολογιών υδρογόνου αναλύεται σε σχετικές εργασίες (Pilavachi et al., 2009; Afgan and Carvalho, 2004).

- Κατηγορία Β: Επιλογή μεταξύ εναλλακτικών ενεργειακών πολιτικών σε τοπικό ή εθνικό επίπεδο

Στην παρούσα κατηγορία προβλημάτων επιδιώκεται η κατάστρωση του ενεργειακού σχεδιασμού σε τοπικό/εθνικό επίπεδο μέσω της αξιολόγησης αναπτυξιακών σεναρίων (Diakoulaki, 1999). Στον τομέα της ηλεκτροπαραγωγής οι σχετικές δημοσιεύσεις (Lootsma et al., 1990; Pan and Rahman; 1998; Voropai and Ivanova, 2002) εξετάζουν σενάρια επέκτασης εντός ενός πλαισίου υποθέσεων για την εξέλιξη των συνθηκών της αγοράς ηλεκτρισμού. Καταγράφονται επίσης δημοσιεύσεις που αφορούν το συνολικό ενεργειακό σύστημα μιας

χώρας (Jones et al., 1990; Georgopoulou et al., 1997, Doukas et al., 2007; Begic and Afgan, 2007; Diakoulaki and Karangelis, 2007; Madlener et al., 2007). Όσον αφορά την ανάπτυξη σχεδίων εκμετάλλευσης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας σε τοπικό επίπεδο, ενδεικτικά αναφέρονται αντίστοιχες δημοσιεύσεις (Goumas and Lygerou, 2000; Haralampopoulos and Polatidis, 2003; Jovanovic et al., 2009).

- Κατηγορία Γ: Κατάταξη εναλλακτικών σχεδίων ενεργειακών επενδύσεων

Κατά την περίπτωση που το πλήθος των εναλλακτικών σχεδίων είναι μεγάλο, αναδεικνύεται η ανάγκη δημιουργίας μιας αρχικής επιλογής ενός μικρότερου, ευκολότερα διαχειρίσιμου συνόλου σχεδίων, τα οποία διαφαίνονται ως επικρατέστερα, βάσει των προτεραιοτήτων των αποφασιζόντων. Οι σχετικές δημοσιεύσεις επεκτείνονται σε εθνικά ηλεκτρικά συστήματα (Goletsis et al., 2003), δίκτυα διανομής φυσικού αερίου (Hobbs and Horn, 1997) και ηλεκτρισμού (Matos, 1999) και εναλλακτικές λύσεις μείωσης εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (Georgopoulou, 2003). Καταγράφεται επίσης χρήση μεθοδολογιών ΠΑ στην επιλογή ενεργειακών επενδύσεων από την αρμόδια αρχή αδειοδότησης (Mavrotas et al., 2003) και προτάσεων για ερευνητικά προγράμματα (Lootsma et al., 1986).

- Κατηγορία Δ: Χωροθέτηση ενεργειακών μονάδων

Ως αντιπροσωπευτικές εργασίες στη συγκεκριμένη κατηγορία προβλημάτων αναφέρονται δημοσιεύσεις που αφορούν τη χωροθέτηση θερμικών (Barda et al., 1990) και πυρηνικών (Rietveld and Ouwversloot, 1992) μονάδων ηλεκτροπαραγωγής, όπως και τη χάραξη του ηλεκτρικού δικτύου διανομής (Rousseau and Martel, 1994).

2.3 Συμπερασματικά σχόλια

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάστηκε το γενικό πλαίσιο δυο μεθοδολογιών (Ανάλυση Κύκλου Ζωής - ΑΚΖ και Πολυκριτηριακή Ανάλυση - ΠΑ) που συνδέονται άμεσα – με διαφορετικό ωστόσο τρόπο – με την έννοια της ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών. Επίσης, καταγράφηκαν οι σημαντικότερες αντίστοιχες δημοσιεύσεις και μελέτες κατά την δεκαετία 2000-10.

Η ενσωμάτωση της ΑΚΖ στη διαδικασία αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών προσφέρει τη δυνατότητα κατανόησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι οποίες δεν θα λαμβάνονταν υπόψη σε διαφορετική περίπτωση. Αποτελεί μέσο καταγραφής του πλήρους φάσματος των επιπτώσεων της επιλογής τεχνολογίας/συστήματος, ειδικά εκείνων που λαμβάνουν χώρα εκτός χώρου λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος. Ωστόσο, είναι παρακινδυνευμένη η χρήση αποτελεσμάτων μιας μελέτης ΑΚΖ με διαφορετικό πλαίσιο εφαρμογής (π.χ. χρονικό ή γεωγραφικό), καθώς η πληθώρα διαφορετικών υποθέσεων και εισαγόμενων στοιχείων είναι δυνατόν να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα. Η ΑΚΖ δεν είναι τίποτα περισσότερο ή λιγότερο από ένα εργαλείο με σαφή χρήση και περιορισμούς. Γενικός σκοπός της είναι να παρέχει έγκυρη και συμπυκνωμένη πληροφορία στους αποφασίζοντες και οφείλει να συμπληρώνεται από αντίστοιχα κριτήρια κόστους και τεχνικής αποδοτικότητας, προκειμένου να προωθούνται ορθολογικές και ισορροπημένες αποφάσεις επιλογής ενεργειακής τεχνολογίας/συστήματος.

Ο γενικός σκοπός που περιγράφηκε παραπάνω αποτελεί κοινό τόπο μεταξύ των μεθόδων ΑΚΖ και ΠΑ, με τη διαφορά οτι η ΠΑ είναι δυνατόν να λειτουργήσει ως το τελικό εργαλείο σύνθεσης των διαφόρων «ροών πληροφορίας», υποβοηθώντας «αντικειμενικές» αποφάσεις. Ωστόσο, όπως αναλύθηκε στην παράγραφο 2.2.1.2, διαπιστώνονται σαφείς περιορισμοί στην προσέγγιση της – όποιας – αντικειμενικότητας. Κατ' αντιστοιχία με την ΑΚΖ, οι μεθοδολογίες ΠΑ δεν αποτελούν τη μέθοδο – πανάκεια επίλυσης κάθε προβλήματος με πολλαπλά κριτήρια αξιολόγησης. Δεν ευαγγελίζονται οτι αποκαλύπτουν τη «σωστή» ή «αντικειμενική» επιλογή, ούτε οτι υπαγορεύουν κατά τρόπο αναντίρητο την «επιστημονικά ορθή» κατάταξη των εναλλακτικών. Τα οφέλη της συνετής χρήσης των μεθοδολογιών ΠΑ συνδέονται τόσο με τα τελικά αποτελέσματα, όσο και με τη διαδικασία δόμησης ενός πολυκριτηριακού ασαφώς ορισμένου προβλήματος. Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμογή μεθόδων ΠΑ είναι σε θέση να οδηγήσει σε ευρύτερα αποδεκτές αποφάσεις, οι οποίες να διαθέτουν επαρκή επιστημονική αιτιολόγηση.

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής ενέργειας εν γένει, αναγνωρίζονται πλέον, αν όχι ο κυριότερος, τουλάχιστον ως ένας από τους σημαντικότερους επιβαρυντικούς παράγοντες σε παγκόσμιο επίπεδο. Δεν νοείται σχέδιο ενεργειακού σχεδιασμού χωρίς

ποσοτικοποίηση των σημαντικότερων επιπτώσεων, η οποία χαρακτηρίζεται ως ελλιπής, αν δεν συμπεριλαμβάνει το σύνολο των σταδίων του κύκλου ζωής των εναλλακτικών επιλογών. Στον αντίποδα δεν είναι δυνατόν να τίθεται υπό διαπραγμάτευση η εξασφάλιση της ενεργειακής παροχής και η διατήρηση της ποιότητας των αντίστοιχων προσφερόμενων υπηρεσιών σε αποδεκτό επίπεδο. Οι εμπλεκόμενες πλευρές (ρυθμιστικοί φορείς ενέργειας, εθνικοί ενεργειακοί φορείς, εταιρίες παραγωγής/εμπορίας, τοπικές αρχές) οφείλουν να λάβουν υπόψη αντικρουόμενα και ανομοιογενή (τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά) κριτήρια αξιολόγησης των εναλλακτικών επιλογών ενεργειακού σχεδιασμού, σε διάφορα επίπεδα απόφασης (από τα άμεσο λειτουργικό μέχρι το μακροπρόθεσμο αναπτυξιακό).

Τα παραπάνω αναδεικνύουν οτι ο ενεργειακός σχεδιασμός αποτελεί ιδανικό χώρο εφαρμογής τόσο της ΑΚΖ, όσο και της ΠΑ. Η ενσωμάτωσή τους σε μια συνολική μεθοδολογία συνδυασμένης αξιολόγησης είναι σε θέση να συνθέσει συνεργητικά τα επιμέρους οφέλη που είναι δυνατόν να 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. Ο συνδυασμός των δυο μεθοδολογιών αποτελεί τον κορμό της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνδυασμένης αξιολόγησης που παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

Βιβλιογραφία 2ου Κεφαλαίου

Ελληνική

Καρβούνης Σ. και Γεωργακέλος Δ. Διαχείριση Περιβάλλοντος- Επιχειρήσεις και Βιώσιμη Ανάπτυξη. Εκδόσεις Σταμούλης Αθήνα 2003

Λάζογλου Κ. Συγκριτική ανάλυση τριών εναλλακτικών σεναρίων διαχείρισης των αστικών στερεών απορριμμάτων του νομού Ξάνθης βάσει ανάλυσης κύκλου ζωής. Μεταπτυχιακή Διατριβή - Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Διεπιστημονικό - Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών "Περιβάλλον και Ανάπτυξη". Αθήνα, 2009

Μαυρωτάς Γ. Πολυκριτηριακός προγραμματισμός σε συνθ'ήκες αβεβαιότητας. Κατασκευή συστήματος υποστήριξης αποφάσεων και εφαρμογή στον ενεργειακό σχεδιασμό. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Χημικών Μηχανικών, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο. Αθήνα, 2000

Πολατίδης Η. Ενεργειακή Ανάλυση και Λήψη Αποφάσεων: Ένα Πολυκριτηριακό Μεθοδολογικό Πλαίσιο. Διδακτορική Διατριβή. Τμήμα Περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Αιγαίου. 2003

Ξενόγλωσση

Afgan N.H. and Carvalho M.G. Sustainability assessment of a hybrid energy system. Energy Policy 36 (2008) 2903–2910.

Afgan N.H. and Carvalho M.G. Sustainability assessment of hydrogen energy systems. International Journal of Hydrogen Energy 29 (2004) 1327–1342.

Allen S.R., Hammond G.P., Harajli H.A., Jones C.I., McManus M.C. and Winnett A.B. Integrated appraisal of micro-generators: methods and applications. Proceedings of ICE: Energy 161(2) (2008) 73–86.

Armstrong J. Advocacy and objectivity in science. Management Science 25 (1979) 423–428.

Baas S.M. and Kwakernaak H. Rating and ranking of multiple-aspect alternatives using fuzzy sets. Automatica 13(1) (1977) 47-58.

Barda O., Dupuis J., and Lencioni P. Multicriteria location of thermal power plants. European Journal of Operational Research, 45 (1990) 332–346.

Beccali M., Cellura M., and Ardente D. Decision making in energy planning: The ELECTRE multicriteria analysis approach compared to a fuzzy-sets methodology. Energy Conversion Management 39 (1998) 1869– 1881.

Begic F. and Afgan N.H. Sustainability assessment tool for the decision making in selection of energy system—Bosnian case. Energy 32 (2007) 1979–1985.

Behzadian M., Kazemzadeh R.B., Albadvi A and, Aghdasi M. PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications. European Journal of Operational Research 200 (2010) 198–215

Bellman R. and Zadeh L.A. Decision-making in a fuzzy environment. Management Science 17B(4) (1970) 141-164.

Benetto E., Dujet C. and Rousseaux P. Integrating fuzzy multicriteria analysis and uncertainty evaluation in life cycle assessment. Environmental Modelling and Software 23(12) (2008) 1461-1467.

Bouyssou D. Some remarks on the notion of compensation in MCDM. European Journal Of Operational Research 26 (1986) 150–160.

Brand C., Mattarelli M., Moon D. and Calvo R.W. STEEDS: A strategic transport-energy-environmental decision support. European Journal of Operational Research 139 (2002) 416-435.

Brans J.P., Mareschal B., and Vincke, Ph. How to select and how to rank projects: The PROMETHEE method. European Journal of Operational Research 24(2) (1986) 228–238.

Briem S. Gas fired CHP systems – Internal Combustion Engines. Report of ECLIPSE project. 2003. http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html.

Chataignere A. and Le Boulch D. Wind Turbine (WT) Systems. Final Report. ECLIPSE 2003. http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html.

Chatzimouratidis A.I. and Pilavachi P.A. Technological, economic and sustainability evaluation of power plants using the Analytic Hierarchy Process. Energy Policy 37 (2009) 778–787.

Chen S.J., Hwang C.L. and Hwang F.P. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making, Methods and Applications. Berlin: Springer (1992)

Curran M.A. Environmental Life-Cycle Assessment. McGraw-Hill (1996).

Davidsson S., Höök M., Wall G. A review of life cycle assessments on wind energy systems. Int J Life Cycle Assess. Article in Press. 2012

Delucchi K. A Life Cycle Emissions Analysis: Urban Air Pollutants and Greenhouse-Gases from Petroleum, Natural Gas, LPG and Other Fuels for Highway Vehicles, Forklift and Household Heating in the U.S. World Resource Review 13(1) (2001) 25–51.

Deng H. and Yeh C.H. Simulation-based evaluation of defuzzification-based approaches to fuzzy multiattribute decision making. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics 36(5) (2006) 968-977.

Deng H. Developments in Fuzzy Multicriteria Analysis, Fuzzy Information and Engineering. 1(1) (2009) 103-109.

Deng H. Multicriteria analysis with fuzzy pairwise comparison. International Journal of Approximate Reasoning 21(3) (1999) 215-231.

Diakoulaki D. and Karangelis F. Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece. Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007) 716–727.

Diakoulaki D., Antunes C.A. and Martins A.G. MCDA and energy planning. In "Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys". Edited by J.Figuera, S. Greco and M. Ehrgott. Springer Science + Business Media, Inc., Boston (2005).

Diakoulaki D., Zopounidis C., Mavrotas G., Doumpos M. The use of a preference disaggregation method in energy analysis and policy making. Energy 24 (1999) 157–166.

Dones R., Heck T. and Hirschberg S. Greenhouse Gas Emissions from Energy Systems, Comparison and Overview. Encyclopedia of Energy 3 (2004) pp. 77–95.

Doukas H., Patlitzianas K.D. and Psarras J. Supporting sustainable electricity technologies in Greece using MCDM. Resources Policy 31 (2006) 129–136.

Doukas H.C., Andreas B.M., Psarras J.E. Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variables. European Journal of Operational Research 182 (2007) 844–855.

Dubois, D. and Prade, H. Fuzzy sets - A convenient fiction for modeling vagueness and possibility. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 2(1) (1994) 16-21.

Edwards W. How to use mutiattribute utility measurement for social decision-making. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics SMC-7 (1977) 326-340.

EPA. U.S. Environmental Protection Agency and Science Applications International Corporation. LCAccess – LCA 101, (2001).

EU-JRC. Well-to-wheels analysis of future automotive fuels and powertrains in the European context. Version 2c. (2007). http://ies.jrc.ec.europa.eu/WTW

Figueira J., Mousseau V. and Roy B. ELECTRE Methods. In Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys. Edited by J.Figuera, S. Greco and M. Ehrgott. Springer Science + Business Media, Inc., Boston (2005).

Frankl P., Corrado A. and Lombardelli S. Photovoltaic (PV) Systems. Final Report. ECLIPSE. (2004). http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html.

Geldermann J., Spengler T. and Rentz O. Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: iron and steel making industry. Fuzzy Sets and Systems 115(1) (2000) 45-65.

Georgopoulou E., Lalas D., and Papayannakis L. A multicriteria decision aid approach for energy planning problems: The case of renewable energy option. European Journal of Operational Research 103 (1997) 38–54.

Georgopoulou E., Sarafidis Y., Mirasgedis S., Zaimi S., and Lalas D. A multiple criteria decision aid approach in defining national priorities for greenhouse gases emissions reduction in the energy sector. European Journal of Operational Research 146 (2003) 199–215.

Gnansounou E., Dauriat A., Villegas J. and Panichelli L. Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances. Bioresource Technology 100 (2009) 4919–4930

Goletsis Y., Psarras J, and Samouilidis J. Project ranking in the Armenian energy sector using a multicriteria method for groups. Annals of Operations Research 120 (2003) 135–157.

Goumas M. and Lygerou V. An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. European Journal of Operational Research 123 (2000) 606–613.

Gregory R. and Keeny R. L. Creating Policy Alternatives Using Stakeholder Values. Management Science 40 (1994) 1035-1048.

Hämäläinen R. A decision aid in the public debate on nuclear power. European Journal of Operational Research. 48 (1990) 66–76.

Haralampopoulos D. and Polatidis H. Renewable energy projects: Structuring a multicriteria group decision-making framework. Renewable Energy 28 (2003) 961–973.

Hobbs B. and Horn G. Building public confidence in energy planning: A multimethod MCDM approach to demand-side planning at BC Gas. Energy Policy 25 (1997) 357–375.

Hokkanen J. and Salminen P. ELECTRE III and IV decision aids in an Environmental Problem. Journal of Multicriteria Decision Analysis 6 (1997) 215-226.

Hokkanen J. and Salminen P. The choice of a solid waste management system by using the ELECTRE III decision – aid method. In Applying Multiple Criteria Aid for Decision to Environmental Management, pg. 111-153, Paruccini M. (ed.), Kluwer Academic Publishers (1994).

Hyde K., Maier H.R. and Colby C. Incorporating Uncertainty in the PROMETHEE MCDA Method. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis 12 (4-5) (2003) 245–259.

ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, (2006).

Jones M., Hope C., and Hughes R. A multi-attribute value model for the study of UK energy policy. Journal of the Operational Research Society 41 (1990) 919–929.

Jovanovic M., Afgan N., Radovanovic P. and Stevanovic V. Sustainable development of the Belgrade energy system. Energy 34 (2009) 532–539.

Kablan M. Prioritization of decentralized electricity options available for rural areas in Jordan. Energy Conversion Management 38 (1997) 1515–1521.

Kahraman C. Multi-criteria decision making methods and fuzzy sets, In: Kahraman, C. (ed.), Fuzzy Multi-Criteria Decision Making, pg. 1-18, New York: Springer (2008)

Keeney R. and Raiffa H. Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs. John Wiley & Sons, New York, (1976).

Keyser W.D and Peeters P. A note on the use of PROMETHEE multicriteria methods. European Journal of Operational Research 89 (1996) 457-461.

Klauer B., Drechsler M. and Messner F. 'Multicriteria analysis under uncertainty with IANUS – method and empirical results', Environment and Planning C: Government and Policy 24(2) (2004) 235 – 256.

Lahdelma R., Hokkanen J. and Salminen P. SMAA – Stochastic Multiobjective Acceptability Analysis. European Journal of Operational Research 106 (1998) 137-143.

LBST (L-B-Systemtechnik GmbH). GM Well-to-Wheel Analysis of Energy Use and Greenhouse Gas Emissions of Advanced Fuel/Vehicle Systems – A European Study. Ottobrunn (2002). http://www.lbst.de/gm-wtw/

Le Téno J.F. and Mareschal B. An interval version of PROMETHEE for the comparison of building products' design with ill-defined data on environmental quality. European Journal of Operational Research 109(2) (1998) 522-529.

Lootsma F., Boonekamp P., Cooke R., and van Oostvoorn F. Choice of a long-term strategy for the national electricity supply via scenario analysis and multicriteria analysis. European Journal of Operational Research 48 (1990) 189–203.

Lootsma F., Meisner J., and Schellemans F. Multicriteria decision analysis as an aid to the strategic planning of energy R&D. European Journal of Operational Research 25 (1986) 216–234.

Lootsma F.A and Schuijt H. The Multiplicative AHP, SMART and ELECTRE in a common context. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis 6 (1997) 185-196.

Madlener R. and Stagl S. Sustainability-guided promotion of renewable electricity generation. Ecological Economics 53 (2005) 147–167.

Madlener R., Kowalski K. and Stagl S. New ways for the integrated appraisal of national energy scenarios: The case of renewable energy use in Austria. Energy Policy 35 (2007) 6060–6074.

Mamlook R., Akash B., and Nijmeh S. Fuzzy sets programming to perform evaluation of solar systems in Jordan. Energy Conversion Management 42 (2001) 1717–1726.

Martinez-Alier J., Munda G. and O Neil J. Weak comparability of values as a foundation for ecological economics. Ecological Economics. 26 (1998) 277-286.

Matos M.A. A fuzzy filtering method applied to power distribution planning. Fuzzy Sets and Systems 102 (1999) 53–58.

Mavrotas G., Diakoulaki D., and Capros P. Combined MCDA-IP approach for project selection in the electricity market. Annals of Operations Research 120 (2003) 159–170.

Miettinen K. and Salminen P. Decision aid for discrete multiple criteria decision making problems with imprecise data. European Journal of Operational Research 119 (1999) 50-60.

Mousseau V. and Slowinski R., Inferring an ELECTRE TRI model from assignment examples. Journal of global Optimization 12 (1998) 157-174.

Munda G. Multicriteria Evaluation in a fuzzy environment. Theory and Applications. Ecol. Econ. Physica-Verlag, Heidelberg (1995).

Munda G., Nijkamp P. and Rietveld P. Qualitative multicriteria methods for fuzzy evaluation problems: An illustration of economic-ecological evaluation. European Journal of Operational Research 82(1) (1995) 79-97.

NaturalHy - Literature Review Report on life cycle and socio-economic assessment aspects concerning NATURALHY. Deliverable D1 (2004). http://www.naturalhy.net/

NEEDS - "New Energy Externalities Development for Sustainability". IP project, 2004-08. www.needs-project.org

Nunn J. Coal in a Sustainable Society. Australian Coal Association Coal Research Program - ACARP (2001).

Ölcer A.I. and Odabasi A.Y. A new fuzzy multiple attributive group decision making methodology and its application to propulsion/manoeuvring system selection problem. European Journal of Operational Research 166(1) (2005) 93–114.

Pan J. and Rahman S. Multiattribute utility analysis with imprecise information: an enhanced decision support technique for the evaluation of electric generation expansion strategies. Electric Power Systems Research 46 (1998) 101–109.

Petrovic, S. and Petrovic, R. A new fuzzy multi-criteria methodology for ranking of alternatives. International Transactions in Operational Research 9 (2002) 73-84.

Pilavachi P.A., Stephanidis S.D., Pappas V.A. and Afgan N.H. Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies. Applied Thermal Engineering 29 (2009) 2228–2234.

Pohekar S.D. and Ramachandran M. Application of multi-criteria decision making to sustainable energy planning – a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 8 (2004) 365–381.

Ramanathan R. A note on the use of the analytic hierarchy process for the environmental impact assessment. Journal of Environmental Management 63 (2001) 27-35.

Ramanathan R. and Ganesh L.S. Energy Resource Allocation Incorporating qualitative and quantitative criteria: An integrated model using Goal Programming and AHP. Socio-Econ Plann. Sci. 29 (1995a) 197-218.

Ramanathan R. and Ganesh L.S. Using AHP for resource allocation problems. European Journal of Operational Research 80 (1995b) 410-417.

Rauschmayer, F.: How to consider ethics in MCA? In: A. Colorni, M., Paruccini, B. Roy (eds.): Multiple Criteria Decision Aiding. European Commission, Joint Research Centre, pp.273-279. (2001)

Ribeiro, R.A. Fuzzy multiple attribute decision making: A review and new preference elicitation techniques. Fuzzy Sets and Systems 78 (2) (1996) 55-181.

Rietveld P. and Ouwersloot H. Ordinal data in multicriteria decision making: A stochastic dominance approach to siting nuclear power plants. European Journal of Operational Research 56 (1992) 249–262.

Rousseau A. and Martel J.M. Environmental assessment of an electric transmission line project: A MCDA method. In M. Paruccini, editor, Applying Multiple Criteria Aid for Decisions to Environmental Management, pages 163–185. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1994).

Roy B. and Hugonnard J.C. Ranking of suburban line extension projects on the Paris Metro system by a multicriteria method. European Journal of Operational Research 16A (1982) 301-312.

Roy B. and Vincke Ph. Multicriteria analysis: Survey and new directions. European Journal of Operational Research 8 (1981) 207-218.

Roy B. Decision aid and decision making. In Bana e Costa C.A. (ed.) – Readings in multiple criteria decision aid. Springer-Verlag, Berlin, pp.17-35, (1990)

Roy B. Present M. and Silhol D. A programming method for determining which Paris metro stations should be renovated. European Journal of Operational Research 24 (1986) 318-334.

Roy B. Decision-aiding today: What should we expect? In T. Gal, T. Stewart, and T. Hanne, editors, Multicriteria Decision Making: Advances in MCDM Models, Algorithms, Theory and Applications, pages 1.1–1.35. Kluwer Academic Publishers, Boston (1999).

Roy, B. An Overview of MCDA Techniques Today – Paradigms and Challenges. In "Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys". Edited by J.Figuera, S. Greco and M. Ehrgott. Springer Science + Business Media, Inc., Boston (2005).

Roy, B. Multicriteria Methodology for Decision Aiding, volume 12 of Nonconvex Optimization and its Applications. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1996).

Roy, B. Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELEC-TRE). RIRO 8 (1968) 57–75.

Saaty, T.L. The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill (1980)

Salminen P., Hokkanen J. and Lahdelma R. Comparing multi-criteria methods in the context of environmental problems. European Journal of Operational Research 104 (1998) 485-496.

SETAC – Society of Environmental Toxicology and Chemistry, Guidelines for Life Cycle Assessment: A "Code of Practice", SETAC (1993).

Setterwall, C., Münter, M., Sarközi, P. & Bodlund, B. Bio-Fuelled Combined Heat and Power Systems. Final Report. ECLIPSE (2003). http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html.

Sherwani A.F., Usmani J.A. and Varun. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010) 540–544.

Siskos J. and Hubert Ph. Multicriteria analysis of the impacts of energy alternatives: A survey and a new comparative approach. European Journal of Operational Research 13 (1983) 278–299.

Spath P.L. and Mann M.K. Biomass Power and Conventional Fossil Systems with and without CO2 Sequestration – Comparing the Energy Balance, Greenhouse Gas Emissions and Economics. National Renewable Energy Laboratory (NREL/TP-510-32575). Golden, CO, USA (2004). http://www.osti.gov/bridge/

Spath P.L. and Mann M.K. Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined Cycle Power Generation System (NREL/TP-570-27715). National Renewable Energy Laboratory: Golden, CO, USA. 2000. http://www.osti.gov/bridge/

Stewart T.J. Dealing with uncertainties in MCDA. In: Figueira, J., Greco, S. and Ehrgott, M. (ed.), Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys, (pp. 445-470), New York: Springer (2005).

Varun, Bhat I.K., Prakash P. LCA of renewable energy for electricity generation systems—A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 1067–1073

Vattenfall. Certified Environmental Product Declaration of Electricity from Hydropower Stations on the River Ume Älv (2002). http://www.environdec.com/

Vattenfall. Certified Environmental Product Declaration of Electricity from Vattenfall AB's Swedish Windpower Plants (2003). http://www.environdec.com/

Vattenfall. Certified Environmental Product Declaration of Electricity from Forsmark Kraftgrupp AB (FKA) (2001). http://www.environdec.com/

Viebahn, P. and Krewitt, W. Fuel Cell (FC) Systems. Final Report. ECLIPSE (2003). http://www.eclipse-eu.org/pubres_guide.html.

Vincke Ph. Multicriteria decision aid. Wiley, New York (1992)

von Winterfeldt D and Edwards W. Decision analysis and Behavioral Research. Cambridge University Press, Cambridge, MA (1992)

Voropai N. and Ivanova E. Multicriteria decision analysis techniques in electric power system expansion planning. Electrical Power and Energy Systems 24 (2002) 71–78.

Wang J.J., Jing Y.Y., Zhang C.F. and Zhao J.H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 2263–2278

Weber M. and Borcherding K. Behavioral influences on weight judgements in multiattribute decision making. European Journal of Operational Research 67 (1993) 1-12.

WEC (World Energy Council). Comparison of energy systems using life cycle assessment. WEC (2004). http://www.worldenergy.org/documents/lca2.pdf

Yeh C.H. and Deng H. A practical approach to fuzzy utilities comparison in fuzzy multicriteria analysis. International Journal of Approximate Reasoning 35(2) (2004) 179-194.

Yeh C.H., Deng H. and Pan H. Multi-criteria analysis for dredger dispatching under uncertainty. Journal of Operational Research Society 50(1) (1999) 35-43.

Zadeh, L.A. Fuzzy sets. Information and Control 8 (1965) 338–353.

Zimmermann H.J. Fuzzy programming and linear programming with several objective functions. Fuzzy Sets and Systems 1 (1978) 45–55.

Κεφάλαιο 3ο

Μεθοδολογία ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών

Στο παρόν κεφάλαιο αρχικά αναλύονται οι περιορισμοί της κλασικής τεχνο/οικονομικής αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων και παρουσιάζονται συνοπτικά οι προτεινόμενες μέθοδοι αντιμετώπισης. Επίσης, συνοψίζονται οι επιμέρους επιδιώξεις, τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα, η πρωτοτυπία και η συνεισφορά της προτεινόμενης μεθοδολογίας ολοκληρωμένης αξιολόγησης. Στο κύριο μέρος παρουσιάζεται αναλυτικά η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών, η οποία συνδυάζει βασικά χαρακτηριστικά των δυο μεθοδολογιών που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο. Στο τελευταίο υποκεφάλαιο συνοψίζονται τα οφέλη, η συνεισφορά και οι περιορισμοί της μεθοδολογίας που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής.

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν υποκεφάλαιο αναλύονται οι περιορισμοί της κλασικής τεχνο/οικονομικής αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων και παρουσιάζονται συνοπτικά οι προτεινόμενες μέθοδοι αντιμετώπισης. Επίσης, συνοψίζονται οι επιμέρους επιδιώξεις, τα επιδιωκόμενα αποτελέσματα, η πρωτοτυπία και η συνεισφορά της προτεινόμενης μεθοδολογίας ολοκληρωμένης αξιολόγησης.

3.1.1 Αδυναμίες κλασικής τεχνο-οικονομικής μεθοδολογίας αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων.

Η συνήθης πρακτική αντιμετώπισης του προβλήματος της επιλογής/αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων κάλυψης ηλεκτρικών ή/και θερμικών φορτίων (π.χ. επένδυση συστήματος συμπαραγωγής ή διαμόρφωση ενεργειακού μίγματος ηλεκτροπαραγωγής) αφορά τον υπολογισμό τεχνοοικονομικών δεικτών (είτε στατικών – π.χ. απόσβεση επένδυσης – είτε δυναμικών – π.χ. καθαρή παρούσα αξία) (Frangopoulos, 2001). Όσον αφορά την περιβαλλοντική διάσταση της αξιολόγησης, θεωρείται επαρκές να τηρούνται τα όρια εκπομπών κατά τη λειτουργία, όπως καθορίζονται από την εκάστοτε νομοθεσία. Η παραπάνω προσέγγιση οδηγεί μεν σε οικονομικά βιώσιμες επιλογές, χαρακτηρίζεται δε από μονομέρεια, όταν το πρόβλημα αξιολόγησης τίθεται σε σύγχρονους όρους (§2.2.2). Η ανεπάρκεια της συνήθους τεχνο-οικονομικής προσέγγισης εντοπίζεται στα εξής ζητήματα:

3.1.1.1 Περιβαλλοντική συνιστώσα προβλήματος αξιολόγησης.

Η τήρηση της παρούσας περιβαλλοντικής νομοθεσίας περιορίζεται στους αέριους ρύπους που παράγονται κατά τη λειτουργία του συστήματος παραγωγής ηλεκτρικής ή/και θερμικής ενέργειας. Ωστόσο, οι πραγματικές επιπτώσεις στο περιβάλλον διαχέονται χρονικά (στάδια ζωής συστήματος - εξόρυξη των πρώτων υλών, κατασκευή του συστήματος, αλυσίδα προμήθειας καυσίμου, λειτουργία, τέλος ζωής), χωρικά (τοπικές εκπομπές ρύπων με παγκόσμια επίπτωση, π.χ. φαινόμενο θερμοκηπίου) και ποιοτικά (αέρια, στερεά και υγρά απόβλητα). Εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης υποστηρίζεται πλέον ενεργά η τάση για συνολική εκτίμηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής σε επίπεδο διαμόρφωσης πολιτικών (IES, 2012).

3.1.1.2 Μονομέρεια αξιολόγησης και επιλογής ενεργειακού συστήματος.

Σύμφωνα με τη συνήθη πρακτική, οι τεχνο-οικονομικοί δείκτες αποτελούν το μοναδικό κριτήριο αξιολόγησης, αναδεικνύοντας ως επικρατέστερη την επιλογή που εμφανίζει την ευνοϊκότερη τιμή. Ως αποτέλεσμα, η επιλογή «κατευθύνεται» σε συστήματα οικονομικά

αποδοτικότερα μεν, με δυσμενέστερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις δε. Από τη στιγμή που διαπιστώνεται η ανάγκη ενσωμάτωσης περιβαλλοντικών κριτηρίων, κρίνεται απαραίτητη είτε η «μετάφραση» των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε οικονομικούς όρους (Munasinghe, 1993) είτε η εφαρμογή μεθοδολογιών πολυκριτηριακής ανάλυσης (Diakoulaki et al., 2005).

3.1.1.3 Αδυναμία σύνθεσης διαφορετικών προτεραιοτήτων κατά τη διαδικασία απόφασης.

Η μονοδιάστατη προσέγγιση της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης δεν προβλέπει το συγκερασμό διαφορετικών απόψεων σχετικά με τη βαρύτητα των τριών συνιστωσών της συνολικής αποδοτικότητας (τεχνική – οικονομική – περιβαλλοντική). Συνεπώς, σε περιπτώσεις π.χ. δημόσιας διαβούλευσης για διαμόρφωση ενεργειακής πολιτικής, απαιτείται εφαρμογή μεθοδολογιών αξιολόγησης που θα διευκολύνουν τη συμμετοχή ομάδων – φορέων με διαφορετικές προτεραιότητες (π.χ. τοπική κοινωνία, οικολογικές οργανώσεις, επενδυτές).

3.1.1.4 Περιορισμένη ενσωμάτωση αβεβαιότητας.

Η ασάφεια που χαρακτηρίζει τις παραμέτρους της αξιολόγησης των ενεργειακών συστημάτων αντιμετωπίζεται κατα τεκμήριο[1] μέσω μονοπαραμετρικής ανάλυσης ευαισθησίας στη μεταβολή μεμονωμένων παραμέτρων (π.χ. τιμές καυσίμων, επιτόκια αναγωγής, κόστη εγκατάστασης). Κατά τη συνήθη αυτή εφαρμογή της ανάλυσης ευαισθησίας ποσοτικοποιείται η επίδραση της διακύμανσης μίας μόνο παραμέτρου, αγνοώντας την ταυτόχρονη μεταβολή (όπως επίσης και την ασάφεια υπολογισμού) των υπολοίπων. Διαφαίνεται συνεπώς η αναγκαιότητα της συνολικής ενσωμάτωσης της ασάφειας των δεδομένων του προβλήματος επιλογής, ειδικά σε περιπτώσεις όπου αξιολογούνται καινοτόμα συστήματα για τα οποία δεν διατίθεται πλήθος αξιόπιστων δεδομένων σχετικά με την τεχνική, οικονομική και περιβαλλοντική τους αποδοτικότητα.

3.1.2 Αντιμετώπιση αδυναμιών τεχνο-οικονομικής μεθοδολογίας

Τα μεθοδολογικά ζητήματα στα οποία η συνήθης πρακτική της τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης αποτυγχάνει να ανταποκριθεί (§ 3.1.1) αντιμετωπίζονται από την προτεινόμενη μεθοδολογία ως εξής:

3.1.2.1 Περιβαλλοντική συνιστώσα προβλήματος αξιολόγησης.

Το περιβαλλοντικό σκέλος της αξιολόγησης προσεγγίζεται συνολικά αξιοποιώντας τη μεθοδολογία της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) (§ 2.1), κατάλληλα προσαρμοσμένη για συστήματα παραγωγής ηλεκτρισμού ή/και θερμότητας (λεπτομερής περιγραφή στην

[1] Είναι δυνατή και η πολυπαραμετρική ανάλυση ευαισθησίας/αβεβαιότητας (Frangopoulos, 2001)

παράγραφο § 3.2.2.2). Η εν λόγω μεθοδολογία εκτίμησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων βασίζεται στη μοντελοποίηση του συνόλου των σταδίων του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, υπηρεσίας ή δραστηριότητας (§ 2.1). Επίσης η ΑΚΖ επεκτείνεται τόσο χωρικά (συνυπολογισμός περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκαλούνται από απομακρυσμένες εκπομπές - π.χ. CO_2 με αντίκτυπο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου) όσο και ποιοτικά (συνυπολογισμός ρύπων που αλλάζουν «μέσο» - π.χ. από αέρια σε υγρή μορφή σε εφαρμογή wet scrubbing).

3.1.2.2 Μονομέρεια αξιολόγησης και επιλογής ενεργειακού συστήματος.

Το πρόβλημα της ενσωμάτωσης των τριών συνιστωσών της συνολικής αποδοτικότητας (τεχνική – οικονομική – περιβαλλοντική) προσεγγίζεται μέσω εφαρμογής μεθοδολογίας Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (ΠΑ) (§ 2.2) (αναλυτική περιγραφή στην παράγραφο § 3.2.3). Δεν υιοθετήθηκαν μέθοδοι μετατροπής των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε οικονομικούς όρους, αφενός εξαιτίας του εγγενούς μεθοδολογικού (και ηθικού) ρίσκου και αφετέρου προκειμένου να δημιουργηθεί ένα εργαλείο υποστήριξης απόφασης, το οποίο σταθμίζει και επεξεργάζεται τη διαθέσιμη (τεχνική – οικονομική – περιβαλλοντική) πληροφορία στην πραγματική της μορφή και διαστάσεις.

3.1.2.3 Αδυναμία σύνθεσης διαφορετικών προτεραιοτήτων κατά τη διαδικασία απόφασης.

Η σύνθεση διαφορετικών προτεραιοτήτων αποτελεί δομικό στοιχείο των μεθοδολογιών ΠΑ (§ 2.2) και επιτυγχάνεται κατά κανόνα μέσω προσδιορισμού συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων αξιολόγησης (§ 2.2.1.2). Στη βιβλιογραφία προτείνονται διάφορες τεχνικές προσδιορισμού των συντελεστών βαρύτητας αξιοποιώντας στατιστικά μεγέθη των τιμών των κριτηρίων (Wang et al., 2009), ωστόσο είναι αμφισβητήσιμο το κατά πόσο ο υπολογισμός (και γενικότερα ετεροκαθορισμός) ενός σαφώς υποκειμενικού μεγέθους είναι εννοιολογικά ορθός. Δυσχέρειες στην εφαρμογή ΠΑ παρουσιάζονται επίσης κατά την περίπτωση όπου διαπιστώνεται αδυναμία άμεσου και σαφούς καθορισμού των συντελεστών βαρύτητας εκ μέρους των αποφασιζόντων (ατόμων ή ομάδων) (§ 2.2.1.2).

Η προτεινόμενη μεθοδολογία επιτυγχάνει τη σύνθεση των προτεραιοτήτων απόφασης μέσω εφαρμογής μεθοδολογίας ΠΑ και παράλληλα παρακάμπτει τον κίνδυνο του ετεροκαθορισμού των συντελεστών βαρύτητας, καθώς αυτοί αντιμετωπίζονται ως ελεύθερες παράμετροι (όταν διαπιστώνεται πλήρης αδυναμία προσδιορισμού τους) (λεπτομέρειες στην παράγραφο § 3.2.3.3). Ως επακόλουθο, δεν απαιτείται (τουλάχιστον σε στάδιο αρχικής αξιολόγησης) παροχή στοιχείων για τους συντελεστές βαρύτητας. Με αυτόν τον τρόπο προσεγγίζεται η κατάσταση πλήρους ασάφειας ως προς την υποκειμενική συνιστώσα του προβλήματος αξιολόγησης (§ 3.2.3.3) και παράγονται αποτελέσματα (κατατάξεις συστημάτων) για το

σύνολο των συνδυασμών συντελεστών βαρύτητας των τριών συνιστωσών της αποδοτικότητας (τεχνική – οικονομική – περιβαλλοντική).

3.1.2.4 Περιορισμένη ενσωμάτωση αβεβαιότητας.

Προκειμένου να επιτευχθεί συνολική αντιμετώπιση της ασάφειας των δεδομένων των κριτηρίων αξιολόγησης, επεκτείνεται η υπάρχουσα μεθοδολογία ΠΑ, έτσι ώστε να διαχειρίζεται ασαφή (fuzzy) δεδομένα. Ο ταυτόχρονος συνυπολογισμός της ασάφειας του συνόλου των δεδομένων καθιστά μη απαραίτητη την εφαρμογή ανάλυσης ευαισθησίας. Εκτός από την αβεβαιότητα προσδιορισμού της αντικειμενικής συνιστώσας του προβλήματος αξιολόγησης (αποτελέσματα επιμέρους αξιολογήσεων), προσεγγίζεται και η αβεβαιότητα καθορισμού της υποκειμενικής συνιστώσας (συντελεστές βαρύτητας κριτηρίων). Οι δυο «πηγές» αβεβαιότητας ενσωματώνονται στο τελικό αποτέλεσμα, η μορφή του οποίου καθορίζεται από το αν είναι εφικτός ο (έστω και ασαφής) προσδιορισμός των συντελεστών βαρύτητας.

3.1.3 Σύνοψη προτεινόμενης μεθοδολογίας ολοκληρωμένης αξιολόγησης.

Ο κύριος στόχος της προτεινόμενης προσέγγισης αφορά τη διατύπωση μιας μεθοδολογίας ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων, τα οποία καλύπτουν ηλεκτρικά ή/και θερμικά φορτία. Η γενική αυτή στόχευση αναλύεται στις παρακάτω επιμέρους επιδιώξεις:

- Καθορισμός της τεχνικής αποδοτικότητας, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της οικονομικής βιωσιμότητας των εξεταζόμενων συστημάτων μέσω δεικτών – κριτηρίων αξιολόγησης.
- Κάλυψη του συνολικού κύκλου ζωής (παραγωγή πρώτων υλών – κατασκευή/συναρμολόγηση συστημάτων – λειτουργία – απόσυρση) των συστημάτων.
- Ενσωμάτωση της αβεβαιότητας καθορισμού των κριτηρίων αξιολόγησης.
- Διαμόρφωση εργαλείου υποστήριξης της διαδικασίας επιλογής του επικρατέστερου συστήματος, το οποίο θα λαμβάνει υπόψη την υποκειμενικότητα των αποφασιζόντων.

Το επιδιωκόμενο αποτέλεσμα είναι η ανάδειξη του επικρατέστερου συστήματος, βάσει της σύνθεσης της συνολικής του αποδοτικότητας (συνδυασμός τεχνικών – περιβαλλοντικών και οικονομικών κριτηρίων) και των υποκειμενικών προτεραιοτήτων που αναπόφευκτα επηρεάζουν τη διαδικασία λήψης απόφασης. Η μορφή του τελικού αποτελέσματος εξαρτάται από το εύρος της αδυναμίας καθορισμού της υποκειμενικότητας των αποφασιζόντων μέσω των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων:

- Αν είναι εφικτός ο – έστω και ασαφής – καθορισμός των συντελεστών βαρύτητας, το τελικό αποτέλεσμα αποδίδεται σε μορφή της ασαφούς κατάταξης των εξεταζόμενων

συστημάτων, της οποίας η αξιοπιστία ποσοτικοποιείται με τη χρήση κατάλληλης μεθοδολογίας.

- Στην περίπτωση αδυναμίας καθορισμού των υποκειμενικών συντελεστών βαρύτητας, το αποτέλεσμα είναι ένας «χάρτης απόφασης», εντός του οποίου αναδεικνύεται το επικρατέστερο σύστημα για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς συντελεστών βαρύτητας.

Η πρωτοτυπία της προτεινόμενης μεθοδολογίας εντοπίζεται στα εξής:

- Επιχειρείται συνολική προσέγγιση του προβλήματος αξιολόγησης. Η έννοια της συνολικότητας αφορά τα εξής δύο επίπεδα:
  1. Ως προς το εύρος της αξιολόγησης. Η μεθοδολογία αντιμετωπίζει τόσο το τεχνοοικονομικό όσο και το περιβαλλοντικό σκέλος της αποδοτικότητας των εξεταζόμενων ενεργειακών συστημάτων.
  2. Ως προς τη χρονική διάσταση της αξιολόγησης. Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει δομηθεί με βάση τη μέθοδο περιβαλλοντικής αποτίμησης της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (§ 2.1), η οποία έχει προσαρμοστεί για εφαρμογή σε ενεργειακά συστήματα.
- Επεκτείνεται η υπάρχουσα θεωρία πολυκριτηριακής ανάλυσης, έτσι ώστε να επιτυγχάνεται ευέλικτη αντιμετώπιση της αδυναμίας καθορισμού της υποκειμενικότητας του προβλήματος αξιολόγησης. Οι δυο εναλλακτικές μεθοδολογικές οδεύσεις που διατυπώνονται είναι σε θέση να αναδείξουν το επικρατέστερο ενεργειακό σύστημα υπό συνθήκες είτε μερικής είτε πλήρους αδυναμίας καθορισμού των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων αξιολόγησης:
  1. Προκειμένου να αντιμετωπιστεί η περίπτωση πλήρους αβεβαιότητας, ενσωματώνεται αλγόριθμος σάρωσης των πιθανών συντελεστών βαρύτητας.
  2. Κατά την περίπτωση μερικής αβεβαιότητας, αναδιατυπώνεται η πολυκριτηριακή μέθοδος με σκοπό τη χρήση ασαφών δεδομένων. Εισάγεται η έννοια της αξιοπιστίας της ασαφούς κατάταξης (που προκύπτει ως αποτέλεσμα) και επιτυγχάνεται η ποσοτικοποίησή της.

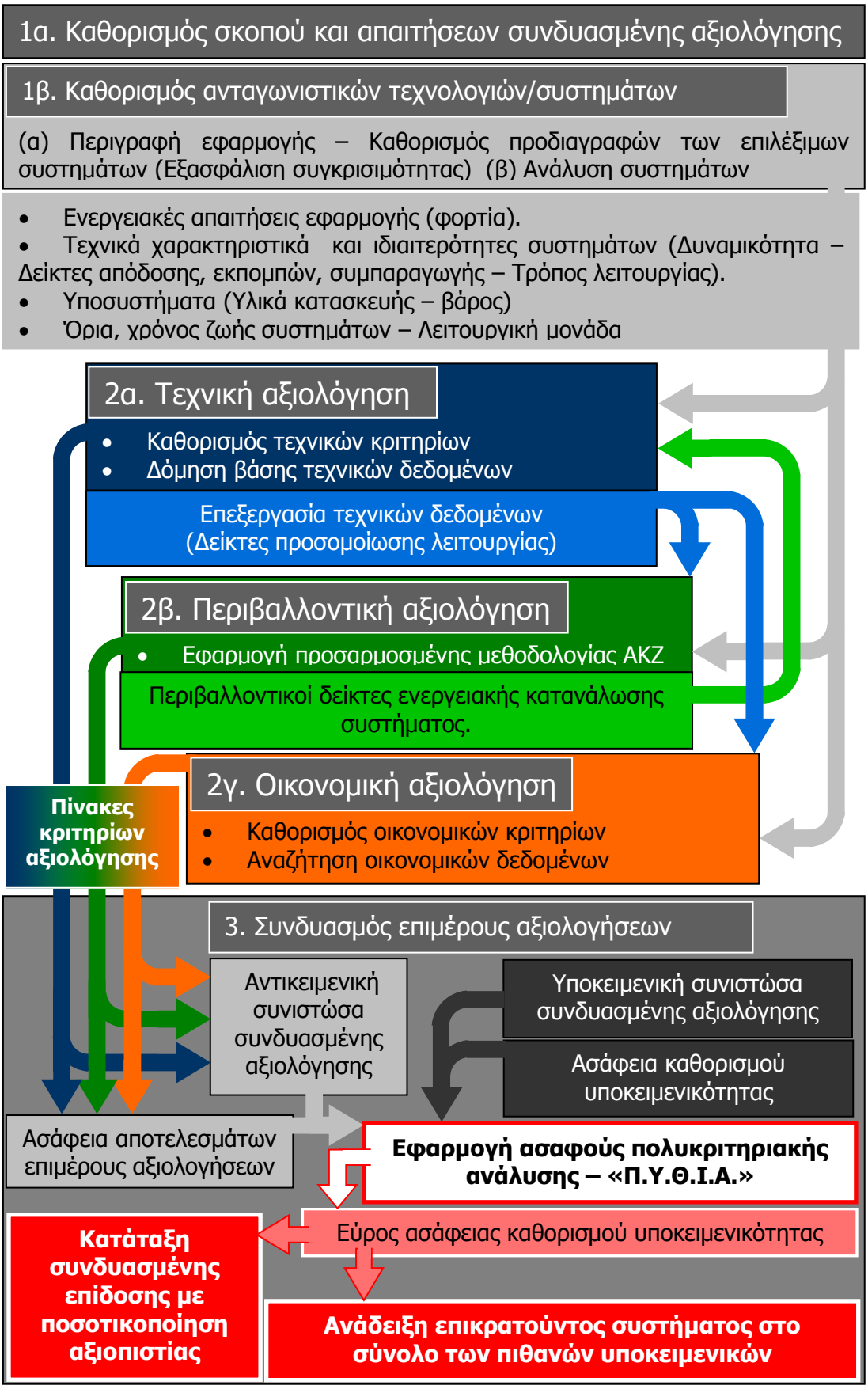
Η συνεισφορά της προτεινόμενης μεθοδολογίας εντοπίζεται στην παροχή υποστήριξης σε προβλήματα επιλογής συστημάτων/τεχνολογιών κατά τον ενεργειακό σχεδιασμό σε επίπεδο μακροκλίμακας (διαμόρφωση ενεργειακής πολιτικής) και μέσης κλίμακας (αξιολόγηση ενεργειακών επενδύσεων).

3.2 Αναλυτική περιγραφή μεθοδολογίας

Η προτεινόμενη μεθοδολογία συνδυασμένης αξιολόγησης αποτελείται από τρία σκέλη (Σχήμα 3.1):

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.

Στις παραγράφους που ακολουθούν αναλύονται τα τρία προαναφερθέντα σκέλη της μεθοδολογίας, με γνώμονα το γενικό διάγραμμα ροής του σχήματος 3.1.



Σχήμα 3.1 Συνολικό διάγραμμα ροής μεθοδολογίας

3.2.1 Καθορισμός πλαισίου συνδυασμένης αξιολόγησης

Το αρχικό σκέλος αποσκοπεί στη διασαφήνιση του πλαισίου εντός του οποίου θα εφαρμοστεί η προτεινόμενη μεθοδολογία. Σε πρώτο στάδιο εξειδικεύεται ο γενικός σκοπός της αξιολόγησης συστημάτων κάλυψης ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων με βάση το μέγεθος και το είδος της εφαρμογής. Αν κριθεί σκόπιμο, καθορίζονται ελάχιστες απαιτήσεις για την προέλευση και την «ποιότητα» των δεδομένων που θα αναζητηθούν σε επόμενα στάδια (π.χ. απαιτούμενη «ποιότητα» ή πλήθος τεχνικών δεδομένων – βλέπε παράγραφο «Δόμηση βάσης τεχνικών δεδομένων»).

Προκειμένου επίσης να οριοθετηθεί και να κατευθυνθεί η αναζήτηση των απαραίτητων στοιχείων για τις επιμέρους αξιολογήσεις, περιγράφεται η εφαρμογή, οι συνθήκες λειτουργίας, οι λειτουργικές απαιτήσεις και η ενεργειακή ζήτηση που καλούνται να καλύψουν τα εξεταζόμενα συστήματα. Η αποσαφήνιση του πλαισίου λειτουργίας αποτελεί κριτήριο για τον καθορισμό των ανταγωνιστικών ενεργειακών συστημάτων, καθώς οφείλουν να εκπληρώνουν τις προδιαγραφές που καθορίζει η συγκεκριμένη εφαρμογή.

Με άλλα λόγια, τα ενεργειακά συστήματα που επιλέγονται να αξιολογηθούν οφείλουν να διαθέτουν κάποια κοινά βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά (κοινό σκοπό λειτουργίας, όρια συστήματος, παραγόμενη μορφή ενέργειας – λειτουργική μονάδα, παραπλήσια δυναμικότητα) προκειμένου να εξασφαλίζεται ότι είναι συγκρίσιμα.

Η προεπιλογή των ανταγωνιστικών ενεργειακών συστημάτων ακολουθείται από την περιγραφή του τρόπου λειτουργίας και την καταγραφή των υποσυστημάτων τους, η οποία περιλαμβάνει τα υλικά κατασκευής και την απαιτούμενη ποσότητά τους (σε βάρος). Επιπρόσθετα, απαιτούνται ως δεδομένα τα εξής συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά: εκτιμώμενος χρόνος ζωής, δυναμικότητα, τεχνικό ελάχιστο, περιορισμοί χρονικής διακύμανσης απόδοσης, δείκτες ενεργειακής αποδοτικότητας, συντελεστές εκπομπών και λόγος συμπαραγωγής (το κλάσμα ηλεκτρικής προς θερμική απόδοση - απαιτείται όταν εξετάζονται συμπαραγωγικά συστήματα). Τα παραπάνω δεδομένα χρησιμοποιούνται στα επόμενα στάδια της τεχνικής και περιβαλλοντικής αξιολόγησης.

3.2.2 Επιμέρους αξιολογήσεις τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής συνιστώσας

Η ολοκλήρωση του πρώτου σκέλους της μεθοδολογίας έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό του πλαισίου και των συνθηκών λειτουργίας, καθώς και των τεχνικών χαρακτηριστικών και ιδιαιτεροτήτων των ανταγωνιστικών συστημάτων. Το δεύτερο σκέλος αποσκοπεί στην συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, προκειμένου να καθοριστούν και να ποσοτικοποιηθούν κριτήρια αξιολόγησης της τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής αποδοτικότητας. Οι

επιμέρους αξιολογήσεις έχουν ως αποτέλεσμα τον συγκεντρωτικό πίνακα κριτηρίων, ο οποίος συμπεριλαμβάνει εκτός από τις απόλυτες τιμές και το εύρος διακύμανσης των κριτηρίων, προκειμένου να γίνει επεξεργασία της ασάφειας των αποτελεσμάτων στο επόμενο σκέλος. Στις επόμενες παραγράφους αναλύονται οι αντίστοιχες μεθοδολογικές προσεγγίσεις.

3.2.2.1 Τεχνική αξιολόγηση

Το συγκεκριμένο τμήμα της μεθοδολογίας έχει ως στόχο τη συγκριτική αξιολόγηση της τεχνικής συνιστώσας των εξεταζόμενων ενεργειακών συστημάτων μέσω δεικτών (κριτηρίων) που περιγράφουν την τεχνική αποδοτικότητα και τη λειτουργική συμπεριφορά.

Καθορισμός τεχνικών κριτηρίων

Σύμφωνα με σχετική ανασκόπηση (Wang et al, 2009) τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα τεχνικά κριτήρια είναι η αποδοτικότητα (ενεργειακή ή εξεργειακή), η αξιοπιστία και η ασφάλεια. Σε κάθε περίπτωση, η επιλογή – τόσο σε ποσότητα όσο και σε ποιότητα – των τεχνικών κριτηρίων εξαρτάται άμεσα από τις ιδιαιτερότητες των συγκεκριμένων συστημάτων που αξιολογούνται και από την εφαρμογή τους (βλ. κεφάλαια 4 και 5), ωστόσο είναι απαραίτητο να τηρηθούν οι γενικές προϋποθέσεις που οφείλουν να πληρούν τα κριτήρια αξιολόγησης (§ 2.2.1.2):

- Πληρότητα. Η υποκατηγορία των τεχνικών κριτηρίων οφείλει να αναφέρεται – κατά το δυνατόν – στο σύνολο των χαρακτηριστικών που περιγράφουν των τεχνική αποδοτικότητα των ενεργειακών συστημάτων που αξιολογούνται. Ανεξάρτητα από την εφαρμογή, είναι απαραίτητη η εισαγωγή κριτηρίων που αναφέρονται:
    - Στην αποδοτικότητα του συστήματος. Με δεδομένο ότι η μεθοδολογία αφορά κάλυψη ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων, σχετικοί δείκτες είναι οι αντίστοιχοι βαθμοί απόδοσης (σε ονομαστικό ή/και μερικό φορτίο). Εναλλακτικά και σε συνδυασμό με την Ανάλυση Κύκλου Ζωής είναι δυνατόν να εφαρμοστούν πιο πολύπλοκοι δείκτες, όπως η Αθροιστική Απαίτηση Ενέργειας (Cumulative Energy Demand - CED) (βλ. §4.4.2.3 και §5.4.2.3).
    - Στο χρόνο ζωής. Κατάλληλος δε, δείκτης είναι ο συνολικός εκτιμώμενος χρόνος ζωής του εξεταζόμενου συστήματος (σε ώρες λειτουργίας). Αν η εκτίμηση του χρόνου ζωής είναι διαθέσιμη σε έτη, είναι αναγκαία η υπόθεση των ετήσιων ωρών λειτουργίας.
    - Στη λειτουργική αξιοπιστία. Η αξιοπιστία είναι δυνατόν να περιγραφεί ποσοτικά με δείκτες όπως ο λόγος (EDUCOGEN, 2001):

    $Reliability(\%) = \frac{T-(S+U)}{T-S} \times 100$,όπου

    T: οι ετήσιες ώρες που αναμένεται να λειτουργήσει το ενεργειακό σύστημα, S: οι προγραμματισμένες ετήσιες ώρες διακοπής λειτουργίας για λόγους συντήρησης και U:

οι μη προγραμματισμένες ετήσιες ώρες διακοπής λειτουργίας λόγω βλάβης. Εναλλακτικά η αξιοπιστία εκφράζεται με δείκτες όπως ο MTBF (Mean Time Between Failures) και ο AFR (Annual Failure Ratio). Στη συχνά απαντώμενη περίπτωση που δεν είναι διαθέσιμη τόσο λεπτομερής πληροφορία, γίνεται χρήση ενός ποιοτικού δείκτη (1-10), με αναφορές σε σχετική βιβλιογραφία.

- Στη λειτουργική ευελιξία. Η ευελιξία εκφράζεται μέσω του τεχνικού ελάχιστου (Turn down ratio), του απαιτούμενου χρόνου για απόδοση της μέγιστης ισχύος ή/και μέσω της ικανότητας κάλυψης των διακυμάνσεων του φορτίου (π.χ. μπορεί να χρησιμοποιηθεί ο δείκτης Ramp rate (ρυθμός μεταβολής ισχύος, kWel/min)).

Ανάλογα με τα διαθέσιμα δεδομένα και τις συγκεκριμένες απαιτήσεις του προβλήματος αξιολόγησης, προστίθενται στην ανάλυση κριτήρια σχετικά με τη συγκέντρωση ισχύος του συστήματος, τον εκπεμπόμενο θόρυβο ή κραδασμούς, κ.α.

- Σαφήνεια. Προκειμένου να εξασφαλίζεται η διαφάνεια της τεχνικής αξιολόγησης, κάθε κριτήριο οφείλει να συνοδεύεται από μια περιγραφή του τι ακριβώς εκφράζει και υπό ποιές συνθήκες (π.χ. ο βαθμός απόδοσης πρέπει να αναφέρεται στο αντίστοιχο φορτίο).
- Αυτονομία. Είναι σημαντικό για κάθε κριτήριο να διατηρεί την «αυτονομία» του, εκφράζοντας μια συγκεκριμένη πτυχή της τεχνικής συνιστώσας των εξεταζόμενων συστημάτων. Αν π.χ. επιλεγούν δυο ομοειδή κριτήρια για να εκφράσουν τη λειτουργική αξιοπιστία, κατευθύνεται η συγκριτική ανάλυση προς όφελος του συστήματος που αποδίδει καλύτερα στο συγκεκριμένο πεδίο. Με άλλα λόγια η ίδια πληροφορία λαμβάνεται υπόψη δυο φορές κατά την επεξεργασία των τεχνικών κριτηρίων.
- Μετρησιμότητα. Η ποιότητα της πληροφορίας που ενσωματώνεται από τα ποσοτικά κριτήρια (μετρήσιμα με σαφείς μονάδες μέτρησης) είναι σαφώς ανώτερη των ποιοτικών (που λαμβάνουν μια σχετική ποιοτική βαθμολογία). Η μη ύπαρξη ποσοτικών κριτηρίων ενισχύει την ασάφεια και την αδιαφάνεια της αξιολόγησης, όπως επίσης δυσχεραίνει την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων, μειώνοντας τη χρησιμότητα της ανάλυσης ευαισθησίας. Η χρήση ποιοτικής κλίμακας για τον καθορισμό ενός τεχνικού κριτηρίου αποτελεί συμβιβασμό στην περίπτωση που τα διαθέσιμα στοιχεία δεν επαρκούν για τη σαφή μέτρηση.
- Ικανός όγκος πληροφορίας. Σε συνάφεια με την προϋπόθεση της αυτονομίας, κάθε τεχνικό κριτήριο που επιλέγεται, οφείλει να ενσωματώνει ικανή ποσότητα πληροφορίας σχετικής με τον κύριο σκοπό της λειτουργίας του συστήματος (κάλυψη ηλεκτρικών – θερμικών φορτίων). Από τη στιγμή που η μεθοδολογία δεν αποσκοπεί στη θερμοδυναμική βελτιστοποίηση της λειτουργίας, αλλά στη συνολική αιτιολόγηση της επιλογής ενός συστήματος/τεχνολογίας, η χρήση κριτηρίων όπως π.χ. ενδιάμεσες θερμοκρασίες ή πιέσεις είναι εκτός του πλαισίου εφαρμογής της μεθοδολογίας.

- Απλότητα. Με δεδομένο ότι τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας αξιολόγησης απευθύνονται σε αποφασίζοντες οι οποίοι πιθανόν να μη διαθέτουν πλήρη «κάθετη» γνώση των τεχνικών χαρακτηριστικών των τεχνολογιών που αξιολογούνται, είναι σημαντική η επιδίωξη της επιλογής κατανοητών και μη εξεζητημένων τεχνικών κριτηρίων.

Δόμηση βάσης τεχνικών δεδομένων

Η επιλογή και αποσαφήνιση των τεχνικών κριτηρίων αξιολόγησης ακολουθείται από την αναζήτηση στοιχείων, προκειμένου να τους αποδοθούν τιμές. Πρόκειται για ένα ιδιαιτέρως κρίσιμο στάδιο, καθώς η ποιότητα των τεχνικών στοιχείων που εισάγονται επηρεάζει άμεσα και την ποιότητα των τελικών αποτελεσμάτων και συμπερασμάτων. Όπως κάθε μαθηματικό μοντέλο που προσομοιώνει μια πραγματική κατάσταση, η προτεινόμενη μεθοδολογία δεν είναι σε θέση να αυξήσει την ποσότητα ή να βελτιώσει την ποιότητα της πληροφορίας που εισέρχεται μέσω των δεδομένων. Η χρήση αξιόπιστων στοιχείων είναι συνεπώς ζωτικής σημασίας.

Το άμεσο πρόβλημα που ανακύπτει κατά την εφαρμογή της μεθοδολογίας αφορά τη διαθεσιμότητα αξιόπιστων και συγκεκριμένων στοιχείων. Η δυσχέρεια αυτή εντείνεται, καθώς επιχειρείται η αξιολόγηση καινοτόμων συστημάτων που βρίσκονται σε ερευνητικό ή πιλοτικό στάδιο. Διαπιστώνεται συνεπώς η ανάγκη του συμβιβασμού της αξιοποίησης δεδομένων, τα οποία προέρχονται από προσομοιώσεις (που υπόκεινται σε πλήθος υποθέσεων) ή που δεν έχουν ελεγχθεί από ανεξάρτητη πηγή. Με βάση το κατά πόσο τα προς χρήση δεδομένα έχουν ελεγχθεί ανεξάρτητα ή έχουν παραχθεί βάσει προτύπων, ακολουθείται η εξής σειρά ιεράρχησης της αξιοπιστίας των εν δυνάμει πηγών τεχνικής πληροφορίας:

1. Πρωτόκολλα μετρήσεων πραγματικής λειτουργίας των εξεταζόμενων συστημάτων / τεχνολογιών βάσει προτύπων.
2. Πιστοποιημένες εργαστηριακές/πειραματικές μετρήσεις.
3. Δημοσιεύσεις επιστημονικών συγγραμμάτων.
4. Εμπορικές βάσεις δεδομένων AKZ.
5. Μελέτες – τεχνικές αναφορές ερευνητικών προγραμμάτων.
6. Μελέτες – τεχνικές αναφορές οργανισμών – ερευνητικών κέντρων.
7. Τεχνικές αναφορές κατασκευαστών υποσυστημάτων.
8. Προσωπική επικοινωνία με κατασκευαστές / εμπειρογνώμονες.

Είναι σαφές ότι σε κάθε περίπτωση επιδιώκεται η αξιοποίηση πηγών σύμφωνα με τον αύξοντα αριθμό της παραπάνω κατάταξης.

Οι διαφορετικές πηγές δεδομένων που χρησιμοποιούνται δεν διαθέτουν – κατά τεκμήριο – κοινές διατάξεις ή υποθέσεις προκειμένου να παράγουν μετρήσεις ή αποτελέσματα. Σε γενικές γραμμές, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στο αν διαπιστώνονται ικανές ομοιότητες με τα χαρακτηριστικά των συστημάτων που καθορίστηκαν στο αρχικό στάδιο της μεθοδολογίας.

Επιδιώκεται οι – αναπόφευκτοι – συμβιβασμοί να μην επιβάλλουν τη σύγκριση ετερόκλητων δεδομένων.

Ωστόσο, χωρίς να υποβαθμίζεται η σημασία της επιδίωξης συλλογής αξιόπιστων στοιχείων, οι τιμές των τεχνικών κριτηρίων αποδίδονται με τη μορφή ασαφών αριθμών, όπου καθορίζεται η κεντρική τιμή και το εύρος διακύμανσης. Με αυτόν τον τρόπο ενσωματώνεται η ασάφεια στις τιμές των τεχνικών κριτηρίων λόγω διαφορετικής προέλευσης των δεδομένων. Ως αποτέλεσμα, δεν υιοθετείται συγκεκριμένη τιμή από μια πηγή δεδομένων, αλλά το πλήθος των διαθέσιμων στοιχείων οδηγεί στον καθορισμό της κεντρικής τιμής και του εύρους διακύμανσης για κάθε τεχνικό κριτήριο. Το τίμημα της χρήσης ασαφών αριθμών είναι οι αυξημένες απαιτήσεις από το τρίτο σκέλος της μεθοδολογίας, όπου τίθεται η πρόκληση της διαχείρισης της ασάφειας κατά τη συνδυασμένη αξιολόγηση.

Πίνακας τεχνικών κριτηρίων

Η κατάρτιση και συμπλήρωση του πίνακα των τεχνικών κριτηρίων είναι το αποτέλεσμα αφενός της συλλογής δεδομένων και αφετέρου – αν κρίνεται σκόπιμο – της ενσωμάτωσης ενεργειακών δεικτών της περιβαλλοντικής αξιολόγησης. Αυτοί οι δείκτες είναι μεν πιο δυσνόητοι από το βαθμό απόδοσης, αλλά περιέχουν πληροφορία για το σύνολο της ενεργειακής κατανάλωσης του κύκλου ζωής. Ο πίνακας τεχνικής αξιολόγησης σε κάθε περίπτωση περιλαμβάνει τα επιλεχθέντα τεχνικά κριτήρια, τις κεντρικές τιμές, τα όρια διακύμανσης και τις αντίστοιχες πηγές.

Επεξεργασία τεχνικών δεδομένων

Ανεξάρτητα από την κατάρτιση του πίνακα τεχνικών κριτηρίων, είναι απαραίτητη η παροχή δεδομένων για τη λειτουργία των εξεταζόμενων συστημάτων στις δυο υπόλοιπες συνιστώσες της συνδυασμένης αξιολόγησης, την περιβαλλοντική και την οικονομική. Η επικοινωνία αυτή οφείλει να μην παρεκκλίνει από τις συγκεκριμένες λειτουργικές απαιτήσεις που καθορίστηκαν στο αρχικό στάδιο. Με άλλα λόγια, δεν είναι αποδεκτό να αναζητηθεί βιβλιογραφικά π.χ. η ειδική κατανάλωση καυσίμου, καθώς μπορεί να αναφέρεται σε παρόμοια εφαρμογή, αλλά δεν συνδέεται με τις ενεργειακές και λειτουργικές απαιτήσεις που τέθηκαν αρχικά.

Είναι συνεπώς απαραίτητη η λειτουργική προσομοίωση των εξεταζόμενων συστημάτων με βάση συγκεκριμένες λειτουργικές απαιτήσεις – προφανώς κοινές για τα συγκρινόμενα συστήματα. Η επεξεργασία αποσκοπεί στον υπολογισμό – στην περίπτωση που δεν είναι ήδη γνωστά – των ακόλουθων δεικτών (για την αναγωγή χρησιμοποιείται η ηλεκτρική kWh) για το σύνολο της λειτουργικής ζωής των συστημάτων:

1. Ειδική κατανάλωση καυσίμου συνολικού χρόνου λειτουργίας - m_{f_L} (kg/kWh ή Nm^3/kWh). Χρησιμοποιείται ως δεδομένο για την περιβαλλοντική (υπολογισμός επιπτώσεων αλυσίδας εφοδιασμού καυσίμου) και οικονομική (κόστος καυσίμου) αξιολόγηση.

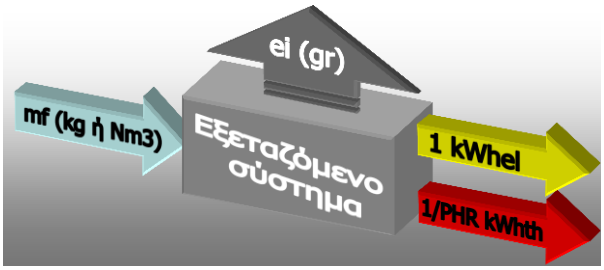
2. Ειδική εκπομπή αερίου ρύπου p συνολικού χρόνου λειτουργίας - e_{p_L} (gr/kWhel). Απαιτούμενο δεδομένο της περιβαλλοντικής αξιολόγησης του σταδίου της λειτουργίας.

3. Λόγος θερμότητας προς ηλεκτρισμό συνολικού χρόνου λειτουργίας - $q_{th\_out\_L}$ (-) (=$Q_{th\_out\_L}/W_{el\_out\_L}$). Υπολογίζεται στην περίπτωση αξιολόγησης συστημάτων συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.

Σημειώνεται οτι τα μεγέθη «συνολικού χρόνου λειτουργίας» αφορούν σταθερές τιμές (μέσους όρους), οι οποίες δεν μεταβάλλονται εντός του χρόνου ζωής των συστημάτων.

Κατά την απλή περίπτωση που απαιτείται προσομοίωση σταθερής χρονικά λειτουργίας (Σχήμα 3.2) είναι επαρκή τα εξής δεδομένα:

- Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συστήματος κατά την ονομαστική (nominal) λειτουργία (η_{el_NM})
- Θερμογόνος δύναμη καυσίμου (H_u)
- Συντελεστής εκπομπής αερίου ρύπου p κατά την ονομαστική λειτουργία (e_{p_NM})
- Λόγος ηλεκτρισμού-θερμότητας κατά την ονομαστική λειτουργία (Power-To-Heat ratio – $PHR_{\_NM}$)



Σχήμα 3.2 Βασικοί δείκτες συστήματος σταθερής χρονικά λειτουργίας

Αποδεικνύεται (βλέπε Παράρτημα Β) ότι οι ζητούμενοι δείκτες υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$m_{f\_L} = \frac{1}{\eta_{el\_NM} \cdot H_u} \qquad (3.1)$$

$$e_{p\_L} = e_{p\_NM} \qquad (3.2)$$

$$q_{th\_out\_L} = \frac{1}{PHR_{\_NM}} \qquad (3.3)$$

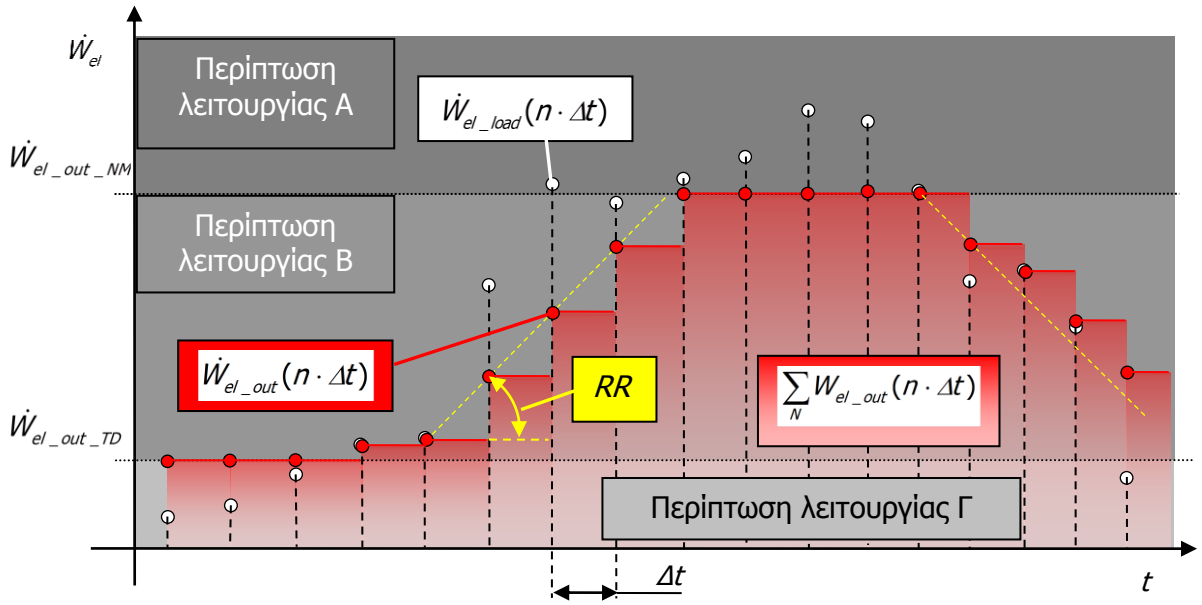
Η προσομοίωση μεταβαλλόμενης λειτουργίας προϋποθέτει γνώση της χρονικής μεταβολής της ηλεκτρικής ζήτησης ισχύος $\dot{W}_{el\_load}(t)$(αν η ενεργειακή ζήτηση αφορά θερμότητα, το αντίστοιχο μέγεθος είναι η θερμική ζήτηση ισχύος $\dot{Q}_{th\_load}(t)$). Έστω ότι τα δεδομένα της ενεργειακής απαίτησης είναι διαθέσιμα σε μορφή χρονοσειράς με βήμα Δt ($t=n\cdot\Delta t$ με $n=1…N$, $I=\Omega/\Delta t$) (Σχήμα 3.3).

Ο υπολογισμός των ζητούμενων δεικτών για κάθε χρονικό βήμα απαιτεί τα εξής τεχνικά δεδομένα:

- Τεχνικοί περιορισμοί συστήματος:
  - Μέγιστη (ονομαστική – Nominal) και ελάχιστη παραγόμενη ηλεκτρική ισχύς ($\dot{W}_{el\_out\_NM}$ και $\dot{W}_{el\_out\_TD}$ αντίστοιχα)

- Δείκτης ικανότητας κάλυψης των διακυμάνσεων του φορτίου (*RR*)

- Δεδομένα μερικής λειτουργίας. Ορίζεται ο συντελεστής φόρτισης του συστήματος $f(n\cdot\Delta t)$ ως ο λόγος $\frac{\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t)}{\dot{W}_{el\_out\_NM}}$:
  - Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης [$\eta_{el}(f(n\cdot\Delta t))$]
  - Συντελεστής εκπομπής αερίου ρύπου p [$e_p(f(n\cdot\Delta t))$]
  - Λόγος ηλεκτρισμού-θερμότητας [$PHR(f(n\cdot\Delta t))$]



Σχήμα 3.3 Απεικόνιση προσομοίωσης χρονικά μεταβαλλόμενης λειτουργίας

Προκειμένου να υπολογιστεί η ηλεκτρική ισχύς του συστήματος $\dot{W}_{el\_load}(n\cdot\Delta t)$ σε κάθε χρονικό βήμα $n\cdot\Delta t$, διακρίνονται οι εξής τρεις περιπτώσεις (Σχήμα 3.3), ανάλογα με το αν η μεταβαλλόμενη ενεργειακή απαίτηση υπερβαίνει ή όχι τη μέγιστη και την ελάχιστη απόδοση του συστήματος (Οι ακριβείς εξισώσεις υπολογισμού των ζητούμενων δεικτών παρατίθενται στο παράρτημα):

Α. $\dot{W}_{el\_load}(n\cdot\Delta t) > \dot{W}_{el\_out\_NM}$

Κατά την περίπτωση Α επιδιώκεται η μέγιστη παραγωγή ισχύος $\dot{W}_{el\_out\_NM}$. Η παραγωγή ισχύος $\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t)$ εξαρτάται από το αν το σύστημα είναι σε θέση εντός του χρονικού βήματος να αποδώσει στο τεχνικό μέγιστο $\dot{W}_{el\_out\_NM}$. Διακρίνονται συνεπώς οι εξής δυο υποπεριπτώσεις:

1. $\left[\frac{\dot{W}_{el\_out\_NM} - \dot{W}_{el\_out}([n-1]\cdot\Delta t)}{\Delta t}\right] < RR$

Είναι εφικτή η λειτουργία σε ονομαστική απόδοση και ισχύει ότι $\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t) = \dot{W}_{el\_out\_NM}$ και $f(n\cdot\Delta t) = 1$

2. $\left[\frac{\dot{W}_{el\_out\_NM} - \dot{W}_{el\_out}([n-1]\cdot\Delta t)}{\Delta t}\right] > RR$

Στο χρονικό βήμα το σύστημα αυξάνει την απόδοση ισχύος κατά *RR·Δt*, καθώς δεν είναι σε θέση να λειτουργήσει στη μέγιστη ισχύ εντός του Δt. Σε αυτή την υποπερίπτωση ισχύει ότι $\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t) = \left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] + RR\cdot\Delta t\right]$ και

$$f(n\cdot\Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] + RR\cdot\Delta t}{\dot{W}_{el\_out\_NM}}$$

Β. $\dot{W}_{el\_out\_TD} < \dot{W}_{el\_load}(n\cdot\Delta t) < \dot{W}_{el\_out\_NM}$

Επιδιώκεται η παραγωγή ισχύος ίση με την απαίτηση $\dot{W}_{el\_load}(n\cdot\Delta t)$. Σε αντιστοιχία με την περίπτωση Α, διακρίνονται δυο υποπεριπτώσεις λειτουργίας:

1. $\left[\frac{\left|\dot{W}_{el\_load}(n\cdot\Delta t) - \dot{W}_{el\_out}([n-1]\cdot\Delta t)\right|}{\Delta t}\right] < RR$

Η χρονική μεταβολή της ζήτησης βρίσκεται εντός του ορίου απόκρισης του συστήματος και ισχύει ότι $\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t) = \dot{W}_{el\_load}(n\cdot\Delta t)$ και

$$f(n\cdot\Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_load}(n\cdot\Delta t)}{\dot{W}_{el\_out\_NM}}$$

2. $\left[\frac{\left|\dot{W}_{el\_load}(n\cdot\Delta t) - \dot{W}_{el\_out}([n-1]\cdot\Delta t)\right|}{\Delta t}\right] > RR$

Η απόδοση ισχύος αυξάνεται ή μειώνεται κατά *RR·Δt*, ανάλογα με το αν παρατηρείται αύξηση ή μείωση της απαίτησης. Σε αυτή την υποπερίπτωση ισχύει: $\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t) = \left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] \pm RR\cdot\Delta t\right]$ και

$$f(n\cdot\Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] \pm RR\cdot\Delta t}{\dot{W}_{el\_out\_NM}}$$

Γ. $\dot{W}_{el\_out\_TD} > \dot{W}_{el\_load}(n\cdot\Delta t)$

Εξαρτάται από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του συστήματος και τις λειτουργικές απαιτήσεις το αν σε συνθήκες μειωμένης ζήτησης η λειτουργία θα διακοπεί ($\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t) = 0$) ή θα συνεχίσει επιδιώκοντας το τεχνικό ελάχιστο $\dot{W}_{el\_out\_TD}$.

1. Διακοπή λειτουργίας. Είναι σαφές ότι ισχύει $\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t) = 0$
2. Επιδίωξη τεχνικού ελάχιστου.

Αντίστοιχα με τις περιπτώσεις λειτουργίας Α και Β, διακρίνονται δυο υποπεριπτώσεις:

i. $$-\left[\frac{\dot{W}_{el\_out\_TD} - \dot{W}_{el\_out}([n-1]\cdot\Delta t)}{\Delta t}\right] < RR$$

Η επιδιωκόμενη μείωση της απόδοσης ισχύος είναι εφικτή εντός του χρονικού βήματος και ισχύει ότι: $\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t) = \dot{W}_{el\_out\_TD}$ και $f(n\cdot\Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_out\_TD}}{\dot{W}_{el\_out\_NM}}$

ii. $$-\left[\frac{\dot{W}_{el\_out\_TD} - \dot{W}_{el\_out}([n-1]\cdot\Delta t)}{\Delta t}\right] > RR$$

Στην «προσπάθεια» να επιτευχθεί η ελάχιστη παραγωγή ισχύος, η απόδοση μειώνεται κατά $RR\cdot\Delta t$. Ισχύει ότι: $\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t) = \left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] - RR\cdot\Delta t\right]$ και $f(n\cdot\Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] - RR\cdot\Delta t}{\dot{W}_{el\_out\_NM}}$

Η παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια συνολικού χρόνου λειτουργίας είναι ίση με $W_{el\_out\_L} = \sum_N W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)$, ενώ αντίστοιχα οι ζητούμενοι δείκτες υπολογίζονται από τους λόγους των αθροισμάτων:

$$m_{f\_L} = \frac{\sum_N M_f(n\cdot\Delta t)}{\sum_N W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)} \qquad (3.4)$$

$$e_{p\_L} = \frac{\sum_N E_p(n\cdot\Delta t)}{\sum_N W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)} \qquad (3.5)$$

$$q_{th\_L} = \frac{\sum_N Q_{th\_out}(n\cdot\Delta t)}{\sum_N W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)} \qquad (3.6)$$

3.2.2.2 Περιβαλλοντική αξιολόγηση

Το συγκεκριμένο τμήμα της μεθοδολογίας αποσκοπεί στην συγκριτική αξιολόγηση της περιβαλλοντικής συνιστώσας των εξεταζόμενων ενεργειακών συστημάτων. Εφαρμόζεται η μεθοδολογία της ΑΚΖ (Ανάλυσης Κύκλου Ζωής – §2.1), προσαρμοσμένη στο γενικότερο πλαίσιο της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνδυασμένης αξιολόγησης. Οι δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής των εξεταζόμενων συστημάτων αποτελούν τα περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης.

Προσαρμογή και εφαρμογή μεθόδου ΑΚΖ

Το αρχικό στάδιο εφαρμογής της ΑΚΖ (Προσδιορισμός σκοπού και αντικειμένου) καλύπτεται στο πρώτο σκέλος της προτεινόμενης μεθοδολογίας, εκτός από τη μέθοδο κατανομής των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε δυο ταυτόχρονα παραγόμενα ενεργειακά «προϊόντα» κατά

την περίπτωση της συμπαραγωγής θερμότητας και ηλεκτρισμού. Από τις μεθόδους κατανομής που απαντώνται στη βιβλιογραφία (Rosen, 2006) επιλέγεται η εξεργειακή μέθοδος (Παράρτημα Θ), της οποίας η εφαρμογή απαιτεί εκτός από τον ηλεκτρικό και θερμικό βαθμό απόδοσης και τις θερμοκρασίες περιβάλλοντος T_E, επιστροφής T_R και εξόδου T_O του εργαζόμενου μέσου που καλύπτει τα θερμικά φορτία.

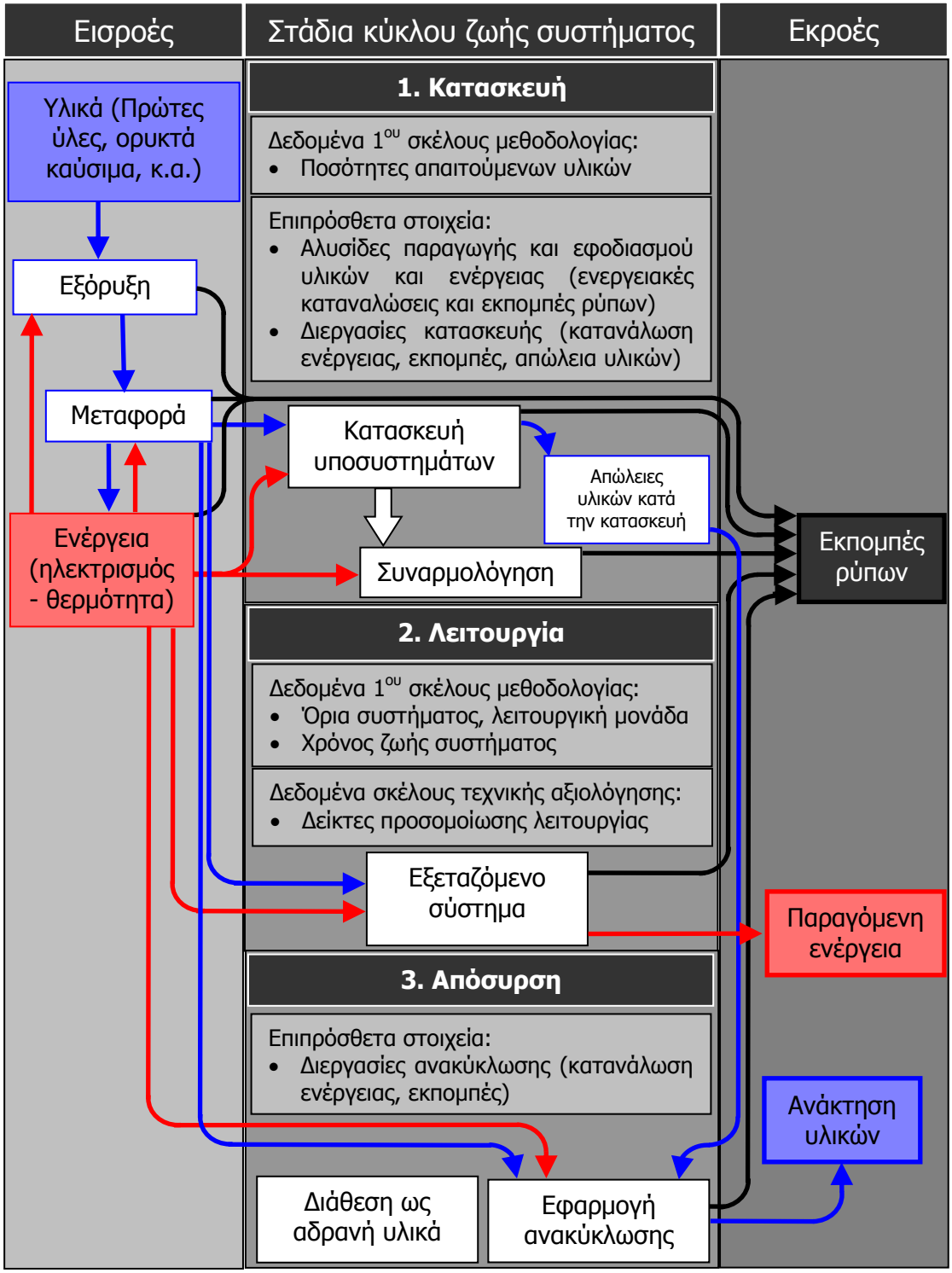
Ακολουθεί το στάδιο της απογραφής δεδομένων, όπου καταστρώνεται το συνολικό διάγραμμα ροών ενέργειας (κόκκινα βέλη σχήματος 3.4), υλικών (μπλε βέλη) και περιβαλλοντικών εκπομπών (μαύρα βέλη) για τα στάδια του κύκλου ζωής των εξεταζόμενων συστημάτων, ενώ παράλληλα οι επιμέρους κλάδοι των τριών ροών ποσοτικοποιούνται μέσω αναζήτησης και καταγραφής των απαιτούμενων δεδομένων. Ο κύκλος ζωής των συστημάτων αποτελείται από τρία γενικά στάδια (κατασκευή, λειτουργία και απόσυρση – Σχήμα 3.4), για την μοντελοποίηση των οποίων απαιτούνται επιπρόσθετα στοιχεία, που παρουσιάζονται ανά στάδιο στο σχήμα 3.4.

Οι περιορισμοί και οι προκλήσεις της αναζήτησης τεχνικών δεδομένων (§3.2.2.1) ισχύουν και σε αυτήν την περίπτωση, με τη διαφορά ότι η δυνατότητα εκτενούς χρήσης εμπορικών βάσεων δεδομένων ειδικά σχεδιασμένων για χρήση σε Αναλύσεις Κύκλου Ζωής διευκολύνει την ανεύρεση αξιόπιστων και κατάλληλων δεδομένων. Η μεθοδολογική προσέγγιση των επιμέρους σταδίων του κύκλου ζωής αναλύεται στις επόμενες παραγράφους.

Η μοντελοποίηση του σταδίου της κατασκευής αξιοποιεί στοιχεία που συγκεντρώθηκαν κατά το πρώτο στάδιο της μεθοδολογίας (αποτύπωση υποσυστημάτων και απαιτούμενες ποσότητες υλικών). Κατά την ποσοτικοποίση των αναγκών σε πρώτες ύλες λαμβάνονται υπόψη οι απώλειες κατά την κατασκευή των υποσυστημάτων. Παράλληλα με τις απαιτήσεις σε υλικά, καθορίζονται και οι ενεργειακές καταναλώσεις των διεργασιών κατασκευής και συναρμολόγησης του ενεργειακού συστήματος. Για κάθε ένα από τα χρησιμοποιούμενα υλικά καταστρώνεται η αλυσίδα παραγωγής και εφοδιασμού, που περιλαμβάνει τα στάδια της εξόρυξης και μεταφοράς, όπως επίσης και τις αντίστοιχες ενεργειακές καταναλώσεις. Η παραγωγή και μεταφορά της ενέργειας μοντελοποιείται μέσω αντίστοιχων αλυσίδων παραγωγής καυσίμων και ενεργειακής μετατροπής. Οι ρύποι που εκπέμπονται από κάθε διεργασία των αλυσίδων παραγωγής υλικών και ενέργειας (όπως και κατά την κατασκευή – συναρμολόγηση) καταχωρούνται ως εκροές και αποτελούν τη βάση υπολογισμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του πρώτου σταδίου του κύκλου ζωής.

Το αποτέλεσμα της επεξεργασίας των τεχνικών δεδομένων τροφοδοτεί την περιβαλλοντική μοντελοποίηση του σταδίου της λειτουργίας, καθορίζοντας εκτός από τις απαιτήσεις σε ενέργεια και υλικά και τις λειτουργικές εκπομπές ρύπων. Η συνολικά παραγόμενη ενέργεια χρησιμοποιείται ως βάση αναγωγής για τους ρύπους που καταγράφονται σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής. Επιπλέον, το αποτέλεσμα της λειτουργικής προσομοίωσης καθορίζει το αν

η παραγόμενη ενέργεια υπερκαλύπτει τις αντίστοιχες ανάγκες και καταγράφεται περιβαλλοντικό όφελος λόγω π.χ. πιθανών «εξαγωγών» ηλεκτρισμού στο κεντρικό δίκτυο και συνεπακόλουθα αποφυγής πρωτογενούς παραγωγής.



Σχήμα 3.4 Διάγραμμα ροής εφαρμογής μεθόδου ΑΚΖ

Μετά το πέρας του χρόνου ζωής του συστήματος, διακρίνονται δυο «οδεύσεις» των υλικών που το απαρτίζουν. Με δεδομένο ότι πρόκειται κατά κύριο λόγο για μέταλλα, γίνεται η

υπόθεση ενός ποσοστού του συνολικού βάρους το οποίο ανακτάται (με αντίστοιχη κατανάλωση υλικών, ενέργειας και εκπομπή ρύπων), ενώ το υπόλοιπο αποσύρεται ως αδρανές υλικό. Απαιτούνται συνεπώς στοιχεία σχετικά με τις διεργασίες ανακύκλωσης, προκειμένου να υπολογιστεί το περιβαλλοντικό κόστος (απευθείας εκπομπές) και όφελος (αποφυγή εκπομπών λόγω πρωτογενούς παραγωγής) της ανάκτησης των υλικών. Επιλέγεται η υπόθεση του «ανοιχτού βρόχου» ανακύκλωσης, όπου τα ανακτώμενα υλικά δεν επαναχρησιμοποιούνται κατά το στάδιο της κατασκευής (μειώνοντας τη σχετική απαίτηση), ως πιο ρεαλιστική από την υπόθεση του «κλειστού βρόχου».

Το αποτέλεσμα του σταδίου απογραφής δεδομένων αποτελείται από τις αναλυτικές εκπομπές ρύπων, συνοδευόμενες από σαφή καταγραφή της προέλευσής τους και ταξινομημένες ανά στάδιο κύκλου ζωής. Η μετάβαση από τις εκπομπές σε δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων επιτυγχάνεται στο στάδιο της εκτίμησης επιπτώσεων, μέσω εφαρμογής ειδικών μεθοδολογιών εκτίμησης επιπτώσεων. Στη βιβλιογραφία διατίθεται πλήθος μεθοδολογιών (ILCD, 2011) που αφορούν τις διαφορετικές πλευρές της συνολικής περιβαλλοντικής επίδοσης.

Η επιλογή των κατηγοριών επιπτώσεων που υπολογίζονται (και συνεπακόλουθα των περιβαλλοντικών κριτηρίων) εξαρτάται σε πρώτο στάδιο από το πλαίσιο της εφαρμογής που καθορίστηκε στο αρχικό στάδιο της μεθοδολογίας και τις τεχνικές λεπτομέρειες των εξεταζόμενων συστημάτων. Για παράδειγμα, αν στον κύκλο ζωής δεν διαπιστώνεται σημαντική χρήση βιομάζας ως καυσίμου δεν είναι σκόπιμο να εξεταστεί η κατηγορία επιπτώσεων «Ευτροφισμός», που αφορά στην χρήση λιπασμάτων για την καλλιέργεια. Επίσης, δεν εξετάζονται κατηγορίες επιπτώσεων που πιθανότατα απαιτούν μη διαθέσιμη λεπτομερή πληροφορία (π.χ. η κατηγορία «Τοξικότητα»). Το δεύτερο στάδιο επιλογής κατηγοριών επιπτώσεων είναι η κανονικοποίηση (normalization), όπου οι υπολογισθέντες περιβαλλοντικοί δείκτες συγκρίνονται με μια επίπτωση αναφοράς (π.χ. αντίστοιχος ετήσιος ευρωπαϊκός δείκτης) και «απορρίπτονται» ως μη σημαντικοί οι δείκτες που αποκλίνουν περισσότερο. Γενικεύοντας, γίνεται σαφές ότι η εφαρμογή της ΑΚΖ είναι επαναληπτική, κάτι που σημαίνει ότι τα αρχικά αποτελέσματα χρησιμοποιούνται αναδραστικά στην αναδιαμόρφωση μεθοδολογικών λεπτομερειών.

Παρ' όλες τις τεχνικές ιδιαιτερότητες των συστημάτων που αξιολογούνται περιβαλλοντικά, ο γενικός σκοπός της προτεινόμενης μεθοδολογίας καθιστά αναγκαία την – κατ' ελάχιστον – επιλογή δεικτών που να αφορούν:

- Τη συνολική ενεργειακή απαίτηση του κύκλου ζωής, όπου εκφράζεται η ενεργειακή αποδοτικότητα. Αν κριθεί σκόπιμο, η απαίτηση εστιάζεται στην κατανάλωση που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα.

- Την επιβάρυνση του φαινομένου του θερμοκηπίου, καθώς πρόκειται για την πλέον σημαντική περιβαλλοντική πλευρά.
- Τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των «όξινων» εκπομπών ρύπων, με έμφαση στα οξείδια του αζώτου.
- Τη συνολική απαίτηση σε πρώτες ύλες, εστιασμένη σε ορυκτά των οποίων η εξόρυξη χαρακτηρίζεται ως ενεργοβόρα.

Το τελικό στάδιο της εφαρμογής της προσαρμοσμένης μεθοδολογίας ΑΚΖ αφορά στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων, όπου αναδεικνύονται οι διεργασίες που επιβαρύνουν περισσότερο τους περιβαλλοντικούς δείκτες και προτείνονται πιθανές βελτιώσεις που μειώνουν τις σχετικές επιπτώσεις.

Πίνακας περιβαλλοντικών κριτηρίων

Το αποτέλεσμα της περιβαλλοντικής αξιολόγησης αποτελείται από τους περιβαλλοντικούς δείκτες που υπολογίστηκαν κατά την εφαρμογή της ΑΚΖ. Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει την τήρηση των γενικών προϋποθέσεων των κριτηρίων αξιολόγησης (§ 3.2.2.1), καθώς δεν προέρχονται από πρωτογενή αναζήτηση στοιχείων (όπως τα τεχνικά κριτήρια), αλλά είναι αποτέλεσμα ενός σαφούς μεθοδολογικού πλαισίου. Προκειμένου να ενσωματωθεί η ασάφεια των περιβαλλοντικών επιπτώσεων στις τιμές των αντίστοιχων δεικτών, υπολογίζονται διάφορες περιπτώσεις όπου μεταβάλλονται βασικές παράμετροι, έτσι ώστε – σε αντιστοιχία με τα τεχνικά κριτήρια – οι περιβαλλοντικοί δείκτες να δίδονται με τη μορφή ασαφών αριθμών (κεντρική τιμή και εύρος διακύμανσης). Τυπικά περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης που απαντώνται στη βιβλιογραφία (Wang et al., 2009) είναι οι εκπομπές CO_2, NOx, CO, SO_2 και σωματιδίων (χωρίς να αποσαφηνίζεται αν αφορούν κύκλο ζωής ή λειτουργία) και η χρήση γης (υιοθετείται κατά κύριο λόγο σε ΑΚΖ βιοκαυσίμων).

3.2.2.3 Οικονομική αξιολόγηση

Κατ' αντιστοιχία με τις δυο προηγούμενες επιμέρους αξιολογήσεις, σκοπός της οικονομικής αξιολόγησης είναι η εκτίμηση της οικονομικής αποδοτικότητας των εξεταζόμενων ενεργειακών συστημάτων.

Καθορισμός οικονομικών κριτηρίων

Η επιλογή των οικονομικών κριτηρίων εξαρτάται από το είδος και την ποσότητα της διαθέσιμης πληροφορίας. Κατ' ελάχιστον, απαιτείται το κόστος εγκατάστασης C_{inst} και το κόστος λειτουργίας του κύκλου ζωής του συστήματος C_{op_L}. Το κόστος λειτουργίας συμπεριλαμβάνει το κόστος συντήρησης $C_{op\_maint\_L}$ και καυσίμου $C_{op\_f\_L}$. Στην περίπτωση που είναι διαθέσιμα αποτελέσματα τεχνοοικονομικής ανάλυσης, αξιοποιούνται οι αντίστοιχοι δείκτες (Frangopoulos, 2001), όπως η περίοδος απόσβεσης *PP*, η καθαρή παρούσα αξία της επένδυσης *NPV* και ο εσωτερικός βαθμός απόδοσης *IRR*. Σε κάθε περίπτωση επιδιώκεται να

τηρούνται οι γενικές προϋποθέσεις των κριτηρίων αξιολόγησης, όπως αναλύθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους (§3.2.2.1 και 2):

- Πληρότητα. Τα οικονομικά κριτήρια οφείλουν να αναφέρονται αφ' ενός στο σύνολο των υποσυστημάτων και αφ' ετέρου – ει δυνατόν – σε όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του συστήματος.
- Σαφήνεια. Είναι απαραίτητη η σαφής περιγραφή της πληροφορίας που φέρει κάθε οικονομικό κριτήριο, όπως και των υποθέσεων που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό της (π.χ. επιτόκια αναγωγής σε παρούσα αξία).
- Αυτονομία. Σε αντιστοιχία με τα τεχνικά κριτήρια, η πληροφορία που φέρει κάθε οικονομικός δείκτης δεν πρέπει να εμπεριέχεται σε παρεμφερές κριτήριο (π.χ. ταυτόχρονη ύπαρξη κριτηρίων «κόστος καυσίμου» και «συνολικού κόστους λειτουργίας»).

Η οικονομική φύση των κριτηρίων και – κατά κύριο λόγο – η επιδιωκόμενη χρήση αποτελεσμάτων τεχνοοικονομικής μελέτης εξασφαλίζει την τήρηση των υπόλοιπων προϋποθέσεων (μετρησιμότητα, ικανός όγκος πληροφορίας και απλότητα).

Αναζήτηση οικονομικών δεδομένων

Οι προκλήσεις της συλλογής αξιόπιστων και αντιπροσωπευτικών οικονομικών στοιχείων είναι αντίστοιχες με αυτές που αναλύονται στην παράγραφο 3.2.2.1. Ακολουθείται συνεπώς μια αντίστοιχη προσέγγιση κριτικής αντιμετώπισης των διαθέσιμων στοιχείων, η οποία καταλήγει στον καθορισμό κεντρικής τιμής και εύρους διακύμανσης των οικονομικών κριτηρίων που θα επιλεγούν. Προφανώς αξιοποιούνται αποτελέσματα της επεξεργασίας των τεχνικών δεδομένων (Ειδική κατανάλωση καυσίμου συνολικού χρόνου λειτουργίας - m_{f_L}) για τον υπολογισμό μέρους του λειτουργικού κόστους.

Πίνακας οικονομικών κριτηρίων

Η κατάρτιση και συμπλήρωση του πίνακα των οικονομικών κριτηρίων είναι το αποτέλεσμα της συλλογής δεδομένων, ο οποίος περιλαμβάνει τα επιλεχθέντα οικονομικά κριτήρια, τις κεντρικές τιμές, τα όρια διακύμανσης και τις αντίστοιχες πηγές.

3.2.3 Συνδυασμός επιμέρους αξιολογήσεων

Το τρίτο στάδιο της μεθοδολογίας αποσκοπεί στη δόμηση ενός εργαλείου υποβοήθησης της απόφασης επιλογής ενός από τα υποψήφια συστήματα που τέθηκαν υπό αξιολόγηση. Ο βασικός στόχος εντοπίζεται στον συνδυασμό των τριών «ροών 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.

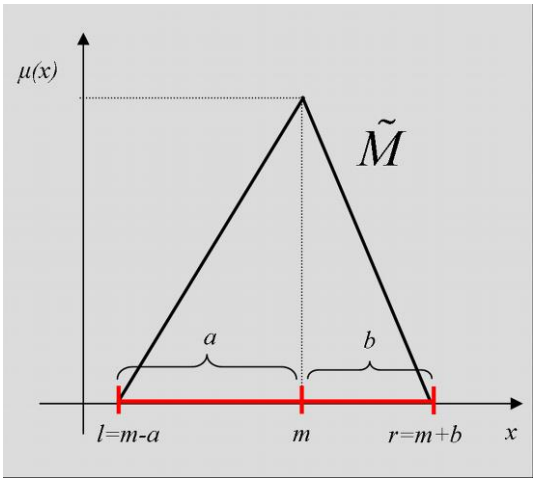
Η μορφή του τελικού αποτελέσματος της μεθοδολογίας εξαρτάται από το επίπεδο ασάφειας των υποκειμενικών προτεραιοτήτων των αποφασιζόντων. Όταν η διαδικασία λήψης απόφασης βρίσκεται σε αρχικό στάδιο, είναι πιο πιθανό να μην είναι εφικτή η ποσοτικοποίηση των προτεραιοτήτων της απόφασης μέσω καθορισμού συντελεστών βαρύτητας (§ 2.2.1.2) για κάθε ένα από τα κριτήρια αξιολόγησης. Σε αυτή την περίπτωση 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. Προκειμένου να αποφευχθεί ένα υπερβολικά ασαφές και μικρής χρησιμότητας διάγραμμα, τα δεδομένα των κριτηρίων αξιολόγησης δεν εισάγονται ως ασαφείς αριθμοί, αλλά υπολογίζεται χρησιμοποιείται το Κέντρο της Επιφάνειας (Center Of Area – COA §3.2.3.1) κάθε τριγωνικού αριθμού.

Αν είναι εφικτός ο προσδιορισμός του συντελεστή βαρύτητας κάθε κριτηρίου μέσω ασαφών αριθμών (κεντρική τιμή και εύρος διακύμανσης), εφαρμόζεται η μεθοδολογία ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπως αναλύεται στην αντίστοιχη παράγραφο (§3.2.3.3) . Τα κριτήρια αξιολόγησης εισάγονται με την ασαφή τους μορφή και το τελικό αποτέλεσμα αναπαριστά την κατάταξη της συνδυασμένης αξιολόγησης με ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας.

3.2.3.1 Αντικειμενική συνιστώσα συνδυασμένης αξιολόγησης

Όπως αναφέρθηκε στις αντίστοιχες παραγράφους, τα αποτελέσματα των επιμέρους αξιολογήσεων αποδίδονται με τη μορφή ασαφών αριθμών $\tilde{M} = (m, a, b)$ (Σχήμα 3.5 – Εξίσωση 3.7) προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η ασάφεια του καθορισμού τους.

$$\mu(x) = \begin{cases} 0, & \alpha\nu \quad x \le m - \alpha \quad \acute{\eta} \quad m + b \le x \\ 1 - \dfrac{m - x}{\alpha}, & \alpha\nu \quad m - \alpha < x < m \\ 1, & \alpha\nu \quad x = m \\ 1 - \dfrac{x - m}{b}, & \alpha\nu \quad m < x < m + b \end{cases} \qquad (3.7)$$



Σχήμα 3.5 Απεικόνιση του τριγωνικού αριθμού $\tilde{M} = (m, a, b)$

Με $\mu(x)$ συμβολίζεται η γραμμική συνάρτηση συμμετοχής, με m η κεντρική τιμή κάθε κριτηρίου αξιολόγησης και με a, b η αρνητική και θετική διακύμανση. Η αντικειμενική συνιστώσα της συνδυασμένης αξιολόγησης αποτυπώνεται στον πίνακα των κριτηρίων αξιολόγησης (Πίνακας Απόφασης – Decision Matrix

$\tilde{DM}(i,j)$). Επισημαίνεται ότι ακολουθείται ο συμβολισμός της πολυκριτηριακής μεθοδολογίας PROMETHEE (Παράρτημα Α), όπου *A* είναι το σύνολο των *J* συστημάτων προς αξιολόγηση [$A = \{a_1,\ldots,a_J\}$: a_j $(j = 1,\ldots,J)$] και *F* το σύνολο των *I* κριτηρίων αξιολόγησης [$F = \{f_1,\ldots,f_I\}$: f_i $(i = 1,\ldots,I)$]. Ο δείκτης «~» χρησιμοποιείται για να διαχωριστούν οι ασαφείς από τους απόλυτους αριθμούς.

$$\tilde{DM}(i,j) = \begin{pmatrix} \tilde{f}_1(a_1) & \ldots & \tilde{f}_1(a_J) \\ \vdots & & \vdots \\ \tilde{f}_i(a_1) & \ldots & \tilde{f}_i(a_J) \\ \vdots & & \vdots \\ \tilde{f}_I(a_1) & \ldots & \tilde{f}_I(a_J) \end{pmatrix} \qquad (3.8)$$

Με τους δείκτες $\tilde{f}_i(a_j) = (f_{i,m}(a_j), f_{i,\alpha}(a_j), f_{i,b}(a_j))$ συμβολίζονται οι κεντρικές τιμές και τα εύρη διακύμανσης της επίδοσης του συστήματος a_j αναφορικά με το κριτήριο f_i.

Στην περίπτωση κατά την οποία διαπιστώνεται πλήρης αβεβαιότητα στον καθορισμό των συντελεστών βαρύτητας των κριτηρίων f_i (§ 3.2.3.3) είναι απαραίτητη η μετατροπή των ασαφών δεδομένων $\tilde{f}_i(a_j)$ σε απόλυτα (αποασαφοποίηση), προκειμένου να εισαχθούν στον αλγόριθμο πολυκριτηριακής αξιολόγησης. Η τεχνητή «μείωση της ασάφειας» της αντικειμενικής συνιστώσας οδηγεί μεν σε απώλεια πληροφορίας (Deng, 2009), αλλά κρίνεται αναγκαία, καθώς στην αντίθετη περίπτωση το τελικό αποτέλεσμα της μεθοδολογίας θα ήταν υπέρμετρα ασαφές και ελάχιστα πρόσφορο για χρήσιμα συμπεράσματα. Η αποασαφοποίηση επιτυγχάνεται μέσω του τύπου υπολογισμού του Κέντρου Επιφάνειας *COA* και απλοποιείται λόγω χρήσης τριγωνικών αριθμών ως εξής:

$$COA(\tilde{f}_i(a_j)) = \frac{\int_{f_{i,l}(a_j))}^{f_{i,r}(a_j)} x \cdot \mu_{\tilde{f}_i(a_j)}(x)dx}{\int_{f_{i,l}(a_j)}^{f_{i,r}(a_j)} \mu_{\tilde{f}_i(a_j)}(x)dx} \quad \rightarrow$$

$$COA(\tilde{f}_i(a_j)) = \frac{3 \cdot f_{i,m}(a_j) - f_{i,\alpha}(a_j) + f_{i,b}(a_j)}{3} \qquad (3.9)$$

Ισχύει ότι $f_{i,l}(a_j) = f_{i,m}(a_j) - f_{i,\alpha}(a_j)$ και $f_{i,r}(a_j) = f_{i,m}(a_j) + f_{i,b}(a_j)$, ενώ ο πίνακας *DM* πλέον δεν περιέχει ασαφείς αριθμούς, αλλά τα κέντρα επιφάνειας των $\tilde{f}_i(a_j)$:

$$DM(i,j) = [COA(\tilde{f}_i(a_j))] \qquad (3.10)$$

3.2.3.2 Υποκειμενική συνιστώσα συνδυασμένης αξιολόγησης

Η ενσωμάτωση του υποκειμενισμού των ατόμων/ομάδων που αποφασίζουν αποτελεί κύριο στοιχείο ενός εργαλείου υποβοήθησης απόφασης βασισμένου στη μεθοδολογία της πολυκριτηριακής ανάλυσης. Η μοντελοποίηση της υποκειμενικής συνιστώσας ή με άλλα

λόγια των προτεραιοτήτων που θα επηρεάσουν την τελική επιλογή επιτελείται κατά την εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE μέσω του καθορισμού των συντελεστών βαρύτητας w_i και των κατωφλίων αδιαφορίας και προτίμησης q_i και p_i - ή εναλλακτικά του συντελεστή σ_i (ανάλογα με την επιλογή της συνάρτησης προτίμησης $P_i(d_i^{j,j'})$ για κάθε κριτήριο i – βλ. Παράρτημα Α).

Σύμφωνα με τις εφαρμογές της μεθόδου PROMETHEE που καταγράφονται στη βιβλιογραφία, ο καθορισμός των συντελεστών βαρύτητας αποτελεί την κύρια πρόκληση μοντελοποίησης της υποκειμενικότητας (§2.2.1.2), καθώς τα κατώφλια αδιαφορίας και προτίμησης είναι αποδεκτό να καθορίζονται μέσω εμπειρικών κανόνων (Kapepula et al., 2007; Oberschmidt et al., 2010). Η βασική αιτία της σημαντικότητας που αποδίδεται στους συντελεστές βαρύτητας εντοπίζεται στην αδυναμία σαφούς καθορισμού τους, ακόμα και από τους ίδιους τους αποφασίζοντες (§2.2.1.2).

Το μεγάλο εύρος της αβεβαιότητας σχετικά με τον καθορισμό των συντελεστών βαρύτητας αντιμετωπίζεται από την παρούσα μεθοδολογία μέσω μιας ευέλικτης προσέγγισης, ικανής να διαχειριστεί περιπτώσεις πλήρους, μερικής ή και – ιδανικά – απουσίας αδυναμίας σαφούς καθορισμού.

Προκειμένου να εφαρμοστούν οι δυο εναλλακτικές μεθοδολογικές οδεύσεις (Σχήμα 3.1) που αναλύονται στη σχετική παράγραφο (§3.2.3.3), απαιτείται κατάλληλη διαμόρφωση των δεδομένων που εκφράζουν την υποκειμενική συνιστώσα της αξιολόγησης. Στην περίπτωση μερικής αβεβαιότητας σχετικά με τους συντελεστές βαρύτητας, αυτοί εκφράζονται μέσω ασαφών αριθμών: $\tilde{w}_i = (w_{i,m}, w_{i,\alpha}, w_{i,b})$.

Η κατάσταση πλήρους αδυναμίας προσδιορισμού συντελεστών βαρύτητας οδηγεί στην εφαρμογή της πολυκριτηριακής μεθοδολογίας για το σύνολο των πιθανών συνδυασμών των w_i, όπου λαμβάνουν τιμές εντός του διαστήματος [0,1] και ισχύει ότι $\sum_{i=1}^{I} w_i = 1$. Η μαθηματική προσέγγιση είναι μεν εφικτή, αλλά όταν I>4 είναι αδύνατη η γεωμετρική απεικόνιση των αποτελεσμάτων. Για I=2 διαπιστώνεται ότι ο χώρος απεικόνισης των λύσεων (του επικρατούντος συστήματος) είναι ευθεία, για I=3 επίπεδο και για I=4 στερεό. Με δεδομένο ότι το πλήθος των κριτηρίων αξιολόγησης αναμένεται σαφώς μεγαλύτερο, αξιοποιείται η μεθοδολογική ομαδοποίηση των κριτηρίων σε τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά, ώστε πλέον να εξεταστούν οι πιθανοί συνδυασμοί των συντελεστών βαρύτητας των ομαδοποιημένων κριτηρίων. Εντός κάθε ομάδας, στα κριτήρια αξιολόγησης μπορεί να αποδοθεί ένας συντελεστής σημαντικότητας (COI_i - Coefficient Of Importance, με πεδίο τιμών 1 (μικρή σημαντικότητα) – 10 (μεγάλη σημαντικότητα)) προκειμένου να υπολογιστούν τα w_i:

Τεχνικά κριτήρια: $w_{T,i} = w_T \cdot \frac{COI_{T,i}}{\sum_{i=1}^{I_T} COI_{T,i}}$ (3.11)

Περιβαλλοντικά κριτήρια: $w_{En,i} = w_{En} \cdot \frac{COI_{En,i}}{\sum_{i=1}^{I_{En}} COI_{En,i}}$ (3.12)

Οικονομικά κριτήρια: $w_{Ec,i} = w_{Ec} \cdot \frac{COI_{Ec,i}}{\sum_{i=1}^{I_{Ec}} COI_{Ec,i}}$ (3.13)

Με w_T, w_{En} και w_{Ec} συμβολίζονται οι συντελεστές βαρύτητας των τριών ομάδων κριτηρίων και με I_T, I_{En} και I_{Ec} τα πλήθη των τεχνικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών κριτηρίων αντίστοιχα. Ισχύει ότι $w_T + w_{En} + w_{Ec} = 1$ και $I_T + I_{En} + I_{Ec} = I$. Ισχύει επίσης ότι $\sum_{i=1}^{I_T} w_{T,i} = w_T$ (προφανώς και για τις άλλες δυο ομάδες κριτηρίων). Η ουδέτερη αντιμετώπιση των κριτηρίων εντός κάθε ομάδας συνεπάγεται κοινό COI_i, όπου αποδίδει κοινά βάρη $w_{T,i} = \frac{w_T}{I_T}$ (με αντιστοιχία στα περιβαλλοντικά και οικονομικά κριτήρια).

Με αυτή την προσέγγιση μπορεί να μειώνεται το εύρος των συνδυασμών των w_i που λαμβάνονται υπόψη, αλλά εξασφαλίζεται η εποπτική απεικόνιση του αποτελέσματος της αξιολόγησης. Για τον καθορισμό των κατωφλίων αδιαφορίας και προτίμησης αξιοποιούνται δεδομένα και εμπειρικοί κανόνες από τη σχετική βιβλιογραφία (Kapepula et al., 2007). Η αποφυγή χρήσης ασαφών κατωφλίων υποστηρίζεται από τους κινδύνους που εμπεριέχει ο πολλαπλασιασμός ασαφών αριθμών (π.χ. υπερβολική ασάφεια (Ribeiro, 1996) και αναπόφευκτη απώλεια πληροφορίας λόγω προσεγγίσεων (Dubois and Prade, 1979; Hanss, 2005)), όπως επίσης και από το μη σημαντικό μεθοδολογικό όφελος.

3.2.3.3 Ο αλγόριθμος πολυκριτηριακής αξιολόγησης «Π.Υ.Θ.Ι.Α» (Πολυκριτηριακή Υποστηρικτική Θεωρία αποφάσεων σε περΙβάλλον Ασάφειας)

Η εφαρμογή της πολυκριτηριακής αξιολόγησης αποτελεί το κεντρικό σημείο του τρίτου σταδίου της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Ο αλγόριθμος αναπτύχθηκε με βάση την μέθοδο PROMETHEE (Παράρτημα Α) προκειμένου να εκμεταλλευτεί τα μεθοδολογικά πλεονεκτήματα που ενσωματώνει (§2.2.1). Οι μεθοδολογικές επεκτάσεις και αναδιαμορφώσεις που αναπτύχθηκαν συνοψίζονται ως εξής:

1. Καθορισμός εναλλακτικών μεθοδολογικών οδεύσεων.

Όπως διατυπώθηκε και στις προηγούμενες παραγράφους, η προτεινόμενη μεθοδολογία διαχειρίζεται με ευελιξία το εύρος της ασάφειας όσον αφορά τον καθορισμό των

υποκειμενικών προτεραιοτήτων κατά την επιλογή του επικρατούντος συστήματος. Προκειμένου να είναι εφικτή η προσέγγιση λύσης ανεξάρτητα από το αν είναι εφικτός η όχι ο – έστω και ασαφής – καθορισμός των συντελεστών βαρύτητας, αναπτύχθηκαν δυο εναλλακτικές μεθοδολογικές οδεύσεις, οι οποίες ακολουθούνται ανάλογα με το αν διαπιστώνεται πλήρης ή μερική αβεβαιότητα κατά τον καθορισμό της υποκειμενικότητας. Τα μεθοδολογικά στάδια που αποτελούν επεκτάσεις της PROMETHEE απεικονίζονται με σκούρο γκρίζο χρώμα στα διαγράμματα ροής των σχημάτων 3.6 και 3.8, αντίστοιχα για τις δυο εναλλακτικές οδεύσεις.

2. Αναδιαμόρφωση εξισώσεων αρχικής πολυκριτηριακής μεθοδολογίας.

Η διατύπωση των εναλλακτικών μεθοδολογικών οδεύσεων καθιστά αναγκαία την αναδιαμόρφωση των αρχικών εξισώσεων υπολογισμού είτε λόγω «σάρωσης» των πιθανών συνδυασμών των συντελεστών βαρύτητας (Σχήμα 3.6) είτε λόγω χρήσης ασαφών αριθμών (Σχήμα 3.8). Τα μεθοδολογικά στάδια όπου χρησιμοποιούνται οι αναδιαμορφωμένες εξισώσεις της μεθόδου PROMETHEE απεικονίζονται με ανοιχτό γκρίζο χρώμα στα διαγράμματα ροής των σχημάτων 3.6 και 3.8, αντίστοιχα για τις δυο εναλλακτικές οδεύσεις.

3. Επιμέρους επεκτάσεις ανά μεθοδολογική όδευση

i. Πλήρης αβεβαιότητα καθορισμού υποκειμενικότητας

- Μέθοδος «σάρωσης» πιθανών συνδυασμών συντελεστών βαρύτητας

Με δεδομένο ότι δεν είναι γνωστοί οι συντελεστές βαρύτητας, υπολογίζονται μέσω επαναληπτικής διαδικασίας όλες οι ροές προτίμησης $\varphi(a_j)$ για κάθε συνδυασμό (w_T, w_{En}, w_{Ec}) (Σχήμα 3.6).

- Απεικόνιση λύσεων στον «χώρο απόφασης».

Η επαναληπτική διαδικασία έχει ως αποτέλεσμα N_w κατατάξεις των ανταγωνιστικών συστημάτων. Η απεικόνιση των $N_w \cdot J$ ροών για κάθε σύστημα θα ήταν ιδιαίτερα πολύπλοκη, χωρίς να συνεισφέρει στην αμεσότητα του τελικού αποτελέσματος. Γι' αυτό το λόγο, επιλέγεται να απεικονιστεί μόνο το επικρατέστερο σύστημα εντός του «χώρου απόφασης» (Σχήμα 3.6) που καλύπτει το σύνολο των πιθανών συνδυασμών (w_T, w_{En}, w_{Ec}) και αναδεικνύει τις περιοχές επικράτησης των διαφόρων συστημάτων. Η ύπαρξη τριών ομάδων κριτηρίων οδήγησε στην υιοθέτηση ενός χώρου απεικόνισης λύσεων τριγωνικής μορφής (ακολουθώντας αντίστοιχες περιπτώσεις στη βιβλιογραφία (Hofsteter et al., 1999; Ribeiro et al., 2008)), όπου κάθε εσωτερικό σημείο αντιστοιχεί σε ένα συνδυασμό (w_T, w_{En}, w_{Ec}) .

ii. Μερική αβεβαιότητα καθορισμού υποκειμενικότητας

- Ασαφής κατάταξη ανταγωνιστικών συστημάτων.

Ο στόχος της χρησιμοποίησης ασαφών δεδομένων προκειμένου να επιτευχθεί η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας καθιστά την κατάταξη των συστημάτων μη τετριμμένη, καθώς το αποτέλεσμα (συνολικές ροές $\varphi(a_j)$) δεν είναι απόλυτοι, αλλά ασαφείς αριθμοί με

πιθανές επικαλύψεις. Μια ευρέως χρησιμοποιούμενη προσέγγιση είναι αυτή της «αποασαφοποίησης» (defuzzification), που αφορά τη μετατροπή των ασαφών (fuzzy) αριθμών σε απόλυτους (crisp), έτσι ώστε να καθίσταται εφικτή η ανάλυση ευαισθησίας των αποτελεσμάτων (Geldermann et al., 2000). Οι Deng et al.(2000) αναδεικνύουν ως μια από τις πλέον «συνεπείς» (consistent) μεθόδους αποασαφοποίησης τη μέθοδο COA (Εξίσωση 3.9), η οποία χρησιμοποιείται από τους Geldermann et al. (2000) και Goumas and Lygerou (2000)

Ωστόσο, η πρόσφατη ανασκόπηση του Deng (2009), επισημαίνει το μεθοδολογικό κίνδυνο της απώλειας πληροφορίας μέσω της αποασαφοποίσης, κάτι που επιχειρείται να αντιμετωπιστεί μέσω εφαρμογής αλγόριθμων ασαφούς κατάταξης (Lee-Kwang and Jee-Hyong, 1999). Στην μεθοδολογία που προτείνεται στην παρούσα διατριβή υιοθετείται η μέθοδος ασαφούς κατάταξης των Lee-Kwang και Jee-Hyong (1999), προκειμένου ακριβώς να αποφευχθεί απώλεια πληροφορίας, χωρίς να διακινδυνεύεται η συνέπεια της τελικής κατάταξης,

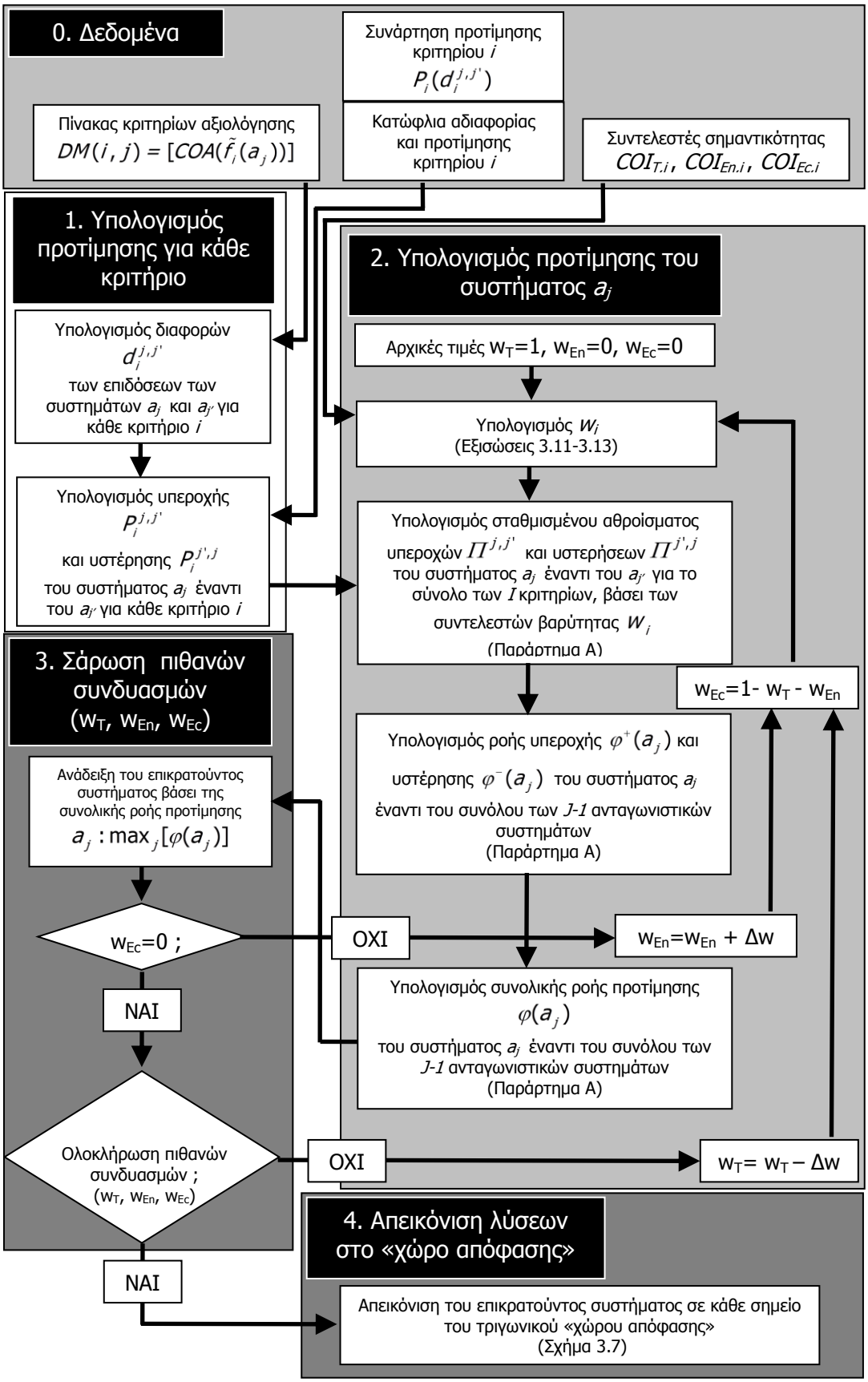
- Ανάλυση αβεβαιότητας ασαφούς κατάταξης.

Μέσω της αποφυγής της αποασαφοποίησης διατηρήθηκε μεν η πληροφορία των ορίων διακύμανσης του αποτελέσματος, αλλά η κατάταξη των συστημάτων δεν παρέχει σαφή εικόνα της επικράτησης ενός συστήματος έναντι των υπολοίπων, λόγω των επικαλύψεων των ασαφών ροών $\tilde{\varphi}(a_j)$. Η ενσωμάτωση της προτεινόμενης μεθόδου υπολογισμού της αξιοπιστίας κάθε καταταγμένου ζεύγους απαντά στο ερώτημα: «πόσο αξιόπιστη είναι δήλωση ότι το σύστημα a_j είναι επικρατέστερο του $a_{j'}$». Επιπρόσθετα υπολογίζεται η αξιοπιστία της συνολικής κατάταξης, της οποίας η αύξηση (αν συγκριθεί με την αρχική μεθοδολογία οπού δεν λαμβάνεται υπόψη η ασάφεια των κριτηρίων αξιολόγησης) καταδεικνύει το όφελος της προτεινόμενης ασαφούς μεθοδολογίας.

Στις ακόλουθες παραγράφους αναλύονται οι δυο εναλλακτικές μεθοδολογικές οδεύσεις που συνιστούν τον αλγόριθμο πολυκριτηριακής αξιολόγησης «Π.Υ.Θ.Ι.Α. - Πολυκριτηριακή Υποστηρικτική Θεωρία αποφάσεων σε Περιβάλλον Ασάφειας»

Εφαρμογή ασαφούς πολυκριτηριακής αξιολόγησης σε συνθήκες πλήρους αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικότητας.

Η διαχείριση της πλήρους αβεβαιότητας όσον αφορά τον καθορισμό των συντελεστών βαρύτητας επιτελείται μέσω επαναλήψεων της μεθόδου PROMETHEE (Παράρτημα Α) για κάθε συνδυασμό (w_T, w_{En}, w_{Ec}) και απεικόνιση του επικρατούντος συστήματος στο «χώρο απόφασης» που προκύπτει από την επαναληπτική διαδικασία. Το διάγραμμα ροής της μεθοδολογικής προσέγγισης απεικονίζεται στο σχήμα 3.6, όπου το ανοιχτό γκρίζο χρώμα αντιστοιχεί σε αναδιαμόρφωση της μεθόδου PROMETHEE και το σκούρο γκρίζο στις μεθοδολογικές επεκτάσεις που προτείνονται.



Σχήμα 3.6 Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης σε συνθήκες πλήρους αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικότητας

0. Δεδομένα

Η μορφή και το είδος των απαιτούμενων δεδομένων για την αντικειμενική και υποκειμενική συνιστώσα του προβλήματος αξιολόγησης απεικονίζονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.6 και περιγράφονται στις παραγράφους 3.2.3.1 και 3.2.3.2 αντίστοιχα.

1. Υπολογισμός προτίμησης του συστήματος a_j

Αξιοποιούνται οι αρχικές εξισώσεις της PROMETHEE (Παράρτημα Α), με τη διαφορά ότι οι συντελεστές βαρύτητας w_i υπολογίζονται εκ νέου σε κάθε υπολογιστικό βήμα βάσει των εξισώσεων (3.11 – 3.13) (Σχήμα 3.6).

2. «Σάρωση» πιθανών συνδυασμών (w_T, w_{En}, w_{Ec})

Ορίζοντας την αρχική τιμή του συνδυασμού συντελεστών (w_T, w_{En}, w_{Ec}) = (1, 0, 0) και το βήμα «σάρωσης» Δw, υπολογίζονται οι N_w κατατάξεις των J συστημάτων βάσει των συνολικών ροών προτίμησης $\varphi(a_j)$. Το πλήθος των απαραίτητων επαναλήψεων N_w καθορίζεται από το βήμα Δw, μέσω της εξίσωσης:

$$N_w = \sum_{n_w=1}^{\frac{1}{\Delta w}} n_w \;\rightarrow\; N_w = \frac{\frac{1}{\Delta w}\cdot\left(\frac{1}{\Delta w}+1\right)}{2} = \frac{\Delta w + 1}{2\cdot\left(\Delta w\right)^2} \qquad (3.14)$$

Προκειμένου να επιτευχθεί επαρκής λεπτομέρεια κατά την «σάρωση» των πιθανών τιμών, χωρίς ταυτόχρονα να επιβαρύνεται αναίτια ο υπολογιστικός χρόνος, η τιμή του Δw προτείνεται να βρίσκεται στο διάστημα (0,01 – 0,1).

3. Απεικόνιση λύσεων στο «χώρο απόφασης»

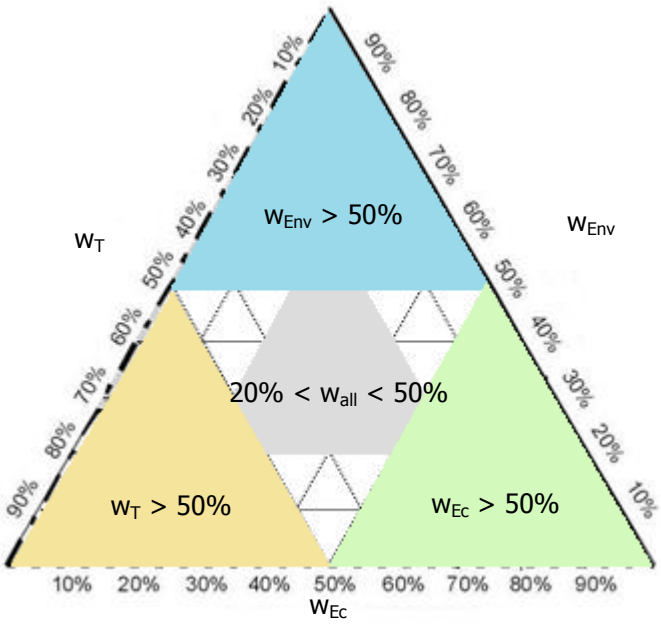
Η ύπαρξη μεγάλου πλήθους αποτελεσμάτων και η επιδίωξη ενός διαγράμματος εποπτικής απεικόνισης του συνόλου των πιθανών συνδυασμών συντελεστών βαρύτητας, οδήγησαν αφενός στην παρουσίαση μόνο του επικρατούντος συστήματος για κάθε κατάταξη και αφετέρου στην υιοθέτηση ενός ισόπλευρου τριγωνικού διαγράμματος απεικόνισης των N_w περιπτώσεων (Σχήμα 3.7).

Η συγκεκριμένη μορφή διαγράμματος απαντάται ευρέως στη βιβλιογραφία (Hofsteter et al., 1999; Ribeiro et al., 2008), καθώς παρέχει μια συνολική και εποπτική εικόνα του «χώρου απόφασης», καθιστώντας μη αναγκαία την ανάλυση σεναρίων για διάφορους συντελεστές βαρύτητας. Κάθε μια από τις τρεις πλευρές αντιστοιχεί στους συντελεστές βαρύτητας w_T, w_{En} και w_{Ec}. Διαπιστώνονται τρία «κέντρα βάρους απόφασης» (τρεις άκρες πλευρών), τα οποία αναπαριστούν τις ακραίες περιπτώσεις κατά τις οποίες λαμβάνεται υπόψη μόνο μία από τους τρεις αντικειμενικές συνιστώσες του προβλήματος αξιολόγησης (τεχνική, περιβαλλοντική και οικονομική).

Τα εσωτερικά σημεία του τριγωνικού διαγράμματος αντιστοιχούν σε πιθανή τριάδα συντελεστών βαρύτητας. Εντός του τριγωνικού διαγράμματος διακρίνονται οι εξής περιοχές, που αντιστοιχούν σε διαφορετικές προτεραιότητες επιλογής συστήματος:

- Προτεραιότητα επιλογής συστήματος: Περιβαλλοντική απόδοση

Η περιοχή οριοθέτησης της τάσης επιλογής του συστήματος που αξιολογήθηκε ότι διαθέτει την καλύτερη περιβαλλοντική απόδοση (βάσει των αντίστοιχων κριτηρίων) ορίζεται από τον περιορισμό $w_{Env} > 50\%$. Με άλλα λόγια, το άθροισμα των συντελεστών βαρύτητας των περιβαλλοντικών κριτηρίων τίθεται κατ' ελάχιστο στο 50%, με το υπόλοιπο να κατανέμεται στα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια. Η συγκεκριμένη περιοχή απεικονίζεται με μπλε χρώμα στο σχήμα 3.7



Σχήμα 3.7 Τριγωνικό διάγραμμα απεικόνισης αποτελεσμάτων σε συνθήκες πλήρους αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικότητας

- Προτεραιότητα επιλογής συστήματος: Τεχνική αποδοτικότητα

Σε αντιστοιχία με τα παραπάνω, η περιοχή προτεραιότητας της τεχνικής αποδοτικότητας ορίζεται από τον περιορισμό $w_T > 50\%$ και απεικονίζεται με πορτοκαλί χρώμα.

- Προτεραιότητα επιλογής συστήματος: Οικονομική αποδοτικότητα

Επίσης κατ αντιστοιχία, η περιοχή προτεραιότητας της οικονομικής αποδοτικότητας ορίζεται από τον περιορισμό $w_{Ec} > 50\%$ και απεικονίζεται με πράσινο χρώμα.

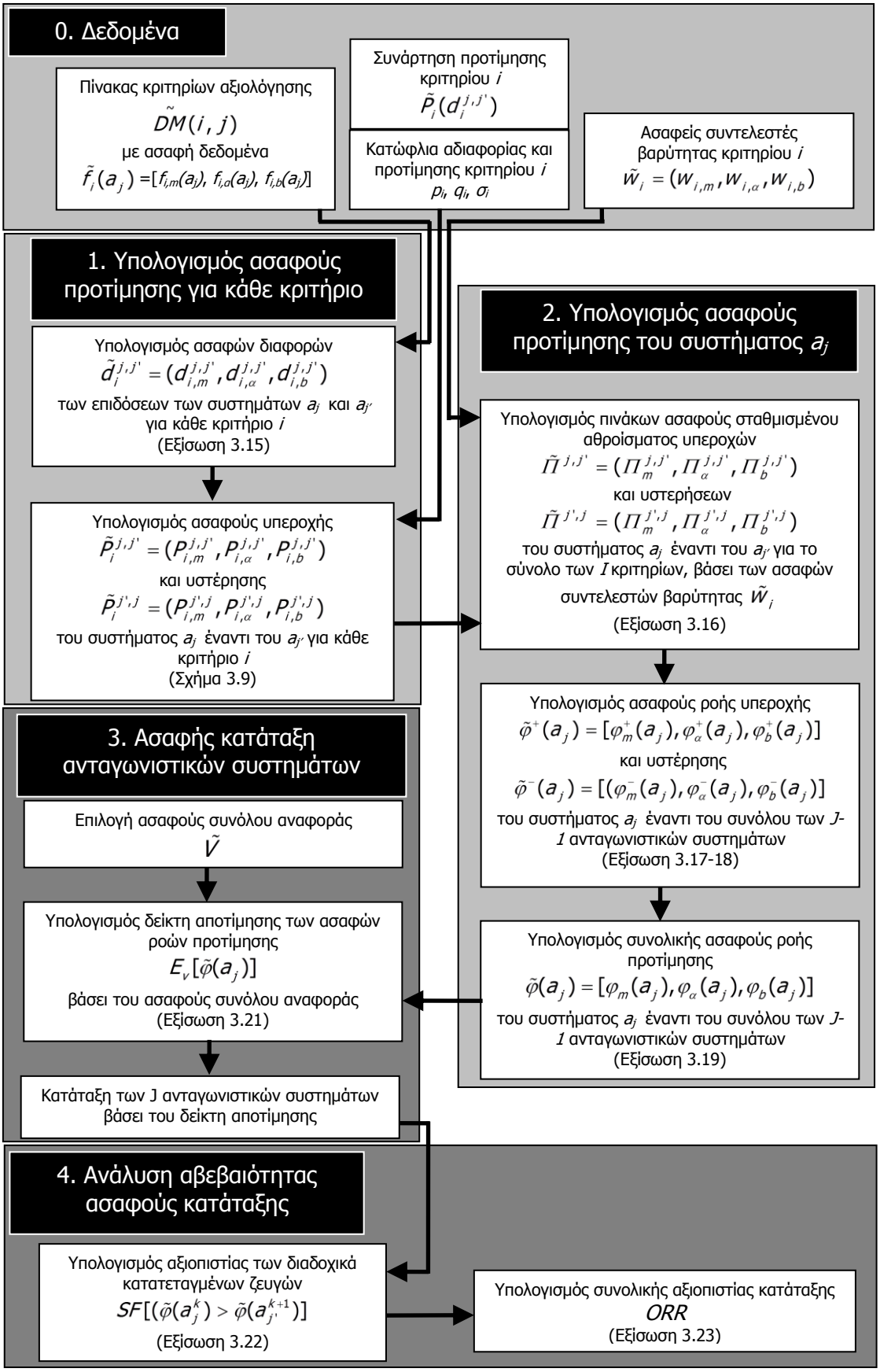
- Καμία ιδιαίτερη προτεραιότητα: Περιοχή μετριοπάθειας – ουδετερότητας

Η κεντρική περιοχή του τριγωνικού διαγράμματος (γκρι χρώμα) χαρακτηρίζεται από ουδετερότητα έναντι των τριών συνιστωσών αξιολόγησης και καθορίζεται από τον περιορισμό ότι και οι τρείς ομαδικοί συντελεστές βαρύτητας βρίσκονται μεταξύ του 20% και του 50%.

Στους N_w κόμβους του τριγωνικού διαγράμματος (σημεία τομής των πλευρών και των παραλλήλων τους στα όρια και εντός του τριγώνου) «τοποθετείται» το σύστημα που υπολογίστηκε ως επικρατέστερο με τον αντίστοιχο συνδυασμό (w_T, w_{En}, w_{Ec}). Η απεικόνιση στο «χώρο απόφασης» παρέχει μια ολοκληρωμένη αποτύπωση των λύσεων του προβλήματος αξιολόγησης, όπου οριοθετούνται οι περιοχές επικράτησης των συστημάτων και αναδεικνύονται οι επιρροές των προτεραιοτήτων επιλογής, όπως επίσης και οι σχέσεις ισορροπίας τους.

Εφαρμογή ασαφούς πολυκριτηριακής αξιολόγησης σε συνθήκες μερικής αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικότητας.

Η προσέγγιση που αναπτύχθηκε επεκτείνει την μεθοδολογική δομή της πολυκριτηριακής μεθόδου PROMETHEE (Παράρτημα Α), χρησιμοποιώντας τις ασαφείς αλγεβρικές πράξεις, όπως ορίστηκαν από τους Dubois και Prade (1994). Ο κύριος στόχος αφορά την ικανότητα διαχείρισης της ασάφειας, με παράλληλη αποφυγή απώλειας πληροφορίας μέσω αποασαφοποίησης (defuzzification), όπως αναφέρει ο Deng (2009). Επιπλέον, αποσκοπεί στην ενσωμάτωση μιας «συνεπούς» μεθόδου κατάταξης ασαφών αριθμών, που να παρέχει πληροφορία για τη σταθερότητα της κατάταξης και να ελαχιστοποιεί την ανάγκη για ανάλυση ευαισθησίας. Η παρουσίαση της μεθοδολογίας ακολουθεί τα τρία κύρια στάδια ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπως καθορίζονται στη βιβλιογραφία (Deng, 2009; Benetto et al., 2008), ενώ εξετάζεται και ένα τέταρτο στάδιο που αφορά την ανάλυση ασάφειας μετά την κατάταξη των ανταγωνιστικών συστημάτων. Το σχήμα 3.8 απεικονίζει το γενικό διάγραμμα ροής της προτεινόμενης προσέγγισης, όπου με ανοιχτό γκρι χρώμα επισημαίνονται τα στάδια που ακολουθείται η μέθοδος PROMETHEE (προσαρμοσμένη για ασαφείς αριθμούς) και με σκούρο γκρι οι προτεινόμενες μεθοδολογικές επεκτάσεις. Λόγω της ιδιαιτερότητας της χρήσης ασαφών αριθμών και προκειμένου να διευκολυνθεί η κατανόηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας, στο παράρτημα Γ παρατίθεται αναλυτικό αριθμητικό παράδειγμα.



Σχήμα 3.8 Διάγραμμα ροής μεθοδολογίας ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης σε συνθήκες μερικής αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικότητας

0. Δεδομένα

Η μορφή και το είδος των απαιτούμενων δεδομένων για την αντικειμενική και υποκειμενική συνιστώσα του προβλήματος αξιολόγησης απεικονίζονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.8 και περιγράφονται στις παραγράφους 3.2.3.1 και 3.2.3.2 αντίστοιχα.

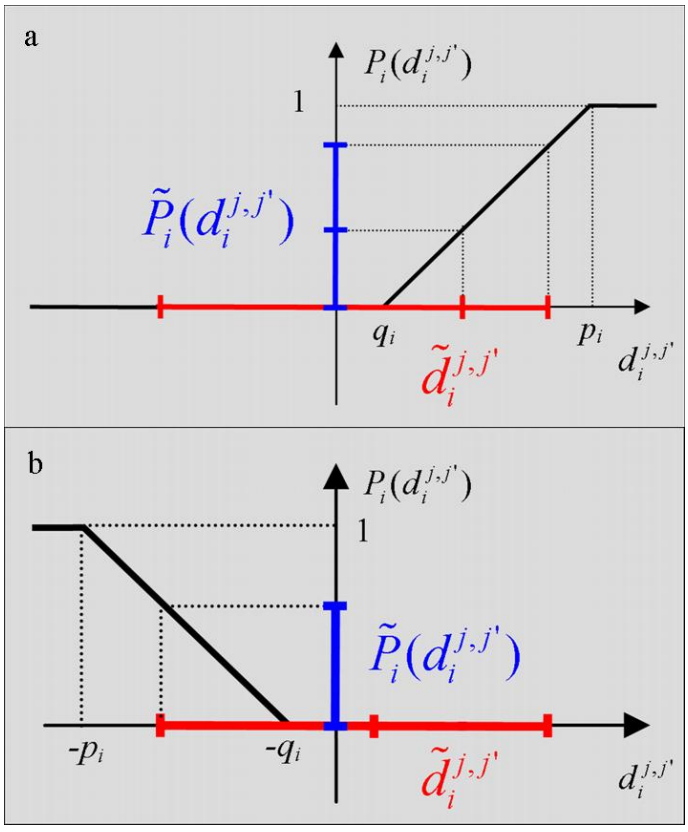
1. Υπολογισμός ασαφούς προτίμησης ανταγωνιστικών συστημάτων για κάθε κριτήριο αξιολόγησης

Σε γενικές γραμμές έχει υιοθετηθεί η δομή προηγούμενων προσεγγίσεων ενσωμάτωσης ασαφών αριθμών στην PROMETHEE (Παράρτημα Α). Όπως αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου, τα δεδομένα (Σχήμα 3.8) εισάγονται σε μορφή ασαφών αριθμών (Σχήμα3.5 – Εξίσωση 3.7).

Αρχικά υπολογίζονται οι ασαφείς διαφορές $\tilde{d}_i^{j,j'} = (d_{i,m}^{j,j'}, d_{i,\alpha}^{j,j'}, d_{i,b}^{j,j'})$:

$$\tilde{d}_i^{j,j'} = \begin{cases} f_{i,m}(a_j) - f_{i,m}(a_{j'}), (f_{i,\alpha}(a_j) + f_{i,b}(a_{j'}), f_{i,b}(a_j) + f_{i,\alpha}(a_{j'})), & \alpha\nu \quad j \neq j' \\ (0,0,0), & \alpha\nu \quad j = j' \end{cases} \qquad (3.15)$$

Κατά την περίπτωση όπου $j = j'$ το αποτέλεσμα στη μη ασαφή εφαρμογή της PROMETHEE είναι προφανώς μηδενικό. Αν εφαρμοστεί ο τύπος της ασαφούς αφαίρεσης κατά Dubois και Prade (1994) , το αποτέλεσμα είναι: $\tilde{d}_i^{j,j} = [0, f_{i,a}(a_j) + f_{i,b}(a_j), f_{i,a}(a_j) + f_{i,b}(a_j)]$. Η επίδραση που έχει στα επόμενα βήματα ένα μη μηδενικό αποτέλεσμα είναι ασύμβατη με την πολυκριτηριακή μεθοδολογία, οπότε με τον καθορισμό μηδενικής τιμής αποφεύγονται οι αντίστοιχες επιπλοκές.



Σχήμα 3.9 Απεικόνιση υπολογισμού ασαφούς προτίμησης

Για τον υπολογισμό των ασαφών υπεροχών και υστερήσεων του συστήματος a_j έναντι του $a_{j'}$ για κάθε κριτήριο i, προσαρμόζονται οι αντίστοιχες εξισώσεις της μεθόδου PROMETHEE (Σχήμα Π.1 – Παράρτημα Α). Η προσαρμογή αφορά το ότι πλέον δεν υφίσταται αντιστοίχιση του $d_i^{j,j'}$ ως σημείο (Σχήμα Π.1), αλλά προβολή του διαστήματος $[d_{i,l}^{j,j'}, d_{i,r}^{j,j'}]$ στη συνάρτηση προτίμησης $P_i(d_i^{j,j'})$(Σχήμα 3.9). Όταν το κριτήριο i αφορά ελαχιστοποίηση (π.χ. κόστος εγκατάστασης), οι αρνητικές τιμές

του $d_i^{j,j'}$ συνδέονται με υπεροχή του a_j έναντι του $a_{j'}$. Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιείται η συμμετρική συνάρτηση προτίμησης (Σχήμα 3.9.b), όπου τα όρια $P_{i,l}(d_i^{j,j'})$ και $P_{i,r}(d_i^{j,j'})$ υπολογίζονται ως οι προβολές των $d_{i,r}^{j,j'}$ και $d_{i,l}^{j,j'}$ αντίστοιχα.

2. Υπολογισμός ασαφούς προτίμησης του συστήματος a_j

Η σταθμισμένη άθροιση των $\tilde{P}_i^{j,j'}$ και $\tilde{P}_i^{j',j}$ βάσει των ασαφών συντελεστών βαρύτητας αποδίδει τους πίνακες ασαφούς υπεροχής $\tilde{\Pi}^{j,j'}$ και υστέρησης $\tilde{\Pi}^{j,j'}$ του συστήματος a_j έναντι του $a_{j'}$ στο σύνολο των I κριτηρίων. Έχοντας υπόψη τους κινδύνους και τους συμβιβασμούς που εμπεριέχει ο πολλαπλασιασμός ασαφών αριθμών (Hanss, 2005), χρησιμοποιείται το ασαφές ισοδύναμο της εξίσωσης Π.2 του Παραρτήματος (συμβολισμός ασαφούς πολλαπλασιασμού: $\otimes$):

$\tilde{\Pi}^{j,j'} = (\Pi_m^{j,j'}, \Pi_\alpha^{j,j'}, \Pi_b^{j,j'})$, όπου

$$\tilde{\Pi}(a_j, a_{j'}) = \sum_{i=1}^{I} (\tilde{w}_i \otimes \tilde{P}_i^{j,j'}) \Rightarrow$$

$$\Pi_m(a_j, a_j') = \sum_{i=1}^{I} [w_{i,m} \cdot P_{i,m}(d_i^{j,j'})],$$

$$\Pi_\alpha(a_j, a_j') = \sum_{i=1}^{I} [w_{i,\alpha} \cdot P_{i,m}(d_i^{j,j'}) + w_{i,m} \cdot P_{i,\alpha}(d_i^{j,j'}) - w_{i,\alpha} \cdot P_{i,\alpha}(d_i^{j,j'})],$$

$$\Pi_b(a_j, a_j') = \sum_{i=1}^{I} [w_{i,b} \cdot P_{i,m}(d_i^{j,j'}) + w_{i,m} \cdot P_{i,b}(d_i^{j,j'}) + w_{i,b} \cdot P_{i,b}(d_i^{j,j'})] \quad (3.16)$$

Οι εξισώσεις υπολογισμού των πινάκων ασαφούς υπεροχής και υστέρησης λήφθηκαν από τους Dubois και Prade (1994) και Hanss (2005) (εξισώσεις προσέγγισης αντίστροφου συνημιτόνου για ασαφή πολλαπλασιασμό - secant approximation formulas for the multiplication of L-R fuzzy numbers).

Ακολούθως αθροίζονται οι συνεισφορές των *J-1* ζευγών των ανταγωνιστικών συστημάτων, προκειμένου να υπολογιστούν οι ασαφείς ροές υπεροχής και υστέρησης, οι οποίες αποτελούν το μέτρο της συνολικής υπεροχής και υστέρησης του συστήματος a_j έναντι όλων των υπολοίπων:

$\tilde{\varphi}^+(a_j) = [\varphi_m^+(a_j), \varphi_\alpha^+(a_j), \varphi_b^+(a_j)]$, όπου

$$\varphi_m^+(a_j) = \sum_{j'=1}^{J} \Pi_m(a_j, a_{j'}),\ \varphi_\alpha^+(a_j) = \sum_{j'=1}^{J} \Pi_\alpha(a_j, a_{j'}) \text{ και } \varphi_b^+(a_j) = \sum_{j'=1}^{J} \Pi_b(a_j, a_{j'}) \quad (3.17)$$

και αντίστοιχα

$$\varphi_m^-(a_j)=\sum_{j'=1}^{J}\Pi_{\mathrm{m}}(a_{j'},a_j),\ \varphi_\alpha^-(a_j)=\sum_{j'=1}^{J}\Pi_\alpha(a_j,a_{j'})\ \text{και}\ \varphi_b^-(a_j)=\sum_{j'=1}^{J}\Pi_b(a_j,a_{j'}) \quad (3.18)$$

Η συνολική ασαφής ροή προτίμησης υπολογίζεται από τη διαφορά των ροών υπεροχής και υστέρησης:

$\tilde{\varphi}^-(a_j)=[(\varphi_m^-(a_j),\varphi_\alpha^-(a_j),\varphi_b^-(a_j)]$, όπου

$$\varphi_m(a_j)=\varphi_m^+(a_j)-\varphi_m^-(a_j),\ \varphi_\alpha(a_j)=\varphi_\alpha^+(a_j)+\varphi_b^-(a_j)\ \text{και}\ \varphi_b(a_j)=\varphi_b^+(a_j)+\varphi_\alpha^-(a_j) \quad (3.19)$$

Παρά το γεγονός ότι το αποτέλεσμα του ασαφούς πολλαπλασιασμού τριγωνικών αριθμών δεν έχει την ίδια μορφή (οι πλευρές της συνάρτησης συμμετοχής μ(x) – Σχήμα 3.5 – είναι καμπύλες (Hanss, 2005)), γίνεται η υπόθεση ότι η ροή $\tilde{\varphi}(a_j)$ είναι ασαφής τριγωνικός αριθμός, προκειμένου να απλουστευτούν οι υπολογισμοί των ολοκληρωμάτων της εξίσωσης (3.22). Οι ασαφείς προτιμήσεις των J συστημάτων εισάγονται στο επόμενο σκέλος του αλγορίθμου ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης, όπου και επεξεργάζονται για να καθοριστεί η τελική κατάταξη.

3. *Ασαφής κατάταξη ανταγωνιστικών συστημάτων*

Η κατάταξη των ασαφών ροών $\tilde{\varphi}(a_j)$ επιτυγχάνεται με τον εξής αλγόριθμο ασαφούς κατάταξης (Lee-Kwang and Jee-Hyong, 1999):

i. Ορισμός ασαφούς συνόλου αναφοράς $\tilde{V}$. Με δεδομένο ότι διατηρείται η ασαφής μορφή των ροών, η κατάταξη των συστημάτων a_j γίνεται μέσω της σύγκρισης κάθε $\tilde{\varphi}(a_j)$ με ένα ασαφές σύνολο αναφοράς. Ακολουθώντας την ουδέτερη προσέγγιση όπως ορίζεται από τους Lee-Kwang και Jee-Hyong (1999), επιλέγεται το σύνολο:

$$\mu_V(x)=\begin{cases}1, & \alpha\nu\ \ \min(\varphi_l(a_j))\le x\le\max(\varphi_r(a_j))\\ 0, & \alpha\nu\ \ x>\max(\varphi_r(a_j))\ \ \acute{\eta}\ \ x<\min(\varphi_l(a_j))\end{cases}, \quad (3.20)$$

ii. Υπολογισμός του δείκτη αποτίμησης $E_V[\tilde{\varphi}(a_j)]$ (Evaluation Value) για κάθε ασαφή ροή $\tilde{\varphi}(a_j)$ από την εξίσωση (3.21). Ο δείκτης αποτίμησης αποτελεί μέτρο σύγκρισης της ασαφούς ροής $\tilde{\varphi}(a_j)$ με το σύνολο $\tilde{V}$.

$$E_V[\tilde{\varphi}(a_j)]=\frac{\mathrm{COA}(\tilde{\varphi}(a_j))-\min(\varphi_l(a_j))}{\max(\varphi_r(a_j))-\min(\varphi_l(a_j))} \quad (3.21)$$

, όπου $COA(\tilde{\varphi}(a_j)) = \frac{\int_{\min(\varphi_l(a_j))}^{\max(\varphi_r(a_j))} x \cdot \mu_{\tilde{\varphi}(a_j)}(x)dx}{\int_{\min(\varphi_l(a_j))}^{\max(\varphi_r(a_j))} \mu_{\tilde{\varphi}(a_j)}(x)dx}$ και λόγω της υπόθεσης ότι οι ροές $\tilde{\varphi}(a_j)$ είναι τριγωνικοί αριθμοί ισχύει ότι: $COA(\tilde{\varphi}(a_j)) = \frac{3 \cdot \varphi_m(a_j) - \varphi_\alpha(a_j) + \varphi_b(a_j)}{3}$

iii. Κατάταξη των συστημάτων a_j με βάση τις τιμές του δείκτη αποτίμησης $E_V[\tilde{\varphi}(a_j)]$.

4. Ανάλυση αβεβαιότητας ασαφούς κατάταξης

Το τελευταίο στάδιο της μεθοδολογίας διαχείρισης της μερικής αβεβαιότητας όσον αφορά τον καθορισμό των συντελεστών βαρύτητας έχει ως στόχο τον υπολογισμό της αξιοπιστίας αφενός για κάθε διαδοχικό ζεύγος και αφετέρου για το σύνολο της ασαφούς κατάταξης. Η διατήρηση της ασαφούς μορφής των ροών επιφέρει μεν αδυναμία εφαρμογής ανάλυσης ευαισθησίας (όπως ακολουθείται από τους Geldermann, Spengler, and Rentz, (2000)), ωστόσο αξιοποιείται η ασαφής πληροφορία που διατηρήθηκε, προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί και να αποτυπωθεί η αξιοπιστία της ασαφούς κατάταξης.

Η μέθοδος ανάλυσης της αβεβαιότητας που προτείνεται υιοθετεί την έννοια της «Συνάρτησης Ικανοποίησης» SF (Satisfaction Function), όπως ορίζεται από τους Lee-Kwang και Jee-Hyong (1999) ως «η ποσοτικοποίηση της πιθανότητας ο ασαφής αριθμός $\tilde{A}$ να είναι μεγαλύτερος (ή μικρότερος) από τον $\tilde{B}$ ». Η εξίσωση (3.22) εφαρμόζεται σε κάθε διαδοχικό ζεύγος της ασαφούς κατάταξης (a_j^k και $a_{j'}^{k+1}$, όπου για k=1 → a_j^1 το επικρατέστερο σύστημα και για $k=J$ → $a_{j'}^J$ το υποδεέστερο), όπως αυτή καθορίστηκε από το προηγούμενο στάδιο. Η συνάρτηση $SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1}))$ συγκρίνει τις συνολικές ροές $\tilde{\varphi}(a_j)$ δυο διαδοχικά κατατεταγμένων συστημάτων και έχει ως αποτέλεσμα έναν απόλυτο αριθμό με πεδίο τιμών το διάστημα [0,1]:

$$SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1})) = \frac{\int_{\min(\varphi_l(a_j))}^{\max(\varphi_r(a_j))} [\mu_{\tilde{\varphi}(\alpha_{j'}^{k+1})}(\mathrm{y}) \cdot \mathrm{SF}(\tilde{\varphi}(a_j^k) > y)]dy}{\int_{\min(\varphi_l(a_j))}^{\max(\varphi_r(a_j))} \mu_{\tilde{\varphi}(\alpha_{j'}^{k+1})}(\mathrm{y})dy} \quad (3.22) \quad ,$$

με k=(1,…, J - 1), όπου $SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > z) = \frac{\int_z^{\varphi_r(a_j^k)} \mu_{\tilde{\varphi}(\alpha_j^k)}(x)dx}{\int_{\varphi_l(a_j^k)}^{\varphi_r(a_j^k)} \mu_{\tilde{\varphi}(\alpha_j^k)}(x)dx}$ η συνάρτηση

ικανοποίησης για τη σύγκριση του $\tilde{\varphi}(a_j^k)$ με τη μεταβλητή z. Ισχύει ότι

$SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1})) = 1 - SF(\tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1}) > \tilde{\varphi}(a_j^k))$.

Οι τιμές του $SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1}))$ για κάθε διαδοχικό ζεύγος συστημάτων χαρακτηρίζει τη σχέση υπεροχής (και προσδιορίζει την αξιοπιστία του συγκεκριμένου ζεύγους κατάταξης) μεταξύ των a_j^k και a_j^{k+1} ως εξής:

i. $SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1})) = 1$ ➔ Σαφής προτίμηση του συστήματος a_j^k έναντι του $a_{j'}^{k+1}$

ii. $1 > SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1})) \geq 0.85$ ➔ Ισχυρή προτίμηση του a_j^k έναντι του $a_{j'}^{k+1}$

iii. $0.85 > SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1})) \geq 0.65$ ➔ Μέτρια προτίμηση του a_j^k έναντι του $a_{j'}^{k+1}$

iv. $0.65 > SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1})) > 0.5$ ➔ Ασθενής προτίμηση του a_j^k έναντι του $a_{j'}^{k+1}$

v. $SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1})) = 0.5$ ➔ Ταύτιση a_j^k και $a_{j'}^{k+1}$

Με δεδομένο ότι η εξίσωση (3.22) εφαρμόζεται σε καταταγμένο και όχι τυχαίο σύνολο, δεν αναμένεται να λάβει τιμές μικρότερες του 0.5. Οι υπολογισμοί των *J-1* ζευγών της ασαφούς κατάταξης αποδίδει τη συνολική εικόνα της αξιοπιστίας της κατάταξης, παρέχοντας τη δυνατότητα εστίασης στα λιγότερο αξιόπιστα (άρα και ευμετάβλητα) ζεύγη. Ως δείκτης της συνολικής αξιοπιστίας της κατάταξης ορίζεται το μέγεθος ORR (Overall Ranking Reliability) ως ο μέσος όρος του $SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1}))$ των *J-1* ζευγών της ασαφούς κατάταξης:

$$ORR = \frac{\sum_{k=1}^{J-1} SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1}))}{J-1} \qquad (3.23)$$

3.3 Κριτική αποτίμηση μεθοδολογίας

Η προτεινόμενη μεθοδολογία επιχειρεί να διαμορφώσει ένα συνολικό πλαίσιο ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων, το οποίο συνδέεται με εργαλείο υποβοήθησης επιλογής σε συνθήκες αβεβαιότητας. Οι επιμέρους τεχνικές που συνθέτουν τη συνολική προσέγγιση παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.1, σε συσχέτιση με τον αντίστοιχο μεθοδολογικό στόχο. Παράλληλα αναφέρεται και η παράγραφος που αναλύεται η αντίστοιχη επιμέρους μεθοδολογία.

Όπως γίνεται σαφές από τον Πίνακα 3.1, προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι επιμέρους αδυναμίες της καθιερωμένης τεχνο-οικονομικής μεθόδου αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων (§3.1.1), ενσωματώθηκαν στο γενικό μεθοδολογικό πλαίσιο προσεγγίσεις από διαφορετικά επιστημονικά πεδία (ανάλυση ενεργειακών συστημάτων σύμφωνα με τον $1^{ο}$ και $2^{ο}$ θερμοδυναμικό νόμο, περιβαλλοντική ανάλυση κύκλου ζωής, υποστήριξη απόφασης, διαχείριση αβεβαιότητας και θεωρία ασαφών αριθμών).

Η προτεινόμενη προσέγγιση δεν υποκαθιστά τις προσεγγίσεις βελτιστοποίησης (§2.2) (ενεργειακής, περιβαλλοντικής και οικονομικής) των ενεργειακών συστημάτων, αλλά δρα συμπληρωματικά. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης επεμβαίνουν στις παραμέτρους των συστημάτων, μεγιστοποιώντας την ενεργειακή, περιβαλλοντική ή την οικονομική αποδοτικότητα ενός συγκεκριμένου ενεργειακού συστήματος. Το ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο που προτείνεται είναι σε θέση να αξιοποιήσει το αποτέλεσμα των μεθόδων βελτιστοποίησης σε ανταγωνιστικά συστήματα, προκειμένου να αναδειχτεί το επικρατέστερο εντός ενός πλαισίου υποστήριξης απόφασης που αναζητά έναν ορθολογικά τεκμηριωμένο συμβιβασμό.

Παρά την προσπάθεια να είναι δυνατή η αξιοποίηση ελλιπών δεδομένων, είναι σαφές ότι η εφαρμογή της ολοκληρωμένης αξιολόγησης απαιτεί μεγάλο όγκο και υψηλή ποιότητα και αξιοπιστία αρχικών δεδομένων. Γι' αυτό το λόγο το πλαίσιο εφαρμογών περιορίζεται σε επίπεδο ενεργειακού σχεδιασμού ή μεγάλων ενεργειακών επενδύσεων, όπου διαπιστώνεται η ανάγκη συνολικής προσέγγισης, η βιωσιμότητα της επιλογής απαιτεί τον συγκερασμό διαφορετικών προτεραιοτήτων απόφασης και διατίθενται οι πόροι (χρηματικοί και χρονικοί) που απαιτούνται για τη συλλογή και επεξεργασία ενός κρίσιμου όγκου τεχνικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών δεδομένων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιολόγησης αποτελεί ένα σπονδυλωτό, αλλά συμπαγές πλαίσιο, που διαμορφώνει ένα περιβάλλον ολοκληρωμένης προσέγγισης του προβλήματος της πολυκριτηριακής αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών, διαχειρίζεται ευέλικτα την αβεβαιότητα είτε της αντικειμενικής πληροφορίας (αποτελέσματα επιμέρους τεχνικής –

περιβαλλοντικής – οικονομικής αξιολόγησης) είτε της υποκειμενικής (προτεραιότητες αποφασιζόντων) και τελικά συμβάλλει στη συνολική τεκμηρίωση και δικαιολόγηση της επιλογής τεχνολογίας.

<table>
<tr><th colspan="4">Προτεινόμενη Μεθοδολογία Ολοκληρωμένης Αξιολόγησης Ενεργειακών Τεχνολογιών / Συστημάτων</th></tr>
<tr><td colspan="4">Επιμέρους μεθοδολογικοί στόχοι – τεχνικές</td></tr>
<tr><td colspan="2">Στόχος</td><td>Μεθοδολογική προσέγγιση</td><td>Παράγραφος - Σχήμα</td></tr>
<tr><td colspan="2" rowspan="2">Καθορισμός τεχνικής και περιβαλλοντικής αποδοτικότητας του κύκλου ζωής.</td><td>Προσομοίωση μεταβαλλόμενης λειτουργίας συστημάτων κάλυψης ηλεκτρικών/θερμικών φορτίων</td><td>§3.2.2.1 – Σχ. 3.3</td></tr>
<tr><td>Προσαρμογή και εφαρμογή μεθοδολογίας AKZ</td><td>§3.2.2.2 – Σχ. 3.4</td></tr>
<tr><td rowspan="5">Διαμόρφωση εργαλείου υποστήριξης της διαδικασίας επιλογής – Αλγόριθμος «Π.Υ.Θ.Ι.Α.»</td><td rowspan="2">Διαχείριση πλήρους αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικών προτεραιοτήτων</td><td>Σάρωση πιθανών συντελεστών βαρύτητας κριτηρίων</td><td>§3.2.3.3 – Σχ. 3.6</td></tr>
<tr><td>Διαμόρφωση και απεικόνιση αποτελεσμάτων σε τριγωνικό «χώρο απόφασης»</td><td>§3.2.3.3 – Σχ. 3.7</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Διαχείριση μερικής αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικών προτεραιοτήτων</td><td>Ασαφής (fuzzy) επέκταση υπάρχουσας μεθοδολογίας ΠΑ</td><td>§3.2.3.1, 3 – Σχ. 3.5, 8</td></tr>
<tr><td>Προσαρμογή και εφαρμογή τεχνικής ασαφούς κατάταξης των ανταγωνιστικών συστημάτων</td><td>§3.2.3.3 – Σχ. 3.8 (Παράρτημα Γ)</td></tr>
<tr><td>Ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας της ασαφούς κατάταξης.</td><td>§3.2.3.3 – Σχ. 3.8 (Παράρτημα Γ)</td></tr>
</table>

Πίνακας 3.1 Μεθοδολογικοί στόχοι προτεινόμενης μεθοδολογίας συνδυασμένης αξιολόγησης και αντίστοιχες μεθοδολογικές προσεγγίσεις

Βιβλιογραφία 3ου κεφαλαίου

Benetto, E., Dujet, C., Rousseaux, P. Integrating fuzzy multicriteria analysis and uncertainty evaluation in life cycle assessment, Environmental Modelling and Software. 23 (2008) 1461-1467

Deng H. Developments in Fuzzy Multicriteria Analysis, Fuzzy Information and Engineering. 1(1) (2009) 103-109.

Deng H., Lau M., Millar K. Defuzzification in fuzzy multicriteria analysis. Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS. 19th International Conference of the North American (2000) 222 – 226.

Diakoulaki D., Antunes C.A. and Martins A.G. MCDA and energy planning. In "Multiple Criteria Decision Analysis: State of the Art Surveys". Edited by J.Figuera, S. Greco and M. Ehrgott. Springer Science + Business Media, Inc., Boston (2005).

Dubois, D. and Prade, H. Fuzzy sets - A convenient fiction for modeling vagueness and possibility. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 2(1) (1994) 16-21.

EDUCOGEN project. A Guide to cogeneration (2001). The European Association for the Promotion of Cogeneration

Frangopoulos CA. EDUCOGEN, The European educational tools on cogeneration (2001) The European Association for the Promotion of Cogeneration.

Geldermann J., Spengler T. and Rentz O. Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: iron and steel making industry. Fuzzy Sets and Systems 115 (2000) 45-65.

Goumas M. and Lygerou V. An extension of the PROMETHEE method for decision making in fuzzy environment: Ranking of alternative energy exploitation projects. European Journal of Operational Research 123 (2000) 606-613

Hanss M., Applied fuzzy arithmetic: An introduction with engineering applications (2005). Birkhäuser.

Hofsteter P. et al. The Mixing Triangle: Correlation and Graphical Decision Support for LCA-based Comparisons. Journal of Industrial Ecology3(4) (1999) 97–115.

IES (Institute of Environment and Sustainability). Life Cycle Thinking and Assessment (2012). http://lct.jrc.ec.europa.eu

ILCD (International Reference Life Cycle Data System). Recommendations f or Life Cycle Impact Assessment in the European context - based on existing environmental impact assessment models and factors (2011). http://lct.jrc.ec.europa.eu/pdf-directory/Recommendation-of-methods-for-LCIA-def.pdf

Kapepula K.M., Colson G., Sabri K. and Thonart P. A multiple criteria analysis for household solid waste management in the urban community of Dakar. Waste Management 27 (2007) 1690–1705

Lee-Kwang H. and Jee-Hyong L. A method for ranking fuzzy numbers and its application to desicion making. IEEE transactions on fuzzy systems 7 (1999) 677-685

Munasinghe M. Environmental Economics and sustainable development. World Bank Environment Paper No. 3 (1993). Washington, DC, World Bank, USA.

Oberschmidt J., Geldermann J., Ludwig J. and Schmehl M.. Modified PROMETHEE approach for assessing energy technologies, International Journal of Energy Sector Management 4(2) (2010) 183-212.

Ribeiro I. et al. Life cycle engineering methodology applied to material selection, a fender case study. Journal of Cleaner Production 16 (2008) 1887-1899

Ribeiro, R.A. Fuzzy multiple attribute decision making: A review and new preference elicitation techniques. Fuzzy Sets and Systems 78 (2) (1996) 55-181.

Rosen M. Allocating carbon dioxide emissions from cogeneration systems: descriptions of selected output-based methods. Journal of Cleaner Production 16 (2008) 171-177.

Wang J.J., Jing Y.Y., Zhang C.F. and Zhao J.H. Review on multi-criteria decision analysis aid in sustainable energy decision-making. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13 (2009) 2263–2278

Κεφάλαιο 4ο

Αξιολόγηση τεχνολογιών βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής σε ναυτικές εφαρμογές

Στις αρχικές παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου παρατίθενται γενικά στοιχεία για τις τεχνολογικές τάσεις στον τομέα των ναυτικών συστημάτων βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής και καταγράφονται τα γενικά χαρακτηριστικά των αντίστοιχων τεχνολογιών. Ακολουθεί μια σύντομη ανασκόπηση των προσπαθειών αξιολόγησης τεχνολογιών/συστημάτων στη ναυτιλία. Στο κύριο μέρος του κεφαλαίου εφαρμόζεται η μεθοδολογία ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων, όπως διατυπώθηκε αναλυτικά στο προηγούμενο κεφάλαιο. Εξετάζονται δυο ανταγωνιστικά συστήματα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής σε ναυτιλιακές εφαρμογές με τελικό σκοπό την ανάδειξη του επικρατέστερου βάσει του συνδυασμού της τεχνικής – οικονομικής – περιβαλλοντικής αποδοτικότητας και εναλλακτικών προσεγγίσεων όσον αφορά την απόφαση επιλογής. Στην κατακλείδα του κεφαλαίου, συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα και συμπεράσματα, ενώ παρατίθεται και η αντίστοιχη βιβλιογραφία.

4.1 Παρουσίαση τρέχουσας κατάστασης και τεχνολογικών τάσεων.

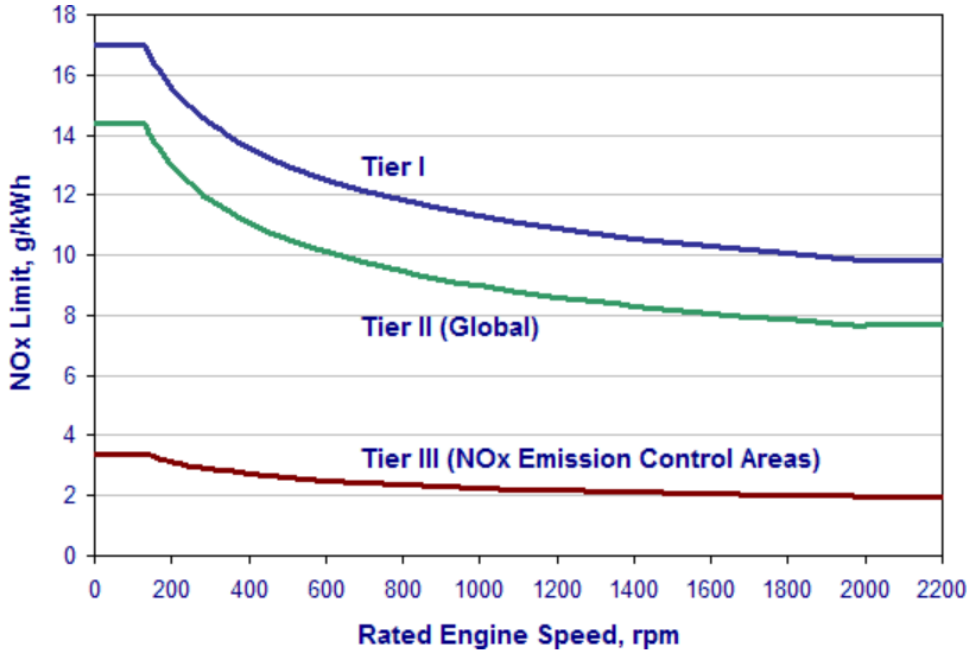
Η κυρίαρχη τεχνολογία που εφαρμόζεται σε συστήματα πρόωσης και βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής στη ναυτιλία αφορά σε ποσοστό 99% κινητήρες diesel (Κυρτάτος, 2009), των οποίων οι αέριες εκπομπές εμφανίζουν σημαντική συνεισφορά σε παγκόσμια κλίμακα. Στον τομέα της ναυτιλίας αποδίδεται το 3% της παγκόσμιας κατανάλωσης πετρελαίου, ενώ παράλληλα το 13 - 16% των παγκόσμιων εκπομπών οξειδίων αζώτου (NOx) και θείου (SOx) (στοιχεία 1995) (Κυρτάτος, 2009; Bensaid et al., 2009). Η αυξητική τάση του όγκου των θαλασσίων μεταφορών σε συνδυασμό με τη χρονική υστέρηση επιβολής σχετικών νομοθεσιών έναντι των εκπομπών στην ξηρά, συντείνουν στην εκτίμηση ότι οι συνολικές εκπομπές NOx και SOx από τη ναυτιλία θα υπερβούν τις αντίστοιχες από πηγές στην ξηρά κατά την πενταετία 2015-2020. Παράλληλα, η λειτουργία των κινητήρων diesel συνδέεται με εκπομπή σωματιδίων (PM) και πτητικών οργανικών ενώσεων (Volatile Organic Compounts - VOCs). Όσον αφορά τις εκπομπές CO_2, ο υψηλός βαθμός απόδοσης των ναυτικών κινητήρων συμβάλλει στον περιορισμό τους (EC, 2002a).

Οι μεσοπρόθεσμες τάσεις όσον αφορά τις απαιτήσεις των συστημάτων πρόωσης και βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής αποτυπώνονται σε πρόσφατες νομοθετικές ρυθμίσεις και κείμενα καθορισμού πολιτικών, τόσο σε παγκόσμιο (IMO, 2004; CARB, 2008; NRDC, 2004), όσο και σε ευρωπαϊκό επίπεδο (EC, 2002b; 2004). Σύμφωνα με αυτές, τα αντίστοιχα συστήματα στο άμεσο μέλλον καλούνται να επιδείξουν σημαντικά μειωμένες όξινες εκπομπές (Σχήμα 4.1) (IMO, 2004) και χαμηλότερα επίπεδα θορύβου και κραδασμών.

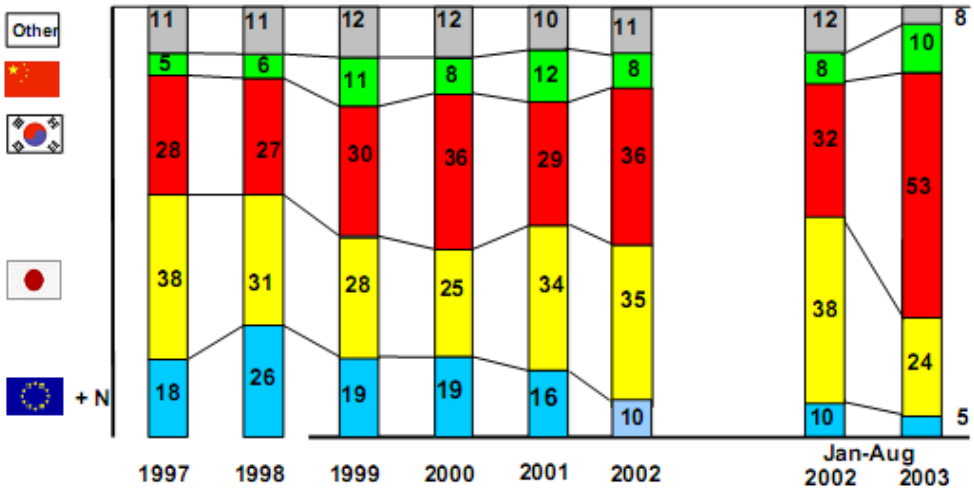
Επιπρόσθετα, το διαρκώς μειούμενο ποσοστό ναυπήγησης νέων πλοίων από ευρωπαϊκά ναυπηγεία (από 26% το 1998 σε 5% το 2003 – Σχήμα 4.2) (MCWAP, 2005), ωθεί στην αναζήτηση και εφαρμογή καινοτόμων τεχνολογιών πρόωσης και βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής. Μέσω του τεχνολογικού πλεονεκτήματος, τα ευρωπαϊκά ναυπηγεία αποσκοπούν στη μείωση του κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων του κύκλου ζωής, ώστε να αντιμετωπιστούν το χαμηλό εργατικό κόστος και ο συνεπαγόμενος έντονος ανταγωνισμός των ασιατικών ναυπηγείων.

Οι νέες απαιτήσεις που διαμορφώνονται για τους ναυτικούς κινητήρες προσεγγίζονται πρακτικά με επεμβάσεις (είτε πρωτογενείς, π.χ. κινητήρες διπλού καυσίμου είτε δευτερογενείς, π.χ. προσθήκη συστημάτων δέσμευσης NOx) (Wartsila, 2010) στα υπάρχοντα συστήματα κινητήρων diesel. Σε επίπεδο έρευνας σχετικής με πρωτογενείς τεχνικές βελτίωσης των κινητήρων αναφορικά με αύξηση του βαθμού απόδοσης και μείωση των εκπομπών NOx, καταγράφεται ο άμεσος ελεγχόμενος ψεκασμός καυσίμου σε υψηλή πίεση

(common rail) (Hountalas, 2000), η επανακυκλοφορία καυσαερίων (EGR) (Hountalas, 2008) και η βελτιστοποίηση των παραμέτρων ψεκασμού (Chryssakis, 2006).



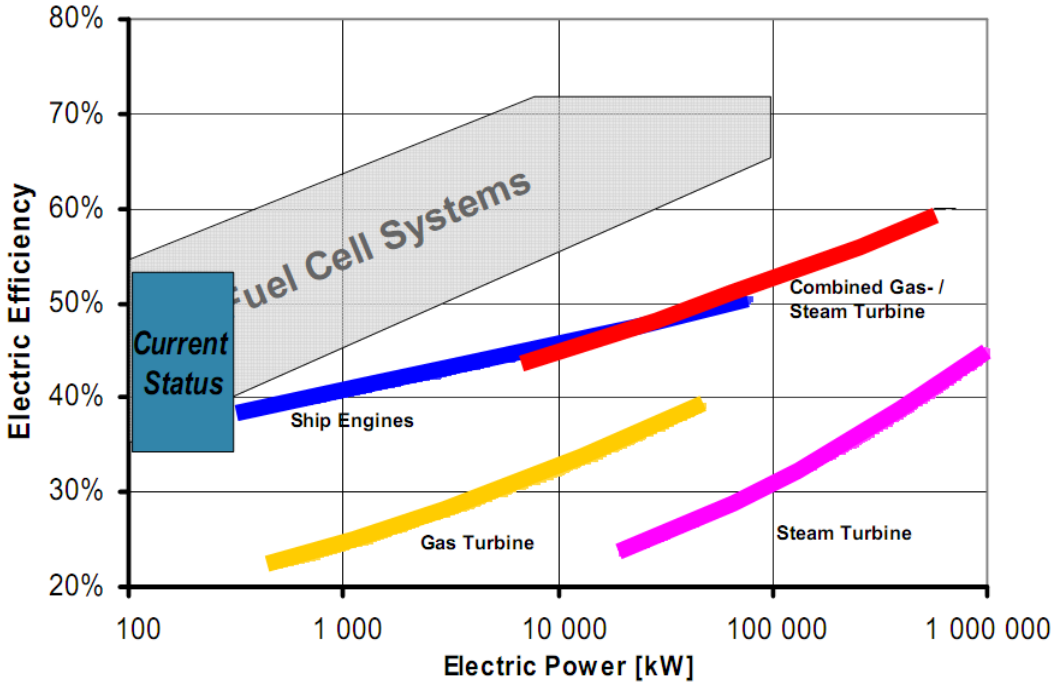
Σχήμα 4.1 Όρια εκπομπών NOx για ναυτικούς κινητήρες θεσμοθετημένα από τον οργανισμό IMO (Tier II: από 1/1/2011, Tier III: από 1/1/2016) (IMO, 2004).



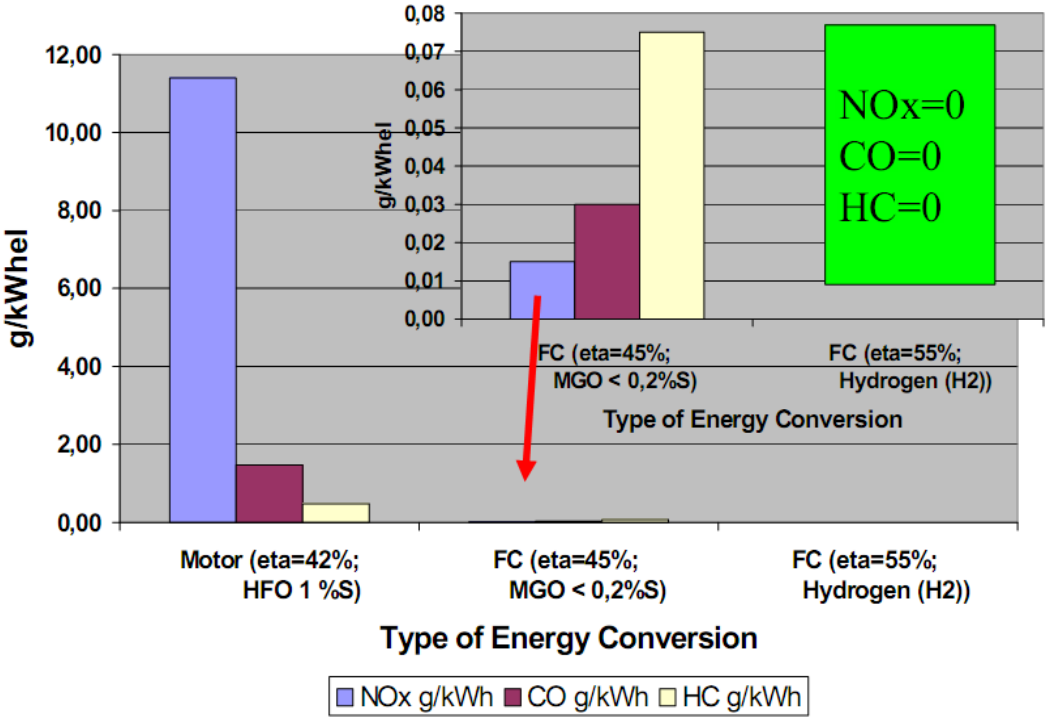
Σχήμα 4.2 Χρονική εξέλιξη ναυπήγησης νέων πλοίων 1997-2003 (MC-WAP, 2005)

Ωστόσο, διαπιστώνεται έντονη ερευνητική προσπάθεια (REF, 2011) που επικεντρώνεται στο σχεδιασμό και την εγκατάσταση μονάδων βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής (Auxiliary Power Units – APUs σε πλοία, που ενσωματώνουν κυψέλες καυσίμου (Fuel Cells – FCs). Οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμου είναι σε θέση να προσφέρουν σημαντικά – θεωρητικά – πλεονεκτήματα έναντι των συμβατικών κινητήρων diesel, όπως υψηλότεροι βαθμοί απόδοσης (Σχήμα 4.3) (σε πλήρες και μερικό φορτίο), μειωμένες εκπομπές ρύπων (Σχήμα 4.4) και απουσία κινούμενων μερών, κραδασμών και θορύβου. Ωστόσο, το γεγονός ότι οι εφαρμογές κυψελών καυσίμου βρίσκονται σε ερευνητικό – πιλοτικό στάδιο καθιστά την εγκατάσταση και

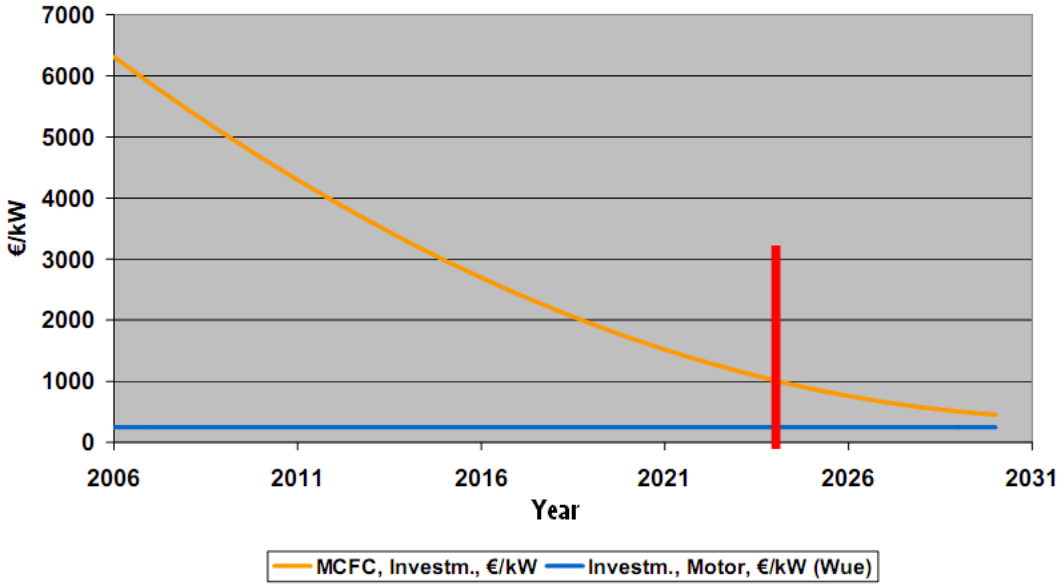
διασύνδεσή τους με την υπάρχουσα υποδομή πολύπλοκες και δαπανηρές (Bensaid et al., 2009), τουλάχιστον σε παρούσα φάση (Σχήμα 4.5). Πρόσφατες εκτιμήσεις (REF, 2011) τοποθετούν το έτος κατά το οποίο αναμένεται ανταγωνιστικό κόστος εγκατάστασης μετά το 2020.



Σχήμα 4.3 Σύγκριση ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης τεχνολογιών ηλεκτροπαραγωγής. (Wuersig, 2009)



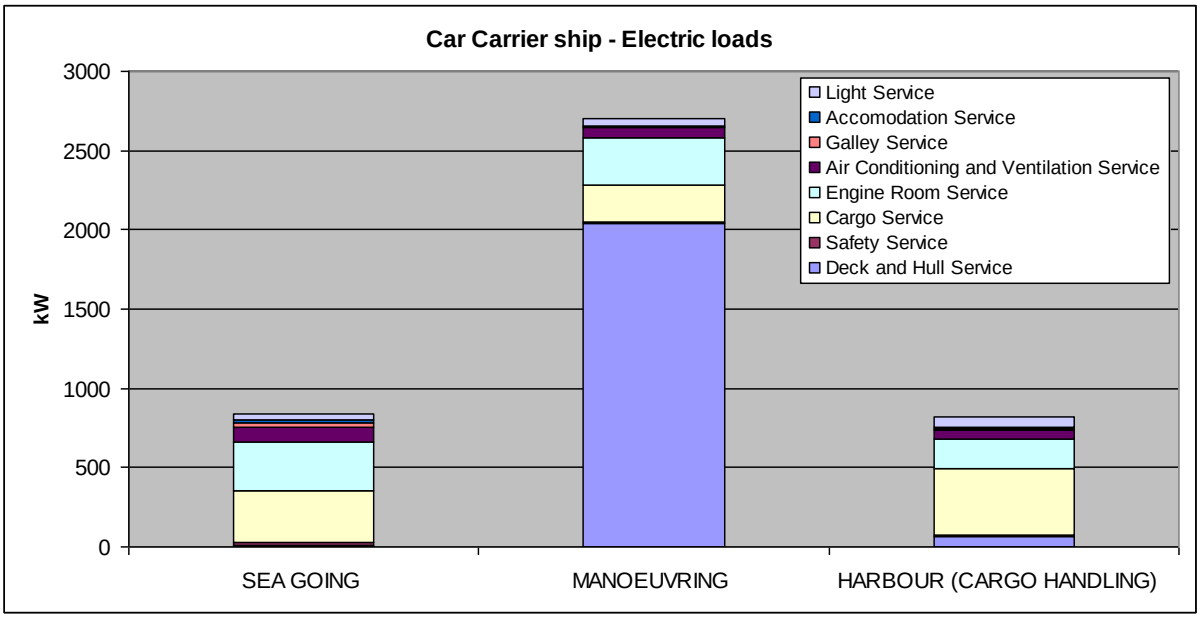
Σχήμα 4.4 Συντελεστές εκπομπής NOx, CO και HC για λειτουργία κινητήρα diesel (αριστερά), κυψέλης καυσίμου με τροφοδοσία MGO (Marine Gas Oil) (κέντρο) και κυψέλης καυσίμου με τροφοδοσία υδρογόνου (δεξιά). (HFO: Heavy Fuel Oil). (Wuersig, 2009)



Σχήμα 4.5 Εκτίμηση εξέλιξης κόστους εγκατάστασης συστήματος κυψέλης καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (MCFC). Σύγκριση με αντίστοιχο κόστος κινητήρα diesel. (Wuersig, 2009)

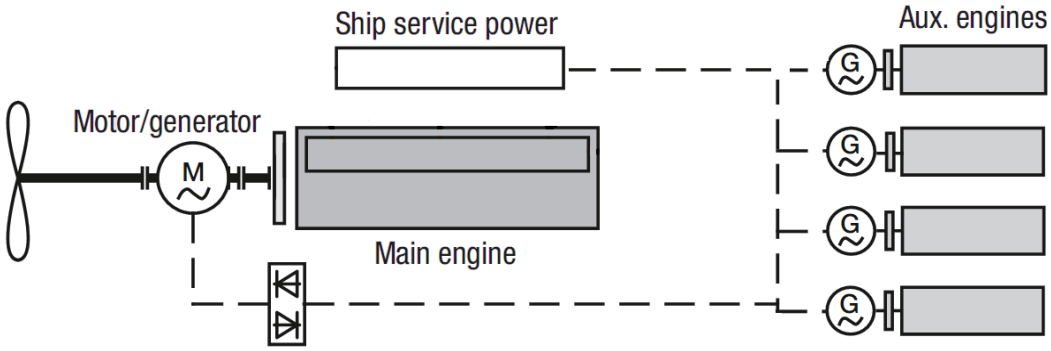
4.2 Τεχνολογίες βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής στη ναυτιλία

Ως μονάδες βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής (ΜΒΗ) (Auxiliary Power Units – APUs) ορίζονται τα συστήματα που καλούνται να καλύψουν τα διάφορα ηλεκτρικά φορτία (που δημιουργούνται από ανάγκες για φωτισμό, κλιματισμό, θέρμανση, ψύξη, κ.α.) εντός ενός μέσου μεταφοράς, μη συνεισφέροντας στην πρόωση/κίνηση του (Baratto and Diwekar, 2005; Adamson, 2006). Εκτός της παραγωγής ηλεκτρισμού, τα φορτία αυτά είναι δυνατόν να καλυφθούν είτε απομαστεύοντας ισχύ από τον κινητήρα πρόωσης (αεροπλάνα) είτε αποθηκεύοντας ηλεκτρισμό σε μπαταρίες (Adamson, 2006). Ωστόσο, σε ναυτικές εφαρμογές η παραγόμενη ισχύς των ΜΒΗ είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για πραγματοποίηση ελιγμών. Όπως διακρίνεται στο Σχήμα 4.6, τα ηλεκτρικά φορτία που καλύπτονται αφορούν το σύνολο των καταναλώσεων για φωτισμό, ενδιαίτηση, κλιματισμό, φόρτωση, λειτουργία του συστήματος της πρωραίας έλικας διεύθυνσης (bow thruster), κ.α. (Σχήμα 4.6).



Σχήμα 4.6 Τυπική κατανομή ηλεκτρικών φορτίων οχηματαγωγού πλοίου (MCWAP, 2005).

Η απεικόνιση μιας τυπικής κατανομής των φορτίων αυτών σε οχηματαγωγό πλοίο (MC-WAP, 2005) αναδεικνύει το μέγεθος της απαιτούμενης ισχύος κατά την πραγματοποίηση ελιγμών. Οι ΜΒΗ διατάσσονται παράλληλα σύμφωνα με το Σχήμα 4.7, όπου απεικονίζεται σχηματικά και η ηλεκτρική σύνδεσή τους με τον κινητήρα πρόωσης.



Σχήμα 4.7 Διάταξη κινητήρων βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής (Wartsila, 2011).

4.2.1 Κινητήρες Diesel

Οι ναυτικές μονάδες βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής αποτελούνται σχεδόν αποκλειστικά από τετράχρονους μεσόστροφους (600-1000 rpm) κινητήρες βαρέος diesel, που τοποθετούνται σε κοινό πλαίσιο με τη γεννήτρια (Εικόνα 4.1). Απαντώνται σε μεγάλο εύρος δυναμικότητας ισχύος (0.5-11 MWel) (Wartsila, 2009). Η μακροχρόνια εξέλιξη των ναυτικών κινητήρων έχει ως αποτέλεσμα να χαρακτηρίζονται από ιδιαίτερα μεγάλο βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης (συγκριτικά με τους υπόλοιπους θερμικούς κινητήρες – π.χ. αεριοστρόβιλο/ατμοστρόβιλο – Σχήμα 4.3) και αυξημένη αξιοπιστία (τεχνικά χαρακτηριστικά και τυπικές διαστάσεις παρατίθενται στο Παράρτημα Δ) (Wartsila, 2009).

Εικόνα 4.1 Ναυτική ηλεκτρογεννήτρια – Wartsila W20 (Wartsila, 2009).

4.2.2 Συστήματα κυψελών καυσίμου

Οι κυψέλες καυσίμου είναι ηλεκτροχημικές διατάξεις που μετατρέπουν τη χημική ενέργεια των καυσίμων απευθείας σε ηλεκτρική και χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό απόδοσης και ελάχιστες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (USDOE, 2004). Λόγω του ότι αποφεύγονται τα ενδιάμεσα στάδια της μετατροπής σε θερμότητα και μηχανικό έργο (όπως συμβαίνει στις

συμβατικές μεθόδους ηλεκτροπαραγωγής), δεν υφίστανται οι αντίστοιχες θερμοδυναμικές δεσμεύσεις των θερμικών κύκλων (Carnot). Επιπρόσθετα, δεν επισυμβαίνει φυσική επαφή καυσίμου – οξειδωτικού, κατά συνέπεια ούτε αντίδραση καύσης, άρα αποφεύγονται οι αντίστοιχες εκπομπές ρύπων.

Ένα τυπικό σύστημα ηλεκτροπαραγωγής με κυψέλες καυσίμου αποτελείται από δυο κύρια μέρη:

- Τις συστοιχίες, οι οποίες σχηματίζονται συνδέοντας τις επιμέρους κυψέλες μέσω διπολικών πλακών (Σχ 4.8).
- Τα βοηθητικά υποσυστήματα, υπεύθυνα για την τροφοδοσία του καυσίμου, τη θερμική διαχείριση, τη διαμόρφωση της παραγόμενης ισχύος, κ.α.

Η εξέλιξη συστημάτων κυψελών καυσίμου για βοηθητική ηλεκτροπαραγωγή βρίσκεται σε ερευνητικό – πιλοτικό στάδιο, καθώς δεν υπάρχουν εμπορικές εφαρμογές. Ωστόσο, με κύρια κίνητρα την εξαιρετική περιβαλλοντική επίδοση λόγω ηλεκτροχημικής και όχι θερμοχημικής μετατροπής της ενέργειας του καυσίμου και τις – θεωρητικά – ανώτερες ηλεκτρικές αποδόσεις, παρατηρείται σημαντική ερευνητική προσπάθεια (REF, 2011), προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι τεχνικές και οικονομικές προκλήσεις μιας εφαρμογής ευρείας κλίμακας.

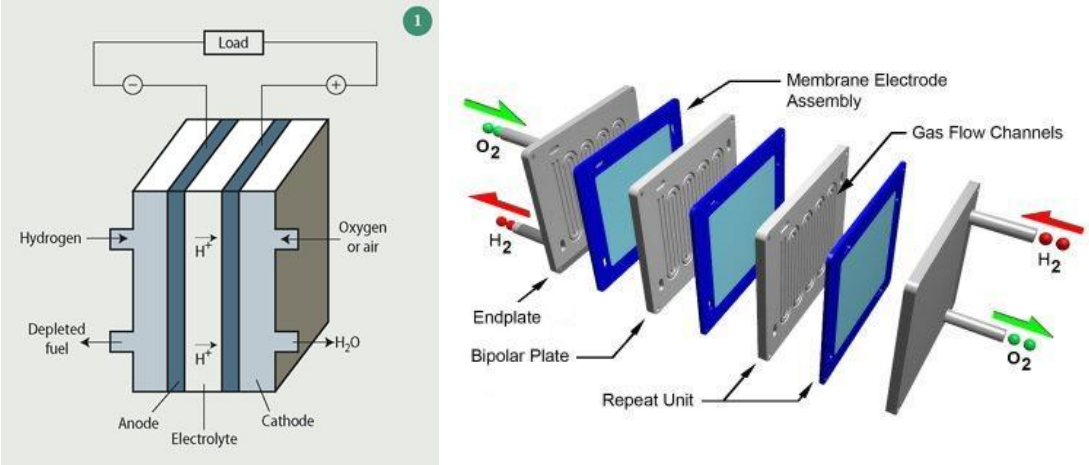
Οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμου που ελκύουν το ερευνητικό ενδιαφέρον για ναυτικές εφαρμογές είναι η κυψέλη καυσίμου τηγμένων ανθρακικών αλάτων (Molten Carbonate Fuel Cell – MCFC), η κυψέλη μεμβράνης ανταλλαγής πρωτονίων (Proton Exchange Membrane Fuel Cell – PEMFC) και η κυψέλη στερεών οξειδίων (Solid Oxide Fuel Cell – SOFC) (Adams, 1990; Sattler, 1998; Raguei et al., 2005; Alkaner and Zhou, 2006; USCG, 1999). Η πρώτη εξ' αυτών κρίνεται ως η πλέον υποσχόμενη για συστήματα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής σε ναυτικές εφαρμογές, λόγω των εξής πλεονεκτημάτων (Bensaid et al., 2009):

- Οι συστοιχίες MCFC είναι σε θέση να αξιοποιήσουν ως ενεργειακό φορέα το CO, το οποίο είναι συστατικό του αερίου αναμόρφωσης ναυτικών καυσίμων diesel. Αντίθετα, στις συστοιχίες PEM όχι μόνο δεν αξιοποιείται το CO, αλλά δρα ως «δηλητήριο», μειώνοντας δραστικά την ενεργειακή αποδοτικότητα (Baschuk and Li, 2000).
- Λόγω της υψηλής θερμοκρασίας λειτουργίας, στις συστοιχίες MCFC αφενός δεν απαιτούνται ευγενή μέταλλα ως καταλύτες και αφετέρου επιτυγχάνεται εσωτερική αναμόρφωση του CH_4 του αερίου αναμόρφωσης.
- Τα συστήματα MCFC εμφανίζουν γενικά μεγαλύτερο βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης.

Ακολουθεί περιγραφή των βασικών χαρακτηριστικών των διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου και των σημαντικότερων αντίστοιχων συστημάτων που βρίσκονται σε στάδιο ερευνητικής εφαρμογής.

4.2.2.1 Συστήματα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής βασισμένα σε κυψέλη καυσίμου τύπου PEM

Τα βασικά δομικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου τύπου PEM (Σχήμα 4.8) είναι τα δυο ηλεκτρόδια (άνοδος και κάθοδος) και η πολυμερής μεμβράνη – ηλεκτρολύτης, η οποία φέρει επιστρώσεις πλατίνας που δρα ως καταλύτης (USDOE, 2004).



Σχήμα 4.8 Αρχή λειτουργίας και δομικά στοιχεία κυψέλης τύπου PEM

Τα συστήματα κυψελών PEM είναι ο πιο διαδεδομένος τύπος, με κυριότερες εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία και σε φορητές συσκευές. Ως κύρια πλεονεκτήματα αναφέρονται (USDOE, 2004):

- Ο ηλεκτρολύτης στερεάς φάσης αποτρέπει την ανάμιξη των αερίων ρευμάτων
- Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας (80-100°C) συνεπάγεται γρήγορη εκκίνηση και δεν προκαλεί την απαίτηση χρήσης «εξωτικών» υλικών σε συστοιχία και βοηθητικά υποσυστήματα.
- Υψηλότερη συγκέντρωση ισχύος συγκριτικά με τους άλλους τύπους κυψελών καυσίμου.

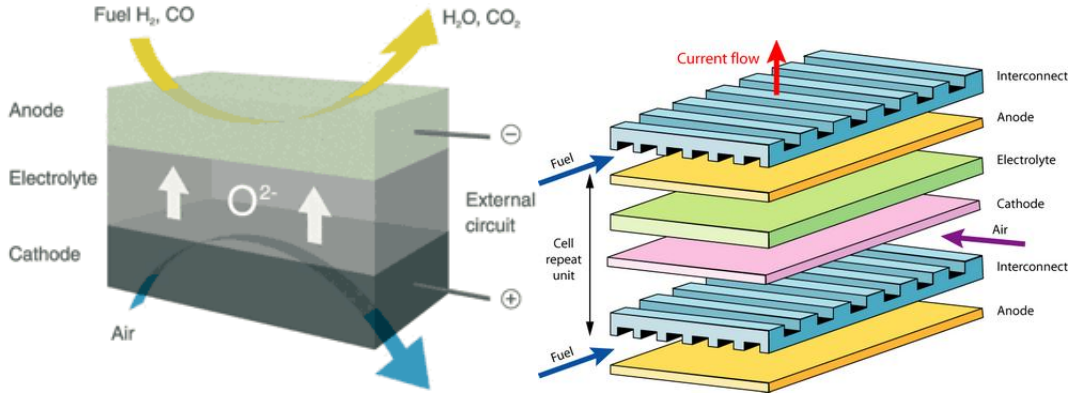
Στον αντίποδα, τα σημαντικότερα μειονεκτήματα είναι:

- Τα στενό εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας επιφέρει δυσκολίες στη θερμική διαχείριση
- Η χαμηλή ενθαλπία της απορριπτόμενης θερμότητας αποτρέπει την αξιοποίησή της μέσω συμπαραγωγής ή συνδυασμένης λειτουργίας θερμικού κύκλου.
- Υπάρχουν ιδιαίτερες απαιτήσεις όσον αφορά το ποσοστό υγρασίας στον ηλεκτρολύτη, το οποίο οφείλει να διατηρείται εντός συγκεκριμένου εύρους.
- Διαπιστώνεται ευαισθησία ακόμα και σε πολύ χαμηλές περιεκτικότητες (τάξης μεγέθους ppm) CO, ενώσεις θείου και αμμωνίας. Το παραπάνω συνεπάγεται πολύπλοκες και δαπανηρές διατάξεις αναμόρφωσης και καθαρισμού του καυσίμου.
- Η εφαρμογή τους εξαρτάται από την εξάπλωση της υποδομής παροχής υδρογόνου ως ενεργειακού φορέα, καθώς τροφοδοτούνται αποκλειστικά από αυτό.

Οι ερευνητικές/πιλοτικές εφαρμογές των κυψελών καυσίμου PEM για βοηθητική ηλεκτροπαραγωγή αφορούν μικρές μονάδες (10-20 kW) με καύσιμο υδρογόνο ή αναμορφωμένο προπάνιο, που από το 2006 έχουν τοποθετηθεί σε διάφορα μικρά σκάφη (ερευνητικά, τουριστικά, αναψυχής) (Roads2HyCom, 2008). Το πιο σημαντικό ερευνητικό πρόγραμμα PEM για μεγαλύτερες ισχύες (250 kW) είναι το HyFerry, το οποίο εντάσσεται στο μεγάλης κλίμακας (προϋπολογισμού 51,3 M€) βιομηχανικό πρόγραμμα ανάπτυξης τεχνολογιών κυψελών καυσίμου στη ναυτιλία "E4ships" (E4ships, 2009).

4.2.2.2 Συστήματα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής βασισμένα σε κυψέλη καυσίμου τύπου SOFC

Κατ' αντιστοιχία με τον τύπο PEM, στην κυψέλη SOFC διακρίνονται τα ίδια δομικά στοιχεία: η άνοδος, η κάθοδος και ο ηλεκτρολύτης (Σχήμα 4.9) (USDOE, 2004). Η κύρια διαφορά αφορά τον ηλεκτρολύτη, ο οποίος αποτελείται από στερεό, μη πορώδες οξείδιο μετάλλου, συνήθως υττρίου. Η θερμοκρασία λειτουργίας είναι 600-1000 °C, όπου επισυμβαίνει η αγωγή ιόντων οξυγόνου μέσω του ηλεκτρολύτη. Το πεδίο των εν δυνάμει εφαρμογών επεκτείνεται τόσο σε φορητά συστήματα, όσο και σε εφαρμογές συμπαραγωγής μικρής και μέσης δυναμικότητας.



Σχήμα 4.9 Αρχή λειτουργίας και δομικά στοιχεία κυψέλης τύπου SOFC

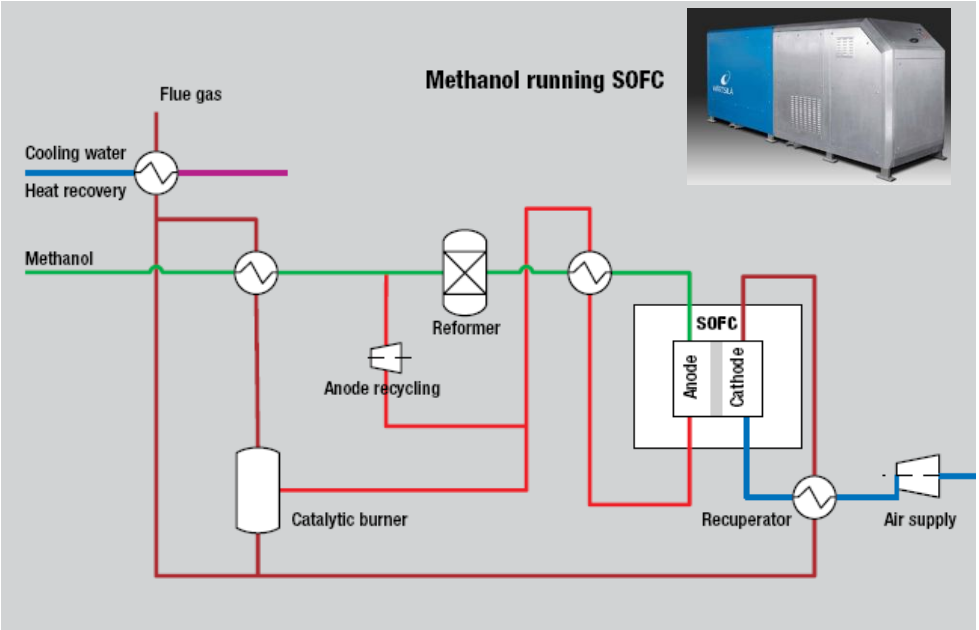
Ως κύρια πλεονεκτήματα καταγράφονται τα εξής (USDOE, 2004):

- Δυνατότητα διαμόρφωσης της κυψέλης σε πληθώρα μορφών και σχημάτων (κυλινδρική, πλακοειδής).
- Το CO αξιοποιείται ενεργειακά, έστω και έμμεσα, λόγω της παραγωγής υδρογόνου μέσω της αντίδρασης CO – H_2O (water gas shift reaction).
- Συγκρινόμενο με τον τύπο MCFC, δεν υφίσταται ανάγκη παροχής CO_2 στην κάθοδο.
- Λόγω των υψηλών θερμοκρασιών λειτουργίας, αφενός δεν απαιτούνται ευγενή μέταλλα για καταλύτες και αφετέρου η παραγόμενη θερμότητα είναι άμεσα αξιοποιήσιμη για συμπαραγωγή ή συνδυασμένη λειτουργία θερμικού κύκλου.
- Υψηλοί βαθμοί ηλεκτρικής απόδοσης – δυνατότητα υπέρβασης του 60%.

Τα αντίστοιχα κυριότερα μειονεκτήματα είναι:

- Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας προκαλεί ανισορροπίες κατά τη διαστολή των διαφόρων τύπων υλικών των κυψελών, με αποτέλεσμα την ανάπτυξη θερμικών τάσεων. Το παραπάνω συνεπάγεται περιορισμούς στην επιλογή των υλικών κατασκευής.
- Η επιδίωξη της αποφυγής διάβρωσης των μεταλλικών μερών της συστοιχίας (πλάκες διασύνδεσης – interconnects – Σχήμα 4.9) περιορίζει τη συγκέντρωση ισχύος που επιτυγχάνεται, τη δυνατότητα εναλλαγών στην αποδιδόμενη ισχύ (thermal cycling), όπως και το λειτουργικό χρόνο ζωής.

Η εφαρμογή του τύπου SOFC σε ναυτική ΜΒΗ είναι το αντικείμενο του ερευνητικού προγράμματος METHAPU (METHAPU, 2010), μέσω της τοποθέτησης πιλοτικής μονάδας δυναμικότητας 20 kW, τροφοδοτούμενης από μεθανόλη (Σχήμα 4.10).

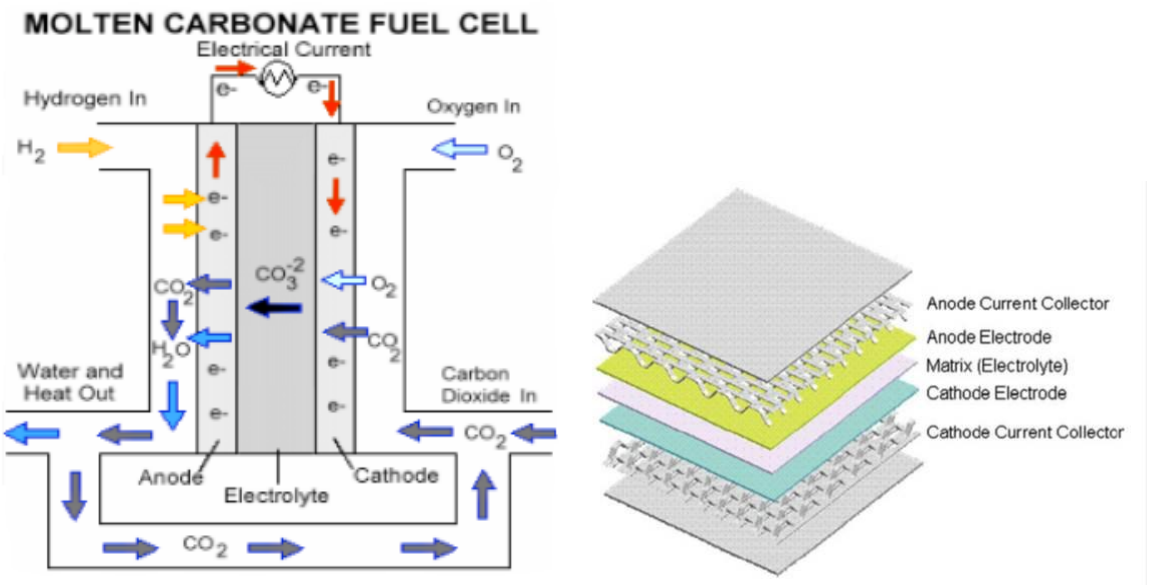


Σχήμα 4.10 Διάγραμμα λειτουργίας μονάδας SOFC με καύσιμο μεθανόλη. (METHAPU, 2010)

4.2.2.3 Συστήματα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής βασισμένα σε κυψέλη καυσίμου τύπου MCFC

Στο σχήμα 4.11 απεικονίζεται η αρχή λειτουργίας και τα δομικά στοιχεία της κυψέλης καυσίμου τύπου MCFC. Η ιδιαιτερότητα του συγκεκριμένου τύπου βασίζεται στη χρήση ανθρακικών αλάτων ως ηλεκτρολύτη, τα οποία στη θερμοκρασία λειτουργίας (600 - 700 °C) βρίσκονται σε υγρή μορφή και διαπερνώνται από ανθρακικά ιόντα (Σχήμα 4.11).

Λόγω του απαιτούμενου όγκου και της χρονοβόρου έναυσης των αντίστοιχων συστημάτων, οι εφαρμογές περιορίζονται σε μέσου μεγέθους (200-500 kW) μονάδες συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας.



Σχήμα 4.11 Αρχή λειτουργίας και δομικά στοιχεία κυψέλης τύπου MCFC. (USDOE, 2004)

Τα σημαντικότερα συγκριτικά πλεονεκτήματα του συγκεκριμένου τύπου κυψελών είναι τα εξής (USDOE, 2004):

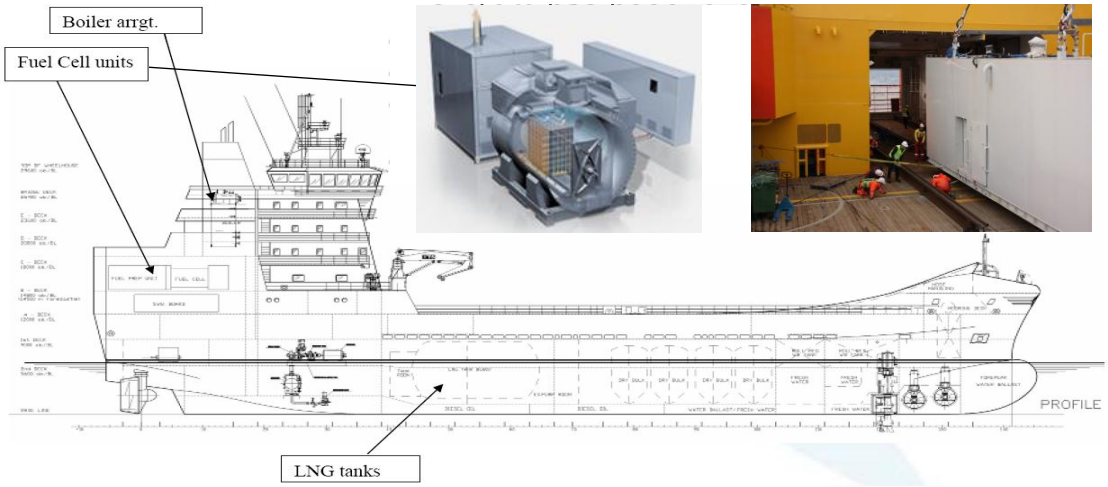
- Η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας προσφέρει τα αντίστοιχα πλεονεκτήματα με τον τύπο SOFC. Δεν απαιτούνται εξωτικά υλικά για την κατασκευή των ηλεκτροδίων, το CO και το CH_4 μετατρέπονται εσωτερικά σε υδρογόνο, απλουστεύοντας τα υποστηρικτικά υποσυστήματα.
- Αναμένονται υψηλές ηλεκτρικές αποδόσεις (της τάξης του 40-50%).
- Η υψηλή ενθαλπία της απορριπτόμενης θερμότητας είναι αξιοποιήσιμη σε εφαρμογές συμπαραγωγής η συνδυασμένου θερμικού κύκλου (συνδυασμός με αεριοστρόβιλο μικρής ισχύος – 100 kW – είναι σε θέση να εμφανίσει έως και 60% ηλεκτρική αποδοτικότητα.

Ωστόσο, καταγράφονται και σημαντικά μειονεκτήματα:

- Η κύρια πρόκληση αφορά το έντονα διαβρωτικό περιβάλλον του ηλεκτρολύτη, που απαιτεί τη χρήση έντονα κραματωμένου ανοξείδωτου χάλυβα.
- Παρατηρούνται τα αντίστοιχα προβλήματα που προκαλεί η υψηλή θερμοκρασία λειτουργίας (περιορισμοί στην επιλογή υλικών, θερμικές τάσεις, μειωμένος χρόνος ζωής).
- Απαιτείται συνεχής παροχή CO_2 στην κάθοδο (μέσω ανακύκλωσης από την έξοδο της ανόδου – Σχήμα 4.11), προκειμένου να παραχθούν τα ανθρακικά ιόντα.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα συστήματα που ενσωματώνουν την κυψέλη τηγμένων ανθρακικών αλάτων συγκεντρώνουν περισσότερο ερευνητικό ενδιαφέρον από τα αντίστοιχα με κυψέλες PEM και SOFC, κάτι που αποτυπώνεται τόσο από το πλήθος των πιλοτικών εφαρμογών, όσο και από το επίπεδο προόδου τους . Η πρώτη ενσωμάτωση ΜΒΗ με κυψέλες

MCFC μέσης ισχύος σε πλοίο εφοδιασμού (Supply vessel "Viking Lady") επιτεύχθηκε το Δεκέμβρη του 2009 στα πλαίσια του βιομηχανικού ερευνητικού προγράμματος «FellowSHIP» (Σχήμα 4.12) (FellowSHIP, 2010). Η μονάδα έχει δυναμικότητα 320 kW, τροφοδοτείται από LNG (Liquefied Natural Gas) και λειτουργεί σε πλήρες, μη μεταβαλλόμενο φορτίο. Ιδιαίτερα σημαντικό είναι το γεγονός ότι καλύπτει μεγάλο μέρος του ηλεκτρικού φορτίου κατά τον ελλιμενισμό (απαιτείται η συμπληρωματική λειτουργία μόνο μιας από τις 4 υπάρχουσες συμβατικές MBH Diesel). Κατά το πρώτο έτος λειτουργίας μετρήθηκε μείωση στις εκπομπές NOx κατά 180 τόνους (το ισοδύναμο 22000 αυτοκινήτων) και CO_2 κατά 20% (FellowSHIP, 2010). Ακόμα πιο φιλόδοξα είναι τα γερμανικά βιομηχανικά προγράμματα «Pa-X-ell» και «SchIBZ», που εντάσσονται στο "E4ships" (E4ships, 2009), καθώς αποσκοπούν στη δοκιμή μονάδων δυναμικότητας πάνω από 1 MW.



Σχήμα 4.12 Χωροθέτηση μονάδας βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής με συστοιχία MCFC (FellowSHIP, 2010)

Μεταξύ των σημαντικών ερευνητικών προσπαθειών ανάπτυξης της τεχνολογίας MCFC σε ναυτικές εφαρμογές κατατάσσεται και το πρόγραμμα «MC-WAP» (MC-WAP, 2005), στο πλαίσιο το οποίου ναι μεν δεν κατέστη εφικτός ο αρχικός στόχος της ενσωμάτωσης μιας MBH 500kW σε πλοίο, ωστόσο παρήχθη σημαντική γνώση σχετική με την αναμόρφωση του ναυτικού καυσίμου.

4.3 Προηγούμενες προσπάθειες αξιολόγησης

Το γεγονός ότι τα συστήματα που ενσωματώνουν τεχνολογίες κυψελών καυσίμου βρίσκονται σε πιλοτικό στάδιο έχει σαφή αντίκτυπο στην απουσία πλήθους δημοσιεύσεων σχετικών με την τεχνική, περιβαλλοντική και οικονομική τους αποδοτικότητα. Επικεντρώνοντας στην τεχνολογία κυψελών MCFC, ο όγκος των διαθέσιμων δεδομένων είναι ελάχιστος, λόγω του έντονου ανταγωνισμού μεταξύ των ελάχιστων εταιριών παγκοσμίως που την αναπτύσσουν. Δεν είναι τυχαίο επίσης το γεγονός ότι η όποια διαθέσιμη πληροφορία σε μορφή δημοσιεύσεων προέρχεται από τις τέσσερις χώρες στις οποίες εδρεύουν οι συγκεκριμένες εταιρίες (ΗΠΑ, Γερμανία, Ιταλία και Ν. Κορέα).

Σε επίπεδο αξιολόγησης της τεχνικής συνιστώσας συστημάτων παραγωγής ηλεκτρισμού (ή συμπαραγωγής) με κυψέλες MCFC, καταγράφεται η προσπάθεια προσομοίωσης και βελτιστοποίησης του βαθμού απόδοσης, με ιδιαίτερη έμφαση σε υβριδικά συστήματα MCFC – αεριοστρόβιλου μικρής ισχύος (Lunghi et al., 2001; Lunghi et al., 2003; Kyong and Tong, 2006; Orecchini, 2006). Οι απόπειρες αυτές ενεργειακής βελτιστοποίησης επικεντρώνονται στην παραμετρική ανάλυση των θερμοδυναμικών χαρακτηριστικών του συνδυασμένου κύκλου αεριοστροβίλου, ο οποίος είτε τροφοδοτείται μόνο από το υψηλής ενθαλπίας ρεύμα εξόδου από την συστοιχία είτε με συμπληρωματική καύση. Επίσης ερευνώνται εναλλακτικά του φυσικού αερίου καύσιμα, όπως αέριο σύνθεσης από αεριοποίηση βιομάζας (Iaquaniello and Mangiapane, 2006; Donolo et al., 2005) ή βιοαέριο (Bove and Lunghi, 2005). Σε επίπεδο καταγραφής της εμπειρίας από τη λειτουργία συστημάτων MCFC, αναφέρονται οι δημοσιεύσεις από τη γερμανική (Bischoff and Huppmann, 2002) και την αμερικανική (Daly et al., 2005) ερευνητική προσπάθεια.

Η παρουσία ελάχιστων συστημάτων MCFC με μακροχρόνια λειτουργία και η αντίστοιχη έλλειψη οικονομικών στοιχείων αναδεικνύεται από το ότι υπάρχει μόνο μία πλήρης δημοσίευση (Hengeveld and Revankar, 2007) που αφορά την οικονομική αποδοτικότητα της εγκατάστασης και λειτουργίας μιας μονάδας συμπαραγωγής MCFC. Στο συγκεκριμένο επιστημονικό άρθρο υπολογίζονται οι αποσβέσεις της αντίστοιχης επένδυσης για συστήματα δυναμικότητας 0,5 και 1 MW και αναλύεται η επίδραση της μεταβολής των τιμών φυσικού αερίου και ηλεκτρισμού στην οικονομική βιωσιμότητα.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής – ΑΚΖ (Life Cycle Assessment – LCA) αποτελεί μονόδρομο στο σύνολο των δημοσιεύσεων στις οποίες αναλύεται και εκτιμάται η περιβαλλοντική διάσταση της τεχνολογίας κυψελών καυσίμου MCFC. Οι Lunghi και Bove εκτός των άρθρων που αφορούν προσομοίωση συστημάτων, έχουν δημοσιεύσει αποτελέσματα μελετών περιβαλλοντικών εκτιμήσεων τόσο για μεμονωμένη συστοιχία MCFC

(Lunghi and Bove, 2003) όσο και για ολοκληρωμένο σύστημα ηλεκτροπαραγωγής (Lunghi et al., 2004). Σε επίπεδο συγκριτικής μελέτης αξιολόγησης με ανταγωνιστικά συστήματα, η περιβαλλοντική επίδοση των μονάδων MCFC αντιπαρατίθεται με αεριοστρόβιλους φυσικού αερίου (Raguei et al., 2005) και συμβατικές μεθόδους ηλεκτροπαραγωγής (Desideri et al., 2004).

Η μοναδική δημοσίευση που αφορά τη σύγκριση της περιβαλλοντικής αξιολόγησης ναυτικής ΜΒΗ με κυψέλες MCFC και συμβατικού ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους diesel είναι των Alkaner και Zhou (2006), οι οποίοι αντιμετωπίζουν την έλλειψη πρωτογενών δεδομένων με ανάλυση διαφόρων σεναρίων (μεταβάλλοντας το συντελεστή φορτίου και το ποσοστό ανάκτησης πρώτων υλών). Η κύρια συνεισφορά εντοπίζεται στην ανάδειξη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της κατασκευής των συστοιχιών MCFC.

Συνοψίζοντας τα ευρήματα των δημοσιεύσεων σχετικών με την αξιολόγηση των συστημάτων με κυψέλες MCFC διαπιστώνονται τα εξής:

- Μετά από περίπου μια δεκαετία ερευνητικής προσπάθειας, δεν διατίθενται στοιχεία μακροχρόνιας λειτουργίας συστημάτων MCFC, έτσι ώστε οι αξιολογήσεις των τριών συνιστωσών της συνολικής αποδοτικότητας (τεχνική, οικονομική και περιβαλλοντική) να τεθούν επί πραγματικής βάσης, μειώνοντας έτσι την αβεβαιότητα των αποτελεσμάτων τους.
- Διαφαίνεται μείωση του αριθμού δημοσιεύσεων μετά το έτος 2008, πιθανότατα λόγω επιβράδυνσης της σχετικής ερευνητικής δραστηριότητας που οφείλεται σε αναδιαμόρφωση των δραστηριοτήτων των εταιριών που αναπτύσσουν τη συγκεκριμένη τεχνολογία.
- Δεν καταγράφηκε κάποια απόπειρα δόμησης του προβλήματος αξιολόγησης της συγκεκριμένης καινοτόμου τεχνολογίας στο ευρύτερο τεχνικό – οικονομικό – περιβαλλοντικό πλαίσιο. Οι προσπάθειες αξιολόγησης αφορούν επιμέρους αξιολογήσεις της συνολικής αποδοτικότητας, καθώς δεν έχει διατυπωθεί μεθοδολογία ικανή να συνδυάζει τις τρεις βασικές αντίστοιχες συνιστώσες εντός ενός πλαισίου υποστήριξης της επιλογής συστήματος.

Η μεθοδολογία που διατυπώνεται στο 3^{ο} κεφάλαιο της παρούσας διατριβής επιχειρεί να καλύψει το κενό που περιγράφεται στο τρίτο σημείο της παραπάνω σύνοψης, ενσωματώνοντας και την υποκειμενική διάσταση των αποφασιζόντων εντός ενός κατάλληλα δομημένου πλαισίου υποστήριξης επιλογής τεχνολογίας.

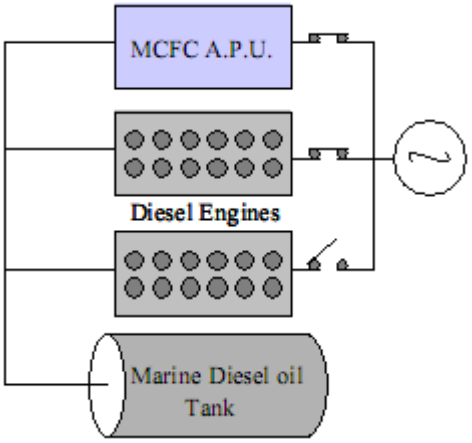
4.4 Εφαρμογή μεθοδολογίας

Στο παρόν υποκεφάλαιο εφαρμόζεται η μεθοδολογία που περιγράφηκε στο 3ο κεφάλαιο, προκειμένου να αξιολογηθεί συνολικά και συγκριτικά ένα πρότυπο σύστημα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής για ναυτικές εφαρμογές.

4.4.1 Καθορισμός πλαισίου συνδυασμένης αξιολόγησης

Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας αποσκοπεί στην συγκριτική αξιολόγηση του κύκλου ζωής πρότυπης ΜΒΗ με συστοιχία MCFC. Ως σύστημα αναφοράς επιλέγεται ηλεκτροπαραγωγό ζεύγος με κινητήρα diesel αντίστοιχης δυναμικότητας. Οφείλει να γίνει σαφές το ότι η μονάδα συστοιχίας MCFC που μελετάται, αναπτύχθηκε – σε θεωρητικό επίπεδο – στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος MC-WAP (MC-WAP, 2005).

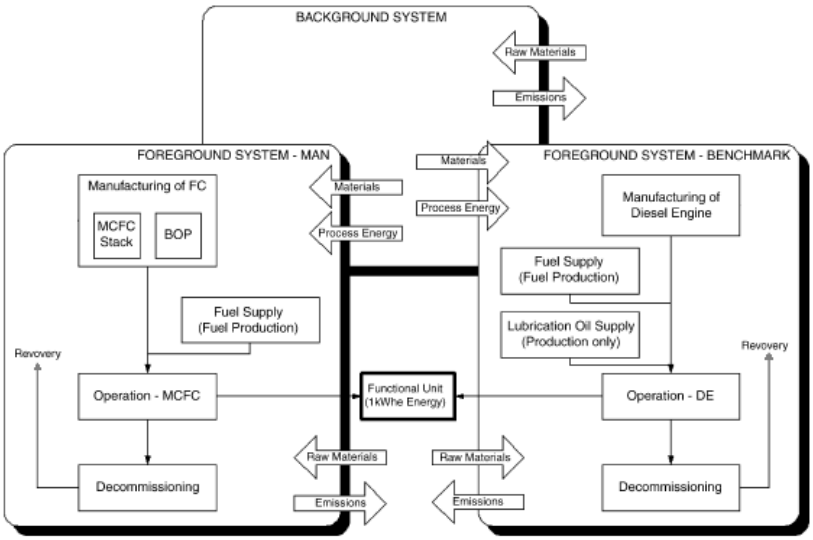
Τα ανταγωνιστικά συστήματα καλούνται να καλύψουν ηλεκτρικό φορτίο βάσης (συνεχής λειτουργία σε πλήρη δυναμικότητα) μεγέθους 500 kW, σε παράλληλη σύνδεση με τις υπόλοιπες μονάδες diesel (Σχήματα 4.7 και 4.13). Το κοινό καύσιμο θεωρείται ότι είναι diesel προδιαγραφών NATO F76 με περιεκτικότητα σε θείο 1000 ppm.



Σχήμα 4.13 Παράλληλη διάταξη ΜΒΗ

Στο σχήμα 4.14 απεικονίζονται τα όρια των εξεταζόμενων συστημάτων, τα οποία καλύπτουν τα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής (εξόρυξη πρώτων υλών, κατασκευή, λειτουργία και τέλος ζωής).

Παρατηρείται επίσης ο διαχωρισμός των απαιτούμενων δεδομένων σε γενικά (background data) και ειδικά (foreground data) ανάλογα με το αν αφορούν τις παράπλευρες διεργασίες του κύκλου ζωής (πρώτες ύλες, παραγωγή ηλεκτρισμού δικτύου,



Σχήμα 4.14 Διάγραμμα απεικόνισης ορίων των εξεταζόμενων συστημάτων (Alkaner and Zhou, 2006)

μεταφορές, κ.α.) ή τα εξεταζόμενα συστήματα. Ως λειτουργική μονάδα, στην οποία ανάγονται τα αποτελέσματα της AKZ ορίζεται η παραγωγή μιάς ηλεκτρικής κιλοβατώρας.

4.4.1.1 Καθορισμός ανταγωνιστικών τεχνολογιών/συστημάτων

Η μονάδα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής με συστοιχία MCFC αναλύεται στα παρακάτω υποσυστήματα (Σχήμα 4.15 και Πίνακας 4.1):

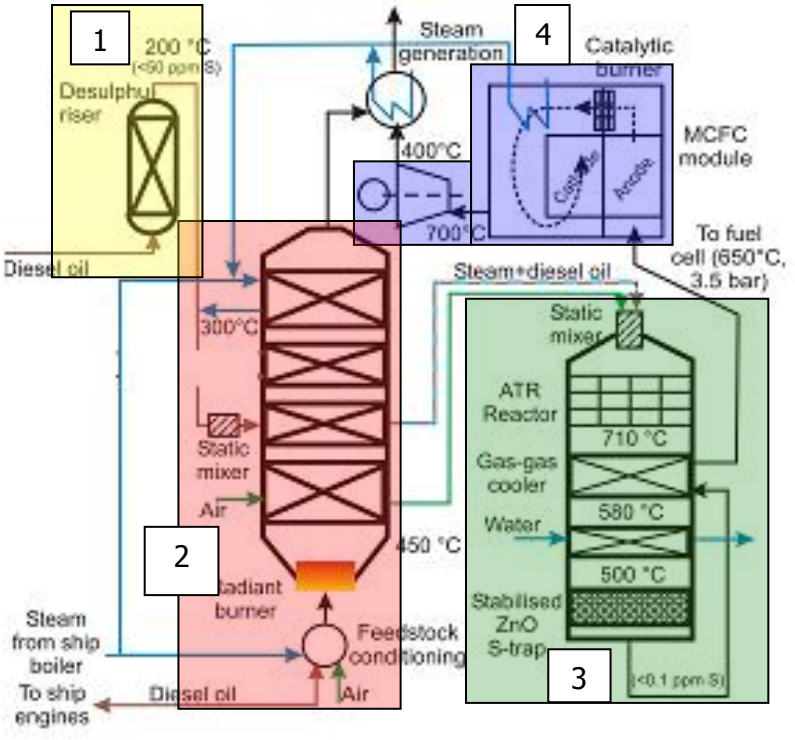
1. *Υποσύστημα αρχικής αποθείωσης*.

Η βασική λειτουργία είναι η μείωση της περιεκτικότητας του εισερχόμενου καυσίμου σε θείο από 1000 σε 50-100 ppm. Αυτό επιτυγχάνεται με τη χρήση NiO ως απορροφητικού μέσου.

2. *Υποσύστημα θερμικής διαχείρισης*.

Αποτελείται από καυστήρα πορώδους μέσου και διάφορους εναλλάκτες. Αποσκοπεί στη διαμόρφωση των κατάλληλων θερμοκρασιών στις εξής ροές:

- Του ατμού που παράγεται από την εξαγωγή του υποσυστήματος MCFC – αεριοστρόβιλου, προκειμένου να αναμιχθεί με το αποθειωμένο diesel (εκροή υποσυστήματος αρχικής αποθείωσης).
- Του μίγματος diesel-ατμού, προκειμένου να προσαχθεί προς αναμόρφωση.
- Του αέρα περιβάλλοντος, πριν την εισαγωγή του στο υποσύστημα αναμόρφωσης.



Σχήμα 4.15 Διάγραμμα απεικόνισης των βασικών υποσυστημάτων της ΜΒΗ με συστοιχία MCFC (MC-WAP, 2005).

3. *Υποσύστημα αναμόρφωσης – τελικής αποθείωσης*.

Εντός του υποσυστήματος αναμόρφωσης επιτελείται η μετατροπή του μίγματος καυσίμου-ατμού σε μίγμα αερίων φορέων ενέργειας κατάλληλο για αξιοποίηση από τη συστοιχία MCFC.

Στον αντιδραστήρα αυτόθερμης αναμόρφωσης (Autothermal Reforming reactor – ATR reactor), οι υδρογονάνθρακες αντιδρούν με ατμό παρουσία οξυγόνου και κατάλληλου καταλύτη, σχηματίζοντας μίγμα H2, CO, CO2, H2O, CH4 και N2 μέσω των αντιδράσεων:

- CXHY + x/2 O2 → x CO + y/2 H2 (μερική οξείδωση)
- CXHY + x H2O → x CO +(x+y/2) H2 (αναμόρφωση υδρογονανθράκων)
- CH4 + H2O ←→ CO + 3 H2 (αναμόρφωση μεθανίου)
- CO + H2O ←→ CO2 + H2 (αντίδραση water-gas shift)

MCFC APU Assemblies and Components				
1. Liquid de-S	4. MCFC Module	2. Heat Cell	3. ATR Package	5. BoP
Reactor	Fuel Cell Assembly	Porous burner & Vaporiser	First ATR Cooler	Process Air Compressor
	Gas Turbine Module	Combustion chamber	Second ATR Heat Exchanger	Power Conditioning
	Steam Generator	Process steam superheater	Autothermal Reformer	Control System
Adsorber		Air/feed preheaters	Sulphur Guard	Diesel Pump
	Convective Section	Combustion fan	ATR Distributor	Cooling of FCM
		Static mixer	Casing	Safety gas bottles

Πίνακας 4.1 Καταγραφή υποσυστημάτων και εξαρτημάτων ΜΒΗ με συστοιχία MCFC

Με κατάλληλη ανάμιξη των εισερχόμενων ροών επιτυγχάνεται μια αυτοσυντηρούμενη διεργασία, όπου η παραγόμενη θερμότητα κατά την μερική οξείδωση (εντόνως εξώθερμη) αξιοποιείται στις αντιδράσεις αναμόρφωσης (ενδόθερμες). Διατηρούνται υποστοιχειομετρικές συνθήκες, προκειμένου να μην αντιδράσει υπερβολικό ποσοστό υδρογονανθράκων με οξυγόνο, ώστε να αναμορφωθεί ικανή ποσότητα σε υδρογόνο και CO. Η θερμοκρασία της διεργασίας ελέγχεται μέσω του λόγου αέρα/καυσίμου. Αύξησή της προκαλεί μεγαλύτερη παραγωγή H2. Ενδεχόμενη αύξηση της πίεσης έχει αρνητικό αντίκτυπο στην αναμόρφωση, καθώς οι αντίστοιχες αντιδράσεις συνοδεύονται από μεγαλύτερο όγκο προϊόντων. Ιδιαίτερα σημαντικός είναι και ο λόγος ατμού/καυσίμου (τυπικές τιμές κυμαίνονται εντός των ορίων 1,5 και 3,0 mol/mol), έχοντας άμεση επίδραση στην αποφυγή σχηματισμού σωματιδίων άνθρακα. Ο βαθμός απόδοσης της διεργασίας αναμόρφωσης εκφράζεται μέσω του λόγου των ενεργειακών περιεχομένων καυσίμου και παραγόμενων αξιοποιήσιμων αερίων: $\eta_{ref} = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot LHV_{H_2} + \dot{m}_{CO} \cdot LHV_{CO}}{\dot{m}_f \cdot LHV_f}$.

Στο ίδιο υποσύστημα εντάσσεται και το τελικό στάδιο αποθείωσης, το οποίο καλείται να μειώσει την περιεκτικότητα του παραγόμενου μίγματος αερίου σε ενώσεις θείου στα

ανεκτά από τη συστοιχία MCFC επίπεδα του 0,1 ppm. Η τελική αποθείωση επιτυγχάνεται μέσω απορρόφησης από πορώδες οξείδιο του ψευδαργύρου σύμφωνα με την αντίδραση: ZnO(S) + H2S(g) → ZnS(S) + H2O (g). Το γεγονός ότι η παραπάνω αντίδραση επισυμβαίνει σε θερμοκρασιακό εύρος μεταξύ 320-400 °C, καθιστά αναγκαία την ψύξη του ρεύματος του παραγόμενου μίγματος μέσω εναλλαγής με νερό και με το εξερχόμενο από την αποθείωση ρεύμα (Σχήμα 4.15).

4. *Υποσύστημα συστοιχίας MCFC – αεριοστρόβιλου*.

Η συστοιχία MCFC επιτελεί τη βασική λειτουργία της μετατροπής της χημικής ενέργειας του αερίου αναμόρφωσης σε ηλεκτρική. Όπως προαναφέρθηκε, η μετατροπή αυτή επιτελείται απευθείας στους 600°C μέσω των εξής αντιδράσεων (Σχήμα 4.11):

$$H_2 + CO_3^{=} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2e^- \quad \text{(άνοδος)}$$

$$\tfrac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2e^- \rightarrow CO_3^{=} \quad \text{(κάθοδος)}$$

$$H_2 + \tfrac{1}{2} O_2 + CO_{2(cathode)} \rightarrow H_2O + CO_{2(anode)} \quad \text{(συνολικά)}$$

Το υποσύστημα συστοιχίας MCFC βρίσκεται εντός κελύφους υπό πίεση 3.5 bar. Εκτός της συστοιχίας περιέχει τα εξής εξαρτήματα (Σχήμα 4.15):

- Καταλυτικό καυστήρα, όπου αντιδρά τα καύσιμο κλάσμα της εξαγωγής της ανόδου (μετάκαυση).
- Εναλλάκτη θερμότητας που επαναφέρει την ανακυκλοφορία CO2 στη θερμοκρασία λειτουργίας και παράγει ατμό.
- Συμπιεστή ανακυκλοφορίας CO2
- Ηλεκτρικές αντιστάσεις, οι οποίες προθερμαίνουν την κάθοδο κατά την εκκίνηση.

Η ενθαλπία των καυσαερίων εξόδου είναι ικανή να κινήσει τον αεριοστρόβιλο, ώστε να παραχθεί επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια. Πριν την απόρριψη στο περιβάλλον η εξαγωγή του αεριοστρόβιλου διοχετεύεται σε εναλλάκτη ώστε να παραχθεί επιπλέον ατμός προς ανάμιξη με το ρεύμα καυσίμου (Σχήμα 4.15).

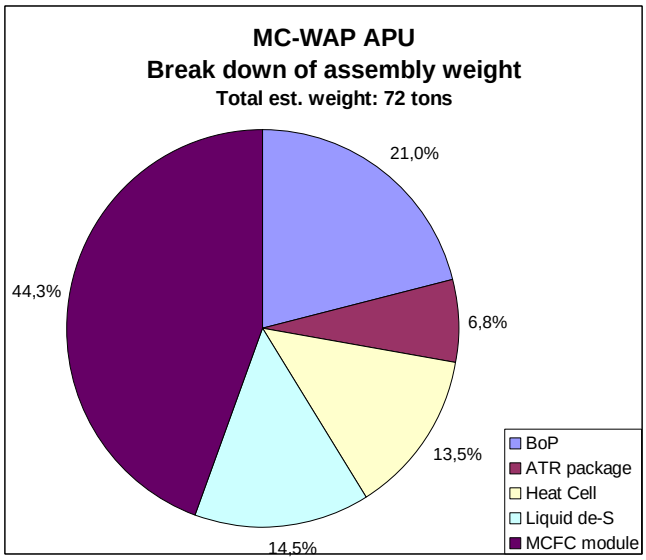
5. *Βοηθητικά υποσυστήματα - εξαρτήματα*.

Στα υπόλοιπα μέρη της ΜΒΗ που δεν απεικονίζονται στο Σχήμα 4.15 κατατάσσονται βοηθητικές αντλίες, συμπιεστές και τα υποσυστήματα ελέγχου και διαχείρισης της παραγόμενης ηλεκτρικής ισχύος.

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας AKZ προϋποθέτει τη παροχή δεδομένων σχετικών με το είδος και την ποσότητα των απαιτούμενων πρώτων υλών για την κατασκευή των υποσυστημάτων που καταγράφηκαν. Οι αναλυτικοί πίνακες που περιέχουν τα αντίστοιχα στοιχεία και τις πηγές από τις οποίες ανακτήθηκαν παρατίθενται στο Παράρτημα Ε. Συνοπτικά, το συνολικό βάρος της ΜΒΗ συστοιχίας MCFC εκτιμήθηκε στους 72 tn, με την αντίστοιχη κατανομή να απεικονίζεται στα σχήματα 4.16 και 4.17. Είναι σημαντικό να αναφερθεί το ότι, σύμφωνα με

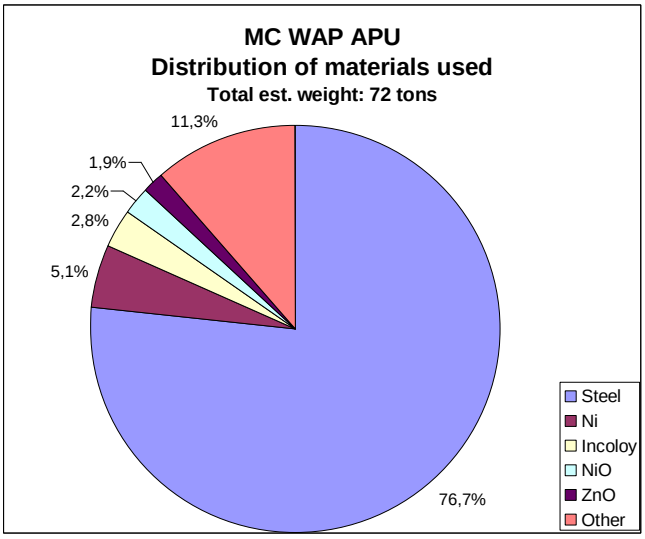
τις παραδοχές αντίστοιχων μελετών (Alkaner and Zhou, 2006; Karakoussis et al., 2001), θεωρείται ότι οι απώλειες υλικών κατά την κατασκευή των διαφόρων υποσυστημάτων είναι 15% της τελικά χρησιμοποιούμενης ποσότητας.

Όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.2.1 της διατριβής, η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας απαιτεί επίσης συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά. Λόγω της συγκεκριμένης εφαρμογής (μη κάλυψη θερμικού φορτίου, συνεχής και σταθερή λειτουργία), δεν απαιτούνται δεδομένα σχετικά με μεταβαλλόμενη λειτουργία και συμπαραγωγή.



Σχήμα 4.16 Κατανομή συνολικού βάρους σε υποσυστήματα

Ο Πίνακας 4.2 περιέχει τα σχετικά τεχνικά δεδομένα για τη ΜΒΗ με συστοιχία MCFC, τα οποία κατά κύριο λόγο προέρχονται από προσομοιώσεις (Bensaid et al., 2009) και εμπορικές βάσεις δεδομένων (Ecoinvent, 2009).



Σχήμα 4.17 Κατανομή συνολικού βάρους σε υλικά κατασκευής

Όσον αφορά τις εκπομπές ρύπων κατά τη λειτουργία, προέρχονται από τρεις πηγές:

- Εξαγωγή ανόδου-καθόδου, μετά από την μετάκαυση, την κίνηση του αεριοστρόβιλου και την ατμοπαραγωγή στον αντίστοιχο εναλλάκτη.
- Καυσαέρια πορώδους καυστήρα (υποσύστημα θερμικής διαχείρισης).
- Αναγέννηση υλικών απορρόφησης θείου (NiO στο υποσύστημα αρχικής αποθείωσης και ZnO στο υποσύστημα τελικής αποθείωσης).

Ως σύστημα αναφοράς με το οποίο συγκρίνεται η ΜΒΗ με συστοιχία MCFC επιλέγεται το μοντέλο 520W4L20 της σειράς ηλεκτρογεννητριών Auxpac (Wartsila, 2011) (Παράρτημα Δ) της Wartsila, λόγω της παραπλήσιας δυναμικότητας ισχύος που αποδίδει. Η λεπτομερής περιγραφή της λειτουργίας της μονάδας diesel κρίνεται ως μη επιβεβλημένη, λόγω του ότι αφορά καθιερωμένη και ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία.

Τα δεδομένα σχετικά με τα απαιτούμενα υλικά για κατασκευή του ηλεκτροπαραγωγού ζεύγους παρατίθενται στο Παράρτημα Ε. Κατ' αντιστοιχία με τον πίνακα 4.2, στον πίνακα 4.3 απεικονίζονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρογεννήτριας diesel.

ΜΒΗ με συστοιχία MCFC					
Χρόνος ζωής συστήματος (h)	Δυναμικότητα (kW)	Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης η_{el} (%)	Ειδική κατανάλωση καυσίμου – SFC (kg/kWh)	Συντελεστές εκπομπών ρύπων λειτουργίας (g/kWh)	
120000	500	35,1%	0.2408	CO_2	855
				CO	0.027
				NO_x	0.015
				SO_2	0.427
				HC	0.075
				PM	0
Σχόλια - Παραδοχές: 1. Ο χρόνος ζωής της συστοιχίας είναι 30000h. 2. Ετήσια λειτουργία: 6000 h 3. $SFC_{MCFC}=3600/((\eta_{el\_MCFC})*LHV)$. LHV=42600 kJ/kg 4. Υπολογισμός συντελεστή CO2: αντίστοιχος συντελεστής για μονάδα Diesel (Briem, 2003), ανηγμένος στην ηλεκτρική απόδοση της μονάδας MCFC. 5. Υπολογισμός συντελεστών CO, NOx: άθροιση συντελεστών από εξαγωγή υποσυστήματος συστοιχίας (Briem, 2003) και θερμικής διαχείρισης (CO: 10 mg/kWhth , NOx: 40 mg/kWhth) (Brehmer et al., 2004). 6. Το περιεχόμενο S των καυσίμων μετατρέπεται στο σύνολό του SO2, κατά την αναγέννηση των υλικών απορρόφησης (NiO και ZnO).					
Πηγές: (Alkaner and Zhou, 2006), (Bensaid et al., 2009), (Ecoinvent, 2009), (Briem, 2003)					

Πίνακας 4.2 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά ΜΒΗ με συστοιχία MCFC.

ΜΒΗ με κινητήρα diesel						
Χρόνος ζωής συστήματος (h)	Δυναμι-κότητα (kW)	Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης η_{el} (%)	Ειδική κατανάλωση καυσίμου – SFC (kg/kWh)	Ειδική κατανάλωση λιπαντικού – (g/kWh)	Συντελεστές εκπομπών ρύπων λειτουργίας (g/kWh)	
120000	500	43.0%	0.1965	7,0	CO_2	698
					CO	1.68
					NO_x	13.43
					SO_2	0.427
					HC	0.53
					PM	0.55
Σχόλια - Παραδοχές: 1. Ετήσια λειτουργία: 6000 h 2. $SFC_{DE}=3600/((\eta_{el\_DE})*LHV)$. LHV=42600 kJ/kg 3. Υπολογισμός συντελεστή SO2: το 1/6 του συντελεστή από (Briem, 2003), λόγω αντίστοιχης περιεκτικότητας σε θείο του καυσίμου.						
Πηγές: (Alkaner and Zhou, 2006), (Ecoinvent, 2009), (Briem, 2003)						

Πίνακας 4.3 Βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά ΜΒΗ με κινητήρα diesel.

4.4.2 Επιμέρους αξιολογήσεις τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής συνιστώσας

Το δεύτερο σκέλος αποσκοπεί στην συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, προκειμένου να καθοριστούν και να ποσοτικοποιηθούν κριτήρια αξιολόγησης της τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής αποδοτικότητας των συστημάτων που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Με δεδομένο ότι στην επόμενη δεκαετία (με χρονικό ορίζοντα το 2020-25) αναμένονται σημαντικές αλλαγές στη συνολική αποδοτικότητα και των δυο ανταγωνιστικών συστημάτων, εξετάζεται και το μελλοντικό σενάριο που ενσωματώνει τις αναμενόμενες εξελίξεις. Οι υποθέσεις σχετικά με την μελλοντική απόδοση της μονάδας MCFC (κεντρική τιμή και εύρος διακύμανσης) αντιστοιχούν στις πλέον αισιόδοξες εκτιμήσεις (EPA, 2003), (MC-WAP, 2005), (Moreno et al., 2008), (Lunghi et al., 2001), (Wuersig, 2009), (Delta, 2006) σχετικά με την επίτευξη των λειτουργικών στόχων της συγκεκριμένης τεχνολογίας. Όσον αφορά τη μονάδα DE, εφαρμόζεται η υπόθεση ότι η τήρηση των νέων ορίων εκπομπών NOx (Σχήμα 4.1-Tier II) (IMO, 2004) θα επιτευχθεί μέσω βελτιστοποίησης παραμέτρων καύσης. Σύμφωνα με τους Yoon et al. (2008), είναι εφικτή η μείωση των εκπομπών NOx κατά 24% (ικανή να επιτύχει τήρηση των ορίων Tier II) μέσω βελτιστοποίησης του σχεδιασμού (σε θάλαμο καύσης και ακροφύσιο έγχυσης) και του ρυθμού έγχυσης του καυσίμου. Η συνεπαγόμενη μείωση του βαθμού απόδοσης κατά 0,7% (Yoon et al., 2008) απεικονίζεται στα στοιχεία στον πίνακα 4.5, ωστόσο θεωρείται αμελητέα η πιθανή αύξηση του κόστους εγκατάστασης. Δεν εξετάστηκαν περιπτώσεις μείωσης των εκπομπών NOx μέσω επεμβάσεων δέσμευσης κατάντη της μονάδας. Επίσης, δεν αξιοποιήθηκαν διαθέσιμα στοιχεία (Jacobs et al., 2003, Hountalas et al., 2008) σχετικά με πιο δραστικές τεχνικές (EGR – βλ. §4.1.1), οι οποίες επιτυγχάνουν μείωση αντίστοιχη με την τήρηση των ορίων Tier III, λόγω της αδυναμίας εκτίμησης του αντίστοιχου κόστους.

4.4.2.1 Τεχνική αξιολόγηση

Ακολουθούνται τα μεθοδολογικά βήματα που περιγράφονται στην παράγραφο §3.2.2.1, τόσο για τον καθορισμό των κριτηρίων αξιολόγησης όσο και για τη συλλογή των δεδομένων, προκειμένου να συμπληρωθεί ο πίνακας τεχνικής αξιολόγησης (Πίνακας 4.4), σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του σχήματος 3.1. Υπενθυμίζεται ότι η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης αφορά συνεχές, σταθερό και όχι συμπαραγωγικό φορτίο, κάτι που έχει ως συνέπεια να μην εφαρμόζονται τα μεθοδολογικά βήματα που σχετίζονται με συμπαραγωγή και μεταβαλλόμενο φορτίο. Τα δεδομένα για το εκτιμώμενο εύρος της ηλεκτρικής απόδοσης της μονάδας MCFC προέρχονται από σχετική δημοσίευση (Bensaid et al., 2009), όπου προσομοιώνονται

εναλλακτικές διατάξεις επεξεργασίας και αναμόρφωσης του εισερχόμενου καυσίμου. Τα αντίστοιχα δεδομένα για το μελλοντικό σενάριο παρουσιάζονται στον πίνακα 4.5.

		MCFC (a_1)			DE (a_2)		
		Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_3)$
Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης	%	32.7	41.7	50.6	42.0	43.0	45.0
Ισχύς ανά απαιτούμενο εμβαδό	kW/m2	5.0	7.5	10.0	35.0	40.0	45.0
Χρόνος απόδοσης πλήρους ισχύος	s	12000	15000	18000	30	45	60
Χρονικό διάστημα για επισκόπηση/συντήρηση συστήματος	h	10000	12500	15000	25000	27500	30000
Χρόνος ζωής συστήματος	h	10000	30000	40000	120000	120000	160000
Θόρυβος	dB-1m	70.0	75.0	80.0	70.0	92.5	115.0

Πίνακας 4.4 Τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Σενάριο παρούσας κατάστασης. Πηγές: (Alkaner and Zhou, 2006), (Bensaid et al., 2009), (EPA, 2003), (MC-WAP, 2005), (Moreno et al., 2008), (Lunghi et al., 2001), (Wuersig, 2009).

		MCFC (a_1)			DE (a_2)		
		Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_3)$
Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης	%	45.0	55.0	60.0	41.7	42.7	44.7
Ισχύς ανά απαιτούμενο εμβαδό	kW/m2	10.0	17.5	25.0	35.0	40.0	45.0
Χρόνος απόδοσης πλήρους ισχύος	s	9000	11500	13500	30	45	60
Χρονικό διάστημα για επισκόπηση/συντήρηση συστήματος	h	6000	7500	9000	25000	27500	30000
Χρόνος ζωής συστήματος	h	30000	40000	50000	120000	120000	160000
Θόρυβος	dB-1m	70.0	75.0	80.0	70.0	92.5	115.0

Πίνακας 4.5 Τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Μελλοντικό σενάριο (2020-2025). Πηγές: (Alkaner and Zhou, 2006), (EPA, 2003), (MC-WAP, 2005), (Moreno et al., 2008), (Lunghi et al., 2001), (Wuersig, 2009), (Delta, 2006).

4.4.2.2 Οικονομική αξιολόγηση

Το σκέλος της εκτίμησης της οικονομικής βιωσιμότητας των ανταγωνιστικών συστημάτων καλύπτεται μέσω της αναζήτησης δεδομένων σχετικών με το κόστος εγκατάστασης και το εκτιμώμενο κόστος λειτουργίας και συντήρησης (συμπεριλαμβανομένου το εκτιμώμενο κόστος καυσίμου, το οποίο εξαρτάται από το βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης – Πίνακες 4.4 και 4.5). τα αντίστοιχα δεδομένα παρουσιάζονται στους Πίνακες 4.6 και 4.7

		MCFC (a_1)			DE (a_2)		
		Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_3)$
Κόστος εγκατάστασης	€/kW	4000	4500	8000	250	300	350
Κόστος συντήρησης και λειτουργίας	c€/kWh	14,9	17,7	22,2	15,8	16,5	16,8

Πίνακας 4.6 Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Σενάριο παρούσας κατάστασης. Πηγές: (Alkaner and Zhou, 2006), (MC-WAP, 2005), (Wuersig, 2009), (Hengeveld and Revankar, 2007).

		MCFC (a_1)			DE (a_2)		
		Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_3)$
Κόστος εγκατάστασης	€/kW	1500	2000	2500	250	300	350
Κόστος συντήρησης και λειτουργίας	c€/kWh	12,0	13,0	15,8	15,9	16,6	17,0

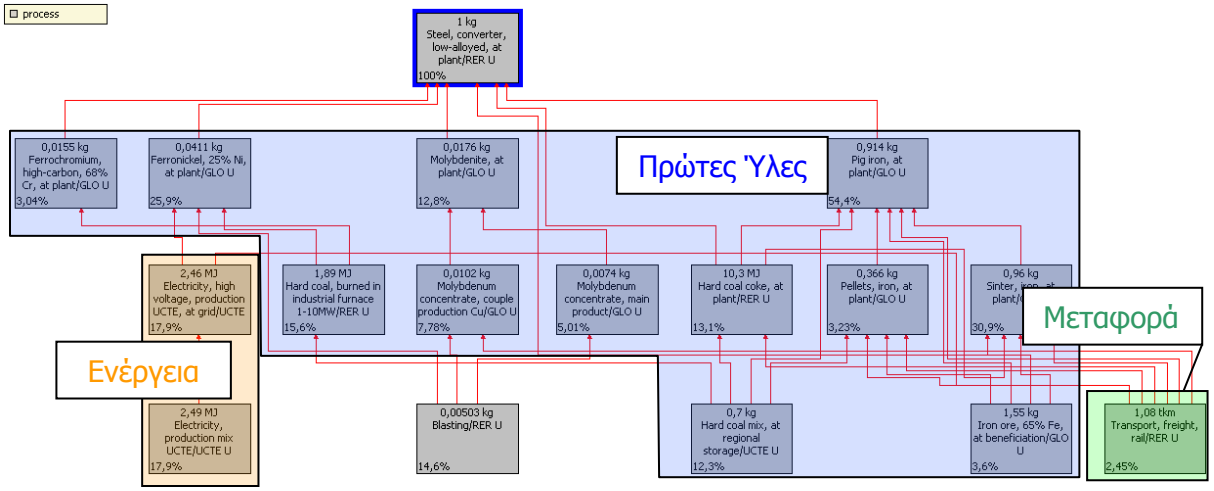
Πίνακας 4.7 Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Μελλοντικό σενάριο (2020-2025). Πηγές: (Alkaner and Zhou, 2006), (MC-WAP, 2005), (Wuersig, 2009), (Delta, 2006), (Hengeveld and Revankar, 2007).

4.4.2.3 Περιβαλλοντική αξιολόγηση

Η εκτίμηση των δεικτών που αφορούν την περιβαλλοντική επίδοση των ανταγωνιστικών συστημάτων επιτυγχάνεται αναλύοντας κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ξεχωριστά μέσω της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2.2.2 και αναπαρίσταται στο σχήμα 3.4.

Κατασκευή Συστημάτων

Κατά τη μελέτη του πρώτου σταδίου επιδιώκεται ο υπολογισμός των συνολικών εκπομπών ρύπων που οφείλονται στην εξόρυξη - μεταφορά των απαιτούμενων πρώτων υλών. Αξιοποιούνται τα στοιχεία που καταγράφονται στο Παράρτημα Ε προκειμένου να διατυπωθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα δικτύου εφοδιασμού για κάθε ένα από τα υλικά κατασκευής. Στο σχήμα 4.18 ενδεικτικά παρουσιάζεται το διάγραμμα δικτύου εφοδιασμού που αφορά την παραγωγή 1kg χάλυβα με χαμηλό ποσοστό κραμάτωσης (low-alloyed steel). Διακρίνονται οι συνεισφορές των αντίστοιχων πρώτων υλών, της ενέργειας που απαιτείται για την εξόρυξη και την παραγωγή ενδιάμεσων υλικών, όπως της εκτιμώμενης χρήσης μεταφορικών μέσων.



Σχήμα 4.18 Διάγραμμα δικτύου εφοδιασμού για παραγωγή 1kg χάλυβα

Η δόμηση των αντίστοιχων δικτύων για κάθε υλικό που καταγράφεται στους πίνακες του Παραρτήματος Ε καθίσταται εφικτή μέσω χρήσης εμπορικών βάσεων δεδομένων κύκλου ζωής (Ecoinvent, 2009), ενσωματωμένων σε ειδικό λογισμικό AKZ (Simapro 7.0).

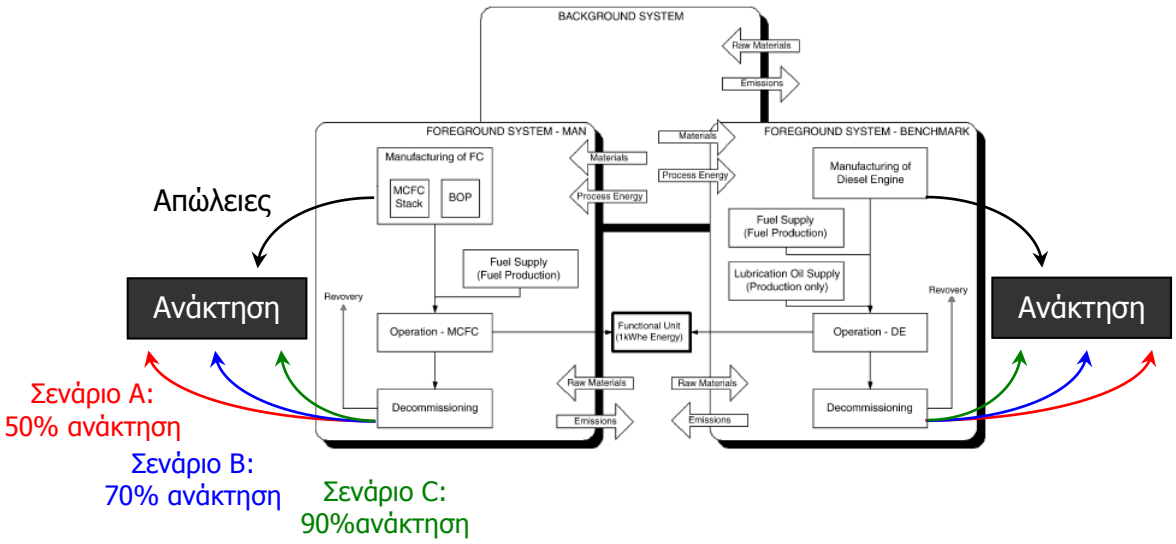
Όσον αφορά το στάδιο της κατασκευής της μονάδας MCFC (συστοιχία και περιφερειακά υποσυστήματα), αξιοποιούνται εκτιμήσεις και υποθέσεις για την αντίστοιχη κατανάλωση ενέργειας και εκπομπή ρύπων από σχετικές πηγές (Alkaner and Zhou, 2006, Karakoussis et al., 2006). Η κατασκευή του συστήματος DE καλύπτεται από αντίστοιχες αναφορές (Alkaner and Zhou, 2006, Briem, 2003).

Λειτουργία

Οι συνθήκες λειτουργίας, τα απαραίτητα τεχνικά χαρακτηριστικά και οι συντελεστές εκπομπών των ανταγωνιστικών συστημάτων παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (§4.4.1.1), όπου καθορίστηκε το πλαίσιο της συνδυασμένης αξιολόγησης.

Απόσυρση

Το στάδιο της απόσυρσης των συστημάτων παρέχει ποσοτική αποτίμηση της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω ανάκτησης ενός ποσοστού από τα κύρια υλικά κατασκευής. Δεν εξετάστηκαν οι λεπτομέρειες των τεχνικών ανακύκλωσης, καθώς δεν έχουν καθοριστεί από τους κατασκευαστές των συστημάτων MCFC (Alkaner and Zhou, 2006) και η αναζήτηση κατάλληλων μεθόδων ανακύκλωσης υπερβαίνει τους στόχους της διατριβής.



Σχήμα 4.19 Εξεταζόμενα σενάρια ποσοστού ανακύκλωσης

Εξετάστηκαν τρία σενάρια ποσοστών ανακύκλωσης και για τα δυο ανταγωνιστικά συστήματα (Σχήμα 4.19 και αντίστοιχοι πίνακες παραρτήματος Ε), όπου υποτίθεται ανάκτηση του 50%, 70% και 90% του βάρους των κυριότερων υλικών, με το πιο αισιόδοξο σενάριο ανακύκλωσης να αντιστοιχεί σε ανάκτηση πάνω από 80% του συνολικού βάρους των ανταγωνιστικών συστημάτων (Πίνακες παραρτήματος Ε). Γίνεται επίσης η υπόθεση ότι το

σύνολο των απωλειών κατά την κατασκευή οδεύει προς ανακύκλωση. Ακολουθήθηκε η υπόθεση της ανάκτησης «ανοιχτού βρόχου», όπου τα ανακτώμενα υλικά αποτρέπουν αντίστοιχη πρωτογενή εξόρυξη, χωρίς να επανατροφοδοτούνται στην διαδικασία κατασκευής των συστημάτων, μειώνοντας την αρχικά απαιτούμενη ποσότητα. Το ποσοστό των υλικών το οποίο υποτίθεται ότι δεν ανακτάται, χαρακτηρίζεται ως αδρανές υλικό και οδεύει προς απόθεση.

Ενδιάμεσα αποτελέσματα συλλογής – επεξεργασίας δεδομένων κύκλου ζωής.

Το αποτέλεσμα της συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων σχετικά με τα στάδια του κύκλου ζωής των συστημάτων αποτελείται από:

- Τις εισροές σε ενέργεια και υλικά για το σύνολο των σταδίων του κύκλου ζωής των συστημάτων. Οι κυριότερες εισροές (με συνεισφορά πάνω από 3% του αντίστοιχου συνόλου) ανά παραγόμενη kWh απεικονίζονται στους πίνακες 4.8 και 4.9 για τα συστήματα MCFC και DE, αντίστοιχα. Στον πίνακα 4.8 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις ακραίες τιμές του βαθμού ηλεκτρικής απόδοσης (πίνακας 4.4). Όλες οι εισροές παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα ΣΤ.
- Τις αναλυτικές εκπομπές ρύπων, συνοδευόμενες από σαφή καταγραφή της προέλευσής τους και ταξινομημένες ανά στάδιο κύκλου ζωής. Οι κυριότερες αέριες εκπομπές ανά παραγόμενη kWh των ανταγωνιστικών κύκλων ζωής απεικονίζονται στους πίνακες 4.10 και 4.11. Το σύνολο των εκπομπών ρύπων σε ατμόσφαιρα, υδάτινο περιβάλλον και έδαφος παρουσιάζονται αναλυτικά στο παράρτημα ΣΤ.

Εισροή	**Μονάδα**	**Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συστήματος MCFC**	
		32,70%	**50,70%**
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ/kWhel	3,484E-02	2,732E-02
Energy, gross calorific value, in biomass		8,881E-03	6,428E-03
Energy, kinetic (in wind), converted		4,972E-03	3,789E-03
Energy, from hydro power		2,153E-03	2,153E-03
Oil, crude, in ground	kg/kWh	2,866E-01	1,853E-01
Water, unspecified natural origin/kg		1,600E-02	1,600E-02
Gravel, in ground		1,533E-02	1,156E-02
Coal, brown, in ground		1,090E-02	8,019E-03
Coal, hard, unspecified, in ground		8,176E-03	5,954E-03
Water, turbine use, unspecified natural origin	m^3/kWh	2,748E-01	2,140E-01
Gas, natural, in ground		1,632E-02	1,112E-02
Water, cooling, unspecified natural origin/m3		2,274E-03	1,601E-03
Water, unspecified natural origin/m3		7,436E-04	4,852E-04

Πίνακας 4.8 Κυριότερες εισροές ενέργειας και πρώτων υλών για τον κύκλο ζωής του συστήματος MCFC.

Εισροή	Μονάδα	
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ/kWhel	1,649E-02
Energy, gross calorific value, in biomass		5,415E-03
Energy, kinetic (in wind), converted		2,580E-03
Oil, crude, in ground	kg/kWhel	2,181E-01
Gravel, in ground		8,177E-03
Coal, brown, in ground		6,276E-03
Coal, hard, unspecified, in ground		4,875E-03
Water, turbine use, unspecified natural origin	m^3/kWhel	1,336E-01
Gas, natural, in ground		1,126E-02
Water, cooling, unspecified natural origin/m3		1,455E-03

Πίνακας 4.9 Κυριότερες εισροές ενέργειας και πρώτων υλών για τον κύκλο ζωής του συστήματος DE.

Εκροή	Μονάδα	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συστήματος MCFC	
		32,70%	**50,70%**
Heat, waste	MJ/kWhel	2,007E+00	1,345E+00
Carbon dioxide, fossil	Kg/kWhel	1,054E+00	6,864E-01
Sulfur dioxide		2,027E-03	1,432E-03
Carbon dioxide, biogenic		9,003E-04	6,600E-04
Methane, fossil		5,820E-04	3,836E-04
Nitrogen oxides		5,164E-04	3,481E-04
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin		3,112E-04	2,025E-04

Πίνακας 4.10 Κυριότερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα για τον κύκλο ζωής του συστήματος MCFC (ανά παραγόμενη kWh).

Εκροή	Μονάδα	
Heat, waste	MJ/kWhel	1,434E+00
Carbon dioxide, fossil	kg/kWhel	7,889E-01
Nitrogen dioxide		1,378E-02
Carbon monoxide		1,681E-03
Sulfur dioxide		1,280E-03
Methane, fossil		9,005E-04
Particulates, < 10 um		5,500E-04
Carbon dioxide, biogenic		5,452E-04
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin		2,413E-04

Πίνακας 4.11 Κυριότερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα για τον κύκλο ζωής του συστήματος DE (ανά παραγόμενη kWh).

Τελικά αποτελέσματα – Κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Προκειμένου να επιτευχθεί η μετάβαση από τις εκπομπές σε δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, χρησιμοποιούνται οι μεθοδολογίες και οι κατηγορίες επιπτώσεων του πίνακα 4.12.

Μέσω των μεθοδολογιών εκτίμησης επιπτώσεων επιλέγονται οι εκπομπές που αφορούν την εκάστοτε κατηγορία (π.χ. οι εκπομπές CH4 συνδέονται με τον δείκτη GWP και όχι με τον AP) και η συνεισφορά τους ανάγεται μέσω αντίστοιχων συντελεστών σε κατάλληλη μονάδα

αναφοράς (Πίνακες παραρτήματος Ζ). Η επιλογή των συγκεκριμένων μεθοδολογιών έγινε βάσει των κριτηρίων που αναλύονται στην παράγραφο §3.2.2.2. Ένας επιπρόσθετος λόγος για την επιλογή τους είναι το ότι αφορούν επιπτώσεις που εξαπλώνονται σε παγκόσμια κλίμακα (σε αντιστοιχία με την αναμενόμενη διασπορά των εκπομπών).

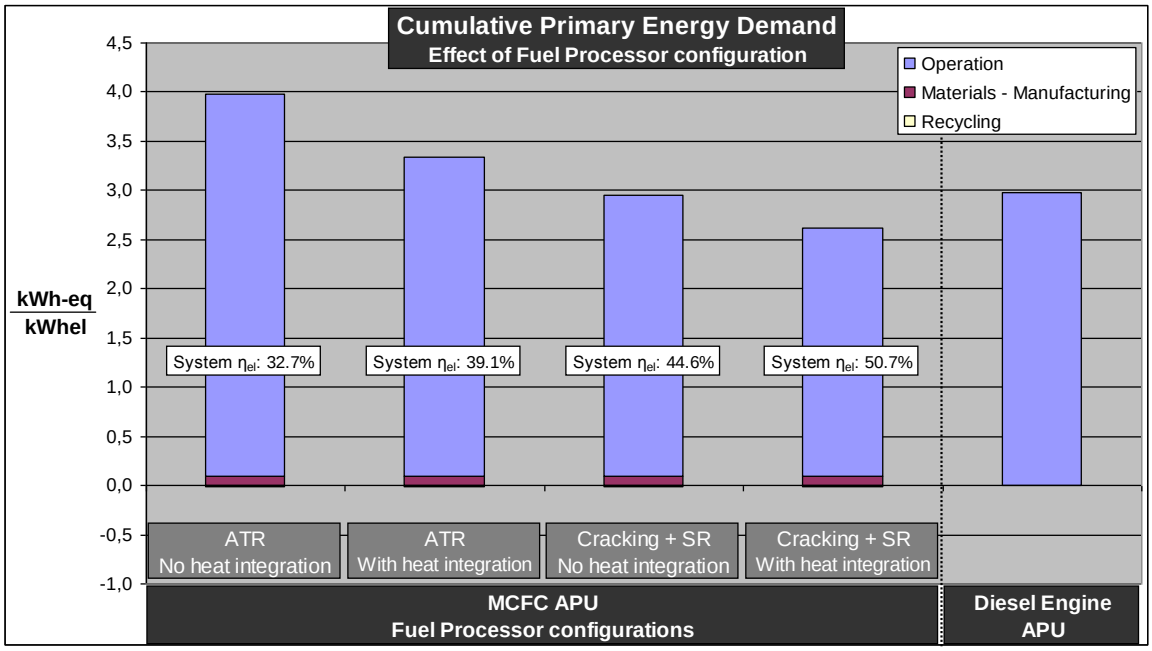
Μεθοδολογίες Εκτίμησης Επιπτώσεων	Κατηγορία Επιπτώσεων	Μονάδα αναφοράς	Σχόλια
Cumulative Energy Demand (Frischknecht et al., 2003))	Cumulative Energy Demand (CED)	kWh-eq	Το άθροισμα της απαιτούμενης ενέργειας για εξαγωγή πρώτων υλών, μεταφορά, κατασκευή και συναρμολόγηση μονάδας, παροχή καυσίμου και ανάκτηση υλικών.
CML 2 (Guinée et al., 2002)	Global Warming Potential (GWP)	kg CO2-eq	Το δυναμικό αύξησης της παγκόσμιας θερμοκρασίας λόγω της ιδιότητας ορισμένων αερίων εκπομπών να σωρεύουν θερμότητα που ανακλάται από την επιφάνεια της Γης.
	Acidification Potential (AP)	kg SO2-eq	Η δυσμενής επίδραση εκπομπών οξειδίου του αζώτου και θείου όσον αφορά φθορά οικοσυστημάτων, ρύπανση εδαφών και επιπλοκές υγείας.
Eco-indicator 99 (Goedkoop and Spriensma, 2001)	Minerals Depletion Potential (MDP)	MJ surplus	Σχετικός δείκτης έντασης χρήσης πρώτων υλών. Η μονάδα αναφοράς αντιστοιχεί στην πρόσθετη ενέργεια εξόρυξης που απαιτείται λόγω κατανάλωσης του κοιτάσματος.

Πίνακας 4.12 Μεθοδολογίες Εκτίμησης και αντίστοιχες κατηγορίες επιπτώσεων που χρησιμοποιήθηκαν.

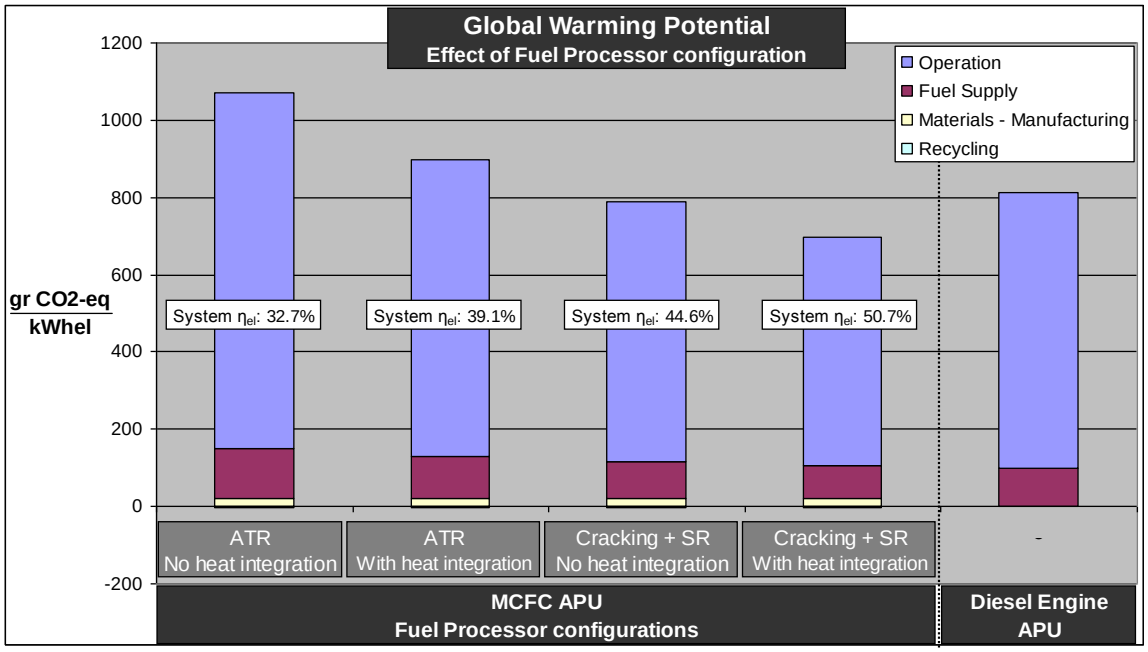
Στα σχήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών δεικτών. Απεικονίζεται επίσης η αντίστοιχη επίδραση της διακύμανσης του βαθμού ηλεκτρικής απόδοσης και του ποσοστού ανακύκλωσης. Επισημαίνεται ότι στα αποτελέσματα των σχημάτων 4.20-23 έχει υποτεθεί το πλέον αισιόδοξο σενάριο ανάκτησης υλικών (Σενάριο C - 90% ανάκτηση, Σχήμα 4.19 και παράρτημα Ε). Στο σχήμα 4.20 απεικονίζεται η απόλυτη και σχετική συνεισφορά στο δείκτη CED των σταδίων του κύκλου ζωής για τα εξεταζόμενα συστήματα.

Όπως ήταν αναμενόμενο, το στάδιο της λειτουργίας (στο οποίο εντάσσεται και ο εφοδιασμός του καυσίμου) καταναλώνει σχεδόν το σύνολο της απαιτούμενης πρωτογενούς ενέργειας. Λειτουργώντας με τον πλέον απαισιόδοξο βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης, η μονάδα MCFC απαιτεί 25% περισσότερη πρωτογενή ενέργεια από τη μονάδα DE. Άμεσα υπεύθυνη για αυτό είναι η διαφορά των βαθμών απόδοσης, όπως επίσης και το γεγονός ότι η μονάδα MCFC έχει επταπλάσιο βάρος από την DE, κάτι που επιδρά στη συνεισφορά του σταδίου υλικών-κατασκευής (materials-manufacturing) (Σχήμα 4.20). Η σημαντική απαίτηση υλικών των οποίων η εξόρυξη χαρακτηρίζεται από ιδιαίτερη ενεργειακή ένταση (Ni και NiO) συμβάλλει

επίσης στην αύξηση της συνεισφοράς του σταδίου ανάκτησης υλικών. Το ενεργειακό όφελος της ανάκτησης υλικών είναι ασήμαντο. Η υπόθεση εναλλακτικών μεθόδων αναμόρφωσης του καυσίμου (Bensaid et al., 2009) βελτιώνει το συνολικό βαθμό απόδοσης της μονάδας MCFC και κατά συνέπεια μειώνει δραματικά την απαίτηση σε πρωτογενή ενέργεια – στη πλέον ευνοϊκή περίπτωση – κατά σχεδόν 1,4 kWh-eq ανά παραγόμενη KWhel. Η αντίστοιχη σύγκριση με το συμβατικό σύστημα (DE) δείχνει 15% μικρότερο δείκτη CED.



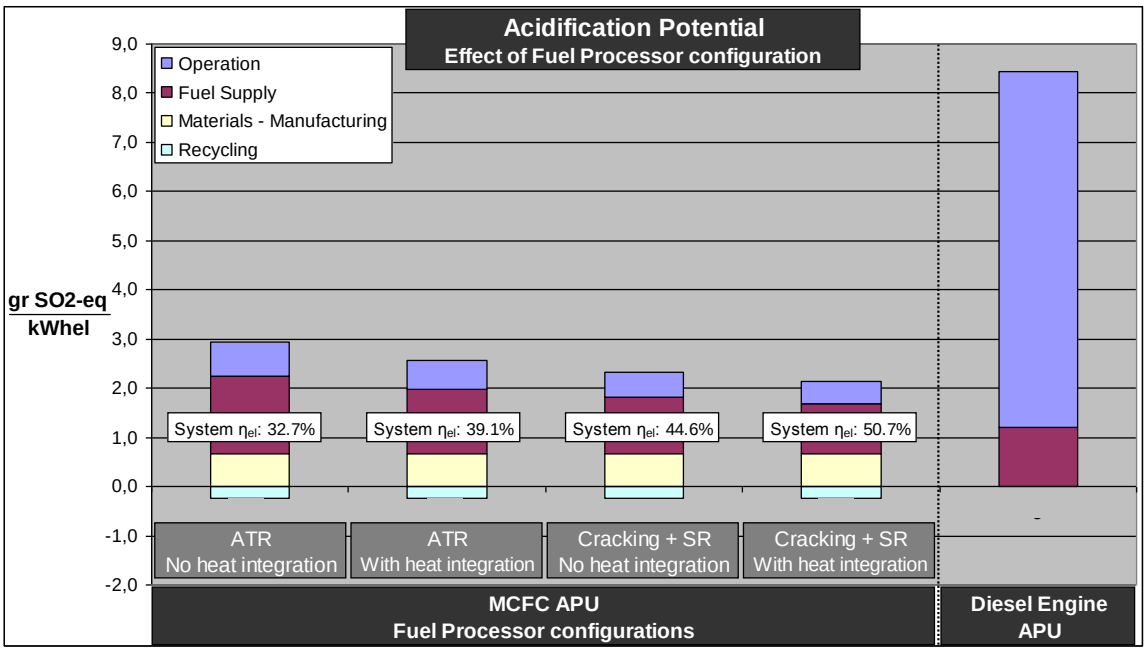
Σχήμα 4.20 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλων ζωής συστημάτων MCFC και DE. Εξέταση τεσσάρων εναλλακτικών μεθόδων αναμόρφωσης καυσίμου για το σύστημα MCFC (Bensaid et al., 2009). Κατηγορία επιπτώσεων: Cumulative Energy Demand (CED).



Σχήμα 4.21 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλων ζωής συστημάτων MCFC και DE. Εξέταση τεσσάρων εναλλακτικών μεθόδων αναμόρφωσης καυσίμου για το σύστημα MCFC (Bensaid et al., 2009). Κατηγορία επιπτώσεων: Global Warming Potential (GWP).

Τα συγκριτικά αποτελέσματα του δείκτη GWP και οι αντίστοιχες συνεισφορές των σταδίων του κύκλου ζωής παρουσιάζονται στο σχήμα 4.21. Παρατηρούνται σημαντικές ομοιότητες με το διάγραμμα του σχήματος 4.20, λόγω της συμβολής των εκπομπών CO2 από καύση ορυκτών καυσίμων (ειδικά για κεντρική ηλεκτροπαραγωγή). Το σύστημα MCFC χαμηλής αποδοτικότητας εμφανίζει χειρότερο δείκτη για δύο λόγους: Μεγαλύτερη απαίτηση σε καύσιμο οδηγεί σε αυξημένες εκπομπές CO2 κατά τη λειτουργία, όπως επίσης η εξόρυξη και διακίνηση περισσότερου καυσίμου αυξάνει τη συνεισφορά της αντίστοιχης αλυσίδας εφοδιασμού (fuel supply). Το στάδιο υλικών-κατασκευής συνεισφέρει αντίστοιχα με τον δείκτη CED. Το σύστημα MCFC υψηλής αποδοτικότητας είναι σε θέση να επιβαρύνει το δείκτη GWP κατά 250 gr CO2-eq/kWh λιγότερο από το συμβατικό σύστημα (σχετική διαφορά: 14,3%).

Ακολουθούν στο σχήμα 4.22 τα αντίστοιχα αποτελέσματα του δείκτη AP. Το συμβατικό σύστημα DE παρουσιάζει υψηλές λειτουργικές εκπομπές NOx, κάτι που επιβαρύνει σημαντικά τη συγκεκριμένη κατηγορία επιπτώσεων (μέχρι και τετραπλάσια τιμή από τη μονάδα MCFC). Οι αντίστοιχες εκπομπές της μονάδας MCFC είναι ιδιαίτερα χαμηλές αφενός λόγω ηλεκτροχημικής (και όχι θερμοχημικής – συμβατικό σύστημα DE) μετατροπής ενέργειας στην κυψέλη καυσίμου και αφετέρου λόγω του πορώδους καυστήρα του υποσυστήματος θερμικής διαχείρισης (πίνακες 4.1 και 4.2). Ωστόσο, σε αντίθεση με τα NOx, οι εκπομπές SO2 του συστήματος MCFC είναι αντίστοιχης τάξης μεγέθους με τη μονάδα DE (πίνακες 4.10 και 4.11), καθώς εξαρτώνται κυρίως από την περιεκτικότητα του καυσίμου. Στην περίπτωση της μονάδας MCFC οι εκπομπές επισυμβαίνουν κατά την αναγέννηση των υλικών αποθείωσης, αποτελώντας περίπου 25% της συνολικής επιβάρυνσης στου κύκλου ζωής.

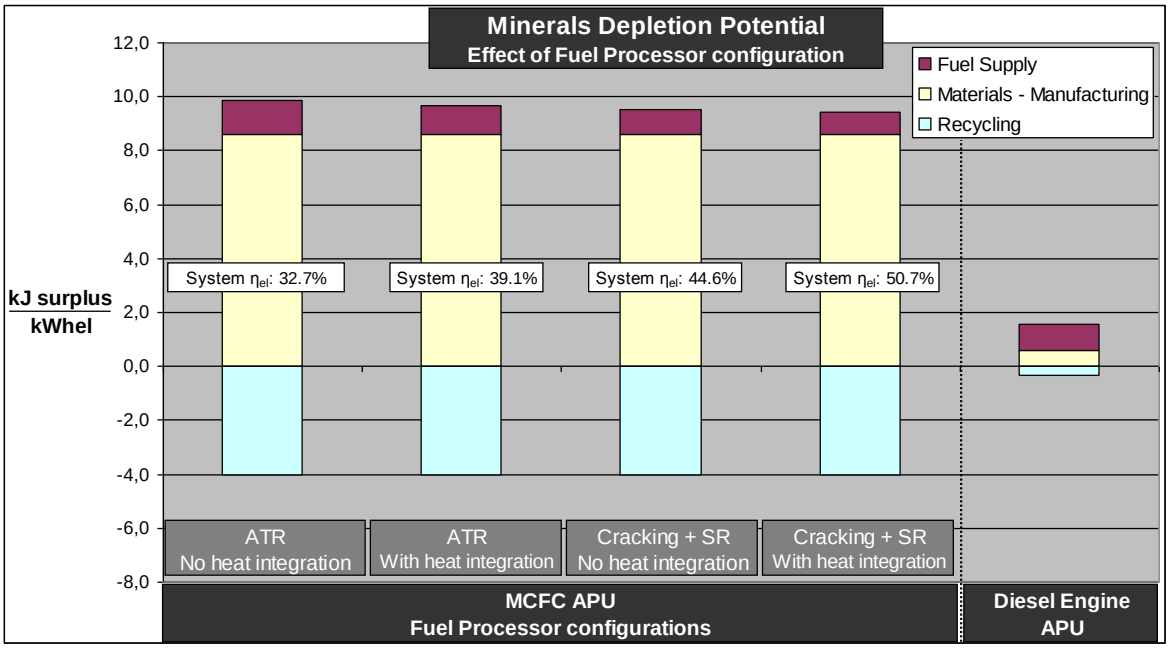


Σχήμα 4.22 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλων ζωής συστημάτων MCFC και DE. Εξέταση τεσσάρων εναλλακτικών μεθόδων αναμόρφωσης καυσίμου για το σύστημα MCFC (Bensaid et al., 2009). Κατηγορία επιπτώσεων: Acidification Potential (AP).

Επίσης, παρατηρείται αύξηση της σχετικής συνεισφοράς του σταδίου υλικών-κατασκευής (συγκριτικά με τα διαγράμματα των δυο προηγούμενων κατηγοριών επιπτώσεων), κάτι που οφείλεται στις σημαντικές εκπομπές NOx κατά την παραγωγή Ni και NiO, δυο υλικά που χρησιμοποιούνται εκτενώς κατά την κατασκευή της μονάδας MCFC. Η αποφυγή πρωτογενούς παραγωγής αυτών των υλικών μέσω ανάκτησης κατά το τέλος ζωής της μονάδας MCFC είναι σε θέση να μειώσει το δείκτη AP κατά 9%, αν υποτεθεί το πλέον ευνοϊκό σενάριο C (Σχήμα 4.19 και παράρτημα Ε). Η αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης μειώνει επίσης την επίπτωση στη συγκεκριμένη κατηγορία, ωστόσο είναι σαφής η διαφορά στις επιδόσεις των δύο συστημάτων, ακόμα και για τη μονάδα MCFC χαμηλής αποδοτικότητας.

Ο υπολογισμός του δείκτη κατανάλωσης ορυκτών πόρων (MDP) βασίζεται στη υπόθεση ότι η συνεχής εξόρυξη πρώτων υλών συνεπάγεται αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας εξόρυξης της υπόλοιπης διαθέσιμης ποσότητας του ορυκτού κοιτάσματος. Με βάση τα παραπάνω, η μονάδα που εκφράζει την εξάντληση των ορυκτών πρώτων υλών είναι η αύξηση της ενεργειακής απαίτησης σε MJ. Οι αντιστοιχία των διαφόρων ορυκτών με την επιπλέον απαιτούμενη ενέργεια παρουσιάζεται αναλυτικά στο Παράρτημα Ζ.

Τα αντίστοιχα αποτελέσματα δείχνουν (σχήμα 4.23) τη σημαντική αντίστοιχη επιβάρυνση που επιφέρει ο κύκλος ζωής της μονάδας MCFC. Τα αίτια της διαφοράς με το δείκτη του συστήματος DE είναι τόσο ποσοτικά (πίνακες απαιτούμενων υλικών κατασκευής – παράρτημα Ε) όσο και ποιοτικά (χρήση υλικών των οποίων η εξόρυξη παρουσιάζει ιδιαίτερη ενεργειακή ένταση – Ni, NiO, χάλυβες με υψηλή κραμάτωση).



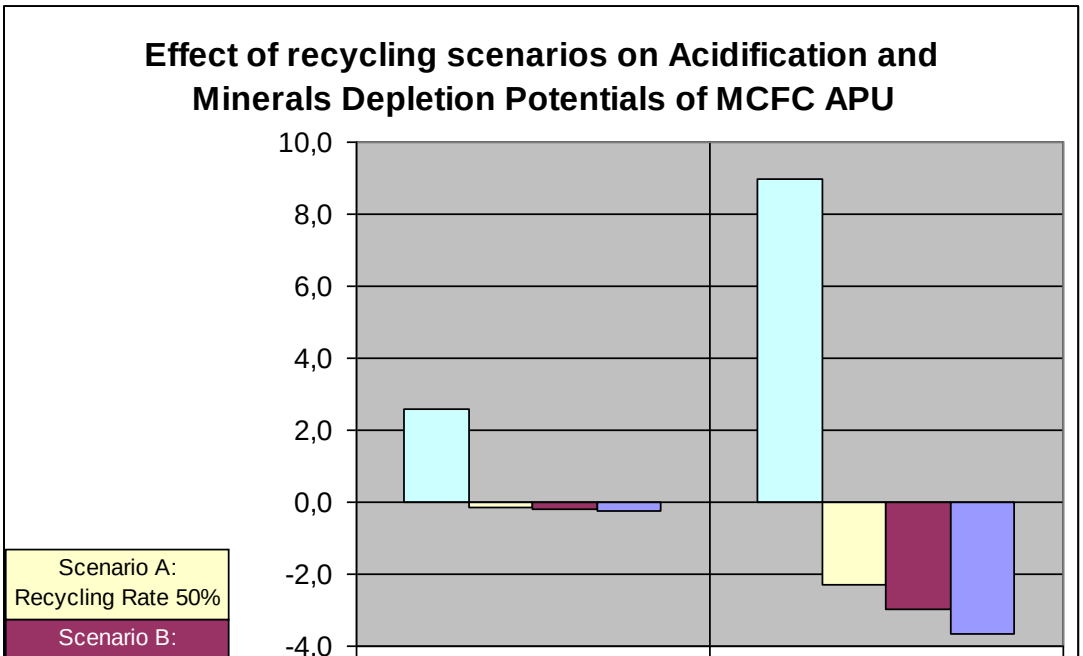
Σχήμα 4.23 Αποτελέσματα ανάλυσης κύκλων ζωής συστημάτων MCFC και DE. Εξέταση τεσσάρων εναλλακτικών μεθόδων αναμόρφωσης καυσίμου για το σύστημα MCFC (Bensaid et al., 2009). Κατηγορία επιπτώσεων: Mineral Depletion Potential (MDP).

Η συγκεκριμένη κατηγορία επιπτώσεων επωφελείται σημαντικά από την αποφυγή πρωτογενούς εξόρυξης μέσω ανάκτησης υλικών (~40% μείωση αντίστοιχου δείκτη). Μικρή επίδραση διαπιστώνεται ότι έχει η αύξηση του ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης (βελτίωση δείκτη κατά 4,7% στην ακραία περίπτωση μεταβολής), κάτι που καταδεικνύει ότι η μείωση της κατανάλωσης ορυκτών πόρων επιτυγχάνεται αφενός με βελτιστοποίηση των διεργασιών κατασκευής και αφετέρου ανάκτηση υλικών.

Εξέταση επίδρασης ποσοστού ανακύκλωσης υλικών

Τα αποτελέσματα σχετικά με τη βελτίωση των περιβαλλοντικών δεικτών στα τρία σενάρια ανακύκλωσης (Σχήμα 4.19 και παράρτημα Ε) απεικονίζονται στο σχήμα 4.24. Παρουσιάζονται οι δύο δείκτες επιπτώσεων στους οποίους διαπιστώθηκε αξιοσημείωτη αντίστοιχη βελτίωση, της τάξης του 5-9% για το δείκτη AP και 26-41% για το δείκτη MDP.

Το περιβαλλοντικό όφελος της ανακύκλωσης εντοπίζεται στην αποφυγή πρωτογενούς παραγωγής Ni και NiO, των οποίων η παραγωγή αναδεικνύεται αφενός ως ιδιαιτέρως απαιτητική σε ορυκτές πρώτες ύλες και αφετέρου ως ενεργοβόρα. Επιπρόσθετα, αποφεύγονται εκπομπές SO2 που οφείλονται στην εξαγωγή Ni από μεταλλεύματα που περιέχουν θείο.



	AP (g SO2-eq/kWh) Absolute and relative impact reduction		MDP (kJ surplus/kWh) Absolute and relative impact reduction	
Total MCFC APU impact (0% recycling)	2,6		8,96	
Recycling Scenario A	-0,135	-5.19%	-2,29	-25.56%
Recycling Scenario B	-0,175	-6.73%	-2,97	-33.15%
Recycling Scenario C	-0,22	-8.46%	-3,65	-40.74%

Σχήμα 4.24 Μείωση περιβαλλοντικών δεικτών λόγω ανακύκλωσης υλικών. Κατηγορίες επιπτώσεων: Acidification Potential (AP) και Mineral Depletion Potential (MDP).

Κύρια ευρήματα

Συνοψίζοντας την περιβαλλοντική αξιολόγηση των δυο ανταγωνιστικών συστημάτων, διαπιστώνεται η αναγκαία συνθήκη για το σύστημα κυψελών καυσίμου να λειτουργήσει με ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης άνω του 42-43%, προκειμένου να πιστωθεί μια συνολικά βελτιωμένη περιβαλλοντική συμπεριφορά έναντι του συμβατικού συστήματος DE. Επίσης, την περιβαλλοντική επίδοση της μονάδας MCFC επιβαρύνει η ευρεία χρήση/κατανάλωση υλικών, των οποίων η παραγωγή χαρακτηρίζεται από μεγάλες απαιτήσεις σε ενέργεια και πρώτες ύλες. Ωστόσο, το γεγονός ότι η ενεργειακή μετατροπή δεν γίνεται θερμοχημικά (μέσω καύσης) αλλά ηλεκτροχημικά, συνεπάγεται ελάχιστες εκπομπές NOx (άμεση επίδραση στο δείκτη AP), CO και στερεών σωματιδίων.

Πίνακες περιβαλλοντικών κριτηρίων

Με βάση τα αποτελέσματα της AKZ συμπληρώνονται οι πίνακες των περιβαλλοντικών κριτηρίων (4.13 και 4.14), αντίστοιχα με τους πίνακες 4.4-7. Επισημαίνεται ότι τα αποτελέσματα για το μελλοντικό σενάριο (πίνακας 4.14) υπολογίστηκαν μέσω γραμμικής παρεκβολής στις τιμές του πίνακα 4.13, έχοντας ως μεταβλητή το βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης.

		MCFC (a_1)			DE (a_2)		
		Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_3)$
Cumulative Energy Demand (CED)	$kWh-eq/kWhel$	2,60	3,29	3,97	2,82	2,97	3,12
Global Warming Potential (GWP)	$grCO_2-eq/kWhel$	696,1	882,6	1069,0	772,7	813,3	854,0
Acidification Potential (AP)	$grSO_2-eq/kWhel$	1,89	2,30	2,70	8,01	8,43	8,85
Minerals Depletion Potential (MDP)	$MJ_{surplus}-eq/kWhel$	5,38	5,60	5,82	1,17	1,23	1,29

Πίνακας 4.13 Περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Αποτελέσματα AKZ. Σενάριο παρούσας κατάστασης.

		MCFC (a_1)			DE (a_2)		
		Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_3)$
Cumulative Energy Demand (CED)	$kWh-eq/kWhel$	1,83	2,21	2,97	2,95	3,11	3,27
Global Warming Potential (GWP)	$grCO_2-eq/kWhel$	486,1	589,4	796,0	807,5	850,0	892,5
Acidification Potential (AP)	$grSO_2-eq/kWhel$	1,44	1,66	2,11	2,38	2,5	2,63
Minerals Depletion Potential (MDP)	$MJ_{surplus}-eq/kWhel$	5,13	5,25	5,50	1,18	1,24	1,30

Πίνακας 4.14 Περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Γραμμικές παρεμβολές βάσει της ηλεκτρικής αποδοτικότητας επί των αποτελεσμάτων του πίνακα 4.13. Μελλοντικό σενάριο (2020-2025).

4.4.3 Συνδυασμός επιμέρους αξιολογήσεων

Η μεθοδολογία συνδυασμού των επιμέρους αξιολογήσεων της παραγράφου 4.1.4.2 περιγράφεται αναλυτικά στο 3ο κεφάλαιο (παράγραφος 3.2.3). Ειδικότερα, ακολουθείται το διάγραμμα ροής του σχήματος 3.8, το οποίο αφορά την περίπτωση εφαρμογής σε συνθήκες μερικής αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικότητας. Ο καθορισμός συντελεστών βαρών για τα κριτήρια αξιολόγησης κατέστη εφικτός στα πλαίσια της συμμετοχής του συγγραφέα του παρόντος στο ερευνητικό πρόγραμμα MC-WAP (MC-WAP, 2005), όπου κατά την ενημερωτική ημερίδα του προγράμματος που έλαβε χώρα τον Οκτώβριο του 2007, συμπληρώθηκε από τους συμμετέχοντες σχετικό ερωτηματολόγιο (Παράρτημα Η).

Διακρίνονται συνολικά τέσσερις περιπτώσεις εφαρμογής:

- Παρόν και μελλοντικό σενάριο τεχνικής-οικονομικής-περιβαλλοντικής επίδοσης των συστημάτων MCFC και DE.
- Δυο προσεγγίσεις επιλογής συστήματος, όπως εκφράζονται μέσω διαφορετικών συντελεστών βαρύτητας των τριών ομάδων κριτηρίων (σταθμίσεις Α και Β – βλ. επόμενη παράγραφο).

Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται η εφαρμογή των πέντε βασικών μεθοδολογικών βημάτων όπως απεικονίζονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.8.

4.4.3.1 Δεδομένα

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του σχήματος 3.8, απαιτούνται τα εξής δεδομένα:

- Πίνακας κριτηρίων αξιολόγησης - $\tilde{DM}(i,j)$. (Εικόνα 4.2)

Ισχύει ότι I=12 (το σύνολο των κριτηρίων αξιολόγησης – τεχνικά (I_T=6, πίνακες 4.4, 4.5), οικονομικά (I_{Ec}=2, πίνακες 4.6, 4.7) και περιβαλλοντικά (I_{En}=4, πίνακες 4.13, 4.14)) και J=2 (τα δύο ανταγωνιστικά συστήματα – MCFC και DM). Καθώς εξετάζονται δυο σενάρια (παρόν και μελλοντικό), η ένωση των πινάκων 4.4, 4.6 και 4.13 αποδίδει τον πίνακα κριτηρίων του παρόντος και αντίστοιχα η ένωση των πινάκων 4.5, 4.7 και 4.14 τον πίνακα κριτηρίων του μελλοντικού σεναρίου.

- Συνάρτηση προτίμησης κριτηρίου i - $\tilde{P}_i(d_i^{j,j'})$. (Εικόνα 4.3)

Επιλέγεται το «Γκαουσιανό» γενικευμένο κριτήριο (τύπος IV, σχήμα Π.1 – παράρτημα Α), καθώς η αντίστοιχη συνάρτηση $\tilde{P}_i(d_i^{j,j'})$ είναι συνεχής, συμβάλλοντας έτσι στη αποφυγή απότομων μεταβολών στο αποτέλεσμα (Brans et al., 1986). Προφανώς η συγκεκριμένη επιλογή δεν είναι μονόδρομος, καθώς εξαρτάται από πιθανές προτιμήσεις των αποφασιζόντων ή ιδιαιτερότητες συγκεκριμένων κριτηρίων.

- Κατώφλια αδιαφορίας και προτίμησης κριτηρίου i - p_i, q_i, σ_i (Εικόνες 4.2 και 4.3)

Ο καθορισμός του συντελεστή σ_i για κάθε κριτήριο i ακολουθεί σε γενικές γραμμές πρακτικές που ακολουθούνται σε αντίστοιχες μελέτες (Kapepula et al., 2007; Oberschmidt et al., 2010).

- Ασαφείς συντελεστές βαρύτητας κριτηρίου i - $\tilde{DM}(i,j)$ (Εικόνες 4.2, 4.3)

Ο προσδιορισμός συντελεστών βαρύτητας (χωρίς όρια διακύμανσης – $w_{i,a} = w_{i,b} = 0$) επιτεύχθηκε μέσω επεξεργασίας των ερωτηματολογίων (Παράρτημα Η) που συμπληρώθηκαν στα πλαίσια ενημερωτικής ημερίδας του ερευνητικού προγράμματος MC-WAP. Οι συμμετέχοντες κατατάχθηκαν σε τέσσερις κατηγορίες, σύμφωνα με το φορέα/ίδρυμα εκπροσώπησης: (α) Ναυτιλιακές εταιρίες, (β) Ακαδημαϊκός τομέας, (γ) Εταιρίες ανάπτυξης τεχνολογίας MCFC και (δ) Ερευνητικά ιδρύματα. Η επεξεργασία των ερωτηματολογίων απέδωσε δυο σταθμίσεις τεχνικών-περιβαλλοντικών και οικονομικών κριτηρίων:

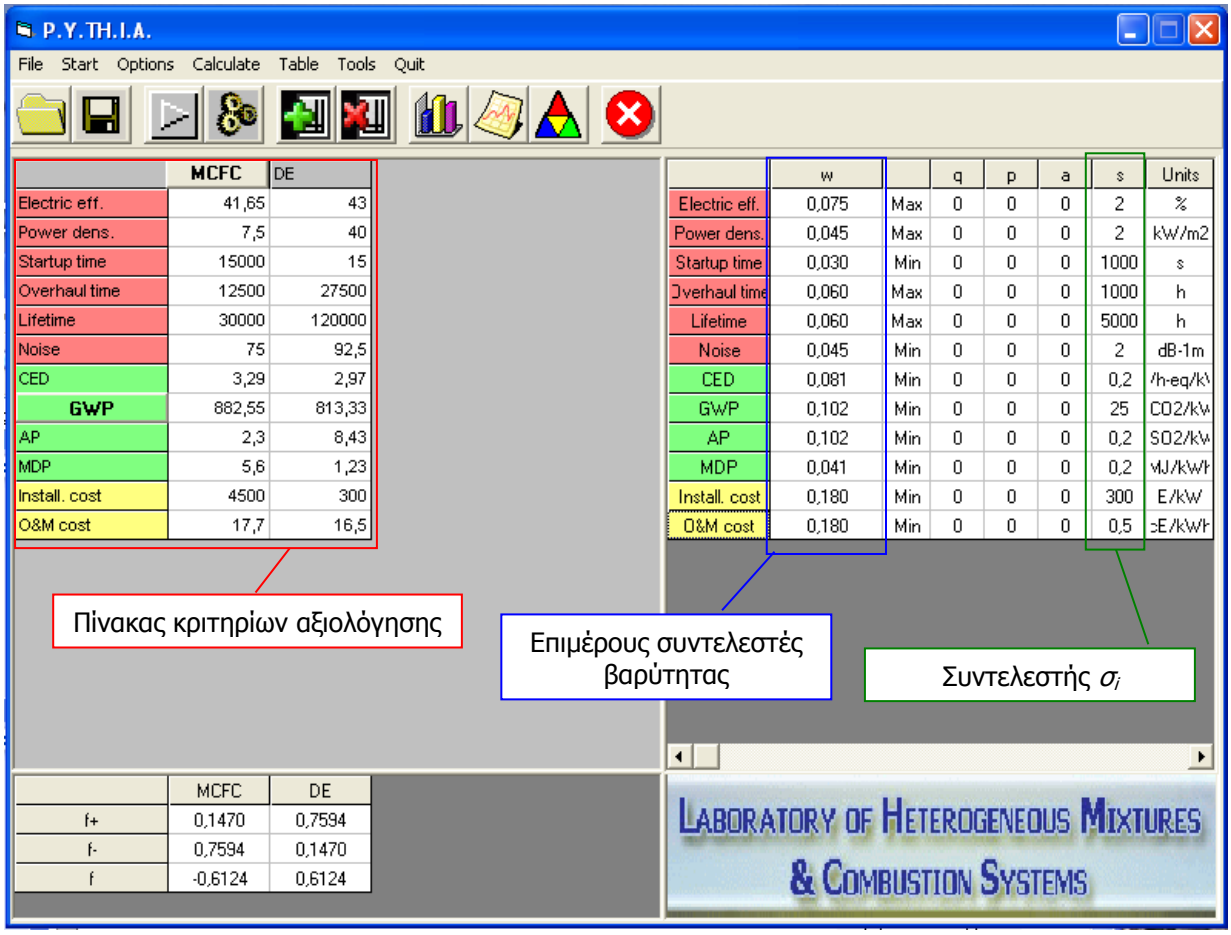
- Στάθμιση Α – Ναυτιλιακές εταιρίες, Ακαδημαϊκός τομέας: w_T = 31,5% (συντελεστής βαρύτητας τεχνικών κριτηρίων), w_{En} = 32,5% (συντελεστής βαρύτητας περιβαλλοντικών κριτηρίων) και w_{Ec} = 36% (συντελεστής βαρύτητας οικονομικών κριτηρίων). Η στάθμιση Α κρίνεται εν γένει ισορροπημένη, με μια ελαφριά τάση προς τα οικονομικά κριτήρια.
- Στάθμιση Β – Εταιρίες ανάπτυξης τεχνολογίας MCFC, Ερευνητικά ιδρύματα: w_T = 29% (συντελεστής βαρύτητας τεχνικών κριτηρίων), w_{En} = 43% (συντελεστής βαρύτητας περιβαλλοντικών κριτηρίων) και w_{Ec} = 28% (συντελεστής βαρύτητας οικονομικών κριτηρίων). Σε αντίθεση με τη στάθμιση Α, είναι προφανές «πριμοδοτούνται» τα περιβαλλοντικά κριτήρια.

Οι συντελεστές βαρύτητας των επιμέρους κριτηρίων ($w_{T,i}$, $w_{En,i}$, $w_{,Ec,i}$) υπολογίστηκαν βάσει των τύπων 3.11-3.13 της παραγράφου 3.2.3.2. Ο πίνακας 4.15 παρουσιάζει τους συντελεστές σημαντικότητας COI_i (παράγραφος 3.2.3.2) που χρησιμοποιήθηκαν προκειμένου να κατανεμηθούν οι «ομαδικοί» σε επιμέρους συντελεστές βαρύτητας.

Τα παραπάνω δεδομένα εισάγονται στο υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, όπως απεικονίζεται στις εικόνες 4.2, 4.3α,β και 4.4, όπου διακρίνεται η περίπτωση εφαρμογής του σεναρίου παρόντος χρόνου με στάθμιση κριτηρίων Α (Ναυτιλιακές εταιρίες – Ακαδημαϊκός τομέας) (w_T = 31,5%, w_{En} = 32,5% και w_{Ec} = 36%).

Τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης	1. Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 2. Ισχύς ανά απαιτούμενο εμβαδό 3. Χρόνος απόδοσης πλήρους ισχύος 4. Χρονικό διάστημα για επισκόπηση/συντήρηση συστήματος 5. Χρόνος ζωής συστήματος 6. Θόρυβος
Περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης	7. Cumulative Energy Demand (CED) 8. Global Warming Potential (GWP) 9. Acidification Potential (AP) 10. Minerals Depletion Potential (MDP)
Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης	11. Κόστος εγκατάστασης 12. Κόστος συντήρησης και λειτουργίας

Πίνακας 4.15 Συντελεστές σημαντικότητας COI_i των κριτηρίων αξιολόγησης

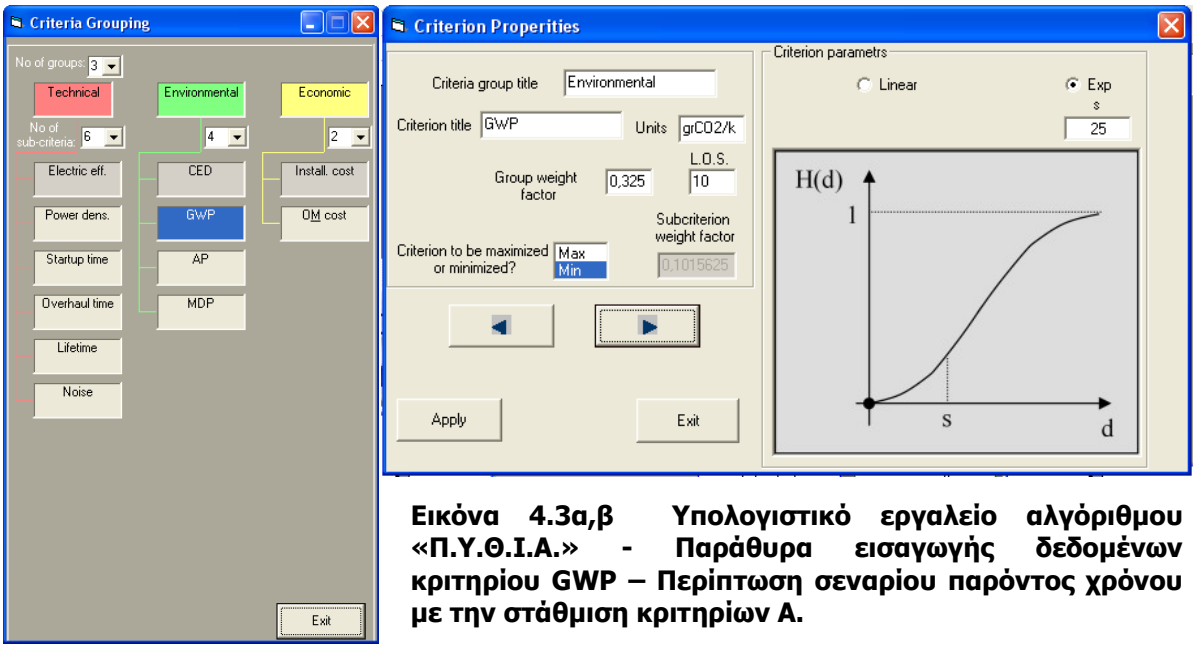


	MCFC	DE
Electric eff.	41,65	43
Power dens.	7,5	40
Startup time	15000	15
Overhaul time	12500	27500
Lifetime	30000	120000
Noise	75	92,5
CED	3,29	2,97
GWP	882,55	813,33
AP	2,3	8,43
MDP	5,6	1,23
Install. cost	4500	300
O&M cost	17,7	16,5

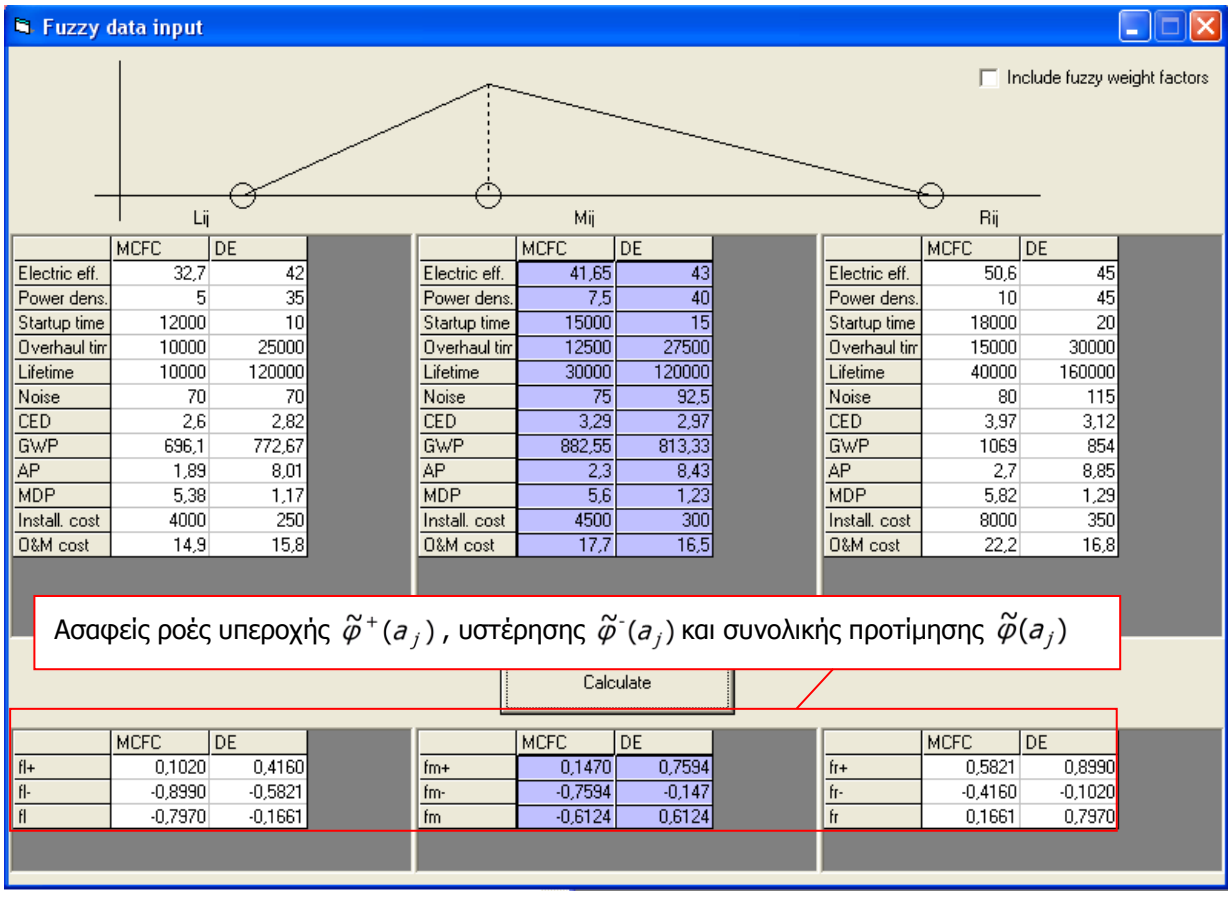
	w		q	p	a	s	Units
Electric eff.	0,075	Max	0	0	0	2	%
Power dens.	0,045	Max	0	0	0	2	kW/m2
Startup time	0,030	Min	0	0	0	1000	s
Overhaul time	0,060	Max	0	0	0	1000	h
Lifetime	0,060	Max	0	0	0	5000	h
Noise	0,045	Min	0	0	0	2	dB-1m
CED	0,081	Min	0	0	0	0,2	/h-eq/k
GWP	0,102	Min	0	0	0	25	CO2/kW
AP	0,102	Min	0	0	0	0,2	SO2/kW
MDP	0,041	Min	0	0	0	0,2	MJ/kWh
Install. cost	0,180	Min	0	0	0	300	E/kW
O&M cost	0,180	Min	0	0	0	0,5	cE/kWh

	MCFC	DE
f+	0,1470	0,7594
f-	0,7594	0,1470
f	-0,6124	0,6124

Εικόνα 4.2 Υπολογιστικό εργαλείο αλγόριθμου «Π.Υ.Θ.Ι.Α.» - Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων – Περίπτωση σεναρίου παρόντος χρόνου με την στάθμιση κριτηρίων Α.



Εικόνα 4.3α,β Υπολογιστικό εργαλείο αλγόριθμου «Π.Υ.Θ.Ι.Α.» - Παράθυρα εισαγωγής δεδομένων κριτηρίου GWP – Περίπτωση σεναρίου παρόντος χρόνου με την στάθμιση κριτηρίων Α.



	MCFC	DE
Electric eff.	32,7	42
Power dens.	5	35
Startup time	12000	10
Overhaul tim	10000	25000
Lifetime	10000	120000
Noise	70	70
CED	2,6	2,82
GWP	696,1	772,67
AP	1,89	8,01
MDP	5,38	1,17
Install. cost	4000	250
O&M cost	14,9	15,8

	MCFC	DE
Electric eff.	41,65	43
Power dens.	7,5	40
Startup time	15000	15
Overhaul tim	12500	27500
Lifetime	30000	120000
Noise	75	92,5
CED	3,29	2,97
GWP	882,55	813,33
AP	2,3	8,43
MDP	5,6	1,23
Install. cost	4500	300
O&M cost	17,7	16,5

	MCFC	DE
Electric eff.	50,6	45
Power dens.	10	45
Startup time	18000	20
Overhaul tim	15000	30000
Lifetime	40000	160000
Noise	80	115
CED	3,97	3,12
GWP	1069	854
AP	2,7	8,85
MDP	5,82	1,29
Install. cost	8000	350
O&M cost	22,2	16,8

	MCFC	DE
fl+	0,1020	0,4160
fl-	-0,8990	-0,5821
fl	-0,7970	-0,1661

	MCFC	DE
fm+	0,1470	0,7594
fm-	-0,7594	-0,147
fm	-0,6124	0,6124

	MCFC	DE
fr+	0,5821	0,8990
fr-	-0,4160	-0,1020
fr	0,1661	0,7970

Εικόνα 4.4 Υπολογιστικό εργαλείο αλγόριθμου «Π.Υ.Θ.Ι.Α.» - Παράθυρο εισαγωγής ασαφών δεδομένων – Περίπτωση σεναρίου παρόντος χρόνου με την στάθμιση κριτηρίων Α.

4.4.3.2 Υπολογισμός ασαφούς προτίμησης για κάθε κριτήριο

Υπολογίζεται βάσει του σχήματος 3.9 η ασαφής υπεροχή $\tilde{P}_i^{j,j'} = (P_{i,m}^{j,j'}, P_{i,\alpha}^{j,j'}, P_{i,b}^{j,j'})$ (και η αντίστοιχη υστέρηση $\tilde{P}_i^{j',j} = (P_{i,m}^{j',j}, P_{i,\alpha}^{j',j}, P_{i,b}^{j',j})$) του ενός συστήματος επί του άλλου για κάθε κριτήριο.

4.4.3.3 Υπολογισμός ασαφούς προτίμησης του συστήματος aj.

Υπολογίζονται σύμφωνα με τις εξισώσεις 3.16-19 οι ασαφείς ροές προτίμησης . Λόγω της ύπαρξης δύο συστημάτων προς αξιολόγηση, ισχύει ότι $\tilde{\varphi}(a_1) = -\tilde{\varphi}(a_2)$ ή αλλιώς $\tilde{\varphi}(MCFC) = -\tilde{\varphi}(DE)$ (Εικόνα 4.4 για την περίπτωση εφαρμογής σεναρίου παρόντος χρόνου με στάθμιση κριτηρίων Α).

4.4.3.4 Ασαφής κατάταξη ανταγωνιστικών συστημάτων

Οι ασαφείς ροές προτίμησης που υπολογίστηκαν, κατατάσσονται σύμφωνα με την τιμή του δείκτη αποτίμησης $E_V[\tilde{\varphi}(a_j)]$ (εξίσωση 3.21). Τα ενδεικτικά αποτελέσματα για την περίπτωση εφαρμογής του σεναρίου παρόντος χρόνου με στάθμιση κριτηρίων Α παρουσιάζονται στον πίνακα 4.16.

Ανταγωνιστικά συστήματα	COA ($\tilde{\varphi}(a_j)$)	$E_V(\tilde{\varphi}(a_j))$	Κατάταξη
MCFC (a_1)	-0.4144	0.24	2
DE (a_2)	0.4144	0.76	1

Πίνακας 4.16 Κέντρο επιφάνειας *COA* και δείκτης αποτίμησης $E_V[\tilde{\varphi}(a_j)]$ των ασαφών ροών προτίμησης των εξεταζόμενων συστημάτων.

4.4.3.4 Ανάλυση αβεβαιότητας ασαφούς κατάταξης

Προκειμένου να ποσοτικοποιηθεί η αξιοπιστία της κατάταξης που προέκυψε από το προηγούμενο μεθοδολογικό στάδιο, χρησιμοποιείται η εξίσωση της Συνάρτησης Ικανοποίησης SF (εξίσωση 3.22 - παράγραφος 3.2.3.3). Καθώς αξιολογούνται δυο συστήματα, υπάρχει μόνο ένα καταταγμένο ζεύγος στο οποίο εφαρμόζεται η εξίσωση 3.22 και το μέγεθος ORR ισούται με την τιμή της SF για το μοναδικό ζεύγος.

4.5 Αποτελέσματα

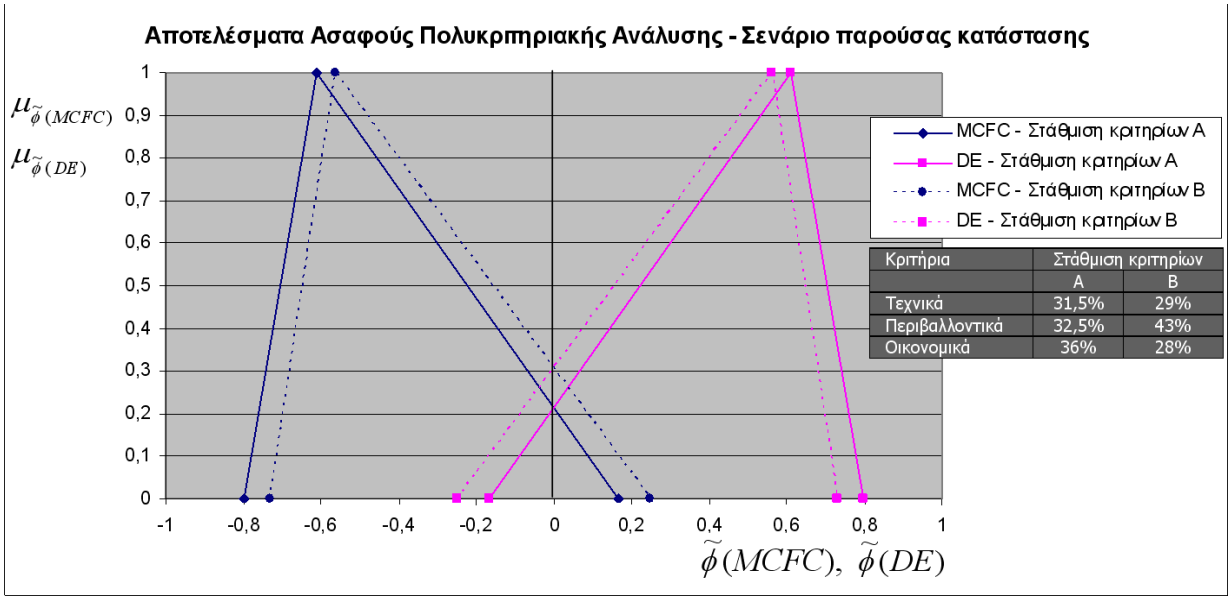
Στην παρούσα παράγραφο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας συνδυασμένης αξιολόγησης, που αναφέρονται σε τέσσερεις περιπτώσεις εφαρμογής:

- Παρόν και μελλοντικό σενάριο τεχνικής-οικονομικής-περιβαλλοντικής επίδοσης των συστημάτων MCFC και DE.
- Δυο προσεγγίσεις επιλογής συστήματος, όπως εκφράζονται μέσω διαφορετικών συντελεστών βαρύτητας των τριών ομάδων κριτηρίων (σταθμίσεις Α και Β).

4.5.1 Σενάριο παρούσας κατάστασης τεχνικής – οικονομικής – περιβαλλοντικής επίδοσης συστημάτων

Στο σενάριο παρόντος χρόνου αντιστοιχούν τα δεδομένα των πινάκων 4.4, 4.6 και 4.13, βάσει των οποίων εξάγονται τα αποτελέσματα του σχήματος 4.25 και ποσοτικοποιείται η αξιοπιστία τους στα σχήματα 4.26 και 27 για τις δυο περιπτώσεις στάθμισης των κριτηρίων Α και Β, αντίστοιχα.

Η ασαφής συνολική ροή προτίμησης του συστήματος DE εμφανίζεται εποπτικά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη του συστήματος MCFC (σχήμα 4.25), καθώς παρατηρείται μια περιορισμένη περιοχή επικάλυψης, η οποία αντιστοιχεί στις ακραία ευνοϊκές για το σύστημα MCFC τιμές των κριτηρίων αξιολόγησης.

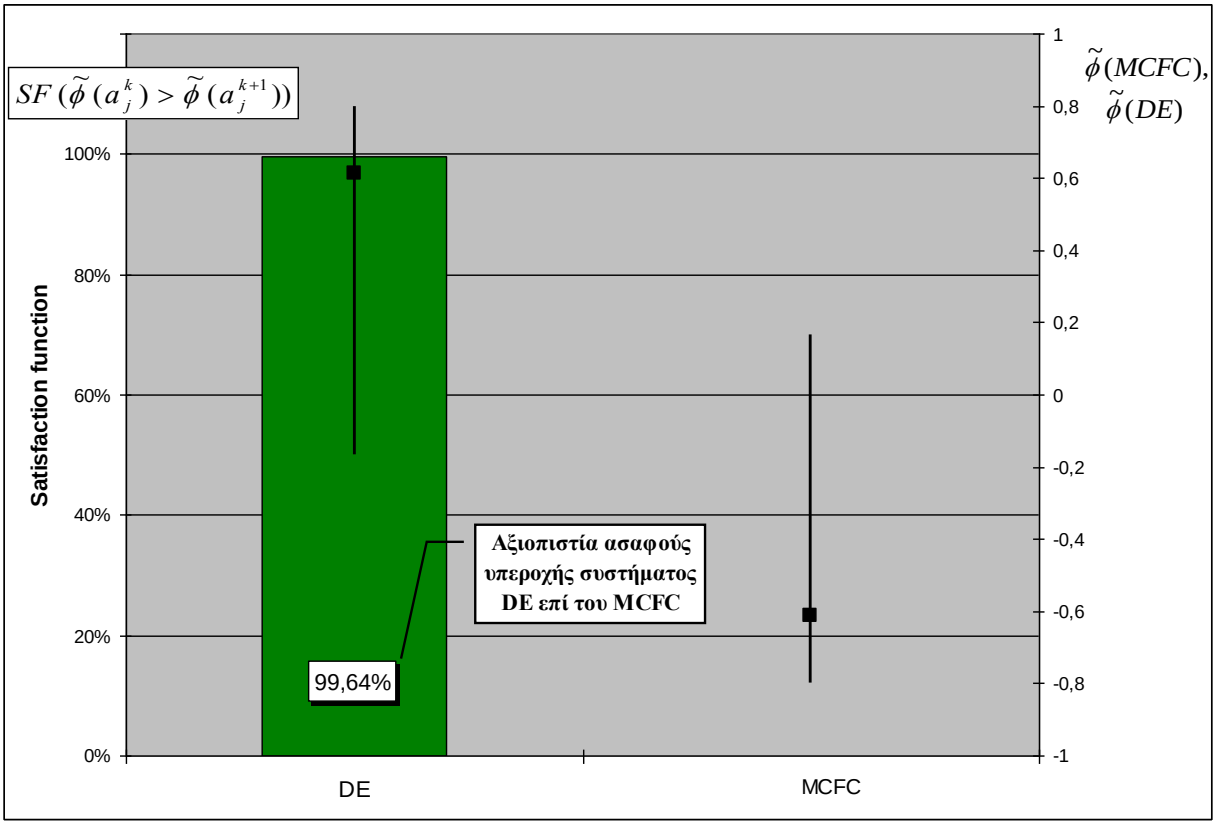


Σχήμα 4.25 Αποτελέσματα ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης – Σενάριο παρούσας κατάστασης

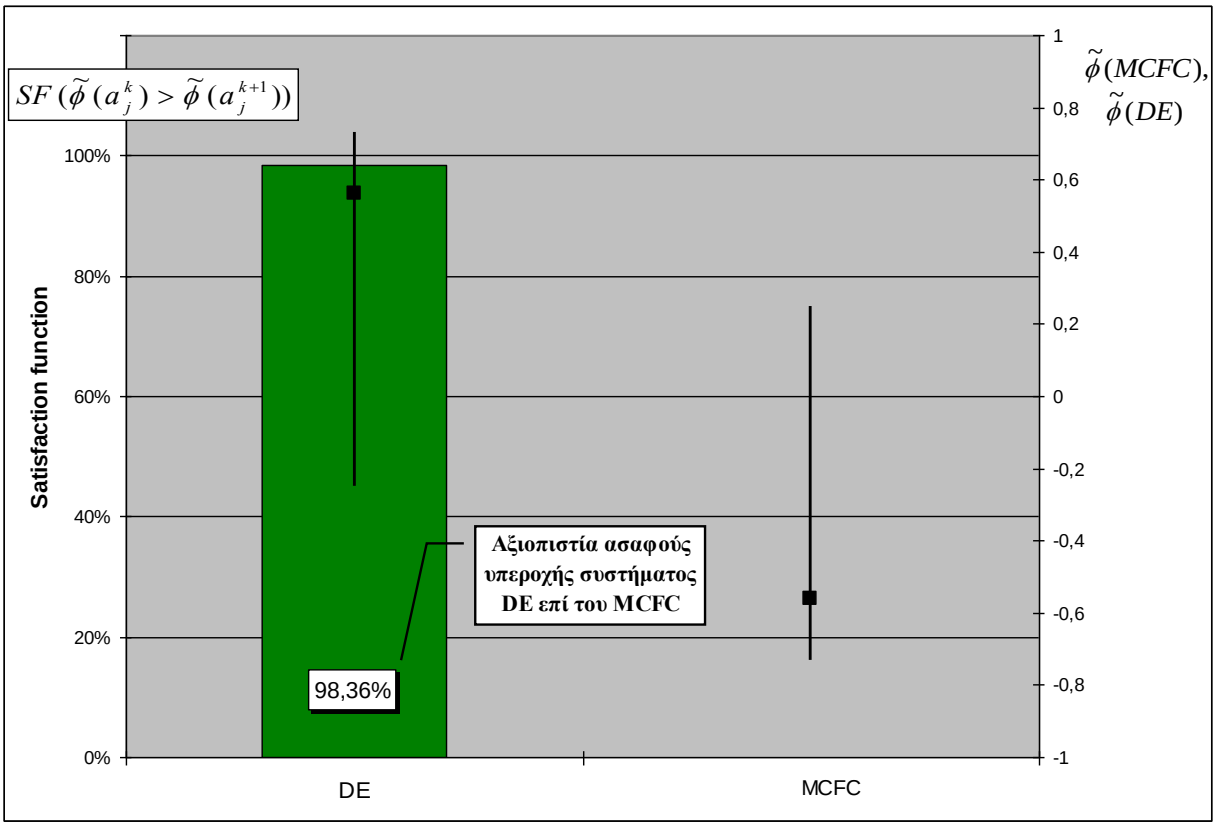
Η συμμετρία των αποτελεσμάτων οφείλεται στο ότι αξιολογούνται δυο ανταγωνιστικά συστήματα, συνεπώς η υπεροχή του ενός ταυτίζεται με την υστέρηση του άλλου. Η

αξιολόγηση του συστήματος MCFC ευνοείται ελαφρά από την περιβαλλοντική στάθμιση Β, λόγω της δυνατότητας επίτευξης μεγαλύτερων βαθμών ηλεκτρικής απόδοσης και μικρότερων εκπομπών αέριων ρύπων κατά την λειτουργία. Το γεγονός ότι το κόστος εγκατάστασης κυμαίνεται σε εύρος μιας τάξης μεγέθους πάνω από το αντίστοιχο της μονάδας DE αντανακλάται πιο έντονα στη στάθμιση Α, η οποία κλίνει περισσότερο προς τα οικονομικά κριτήρια.

Η ανάδειξη της συμβατικής ΜΒΗ με κινητήρα Diesel ως επικρατέστερης διακρίνεται μεν ποιοτικά στο σχήμα 4.25, αλλά πιστοποιείται στα σχήματα 4.26 και 27, όπου η αξιοπιστία της υπεροχής του συστήματος DE αγγίζει το 100% και για τα δυο σενάρια στάθμισης. Τόσο στην «οικονομική» στάθμιση Α, όσο και στην «περιβαλλοντική» στάθμιση Β, είναι σχεδόν απόλυτα σαφές ότι το συμβατικό σύστημα με κινητήρα DE αναδεικνύεται ως επικρατέστερο.



Σχήμα 4.26 Αξιοπιστία ασαφούς κατάταξης – Σενάριο παρούσας κατάστασης – Στάθμιση κριτηρίων Α.

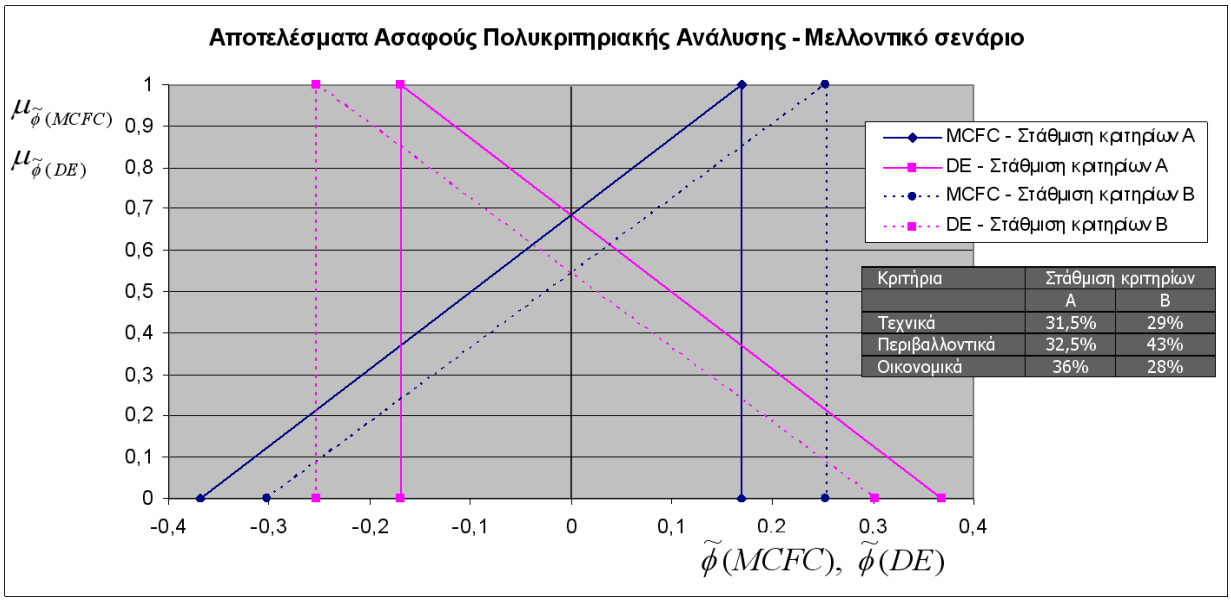


Σχήμα 4.27 Αξιοπιστία ασαφούς κατάταξης – Σενάριο παρούσας κατάστασης – Στάθμιση κριτηρίων Β.

4.5.2 Μελλοντικό σενάριο τεχνικής-οικονομικής-περιβαλλοντικής επίδοσης συστημάτων

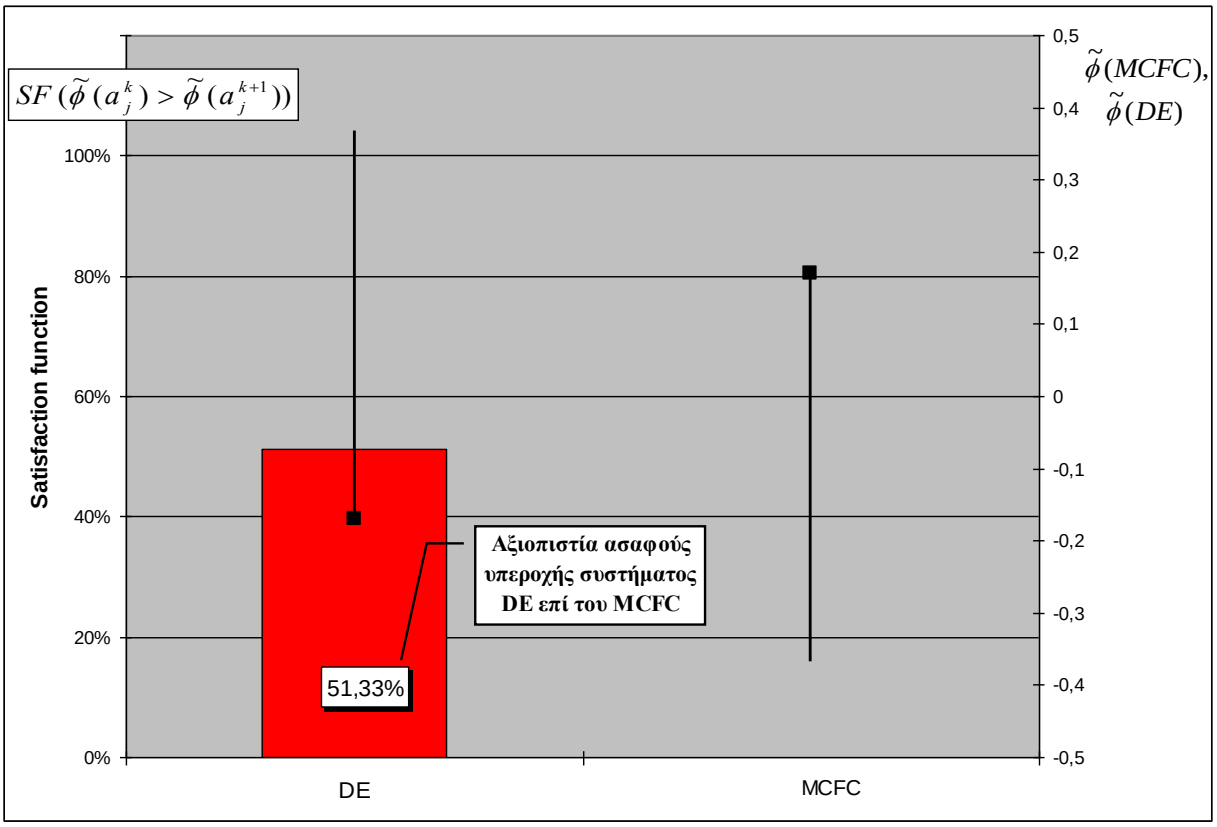
Κατ' αντιστοιχία με την προηγούμενη παράγραφο, στα σχήματα 4.28-30 απεικονίζονται τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν στα δεδομένα του μελλοντικού σεναρίου (πίνακες 4.5, 4.7 και 4.14). Η υπόθεση των ακραία αισιόδοξων προβλέψεων όσον αφορά τα τεχνικά και οικονομικά κριτήρια του συστήματος κυψελών καυσίμου αποδίδει μια κατάσταση όπου διαπιστώνεται έντονη επικάλυψη των ασαφών ροών προτίμησης, κάτι που συνεπάγεται μειωμένη αξιοπιστία στην υπεροχή του ενός ή του άλλου συστήματος.

Η μορφή των τριγωνικών ροών του σχήματος 4.28 υποδεικνύει ότι εξαντλείται η αισιοδοξία για ευνοϊκότερες επιδόσεις του συστήματος MCFC, καθώς το εύρος του δεξιού σκέλους της ροής MCFC (μπλε γραμμή) είναι μηδαμινό, σε αντίθεση με το αριστερό, το οποίο αποδίδει τη σημαντική αβεβαιότητα επίτευξης των ευνοϊκών προβλέψεων. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται βελτιωμένη συνολική επίδοση του συστήματος MCFC στο περιβαλλοντικό σενάριο στάθμισης Β. Αξίζει επίσης να αναφερθεί ότι η κλασσική πολυκριτηριακή προσέγγιση δεν θα είχε τη δυνατότητα να απεικονίσει αυτή την αβεβαιότητα, καταλήγοντας σε μια καθαρή επικράτηση του συστήματος MCFC (κρίνοντας από τη θέση των κορυφών των τριγωνικών ροών του σχήματος 4.28).

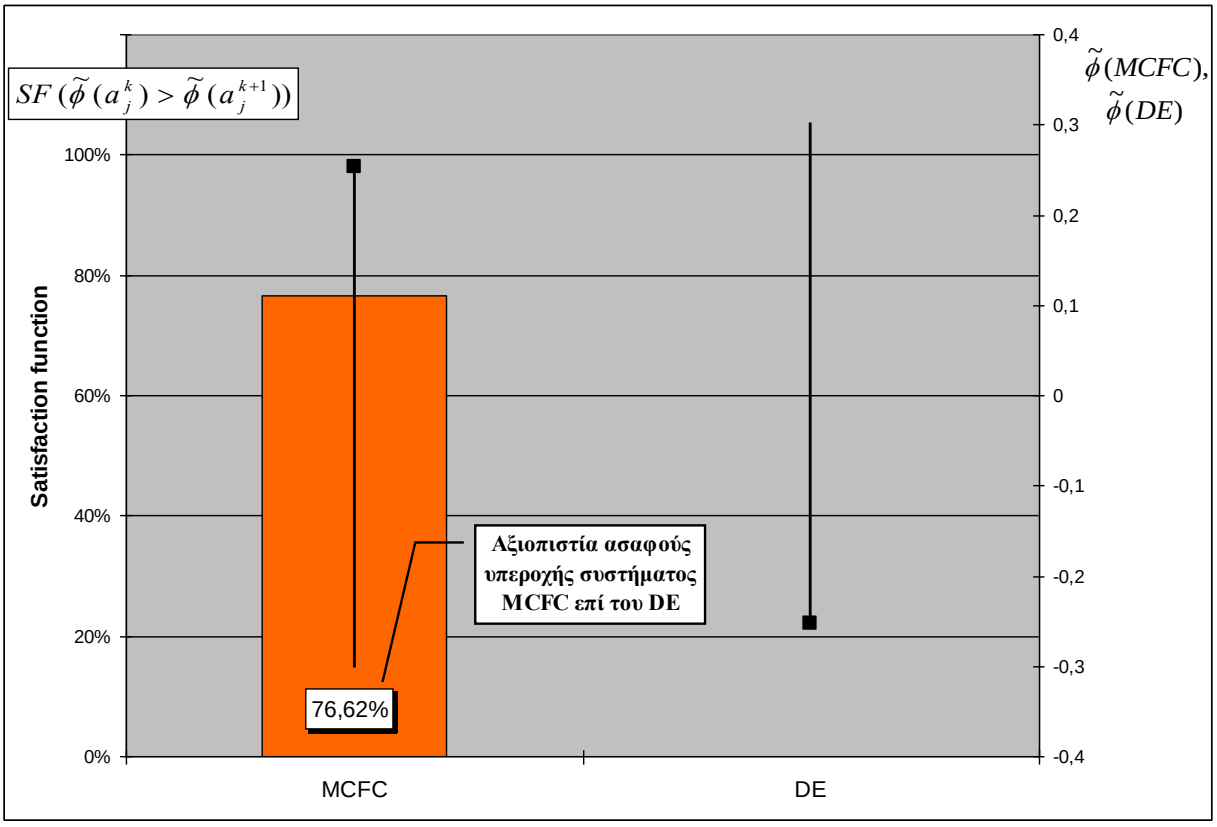


Σχήμα 4.28 Αποτελέσματα ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης – Σενάριο μελλοντικής κατάστασης

Η κατάταξη των δυο συστημάτων, σε αντίθεση με το προηγούμενο σενάριο παρούσας κατάστασης, αναδεικνύεται ως μη τετριμμένη, κάτι που καθιστά αν όχι αναγκαία, τουλάχιστον εξαιρετικά χρήσιμη την ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας των ασαφών κατατάξεων. Το σχήμα 4.29 απεικονίζει την οριακή επικράτηση του συμβατικού συστήματος DE κατά την «οικονομική» στάθμιση Α, καθώς το ποσοστό της αξιοπιστίας επικράτησης υπερβαίνει ελάχιστα το 50%. Αυτή η οριακή επικράτηση αποδίδεται στο ότι το κόστος εγκατάστασης του συστήματος MCFC αναμένεται να παραμείνει σε πολύ υψηλά επίπεδα (πίνακας 4.7). Όταν στην απόφαση επιλογής βαρύνουν περισσότερο τα περιβαλλοντικά κριτήρια, παρουσιάζεται η μοναδική περίπτωση όπου το σύστημα κυψελών καυσίμου αναδεικνύεται ως επικρατέστερο. Ωστόσο, η αξιοπιστία της υπεροχής χαρακτηρίζεται ως μέτρια, λόγω της σημαντικής αβεβαιότητας επίτευξης των αισιόδοξων προβλέψεων.



Σχήμα 4.29 Αξιοπιστία ασαφούς κατάταξης – Σενάριο μελλοντικής κατάστασης – Στάθμιση κριτηρίων Α.



Σχήμα 4.30 Αξιοπιστία ασαφούς κατάταξης – Σενάριο μελλοντικής κατάστασης – Στάθμιση κριτηρίων Β.

4.6 Σύνοψη – κριτική αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο εφαρμόστηκε η μεθοδολογία ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων, όπως διατυπώθηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3. Εξετάστηκαν δυο ανταγωνιστικά συστήματα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής σε ναυτιλιακές εφαρμογές με τελικό σκοπό την ανάδειξη του επικρατέστερου βάσει του συνδυασμού της τεχνικής – οικονομικής – περιβαλλοντικής αποδοτικότητας και εναλλακτικών προσεγγίσεων όσον αφορά την απόφαση επιλογής. Η ανάλυση συμπεριέλαβε την ασάφεια καθορισμού των αντίστοιχων κριτηρίων αξιολόγησης και επεκτάθηκε πέραν της παρούσας κατάστασης σε ένα μελλοντικό σενάριο με ορίζοντα 10-15 ετών.

Όσον αφορά το μεθοδολογικό σκέλος της εφαρμογής, αντιμετωπίστηκαν με επιτυχία οι αδυναμίες της κλασικής τεχνο-οικονομικής προσέγγισης αξιολόγησης (παράγραφος 3.1.1), καθώς:

- Επιτεύχθηκε πλήρης ενσωμάτωση της περιβαλλοντικής συνιστώσας στη διαδικασία ολοκληρωμένης αξιολόγησης (παράγραφος 4.4.2.3 – Περιβαλλοντική αξιολόγηση).
- Αποφεύχθηκε η μονομέρεια της αξιολόγησης, μέσω του συνδυασμού της τεχνικής, της οικονομικής και της περιβαλλοντικής πληροφορίας των εξεταζόμενων συστημάτων (παράγραφος 4.4.3).
- Το εύρος της ασάφειας προσδιορισμού των τιμών των κριτηρίων αξιολόγησης αποτυπώθηκε στα τελικά αποτελέσματα, ενισχύοντας την παρεχόμενη πληροφορία προς τους αποφασίζοντες (παράγραφος 4.5). Το αποτέλεσμα με τη μορφή ασαφών αριθμών παρέχει πρόσθετη πληροφορία συγκριτικά με μια απλή κατάταξη συστημάτων, καθώς απεικονίζει το εύρος της ασάφειας και αποδίδει εποπτικά τη σταθερότητα της τελικής κατάταξης.

Σε επίπεδο αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας, διαπιστώνεται ότι το σύστημα που βασίζεται στην τεχνολογία των κυψελών καυσίμου διαθέτει μεν σημαντικά θεωρητικά πλεονεκτήματα συγκρινόμενο με το συμβατικό σύστημα κινητήρα DE, όμως η αδυναμία 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.

Το μελλοντικό σενάριο ίσως έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς η υπόθεση της συνολικής βελτίωσης των δεικτών του συστήματος MCFC αποδίδει μια σχεδόν ισοσκελισμένη εικόνα. Με δεδομένο λοιπόν ότι θα επαληθευτούν τα επόμενα 10-15 έτη οι πλέον αισιόδοξες προβλέψεις σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη μείωση του κόστους εγκατάστασης, διαφαίνεται ότι οι ΜΒΗ MCFC είναι σε θέση να αντικαταστήσουν συμβατικές μονάδες. Το εύρος της εφαρμογής τους αναμένεται να ενισχυθεί, αν στην απόφαση βαρύνουν

περισσότερο τα αντίστοιχα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα της μονάδας MCFC. Ωστόσο, το γεγονός ότι οι συμβατικές μονάδες DE 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.

Βιβλιογραφία 4ου Κεφαλαίου

Ελληνική βιβλιογραφία

Κυρτάτος Ν. «Ναυτικοί κινητήρες και ατμοσφαιρική ρύπανση». Σύγχρονη Τεχνική Επιθεώρηση. Τεύχος 210, Σελ. 32-37. Φεβρουάριος 2009.

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Adams V.W. Possible fuel cell applications for ships and submarines. J Power Sources 29(1-2) (1990) 181-192.

Adamson K.A. Niche Transport Vehicle Survey, Part 2: APU and Marine Applications (2006). http://www.fuelcelltoday.com

Alkaner S. and Zhou P. A comparative study on life cycle analysis of molten carbonate fuel cells and diesel engines for marine application. J Power Sources 158 (2006) 188-199.

Baratto F. and Diwekar U.M. Life cycle assessment of fuel cell-based APUs. Journal of Power Sources 139 (2005) 188–196

Baschuk J.J and Xianguo L. Carbon monoxide poisoning of proton exchange membrane fuel cells. Int. J. Energy Res. 25 (2001) 695-713.

Bensaid S., Specchia S., Federici F., Saracco G and Specchia V. MCFC-based marine APU: Comparison between conventional ATR and cracking coupled with SR integrated inside the stack pressurized vessel. International journal of hydrogen energy 34 (2009) 2026–2042.

Bischoff M. and Huppmann G. Operating experience with a 250 kWel molten carbonate fuel cell (MCFC) plant. Journal of Power Sources 105 (2002) 216-221.

Bove R. and Lunghi P. Experimental comparison of MCFC performance using three different biogas types and methane. Journal of Power Sources 145 (2005) 588–593.

Brans J.P., Vincke Ph. and Mareschal B., How to select and how to rank projects: the PROMETHEE method, European J. Oper. Res., 24 (1986) 228-238.

Brehmer T., Heger F.,Lucka K, von Schloss J., Abu-Sharekh Y., Trimis D., Heeb A., Köb G., Hayashi T., Pereira J.C.F, Founti M., Kolaitis D., Molinari M., Ortona A., Michel J.B., Theurillat P.. BIOFLAM Project Final Report (2004).

Briem S. Gas fired CHP systems – Internal Combustion Engines. Report of ECLIPSE project. 2003.

CARB (California Air Resources Board). Fuel Sulfur and Other Operational Requirements for Ocean-Going Vessels Within California Waters And 24 Nautical Miles of the California Baseline (2008).

Chryssakis C.A., Hagena J.R., Knafl A, Hamosfakidis V.D and Filipi Z.S. In-cylinder reduction of PM and NOx emissions from diesel combustion with advanced injection strategies. Int. J. Vehicle Design 41 (2006).

Daly J., Steinfeld G., Moyer D.K. and Holcomb F.H. Molten carbonate fuel cell operation with dual fuel flexibility. Journal of Power Sources 173 (2007) 925–934.

Delta Energy and Environment. New technologies for CHP applications. (2006). Available at: http://www.sei.ie/getFile.asp?FC_ID=1774&docID=57.

Desideri U., Lunghi P. and Zepparelli F.. A comparison between LCA of a MCFC system, a LFG – MCFC system and traditional energy conversion systems. Proceedings of the 2nd International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology. Rochester, New York, USA (2004)

Donolo G., De Simon G and Fermeglia M.. Steady state simulation of energy production from biomass by molten carbonate fuel cells. Journal of Power Sources 158 (2006) 1282–1289.

E4Ships – Klimafreundliche Energieversorgung auf Schiffen mit Brennstoffzellen. German Industrial Project (2009). Available at: http://ebookbrowse.com/e4ships-090701-pk-praesentation-pdf-d76088852

EC (European Commission). Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community. Entec UK Limited (2002a). Available from: http://ec.europa.eu/environment/air/.

EC (European Commission). A European Union strategy to reduce atmospheric emissions from sea-going ships. COM:595. (2002b). Available from: www.europa.eu.int/comm/environment/air.

EC (European Commission). Fuel cells in ships – synthesis of open problems and roadmap for future RTD (2004). Available from: www.europa.eu.int/comm/environment/air.

Ecoinvent v. 2.1 LCA database (SimaPro 7.3). The Ecoinvent center, Switzerland. (2009)

EPA (Environmental Protection Agency). Catalogue of CHP Technologies. (2003). Available at: http://www.epa.gov/CHP/pdf/intro.pdf

FellowSHIP. Industrial research project. (2010). http://vikinglady.no/

Frischknecht R. et.al.. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent (2003), Swiss Centre for LCI. Duebendorf, CH. Available at: www.ecoinvent.ch

Goedkoop, M., and Spriensma, R. The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report. PRe Consultants B.V. (2001). Available at: http://www.pre-sustainability.com/content/reports

Guinée, J.B., Gorrée, M., Heijungs, R., Huppes, G., Kleijn, R., Koning, A. de, Oers, L. van, Wegener Sleeswijk, A., Suh, S., Udo de Haes, H.A., Bruijn, H. de, Duin, R. van and Huijbregts, M.A.J. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, CML, 2001. ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, (2002). Pp. 692.

Hengeveld D.W. and Revankar S.T. Economic analysis of a combined heat and power molten carbonate fuel cell system. Journal of Power Sources 165 (2007) 300–306.

Hountalas D. and Papagiannakis R. Development of a Simulation Model for Direct Injection Dual Fuel Diesel-Natural Gas Engines. SAE Technical Paper 2000-01-0286 (2000)

Hountalas D.T., Mavropoulos G.C. and Binder K.B. Effect of exhaust gas recirculation (EGR) temperature for various EGR rates on heavy duty DI diesel engine performance and emissions. Energy 33 (2008) 272–283

Iaquaniello G and Mangiapane A. Integration of biomass gasification with MCFC. International Journal of Hydrogen Energy 31 (2006) 399 – 404.

IMO (International Maritime Organization). MARPOL 73/78 Annex VI: Prevention of Air Pollution from Ships (2004).

Jacobs T., Assanis D. and Filipi Z. The Impact of Exhaust Gas Recirculation on Performance and Emissions of a Heavy-Duty Diesel Engine. Paper No. 2003-01-1068. (2003) SAE World Congress & Exhibition.

Kapepula K.M., Colson G., Sabri K. and Thonart P. A multiple criteria analysis for household solid waste management in the urban community of Dakar. Waste Management 27 (2007) 1690–1705

Karakoussis V., Brandon, N.P., Leach, M. and van der Vorst M. The environmental impact of manufacturing planar and tubular solid oxid fuel cells. J of Power Sources 101 (2001) 10-26.

Kyong S.O. and Tong S.K. Performance analysis on various system layouts for the combination of an ambient pressure molten carbonate fuel cell and a gas turbine. Journal of Power Sources 158 (2006) 455–463.

Lunghi P. and Bove R. Life Cycle Assessment of a molten carbonate fuel cell stack. Fuel Cells 3 (2003) 224-230.

Lunghi P., Bove R. and Desideri U. Analysis and optimization of hybrid MCFC gas turbines plants. Journal of Power Sources 118 (2003) 108–117.

Lunghi P., Bove R. and Desideri U. LCA of a molten carbonate fuel cell system. Journal of Power Sources 137 (2004) 239–247.

Lunghi P., Ubertini S. and Desideri U. Highly efficient electricity generation through a hybrid molten carbonate fuel cell-closed loop gas turbine plant. Energy Conversion and Management 42 (2001) 1657-1672.

MC-WAP EU research project. Molten-carbonate fuel Cells for Waterborne APplication. Internal report. Contract No:FP6 – 019973, 2005-2011. http://mc-wap.cetena.it

METHAPU EU Research Project. (2010). http://www.methapu.eu

Moreno, S. McPhail and R. Bove. International Status of Molten Carbonate Fuel Cell Technology. (2008).

NRDC (Natural Resources Defense Council). Harboring pollution: strategies to clean up U.S. ports. New York, NY (2004). Available from: http://www.nrdc.org/air/pollution/ports

Oberschmidt J., Geldermann J., Ludwig J. and Schmehl M.. Modified PROMETHEE approach for assessing energy technologies, International Journal of Energy Sector Management 4(2) (2010) 183-212.

Orecchini F., Bocci E. and Di Carlo A. MCFC and microturbine power plant simulation. Journal of Power Sources 160 (2006) 835–841.

Raugei M., Bargigli S. and Ulgiati S. A multi-criteria life cycle assessment of molten carbonate fuel cells (MCFC) – a comparison to natural gas turbine. Int J Hydrogen Energy 30 (2005) 123-130.

REF (Renewable Energy Focus). Fuel cells in maritime operation - low emissions in port and at sea. (2011). Available at: http://www.renewableenergyfocus.com/view/17608/fuel-cells-in-maritime-operation--low-emissions-in-port-and-at-sea/

Roads2HyCom EU Integrated Project. Publishable report (2008). Available at: http://www.ika.rwth-aachen.de/r2h/Hydrogen_and_Fuel_Cells_in_Marine_Transport

Sattler G. Fuel cells going on-board. J Power Sources 86 (2000) 61-67.

Sattler G. PEFCs for naval ships and submarines: many tasks, one solution. J Power Sources 71(1-2) (1998) 144-149.

USCG (U.S. Coast Guard) Research and Development Center, U.S. Department of Transportation. Marine molten carbonate fuel cell demonstration module: USCGC VINDICATOR ship interface studies. CG-D-12-99 (1999).

USDOE (U.S. Department of Energy) - Office of Fossil Energy. Fuel Cell Handbook (Seventh Edition). (2004).

Wartsila. Energy efficient solutions for cruise ships, ferries and megayachts. (2010). Available from: http://www.wartsila.com

Wartsila. Generating sets – Auxpack technology review (2009). Available from: http://www.wartsila.com

Wartsila. Ship Power Product Catalogue (2011). Available from: http://www.wartsila.com

Wook H.Y., Byong S.K., Ki D.K., Yong S.L. and Sang H.G. Optimization of Piston Bowl Shape, Fuel Injection Nozzle and Fuel Injection Rate for the Reduction of NOx Emissions in a Medium-speed Diesel Engine. The Seventh International Conference on Modeling and Diagnostics for Advanced Engine Systems. COMODIA (2008), Sapporo, Japan.

Wuersig G. Shipping - A Market for Fuel Cell Systems? Challenges and Opportunities for Fuel Cell Technology. Proceedings of the Eleventh Grove Fuel Cell Symposium, Queen Elizabeth II Conference Centre, Westminster, London, UK. (2009). Available at: http://www.grovefuelcell.com/pdf/papers/30_wuersig.pdf

Κεφάλαιο 5ο

Αξιολόγηση τεχνολογιών μικρο-συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για οικιακές εφαρμογές

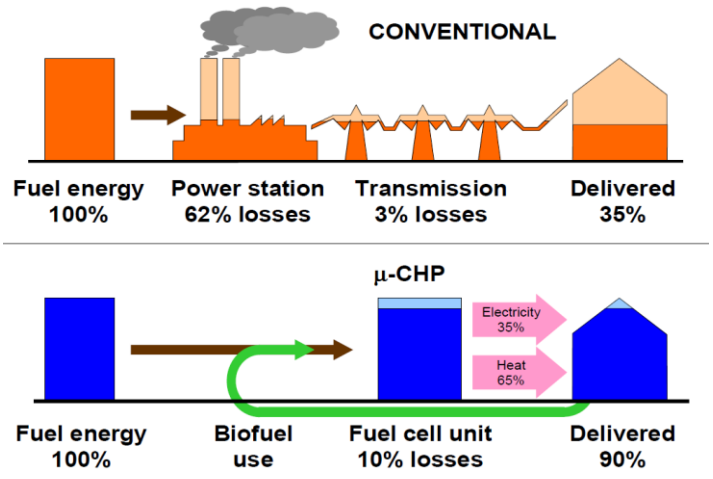
Στην εισαγωγική παράγραφο ορίζεται η έννοια της μικρο-συμπαραγωγής και παρατίθενται τα γενικά οφέλη που τη χαρακτηρίζουν. Στη συνέχεια παρουσιάζεται η τρέχουσα κατάσταση όσον αφορά το επίπεδο ανάπτυξης και τις βασικές τεχνολογίες των σχετικών εφαρμογών σε παγκόσμιο επίπεδο, ενώ παρουσιάζονται και οι κυριότερες προσπάθειες αξιολόγησης αντίστοιχων συστημάτων. Στο κύριο μέρος εφαρμόζεται η μεθοδολογία ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων, όπως διατυπώθηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3. Εξετάστηκαν δυο εναλλακτικά συστήματα μικροσυμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (μ-ΣΗΘ) για οικιακές εφαρμογές, όπως και συμβατικό σύστημα αναφοράς με λέβητα αερίου. Μετά την παρουσίαση των αποτελεσμάτων της προτεινόμενης μεθοδολογίας συνοψίζονται τα κύρια ευρήματα και συμπεράσματα. Στο τέλος παρατίθεται η σχετική ελληνική και ξενόγλωσση βιβλιογραφία.

5.1 Εισαγωγή

Η επιδίωξη για βιωσιμότητα στην αλυσίδα παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης ενέργειας προϋποθέτει διαρκή προσπάθεια για αύξηση της ενεργειακής αποδοτικότητας των ενδιάμεσων διεργασιών και μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του συνολικού συστήματος. Η εφαρμογή αποδοτικότερων και λιγότερο επιβαρυντικών τεχνικών μετατροπής πρωτογενούς ενέργειας, καθίσταται επιτακτικότερη όταν διατυπώνονται εκτιμήσεις (EIA, 2004) σύμφωνα με τις οποίες αναμένεται να διπλασιαστεί τα επόμενα 20 έτη σε παγκόσμιο επίπεδο η κατανάλωση ηλεκτρισμού.

Προκειμένου να καλυφθούν οι ανάγκες της αυξημένης ενεργειακής αποδοτικότητας και της βελτιωμένης περιβαλλοντικής συμπεριφοράς στο πλαίσιο μιας εξελισσόμενης ενεργειακής αγοράς, αναπτύσσονται νέες τεχνολογίες και πρακτικές. Το παρόν πρότυπο κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής και διανομής σε υψηλή τάση αποτελεί πεδίο κριτικής (Kaundinya et al., 2009), τόσο για λόγους οικονομικούς (υψηλές απαιτήσεις σε κεφάλαιο προκειμένου να ενισχυθούν τα δίκτυα μεταφοράς), όσο και περιβαλλοντικούς (επιπτώσεις εκπομπών αερίων ρύπων λόγω καύσης ορυκτών καυσίμων). Η μετάβαση σε ένα νέο «διασπαρμένο» σύστημα παραγωγής και διανομής προϋποθέτει την εγκατάσταση μικρών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής και αναμένεται να συμβάλλει στη μείωση των απωλειών του δικτύου και των αντίστοιχων περιβαλλοντικών επιπτώσεων, παρέχοντας παράλληλα πεδίο ανάπτυξης εφαρμογών ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Pehnt et al., 2006). Ως επιπρόσθετα οφέλη που αναμένονται από την εφαρμογή του διεσπαρμένου μοντέλου αναφέρονται η αποφυγή του κόστους μεταφοράς και διανομής και η αξιοποίηση τοπικά διαθέσιμων καυσίμων (Brown et al., 2007).

Οι προοπτικές εξοικονόμησης ενέργειας ενισχύονται όταν η τοπική ηλεκτροπαραγωγή συνδυάζεται με παραγωγή θερμότητας (Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού και Θερμότητας – ΣΗΘ). Η εν δυνάμει επίτευξη συνδυασμένων βαθμών απόδοσης της τάξης του 85-90% (Σχήμα 5.1) καθιστά ελκυστική την ανάπτυξη επενδυτικών σχεδίων για εφαρμογή ΣΗΘ, τόσο σε ιδιωτικό (σημαντικές βιομηχανικές απαιτήσεις ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας), όσο και σε δημόσιο (προσέγγιση εθνικών



Σχήμα 5.1 Ενεργειακό όφελος μικρο-συμπαραγωγής

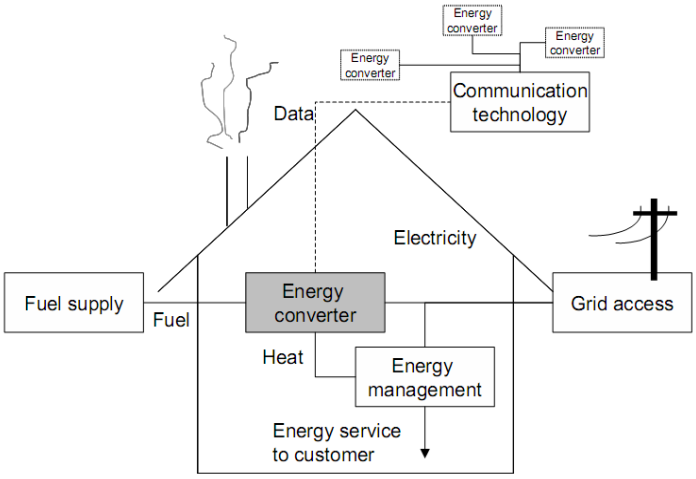
στόχων εξοικονόμησης ενέργειας και εκπομπών διοξειδίου άνθρακα) επίπεδο (Madlener and Schmid, 2003).

Η εφαρμογή του διεσπαρμένου μοντέλου παραγωγής και διανομής παρουσιάζει αυξητική τάση λόγω της σταδιακής κατάργησης των κρατικών μονοπωλίων ηλεκτροπαραγωγής, με σχετικές εκτιμήσεις (WADE, 2005; Kaundinya et al., 2009) να προβλέπουν ότι το ποσό της παγκόσμιας εξοικονόμησης να φτάνει τα 2,7 τρις $ μέχρι το έτος 2030.

Σημαντικό τμήμα της συνολικής κατανάλωσης πρωτογενούς ενέργειας αφορά την κάλυψη ηλεκτρικών και θερμικών φορτίων του οικιακού τομέα (26% της συνολικής κατανάλωσης - EE27, 2008). Οι ενεργειακές απαιτήσεις του οικιακού τομέα τείνουν να αυξάνονται (Pehnt et al., 2006) λόγω της βελτίωσης του βιοτικού επιπέδου (νέες καταναλωτικές ανάγκες), δημογραφικών (γήρανση πληθυσμού) και γενικότερων κοινωνικών αλλαγών (εργασία από το σπίτι).

Ιδιαίτερη ερευνητική προσπάθεια συγκεντρώνεται γύρω από οικιακές μονάδες ΣΗΘ (βλ. § 5.4). Ως οικιακή μικρο-συμπαραγωγή (μ-ΣΗΘ) ορίζεται η ταυτόχρονη παροχή θερμικής ή ψυκτικής και ηλεκτρικής ισχύος σε κτήριο, δυναμικότητας έως 15 kW ηλεκτρισμού (Pehnt et al., 2006). Στο Σχήμα 5.2 απεικονίζονται τα κύρια στοιχεία ενός συστήματος οικιακής μ-ΣΗΘ.

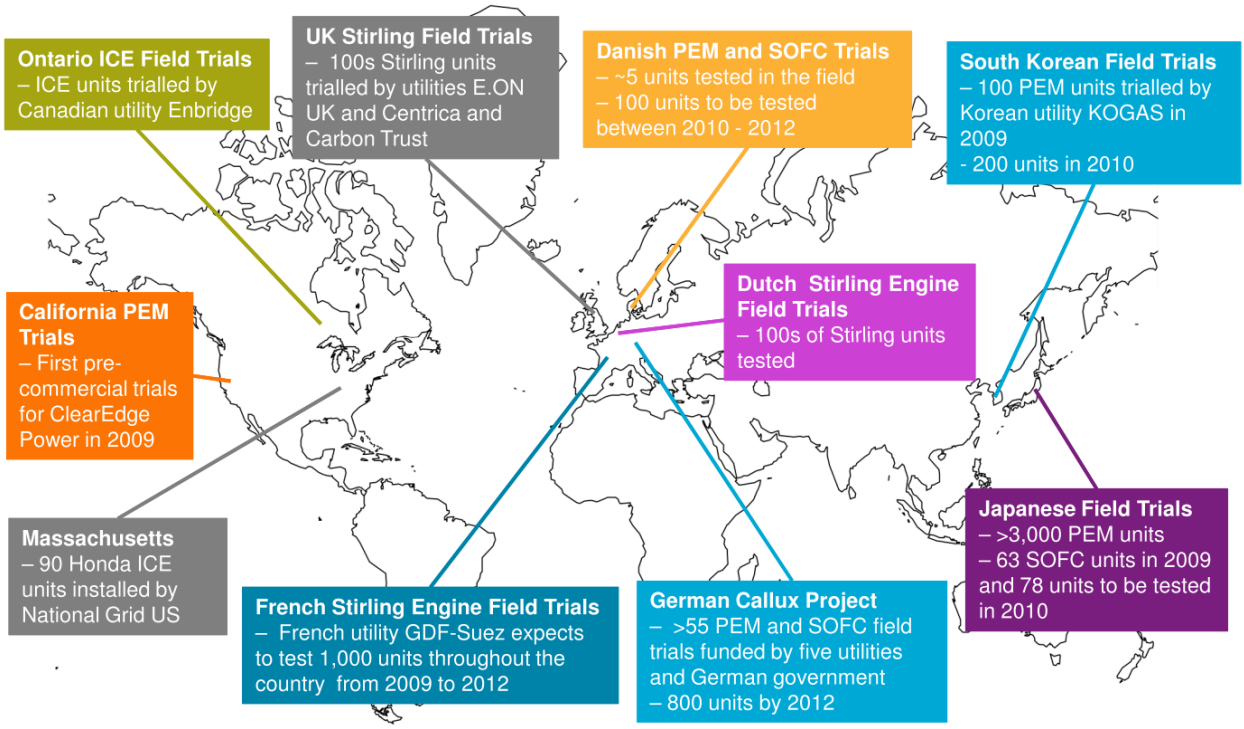
Στις παραγράφους που ακολουθούν παρουσιάζεται η παρούσα θέση των συστημάτων οικιακής μ-ΣΗΘ στην παγκόσμια ενεργειακή αγορά και αναλύονται οι διαθέσιμες τεχνολογίες. Έπεται η καταγραφή και ο σχολιασμός των υπαρχουσών προσπαθειών αξιολόγησης συστημάτων και τεχνολογιών μ-ΣΗΘ. Τα βήματα της προτεινόμενης μεθοδολογίας που παρουσιάστηκε λεπτομερώς στο κεφάλαιο 3 εφαρμόζονται στη παράγραφο 5.5, προκειμένου να επιτευχθεί συνολική και συνδυασμένη αξιολόγηση ενός καινοτόμου συστήματος μ-ΣΗΘ με συστοιχία κυψελών καυσίμου τύπου SOFC. Ως συστήματα αναφοράς ορίζονται: (α) Συμβατικό σύστημα κάλυψης οικιακών ενεργειακών αναγκών με λέβητα αερίου και σύνδεση στο κεντρικό ηλεκτρικό δίκτυο και (β) Ανταγωνιστικό σύστημα μ-ΣΗΘ με μηχανή εσωτερικής καύσης παρόμοιας δυναμικότητας. Τα αποτελέσματα, ο σχολιασμός της προτεινόμενης μεθοδολογίας και τα αντίστοιχα συμπεράσματα παρατίθενται στις δυο τελευταίες παραγράφους του παρόντος κεφαλαίου.



Σχήμα 5.2 Κύρια στοιχεία συστήματος οικιακής μ-ΣΗΘ

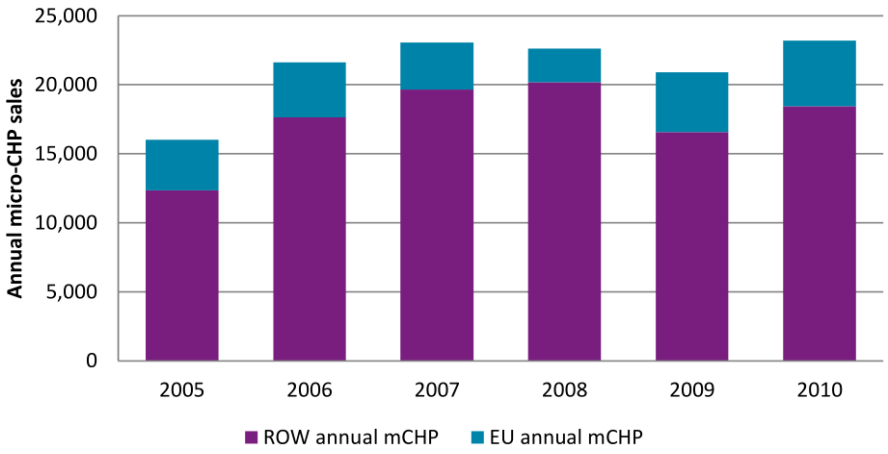
5.2 Παρουσίαση τρέχουσας κατάστασης και εκτιμήσεων για την ανάπτυξη εφαρμογών μικρο-ΣΗΘ

Οι εφαρμογές συστημάτων μ-ΣΗΘ που καταγράφονται σε παγκόσμιο επίπεδο διαχωρίζονται σε πιλοτικές και εμπορικές. Στο σχήμα 5.3 απεικονίζονται τα πιο σημαντικά προγράμματα δοκιμαστικής λειτουργίας συστημάτων μ-ΣΗΘ εντός του 2010. Διακρίνονται οι τρεις περιοχές όπου παρατηρείται ερευνητική δραστηριότητα: ΗΠΑ, Δυτική Ευρώπη (κατά κύριο λόγο Γερμανία, Μ.Βρετανία και Ολλανδία) και Άπω Ανατολή (Ιαπωνία και Ν. Κορέα), όπως και οι τεχνολογίες που αναπτύσσονται (ή υιοθετούνται) αντίστοιχα. Όσον αφορά τις πωλήσεις εμπορικών μονάδων μ-ΣΗΘ, είναι σαφές ότι προϋποθέτουν αφενός την επιτυχή πιλοτική λειτουργία ενός συστήματος μ-ΣΗΘ και αφετέρου τη διαμόρφωση ενός ευνοϊκού επενδυτικού περιβάλλοντος (νομοθετικά κίνητρα, «ώριμη» ενεργειακή αγορά).



Σχήμα 5.3 Σημαντικότερα πιλοτικά προγράμματα μ-ΣΗΘ εντός του 2010 (Morgado and Slowe, 2010)

Τα εμπορικά συστήματα μ-ΣΗΘ που πωλήθηκαν στο πρόσφατο παρελθόν παγκοσμίως δεν ξεπερνούν τις 25000 μονάδες σε ετήσια βάση (Σχήμα 5.4), των οποίων η πλειονότητα αφορά την αγορά της Ιαπωνίας, ωστόσο μετά το 2008 διαφαίνεται ανοδική πορεία και στην Ευρώπη. Η άνοδος στην αξία των ευρωπαϊκών πωλήσεων μεταξύ 2009 και 2010 εκτιμάται στο 25% (Brown, 2011).



Σχήμα 5.4 Ετήσιες πωλήσεις εμπορικών συστημάτων μ-ΣΗΘ. ROW: Rest of World, EU: European Union (Dwyer S. and Slowe J., 2011)

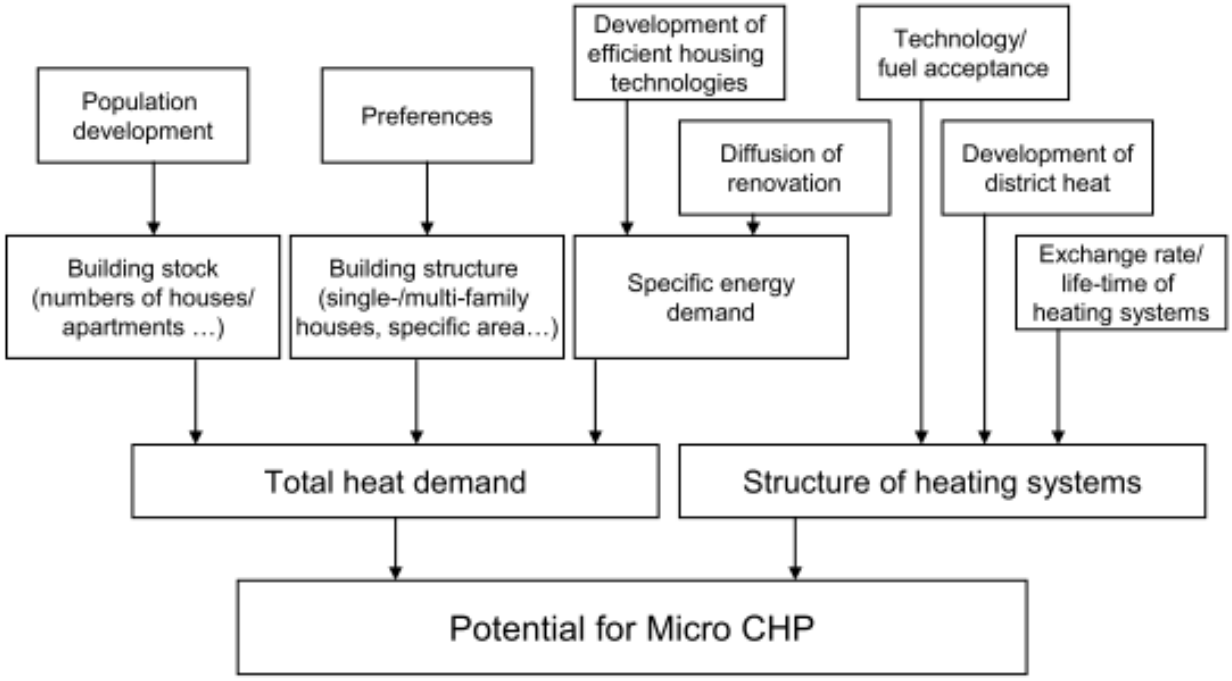
Εκτός των προφανών ενδογενών παραγόντων (επίπεδο τεχνολογικής εξέλιξης, κόστη παραγωγής, περιβαλλοντικές επιπτώσεις), οι προοπτικές εμπορικής επέκτασης των εφαρμογών μ-ΣΗΘ εξαρτώνται άμεσα και από εξωγενείς παράγοντες, οι οποίοι διαμορφώνουν το πλαίσιο της ενεργειακής αγοράς. Ως οι τρεις σημαντικότεροι καταγράφονται οι εξής:

- Το δυναμικό εφαρμογής
- Η διακύμανση των ενεργειακών τιμών
- Οι υποστηρικτικοί νομοθετικοί μηχανισμοί

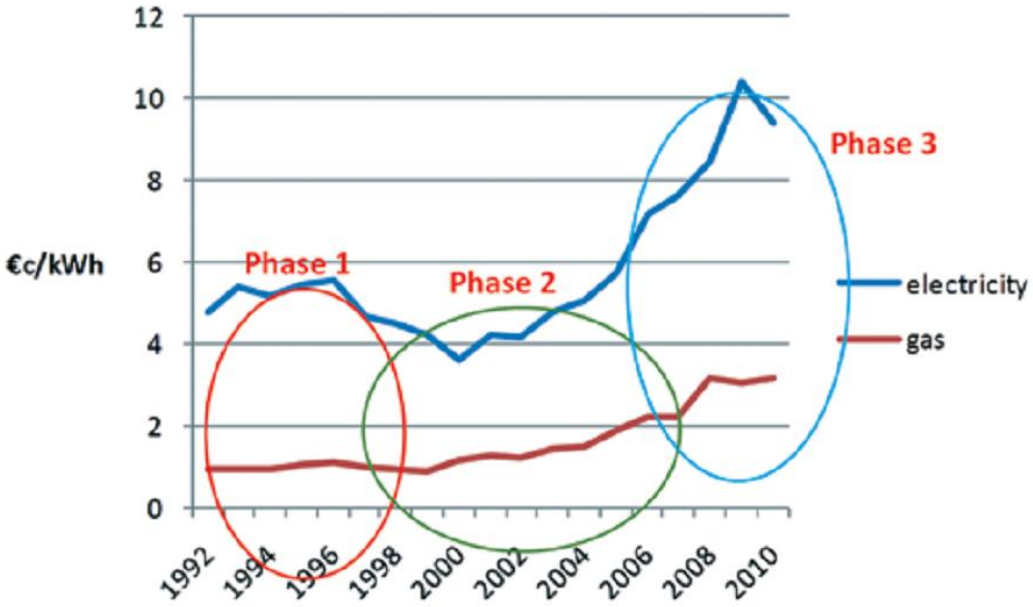
Η εκτίμηση του μελλοντικού δυναμικού εφαρμογής μ-ΣΗΘ ουσιαστικά καθορίζεται το μέγεθος της ενεργειακής «πίτας», της οποίας μερίδιο καλείται να καλύψουν εφαρμογές μ-ΣΗΘ, ανταγωνιζόμενες συστήματα όπως λέβητες συμπύκνωσης και αντλίες θερμότητας. Μια τέτοια εκτίμηση αποτελεί ένα ιδιαίτερα πολύπλοκο θέμα τη στιγμή που επηρεάζεται από πληθώρα δημογραφικών, οικιστικών, ενεργειακών και τεχνολογικών παραμέτρων. Στο σχήμα 5.5 συνοψίζονται οι κύριες επιδράσεις στο δυναμικό εφαρμογής.

Ως θεμελιώδης κρίνεται η επιρροή της διακύμανσης της διαφοράς των τιμών ηλεκτρισμού και φυσικού αερίου, καθώς είναι σε θέση να επιδράσει άμεσα την οικονομική βιωσιμότητα είτε θετικά είτε αρνητικά. Στο σχήμα 5.6, όπου παρουσιάζεται η εξέλιξη των αντίστοιχων βιομηχανικών ενεργειακών τιμών για τις 15 (μέχρι το 2007) χώρες της Ευρωζώνης, παρατηρείται σαφής ανοδική τάση και για τους δυο ενεργειακούς φορείς τα τελευταία 20 έτη. Εστιάζοντας στην τιμή του φυσικού αερίου στο άμεσο μέλλον, μια πρόσφατη εκτίμηση (Brown, 2011) υπογραμμίζει μεν την αναμενόμενη αυξημένη προσφορά φυσικού αερίου (προφανώς λόγω νέων κοιτασμάτων), ωστόσο υποστηρίζει οτι η αντίστοιχη τιμή (τουλάχιστον στην Ευρώπη) θα συγκρατηθεί σε υψηλά επίπεδα, λόγω του καθορισμού της μέσω της τιμής του πετρελαίου από μακροχρόνια συμβόλαια εφοδιασμού. Στον αντίποδα, η βραχυπρόθεσμη τάση των τιμών του ηλεκτρισμού στην Ευρώπη καθορίζεται από τη μείωση της ζήτησης λόγω οικονομικής ύφεσης (παρόλη την

αύξηση λόγω στροφής της οικιακής θέρμανσης προς αντλίες θερμότητας). Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί η αναγκαιότητα απόσυρσης σημαντικού αριθμού γηρασμένων θερμικών μονάδων ηλεκτροπαραγωγής στην Ευρώπη εντός 15-20 ετών. Το κενό αναμένεται να καλυφθεί με ανανεώσιμες μονάδες, ειδικά τη στιγμή που η πυρηνική ενέργεια έχει χάσει τη δημοφιλία των περασμένων δεκαετιών, κάτι που αναμένεται να επιδράσει αυξητικά στο κόστος ηλεκτροπαραγωγής.



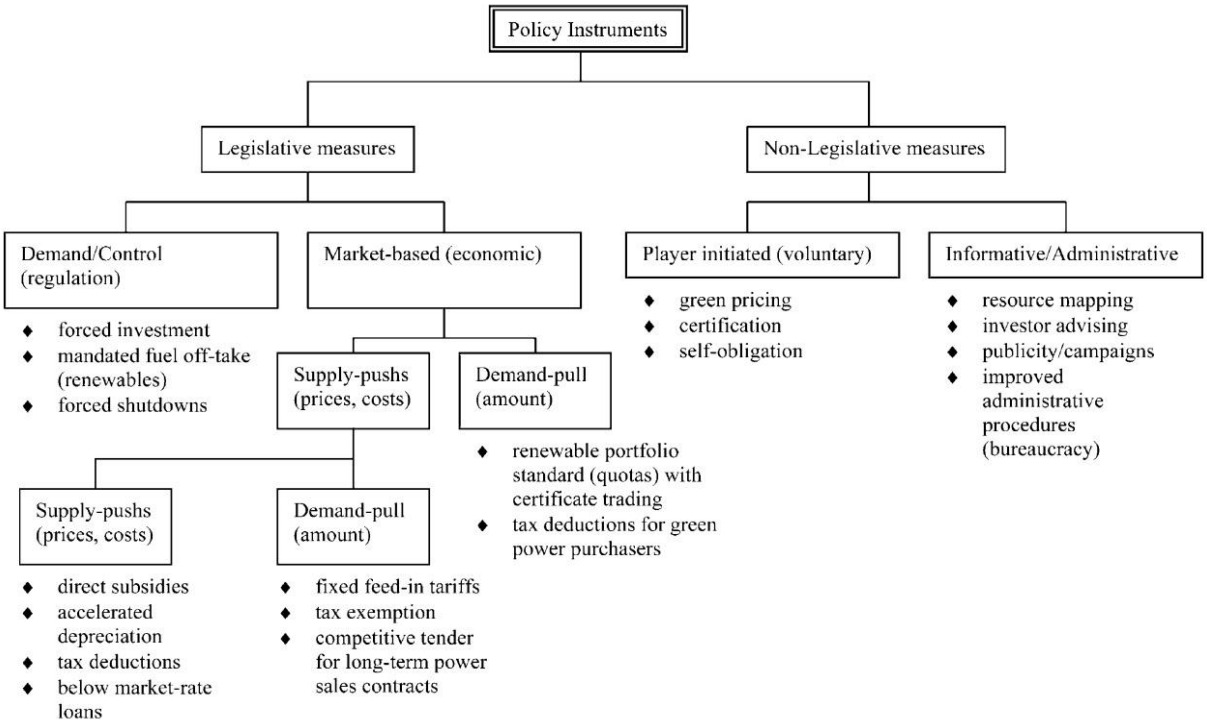
Σχήμα 5.5 Παράγοντες επίδρασης στην εξέλιξη της απαίτησης θερμότητας και του δυναμικού εφαρμογής μ-ΣΗΘ στο οικιακό τομέα. (Pehnt et al., 2006)



Σχήμα 5.6 Ενεργειακές τιμές βιομηχανίας (πλέον φόρων) - EU-15 (Brown, 2011)

Συνοπτικά, οι ενεργειακές τιμές εκτιμάται (Brown, 2011) οτι δεν ευνοούν επενδυτικά σχέδια βιομηχανικής συμπαραγωγής στο άμεσο μέλλον, ωστόσο δεν αποτρέπουν την ανάπτυξη εφαρμογών μ-ΣΗΘ ειδικά αν υποστηριχθούν από αντίστοιχες ενεργειακές πολιτικές.

Η συνεισφορά των υποστηρικτικών μηχανισμών στην ανάπτυξη και καθιέρωση καινοτόμων εφαρμογών είναι αποφασιστικής σημασίας. Ο καθορισμός ευνοϊκής ενεργειακής πολιτικής είναι σε θέση όχι μόνο να ενισχύσει την αγορά νέων ενεργειακών τεχνολογιών, αλλά και να τη δημιουργήσει (Alanne and Saari, 2004). Προκειμένου να εφαρμοστεί η πολιτική βούληση για προώθηση νέων τεχνολογιών είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διάφοροι υποστηρικτικοί μηχανισμοί, οι οποίοι διακρίνονται σε νομοθετικοί και μη νομοθετικοί (σχήμα 5.7).



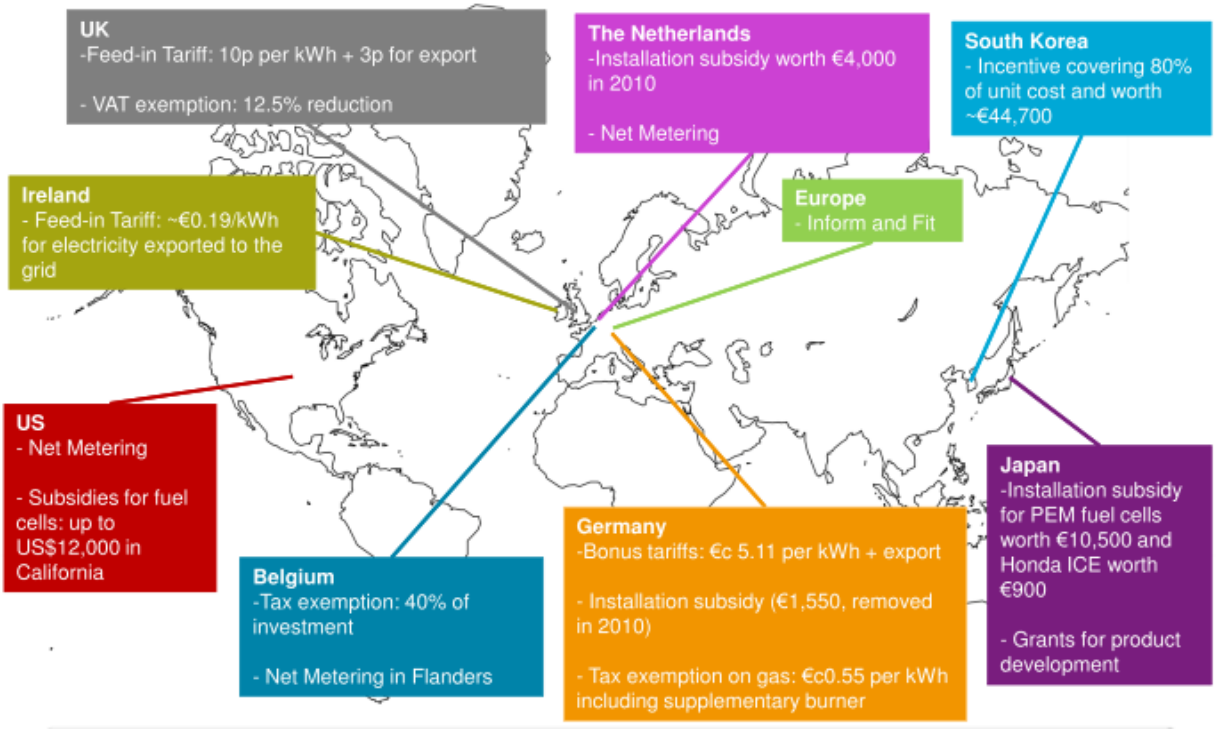
Σχήμα 5.7 Καταγραφή κυριότερων υποστηρικτικών μηχανισμών για νέες τεχνολογίες (Enzensberger et al., 2002)

Αναφορικά με την προώθηση της μ-ΣΗΘ, εφαρμόζονται σήμερα πλήθος υποστηρικτικών πρωτοβουλιών ανά τον κόσμο (σχήμα 5.8), που βελτιώνουν την οικονομική βιωσιμότητα των αντίστοιχων μονάδων.

Όσον αφορά το επίπεδο ανάπτυξης του τομέα της μ-ΣΗΘ στην Ελλάδα, διατίθενται εμπορικά συστήματα μικρών κινητήρων ΜΕΚ για εφαρμογές εκτός ηλεκτρικού δικτύου. Ως σημαντικές πρόσφατες εξελίξεις καταγράφονται η έκδοση σχετικής Τεχνικής Οδηγίας (ΤΟΤΕΕ, 2010) και η πρώτη εγκατάσταση μονάδας μ-ΣΗΘ με τροφοδοσία από το δίκτυο ΦΑ (ΕΠΑ Θεσσαλονίκης, 2011).

Σε γενικές γραμμές, ο τομέας της μ-ΣΗΘ διανύει στην παρούσα φάση το στάδιο των «παιδικών ασθενειών», κατά το οποίο μεταβαίνει από την καινοτομία στην μαζική παραγωγή. Όπως αναλύθηκε στο παρόν κεφάλαιο, η ταχύτητα αυτής της μετάβασης και το εύρος εφαρμογής θα

εξαρτηθεί από πλήθος ετερόκλητων παραγόντων, των οποίων η διακύμανση και η επιρροή είναι δύσκολα προβλέψιμη. Ωστόσο, η αγορά της μ-ΣΗΘ αναμένεται να αναπτυχθεί με εντονότερους ρυθμούς τα επόμενα 15 έτη (Bradley, 2011).



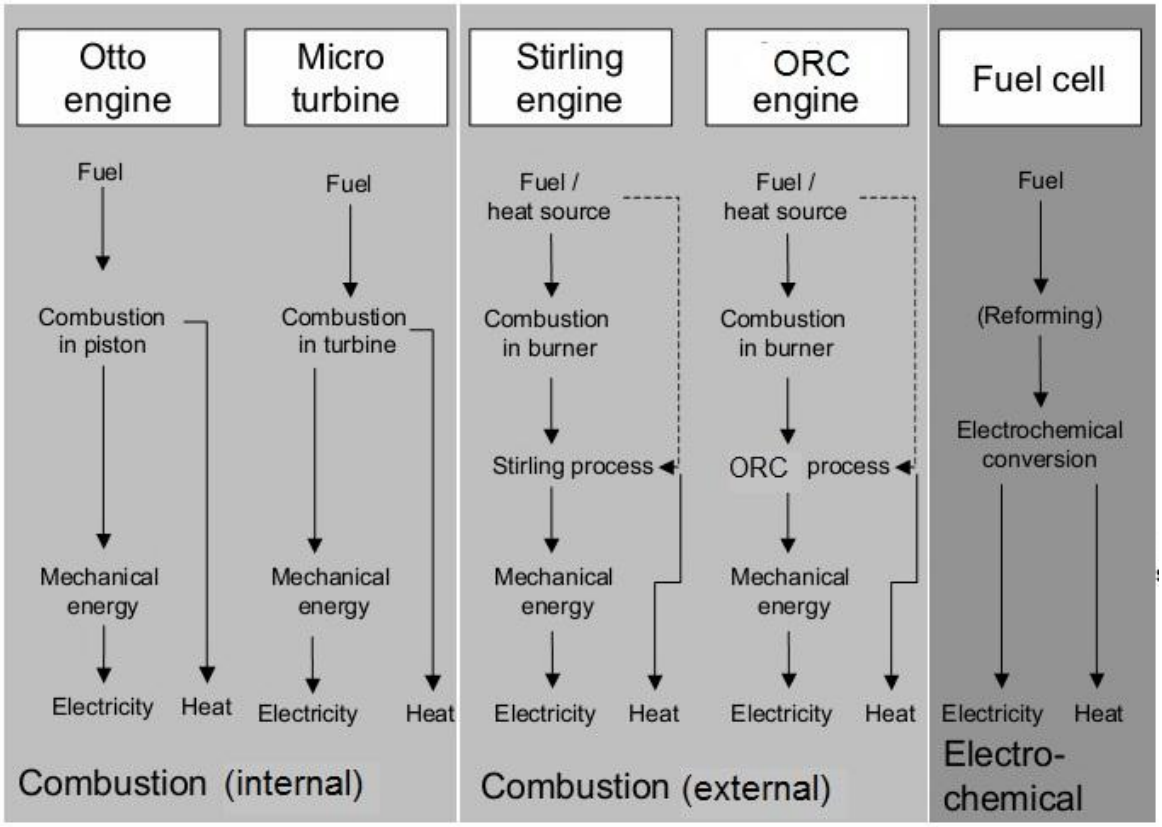
Σχήμα 5.8 Κυριότερες υποστηρικτικές πρωτοβουλίες για μ-ΣΗΘ (Morgado D. and Slowe, J, 2010)

5.3 Τεχνολογίες οικιακής μικρο-συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας

Σκοπός κάθε συστήματος συμπαραγωγής είναι η βέλτιστη μετατροπή της χημικής ενέργειας των καυσίμων σε ηλεκτρική και θερμική. Ως οι πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες ενεργειακής μετατροπής για συστήματα δυναμικότητας επιπέδου μ-ΣΗΘ αναφέρονται (Pehnt et al., 2006; Onovwiona and Ugursal, 2006; Delta, 2006) οι εξής:

- Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ) κύκλου Otto
- Μικροστρόβιλοι
- Κινητήρες κύκλου Stirling
- Κινητήρες κύκλου Rankine με οργανικό εργαζόμενο μέσο
- Συστοιχίες κυψελών καυσίμου

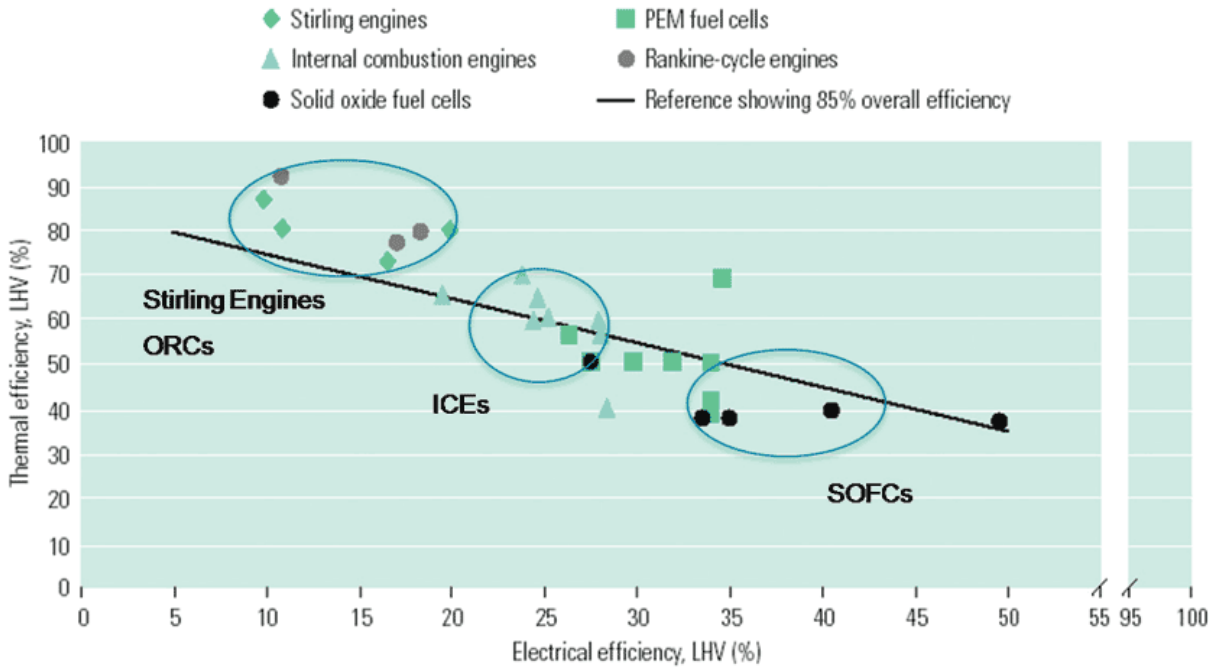
Η βασική διάκριση των τεχνολογιών αυτών αφορά τον τρόπο μετατροπής της ενέργειας των καυσίμων (Σχήμα 5.9), ο οποίος βασίζεται είτε σε καύση (εσωτερική ή εξωτερική) είτε σε ηλεκτροχημική μετατροπή.



Σχήμα 5.9 Κύριες τεχνολογίες συστημάτων μ-ΣΗΘ (Pehnt et al., 2006)

Με βάση την ηλεκτρική και θερμική αποδοτικότητα, οι τεχνολογίες μ-ΣΗΘ είναι δυνατό να ταξινομηθούν σε τρεις «ομάδες» (Σχήμα 5.10): οι τεχνολογίες εξωτερικής καύσης παράγουν

κατά κύριο λόγο θερμότητα, οι κυψέλες καυσίμου εμφανίζουν το μεγαλύτερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης, ενώ οι ΜΕΚ κατατάσσονται στο ενδιάμεσο.



Σχήμα 5.10 Ταξινόμηση τεχνολογιών μ-ΣΗΘ βάσει θερμικού και ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης. (Dijkstra, 2009)

Οι πίνακες 5.1 και 5.2 συνοψίζουν τα βασικά θετικά και αρνητικά στοιχεία των τεχνολογιών μ-ΣΗΘ, όπως επίσης παραθέτουν τους σημαντικότερους κατασκευαστές σε παγκόσμιο επίπεδο.

	Stirling Engine	ORC	ICE
Description	External combustion engine, using a heat source to expand a working fluid driving piston engine	External combustion engine, using a heat source to expand a working fluid through a turbine	Vehicle or long-life engines
Electrical efficiency	10%–20%	~10%	20%–30%
Pros	Generally quiet, Little maintenance required	Components already mass-produced, Potentially low cost	Mature technology, Relatively high efficiency
Cons	High cost (today), Heavy	High heat-to-power ratio	Period oil changes required, Can cause vibrations
Example products	Whispergen, Microgen Engine Corporation, ENATEC	Energetix Genlec	Honda ECOWILL

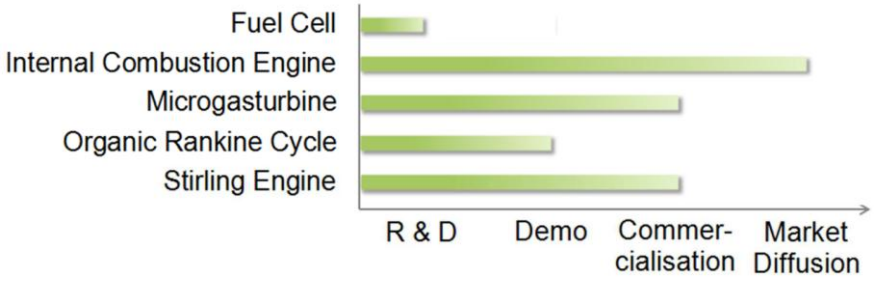
Πίνακας 5.1 Συνόψιση βασικών χαρακτηριστικών τεχνολογιών καύσης για μ-ΣΗΘ (Dijkstra, 2009)

	PEMFC	SOFC
Description	Chemical cells consisting of an anode and cathode separated by a proton-exchange membrane	Chemical cells consisting of an anode and cathode in a solid oxide medium
Electrical efficiency	30%–35%	30%–50%
Pros	Technology understood and proven in laboratory, Operates at lower temperature than SOFC Proven in the field in Japan	High electrical efficiency, High temperature allows for internal reforming
Cons	Uses (expensive) platinum catalyst, Needs complete reforming of natural gas	Lifetime still unproven, Degradation process not well understood
Main producers	Ebara-Ballard, Toshiba, Eneos Celltech, Panasonic, Baxi	Hexis, Topsoe, Ceres Power, Kyocera

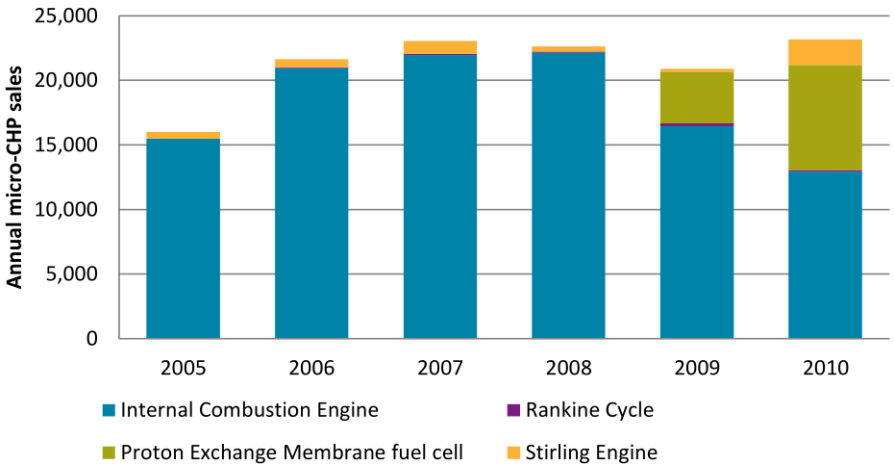
Πίνακας 5.2 Συνόψιση βασικών χαρακτηριστικών τεχνολογιών κυψέλης καυσίμου για μ-ΣΗΘ (Dijkstra, 2009)

Οι πέντε βασικές τεχνολογίες μ-ΣΗΘ βρίσκονται σε διαφορετικά επίπεδα ανάπτυξης και εμπορικής αξιοποίησης (Σχήμα 5.11), με τις ΜΕΚ να ενσωματώνονται ήδη σε εμπορικά συστήματα μ-ΣΗΘ, ενώ στον αντίποδα οι αντίστοιχες εφαρμογές κυψελών καυσίμου να χαρακτηρίζονται ως πιλοτικές.

Το επίπεδο εξέλιξης των τεχνολογιών μ-ΣΗΘ αντικατοπτρίζεται και στο Σχήμα 5.12, όπου καταγράφονται οι πωλήσεις αντίστοιχων συστημάτων παγκοσμίως. Τα εγκαταστημένα συστήματα αφορούν κατά κύριο λόγο μικρές ΜΕΚ, με κύριους εκπροσώπους στην Ευρώπη το μοντέλο Dachs της BDR Thermea (πρώην Senertec) και στην Ιαπωνία το Ecowill της Honda (Bradley, 2011). Οι πωλήσεις που καταγράφουν τα συστήματα PEM κατά τα έτη 2009 και 2010 οφείλονται σε συντονισμένη προσπάθεια προώθησης της μονάδας ENEFARM στην Ιαπωνία.



Σχήμα 5.11 Επίπεδο ανάπτυξης βασικών τεχνολογιών μ-ΣΗΘ (Lenz and Buechner, 2011)



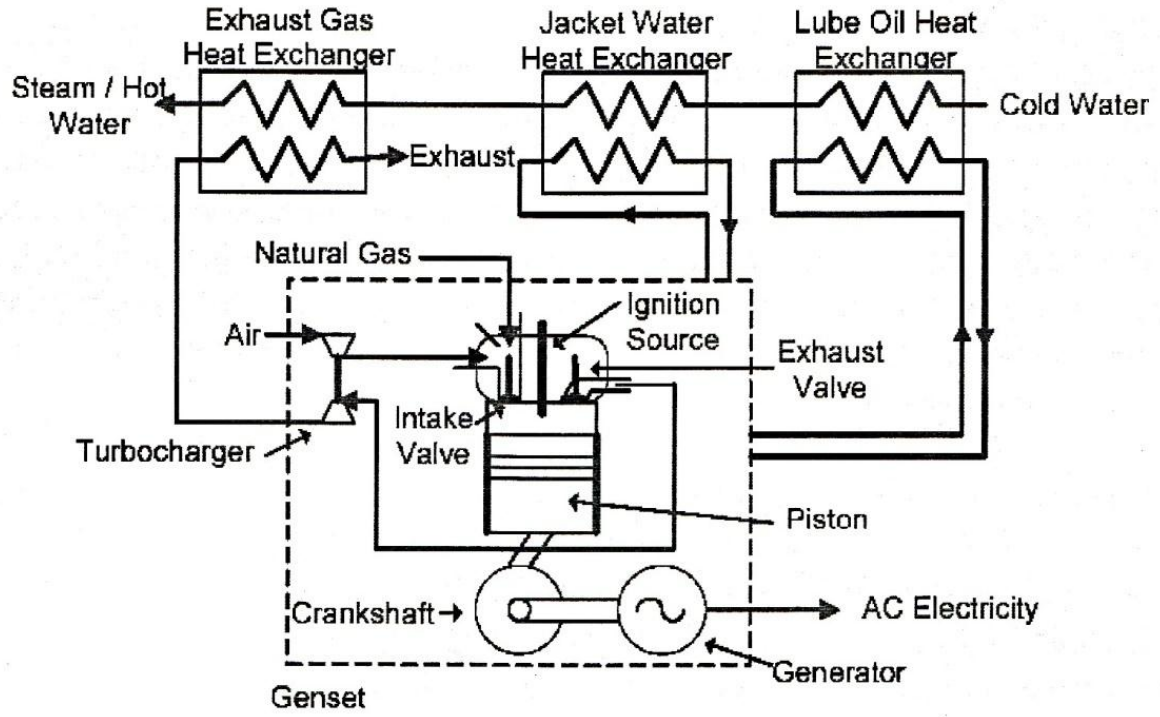
Σχήμα 5.12 Ετήσιες πωλήσεις εμπορικών συστημάτων μ-ΣΗΘ ανά τεχνολογία (Dwyer and Slowe, 2011)

Στις ακόλουθες παραγράφους αναλύονται τα κυριότερα τεχνικά, περιβαλλοντικά και οικονομικά χαρακτηριστικά των πέντε επικρατέστερων τεχνολογιών μ-ΣΗΘ.

5.3.1 Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ)

Οι παλινδρομικές μηχανές εσωτερικής καύσης αποτελούν την πλέον διαδεδομένη τεχνολογία (Σχήμα 5.12) για εφαρμογές συμπαραγωγής μικρής κλίμακας λόγω της εύρωστης και

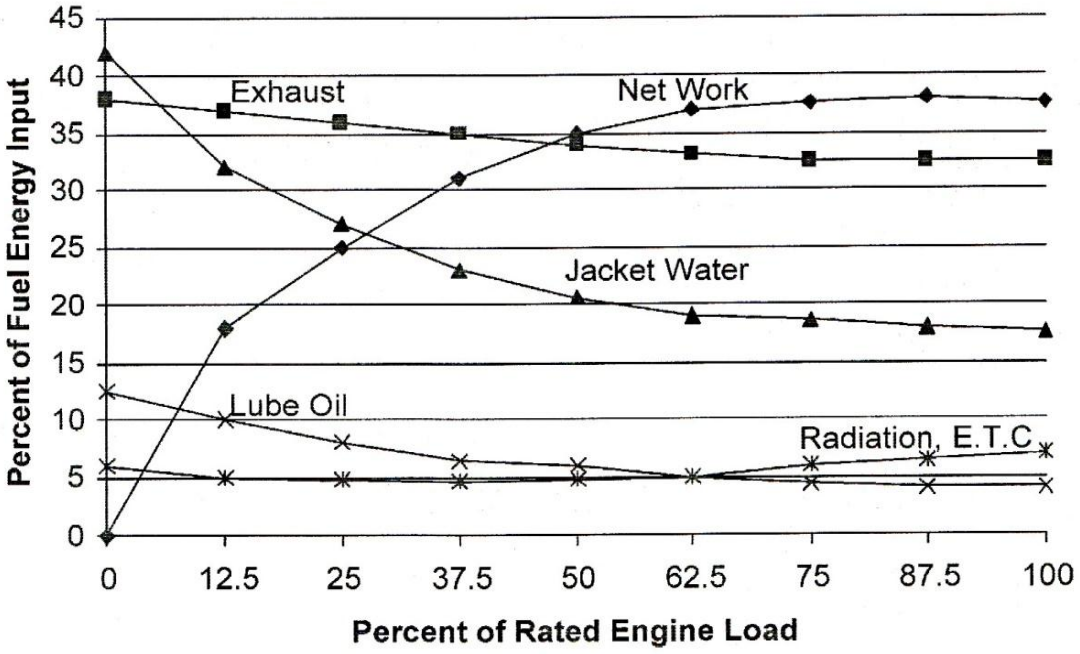
δοκιμασμένης τεχνολογίας τους. Καλύπτουν ισχύες από μερικά kW μέχρι και άνω των 10 MW, κάτι που τις καθιστά κατάλληλες για ένα μεγάλο αριθμό εφαρμογών σε οικιακά, εμπορικά και μικρής κλίμακας βιομηχανικά φορτία. Τα βασικά υποσυστήματα ενός συστήματος μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ είναι ο κινητήρας, η ηλεκτρογεννήτρια, το σύστημα ανάκτησης θερμότητας, το σύστημα απόρριψης των καυσαερίων, το σύστημα ελέγχου και ακουστικής μόνωσης (Σχήμα 5.13). Η αποκομιδή της θερμότητας επιτυγχάνεται μέσω εναλλακτών από: (α) τα θερμά καυσαέρια, (β) το νερό ψύξης, (γ) το λιπαντικό μέσο (σε μικρότερα ποσοστά ανάκτησης) και (δ) το σύστημα υπερπλήρωσης (εάν υπάρχει).



Σχήμα 5.13 Τυπική δομή ενός συστήματος συμπαραγωγής με μια μηχανή εσωτερικής καύσης.

Στο θερμικό ισοζύγιο του σχήματος 5.14 διακρίνεται οτι η δυνατότητα θερμικής παραγωγής αφενός ενισχύεται (σε σχετικούς όρους) στα μερικά φορτία και αφετέρου προέρχεται κατά κύριο λόγο από τον εναλλάκτη καυσαερίων και του νερού ψύξης.

Η ανακτώμενη θερμότητα του νερού ψύξης για χρήση ζεστού νερού φτάνει τους 85-90°C, ενώ η θερμότητα που προέρχεται από την απαγωγή των καυσαερίων για χρήση ζεστού νερού ή χαμηλής πίεσης ατμού φτάνει τους 100 με 120°C (Onovwiona and Ugursal, 2006). Η θερμότητα αυτή χρησιμοποιείται για παραγωγή ζεστού νερού χρήσης ή/και για θέρμανση των εσωτερικών χώρων. Η παραγωγή ψύξης είναι μεν θεωρητικά εφικτή μέσω συνδυασμού με κύκλο απορρόφησης, αλλά η σχετικά χαμηλή ενθαλπία των καυσαερίων δεν αποτελεί ευνοϊκό παράγοντα.



Σχήμα 5.14 Θερμικό ισοζύγιο μιας τυπικής παλινδρομικής μηχανής εσωτερικής καύσης (Onovwiona and Ugursal, 2006)

5.3.1.1 Λειτουργικά Χαρακτηριστικά

Οι μηχανές εσωτερικής καύσης έχουν ηλεκτρικές αποδόσεις που κυμαίνονται μεταξύ 25 και 45% (Onovwiona and Ugursal, 2006), ωστόσο τα συστήματα μικρών ισχύων που αφορούν εφαρμογές οικιακής μ-ΣΗΘ δεν ξεπερνούν το 30% (πίνακας 5.3). Με τη σωστή συντήρηση ένας εμβολοφόρος κινητήρας σε ένα σύστημα συμπαραγωγής λειτουργεί σε υψηλά επίπεδα διαθεσιμότητας. Τα αποτελέσματα σχετικού προγράμματος επίδειξης (Major, 1995) έδειξε ότι η διαθεσιμότητα είναι της τάξης του 87-98%, σε συμφωνία με αντίστοιχες προδιαγραφές κατασκευαστών.

5.3.1.2 Εκπομπές ρύπων

Οι βασικοί ρυπαντές των παλινδρομικών μηχανών εσωτερικής καύσης είναι τα οξείδια του αζώτου (NO_X), το μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και πτητικές οργανικές ουσίες (VOCs). Άλλοι ρυπαντές όπως τα οξείδια του θείου (SO_X) πρωτίστως εξαρτώνται από τον τύπο του καυσίμου και της μηχανής που χρησιμοποιείται.

Οι εκπομπές NO_X παράγονται κατά την καύση ορυκτών καυσίμων υπό την παρουσία οξυγόνου. Η παραγωγή τους εξαρτάται από τις συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης, από τη γεωμετρία του θαλάμου καύσης και από τον τύπο του μίγματος αέρος-καυσίμου της μηχανής. Στις περισσότερες των περιπτώσεων αφορούν μίγμα NO και NO_2 σε ευμετάβλητη αναλογία. Οι κινητήρες φυσικού αερίου εκπέμπουν χαμηλότερα επίπεδα NO_x έναντι της

χρήσης diesel σε αντίστοιχες ισχύες (πίνακας 5.4) (Onovwiona and Ugursal, 2006). Είναι επίσης προφανής η αντίστοιχη μείωση σε περίπτωση εγκατάστασης καταλυτικού μετατροπέα.

Λειτουργικά χαρακτηριστικά μονάδων μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ		
Ηλεκτρική απόδοση (kW)	1 – 50	50 – 100
Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης (%)	21,3 – 30,5	26,4 – 30,6
Συνολικός (συμπαραγωγικός) βαθμός απόδοσης (%) (Βάσει Ανώτερης Θερμογόνου Ικανότητας)	85 – 90	78 – 83,1
Ταχύτητα περιστροφής (rpm)	3600	1500 - 1825
Θερμική απόδοση (kW)	3 – 12,5	87,9 - 129
Ισχύς καυσίμου (kW)	4,7 – 20	183,3 – 277,8

Πίνακας 5.3 Λειτουργικά χαρακτηριστικά μονάδων μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ (Onovwiona and Ugursal, 2006)

Στοιχεία εκπομπών αερίων ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ				
Ηλεκτρική απόδοση (kW)	1 – 50		50 – 100	
Τύπος κινητήρα / καυσίμου	Diesel/Diesel	SI/NG	Diesel/Diesel	SI/NG
Σύστημα ελέγχου εκπομπών	Όχι	Όχι	Όχι	Καταλυτικός μετατροπέας
Λόγος συμπίεσης CR	17,3 - 18,5:1	9,4:1	16,5:1	-
NOx (g/bhph)	12,6	7,0-7,8	8,0	<0,15[a]
CO (g/bhph)	1,2 -3,1	36,8 – 38,6	0,8	<0,60[a]
Άκαυστοι Υδρ/κες (g/bhph)	0,5-1,64	1,2-1,3	0,4	<0,15[a]
SO_2 (g/bhph)	0,62	-	0,6	-
Σωματίδια (g/bhph)	0,66	-	0,13	-

Πίνακας 5.4 Στοιχεία εκπομπών αερίων ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ (Onovwiona and Ugursal, 2006) *SI/NG: Spark ignition/Natural Gas, CR: Compression Ratio. [a]Διόρθωση εκπομπών για 15% O_2.

Οι εκπομπές SO_2 προέρχονται από την καύση ορυκτών καυσίμων που περιέχουν θείο. Έχουν διαβρωτικές συνέπειες για τις μονάδες συμπαραγωγής, ειδικότερα για τους εναλλάκτες θερμότητας και το σύστημα απαγωγής των καυσαερίων. Ωστόσο οι μηχανές εσωτερικής καύσης που λειτουργούν με φυσικό αέριο παράγουν αμελητέες ποσότητες SO_x.

Το CO που προέρχεται από ατελή καύση είναι δηλητηριώδες αέριο, αλλά οι εκπομπές του είναι αμελητέες όταν ο λόγος αέρα/καυσίμου ελέγχεται ικανοποιητικά (Onovwiona and Ugursal, 2006).

Οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες προέρχονται από ατελή οξείδωση, κατά τη διάρκεια της καύσης, από μακριές αλυσίδες υδρογονανθράκων. Η χρήση οξειδωτικών καταλυτών μπορεί να μειώσει τις εκπομπές CO και των άκαυστων υδρογονανθράκων. Οι καταλύτες επιδιώκουν την οξείδωση σε CO2 και νερό υπό την περίσσεια οξυγόνου. Η μετατροπή αυτή είναι εφικτή σε ποσοστό 98-99%. Οι καταλύτες οξείδωσης χρησιμοποιούνται σε όλους τους τύπους μηχανών και περισσότερο σε μηχανές Otto με καύσιμο φυσικό αέριο (Onovwiona and Ugursal, 2006).

5.3.1.3 Κόστος εγκατάστασης και συντήρησης

Τα βασικά κόστη εξαρτώνται από τη συνολική ισχύ της μηχανής του συμπαραγωγικού συστήματος. Στον πίνακα 5.5 απεικονίζονται ενδεικτικά τα εκτιμώμενα κόστη εγκατάστασης εμπορικών συστημάτων μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ διαφόρων ισχύων. Τα κόστη συντήρησης διαφέρουν ανάλογα με τον τύπο, την ταχύτητα περιστροφής, το μέγεθος και τον αριθμό των κυλίνδρων της μηχανής. Τα κόστη αυτά περιλαμβάνουν την εργασία, τα υλικά και τα εξαρτήματα (π.χ. φίλτρο λαδιού, φίλτρο καθαρισμού αέρα, μπουζί, στεγανοποιητικό παρέμβυσμα, βαλβίδα, δακτύλιο εμβόλου και αλλαγή λαδιού). Οι μικρότερες μηχανές μπορούν να έχουν συνεχή λειτουργία για 15.000-20.000 ώρες μέχρι να υποβληθούν σε γενική συντήρηση.

Το κόστος συντήρησης για μια μηχανή εσωτερικής καύσης με εγκατεστημένη ισχύ 5.5 kW της Senertec εκτιμάται στα 0.014 $/kWh, με ένα μέσο διάστημα συντήρησης στις 3.500 ώρες (Major, 1995). Το κόστος αυτό είναι ενδεικτικό για μηχανές εσωτερικής καύσης συστημάτων συμπαραγωγής μικρής κλίμακας (Onovwiona and Ugursal, 2006).

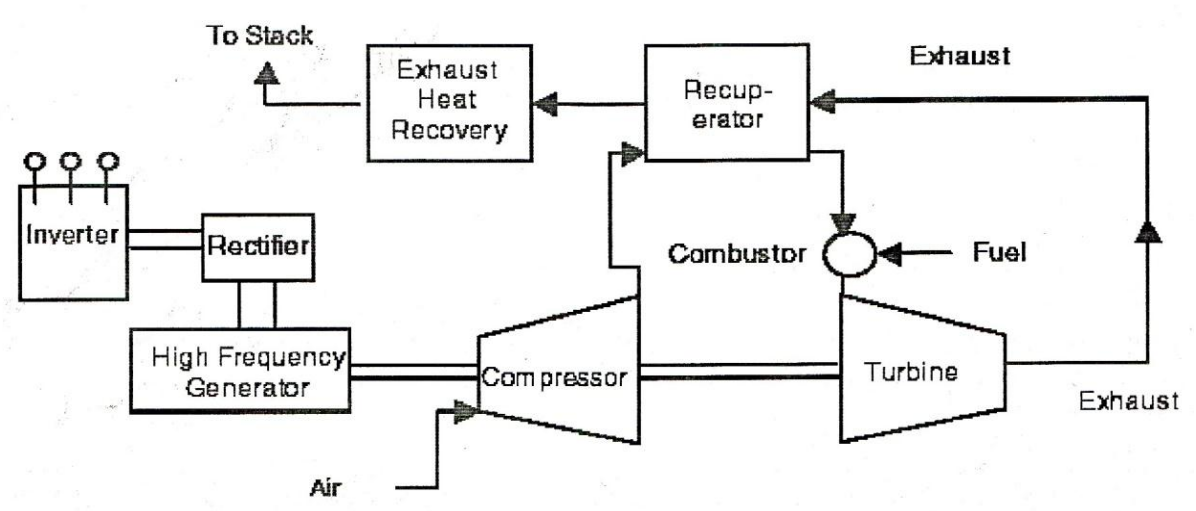
Εκτιμώμενα κόστη συστημάτων μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ		
Ηλεκτρική απόδοση (kW)	1 – 50	50 – 100
Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης (%)	27,5 – 37,4	30,6
Βαθμός θερμικής απόδοσης (%)	50,0 – 62,5	50,4
Κόστος εγκατάστασης ($/kW)	1300 – 2800	1080

Πίνακας 5.5 Εκτιμώμενα κόστη ($/kW) μηχανών εσωτερικής καύσης. (Onovwiona and Ugursal, 2006).

5.3.2 Μικροστρόβιλοι

Τα συστήματα μικροστροβίλων αποτελούν εν γένει σμικρυμένες (scaled down) εκδόσεις βιομηχανικών αεριοστρόβιλων. Οι αντίστοιχες δυναμικότητες σε ισχύ κυμαίνονται από 25 έως και 80 kW, κατάλληλες για κάλυψη θερμικών και ηλεκτρικών απαιτήσεων π.χ. ενός συγκροτήματος κατοικιών. Συστήματα με εγκατεστημένη ισχύ κάτω των 25 kW ("pico-turbines" ισχύος 1-10 kW) αποτελούν σε παρούσα φάση αντικείμενο έρευνας (Pilavachi, 2002). Τα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις μηχανές εσωτερικής καύσης επικεντρώνονται στο μικρότερο μέγεθος, το χαμηλό βάρος και τον περιορισμένο θόρυβο/κραδασμούς. Επιπλέον η απορριπτόμενη θερμότητα είναι υψηλότερης ενθαλπίας και εμφανίζουν μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης (αλλά απαιτούν εξειδικευμένο προσωπικό). Ωστόσο, ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης είναι σαφώς μικρότερος από μια αντίστοιχη ΜΕΚ, ενώ μειώνεται περαιτέρω στα συστήματα χαμηλότερων ισχύων (Pilavachi, 2002).

Τα βασικά υποσυστήματα ενός συστήματος μικροστροβίλου αποτελούν ο συμπιεστής, ο στρόβιλος, η ηλεκτρογεννήτρια και ο προθερμαντής του αέρα καύσης (recuperator) (Σχήμα 5.15).



Σχήμα 5.15 Σχηματική αναπαράσταση ενός ολοκληρωμένου συστήματος συμπαραγωγής με μικροστρόβιλο. (Onovwiona and Ugursal, 2006)

Η μοναδική πηγή ανάκτησης θερμότητας από ένα σύστημα συμπαραγωγής μικροστροβίλου είναι το ρεύμα των καυσαερίων. Ως τυπικά χαρακτηριστικά της ανακτώμενης θερμότητας από ένα αντίστοιχο σύστημα ισχύος 80 kW αναφέρονται (Onovwiona and Ugursal, 2006) η παραγωγή ζεστού νερού σε θερμοκρασία 70-90°C και πίεση 350kPa. Η προοπτική της διασύνδεσης με ψύκτη απορρόφησης ευνοείται από την υψηλή ενθαλπία των καυσαερίων. Η προθέρμανση του αέρα καύσης (σχήμα 5.15) αυξάνει την ηλεκτρική απόδοση του συστήματος, μειώνοντας παράλληλα τη διαθέσιμη προς ανάκτηση θερμότητα των καυσαερίων.

5.3.2.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Τα συστήματα μ-ΣΗΘ με μικροστρόβιλο εμφανίζουν ηλεκτρική απόδοση της τάξης του 25-27%, με δυνατότητα τροφοδοσίας διαφόρων ειδών καυσίμου (φυσικό αέριο, diesel, βιοαέριο, αιθανόλη κ.α.). Ο συνολικός συμπαραγωγικός βαθμός απόδοσης κυμαίνεται γύρω από το 80% (Onovwiona and Ugursal, 2006). Στοιχεία σχετικά με την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα των συστημάτων μ-ΣΗΘ με μικροστρόβιλους δεν διατίθενται στην βιβλιογραφία λόγω των περιορισμένων εφαρμογών (Onovwiona and Ugursal, 2006). Αν υποτεθεί αντιστοιχία με μεγαλύτερα συστήματα στροβιλοσυμπιεστών, η διαθεσιμότητα φτάνει το 90-95%.

Τα λειτουργικά χαρακτηριστικά τριών συστημάτων μ-ΣΗΘ συνοψίζονται στον πίνακα 5.6. Η ηλεκτρική αποδοτικότητα βελτιώνεται με αύξηση της μέγιστης πίεσης και θερμοκρασίας του κύκλου και με την παράλληλη επιλογή υλικών κατάλληλων για το σκοπό αυτό. Ωστόσο, οι υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να οδηγήσουν σε υψηλά επίπεδα εκπομπών NO_x, παράμετρος που πρέπει να ληφθεί υπόψη στο γενικό σχεδιασμό (Pilavachi, 2002).

Διαπιστώνεται ωστόσο οτι ο ηλεκτρικός καθώς και ο συνολικός βαθμός απόδοσης του συστήματος συμπαραγωγής από μικρο-στροβίλους είναι αισθητά μειωμένος σε σχέση με άλλα συστήματα που λειτουργούν με μηχανές εσωτερικής καύσης ή κυψέλες καυσίμου. Οι ταχύτητες περιστροφής αγγίζουν τις 80.000-120.000 σ.α.λ.. Εγκαταστάσεις σχετικά μικρής δυναμικότητας παρουσιάζουν γενικά μεγαλύτερες ταχύτητες περιστροφής (Onovwiona and Ugursal, 2006).

Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστημάτων μ-ΣΗΘ με μικροστρόβιλο		
Ηλεκτρική απόδοση (kW)	30	50 – 100
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (HHV) (%)	23,4	25,5 – 27,0
Ισχύς καυσίμου (MMBtu/h)	0,437	0,948 – 1,264
Απαιτούμενη πίεση αερίου καυσίμου (psig)	55	55 – 75
Παροχή καυσαερίων (lbs/s)	0,72	1,4 - 1,74
Θερμοκρασία καυσερίων (F)	500	435 – 500
Θερμοκρασία εξόδου εναλλάκτη (F)	150	130
Συνολικός βαθμός απόδοσης (HHV) (%)	73	64 – 71
Λόγος ηλεκτρισμού – θερμότητας	0,47	0,62 – 0,65

Πίνακας 5.6 Λειτουργικά χαρακτηριστικά μικροστρόβιλων. (Onovwiona and Ugursal, 2006)

Η αποδοτικότητα του συστήματος σε μερικό φορτίο ελαττώνεται με τη μείωση της ταχύτητας περιστροφής του συμπιεστή (μείωση του ρυθμού ροής του αέρα) και τη μείωση της θερμοκρασίας εισόδου στον στρόβιλο. Η απόδοση σε μερικά φορτία για αντίστοιχο σύστημα ισχύος 30 kW μειώνεται κατά περίπου 18% σε μερικό φορτίο 50% και κατά 35% σε φορτίο 20% (Onovwiona and Ugursal, 2006).

5.2.2.2 Εκπομπές ρύπων

Οι κυριότεροι ρυπαντές των συστημάτων μικροστρόβιλου είναι τα NO_x, το CO και οι άκαυστοι υδρογονάνθρακες. Τα ποσοστά του SO_2 είναι αμελητέα λόγω καυσίμου. Τα χαρακτηριστικά των εκπομπών για τα τρία συστήματα του πίνακα 5.6 καταγράφονται στον πίνακα 5.7 σύμφωνα με τις προδιαγραφές των κατασκευαστών.

Στοιχεία εκπομπών αερίων ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με μικροστρόβιλο		
Ηλεκτρική απόδοση (kW)	30	50 – 100
Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης (HHV) (%)	23,4	25,5 – 27,0
NOx (lb/MWh)	0,54	0,5 – 0,8
CO (lb/MWh)	1,46	0,3 – 0,46
CO_2 (lb/MWh)	1928	1706 - 1774

Πίνακας 5.7 Στοιχεία εκπομπών αερίων ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με μικροστρόβιλους. (Onovwiona and Ugursal, 2006)

5.3.2.3 Κόστος εγκατάστασης και συντήρησης

Τα κόστη εγκατάστασης παρουσιάζονται αναλυτικά στον πίνακα 5.8 για τρεις αντιπροσωπευτικές μονάδες συμπαραγωγής. Λόγω του ελάχιστου αριθμού των κινητών

εξαρτημάτων τα συστήματα μικροστροβίλου είναι σε θέση να εμφανίζουν μειωμένα κόστη συντήρησης σε σχέση με τις ΜΕΚ. Επίσης, αν χρησιμοποιείται έδραση σε στρώμα αέρα (air bearings) σε μηχανές με μονό άξονα, δεν χρειάζεται κάποιο λιπαντικό μέσο, με αποτέλεσμα περαιτέρω μείωση των αναγκών συντήρησης. Φυσιολογικά, προληπτική συντήρηση πραγματοποιείται μια φορά το χρόνο ενώ τα κόστη συντήρησης φτάνουν τα 0.006-0.01 $/kWh (Onsite Sycom Energy, 2000). Λεπτομερής επιθεώρηση κρίνεται αναγκαία κάθε 20.000-40.000 ώρες (Onovwiona and Ugursal, 2006) και περιλαμβάνει την αντικατάσταση του κεντρικού άξονα και αν κριθεί απαραίτητη, την αντικατάσταση του θαλάμου καύσης.

Εκτιμώμενα κόστη συστημάτων μ-ΣΗΘ με μικροστρόβιλο		
Ηλεκτρική απόδοση (kW)	30	50 – 100
Κόστος εξοπλισμού ($/kW)	1400	900 – 1200
Κόστος εργατικών-υλικών ($/kW)	900	600 – 800
Σύνολο ($/kW)	2500	1500 – 2000

Πίνακας 5.8 Εκτιμώμενα κόστη εγκατάστασης και συντήρησης. Πηγή: (Onovwiona and Ugursal, 2006)

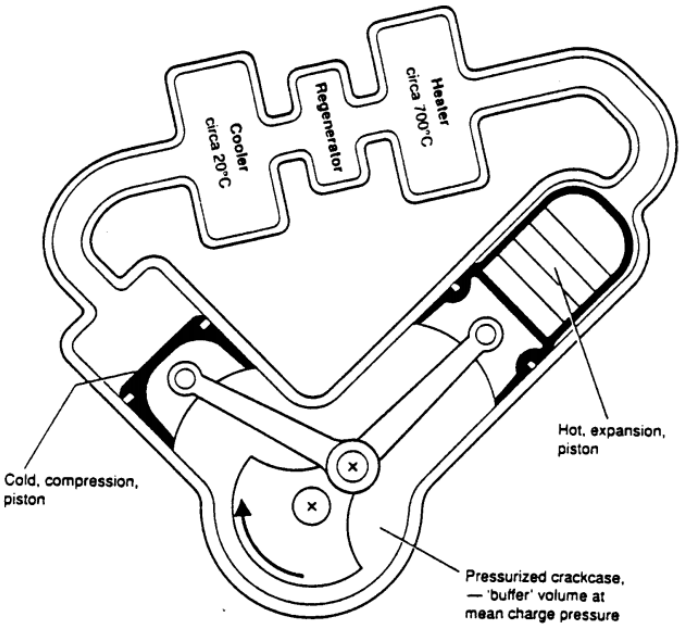
5.3.3 Κινητήρες Stirling

Η τεχνολογία των μηχανών Stirling σε εφαρμογές μ-ΣΗΘ βρίσκεται μεν στο στάδιο των πρώτων εμπορικών συστημάτων, ωστόσο παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα όπως υψηλή συνολική απόδοση, ευελιξία επιλογής καυσίμου, χαμηλές εκπομπές ρύπων, χαμηλή στάθμη θορύβου και κραδασμών αλλά και καλή συμπεριφορά σε συνθήκες μερικού φορτίου (Frangopoulos, 2001). Αντίθετα με τις ΜΕΚ, η θερμότητα προέρχεται από εξωτερικές πηγές, επιτρέποντας τη χρήση ενός μεγάλου φάσματος ενεργειακών πηγών όπως είναι τα φυσικά καύσιμα (πετρέλαιο, φυσικό αέριο) και οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (ηλιακή ενέργεια, βιομάζα). Επειδή η καύση είναι εξωτερική και ο κύκλος λειτουργίας τους κλειστός, τα κινούμενα μέρη του κινητήρα δεν εκτίθενται στα προϊόντα της καύσης, με αποτέλεσμα να είναι περιορισμένες οι φθορές και να μειώνονται οι ανάγκες τακτικής συντήρησης (Frangopoulos, 2001). Απαιτούνται, όμως, πολύ αποτελεσματικές και δύσκολα επιτεύξιμες στεγανωτικές διατάξεις για την αποφυγή διαρροών, τόσο του αερίου υψηλής πίεσης προς το εξωτερικό του κυλίνδρου, όσο και του λιπαντικού προς το εσωτερικό του κυλίνδρου. Έτσι, η κατασκευή αποτελεσματικών διατάξεων στεγανοποίησης με ικανοποιητική διάρκεια ζωής είναι ένα από τα σημαντικότερα προβλήματα που πρέπει να αντιμετωπισθούν.

5.3.3.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Η λειτουργία του κινητήρα Stirling βασίζεται στη διαδοχική συμπίεση και εκτόνωση εργαζόμενου μέσου (π.χ. υδρογόνο, ήλιο, κ.α.) σε διάταξη κυλίνδρου δύο εμβόλων, με αποτέλεσμα την περιστροφή στροφαλοφόρου άξονα (Σχήμα 5.16).

Το εργαζόμενο αέριο θερμαίνεται σε εναλλάκτη θερμότητας χωρίς να συμμετέχει στην καύση. Ο κύκλος Stirling έχει το πλεονέκτημα της επίτευξης υψηλότερων θεωρητικών αποδόσεων σε σχέση με αυτές των κύκλων Rankine και Joule, καθώς προσομοιάζει αρκετά με τον κύκλο Carnot (Urieli, 1984).



Σχήμα 5.16 Διάταξη μηχανής Stirling. (Frangopoulos, 2001)

Ωστόσο, σε επίπεδο συστημάτων μ-ΣΗΘ ο ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης περιορίζεται από 15-20% (για δυναμικότητα κάτω των 10kW) έως 30% (άνω των 20 kW) (Onovwiona and Ugursal, 2006). Ο συνολικός βαθμός απόδοσης ενός συστήματος συμπαραγωγής από μια μηχανή Stirling κυμαίνεται μεταξύ 65-85% με ένα λόγο ηλεκτρισμού/θερμότητας μεταξύ 1.2 και 1.7. Παρατηρείται καλή συμπεριφορά σε συνθήκες μερικού φορτίου, καθώς η σχετική μείωση του βαθμού απόδοσης είναι της τάξης του 10-20% στο μισό φορτίο (Frangopoulos, 2001). Όσον αφορά την διαθεσιμότητα και την αξιοπιστία των συστημάτων Stirling, θεωρείται ότι είναι συγκρίσιμες με τις αντίστοιχες των ΜΕΚ, με μια μέση ετήσια διαθεσιμότητα της τάξεως του 85-90% (Frangopoulos, 2001).

Κατ' αντιστοιχία με τις ΜΕΚ, οι πηγές της ανακτώμενης θερμότητας εντοπίζονται στο σύστημα ψύξης, στον εναλλάκτη θερμότητας των καυσαερίων και σε μικρότερο βαθμό στο λιπαντικό μέσο και στα τοιχώματα του κυλίνδρου (Onovwiona and Ugursal, 2006).

5.3.3.2 Εκπομπές ρύπων

Οι εκπομπές ενός συστήματος ΣΗΘ με κινητήρα Stirling εξαρτώνται από τον τρόπο παραγωγής της θερμότητας. Ο πίνακας 5.9 (Onovwiona and Ugursal, 2006) περιέχει στοιχεία που προέρχονται από κατασκευαστές συστημάτων Stirling, τα οποία παρουσιάζουν παρόμοιες εκπομπές με μηχανές ΜΕΚ που ενσωματώνουν καταλυτικό μετατροπέα.

5.3.3.3 Κόστος εγκατάστασης και συντήρησης

Οι κινητήρες Stirling βασίζονται σε μια αναπτυσσόμενη τεχνολογία με περιορισμένο, προς το παρόν, αριθμό εφαρμογών. Ένας από τους κύριους κατασκευαστές συστημάτων (SOLO) οριοθετούσε στις αρχές της δεκαετίας το κόστος επένδυσης ενός συστήματος δυναμικότητας 2-9 kWel (ανάλογα με την πίεση του εργαζόμενου μέσου) στα 13000$, από τα οποία τα 10400$ αφορούν το κόστος του κινητήρα και τα υπόλοιπα για περιφερειακά υποσυστήματα

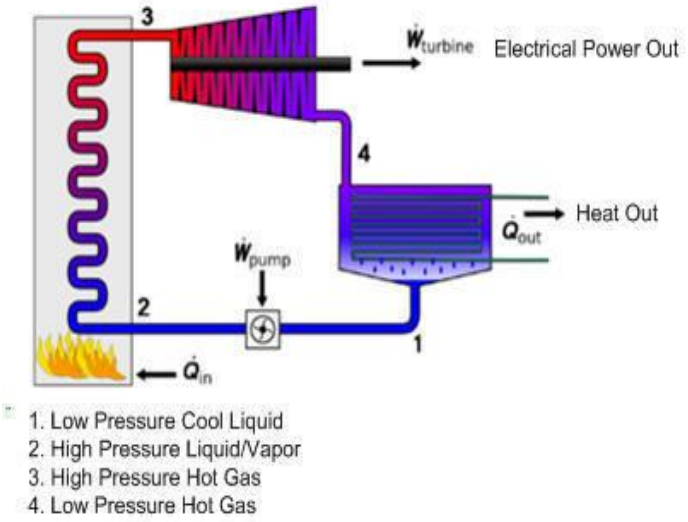
και διασύνδεση. Επιπρόσθετα, το κόστος συντήρησης της μονάδας εκτιμάται στα 0.013 $/ kWh (Onovwiona and Ugursal, 2006). Γενικά, το κόστος επένδυσης σε μια τέτοια τεχνολογία είναι περίπου διπλάσιο από μια μονάδα μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ αλλά το κόστος συντήρησης αναμένεται χαμηλότερο, καθώς απαιτούνται λιγότερα κινητά μέρη. Ειδικά, αν επιτευχθεί μαζική παραγωγή, το κόστος συντήρησης προβλέπεται να μειωθεί στα επίπεδα των 0.006 €/kWh (Onovwiona and Ugursal, 2006).

Στοιχεία αποδοτικότητας και εκπομπών ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με κινητήρες Stirling		
Ηλεκτρική απόδοση (kW)	1 – 10	10 – 30
Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης (%)	22 – 24	29,6
Συνολικός (συμπαραγωγικός) βαθμός απόδοσης (%)	>90	82
NOx (g/bhph)	0,08 – 0,12	0,15 – 0,32
CO (g/bhph)	0,04 – 0,06	0,32

Πίνακας 5.9 Στοιχεία αποδοτικότητας και εκπομπών αερίων ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με κινητήρες Stirling (Onovwiona and Ugursal, 2006)

5.3.4 Κινητήρες κύκλου Rankine με οργανικό εργαζόμενο μέσο (Organic Rankine Cycle - ORC)

Οι κινητήρες οργανικού κύκλου Rankine ORC βασίζονται σε παραλλαγή του πιο κοινού θερμοδυναμικού κύκλου για ηλεκτροπαραγωγή (Rankine), χρησιμοποιώντας ως εργαζόμενο μέσο αντί για νερό/ατμό, κατάλληλα επιλεγμένο οργανικό υγρό (ψυκτικά υγρά, κυκλοεξάνιο, κ.α.) (Saleh et al., 2007). Το κίνητρο της εφαρμογής εναλλακτικού εργαζόμενου μέσου είναι η δυνατότητα ηλεκτροπαραγωγής από θερμότητα μέτριας/χαμηλής ενθαλπίας, αξιοποιώντας πηγές όπως βιομάζα, γεωθερμία, ηλιακή ενέργεια και απορριπτόμενη θερμότητα (Schuster et al., 2009).



Σχήμα 5.17 Βασική αρχή λειτουργίας συστήματος ORC (http://www.transpacenergy.com)

Η βασική αρχή λειτουργίας απεικονίζεται στο σχήμα 5.17. Το εργαζόμενο μέσο ατμοποιείται, υπερθερμαίνεται, εκτονώνεται σε στρόβιλο (τύπου scroll για εφαρμογές μ-ΣΗΘ), υγροποιείται αποδίδοντας θερμότητα και επανακυκλοφορεί προς ατμοποίηση και υπερθέρμανση.

Ως πλεονεκτήματα των συστημάτων ORC καταγράφονται τα αξιόπιστα υποσυστήματα χαμηλού κόστους, η δυνατότητα άμεσης ανάπτυξης εμπορικών συστημάτων και τα χαμηλά

επίπεδα εκπομπών ρύπων και θορύβου (Delta, 2006). Ωστόσο, παρατηρούνται χαμηλοί βαθμοί ηλεκτρικής απόδοσης, κάτι που περιορίζει τις πιθανές εφαρμογές και καθιστά αναγκαία την αξιοποίηση του συνόλου της εκλυόμενης θερμότητας. Τα παραπάνω γενικά χαρακτηριστικά των συστημάτων ORC αναδεικνύουν την αντιστοιχία με τα συστήματα Stirling.

5.3.4.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Η αποδοτικότητα των συστημάτων ORC σε εφαρμογές μ-ΣΗΘ δεν έχει τεκμηριωθεί λόγω του πιλοτικού σταδίου ανάπτυξης των υπαρχόντων συστημάτων. Οι σχετικές εκτιμήσεις (Delta, 2006) αναφέρουν παραπλήσιες αποδοτικότητες με τη μηχανή Stirling, με το βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης να εκτιμάται στο 12-15% και τον αντίστοιχο συμπαραγωγικό μέχρι 90%.

5.3.4.2 Εκπομπές ρύπων

Κατά αντιστοιχία με τους κινητήρες Stirling, οι εκπομπές ρύπων των μηχανών ORC εξαρτώνται από τον τρόπο παραγωγής της κινητηρίου θερμότητας και αναμένεται να κυμαίνονται σε αντίστοιχα επίπεδα.

5.3.4.3 Κόστος εγκατάστασης και συντήρησης

Τα δομικά μέρη του συστήματος ORC αποτελούν εμπορικά προϊόντα, καθώς απαντώνται και σε τυπικές απλές ψυκτικές εγκαταστάσεις. Κατά συνέπεια, δεν αναμένονται ιδιαίτερα υψηλά κόστη εγκατάστασης και συντήρησης. Ενδεικτικά, αναφέρονται οι εκτιμήσεις για 1200-2200 €/kW και 0,5-2,0 c€/kWh, αντίστοιχα (Delta, 2006).

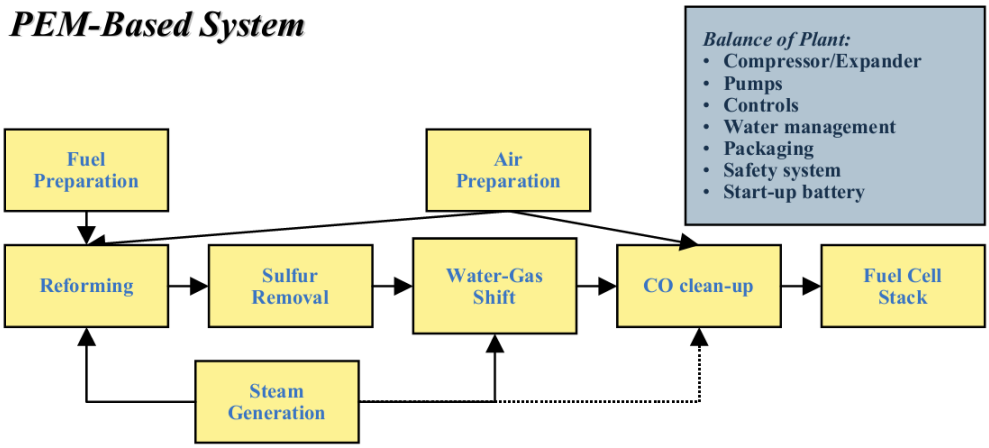
5.3.5 Κυψέλες καυσίμου

Τα συστήματα μ-ΣΗΘ με κυψέλες καυσίμου ενσωματώνουν την πλέον εξεζητημένη τεχνολογία συγκριτικά με τα συστήματα που προαναφέρθηκαν. Παρατηρείται έντονη ερευνητική προσπάθεια ώστε τα θεωρητικά πλεονεκτήματα που εμφανίζουν (χαμηλή στάθμη θορύβου, μικρές απαιτήσεις συντήρησης, εξαιρετική συμπεριφορά σε συνθήκες μερικού φορτίου, σχεδόν μηδενικά επίπεδα εκπομπών ρύπων, υψηλές αποδόσεις (85-90%) ανεξάρτητα από το μέγεθος της κυψέλης) να αποτελέσουν τεχνικά χαρακτηριστικά εμπορικών συστημάτων (Onovwiona and Ugursal, 2006). Η επιδίωξη αυτή δεν έχει επιτευχθεί στο βαθμό που θα επέτρεπε την άμεση εφαρμογή και εγκατάσταση συστημάτων κυψελών καυσίμου, καθώς εκκρεμούν προβλήματα αξιοπιστίας, μείωσης αποδοτικότητας με τη λειτουργία και χαμηλής διάρκειας ζωής. Σημαντική πρόκληση αποτελεί επίσης η μείωση του κόστους ενός αντίστοιχου συστήματος μέσω επιλογής φτηνότερων υλικών και ανάπτυξη

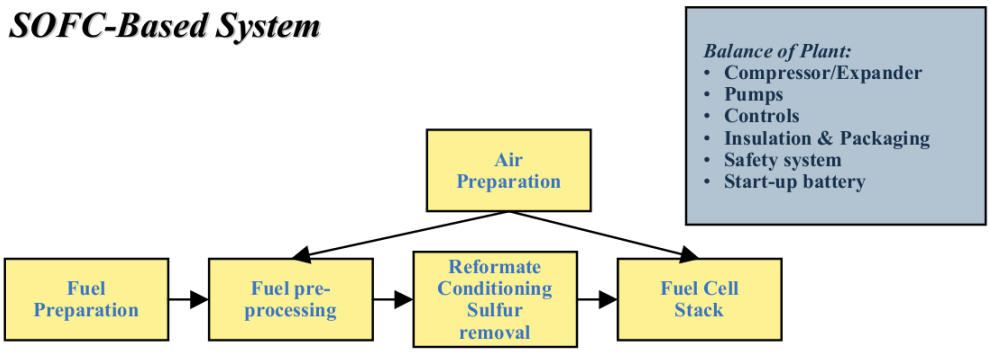
οικονομιών κλίμακας με διεργασίες κατασκευής κατάλληλες για μαζική παραγωγή (Frangopoulos, 2001). Η λειτουργία των κυψελών καυσίμου βασίζεται στην ηλεκτροχημική (και όχι θερμοχημική) μετατροπή της χημικής ενέργειας των καυσίμων. Η σχετική περιγραφή της αρχής λειτουργίας, όπως και η καταγραφή των σημαντικότερων θετικών και αρνητικών πλευρών των κυψελών καυσίμου παρατίθενται στην παράγραφο 4.2.2. Όσον αφορά τα συστήματα μ-ΣΗΘ με κυψέλες καυσίμου, εστιάζονται αποκλειστικά σε δυο τύπους (Pehnt et al., 2006): τις κυψέλες τύπου PEM (§ 4.2.2.2) και τύπου SOFC (§ 4.2.2.2).

5.3.5.1 Λειτουργικά χαρακτηριστικά

Οι δυο τύποι κυψελών που είναι κατάλληλοι για εφαρμογές μ-ΣΗΘ λειτουργούν μεν με την ίδια αρχή λειτουργίας, ωστόσο οι διαφορετικές θερμοκρασίας λειτουργίας (PEM: 80-100°C, SOFC: 800-1000°C) συνεπάγονται σημαντικές διαφορές στο σχεδιασμό του συστήματος μ-ΣΗΘ και στα περιφερειακά υποσυστήματα (Alanne and Saari, 2004; Pehnt, 2006; Tsay, 2003; USDOE, 2004). Η χαμηλή θερμοκρασία λειτουργίας του τύπου κυψέλης PEM απαιτεί ιδιαίτερες διατάξεις αναμόρφωσης του καυσίμου και καθαρισμού του ρεύματος εισαγωγής στην κυψέλη (Σχήματα 5.18 και 5.19), καθώς αυτή τροφοδοτείται αποκλειστικά με H_2, ενώ ίχνη CO είναι δυνατόν να προκαλέσουν λειτουργικά προβλήματα (Baschuk and Li, 2000).
Στον αντίποδα, οι κυψέλες SOFC είναι σε θέση να αξιοποιήσουν ενεργειακά το CO, όπως και να αναμορφώσουν εσωτερικά τα απλούστερα μόρια υδρογονανθράκων (Delta, 2006). Τα συστήματα PEM χαρακτηρίζονται από αμεσότερη απόκριση σε αλλαγές φορτίου, με μικρότερη ωστόσο ενθαλπία στην διατιθέμενη θερμότητα και μικρότερο ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης από ένα αντίστοιχο σύστημα SOFC. Τα κύρια λειτουργικά χαρακτηριστικά των συστημάτων μ-ΣΗΘ (όπως προέκυψαν από σχετική στατιστική ανάλυση (Staffel, 2009)) παρουσιάζονται στους πίνακες 5.10 και 5.11 για τις κυψέλες PEM και SOFC, αντίστοιχα. Σε συστήματα μ-ΣΗΘ, η αποκομιδή της θερμότητας γίνεται σε εναλλάκτη καυσαερίων μετά το τελικό στάδιο της μετάκαυσης (Σχήμα 5.21).



Σχήμα 5.18 Γενική διάταξη συστήματος μ-ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου PEM (USDOE, 2004)



Σχήμα 5.19 Γενική διάταξη συστήματος μ-ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου SOFC (USDOE, 2004)

PEMFC performance	Mean	Standard deviation	Range (μ ± σ)	Number of references
Operating cell voltage *(V)*	0.68	0.08	0.60-0.76	
Operating cell current *(A/cm²)*	0.51	0.30	0.20-0.81	8
Power density *(W/cm²)*	0.33	0.17	0.16-0.50	
Gross stack electrical efficiency *(HHV)*	37.1%	4.9%	32.3-42.0%	20
Net system electrical efficiency *(HHV)*	26.7%	3.5%	23.2-30.2%	
Net total efficiency *(HHV)*	66.9%	6.6%	60.3-73.6%	19
Operating lifetime *(kh)*	19.7	10.0	9.7-29.7	22
*(years)**	4.1	2.5	2.4-7.4	
Degradation rate *(μV/h)*	8.0	7.8	0.1-15.8	17
*(power loss per year)**	4.7%	4.6%	0.1-9.3%	

Πίνακας 5.10 Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστημάτων μ-ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου PEM (Staffel, 2009). *Παραδοχή ετησίων ωρών λειτουργίας: 4000 h/y

SOFC performance	Mean	Standard deviation	Range (μ ± σ)	Number of references
Operating cell voltage *(V)*	0.71	0.05	0.66-0.76	
Operating cell current *(A/cm²)*	0.34	0.17	0.17-0.52	11
Power density *(W/cm²)*	0.27	0.14	0.13-0.41	
Gross stack electrical efficiency *(HHV)*	44.2%	5.7%	38.5-50.0%	10
Net system electrical efficiency *(HHV)*	34.7%	4.5%	30.2-39.2%	
Net total efficiency *(HHV)*	72.4%	4.4%	68.0-76.8%	6
Operating lifetime *(kh)*	11.3	7.1	4.2-18.4	12
*(years)**	2.8	1.8	1.0-4.6	
Degradation rate *(μV/h)*	12	16	0-28	16
*(power loss per year)**	6.9%	9.2%	0-16%	

Πίνακας 5.11 Λειτουργικά χαρακτηριστικά συστημάτων μ-ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου SOFC (Staffel, 2009). *Παραδοχή ετησίων ωρών λειτουργίας: 4000 h/y

5.3.5.2 Εκπομπές ρύπων

Η ηλεκτροχημική μετατροπή της χημικής ενέργειας των καυσίμων στα συστήματα κυψελών καυσίμου αποτελεί βασικό πλεονέκτημα έναντι των ανταγωνιστικών συστημάτων, καθώς συνεπάγεται ελάχιστες εκπομπές αέριων ρύπων κατά τη λειτουργία. Συνεπώς, οι εκπομπές εστιάζονται στο στάδιο της αναμόρφωσης (ειδικά όταν επιδιώκεται η παραγωγή H_2 στα συστήματα PEM) ή στο στάδιο της μετάκαυσης (βλ. Σχήμα 5.21). Στον πίνακα 5.12 συνοψίζονται χαρακτηριστικά μεγέθη εκπομπών από συστήματα συμπαραγωγής με κυψέλες καυσίμου (Onovwiona and Ugursal, 2006).

Στοιχεία εκπομπών αερίων ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με κυψέλες καυσίμου	
Ηλεκτρική απόδοση (kW)	10 – 200
Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης (%)	30 – 45
NOx (lb/MWh)	0,05 – 0,06
CO (lb/MWh)	0,04 – 0,07
Άκαυστοι υδρογ/κες (lb/MWh)	0,01
CO_2 (lb/MWh)	900 - 1360

Πίνακας 5.12 Στοιχεία εκπομπών αερίων ρύπων συστημάτων μ-ΣΗΘ με κυψέλες καυσίμου (Onovwiona and Ugursal, 2006)

5.3.5.3 Κόστος εγκατάστασης και συντήρησης

Το συνολικό κόστος κατασκευής ενός συστήματος μ-ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου επιμερίζεται στα αντίστοιχα υποσυστήματα (σχήματα 5.18 και 5.19) ως εξής (Onovwiona and Ugursal, 2006): κυψέλη (25-40%), επεξεργασία καυσίμου (25-30%), ηλεκτρονικά ισχύος (10-20%), διαχείριση θερμότητας (10-20%) και περιφερειακά συστήματα (5-10%). Οι εκτιμήσεις (Delta, 2006) του κόστους εγκατάστασης στα μέσα της δεκαετίας 2000-10 κυμαίνονταν μεταξύ 3500 €/kW (PEM) και 4500 €/kW (SOFC). Ωστόσο, το κόστος αγοράς του μοναδικού εμπορικά διατιθέμενου συστήματος PEM δυναμικότητας 1kW ανέρχεται στα 35000 € (Tokyo Gas, 2009), κάτι που αναδεικνύει τη δυσκολία εκτίμησης του κόστους ενός καινοτόμου συστήματος που δεν παράγεται μαζικά με τυποποιημένες μεθόδους κατασκευής.

Όσον αφορά τα κόστη συντήρησης, κατανέμονται σε εργατικό κόστος, ανταλλακτικά και αναλώσιμα. Επιπρόσθετα, κατά την κύρια συντήρηση ενός συστήματος PEM, προκύπτει κόστος αλλαγής των καταλυτικών μετατροπέων του υποσυστήματος αναμόρφωσης (κάθε 3-5 έτη) και της συστοιχίας των κυψελών (4-8 έτη) (Onovwiona and Ugursal, 2006). Το συνολικό κόστος συντήρησης εκτιμάται (Onovwiona and Ugursal, 2006; Delta, 2006) και για τους δυο τύπους κυψελών οτι κυμαίνεται στα 2,0-2,5 c€/kWh.

5.4 Προηγούμενες προσπάθειες αξιολόγησης

Η προσπάθεια ανάπτυξης των τεχνολογιών μ-ΣΗΘ που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο συνοδεύτηκε κατά την δεκαετία 2000-2010 από σημαντική σχετική ερευνητική δραστηριότητα, εντοπισμένη κατά κύριο λόγο στην Ευρώπη και δευτερευόντως στην Ιαπωνία – σε αντιστοιχία με την παγκόσμια κατανομή πιλοτικών προγραμμάτων (Σχήμα 5.3) και ενισχυτικών νομοθεσιών (Σχήμα 5.8).

Η αξιολόγηση της τεχνικής αποδοτικότητας των τεχνολογιών μ-ΣΗΘ επικεντρώνεται κατά κύριο λόγο στην εκτίμηση του ποσοστού εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας που επιτυγχάνεται μέσω της λειτουργίας σε διάφορα σενάρια θερμικών και ηλεκτρικών απαιτήσεων. Καταγράφονται τόσο συγκριτικές αξιολογήσεις μεταξύ ανταγωνιστικών συστημάτων, όσο και δημοσιεύσεις που αφορούν μεμονωμένες εφαρμογές. Όσον αφορά την τεχνική αξιολόγηση ενός συστήματος μ-ΣΗΘ, εξετάζονται μονάδες ΜΕΚ (Onovwiona et al., 2007; Haeseldonckx et al., 2007), κυψέλες καυσίμου τύπου SOFC (Alanne et al., 2006; Hawkes et al., 2007) και κινητήρες Stirling (Alanne et al., 2010). Οι μονάδες SOFC αποτελούν επίσης το επίκεντρο προσπαθειών τεχνο-οικονομικής βελτιστοποίησης είτε σε επίπεδο μονάδας (Hawkes et al., 2006) είτε δικτυωμένες σε επίπεδο συνοικίας (Burer et al., 2003). Η επιλογή ανταγωνιστικών συστημάτων μ-ΣΗΘ στις σχετικές συγκριτικές δημοσιεύσεις, καλύπτει πλήθος συνδυασμών: οι Barbieri et al. (Barbieri et al., 2011) αναλύουν μόνο συμβατικά συστήματα, ενώ στον αντίποδα οι Staffel et al. και Dorer et al. (Staffel et al., 2008; Dorer et al., 2005) ασχολούνται αποκλειστικά με συστήματα διαφόρων τύπων κυψελών καυσίμου. Γεγονός παραμένει ωστόσο το οτι με εξαίρεση τους Barbieri et al., οι τεχνολογίες κυψελών καυσίμου (PEM ή/και SOFC) εξετάζονται ως εναλλακτική από όλες τις σχετικές δημοσιεύσεις, καθώς αναγνωρίζονται τα – εν δυνάμει – λειτουργικά τους πλεονεκτήματα. Τα συστήματα κινητήρων ΜΕΚ και Stirling αποτελούν τις ανταγωνιστικές συμβατικές επιλογές στις τρεις σχετικές δημοσιεύσεις που καταγράφηκαν (De Paepe et al., 2006; Dorer and Weber, 2009; Peacock and Newborough, 2005). Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η διαπίστωση οτι δεν παρατηρείται συμφωνία ως προς την επικρατέστερη ενεργειακά τεχνολογία, κάτι που αναδεικνύει την επίδραση παραγόντων όπως το μέγεθος και η αναλογία ηλεκτρικού-θερμικού φορτίου και τις διαστάσεις και την αποδοτικότητα των υπόλοιπων υποσυστημάτων (π.χ. αποθήκευση θερμότητας). Ωστόσο αποτελεί κοινή διαπίστωση το δυναμικό εξοικονόμησης πρωτογενούς ενέργειας μέσω εφαρμογής συστημάτων μ-ΣΗΘ, τουλάχιστον κατά 10-20%. Τα αποτελέσματα προγραμμάτων πιλοτικής λειτουργίας μονάδων μ-ΣΗΘ σε Γερμανία, Μ.Βρετανία και Ιαπωνία παρουσιάζονται σε τρεις σχετικές δημοσιεύσεις (Kuhn et al., 2009; Guy and Sykes, 2011; Hamada, 2006).

Η εκτίμηση της οικονομικής βιωσιμότητας των συστημάτων μ-ΣΗΘ αποτελεί το αντικείμενο ενός σημαντικού πλήθους δημοσιεύσεων και συνδέεται άμεσα με την ενεργειακή αποδοτικότητα, καθώς σχεδόν το σύνολο των εργασιών που καταγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο, αναλύουν και το οικονομικό σκέλος της λειτουργίας των μονάδων μ-ΣΗΘ. Αμιγώς οικονομικές αξιολογήσεις αποτελούν οι εργασίες των Alanne και Hawkes (Alanne et al., 2007; Hawkes and Leach, 2008).

Εκτός της αξιολόγησης της οικονομικής βιωσιμότητας, οι περισσότερες προαναφερθείσες δημοσιεύσεις προσεγγίζουν επιπρόσθετα και την περιβαλλοντική διάσταση της λειτουργίας των συστημάτων μ-ΣΗΘ μέσω της εκτίμησης της μείωσης των ισοδύναμων εκπομπών CO_2. Όπως ήταν αναμενόμενο, τα ευρήματα για την εν δυνάμει μείωση των εκπομπών CO_2 είναι αντίστοιχης τάξης μεγέθους με την ενεργειακή εξοικονόμηση. Ιδιαίτερης αναφοράς χρήζει η μοναδική δημοσίευση (Cockroft and Kelly, 2006) που καταλήγει οτι η τεχνολογία των συμβατικών (όχι γεωθερμικών) αντλιών θερμότητας είναι σε θέση να επιτύχει μεγαλύτερες μειώσεις εκπομπών CO_2 από τα συστήματα μ-ΣΗΘ.

Ο υπολογισμός της εν δυνάμει μείωσης των εκπομπών CO_2 κατά την ετήσια λειτουργία αποτελεί μεν κύριο θέμα της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των συστημάτων μ-ΣΗΘ, δεν παύει ωστόσο να αγνοεί τις παράπλευρες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (π.χ. Acidification potential), όπως και τα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής των σχετικών μονάδων. Στο στάδιο της κατασκευής μονάδων μ-ΣΗΘ με κυψέλες καυσίμου τύπου PEM και SOFC εστιάστηκε η μελέτη των Karakoussis et al. (2001), σε μια προσπάθεια να ποσοτικοποιηθούν οι σχετικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η τάση για συνολική προσέγγιση της περιβαλλοντικής συμπεριφοράς των συστημάτων μ-ΣΗΘ μέσω εφαρμογής ΑΚΖ αρχίζει να διαφαίνεται μόλις τα τελευταία χρόνια, με τις σχετικές δημοσιεύσεις της ερευνητικής ομάδας του Πανεπιστημίου του Birmingham (Stafell and Ingram, 2010; Stafell et al., 2012).

Σε αντιστοιχία με την ΑΚΖ, η εφαρμογή μεθοδολογιών πολυκριτηριακής ανάλυσης για επιλογή τεχνολογίας μ-ΣΗΘ δεν είναι διαδεδομένη. Ωστόσο, από το 2004 έχει διαπιστωθεί η ανάγκη της συνολικής διατύπωσης του προβλήματος επιλογής τεχνολογίας μ-ΣΗΘ, λαμβάνοντας υπόψη και τις διαφορετικές προτεραιότητες των εν δυνάμει αποφασιζόντων (Alanne and Saari, 2004). Επίσης, καταγράφονται δυο πρόσφατες δημοσιεύσεις (Alanne et al., 2007b; Nieto-Morote et al., 2011) που εφαρμόζουν πολυκριτηριακές μεθόδους για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση συστημάτων μ-ΣΗΘ.

Συνοψίζοντας τα ευρήματα των δημοσιεύσεων σχετικών με την αξιολόγηση των συστημάτων μ-ΣΗΘ διαπιστώνονται τα εξής:

- Κατά την τελευταία δεκαετία (2000-2010), με κίνητρο τόσο την ανάπτυξη πιλοτικών μονάδων όσο και ευνοϊκές εξελίξεις στις υποδομές και τη νομοθεσία της αγοράς ενέργειας, καταγράφηκαν πλήθος δημοσιεύσεων με στόχο την εκτίμηση της

οικονομικής βιωσιμότητας των (συμβατικών και μη) τεχνολογιών μ-ΣΗΘ. Κατά κανόνα, προσεγγίζουν την περιβαλλοντική επίδοση των συστημάτων μέσω του υπολογισμού της μείωσης των εκπομπών CO2.

- Η αντιπαράθεση των ευρημάτων δεν αναδεικνύει την ύπαρξη κάποιας συγκεκριμένης τεχνολογίας ως επικρατούσας σε γενικό επίπεδο, καθώς η εξοικονόμηση ενέργειας και κόστους εξαρτάται από πλήθος εξωγενών παραγόντων όπως το μέγεθος, η αναλογία και η διακύμανση των απαιτήσεων σε ηλεκτρισμό και θερμότητα, οι διαστάσεις και η αποδοτικότητα των περιφερειακών υποσυστημάτων, η υπάρχουσα κατάσταση κάλυψης των σχετικών αναγκών και το νομικό πλαίσιο.
- Ελάχιστες δημοσιεύσεις προσέγγισαν συνολικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις μέσω ΑΚΖ, παρέχοντας αποτελέσματα σχετικά με κρίσιμους περιβαλλοντικούς δείκτες, εκτός των εκπομπών CO2.
- Μόλις δυο πρόσφατες δημοσιεύσεις διατυπώνουν το πρόβλημα επιλογής συστήματος μ-ΣΗΘ με όρους πολυκριτηριακής ανάλυσης, αξιολογώντας τις τρεις βασικές συνιστώσες του προβλήματος (τεχνική-οικονομική-περιβαλλοντική), χωρίς ωστόσο να αναλύεται σε βάθος η περιβαλλοντική διάσταση μέσω εφαρμογής ΑΚΖ.

Η μεθοδολογία που διατυπώνεται στο κεφάλαιο 3 της διατριβής αποτελεί μια ολοκληρωμένη πρόταση συνολικής αξιολόγησης, καλύπτοντας τα μεθοδολογικά κενά των προσεγγίσεων που καταγράφηκαν.

5.5 Εφαρμογή μεθοδολογίας

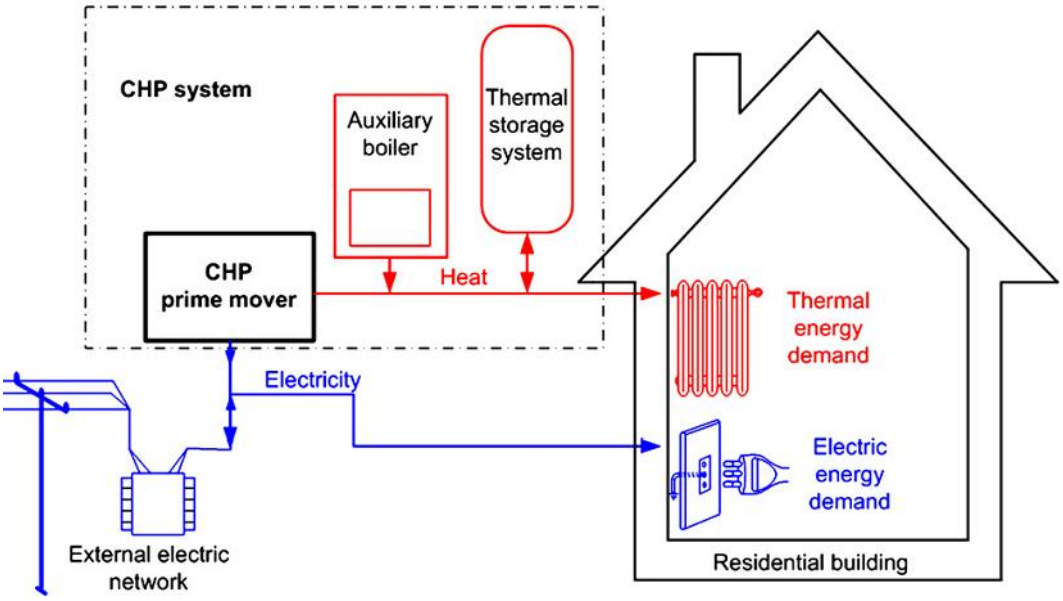
Στο παρόν υποκεφάλαιο εφαρμόζεται η μεθοδολογία που περιγράφηκε στο κεφάλαιο 3, προκειμένου να αξιολογηθεί συνολικά και συγκριτικά ένα πρότυπο σύστημα μ-ΣΗΘ για οικιακές εφαρμογές.

5.5.1 Καθορισμός πλαισίου συνδυασμένης αξιολόγησης

Η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας αποσκοπεί στην συγκριτική αξιολόγηση του κύκλου ζωής πρότυπης μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC. Ως συστήματα αναφοράς επιλέγονται :

- Συμβατική περίπτωση κάλυψης θερμικών αναγκών με λέβητα αερίου και ηλεκτρικών με αγορά από το δίκτυο κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής.
- Ανταγωνιστικό σύστημα μ-ΣΗΘ με μηχανή εσωτερικής καύσης (Σχήμα 5.20) – το πλέον διαδεδομένο και το μοναδικό με εμπορικές εφαρμογές τα τελευταία 5 έτη (Σχήμα 5.12).

Οφείλει να γίνει σαφές το ότι η μονάδα SOFC που μελετάται, αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος FlameSOFC (FlameSOFC, 2005).



Σχήμα 5.20 Απεικόνιση κύριων τμημάτων συστήματος οικιακής μ-ΣΗΘ (Bianchi et al., 2011)

Το σύστημα μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC και τα δυο συστήματα αναφοράς που επιλέχθηκαν, καλούνται να καλύψουν τα ετήσια θερμικά και ηλεκτρικά φορτία μονοκατοικίας σε κλιματικές συνθήκες Κεντρικής και Δυτικής Ευρώπης (Πίνακας 5.13). Οι τρεις συγκεκριμένες χώρες (Γερμανία, Μ.Βρετανία και Ισπανία) επιλέχθηκαν προκειμένου να αξιοποιηθούν τα δεδομένα

που διατέθηκαν μέσω του ερευνητικού προγράμματος FlameSOFC (και αφορούσαν τις συγκεκριμένες χώρες).

Το κοινό καύσιμο για παραγωγή θερμότητας είναι το φυσικό αέριο (προδιαγραφών DIN 51857). Τα όρια του εξεταζόμενου συστήματος απεικονίζονται στο Σχήμα 5.20, με την προσθήκη των αρχικών σταδίων του κύκλου ζωής των συστημάτων (εξόρυξη πρώτων υλών, κατασκευή) και του σταδίου της απόσυρσης. Οι λειτουργικές μονάδες, βάσει των οποίων γίνεται η συγκριτική αξιολόγηση είναι η παραγωγή μίας ηλεκτρικής και μιας θερμικής κιλοβατώρας (1 kWel, 1 kWth) για κάλυψη οικιακών φορτίων.

	Ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις (kWh)		**Μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος(°C)**
	Ηλεκτρισμός	Θερμότητα	
D	5000	20000	9
UK	3500	16000	10
SP	3500	18000	15

Πίνακας 5.13 Ετήσιες ενεργειακές απαιτήσεις και μέση θερμοκρασία περιβάλλοντος ανά χώρα υποτιθέμενης εγκατάστασης των μονάδων μ-ΣΗΘ (FlameSOFC, 2005)

5.5.1.1 Καθορισμός ανταγωνιστικών τεχνολογιών/συστημάτων

Στο σύστημα κυψέλης καυσίμου (Σχήμα 5.21), η συστοιχία SOFC συνδυάζεται με αντιδραστήρα μερικής θερμικής οξείδωσης (Thermal Partial Oxidation reactor – T-POX), με μετακαυστήρα πορώδους τύπου (off gas porous burner) και διάφορους εναλλάκτες προθέρμανσης και ανάκτησης θερμότητας. Περιλαμβάνεται επίσης παγίδα αιθάλης (soot trap) και υποσύστημα αποθείωσης, προκειμένου να εξασφαλιστεί η δέσμευση σωματιδίων και υδροθείου αντίστοιχα, πριν την εισαγωγή στην άνοδο της συστοιχίας SOFC.

Αναλυτικά τα υποσυστήματα της μονάδας είναι τα εξής (Σχήμα 5.21) (Δεν απεικονίζονται οι διάφοροι κυκλοφορητές – ανεμιστήρες, όπως και το υποσύστημα ηλεκτρονικών ελέγχου):

1. Υποσύστημα επεξεργασίας καυσίμου:

Έχει ως κύριο σκοπό λειτουργίας την αναμόρφωση του φυσικού αερίου σε μίγμα H2 και CO, το οποίο θα πληροί τις απαιτήσεις της συστοιχίας όσον αφορά θερμοκρασία και καθαρότητα.

a. Αντιδραστήρας T-POX
b. Δοχείο ανάμιξης
c. Αποθειωτής
d. Ηλεκτρική προθέρμανση
e. Προθέρμαντής αέρα T-POX
f. Παγίδα αιθάλης

2. Συστοιχία και ηλεκτρονικά ισχύος:

Αποτελεί την «καρδιά» της μονάδας, όπου επιτελούνται οι ηλεκτροχημικές αντιδράσεις παραγωγής ηλεκτρισμού, ο οποίος υπόκειται σε κατάλληλη μετατροπή προκειμένου να καλύψει οικιακές ανάγκες ή να τροφοδοτηθεί στο δίκτυο.

g. Μονάδα συστοιχίας SOFC (συμπεριλαμβάνει συστοιχία, κέλυφος, μόνωση, φλάντζες)

h. Μονάδα διαχείρισης ισχύος (DC/AC converter)

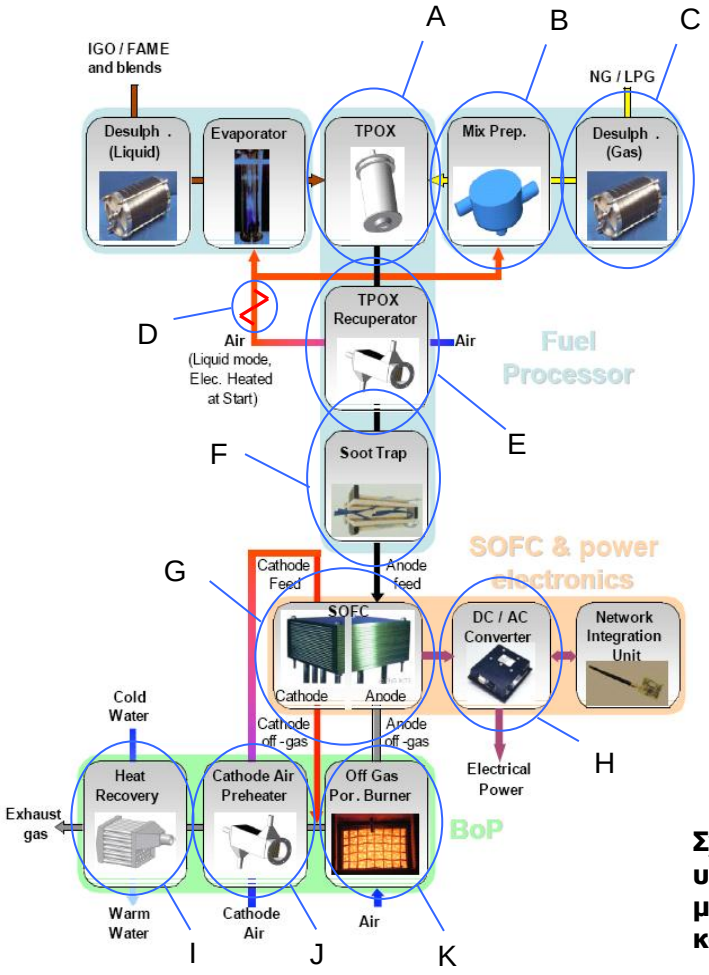
3. Περιφερειακά υποσυστήματα:

i. Εναλλάκτης ανάκτησης θερμότητας

j. Προθερμαντής αέρα καθόδου

k. Πορώδης μετακαυστήρας

4. Κέλυφος και σωληνώσεις

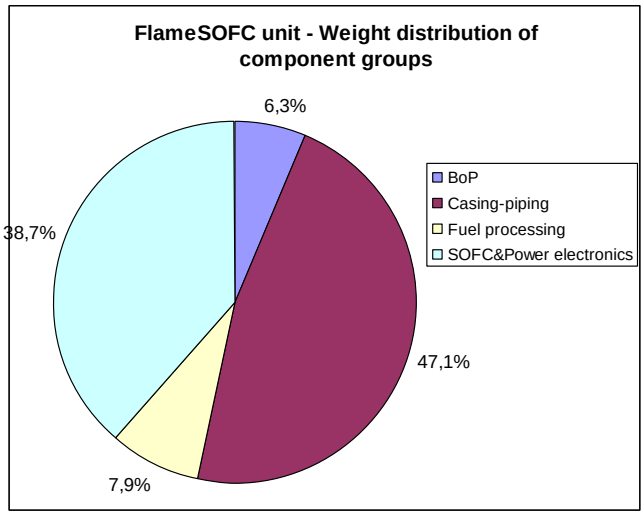


Σχήμα 5.21 Ανάλυση υποσυστημάτων εξεταζόμενης μονάδας μ-ΣΗΘ με κυψέλη καυσίμου τύπου SOFC

Συνοπτικά η λειτουργία του συστήματος περιγράφεται ως εξής: Το καύσιμο παρέχεται μέσω βαλβίδας ελέγχου ροής στον αποθειωτή, όπου δεσμεύονται ενώσεις θείου που έχουν εισαχθεί στο αέριο ως πρόσθετα. Στο δοχείο Β (σχήμα 5.21) αναμιγνύεται με το προθερμασμένο ρεύμα αέρα και εισέρχεται στον αντιδραστήρα Τ-ΡΟΧ. Η ανάμιξη ρυθμίζεται υποστοιχειομετρικά (λ=0.42-45), έτσι ώστε να επιτευχθεί αυξημένη παραγωγή Η2 και CO. Η

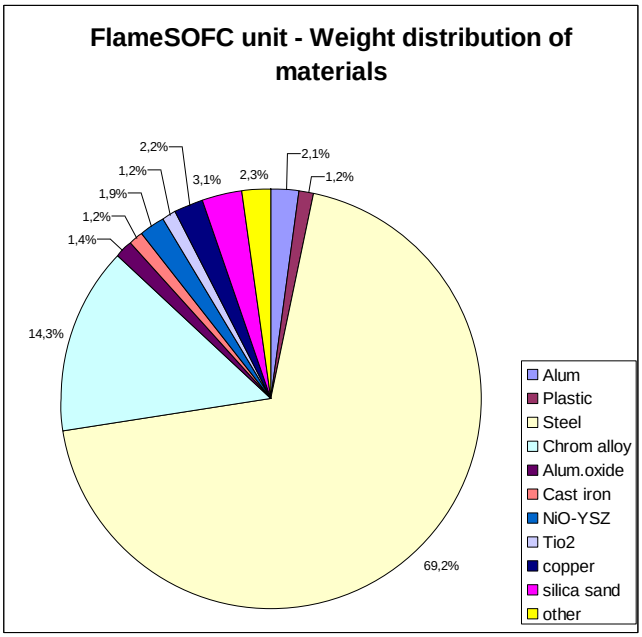
δε θερμοκρασία αναμόρφωσης οφείλει να βρίσκεται εντός υψηλών ορίων (1200-1400°C), προκειμένου να εξασφαλιστούν επαρκείς ταχύτητες αντίδρασης. Το αέριο μίγμα που παράγεται κατά την αναμόρφωση, προθερμαίνει το ρεύμα αέρα ανάμιξης, μειώνοντας τη θερμοκρασία του στα επίπεδα λειτουργίας της συστοιχίας (800-850°C). Έπειτα διέρχεται από την παγίδα αιθάλης (περιέχει κεραμικά φίλτρα), προκειμένου να αφαιρεθούν τα σωματίδια που παράχθηκαν κατά την μερική οξείδωση. Οι διεργασίες εντός της συστοιχίας SOFC περιγράφηκαν συνοπτικά στην παράγραφο 4.2.2.2

Το ρεύμα του αέρα καθόδου επιτελεί δυο σημαντικές λειτουργίες: αφενός παρέχει το απαιτούμενο οξυγόνο για τις ηλεκτροχημικές αντιδράσεις εντός της συστοιχίας και αφετέρου ψύχει τις κυψέλες καυσίμου, απάγοντας την εκλυόμενη θερμότητα. Προκειμένου να αποφευχθούν θερμικές τάσεις στα κεραμικά στοιχεία των κυψελών, προβλέπεται προθέρμανση του αέρα καθόδου στους 850°C από το αέριο μίγμα των απαερίων του μετακαυστήρα και της καθόδου. Οι ποσότητες H_2 και CO που δεν αντέδρασαν εντός της συστοιχίας καίγονται στο μετακαυστήρα και τελικά τα απαέρια μετακαυστήρα και καθόδου αποδίδουν θερμότητα σε εναλλάκτη αέρα-νερού.



Σχήμα 5.22 Κατανομή συνολικού βάρους σε υποσυστήματα

Η εφαρμογή της μεθοδολογίας ΑΚΖ προϋποθέτει τη παροχή δεδομένων σχετικών με το είδος και την ποσότητα των απαιτούμενων πρώτων υλών για την κατασκευή των υποσυστημάτων που καταγράφηκαν. Οι αναλυτικοί πίνακες που περιέχουν τα αντίστοιχα στοιχεία και τις πηγές από τις οποίες ανακτήθηκαν παρατίθενται στο Παράρτημα Ι. Συνοπτικά, το συνολικό βάρος του συστήματος μ-ΣΗΘ συστοιχίας SOFC εκτιμήθηκε στα 254 kg, με την αντίστοιχη κατανομή να απεικονίζεται στα σχήματα 5.22 και 5.23. Είναι σημαντικό να αναφερθεί το ότι, σύμφωνα



Σχήμα 5.23 Κατανομή συνολικού βάρους σε υλικά κατασκευής

με τις παραδοχές αντίστοιχων μελετών (Alkaner and Zhou, 2006; Karakoussis et al., 2001), θεωρείται ότι οι απώλειες υλικών κατά την κατασκευή των διαφόρων υποσυστημάτων είναι 15% της τελικά χρησιμοποιούμενης ποσότητας.

Όπως περιγράφεται στην παράγραφο 3.2.1 της διατριβής, η εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας απαιτεί επίσης συγκεκριμένα τεχνικά χαρακτηριστικά. Για λόγους συμβατότητας με τα αποτελέσματα της μελέτης οικονομικής βιωσιμότητας της μονάδας (FlameSOFC, 2005), έγινε η υπόθεση συνεχούς και σταθερής λειτουργίας που καλύπτει τα ετήσια θερμικά φορτία του πίνακα 5.13. Κατά συνέπεια, δεν απαιτήθηκαν δεδομένα σχετικά με μεταβαλλόμενη λειτουργία. Ο Πίνακας 5.14 περιέχει τα σχετικά τεχνικά δεδομένα για τη μονάδα μ-ΣΗΘ συστοιχίας SOFC, τα οποία κατά κύριο λόγο προέρχονται από προσομοιώσεις (FlameSOFC, 2005) και εμπορικές βάσεις δεδομένων (Ecoinvent, 2009).

Σύστημα μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC						
Χρόνος ζωής συστοιχίας (h)	Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης η_{el} (%)	Βαθμός θερμικής απόδοσης η_{th} (%)	Αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς (kW)	Αποδιδόμενη θερμική ισχύς (kW)	Συντελεστές εκπομπών ρύπων λειτουργίας (ανά kWh καυσίμου) (g/kWh_{fuel})	
30000	(α) 25,0% (β) 35,0%	(α) 66,0% (β) 56,0%	2,0	(α) 5,3 (β) 3,2	CO_2	203
					CO	$7,0*10^{-3}$
					NO_x	$6,4*10^{-3}$
					SO_2	$1,8*10^{-3}$
					HC	$3,6*10^{-3}$
Σχόλια - Παραδοχές: 7. Εξετάζονται δυο περιπτώσεις (§5.2.4): (α) Χαμηλής ηλεκτρικής αποδοτικότητας και (β) Υψηλής ηλεκτρικής αποδοτικότητας. Στις υπόλοιπες στήλες, οι δείκτες (α) και (β) αντιστοιχούν στους δυο βαθμούς ηλεκτρικής απόδοσης. 8. Ο χρόνος ζωής των υπόλοιπων συστημάτων είναι ίσος με τον αντίστοιχο του συστήματος αναφοράς. 9. Ο συνολικός βαθμός απόδοσης (το άθροισμα ηλεκτρικού και θερμικού) παραμένει 91,0% 10. Υπολογισμός συντελεστών CO, NOx: από συντελεστές εκπομπής πορώδους καυστήρα (CO: 10 mg/kWhth , NOx: 40 mg/kWhth), συνυπολογίζοντας την ισχύ λειτουργίας του πορώδους καυστήρα. 11. Το περιεχόμενο S των καυσίμων μετατρέπεται στο σύνολό του σε SO2, κατά την αναγέννηση των υλικών απορρόφησης του αποθειωτή.						
Πηγές: (FlameSOFC, 2005), (Ecoinvent, 2009), (Briem, 2003), (Brehmer et al., 2004)						

Πίνακας 5.14 Τεχνικά δεδομένα συστήματος μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC

Το συμβατικό σύστημα αναφοράς αποτελείται από καυστήρα-λέβητα φυσικού αερίου ισχύος 8kW. Στοιχεία σχετικά με την κατανομή του συνολικού βάρους (~150kg) σε υλικά ανακτήθηκαν από εμπορική βάση δεδομένων AKZ (Ecoinvent, 2009). Ενδεικτικά αναφέρεται ότι γύρω στο 80% αφορά χάλυβα χαμηλής και μέσης κραμάτωσης. Ο συνολικός ετήσιος βαθμός απόδοσης λαμβάνεται ίσος με 95%, που αντιστοιχεί στους πλέον σύγχρονους λέβητες αερίου (συμπύκνωσης). Τα βασικά χαρακτηριστικά και οι συντελεστές εκπομπής παρατίθενται στον πίνακα 5.15.

Συμβατικό σύστημα θέρμανσης με λέβητα αερίου				
Χρόνος ζωής (h)	Βαθμός θερμικής απόδοσης η_{th} (%)	Αποδιδόμενη θερμική ισχύς (kW)	Συντελεστές εκπομπών ρύπων λειτουργίας (ανα kWh καυσίμου) (g/kWh$_{fuel}$)	
50000	95,0%	8,0	CO_2	203
			CO	$21,2*10^{-3}$
			NO_x	$36,0*10^{-3}$
			SO_2	$1,8*10^{-3}$
			HC	$10,8*10^{-3}$
			CH_4	$7,2*10^{-3}$
Πηγή: (Ecoinvent, 2009)				

Πίνακας 5.15 Τεχνικά δεδομένα συμβατικού συστήματος θέρμανσης με λέβητα αερίου

Κατά την περίπτωση σύγκρισης με ανταγωνιστική τεχνολογία μ-ΣΗΘ, το σύστημα αναφοράς περιλαμβάνει τη μονάδα Ecopower (Ecopower, 2006), της οποίας τα χαρακτηριστικά (υλικά, βαθμοί απόδοσης, δυναμικότητα, συντελεστές εκπομπών περιλαμβάνονται στη βάση δεδομένων Ecoinvent (Πίνακας 5.16) (Ecoinvent, 2009). Τα βασικά δομικά υποσυστήματα περιλαμβάνουν: (α) τον κινητήρα, (β) τη γεννήτρια, (γ) τον εναλλάκτη ανάκτησης θερμότητας. Το συνολικό βάρος εκτιμάται στα 210kg, με κύρια υλικά κατασκευής χάλυβα (45%), υαλόνημα (24%) και χαλκό (14%) (Ecoinvent, 2009).

Ανταγωνιστικό σύστημα μ-ΣΗΘ με Μηχανή Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ)						
Χρόνος ζωής (h)	Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης η_{el} (%)	Βαθμός θερμικής απόδοσης η_{th} (%)	Αποδιδόμενη ηλεκτρική ισχύς (kW)	Αποδιδόμενη θερμική ισχύς (kW)	Συντελεστές εκπομπών ρύπων λειτουργίας (ανα kWh καυσίμου) (g/kWh$_{fuel}$)	
60000	25,0%	65%	3,0	8,0	CO_2	203
					CO	1,45
					NO_x	1,81
					SO_2	$1,8*10^{-3}$
					HC	$84,6*10^{-3}$
					CH_4	$155*10^{-3}$
Πηγή: (Ecoinvent, 2009)						

Πίνακας 5.16 Τεχνικά δεδομένα συστήματος μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ

Η λεπτομερής περιγραφή της λειτουργίας του συμβατικού συστήματος κρίνεται ως μη απαραίτητη, καθώς πρόκειται για ευρύτατα διαδεδομένη τεχνολογία. Όσον αφορά το σύστημα μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ, αναλύεται εκτενώς στην παράγραφο 5.2.1.

5.5.2 Επιμέρους αξιολογήσεις τεχνικής, περιβαλλοντικής και οικονομικής συνιστώσας

Το δεύτερο σκέλος αποσκοπεί στην συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, προκειμένου να καθοριστούν και να ποσοτικοποιηθούν κριτήρια αξιολόγησης της τεχνικής, περιβαλλοντικής

και οικονομικής αποδοτικότητας των συστημάτων που περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο.

Κρίθηκε αναγκαίος ο διαχωρισμός του προβλήματος αξιολόγησης σε δύο περιπτώσεις:

- *Περίπτωση αξιολόγησης Α:* Συγκριτική αξιολόγηση συστήματος μ-ΣΗΘ συστοιχίας SOFC με συμβατική περίπτωση κάλυψης θερμικών (λέβητας αερίου) και ηλεκτρικών αναγκών (από το δίκτυο κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής).
- *Περίπτωση αξιολόγησης Β:* Σύγκριση με ανταγωνιστικό σύστημα μ-ΣΗΘ (ΜΕΚ).

Ο λόγος για τον οποίο εξετάζονται χωριστά οι δύο περιπτώσεις έγκειται στην ανάγκη ύπαρξης κοινών κριτηρίων αξιολόγησης. Για παράδειγμα, δεν είναι ευθέως συγκρίσιμοι οι βαθμοί ηλεκτρικής απόδοσης της μονάδας μ-ΣΗΘ με τον αντίστοιχο της κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής, αλλά το αντίθετο ισχύει όταν συγκρίνονται δυο μονάδες μ-ΣΗΘ διαφορετικής τεχνολογίας.

5.5.2.1 Τεχνική αξιολόγηση

Κατά την τεχνική αξιολόγηση υπολογίζονται τα ετήσια θερμικά και ηλεκτρικά ισοζύγια των συστημάτων που εξετάζονται. Ακολουθεί η εφαρμογή των μεθοδολογικών βημάτων που περιγράφονται στην παράγραφο §3.2.2.1, τόσο για τον καθορισμό των κριτηρίων αξιολόγησης όσο και για τη συλλογή των δεδομένων, προκειμένου να συμπληρωθεί ο πίνακας τεχνικής αξιολόγησης (αντίστοιχος του πίνακα 4.4), σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του σχήματος 3.1. Υπενθυμίζεται ότι η συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης αφορά κάλυψη ετησίων θερμικών και ηλεκτρικών φορτίων, κάτι που έχει ως συνέπεια να μην εφαρμόζονται τα μεθοδολογικά βήματα που σχετίζονται με κάλυψη μεταβαλλόμενου φορτίου.

Αναλύονται δυο περιπτώσεις αξιολόγησης (Α και Β), όπως περιγράφονται στην εισαγωγή της παρούσας παραγράφου και απεικονίζονται στο σχήμα 5.24 .

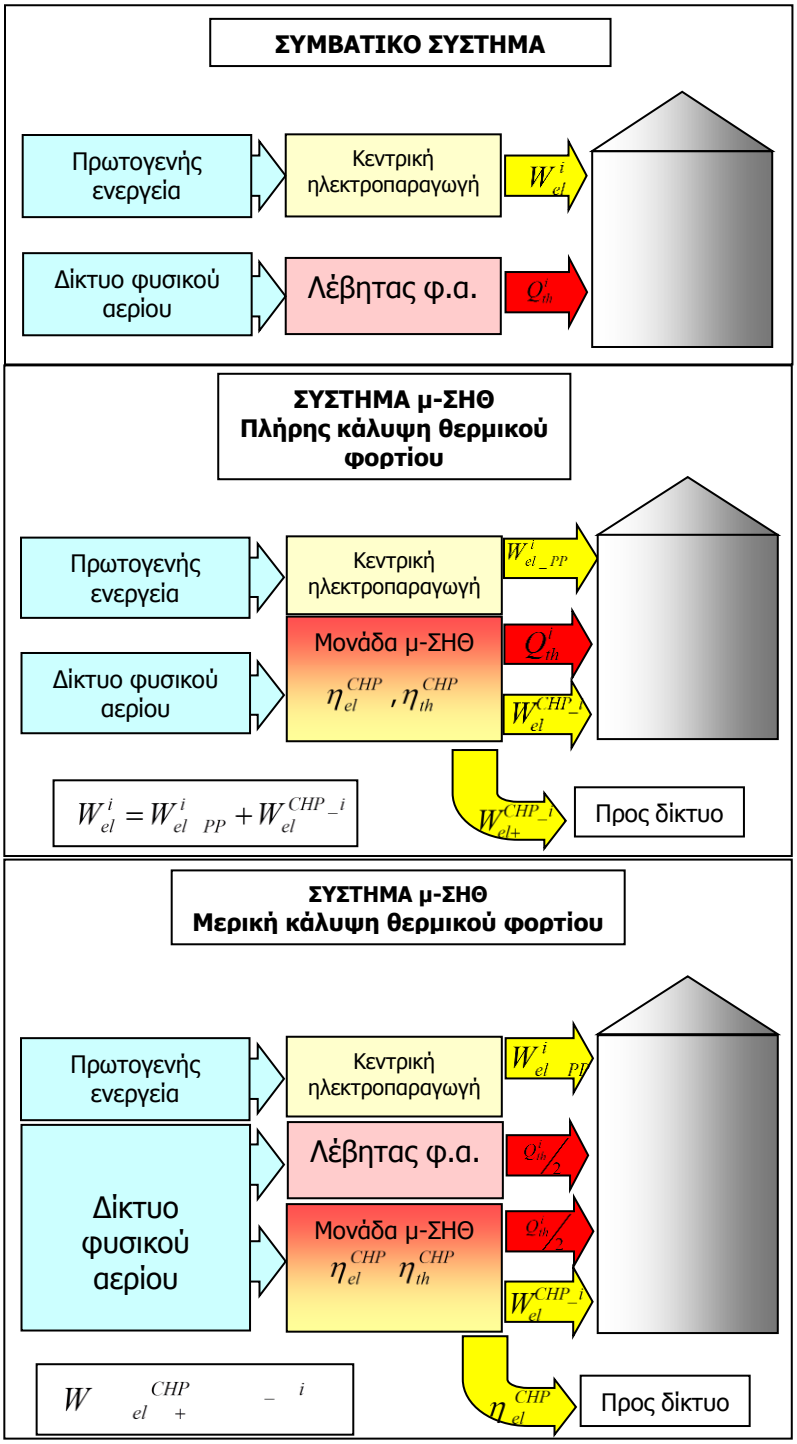
Επιπρόσθετα, εξετάστηκαν τα εξής ζητήματα:

- *Ποσοστό κάλυψης ετήσιου θερμικού φορτίου από μ-ΣΗΘ*.

Κατά αντιστοιχία με μεγαλύτερα συστήματα συμπαραγωγής, η μεγιστοποίηση της αξιοποίησης της ανακτώμενης θερμότητας αποτελεί κύριο παράγοντα βιωσιμότητας (Peacock and Newborough, 2005; Dorer et al., 2005), καθώς αυξάνει τις ετήσιες ώρες λειτουργίας. Εξετάζονται οι περιπτώσεις όπου η μονάδα μ-ΣΗΘ καλύπτει πλήρως και κατά το ήμισυ το ετήσιο θερμικό φορτίο.

- Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης συστήματος μ-ΣΗΘ.

Με δεδομένη την αβεβαιότητα ως προς την ηλεκτρική αποδοτικότητα των μονάδων μ-ΣΗΘ σε μακροχρόνια λειτουργία, εξετάζονται δυο βαθμοί αντίστοιχης απόδοσης: 25% και 35%. Ο συμπαραγωγικός βαθμός απόδοσης παραμένει 91%.



Σχήμα 5.24α,β,γ Απεικόνιση των εξεταζόμενων περιπτώσεων αξιολόγησης

- Συνυπολογισμός περιβαλλοντικού οφέλους λόγω αποφυγής κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής.

Ο προσδιορισμός της μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που επιφέρουν οι εξαγωγές της μονάδας μ-ΣΗΘ ηλεκτρισμού στο δίκτυο δεν είναι τετριμμένος (Dorer et al., 2005; Dorer and Weber, 2009). Ο κύριος λόγος είναι η αβεβαιότητα σχετικά με το μίγμα καυσίμου της κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής όταν διαπιστώνεται ηλεκτρικό πλεόνασμα σε οικιακό επίπεδο. Τα αποτελέσματα της ΑΚΖ παρουσιάζονται κατά τέτοιο τρόπο ώστε να είναι εμφανής η

συνεισφορά των εξαγωγών ηλεκτρισμού στη μείωση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

- Μέγεθος και αναλογία ηλεκτρικής-θερμικής απαίτησης.

Εξετάζονται τρεις περιπτώσεις εγκατάστασης (πίνακας 5.13). Εκτός από τις διαφορετικές ενεργειακές απαιτήσεις, η υπόθεση εγκατάστασης των μονάδων σε τρεις διαφορετικές χώρες, επιβάλλει διαφορετικές μέσες θερμοκρασίες περιβάλλοντος (με επίδραση στην εξεργειακή κατανομή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων – Παράρτημα Θ) και το μίγμα κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής (επίδραση στις αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις).

Η περίπτωση αξιολόγησης Α αφορά τη σύγκριση της μονάδας SOFC με το συμβατικό σύστημα. Οι κύριες υποθέσεις καταγράφονται στον πίνακα 5.17. Τα ενεργειακά χαρακτηριστικά των εξεταζόμενων συστημάτων παρουσιάστηκαν στους πίνακες 5.14 και 5.15. Τα τέσσερα σενάρια λειτουργίας παρουσιάζονται στον πίνακα 5.18.

	SOFC Unit	**Standard Case**	**Comments – Data Source**
Domestic installation	FlameSOFC m-CHP unit	Gas boiler	
Load coverage	**Power**: m-CHP output+grid **Heat**: m-CHP output (+heat buffer)	**Power**: grid **Heat**: Gas boiler output (+heat buffer)	
Operation mode	Full capacity operation		
Annual electric import from grid	10% of annual electric load + possible negative balance	100% of annual electric load	Due to the thermally driver operational strategy, some grid import is inevitable, even when an electricity surplus is produced by the FlameSOFC unit.
Thermal losses (storage etc.)	15% of thermal load covered	-	SOFC system will produce 115% of the thermal load covered.

Πίνακας 5.17 Κύριες παραδοχές περίπτωσης αξιολόγησης Α (μονάδα μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC και λέβητας αερίου)

Με βάση τα τεχνικά χαρακτηριστικά, τις ενεργειακές απαιτήσεις και τα σενάρια λειτουργίας, υπολογίζονται οι ετήσιες ώρες λειτουργίας και οι απαιτούμενες συστοιχίες κατά τη διάρκεια ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ (πίνακας 5.19). Λόγω της μεταβολής του καλυπτόμενου ετήσιου θερμικού φορτίου, παρατηρείται αντίστοιχη διαφορά στις ετήσιες ώρες λειτουργίας.

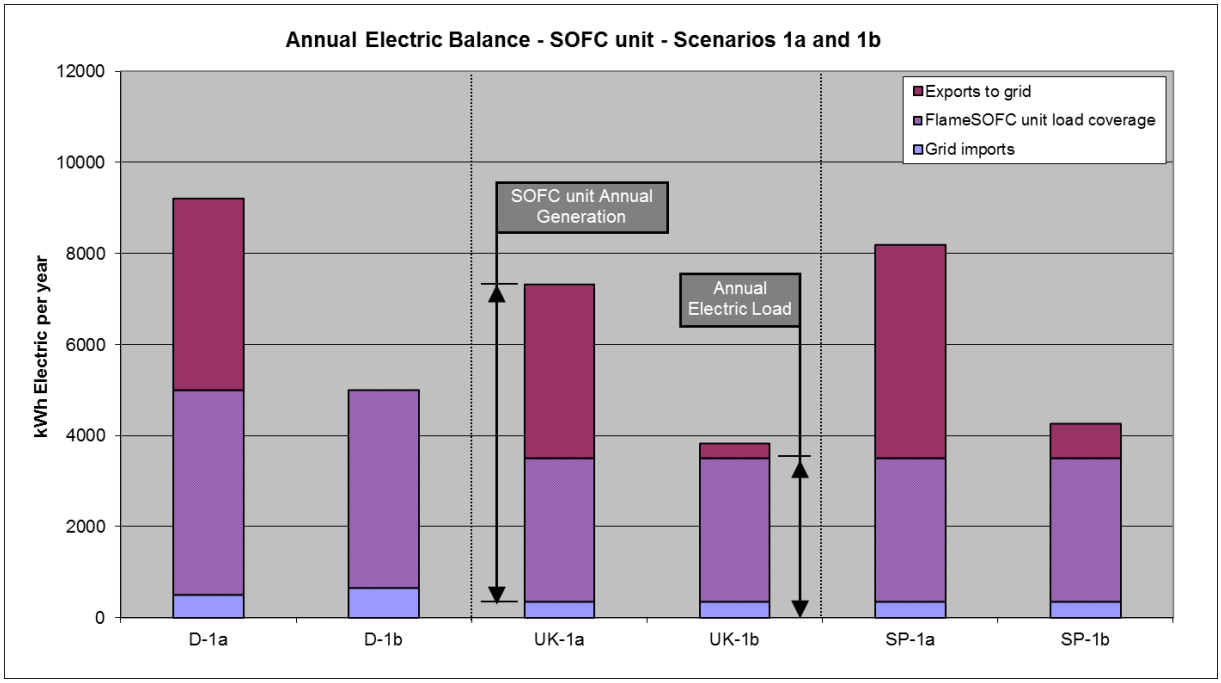
	FlameSOFC unit			
	Scenario 1		Scenario 2	
Annual electric eff.	25%		35%	
	Scenario 1a	**Scenario 1b**	**Scenario 2a**	**Scenario 2b**
Operational target	Full coverage of annual thermal load	Half coverage of annual thermal load	Full coverage of annual thermal load	Half coverage of annual thermal load

Πίνακας 5.18 Εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας συστήματος μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC – Περίπτωση αξιολόγησης Α

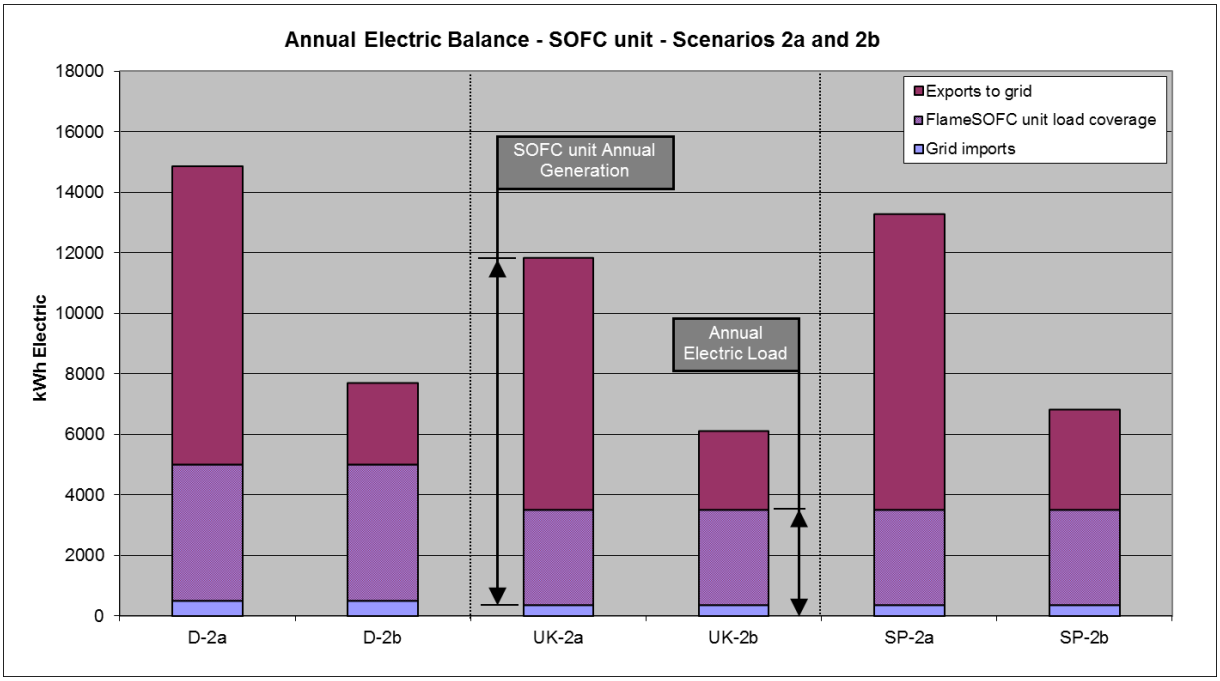
	FlameSOFC unit								Gas boiler
	Scenario 1a		Scenario 1b		Scenario 2a		Scenario 2b		
	Stacks	h/year	Stacks	h/year	Stacks	h/year	Stacks	h/year	h/year
D	2.90	4356	1.45	2178	4.79	7188	2.40	3594	2500
UK		3485		1742		5750		2875	2000
SP		3920		1960		6469		3234	2250

Πίνακας 5.19 Ετήσιες ώρες λειτουργίας και απαιτούμενες συστοιχίες SOFC για τα εξεταζόμενα σενάρια λειτουργίας – Περίπτωση αξιολόγησης Α

Τα ετήσια ηλεκτρικά ισοζύγια υπολογίζονται αξιοποιώντας όλα τα παραπάνω δεδομένα για τις τρεις χώρες που λαμβάνονται υπόψη. Τα αποτελέσματα για τα τέσσερα σενάρια λειτουργίας (πίνακες 5.18 και 5.19) απεικονίζονται στα σχήματα 5.25 και 5.26. Παρατηρείται ότι η λειτουργία κάλυψης των θερμικών φορτίων οδηγεί σε αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής, αυξανόμενης της θερμικής απαίτησης.



Σχήμα 5.25 Ετήσια ηλεκτρικά ισοζύγια μονάδας SOFC για τα σενάρια 1a και 1b, σύμφωνα με τις παραδοχές των πινάκων 5.17, 5.18 και 5.19.



Σχήμα 5.26 Ετήσια ηλεκτρικά ισοζύγια μονάδας SOFC για τα σενάρια 2a και 2b, σύμφωνα με τις παραδοχές των πινάκων 5.17, 5.18 και 5.19.

Σε αντιστοιχία με την περίπτωση αξιολόγησης Α, στον πίνακα 5.20 παρουσιάζονται οι κύριες υποθέσεις για την περίπτωση σύγκρισης των συστημάτων μ-ΣΗΘ (περίπτωση αξιολόγησης Β).

	FlameSOFC Unit	**IC engine**	**Comments – Data Source**
Domestic installation	FlameSOFC m-CHP unit	IC m-CHP engine	-
Load coverage	**Power**: m-CHP output+grid **Heat**: m-CHP output (+heat buffer)		-
Operation mode	Full capacity operation		-
Annual electric import from grid	10% of annual electric load + possible negative balance	5% of annual electric load	Higher nominal electricity output of ICE
Thermal losses (storage etc.)	15% of thermal load covered		Both systems will produce 115% of the thermal load covered.

Πίνακας 5.20 Κύριες παραδοχές περίπτωσης αξιολόγησης Α (μονάδα μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC και μονάδα μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ)

Οι πίνακες 5.21-23 περιέχουν τα αντίστοιχα στοιχεία για την περίπτωση Β, όπως επίσης και το ηλεκτρικό ισοζύγιο για το σύστημα μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ (ICE – Internal Combustion Engine) (Σχήμα 5.27).

	ICE (Ecopower)			
	Scenario 1		Scenario 2	
Annual electric eff.	25%			
	Scenario 1a	**Scenario 1b**	**Scenario 2a**	**Scenario 2b**
Operational target	Full coverage of annual thermal load	Half coverage of annual thermal load	Full coverage of annual thermal load	Half coverage of annual thermal load

Πίνακας 5.21 Εναλλακτικά σενάρια λειτουργίας συστήματος μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ – Περίπτωση αξιολόγησης Β

	FlameSOFC unit							
	Scenario 1a		Scenario 1b		Scenario 2a		Scenario 2b	
	Stacks	h/year	Stacks	h/year	Stacks	h/year	Stacks	h/year
D	3.03	4356	3.03	2178	5.0	7188	5.0	3594
UK		3485		1742		5750		2875
SP		3920		1960		6469		3234

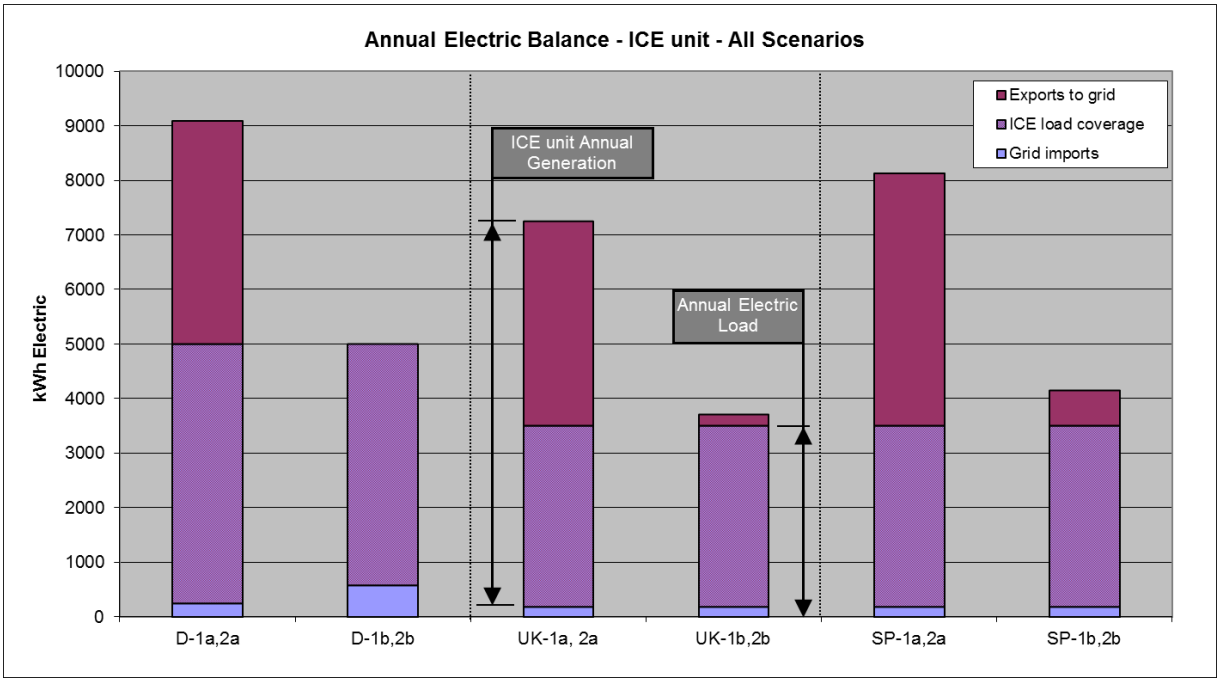
Πίνακας 5.22 Ετήσιες ώρες λειτουργίας και απαιτούμενες συστοιχίες SOFC για τα εξεταζόμενα σενάρια λειτουργίας – Περίπτωση αξιολόγησης Β

	IC Engine			
	Scenario 1a	**Scenario 1b**	**Scenario 2a**	**Scenario 2b**
	h/year	h/year	h/year	h/year
D	2875	1438	2875	1438
UK	2300	1150	2300	1150
SP	2588	1294	2588	1294

Πίνακας 5.23 Ετήσιες ώρες λειτουργίας του συστήματος μ-ΣΗΘ με κινητήρα ΜΕΚ

Τα αποτελέσματα της τεχνικής αξιολόγησης αποτελούν τη βάση για τη μελέτη του σταδίου της λειτουργίας των εξεταζόμενων συστημάτων, κατά την εφαρμογή της ΑΚΖ σε επόμενη παράγραφο.

Ο καθορισμός των τεχνικών κριτηρίων αξιολόγησης και η συμπλήρωση του σχετικού πίνακα αξιολόγησης επιτυγχάνεται μέσω της μεθοδολογίας της παραγράφου §3.2.2. Καθώς εξετάζονται δυο περιπτώσεις αξιολόγησης τα αντίστοιχα τεχνικά κριτήρια και δεδομένα παρουσιάζονται στους πίνακες 5.24 και 5.25. Η περιγραφή των κριτηρίων, όπως και οι σχετικές πηγές παρουσιάζονται στο Παράρτημα Κ. Οι ακραίες τιμές των συστημάτων αναφοράς υπολογίστηκαν με διακύμανση ±5% των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ (κριτήρια CED). Όπως αναλύεται στην παράγραφο 3.2.2, τα δεδομένα καταγράφονται με τη μορφή ασαφών αριθμών.



Σχήμα 5.27 Ετήσια ηλεκτρικά ισοζύγια μονάδας ΜΕΚ για όλα τα σενάρια, σύμφωνα με τις παραδοχές των πινάκων 5.20, 5.22 και 5.23

			ΣΣ (Συμβατικό Σύστημα) (a_1)			μ-ΣΗΘ SOFC (a_2)		
			Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_2)$
Cumulative Energy Demand (CED) ανά kWhel	$\frac{MJ-eq}{kWhel}$	D UK SP	11.97 11.78 11.59	12.60 12.40 12.20	13.23 13.02 12.81	2.05 3.24 2.96	8.44 8.18 7.56	14.83 13.12 12.16
Cumulative Energy Demand (CED) ανά kWhth	$\frac{MJ-eq}{kWhth}$	D UK SP	4.19 4.19 4.19	4.41 4.41 4.41	4.63 4.63 4.63	1.36 1.34 1.20	3.49 3.46 3.32	5.61 5.58 5.43
Τεχνικό ελάχιστο	-		5.0	5.0	5.0	4.0	6.0	6.0
Απόκριση σε μεταβολή φορτίου	kWel/min		(άμεση)	(άμεση)	(άμεση)	0.02	0.05	0.05
Αξιοπιστία	-		5	5	5	2	3	4
Χρόνος ζωής συστήματος	έτη		17.0	20.0	23.0	5.0	7.5	7.5

Πίνακας 5.24 Τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Περίπτωση αξιολόγησης Α

			μ-ΣΗΘ ΜΕΚ (a_1)			μ-ΣΗΘ SOFC (a_2)		
			Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_2)$
Cumulative Energy Demand (CED) ανά kWhel	$\frac{MJ-eq}{kWhel}$	D UK SP	7.40 6.70 6.50	10.95 9.75 9.45	14.50 12.80 12.40	2.05 3.24 2.96	8.44 8.18 7.56	14.83 13.12 12.16
Cumulative Energy Demand (CED) ανά kWhth	$\frac{MJ-eq}{kWhth}$	D UK SP	1.70 1.70 1.50	3.65 3.60 3.45	5.60 5.50 5.40	1.36 1.34 1.20	3.49 3.46 3.32	5.61 5.58 5.43
Σχετική μείωση η_{el} στο 50% των θερμικών kW	%		25.65	27	28.35	6.3	7	7.7
Συγκέντρωση ισχύος	kW/m^2		33.25	35	36.75	4.5	5	7.5
Απόκριση σε μεταβολή φορτίου	kWel/min		0.23	0.25	0.28	0.02	0.05	0.05
Αξιοπιστία	-		3	4	4	2	3	4
Χρόνος ζωής συστήματος	έτη		17.0	20.0	23.0	5.0	7.5	7.5

Πίνακας 5.25 Τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Περίπτωση αξιολόγησης Β

5.5.2.2 Οικονομική αξιολόγηση

Το σκέλος της εκτίμησης της οικονομικής βιωσιμότητας των ανταγωνιστικών συστημάτων καλύπτεται μέσω της αναζήτησης δεδομένων σχετικών με το κόστος εγκατάστασης και το εκτιμώμενο κόστος λειτουργίας και συντήρησης. Η κύρια πηγή των οικονομικών δεδομένων ήταν τα αποτελέσματα της τεχνοοικονομικής ανάλυσης της μονάδας μ-ΣΗΘ που αναπτύχθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού προγράμματος FlameSOFC (FlameSOFC, 2005), ωστόσο αξιοποιήθηκαν και σχετικές πηγές από τη διατιθέμενη βιβλιογραφία (αναλυτική παρουσίαση των πηγών στο Παράρτημα Κ). Οι πίνακες 5.26 και 5.27 συνοψίζουν τα δεδομένα σχετικά με την οικονομική βιωσιμότητα των εξεταζόμενων συστημάτων.

			ΣΣ (Συμβατικό Σύστημα) (a_1)			μ-ΣΗΘ SOFC (a_2)		
			Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_2)$
Κόστος εγκατάστασης	€/kW	D	1900	2000	2100	3351.6	3528	4057.2
		UK	1425	1500	1575	3454.2	3636	4181.4
		SP	1425	1500	1575	3264.2	3436	3951.4
Κόστος ετήσιας συντήρησης και λειτουργίας	€/έτος	D	1072.55	1129	1185.45	567.15	597	686.55
		UK	1217.9	1282	1346.1	775.2	816	938.4
		SP	1804.05	1899	1993.95	1239.75	1305	1500.75
Ευαισθησία ετήσιου κόστους σε αύξηση 20% της τιμής ηλεκτρισμού	%		7.03%	7.40%	7.77%	1.43%	1.50%	1.73%
Ευαισθησία ετήσιου κόστους σε αύξηση 20% της τιμής φυσικού αερίου	%		7.22%	7.60%	7.98%	11.12%	11.70%	13.46%

Πίνακας 5.26 Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Περίπτωση αξιολόγησης Α

			μ-ΣΗΘ ΜΕΚ (a_1)			μ-ΣΗΘ SOFC (a_2)		
			Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_2)$
Κόστος εγκατάστασης	€/kW	D				3351.6	3528	4057.2
		UK	3372.5	3550	3727.5	3454.2	3636	4181.4
		SP				3264.2	3436	3951.4
Κόστος ετήσιας συντήρησης και λειτουργίας	€/έτος	D				567.15	597	686.55
		UK	1380	1453	1525	775.2	816	938.4
		SP				1239.75	1305	1500.75
Ευαισθησία ετήσιου κόστους σε αύξηση 20% της τιμής ηλεκτρισμού	%		4.28%	4.50%	4.73%	1.43%	1.50%	1.73%
Ευαισθησία ετήσιου κόστους σε αύξηση 20% της τιμής φυσικού αερίου	%		9.79%	10.30%	10.82%	11.12%	11.70%	13.46%

Πίνακας 5.27 Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Περίπτωση αξιολόγησης Β.

5.5.2.3 Περιβαλλοντική αξιολόγηση

Η εκτίμηση των δεικτών που αφορούν την περιβαλλοντική επίδοση των ανταγωνιστικών συστημάτων επιτυγχάνεται αναλύοντας κάθε στάδιο του κύκλου ζωής ξεχωριστά μέσω της μεθοδολογίας που περιγράφεται στην παράγραφο 3.2.2.2 και αναπαρίσταται στο σχήμα 3.4.

Κατασκευή Συστημάτων

Κατά τη μελέτη του πρώτου σταδίου επιδιώκεται ο υπολογισμός των συνολικών εκπομπών ρύπων που οφείλονται στην εξόρυξη - μεταφορά των απαιτούμενων πρώτων υλών. Αξιοποιούνται τα στοιχεία του παραρτήματος Ι, προκειμένου να διατυπωθούν τα αντίστοιχα διαγράμματα δικτύου εφοδιασμού για τα υλικά κατασκευής. Στο σχήμα 4.18 της παραγράφου 4.4.2.3 παρουσιάζεται ενδεικτικό διάγραμμα δικτύου εφοδιασμού που αφορά την παραγωγή 1kg χάλυβα.

Η αδυναμία συγκέντρωσης λεπτομερών στοιχείων σχετικών με τις ενεργειακές καταναλώσεις, τις εκπομπές ρύπων και τις απώλειες υλικών για κάθε ένα από τα δομικά στοιχεία της μονάδας SOFC, οδήγησε στην αξιοποίηση στοιχείων και υποθέσεων από σχετικές πηγές (Little, 1999; Karakoussis et al., 2001; Zapp, 1996; Inframat, 2006) και από εμπορικές βάσεις δεδομένων AKZ (Ecoinvent, 2009; IDEMAT, 2001).

Οι βασικές υποθέσεις που κρίθηκαν αναγκαίες για τη μονάδα SOFC ήταν οι εξής:

- Υποσύστηματα 1, 3 και 4 (§5.5.1)

Απαιτούμενη ενέργεια (ηλεκτρική) για κατασκευή: 5% για παραγωγή των αντίστοιχων. Απώλειες υλικών κατά την κατασκευή: 15% του αντίστοιχου βάρους στο υποσύστημα. υλικών) (Karakoussis et al., 2001).

- Υποσύστημα 2 (§5.5.1)

Απαιτούμενη ενέργεια κατασκευής και απώλειες υλικών για τα ηλεκτρονικά ισχύος: (Ecoinvent, 2009). Σχετικά με τη συστοιχία SOFC, προσαρμόστηκαν τα στοιχεία από την βάση δεδομένων Ecoinvent, βάσει των διαδικασιών παραγωγής που περιγράφονται στις σχετικές πηγές (Little, 1999; Karakoussis et al., 2001; Zapp, 1996).

Όσον αφορά τα συστήματα αναφοράς, τα αντίστοιχα στοιχεία ανακτήθηκαν από την βάση δεδομένων AKZ (Ecoinvent, 2009).

Λειτουργία

Το στάδιο της λειτουργίας του κύκλου ζωής των εξεταζόμενων συστημάτων αναλύεται στην προηγούμενη παράγραφο της τεχνικής αξιολόγησης. Όσον αφορά τις λειτουργικές εκπομπές, οι σχετικοί συντελεστές εκπομπών για τη μονάδα SOFC παρουσιάζονται στον πίνακα 5.14.

Η ταυτόχρονη παραγωγή δυο ενεργειακών «προϊόντων» κατά τη συμπαραγωγή μπορεί να προσεγγιστεί μέσω της αντίστοιχης κατανομή των εκπομπών (βλ. §3.2.2 – Προσαρμογή και εφαρμογή μεθόδου AKZ).

	Exergetic allocation factors			
	Scenario 1		**Scenario 2**	
	Electric AF_{el}	Thermal AF_{th}	Electric AF_{el}	Thermal AF_{th}
DE	0.746	0.254	0,829	0,171
UK	0.750	0.250	0,832	0,168
SP	0.774	0.226	0,850	0,150

Πίνακας 5.28 Εξεργειακοί συντελεστές κατανομής επιπτώσεων σε ηλεκτρική και θερμική kWh

Η εφαρμογή εξεργειακής κατανομής (αναλυτικές εξισώσεις στο Παράρτημα Θ) αποδίδει τους συντελεστές κατανομής του πίνακα 5.28. Τα απαραίτητα δεδομένα για την εφαρμογή είναι: (α) Θερμοκρασία περιβάλλοντος (πίνακας 5.13), (β) Θερμοκρασίες εξόδου (80 °C) και επιστροφής (30 °C) (αφορούν την αποκομιδή θερμότητας – Heat recovery – Υποσύστημα «Ι» στο σχήμα 5.21) και (γ) Βαθμοί ηλεκτρικής και θερμικής απόδοσης (πίνακες 5.14 και 5.16). Παρατηρούνται μικρές διαφορές ανά χώρα, που οφείλονται στις διαφορετικές θερμοκρασίες περιβάλλοντος (πίνακας 5.13). Η αυξημένη κατανομή στην ηλεκτρική kWh κατά το σενάριο 2 αποδίδεται στον μεγαλύτερο λόγο παραγωγής ηλεκτρισμού προς θερμότητα (πίνακας 5.18).

Οι συντελεστές εκπομπών για τα συστήματα αναφοράς παρουσιάζονται στους πίνακες 5.15 και 5.16, ενώ οι εξεργειακοί συντελεστές κατανομής του πίνακα 5.28 ισχύουν και για το σύστημα μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ.

Απόσυρση

Το τελικό στάδιο ζωής της απόσυρσης των συστημάτων προσεγγίστηκε κατά ένα γενικό τρόπο, στοχεύοντας στην ποσοτικοποίηση των οφελών από την ανάκτηση υλικών. Η έλλειψη σαφών στρατηγικών ανακύκλωσης από κατασκευαστές συστοιχιών και σχετικών δεδομένων καθιστά μη εφικτή μια λεπτομερή μελέτη ανακύκλωσης. Με βάση τα στοιχεία περί χρησιμοποίησης υλικών για την κατασκευή του συστήματος μ-ΣΗΘ SOFC, γίνεται η υπόθεση οτι ανακτάται ένα ποσοστό της τάξης του 90% των πλέον χρησιμοποιηθέντων υλικών. Οι απώλειες υλικών κατά την κατασκευή θεωρείται οτι ανακυκλώνονται στο σύνολό τους. Ακολουθείται η υπόθεση της ανάκτησης «ανοιχτού βρόχου» (βλ. §4.4.2.3), όπου τα ανακτώμενα υλικά αποτρέπουν αντίστοιχη πρωτογενή εξόρυξη, χωρίς να επανατροφοδοτούνται στην διαδικασία κατασκευής των συστημάτων, μειώνοντας την αρχικά απαιτούμενη ποσότητα. Το ποσοστό των υλικών το οποίο υποτίθεται ότι δεν ανακτάται, χαρακτηρίζεται ως αδρανές υλικό και οδεύει προς απόθεση.

Ο πίνακας 5.29 περιέχει τα στοιχεία σχετικά με τα υλικά και τις αντίστοιχες τις ποσότητες που ανακτώνται μετά το τέλος ζωής της μονάδας SOFC. Το στάδιο της ανάκτησης υλικών για τα συστήματα αναφοράς δεν λήφθηκε υπόψη, λόγω μικρής αναμενόμενης συνεισφοράς.

Ενδιάμεσα αποτελέσματα συλλογής – επεξεργασίας δεδομένων κύκλου ζωής.

Το αποτέλεσμα της συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων σχετικά με τα στάδια του κύκλου ζωής των συστημάτων αποτελείται από:

- Τις εισροές σε ενέργεια και υλικά για το σύνολο των σταδίων του κύκλου ζωής των συστημάτων. Οι κυριότερες εισροές που αντιστοιχούν σε παραγωγή μιας ηλεκτρικής και μιας θερμικής kWh απεικονίζονται στο Παράρτημα Λ για τρία εξεταζόμενα συστήματα για την περίπτωση εφαρμογής της Γερμανίας. Στο σύστημα μ-ΣΗΘ παρουσιάζονται οι συνολικές εισροές για τα δυο σενάρια βαθμών ηλεκτρικής απόδοσης. Οι αρνητικές τιμές σε κάποια

υλικά/μορφές ενέργειας οφείλονται στην αποφυγή κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής και των συνεπαγόμενων εισροών.

- Τις αναλυτικές εκπομπές ρύπων, συνοδευόμενες από σαφή καταγραφή της προέλευσής τους και ταξινομημένες ανά στάδιο κύκλου ζωής. Οι κυριότερες αέριες και υδάτινες εκπομπές ανά παραγόμενη kWh των ανταγωνιστικών κύκλων ζωής απεικονίζονται στο Παράρτημα Λ.

Amount of FlameSOFC unit materials for recycling				
Material	Recycled (kg)	Manufacturing loss (kg)	Total (kg)	Reference for data on energy demand and emissions of recycling
Stainless Steel	158.5	25.0	183.5	SimaPRO 7 LCA Databases
Cast Iron	2.7	0.5	3.2	
Chrome Alloy	32.9	5.5	38.4	
Copper	5.0	0	5.0	
Aluminum	4.9	0.6	5.5	
Plastic	2.7	0.5	3.2	
Recovery of selected materials: 90%		Total recycled weight (kg)	238.6	
		% of used material	93.7%	

Πίνακας 5.29 Μάζα πρώτων υλών που θεωρείται οτι ανακυκλώνεται

Τελικά αποτελέσματα – Κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Προκειμένου να επιτευχθεί η μετάβαση από τις εκπομπές σε δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, χρησιμοποιούνται οι μεθοδολογίες και οι κατηγορίες επιπτώσεων του πίνακα 5.30.

Μέσω των μεθοδολογιών εκτίμησης επιπτώσεων επιλέγονται οι εκπομπές που αφορούν την εκάστοτε κατηγορία (π.χ. οι εκπομπές CH4 συνδέονται με τον δείκτη GWP και όχι με τον AP) και η συνεισφορά τους ανάγεται μέσω αντίστοιχων συντελεστών σε κατάλληλη μονάδα αναφοράς (Παράρτημα Ζ). Η επιλογή των συγκεκριμένων μεθοδολογιών έγινε βάσει των κριτηρίων που αναλύονται στην παράγραφο §3.2.2.2. Συγκριτικά με τον πίνακα 4.12 της μελέτης περίπτωσης του κεφαλαίου 4, δεν επιλέχθηκε η κατηγορία Εξάντλησης Ορυκτών Πόρων (Minerals Depletion Potential-MDP), λόγω παραπλήσιου βάρους και χρήσης υλικών των συστημάτων που εξετάζονται.

Μεθοδολογία Εκτίμησης Επιπτώσεων	Μονάδες	Κατηγορία Επιπτώσεων	Περιγραφή
Energy Demand (Frischknecht et al., 2003)	$\frac{MJ-eq}{kWh}$	Αθροιστική Ενεργειακή Απαίτηση – Cumulative Energy Demand (CED)	Το άθροισμα της απαιτούμενης ενέργειας για εξαγωγή πρώτων υλών, μεταφορά, κατασκευή και συναρμολόγηση μονάδας, παροχή καυσίμου και ανάκτηση υλικών.
	$\frac{MJ-eq}{kWh}$	Ενεργειακή Απαίτηση Ορυκτών Καυσίμων – Fossil Energy Demand (FED)	Η απαιτούμενη ενέργεια που προέρχεται από ορυκτά καύσιμα.
EPD 2007 (Environdec, 2007)	$\frac{grCO_2-eq}{kWh}$	Δυναμικό Φαινομένου Θερμοκηπίου – Global Warming Potential (GWP)	Η δυνατότητα ορισμένων αερίων εκπομπών να σωρεύουν θερμότητα που ανακλάται από τη Γη.
	$\frac{grSO_2-eq}{kWh}$	Δυναμικό Οξίνισης – Acidification Potential (AP)	Η επίδραση εκπομπών οξειδίου του αζώτου και θείου μέσω φθοράς οικοσυστημάτων, μόλυνση εδαφών και επιπλοκών υγείας.

Πίνακας 5.30 Μεθοδολογίες Εκτίμησης και αντίστοιχες κατηγορίες επιπτώσεων που χρησιμοποιήθηκαν.

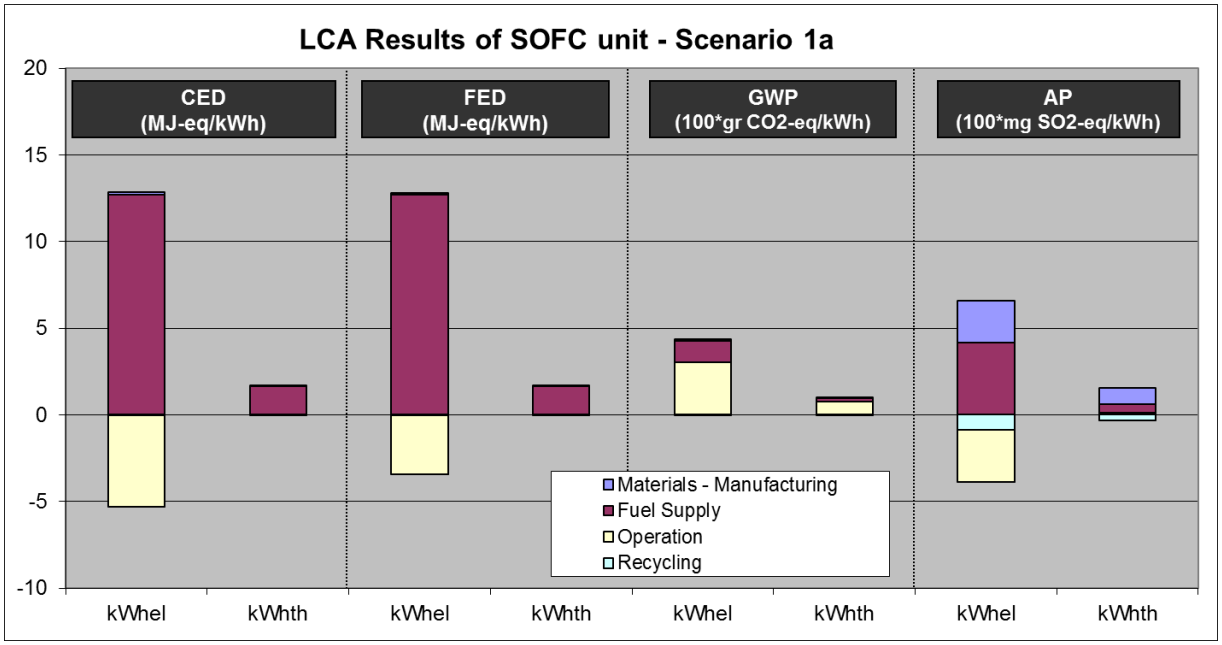
Συνεισφορά επιμέρους σταδίων ζωής στις συνολικούς δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η συνεισφορά των επιμέρους σταδίων του κύκλου ζωής της μονάδας SOFC για το σενάριο 1α (χαμηλή ηλεκτρική αποδοτικότητα και πλήρης κάλυψη θερμικού φορτίου) παρουσιάζονται στο σχήμα 5.28. Για λόγους οικονομίας χώρου τα αναλυτικά διαγράμματα για κάθε περίπτωση εφαρμογής παρατίθενται στο παράρτημα Μ. Σημειώνεται οτι στο σχήμα 5.28 έχει συνυπολογιστεί η μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων λόγω εξαγωγών ηλεκτρισμού στο δίκτυο (αρνητικές τιμές δεικτών). Προκειμένου να παρουσιαστούν όλοι οι δείκτες σε ένα διάγραμμα, επιλέχθηκε κατάλληλη κλιμάκωση.

Η αλυσίδα παροχής φυσικού αερίου αποτελεί το πλέον ενεργοβόρο στάδιο (δείκτες CED και FED), τη στιγμή που οι εξαγωγές στο δίκτυο επιφέρουν σημαντικές ελαφρύνσεις σε όλες σχεδόν τις κατηγορίες επιπτώσεων.

Το στάδιο της λειτουργίας αποδίδει την πλειονότητα των εκπομπών «θερμοκηπίου», με την αλυσίδα εξόρυξης και παραγωγής να συνεισφέρει επίσης κατά 125 gr CO_2-eq ανά kWhel και 15gr ανά kWhth. Οι μειωμένες εκπομπές NOx και SO2 της λειτουργίας της μονάδας SOFC συγκριτικά με την κεντρική ηλεκτροπαραγωγή και οι εξαγωγές ηλεκτρισμού οδηγούν στο αντίστοιχο αρνητικό πρόσημο του δείκτη AP. Καταγράφεται η συνεισφορά του σταδίου εξόρυξης πρώτων υλών – κατασκευής της μονάδας SOFC, λόγω της εκτεταμένης χρήσης νικελίου και χρωμίου (η εξόρυξη των οποίων συνδέεται με εκπομπές στο δείκτη AP). Η αποφυγή εκπομπών NOx και SO2 (προερχόμενες από πρωτογενή εξόρυξη Ni και Cr) που

επιτυγχάνεται μέσω ανάκτησης υλικών, επιδρά θετικά μειώνοντας το συνολικό αντίστοιχο δείκτη.



Σχήμα 5.28 Αποτελέσματα ΑΚΖ της μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC - Σενάριο 1a: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Πλήρης κάλυψη ετήσιου θερμικού φορτίου.

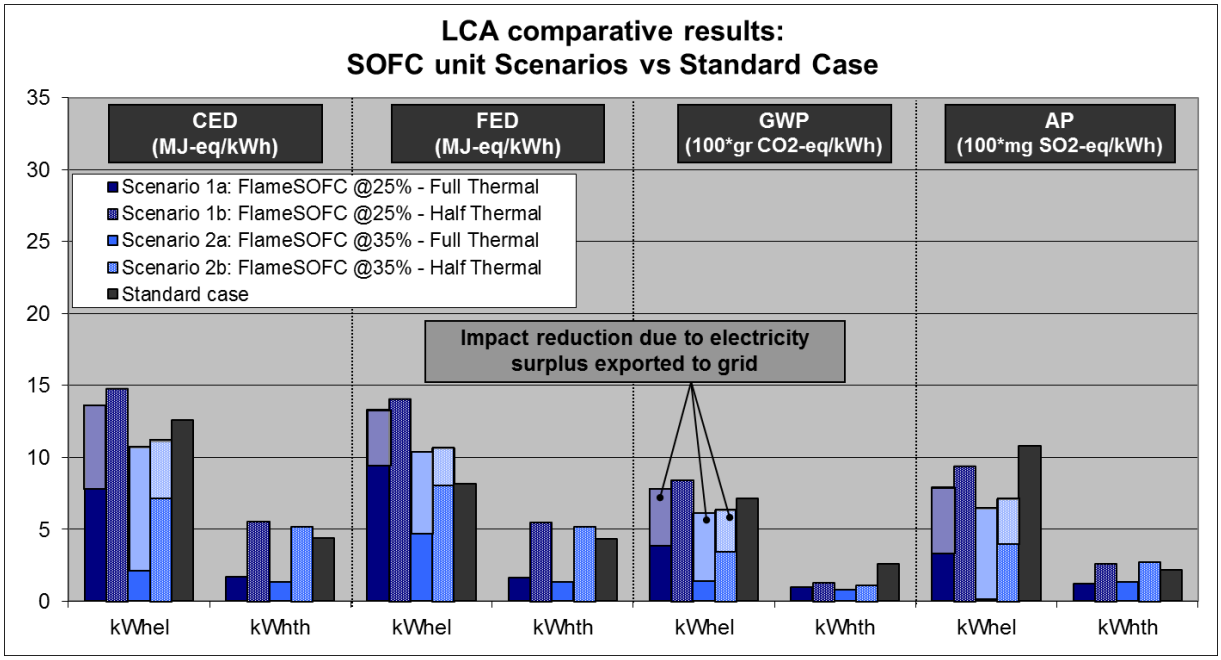
Όσον αφορά τα αποτελέσματα της ΑΚΖ για τα συστήματα αναφοράς, οι περιβαλλοντικοί δείκτες του συμβατικού συστήματος απεικονίζονται στο συγκριτικό διάγραμμα του σχήματος 5.29 και οι αντίστοιχοι του συστήματος μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ στο συγκριτικό διάγραμμα του σχήματος 5.30 (αναλυτικά στο Παράρτημα Μ).

Περίπτωση αξιολόγησης Α: Συγκριτική αξιολόγηση συστήματος μ-ΣΗΘ συστοιχίας SOFC με συμβατική περίπτωση κάλυψης και ηλεκτρικών αναγκών

Η σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των κύκλων ζωής της μονάδας SOFC (μπλε και γαλάζιες ράβδοι) με το συμβατικό σύστημα (γκρι μπάρα στα δεξιά) παρουσιάζεται στο σχήμα 5.29. Με βαθύ μπλε απεικονίζονται οι περιβαλλοντικοί δείκτες του σεναρίου χαμηλής ηλεκτρικής αποδοτικότητας (Σενάριο 1), ενώ με γαλάζιο οι αντίστοιχοι δείκτες του Σεναρίου 2. Οι ράβδοι με διάστικτο χρώμα αντιστοιχούν σε κάλυψη του μισού ετήσιου θερμικού φορτίου από τη μονάδα SOFC.

Προκειμένου να καταδειχθεί η επίδραση των εξαγωγών ηλεκτρισμού στο δίκτυο, μια αχνή περιοχή σε κάθε ράβδο απεικονίζει τη σχετική μείωση των περιβαλλοντικών δεικτών της ηλεκτρικής kWh. Η ακριβής ποσοτικοποίηση της μείωσης των επιπτώσεων δε θεωρείται απλή, καθώς υπάρχει αβεβαιότητα για το ποιό είναι το μίγμα πρωτογενούς ενέργειας (άρα και εκπομπών) της κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής τα χρονικά διαστήματα όπου επισυμβαίνουν εξαγωγές. Το περιβαλλοντικό όφελος που παρουσιάζεται στο σχήμα 5.29 αφορά το σύστημα

ηλεκτροπαραγωγής της Γερμανίας (αναλυτικά διαγράμματα και για τις υπόλοιπες δυο χώρες στο Παράρτημα Μ).



Σχήμα 5.29 Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ: Σύστημα μ-ΣΗΘ με SOFC και συμβατικό σύστημα – Χώρα αναφοράς: Γερμανία

Η γενική εικόνα των αποτελεσμάτων αναδεικνύει τη σημασία των παραμέτρων που επιλέχθηκαν, τόσο το εύρος κάλυψης του θερμικού φορτίου, όσο και τον ηλεκτρικό βαθμό απόδοσης.

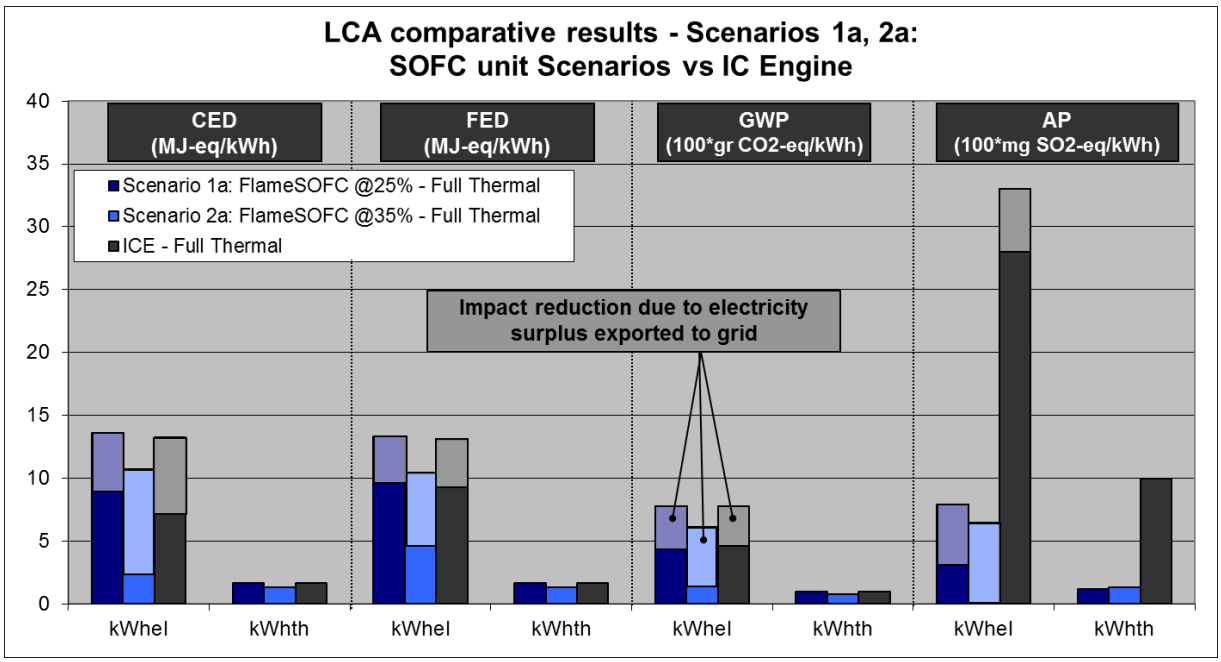
Σε όλες τις περιπτώσεις που εξετάστηκαν, η κάλυψη του μισού θερμικού φορτίου αποδίδει χειρότερη περιβαλλοντική απόδοση για το ηλεκτρικό σκέλος, αφού παράγονται λιγότερες kWhel, στις οποίες είναι ανηγμένοι οι αντίστοιχοι δείκτες. Επιπρόσθετα, λόγω μειωμένης ηλεκτροπαραγωγής του συστήματος μ-ΣΗΘ, μειώνεται η αντίστοιχη θετική επίδραση των εξαγωγών στο δίκτυο. Επίσης εξαιτίας της μείωσης της παραγωγής θερμικών kWh, παρατηρείται αύξηση και στους δείκτες που αναφέρονται στο θερμικό σκέλος (συνυπολογίζεται η συνεισφορά του καυστήρα αερίου, του οποίου οι εκπομπές ανάγονται στη λειτουργική μονάδα, που είναι η θερμική παραγωγή της μονάδας μ-ΣΗΘ). Συμπεραίνεται η θετική επίδραση της κάλυψης (εί δυνατόν) του συνόλου του θερμικού φορτίου από το σύστημα μ-ΣΗΘ.

Η λειτουργία του συστήματος SOFC με ηλεκτρική απόδοση 35% είναι ικανή σε αρκετές περιπτώσεις να παρέχει καλύτερη περιβαλλοντική επίδοση από το συμβατικό σύστημα. Συγκεκριμένα, μειώθηκαν δραστικά οι ενεργειακοί δείκτες (CED και FED), όπως και ο GWP. Αν συνυπολογιστεί και το όφελος λόγω εξαγωγών, η βελτίωση είναι καθολική. Ο δείκτης όξινων εκπομπών αποτελεί (AP) την πλέον ευνοϊκή περίπτωση για το σύστημα SOFC, που βελτιώνεται περαιτέρω μέσω του αυξημένου ηλεκτρικού βαθμού απόδοσης.

Περίπτωση αξιολόγησης Β: Σύγκριση με ανταγωνιστικό σύστημα μ-ΣΗΘ (ΜΕΚ).

Τα αντίστοιχα συγκριτικά αποτελέσματα της περίπτωσης αξιολόγησης Β παρουσιάζονται στο σχήμα 5.30. Δεν κρίθηκε σκόπιμη η απεικόνιση των αποτελεσμάτων της σύγκρισης σε μερικό φορτίο (σενάρια 1β, 2β), καθώς και οι δυο μονάδες μ-ΣΗΘ επηρεάζονται με τον ίδιο τρόπο.

Τα συμπεράσματα από τη σύγκριση των δυο μονάδων μ-ΣΗΘ είναι πιο άμεσα από την προηγούμενη περίπτωση. Οι παράμετροι που επηρεάζουν κατά κύριο λόγο την περιβαλλοντική σύγκριση είναι αφενός η δυνατότητα του συστήματος SOFC να επιτύχει ηλεκτρικές αποδοτικότητες της τάξης του 35% και οι εκπομπές NOx λόγω καύσης στη μηχανή ΜΕΚ. Λόγω του - εν δυνάμει - αυξημένου βαθμού απόδοσης, η μονάδα SOFC απαιτεί λιγότερη πρωτογενή ενέργεια (με αντίκτυπο στους δείκτες CED και FED), αποδίδοντας μειωμένες εκπομπές CO2.



Σχήμα 5.30 Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ: Συστήματα μ-ΣΗΘ με SOFC και ΜΕΚ. Σενάρια 1a, 2a

Η αποφυγή λειτουργικών εκπομπών NOx λόγω ηλεκτροχημικής μετατροπής ευθύνεται για τη χαρακτηριστική διαφορά στο δείκτη AP. Παρουσιάζεται επίσης η θετική επιρροή των εξαγωγών ηλεκτρισμού στο δίκτυο, αλλά δεν αποτελεί κρίσιμο παράγοντα, καθώς επιδρά στα δυο συστήματα με κοινό τρόπο. Σε κάθε περίπτωση, επωφελείται περισσότερο η μονάδα SOFC υψηλής ηλεκτρικής αποδοτικότητας, καθώς παράγει (και κατά συνέπεια εξάγει) περισσότερες kWhel.

Κύρια ευρήματα

Η σύνοψη των κυρίων ευρημάτων της συγκριτικής ανάλυσης των κύκλων ζωής των τριών συστημάτων κάλυψης οικιακών ενεργειακών αναγκών έχει ως εξής:

- Συνεισφορά σταδίων κύκλου ζωής στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις του συστήματος SOFC:
  - Σχεδόν το σύνολο της ενεργειακής απαίτησης (δείκτες CED και FED) αφορά την αλυσίδα εξόρυξης, παραγωγής και μεταφοράς φυσικού αερίου, η οποία συνεισφέρει σημαντικά και στις εκπομπές «θερμοκηπίου».
  - Το στάδιο της λειτουργίας είναι σε θέση να παράγει καθοριστικά οφέλη, μέσω των εξαγωγών ηλεκτρισμού στο δίκτυο. Επίσης, η ηλεκτροχημική μετατροπή στην κυψέλη SOFC εκπέμπει ελάχιστους «όξινους» ρύπους που επηρεάζουν την κατηγορία επιπτώσεων AP.
  - Η συνεισφορά της παραγωγής υλικών και κατασκευής μονάδας γίνεται αισθητή μόνο στο δείκτη Acidification Potential, λόγω έντονης χρήσης κραμάτων νικελίου και χρωμίου.
  - Τα οφέλη της ανάκτησης υλικών είναι άμεσα συνδεδεμένα με το στάδιο υλικών-κατασκευής, καθώς ισοσκελίζουν – κατά ένα ποσοστό – τις αντίστοιχες επιπτώσεις.
- Επίδραση παραμέτρων:
  - Η κάλυψη του μισού ετήσιου θερμικού φορτίου προκαλεί μειωμένη χρησιμοποίηση της μονάδας SOFC (ετήσιες ώρες λειτουργίας), έχοντας ως θετικό αντίκτυπο την απαίτηση λιγότερου αριθμού συστοιχιών στο χρόνο ζωής του συστήματος. Ωστόσο οι μειωμένες ώρες λειτουργίας επιδρούν αρνητικά σε όλες τις κατηγορίες επιπτώσεων, καθώς είναι ανηγμένες στη συνολική ηλεκτροπαραγωγή. Επιπρόσθετα, μειώνονται ή εκμηδενίζονται οι θετικές επιπτώσεις των εξαγωγών στο ηλεκτρικό δίκτυο.
  - Στον αντίποδα, η λειτουργία με αυξημένο βαθμό ηλεκτρικής απόδοσης επιδρά θετικά σε όλους τους δείκτες. Λόγω του μικρότερου βαθμού θερμικής απόδοσης αυξάνονται οι ετήσιες ώρες λειτουργίας και απαιτούνται περισσότερες συστοιχίες, παράλληλα όμως αναμένεται ραγδαία αύξηση της ηλεκτροπαραγωγής και των συνεπαγόμενων εξαγωγών στο δίκτυο.
- Περίπτωση αξιολόγησης Α: Συγκριτική αξιολόγηση συστήματος μ-ΣΗΘ συστοιχίας SOFC με συμβατική περίπτωση κάλυψης και ηλεκτρικών αναγκών

Η σύγκριση του συστήματος SOFC με το συμβατικό αναδεικνύει τη δυνατότητα μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, δεδομένου οτι:

  - Ο βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης της μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC είναι τουλάχιστον 30%
  - Η μονάδα SOFC καλύπτει τουλάχιστον 60-70% του ετήσιου θερμικού φορτίου.

Ως μειονεκτήματα της μονάδας SOFC καταγράφεται αφενός η αποκλειστική τροφοδοσία με φυσικό αέριο, το οποίο ως ορυκτό καύσιμο αυξάνει το δείκτη FED και αφετέρου η εκτεταμένη χρήση ορυκτών πόρων όπως Ni και Cr, των οποίων η εξόρυξη συνδέεται με

όξινες εκπομπές. Ο συνυπολογισμός του υπαρκτού μεν, ασαφούς δε περιβαλλοντικού οφέλους λόγω αποφυγής κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής βελτιώνει σημαντικά την εικόνα της μονάδας SOFC.

- Περίπτωση αξιολόγησης Β: Σύγκριση με ανταγωνιστικό σύστημα μ-ΣΗΘ (ΜΕΚ).

Η συγκριτική αξιολόγηση των δυο συστημάτων μ-ΣΗΘ είναι πιο άμεση από την περίπτωση Α, καθώς πρόκειται για συστήματα με παρόμοια λειτουργία. Δυο είναι οι κυριότεροι παράγοντες που καθιστούν το σύστημα μ-ΣΗΘ ανώτερο με περιβαλλοντικούς όρους:

- Η δυνατότητα αυξημένων ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης οδηγεί στην κατανάλωση λιγότερης πρωτογενούς ενέργειας και σε μειωμένες εκπομπές CO2 ανά παραγόμενη kWh.
- Οι ελάχιστες εκπομπές NOx κατά τη λειτουργία της μονάδας SOFC αντιστοιχούν σε κατά πολύ μικρότερο αντίστοιχο δείκτη επιπτώσεων (AP), συγκριτικά με το σύστημα με ΜΕΚ.

Καθώς και τα δυο συστήματα εξάγουν το ηλεκτρικό πλεόνασμα στο δίκτυο, ο συνυπολογισμός του αντίστοιχου περιβαλλοντικού οφέλους δεν επιδρά σημαντικά στα συγκριτικά αποτελέσματα.

Πίνακες περιβαλλοντικών κριτηρίων

Με βάση τα αποτελέσματα της ΑΚΖ συμπληρώνονται οι πίνακες των περιβαλλοντικών κριτηρίων (5.31 και 5.32), αντίστοιχα με τους πίνακες 5.24-27. Οι κατώτατες και ανώτατες τιμές για το σύστημα SOFC αντιστοιχούν στις ακραίες τιμές των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ για τα σενάρια που εξετάστηκαν. Οι ακραίες τιμές των συστημάτων αναφοράς υπολογίστηκαν με διακύμανση ±5% των αποτελεσμάτων της ΑΚΖ.

			ΣΣ (Συμβατικό Σύστημα) (a_1)			μ-ΣΗΘ SOFC (a_2)		
			Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_2)$
Global Warming Potential (GWP) ανά kWhel	$\frac{grCO2-eq}{kWhel}$	D	680.2	716	751.8	118.1	482.35	846.6
		UK	646	680	714	202.7	475.15	747.6
		SP	560.5	590	619.5	237.7	470.65	703.6
Global Warming Potential (GWP) ανά kWhth	$\frac{grCO2-eq}{kWhth}$	D	245.1	258	270.9	77.6	106.05	134.5
		UK	245.1	258	270.9	76	104.4	132.8
		SP	245.1	258	270.9	68.5	96.3	124.1
Acidification Potential (AP) ανά kWhel	$\frac{grSO2-eq}{kWhel}$	D	1.03	1.08	1.13	-0.1	0.43	0.95
		UK	2.29	2.41	2.53	-0.75	0.03	0.8
		SP	5.34	5.62	5.90	-2.83	-1.32	0.2
Acidification Potential (AP) ανά kWhth	$\frac{grSO2-eq}{kWhth}$	D	0.21	0.22	0.23	0.13	0.2	0.27
		UK	0.21	0.22	0.23	0.13	0.17	0.2
		SP	0.21	0.22	0.23	0.13	0.20	0.26
Fossil Energy Demand (FED) ανά kWhel	$\frac{MJ-eq}{kWhel}$	D	7.76	8.17	8.58	4.8	9.45	14.1
		UK	8.42	8.86	9.30	5.2	9.05	12.9
		SP	7.00	7.37	7.74	5.9	9.2	12.5
Fossil Energy Demand (FED) ανά kWhth	$\frac{MJ-eq}{kWhth}$	D	4.12	4.34	4.56	1.3	3.45	5.6
		UK	4.12	4.34	4.56	1.3	3.4	5.5
		SP	4.12	4.34	4.56	1.2	3.3	5.4

Πίνακας 5.31 Περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Αποτελέσματα ΑΚΖ - Περίπτωση αξιολόγησης Α

			μ-ΣΗΘ ΜΕΚ (a_1)			μ-ΣΗΘ SOFC (a_2)		
			Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_1)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_1)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_1)$	Κατώτατη τιμή $f_{i,l}(a_2)$	Κεντρική τιμή $f_{i,m}(a_2)$	Ανώτατη τιμή $f_{i,r}(a_2)$
Global Warming Potential (GWP) ανά kWhel	$\frac{grCO2-eq}{kWhel}$	D	449.1	651.6	854.1	118.1	482.35	846.6
		UK	422.1	590.1	758.1	202.7	475.15	747.6
		SP	458.1	587.6	717.1	237.7	470.65	703.6
Global Warming Potential (GWP) ανά kWhth	$\frac{grCO2-eq}{kWhth}$	D	100.8	119.2	137.6	77.6	106.05	134.5
		UK	99	117.4	135.8	76	104.4	132.8
		SP	90	108.35	126.7	68.5	96.3	124.1
Acidification Potential (AP) ανά kWhel	$\frac{grSO2-eq}{kWhel}$	D	2.8	3.1	3.4	-0.1	0.43	0.95
		UK	2.1	2.7	3.3	-0.75	0.03	0.8
		SP	0.2	1.45	2.7	-2.83	-1.32	0.2
Acidification Potential (AP) ανά kWhth	$\frac{grSO2-eq}{kWhth}$	D	1	1.05	1.1	0.13	0.2	0.27
		UK	1	1.05	1.1	0.13	0.17	0.2
		SP	0.9	0.95	1	0.13	0.20	0.26
Fossil Energy Demand (FED) ανά kWhel	$\frac{MJ-eq}{kWhel}$	D	9.3	11.6	13.9	4.8	9.45	14.1
		UK	8.4	10.6	12.8	5.2	9.05	12.9
		SP	9.1	10.75	12.4	5.9	9.2	12.5
Fossil Energy Demand (FED) ανά kWhth	$\frac{MJ-eq}{kWhth}$	D	1.7	3.6	5.5	1.3	3.45	5.6
		UK	1.6	3.6	5.6	1.3	3.4	5.5
		SP	1.5	3.45	5.4	1.2	3.3	5.4

Πίνακας 5.32 Περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης των εξεταζόμενων συστημάτων – Αποτελέσματα AKZ - Περίπτωση αξιολόγησης Β

5.5.3 Συνδυασμός επιμέρους αξιολογήσεων

Η μεθοδολογία συνδυασμού των επιμέρους αξιολογήσεων της παραγράφου 5.4.2 περιγράφεται αναλυτικά στο 3ο κεφάλαιο (παράγραφος 3.2.3). Ειδικότερα, ακολουθείται το διάγραμμα ροής του σχήματος 3.6, το οποίο αφορά την περίπτωση εφαρμογής σε συνθήκες πλήρους αβεβαιότητας καθορισμού υποκειμενικότητας. Σε αντίθεση με την μελέτη περίπτωσης του κεφαλαίου 4, οι συντελεστές βαρών των κριτηρίων δεν θεωρούνται εκ των προτέρων γνωστοί. Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση του εύρους διακύμανσης των κριτηρίων, η προτεινόμενη μεθοδολογία εφαρμόζεται και για τις δυο περιπτώσεις αξιολογήσεων (Α και Β) για τρία σενάρια, με βάση το πόσο ευνοϊκά είναι τα αντίστοιχα δεδομένα για το σύστημα SOFC :

- «Δυσμενές» σενάριο: Λαμβάνονται υπόψη οι ακραία χειρότερες τιμές των κριτηρίων της μονάδας SOFC, σε συνδυασμό με τις ακραία καλύτερες τιμές των συστημάτων αναφοράς.
- «Ουδέτερο» σενάριο: Η εφαρμογή γίνεται βάσει των κεντρικών τιμών.
- «Ευνοϊκό» σενάριο: Το αντίθετο του «δυσμενούς».

Επίσης, γίνεται εφαρμογή και για τις τρεις ομάδες δεδομένων που αφορούν τις τρεις χώρες εγκατάστασης. Στις επόμενες παραγράφους αναλύεται η εφαρμογή των τεσσάρων βασικών μεθοδολογικών βημάτων όπως απεικονίζονται στο διάγραμμα ροής του σχήματος 3.6.

5.5.3.1 Δεδομένα

Σύμφωνα με το διάγραμμα ροής του σχήματος 3.6, απαιτούνται τα εξής δεδομένα:

- Πίνακας κριτηρίων αξιολόγησης - $\tilde{DM}(i,j)$. (Εικόνα 5.1)

Ισχύει ότι I=16 (το σύνολο των κριτηρίων αξιολόγησης – τεχνικά (I_T=6, πίνακες 5.24, 5.25), οικονομικά (I_{Ec}=4, πίνακες 5.26, 5.27) και περιβαλλοντικά (I_{En}=6, πίνακες 5.31, 5.32)) και J=2 (τα δύο ανταγωνιστικά συστήματα – συμβατικό (standard) και SOFC). Καθώς εξετάζονται δυο περιπτώσεις αξιολόγησης (A και B), η ένωση των πινάκων 5.24, 5.26 και 5.31 αποδίδει τον πίνακα κριτηρίων της περίπτωσης A και αντίστοιχα η ένωση των πινάκων 5.25, 5.27 και 5.32 τον αντίστοιχο πίνακα κριτηρίων της περίπτωσης B.

- Συνάρτηση προτίμησης κριτηρίου *i* - $\tilde{P}_i(d_i^{j,j'})$.

Επιλέγεται το «Γκαουσιανό» γενικευμένο κριτήριο (τύπος IV, Παράρτημα A) (βλ. Εικόνα 4.3), καθώς η αντίστοιχη συνάρτηση $\tilde{P}_i(d_i^{j,j'})$ είναι συνεχής, συμβάλλοντας έτσι στη αποφυγή απότομων μεταβολών στο αποτέλεσμα (Brans et al., 1986). Σε δυο από τα κριτήρια που λαμβάνουν ακέραιες τιμές (Τεχνικό Ελάχιστο και Αξιοπιστία) επιλέγεται η αντίστοιχη συνάρτηση με κατώφλιο προτίμησης p_i (Εικόνα 5.2). Προφανώς η συγκεκριμένη επιλογή δεν είναι μονόδρομος, καθώς εξαρτάται από πιθανές προτιμήσεις των αποφασιζόντων ή ιδιαιτερότητες συγκεκριμένων κριτηρίων.

- Κατώφλια αδιαφορίας και προτίμησης κριτηρίου *i* - p_i, q_i, σ_i (Εικόνες 5.1 και 5.2)

Ο καθορισμός των συντελεστών p_i και σ_i για κάθε κριτήριο i ακολουθεί σε γενικές γραμμές πρακτικές που ακολουθούνται σε αντίστοιχες μελέτες (Kapepula et al., 2007; Oberschmidt et al., 2010).

- Συντελεστές σημαντικότητας - $COI_{T,i}$, $COI_{En,i}$, $COI_{Ec,i}$

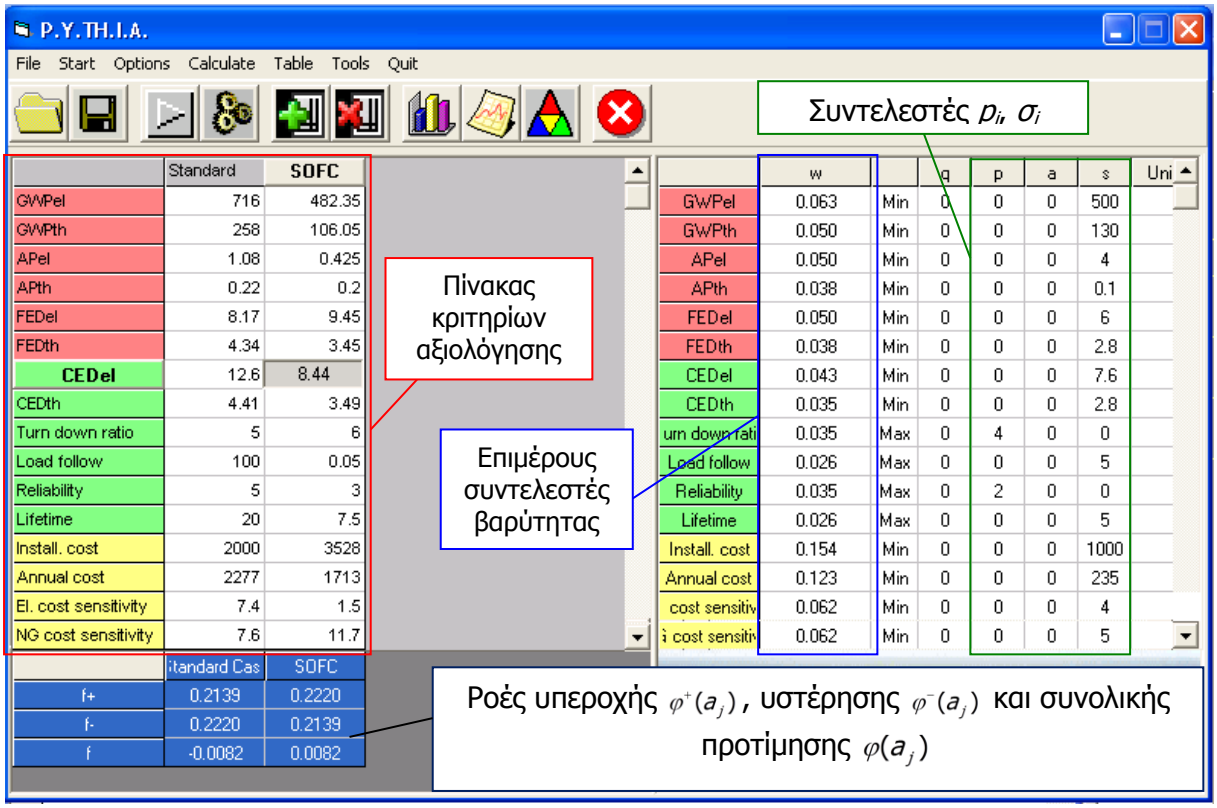
Οι συντελεστές COI είναι απαραίτητοι για να τον υπολογισμό των επιμέρους συντελεστών βαρών (Εξισώσεις 3.11-3.13, σχήμα 3.6). Οι σχετικές τιμές παρατίθενται στον πίνακα 5.33.

		COI_i
Περιβαλλοντικά κριτήρια αξιολόγησης	1. Global Warming Potential (GWP) ανά kWhel	8
	2. Global Warming Potential (GWP) ανά kWhth	8
	3. Acidification Potential (AP) ανά kWhel	8
	4. Acidification Potential (AP) ανά kWhth	6
	5. Fossil Energy Demand (FED) ανά kWhel	8
	6. Fossil Energy Demand(FED) ανά kWhth	6
Τεχνικά κριτήρια αξιολόγησης	7. Cumulative Energy Demand (CED) ανά kWhel	10
	8. Cumulative Energy Demand (CED) ανά kWhth	8
	9. Τεχνικό ελάχιστο	8
	10. Απόκριση σε μεταβολή φορτίου	6
	11. Αξιοπιστία	8
	12. Χρόνος ζωής συστήματος	6
Οικονομικά κριτήρια αξιολόγησης	13. Κόστος εγκατάστασης	10
	14. Κόστος συντήρησης και λειτουργίας	8
	15. Ευαισθησία ετήσιου κόστους σε αύξηση 20% της τιμής ηλεκτρισμού	4
	16. Ευαισθησία ετήσιου κόστους σε αύξηση 20% της τιμής φυσικού αερίου	4

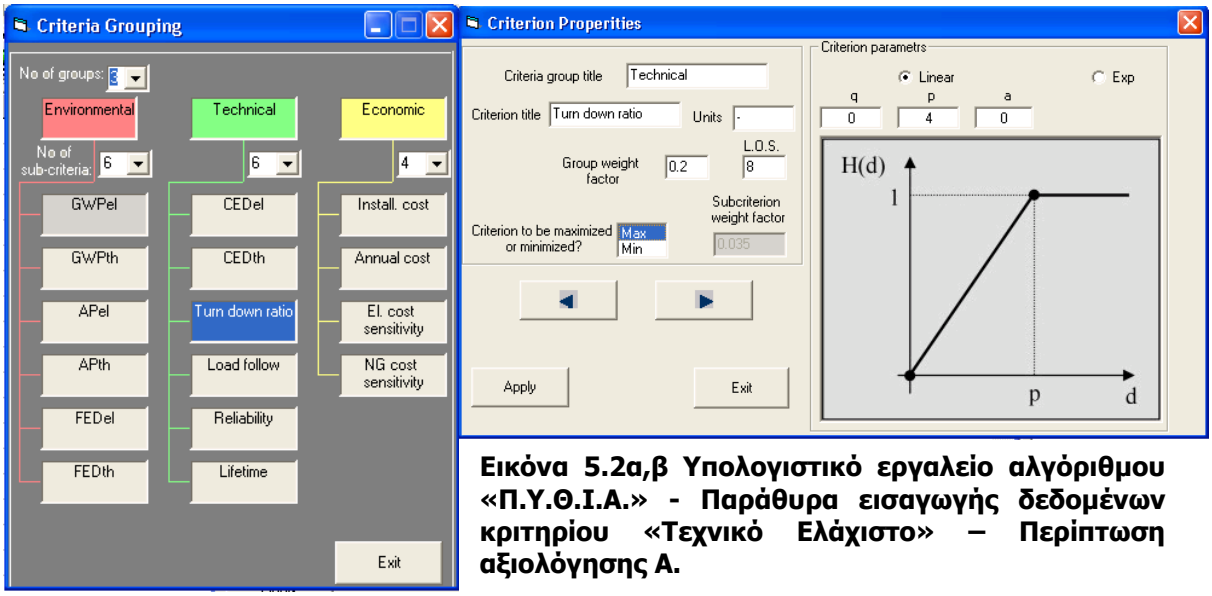
Πίνακας 5.33 Συντελεστές σημαντικότητας COI_i των κριτηρίων αξιολόγησης

Τα παραπάνω δεδομένα εισάγονται στο υπολογιστικό εργαλείο που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της παρούσας διατριβής, όπως απεικονίζεται στις εικόνες 5.1 και 5.2α,β, όπου διακρίνεται η περίπτωση εφαρμογής A του «Ουδέτερου» σεναρίου. Οι επιμέρους συντελεστές βαρύτητας

και τα αποτελέσματα της εικόνας 5.1 (ροές υπεροχής, υστέρησης και προτίμησης) αφορούν μια συγκεκριμένη τιμή συνδυασμού συντελεστών: (w_T, w_{En}, w_{Ec}) = (0.2, 0.4, 0.4).



Εικόνα 5.1 Υπολογιστικό εργαλείο αλγόριθμου «Π.Υ.Θ.Ι.Α.» - Παράθυρο εισαγωγής δεδομένων – Περίπτωση αξιολόγησης Α – «Μετριοπαθές» σενάριο – Δεδομένα για Γερμανία.



Εικόνα 5.2α,β Υπολογιστικό εργαλείο αλγόριθμου «Π.Υ.Θ.Ι.Α.» - Παράθυρα εισαγωγής δεδομένων κριτηρίου «Τεχνικό Ελάχιστο» – Περίπτωση αξιολόγησης Α.

5.5.3.2 Υπολογισμός προτίμησης κριτηρίου/συστήματος a_j.

Ακολουθούνται τα βήματα 1 και 2 της μεθοδολογίας του διαγράμματος ροής στο σχήμα 3.6

5.5.3.3 Σάρωση πιθανών συνδυασμών (w_T, w_{En}, w_{Ec})

Επιλέγεται ως βήμα σάρωσης Δw η τιμή 0,1 για λόγους που αναφέρονται στην αντίστοιχη μεθοδολογική παράγραφο και συνεπακόλουθα υπολογίζονται οι N_w (55 το πλήθος, σύμφωνα με την εξίσωση 3.14) κατατάξεις για κάθε ένα από τους συνδυασμούς (w_T, w_{En}, w_{Ec}).

5.5.3.4 Απεικόνιση λύσεων στο «χώρο απόφασης»

Τα αποτελέσματα για το σύστημα που συγκεντρώνει τη μεγαλύτερη ροή προτίμησης σε κάθε μια από τις N_w επαναλήψεις απεικονίζονται στο τριγωνικό διάγραμμα του σχήματος 3.7.
Στο κεφάλαιο που ακολουθεί αναλύονται και σχολιάζονται τα τριγωνικά διαγράμματα των αποτελεσμάτων του συνδυασμού των αξιολογήσεων.

5.6 Αποτελέσματα

Στο παρόν υποκεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της μεθοδολογίας συνδυασμένης αξιολόγησης, που αναφέρονται στις εξής περιπτώσεις εφαρμογής:

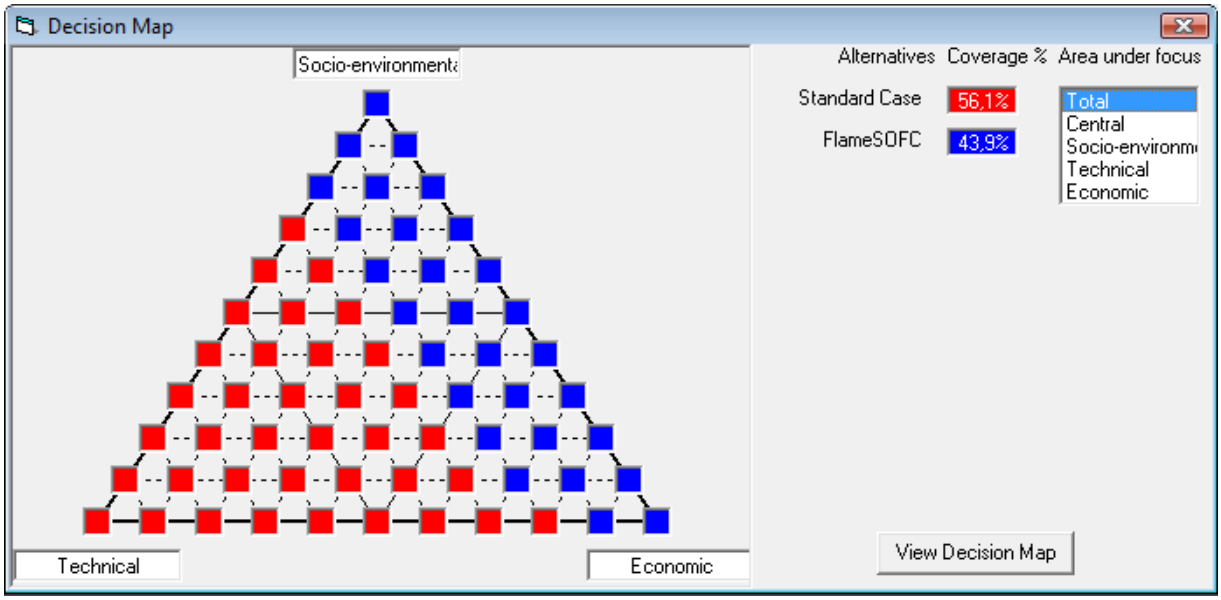
- Δύο περιπτώσεις συγκριτικής αξιολόγησης του συστήματος μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC: Με το συμβατικό σύστημα αναφοράς (περίπτωση Α) και με ανταγωνιστικό σύστημα μ-ΣΗΘ με ΜΕΚ (περίπτωση Α)
- Τρία σενάρια σχετικά με την επίδοση του συστήματος SOFC στα κριτήρια αξιολόγησης: «Δυσμενές», «Ουδέτερο» και «Ευνοϊκό»
- Τρεις περιπτώσεις χωρών εγκατάστασης των εξεταζόμενων συστημάτων (Πίνακας 5.13)

Επισημαίνεται οτι δεν κρίθηκε αναγκαίο να υπολογιστούν τα σενάρια «Δυσμενές» και «Ευνοϊκό» για όλες τις περιπτώσεις χωρών εγκατάστασης, καθώς κρίθηκε οτι τα αντίστοιχα αποτελέσματα δεν προσέφεραν σημαντική πληροφορία.

5.6.1 Περίπτωση αξιολόγησης Α: Συγκριτική αξιολόγηση συστήματος μ-ΣΗΘ συστοιχίας SOFC με συμβατική περίπτωση κάλυψης και ηλεκτρικών αναγκών

Το σχήμα 5.31 απεικονίζει το τριγωνικό διάγραμμα των αποτελεσμάτων της πολυκριτηριακής ανάλυσης για το σύνολο των πιθανών συνδυασμών (w_T, w_{En}, w_{Ec}). Αναφέρεται στο «Ουδέτερο» σενάριο και στην περίπτωση εγκατάστασης στη Γερμανία. Τα τετράγωνα εντός του τριγωνικού διαγράμματος αντιστοιχούν σε διαφορετικές τριάδες συντελεστών (w_T, w_{En}, w_{Ec}) (loops διαγράμματος ροής στο Σχ. 3.6). Τα κόκκινα τετράγωνα αναπαριστούν την ανάδειξη του συμβατικού συστήματος ως επικρατέστερου (λόγω μεγαλύτερης ροής συνολικής προτίμησης), ενώ τα μπλε αντιστοιχούν σε επικράτηση του συστήματος SOFC. Μέσω του σχήματος 5.31 γίνεται σαφής η επίδραση των διαφορετικών προτεραιοτήτων όσον αφορά την επιλογή συστήματος, καθώς διακρίνονται οι δυο περιοχές του «χάρτη απόφασης»: το συμβατικό σύστημα υπερτερεί όταν βαρύνουν κριτήρια τεχνικής αποδοτικότητας και λειτουργικότητας (κόκκινη περιοχή για w_T>30%), ενώ το σύστημα SOFC ευνοείται όσο τα περιβαλλοντικά κριτήρια γίνονται σημαντικότερα. Απεικονίζεται επίσης μια ιδιαίτερα θετική επίδοση για τη μονάδα SOFC στην περιοχή των οικονομικών κριτηρίων, κάτι που οφείλεται στην εξαιρετικά αισιόδοξη οικονομική αποδοτικότητα (π.χ. κριτήριο «κόστος συντήρησης και λειτουργίας») όπως φαίνεται στα αποτελέσματα του πίνακα 5.26. Τα σχετικά στοιχεία προήλθαν από τεχνοοικονομική ανάλυση στα πλαίσια του ερευνητικού

προγράμματος FlameSOFC και προφανώς αφορά μελλοντικές εκτιμήσεις σχετικά με κόστη εγκατάστασης και λειτουργίας.



Σχήμα 5.31 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Μετριοπαθές» σενάριο

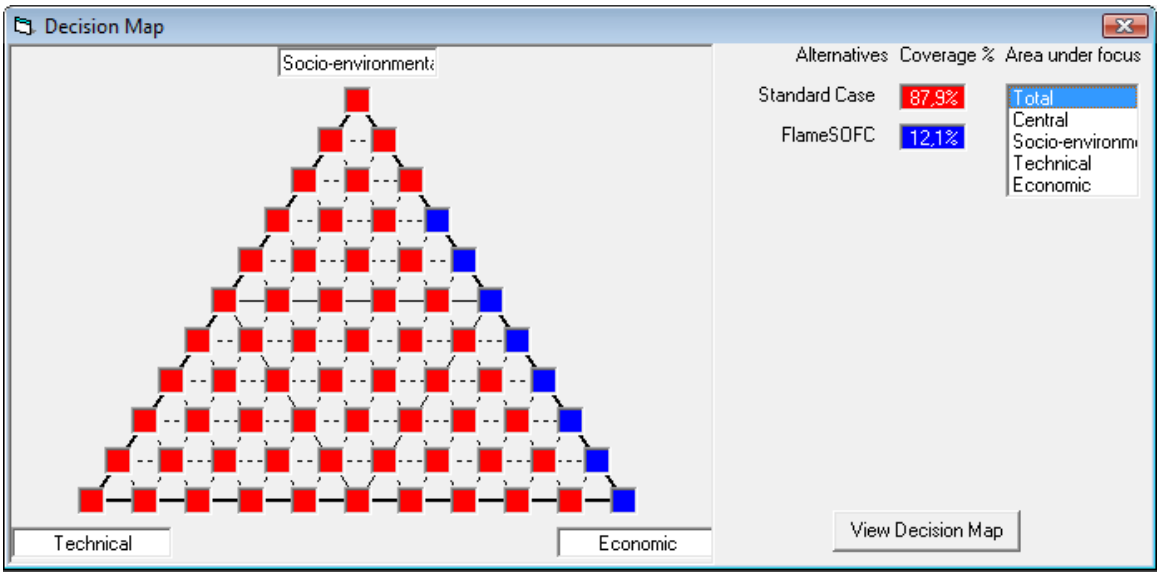
Ως ένα μέτρο της συνολικής προτίμησης ορίζεται το «ποσοστό κάλυψης» του «χάρτη απόφασης» για το ένα ή το άλλο εναλλακτικό σύστημα. Το εν λόγω ποσοστό αντιστοιχεί στο κλάσμα του πλήθους των συνδυασμών βαρών (w_T, w_{En}, w_{Ec}) που αποδίδουν το συγκεκριμένο σύστημα ως επικρατέστερο προς το σύνολο των πιθανών συνδυασμών. Τα ποσοστά κάλυψης, εκτός από το συνολικό χώρο του διαγράμματος, αναφέρονται και σε συγκεκριμένες περιοχές, οι οποίες αντιστοιχούν σε διαφορετικές προτεραιότητες επιλογής (βλ. Σχήμα 3.7). Η σχετικά ισορροπημένη εικόνα που εποπτικά διαφαίνεται στο σχήμα 5.31, αποτυπώνεται στα αποτελέσματα των ποσοστών κάλυψης (πίνακας 5.34) για τις επιμέρους περιοχές που περιγράφονται στο σχήμα 3.7 (Συνολική, Περιβαλλοντική, Τεχνική, Οικονομική, Κεντρική).

Decision Map region under focus	**Decision Map coverage**	
	Standard Case	SOFC unit
Total	56.1%	43.9%
Central (minimum 20% - maximum 50% for all weights)	75.0%	25.0%
Environmental (min. 50% for environmental criteria)	28.6%	71.4%
Technical (min. 50% for technical criteria)	100.0%	0.0%
Economic (min. 50% for economic criteria)	33.3%	66.7%

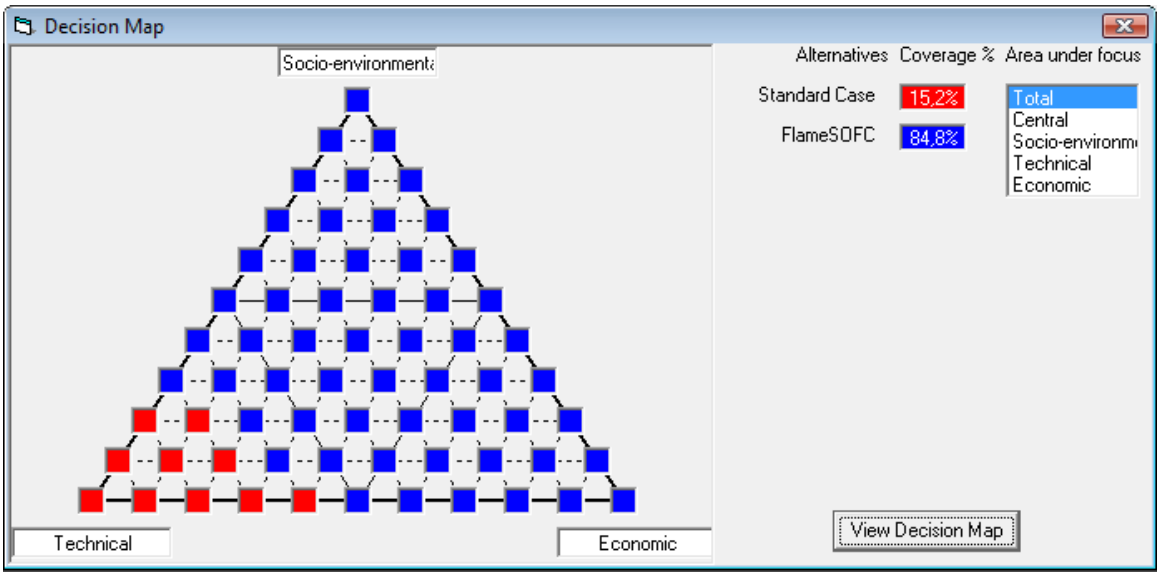
Πίνακας 5.34 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Μετριοπαθές» σενάριο

Τα σχήματα 5.32 και 5.33 παρουσιάζουν τα αποτελέσματα της πολυκριτηριακής ανάλυσης για το «Δυσμενές» και το «Ευνοϊκό» σενάριο, αντίστοιχα. Όσον αφορά το πρώτο, η ενδεχόμενα

χειρότερη περιβαλλοντική επίδοση της μονάδας SOFC δρα καταλυτικά στην σχεδόν καθολική επικράτηση του συμβατικού συστήματος. Εμφανίζεται μια μικρή περιοχή επικράτησης του συστήματος SOFC, αλλά κρίνεται ως μη ρεαλιστική (τουλάχιστον στις παρούσες συνθήκες), λόγω των εξαιρετικά αισιόδοξων οικονομικών δεδομένων. Όπως αναμένεται, η εικόνα αντιστρέφεται αν ληφθούν υπόψη τα πλέον ευνοϊκά δεδομένα για τη μονάδα SOFC. Πλέον απαιτείται να αποδοθεί έντονη βαρύτητα στα τεχνικά κριτήρια (w_T>70%) για να επικρατήσει το συμβατικό σύστημα.



Σχήμα 5.32 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Δυσμενές» σενάριο



Σχήμα 5.33 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Ευνοϊκό» σενάριο

Σε αντιστοιχία με τον πίνακα 5.34, στον πίνακα 5.35 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του ποσοστού κάλυψης για το «Δυσμενές» και το «Ευνοϊκό» σενάριο στις πέντε επιμέρους

περιοχές ενδιαφέροντος. Το εύρος της επίδρασης των διαφορετικών προτεραιοτήτων στην επιλογή συστήματος είναι εμφανές.

Η κύρια διαφορά με τα στοιχεία του πίνακα 5.34, που αφορά τη Γερμανία, είναι η επικράτηση του συμβατικού συστήματος στην περιοχή προτεραιότητας των οικονομικών κριτηρίων, λόγω χαμηλότερου κόστους εγκατάστασης και ετήσιας λειτουργίας (πίνακας 5.26). Επίσης παρατηρείται εντονότερη επικράτηση του συστήματος SOFC για την «περιβαλλοντική» περιοχή απόφασης στην περίπτωση της Ισπανίας, λόγω αυξημένου δείκτη ΑΡ στην κεντρική ηλεκτροπαραγωγή (Παράρτημα Μ – «Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ: Σύστημα μ-ΣΗΘ με SOFC και συμβατικό σύστημα»).

Decision Map region under focus	**Decision Map coverage**			
	Standard Case		SOFC unit	
	Worst SOFC case	Best case	Worst case	Best case
Total	87.9%	15.2%	12.1%	84.8%
Central (minimum 20% - maximum 50% for all weights)	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%
Environmental (min. 50% for environmental criteria)	85.7%	0.0%	14.3%	100.0%
Technical (min. 50% for technical criteria)	100.0%	47.6%	0.0%	52.4%
Economic (min. 50% for economic criteria)	71.4%	0.0%	28.6%	100.0%

Πίνακας 5.35 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Δυσμενές» και «Ευνοϊκό» σενάριο

Όσον αφορά τις υπόλοιπες Ευρωπαϊκές χώρες που λήφθηκαν υπόψη, τα αντίστοιχα αποτελέσματα του ποσοστού κάλυψης απεικονίζονται στον πίνακα 5.36

Decision Map region under focus	**Decision Map coverage**			
	Standard Case		SOFC unit	
	UK	SP	UK	SP
Total	60.6%	60.6%	39.4%	39.4%
Central	91.7%	75.0%	08.3%	25.0%
Environmental	28.6%	14.3%	71.4%	85.7%
Technical	100.0 %	100.0 %	0.0%	0.0%
Economic	66.7%	61.9%	33.3%	38.1%

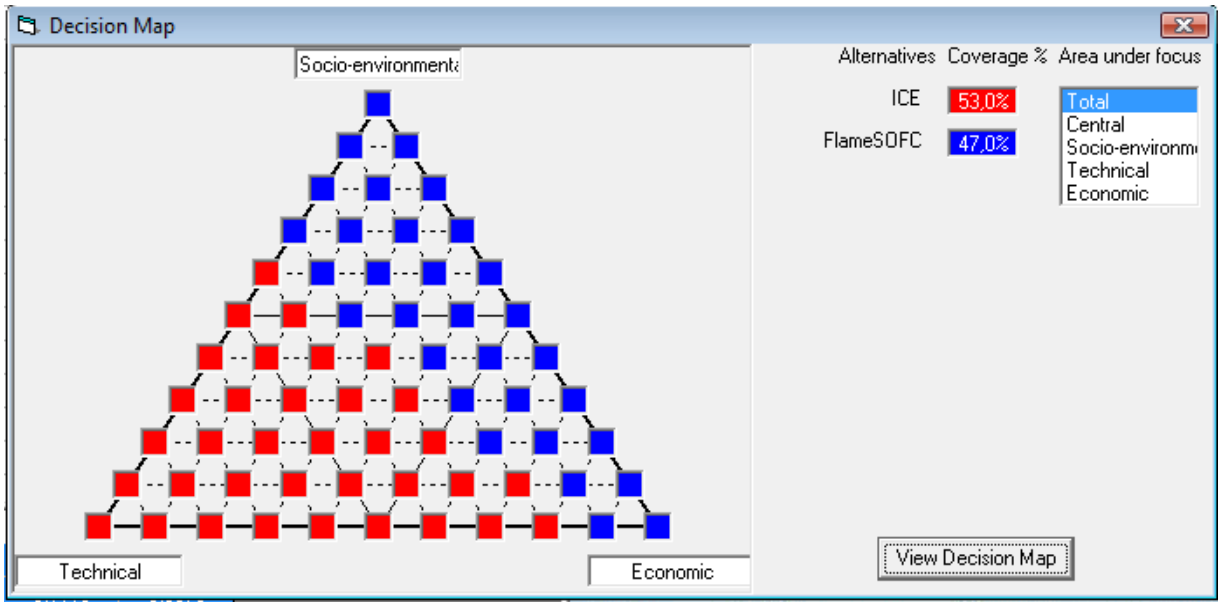
Πίνακας 5.36 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Α – Χώρες αναφοράς: Αγγλία, Ισπανία – «Μετριοπαθές» σενάριο.

5.6.2 Περίπτωση αξιολόγησης Β: Σύγκριση με ανταγωνιστικό σύστημα μ-ΣΗΘ (ΜΕΚ).

Τα αποτελέσματα της περίπτωσης αξιολόγησης Β παρουσιάζονται στην ακόλουθη παράγραφο. Αναδεικνύεται στο σχήμα 5.34 μια παρόμοια διχασμένη εικόνα του «χάρτη απόφασης» με την αντίστοιχη του «Ουδέτερου» σεναρίου του σχήματος 5.31 της περίπτωσης αξιολόγησης Α. Το σύστημα με ΜΕΚ μπορεί να μην έχει τη δυνατότητα υψηλών ηλεκτρικών βαθμών απόδοσης, αλλά είναι σαφώς πιο αξιόπιστο, έχει μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και απαιτεί λιγότερο χώρο.

Τα οικονομικά δεδομένα (πίνακας 5.27) εισάγουν στο πολυκριτηριακό μοντέλο έντονη αισιοδοξία ως προς τα κόστη της μονάδας SOFC, καθώς τα μεν κόστη εγκατάστασης είναι συγκρίσιμα, τα δε λειτουργίας κυμαίνονται από 40% έως 90% του κόστους της ΜΕΚ. Τα εξαιρετικά ευνοϊκά οικονομικά στοιχεία προκαλούν την επέκταση της επικράτησης του SOFC εντός της περιοχής οικονομικής προτεραιότητας. Δεν τίθεται κανένα ζήτημα σχετικά με την περιβαλλοντική περιοχή, όπου τα σχετικά πλεονεκτήματα της ηλεκτροχημικής μετατροπής έναντι της θερμοχημικής δρουν καταλυτικά υπέρ της μονάδας SOFC.

Τα ποσοστά κάλυψης ποσοτικοποιούν τα ευρήματα της προηγούμενης παραγράφου και παρουσιάζονται στον πίνακα 5.37.

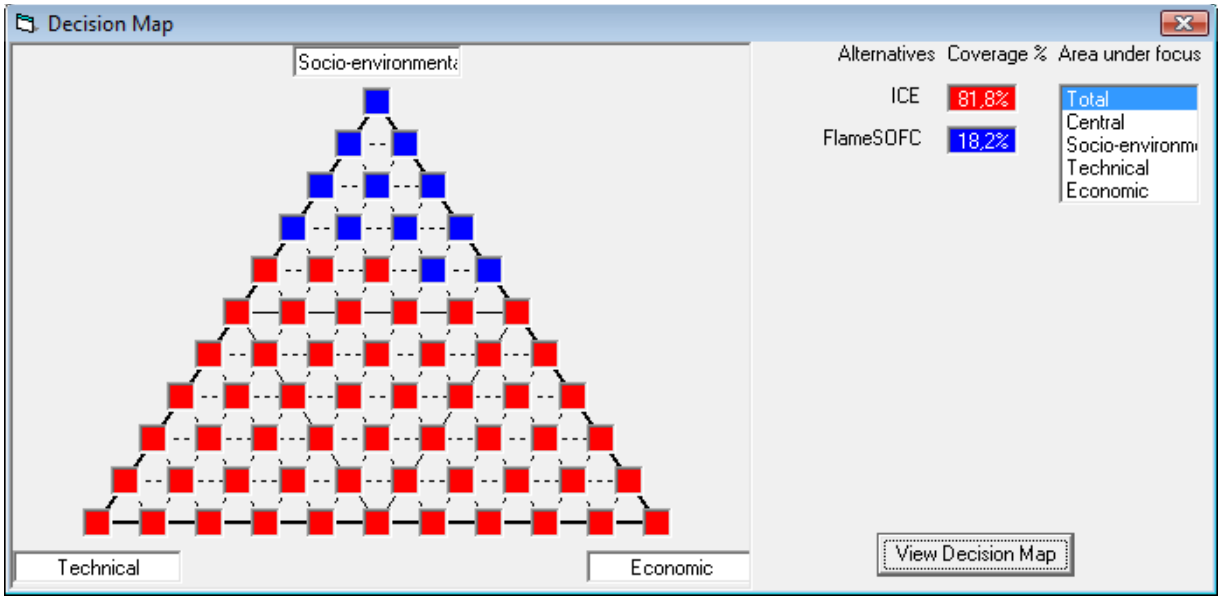


Σχήμα 5.34 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Μετριοπαθές» σενάριο

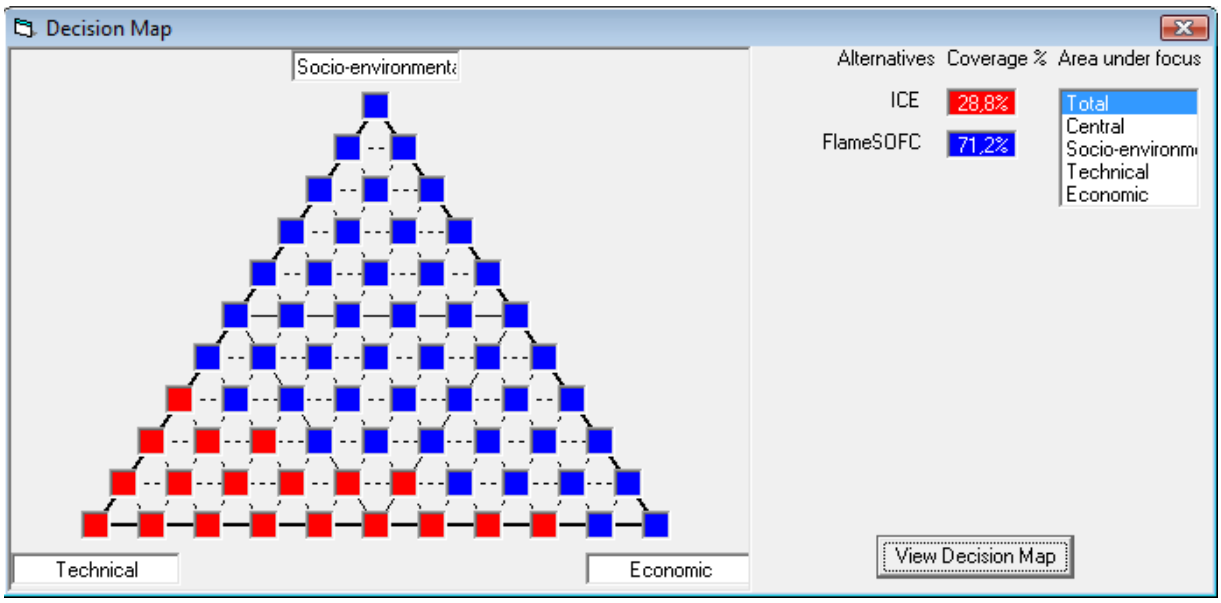
Decision Map region under focus	Decision Map coverage	
	ICE	SOFC unit
Total	53.0%	47.0%
Central	66.7%	33.3%
Environmental	14.3%	85.7%
Technical	100.0%	0.0%
Economic	38.1%	61.9%

Πίνακας 5.37 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Μετριοπαθές» σενάριο

Τα αποτελέσματα για το «Δυσμενές» και το «Ευνοϊκό» σενάριο παρουσιάζονται στα τριγωνικά διαγράμματα των σχημάτων 5.35 και 5.36, αντίστοιχα. Στο πρώτο εκ των δυο σεναρίων, παρατηρείται ανατροπή αποτελέσματος στην περιοχή οικονομικής προτεραιότητας και μικρή συρρίκνωση της προτίμησης του συστήματος SOFC στην περιβαλλοντική περιοχή. Η αιτία της επικράτησης του συστήματος ΜΕΚ με οικονομικά κριτήρια βασίζεται στο οτι το αντίστοιχο κόστος εγκατάστασης είναι πλέον μικρότερο του SOFC, όπως επίσης μειώνεται η διαφορά στα ετήσια κόστη. Ωστόσο, ακόμα και με τις χειρότερες για το SOFC υποθέσεις, διατηρεί μια σαφή περιοχή επικράτησης σε ακραία περιβαλλοντικές προσεγγίσεις απόφασης.



Σχήμα 5.35 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Δυσμενές» σενάριο



Σχήμα 5.36 Χάρτης απόφασης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Ευνοϊκό» σενάριο

Στον αντίποδα, όταν στο πολυκριτηριακό μοντέλο εισάγονται οι πλέον ευνοϊκές υποθέσεις για το SOFC, το εν λόγω σύστημα αναδεικνύεται ως επικρατέστερο στην πλειονότητα των πιθανών συντελεστών βαρύτητας. Όπως διακρίνεται στο σχήμα 5.36, η «διελκυνστίδα» μεταξύ περιβαλλοντικών-οικονομικών πλεονεκτημάτων και τεχνικών-λειτουργικών μειονεκτημάτων κλίνει υπέρ των πρώτων. Τα αντίστοιχα ποσοστά κάλυψης παρουσιάζονται τον πίνακα 5.38.

Decision Map region under focus	**Decision Map coverage**			
	ICE		SOFC unit	
	Worst case	Best case	Worst case	Best case
Total	81.8%	28.8%	18.2%	71.2%
Central	100.0%	0.0%	0.0%	100.0%
Environmental	42.9%	0.0%	57.1%	100.0%
Technical	100.0%	71.4%	0.0%	28.6%
Economic	100.0%	23.8%	0.0%	76.2%

Πίνακας 5.38 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρα αναφοράς: Γερμανία – «Δυσμενές» και «Ευνοϊκό» σενάριο

Τα ποσοστά κάλυψης της περίπτωσης αξιολόγησης Β για Μ.Βρετανία και Ισπανία παρατίθενται στον πίνακα 5.39. Δεν διαπιστώνονται ιδιαίτερες διαφορές με τα ήδη υπολογισθέντα για Γερμανία, καθώς στην παρούσα περίπτωση αξιολόγησης μεταξύ ομοειδών συστημάτων μ-ΣΗΘ έχουν αμβλυνθεί οι σχετικές διαφορές. Για παράδειγμα, η επίδραση των διαφορετικών συστημάτων κεντρικής ηλεκτροπαραγωγής έχει μειωθεί συγκριτικά με την περίπτωση αξιολόγησης Α, καθώς και οι δυο μονάδες μ-ΣΗΘ εξάγουν ηλεκτρισμό.

Decision Map region under focus	Decision Map coverage			
	ICE		SOFC unit	
	UK	SP	UK	SP
Total	54.5%	53.0%	45.5%	47.0%
Central	66.7%	66.7%	33.3%	33.3%
Environmental	14.3%	14.3%	85.7%	85.7%
Technical	100.0 %	100.0 %	0.0%	0.0%
Economic	42.9%	38.1%	57.1%	61.9%

Πίνακας 5.39 Ποσοστά κάλυψης για την περίπτωση αξιολόγησης Β – Χώρες αναφοράς: Αγγλία, Ισπανία – «Μετριοπαθές» σενάριο.

5.7 Σύνοψη – κριτική αποτελεσμάτων

Στο παρόν κεφάλαιο εφαρμόστηκε η μεθοδολογία ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων, όπως διατυπώθηκε αναλυτικά στο κεφάλαιο 3. Εξετάστηκαν δυο εναλλακτικά συστήματα μικροσυμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας (μ-ΣΗΘ) για οικιακές εφαρμογές, όπως και συμβατικό σύστημα αναφοράς με λέβητα αερίου. Ως τελικός σκοπός της εφαρμογής ορίζεται η ανάδειξη του επικρατέστερου συστήματος βάσει του συνδυασμού της τεχνικής – οικονομικής – περιβαλλοντικής αποδοτικότητας και εναλλακτικών προσεγγίσεων όσον αφορά την απόφαση επιλογής. Η εφαρμογή δεν απαιτεί τον καθορισμό συντελεστών βαρύτητας για τα κριτήρια αξιολόγησης, καθώς επαναλαμβάνονται οι υπολογισμοί του πολυκριτηριακού μοντέλου για όλους τους πιθανούς συνδυασμούς συντελεστών και τα συνολικά αποτελέσματα απεικονίζονται με τη μορφή συνοπτικού τριγωνικού διαγράμματος.

Όσον αφορά το μεθοδολογικό σκέλος της εφαρμογής, αντιμετωπίστηκαν με επιτυχία οι αδυναμίες της κλασικής τεχνο-οικονομικής προσέγγισης αξιολόγησης (παράγραφος 3.1.1), καθώς:

- Επιτεύχθηκε πλήρης ενσωμάτωση της περιβαλλοντικής συνιστώσας στη διαδικασία ολοκληρωμένης αξιολόγησης (παράγραφος 5.5.2.3 – Περιβαλλοντική αξιολόγηση).
- Αποφεύχθηκε η μονομέρεια της αξιολόγησης, μέσω του συνδυασμού της τεχνικής, της οικονομικής και της περιβαλλοντικής πληροφορίας των εξεταζόμενων συστημάτων (παράγραφος 5.5.3).
- Αντιμετωπίστηκε με επιτυχία η αδυναμία προσδιορισμού συντελεστών βαρύτητας για τις τρεις κατηγορίες κριτηρίων αξιολόγησης. 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».

Σε επίπεδο αποτελεσμάτων της μεθοδολογίας, το συνολικό συμπέρασμα που εξάγεται και από τις δυο περιπτώσεις αξιολόγησης που εξετάστηκαν είναι οτι 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 (Staffel, 2009) υπερβαίνουν τα 50.000 € για σύστημα SOFC δυναμικότητας 1kW. Με δεδομένο οτι η τεχνική αποδοτικότητα 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.

Βιβλιογραφία

Ελληνική βιβλιογραφία

Τεχνική Οδηγία (ΤΟ) ΤΕΕ. Συμπαραγωγή Ηλεκτρισμού, Θερμότητας & Ψύξης: Εγκαταστάσεις σε κτήρια. Α' Έκδοση. Δεκέμβριος 2010. Διαθέσιμη στο: http://portal.tee.gr/portal/page/portal/SCIENTIFIC_WORK/GR_ENERGEIAS/COPRODUCTION/totee2001a.pdf

ΕΠΑ Θεσσαλονίκης. Η Ε.Π.Α. ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ ΤΡΟΦΟΔΟΤΗΣΕ ΤΗΝ ΠΡΩΤΗ ΜΟΝΑΔΑ ΣΥΜΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΕ ΦΥΣΙΚΟ ΑΕΡΙΟ ΓΙΑ ΟΙΚΙΑΚΗ ΚΕΝΤΡΙΚΗ ΘΕΡΜΑΝΣΗ ΣΤΗΝ ΕΛΛΑΔΑ. 2011. Καταχώρηση στην ιστοσελίδα: http://www.epathessaloniki.gr/index.php?rm=0&nid=91

Ξενόγλωσση βιβλιογραφία

Alanne K. and Saari A. Sustainable small-scale CHP technologies or buildings: the basis for multi-perspective decision-making. Renewable and Sustainable Energy Reviews 8 (2004) 401–431

Alanne, K. et al, Comparative Analysis of the Life-Cycle Costs of Residential Energy Supply Technologies. Nordic Journal of Surveying and Real Estate Research 4(1) (2007) 23–44

Alanne, K. et al. Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems. Energy and Buildings 39 (2007b) 1218–1226

Alanne, K., et al. Techno-economic assessment and optimization of Stirling engine micro-cogeneration systems in residential buildings. Energy Conversion and Management 51 (2010) 2635–2646

Alanne, K., et al. The financial viability of an SOFC cogeneration system in single-family dwellings. Journal of Power Sources 158 (2006) 403–416

APME (Association of Plastics Manufacturers Europe), (2007). http://www.plasticseurope.org/

Barbieri, E.S. et al, Analysis of innovative micro-CHP systems to meet household energy demands. Article in press. Appl Energy (2011)

Baschuk J.J. and Xianguo L. Carbon monoxide poisoning of proton exchange membrane fuel cells. Int. J. Energy Res. 25 (2001) 695-713

Bayer et al., Economical and ecological comparison of granular activated carbon (GAC) adsorber refill strategies. Water Research 39 (2005)

Bianchi, M. et al. Guidelines for residential micro-CHP systems design. Article in press. Appl Energy (2011)

Bowman, L. Small modular power development at External Power, LLC: Residential and small commercial Stirling cogeneration systems. (2001) Fifth International Biomass Congress of the Americas, Orlando, USA.

Bradley, A. Global Micro-CHP Market Growing Strongly in 2011 – Latest Delta-ee Report. Report by Delta Energy & Environnent Ltd (2011).

Brown J.E., Hendry C.N., Harborne P. An emerging market in fuel cells? Residential combined heat and power in four countries. Energy Policy 35 (2007) 2173–2186

Brown, M. Cogeneration growth in Europe – smaller systems have better prospects. Cogeneration & On-Site Power Production 12(4) (2011)

Burer M., et al. Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solid oxide fuel cell–gas turbine combined cycle, heat pumps and chillers. Energy 28 (2003) 497–518

Cockroft, J. and Kelly, N.. A comparative assessment of future heat and power sources for the UK domestic sector. Energy Conversion and Management 47 (2006) 2349–2360

De Paepe M., Micro-CHP systems for residential applications. Energy Conversion and Management 47 (2006) 3435–3446

Delta Energy & Environment. New Technologies for CHP Applications (2006). http://www.seai.ie/Publications/Your_Business_Publications/New-Technologies-final.pdf

Dijkstra S. Micro-CHP: edging towards the mass market. Cogeneration & On-Site Power Production 10(4) (2009).

Dorer, V. and Weber, A. Energy and CO 2 emissions performance assessment of residential micro-cogeneration systems with dynamic whole-building simulation programs. Energy Conversion and Management 50 (2009) 648–657

Dorer, V. et al. Performance assessment of fuel cell micro-cogeneration systems for residential buildings. Energy and Buildings 37 (2005) 1132–1146

DTE Energy Technologies. DTE Energy Technologies Introduces the ENX 55 Stirling Engine. 2004. http://www.energyvortex.com/pages/headlinedetails.cfm?id=1124&archive=1

Dwyer S. and Slowe J. Summit Highlights of the 6th Annual Delta Micro-CHP in Europe Summit:2011. Report by Delta Energy & Environment Ltd (2011).

Ecopower e3.0 data sheet, (2006) http://www.ecopower.de/ecopower-mini-bhkw/anlagen-und-systeme/ecopower-30.html

EIA (Energy Information Administration, US Department of Energy). International energy outlook (2004).

Environdec. Revision of the EPD® system into an International EPD®, 2007. http://www.environdec.com/documents/pdf/rev_EPD_Section_1_Application_of_LCA_methodology.pdf

Enzensberger N, Wietschel M and Rentz O. Policy instruments fostering wind energy projects—a multi-perspective evaluation approach. Energy Policy 30(9) (2002) 793–801.

EUSUSTEL EU research project. European Sustainable Electricity; Comprehensive Analysis of Future European Demand and Generation of European Electricity and its Security of Supply. 2005-2006. http://www.eusustel.be/public/documents_publ/WP/WP3/Fuel%20Cell%20Report%20Appendix.pdf

FC-District EU research project. New m-CHP network technologies for energy efficient and sustainable districts.. Contract No:FP7 – 260105, 2010-2014. http://www.fc-district.eu

FlameSOFC EU research project. Fuel Flexible, Air-regulated, Modular, and Electrically Integrated SOFC-System. Contract No:FP6 – 019875, 2005-2010. http://www.flamesofc.org

Frangopoulos C.A. EDUCOGEN, The European educational tool on cogeneration (2001) European Commission.

Guy, R. and Sykes, B. MicroCHP Accelerator. The Carbon Trust. Final Report (2011)

Haeseldonckx., D. et al. The impact of thermal storage on the operational behaviour of residential CHP facilities and the overall CO 2 emissions. Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007) 1227–1243

Hamada, Y., et al. Operating results and simulations on a fuel cell for residential energy systems. Energy Conversion and Management 47 (2006) 3562–3571

Hawkes, A.D and Leach, M. A. On policy instruments for support of micro combined heat and power. Energy Policy 36 (2008) 2973–2982

Hawkes, A.D. et al. Solid oxide fuel cell micro combined heat and power system operating strategy: Options for provision of residential space and water heating. Journal of Power Sources 164 (2007) 260–271

Hawkes, A.D., et al. Techno-economic modelling of a solid oxide fuel cell stack for micro combined heat and power. Journal of Power Sources 156 (2006) 321–333

IDEMAT2001 LCA Database. Delft University of Technology, Faculty of Design, Engineering and Production. (2001) http://www.io.tudelft.nl/research/dfs/idemat/index.htm

Inframat © Advanced Materials. (2006) http://www.advancedmaterials.us/

Kapepula K.M., Colson G., Sabri K. and Thonart P. A multiple criteria analysis for household solid waste management in the urban community of Dakar. Waste Management 27 (2007) 1690–1705

Karakoussis, V. et al., The environmental impact of manufacturing planar and tubular solid oxide fuel cells. Journal of Power Sources 101 (2001), 10-26

Kaundinya D. P., Balachandra P. and Ravindranah N. H. Grid-connected versus stand-alone energy systems for decentralized power – A review of literature, Renewable Sustainable Energy Rev. 13 (2009) 2041-2050.

Kuhn, V., et al. MicroCHP: Overview of selected technologies, products and field test results. Applied Thermal Engineering 28 (2008) 2039–2048

Lenz V. and Buechner D., Technical Status and Economic Overview of m-CHP plants. German Biomass Research Center. International Biomass Conference (2011), Leipzig.

Little, A.D. Assessment of Planar Solid Oxide Fuel Cell Technology (1999). Report to the US Department of Energy.

Madlener R and, Schmid C. Combined heat and power generation in liberalised markets and a carbon-constrained world. Gaia 12 (2003) 114–120.

Major, G. Small scale cogeneration. The Netherlands: Centre for the Analysis and Dissemination of Demonstrated Energy Technologies. CADDET Energy Efficiency Analysis Series 1. IEA/OECD (1995).

MICROMAP Mini and Macro-CHP Market Assessment and Development Plan Summary Report. (2002) London, UK: FaberMaunsell Ltd.

Morgado D. and Slowe J. Exploring the Market Opportunity for SOFC Micro-CHP. , Proceedings of the 9th European SOFC Forum (2010). Lucerne, Switzerland.

Nieto-Morote, A. et al. Selection of a trigeneration system using a fuzzy AHP multi-criteria decision-making approach. Int. J. Energy Res. 35 (2011) 781–794

Oberschmidt J., Geldermann J., Ludwig J. and Schmehl M.. Modified PROMETHEE approach for assessing energy technologies, International Journal of Energy Sector Management 4(2) (2010) 183-212.

Onovwiona H.I. and Ugursal V.I., Residential cogeneration systems: review of the current technology, Renewable Sustainable Energy Rev. 10 (2006) 389-431.

Onovwiona, H.I., et al. Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications. Applied Thermal Engineering 27 (2007) 848–861

Onsite Sycom Energy Corp. The market and potential for combined heat and power in the commercial/institutional sector. (2000) USA: US Department of Energy, Energy Information Administration.

Peacock A.D. and Newborough M. Impact of micro-CHP systems on domestic sector CO 2 emissions. Applied Thermal Engineering 25 (2005) 2653–2676

Pehnt M., Cames M., Fischer C., Praetorius B., Schneider L., Schumacher K., Voß J.P. Micro Cogeneration - Towards Decentralized Energy Systems (2006). Springer-Verlag Berlin Heidelberg

Pilavachi P.A. Mini- and micro-gas turbines for combined heat and power. Appl Ther Eng 22 (2002) 2003–2014.

Plansee, (2007). http://www.plansee.com

ProEcoPoly Net. Fact Sheet "SOLO Stirling 161". (2007) Available at: www.buildup.eu/system/files/content/SOLO%20Stirling%20161.pdf

Saleh B., Koglbauer G., Wendland M. and Fischer J. Working fluids for low-temperature Organic Rankine Cycles, Energy 32 (2007) 1210–1221.

Schuster A., Karellas S., Kakaras E. and Spliethoff H. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. Applied Thermal Engineering 29 (2009) 1809–1817

Simader G., Krawinkler R. and Trnka G. Micro CHP systems: state-of-the-art. Deliverable of Green Lodges Project. (2006)

Staffel, I., et al. Cost targets for domestic fuel cell CHP. Journal of Power Sources 181 (2008) 339–349

Staffell, I. and Ingram, A. Life cycle assessment of an alkaline fuel cell CHP system. International Journal of Hydrogen Energy 35 (2010) 2491–2505.

Staffell, I. et al. Energy and carbon payback times for solid oxide fuel cell based domestic CHP. International Journal of Hydrogen Energy 37 (2012) 2509-2523.

Staffell, I., A review of small stationary fuel cell performance (2009). University of Birmingham, UK. Available at: http://birmingham.academia.edu/IainStaffell/Papers/1126233/A_review_of_small_stationary_fuel_cell_performance

Tokyo Gas, TG monthly newsletter no. 64. (2009). Available at: http://www.tokyo-gas.co.jp/tgminutes/64.pdf

Tsay D., Feasibility study of fuel cell residential energy stations. MSc thesis. Massachusetts Institute of Technology. 2003

Urieli I. Stirling cycle engine analysis. (1984) Bristol, UK: Adam Hilger Ltd.

USDOE, Office of Fossil Energy. Fuel Cell Handbook (Seventh Edition). 2004.

Viebahn, P. and Krewitt, W. Fuel Cell (FC) Systems. Final Report of ECLIPSE (Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for Present and Future Power Systems in Europe) (2003). DLR.

WADE (World Alliance for Decentralized Energy). Security via Decentralized Energy- Energy Security, Climate Change and Decentralized Energy (2005). http://www.cospp.com

Zapp, P. Environmental analysis of solid oxide fuel cells. J of Power sources 61 (1996) 259-262.

Κεφάλαιο 6ο

Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο συνοψίζονται τα κυριότερα συμπεράσματα που συνάγονται από την ολοκλήρωση της μελέτης και την κριτική αξιολόγηση της προτεινόμενης μεθοδολογίας και των σχετικών αποτελεσμάτων. Η αρχική παράγραφος εστιάζει στις δυο βασικές μεθόδους των οποίων ο συνδυασμός αποτελεί τον πυρήνα της προτεινόμενης προσέγγισης. Ακολουθεί ο σχολιασμός της μεθοδολογίας συνδυασμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων που αναπτύχθηκε στα πλαίσια της διατριβής. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα κύρια συμπεράσματα και ευρήματα που προέκυψαν από την εφαρμογή της μεθοδολογίας σε συστήματα βοηθητικής ηλεκτροπαραγωγής και οικιακής συμπαραγωγής. Στην κατακλείδα του κεφαλαίου προτείνονται κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα.

6.1 Οφέλη και περιορισμοί των μεθοδολογιών Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και Πολυκριτηριακής Ανάλυσης

Ο πυρήνας της συνολικής προσέγγισης που διατυπώθηκε στην παρούσα διατριβή αποτελείται από τον συνδυασμό των μεθοδολογιών της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (ΑΚΖ) και της Πολυκριτηριακής Ανάλυσης (ΠΑ).

Η ενσωμάτωση της ΑΚΖ στη διαδικασία αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών προσφέρει τη δυνατότητα κατανόησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, οι οποίες δεν θα λαμβάνονταν υπόψη σε διαφορετική περίπτωση. Αποτελεί μέσο καταγραφής του πλήρους φάσματος των επιπτώσεων της επιλογής τεχνολογίας/συστήματος, ειδικά εκείνων που λαμβάνουν χώρα εκτός χώρου λειτουργίας του ενεργειακού συστήματος. Γενικός σκοπός της είναι να παρέχει έγκυρη και συμπυκνωμένη πληροφορία στους αποφασίζοντες και οφείλει να συμπληρώνεται από αντίστοιχα κριτήρια κόστους και τεχνικής αποδοτικότητας, προκειμένου να προωθούνται ορθολογικές και ισορροπημένες αποφάσεις επιλογής ενεργειακής τεχνολογίας/συστήματος.

Ο γενικός σκοπός που περιγράφηκε παραπάνω αποτελεί κοινό τόπο μεταξύ των μεθόδων ΑΚΖ και ΠΑ, με τη διαφορά οτι η ΠΑ είναι δυνατόν να λειτουργήσει ως το τελικό εργαλείο σύνθεσης των διαφόρων «ροών πληροφορίας», υποβοηθώντας ευρύτερα αποδεκτές αποφάσεις, οι οποίες να διαθέτουν επαρκή επιστημονική αιτιολόγηση.

Ωστόσο, είναι παρακινδυνευμένη η χρήση αποτελεσμάτων μιας μελέτης ΑΚΖ με διαφορετικό πλαίσιο εφαρμογής (π.χ. χρονικό ή γεωγραφικό), καθώς η πληθώρα διαφορετικών υποθέσεων και εισαγόμενων στοιχείων είναι δυνατόν να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα. Η ΑΚΖ δεν είναι τίποτα περισσότερο ή λιγότερο από ένα εργαλείο με σαφή χρήση και περιορισμούς. Κατ' αντιστοιχία με την ΑΚΖ, οι μεθοδολογίες ΠΑ δεν αποτελούν τη μέθοδο – πανάκεια επίλυσης κάθε προβλήματος με πολλαπλά κριτήρια αξιολόγησης. Δεν ευαγγελίζονται οτι αποκαλύπτουν τη «σωστή» ή «αντικειμενική» επιλογή, ούτε οτι υπαγορεύουν κατά τρόπο αναντίρητο την «επιστημονικά ορθή» κατάταξη των εναλλακτικών. Τα οφέλη της συνετής χρήσης των μεθοδολογιών ΠΑ συνδέονται τόσο με τα τελικά αποτελέσματα, όσο και με τη διαδικασία δόμησης ενός πολυκριτηριακού ασαφώς ορισμένου προβλήματος. Είναι επίσης αυτονόητο το οτι η ποιότητα του όποιου αποτελέσματος των δυο μεθοδολογιών εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα και την επάρκεια της εισερχόμενης πληροφορίας.

6.2 Συμπεράσματα σχετικά με την προτεινόμενη μεθοδολογία

Η προτεινόμενη μεθοδολογία διαμορφώνει ένα συνολικό πλαίσιο ολοκληρωμένης αξιολόγησης ενεργειακών συστημάτων, το οποίο συνδέεται με εργαλείο υποβοήθησης επιλογής σε συνθήκες αβεβαιότητας. Αποτελεί μια σύνθεση προσεγγίσεων από διαφορετικά επιστημονικά πεδία (ανάλυση ενεργειακών συστημάτων σύμφωνα με τον $1^{ο}$ και $2^{ο}$ θερμοδυναμικό νόμο, επιχειρησιακή έρευνα, περιβαλλοντική ανάλυση κύκλου ζωής, υποστήριξη απόφασης, διαχείριση αβεβαιότητας και θεωρία ασαφών αριθμών), προκειμένου να επιτύχει τους στόχους που καθορίστηκαν στο εισαγωγικό κεφάλαιο.
Η προσέγγιση που διατυπώθηκε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί ως επέκταση των καθιερωμένων μεθόδων τεχνο-οικονομικής αξιολόγησης, καθώς αντιμετωπίζει με επιτυχία βασικούς περιορισμούς που τις χαρακτηρίζουν:

- 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 προτεραιότητων των (εν δυνάμει) αποφασιζόντων, 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».

Επίσης, το παρόν μεθοδολογικό πλαίσιο δεν υποκαθιστά τις προσεγγίσεις προσομοίωσης/βελτιστοποίησης (ενεργειακής, περιβαλλοντικής και οικονομικής) των ενεργειακών συστημάτων, αλλά δρα συμπληρωματικά. Οι μέθοδοι βελτιστοποίησης επεμβαίνουν στις παραμέτρους των συστημάτων, μεγιστοποιώντας την ενεργειακή,

περιβαλλοντική ή την οικονομική αποδοτικότητα ενός συγκεκριμένου ενεργειακού συστήματος. Το ολοκληρωμένο μεθοδολογικό πλαίσιο που προτείνεται είναι σε θέση να αξιοποιήσει το αποτέλεσμα των μεθόδων βελτιστοποίησης σε ανταγωνιστικά συστήματα, προκειμένου να αναδειχτεί το επικρατέστερο εντός ενός πλαισίου υποστήριξης απόφασης που αναζητά έναν ορθολογικά τεκμηριωμένο συμβιβασμό.

Όπως γίνεται σαφές τόσο από την περιγραφή της προτεινόμενης προσέγγισης, τόσο και από τις εφαρμογές που παρατίθενται, έχει δοθεί περισσότερο βάρος στην περιβαλλοντική και τεχνική συνιστώσα της αξιολόγησης των ενεργειακών συστημάτων, καθώς η ενσωμάτωση μιας μεθοδολογίας οικονομικής βελτιστοποίσης κρίθηκε οτι υπερβαίνει το σκοπό της παρούσας διατριβής.

Παρά την προσπάθεια να είναι δυνατή η αξιοποίηση ελλιπών δεδομένων, είναι σαφές ότι η εφαρμογή της ολοκληρωμένης αξιολόγησης απαιτεί μεγάλο όγκο και υψηλή ποιότητα και αξιοπιστία αρχικών δεδομένων. Γι’ αυτό το λόγο το πλαίσιο εφαρμογών περιορίζεται σε επίπεδο ενεργειακού σχεδιασμού ή μεγάλων ενεργειακών επενδύσεων, όπου διαπιστώνεται η ανάγκη συνολικής προσέγγισης, η βιωσιμότητα της επιλογής απαιτεί τον συγκερασμό διαφορετικών προτεραιοτήτων απόφασης και διατίθενται οι πόροι (χρηματικοί και χρονικοί) που απαιτούνται για τη συλλογή και επεξεργασία ενός κρίσιμου όγκου τεχνικών, περιβαλλοντικών και οικονομικών δεδομένων.

Η προτεινόμενη μεθοδολογία αξιολόγησης αποτελεί ένα σπονδυλωτό, αλλά συμπαγές πλαίσιο, που διαμορφώνει ένα περιβάλλον ολοκληρωμένης προσέγγισης του προβλήματος της πολυκριτηριακής αξιολόγησης ενεργειακών τεχνολογιών, διαχειρίζεται ευέλικτα την αβεβαιότητα είτε της αντικειμενικής πληροφορίας (αποτελέσματα επιμέρους τεχνικής – περιβαλλοντικής – οικονομικής αξιολόγησης) είτε της υποκειμενικής (προτεραιότητες αποφασιζόντων) και τελικά συμβάλλει στη συνολική τεκμηρίωση και δικαιολόγηση της επιλογής τεχνολογίας.

6.3 Συμπεράσματα σχετικά με τις εφαρμογές

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής ενέργειας εν γένει, αναγνωρίζονται πλέον, αν όχι ο κυριότερος, τουλάχιστον ως ένας από τους σημαντικότερους επιβαρυντικούς παράγοντες σε παγκόσμιο επίπεδο. Δεν νοείται σχέδιο ενεργειακού σχεδιασμού χωρίς ποσοτικοποίηση των σημαντικότερων επιπτώσεων, η οποία χαρακτηρίζεται ως ελλιπής, αν δεν συμπεριλαμβάνει το σύνολο των σταδίων του κύκλου ζωής των εναλλακτικών επιλογών. Στον αντίποδα δεν είναι δυνατόν να τίθεται υπό διαπραγμάτευση η εξασφάλιση της ενεργειακής παροχής και η διατήρηση της ποιότητας των αντίστοιχων προσφερόμενων υπηρεσιών σε αποδεκτό επίπεδο. Οι εμπλεκόμενες πλευρές (ρυθμιστικοί φορείς ενέργειας, εθνικοί ενεργειακοί φορείς, εταιρίες παραγωγής/εμπορίας, τοπικές αρχές) οφείλουν να λάβουν υπόψη αντικρουόμενα και ανομοιογενή (τεχνικά, οικονομικά, περιβαλλοντικά) κριτήρια αξιολόγησης των εναλλακτικών επιλογών ενεργειακού σχεδιασμού, σε διάφορα επίπεδα απόφασης (από τα άμεσο λειτουργικό μέχρι το μακροπρόθεσμο αναπτυξιακό).

Τα παραπάνω αναδεικνύουν οτι ο ενεργειακός σχεδιασμός αποτελεί ιδανικό χώρο εφαρμογής τόσο της ΑΚΖ, όσο και της ΠΑ. Η ενσωμάτωσή τους σε μια συνολική μεθοδολογία συνδυασμένης αξιολόγησης είναι σε θέση να συνθέσει συνεργητικά τα επιμέρους οφέλη που είναι δυνατόν να 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.

6.3.1 Αξιολόγηση 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.

Το μελλοντικό σενάριο ίσως έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον, καθώς η υπόθεση της συνολικής βελτίωσης των δεικτών του συστήματος MCFC αποδίδει μια σχεδόν ισοσκελισμένη εικόνα. Με δεδομένο λοιπόν ότι θα επαληθευτούν τα επόμενα 10-15 έτη οι πλέον αισιόδοξες προβλέψεις σχετικά με την ενεργειακή αποδοτικότητα και τη μείωση του κόστους εγκατάστασης,

διαφαίνεται ότι οι ΜΒΗ MCFC είναι σε θέση να αντικαταστήσουν συμβατικές μονάδες. Το εύρος της εφαρμογής τους αναμένεται να ενισχυθεί, αν στην απόφαση βαρύνουν περισσότερο τα αντίστοιχα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα της μονάδας MCFC. Ωστόσο, το γεγονός ότι οι συμβατικές μονάδες DE 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.

6.3.2 Αξιολόγηση τεχνολογιών μικρο-συμπαραγωγής ηλεκτρισμού και θερμότητας για οικιακές εφαρμογές

Το συνολικό συμπέρασμα που εξάγεται και από τις δυο περιπτώσεις αξιολόγησης που εξετάστηκαν είναι οτι 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 οτι η τεχνική αποδοτικότητα 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.

6.4 Προτάσεις μελλοντικής έρευνας

Τόσο κατά τη διάρκεια της εκπόνησης, όσο και μετά το πέρας της διατριβής αναδείχθηκαν τρεις κύριες κατευθύνσεις επέκτασης/βελτίωσης της προτεινόμενης μεθοδολογίας. Στη συνέχεια παρατίθενται προτάσεις μελλοντικής έρευνας για κάθε μια από τις κατευθύνσεις αυτές.

6.4.1 Ενίσχυση ποιότητας δεδομένων

Η εισαγωγή δεδομένων υψηλής ποιότητας (με την έννοια της ρεαλιστικής απεικόνισης της τεχνικής, οικονομικής και περιβαλλοντικής επίδοσης μιας αξιολογούμενης τεχνολογίας μέσω των τιμών στα κριτήρια) αποτελεί ζήτημα θεμελιώδους σημασίας για την επιτυχή εφαρμογή του προτεινόμενου μεθοδολογικού πλαισίου. Σχετικές προτάσεις βελτίωσης της εισερχόμενης πληροφορίας είναι:

- Συνδυασμός με «κάθετες» μεθοδολογίες προσομοίωσης ή βελτιστοποίησης.

Η ενσωμάτωση της AKZ εξασφαλίζει την ποιότητα των περιβαλλοντικών κριτηρίων, όμως δεν υπάρχει αντίστοιχη μεθοδολογία προσομοίωσης/βελτιστοποίησης της οικονομικής βιωσιμότητας των αξιολογούμενων συστημάτων. Όσον αφορα την τεχνική συνιστώσα, διατυπώνεται μια μέθοδος προσομοίωσης της μεταβαλλόμενης χρονικά λειτουργίας (§3.2.2.1), η οποία συμβάλλει σε τεχνικά δεδομένα πιο αντιπροσωπευτικά της πραγματικότητας (η συγκεκριμένη μέθοδος δεν εφαρμόστηκε στις μελέτες περιπτώσεων του 4^{ου} και 5^{ου} κεφαλαίου). Παρατηρούνται κατά συνέπεια μεγάλα περιθώρια δημιουργίας συνεργειών με μεθόδους οικονομικής (π.χ. μοντέλα Life Cycle Costing, βελτιστοποίησης εφοδιαστικών αλυσίδων) και ενεργειακής προσομοίωσης/βελτιστοποίησης (π.χ. μοντέλα βελτιστοποίησης λειτουργίας μονάδων μ-ΣΗΘ).

- Συνδυασμός με λογισμικό υπολογισμού μεταβαλλόμενων θερμικών-ηλεκτρικών φορτίων.

Η μέθοδος προσομοίωσης λειτουργίας σε μεταβαλλόμενο φορτίο (§ 3.2.2.1 και Παράρτημα Β) δεν εφαρμόστηκε στις μελέτες περιπτώσεων των κεφαλαίων 4 και 5, είτε λόγω απαιτήσεων εφαρμογής είτε λόγω μη διαθεσιμότητας χρονοσειρών θερμικής ή ηλεκτρικής απαίτησης. Ο συνδυασμός με λογισμικό υπολογισμού μεταβαλλόμενων φορτίων (π.χ. TRNSYS) θα ενισχύσει την αντιπροσωπευτικότητα των ενεργειακών απαιτήσεων.

- Ανάπτυξη και διαχείριση βάσης τεχνικών, οικονομικών και περιβαλλοντικών δεδομένων για συγκεκριμένες εφαρμογές.

Η συλλογή, αποθήκευση και ανανέωση των αντίστοιχων δεδομένων είναι σε θέση να συμβάλλει θετικά στην εισαγωγή αξιόπιστων στοιχείων στη μεθοδολογία αξιολόγησης. Επιπρόσθετα οφέλη θα ήταν η μείωση της ασάφειας των δεδομένων (άρα και του τελικού

αποτελέσματος), όπως και η δυνατότητα παρακολούθησης της τεχνολογικής εξέλιξης, ειδικά των καινοτόμων τεχνολογιών. Η βάση δεδομένων θα μπορούσε επίσης να συμπεριλάβει εναλλακτικές υποστηρικτικές νομοθεσίες για νέες τεχνολογίες (π.χ. μικρο-συμπαραγωγή), ώστε να ενσωματωθεί η αντίστοιχη επίδραση στα οικονομικά κριτήρια.

6.4.2 Επέκταση εφαρμογών και εξεταζόμενων τεχνολογιών

Η προτεινόμενη μεθοδολογία έχει διατυπωθεί κατά τρόπο γενικό, έτσι ώστε να υπάρχει δυνατότητα προσέγγισης προβλημάτων με διαφορετικά χαρακτηριστικά από τις μελέτες περιπτώσεων που αναλύθηκαν. Ως πιθανές επεκτάσεις εφαρμογών προτείνονται οι εξής:

- Προσαρμογή μελετών περιπτώσεων σε συνθήκες ελληνικής ενεργειακής αγοράς και νομοθετικού πλαισίου.

Το γεγονός οτι τα τα περισσότερα από τα δεδομένα των συστημάτων που εξετάστηκαν έγιναν διαθέσιμα μέσω της συμμετοχής σε ευρωπαϊκά ερευνητικά προγράμματα, καθόρισε και το γεωγραφικό πλαίσιο των εφαρμογών (τουλάχιστον της αξιολόγησης συστημάτων μικροσυμπαραγωγής).

- Αξιολόγηση μεγαλύτερου αριθμού ανταγωνιστικών τεχνολογιών.

Για την περίπτωση εφαρμογής του 5^{ου} κεφαλαίου διαπιστώνεται πλήθος συστημάτων, τα οποία παρέχουν αντίστοιχες υπηρεσίες (κάλυψη οικιακών ενεργειακών απαιτήσεων), όπως εναλλακτικές τεχνολογίες μ-ΣΗΘ, αντλίες θερμότητας (συμβατικές και γεωθερμικές), συστήματα ΑΠΕ, κ.α. Η ενσωμάτωση συστημάτων κάλυψης ψυκτικών φορτίων θεωρείται επιβεβλημένη, σε συνδυασμό με την προσαρμογή των εφαρμογών σε ελληνικές συνθήκες. Επιπρόσθετα, η ερευνητική δραστηριότητα δικτύωσης των μονάδων μ-ΣΗΘ σε επίπεδο συνοικίας ανοίγει ένα νέο πεδίο εφαρμογών για την προτεινόμενη μεθοδολογία.

- Επέκταση σε παρεμφερείς ενεργειακές εφαρμογές.

Θεωρητικά υπάρχει δυνατότητα επέκτασης σε όλους τους τύπους προβλημάτων που βρίσκουν εφαρμογή οι μεθοδολογίες ΠΑ και αναφέρονται στην παράγραφο 2.2.2. Ωστόσο, πιο προβάσιμα θεωρούνται προβλήματα που αφορούν την πολυκριτηριακή επιλογή τεχνολογίας, όπως π.χ. σχεδιασμός μίγματος ηλεκτροπαραγωγής.

6.4.3 Εμβάθυνση επιμέρους μεθόδων

Διαπιστώνονται περιθώρια σημαντικής βελτίωσης σε επιμέρους μεθοδολογικά ζητήματα όπως:

- Βελτίωση προσέγγισης σταδίου τέλους ζωής συστήματος

Μια λεπτομερέστερη διερεύνηση των εναλλακτικών οδεύσεων των υλικών κατασκευής μετά την απόσυρση του συστήματος θα συνέβαλλε στην εκτίμηση του πιθανού περιβαλλοντικού οφέλους με μεγαλύτερη ακρίβεια.

- Μοντελοποίηση πραγματικών παραγωγικών διαδικασιών για τα υποσυστήματα.

Οι απαιτήσεις σε ενέργεια του σταδίου της κατασκευής των ανταγωνιστικών συστημάτων στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις προσεγγίστηκε με γενικό τρόπο, ακολουθώντας τις παραδοχές προηγούμενων αντίστοιχων μελετών. Ασφαλέστερα συμπεράσματα σχετικά με τις αντίστοιχες περιβαλλοντικές επιπτώσεις θα μπορούσαν να εξαχθούν, αν μοντελοποιούνταν πραγματικές παραγωγικές διαδικασίες.

- Συνένωση εναλλακτικών οδεύσεων προτεινόμενης μεθοδολογίας (Σχ. 3.6 και 3.8).

Κατά την περίπτωση πλήρους αδυναμίας προσδιορισμού της υποκειμενικής συνιστώσας, δεν χρησιμοποιούνται ασαφείς αριθμοί στο πολυκριτηριακό μοντέλο (§3.2.3.1). Η πιθανή αποφυγή της αποασαφοποίησης σε αρχικό στάδιο της μεθοδολογίας, θα αποδώσει ως αποτέλεσμα ένα τριγωνικό διάγραμμα με περισσότερη πληροφορία, καθώς εκτός των περιοχών επικράτησης των εναλλακτικών θα αναδειχθούν και περιοχές ασάφειας.

- Προσέγγιση μελετών περιπτώσεων με εναλλακτικές μεθοδολογίες ΠΑ.

Σε επίπεδο μεθοδολογικής σύγκρισης προτείνεται η προσέγγιση των περιπτώσεων εφαρμογής με διαφορετικές μεθόδους ΠΑ (βλ. §2.2.1.1), ώστε πιθανότατα να αναδειχθούν σημεία στα οποία υστερεί η προτεινόμενη μεθοδολογία, με απώτερο σκοπό την ενσωμάτωση νέων μεθοδολογικών στοιχείων.

Παραρτήματα

Παράρτημα Α - Η οικογένεια μεθόδων PROMETHEE (Brans et al, 1986)

Έστω *A* το σύνολο των *J* εναλλακτικών δράσεων προς αξιολόγηση [$A = \{a_1,\ldots,a_J\}$: a_j $(j = 1,\ldots,J)$] και *F* το σύνολο των I κριτηρίων αξιολόγησης [$F = \{f_1,\ldots,f_I\}$: f_i $(i = 1,\ldots,I)$].
Τα βασικά στοιχεία του πολυκριτηριακού προβλήματος απεικονίζονται στον I x J πίνακα (Πίνακας Απόφασης – Decision Matrix):

$$DM(i,j) = \begin{pmatrix} f_1(a_1) & \cdots & f_1(a_J) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_I(a_1) & \cdots & f_I(a_J) \end{pmatrix} \qquad (\Pi.1)$$

Η εφαρμογή της μεθόδου PROMETHEE ακολουθεί τα παρακάτω στάδια:

1. Οι εναλλακτικές επιλογές a_j συγκρίνονται ανά ζεύγη και για κάθε κριτήριο *i* υπολογίζεται η διαφορά $d_i^{j,j'}$ των τιμών $f_i(a_j)$ και $f_i(a_{j'})$. Η προτίμηση του a_j έναντι του $a_{j'}$ για το κριτήριο *i* εκφράζεται από έναν αριθμό $P_i(d_i^{j,j'})$, μεταξύ του διαστήματος [0,1] (0 για απουσία προτίμησης ή παρουσία αδιαφορίας και 1 για αυστηρή προτίμηση). Η συνάρτηση που συνδέει τη διαφορά απόδοσης με την προτίμηση δύναται να καθοριστεί από τον λήπτη απόφασης και ονομάζεται γενικευμένο κριτήριο.
   Προτείνονται έξι μορφές συναρτήσεων προτίμησης (Σχήμα Π.1). Εκτός από την πρώτη περίπτωση, ορίζονται μία ή δυο παράμετροι, οι οποίες έχουν σαφή σημασία:
   q: Κατώφλιο αδιαφορίας (κάθε διαφορα $d_i^{j,j'}$ με μικρότερη τιμή αποδίδει μηδενική προτίμηση του a_j έναντι του $a_{j'}$)
   p: Κατώφλιο προτίμησης (κάθε διαφορα $d_i^{j,j'}$ με μεγαλύτερη τιμή αποδίδει ολική προτίμηση του a_j έναντι του $a_{j'}$)
   s: Παράμετρος γκαουσιανού γενικευμένου κριτηρίου (σημείο καμπής αντίστοιχης συνάρτησης)

2. Ένας πολυκριτηριακός Δείκτης Προτίμησης $\Pi^{j,j'}$ σχηματίζεται για κάθε ζεύγος δράσεων a_j και $a_{j'}$ ως ο σταθμισμένος μέσος των αντίστοιχων προτιμήσεων που έχουν υπολογιστεί στο προηγούμενο στάδιο για κάθε κριτήριο. Ο δείκτης $\Pi^{j,j'}$ (στο διάστημα [0,1]) εκφράζει τη συνολική προτίμηση της δράσης a_j σε σχέση με τη $a_{j'}$ (λαμβάνοντας υπόψη το σύνολο των κριτηρίων αξιολόγησης). Ο αποφασίζων καθορίζει τους βαθμούς βαρύτητας w_i των κριτηρίων.

$$\Pi^{j,j\prime} = \sum_{i=1}^{I} P_i\left(d_i^{j,j'}\right) * w_i \Big/ \sum_{i=1}^{I} w_i \qquad (\Pi.2)$$

3. Η κατάταξη των εναλλακτικών επιλογών επιτυγχάνεται σύμφωνα με:
   - Το αδιαστατοποιημένο άθροισμα των δεικτών $\Pi^{j,j'}$, δηλώνοντας την προτίμηση της δράσης a_j σε σχέση με τις υπόλοιπες. Η τιμή αυτή ονομάζεται ροή εκροής (υπεροχής) $\varphi^+(a_j)$ και αποτελεί μέτρο έκφρασης της συνολικής υπεροχής της δράσης a_j.
   $$\varphi^+(a_j) = \sum_{j'=1}^{J} \Pi^{j,j\prime} \qquad (\Pi.3)$$
   - Το αδιαστατοποιημένο άθροισμα των δεικτών $\Pi^{j',j}$, δηλώνοντας την προτίμηση όλων των άλλων εναλλακτικών επιλογών συγκρινόμενες με την a_j . Η τιμή αυτή ονομάζεται ροή εισροής (υστέρησης) $\varphi^-(a_j)$ και αποτελεί μέτρο έκφρασης της συνολικής υστέρησης της δράσης a_j.
   $$\varphi^-(a_j) = \sum_{j'=1}^{J} \Pi^{j',j} \qquad (\Pi.4)$$

Σύμφωνα με τη μέθοδο PROMETHEE I, μία δράση a_j θεωρείται υπέρτερη από μία δράση $a_{j'}$, όταν η ροή εκροής της a_j είναι μεγαλύτερη από αυτήν της $a_{j'}$ και όταν η ροή εισροής της a_j είναι μικρότερη από αυτήν της $a_{j'}$. Δηλαδή όταν ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$\varphi^+(a_j) \geq \varphi^+(a_{j\prime}) \text{ και } \varphi^-(a_j) \leq \varphi^-(a_{j\prime}) \qquad (\Pi.5)$$

Η περίπτωση της ισότητας δηλώνει την ύπαρξη αδιαφορίας προτίμησης μεταξύ των δράσεων a_j και $a_{j'}$.
Στην περίπτωση που η ροή εκροής δηλώνει προτίμηση της δράσης a_j, ενώ η ροή εισροής δηλώνει προτίμηση της δράσης $a_{j'}$, τότε οι δύο επιλογές θεωρούνται μη συγκρίσιμες μεταξύ τους.
Αυτό συμβαίνει όταν ισχύουν οι σχέσεις:

$\varphi^+(a_j) > \varphi^+(a_{j'})$ και $\varphi^-(a_j) > \varphi^-(a_{j'})$ (Π.6) ή

$\varphi^+(a_j) < \varphi^+(a_{j'})$ και $\varphi^-(a_j) < \varphi^-(a_{j'})$ (Π.7)

Generalised criterion	Definition	Parameters to fix
Type 1: Usual Criterion	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \le 0 \\ 1 & d > 0 \end{cases}$	–
Type 2: U-shape Criterion	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \le q \\ 1 & d > q \end{cases}$	q
Type 3: V-shape Criterion	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \le 0 \\ \frac{d}{p} & 0 \le d \le p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p
Type 4: Level Criterion	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \le q \\ \frac{1}{2} & q < d \le p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
Type 5: V-shape with indifference Criterion	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \le q \\ \frac{d-q}{p-q} & q < d \le p \\ 1 & d > p \end{cases}$	p, q
Type 6: Gaussian Criterion	$P(d) = \begin{cases} 0 & d \le 0 \\ 1 - e^{-\frac{d^2}{2s^2}} & d > 0 \end{cases}$	s

Σχήμα Π.1 Εναλλακτικές μορφές συναρτήσεων προτίμησης μεθόδου PROMETHEE

Η μέθοδος PROMETHEE II επιτρέπει την πλήρη κατάταξη των εναλλακτικών δράσεων, μέσω του υπολογισμού της καθαρής ροής (διαφορά μεταξύ των ροών εκροής και εισροής).

$\varphi(a_j)=\varphi^+(a_j) - \varphi^-(a_j)$ (Π.8)

Παράρτημα Β – Αναλυτική περιγραφή εξισώσεων προσομοίωσης σταθερής και μεταβαλλόμενης χρονικά λειτουργίας συστημάτων κάλυψης θερμικών/ηλεκτρικών φορτίων

Προσομοίωση σταθερής χρονικά λειτουργίας

Ειδική κατανάλωση καυσίμου συνολικού χρόνου λειτουργίας - m_{f_L}

$m_{f\_L} = M_{f\_L} / W_{el\_out\_L} = (Q_{f\_L} / H_u) / (Q_{f\_L} \cdot \eta_{el\_NM}) = 1 / (\eta_{el\_NM} \cdot H_u)$

Ειδική εκπομπή αερίου ρύπου p συνολικού χρόνου λειτουργίας – e_{p_L}

$e_{p\_L} = E_{p\_L} / W_{el\_out\_L} = (e_{p\_NM} \cdot W_{el\_out\_L}) / W_{el\_out\_L} = e_{p\_NM}$

Ειδική συμπαραγωγή θερμότητας συνολικού χρόνου λειτουργίας

$q_{th\_out\_L} = Q_{th\_out\_L}/W_{el\_out\_L} = Q_{th\_out\_L}/(PHR\_{NM} \cdot Q_{th\_out\_L}) = 1 / PHR\_{NM}$

Προσομοίωση μεταβαλλόμενης χρονικά λειτουργίας

$W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)=\dot{W}_{el\_out}(i\cdot\Delta t)\cdot\Delta t$

$\dot{W}_{el\_out}(0)=0$

A. $\dot{W}_{el\_load}(n\cdot\Delta t) > \dot{W}_{el\_out\_NM}$

Περιορισμός ευελιξίας απόδοσης

1. $\left[\frac{\dot{W}_{el\_out\_NM} - \dot{W}_{el\_out}([n-1]\cdot\Delta t)}{\Delta t}\right] <$ RR

$\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t) = \dot{W}_{el\_out\_NM}$

$f(n\cdot\Delta t)=1$

$$\boxed{W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)= \dot{W}_{el\_out\_NM}\cdot\Delta t}$$

$$M_f(n\cdot\Delta t)= Q_f(n\cdot\Delta t) / H_u = \frac{W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)}{\eta_{el}[f(n\cdot\Delta t)]\cdot H_u} \rightarrow \boxed{M_f(n\cdot\Delta t)= \frac{\dot{W}_{el\_out\_NM}}{\eta_{el\_N}\cdot H_u}\cdot\Delta t}$$

$$E_p(n\cdot\Delta t)= e_p[f(n\cdot\Delta t)]\cdot W_{el\_out}(n\cdot\Delta t) \rightarrow \boxed{E_p(n\cdot\Delta t)= e_{p\_N}\cdot\dot{W}_{el\_out\_NM}\cdot\Delta t}$$

$$Q_{th\_out}(n\cdot\Delta t) = \frac{W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)}{PHR[f(n\cdot\Delta t)]} \rightarrow \boxed{Q_{th\_out}(n\cdot\Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_out\_N}}{PHR_{\_N}}\cdot\Delta t}$$

2. $\left[\frac{\dot{W}_{el\_out\_N} - \dot{W}_{el\_out}([n-1]\cdot\Delta t)}{\Delta t}\right] > RR$

$\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t) = \left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] + RR\cdot\Delta t\right]$

$f(n\cdot\Delta t)= \frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] + RR\cdot\Delta t}{\dot{W}_{el\_out\_NM}}$

$$\boxed{W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)= \left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] + RR\cdot\Delta t\right]\cdot\Delta t}$$

$$\boxed{M_f(n\cdot\Delta t)= \frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] + RR\cdot\Delta t}{\eta_{el}[f(n\cdot\Delta t)]\cdot H_u}\cdot\Delta t}$$

$$\boxed{E_p(n\cdot\Delta t)= e_p[f(n\cdot\Delta t)]\cdot\left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] + RR\cdot\Delta t\right]\cdot\Delta t}$$

$$\boxed{Q_{th\_out}(n\cdot\Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t] + RR\cdot\Delta t}{PHR[f(n\cdot\Delta t)]}\cdot\Delta t}$$

Β. $\dot{W}_{el\_out\_TD} < \dot{W}_{el\_load}(n \cdot \Delta t) < \dot{W}_{el\_out\_NM}$

1. Μεταβολή ενεργειακής απαίτησης εντός τεχνικού περιορισμού συστήματος: $\left[\frac{\left|\dot{W}_{el\_load}(n \cdot \Delta t) - \dot{W}_{el\_out}([n-1] \cdot \Delta t)\right|}{\Delta t}\right] < RR$

$$\dot{W}_{el\_out}(n \cdot \Delta t) = \dot{W}_{el\_load}(n \cdot \Delta t)$$

$$f(n \cdot \Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_load}(n \cdot \Delta t)}{\dot{W}_{el\_out\_NM}}$$

$$W_{el\_out}(n \cdot \Delta t) = \dot{W}_{el\_load}(n \cdot \Delta t) \cdot \Delta t$$

$$M_f(n \cdot \Delta t) = \frac{W_{el\_out}(n \cdot \Delta t)}{\eta_{el}[f(n \cdot \Delta t)] \cdot H_u} \rightarrow M_f(n \cdot \Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_load}(n \cdot \Delta t)}{\eta_{el}[f(n \cdot \Delta t)] \cdot H_u} \cdot \Delta t$$

$$E_p(n \cdot \Delta t) = e_p[f(n \cdot \Delta t)] \cdot W_{el\_out}(n \cdot \Delta t) \rightarrow$$

$$E_p(n \cdot \Delta t) = e_p[f(n \cdot \Delta t)] \cdot \dot{W}_{el\_load}(n \cdot \Delta t) \cdot \Delta t$$

$$Q_{th\_out}(n \cdot \Delta t) = W_{el\_out}(n \cdot \Delta t)/PHR[f(n \cdot \Delta t)] \rightarrow$$

$$Q_{th\_out}(n \cdot \Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_load}(i \cdot \Delta t)}{PHR[f(i \cdot \Delta t)]} \cdot \Delta t$$

2. Μεταβολή ενεργειακής απαίτησης εκτός τεχνικού περιορισμού συστήματος: $\left[\frac{\left|\dot{W}_{el\_load}(n \cdot \Delta t) - \dot{W}_{el\_out}([n-1] \cdot \Delta t)\right|}{\Delta t}\right] > RR$

$$\dot{W}_{el\_out}(n \cdot \Delta t) = \left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1) \cdot \Delta t] \pm RR \cdot \Delta t\right]$$

$$f(n \cdot \Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1) \cdot \Delta t] \pm RR \cdot \Delta t}{\dot{W}_{el\_out\_N}}$$

$$W_{el\_out}(n \cdot \Delta t) = \left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1) \cdot \Delta t] \pm RR \cdot \Delta t\right] \cdot \Delta t$$

$$M_f(n \cdot \Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1) \cdot \Delta t] \pm RR \cdot \Delta t}{\eta_{el}[f(n \cdot \Delta t)] \cdot H_u} \cdot \Delta t$$

$$E_p(n \cdot \Delta t) = e_p[f(n \cdot \Delta t)] \cdot \left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1) \cdot \Delta t] \pm RR \cdot \Delta t\right] \cdot \Delta t$$

$$Q_{th\_out}(n \cdot \Delta t) = \frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1) \cdot \Delta t] \pm RR \cdot \Delta t}{PHR[f(n \cdot \Delta t)]} \cdot \Delta t$$

Γ. $\dot{W}_{el\_out\_TD} > \dot{W}_{el\_load}(n \cdot \Delta t)$

1. Διακοπή λειτουργίας

$$\dot{W}_{el\_out}(n \cdot \Delta t) = 0$$

$W_{el\_out}(n \cdot \Delta t) = 0$
$M_f(n \cdot \Delta t) = 0$
$E_p(n \cdot \Delta t) = 0$
$Q_{th\_out}(n \cdot \Delta t) = 0$

2. Λειτουργία στο τεχνικό ελάχιστο

i. $-\left[\frac{\dot{W}_{el\_out\_TD} - \dot{W}_{el\_out}([n-1] \cdot \Delta t)}{\Delta t}\right] < RR$

$$\dot{W}_{el\_out}(n \cdot \Delta t) = \dot{W}_{el\_out\_TD}$$

$$f(n\cdot\Delta t)=\frac{\dot{W}_{el\_out\_TD}}{\dot{W}_{el\_out\_NM}}$$

$$W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)=\dot{W}_{el\_out\_TD}\cdot\Delta t$$

$$M_f(n\cdot\Delta t)=Q_f(n\cdot\Delta t)\,/\,H_u=\frac{W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)}{\eta_{el}[f(n\cdot\Delta t)]\cdot H_u}\rightarrow$$

$$M_f(n\cdot\Delta t)=\frac{\dot{W}_{el\_out\_TD}}{\eta_{el\_TD}\cdot H_u}\cdot\Delta t$$

$$E_p(n\cdot\Delta t)=e_p[f(n\cdot\Delta t)]\cdot W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)\rightarrow$$

$$E_p(n\cdot\Delta t)=e_{p\_TD}\cdot\dot{W}_{el\_out\_TD}\cdot\Delta t$$

$$Q_{th\_out}(n\cdot\Delta t)=\frac{W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)}{PHR[f(n\cdot\Delta t)]}\rightarrow$$

$$Q_{th\_out}(n\cdot\Delta t)=\frac{\dot{W}_{el\_out\_TD}}{PHR_{\_TD}}\cdot\Delta t$$

ii. $$-\left[\frac{\dot{W}_{el\_out\_TD}-\dot{W}_{el\_out}([n-1]\cdot\Delta t)}{\Delta t}\right] > RR$$

$$\dot{W}_{el\_out}(n\cdot\Delta t)=\left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t]-RR\cdot\Delta t\right]$$

$$f(n\cdot\Delta t)=\frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t]-RR\cdot\Delta t}{\dot{W}_{el\_out\_N}}$$

$$W_{el\_out}(n\cdot\Delta t)=\left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t]-RR\cdot\Delta t\right]\cdot\Delta t$$

$$M_f(n\cdot\Delta t)=\frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t]-RR\cdot\Delta t}{\eta_{el}[f(n\cdot\Delta t)]\cdot H_u}\cdot\Delta t$$

$$E_p(n\cdot\Delta t)=e_p[f(n\cdot\Delta t)]\cdot\left[\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t]-RR\cdot\Delta t\right]\cdot\Delta t$$

$$Q_{th\_out}(n\cdot\Delta t)=\frac{\dot{W}_{el\_out}[(n-1)\cdot\Delta t]-RR\cdot\Delta t}{PHR[f(n\cdot\Delta t)]}\cdot\Delta t$$

Παράρτημα Γ – Παράδειγμα αριθμητικής εφαρμογής ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης σε συνθήκες μερικής αβεβαιότητας (Giannopoulos and Founti, 2010)[2]

Στο παράδειγμα που ακολουθεί γίνεται αριθμητική εφαρμογή ασαφούς πολυκριτηριακής ανάλυσης σε συνθήκες μερικής αβεβαιότητας ως προς τον καθορισμό της υποκειμενικότητας (Σχήμα 3.8). Τα αριθμητικά δεδομένα της εφαρμογής απεικονίζονται στον Πίνακα Π.1 και αφορούν την πολυκριτηριακή σύγκριση τεσσάρων εναλλακτικών σεναρίων κατασκευής 100 m^2 γυψοσανίδας (Le Téno and Mareschal; 1998). Η μετατροπή των ασαφών διαστημάτων (fuzzy intervals) που χρησιμοποιούνται στην αρχική εργασία σε ασαφείς τριγωνικούς αριθμούς της μορφής $\tilde{M} = (m, a, b)$ (Εξίσωση 3.7 – Σχήμα 3.5) γίνεται με το να θεωρηθεί ότι η κεντρική τιμή m ισούται με τον μέσο όρο των δύο ακραίων τιμών των διαστημάτων. Επιπρόσθετα, γίνεται εκτίμηση των γραμμικών κατωφλίων προτίμησης p_j (q_j=0), καθώς οι αντίστοιχες τιμές δεν υπάρχουν στην αρχική εργασία.

Scenarios	**Criterion A (f_1)** Dust generated (kg)	**Criterion B (f_2)** Total energy consumed (kWh)	**Criterion C (f_3)** Waste generated (kg)
1 (a_1) Open pit mining and use of rotary kiln	(6.5, 6.5, 6,5)	(676.5, 124.5, 124.5)	(1154.5, 628.5,628.5)
2 (a_2) Open pit mining and use of pot kiln	(6, 6, 6)	(669, 142, 142)	(1154.5, 628.5,628.5)
3 (a_3) Underground mining and use of rotary kiln	(6.5, 6.5, 6,5)	(680.5, 124.5, 124.5)	(105.5, 65.5, 65.5)
4 (a_4) Open pit mining and use of pot kiln	(6, 6, 6)	(673, 142, 142)	(105.5, 65.5, 65.5)
Weight factors (w_j)			
	(0.333, 0, 0)	(0.333, 0, 0)	(0.333, 0, 0)
Preference threshold (p_j) (q_j=0)			
	1.6	80	4000

Πίνακας Π.1 Δεδομένα ΠΑ εφαρμογής παραδείγματος

Ακολουθούνται τα βήματα 0, 1, 2 και 3 της μεθοδολογίας του σχήματος 3.8 (§ 3.2.3.3) προκειμένου να υπολογιστούν οι ασαφείς ροές και η αντίστοιχη κατάταξη, με τα αποτελέσματα να παρουσιάζονται στον πίνακα Π.2. Παρατίθενται επίσης τα αντίστοιχα αποτελέσματα της κλασσικής μεθοδολογίας (Brans et al., 1986) και της ασαφούς προσέγγισης των Le Téno και Mareschal (1998). Η κατάταξη της προτεινόμενης μεθοδολογίας διαμορφώνεται βάσει του δείκτη αποτίμησης
$E_i(\tilde{\varphi}(\alpha_j))$ (σχετικά αποτελέσματα στον πίνακα Π.3).

Η προτεινόμενη προσέγγιση επιτυγχάνει να αποτυπώσει την επίδραση της αβεβαιότητας των δεδομένων στα αποτελέσματα, καθώς καταλήγει σε διαφορετική κατάταξη από αυτήν της κλασικής μεθόδου. Όπως ήταν αναμενόμενο, παρατηρείται ταύτιση με την κατάταξη της ασαφούς μεθόδου των Le Téno και Mareschal (1998), ωστόσο η προτεινόμενη μεθοδολογία (μέσω της αποφυγής της αποασαφοποίησης) παρουσιάζει τα αποτελέσματα σε ασαφή μορφή, αποδίδοντας μια αρχική απεικόνιση της ασάφειας των ροών προτίμησης (Σχήμα Π.2).
Η διατήρηση της ασαφούς μορφής έχει ως επακόλουθο την ενίσχυση της πληροφορίας που φέρει το τελικό αποτέλεσμα, καθώς αναπαρίσταται γραφικά το εύρος διακύμανσης που αντιστοιχεί σε μια ποιοτική απεικόνιση της αβεβαιότητας του προβλήματος αξιολόγησης (Σχήμα Π.2). Το ασαφές αποτέλεσμα (Στήλη 4 του Πίνακα Π.2) είναι πιο χρήσιμο από το απόλυτο (Στήλη 3 – Π.2), δεδομένου ότι υπάρχουν άπειροι ασαφείς αριθμοί που αποδίδουν το ίδιο αποασαφοποιημένο αποτέλεσμα (π.χ. δείκτη Yager).

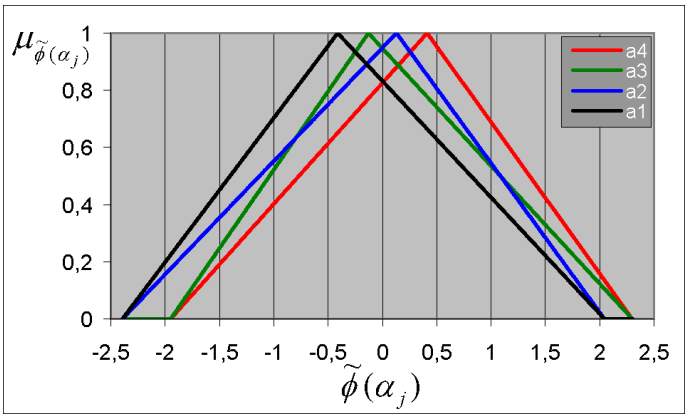
[2] Giannopoulos D and Founti M.A. A fuzzy approach to incorporate uncertainty in the PROMETHEE multicriteria method. International Journal of Multicriteria Decision Making, 1(1) (2010) 80 – 102.

Scenarios	PROMETHEE II (Brans et al., 1986)	Le Téno and Mareschal; 1998	Proposed approach
	Net flow	Defuzzified flow intervals	Fuzzy net flow
1 (a_1)	-0.41	-0.26	(-0.41, 1.98, 2.45)
2 (a_2)	0.13	-0.13	(0.13, 2.52, 1.91)
3 (a_3)	-0.13	0.13	(-0.13, 1.82, 2.43)
4 (a_4)	0.41	0.26	(0.41, 2.36, 1.89)
Ranking	**4 > 2 > 3 > 1**	**4 > 3 > 2 > 1**	**4 > 3 > 2 > 1**

Πίνακας Π.2 Αποτελέσματα μεθόδου PROMETHEE II (Brans, Vincke, and Mareschal, 1986), της ασαφούς μεθόδους των Le Téno and Mareschal (1998) και της προτεινόμενης ασαφούς μεθοδολογίας

Scenarios	COA($\tilde{\varphi}(a_j)$)	$E_\lambda(\tilde{\varphi}(a_j))$
1 (a_1)	-0.25	1.82
2 (a_2)	-0.07	1.98
3 (a_3)	0.07	2.10
4 (a_4)	0.25	2.26

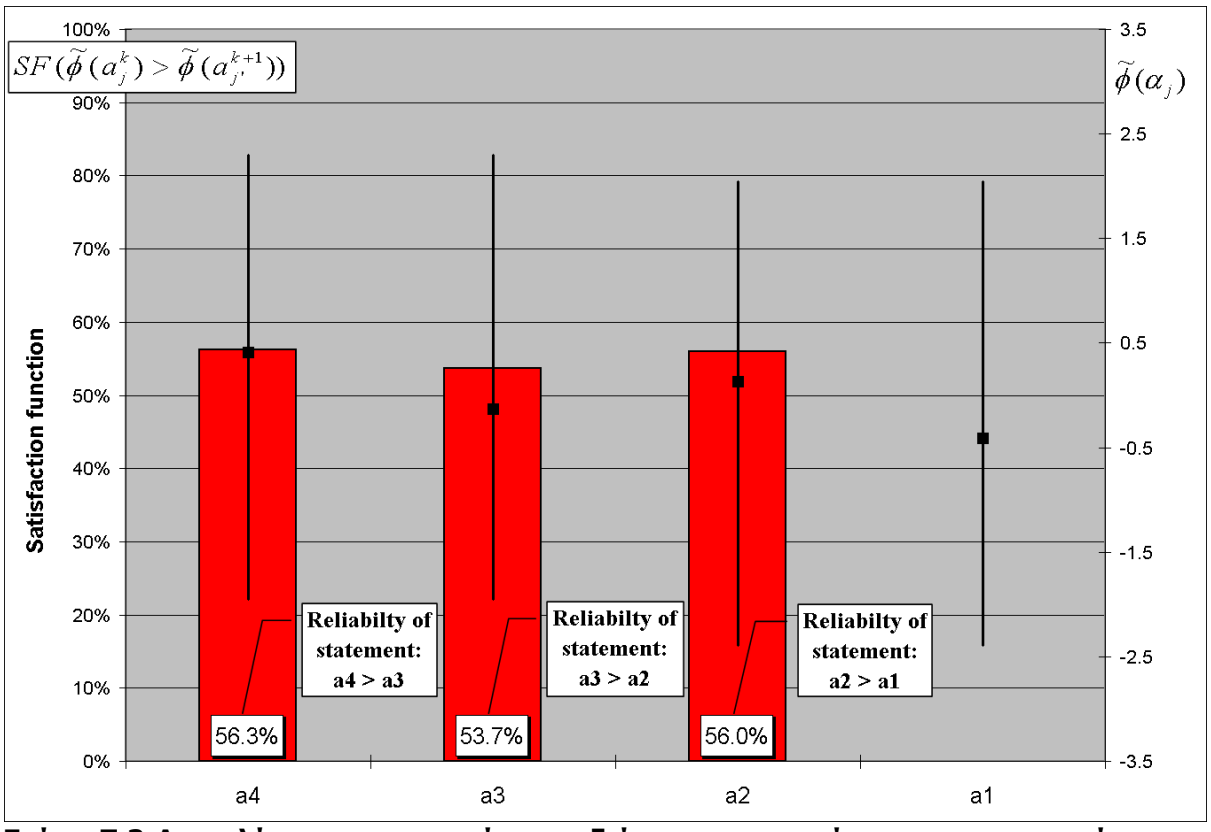
Πίνακας Π.3 Δείκτης αποτίμησης $E_\lambda(\tilde{\varphi}(\alpha_j))$



Σχήμα Π.2 Απεικόνιση των ασαφών καθαρών ροών (Πίνακας Π.3)

Τα αποτελέσματα που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο απέδειξαν την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης, καθώς διαχειρίστηκε και ερμήνευσε με επιτυχία την ασάφεια των αρχικών δεδομένων. Στις επόμενες παραγράφους εφαρμόζεται το κύριο στοιχείο πρωτοτυπίας, η ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας της ασαφούς κατάταξης.

Το Σχήμα Π.3 παρουσιάζει τα αποτελέσματα του δείκτη $SF(\tilde{\varphi}(a_j^k) > \tilde{\varphi}(a_{j'}^{k+1}))$ για τα τρία ζεύγη της ασαφούς κατάταξης, μετά από εφαρμογή της εξίσωσης 3.22. Η αξιοπιστία για κάθε ζεύγος κατάταξης αναπαρίσταται με ράβδους και αντιστοιχεί στον αριστερό άξονα Υ. Τα αποτελέσματα των ασαφών ροών (Πίνακας Π.2) αντιστοιχούν στον δεξιό άξονα Υ. Το τετράγωνο σε κάθε γραμμή αντιστοιχεί στην κεντρική τιμή των ασαφών ροών ($\tilde{\phi}_m(\alpha_j)$), η οποία είναι ίδια με το αποτέλεσμα της κλασικής μεθόδου PROMETHEE (Στήλη 2 πίνακα Π-2). Η ασαφής προτίμηση που ποιοτικά παρουσιάζεται στο Σχήμα Π.2 (μέσω επικαλύψεων των ασαφών ροών) ποσοτικοποιείται μέσω της εφαρμογής της αντίστοιχης μεθοδολογίας (§ 3.2.3.3 – Συνθήκες μερικής αβεβαιότητας). Η συνολική αξιοπιστία της ασαφούς κατάταξης υπολογίζεται μέσω της εξίσωσης 3.23.



Σχήμα Π.3 Αποτελέσματα εφαρμογής παραδείγματος και αντίστοιχη ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας της κατάταξης

Σε όλα τα κατατατετεγμένα ζεύγη παρατηρείται ασθενής προτίμηση (§ 3.2.3.3 - ανάλυση αβεβαιότητας ασαφούς κατάταξης), καθώς ο δείκτης αξιοπιστίας είναι μικρότερος του 60%, απόρροια των παραπλήσιων τιμών του πίνακα Π.1 και του μεγάλου εύρους ασάφειας. Αναδεικνύεται μια έντονα ασταθής κατάταξη, ιδιαίτερα ευαίσθητη σε αλλαγές.
Ο Πίνακας Π.4 παρουσιάζει το δείκτη αξιοπιστίας SF για τα επιμέρους ζεύγη και για τη συνολική κατάταξη των τριών μεθόδων (ORR).

	PROMETHEE II (Brans, Vincke and Mareschal, 1986)			**Le Téno and Mareschal (1998)**		**Proposed approach**
Ranking	4 > 2 > 3 > 1			4 > 3 > 2 > 1		
Satisfaction function index SF	$a_4>a_2$	$a_2>a_3$	$a_3>a_1$	$a_4>a_3$	$a_3>a_2$	$a_2>a_1$
	59.8%	**46.3%**	59.9%	56.3%	**53.7%**	56.0%
ORR	**55.3%**			**55.3%**		

Πίνακας Π.4 Δείκτης αξιοπιστίας SF κατατάξεων της κλασικής μεθόδου PROMETHEE II, της ασαφούς μεθόδου των Le Téno and Mareschal (1998) και της προτεινόμενης μεθοδολογίας

Ο δείκτης SF της κατάταξης της μεθόδου PROMETHEE II δεν λαμβάνει υπόψη το εύρος της ασάφειας των δεδομένων, εξού και η αλλαγή στις δυο άλλες μεθόδους που συνυπολογίζουν το εύρος διακύμανσης των δεδομένων του πίνακα Π.1. Η συνολική αξιοπιστία είναι κοινή (και εξαιρετικά χαμηλή), ωστόσο το όφελος από την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθοδολογίας εντοπίζεται οτι εξασφαλίζεται αξιοπιστία τουλάχιστον 50% για κάθε κατατεταγμένο ζεύγος και καθιστά δυνατή την ποσοτικοποίηση της αξιοπιστίας.

Παράρτημα Δ – Τεχνικά χαρακτηριστικά και τυπικές διαστάσεις ηλεκτροπαραγωγών ζευγών με κινητήρα Diesel (Wartsila, 2011)

PRE-ENGINEERED MEDIUM-SPEED GENERATING SETS

Main data of generators	**60 Hz**	**50 Hz**
Voltage	450, 690 V	400, 690 V
Protection class	IP 23, IP 44 *	IP 23, IP 44 *
Temperature rise and isolation	Class F	Class F
Cooling	Air, water *	Air, water *

* Option

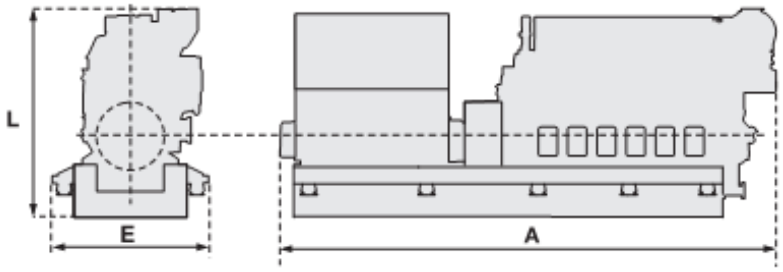
Fuel oil specification:
700 cSt/50°C, 7200 sR1/100°F, ISO 8217, category ISO-F-RMK 55

60 Hz

	Output		Dimensions (mm) and weights (tonnes)			
Type	kWe	kVA	A	E	L	Weight
520W4L20	520	650	3 837	1 720	2 243	13.4
645W4L20	645	806	4 390	1 720	2 243	14.0
760W6L20	760	950	4 988	1 720	2 243	17.0
875W6L20	875	1 094	5 048	1 720	2 243	17.3
975W6L20	975	1 219	5 158	1 720	2 243	17.9
1050W6L20	1 050	1 313	5 083	1 920	2 243	19.1
1200W8L20	1 200	1 500	5 758	1 920	2 490	21.2
1400W8L20	1 400	1 750	5 900	1 920	2 474	21.5
1600W9L20	1 600	2 000	6 513	1 920	2 474	23.6
1800W6L26	1 800	2 250	6 422	2 246	2 938	31.7
2100W8L26	2 100	2 625	7 664	2 332	3 025	41.7
2400W8L26	2 400	3 000	7 744	2 332	3 025	42.3
2700W9L26	2 700	3 375	8 799	2 332	3 090	46.8

50 Hz

	Output		Dimensions (mm) and weights (tonnes)			
Type	kWe	kVA	A	E	L	Weight
520W4L20	520	650	3 648	1 770	2 243	13.0
670W4L20	670	838	3 837	1 770	2 243	13.6
790W6L20	790	988	4 988	1 770	2 243	16.2
860W6L20	860	1 075	5 048	1 770	2 243	16.9
1000W6L20	1 000	1 250	5 158	1 770	2 243	17.5
1140W6L20	1 140	1 425	5 288	1 770	2 243	18.1
1350W8L20	1 350	1 688	5 758	1 920	2 490	21.7
1550W9L20	1 550	1 938	6 163	1 920	2 474	22.9
1700W9L20	1 700	2 125	6 513	1 920	2 474	24.4
1950W6L26	1 950	2 438	6 422	2 246	2 938	31.7
2250W8L26	2 250	2 813	7 644	2 332	3 025	41.7
2550W9L26	2 550	3 188	8 809	2 332	3 090	46.5
2850W9L26	2 850	3 563	8 809	2 332	3 090	46.5



Πίνακας Π.5 Τεχνικά χαρακτηριστικά και τυπικές διαστάσεις ηλεκτροπαραγωγών ζευγών με κινητήρα Diesel

Παράρτημα Ε – Βάση δεδομένων ΑΚΖ 4ου κεφαλαίου.

1. Liquid desulphuriser (R-101)				
Component	Materials	Weight (tn)	Contribution (%)	Reference
Reactor	Stainless Steel (SS)	5.18	42.3%	Communication with OWI (11/2006).
Adsorber	Ni	4.05	33.1%	
	NiO	1.10	9.0%	
	Al_2O_3	0.64	5.2%	
	ZnO	1.28	10.4%	
Subtotal		**12.25**	**100.0%**	

4. MCFC Module					
Component	Subcomponent	Materials	Weight (tn)	Contribution (%)	Reference
Fuel Cell Assembly (FA-101)	MCFC Stack	SS	3.81	9.3%	Communication with AFCo (10/2007), relevant deliverables, assumptions from [Alkaner and Zhou, 2006] and [Karakoussis et al., 2001].
		NiCr	1.15	2.8%	
		Ni	0.23	0.6%	
		NiO	0.73	1.8%	
		Li_2CO_3	0.48	1.2%	
		K_2CO_3	0.38	0.9%	
		$LiAlO_2$	0.62	1.5%	
	MIHEX	Incoloy	0.75	1.8%	
	Pressurised vessel	SS	13.85	33.9%	
		Silica sand	1.49	3.6%	
		TiO_2	0.73	1.8%	
	Connection devices	SS	6.69	16.4%	
	Electrical heaters	Incoloy	0.75	1.8%	
		NiCr	0.17	0.3%	
		MnO	0.17	0.3%	
	Recycle blower	SS	0.57	1.4%	
		Incoloy	0.12	0.3%	
Gas Turbine Module (GTM 1&2)	Gas Turbine (x2)	SS	0.4	1.0%	
		Cast iron	0.34	0.9%	
	Generator	SS	1.38	3.4%	
		Cu	0.19	0.3%	
Convective Generation Assembly	Downstream steam generator (CA-102)	SS	0.28	0.7%	
		Incoloy	0.28	0.7%	
	Steam drum (T-102)	SS	1.73	4.2%	
Steam Generator (E-101)	-	SS	3.56	8.7%	
Subtotal			**40.85**	**100.0%**	

Πίνακας Π.6 Απαιτούμενες ποσότητες υλικών κατασκευής ΜΒΗ συστοιχίας MCFC – Υποσυστήματα 1, 4

2. Heat Cell				
Component	Materials	Weight (tn)	Contribution (%)	Reference
Combustion Chamber (CA-101)	SS	10.93	96.0%	Communication with ADROP and TUBAF (04/2007), assumptions from [Alkaner and Zhou, 2006] and [Karakoussis et al., 2001].
Process Air Preheater (CC-102)	SS	0.10	0.9%	
	Incoloy	0.10	0.9%	
Flow Preheater (CC-103)	SS	0.05	0.5%	
Porous Burner & Vaporiser Assembly (BA-101)	SS	0.11	1.0%	
Subtotal		**11.38**	**100.0%**	
3. ATR Package				
Component	Materials	Weight (tn)	Contribution (%)	Reference
ATR Casing	SS	4.60	80.3%	Communication with ADROP and TUBAF (04/2007), assumptions from [Alkaner and Zhou, 2006] and [Karakoussis et al., 2001].
First ATR Cooler (E-102)	SS	0.21	3.7%	
	Incoloy	0.21	3.7%	
Second ATR Heat Exchanger (E-103)	SS	0.08	1.4%	
	Incoloy	0.08	1.4%	
Reactor (R-102)	Al_2O_3	0.20	4.0%	
S-trap (R-103)	ZnO	0.30	5.2%	
Subtotal		**5.73**	**100.0%**	
5. Balance of Plant				
Component	Materials	Weight (tn)	Contribution (%)	Reference
Control system	SS	0.69	3.9%	Communication with AFCo (10/2007), MCWAP system layout, assumptions from [Alkaner and Zhou, 2006] and [Karakoussis et al., 2001].
	Plastic	0.48	2.7%	
Cooling system of FCM	SS	1.73	9.7%	
Process air processor (K-101)	SS	1.84	10.4%	
	Copper	0.46	2.6%	
Power conditioning system	SS	1.44	8.1%	
	Aluminium	0.13	0.7%	
	Copper	0.34	1.9%	
Safety gas system	SS	9.2	51.8%	
Subtotal		**17.75**	**100.0%**	

Πίνακας Π.7 Απαιτούμενες ποσότητες υλικών κατασκευής ΜΒΗ συστοιχίας MCFC – Υποσυστήματα 2,3,5

Diesel Engine APU			
Materials	Weight (tn)	Contribution (%)	Reference
Cast iron	2,09	14.0%	Data from [Alkaner and Zhou, 2006], [Briem, 2003] and [Wartsila, 2011]. Έχει γίνει η παραδοχή ότι η απαιτούμενη ποσότητα κάθε υλικού είναι 115% της συνεισφοράς στο βάρος της μονάδας (13 tn [Wartsila, 2011])
SS	10,83	72.2%	
Vulcanized rubber	0,08	0.6%	
Ceramics	0,07	0.5%	
Aluminium	0,09	0.6%	
Mineral wool	1,30	8.7%	
Copper	0,43	2.9%	
PVC	0,05	0.3%	
Total	**14,95**	**100.0%**	

Πίνακας Π.8 Απαιτούμενες ποσότητες υλικών κατασκευής ΜΒΗ κινητήρα diesel

Amount of MCFC APU materials for recycling					
Mate-rial	Recycling rate (referring to amount used for unit)		Manufacturing loss (tn)	Total (tn)	Reference for data on energy demand and emissions of recycling
	%	tn			
Stain-less Steel	50%	27.6	9.7	37.3	LCA Database: BUWAL 250
	70%	38.6		48.4	
	90%	49.7		59.4	
Cast Iron	50%	0.17	0.06	0.23	
	70%	0.24		0.30	
	90%	0.31		0.37	
Ni	50%	1.82	0.64	2.46	LCA Database: Ecoinvent v2.0
	70%	2.55		3.19	
	90%	3.27		3.91	
NiCr	50%	0.56	0.20	0.76	
	70%	0.79		0.99	
	90%	1.01		1.21	
Inco-loy	50%	1.01	0.36	1.37	
	70%	1.42		1.77	
	90%	1.82		2.18	
Cop-per	50%	0.42	0.15	0.57	LCA Database: Ecoinvent v2.0
	70%	0.59		0.74	
	90%	0.76		0.91	
Scenario A (50% recovery of selected materials)			Total recycled weight (tn)	43.1	
			% of used material	50.9%	
Scenario B (70% recovery of selected materials)			Total recycled weight (tn)	55.8	
			% of used material	66.0%	
Scenario C (90% recovery of selected materials)			Total recycled weight (tn)	68.6	
			% of used material	81.0%	

Πίνακας Π.9 Εξεταζόμενα σενάρια ποσοστού ανακύκλωσης ΜΒΗ με συστοιχία MCFC

Amount of DE APU materials for recycling					
Material	Recycling rate (referring to amount used for unit)		Manufacturing loss (tn)	Total (tn)	Reference for data on energy demand and emissions of recycling
	%	tn			
Stainless Steel	50%	3.62	1.09	4.71	LCA Database: BUWAL 250
	70%	5.07		6.16	
	90%	6.52		7.61	
Cast Iron	50%	0.70	0.21	0.91	
	70%	0.98		1.19	
	90%	1.26		1.47	
Copper	50%	0.14	0.04	0.19	LCA Database: Ecoinvent v2.0
	70%	0.20		0.24	
	90%	0.26		0.30	
Scenario A (50% recovery of selected materials)			Total recycled weight (tn)	5.81	
			% of used material	50.5%	
Scenario B (70% recovery of selected materials)			Total recycled weight (tn)	7.59	
			% of used material	66.0%	
Scenario C (90% recovery of selected materials)			Total recycled weight (tn)	9.38	
			% of used material	81.6%	

Πίνακας Π.10 Εξεταζόμενα σενάρια ποσοστού ανακύκλωσης ΜΒΗ με μηχανή diesel

Παράρτημα ΣΤ – Συνολικές εισροές ενέργειας και υλικών, εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα, σε υδάτινο περιβάλλον και στο έδαφος κύκλων ζωής συστημάτων MCFC και DE

Substance	Unit	MCFC system efficiency			
		32,70%	39,10%	44,60%	50,70%
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	3,484E-02	3,137E-02	2,919E-02	2,732E-02
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	8,881E-03	7,749E-03	7,038E-03	6,428E-03
Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	4,972E-03	4,426E-03	4,083E-03	3,789E-03
Energy, from hydro power	MJ	2,153E-03	2,153E-03	2,153E-03	2,153E-03
Energy, from uranium	MJ	1,576E-03	1,576E-03	1,576E-03	1,576E-03
Energy, potential, stock, in barrage water	MJ	5,772E-04	5,772E-04	5,772E-04	5,772E-04
Energy, unspecified	MJ	3,417E-04	3,417E-04	3,417E-04	3,417E-04
Energy, solar, converted	MJ	7,807E-05	7,024E-05	6,531E-05	6,109E-05
Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest	MJ	1,886E-05	1,580E-05	1,388E-05	1,223E-05
Oil, crude, in ground	kg	2,866E-01	2,399E-01	2,105E-01	1,853E-01
Water, unspecified natural origin/kg	kg	1,600E-02	1,600E-02	1,600E-02	1,600E-02
Gravel, in ground	kg	1,533E-02	1,359E-02	1,250E-02	1,156E-02
Coal, brown, in ground	kg	1,090E-02	9,571E-03	8,735E-03	8,019E-03
Coal, hard, unspecified, in ground	kg	8,176E-03	7,151E-03	6,506E-03	5,954E-03
Calcite, in ground	kg	3,159E-03	2,807E-03	2,585E-03	2,396E-03
Spodumene, in ground	kg	2,313E-03	2,313E-03	2,313E-03	2,313E-03
Iron, 46% in ore, 25% in crude ore, in ground	kg	2,117E-03	1,741E-03	1,505E-03	1,302E-03
Barite, 15% in crude ore, in ground	kg	1,457E-03	1,220E-03	1,071E-03	9,428E-04
Scrap, external	kg	1,455E-03	1,455E-03	1,455E-03	1,455E-03
Carbon dioxide, in air	kg	9,677E-04	8,497E-04	7,754E-04	7,118E-04
Water, unspecified natural origin/kg	kg	8,261E-04	8,261E-04	8,261E-04	8,261E-04
Clay, unspecified, in ground	kg	7,565E-04	6,688E-04	6,136E-04	5,663E-04
Iron, in ground	kg	4,245E-04	4,245E-04	4,245E-04	4,245E-04
Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	kg	3,961E-04	3,961E-04	3,961E-04	3,961E-04
Coal, brown, 8 MJ per kg, in ground	kg	3,377E-04	3,377E-04	3,377E-04	3,377E-04
Coal, 18 MJ per kg, in ground	kg	2,605E-04	2,605E-04	2,605E-04	2,605E-04
Sodium chloride, in ground	kg	2,424E-04	2,139E-04	1,961E-04	1,808E-04
Oil, crude, in ground	kg	2,330E-04	2,330E-04	2,330E-04	2,330E-04
Coal, hard, unspecified, in ground	kg	1,605E-04	1,605E-04	1,605E-04	1,605E-04
Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	kg	1,346E-04	1,346E-04	1,346E-04	1,346E-04
Nickel, 1.13% in sulfide, Ni 0.76% and Cu 0.76% in crude ore, in ground	kg	1,311E-04	1,311E-04	1,311E-04	1,311E-04
Nickel ore, in ground	kg	1,295E-04	1,295E-04	1,295E-04	1,295E-04
Clay, bentonite, in ground	kg	1,080E-04	9,014E-05	7,890E-05	6,926E-05
Chromium, in ground	kg	1,060E-04	1,060E-04	1,060E-04	1,060E-04
Oil, crude, 41 MJ per kg, in ground	kg	1,010E-04	1,010E-04	1,010E-04	1,010E-04
Limestone, in ground	kg	5,405E-05	5,405E-05	5,405E-05	5,405E-05
Oil, crude, 42.7 MJ per kg, in ground	kg	4,337E-05	4,337E-05	4,337E-05	4,337E-05
Magnesite, 60% in crude ore, in ground	kg	3,485E-05	2,995E-05	2,686E-05	2,422E-05
Nickel, in ground	kg	3,441E-05	3,441E-05	3,441E-05	3,441E-05
Oil, crude, 42.6 MJ per kg, in ground	kg	2,891E-05	2,891E-05	2,891E-05	2,891E-05
TiO2, 54% in ilmenite, 2.6% in crude ore, in ground	kg	2,807E-05	2,595E-05	2,461E-05	2,347E-05
Sylvite, 25 % in sylvinite, in ground	kg	2,736E-05	2,736E-05	2,736E-05	2,736E-05
Fluorspar, 92%, in ground	kg	2,364E-05	1,994E-05	1,761E-05	1,561E-05
Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crude ore, in ground	kg	2,359E-05	2,210E-05	2,117E-05	2,036E-05
Zinc, in ground	kg	2,107E-05	2,107E-05	2,107E-05	2,107E-05
Limestone, in ground	kg	2,071E-05	2,071E-05	2,071E-05	2,071E-05
Nickel, 1.98% in silicates, 1.04% in crude ore, in ground	kg	1,856E-05	1,335E-05	1,008E-05	7,268E-06
Acids	kg	1,529E-05	1,529E-05	1,529E-05	1,529E-05
Auxiliary materials	kg	1,407E-05	1,407E-05	1,407E-05	1,407E-05
Bauxite, in ground	kg	1,371E-05	1,371E-05	1,371E-05	1,371E-05
Manganese, in ground	kg	1,090E-05	1,090E-05	1,090E-05	1,090E-05
Molybdenum, in ground	kg	8,610E-06	8,610E-06	8,610E-06	8,610E-06
Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	8,213E-06	7,698E-06	7,375E-06	7,097E-06
Sodium sulphate, various forms, in ground	kg	6,736E-06	5,673E-06	5,004E-06	4,431E-06
Alloys	kg	6,360E-06	6,360E-06	6,360E-06	6,360E-06
Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	5,979E-06	5,588E-06	5,343E-06	5,132E-06
Zinc, 9.0% in sulfide, Zn 5.3%, Pb, Ag, Cd, In, in ground	kg	5,680E-06	5,136E-06	4,793E-06	4,499E-06
Marl, in ground	kg	5,475E-06	5,475E-06	5,475E-06	5,475E-06
Silicon, in ground	kg	5,188E-06	5,188E-06	5,188E-06	5,188E-06
Dolomite, in ground	kg	5,079E-06	4,189E-06	3,630E-06	3,150E-06
Basalt, in ground	kg	4,410E-06	3,788E-06	3,397E-06	3,062E-06
Chromium, 25.5% in chromite, 11.6% in crude ore, in ground	kg	3,481E-06	2,799E-06	2,371E-06	2,003E-06
Phosphorus, 18% in apatite, 4% in crude ore, in ground	kg	3,270E-06	2,758E-06	2,436E-06	2,160E-06
Oil	kg	2,691E-06	2,691E-06	2,691E-06	2,691E-06
Wood, unspecified, standing/kg	kg	2,298E-06	2,298E-06	2,298E-06	2,298E-06
Degreasing agent	kg	1,590E-06	1,590E-06	1,590E-06	1,590E-06
Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	1,586E-06	1,482E-06	1,417E-06	1,361E-06
Phosphorus, 18% in apatite, 12% in crude ore, in ground	kg	1,442E-06	1,217E-06	1,075E-06	9,536E-07
Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	1,119E-06	1,048E-06	1,004E-06	9,656E-07
Chromium compounds	kg	1,052E-06	1,052E-06	1,052E-06	1,052E-06
Lead, 5.0% in sulfide, Pb 3.0%, Zn, Ag, Cd, In, in ground	kg	9,859E-07	8,411E-07	7,500E-07	6,720E-07
Cobalt, in ground	kg	1,665E-08	1,540E-08	1,462E-08	1,394E-08
Uranium, 451 GJ per kg, in ground	kg	1,464E-08	1,464E-08	1,464E-08	1,464E-08
Baryte, in ground	kg	1,272E-08	1,272E-08	1,272E-08	1,272E-08
Zirconium, 50% in zircon, 0.39% in crude ore, in ground	kg	6,001E-09	5,984E-09	5,974E-09	5,965E-09
Silver, 0.007% in sulfide, Ag 0.004%, Pb, Zn, Cd, In, in ground	kg	5,588E-09	5,571E-09	5,560E-09	5,550E-09
Tantalum, 81.9% in tantalite, 1.6E-4% in crude ore, in ground	kg	4,701E-09	4,688E-09	4,679E-09	4,672E-09
Silver, 3.2ppm in sulfide, Ag 1.2ppm, Cu and Te, in crude ore, in ground	kg	3,987E-09	3,974E-09	3,966E-09	3,959E-09
Sulfur containing material	kg	3,973E-09	3,973E-09	3,973E-09	3,973E-09
Shale, in ground	kg	3,244E-09	2,758E-09	2,453E-09	2,192E-09
Chrysotile, in ground	kg	3,058E-09	2,635E-09	2,370E-09	2,142E-09
Cadmium, 0.30% in sulfide, Cd 0.18%, Pb, Zn, Ag, In, in ground	kg	2,388E-09	1,608E-09	1,118E-09	6,980E-10
Iron ore, in ground	kg	2,323E-09	2,323E-09	2,323E-09	2,323E-09
Copper, in ground	kg	2,262E-09	2,262E-09	2,262E-09	2,262E-09
Vermiculite, in ground	kg	1,735E-09	1,507E-09	1,363E-09	1,239E-09
Uranium, in ground	kg	1,295E-09	1,295E-09	1,295E-09	1,295E-09
Magnesium, 0.13% in water	kg	1,202E-09	1,154E-09	1,124E-09	1,098E-09
Anhydrite, in ground	kg	1,146E-09	9,744E-10	8,666E-10	7,742E-10
Pd, Pd 7.3E-4%, Pt 2.5E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore, in ground	kg	9,762E-10	8,362E-10	7,481E-10	6,726E-10
Kieserite, 25% in crude ore, in ground	kg	9,335E-10	8,405E-10	7,820E-10	7,318E-10
Gold, Au 7.1E-4%, in ore, in ground	kg	8,630E-10	8,606E-10	8,591E-10	8,579E-10
Silver, Ag 4.2E-3%, Au 1.1E-4%, in ore, in ground	kg	8,406E-10	8,379E-10	8,363E-10	8,349E-10
Gold, Au 2.1E-4%, Ag 2.1E-4%, in ore, in ground	kg	8,328E-10	8,305E-10	8,291E-10	8,278E-10
Silver, Ag 4.6E-5%, Au 1.3E-4%, in ore, in ground	kg	8,240E-10	8,214E-10	8,197E-10	8,183E-10
Gold, Au 6.7E-4%, in ore, in ground	kg	7,654E-10	7,632E-10	7,619E-10	7,608E-10
Tellurium, 0.5ppm in sulfide, Te 0.2ppm, Cu and Ag, in crude ore, in ground	kg	5,980E-10	5,961E-10	5,949E-10	5,939E-10
Gold, Au 1.4E-4%, in ore, in ground	kg	5,453E-10	5,437E-10	5,428E-10	5,420E-10
Silver, Ag 9.7E-4%, Au 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore, in ground	kg	5,437E-10	5,419E-10	5,409E-10	5,399E-10
Gold, Au 4.9E-5%, in ore, in ground	kg	4,944E-10	4,930E-10	4,921E-10	4,914E-10
Gold, Au 1.3E-4%, Ag 4.6E-5%, in ore, in ground	kg	4,554E-10	4,541E-10	4,533E-10	4,526E-10
Olivine, in ground	kg	4,175E-10	3,579E-10	3,205E-10	2,883E-10
Pd, Pd 2.0E-4%, Pt 4.8E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore, in ground	kg	4,062E-10	3,479E-10	3,113E-10	2,799E-10
Silver, Ag 2.1E-4%, Au 2.1E-4%, in ore, in ground	kg	3,681E-10	3,669E-10	3,662E-10	3,655E-10
Borax, in ground	kg	3,234E-10	2,835E-10	2,584E-10	2,369E-10
Cinnabar, in ground	kg	2,858E-10	2,464E-10	2,216E-10	2,004E-10
Gold, Au 1.1E-4%, Ag 4.2E-3%, in ore, in ground	kg	2,483E-10	2,477E-10	2,472E-10	2,469E-10
Gold, Au 4.3E-4%, in ore, in ground	kg	2,064E-10	2,058E-10	2,055E-10	2,052E-10
Feldspar, in ground	kg	1,286E-10	1,280E-10	1,277E-10	1,274E-10
Zeolite, in ground	kg	5,403E-11	5,403E-11	5,403E-11	5,403E-11
Gold, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore, in ground	kg	5,171E-11	5,157E-11	5,148E-11	5,140E-11
Indium, 0.005% in sulfide, In 0.003%, Pb, Zn, Ag, Cd, in ground	kg	5,062E-11	3,657E-11	2,773E-11	2,016E-11
Pt, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore, in ground	kg	3,136E-11	2,637E-11	2,322E-11	2,053E-11
TiO2, 95% in rutile, 0.40% in crude ore, in ground	kg	2,645E-11	2,598E-11	2,568E-11	2,543E-11
Rh, Rh 2.4E-5%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore, in ground	kg	2,579E-11	2,160E-11	1,897E-11	1,671E-11
Rhenium, in crude ore, in ground	kg	1,155E-11	9,665E-12	8,479E-12	7,463E-12
Pt, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore, in ground	kg	8,749E-12	7,355E-12	6,478E-12	5,727E-12
Rh, Rh 2.0E-5%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore, in ground	kg	8,235E-12	6,898E-12	6,057E-12	5,336E-12
Diatomite, in ground	kg	1,905E-12	1,635E-12	1,465E-12	1,319E-12
Zinc, in ground	kg	1,507E-12	1,507E-12	1,507E-12	1,507E-12
Helium, 0.08% in natural gas, in ground	kg	1,144E-12	1,032E-12	9,616E-13	9,012E-13
Silver, in ground	kg	7,833E-13	7,833E-13	7,833E-13	7,833E-13
Tin, in ground	kg	4,110E-13	4,110E-13	4,110E-13	4,110E-13
Gallium, 0.014% in bauxite, in ground	kg	2,267E-13	2,045E-13	1,905E-13	1,785E-13
Stibnite, in ground	kg	1,980E-13	1,699E-13	1,522E-13	1,370E-13
Granite, in ground	kg	1,561E-13	1,537E-13	1,522E-13	1,509E-13
Sodium nitrate, in ground	kg	3,306E-14	2,932E-14	2,697E-14	2,495E-14
Lanthanum, 7.2% in bastnasite, 0.72% in crude ore, in ground	kg	7,480E-23	6,889E-23	6,518E-23	6,200E-23
Praseodymium, 0.42% in bastnasite, 0.042% in crude ore, in ground	kg	1,402E-24	1,296E-24	1,229E-24	1,172E-24
Gadolinium, 0.15% in bastnasite, 0.015% in crude ore, in ground	kg	-5,289E-28	-5,241E-28	-5,210E-28	-5,184E-28
Samarium, 0.3% in bastnasite, 0.03% in crude ore, in ground	kg	-1,911E-25	-1,602E-25	-1,408E-25	-1,242E-25
Neodymium, 4% in bastnasite, 0.4% in crude ore, in ground	kg	-7,410E-24	-6,515E-24	-5,952E-24	-5,469E-24
Cerium, 24% in bastnasite, 2.4% in crude ore, in ground	kg	-1,958E-23	-1,732E-23	-1,590E-23	-1,468E-23
Rhenium, in ground	kg	-3,536E-16	-3,536E-16	-3,536E-16	-3,536E-16
Palladium, in ground	kg	-3,579E-16	-3,579E-16	-3,579E-16	-3,579E-16
Rhodium, in ground	kg	-3,857E-16	-3,857E-16	-3,857E-16	-3,857E-16
Platinum, in ground	kg	-4,067E-16	-4,067E-16	-4,067E-16	-4,067E-16
Uranium, 560 GJ per kg, in ground	kg	-1,704E-10	-1,704E-10	-1,704E-10	-1,704E-10
Lead, in ground	kg	-2,015E-10	-2,015E-10	-2,015E-10	-2,015E-10
Manganese, 35.7% in sedimentary deposit, 14.2% in crude ore, in ground	kg	-4,254E-07	-8,153E-07	-1,060E-06	-1,271E-06
Molybdenum, 0.022% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.36% in crude ore, in ground	kg	-6,020E-07	-7,393E-07	-8,256E-07	-8,996E-07
Molybdenum, 0.11% in sulfide, Mo 4.1E-2% and Cu 0.36% in crude ore, in ground	kg	-1,217E-06	-1,494E-06	-1,668E-06	-1,817E-06
Water, turbine use, unspecified natural origin	m3	2,748E-01	2,467E-01	2,291E-01	2,140E-01
Gas, natural, in ground	m3	1,632E-02	1,392E-02	1,242E-02	1,112E-02
Water, cooling, unspecified natural origin/m3	m3	2,274E-03	1,964E-03	1,769E-03	1,601E-03

Πίνακας Π.11 Συνολικές εισροές ενέργειας και υλικών κύκλου ζωής συστήματος MCFC. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh. Παράμετρος: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης

Substance	Unit	Total
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	MJ	1,649E-02
Energy, gross calorific value, in biomass	MJ	5,415E-03
Energy, kinetic (in wind), converted	MJ	2,580E-03
Energy, potential, stock, in barrage water	MJ	5,889E-05
Energy, solar, converted	MJ	3,703E-05
Energy, gross calorific value, in biomass, primary forest	MJ	1,428E-05
Oil, crude, in ground	kg	2,181E-01
Gravel, in ground	kg	8,177E-03
Coal, brown, in ground	kg	6,276E-03
Coal, hard, unspecified, in ground	kg	4,875E-03
Iron, 46% in ore, 25% in crude ore, in ground	kg	1,793E-03
Calcite, in ground	kg	1,672E-03
Barite, 15% in crude ore, in ground	kg	1,108E-03
Carbon dioxide, in air	kg	5,637E-04
Clay, unspecified, in ground	kg	4,247E-04
Scrap, external	kg	1,804E-04
Sodium chloride, in ground	kg	1,336E-04
Clay, bentonite, in ground	kg	8,396E-05
Coal, brown, 8 MJ per kg, in ground	kg	4,246E-05
Nickel, 1.98% in silicates, 1.04% in crude ore, in ground	kg	3,365E-05
Coal, 18 MJ per kg, in ground	kg	2,745E-05
Magnesite, 60% in crude ore, in ground	kg	2,370E-05
Fluorspar, 92%, in ground	kg	1,733E-05
Basalt, in ground	kg	1,179E-05
TiO2, 54% in ilmenite, 2.6% in crude ore, in ground	kg	9,952E-06
Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crude ore, in ground	kg	9,252E-06
Chromium, 25.5% in chromite, 11.6% in crude ore, in ground	kg	7,365E-06
Sodium sulphate, various forms, in ground	kg	4,971E-06
Dolomite, in ground	kg	4,205E-06
Oil, crude, 42.6 MJ per kg, in ground	kg	3,554E-06
Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	2,929E-06
Water, unspecified natural origin/kg	kg	2,793E-06
Zinc, 9.0% in sulfide, Zn 5.3%, Pb, Ag, Cd, In, in ground	kg	2,694E-06
Phosphorus, 18% in apatite, 4% in crude ore, in ground	kg	2,396E-06
Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	2,223E-06
Acids	kg	1,895E-06
Auxiliary materials	kg	1,743E-06
Manganese, 35.7% in sedimentary deposit, 14.2% in crude ore, in ground	kg	1,670E-06
Molybdenum, 0.11% in sulfide, Mo 4.1E-2% and Cu 0.36% in crude ore, in ground	kg	1,186E-06
Phosphorus, 18% in apatite, 12% in crude ore, in ground	kg	1,054E-06
Marl, in ground	kg	8,377E-07
Alloys	kg	7,882E-07
Lead, 5.0% in sulfide, Pb 3.0%, Zn, Ag, Cd, In, in ground	kg	6,786E-07
Fluorine, 4.5% in apatite, 1% in crude ore, in ground	kg	5,990E-07
Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	5,896E-07
Molybdenum, 0.022% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.36% in crude ore, in ground	kg	5,878E-07
Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	kg	4,035E-07
Sand, unspecified, in ground	kg	3,363E-07
Oil	kg	3,335E-07
Wood, unspecified, standing/kg	kg	2,683E-07
Fluorine, 4.5% in apatite, 3% in crude ore, in ground	kg	2,642E-07
Uranium, in ground	kg	2,518E-07
Carbon, in organic matter, in soil	kg	2,060E-07
Degreasing agent	kg	1,971E-07
Sylvite, 25 % in sylvinite, in ground	kg	1,563E-07
Chromium compounds	kg	1,304E-07
Kaolinite, 24% in crude ore, in ground	kg	7,713E-08
Molybdenum, 0.010% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 1.83% in crude ore, in ground	kg	5,444E-08
Peat, in ground	kg	5,365E-08
Sulfur, in ground	kg	3,198E-08
Molybdenum, 0.025% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.39% in crude ore, in ground	kg	2,838E-08
Colemanite, in ground	kg	2,379E-08
Nickel, 1.13% in sulfide, Ni 0.76% and Cu 0.76% in crude ore, in ground	kg	1,910E-08
Metamorphous rock, graphite containing, in ground	kg	1,127E-08
Gypsum, in ground	kg	1,058E-08
Molybdenum, 0.014% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.81% in crude ore, in ground	kg	7,744E-09
Talc, in ground	kg	7,269E-09
Tin, 79% in cassiterite, 0.1% in crude ore, in ground	kg	6,010E-09
Cobalt, in ground	kg	5,825E-09
Ulexite, in ground	kg	4,741E-09
Cadmium, 0.30% in sulfide, Cd 0.18%, Pb, Zn, Ag, In, in ground	kg	4,066E-09
Shale, in ground	kg	2,285E-09
Chrysotile, in ground	kg	1,981E-09
Uranium, 451 GJ per kg, in ground	kg	1,804E-09
Iron, in ground	kg	1,080E-09
Vermiculite, in ground	kg	1,077E-09
Anhydrite, in ground	kg	8,072E-10
Pd, Pd 7.3E-4%, Pt 2.5E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore, in ground	kg	6,544E-10
Kieserite, 25% in crude ore, in ground	kg	4,652E-10
Olivine, in ground	kg	2,811E-10
Pd, Pd 2.0E-4%, Pt 4.8E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore, in ground	kg	2,723E-10
Baryte, in ground	kg	2,462E-10
Magnesium, 0.13% in water	kg	2,317E-10
Borax, in ground	kg	1,874E-10
Cinnabar, in ground	kg	1,850E-10
Wood, dry matter	kg	1,788E-10
Silver, 0.007% in sulfide, Ag 0.004%, Pb, Zn, Cd, In, in ground	kg	1,152E-10
Zirconium, 50% in zircon, 0.39% in crude ore, in ground	kg	1,136E-10
Gas, mine, off-gas, process, coal mining/kg	kg	9,959E-11
Tantalum, 81.9% in tantalite, 1.6E-4% in crude ore, in ground	kg	8,920E-11
Silver, 3.2ppm in sulfide, Ag 1.2ppm, Cu and Te, in crude ore, in ground	kg	8,232E-11
Indium, 0.005% in sulfide, In 0.003%, Pb, Zn, Ag, Cd, in ground	kg	7,277E-11
Bauxite, in ground	kg	2,912E-11
Pt, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore, in ground	kg	2,334E-11
Rh, Rh 2.4E-5%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Ni 3.7E-2%, Cu 5.2E-2% in ore, in ground	kg	1,955E-11
Silver, Ag 4.2E-3%, Au 1.1E-4%, in ore, in ground	kg	1,733E-11
Silver, Ag 4.6E-5%, Au 1.3E-4%, in ore, in ground	kg	1,699E-11
Gold, Au 7.1E-4%, in ore, in ground	kg	1,634E-11
Gold, Au 2.1E-4%, Ag 2.1E-4%, in ore, in ground	kg	1,577E-11
Gold, Au 6.7E-4%, in ore, in ground	kg	1,449E-11
Copper, in ground	kg	1,310E-11
Tellurium, 0.5ppm in sulfide, Te 0.2ppm, Cu and Ag, in crude ore, in ground	kg	1,235E-11
Silver, Ag 9.7E-4%, Au 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore, in ground	kg	1,121E-11
Gold, Au 1.4E-4%, in ore, in ground	kg	1,032E-11
Gold, Au 4.9E-5%, in ore, in ground	kg	9,361E-12
Rhenium, in crude ore, in ground	kg	8,798E-12
Gold, Au 1.3E-4%, Ag 4.6E-5%, in ore, in ground	kg	8,622E-12
Silver, Ag 2.1E-4%, Au 2.1E-4%, in ore, in ground	kg	7,590E-12
Pt, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore, in ground	kg	6,510E-12
Rh, Rh 2.0E-5%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Ni 2.3E+0%, Cu 3.2E+0% in ore, in ground	kg	6,243E-12
Gold, Au 1.1E-4%, Ag 4.2E-3%, in ore, in ground	kg	4,702E-12
Feldspar, in ground	kg	4,069E-12
Gold, Au 4.3E-4%, in ore, in ground	kg	3,908E-12
TiO2, 95% in rutile, 0.40% in crude ore, in ground	kg	2,566E-12
Diatomite, in ground	kg	1,272E-12
Uranium, 560 GJ per kg, in ground	kg	1,162E-12
Chromium, in ground	kg	1,160E-12
Lead, in ground	kg	1,063E-12
Gold, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Cu 0.38%, Pb 0.014%, in ore, in ground	kg	9,792E-13
Nickel, in ground	kg	7,865E-13
Helium, 0.08% in natural gas, in ground	kg	5,304E-13
Manganese, in ground	kg	2,534E-13
Stibnite, in ground	kg	1,322E-13
Gallium, 0.014% in bauxite, in ground	kg	1,050E-13
Silver, in ground	kg	2,330E-14
Sodium nitrate, in ground	kg	1,869E-14
Tin, in ground	kg	1,294E-14
Granite, in ground	kg	1,278E-14
Zinc, in ground	kg	9,662E-15
Molybdenum, in ground	kg	6,980E-18
Platinum, in ground	kg	1,126E-18
Rhodium, in ground	kg	1,056E-18
Rhenium, in ground	kg	1,005E-18
Palladium, in ground	kg	9,927E-19
Lanthanum, 7.2% in bastnasite, 0.72% in crude ore, in ground	kg	2,764E-23
Praseodymium, 0.42% in bastnasite, 0.042% in crude ore, in ground	kg	4,985E-25
Gadolinium, 0.15% in bastnasite, 0.015% in crude ore, in ground	kg	-2,607E-29
Samarium, 0.3% in bastnasite, 0.03% in crude ore, in ground	kg	-1,442E-25
Neodymium, 4% in bastnasite, 0.4% in crude ore, in ground	kg	-4,210E-24
Cerium, 24% in bastnasite, 2.4% in crude ore, in ground	kg	-1,062E-23
Water, turbine use, unspecified natural origin	m3	1,336E-01
Gas, natural, in ground	m3	1,126E-02
Water, cooling, unspecified natural origin/m3	m3	1,455E-03
Water, unspecified natural origin/m3	m3	5,572E-04
Water, river	m3	2,669E-04
Water, salt, sole	m3	1,730E-04
Water, salt, ocean	m3	8,435E-05
Gas, mine, off-gas, process, coal mining/m3	m3	4,755E-05
Water, well, in ground	m3	4,018E-05
Gas, natural, 36.6 MJ per m3, in ground	m3	1,910E-05
Water, process, unspecified natural origin/m3	m3	1,971E-06
Water, lake	m3	1,132E-06
Wood, soft, standing	m3	3,559E-07
Wood, hard, standing	m3	1,552E-07
Gas, natural, 35 MJ per m3, in ground	m3	1,378E-07
Volume occupied, underground deposit	m3	5,209E-09
Wood, primary forest, standing	m3	1,325E-09
Volume occupied, final repository for low-active radioactive waste	m3	5,186E-10
Gas, petroleum, 35 MJ per m3, in ground	m3	5,064E-10
Volume occupied, final repository for radioactive waste	m3	1,311E-10
Wood, unspecified, standing/m3	m3	6,716E-12
Volume occupied, reservoir	m3y	2,994E-04

Πίνακας Π.12 Συνολικές εισροές ενέργειας και υλικών κύκλου ζωής συστήματος DE. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh.

Arsenic	kg	4,564E-11	4,371E-11	4,250E-11	4,146E-11
Antimony	kg	4,433E-11	4,380E-11	4,346E-11	4,318E-11
Zirconium	kg	3,716E-11	3,057E-11	2,642E-11	2,287E-11
Polychlorinated biphenyls	kg	3,305E-11	2,724E-11	2,359E-11	2,046E-11
Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	kg	2,942E-11	2,654E-11	2,472E-11	2,317E-11
Titanium	kg	2,932E-11	2,444E-11	2,138E-11	1,875E-11
Hexane	kg	2,929E-11	2,798E-11	2,716E-11	2,645E-11
Silicon tetrafluoride	kg	2,468E-11	2,081E-11	1,837E-11	1,629E-11
Ammonium carbonate	kg	2,345E-11	2,024E-11	1,822E-11	1,649E-11
Ozone	kg	2,227E-11	2,214E-11	2,207E-11	2,200E-11
Acrolein	kg	2,143E-11	1,807E-11	1,596E-11	1,415E-11
Tin	kg	2,075E-11	1,956E-11	1,881E-11	1,816E-11
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	kg	2,060E-11	1,837E-11	1,696E-11	1,576E-11
Benzene, hexachloro-	kg	1,899E-11	1,567E-11	1,358E-11	1,179E-11
Iodine	kg	1,834E-11	1,555E-11	1,380E-11	1,230E-11
Thallium	kg	1,704E-11	1,495E-11	1,364E-11	1,252E-11
Isoprene	kg	1,619E-11	1,356E-11	1,191E-11	1,050E-11
Phenol	kg	1,600E-11	1,453E-11	1,360E-11	1,281E-11
t-Butyl methyl ether	kg	1,332E-11	1,156E-11	1,045E-11	9,502E-12
Sulfur dioxide	kg	1,319E-11	1,299E-11	1,287E-11	1,277E-11
Silver	kg	1,315E-11	1,315E-11	1,315E-11	1,315E-11
Propanal	kg	1,171E-11	9,906E-12	8,772E-12	7,799E-12
Benzaldehyde	kg	1,118E-11	9,429E-12	8,327E-12	7,383E-12
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	kg	1,031E-11	1,025E-11	1,021E-11	1,017E-11
Cyanide	kg	9,685E-12	9,685E-12	9,685E-12	9,685E-12
Beryllium	kg	9,102E-12	8,492E-12	8,108E-12	7,779E-12
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	kg	8,848E-12	8,718E-12	8,635E-12	8,565E-12
Phosphorus	kg	8,490E-12	8,381E-12	8,312E-12	8,253E-12
Naphthalene	kg	8,478E-12	8,478E-12	8,478E-12	8,478E-12
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	kg	7,755E-12	7,720E-12	7,698E-12	7,679E-12
Cobalt	kg	7,354E-12	6,519E-12	5,994E-12	5,544E-12
Methane, trifluoro-, HFC-23	kg	7,020E-12	6,988E-12	6,968E-12	6,951E-12
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	kg	6,815E-12	6,815E-12	6,815E-12	6,815E-12
Propionic acid	kg	5,688E-12	5,662E-12	5,645E-12	5,631E-12
Ethylene oxide	kg	5,622E-12	5,539E-12	5,487E-12	5,442E-12
Sulfur hexafluoride	kg	5,287E-12	5,095E-12	4,975E-12	4,871E-12
Benzo(a)pyrene	kg	5,254E-12	4,575E-12	4,148E-12	3,782E-12
Acrolein	kg	5,060E-12	4,532E-12	4,200E-12	3,915E-12
Silver	kg	4,736E-12	4,271E-12	3,978E-12	3,727E-12
Heptane	kg	4,687E-12	4,687E-12	4,687E-12	4,687E-12
Uranium	kg	4,063E-12	3,445E-12	3,056E-12	2,722E-12
Beryllium	kg	4,035E-12	3,549E-12	3,244E-12	2,982E-12
Beryllium	kg	3,821E-12	3,340E-12	3,037E-12	2,778E-12
Sodium formate	kg	3,537E-12	3,406E-12	3,324E-12	3,253E-12
Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	kg	3,315E-12	3,305E-12	3,300E-12	3,295E-12
Styrene	kg	3,224E-12	2,877E-12	2,658E-12	2,471E-12
Thorium	kg	3,051E-12	2,587E-12	2,295E-12	2,045E-12
Thorium	kg	3,016E-12	2,481E-12	2,145E-12	1,856E-12
Scandium	kg	3,016E-12	2,481E-12	2,145E-12	1,856E-12
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, cyclic	kg	2,707E-12	2,453E-12	2,293E-12	2,156E-12
Thallium	kg	2,627E-12	2,229E-12	1,979E-12	1,764E-12
Methane, monochloro-, R-40	kg	2,476E-12	2,243E-12	2,097E-12	1,971E-12
Methane, dichloro-, HCC-30	kg	2,461E-12	2,351E-12	2,282E-12	2,223E-12
Antimony	kg	2,418E-12	2,097E-12	1,895E-12	1,723E-12
Ethylene oxide	kg	2,409E-12	2,374E-12	2,351E-12	2,332E-12
Formaldehyde	kg	2,077E-12	2,046E-12	2,027E-12	2,011E-12
Scandium	kg	2,024E-12	1,716E-12	1,522E-12	1,356E-12
Hydrogen cyanide	kg	2,020E-12	2,020E-12	2,020E-12	2,020E-12
Bromine	kg	1,731E-12	1,731E-12	1,731E-12	1,731E-12
Uranium	kg	1,534E-12	1,261E-12	1,090E-12	9,437E-13
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg	1,513E-12	1,365E-12	1,271E-12	1,192E-12
1,4-Butanediol	kg	1,498E-12	1,494E-12	1,491E-12	1,489E-12
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	kg	1,442E-12	1,228E-12	1,094E-12	9,788E-13
Methane, dichloro-, HCC-30	kg	1,356E-12	1,229E-12	1,148E-12	1,080E-12
Methane, dichloro-, HCC-30	kg	1,306E-12	1,306E-12	1,306E-12	1,306E-12
Chlorosilane, trimethyl-	kg	1,255E-12	1,251E-12	1,249E-12	1,247E-12
1-Propanol	kg	1,029E-12	9,284E-13	8,650E-13	8,106E-13
Hydrocarbons, chlorinated	kg	9,487E-13	8,596E-13	8,035E-13	7,554E-13
Thallium	kg	8,715E-13	7,243E-13	6,318E-13	5,525E-13
Chromium VI	kg	7,567E-13	6,633E-13	6,046E-13	5,542E-13
Methane, fossil	kg	6,594E-13	6,496E-13	6,435E-13	6,383E-13
Butadiene	kg	5,816E-13	5,730E-13	5,676E-13	5,629E-13
Particulates, < 2.5 um	kg	5,011E-13	4,937E-13	4,891E-13	4,851E-13
Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	kg	4,962E-13	4,962E-13	4,962E-13	4,962E-13
Zirconium	kg	4,659E-13	4,659E-13	4,659E-13	4,659E-13
Chloroform	kg	4,582E-13	4,151E-13	3,880E-13	3,648E-13
Benzene, ethyl-	kg	4,397E-13	3,983E-13	3,723E-13	3,501E-13
Butyrolactone	kg	4,335E-13	4,323E-13	4,315E-13	4,308E-13
Ethylene oxide	kg	3,965E-13	3,906E-13	3,869E-13	3,838E-13
Thorium	kg	3,959E-13	3,959E-13	3,959E-13	3,959E-13
Dinitrogen monoxide	kg	3,956E-13	3,898E-13	3,861E-13	3,830E-13
Hydrocarbons, halogenated	kg	3,669E-13	3,669E-13	3,669E-13	3,669E-13
Methyl formate	kg	3,069E-13	3,061E-13	3,055E-13	3,051E-13
Benzene	kg	2,631E-13	2,592E-13	2,568E-13	2,547E-13
Benzene, pentachloro-	kg	2,602E-13	2,271E-13	2,062E-13	1,883E-13
Butadiene	kg	2,492E-13	2,456E-13	2,432E-13	2,413E-13
Carbon disulfide	kg	2,329E-13	2,195E-13	2,111E-13	2,039E-13
Sulfate	kg	2,235E-13	2,025E-13	1,893E-13	1,780E-13
Methane, tetrachloro-, CFC-10	kg	2,022E-13	2,022E-13	2,022E-13	2,022E-13
Ethene, tetrachloro-	kg	2,009E-13	1,820E-13	1,701E-13	1,599E-13
Ethane, 1,2-dichloro-	kg	1,867E-13	1,692E-13	1,581E-13	1,487E-13
Sulfuric acid	kg	1,731E-13	1,731E-13	1,731E-13	1,731E-13
Methyl amine	kg	1,563E-13	1,558E-13	1,555E-13	1,553E-13
Ethane, 1,2-dichloro-	kg	1,339E-13	1,339E-13	1,339E-13	1,339E-13
Benzene, hexachloro-	kg	1,037E-13	9,049E-14	8,218E-14	7,505E-14
Acenaphthene	kg	9,735E-14	8,832E-14	8,263E-14	7,776E-14
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	kg	9,349E-14	8,470E-14	7,917E-14	7,444E-14
Methane, monochloro-, R-40	kg	8,220E-14	8,016E-14	7,888E-14	7,778E-14
Phenol, pentachloro-	kg	8,151E-14	7,104E-14	6,445E-14	5,881E-14
Uranium	kg	7,259E-14	7,259E-14	7,259E-14	7,259E-14
Ethene, chloro-	kg	6,676E-14	6,676E-14	6,676E-14	6,676E-14
Phosphine	kg	6,037E-14	6,020E-14	6,010E-14	6,001E-14
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	kg	5,108E-14	4,804E-14	4,612E-14	4,447E-14
Butadiene	kg	4,101E-14	4,041E-14	4,003E-14	3,970E-14
Scandium	kg	3,868E-14	3,868E-14	3,868E-14	3,868E-14
Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	kg	3,582E-14	3,566E-14	3,555E-14	3,547E-14
Ethene, tetrachloro-	kg	3,513E-14	3,267E-14	3,112E-14	2,980E-14
Aldehydes, unspecified	kg	2,942E-14	2,323E-14	1,933E-14	1,599E-14
Sulfuric acid	kg	2,922E-14	2,636E-14	2,456E-14	2,301E-14
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	kg	2,756E-14	2,676E-14	2,625E-14	2,582E-14
Cumene	kg	2,545E-14	2,306E-14	2,156E-14	2,027E-14
Ethylene diamine	kg	2,353E-14	2,163E-14	2,044E-14	1,942E-14
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	kg	2,278E-14	2,278E-14	2,278E-14	2,278E-14
Copper	kg	2,242E-14	2,209E-14	2,188E-14	2,170E-14
Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	kg	2,206E-14	2,196E-14	2,190E-14	2,185E-14
Paraffins	kg	1,833E-14	1,574E-14	1,411E-14	1,272E-14
Acrolein	kg	1,651E-14	1,567E-14	1,514E-14	1,469E-14
Zinc	kg	1,319E-14	1,299E-14	1,287E-14	1,277E-14
Platinum	kg	1,314E-14	1,185E-14	1,104E-14	1,034E-14
Hydrogen chloride	kg	1,134E-14	1,117E-14	1,107E-14	1,098E-14
Butanol	kg	4,644E-15	4,631E-15	4,622E-15	4,615E-15
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	kg	2,672E-15	2,350E-15	2,146E-15	1,972E-15
Polychlorinated biphenyls	kg	2,542E-15	2,535E-15	2,531E-15	2,527E-15
Acenaphthene	kg	2,383E-15	2,159E-15	2,019E-15	1,898E-15
Benzaldehyde	kg	1,273E-15	1,273E-15	1,273E-15	1,273E-15
Nickel	kg	9,231E-16	9,095E-16	9,009E-16	8,936E-16
Arsine	kg	8,141E-16	8,118E-16	8,104E-16	8,092E-16
Chromium	kg	6,594E-16	6,496E-16	6,435E-16	6,383E-16
Platinum	kg	3,723E-16	3,336E-16	3,093E-16	2,884E-16
Lead	kg	2,638E-16	2,599E-16	2,574E-16	2,553E-16
Ethene, tetrachloro-	kg	2,009E-16	1,877E-16	1,794E-16	1,722E-16
Cadmium	kg	1,319E-16	1,299E-16	1,287E-16	1,277E-16
Selenium	kg	1,319E-16	1,299E-16	1,287E-16	1,277E-16
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	kg	9,059E-17	7,773E-17	6,964E-17	6,270E-17
Methyl borate	kg	2,675E-17	2,668E-17	2,663E-17	2,659E-17
Acenaphthene	kg	2,212E-17	2,067E-17	1,975E-17	1,897E-17
Benzene, pentachloro-	kg	1,338E-17	1,338E-17	1,338E-17	1,338E-17
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	kg	1,179E-17	1,069E-17	1,000E-17	9,409E-18
Boron trifluoride	kg	6,076E-18	6,059E-18	6,048E-18	6,039E-18
Phenol, pentachloro-	kg	2,145E-18	2,145E-18	2,145E-18	2,145E-18
Benzal chloride	kg	1,625E-18	1,518E-18	1,451E-18	1,393E-18
Mercury	kg	9,231E-19	9,095E-19	9,009E-19	8,936E-19
Propanal	kg	8,814E-19	8,234E-19	7,869E-19	7,556E-19
Methane, bromo-, Halon 1001	kg	3,717E-19	3,472E-19	3,318E-19	3,186E-19
Carbon disulfide	kg	3,013E-19	2,815E-19	2,690E-19	2,583E-19
Isoprene	kg	2,637E-19	2,463E-19	2,354E-19	2,260E-19
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	kg	2,536E-19	2,369E-19	2,264E-19	2,174E-19
Styrene	kg	5,801E-20	5,419E-20	5,179E-20	4,973E-20
Furan	kg	1,974E-20	1,844E-20	1,762E-20	1,692E-20
Cumene	kg	1,230E-20	1,149E-20	1,099E-20	1,055E-20
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	kg	1,644E-23	1,644E-23	1,644E-23	1,644E-23
Platinum	kg	-1,581E-15	-1,581E-15	-1,581E-15	-1,581E-15
Chloroform	kg	-1,672E-15	-1,672E-15	-1,672E-15	-1,672E-15
Lanthanum	kg	-3,404E-15	-3,404E-15	-3,404E-15	-3,404E-15
2-Propanol	kg	2,696E-08	2,688E-08	2,684E-08	2,680E-08
Formaldehyde	kg	2,518E-08	2,143E-08	1,907E-08	1,704E-08
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	kg	2,426E-08	2,116E-08	1,921E-08	1,754E-08
Methanol	kg	2,364E-08	1,995E-08	1,763E-08	1,564E-08
Lead	kg	2,328E-08	2,178E-08	2,084E-08	2,003E-08
Copper	kg	2,243E-08	1,939E-08	1,748E-08	1,584E-08

Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	kg	-7,248E-15	-7,248E-15	-7,248E-15	-7,248E-15
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	kg	-1,153E-14	-1,153E-14	-1,153E-14	-1,153E-14
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	kg	-1,255E-14	-1,255E-14	-1,255E-14	-1,255E-14
t-Butyl methyl ether	kg	-2,544E-14	-2,544E-14	-2,544E-14	-2,544E-14
Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	kg	-5,314E-14	-5,314E-14	-5,314E-14	-5,314E-14
Ethane, dichloro-	kg	-6,265E-14	-6,265E-14	-6,265E-14	-6,265E-14
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	kg	-1,435E-12	-1,435E-12	-1,435E-12	-1,435E-12
Molybdenum	kg	-1,763E-12	-1,767E-12	-1,769E-12	-1,772E-12
Iodine	kg	-1,947E-12	-1,947E-12	-1,947E-12	-1,947E-12
Barium	kg	-3,874E-12	-3,874E-12	-3,874E-12	-3,874E-12
Butene	kg	-4,394E-12	-4,394E-12	-4,394E-12	-4,394E-12
Phosphorus, total	kg	-5,528E-12	-5,528E-12	-5,528E-12	-5,528E-12
Hydrocarbons, aliphatic, alkenes, unspecified	kg	-5,651E-12	-5,651E-12	-5,651E-12	-5,651E-12
Strontium	kg	-1,112E-11	-1,112E-11	-1,112E-11	-1,112E-11
Ethyne	kg	-1,518E-11	-1,822E-11	-2,013E-11	-2,177E-11
Acetone	kg	-1,889E-11	-1,889E-11	-1,889E-11	-1,889E-11
Propene	kg	-2,448E-11	-2,448E-11	-2,448E-11	-2,448E-11
Ethanol	kg	-3,785E-11	-3,785E-11	-3,785E-11	-3,785E-11
Helium	kg	-4,711E-11	-4,711E-11	-4,711E-11	-4,711E-11
Ethene	kg	-4,966E-11	-4,966E-11	-4,966E-11	-4,966E-11
Magnesium	kg	-5,227E-11	-5,228E-11	-5,228E-11	-5,228E-11
Sodium	kg	-8,467E-11	-8,486E-11	-8,498E-11	-8,508E-11
Vanadium	kg	-1,469E-10	-1,611E-10	-1,700E-10	-1,776E-10
Boron	kg	-2,132E-10	-2,132E-10	-2,132E-10	-2,132E-10
Silicon	kg	-1,817E-09	-1,817E-09	-1,817E-09	-1,817E-09
Radon-222	Bq	1,267E+04	1,098E+04	9,922E+03	9,011E+03
Noble gases, radioactive, unspecified	Bq	6,570E+03	5,643E+03	5,059E+03	4,560E+03
Radioactive species, unspecified	Bq	1,280E+03	1,280E+03	1,280E+03	1,280E+03
Radon-222	Bq	3,099E+02	2,684E+02	2,423E+02	2,200E+02
Hydrogen-3, Tritium	Bq	3,911E+00	3,360E+00	3,013E+00	2,715E+00
Xenon-133	Bq	1,052E+00	9,487E-01	8,838E-01	8,282E-01
Carbon-14	Bq	6,811E-01	5,858E-01	5,259E-01	4,746E-01
Xenon-135	Bq	4,325E-01	3,901E-01	3,634E-01	3,406E-01
Krypton-85	Bq	4,133E-01	3,746E-01	3,503E-01	3,295E-01
Xenon-135m	Bq	2,531E-01	2,282E-01	2,126E-01	1,991E-01
Argon-41	Bq	1,321E-01	1,197E-01	1,119E-01	1,053E-01
Iodine-131	Bq	5,228E-02	4,740E-02	4,433E-02	4,169E-02
Radon-220	Bq	4,458E-02	3,935E-02	3,606E-02	3,324E-02
Xenon-138	Bq	4,126E-02	3,711E-02	3,450E-02	3,227E-02
Xenon-131m	Bq	3,354E-02	3,028E-02	2,822E-02	2,646E-02
Krypton-85m	Bq	1,722E-02	1,550E-02	1,441E-02	1,348E-02
Krypton-87	Bq	7,386E-03	6,671E-03	6,220E-03	5,835E-03
Krypton-88	Bq	7,048E-03	6,356E-03	5,920E-03	5,547E-03
Polonium-210	Bq	6,604E-03	5,700E-03	5,131E-03	4,643E-03
Uranium alpha	Bq	5,336E-03	4,625E-03	4,177E-03	3,794E-03
Xenon-133m	Bq	4,892E-03	4,430E-03	4,140E-03	3,891E-03
Xenon-137	Bq	4,531E-03	4,069E-03	3,778E-03	3,528E-03
Radium-226	Bq	4,155E-03	3,597E-03	3,247E-03	2,946E-03
Lead-210	Bq	3,756E-03	3,242E-03	2,919E-03	2,641E-03
Radioactive species, other beta emitters	Bq	3,056E-03	2,622E-03	2,349E-03	2,115E-03
Uranium-238	Bq	1,842E-03	1,593E-03	1,436E-03	1,301E-03
Krypton-89	Bq	1,652E-03	1,484E-03	1,377E-03	1,286E-03
Uranium-234	Bq	1,188E-03	1,029E-03	9,285E-04	8,427E-04
Potassium-40	Bq	9,310E-04	8,168E-04	7,450E-04	6,834E-04
Iodine-129	Bq	6,837E-04	5,872E-04	5,266E-04	4,745E-04
Thorium-230	Bq	4,083E-04	3,529E-04	3,180E-04	2,882E-04
Radium-228	Bq	3,281E-04	2,847E-04	2,574E-04	2,341E-04
Thorium-232	Bq	2,779E-04	2,411E-04	2,180E-04	1,982E-04
Thorium-228	Bq	1,768E-04	1,534E-04	1,387E-04	1,261E-04
Aerosols, radioactive, unspecified	Bq	1,567E-04	1,333E-04	1,186E-04	1,060E-04
Polonium-210	Bq	1,365E-04	1,158E-04	1,027E-04	9,150E-05
Radium-228	Bq	1,044E-04	8,850E-05	7,851E-05	6,995E-05
Thorium-234	Bq	9,844E-05	8,535E-05	7,712E-05	7,007E-05
Protactinium-234	Bq	9,842E-05	8,533E-05	7,710E-05	7,005E-05
Lead-210	Bq	7,470E-05	6,333E-05	5,618E-05	5,006E-05
Uranium-235	Bq	5,544E-05	4,805E-05	4,341E-05	3,943E-05
Potassium-40	Bq	2,169E-05	1,839E-05	1,631E-05	1,453E-05
Radium-226	Bq	1,928E-05	1,634E-05	1,450E-05	1,292E-05
Uranium-238	Bq	1,606E-05	1,362E-05	1,208E-05	1,076E-05
Actinides, radioactive, unspecified	Bq	9,682E-06	8,771E-06	8,199E-06	7,708E-06
Thorium-228	Bq	8,835E-06	7,491E-06	6,645E-06	5,920E-06
Radioactive species, other beta emitters	Bq	6,078E-06	5,510E-06	5,152E-06	4,846E-06
Thorium-232	Bq	5,622E-06	4,767E-06	4,229E-06	3,768E-06
Iodine-135	Bq	2,570E-06	2,331E-06	2,180E-06	2,051E-06
Iodine-133	Bq	2,064E-06	1,862E-06	1,735E-06	1,626E-06
Radon-220	Bq	1,617E-06	1,372E-06	1,218E-06	1,085E-06
Radon-222	Bq	1,613E-06	1,368E-06	1,214E-06	1,082E-06
Barium-140	Bq	7,354E-07	6,587E-07	6,105E-07	5,691E-07
Cerium-141	Bq	1,783E-07	1,597E-07	1,480E-07	1,380E-07
Cesium-137	Bq	1,514E-07	1,356E-07	1,256E-07	1,171E-07
Cobalt-60	Bq	1,405E-07	1,259E-07	1,167E-07	1,088E-07
Lanthanum-140	Bq	6,285E-08	5,630E-08	5,217E-08	4,864E-08
Zinc-65	Bq	2,921E-08	2,617E-08	2,425E-08	2,261E-08
Zirconium-95	Bq	2,855E-08	2,558E-08	2,370E-08	2,210E-08
Cobalt-58	Bq	1,591E-08	1,425E-08	1,321E-08	1,231E-08
Chromium-51	Bq	1,142E-08	1,023E-08	9,483E-09	8,841E-09
Antimony-125	Bq	1,131E-08	1,013E-08	9,385E-09	8,749E-09
Cesium-134	Bq	8,539E-09	7,648E-09	7,088E-09	6,608E-09
Manganese-54	Bq	5,850E-09	5,240E-09	4,856E-09	4,527E-09
Silver-110	Bq	1,512E-09	1,354E-09	1,255E-09	1,170E-09
Antimony-124	Bq	1,083E-09	9,703E-10	8,993E-10	8,384E-10
Niobium-95	Bq	6,945E-10	6,221E-10	5,765E-10	5,374E-10
Plutonium-alpha	Bq	2,138E-10	1,836E-10	1,647E-10	1,484E-10
Ruthenium-103	Bq	1,526E-10	1,367E-10	1,267E-10	1,181E-10
Plutonium-238	Bq	9,327E-11	8,011E-11	7,183E-11	6,473E-11
Curium-242	Bq	-7,168E-15	-7,168E-15	-7,168E-15	-7,168E-15
Curium-244	Bq	-6,537E-14	-6,537E-14	-6,537E-14	-6,537E-14
Neptunium-237	Bq	-6,833E-14	-6,833E-14	-6,833E-14	-6,833E-14
Cobalt-57	Bq	-1,225E-13	-1,225E-13	-1,225E-13	-1,225E-13
Plutonium-238	Bq	-1,616E-13	-1,616E-13	-1,616E-13	-1,616E-13
Ruthenium-103	Bq	-7,428E-13	-7,428E-13	-7,428E-13	-7,428E-13
Antimony-125	Bq	-2,746E-12	-2,746E-12	-2,746E-12	-2,746E-12
Iron-59	Bq	-2,823E-12	-2,823E-12	-2,823E-12	-2,823E-12
Technetium-99	Bq	-2,907E-12	-2,907E-12	-2,907E-12	-2,907E-12
Zirconium-95	Bq	-4,673E-12	-4,673E-12	-4,673E-12	-4,673E-12
Cerium-141	Bq	-6,644E-12	-6,644E-12	-6,644E-12	-6,644E-12
Radioactive species, other beta emitters	Bq	-9,846E-12	-9,846E-12	-9,846E-12	-9,846E-12
Niobium-95	Bq	-1,284E-11	-1,284E-11	-1,284E-11	-1,284E-11
Antimony-124	Bq	-1,974E-11	-1,974E-11	-1,974E-11	-1,974E-11
Silver-110	Bq	-7,139E-11	-7,139E-11	-7,139E-11	-7,139E-11
Manganese-54	Bq	-7,287E-11	-7,287E-11	-7,287E-11	-7,287E-11
Strontium-89	Bq	-1,276E-10	-1,276E-10	-1,276E-10	-1,276E-10
Lanthanum-140	Bq	-1,785E-10	-1,785E-10	-1,785E-10	-1,785E-10
Chromium-51	Bq	-2,525E-10	-2,525E-10	-2,525E-10	-2,525E-10
Barium-140	Bq	-2,872E-10	-2,872E-10	-2,872E-10	-2,872E-10
Zinc-65	Bq	-3,164E-10	-3,164E-10	-3,164E-10	-3,164E-10
Tellurium-123m	Bq	-3,187E-10	-3,187E-10	-3,187E-10	-3,187E-10
Americium-241	Bq	-1,311E-09	-1,311E-09	-1,311E-09	-1,311E-09
Cobalt-58	Bq	-1,988E-09	-1,988E-09	-1,988E-09	-1,988E-09
Curium alpha	Bq	-2,076E-09	-2,076E-09	-2,076E-09	-2,076E-09
Cobalt-60	Bq	-2,978E-09	-2,978E-09	-2,978E-09	-2,978E-09
Plutonium-alpha	Bq	-4,170E-09	-4,170E-09	-4,170E-09	-4,170E-09
Cerium-144	Bq	-1,400E-08	-1,400E-08	-1,400E-08	-1,400E-08
Iodine-133	Bq	-2,315E-08	-2,315E-08	-2,315E-08	-2,315E-08
Uranium-235	Bq	-2,423E-08	-2,423E-08	-2,423E-08	-2,423E-08
Iodine-135	Bq	-3,465E-08	-3,465E-08	-3,465E-08	-3,465E-08
Promethium-147	Bq	-3,547E-08	-3,547E-08	-3,547E-08	-3,547E-08
Protactinium-234	Bq	-4,176E-08	-4,176E-08	-4,176E-08	-4,176E-08
Thorium-234	Bq	-4,176E-08	-4,176E-08	-4,176E-08	-4,176E-08
Iodine-131	Bq	-4,382E-08	-4,382E-08	-4,382E-08	-4,382E-08
Cesium-134	Bq	-4,974E-08	-4,974E-08	-4,974E-08	-4,974E-08
Strontium-90	Bq	-6,842E-08	-6,842E-08	-6,842E-08	-6,842E-08
Cesium-137	Bq	-9,655E-08	-9,655E-08	-9,655E-08	-9,655E-08
Plutonium-241	Bq	-1,144E-07	-1,144E-07	-1,144E-07	-1,144E-07
Thorium-232	Bq	-3,573E-07	-3,573E-07	-3,573E-07	-3,573E-07
Iodine-129	Bq	-3,746E-07	-3,746E-07	-3,746E-07	-3,746E-07
Ruthenium-106	Bq	-4,170E-07	-4,170E-07	-4,170E-07	-4,170E-07
Thorium-230	Bq	-4,646E-07	-4,646E-07	-4,646E-07	-4,646E-07
Uranium-234	Bq	-4,994E-07	-4,994E-07	-4,994E-07	-4,994E-07
Thorium-228	Bq	-5,612E-07	-5,612E-07	-5,612E-07	-5,612E-07
Radium-228	Bq	-6,632E-07	-6,632E-07	-6,632E-07	-6,632E-07
Potassium-40	Bq	-1,326E-06	-1,326E-06	-1,326E-06	-1,326E-06
Uranium alpha	Bq	-1,492E-06	-1,492E-06	-1,492E-06	-1,492E-06
Uranium-238	Bq	-1,513E-06	-1,513E-06	-1,513E-06	-1,513E-06
Xenon-137	Bq	-2,158E-06	-2,158E-06	-2,158E-06	-2,158E-06
Xenon-133m	Bq	-2,377E-06	-2,377E-06	-2,377E-06	-2,377E-06
Radium-226	Bq	-2,537E-06	-2,537E-06	-2,537E-06	-2,537E-06
Krypton-89	Bq	-2,614E-06	-2,614E-06	-2,614E-06	-2,614E-06
Krypton-87	Bq	-3,640E-06	-3,640E-06	-3,640E-06	-3,640E-06
Lead-210	Bq	-5,268E-06	-5,268E-06	-5,268E-06	-5,268E-06
Krypton-85m	Bq	-8,376E-06	-8,376E-06	-8,376E-06	-8,376E-06
Polonium-210	Bq	-9,137E-06	-9,137E-06	-9,137E-06	-9,137E-06
Noble gases, radioactive, unspecified	Bq	-1,046E-05	-1,046E-05	-1,046E-05	-1,046E-05
Xenon-131m	Bq	-1,740E-05	-1,740E-05	-1,740E-05	-1,740E-05
Radon-220	Bq	-1,792E-05	-1,792E-05	-1,792E-05	-1,792E-05
Xenon-138	Bq	-2,303E-05	-2,303E-05	-2,303E-05	-2,303E-05
Xenon-135m	Bq	-8,453E-05	-8,453E-05	-8,453E-05	-8,453E-05
Carbon-14	Bq	-1,061E-04	-1,061E-04	-1,061E-04	-1,061E-04
Argon-41	Bq	-1,549E-04	-1,549E-04	-1,549E-04	-1,549E-04
Krypton-88	Bq	-3,026E-04	-3,026E-04	-3,026E-04	-3,026E-04
Xenon-135	Bq	-7,996E-04	-7,996E-04	-7,996E-04	-7,996E-04
Hydrogen-3, Tritium	Bq	-1,082E-03	-1,082E-03	-1,082E-03	-1,082E-03
Xenon-133	Bq	-4,617E-03	-4,617E-03	-4,617E-03	-4,617E-03
Radon-222	Bq	-1,002E-01	-1,002E-01	-1,002E-01	-1,002E-01
Krypton-85	Bq	-6,491E+00	-6,491E+00	-6,491E+00	-6,491E+00
Chloroform	kg	6,822E-11	6,700E-11	6,623E-11	6,558E-11
Chlorine	kg	6,732E-11	6,732E-11	6,732E-11	6,732E-11
Tin	kg	6,020E-11	5,345E-11	4,920E-11	4,556E-11
Ozone	kg	5,932E-11	5,150E-11	4,659E-11	4,237E-11
Hydrogen sulfide	kg	4,987E-11	4,532E-11	4,247E-11	4,002E-11
Carbon monoxide, fossil	kg	4,879E-11	4,807E-11	4,762E-11	4,723E-11

Πίνακας Π.13 Συνολικές εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα. Κύκλος ζωής συστήματος MCFC. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh.Παράμετρος: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης.

Substance	Unit	Total
Heat, waste	MJ	1,434E+00
Carbon dioxide	kg	6,982E-01
Carbon dioxide, fossil	kg	9,073E-02
Nitrogen dioxide	kg	1,343E-02
Carbon monoxide	kg	1,681E-03
Sulfur dioxide	kg	1,280E-03
Particulates, < 10 um	kg	5,500E-04
Carbon dioxide, biogenic	kg	5,452E-04
Methane	kg	5,303E-04
Methane, fossil	kg	3,702E-04
Nitrogen oxides	kg	3,507E-04
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspec	kg	2,413E-04
Carbon monoxide, fossil	kg	1,451E-04
Particulates, < 2.5 um	kg	3,391E-05
Particulates, > 10 um	kg	2,852E-05
Pentane	kg	1,577E-05
Propane	kg	1,300E-05
Butane	kg	1,282E-05
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	kg	1,132E-05
Hexane	kg	6,235E-06
Ethane	kg	4,634E-06
Carbon dioxide, land transformation	kg	3,215E-06
Heptane	kg	2,896E-06
Toluene	kg	1,834E-06
Hydrogen chloride	kg	1,784E-06
Dinitrogen monoxide	kg	1,736E-06
Ammonia	kg	1,515E-06
Benzene	kg	1,410E-06
Xylene	kg	1,281E-06
water	kg	1,259E-06
Aluminum	kg	8,433E-07
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	kg	6,403E-07
Ethene	kg	6,294E-07
Carbon monoxide, biogenic	kg	6,121E-07
Propene	kg	5,937E-07
Sulfate	kg	5,395E-07
Helium	kg	5,235E-07
Hydrogen	kg	4,797E-07
Methane, biogenic	kg	4,777E-07
Sulfur oxides	kg	4,342E-07
Hydrogen fluoride	kg	3,008E-07
Benzene, ethyl-	kg	2,898E-07
Butene	kg	2,896E-07
Vanadium	kg	2,289E-07
Sodium	kg	2,037E-07
Particulates	kg	1,774E-07
Boron	kg	1,612E-07
Ozone	kg	1,557E-07
Nickel	kg	1,386E-07
Acetic acid	kg	1,209E-07
Hydrocarbons, aromatic	kg	1,009E-07
Potassium	kg	9,670E-08
Hydrogen sulfide	kg	8,389E-08
Methanol	kg	7,518E-08
Carbon disulfide	kg	7,499E-08
Iron	kg	6,687E-08
Chlorine	kg	6,283E-08
Formaldehyde	kg	5,842E-08
Calcium	kg	5,620E-08
Zinc	kg	5,236E-08
Silicon	kg	4,469E-08
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	kg	3,938E-08
Lead	kg	3,167E-08
Chromium	kg	3,118E-08
Copper	kg	2,778E-08
Cumene	kg	2,173E-08
Acetaldehyde	kg	1,802E-08
Bromine	kg	1,781E-08
Ethanol	kg	1,655E-08
Acetone	kg	1,093E-08
Magnesium	kg	1,090E-08
Cobalt	kg	9,830E-09
Iodine	kg	9,452E-09
Cadmium	kg	9,120E-09
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	kg	8,255E-09
Methane, bromotrifluoro-, Halon 1301	kg	7,496E-09
Arsenic	kg	6,514E-09
Selenium	kg	5,452E-09
Metals, unspecified	kg	5,366E-09
Mercury	kg	5,272E-09
Manganese	kg	5,047E-09
Molybdenum	kg	4,462E-09
Strontium	kg	2,616E-09
Barium	kg	2,564E-09
Phenol	kg	2,451E-09
Ethyl acetate	kg	2,412E-09
Methyl ethyl ketone	kg	2,412E-09
Sulfur hexafluoride	kg	2,348E-09
Ethyne	kg	2,038E-09
Ethane, 1,2-dichloro-	kg	1,526E-09
Phosphorus	kg	1,481E-09
Methane, tetrafluoro-, CFC-14	kg	1,426E-09
Propionic acid	kg	1,043E-09
Cyanide	kg	9,990E-10
Titanium	kg	9,922E-10
Formic acid	kg	9,334E-10
Aldehydes, unspecified	kg	9,216E-10
Fluorine	kg	6,984E-10
Chromium VI	kg	6,765E-10
Propylene oxide	kg	6,321E-10
Tin	kg	5,570E-10
Methane, chlorodifluoro-, HCFC-22	kg	5,141E-10
2-Propanol	kg	5,104E-10
m-Xylene	kg	4,791E-10
Ethene, chloro-	kg	4,490E-10
Benzo(a)pyrene	kg	3,645E-10
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, cyclic	kg	3,505E-10
Hydrocarbons, chlorinated	kg	3,405E-10
Antimony	kg	3,163E-10
Monoethanolamine	kg	3,126E-10
Ethylene oxide	kg	2,704E-10
Furan	kg	2,642E-10
Isocyanic acid	kg	2,380E-10
Sodium chlorate	kg	2,013E-10
Fluosilicic acid	kg	1,853E-10
Ethane, 1,2-dichloro-1,1,2,2-tetrafluoro-, CFC-114	kg	1,823E-10
Particulates, > 10 um (process)	kg	1,669E-10
Ethane, hexafluoro-, HFC-116	kg	1,632E-10
Acetonitrile	kg	1,391E-10
Styrene	kg	1,332E-10
Methane, bromochlorodifluoro-, Halon 1211	kg	1,293E-10
Phenol, pentachloro-	kg	1,247E-10
Terpenes	kg	1,159E-10
Methane, tetrachloro-, CFC-10	kg	1,109E-10
Particulates, < 10 um (stationary)	kg	7,121E-11
Sodium dichromate	kg	7,002E-11
Nitrate	kg	3,701E-11
Nitrogen	kg	3,541E-11
Zirconium	kg	3,164E-11
Polychlorinnated biphenyls	kg	2,796E-11
Acrolein	kg	1,824E-11
Silicon tetrafluoride	kg	1,811E-11
Benzene, hexachloro-	kg	1,611E-11
Ammonium carbonate	kg	1,525E-11
Ethane, 1,1-difluoro-, HFC-152a	kg	1,364E-11
Sodium hydroxide	kg	1,330E-11
Thallium	kg	1,278E-11
Isoprene	kg	1,226E-11
Ethane, 1,1,1,2-tetrafluoro-, HFC-134a	kg	1,075E-11
t-Butyl methyl ether	kg	8,591E-12
Propanal	kg	8,455E-12
Benzaldehyde	kg	8,210E-12
Beryllium	kg	7,988E-12
Chloroform	kg	6,306E-12
Thorium	kg	5,249E-12
Uranium	kg	4,875E-12
Ethyl cellulose	kg	4,799E-12
Scandium	kg	4,346E-12
Hydrogen peroxide	kg	3,582E-12
Sulfuric acid	kg	2,816E-12
Silver	kg	2,207E-12
Methyl acrylate	kg	1,500E-12
Methane, dichlorodifluoro-, CFC-12	kg	1,360E-12
Acrylic acid	kg	1,322E-12
Methane, dichloro-, HCC-30	kg	1,175E-12
Methane, monochloro-, R-40	kg	1,113E-12
Sodium formate	kg	7,229E-13
Particulates, < 10 um (mobile)	kg	6,045E-13
1-Propanol	kg	4,772E-13
Methane, trifluoro-, HFC-23	kg	1,902E-13
Benzene, pentachloro-	kg	1,608E-13
Ethene, tetrachloro-	kg	1,013E-13
Hydrocarbons, aliphatic, alkenes, unspecified	kg	8,149E-14
Butadiene	kg	6,492E-14
Ethane, 1,1,2-trichloro-1,2,2-trifluoro-, CFC-113	kg	6,276E-14
Paraffins	kg	5,028E-14
Hydrocarbons, halogenated	kg	4,548E-14
Acenaphthene	kg	4,373E-14
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	kg	4,166E-14
1,4-Butanediol	kg	2,839E-14
Chlorosilane, trimethyl-	kg	2,376E-14
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	kg	2,014E-14
Phosphorus, total	kg	1,309E-14
Ethylene diamine	kg	9,952E-15
Butyrolactone	kg	8,216E-15
Platinum	kg	6,271E-15
Methyl formate	kg	5,811E-15
Methyl amine	kg	2,961E-15
Methane, tetrafluoro-, FC-14	kg	2,849E-15
Methane, dichlorofluoro-, HCFC-21	kg	2,240E-15
Methane, trichlorofluoro-, CFC-11	kg	1,339E-15
Phosphine	kg	1,143E-15
Ethane, dichloro-	kg	1,125E-15
Lanthanum	kg	4,214E-16
Butanol	kg	8,801E-17
Methane, chlorotrifluoro-, CFC-13	kg	4,972E-17
Arsine	kg	1,541E-17
Benzal chloride	kg	5,276E-19
Methyl borate	kg	5,065E-19
Methane, bromo-, Halon 1001	kg	1,207E-19
Boron trifluoride	kg	1,150E-19
Radon-222	Bq	8,172E+03
Noble gases, radioactive, unspecified	Bq	4,378E+03
Radioactive species, unspecified	Bq	1,576E+02
Hydrogen-3, Tritium	Bq	2,605E+00
Xenon-133	Bq	4,884E-01
Carbon-14	Bq	4,496E-01
Krypton-85	Bq	2,268E-01
Xenon-135	Bq	2,005E-01
Xenon-135m	Bq	1,178E-01
Argon-41	Bq	5,840E-02
Radon-220	Bq	2,471E-02
Iodine-131	Bq	2,311E-02
Xenon-138	Bq	1,963E-02
Xenon-131m	Bq	1,546E-02
Krypton-85m	Bq	8,158E-03
Polonium-210	Bq	4,388E-03
Krypton-87	Bq	3,386E-03
Uranium alpha	Bq	3,369E-03
Krypton-88	Bq	3,278E-03
Radium-226	Bq	2,651E-03
Lead-210	Bq	2,492E-03
Xenon-137	Bq	2,190E-03
Xenon-133m	Bq	2,184E-03
Radioactive species, other beta emitters	Bq	2,043E-03
Uranium-238	Bq	1,190E-03
Krypton-89	Bq	7,987E-04
Uranium-234	Bq	7,515E-04
Potassium-40	Bq	5,583E-04
Iodine-129	Bq	4,566E-04
Radium-228	Bq	2,963E-04
Thorium-230	Bq	2,614E-04
Thorium-232	Bq	1,784E-04
Thorium-228	Bq	1,180E-04
Aerosols, radioactive, unspecified	Bq	1,104E-04
Thorium-234	Bq	6,180E-05
Protactinium-234	Bq	6,179E-05
Uranium-235	Bq	3,487E-05
Actinides, radioactive, unspecified	Bq	4,316E-06
Iodine-135	Bq	1,135E-06
Iodine-133	Bq	9,573E-07
Barium-140	Bq	3,630E-07
Cerium-141	Bq	8,800E-08
Cesium-137	Bq	7,536E-08
Cobalt-60	Bq	6,939E-08
Lanthanum-140	Bq	3,102E-08
Zinc-65	Bq	1,442E-08
Zirconium-95	Bq	1,409E-08
Cobalt-58	Bq	7,866E-09
Chromium-51	Bq	5,640E-09
Antimony-125	Bq	5,580E-09
Cesium-134	Bq	4,554E-09
Manganese-54	Bq	2,888E-09
Ruthenium-106	Bq	2,841E-09
Plutonium-241	Bq	7,812E-10
Silver-110	Bq	7,469E-10
Antimony-124	Bq	5,348E-10
Strontium-90	Bq	4,689E-10
Niobium-95	Bq	3,429E-10
Promethium-147	Bq	2,415E-10
Plutonium-alpha	Bq	1,709E-10
Cerium-144	Bq	9,516E-11
Ruthenium-103	Bq	7,532E-11
Plutonium-238	Bq	6,215E-11
Curium alpha	Bq	1,420E-11
Americium-241	Bq	8,948E-12
Tellurium-123m	Bq	2,141E-12
Strontium-89	Bq	8,521E-13
Technetium-99	Bq	1,988E-14
Iron-59	Bq	1,865E-14
Cobalt-57	Bq	8,229E-16
Neptunium-237	Bq	4,687E-16
Curium-244	Bq	4,278E-16
Curium-242	Bq	4,712E-17

Πίνακας Π.14 Συνολικές εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα. Κύκλος ζωής συστήματος DE. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh.

Substance	Unit	MCFC system efficiency			
		32,70%	39,10%	44,60%	50,70%
Heat, waste	MJ	2,511E-01	2,124E-01	1,880E-01	1,671E-01
Heat, waste	MJ	9,820E-04	8,258E-04	7,276E-04	6,434E-04
Heat, waste	MJ	5,836E-06	5,293E-06	4,951E-06	4,657E-06
Heat, waste	MJ	-2,706E-05	-3,288E-05	-3,654E-05	-3,968E-05
Chloride	kg	6,139E-03	5,140E-03	4,511E-03	3,972E-03
Sodium, ion	kg	3,696E-03	3,094E-03	2,715E-03	2,390E-03
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	3,365E-03	2,816E-03	2,471E-03	2,176E-03
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	3,342E-03	2,797E-03	2,454E-03	2,160E-03
Chloride	kg	3,083E-03	2,580E-03	2,264E-03	1,993E-03
Sodium, ion	kg	1,881E-03	1,574E-03	1,381E-03	1,216E-03
Chloride	kg	1,616E-03	1,355E-03	1,190E-03	1,050E-03
Oils, unspecified	kg	1,053E-03	8,816E-04	7,736E-04	6,810E-04
TOC, Total Organic Carbon	kg	9,924E-04	8,306E-04	7,289E-04	6,417E-04
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	9,904E-04	8,289E-04	7,274E-04	6,403E-04
Silicon	kg	6,230E-04	5,878E-04	5,656E-04	5,466E-04
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	6,165E-04	5,160E-04	4,528E-04	3,986E-04
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	6,062E-04	5,074E-04	4,452E-04	3,919E-04
Calcium, ion	kg	3,787E-04	3,177E-04	2,793E-04	2,464E-04
Suspended solids, unspecified	kg	2,404E-04	2,013E-04	1,766E-04	1,555E-04
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	2,024E-04	1,694E-04	1,486E-04	1,308E-04
TOC, Total Organic Carbon	kg	2,023E-04	1,694E-04	1,486E-04	1,308E-04
Calcium, ion	kg	1,942E-04	1,625E-04	1,426E-04	1,256E-04
Oils, unspecified	kg	1,931E-04	1,617E-04	1,419E-04	1,249E-04
Calcium, ion	kg	1,158E-04	1,023E-04	9,385E-05	8,668E-05
Sulfate	kg	1,020E-04	8,904E-05	8,092E-05	7,396E-05
Sulfate	kg	8,092E-05	7,509E-05	7,142E-05	6,827E-05
Chloride	kg	7,430E-05	6,472E-05	5,870E-05	5,353E-05
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	6,837E-05	6,093E-05	5,625E-05	5,223E-05
Sulfate	kg	6,790E-05	5,955E-05	5,429E-05	4,979E-05
Barite	kg	6,640E-05	5,568E-05	4,878E-05	4,296E-05
Magnesium	kg	6,345E-05	5,314E-05	4,665E-05	4,109E-05
Potassium, ion	kg	5,372E-05	4,498E-05	3,948E-05	3,477E-05
Carboxylic acids, unspecified	kg	4,464E-05	3,737E-05	3,279E-05	2,887E-05
Aluminum	kg	3,845E-05	3,353E-05	3,044E-05	2,779E-05
Solids, inorganic	kg	3,841E-05	3,373E-05	3,079E-05	2,826E-05
Carboxylic acids, unspecified	kg	3,459E-05	2,895E-05	2,541E-05	2,237E-05
Sulfate	kg	3,407E-05	2,872E-05	2,535E-05	2,247E-05
Magnesium	kg	3,385E-05	2,833E-05	2,486E-05	2,189E-05
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	3,008E-05	2,866E-05	2,451E-05	2,266E-05
TOC, Total Organic Carbon	kg	3,008E-05	2,666E-05	2,451E-05	2,266E-05
Potassium, ion	kg	2,590E-05	2,167E-05	1,902E-05	1,674E-05
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	2,319E-05	2,065E-05	1,905E-05	1,768E-05
Iron, ion	kg	2,236E-05	1,988E-05	1,832E-05	1,698E-05
Strontium	kg	2,195E-05	1,837E-05	1,612E-05	1,419E-05
Iron, ion	kg	1,745E-05	1,532E-05	1,399E-05	1,284E-05
Magnesium	kg	1,644E-05	1,440E-05	1,312E-05	1,202E-05
Chloride	kg	1,590E-05	1,336E-05	1,176E-05	1,039E-05
Suspended solids, unspecified	kg	1,446E-05	1,213E-05	1,067E-05	9,421E-06
Nitrogen	kg	1,393E-05	1,393E-05	1,393E-05	1,393E-05
Sulfate	kg	1,367E-05	1,367E-05	1,367E-05	1,367E-05
Sodium, ion	kg	1,281E-05	1,105E-05	9,941E-06	8,991E-06
Fluoride	kg	1,122E-05	1,110E-05	1,102E-05	1,095E-05
Strontium	kg	1,115E-05	9,330E-06	8,186E-06	7,207E-06
Barium	kg	1,058E-05	8,858E-06	7,773E-06	6,843E-06
Bromine	kg	8,533E-06	7,144E-06	6,271E-06	5,523E-06
Calcium, ion	kg	7,854E-06	7,854E-06	7,854E-06	7,854E-06
Hydrocarbons, aromatic	kg	6,371E-06	5,333E-06	4,679E-06	4,119E-06
Barium	kg	5,358E-06	4,484E-06	3,935E-06	3,464E-06
Potassium, ion	kg	4,426E-06	3,789E-06	3,387E-06	3,044E-06
Bromine	kg	4,301E-06	3,600E-06	3,159E-06	2,781E-06
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	kg	4,251E-06	3,558E-06	3,122E-06	2,749E-06
Zinc, ion	kg	3,641E-06	3,050E-06	2,678E-06	2,359E-06
Sodium, ion	kg	3,625E-06	3,169E-06	2,882E-06	2,636E-06
Hydrocarbons, aromatic	kg	3,380E-06	2,829E-06	2,482E-06	2,185E-06
Sulfur	kg	3,260E-06	2,729E-06	2,395E-06	2,109E-06
Solved substances, inorganic	kg	3,009E-06	3,009E-06	3,009E-06	3,009E-06
Solids, inorganic	kg	2,571E-06	2,168E-06	1,914E-06	1,697E-06
Phosphate	kg	2,471E-06	2,077E-06	1,830E-06	1,618E-06
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	kg	2,150E-06	1,800E-06	1,579E-06	1,390E-06
Sodium, ion	kg	1,955E-06	1,666E-06	1,484E-06	1,328E-06
Potassium, ion	kg	1,780E-06	1,562E-06	1,425E-06	1,307E-06
Titanium, ion	kg	1,728E-06	1,551E-06	1,441E-06	1,346E-06
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	kg	1,577E-06	1,320E-06	1,158E-06	1,020E-06
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	1,445E-06	1,372E-06	1,325E-06	1,285E-06
Silicon	kg	1,383E-06	1,295E-06	1,240E-06	1,192E-06
Toluene	kg	1,382E-06	1,157E-06	1,015E-06	8,938E-07
Iron, ion	kg	1,344E-06	1,130E-06	9,950E-07	8,794E-07
Silicon	kg	1,342E-06	1,180E-06	1,078E-06	9,913E-07
Nickel, ion	kg	1,280E-06	1,202E-06	1,154E-06	1,112E-06
Solved solids	kg	1,268E-06	1,109E-06	1,009E-06	9,229E-07
Fluoride	kg	1,248E-06	1,147E-06	1,084E-06	1,029E-06
Hydrocarbons, unspecified	kg	1,245E-06	1,043E-06	9,150E-07	8,057E-07
Iodide	kg	1,214E-06	1,016E-06	8,916E-07	7,849E-07
Nitrate	kg	1,201E-06	1,037E-06	9,344E-07	8,463E-07
Xylene	kg	1,148E-06	9,605E-07	8,429E-07	7,420E-07
Aluminum	kg	1,128E-06	9,446E-07	8,291E-07	7,301E-07
Nitrogen	kg	1,126E-06	9,647E-07	8,634E-07	7,767E-07
Nitrate	kg	1,113E-06	9,334E-07	8,204E-07	7,236E-07
Phenol	kg	9,826E-07	8,224E-07	7,217E-07	6,354E-07
Toluene	kg	9,362E-07	7,835E-07	6,875E-07	6,052E-07
Zinc, ion	kg	9,318E-07	7,882E-07	6,979E-07	6,205E-07
Nitrogen, organic bound	kg	8,350E-07	7,602E-07	7,132E-07	6,729E-07
Ammonium, ion	kg	8,231E-07	6,886E-07	6,041E-07	5,316E-07
Benzene	kg	8,018E-07	6,721E-07	5,905E-07	5,206E-07
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	kg	7,987E-07	6,685E-07	5,866E-07	5,164E-07
Phenol	kg	7,686E-07	6,433E-07	5,645E-07	4,969E-07
Nitrogen, organic bound	kg	7,604E-07	6,373E-07	5,599E-07	4,935E-07
Iron, ion	kg	7,455E-07	6,264E-07	5,515E-07	4,873E-07
Xylene	kg	7,256E-07	6,073E-07	5,329E-07	4,691E-07
Iron	kg	7,205E-07	7,205E-07	7,205E-07	7,205E-07
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	6,841E-07	6,121E-07	5,668E-07	5,280E-07
Fluoride	kg	6,599E-07	5,525E-07	4,850E-07	4,271E-07
Boron	kg	6,500E-07	5,719E-07	5,227E-07	4,806E-07
Suspended solids, unspecified	kg	6,410E-07	5,327E-07	4,646E-07	4,062E-07
Iodide	kg	6,144E-07	5,142E-07	4,512E-07	3,972E-07
Ammonium, ion	kg	6,050E-07	5,101E-07	4,504E-07	3,992E-07
Barium	kg	5,600E-07	4,903E-07	4,465E-07	4,089E-07
Manganese	kg	5,307E-07	4,448E-07	3,908E-07	3,445E-07
Benzene	kg	5,071E-07	4,244E-07	3,724E-07	3,279E-07
Strontium	kg	4,954E-07	4,308E-07	3,902E-07	3,554E-07
Aluminum	kg	4,241E-07	4,237E-07	4,234E-07	4,231E-07
Aluminum	kg	3,879E-07	3,297E-07	2,932E-07	2,618E-07
Manganese	kg	3,793E-07	3,294E-07	2,980E-07	2,711E-07
Iron, ion	kg	3,284E-07	2,749E-07	2,412E-07	2,123E-07
Chromium VI	kg	3,218E-07	2,679E-07	2,340E-07	2,049E-07
Cobalt	kg	3,038E-07	2,914E-07	2,836E-07	2,769E-07
Benzene, ethyl-	kg	2,912E-07	2,437E-07	2,138E-07	1,883E-07
TOC, Total Organic Carbon	kg	2,829E-07	2,711E-07	2,636E-07	2,573E-07
Suspended substances, unspecified	kg	2,824E-07	2,824E-07	2,824E-07	2,824E-07
Manganese	kg	2,710E-07	2,268E-07	1,990E-07	1,752E-07
Zinc, ion	kg	2,667E-07	2,256E-07	1,997E-07	1,775E-07
Methane, dichloro-, HCC-30	kg	2,162E-07	1,802E-07	1,581E-07	1,392E-07
Solved solids	kg	2,074E-07	6,880E-08	-1,838E-08	-9,310E-08
Oils, unspecified	kg	1,931E-07	1,688E-07	1,535E-07	1,404E-07
Vanadium, ion	kg	1,723E-07	1,470E-07	1,311E-07	1,175E-07
Copper, ion	kg	1,719E-07	1,536E-07	1,421E-07	1,322E-07
Phosphate	kg	1,570E-07	1,324E-07	1,169E-07	1,036E-07
Benzene, ethyl-	kg	1,475E-07	1,234E-07	1,083E-07	9,535E-08
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	kg	1,456E-07	1,218E-07	1,069E-07	9,413E-08
Chlorate	kg	1,378E-07	1,185E-07	1,064E-07	9,606E-08
Nitrate	kg	1,271E-07	1,093E-07	9,816E-08	8,860E-08
Rubidium	kg	1,213E-07	1,015E-07	8,910E-08	7,844E-08
Solved solids	kg	1,022E-07	9,549E-08	9,126E-08	8,764E-08
Chromium VI	kg	1,007E-07	8,380E-08	7,318E-08	6,407E-08
Kjeldahl-N	kg	9,079E-08	9,079E-08	9,079E-08	9,079E-08
Phosphate	kg	8,998E-08	8,560E-08	8,285E-08	8,048E-08
Sulfur	kg	8,629E-08	7,222E-08	6,337E-08	5,579E-08
Boron	kg	7,700E-08	6,532E-08	5,797E-08	5,167E-08
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	kg	7,373E-08	6,171E-08	5,416E-08	4,767E-08
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	7,271E-08	6,088E-08	5,343E-08	4,705E-08
Nitrogen, organic bound	kg	7,199E-08	6,064E-08	5,350E-08	4,738E-08
Hydrogen sulfide	kg	6,847E-08	5,783E-08	5,115E-08	4,542E-08
Sulfite	kg	6,814E-08	6,211E-08	5,832E-08	5,507E-08
Cumene	kg	6,758E-08	5,688E-08	5,016E-08	4,439E-08
Phosphate	kg	6,351E-08	6,351E-08	6,351E-08	6,351E-08
Rubidium	kg	6,144E-08	5,142E-08	4,512E-08	3,972E-08
Cyanide	kg	5,861E-08	5,554E-08	5,361E-08	5,196E-08
Lead	kg	5,843E-08	4,962E-08	4,408E-08	3,933E-08
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	kg	5,791E-08	4,845E-08	4,250E-08	3,739E-08
Carbonate	kg	5,621E-08	5,226E-08	4,977E-08	4,764E-08
Magnesium	kg	5,281E-08	5,272E-08	5,266E-08	5,261E-08
Boron	kg	5,024E-08	4,205E-08	3,689E-08	3,248E-08
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	kg	4,872E-08	4,078E-08	3,578E-08	3,150E-08
Phosphorus	kg	4,868E-08	4,066E-08	3,568E-08	3,141E-08
Nitrate	kg	4,747E-08	4,152E-08	3,777E-08	3,457E-08
Metallic ions, unspecified	kg	4,620E-08	4,620E-08	4,620E-08	4,620E-08
Lead	kg	4,516E-08	3,780E-08	3,318E-08	2,921E-08
Phosphorus	kg	4,415E-08	3,707E-08	3,262E-08	2,881E-08
Ammonium, ion	kg	4,408E-08	3,713E-08	3,276E-08	2,901E-08
t-Butyl methyl ether	kg	3,979E-08	3,331E-08	2,923E-08	2,573E-08
Aluminum	kg	3,870E-08	3,387E-08	3,084E-08	2,823E-08
Barium	kg	3,764E-08	3,760E-08	3,757E-08	3,755E-08
Calcium, ion	kg	3,522E-08	3,107E-08	2,846E-08	2,622E-08
Calcium, ion	kg	3,502E-08	3,464E-08	3,423E-08	3,397E-08
Lead	kg	3,189E-08	2,717E-08	2,420E-08	2,166E-08
Strontium	kg	3,025E-08	2,645E-08	2,406E-08	2,202E-08
Cyanide	kg	2,946E-08	2,589E-08	2,365E-08	2,173E-08
Chromium, ion	kg	2,907E-08	2,433E-08	2,135E-08	1,880E-08
Propene	kg	2,862E-08	2,438E-08	2,172E-08	1,944E-08
Ethene	kg	2,786E-08	2,338E-08	2,056E-08	1,814E-08
Nitrogen	kg	2,622E-08	2,196E-08	1,926E-08	1,695E-08
Hydrocarbons, unspecified	kg	2,580E-08	2,218E-08	1,991E-08	1,796E-08
Solved substances	kg	2,557E-08	2,557E-08	2,557E-08	2,557E-08
Arsenic, ion	kg	2,409E-08	2,052E-08	1,827E-08	1,634E-08
Fluoride	kg	2,102E-08	1,839E-08	1,676E-08	1,533E-08
Fluoride	kg	2,059E-08	1,823E-08	1,674E-08	1,547E-08
Antimony	kg	1,973E-08	1,865E-08	1,797E-08	1,738E-08
Chromium, ion	kg	1,952E-08	1,638E-08	1,441E-08	1,271E-08
Molybdenum	kg	1,938E-08	1,659E-08	1,483E-08	1,333E-08
Potassium	kg	1,895E-08	1,895E-08	1,895E-08	1,895E-08
Calcium compounds, unspecified	kg	1,866E-08	1,866E-08	1,866E-08	1,866E-08
Tributyltin compounds	kg	1,777E-08	1,485E-08	1,304E-08	1,149E-08
Zinc, ion	kg	1,613E-08	1,429E-08	1,314E-08	1,214E-08
Bromate	kg	1,613E-08	1,391E-08	1,251E-08	1,131E-08
Arsenic, ion	kg	1,591E-08	1,381E-08	1,249E-08	1,136E-08
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	kg	1,497E-08	1,294E-08	1,166E-08	1,056E-08
Nickel, ion	kg	1,375E-08	1,303E-08	1,258E-08	1,219E-08
Tin, ion	kg	1,366E-08	1,194E-08	1,086E-08	9,929E-09
Nickel, ion	kg	1,353E-08	1,219E-08	1,135E-08	1,063E-08
Undissolved substances	kg	1,288E-08	1,288E-08	1,288E-08	1,288E-08
Sulfide	kg	1,285E-08	1,076E-08	9,443E-09	8,315E-09
Hypochlorite	kg	1,280E-08	1,166E-08	1,095E-08	1,034E-08
Hypochlorite	kg	1,232E-08	1,123E-08	1,055E-08	9,962E-09
Cesium	kg	1,213E-08	1,016E-08	8,910E-09	7,844E-09
Copper, ion	kg	1,092E-08	1,007E-08	9,537E-09	9,079E-09
Silver, ion	kg	1,090E-08	9,124E-09	8,006E-09	7,048E-09
Copper, ion	kg	1,042E-08	9,446E-09	8,835E-09	8,312E-09
Nitrate	kg	1,005E-08	1,005E-08	1,005E-08	1,005E-08
Hydrocarbons, unspecified	kg	9,676E-09	8,401E-09	7,600E-09	6,913E-09
Sulfide	kg	9,176E-09	7,824E-09	6,975E-09	6,247E-09
Bromine	kg	8,763E-09	7,914E-09	7,381E-09	6,923E-09
Manganese	kg	8,750E-09	7,648E-09	6,955E-09	6,361E-09
Chromium VI	kg	8,725E-09	7,507E-09	6,741E-09	6,084E-09
Chromium	kg	8,711E-09	8,711E-09	8,711E-09	8,711E-09
Acetic acid	kg	8,637E-09	7,676E-09	7,071E-09	6,563E-09
Molybdenum	kg	8,571E-09	7,382E-09	6,634E-09	5,993E-09
Antimony	kg	8,395E-09	8,145E-09	7,995E-09	7,865E-09
Glutaraldehyde	kg	8,197E-09	6,862E-09	6,023E-09	5,303E-09
Bromine	kg	8,057E-09	7,077E-09	6,460E-09	5,931E-09
Boron	kg	7,089E-09	6,275E-09	5,762E-09	5,323E-09
Scandium	kg	6,773E-09	5,818E-09	5,217E-09	4,702E-09
Lead	kg	6,773E-09	6,497E-09	6,323E-09	6,175E-09
Magnesium	kg	6,753E-09	5,952E-09	5,448E-09	5,016E-09
Cesium	kg	6,144E-09	5,142E-09	4,512E-09	3,972E-09
Vanadium, ion	kg	6,073E-09	5,256E-09	4,742E-09	4,301E-09
Ammonium, ion	kg	5,928E-09	5,183E-09	4,715E-09	4,314E-09
Ammonium, ion	kg	5,471E-09	5,469E-09	5,468E-09	5,467E-09
Hydroxide	kg	5,390E-09	5,373E-09	5,363E-09	5,353E-09
Barium	kg	5,091E-09	4,413E-09	3,987E-09	3,622E-09
Copper, ion	kg	5,008E-09	4,643E-09	4,414E-09	4,217E-09
Cobalt	kg	4,523E-09	3,923E-09	3,546E-09	3,223E-09
Selenium	kg	4,256E-09	3,663E-09	3,289E-09	2,969E-09
Tungsten	kg	4,237E-09	3,697E-09	3,357E-09	3,066E-09
Benzene, chloro-	kg	4,160E-09	4,148E-09	4,141E-09	4,134E-09
Arsenic, ion	kg	4,101E-09	3,436E-09	3,017E-09	2,659E-09
Beryllium	kg	4,004E-09	3,461E-09	3,121E-09	2,828E-09
Titanium, ion	kg	3,770E-09	3,770E-09	3,770E-09	3,770E-09
Vanadium, ion	kg	3,753E-09	3,141E-09	2,757E-09	2,427E-09
Propylene oxide	kg	3,747E-09	3,423E-09	3,220E-09	3,045E-09
Manganese	kg	3,706E-09	3,292E-09	3,032E-09	2,809E-09
Silver, ion	kg	3,686E-09	3,085E-09	2,707E-09	2,383E-09
Titanium, ion	kg	3,624E-09	3,149E-09	2,850E-09	2,595E-09
Formaldehyde	kg	3,562E-09	2,996E-09	2,641E-09	2,336E-09
Acidity, unspecified	kg	3,406E-09	2,874E-09	2,539E-09	2,253E-09
Cadmium, ion	kg	3,110E-09	2,635E-09	2,336E-09	2,080E-09
Nickel, ion	kg	3,061E-09	2,616E-09	2,342E-09	2,108E-09
Nitrite	kg	3,027E-09	2,814E-09	2,680E-09	2,565E-09
Methanol	kg	2,941E-09	2,932E-09	2,927E-09	2,922E-09
Chlorine	kg	2,881E-09	2,497E-09	2,256E-09	2,049E-09
Antimony	kg	2,815E-09	2,400E-09	2,139E-09	1,915E-09
Nitrogen, total	kg	2,702E-09	2,702E-09	2,702E-09	2,702E-09
Chromium, ion	kg	2,680E-09	2,313E-09	2,082E-09	1,884E-09
Barite	kg	2,657E-09	2,657E-09	2,657E-09	2,657E-09
Lithium, ion	kg	2,472E-09	2,309E-09	2,207E-09	2,119E-09
Titanium, ion	kg	2,454E-09	2,205E-09	2,048E-09	1,914E-09
Nitrite	kg	2,394E-09	2,016E-09	1,779E-09	1,576E-09
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	kg	2,345E-09	1,963E-09	1,722E-09	1,516E-09
Selenium	kg	2,334E-09	1,989E-09	1,772E-09	1,586E-09
Methanol	kg	2,126E-09	1,870E-09	1,707E-09	1,569E-09
Selenium	kg	2,115E-09	1,819E-09	1,633E-09	1,473E-09
Hydrogen sulfide	kg	2,065E-09	1,713E-09	1,492E-09	1,302E-09
Tungsten	kg	1,939E-09	1,705E-09	1,558E-09	1,432E-09
Vanadium, ion	kg	1,924E-09	1,663E-09	1,499E-09	1,359E-09
Selenium	kg	1,882E-09	1,575E-09	1,382E-09	1,217E-09
Triethylene glycol	kg	1,826E-09	1,609E-09	1,474E-09	1,356E-09
Silicon	kg	1,790E-09	1,499E-09	1,316E-09	1,159E-09
Cyanide	kg	1,754E-09	1,469E-09	1,291E-09	1,137E-09
Nitrite	kg	1,723E-09	1,480E-09	1,327E-09	1,196E-09
Cadmium, ion	kg	1,657E-09	1,392E-09	1,225E-09	1,083E-09
Cadmium, ion	kg	1,610E-09	1,396E-09	1,261E-09	1,146E-09
Hydrogen peroxide	kg	1,601E-09	1,593E-09	1,588E-09	1,584E-09
Methyl acrylate	kg	1,548E-09	1,544E-09	1,541E-09	1,539E-09
Hydrocarbons, aromatic	kg	1,521E-09	1,521E-09	1,521E-09	1,521E-09
Hydrogen	kg	1,275E-09	1,275E-09	1,275E-09	1,275E-09
Molybdenum	kg	1,256E-09	1,051E-09	9,223E-10	8,120E-10
BOD6, Biological Oxygen Demand	kg	1,179E-09	1,031E-09	9,380E-10	8,582E-10
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	1,179E-09	1,031E-09	9,380E-10	8,582E-10
Chlorine	kg	1,154E-09	1,029E-09	9,510E-10	8,840E-10
Zinc, ion	kg	1,119E-09	9,749E-10	8,840E-10	8,061E-10
Mercury	kg	1,096E-09	9,170E-10	8,044E-10	7,079E-10
Methanol	kg	1,069E-09	8,989E-10	7,922E-10	7,008E-10
Ethanol	kg	1,063E-09	1,060E-09	1,059E-09	1,057E-09
Arsenic, ion	kg	1,039E-09	1,011E-09	9,929E-10	9,776E-10
Scandium	kg	9,967E-10	8,658E-10	7,835E-10	7,129E-10
Iodide	kg	9,910E-10	8,717E-10	7,966E-10	7,323E-10
Crude oil	kg	9,810E-10	9,810E-10	9,810E-10	9,810E-10
Strontium	kg	9,543E-10	9,461E-10	9,409E-10	9,364E-10
Acetaldehyde	kg	9,108E-10	9,085E-10	9,070E-10	9,057E-10
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	8,391E-10	7,077E-10	6,251E-10	5,543E-10
Acids, unspecified	kg	8,311E-10	8,311E-10	8,311E-10	8,311E-10
Cadmium, ion	kg	7,883E-10	6,584E-10	5,767E-10	5,067E-10
Chromium, ion	kg	7,258E-10	6,292E-10	5,684E-10	5,164E-10
Phosphate	kg	7,244E-10	6,365E-10	5,813E-10	5,340E-10
Scandium	kg	6,946E-10	5,926E-10	5,284E-10	4,734E-10
Nickel, ion	kg	6,802E-10	5,933E-10	5,386E-10	4,917E-10
Tungsten	kg	6,498E-10	5,554E-10	4,960E-10	4,452E-10

Πίνακας Π.15 Συνολικές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον. Κύκλος ζωής συστήματος MCFC. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh. Παράμετρος: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης

Fluosilicic acid	kg	6,221E-10	5,656E-10	5,300E-10	4,995E-10
Hydrocarbons, chlorinated	kg	6,153E-10	6,153E-10	6,153E-10	6,153E-10
Butyl acetate	kg	6,007E-10	5,990E-10	5,979E-10	5,970E-10
Ammonia, as N	kg	5,979E-10	5,979E-10	5,979E-10	5,979E-10
Thallium	kg	4,961E-10	4,282E-10	3,855E-10	3,489E-10
Bromine	kg	4,930E-10	4,605E-10	4,401E-10	4,226E-10
Butanol	kg	4,620E-10	4,608E-10	4,600E-10	4,593E-10
Dichromate	kg	4,147E-10	3,596E-10	3,250E-10	2,954E-10
Phenols, unspecified	kg	3,894E-10	3,894E-10	3,894E-10	3,894E-10
Phenol	kg	3,661E-10	3,095E-10	2,739E-10	2,433E-10
Phosphorus	kg	3,589E-10	3,023E-10	2,667E-10	2,362E-10
Selenium	kg	3,149E-10	3,149E-10	3,149E-10	3,149E-10
Vanadium, ion	kg	3,136E-10	3,136E-10	3,136E-10	3,136E-10
Chromium VI	kg	2,790E-10	2,302E-10	1,996E-10	1,734E-10
Titanium, ion	kg	2,707E-10	2,267E-10	1,990E-10	1,752E-10
Copper, ion	kg	2,556E-10	2,216E-10	2,002E-10	1,818E-10
Arsenic, ion	kg	2,204E-10	1,940E-10	1,774E-10	1,631E-10
Benzene, 1,2-dichloro-	kg	2,014E-10	2,009E-10	2,005E-10	2,002E-10
Toluene	kg	2,000E-10	1,998E-10	1,996E-10	1,995E-10
Ethane, 1,2-dichloro-	kg	1,905E-10	1,617E-10	1,435E-10	1,280E-10
Tin, ion	kg	1,865E-10	1,703E-10	1,600E-10	1,512E-10
Acrylate, ion	kg	1,653E-10	1,648E-10	1,645E-10	1,643E-10
Mercury	kg	1,597E-10	1,366E-10	1,221E-10	1,096E-10
Molybdenum	kg	1,532E-10	1,531E-10	1,531E-10	1,531E-10
Copper, ion	kg	1,458E-10	1,458E-10	1,458E-10	1,458E-10
Molybdenum	kg	1,400E-10	1,229E-10	1,122E-10	1,029E-10
Butene	kg	1,400E-10	1,390E-10	1,385E-10	1,380E-10
Thallium	kg	1,312E-10	1,198E-10	1,125E-10	1,063E-10
Mercury	kg	1,292E-10	1,082E-10	9,495E-11	8,362E-11
Chlorinated solvents, unspecified	kg	1,146E-10	1,016E-10	9,346E-11	8,648E-11
Sulfuric acid	kg	1,116E-10	1,116E-10	1,116E-10	1,116E-10
Cobalt	kg	1,049E-10	1,049E-10	1,049E-10	1,049E-10
Mercury	kg	1,024E-10	9,234E-11	8,603E-11	8,063E-11
Solved organics	kg	9,683E-11	9,683E-11	9,683E-11	9,683E-11
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	kg	9,346E-11	9,346E-11	9,346E-11	9,346E-11
Ethylene oxide	kg	7,835E-11	7,811E-11	7,796E-11	7,783E-11
Acenaphthene	kg	7,546E-11	6,316E-11	5,542E-11	4,879E-11
Rubidium	kg	7,002E-11	6,070E-11	5,483E-11	4,981E-11
Hypochlorous acid	kg	6,393E-11	6,393E-11	6,393E-11	6,393E-11
Sulfide	kg	5,205E-11	5,205E-11	5,205E-11	5,205E-11
Formaldehyde	kg	4,934E-11	4,749E-11	4,632E-11	4,532E-11
Hydrogen sulfide	kg	4,378E-11	4,378E-11	4,378E-11	4,378E-11
Cobalt	kg	4,267E-11	3,700E-11	3,331E-11	3,014E-11
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	kg	4,105E-11	3,539E-11	3,184E-11	2,879E-11
Silver, ion	kg	3,935E-11	3,579E-11	3,355E-11	3,163E-11
Acenaphthene	kg	3,822E-11	3,198E-11	2,807E-11	2,471E-11
Boron	kg	3,408E-11	3,360E-11	3,330E-11	3,305E-11
Phosphorus	kg	2,962E-11	2,483E-11	2,181E-11	1,923E-11
Silver, ion	kg	1,414E-11	1,382E-11	1,363E-11	1,345E-11
Nickel, ion	kg	1,292E-11	1,292E-11	1,292E-11	1,292E-11
Triethylene glycol	kg	1,215E-11	1,215E-11	1,215E-11	1,215E-11
Acidity, unspecified	kg	1,059E-11	1,056E-11	1,054E-11	1,052E-11
Sulfur trioxide	kg	1,012E-11	1,012E-11	1,012E-11	1,012E-11
Lead	kg	9,515E-12	9,515E-12	9,515E-12	9,515E-12
Zinc, ion	kg	9,375E-12	9,375E-12	9,375E-12	9,375E-12
Chloroform	kg	9,236E-12	9,210E-12	9,194E-12	9,180E-12
Sodium formate	kg	8,497E-12	8,183E-12	7,985E-12	7,815E-12
Sulfur	kg	7,580E-12	7,178E-12	6,926E-12	6,710E-12
Benzene	kg	6,887E-12	6,633E-12	6,474E-12	6,337E-12
Beryllium	kg	6,161E-12	5,326E-12	4,801E-12	4,351E-12
Ethene, chloro-	kg	5,761E-12	5,171E-12	4,800E-12	4,482E-12
Beryllium	kg	5,078E-12	4,401E-12	3,975E-12	3,610E-12
Acenaphthylene	kg	4,719E-12	3,950E-12	3,466E-12	3,051E-12
Xylene	kg	4,082E-12	3,961E-12	3,885E-12	3,820E-12
Cobalt	kg	3,834E-12	3,293E-12	2,952E-12	2,661E-12
Arsenic, ion	kg	3,781E-12	3,781E-12	3,781E-12	3,781E-12
Tributyltin	kg	3,511E-12	3,511E-12	3,511E-12	3,511E-12
Chlorinated solvents, unspecified	kg	3,507E-12	3,507E-12	3,507E-12	3,507E-12
Cadmium, ion	kg	3,211E-12	3,211E-12	3,211E-12	3,211E-12
Silver, ion	kg	3,134E-12	2,717E-12	2,454E-12	2,229E-12
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	kg	3,124E-12	3,124E-12	3,124E-12	3,124E-12
Tin, ion	kg	2,988E-12	2,616E-12	2,382E-12	2,181E-12
Cadmium, ion	kg	2,813E-12	2,439E-12	2,203E-12	2,001E-12
Lead	kg	2,723E-12	2,380E-12	2,163E-12	1,978E-12
Acenaphthylene	kg	2,390E-12	2,000E-12	1,755E-12	1,545E-12
Antimony	kg	2,087E-12	2,085E-12	2,084E-12	2,083E-12
Silver	kg	2,081E-12	2,081E-12	2,081E-12	2,081E-12
Iodide	kg	1,446E-12	1,446E-12	1,446E-12	1,446E-12
Butyrolactone	kg	1,040E-12	1,037E-12	1,036E-12	1,034E-12
1,4-Butanediol	kg	5,992E-13	5,975E-13	5,964E-13	5,955E-13
Tin, ion	kg	5,479E-13	5,312E-13	5,207E-13	5,118E-13
Benzene, ethyl-	kg	5,454E-13	5,311E-13	5,221E-13	5,144E-13
Methyl amine	kg	3,750E-13	3,739E-13	3,733E-13	3,727E-13
Glutaraldehyde	kg	3,283E-13	3,283E-13	3,283E-13	3,283E-13
Acenaphthylene	kg	2,885E-13	2,885E-13	2,885E-13	2,885E-13
Hydrocarbons, aliphatic, alkenes, unspecified	kg	2,725E-13	2,725E-13	2,725E-13	2,725E-13
Phosphorus compounds, unspecified	kg	2,462E-13	2,462E-13	2,462E-13	2,462E-13
t-Butyl methyl ether	kg	2,393E-13	2,073E-13	1,872E-13	1,700E-13
Thallium	kg	1,496E-13	1,316E-13	1,203E-13	1,106E-13
Methyl formate	kg	1,225E-13	1,222E-13	1,220E-13	1,218E-13
Ethyl acetate	kg	1,193E-13	1,191E-13	1,190E-13	1,189E-13
Mercury	kg	8,230E-14	8,230E-14	8,230E-14	8,230E-14
m-Xylene	kg	6,967E-14	6,509E-14	6,220E-14	5,973E-14
Ethylene diamine	kg	5,703E-14	5,244E-14	4,955E-14	4,707E-14
Paraffins	kg	5,319E-14	4,568E-14	4,096E-14	3,691E-14
o-Xylene	kg	5,075E-14	4,741E-14	4,531E-14	4,351E-14
Mercury	kg	4,085E-14	3,487E-14	3,111E-14	2,789E-14
Ethane, dichloro-	kg	3,496E-14	3,496E-14	3,496E-14	3,496E-14
Iodide	kg	3,122E-14	2,686E-14	2,411E-14	2,176E-14
Acetone	kg	2,298E-14	2,147E-14	2,052E-14	1,970E-14
Cesium	kg	1,186E-14	1,186E-14	1,186E-14	1,186E-14
Beryllium	kg	1,153E-14	1,001E-14	9,058E-15	8,240E-15
4-Methyl-2-pentanone	kg	9,642E-15	9,008E-15	8,609E-15	8,266E-15
Ethene, trichloro-	kg	6,140E-15	6,140E-15	6,140E-15	6,140E-15
Phosphorus, total	kg	5,557E-15	5,557E-15	5,557E-15	5,557E-15
Thallium	kg	5,466E-15	5,107E-15	4,880E-15	4,686E-15
Phthalate, p-dimethyl-	kg	1,855E-16	1,855E-16	1,855E-16	1,855E-16
Chlorinated solvents, unspecified	kg	3,963E-17	3,805E-17	3,705E-17	3,620E-17
Phthalate, p-dibutyl-	kg	2,879E-17	2,879E-17	2,879E-17	2,879E-17
Ethane, hexachloro-	kg	-7,170E-19	-7,170E-19	-7,170E-19	-7,170E-19
Benzene, chloro-	kg	-1,157E-18	-1,157E-18	-1,157E-18	-1,157E-18
Phthalate, dioctyl-	kg	-5,575E-18	-5,575E-18	-5,575E-18	-5,575E-18
Ethene, chloro-	kg	-2,436E-17	-2,436E-17	-2,436E-17	-2,436E-17
Ethene, tetrachloro-	kg	-8,792E-17	-8,792E-17	-8,792E-17	-8,792E-17
Methane, tetrachloro-, CFC-10	kg	-1,246E-16	-1,246E-16	-1,246E-16	-1,246E-16
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	kg	-3,567E-16	-3,567E-16	-3,567E-16	-3,567E-16
t-Butyl methyl ether	kg	-2,010E-15	-2,010E-15	-2,010E-15	-2,010E-15
Methane, dichloro-, HCC-30	kg	-1,362E-14	-1,362E-14	-1,362E-14	-1,362E-14
Chloroform	kg	-1,923E-14	-1,923E-14	-1,923E-14	-1,923E-14
Ruthenium	kg	-3,598E-13	-3,598E-13	-3,598E-13	-3,598E-13

Tungsten	kg	-5,818E-13	-5,818E-13	-5,818E-13	-5,818E-13
Nitrogen, organic bound	kg	-1,454E-12	-1,454E-12	-1,454E-12	-1,454E-12
Silicon	kg	-5,595E-12	-5,595E-12	-5,595E-12	-5,595E-12
Nitrite	kg	-6,088E-12	-6,088E-12	-6,088E-12	-6,088E-12
VOC, volatile organic compounds as C	kg	-1,199E-11	-1,199E-11	-1,199E-11	-1,199E-11
Hypochlorite	kg	-1,552E-11	-1,552E-11	-1,552E-11	-1,552E-11
Fatty acids as C	kg	-1,753E-10	-1,753E-10	-1,753E-10	-1,753E-10
Salts, unspecified	kg	-9,883E-09	-9,883E-09	-9,883E-09	-9,883E-09
Hydrogen-3, Tritium	Bq	2,644E+02	2,271E+02	2,036E+02	1,835E+02
Hydrogen-3, Tritium	Bq	2,903E+01	2,505E+01	2,254E+01	2,039E+01
Radioactive species, unspecified	Bq	1,178E+01	1,178E+01	1,178E+01	1,178E+01
Thorium-228	Bq	2,426E+00	2,031E+00	1,782E+00	1,569E+00
Radium-226	Bq	2,099E+00	1,790E+00	1,596E+00	1,430E+00
Strontium-90	Bq	1,424E+00	1,291E+00	1,207E+00	1,135E+00
Thorium-228	Bq	1,229E+00	1,029E+00	9,025E-01	7,945E-01
Radium-228	Bq	1,213E+00	1,015E+00	8,910E-01	7,844E-01
Radioactive species, Nuclides, unspecified	Bq	6,640E-01	5,703E-01	5,113E-01	4,608E-01
Radium-228	Bq	6,144E-01	5,142E-01	4,512E-01	3,972E-01
Radium-224	Bq	6,066E-01	5,077E-01	4,455E-01	3,922E-01
Radium-226	Bq	5,020E-01	4,202E-01	3,688E-01	3,247E-01
Radium-224	Bq	3,072E-01	2,571E-01	2,256E-01	1,986E-01
Thorium-230	Bq	2,472E-01	2,143E-01	1,936E-01	1,758E-01
Cesium-137	Bq	1,273E-01	1,093E-01	9,801E-02	8,832E-02
Uranium alpha	Bq	1,044E-01	9,047E-02	8,173E-02	7,424E-02
Polonium-210	Bq	1,421E-02	1,198E-02	1,058E-02	9,374E-03
Strontium-90	Bq	1,415E-02	1,215E-02	1,090E-02	9,820E-03
Lead-210	Bq	9,310E-03	7,849E-03	6,930E-03	6,143E-03
Uranium-238	Bq	6,509E-03	5,670E-03	5,142E-03	4,690E-03
Uranium-238	Bq	4,776E-03	4,027E-03	3,556E-03	3,152E-03
Uranium-235	Bq	3,587E-03	3,109E-03	2,809E-03	2,551E-03
Potassium-40	Bq	2,661E-03	2,379E-03	2,201E-03	2,049E-03
Uranium-234	Bq	2,174E-03	1,885E-03	1,702E-03	1,546E-03
Lead-210	Bq	2,120E-03	1,895E-03	1,753E-03	1,632E-03
Polonium-210	Bq	2,120E-03	1,895E-03	1,753E-03	1,632E-03
Radioactive species, Nuclides, unspecified	Bq	1,982E-03	1,694E-03	1,512E-03	1,357E-03
Thorium-234	Bq	1,812E-03	1,571E-03	1,419E-03	1,289E-03
Protactinium-234	Bq	1,812E-03	1,570E-03	1,419E-03	1,289E-03
Cobalt-58	Bq	1,499E-03	1,301E-03	1,176E-03	1,069E-03
Cobalt-60	Bq	1,201E-03	1,047E-03	9,492E-04	8,658E-04
Potassium-40	Bq	1,125E-03	9,487E-04	8,376E-04	7,425E-04
Silver-110	Bq	1,119E-03	9,748E-04	8,841E-04	8,064E-04
Actinides, radioactive, unspecified	Bq	1,111E-03	9,538E-04	8,553E-04	7,708E-04
Cesium-137	Bq	5,286E-04	4,601E-04	4,170E-04	3,801E-04
Thorium-232	Bq	4,961E-04	4,435E-04	4,104E-04	3,820E-04
Chromium-51	Bq	2,164E-04	1,903E-04	1,740E-04	1,599E-04
Antimony-124	Bq	1,807E-04	1,553E-04	1,394E-04	1,257E-04
Antimony-125	Bq	1,603E-04	1,373E-04	1,228E-04	1,103E-04
Cesium-134	Bq	1,440E-04	1,226E-04	1,091E-04	9,767E-05
Manganese-54	Bq	9,191E-05	7,971E-05	7,203E-05	6,545E-05
Zinc-65	Bq	7,207E-05	6,455E-05	5,983E-05	5,577E-05
Iodine-131	Bq	3,476E-05	3,020E-05	2,732E-05	2,484E-05
Radioactive species, alpha emitters	Bq	2,792E-05	2,355E-05	2,081E-05	1,845E-05
Strontium-89	Bq	2,054E-05	1,799E-05	1,639E-05	1,502E-05
Tellurium-123m	Bq	1,865E-05	1,588E-05	1,414E-05	1,265E-05
Technetium-99m	Bq	1,631E-05	1,461E-05	1,354E-05	1,262E-05
Niobium-95	Bq	1,342E-05	1,150E-05	1,030E-05	9,267E-06
Polonium-210	Bq	1,200E-05	1,012E-05	8,932E-06	7,917E-06
Radium-226	Bq	8,844E-06	7,457E-06	6,584E-06	5,836E-06
Lead-210	Bq	7,884E-06	6,647E-06	5,869E-06	5,202E-06
Sodium-24	Bq	5,316E-06	4,761E-06	4,413E-06	4,114E-06
Cobalt-57	Bq	4,310E-06	3,860E-06	3,577E-06	3,335E-06
Uranium-238	Bq	4,045E-06	3,410E-06	3,011E-06	2,669E-06
Lanthanum-140	Bq	2,038E-06	1,825E-06	1,692E-06	1,577E-06
Barium-140	Bq	1,913E-06	1,714E-06	1,588E-06	1,481E-06
Lead-210	Bq	1,415E-06	1,371E-06	1,343E-06	1,320E-06
Iodine-133	Bq	1,201E-06	1,076E-06	9,970E-07	9,295E-07
Potassium-40	Bq	9,530E-07	8,035E-07	7,094E-07	6,288E-07
Potassium-40	Bq	9,407E-07	9,407E-07	9,407E-07	9,407E-07
Radium-228	Bq	9,145E-07	6,325E-07	4,552E-07	3,031E-07
Zirconium-95	Bq	8,346E-07	7,475E-07	6,928E-07	6,459E-07
Cerium-141	Bq	7,650E-07	6,852E-07	6,350E-07	5,920E-07
Polonium-210	Bq	7,492E-07	7,492E-07	7,492E-07	7,492E-07
Molybdenum-99	Bq	7,026E-07	6,293E-07	5,832E-07	5,437E-07
Antimony-122	Bq	4,368E-07	3,912E-07	3,626E-07	3,380E-07
Iron-59	Bq	3,302E-07	2,958E-07	2,741E-07	2,555E-07
Cerium-144	Bq	2,329E-07	2,086E-07	1,933E-07	1,802E-07
Thorium-232	Bq	1,751E-07	1,751E-07	1,751E-07	1,751E-07
Ruthenium-103	Bq	1,483E-07	1,328E-07	1,231E-07	1,147E-07
Cesium-136	Bq	1,358E-07	1,216E-07	1,127E-07	1,051E-07
Thorium-228	Bq	9,667E-08	8,150E-08	7,196E-08	6,379E-08
Tellurium-132	Bq	4,068E-08	3,644E-08	3,377E-08	3,148E-08
Thorium-232	Bq	-5,246E-25	-5,198E-25	-5,167E-25	-5,141E-25
Cesium-136	Bq	-5,315E-12	-5,315E-12	-5,315E-12	-5,315E-12
Cadmium-109	Bq	-5,722E-12	-5,722E-12	-5,722E-12	-5,722E-12
Tellurium-132	Bq	-1,715E-11	-1,715E-11	-1,715E-11	-1,715E-11
Iron-59	Bq	-1,755E-11	-1,755E-11	-1,755E-11	-1,755E-11
Tellurium-123m	Bq	-4,176E-11	-4,176E-11	-4,176E-11	-4,176E-11
Radioactive species, alpha emitters	Bq	-5,788E-11	-5,788E-11	-5,788E-11	-5,788E-11
Molybdenum-99	Bq	-6,305E-11	-6,305E-11	-6,305E-11	-6,305E-11
Yttrium-90	Bq	-1,040E-10	-1,040E-10	-1,040E-10	-1,040E-10
Cerium-141	Bq	-1,481E-10	-1,481E-10	-1,481E-10	-1,481E-10
Lanthanum-140	Bq	-2,050E-10	-2,050E-10	-2,050E-10	-2,050E-10
Ruthenium-103	Bq	-3,315E-10	-3,315E-10	-3,315E-10	-3,315E-10
Radioactive species, Nuclides, unspecified	Bq	-3,797E-10	-3,797E-10	-3,797E-10	-3,797E-10
Technetium-99m	Bq	-4,366E-10	-4,366E-10	-4,366E-10	-4,366E-10
Niobium-95	Bq	-5,824E-10	-5,824E-10	-5,824E-10	-5,824E-10
Antimony-122	Bq	-9,925E-10	-9,925E-10	-9,925E-10	-9,925E-10
Barium-140	Bq	-9,925E-10	-9,925E-10	-9,925E-10	-9,925E-10
Cobalt-57	Bq	-1,013E-09	-1,013E-09	-1,013E-09	-1,013E-09
Strontium-89	Bq	-2,202E-09	-2,202E-09	-2,202E-09	-2,202E-09
Iodine-133	Bq	-4,517E-09	-4,517E-09	-4,517E-09	-4,517E-09
Antimony-125	Bq	-8,002E-09	-8,002E-09	-8,002E-09	-8,002E-09
Neptunium-237	Bq	-1,108E-08	-1,108E-08	-1,108E-08	-1,108E-08
Iodine-131	Bq	-1,668E-08	-1,668E-08	-1,668E-08	-1,668E-08
Chromium-51	Bq	-1,998E-08	-1,998E-08	-1,998E-08	-1,998E-08
Sodium-24	Bq	-3,054E-08	-3,054E-08	-3,054E-08	-3,054E-08
Zinc-65	Bq	-5,844E-08	-5,844E-08	-5,844E-08	-5,844E-08
Antimony-124	Bq	-1,237E-07	-1,237E-07	-1,237E-07	-1,237E-07
Americium-241	Bq	-1,727E-07	-1,727E-07	-1,727E-07	-1,727E-07
Curium alpha	Bq	-2,284E-07	-2,284E-07	-2,284E-07	-2,284E-07
Zirconium-95	Bq	-3,548E-07	-3,548E-07	-3,548E-07	-3,548E-07
Silver-110	Bq	-4,712E-07	-4,712E-07	-4,712E-07	-4,712E-07
Radioactive species, from fission and activation	Bq	-5,665E-07	-5,665E-07	-5,665E-07	-5,665E-07
Plutonium-alpha	Bq	-6,833E-07	-6,833E-07	-6,833E-07	-6,833E-07
Protactinium-234	Bq	-7,683E-07	-7,683E-07	-7,683E-07	-7,683E-07
Thorium-234	Bq	-7,760E-07	-7,760E-07	-7,760E-07	-7,760E-07
Cobalt-58	Bq	-7,833E-07	-7,833E-07	-7,833E-07	-7,833E-07
Uranium-234	Bq	-1,034E-06	-1,034E-06	-1,034E-06	-1,034E-06
Uranium-235	Bq	-1,535E-06	-1,535E-06	-1,535E-06	-1,535E-06
Radium-224	Bq	-1,730E-06	-1,730E-06	-1,730E-06	-1,730E-06
Uranium-238	Bq	-1,996E-06	-1,996E-06	-1,996E-06	-1,996E-06
Cerium-144	Bq	-3,953E-06	-3,953E-06	-3,953E-06	-3,953E-06
Technetium-99	Bq	-4,377E-06	-4,377E-06	-4,377E-06	-4,377E-06
Manganese-54	Bq	-5,866E-06	-5,866E-06	-5,866E-06	-5,866E-06
Thorium-228	Bq	-6,864E-06	-6,864E-06	-6,864E-06	-6,864E-06
Strontium-90	Bq	-8,304E-06	-8,304E-06	-8,304E-06	-8,304E-06
Carbon-14	Bq	-8,737E-06	-8,737E-06	-8,737E-06	-8,737E-06
Cesium-134	Bq	-8,836E-06	-8,836E-06	-8,836E-06	-8,836E-06
Plutonium-241	Bq	-1,704E-05	-1,704E-05	-1,704E-05	-1,704E-05
Iodine-129	Bq	-2,500E-05	-2,500E-05	-2,500E-05	-2,500E-05
Cobalt-60	Bq	-3,829E-05	-3,829E-05	-3,829E-05	-3,829E-05
Ruthenium-106	Bq	-4,170E-05	-4,170E-05	-4,170E-05	-4,170E-05
Uranium alpha	Bq	-5,047E-05	-5,047E-05	-5,047E-05	-5,047E-05
Cesium-137	Bq	-8,101E-05	-8,101E-05	-8,101E-05	-8,101E-05
Thorium-230	Bq	-1,206E-04	-1,206E-04	-1,206E-04	-1,206E-04
Radium-226	Bq	-3,178E-03	-3,178E-03	-3,178E-03	-3,178E-03
Hydrogen-3, Tritium	Bq	-2,592E-01	-2,592E-01	-2,592E-01	-2,592E-01
Waste water/m3	m3	6,115E-06	6,115E-06	6,115E-06	6,115E-06

Πίνακας Π.16 Συνολικές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον. Κύκλος ζωής συστήματος MCFC. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh. Παράμετρος: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης

Substance	Unit	Total
Heat, waste	MJ	1,819E-01
Chloride	kg	8,292E-03
Sodium, ion	kg	4,255E-03
COD, Chemical Oxygen Demand	kg	3,066E-03
BOD5, Biological Oxygen Demand	kg	3,017E-03
Oils, unspecified	kg	9,490E-04
TOC, Total Organic Carbon	kg	9,256E-04
DOC, Dissolved Organic Carbon	kg	9,241E-04
Calcium, ion	kg	4,966E-04
Suspended solids, unspecified	kg	1,942E-04
Silicon	kg	1,800E-04
Sulfate	kg	1,534E-04
Magnesium	kg	8,356E-05
Potassium, ion	kg	6,456E-05
Carboxylic acids, unspecified	kg	6,031E-05
Barite	kg	5,049E-05
Strontium	kg	2,552E-05
Aluminum	kg	2,448E-05
Solids, inorganic	kg	2,402E-05
Iron, ion	kg	2,372E-05
Barium	kg	1,247E-05
Bromine	kg	9,764E-06
Hydrocarbons, aromatic	kg	7,422E-06
VOC, volatile organic compounds, unspecified origin	kg	4,872E-06
Zinc, ion	kg	3,636E-06
Sulfur	kg	2,545E-06
Phosphate	kg	2,003E-06
Hydrocarbons, aliphatic, alkanes, unspecified	kg	1,808E-06
Toluene	kg	1,765E-06
Nitrate	kg	1,718E-06
Fluoride	kg	1,639E-06
Xylene	kg	1,426E-06
Solved solids	kg	1,401E-06
Iodide	kg	1,392E-06
Phenol	kg	1,333E-06
Ammonium, ion	kg	1,109E-06
Benzene	kg	9,932E-07
Nitrogen, organic bound	kg	9,787E-07
Hydrocarbons, unspecified	kg	9,698E-07
Titanium, ion	kg	8,562E-07
Manganese	kg	8,514E-07
Nitrogen	kg	7,728E-07
Boron	kg	4,655E-07
Nickel, ion	kg	4,227E-07
Solved substances, inorganic	kg	3,729E-07
Chromium VI	kg	3,452E-07
Benzene, ethyl-	kg	3,339E-07
Hydrocarbons, aliphatic, unsaturated	kg	1,669E-07
Methane, dichloro-, HCC-30	kg	1,637E-07
Rubidium	kg	1,391E-07
Vanadium, ion	kg	1,297E-07
Lead	kg	9,935E-08
Copper, ion	kg	9,910E-08
Chlorate	kg	9,035E-08
Iron	kg	8,780E-08
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	kg	8,127E-08
Cobalt	kg	7,443E-08
Phosphorus	kg	7,037E-08
Cumene	kg	5,223E-08
Hydrogen sulfide	kg	5,150E-08
Chromium, ion	kg	3,894E-08
Suspended substances, unspecified	kg	3,380E-08
Cyanide	kg	3,264E-08
Arsenic, ion	kg	3,036E-08
t-Butyl methyl ether	kg	3,029E-08
Sulfite	kg	2,848E-08
Ethene	kg	2,098E-08
Propene	kg	2,062E-08
Molybdenum	kg	1,984E-08
Carbonate	kg	1,901E-08
Sulfide	kg	1,609E-08
Cesium	kg	1,391E-08
Tributyltin compounds	kg	1,343E-08
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	kg	1,133E-08
Silver, ion	kg	1,112E-08
Hypochlorite	kg	1,049E-08
Bromate	kg	1,043E-08
Antimony	kg	8,440E-09
Tin, ion	kg	8,195E-09
Selenium	kg	7,263E-09
Glutaraldehyde	kg	6,233E-09
Metallic ions, unspecified	kg	5,700E-09
Scandium	kg	5,625E-09
Cadmium, ion	kg	5,094E-09
Acetic acid	kg	4,509E-09
Tungsten	kg	4,104E-09
Nitrite	kg	3,926E-09
Formaldehyde	kg	2,761E-09
Beryllium	kg	2,569E-09
Acidity, unspecified	kg	2,487E-09
Chlorine	kg	2,399E-09
Methanol	kg	2,139E-09
Propylene oxide	kg	1,521E-09
Mercury	kg	1,095E-09
Chromium	kg	1,050E-09
Triethylene glycol	kg	1,049E-09
Lithium, ion	kg	8,028E-10
Thallium	kg	3,759E-10
Fluosilicic acid	kg	3,336E-10
Nitrogen, total	kg	3,203E-10
Dichromate	kg	2,598E-10
Undissolved substances	kg	1,584E-10
Ethane, 1,2-dichloro-	kg	1,353E-10
Hydroxide	kg	1,112E-10
Acenaphthene	kg	8,652E-11
Benzene, chloro-	kg	7,884E-11
Hydrocarbons, chlorinated	kg	7,625E-11
Chlorinated solvents, unspecified	kg	6,249E-11
Salts, unspecified	kg	6,030E-11
Kjeldahl-N	kg	5,169E-11
Hydrogen peroxide	kg	4,657E-11
Methyl acrylate	kg	2,931E-11
Phenols, unspecified	kg	2,736E-11
Ethanol	kg	2,014E-11
Acetaldehyde	kg	1,596E-11
Butyl acetate	kg	1,138E-11
Solved substances	kg	9,891E-12
Potassium	kg	9,193E-12
Butanol	kg	8,752E-12
Acenaphthylene	kg	5,452E-12
Butene	kg	5,046E-12
Ethene, chloro-	kg	3,997E-12
Benzene, 1,2-dichloro-	kg	3,818E-12
Acrylate, ion	kg	3,130E-12
Fatty acids as C	kg	2,316E-12
Ethylene oxide	kg	1,839E-12
Sodium formate	kg	1,737E-12
Ammonia, as N	kg	6,986E-13
Hypochlorous acid	kg	1,884E-13
Chloroform	kg	1,754E-13
Paraffins	kg	1,459E-13
VOC, volatile organic compounds as C	kg	1,283E-13
Ethylene diamine	kg	2,413E-14
m-Xylene	kg	2,262E-14
Sulfur trioxide	kg	2,012E-14
Butyrolactone	kg	1,972E-14
o-Xylene	kg	1,648E-14
1,4-Butanediol	kg	1,136E-14
Acids, unspecified	kg	7,983E-15
Acetone	kg	7,463E-15
Methyl amine	kg	7,107E-15
Hydrocarbons, aliphatic, alkenes, unspecified	kg	6,462E-15
Ruthenium	kg	3,697E-15
4-Methyl-2-pentanone	kg	3,131E-15
Methyl formate	kg	2,320E-15
Ethyl acetate	kg	1,364E-15
Phosphorus compounds, unspecified	kg	1,322E-15
Tributyltin	kg	9,185E-16
Ethane, dichloro-	kg	5,795E-16
Silver	kg	2,952E-16
Ethene, trichloro-	kg	9,640E-17
Phthalate, p-dimethyl-	kg	2,604E-17
Phthalate, p-dibutyl-	kg	4,136E-18
Methane, tetrachloro-, CFC-10	kg	2,330E-18
Ethene, tetrachloro-	kg	1,526E-18
Ethane, 1,1,1-trichloro-, HCFC-140	kg	2,338E-19
Phthalate, dioctyl-	kg	5,296E-20
Ethane, hexachloro-	kg	1,285E-20
Hydrogen-3, Tritium	Bq	1,950E+02
Thorium-228	Bq	2,782E+00
Radium-226	Bq	1,830E+00
Radioactive species, unspecified	Bq	1,451E+00
Radium-228	Bq	1,391E+00
Radium-224	Bq	6,955E-01
Strontium-90	Bq	6,389E-01
Radioactive species, Nuclides, unspecified	Bq	4,438E-01
Thorium-230	Bq	1,555E-01
Cesium-137	Bq	8,512E-02
Uranium alpha	Bq	6,564E-02
Polonium-210	Bq	1,150E-02
Lead-210	Bq	7,902E-03
Uranium-238	Bq	7,470E-03
Uranium-235	Bq	2,266E-03
Potassium-40	Bq	2,161E-03
Uranium-234	Bq	1,367E-03
Thorium-234	Bq	1,140E-03
Protactinium-234	Bq	1,139E-03
Cobalt-58	Bq	9,375E-04
Actinides, radioactive, unspecified	Bq	7,400E-04
Cobalt-60	Bq	7,314E-04
Silver-110	Bq	6,814E-04
Thorium-232	Bq	2,488E-04
Chromium-51	Bq	1,230E-04
Antimony-124	Bq	1,198E-04
Antimony-125	Bq	1,090E-04
Cesium-134	Bq	1,011E-04
Manganese-54	Bq	5,770E-05
Zinc-65	Bq	3,557E-05
Iodine-131	Bq	2,166E-05
Radioactive species, alpha emitters	Bq	2,044E-05
Tellurium-123m	Bq	1,306E-05
Strontium-89	Bq	1,205E-05
Niobium-95	Bq	9,041E-06
Technetium-99m	Bq	8,040E-06
Sodium-24	Bq	2,624E-06
Cobalt-57	Bq	2,127E-06
Lanthanum-140	Bq	1,006E-06
Barium-140	Bq	9,443E-07
Iodine-133	Bq	5,929E-07
Zirconium-95	Bq	4,144E-07
Cerium-141	Bq	3,776E-07
Molybdenum-99	Bq	3,468E-07
Ruthenium-106	Bq	2,841E-07
Antimony-122	Bq	2,156E-07
Iodine-129	Bq	1,704E-07
Iron-59	Bq	1,630E-07
Cerium-144	Bq	1,419E-07
Plutonium-241	Bq	1,165E-07
Ruthenium-103	Bq	7,318E-08
Cesium-136	Bq	6,701E-08
Carbon-14	Bq	5,965E-08
Technetium-99	Bq	2,983E-08
Tellurium-132	Bq	2,008E-08
Plutonium-alpha	Bq	4,687E-09
Radioactive species, from fission and activation	Bq	3,523E-09
Curium alpha	Bq	1,562E-09
Americium-241	Bq	1,179E-09
Neptunium-237	Bq	7,528E-11
Yttrium-90	Bq	7,208E-13
Cadmium-109	Bq	3,608E-14
Waste water/m3	m3	7,579E-07

Πίνακας Π.17 Συνολικές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον. Κύκλος ζωής συστήματος DE. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh.

Substance	Unit	MCFC system efficiency			
		32,70%	39,10%	44,60%	50,70%
Oils, unspecified	kg	1,312E-03	1,098E-03	9,633E-04	8,480E-04
Calcium	kg	3,401E-05	2,847E-05	2,498E-05	2,200E-05
Chloride	kg	2,976E-05	2,491E-05	2,186E-05	1,925E-05
Carbon	kg	2,550E-05	2,135E-05	1,874E-05	1,650E-05
Sodium	kg	1,700E-05	1,423E-05	1,249E-05	1,100E-05
Iron	kg	1,700E-05	1,423E-05	1,249E-05	1,100E-05
Aluminum	kg	8,502E-06	7,117E-06	6,246E-06	5,500E-06
Magnesium	kg	6,801E-06	5,694E-06	4,997E-06	4,400E-06
Oils, unspecified	kg	5,962E-06	4,990E-06	4,379E-06	3,855E-06
Sulfur	kg	5,101E-06	4,270E-06	3,748E-06	3,300E-06
Barium	kg	4,251E-06	3,558E-06	3,123E-06	2,750E-06
Potassium	kg	2,976E-06	2,491E-06	2,186E-06	1,925E-06
Chloride	kg	2,780E-06	2,362E-06	2,099E-06	1,874E-06
Iron	kg	1,343E-06	1,133E-06	1,001E-06	8,870E-07
Silicon	kg	8,502E-07	7,117E-07	6,246E-07	5,500E-07
Phosphorus	kg	4,251E-07	3,559E-07	3,123E-07	2,750E-07
Fluoride	kg	4,251E-07	3,558E-07	3,123E-07	2,750E-07
Manganese	kg	3,401E-07	2,847E-07	2,498E-07	2,200E-07
Calcium	kg	2,675E-07	2,323E-07	2,102E-07	1,912E-07
Zinc	kg	1,275E-07	1,068E-07	9,369E-08	8,250E-08
Sodium	kg	9,118E-08	9,042E-08	8,994E-08	8,953E-08
Boron	kg	8,502E-08	7,117E-08	6,246E-08	5,500E-08
Strontium	kg	8,502E-08	7,117E-08	6,246E-08	5,500E-08
Silicon	kg	7,412E-08	6,463E-08	5,867E-08	5,355E-08
Carbon	kg	6,960E-08	5,955E-08	5,322E-08	4,780E-08
Iron	kg	5,263E-08	4,601E-08	4,184E-08	3,827E-08
Potassium	kg	4,684E-08	4,078E-08	3,696E-08	3,369E-08
Chromium	kg	4,251E-08	3,558E-08	3,123E-08	2,750E-08
Oils, unspecified	kg	3,282E-08	2,768E-08	2,445E-08	2,168E-08
Magnesium	kg	2,924E-08	2,542E-08	2,302E-08	2,097E-08
Aluminum	kg	2,183E-08	1,897E-08	1,717E-08	1,563E-08
Manganese	kg	1,753E-08	1,525E-08	1,382E-08	1,259E-08
Chromium VI	kg	1,590E-08	1,379E-08	1,246E-08	1,132E-08
Fluoride	kg	1,076E-08	9,329E-09	8,431E-09	7,661E-09
Copper	kg	1,009E-08	8,748E-09	7,902E-09	7,178E-09
Sulfur	kg	9,203E-09	8,037E-09	7,304E-09	6,675E-09
Phosphorus	kg	8,423E-09	7,332E-09	6,646E-09	6,058E-09
Oils, biogenic	kg	7,476E-09	6,299E-09	5,559E-09	4,925E-09
Zinc	kg	7,084E-09	5,965E-09	5,261E-09	4,658E-09
Oils, biogenic	kg	5,488E-09	4,841E-09	4,434E-09	4,086E-09
Arsenic	kg	3,401E-09	2,847E-09	2,498E-09	2,200E-09
Zinc	kg	2,839E-09	2,438E-09	2,186E-09	1,970E-09
Boron	kg	2,814E-09	2,441E-09	2,206E-09	2,004E-09
Chloride	kg	2,750E-09	2,394E-09	2,170E-09	1,978E-09
Titanium	kg	1,186E-09	1,032E-09	9,359E-10	8,531E-10
Glyphosate	kg	6,946E-10	5,852E-10	5,164E-10	4,575E-10
Strontium	kg	5,616E-10	4,700E-10	4,124E-10	3,631E-10
Copper	kg	5,378E-10	5,123E-10	4,963E-10	4,826E-10
Glyphosate	kg	4,903E-10	4,111E-10	3,613E-10	3,186E-10
Metolachlor	kg	4,132E-10	3,582E-10	3,236E-10	2,939E-10
Nickel	kg	2,492E-10	2,402E-10	2,345E-10	2,296E-10
Copper	kg	2,336E-10	1,959E-10	1,721E-10	1,518E-10
Chromium	kg	2,241E-10	1,975E-10	1,808E-10	1,665E-10
Carbofuran	kg	2,154E-10	1,804E-10	1,585E-10	1,396E-10
Barium	kg	1,571E-10	1,321E-10	1,164E-10	1,029E-10
Lead	kg	1,239E-10	1,132E-10	1,065E-10	1,007E-10
Mancozeb	kg	1,169E-10	1,110E-10	1,073E-10	1,041E-10
Lead	kg	1,032E-10	8,692E-11	7,667E-11	6,787E-11
Chlorothalonil	kg	9,001E-11	8,548E-11	8,262E-11	8,017E-11
2,4-D	kg	6,174E-11	5,174E-11	4,546E-11	4,007E-11
Linuron	kg	5,748E-11	4,988E-11	4,510E-11	4,100E-11
Boron	kg	4,319E-11	3,621E-11	3,181E-11	2,805E-11
Cadmium	kg	3,882E-11	3,689E-11	3,567E-11	3,463E-11
Vanadium	kg	3,395E-11	2,955E-11	2,679E-11	2,442E-11
Nickel	kg	3,242E-11	2,729E-11	2,407E-11	2,131E-11
Cypermethrin	kg	3,044E-11	2,551E-11	2,240E-11	1,974E-11
Orbencarb	kg	2,223E-11	2,111E-11	2,040E-11	1,980E-11
Arsenic	kg	1,696E-11	1,617E-11	1,567E-11	1,524E-11
Cobalt	kg	1,614E-11	1,406E-11	1,276E-11	1,164E-11
Chromium	kg	1,196E-11	1,007E-11	8,885E-12	7,866E-12
Aclonifen	kg	7,410E-12	6,423E-12	5,803E-12	5,271E-12
Metribuzin	kg	4,116E-12	3,909E-12	3,778E-12	3,666E-12
Fenpiclonil	kg	3,798E-12	3,586E-12	3,452E-12	3,337E-12
Bentazone	kg	3,782E-12	3,278E-12	2,962E-12	2,690E-12
Molybdenum	kg	3,577E-12	3,122E-12	2,835E-12	2,590E-12
Cadmium	kg	2,508E-12	2,112E-12	1,863E-12	1,649E-12
Tin	kg	2,073E-12	1,889E-12	1,773E-12	1,673E-12
Aldrin	kg	1,797E-12	1,792E-12	1,789E-12	1,786E-12
Carbetamide	kg	1,430E-12	1,247E-12	1,132E-12	1,033E-12
Tebutam	kg	1,225E-12	1,076E-12	9,822E-13	9,019E-13
Nitrogen	kg	1,204E-12	1,204E-12	1,204E-12	1,204E-12
Thiram	kg	6,969E-13	5,839E-13	5,128E-13	4,519E-13
Napropamide	kg	5,171E-13	4,541E-13	4,145E-13	3,806E-13
Atrazine	kg	4,714E-13	4,700E-13	4,692E-13	4,685E-13
Benomyl	kg	3,928E-13	3,291E-13	2,891E-13	2,547E-13
Pirimicarb	kg	3,577E-13	3,101E-13	2,801E-13	2,545E-13
Metaldehyde	kg	2,922E-13	2,567E-13	2,343E-13	2,151E-13
Teflubenzuron	kg	2,744E-13	2,606E-13	2,519E-13	2,444E-13
Mercury	kg	2,728E-13	2,413E-13	2,216E-13	2,046E-13
Antimony	kg	2,110E-13	2,098E-13	2,090E-13	2,083E-13
Sulfuric acid	kg	9,055E-14	9,030E-14	9,014E-14	9,001E-14
Cadmium	kg	8,913E-15	8,913E-15	8,913E-15	8,913E-15
Mercury	kg	1,050E-15	1,050E-15	1,050E-15	1,050E-15
Cobalt	kg	-8,962E-16	-8,962E-16	-8,962E-16	-8,962E-16
Nickel	kg	-6,872E-15	-6,872E-15	-6,872E-15	-6,872E-15
Lead	kg	-1,782E-14	-1,782E-14	-1,782E-14	-1,782E-14
Aluminum	kg	-2,327E-11	-2,327E-11	-2,327E-11	-2,327E-11

Πίνακας Π.18 Συνολικές εκπομπές ρύπων στο έδαφος. Κύκλος ζωής συστήματος MCFC. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh. Παράμετρος: Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης

Substance	Unit	Total
Heat, waste	MJ	0,001690655
Oils, unspecified	kg	0,001003019
Calcium	kg	2,60238E-05
Chloride	kg	2,45846E-05
Carbon	kg	1,94404E-05
Iron	kg	1,395E-05
Sodium	kg	1,29326E-05
Aluminum	kg	6,47788E-06
Magnesium	kg	5,18954E-06
Sulfur	kg	3,88415E-06
Barium	kg	3,23231E-06
Potassium	kg	2,29121E-06
Silicon	kg	6,91282E-07
Fluoride	kg	3,29962E-07
Phosphorus	kg	3,28375E-07
Manganese	kg	2,69354E-07
Zinc	kg	1,04091E-07
Boron	kg	6,64404E-08
Strontium	kg	6,50721E-08
Chromium	kg	3,24563E-08
Chromium VI	kg	9,96462E-09
Oils, biogenic	kg	8,8003E-09
Copper	kg	6,64317E-09
Arsenic	kg	2,58958E-09
Glyphosate	kg	8,84277E-10
Titanium	kg	7,25997E-10
Metolachlor	kg	2,5926E-10
Carbofuran	kg	1,63099E-10
Lead	kg	1,27201E-10
Nickel	kg	6,77432E-11
2,4-D	kg	4,66682E-11
Linuron	kg	3,58271E-11
Mancozeb	kg	2,88811E-11
Cypermethrin	kg	2,30491E-11
Chlorothalonil	kg	2,22369E-11
Vanadium	kg	2,07803E-11
Cadmium	kg	1,114E-11
Cobalt	kg	9,81779E-12
Orbencarb	kg	5,49149E-12
Aclonifen	kg	4,64938E-12
Bentazone	kg	2,37283E-12
Molybdenum	kg	2,1527E-12
Fenpiclonil	kg	1,03555E-12
Metribuzin	kg	1,01692E-12
Tin	kg	8,77205E-13
Carbetamide	kg	8,62364E-13
Tebutam	kg	7,04596E-13
Thiram	kg	5,27793E-13
Benomyl	kg	2,97496E-13
Napropamide	kg	2,97356E-13
Pirimicarb	kg	2,24454E-13
Metaldehyde	kg	1,68071E-13
Mercury	kg	1,48965E-13
Teflubenzuron	kg	6,77949E-14
Aldrin	kg	3,41076E-14
Atrazine	kg	8,9478E-15
Antimony	kg	7,04969E-15
Sulfuric acid	kg	1,71454E-15
Nitrogen	kg	4,61113E-16

Πίνακας Π.19 Συνολικές εκπομπές ρύπων στο έδαφος. Κύκλος ζωής συστήματος DE. Μονάδα αναφοράς: 1 παραγόμενη kWh.

Παράρτημα Ζ - Συντελεστές αναγωγής των εισροών του κύκλου ζωής (ενέργεια – υλικά) σε κατηγορίες επιτώσεων.

CUMULATIVE ENERGY DEMAND (Frischknecht et al., 2003)[3]

Impact category: Non renewable, fossil (MJ-eq)		
Characterisation factors		
Energy, from coal	1.00	MJ-eq / MJ
Energy, from coal, brown	1.00	
Energy, from gas, natural	1.00	
Energy, from oil	1.00	
Energy, from peat	1.00	
Energy, from sulphur	1.00	
Coal, brown, 8 MJ per kg, in ground	8	MJ-eq / kg
Coal, brown, in ground	9.90	
Coal, brown, 10 MJ per kg, in ground	10	
Peat, in ground	13.00	
Coal, 18 MJ per kg, in ground	18.0	
Coal, hard, unspecified, in ground	19.10	
Coal, 26.4 MJ per kg, in ground	26.4	
Coal, feedstock, 26.4 MJ per kg, in ground	26.4	
Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	29.3	
Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	30.3	
Methane	35.9	
Oil, crude, 41 MJ per kg, in ground	41	
Oil, crude, feedstock, 41 MJ per kg, in ground	41	
Oil, crude, 42 MJ per kg, in ground	42	
Oil, crude, feedstock, 42 MJ per kg, in ground	42	
Oil, crude, 42.6 MJ per kg, in ground	42.6	
Oil, crude, 42.7 MJ per kg, in ground	42.7	
Oil, crude, in ground	45.80	
Gas, natural, 46.8 MJ per kg, in ground	46.8	
Gas, natural, feedstock, 46.8 MJ per kg, in ground	46.8	
Gas, mine, off gas, process, coal mining/kg	49.8	
Gas, natural, 35 MJ per m3, in ground	35	MJ-eq / m^3
Gas, natural, feedstock, 35 MJ per m3, in ground	35	
Gas, petroleum, 35 MJ per m3, in ground	35	
Gas, natural, 36.6 MJ per m3, in ground	36.6	
Gas, natural, in ground	38.3	
Gas, mine, off gas, process, coal mining/m3	39.80	
Gas, off gas, oil production, in ground	39.80	
Oil, crude, 38.4 MJ per m3, in ground	38.40	

Πίνακας Π.20 Συντελεστές αναγωγής στη μονάδα αναφοράς του δείκτη CED

[3] Frischknecht R. et.al.. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods. Final report ecoinvent (2003), Swiss Centre for LCI. Duebendorf, CH. Available at: www.ecoinvent.ch

CML 2 (Guinée et al., 2002)[4]

Impact category: Global warming (GWP100)	**(kg CO_2-eq)**	
Characterisation factors		
Carbon dioxide, in air	1	kg CO2-eq / kg
Carbon dioxide	1	
Carbon dioxide, biogenic	1	
Carbon dioxide, fossil	1	
Carbon monoxide	1.53	
Carbon monoxide, biogenic	1.53	
Carbon monoxide, fossil	1.53	
Methane, bromo, Halon 1001	5	
Methane, dichloro, HCC30	10	
Methane, monochloro, R40	16	
Methane	23	
Methane, biogenic	23	
Methane, fossil	23	
Chloroform	30	
Methane, fluoro, HFC41	97	
Ethane, 1,1 difluoro, HFC152a	120	
Ethane, 2,2 dichloro1,1,1 trifluoro, HCFC123	120	
Ethane, 1,1,1 trichloro, HCFC140	140	
Propane, 3,3 dichloro1,1,1,2,2 pentafluoro, HCFC225ca	180	
Dinitrogen monoxide	296	
Ethane, 1,1,2 trifluoro, HFC143	330	
Methane, difluoro, HFC32	550	
Ethane, 2 chloro1,1,1,2 tetrafluoro, HCFC124	620	
Propane, 1,3 dichloro1,1,2,2,3 pentafluoro, HCFC225cb	620	
Propane, 1,1,2,2,3 pentafluoro, HFC245ca	640	
Ethane, 1,1 dichloro1 fluoro, HCFC141b	700	
Ethane, 1,1,2,2 tetrafluoro, HFC134	1100	
Ethane, 1,1,1,2 tetrafluoro, HFC134a	1300	
Methane, bromochlorodifluoro, Halon 1211	1300	
Pentane, 2,3 dihydroperfluoro, HFC4310mee	1500	
Methane, chlorodifluoro, HCFC22	1700	
Methane, tetrachloro, CFC10	1800	
Ethane, 1 chloro1,1 difluoro, HCFC142	2400	
Ethane, pentafluoro, HFC125	3400	
Propane, 1,1,1,2,3,3,3 heptafluoro, HFC227ea	3500	
Ethane, 1,1,1 trifluoro, HCFC143a	4300	
Methane, trichlorofluoro, CFC11	4600	
Methane, tetrafluoro, FC14	5700	
Ethane, 1,1,2 trichloro1,2,2 trifluoro, CFC113	6000	
Methane, bromotrifluoro, Halon 1301	6900	
Ethane, chloropentafluoro, CFC115	7200	
Butane, perfluoro	8600	
Propane, perfluoro	8600	
Pentane, perfluoro	8900	
Hexane, perfluoro	9000	
Propane, 1,1,1,3,3,3 hexafluoro, HCFC236fa	9400	
Ethane, 1,2 dichloro1,1,2,2 tetrafluoro, CFC114	9800	
Cyclobutane, octafluoro	10000	
Methane, dichlorodifluoro, CFC12	10600	
Ethane, hexafluoro, HFC116	11900	
Methane, trifluoro, HFC23	12000	
Methane, chlorotrifluoro, CFC13	14000	
Sulfur hexafluoride	22200	
Impact category: Acidification (kg SO_2-eq)		
Characterisation factors		
Nitrogen dioxide	0.5	kg SO2 eq / kg
Nitrogen oxides	0.5	
Sulfur dioxide	1.2	
Sulfur oxides	1.2	
Ammonia	1.6	

Πίνακας Π.21 Συντελεστές αναγωγής στη μονάδα αναφοράς των δεικτών GWP και AP

[4] Guinée, J.B et al. Handbook on life cycle assessment. Operational guide to the ISO standards. I: LCA in perspective. IIa: Guide. IIb: Operational annex. III: Scientific background. Kluwer Academic Publishers, CML, 2001. ISBN 1-4020-0228-9, Dordrecht, (2002). Pp. 692.

Eco-indicator99 (Goedkoop and Spriensma, 2001)[5]

Impact category: Minerals depletion (MJ surplus)		
Characterisation factors		
Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crude ore, in ground	2.38	MJ surplus / kg
Aluminium, in ground	2.38	
Bauxite, in ground	0.500	
Chromium compounds	0.9165	
Chromium ore, in ground	0.275	
Chromium, 25.5 in chromite, 11.6% in crude ore, in ground	0.9165	
Chromium, in ground	0.9165	
Cinnabar, in ground	165.5	
Copper ore, in ground	0.415	
Copper, 0.52% in sulfide, Cu 0.27% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	36.7	
Copper, 0.59% in sulfide, Cu 0.22% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	36.7	
Copper, 0.97% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 4.1E-2% in crude ore, in ground	36.7	
Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	36.7	
Copper, 1.13% in sulfide, Cu 0.76% and Ni 0.76% in crude ore, in ground	36.7	
Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	36.7	
Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	36.7	
Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	36.7	
Copper, in ground	36.7	
Cu, Cu 3.2E+0%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0% in ore, in ground	36.7	
Cu, Cu 5.2E-2%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2% in ore, in ground	36.7	
Iron ore, in ground	0.029	
Iron, 46% in ore, 25% in crude ore, in ground	0.051	
Iron, in ground	0.051	
Lead ore, in ground	0.368	
Lead, 5%, in sulfide, Pb 2.97% and Zn 5.34% in crude ore, in ground	7.35	
Lead, in ground	7.35	
Manganese ore, in ground	0.141	
Manganese, 35.7% in sedimentary deposit, 14.2% in crude ore, in ground	0.313	
Manganese, in ground	0.313	
Mercury, in ground	165.5	
Molybdenum ore, in ground	0.041	
Molybdenum, 0.010% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 1.83% in crude ore, in ground	41	
Molybdenum, 0.014% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.81% in crude ore, in ground	41	
Molybdenum, 0.016% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.27% in crude ore, in ground	41	
Molybdenum, 0.022% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.22% in crude ore, in ground	41	
Molybdenum, 0.022% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.36% in crude ore, in ground	41	
Molybdenum, 0.025% in sulfide, Mo 8.2E-3% and Cu 0.39% in crude ore, in ground	41	
Molybdenum, 0.11% in sulfide, Mo 0.41% and Cu 0.36% in crude ore, in ground	41	
Molybdenum, 0.11% in sulfide, Mo 4.1E-2% and Cu 0.36% in crude ore, in ground	41	
Molybdenum, in ground	41	
Ni, Ni 2.3E+0%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Cu 3.2E+0% in ore, in ground	23.75	
Ni, Ni 3.7E-2%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Cu 5.2E-2% in ore, in ground	23.75	
Nickel ore, in ground	0.356	
Nickel, 1.13% in sulfide, Ni 0.76% and Cu 0.76% in crude ore, in ground	23.75	
Nickel, 1.13% in sulfides, 0.76% in crude ore, in ground	23.75	
Nickel, 1.98% in silicates, 1.04% in crude ore, in ground	23.75	
Nickel, in ground	23.75	
Pyrolusite, in ground	0.313	
Tin ore, in ground	0.060	
Tin, 79% in cassiterite, 0.1% in crude ore, in ground	600	
Tin, in ground	600	
Tungsten ore, in ground	0.927	
Zinc 9%, in sulfide, Zn 5.34% and Pb 2.97% in crude ore, in ground	4.09	
Zinc 9%, Lead 5%, in sulfide, in ground	4.09	
Zinc ore, in ground	0.164	
Zinc, in ground	4.09	

Πίνακας Π.22 Συντελεστές αναγωγής στη μονάδα αναφοράς του δείκτη MDP

[5] Goedkoop, M., and Spriensma, R. The Eco-indicator 99. A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. Methodology Report. PRe Consultants B.V. (2001). Available at: http://www.pre-sustainability.com/content/reports

FOSSIL ENERGY DEMAND (Frischknecht et al., 2003)

Impact category: Fossil fuel consumption (MJ-eq)		
Characterisation factors		
Energy, from coal	1.00	MJ-eq / MJ
Energy, from coal, brown	1.00	
Energy, from gas, natural	1.00	
Energy, from oil	1.00	
Energy, from peat	1.00	
Energy, from sulphur	1.00	
Coal, brown, 8 MJ per kg, in ground	8.00	MJ-eq / kg
Coal, brown, in ground	9.90	
Coal, brown, 10 MJ per kg, in ground	10.0	
Peat, in ground	13.0	
Coal, 18 MJ per kg, in ground	18.0	
Coal, hard, unspecified, in ground	19.1	
Coal, 26.4 MJ per kg, in ground	26.4	
Coal, feedstock, 26.4 MJ per kg, in ground	26.4	
Coal, 29.3 MJ per kg, in ground	29.3	
Gas, natural, 30.3 MJ per kg, in ground	30.3	
Methane	35.9	
Oil, crude, 41 MJ per kg, in ground	41.0	
Oil, crude, feedstock, 41 MJ per kg, in ground	41.0	
Oil, crude, 42 MJ per kg, in ground	42.0	
Oil, crude, feedstock, 42 MJ per kg, in ground	42.0	
Oil, crude, 42.6 MJ per kg, in ground	42.6	
Oil, crude, 42.7 MJ per kg, in ground	42.7	
Oil, crude, in ground	45.8	
Gas, natural, 46.8 MJ per kg, in ground	46.8	
Gas, natural, feedstock, 46.8 MJ per kg, in ground	46.8	
Gas, mine, off gas, process, coal mining/kg	49.8	
Gas, natural, 35 MJ per m3, in ground	35.0	MJ-eq / m^3
Gas, natural, feedstock, 35 MJ per m3, in ground	35.0	
Gas, petroleum, 35 MJ per m3, in ground	35.0	
Gas, natural, 36.6 MJ per m3, in ground	36.6	
Gas, natural, in ground	38.3	
Gas, mine, off gas, process, coal mining/m3	39.8	
Gas, off gas, oil production, in ground	39.8	
Oil, crude, 38.4 MJ per m3, in ground	38.4	

Πίνακας Π.23 Συντελεστές αναγωγής στη μονάδα αναφοράς του δείκτη FED

Παράρτημα Η – Ερωτηματολόγιο εκτίμησης συντελεστών βαρύτητας. Εφαρμογή 4ου κεφαλαίου

AWARENESS SEMINAR

FUEL CELL TECHNOLOGIES FOR MARINE APPLICATIONS

QUESTIONNAIRE

Within the frame of the Awareness Seminar "Fuel Cell Technologies for Marine Applications" we kindly ask you to express your point of view regarding which indicators will be the most important towards the establishment of Fuel Cell technologies as marine APUs in Ro-Ro and Ro-PAX, replacing conventional technologies (Diesel APUs)

After filling this form, please hand it over to the Seminar secretariat

Thank you in advance

1. Fill in the following data (Personal data are optional)

Company / Sector: _____

Department: _____

Optional data

Full Name: _____ **e-mail:** _____

2. Assign each of the following indicators (parameters) a level of significance (1 – least important; 5 – extremely important)

	Significance Level				
	Minor		Medium		High
	1	2	3	4	5
Investment cost					
Operation – Maintenance cost					
Electrical efficiency (%)					
Space needed for installation					
Startup time (from zero to full load)					
Ability to use several types of marine fuel					
Expected lifetime					
Annual scheduled service time					
Annual time for repairs					
Noise - Vibrations					
Environmental performance - Emissions					

3. If considered necessary, provide additional indicators, assessing their importance.

	Significance Level				
	Minor		Medium		High
	1	2	3	4	5

Παράρτημα Θ – Εξεργειακή μέθοδος κατανομής εκπομπών σε συμπαραγωγή θερμότητας και ηλεκτρισμού

Πηγή: Viebahn, P. and Krewitt, W. Fuel Cell (FC) Systems. Final Report of ECLIPSE (Environmental and Ecological Life Cycle Inventories for Present and Future Power Systems in Europe) (2003). DLR.

A widely adopted allocation method between electricity and heat is based on exergy. The allocation factors depend on the CHP efficiencies and the temperatures predominating in the system in which the system examined is operating. They are calculated with help of the following equations:

Thermodynamic mean temperature: $$T_M = \frac{T_O - T_R}{\ln\left(\frac{T_O}{T_R}\right)} \quad (1)$$

Quality rating of electricity: $$\xi_{el} = 1 \quad (2)$$

Quality rating of heat: $$\xi_{th} = 1 - \frac{T_E}{T_M} \quad (3)$$

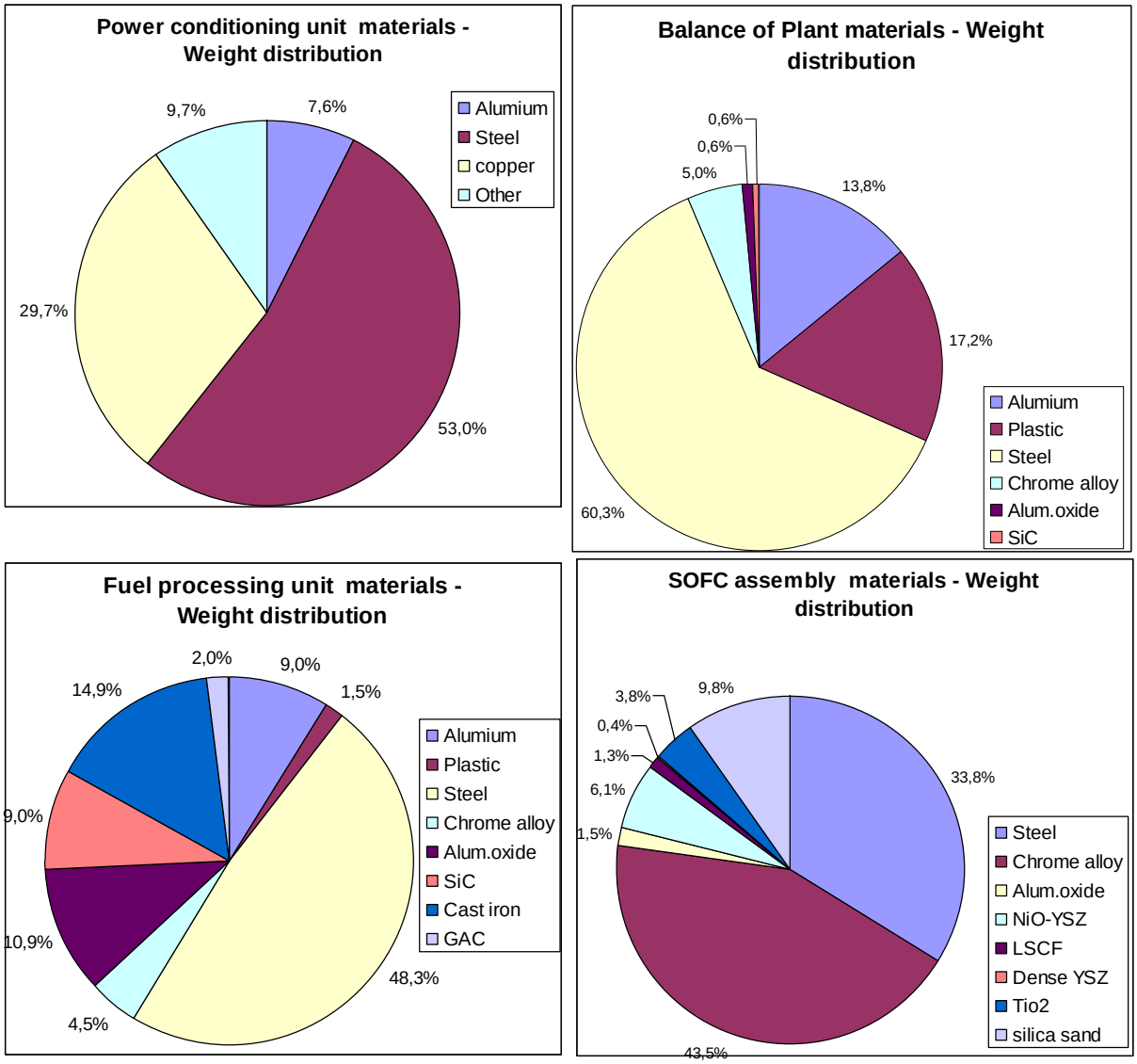
Exergetical efficiency of the CHP system: $$\xi_{CHP} = \xi_{el} \cdot \eta_{el} + \xi_{th} \cdot \eta_{th} \quad (4)$$

Allocation factor for heat: $$AF_{th} = \frac{\xi_{th} \cdot \eta_{th}}{\xi_{CHP}} \quad (5)$$

with T_O: outgoing temperature, T_R: return temperature, T_E: environment temperature, η_{el}: electric efficiency and η_{th}: thermal efficiency.

Παράρτημα Ι – Ποσότητα και είδος απαιτούμενων υλικών κατασκευής μονάδας μ-ΣΗΘ με SOFC

1. Υποσύστημα επεξεργασίας καυσίμου (συνολικό βάρος υποσυστήματος: 20 kg)
2. Συστοιχία και ηλεκτρονικά ισχύος (συνολικό βάρος υποσυστήματος: 98.5 kg)
3. Περιφερειακά υποσυστήματα, κέλυφος, σωληνώσεις (συνολικό βάρος υποσυστήματος: 136,1 kg)



Σχήμα Π.4 Συνεισφορά υλικών στο βάρος των υποσυστημάτων της μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC

Material	Source of data
Aluminium	[Ecoinvent, 2009]
ABS	[APME, 2007]
Stainless Steels X12CrNi17, X10CrNiS	[IDEMAT, 2001]
Cast iron	[Ecoinvent, 2009]
Granular Activated Carbon	[Bayer et al., 2005]
PM2000	[Plansee, 2007]
Al_2O_3	[Ecoinvent, 2009]
SiC	[Ecoinvent, 2009]
Ni-YSZ	[Karakoussis et al., 2001; Inframat, 2006]
YSZ	[Karakoussis et al., 2001; Inframat, 2006]
LSCF	[Karakoussis et al., 2001; Inframat, 2006] (energy input of doped $LaMnO_3$)
Ferrochromium	[Ecoinvent, 2009]
Stainless Steel X10CrNiS	[IDEMAT, 2001]
Iron-nickel-chromium alloy	[Ecoinvent, 2009]
TiO_2	
Al_2O_3	
Silica sand	
Inverter 2500W (component)	

Πίνακας Π.24 Πηγές δεδομένων υλικών μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC

Παράρτημα Κ – Περιγραφή τεχνικών και οικονομικών κριτηρίων 5ου κεφαλαίου

		Σχόλια	Πηγές
Cumulative Energy Demand (CED) ανά kWhel	$\frac{MJ-eq}{kWhel}$	Βλ. Πίνακα 5.30	Αποτελέσματα AKZ (σχήματα 5.29-5.30)
Cumulative Energy Demand (CED) ανά kWhth	$\frac{MJ-eq}{kWhth}$	Βλ. Πίνακα 5.30	Αποτελέσματα AKZ (σχήματα 5.29-5.30)
Τεχνικό ελάχιστο	-	Βλ. §3.2.2 «Καθορισμός τεχνικών κριτηρίων – Λειτουργική ευελιξία»	[FlameSOFC, 2005; Staffel, 2009]
Απόκριση σε μεταβολή φορτίου	kWel/min	Βλ. §3.2.2 «Καθορισμός τεχνικών κριτηρίων – Λειτουργική ευελιξία»	[FlameSOFC, 2005; Staffel, 2009]
Αξιοπιστία	-	Βλ. §3.2.2 «Καθορισμός τεχνικών κριτηρίων – Λειτουργική αξιοπιστία»	[FlameSOFC, 2005]
Χρόνος ζωής συστήματος	έτη	Βλ. §3.2.2 «Καθορισμός τεχνικών κριτηρίων – Χρόνος ζωής». FlameSOFC target: 30,000 h (target lifetime) / 4,000 (h/y)	[FlameSOFC, 2005; Staffel et al., 2008; Stafell, 2009]
Σχετική μείωση η_{el} στο 50% των θερμικών kW	%	An indicator focusing on the relative decrease of the electric efficiency at half thermal output (load).	Υπολογισμοί βάσει της ηλεκτρικής αποδοτικότητας σε μερικό φορτίο [FlameSOFC, 2005].
Συγκέντρωση ισχύος	kW/m^2	-	[EPA, 2003]

Πίνακας Π.25 Σχόλια και πηγές δεδομένων τεχνικών κριτηρίων αξιολόγησης

		Σχόλια	Πηγή
Κόστος εγκατάστασης	€	-	[FlameSOFC, 2005; Onovwiona and Ugursal, 2006; Simader et al., 2006; Delta, 2006; Kuhn, 2008; Hawkes and Leach, 2008]
Κόστος ετήσιας συντήρησης και λειτουργίας	€/έτος	-	[FlameSOFC, 2005; Alanne et al., 2007; Onovwiona and Ugursal, 2006; Simader et al., 2006; Delta, 2006; Kuhn, 2008; Hawkes and Leach, 2008; De Paepe et al., 2008; EUSUSTEL, 2005]
Ευαισθησία ετήσιου κόστους σε αύξηση 20% της τιμής ηλεκτρισμού	%	-	[FlameSOFC, 2005]
Ευαισθησία ετήσιου κόστους σε αύξηση 20% της τιμής φυσικού αερίου	%	-	[FlameSOFC, 2005]

Πίνακας Π.26 Πηγές δεδομένων οικονομικών κριτηρίων αξιολόγησης

Τα περιβαλλοντικά κριτήρια αναλύονται στον πίνακα 4.12 και οι τιμές τους προήλθαν από την εφαρμογή AKZ στα εξεταζόμενα συστήματα (§5.5.2.3).

Παράρτημα Λ – Συνολικές εισροές ενέργειας και υλικών, εκπομπές ρύπων στην ατμόσφαιρα, σε υδάτινο περιβάλλον και στο έδαφος κύκλων ζωής συμβατικού συστήματος και μονάδων μ-ΣΗΘ

Εισροή	Μονάδα	
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	2.40E-01
Energy, kinetic (in wind), converted		1.87E-01
Energy, gross calorific value, in biomass		1.75E-01
Coal, brown, in ground	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	3.46E-01
Coal, hard, unspecified, in ground		1.61E-01
Gravel, in ground		2.31E-02
Carbon dioxide, in air		2.05E-02
Water, turbine use, unspecified natural origin	$\frac{m^3}{kWhel + kWhth}$	2.36E+00
Gas, natural, in ground		1.43E-01

Πίνακας Π.27 Κυριότερες εισροές ενέργειας και πρώτων υλών για τον κύκλο ζωής του συμβατικού συστήματος.

Εισροή	Μονάδα	
Energy, gross calorific value, in biomass	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	-6.58E-02
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted		-6.91E-02
Energy, kinetic (in wind), converted		-7.96E-02
Gravel, in ground	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	9.53E-03
Iron, 46% in ore, 25% in crude ore, in ground		2.61E-03
Oil, crude, in ground		-1.12E-03
Calcite, in ground		-2.66E-03
Carbon dioxide, in air		-7.94E-03
Coal, hard, unspecified, in ground		-6.43E-02
Coal, brown, in ground		-1.47E-01
Gas, natural, in ground	$\frac{m^3}{kWhel + kWhth}$	3.57E-01
Water, turbine use, unspecified natural origin		-8.56E-01

Πίνακας Π.28 Κυριότερες εισροές ενέργειας και πρώτων υλών για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ.

Εισροή	Μονάδα	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συστήματος SOFC	
		25%	35%
Energy, gross calorific value, in biomass	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	-6.33E-02	-1.03E-01
Energy, potential (in hydropower reservoir), converted		-6.47E-02	-1.20E-01
Energy, kinetic (in wind), converted		-7.77E-02	-1.20E-01
Gravel, in ground	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	1.28E-02	7.40E-03
Carbon dioxide, in air		-7.67E-03	-1.23E-02
Coal, hard, unspecified, in ground		-6.26E-02	-9.90E-02
Coal, brown, in ground		-1.44E-01	-2.22E-01
Gas, natural, in ground	$\frac{m^3}{kWhel + kWhth}$	3.57E-01	2.73E-01
Water, turbine use, unspecified natural origin		-8.03E-01	-1.32E+00

Πίνακας Π.29 Κυριότερες εισροές ενέργειας και πρώτων υλών για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ.

Εισροή	Μονάδα	
Heat, waste	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	1.19E+01
Carbon dioxide, fossil	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	9.07E-01
Carbon dioxide, biogenic		1.90E-02
Methane, fossil		2.48E-03
Nitrogen oxides		7.75E-04
Sulfur dioxide		7.51E-04
Particulates, > 10 um		4.64E-04
Carbon monoxide, fossil		3.23E-04
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin		1.48E-04

Πίνακας Π.30 Κυριότερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα για τον κύκλο ζωής του συμβατικού συστήματος.

Εισροή	Μονάδα	
Heat, waste	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	-1.50E+00
Carbon dioxide, fossil	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	4.92E-01
Nitrogen oxides		7.28E-03
Carbon monoxide, fossil		5.90E-03
Methane, fossil		1.85E-03
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin		5.11E-04
Carbon dioxide, biogenic		-7.34E-03

Πίνακας Π.31 Κυριότερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ.

Εισροή	Μονάδα	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συστήματος SOFC	
		25%	35%
Heat, waste	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	-1.42E+00	-3.42E+00
Carbon dioxide	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	6.84E-01	5.43E-01
Methane, fossil		1.34E-03	6.24E-04
Sulfur dioxide		2.25E-04	1.19E-04
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin		1.72E-04	1.15E-04
Carbon dioxide, biogenic		-7.05E-03	-1.13E-02
Carbon dioxide, fossil		-1.86E-01	-3.58E-01

Πίνακας Π.32 Κυριότερες εκπομπές στην ατμόσφαιρα για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ SOFC.

Εισροή	Μονάδα	
Heat, waste	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	9.95E-01
Silicon	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	5.99E-03
Sulfate		4.44E-03
Calcium, ion		3.39E-03
Chloride		3.18E-03
Solids, inorganic		1.22E-03
Iron, ion		1.14E-03
Aluminum		8.03E-04

Πίνακας Π.33 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον για τον κύκλο ζωής του συμβατικού συστήματος.

Εισροή	Μονάδα	
Heat, waste	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	-4.15E-01
Chloride	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	4.82E-04
Suspended solids, unspecified		1.91E-04
Iron, ion		-4.82E-04
Solids, inorganic		-5.17E-04
Calcium, ion		-1.40E-03
Sulfate		-1.78E-03
Silicon		-2.31E-03

Πίνακας Π.34 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ.

Εισροή	Μονάδα	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συστήματος SOFC	
		25%	35%
Heat, waste	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	-4.05E-01	-6.29E-01
Chloride	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	4.56E-04	-
Suspended solids, unspecified		1.91E-04	1.42E-04
Iron, ion		-4.69E-04	-7.28E-04
Solids, inorganic		-5.04E-04	-7.80E-04
Calcium, ion		-1.35E-03	-2.12E-03
Sulfate		-1.71E-03	-2.72E-03
Silicon		-1.83E-03	-3.26E-03

Πίνακας Π.35 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων σε υδάτινο περιβάλλον για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ SOFC.

Εισροή	Μονάδα	
Heat, waste	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	9.95E-01
Oils, unspecified	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	4.27E-05
Calcium		8.69E-06
Iron		5.74E-06
Chloride		4.96E-06
Carbon		2.89E-06
Sodium		1.76E-06
Silicon		1.61E-06

Πίνακας Π.36 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων στο έδαφος για τον κύκλο ζωής του συμβατικού συστήματος.

Εισροή	Μονάδα	
Heat, waste	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	-1.13E-01
Chloride	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	5.87E-06
Carbon		4.72E-06
Calcium		4.26E-06
Sodium		3.21E-06
Iron		2.10E-06
Silicon		-4.68E-07
Oils, unspecified		-7.55E-06

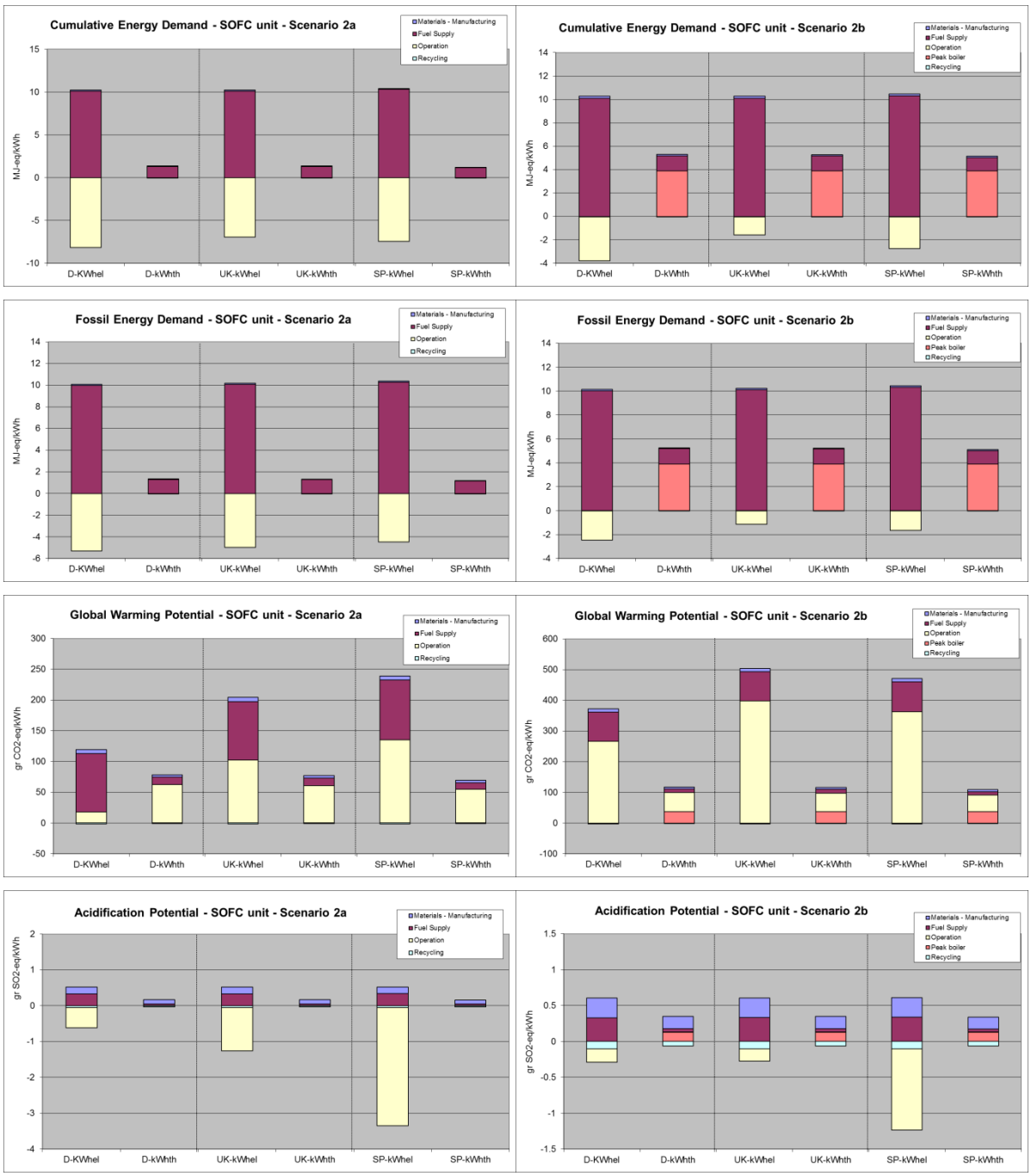
Πίνακας Π.37 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων στο έδαφος για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ.

Εισροή	Μονάδα	Ηλεκτρικός βαθμός απόδοσης συστήματος SOFC	
		25%	35%
Heat, waste	$\frac{MJ}{kWhel + kWhth}$	-1.10E-01	-1.69E-01
Chloride	$\frac{kg}{kWhel + kWhth}$	6.41E-06	4.42E-06
Carbon		4.74E-06	3.33E-06
Calcium		4.33E-06	1.36E-06
Sodium		3.47E-06	2.50E-06
Iron		2.32E-06	-
Silicon		-4.47E-07	-
Oils, unspecified		-7.42E-06	-1.77E-05

Πίνακας Π.38 Κυριότερες εκπομπές εκπομπές ρύπων στο έδαφος για τον κύκλο ζωής του συστήματος μ-ΣΗΘ ΜΕΚ.

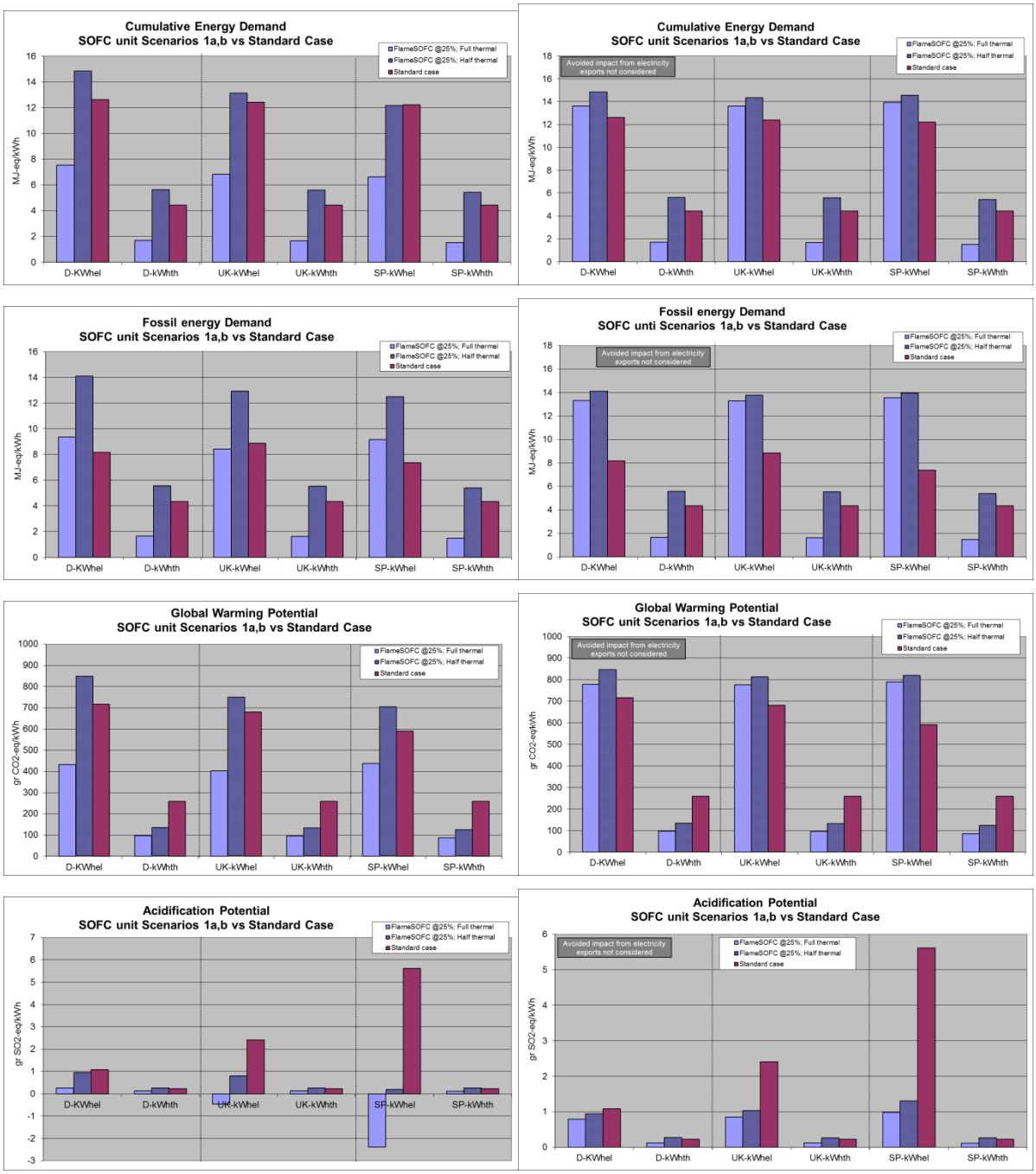
Παράρτημα Μ – Αναλυτικά αποτελέσματα ΑΚΖ

Σχήμα Π.5 Αποτελέσματα ΑΚΖ της μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC:
Σενάριο 1a: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Πλήρης κάλυψη ετήσιου θερμικού φορτίου.
Σενάριο 1b: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Κάλυψη του μισού ετήσιου θερμικού φορτίου + λέβητας αερίου (peak boiler) για το υπόλοιπο.

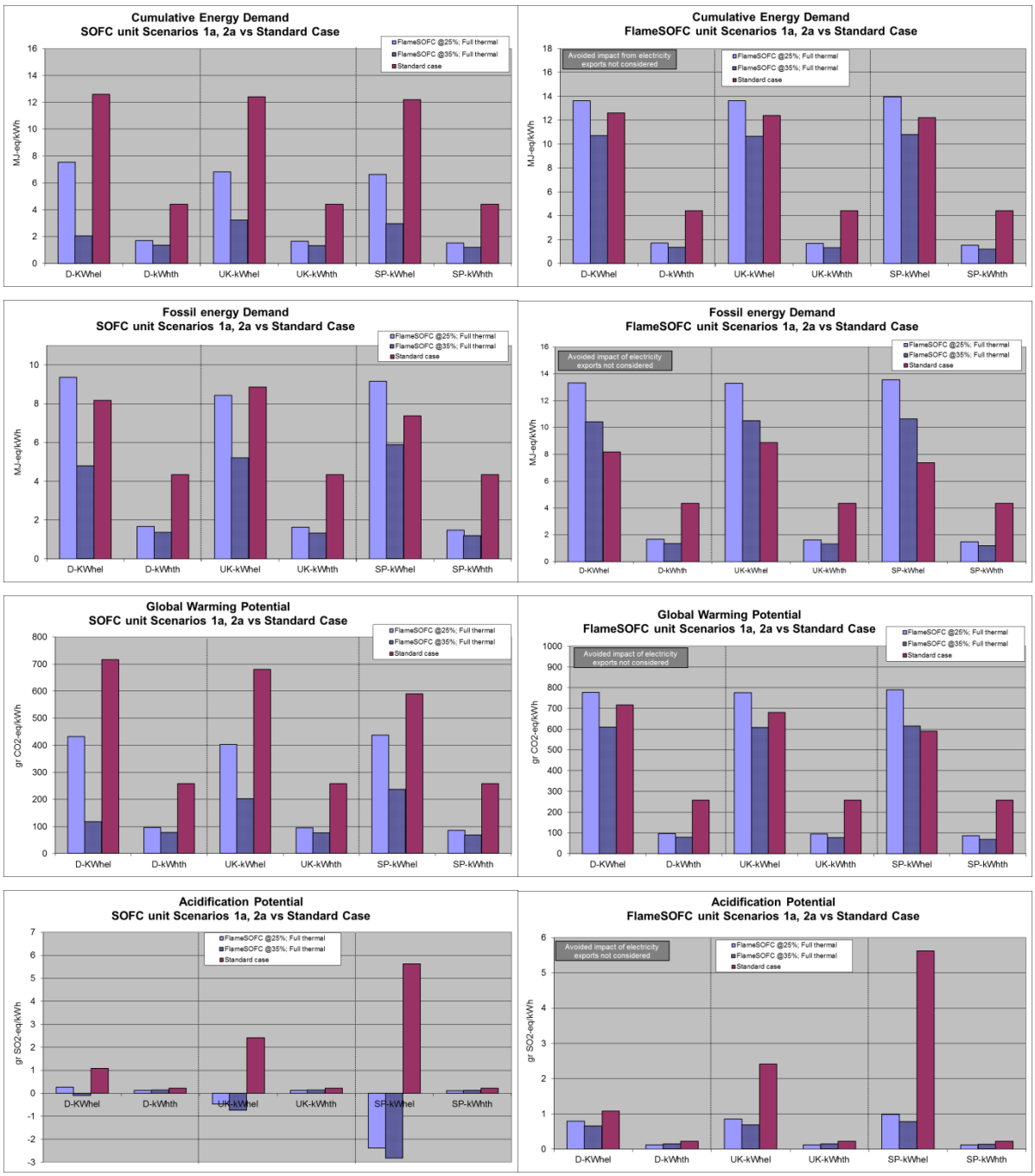


Σχήμα Π.6 Αποτελέσματα ΑΚΖ της μονάδας μ-ΣΗΘ με συστοιχία SOFC:
Σενάριο 2a: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 35% - Πλήρης κάλυψη ετήσιου θερμικού φορτίου.
Σενάριο 2b: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 35% - Κάλυψη του μισού ετήσιου θερμικού φορτίου + λέβητας αερίου (peak boiler) για το υπόλοιπο.

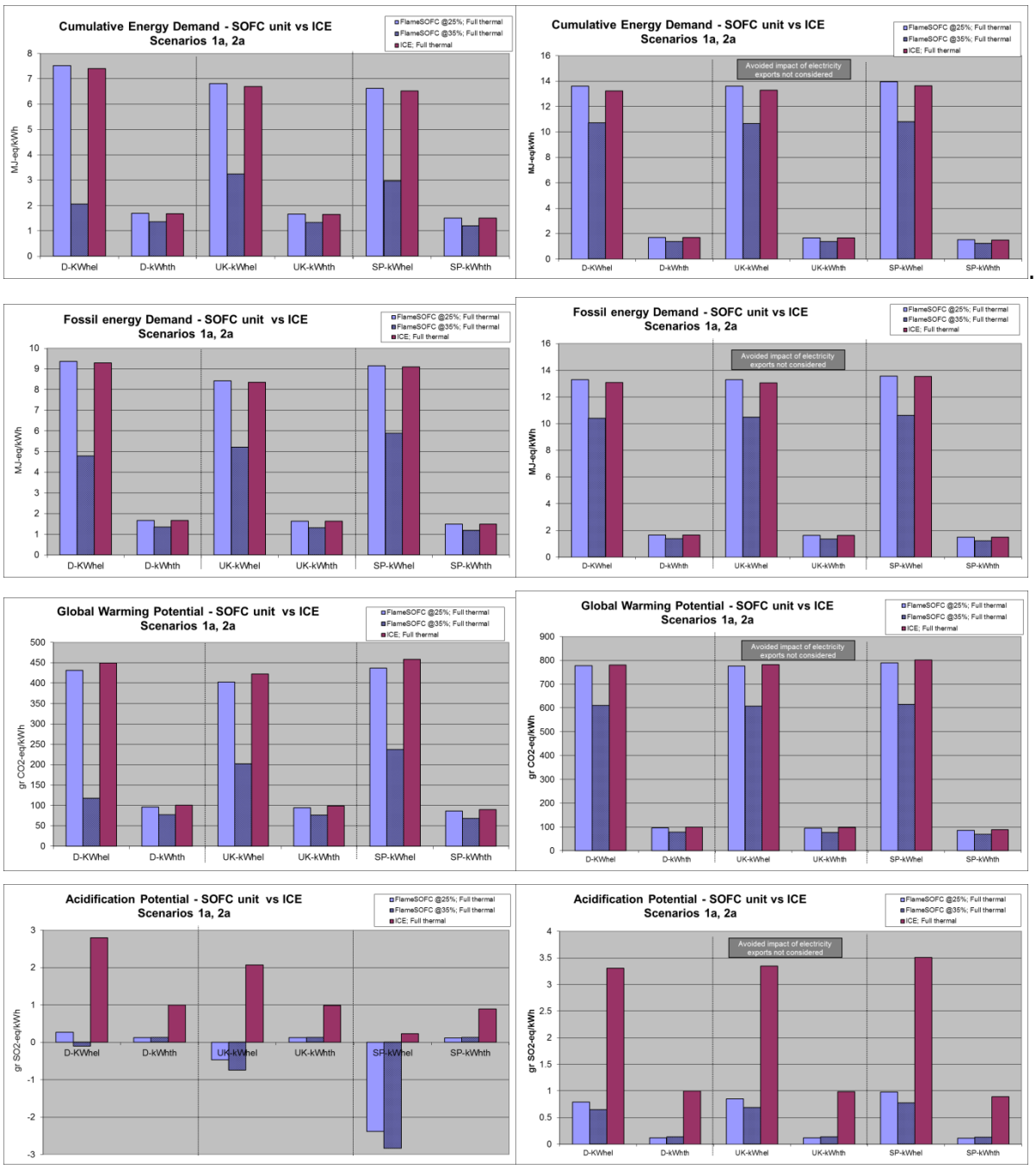
Σχήμα Π.7 Αποτελέσματα ΑΚΖ της μονάδας μ-ΣΗΘ με κινητήρα ΜΕΚ:
Σενάρια 1a,2a: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Πλήρης κάλυψη ετήσιου θερμικού φορτίου.
Σενάριο 1b,2b: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Κάλυψη του μισού ετήσιου θερμικού φορτίου + λέβητας αερίου (peak boiler) για το υπόλοιπο.



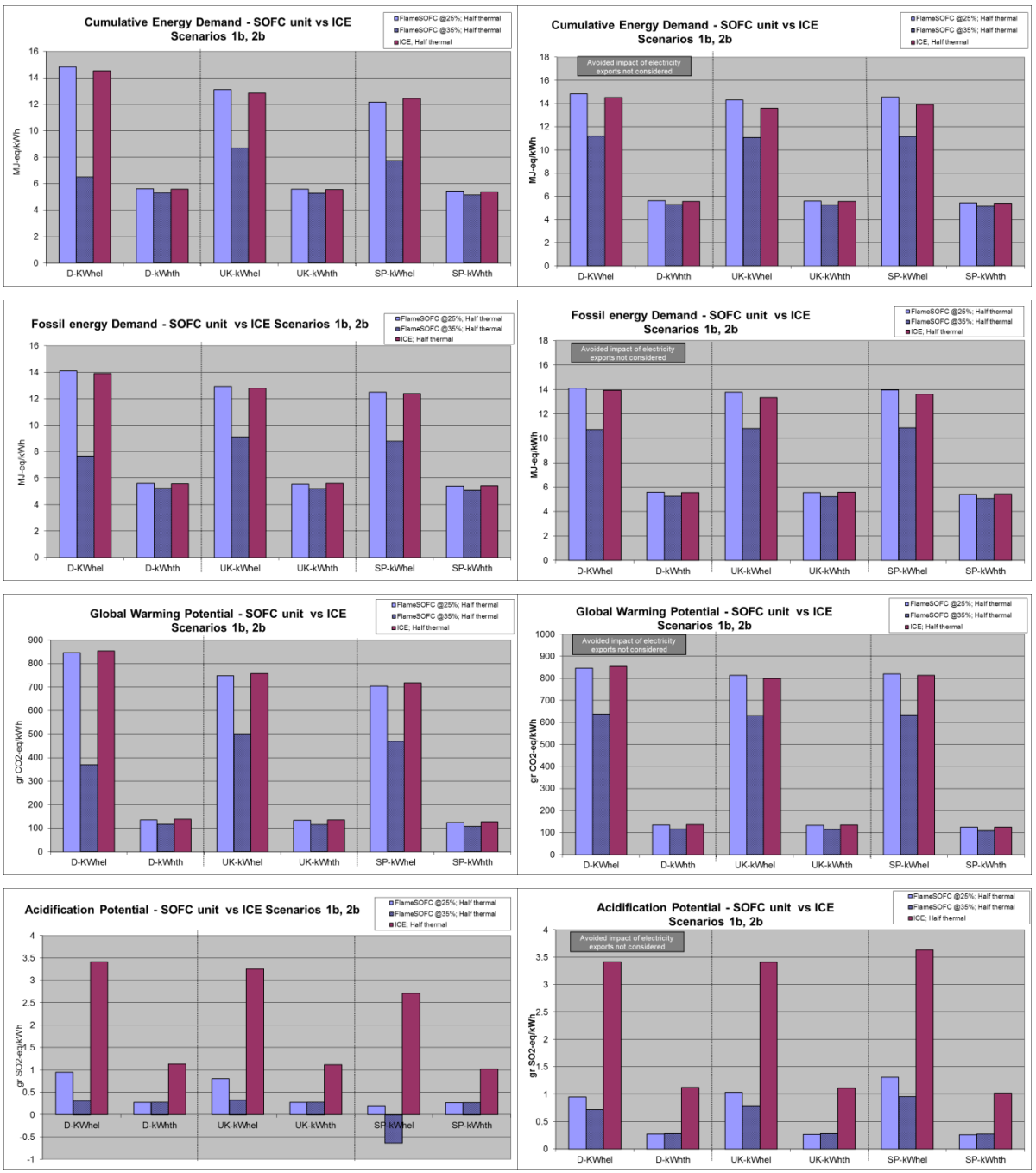
Σχήμα Π.8 Συγκριτικά αποτελέσματα AKZ: Σύστημα μ-ΣΗΘ με SOFC και συμβατικό σύστημα:
Αριστερή στήλη: Με περιβαλλοντικό όφελος από εξαγωγές ηλεκτρικού πλεονάσματος
Δεξιά στήλη: Χωρίς περιβαλλοντικό όφελος από εξαγωγές ηλεκτρικού πλεονάσματος
Σενάριο 1a: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Πλήρης κάλυψη ετήσιου θερμικού φορτίου.
Σενάριο 1b: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Κάλυψη του μισού ετήσιου θερμικού φορτίου + λέβητας αερίου (peak boiler) για το υπόλοιπο.



Σχήμα Π.9 Συγκριτικά αποτελέσματα AKZ: Σύστημα μ-ΣΗΘ με SOFC και συμβατικό σύστημα:
Αριστερή στήλη: Με περιβαλλοντικό όφελος από εξαγωγές ηλεκτρικού πλεονάσματος
Δεξιά στήλη: Χωρίς περιβαλλοντικό όφελος από εξαγωγές ηλεκτρικού πλεονάσματος
Σενάριο 1a: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Πλήρης κάλυψη ετήσιου θερμικού φορτίου.
Σενάριο 2a: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 35% - Πλήρης κάλυψη ετήσιου θερμικού φορτίου.



Σχήμα Π.10 Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ: Συστήματα μ-ΣΗΘ με SOFC και ΜΕΚ:
Αριστερή στήλη: Με περιβαλλοντικό όφελος από εξαγωγές ηλεκτρικού πλεονάσματος
Δεξιά στήλη: Χωρίς περιβαλλοντικό όφελος από εξαγωγές ηλεκτρικού πλεονάσματος
Σενάριο 1a: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Πλήρης κάλυψη ετήσιου θερμικού φορτίου.
Σενάριο 1b: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Κάλυψη του μισού ετήσιου θερμικού φορτίου + λέβητας αερίου (peak boiler) για το υπόλοιπο.



Σχήμα Π.11 Συγκριτικά αποτελέσματα ΑΚΖ: Σύστημα μ-ΣΗΘ με SOFC και ΜΕΚ:
Αριστερή στήλη: Με περιβαλλοντικό όφελος από εξαγωγές ηλεκτρικού πλεονάσματος
Δεξιά στήλη: Χωρίς περιβαλλοντικό όφελος από εξαγωγές ηλεκτρικού πλεονάσματος
Σενάριο 1a: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 25% - Πλήρης κάλυψη ετήσιου θερμικού φορτίου.
Σενάριο 2a: Βαθμός ηλεκτρικής απόδοσης 35% - Πλήρης κάλυψη ετήσιου θερμικού φορτίου.