



Διπλωματική Εργασία :

‘Η Τεχνική SPEA2 στην Πολυκριτηριακή Βελτιστοποίηση. Εφαρμογή στο Σχεδιασμό Μονάδας Συνδυασμένου Κύκλου με Επιλογή από Εμπορικά Μοντέλα Αεριοστροβίλων’

της **Χαρίκλειας Α. Γεωργοπούλου**

Επιβλέπων: **Κ. Χ. Γιαννάκογλου**

Φεβρουάριος 2005

Αντικείμενο

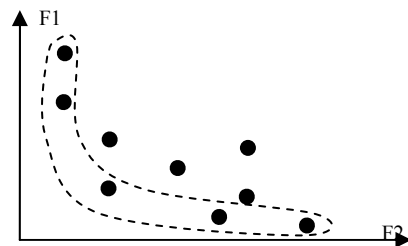
Αντικείμενο της παρούσας Διπλωματικής Εργασίας αποτελεί η παρουσίαση και η εφαρμογή της τεχνικής SPEA2, όπως αυτή χρησιμοποιείται για την επίλυση προβλημάτων βελτιστοποίησης πολλών κριτηρίων, μέσω εξελικτικών αλγορίθμων. Η μέθοδος αυτή αποδίδει σε κάθε λύση μια ενιαία τιμή κόστους λαμβάνοντας υπόψη ταυτόχρονα την κυριαρχία και την πυκνότητα των λύσεων στο χώρο των στόχων. Η SPEA2 προγραμματίστηκε, εντάχθηκε στο λογισμικό του Εργαστηρίου και αρχικά πιστοποιήθηκε σε ένα σύνολο δύσκολων μαθηματικών προβλημάτων με γνωστή αναλυτική λύση.

Το δεύτερο σκέλος της εργασίας περιλαμβάνει την εφαρμογή των εξελικτικών αλγορίθμων και της μεθόδου SPEA2 στη σχεδίαση και βέλτιστη λειτουργία διατάξεων συνδυασμένου κύκλου και συγχρόνως, την παραμετρική μελέτη ένταξης στην παραπάνω σχεδίαση 19 εμπορικών μοντέλων αεριοστροβίλων. Η διερεύνηση αφορά 5 μοντέλα αεροπορικού και 14 μοντέλα βιομηχανικού τύπου του εμπορίου, τα οποία σε απλό κύκλο αποδίδουν 120 MW. Η βελτιστοποίηση γίνεται σε μια τυπική διάταξη λέβητα ανάκτησης θερμότητας, δύο πύσεων, με απομάστευση προς το τροφοδοτικό, στοχεύοντας στην ταυτόχρονη μεγιστοποίηση της συνολικής παραγόμενης ισχύος και του βαθμού απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου. Έχοντας ως καθοριστικές παραμέτρους του προβλήματος τις επιδόσεις των επιλεγμένων αεριοστροβίλων, προσδιορίζεται για κάθε μοντέλο, στο σημείο σχεδίασης του, ο βέλτιστος λέβητας ανάκτησης θερμότητας.

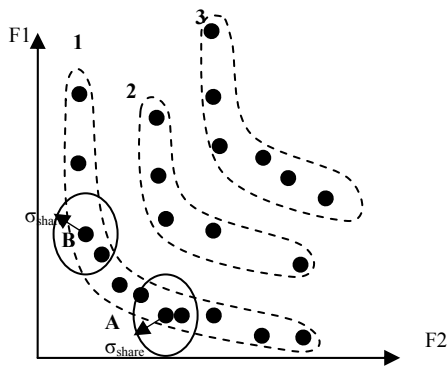
Τεχνικές Απόδοσης Ενιαίας Τιμής Κόστους σε Προβλήματα Πολλαπλών Στόχων

Ανάλογα με την αντικειμενική συνάρτηση του προβλήματος, οι Εξελικτικοί Αλγόριθμοι διακρίνονται σε ΕΑ ενός ή Μ (πολλαπλών, $M > 1$) στόχων. Στην πρώτη περίπτωση, η αντικειμενική συνάρτηση, αποδίδει σε κάθε άτομο την τιμή κόστους ή καταλληλότητάς του (για πρόβλημα ελαχιστοποίησης ή μεγιστοποίησης αντίστοιχα).

Στη δεύτερη περίπτωση η απόδοση ενιαίας τιμής κόστους, που παρακάτω θα αναφέρεται ως ‘ιεράρχηση των λύσεων’, γίνεται με την υιοθέτηση τεχνικών, που ποικίλουν στη βιβλιογραφία. Στη διπλωματική αυτή εργασία παρουσιάζονται συνολικά τρεις μέθοδοι, που ιεραρχούν τις λύσεις με βάση την έννοια του μετώπου βέλτιστων λύσεων κατά Pareto.



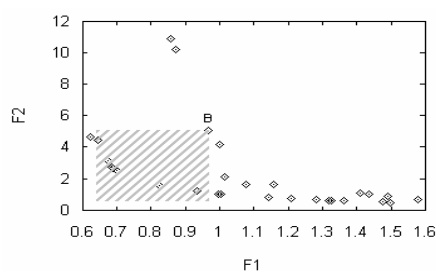
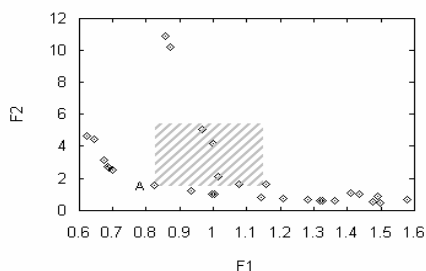
α) Η μέθοδος NSGA, που σχετικά με τις άλλες δύο είναι η παλαιότερη μέθοδος.



Σύμφωνα με αυτή, οι λύσεις της αντικειμενικής συνάρτησης αρχικά διαβαθμίζονται σε μέτωπα κοινής ισχύος με βάση την κυριαρχία, στο διάγραμμα των στόχων της ελαχιστοποίησης. Τα κόστη των λύσεων που ανήκουν στο ίδιο μέτωπο διαφοροποιούνται με βάση τον αριθμό των γειτονικών ατόμων που βρίσκονται εντός μιας ακτίνας σ_{share} , που ορίζεται από το χρήστη. Τα άτομα με τους περισσότερους γείτονες χρεώνονται μεγαλύτερη ποινή. Επομένως, το μεγαλύτερο ρόλο στην απόδοση τιμής

κόστους έχει η γειτνίαση, παρά η κυριαρχία.

β) Η μέθοδος SPEA, που αποτελεί προκάτοχο της SPEA II και είχε δημιουργηθεί μετά την NSGA, προκειμένου να λάβει υπόψη την έννοια της κυριαρχίας κατά την ιεράρχηση των λύσεων. Υπολογίζει διαφορετικά το κόστος για τους κυρίαρχους (επίλεκτοι) από τους κυριαρχούμενους. Οι πρώτοι λαμβάνουν τιμή κόστους ανάλογη των ατόμων στα οποία κυριαρχούν. Το κόστος των δεύτερων είναι ανάλογο του συνολικού κόστους των επίλεκτων, από τους οποίους κυριαρχούνται. Η μέθοδος παρουσιάζει ελαττώματα που αφορούν στην ομοιομορφία και την πυκνότητα του τελικού μετώπου Pareto και στην πιθανή περίπτωση απόδοσης ίδιου κόστους σε δύο διαφορετικές λύσεις.



$$\forall s^e \in S^{g,e} : \varphi^{s^e} = \frac{|\{j | s^j \in (S^{g,\mu} \cup S^{g,\lambda}) \wedge s^e \prec s^j\}|}{\mu + \lambda + 1}$$

$$\forall s^e \in (S^{g,\mu} \cup S^{g,\lambda}) : \varphi^{s^e} = 1 + \sum \phi(s^e \in S^{g,e} | s^e \prec s^i) \in (1, \infty)$$

$$\varphi^{s^e} \in [0, 1)$$

Σχήμα 2.7 Για το πρόβλημα ελαχιστοποίησης των δύο στόχων F1 και F2, στο διάγραμμα των F1 και F2, παρουσιάζονται ορισμένες υποψήφιες λύσεις. Το άτομο A δεν κυριαρχείται από άλλα άτομα και η τιμή κόστους του υπολογίζεται από το πλήθος των ατόμων στα οποία κυριαρχεί, που βρίσκονται εντός του γραμμοσκιασμένου εμβადού, προς το σύνολο γονέων και απογόνων, συν τη μονάδα. Το άτομο B, που κυριαρχείται, λαμβάνει τιμή κόστους ανάλογη των αντίστοιχων τιμών των καλύτερων ατόμων, που κυριαρχούν σ' αυτό και φαίνονται μέσα στο γραμμοσκιασμένο παραλληλόγραμμο.

γ) Η SPEA II [1], που προγραμματίστηκε στο πλαίσιο της εργασίας σε γλώσσα Fortran 77 και προστέθηκε σε υπάρχον λογισμικό εξελικτικής βελτιστοποίησης του Εργαστηρίου Θερμικών Στροβιλομηχανών, είναι πλέον πρόσφατη των δύο προηγούμενων και δημιουργήθηκε για να αντιμετωπίσει τα προβλήματα της προκατόχου της. Χρησιμοποιεί την ίδια συνάρτηση κόστους, τόσο για τα κυριαρχούμενα, όσο και για τα κυρίαρχα άτομα των πληθυσμών του εξελικτικού αλγορίθμου και λαμβάνει υπόψη στον υπολογισμό του κόστους ταυτόχρονα την κυριαρχία και το βαθμό γειτνίασης. Η μορφή του εξελικτικού αλγορίθμου, ο οποίος επεκτάθηκε με την προσθήκη της SPEA II, περιγράφεται αναλυτικά στη διδακτορική διατριβή του Α.Π. Γιώτη [2].

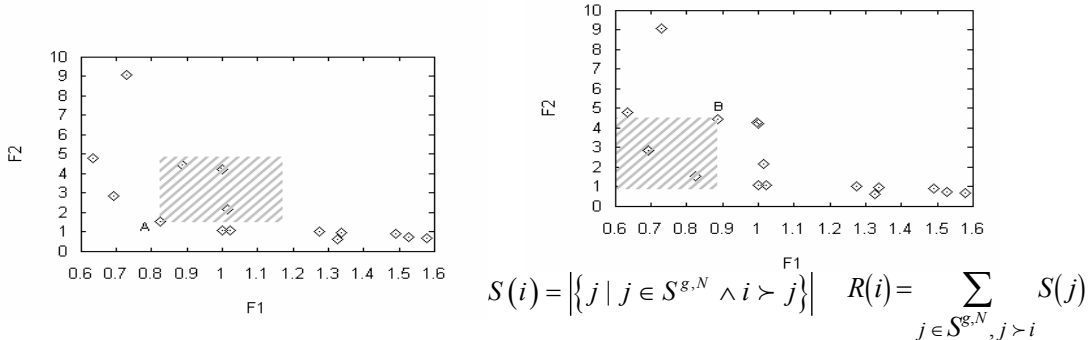
Χαρακτηριστικά της μεθόδου SPEA II είναι τα εξής:

- Στην αξιολόγηση ενός ατόμου που ανήκει στο υπερσύνολο γονέων, απογόνων και επίλεκτων λαμβάνονται υπόψη τα κυριαρχούμενα από αυτό και τα κυρίαρχα σε αυτό άτομα.

- Στην ενιαία τιμή της συνάρτησης κόστους προσμετρείται η επίδραση της απόστασης μεταξύ των πιο γειτονικών ατόμων.
- Εγγυάται τη διατήρηση των λύσεων, που βρίσκονται στα άκρα του μετώπου Pareto.
- Στόχος της μεθόδου είναι να αντιμετωπίσει τις δυσκολίες της SPEA, που αντιστοιχούν άμεσα στα προηγούμενα χαρακτηριστικά.

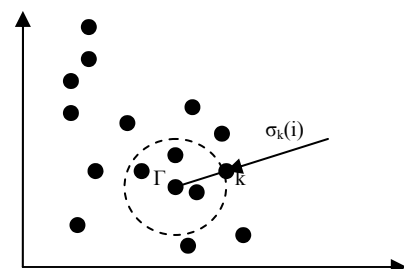
Έστω ένα πρόβλημα δύο στόχων που ελαχιστοποιείται με εξελικτικούς αλγορίθμους. Σε κάθε άτομο i , από το σύνολο $S^{g,N} = (S^{g,\mu} \cup S^{g,\lambda} \cup S^{g,e})$ (γονέων, απογόνων, επίλεκτων) αντιστοιχίζεται μια τιμή καταλληλότητας, που συνίσταται από δύο παράγοντες $F(i) = R(i) + D(i)$.

Ο παράγοντας $R(i)$ αναφέρεται στον αριθμό των λύσεων στις οποίες κυριαρχεί το άτομο i . Για να θεωρείται μια λύση i κυριαρχούμενη από την j θα πρέπει όλες οι τιμές που αποδίδονται στους στόχους με την i να είναι μεγαλύτερες από εκείνες με την j . Έτσι, αρχικά σ' όλα τα άτομα αντιστοιχίζεται ένας αριθμός $S(i)$ (strength) που εκφράζει το πλήθος των κυριαρχούμενων και ερμηνεύεται ως δυναμικότητα του ατόμου λόγω θέσης. Στη συνέχεια αποδίδεται τιμή στον παράγοντα $R(i)$ ίση με το άθροισμα των ισχύων $S(k)$ όλων των λύσεων k που κυριαρχούν στο άτομο i :



Σχήμα . Στο πρώτο γράφημα φαίνεται ο υπολογισμός της ισχύος $S(A)$ για ένα άτομο A . Στο δεύτερο γράφημα παρουσιάζεται ο υπολογισμός του παράγοντα $R(B)$.

Ο αντίστροφος της απόστασης $\sigma_k(i)$ μεταξύ του ατόμου i και του k πιο κοντινού γείτονα σ' αυτό, δίνει τον παράγοντα $D(i)$ και έχει φυσική σημασία πυκνότητας λύσεων σε ένα πεδίο τιμών των στόχων. Η απόσταση $\sigma_k(i)$ υπολογίζεται στο χώρο των στόχων της αντικειμενικής συνάρτησης, ως η ευκλείδεια απόσταση μεταξύ των ατόμων i και j . $\sigma_k(i) = \min_k \{ \text{dist}(j,i) \}$, $k = \sqrt{N}$, όπου: $N = \mu + \lambda + e$ και



τελικά: $D(i) = \frac{1}{\sigma_k(i) + 2}$. Το πεδίο ορισμού του $D(i)$ είναι το $(0,1)$. Επειδή το $\sigma(i)$ δεν

αποκλείεται να μηδενίζεται, για να εξασφαλιστεί ότι η πυκνότητα θα είναι πάντα μικρότερη της μονάδας, προστίθεται στον παρονομαστή το 2.

Πιστοποίηση της τεχνικής SPEA II

Η αναγκαιότητα πιστοποίησης της τεχνικής, που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της εργασίας, προκάλεσε τη δημιουργία ενός τμήματος στο οποίο δοκιμάζονται και συγκρίνονται οι επιδόσεις τους με βιβλιογραφικά δεδομένα πάνω σε γνωστά δύσκολα μαθηματικά προβλήματα ελαχιστοποίησης δύο στόχων. Ελέγχθηκε πόσο καλά συγκλίνει ο αλγόριθμος στο πραγματικό μέτωπο βέλτιστων λύσεων, συγκρίθηκαν οι επιδόσεις του με τον NSGA, εξετάστηκε αν η σύγκλιση είναι τυχαία και πόσο επηρεάζεται από διάφορες παραμέτρους της βελτιστοποίησης.

Για καθένα από τα προβλήματα αυτά, ενώ η αναλυτική έκφραση του βέλτιστου μετώπου Pareto είναι γνωστή, ωστόσο ο εντοπισμός της χρησιμοποιώντας εξελικτικούς αλγορίθμους είναι δύσκολος. Γι' αυτό το λόγο αποτελούν συνήθεις

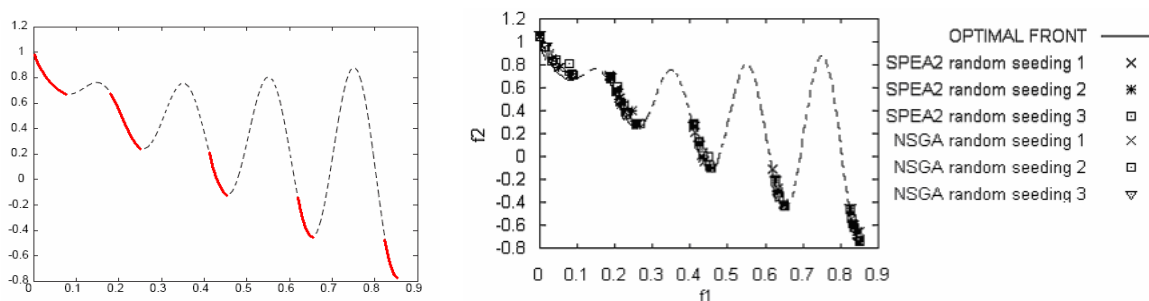
εφαρμογές πιστοποίησης μεθόδων αξιολόγησης λύσεων στη διεθνή βιβλιογραφία. Όλα διέπονται από τα εξής βασικά χαρακτηριστικά:

1. Η αντικειμενική συνάρτηση κάθε προβλήματος διαθέτει δύο συναρτήσεις f_1 και f_2 προς ελαχιστοποίηση. Δύο στόχοι είναι αρκετοί για να αναδειχτούν οι βασικές όψεις μιας βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων.
2. Ο δομικός κορμός των δοκιμαστικών συναρτήσεων είναι παρόμοιος και συντίθεται από τρεις συναρτήσεις f_1 , g και h .
3. Από το διάνυσμα των παραμέτρων $\vec{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, η πρώτη παράμετρος x_1 ορίζει αποκλειστικά την τιμή του πρώτου στόχου: $f_1 = f_1(x_1)$
4. Η συνάρτηση g εξαρτάται από τις παραμέτρους $\{x_2, \dots, x_n\}$, ενώ η συνάρτηση του δεύτερου στόχου είναι το γινόμενο των βασικών συναρτήσεων g και h : $f_2 = g(x_2, \dots, x_n) \cdot h(f_1(x_1), g(x_2, \dots, x_n))$
5. Τα προβλήματα διαφέρουν μεταξύ τους ως προς τον αριθμό των μεταβλητών που χρησιμοποιούν, καθώς επίσης και ως προς τις συναρτήσεις f_2 , g και h , ενώ οι παράμετροι x_i μπορεί να είναι πραγματικοί αριθμοί ή σειρές δυαδικών ψηφίων $\{0,1\}$ (πχ. ZDT5).

1^ο Στάδιο Πιστοποίησης. Έλεγχος Σύγκλισης και Σύγκριση με NSGA.

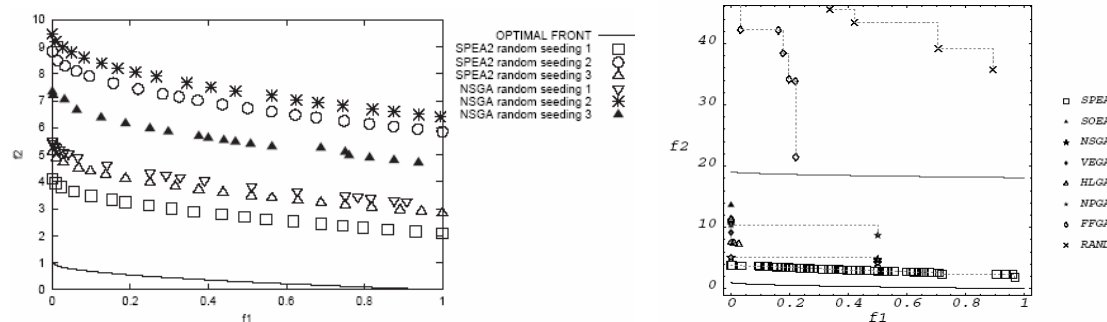
Στα γραφήματα που ακολουθούν παρουσιάζονται εν συντομία ορισμένα από τα αποτελέσματα εφαρμογής του αλγορίθμου σε ορισμένα από τα έξι προβλήματα, που παρουσιάζονται στο κείμενο της εργασίας. Η σύγκλιση του αλγορίθμου παρακολουθείται ακολούθως με την παρουσίαση των επίλεκτων στο διάγραμμα των στόχων $[f_1, f_2]$ σε 50, 150 και 250 γενιές. Για τα περισσότερα από τα έξι προβλήματα είναι γνωστή η τιμή της $g(x)$ που αντιστοιχεί στο βέλτιστο θεωρητικό μέτωπο. Έτσι, ένα ποσοτικό μέτρο ελέγχου της ποιότητας της σύγκλισης είναι η απόκλιση της $g(x)$ από τη βέλτιστη τιμή της (πχ. $|1-g(x)|$).

i) ZDT3



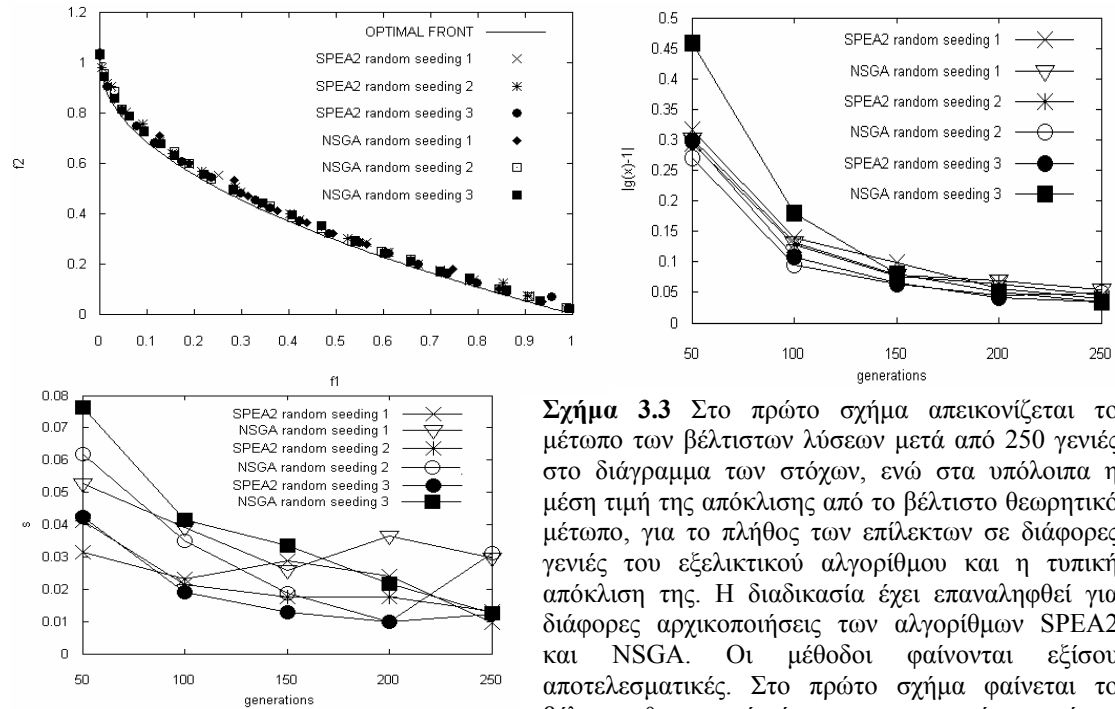
Σχήμα 3.3 Αντιμετώπιση προβλήματος ασυνεχούς βέλτιστου κατά Pareto μετώπου (πρώτο σχήμα – τμήματα με έντονη γραμμή) με επιτυχία και για τις δύο μεθόδους (SPEA II - NSGA), ανεξάρτητα από την αρχικοποίηση.

ii) ZDT4



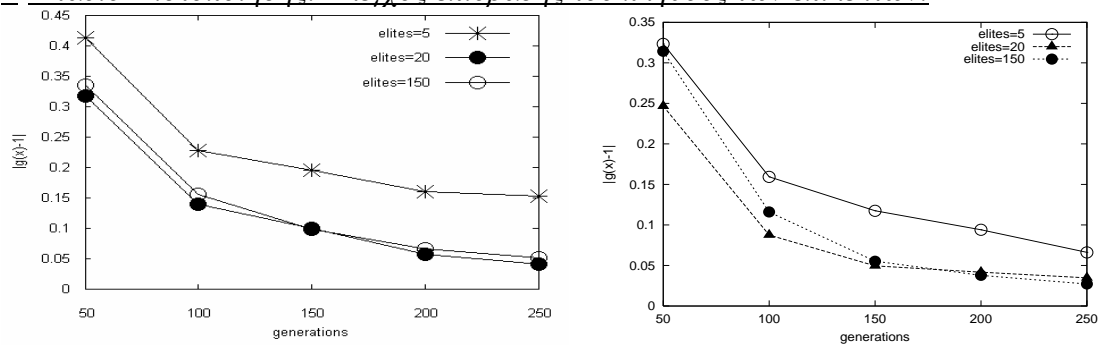
Σχήμα 3.3 Στο πρώτο γράφημα φαίνονται οι επίλεκτοι στις 250 γενιές για διάφορες αρχικοποιήσεις των SPEA II και NSGA, ενώ στο δεύτερο παρουσιάζονται αντίστοιχα αποτελέσματα από τη βιβλιογραφία. Φαίνεται ότι η SPEA II παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ευελιξία σε προβλήματα πολλών μετώπων τοπικά βέλτιστων λύσεων, συγκριτικά με άλλες μεθόδους.

iii) ZDT1

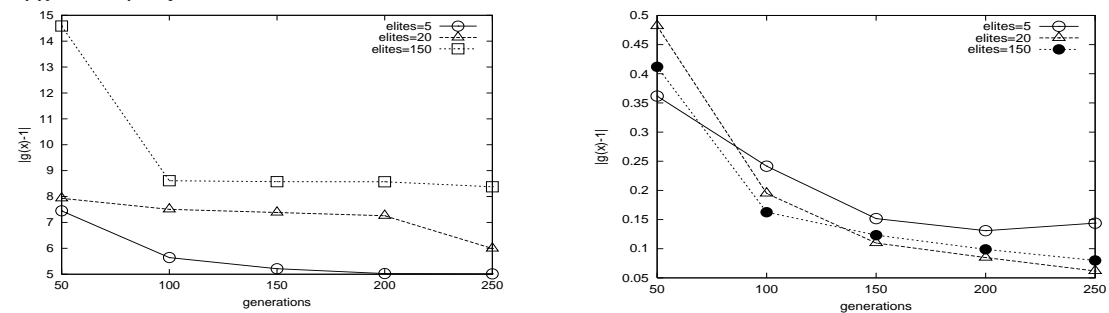


Σχήμα 3.3 Στο πρώτο σχήμα απεικονίζεται το μέτωπο των βέλτιστων λύσεων μετά από 250 γενιές στο διάγραμμα των στόχων, ενώ στα υπόλοιπα η μέση τιμή της απόκλισης από το βέλτιστο θεωρητικό μέτωπο, για το πλήθος των επίλεκτων σε διάφορες γενιές του εξελικτικού αλγορίθμου και η τυπική απόκλιση της. Η διαδικασία έχει επαναληφθεί για διάφορες αρχικοποιήσεις των αλγορίθμων SPEA2 και NSGA. Οι μέθοδοι φαίνονται εξίσου αποτελεσματικές. Στο πρώτο σχήμα φαίνεται το βέλτιστο θεωρητικό μέτωπο με τη συνεχή γραμμή.

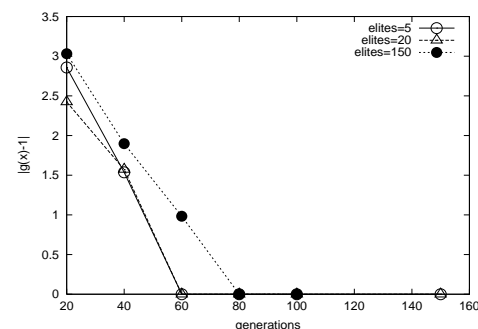
2^ο Στάδιο Πιστοποίησης. Έλεγχος επίδρασης του πλήθους των επίλεκτων.



Σχήμα 3.3 Το μεγάλο πλήθος των επίλεκτων ευνοεί τη σύγκλιση, στα λιγότερο δύσκολα προβλήματα ZDT1 –ZDT2. Στην εργασία υπάρχει επιπλέον μελέτη των συμπερασμάτων για διάφορες αρχικοποιήσεις.



Σχήμα 3.3 ZDT3 - ZDT4: Στα περίπλοκα προβλήματα πολλών τοπικών ακροτάτων ή ασυνεχών βέλτιστων μετώπων, το μεγάλο πλήθος επίλεκτων δε βοηθά πάντα.



Σχήμα 3.3 Ρυθμός σύγκλισης της ZDT6, σε τακτά χρονικά διαστήματα του εξελικτικού αλγορίθμου, για τρία μεγέθη πληθυσμών επίλεκτων. Το συμπέρασμα που προέκυψε για τα περισσότερα προβλήματα είναι ότι, εν τέλει, είναι προτιμότερο ένα μέσο πλήθος επίλεκτων.

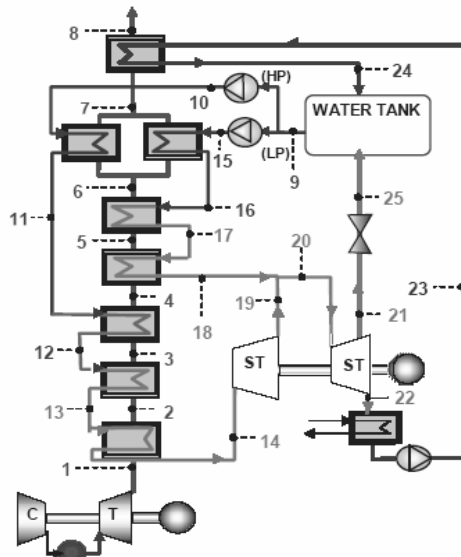
Βελτιστοποίηση σχεδιασμού μονάδας συνδυασμένου κύκλου αεριοστρόβιλου φυσικού αερίου με εμπορικά μοντέλα αεριοστρόβιλων

Το πρόβλημα του σχεδιασμού της βέλτιστης διάταξης συνδυασμένου κύκλου επιλύεται χρησιμοποιώντας συνδυασμούς παραμέτρων της λειτουργίας του σταθμού, οι οποίες, ανάλογα με το τμήμα του κύκλου που παρουσιάζονται, κινούνται εντός ορίων ή καθορίζονται από τυποποιημένα εμπορικά μεγέθη, όπως το τμήμα του αεριοστρόβιλου προσφέρεται στην αγορά αυτοτελές. Υιοθετήθηκε η μορφή λέβητα ανάκτησης θερμότητας δύο πιέσεων, που παρουσιάζεται στο σχήμα.

Στην εργασία αυτή, δύο περιπτώσεις βελτιστοποίησης σχεδιασμού της ίδιας διάταξης λέβητα ερευνήθηκαν:

i) Λαμβάνοντας επιπλέον ελεύθερες παραμέτρους: λόγο πίεσης και λόγο αέρα καύσης του αεριοστρόβιλου. Η διαδικασία αποδίδει ένα ‘θεωρητικό’ βέλτιστο μέτωπο λύσεων. Για τον προσδιορισμό του μετώπου αυτού χρησιμοποιήθηκε ο αλγόριθμος SPEA II, που προγραμματίστηκε στα πλαίσια της εργασίας.

ii) Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα λειτουργίας στο ονομαστικό σημείο σχεδίασης 19 επιλεγμένων εμπορικών αεριοστρόβιλων, οι οποίοι διαφέρουν στο βαθμό απόδοσης, την παραγόμενη ισχύ και τον τύπο (παράγωγος αεροπορικού ή βιομηχανικός) και επαναλαμβάνοντας 19 φορές τη διαδικασία για κάθε μοντέλο.



Σχήμα 4.4 Σχηματική αναπαράσταση διάταξης συνδυασμένου κύκλου που βελτιστοποιείται.

Σε κάθε περίπτωση από τις προηγούμενες, στόχοι της βελτιστοποίησης είναι: (α) η μεγιστοποίηση της ολικής απόδοσης και (β) της ολικής παραγόμενης ισχύος σε συνδυασμένο κύκλο.

Στην πρώτη περίπτωση ζητείται η παραγωγή 120 MW από τον αεριοστρόβιλο. Στην περίπτωση των 19 αεριοστρόβιλων και για κάθε μοντέλο χωριστά, χρησιμοποιούνται 1~5 μηχανές (ίδιο μοντέλο), έτσι ώστε να παράγονται αθροιστικά περίπου 120 MW.

Η διαδικασία της βελτιστοποίησης χρησιμοποιεί τις φυσικές εξισώσεις που περιγράφουν τη λειτουργία της διάταξης, αφήνοντας ελεύθερες ορισμένες θερμοδυναμικές ή ενεργειακές παραμέτρους των εξισώσεων αυτών.

Μερικές από αυτές μεταβάλλονται εντός συμβατών ορίων, ενώ άλλες διατηρούνται σταθερές κατά την αναζήτηση της βέλτιστης λύσης. Παρουσιάζονται τα σταθερά μεγέθη που αφορούν κυρίως στη λειτουργία του αεριοστρόβιλου:

- Από δεδομένα που προσφέρει ο κατασκευαστής, θεωρούνται γνωστά:
 1. Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το στρόβιλο, T_5 ή EGT.
 2. Η παροχή μάζας των καυσαερίων m_{gas} .
 3. Ο θερμοκός βαθμός απόδοσης σε απλό κύκλο του αεριοστρόβιλου, η_{GT} .

Επαναλήφθηκαν τρεις διαφορετικές δοκιμές βελτιστοποίησης για τρία διαφορετικά ζεύγη τιμών των πολυτροπικών βαθμών απόδοσης συμπιεστή και στρόβιλου: $\{0,85 - 0,75\}$, $\{0,9 - 0,7\}$, $\{0,9 - 0,75\}$.

Ακολουθεί παρουσίαση των μεταβλητών σχεδίασης του λέβητα.

- Η χαμηλή και η υψηλή πίεση στα κυκλώματα διακίνησης του νερού:

$$\{p_{lp}\} \in [20 \sim 100 \text{ bar}] \quad \& \quad \{p_{hp}\} \in [2 \sim 15 \text{ bar}].$$
- Η ολική πίεση στον προθερμαντήρα συμπυκνώματος και της τροφοδοσίας:

$$\{p_{feed}\} \in [1,1 \sim 1,99 \text{ bar}]$$

- Η θερμοκρασία του νερού στην έξοδο του δεύτερου οικονομητήρα υψηλής πίεσης (σημείο 11 για το νερό και αντίστοιχα σημείο 6 για τα καυσαέρια):
 $\{ T_{\text{water11}} \} \in [120 \sim 180 \text{ }^\circ\text{C}]$.
- Η θερμοκρασία των καυσαερίων στην έξοδο των οικονομητήρων:
 $\{ T_{\text{gases7}} \} \in [115 \sim 155 \text{ }^\circ\text{C}]$
- Η θερμοκρασιακή μεταβολή στην πλευρά εισόδου των καυσαερίων του υπερθερμαντήρα, στον κλάδο υψηλής πίεσης, {έξοδος του ατμού - είσοδος καυσαερίων}:
 $\{ T_{\text{gases1}} - T_{\text{steam14}} \} \in [54 \sim 10 \text{ }^\circ\text{C}]$.
- Η διαφορά στη θερμοκρασία του εισερχόμενου νερού και του εξερχόμενου κορεσμένου ατμού, περνώντας τον ατμοποιητή υψηλής πίεσης:
 $\{ T_{\text{satur13}} - T_{\text{water12}} \} \in [5 \sim 2 \text{ }^\circ\text{C}]$.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας του νερού περνώντας τους οικονομητήρες χαμηλής πίεσης:
 $\{ T_{\text{water16}} - T_{\text{water15}} \} \in [5 \sim 2 \text{ }^\circ\text{C}]$
- Η μεταβολή στη θερμοκρασία του ατμού περνώντας από τον υπερθερμαντή χαμηλής:
 $\{ T_{\text{steam18}} - T_{\text{satur17}} \} \in [15 \sim 50 \text{ }^\circ\text{C}]$
- Η θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων από το λέβητα ως διαφορά από τους 95°C : $\{ T_{\text{gases8}} - 95 \text{ }^\circ\text{C} \} \in [8,0 \sim 15,0 \text{ }^\circ\text{C}]$
- Το ποσοστό επί τη συνολική μάζα των καυσαερίων \dot{m}_{gas} που διακινείται στον οικονομητήρα χαμηλής πίεσης: $\{ r \} \in [0,1 \sim 0,45]$
 Στον προσδιορισμό της βέλτιστης θεωρητικής διάταξης, οι επιπλέον μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν είναι οι ακόλουθες:
 - Λόγος πίεσης στο συμπιεστή: $\{ \pi_c \} \in [12 \sim 30]$
 - Λόγος αέρα καύσης: $\{ \lambda \} \in [2,7 \sim 3,6]$
 Στους πίνακες που ακολουθούν φαίνονται τα μοντέλα που χρησιμοποιήθηκαν:

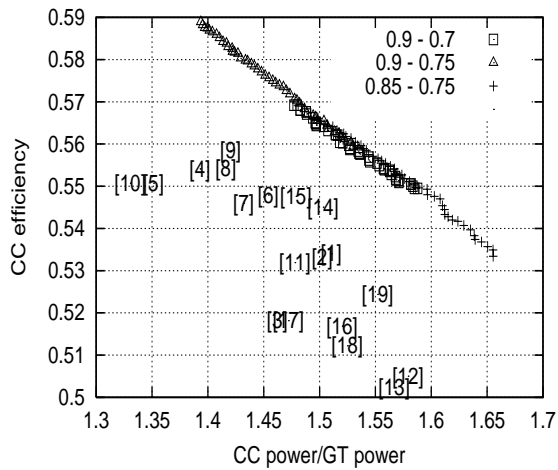
	Όνομα	Εταιρεία κατασκευής	Ισχύς (kW ISO)	Βαθμός Απόδοσης	EGT ($^\circ\text{C}$)	Παροχή Καυσαερίων (kg/s)
1	LM2500PJ	GE	21719	35,35%	533,3	68,8
2	LM2500PE	GE	21820	35,48%	528,3	69,4
3	LM2500+6STG	GE	29244	35,44%	519,4	87,9
4	LM2500+2STG	GE	30349	39,78%	499,4	84,4
5	LM6000PD	GE	41711	40,75%	447,7	126,9
6	RB211-6762 DLE	Rolls-Royce	29500	37,68%	493,3	95,8
7	DRG61GP	Dresser-Rand	30280	38,13%	515	87,2
8	VECTRA-40G	Dresser-Rand	30281	39,14%	513,3	84,5
9	RB211-6761 DLE	Rolls-Royce	32120	39,31%	503,3	94,5
10	DR63G	Dresser-Rand	42984	41,39%	440	128,1

Πίνακας 4. 1 Αεροπορικού τύπου αεριοστρόβιλοι.

	Όνομα	Εταιρεία κατασκευής	Ισχύς (kW ISO)	Βαθμός Απόδοσης	EGT ($^\circ\text{C}$)	Παροχή Καυσαερίων (kg/s)
11	GT10C	Siemens	29060	35,99%	91,2	518
12	MF-221	Mitsubishi	30000	31,98%	108,1	532,7
13	PG6581(B)	GE	42100	32,06%	141,3	547,7
14	PG6591C	GE	42300	36,26%	117,2	569,4
15	GTX100	Siemens	43000	37,03%	122,7	546
16	GT8C2	Alstom Power	57000	34,00%	200,4	508
17	V64,3	Siemens	63000	35,20%	192,2	531
18	GT11N2	Alstom Power	116500	33,95%	400,8	530
19	PG9171(E)	GE	126100	33,79%	418,5	542,7

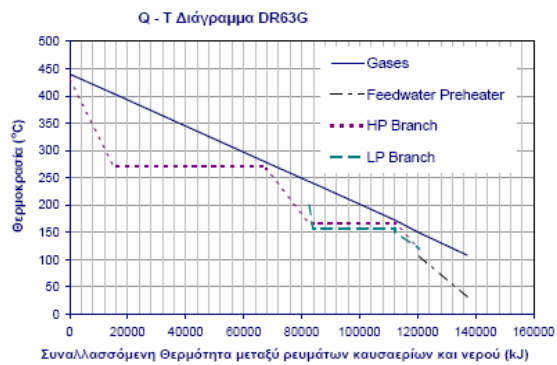
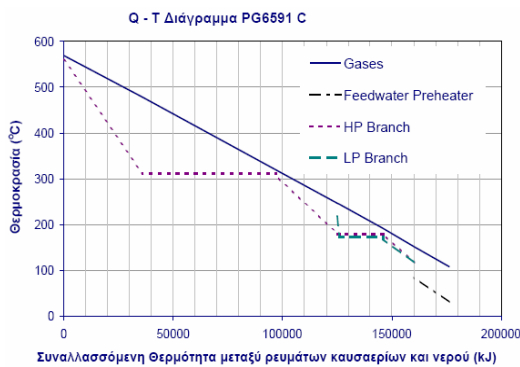
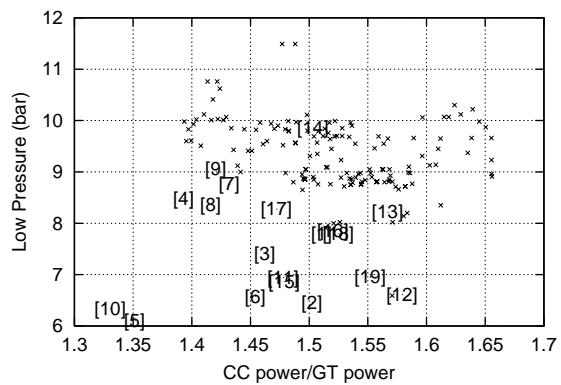
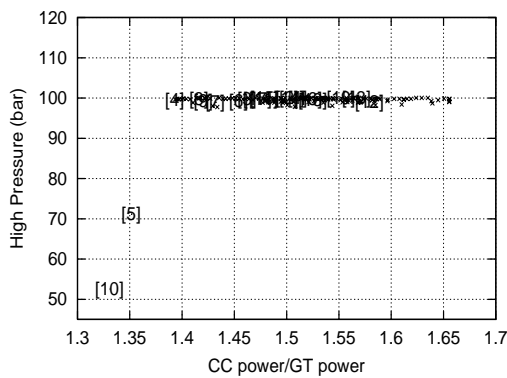
Πίνακας 4. 2 Αεριοστρόβιλοι βιομηχανικού τύπου.

Αποτελέσματα βελτιστοποίησης στο χώρο των στόχων της βελτιστοποίησης



Σχήμα 4.6 Παρουσίαση των αποτελεσμάτων της βελτιστοποίησης του λέβητα των 19 μοντέλων αεροστροβίλων και του θεωρητικού μετώπου στο χώρο των στόχων της αντικειμενικής συνάρτησης. Στον άξονα των x είναι η ανηγμένη ισχύς του συνδυασμένου κύκλου στην ισχύ της διάταξης του αεροστροβίλου, ώστε να υπάρχει δίκαιη σύγκριση μεταξύ των μοντέλων αεροστροβίλων, ενώ στον άξονα των y είναι ο ολικός βαθμός απόδοσης. Στο σχήμα παρουσιάζεται ταυτόχρονα το βέλτιστο μέτωπο λύσεων, που προκύπτει έχοντας ελεύθερες τις παραμέτρους λειτουργίας του αεροστροβίλου, χωρίς περιορισμό για την EGT, με μοναδικό περιορισμό για τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο (1350°C).

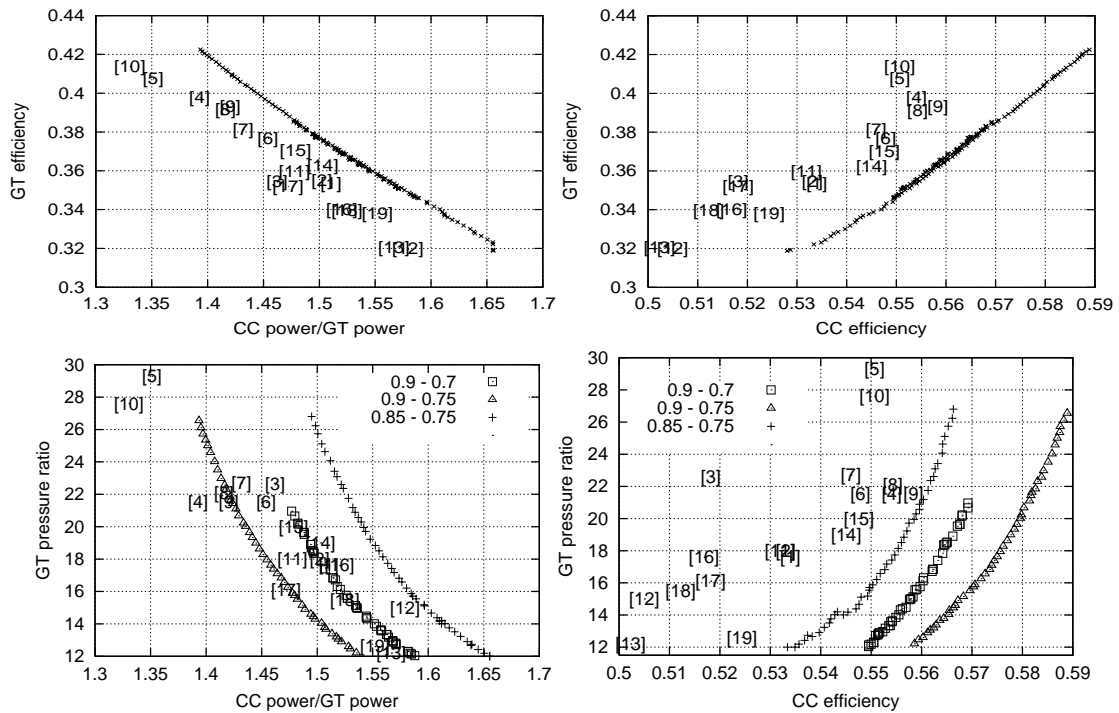
Αποτελέσματα βελτιστοποίησης στο χώρο των μεταβλητών



Σχήμα 4.10 Στα δύο πρώτα διαγράμματα παρουσιάζονται οι τιμές για την υψηλή και χαμηλή πίεση μετάδοσης του νερού μέσα στο λέβητα, συγκριτικά με το λόγο της ισχύος του κύκλου προς την ισχύ της διάταξης των αεροστροβίλων. Σε αεροστροβίλους με υψηλή τιμή της EGT [14], η μεγάλη πίεση προσκολλάται στη μέγιστη τιμή της, αντίθετα μ' εκείνους με χαμηλή EGT [10] (αεροπορικού τύπου). Παρουσιάζονται τα αντίστοιχα διαγράμματα συναλλασσόμενης θερμότητας – θερμοκρασιών ρευμάτων καυσαερίων-νερού/ή ατμού. Ο τρόπος με τον οποίο μεταβάλλεται η χαμηλή πίεση δεν φανερώνει καμία ιδιαίτερη συσχέτιση με τις επιδόσεις του σταθμού.

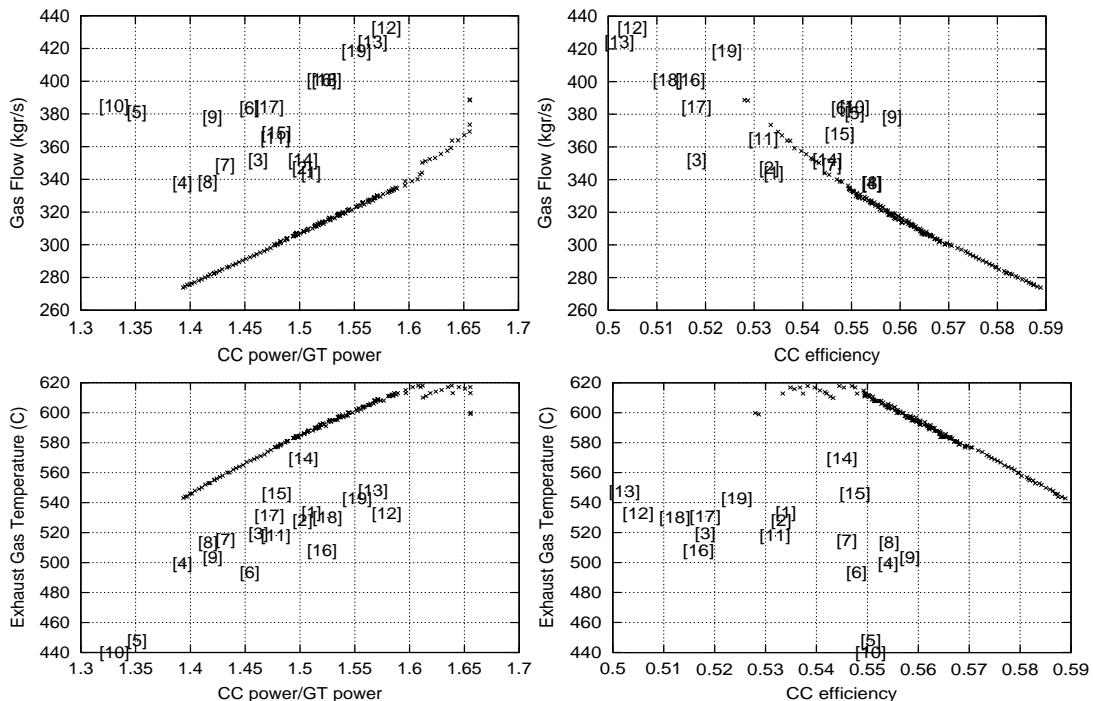
Τα χαρακτηριστικά του αεροστροβίλου επηρεάζουν άμεσα το σχεδιασμό του λέβητα, αφού καθορίζουν την ποιότητα των καυσαερίων. Σε διαγράμματα που θα παρουσιαστούν παρακάτω και αφορούν στα αποτελέσματα της βελτιστοποίησης φαίνεται η επίδρασή τους στο συνδυασμένο κύκλο.

Βαθμός απόδοσης και λόγος πίεσης αεροστροβίλου



Σχήματα 4.13 - 4.14 Συσχετίζοντας το βαθμό απόδοσης του αεριοστροβίλου με το λόγο της τελικής ισχύος του συνδυασμένου κύκλου προς την ισχύ από τη διάταξη των αεριοστροβίλων, προκύπτει το συμπέρασμα ότι ο υψηλός βαθμός απόδοσης σε απλό κύκλο συνεπάγεται υψηλή απόδοση και χαμηλή παραγωγή ισχύος στο συνδυασμένο κύκλο. Ανάλογη συσχέτιση με τους στόχους της βελτιστοποίησης έχει ο λόγος πίεσης του αεριοστροβίλου, επειδή η αύξησή του προκαλεί αύξηση του βαθμού απόδοσης του αεριοστροβίλου.

Παροχή μάζας καυσαερίων και θερμοκρασία εξόδου καυσαερίων από το στρόβιλο



Σχήμα 4.15 Όπως στον απλό κύκλο, έτσι και στο συνδυασμένο η αύξηση της παροχής του εργαζόμενου μέσου επιφέρει αύξηση της ισχύος. Όμοια και για την EGT. Τις καλύτερες επιδόσεις ως προς την ισχύ εμφανίζουν οι αεριοστροβίλοι με υψηλή θερμοκρασία εξόδου των καυσαερίων προς το λέβητα, όπως φαίνεται στο σχήμα. Σημαντικό είναι να παρατηρηθεί ότι για το θεωρητικό βέλτιστο μέτωπο, η θερμοκρασία εισόδου στο λέβητα είναι πολύ υψηλή. Η παρατήρηση αυτή φανεράνει ότι αεριοστροβίλοι που διαθέτουν υψηλή τιμή για την EGT, αποδίδουν καλά σε συνδυασμένο κύκλο, παρ' ότι στον απλό κύκλο ο βαθμός απόδοσής τους είναι χαμηλός.

Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Ανακεφαλαιώνοντας, η παρούσα εργασία αναπτύχθηκε σε δύο διαφορετικά πλαίσια: α) Σε πρώτη φάση, μετά από ανάπτυξη, προγραμματισμό και πιστοποίηση του αλγορίθμου SPEA II, συνοψίζουμε πάνω στα θετικά του στοιχεία: η συνάρτηση υπολογισμού ενιαίας τιμής κόστους των ατόμων κάθε γενιάς, ανεξάρτητα από το σύνολο στο οποίο ανήκουν, λαμβάνει υπόψη τόσο την κυριαρχία, όσο και τη γειννίαση, συνδυάζοντας θετικά χαρακτηριστικά προγενέστερων αλγορίθμων. Έτσι, επιβάλλεται η αραίωση του μετώπου, αποδίδεται ένα πιο ομοιόμορφο μέτωπο λύσεων και εξασφαλίζονται οι οριακές λύσεις του βέλτιστου μετώπου.

β) Σε δεύτερη φάση ερευνήθηκε ο σχεδιασμός και η βέλτιστη λειτουργία δεδομένης διάταξης συνδυασμένου κύκλου, με στόχους τη μεγιστοποίηση της συνολικής παραγόμενης ισχύος και της απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου, στο ονομαστικό σημείο λειτουργίας του αεριοστροβίλου, σε δύο στάδια:

i) Θέτοντας ως επιπλέον μεταβλητές της βελτιστοποίησης το λόγο πίεσης, το λόγο αέρα καύσης του αεριοστροβίλου, χρησιμοποιώντας το σχήμα SPEA2, που προγραμματίστηκε στο πρώτο σκέλος της εργασίας και υπολογίζοντας έτσι ένα βέλτιστο θεωρητικό μέτωπο Pareto,

ii) Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του κατασκευαστή για το ονομαστικό σημείο λειτουργίας 19 επιλεγμένων μοντέλων εμπορικών αεριοστροβίλων.

Από τη σύγκριση των αποτελεσμάτων των δύο σταδίων μεταξύ τους επαληθεύτηκαν συμπεράσματα όπως ότι η βέλτιστη λειτουργία του λέβητα ανάκτησης θερμότητας επιτυγχάνεται για τη μεγαλύτερη διαφορά πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου στον αμοστροβίλο, όπως η αναλογική σχέση μεταξύ της απόδοσης του αεριοστροβίλου και της συνολικής απόδοσης του συνδυασμένου κύκλου και η αντίστροφα ανάλογη σχέση της με τη συνολική ισχύ του κύκλου. Επίσης, διαπιστώθηκε ότι η αύξηση της θερμοκρασίας εξόδου των καυσαερίων και της παροχής τους ευνοούν την συνολική παραγόμενη ισχύ, όμως συνεπάγονται κακό βαθμό απόδοσης του αεριοστροβίλου και δαπάνη καυσίμου. Παρατηρήθηκε ότι όλα τα εμπορικά μοντέλα κυριαρχούνται από το βέλτιστο θεωρητικό μέτωπο Pareto, οι λύσεις του οποίου διαθέτουν πολύ υψηλή τιμή θερμοκρασίας εξόδου από τον αεριοστροβίλο, ενώ σε γενικές γραμμές ότι οι βιομηχανικού τύπου αεριοστροβίλοι εμφανίζουν καλύτερες επιδόσεις σε συνδυασμένο κύκλο από τους παράγωγους αεροπορικών, παρά το γεγονός ότι σε απλό κύκλο, οι επιδόσεις των δεύτερων είναι καλύτερες, ιδιαίτερα όσον αφορά στο βαθμό απόδοσης.

Βιβλιογραφία

[1] E.Zitzler, M.Laumanns & L.Thiele, “SPEA2: Improving the strength Pareto EA for MO”, Evolutionary Methods For Design, Optimization and Control, CIMNE, Barcelona, Spain 2002.

[2] Γιώτης Π. Αλέξης “ Χρήση Εξελικτικών Τεχνικών, Υπολογιστικής Ευφυΐας και Μεθόδων Υπολογιστικής Ρευστομηχανικής στη Βελτιστοποίηση – Αντίστροφη Σχεδίαση Πτερυγώσεων Στροβιλομηχανών, Μέσω Παράλληλης Επεξεργασίας” Διδακτορική διατριβή, Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών, Εργαστήριο Θερμικών Στροβιλομηχανών Αθήνα, 2003

[3] E.T.Bonataki, A.P.Giotis & K.C.Giannakoglou, “Multiobjective design of optimal CCPP with supplementary firing”, EUROGEN 2003, Barcelona, Spain, Sep 1517, 2003

[4] E.T.Bonataki, L.S.Georgoulis, Ch.Georgopoulou & K.C.Giannakoglou, “Optimal design of CCPP based on Gas Turbine performance data”, ERCOFTAC 2004, Design Optimization International Conference, March 31- April 2, Athens, Greece 2004