



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Παραγωγή και Διαχείριση Ενέργειας»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Ανασκόπηση Εφαρμογών Επίγειας Πρόωσης
Με Αεριοστρόβιλο »*

Του Μεταπτυχιακού Φοιτητή

Θεοδοσίου Γ. Λέδε

Επιβλέπων

Ευάγγελος Γ. Γιακουμής, Αναπλ. Καθηγητής Ε.Μ.Π, Σχολή
Μηχανολόγων Μηχανικών Ε.Μ.Π

Αθήνα, Ιούλιος 2016

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract.....	5
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ^ο	6
ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΙΣΧΥΟΣ	6
1.1 Γενικές αρχές	6
1.2 Εγκατάσταση Αεριοστροβίλου με Στρόβιλο Ισχύος.....	12
1.3 Εγκατάσταση Αεριοστροβίλου με Ανακομιστή Θερμότητας.....	14
1.4 Σύνθετες Εγκαταστάσεις με Ενδιάμεση Ψύξη και Αναθέρμανση.....	16
1.5 Συγκεντρωτικά Χαρακτηριστικά – Υποσυστήματα – Εφαρμογές	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ^ο	23
ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΣΕ ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΤΟΣΥΚΛΕΤΕΣ	23
2.1 Σύγκριση αεριοστροβίλων με ταχύστροφους κινητήρες Diesel	23
2.1.1 Το πρώτο αυτοκίνητο με αεριοστρόβιλο της Chrysler	27
2.1.2 General Motors Firebird	28
2.1.3 Rover «Jet 1»	31
2.1.4 Fiat Gas Turbine Type 8001.....	32
2.1.5 Volvo Environmental Concept Car	33
2.1.6 EcoJet concept car.....	34
2.1.7 Jaguar C-X75.....	36
2.2 Αγωνιστικά αυτοκίνητα με χρήση αεριοστροβίλων.....	36
2.3 Μοτοσυκλέτες (δίκυκλα) με αεριοστρόβιλο.....	38
2.4 Άρματα μάχης με αεριοστρόβιλο	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ^ο	43
ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΣΕ ΤΡΕΝΑ ΚΑΙ ΦΟΡΤΗΓΑ	43
3.1 Τρένα με αεριοστροβίλους.....	43
3.2 Ηνωμένο Βασίλειο	44
3.2.1 «British Rail APT-E».....	45
3.2.2 British Rail GT3	45
3.3 Γαλλία.....	45
3.3.1 TGS (Turbine a gaz special) Prototype – XR8575 Trainset	46
3.3.2 Class T 1000 ETG Trains	46
3.3.3 Class T 2000 RTG Trains	46

3.3.4 TGV 001 Experimental High-Speed Train	46
3.4 Ηνωμένες Πολιτείες	47
3.5 Καναδάς	50
3.6 Σοβιετική Ένωση – Ρωσία	50
3.7 Αεριοστρόβιλοι σε φορτηγά.....	51
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4°	53
ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΩΣ ΜΕΣΟ ΠΡΟΩΣΗΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ.....	53
4.1 Γενικά για τους αεριοστρόβιλους στη ναυτιλία	53
4.2 Πλεονεκτήματα.....	53
4.3 Μειονεκτήματα.....	54
4.4 Πλοία με αεριοστρόβιλους απλού κυκλώματος	55
4.5 Πλοία με αεριοστρόβιλους συνδυασμένου κύκλου	61
4.5.1 Combined Diesel And Gas (CODAG)	61
4.5.2 Combined Diesel Or Gas (CODOG).....	66
4.5.3 Combined Gas turbine And Steam turbine (COGAS)	68
4.5.4 Combined Gas turbine and steam turbine intergrated Electric drive System (COGES) ..	69
4.5.5 Combined Diesel-electric And Gas (CODLAG)	71
4.5.6 Combined gas and gas (COGAG).....	73
4.5.7 Combined gas or gas (COGOG)	74
4.5.8 Combined steam and gas (COSAG)	75
4.6 Φορτηγά πλοία.....	77
4.7 Συμπεράσματα	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	80

Περίληψη

Στην εργασία αυτή θα πραγματοποιηθεί μια λεπτομερής ιστορική ανασκόπηση εφαρμογών επίγειας πρόωσης που διαθέτουν ως μονάδα ισχύος αεριοστρόβιλο. Στο πλαίσιο αυτό, θα παρουσιαστούν σχετικές περιπτώσεις αυτοκινήτων, μοτοσυκλετών, φορητών, τρένων, πολεμικών οχημάτων και διαφόρων ναυτικών χρήσεων. Επιπλέον, θα δοθεί έμφαση αφενός στις ιδιαιτερότητες των αεριοστροβιλικών εγκαταστάσεων και στα μειονεκτήματά τους που οδήγησαν στην περιορισμένη χρήση τους σε επίγεια πρόωση και αφετέρου στις συνδυασμένες εγκαταστάσεις με εμβολοφόρους κινητήρες και ηλεκτροκινητήρες.

Ευχαριστίες

Στο σημείο αυτό θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου, τον κύριο Ευάγγελο Γιακουμή για την άμεση και λεπτομερή καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας. Επιπλέον θα ήθελα να δηλώσω ευγνώμων στην οικογένειά μου αλλά και στους φίλους μου για την αμέριστη συμπαράστασή τους τα τελευταία δύο χρόνια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Abstract

The subject of this essay will be to present a thorough historical review of the applications of the means of by land and by water propulsion, whose power is generated by gas turbines. In this context, examples of automobiles, motorcycles, trucks, trains and military vehicles, as well as the use of gas turbines in ship propulsion are presented. In addition, great emphasis will be given firstly to the special characteristics of gas turbine installations and their disadvantages, which led to their limited use in land and sea propulsion and secondly to the combined installations of both piston engines and electric motors.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΑΡΧΕΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΙΣΧΥΟΣ

1.1 Γενικές αρχές

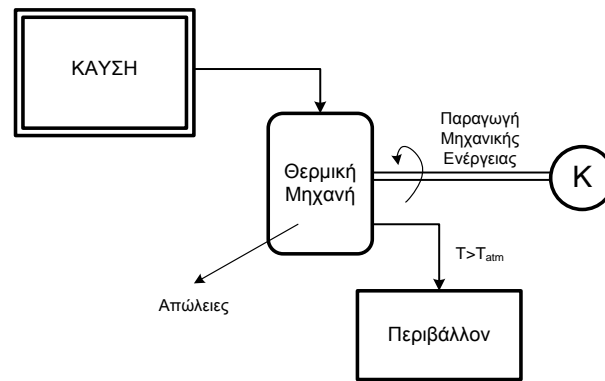
Οι αεριοστρόβιλοι (Α/Σ) (gas turbines) ανήκουν στην ευρύτερη κατηγορία των θερμικών μηχανών, Σχήμα 1.1, και ειδικότερα στις Μηχανές Εσωτερικής Καύσης (ΜΕΚ). Σε μια θερμική μηχανή, μέσω της καύσης μετατρέπεται η χημική ενέργεια του καυσίμου σε έργο (μηχανική ισχύ) διαθέσιμη σε μια περιστρεφόμενη άτρακτο, Σχήμα 1.2, καλύπτοντας έτσι σήμερα περίπου το 85% των παγκοσμίων ενεργειακών αναγκών (μια τάση που αναμένεται να συνεχιστεί και στο άμεσο μέλλον), αλλά και συνεισφέροντας σημαντικά στις εκπομπές βλαβερών ρύπων και διοξειδίου του άνθρακα. Ειδικότερα στις ΜΕΚ, το παραγόμενο από την καύση καυσαέριο είναι αυτό που (αποτονούμενο) παράγει τη μηχανική ισχύ (για αυτό χρησιμοποιείται ο όρος «εσωτερική καύση»), σε αντίθεση με τις μηχανές εξωτερικής καύσης π.χ. ατμοστρόβιλοι), όπου το καυσαέριο μεταφέρει τη θερμότητα του σε κάποιο άλλο εργαζόμενο μέσο (π.χ. υδρατμός), το οποίο και παράγει την τελικά ωφέλιμη ισχύ.



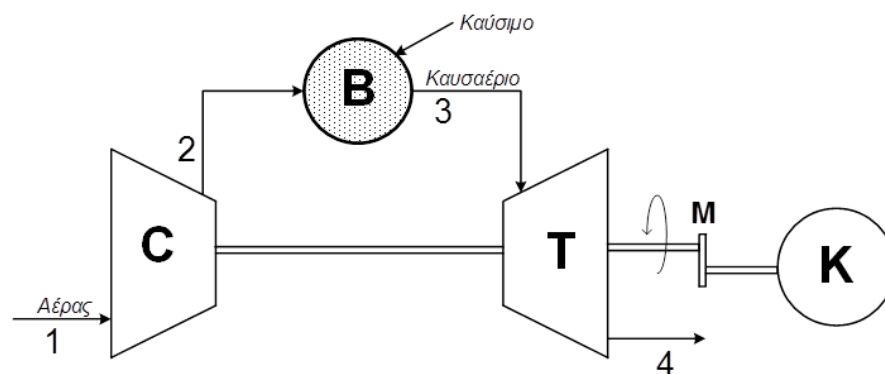
Σχήμα 1.1. Κατηγοριοποίηση θερμικών μηχανών [1]

Οι αεριοστρόβιλοι μπορούν να ταξινομηθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

- A) Βιομηχανικοί αεριοστρόβιλοι (παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας ή κίνησης συμπιεστών/αντλιών),
- B) Ναυτικοί αεριοστρόβιλοι (συμπεριλ. και τις ελάχιστες εφαρμογές πρόωσης οχημάτων),
- Γ) Αεροπορικοί αεριοστρόβιλοι (στροβιλο-αντιδραστήρες),
- Δ) Μικρο-στρόβιλοι (micro-turbines)



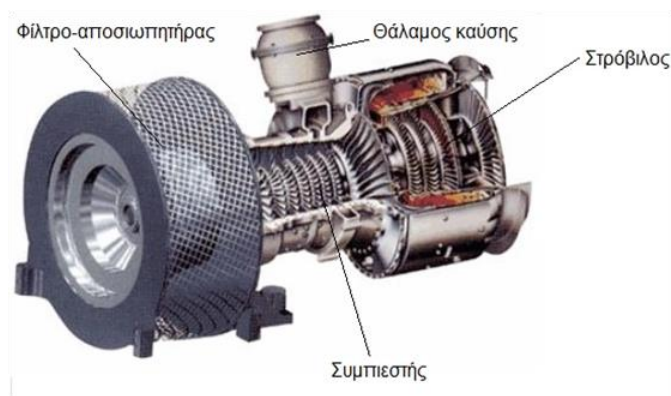
Σχήμα 1.2. Γενική αρχή λειτουργίας θερμικής μηχανής συνδεδεμένης με κατανάλωση K [1]



Σχήμα 1.3α. Σχηματικό διάγραμμα απλής διάταξης αεροστροβιλικής εγκατάστασης μιας ατράκτου συνδεδεμένης μέσω μειωτήρα M με κατανάλωση K [1]

Σε έναν αεροστρόβιλο το εργαζόμενο μέσο είναι αρχικά αέρας που αναρροφάται από το περιβάλλον και στη συνέχεια, μετά την καύση, καυσαέριο. Οι διεργασίες που πραγματοποιούνται, αλλά και οι βασικές συσκευές μηχανές ενός αεροστροβίλου ισχύος είναι (βλέπε και Σχήματα 1.3^α και 1.3^β):

1. Εισαγωγή του αέρα διαμέσου φίλτρου ή/και αποσιωπητήρα,
2. Συμπίεση του αέρα στο συμπιεστή C (Compressor) με σκοπό την αύξηση της πίεσης του (απαραίτητη για την μετέπειτα αποτόνωση) παράλληλα έχουμε και (μικρότερου μεγέθους) αύξηση της θερμοκρασίας,
3. Καύση του συμπιεσμένου αέρα στο θάλαμο καύσης B (Burner ή Combustor) με την κατάλληλη έγχυση καυσίμου, με σκοπό τη σημαντική αύξηση της θερμοκρασίας του εργαζόμενου μέσου ώστε να μεγιστοποιηθεί το όφελος στο επόμενο στάδιο,
4. Αποτόνωση του παραχθέντος καυσαερίου στο στρόβιλο T_a (Turbine) πρόκειται για τη διεργασία κατά την οποία παράγεται η ισχύς για την κίνηση του συμπιεστή, καθώς και η «καθαρή» ωφέλιμη μηχανική ισχύς από την κατανάλωση K ,
5. Εξαγωγή του καυσαερίου διαμέσου κατάλληλης διάταξης απαγωγής προς το περιβάλλον.



Σχήμα 1.3β. Φωτογραφία αεριοστροβίλου ανοικτού κυκλώματος [1]

Οι παραπάνω διεργασίες συνθέτουν έναν ανοικτό κύκλο λειτουργίας (προφανώς το καυσαέριο δε μπορεί να ξαναγίνει αέρας, άρα απορρίπτεται στο περιβάλλον μετά την αποτόνωσή του και αναρροφάται νέα ποσότητα αέρα), ο οποίος επαναλαμβάνεται συνέχεια.

Σε αντίθεση με τους εμβολοφόρους κινητήρες, όπου όλες οι διεργασίες γίνονται στον ίδιο χώρο (δηλ. στον κύλινδρο του κινητήρα Otto ή Diesel), στους αεριοστροβίλους οι διεργασίες πραγματοποιούνται σε διαφορετικούς χώρους. Αυτό έχει ως συνέπεια να μπορούν να πραγματοποιούνται παράλληλα (συνεχής συμπίεση, καύση και αποτόνωση, στους κατάλληλους χώρους η κάθε μία), γεγονός που όπως θα δούμε παρακάτω, οδηγεί και στο βασικό πρόβλημα λειτουργίας του αεριοστροβίλου, που είναι η θερμική καταπόνηση των πτερυγίων του στροβίλου.

Τυπικές τιμές για ορισμένα βασικά θερμοδυναμικά/λειτουργικά μεγέθη ενός αεριοστροβίλου ισχύος είναι:

- Συνολικός λόγος συμπίεσης 10-40 (δηλ. πίεση στην έξοδο του τελευταίου συμπιεστή 10-40bar αντίστοιχα),
- Μέγιστη θερμοκρασία κύκλου (μετά το θάλαμο καύσης) της τάξης των 1200-1500 °C (μικρότερη από τη μέγιστη θερμοκρασία καύσης εντός του θαλάμου καύσης που ξεπερνάει τους 2000 °C),
- Ωφέλιμη ισχύς κατανάλωσης K, 100kW – 300MW, γεγονός που σημαίνει, κατά βάση, μεγάλου μεγέθους μονάδες, με συχνότερη πρακτική εφαρμογή στην ηλεκτροπαραγωγή και τη ναυτική πρόωση,
- Θερμοκρασία εξόδου καυσαερίου από το στρόβιλο 500-600 °C,
- Βαθμός απόδοσης της τάξης του 25-35% στο πλήρες φορτίο.

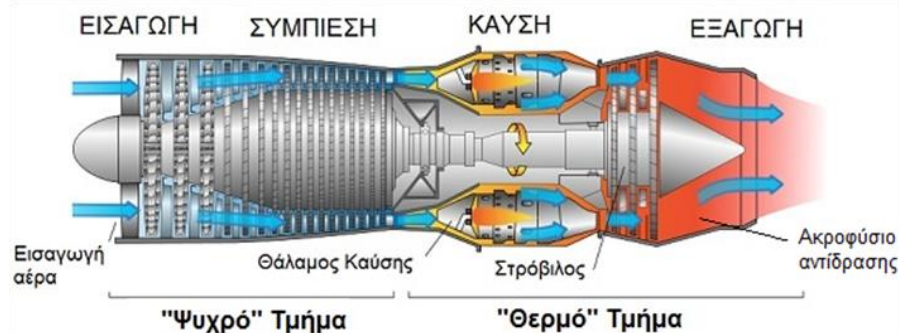
Τα βασικά χαρακτηριστικά της αεριοστροβιλικής εγκατάστασης των Σχημάτων 1.3α,β συνοψίζονται ως εξής:

1. Απλή κατασκευή (αποτελείται από δυο μηχανές και ένα θάλαμο καύσης) χωρίς ιδιαίτερα και πολύπλοκα υποσυστήματα, γεγονός που συνεπάγεται χαμηλή δαπάνη κτήσης,

2. Ύπαρξη μόνο περιστρεφόμενων μαζών (συμπιεστής και στρόβιλος), γεγονός που καθιστά σχετικά απλό τον κινηματικό μηχανισμό, χωρίς ιδιαίτερα προβλήματα ζυγοστάθμισης και ταλαντώσεων ως αποτέλεσμα επιτυγχάνονται υψηλές ταχύτητες περιστροφής (τυπικά, μερικών δεκάδων χιλιάδων rpm ενώ ακόμα και σε πολύ μεγάλου μεγέθους μονάδες (άνω των 100 MW), η ταχύτητα περιστροφής είναι μερικές χιλιάδες rpm) καθώς και μεγάλη διάρκεια ζωής,
3. Ομοιομορφία στρεπτικής ροπής και ταχύτητα περιστροφής (λόγω της συνεχούς ροής – λειτουργίας στροβιλομηχανών και θαλάμου καύσης),
4. Ελαχιστοποίηση απαιτήσεων ψύξης και λίπανσης, και γενικώς και μηχανικών απωλειών (στοιχεία που οδηγούν σε μειωμένο κόστος συντήρησης),
5. Ταχεία εκκίνηση (της τάξης των μερικών (έως 20 λεπτών) για μονάδες με ισχύ αρκετές δεκάδες MW),
6. Υψηλή συγκέντρωση ισχύος, λόγω υψηλών ταχυτήτων περιστροφής και μικρού σχετικά μεγέθους (όγκου) της εγκατάστασης,
7. Χαμηλός βαθμός απόδοσης όπως θα αναλυθεί εκτενέστερα στις επόμενες παραγράφους.

Με βάση τα παραπάνω (κυρίως τα 1, 4, 5 και 7), μια απλή αεριοστροβιλική εγκατάσταση όπως αυτή του Σχήματος 1.3α, φαίνεται ότι, καταρχήν, ταιριάζει καλύτερα για χρήση ως μονάδα αιχμής και όχι ως μονάδα βάσης.

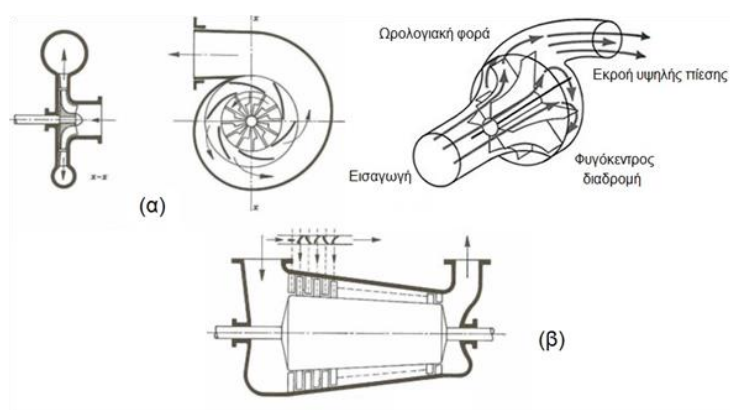
Σε αντίθεση με τους αεριοστροβίλους ισχύος, στους αεροπορικούς αεριοστροβίλους ή στροβιλο-αντιδραστήρες, Σχήμα 1.3γ, δεν υπάρχει παραγωγή μηχανικής ισχύος (turbo-jet, turbo-fan – Σχήμα 6.9), εκτός από την περίπτωση λειτουργίας με έλικα (turbo-prop και turbo-shaft), και η απαιτούμενη ώση παράγεται από κατάλληλη «εκτόνωση» του καυσαερίου σε ακροφύσιο εξόδου μετά το στρόβιλο, ο οποίος απλά κινεί το συμπιεστή.



Σχήμα 1.3γ. Απλή εγκατάσταση αεροπορικού στροβιλο-αντιδραστήρα μίας ατράκτου [1]

Γενικά, οι στροβιλομηχανές (συμπιεστής, στρόβιλος) μπορεί να είναι ακτινικής ροής ή αξονικής ροής, Σχήματα 1.4α και 1.4β. Στην πράξη, σε αεριοστροβιλικές εγκαταστάσεις χρησιμοποιούνται συνήθως αξονικές στροβιλομηχανές αρκετών βαθμίδων (κυρίως σε μεγάλες μονάδες), ώστε να μπορεί να επιτευχθεί με σχετικά μικρό πλήθος (ενός έως τριών) συμπιεστών/στροβίλων η απαιτούμενη σχέση συμπίεσης και αντίστοιχα αποτόνωσης, Σχήμα 1.4α-β. Σε μικρότερες μονάδες, πάντως απαντώνται φυγοκεντρικοί συμπιεστές (Σχήμα 1.4α-α),

με μέγιστο λόγο πιέσεων 5 έναντι του 10 που μπορεί να επιτευχθεί σε αξονικό (πολυβάθμιο) συμπιεστή, ή ακόμα και συνδυασμός ακτινικών και αξονικών στροβιλομηχανών. Με τη χρήση περισσοτέρων συμπιεστών ή στροβίλων εξασφαλίζεται ότι κάθε ζεύγος λειτουργεί στο ιδανικότερο δυνατό πεδίο στροφών του, με προφανή οφέλη στη συνολική απόδοση της μονάδας. Κάθε βαθμίδα στροβιλομηχανής αποτελείται από κινητή και ακίνητη περύγωση. Στο συμπιεστή, η κινητή περύγωση (rotor) αυξάνει την ταχύτητα (δηλαδή την κινητική ενέργεια) και στη σταθερή γίνεται μετατροπή της σε δυναμική (αύξηση της πίεσης). Στο στρόβιλο, η σταθερή περύγωση, η οποία προηγείται, μετατρέπει τα δυναμική ενέργεια (υψηλή πίεση) σε κινητική, και στην κινητή περύγωση γίνεται χρήση της κινητικής ενέργειας για παραγωγή έργου, το οποίο προσφέρεται και για την κίνηση της αντίστοιχης κινητής περύγωσης του συμπιεστή. Με δεδομένη τη μεγαλύτερη ευκολία κατά την οποία πραγματοποιείται η αποτόνωση, οι στρόβιλοι έχουν πάντα (για τον ίδιο λόγο πιέσεων) μικρότερο αριθμό βαθμίδων έναντι των συμπιεστών, όπως είναι εμφανές και στο Σχήμα 1.4β.

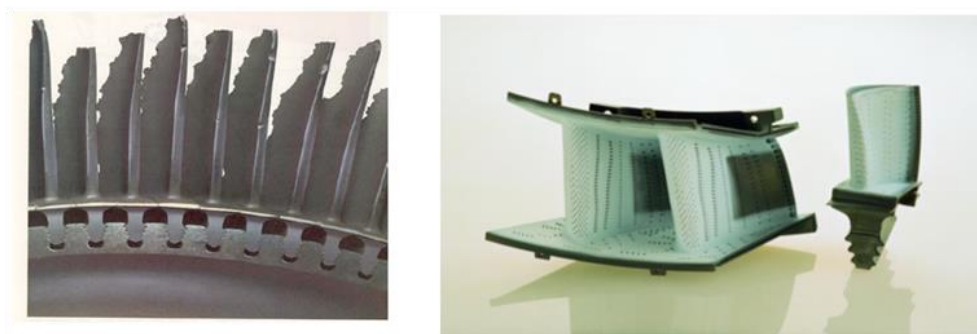


Σχήμα 1.4α. Συμπιεστής ακτινικής ροής (α) και αξονικής ροής πολυβάθμιος (β) [1]

Λόγω της παράλληλης λειτουργίας στροβιλομηχανών και θαλάμου καύσης, οι διεργασίες συμπίεσης, καύσης και αποτόνωσης σε έναν αεριοστρόβιλο πραγματοποιούνται αδιαλείπτως. Αυτό έχει ως συνέπεια η ροή καυσαερίου προς το στρόβιλο να είναι συνεχής, γεγονός που καθιστά τα περύγια του στροβίλου, κυρίως αυτά των πρώτων βαθμίδων, επιρρεπή σε θερμική καταπόνηση από τη συνεχώς υψηλή θερμοκρασία καυσαερίων. Έτσι, παρά το γεγονός ότι υψηλή θερμοκρασία καυσαερίου πριν το στρόβιλο, σύμφωνα με τις επιταγές του κύκλου Carnot, είναι ζητούμενο για την αύξηση του βαθμού απόδοσης και της ισχύος της εγκατάστασης, η συνεπακόλουθη φθορά των περυγίων του στροβίλου (Σχήμα 1.5), καθιστά αναγκαία τη χρήση, γενικά, χαμηλότερων θερμοκρασιών, τυπικά 1000 – 1400 °C, και έως 1500 °C σήμερα με χρήση κεραμικών υλικών, κατάλληλων μονωτικών (Σχήμα 1.5 δεξιά) και ψύξης των περυγίων (π.χ. εσωτερικής ή επιφανειακής (film cooling)).



Σχήμα 1.4β. Άτρακτος αεριοστροβίλου, όπου είναι εμφανής η παρουσία δύο πολυβάθμιων συμπιεστών (δεξιά) και ενός πολυβάθμιου στροβίλου [1]



Σχήμα 1.5. Κατεστραμμένα από θερμική καταπόνηση πτερύγια στροβίλου (αριστερά), και μονωμένα πτερύγια (δεξιά) [1]

Όσον αφορά το παραγόμενο έργο και κατ' επέκταση και το βαθμό απόδοσης αυτά εξαρτώνται ισχυρώς από:

- το λόγο πιέσεων στο συμπιεστή
- τη θερμοκρασία εισόδου στο στρόβιλο, και
- την αποδοτικότητα των διεργασιών συμπίεσης/αποτόνωσης.

Είναι σημαντική η ταυτόχρονη ικανοποίηση και των τριών κριτηρίων για την επίτευξη αποδοτικής εγκατάστασης. Π.χ. στρόβιλος ο οποίος μεταλλουργικά θα μπορούσε να δεχθεί θερμοκρασίες ακόμα και της τάξης των 2000 °C θα ήταν τελικά μικρής πρακτικής αξίας αν δεν μπορούσε να συνδυαστεί με αποδοτική λειτουργία (υψηλός εσωτερικός βαθμός απόδοσης) ή αν δεν υπήρχαν τα κατάλληλα υλικά που θα επέτρεπαν την επίτευξη υψηλών πιέσεων στο συμπιεστή. Όπως γίνεται, λοιπόν, προφανές, η εξέλιξη των αεριοστροβίλων υπήρξε συνυφασμένη με τις εξελίξεις στο χώρο της μεταλλουργίας και των υλικών, κυρίως τις τελευταίες δεκαετίες.

Στο θάλαμο καύσης B πραγματοποιείται συνεχής, ισόθλιπτη καύση με μεγάλη περίσσεια αέρα (4-8 φορές μεγαλύτερη της στοιχειομετρικής στο πλήρες φορτίο). Η καύση πραγματοποιείται σε μονωμένο θάλαμο υποβοηθούμενη από έγχυση του καυσίμου με ειδικούς εγχυτήρες και στροβιλισμό του εισερχόμενου αέρα για επιτάχυνση της διεργασίας, ενώ ειδικά κατά την

εκκίνηση, απαιτείται χρήση σπινθηριστή (στη συνέχεια η φλόγα είναι αυτοσυντηρούμενη λόγω της συνεχούς λειτουργίας της εγκατάστασης).

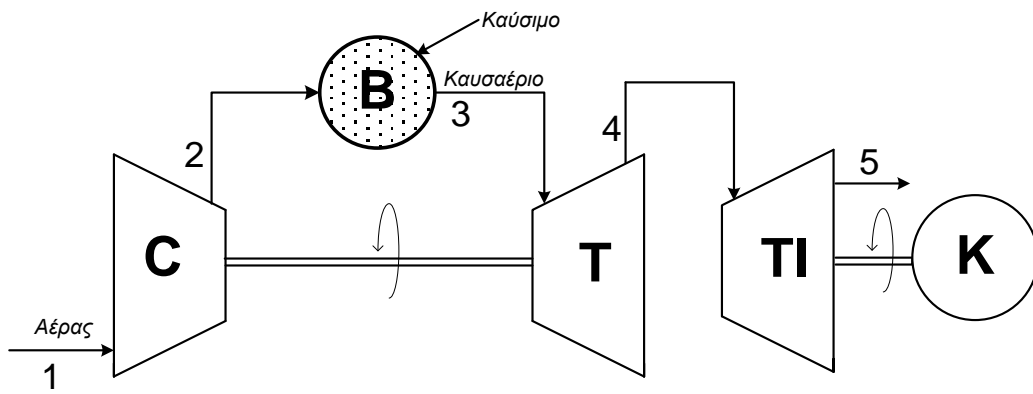
Τα καύσιμα που χρησιμοποιούνται στις αεριοστροβιλικές εγκαταστάσεις είναι συνήθως αέρια (με συνηθέστερο το φυσικό αέριο, αλλά ακόμα προπάνιο, βουτάνιο και συνθετικό αέριο) ή σχετικώς ευγενή υγρά π.χ. ελαφρύ πετρέλαιο. Αντιθέτως η χρήση βαρέων καταλοίπων του πετρελαίου δεν συνίσταται, τουλάχιστο για μεγάλα διαστήματα λειτουργίας (και σε κάθε περίπτωση συνδυάζονται με μικρότερες θερμοκρασίες T_3), γιατί δημιουργούν επικαθήσεις στα περύγια του στροβίλου συντελώντας με τη σειρά τους στην περαιτέρω φθορά τους. Τέλος, η χρήση βιοκαυσίμων σε αεριοστροβίλους βρίσκεται ακόμα σε σχετικά πρώιμο ερευνητικό στάδιο, σε αντίθεση με την έντονη διεύρυνσή τους σε εμβολοφόρους κινητήρες εδώ και αρκετά χρόνια.

Η ρύθμιση ισχύος (δηλαδή η αυξομείωση/μεταβολή ισχύος) σε έναν αεριοστρόβιλο πραγματοποιείται με αυξομείωση της ποσότητας του εγχυόμενου καυσίμου στο θάλαμο καύσης B, διατηρώντας ουσιαστικά σταθερή την ποσότητα του αναρροφώμενου αέρα (αυτό, κατά βάση, συνεπάγεται σταθερές στροφές στην άτρακτο συμπιεστή-στροβίλου). Με τον τρόπο αυτό, αλλάζει η ποιότητα του μίγματος κατ' επέκταση, αυτή η ρύθμιση ισχύος αποκαλείται ποιοτική (όπως και στους κινητήρες Diesel).

1.2 Εγκατάσταση Αεριοστροβίλου με Στρόβιλο Ισχύος

Με σκοπό την καλύτερη προσαρμογή της λειτουργίας μια αεριοστροβιλικής εγκατάστασης σε περιπτώσεις πρόωσης, π.χ. ναυτικές εφαρμογές (Κεφάλαιο 4) ή εφαρμογές οχημάτων (Κεφάλαια 2 και 3), αναπτύχθηκε η εγκατάσταση αεριοστροβίλου με στρόβιλο ισχύος, όπως εικονίζεται στα Σχήματα 1.6α και 1.6β.

Ουσιαστικά, εδώ το κομμάτι της αποτόνωσης έχει διασπαστεί σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος (στρόβιλος T στο Σχήμα 1.6α), η αποτόνωση πραγματοποιείται σε τέτοιο βαθμό ποσοστό όσο απαιτείται για την κίνηση του συμπιεστή (το τμήμα C-B-T αριστερά στο Σχήμα 1.6α ονομάζεται «αεριογόνο» (gas generator), μια και δεν παράγει ισχύ, βλ. και Σχήμα 1.6γ). Στη συνέχεια, το υπόλοιπο μέρος της αποτόνωσης πραγματοποιείται στο στρόβιλο TI (μεγαλύτερου μεγέθους από τον T), ο οποίος και είναι συνδεδεμένος με τη κατανάλωση (τυπικά, έλικα). Έτσι, έχει «απεμπλακεί» το κομμάτι της καύσης (στο αεριογόνο τμήμα) από το κομμάτι παραγωγής ωφέλιμης ισχύος, με το αεριογόνο να λειτουργεί σε εκείνη την ταχύτητα περιστροφής ή το πεδίο στροφών όπου παρουσιάζει και καλύτερη απόδοση, ενώ ο στρόβιλος ισχύος λειτουργεί στη (μεταβλητή) ταχύτητα περιστροφής της κατανάλωσης.



Σχήμα 1.6α. Σχηματικό διάγραμμα απλής διάταξης αεριοστροβιλικής εγκατάστασης με στρόβιλο ισχύος [1]



Σχήμα 1.6β. Φωτογραφία ατράκτου αεριοστροβιλικής εγκατάστασης με στρόβιλο ισχύος [1]

Επιπρόσθετα, λόγω και της μικρότερης διαμέτρου, άρα και ροπής αδράνειας των δύο στρόβιλων (Τ και ΤΙ) έναντι του ενός μεγαλύτερου μεγέθους, επιτυγχάνεται και ταχύτερη εκκίνηση σε σύγκριση με την εγκατάσταση του Σχήματος 1.3α πρακτικά, το σύστημα που πρέπει να εκκινηθεί τώρα είναι μόνο το αεριογόνο.

Σημειωτέον ότι μπορεί να υπάρχουν πολλές «βαθμίδες» αεριογόνων συνδυασμένων παράλληλα, οι οποίες τροφοδοτούν έναν «μεγάλο» στρόβιλο ισχύος, ή ακόμα και πολλές διατάξεις C-B-T-ΤΙ με τους στρόβιλους ισχύος ΤΙ συνδεδεμένους εν σειρά. Για το κομμάτι του αεριογόνου, συχνά χρησιμοποιούνται αεροπορικοί στρόβιλο-αντιδραστήρες χωρίς προφανώς, το κομμάτι του ακροφυσίου αντίδρασής τους. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι στη χρήση στρόβιλο-αντιδραστήρων από το 1980 και μετά σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής εντοπίζεται η σημαντικότερη αύξηση στη μέγιστη θερμοκρασία, στο βαθμό απόδοσης και κατ' επέκταση στην ελκυστικότητα των αεριοστροβίλων ισχύος.



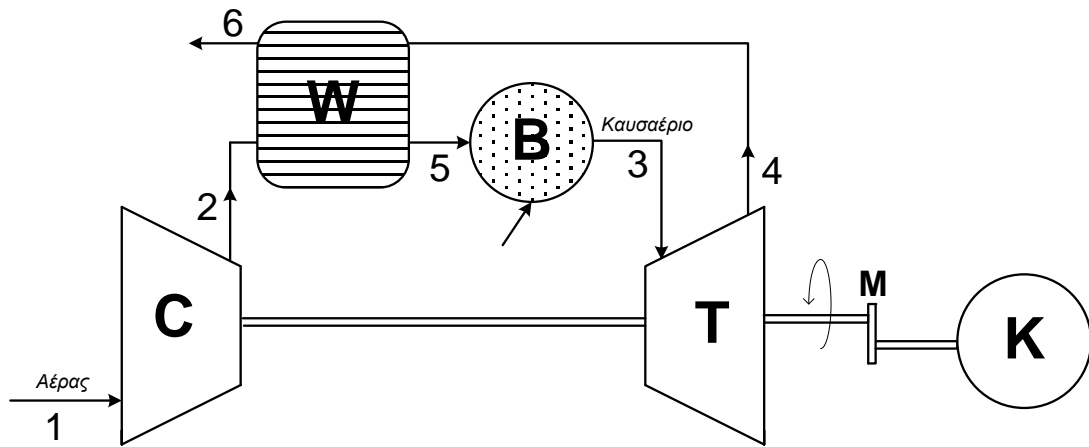
Σχήμα 1.6γ. Αεριογόνο αεροπορικού τύπου (aero-derivative), τύπος LM6000 της GM, για αεριοστροβιλική εγκατάσταση ηλεκτροπαραγωγής [1]

Επίσης, με τη διάταξη του αεριοστροβίλου με στρόβιλο ισχύος, καταρχήν, δεν επιδρούμε στο παραγόμενο έργο (η αποτόνωση γίνεται σε δύο στάδια, ουσιαστικά ανάμεσα στα ίδια όρια) ούτε και στο βαθμό απόδοσης.

Παρά την αρχική χρήση της παραπάνω εγκατάστασης σε εφαρμογές πρόωσης (κυρίως ναυτικές), χρησιμοποιείται τα τελευταία χρόνια ευρέως και σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής, παρά το γεγονός ότι στις τελευταίες δεν έχουμε μεταβλητές στροφές στην κατανάλωση, άρα το βασικό πλεονέκτημα του αεριοστροβίλου με στρόβιλο ισχύος παύει πλέον να ισχύει. Ο λόγος για τη χρήση τέτοιων εγκαταστάσεων και σε εφαρμογές ηλεκτροπαραγωγής έχει να κάνει με το γεγονός ότι πλέον δεν απαιτείται τοποθέτηση μειωτήρα στροφών ανάμεσα σε στρόβιλο και γεννήτρια, γεγονός που οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους. Παρόλα αυτά, πρέπει να ληφθεί μέριμνα ώστε να αποφευχθεί υπερτάχυνση του στροβίλου ισχύος σε περιπτώσεις απότομης πτώσης φορτίου στη γεννήτρια.

1.3 Εγκατάσταση Αεριοστροβίλου με Ανακομιστή Θερμότητας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στην Παράγραφο 1.1, το βασικό μειονέκτημα των αεριοστροβίλων είναι ο χαμηλός βαθμός απόδοσης τους (της τάξης του 30% στο πλήρες φορτίο για μονάδες όπως αυτή του Σχήματος 1.3α). Αποτελεί, λοιπόν, βασική ερευνητική επιδίωξη η αύξηση του βαθμού απόδοσης σε υψηλότερα επίπεδα. Την πλέον αποτελεσματική μέθοδο αύξησης του βαθμού απόδοσης, αποτελεί η χρήση ανακομιστή θερμότητας (regeneration), όπως απεικονίζεται στο Σχήμα 1.7.



Σχήμα 1.7. Σχηματικό διάγραμμα απλής διάταξης αεριοστροβλικής εγκατάστασης μίας απράκτου με ανακομιστή θερμότητας [1]

Ο ανακομιστής θερμότητας W είναι ένας εναλλάκτης θερμότητας που τοποθετείται μεταξύ των ρευμάτων: α) αέρα μετά το συμπιεστή (σημείο 2), και β) καυσαερίου μετά την αποτόνωση στο στρόβιλο (σημείο 4), και είναι κατά βάση τύπου αντιρροής (τα δύο ρεύματα εισέρχονται με αντίθετη φορά στον εναλλάκτη θερμότητας). Εκμεταλλευόμενοι, λοιπόν, το υψηλό θερμικό δυναμικό του καυσαερίου στο σημείο 4, που πηγάζει από την υψηλή θερμοκρασία του (της τάξης των 500-600 °C), μεταφέρουμε θερμότητα προς το ‘ψυχρότερο’ ρεύμα του αέρα. Κατά συνεπεία, ο συμπιεσμένος αέρας εισέρχεται πλέον στο θάλαμο καύσης (σημείο 5) σε θερμοκρασία ανώτερη από αυτήν της κατάστασης 2 (της απλής δηλαδή εγκατάστασης του Σχήματος 1.3α χωρίς ανακομιστή) άρα απαιτείται και μικρότερο ποσό θερμότητας κατά την καύση (συνεπώς και μικρότερη ποσότητα καυσίμου) για να ανέβει η θερμοκρασία του καυσαερίου μέχρι τη (σταθερή) τελική θερμοκρασία T_3 , που αποτελεί και το όριο λειτουργίας της μονάδας. Χρησιμοποιώντας λοιπόν το καυσαέριο που θα πήγαινε χαμένο, αυξάνουμε τη θερμοκρασία του αέρα μετά τη συμπίεση και «γλυτώνουμε» αντίστοιχα ποσότητα καυσίμου, αφού πλέον $(T_3 - T_5) < (T_3 - T_2)$, βελτιώνοντας έτσι σημαντικά το βαθμό απόδοσης της εγκατάστασης (τουλάχιστον κατά 5 ποσοστιαίες μονάδες).

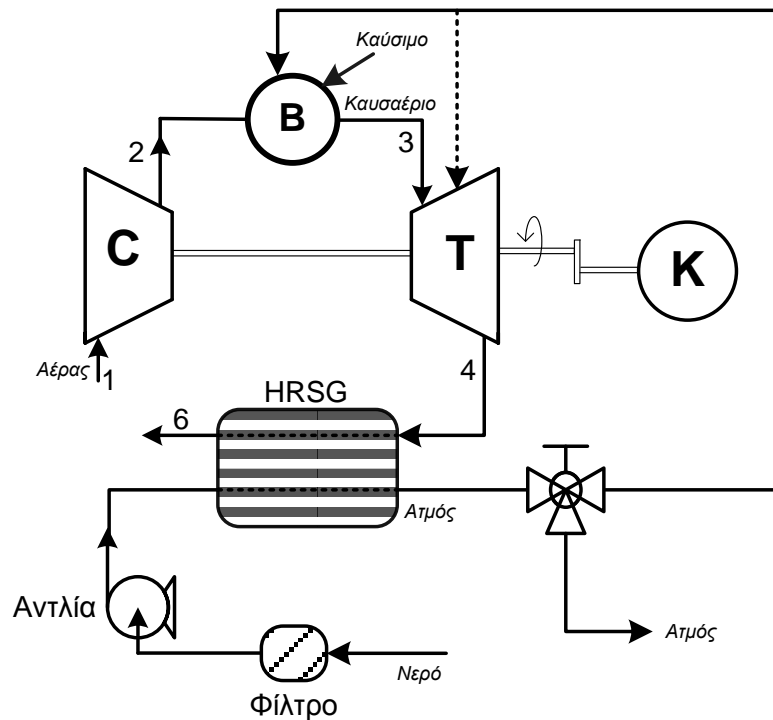
Με την προσθήκη ανακομιστή θερμότητας, εν γένει, δεν επεμβαίνουμε στην παραγόμενη ισχύ, αν και στην πραγματικότητα, λόγω των αναπόφευκτων πτώσεων πίεσης εντός των σωληνώσεων του εναλλάκτη, αναμένεται η πίεση στο σημείο 5 να είναι μικρότερη από το 2 (μέχρι 2%), άρα και το παραγόμενο έργο στο στρόβιλο ελαφρώς μικρότερο από ότι στην εγκατάσταση χωρίς ανακομιστή. Επίσης, είναι προφανές ότι όσο μικρότερος ο λόγος πύεσεων στο συμπιεστή (άρα και η θερμοκρασία T_2), τόσο μεγαλύτερο αναλογικά το όφελος που μπορεί να προκύψει από τη χρήση του ανακομιστή, μέχρι τη θεωρητική περίπτωση που οι θερμοκρασίες T_2 και T_4 είναι ίσες, οπότε και δεν επιτυγχάνεται καμία μεταφορά θερμότητας από το ρεύμα του καυσαερίου προς αυτό του αέρα.

Για τη λειτουργία του ανακομιστή θερμότητας, χρησιμοποιούμε ως χαρακτηριστικό μέγεθος απόδοσης το βαθμό εκμετάλλευσης του ανακομιστή η_w (εξίσωση 1.1), ο οποίος ορίζεται ως το ποσό θερμότητας κατά το οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία του αέρα, προς τη μέγιστη δυνατή

αύξηση. Αμελώντας σε πρώτη προσέγγιση τη μικρή διαφορά στην ειδική θερμοχωρητικότητα ανάμεσα σε αέρα και (πλούσιο σε αέρα) καυσαέριο, έχουμε για το βαθμό εκμετάλλευσης του ανακομιστή:

$$\eta_w = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2} \quad (1.1)$$

Τα τελευταία χρόνια έχουν παρουσιαστεί και μονάδες με ανακομιστή θερμότητας τύπου STIG (steam-injected gas turbine), Σχήμα 1.8. Σε τέτοιες μονάδες, το υψηλό θερμικό δυναμικό (ή μέρος αυτού) χρησιμοποιείται για την παραγωγή ατμού (τυπικά της τάξης του 5-10% σε σχέση με την αναρροφώμενη ποσότητα αέρα) που μπορεί να εγχύεται σε κατάλληλη βαθμίδα στο στρόβιλο και να αυξάνει έτσι το ωφέλιμο έργο της εγκατάστασης λόγω και της αυξημένης θερμοχωρητικότητας του ατμού σε σχέση με το καυσαέριο/αέρα (περίπου διπλάσια), με πιθανό πάντως μειονέκτημα την αυξημένη πιθανότητα διάβρωσης των περυγίων του στροβίλου. Ο ατμός μπορεί να εγχύεται και στο θάλαμο καύσης για μείωση των εκπομπών NO_x.



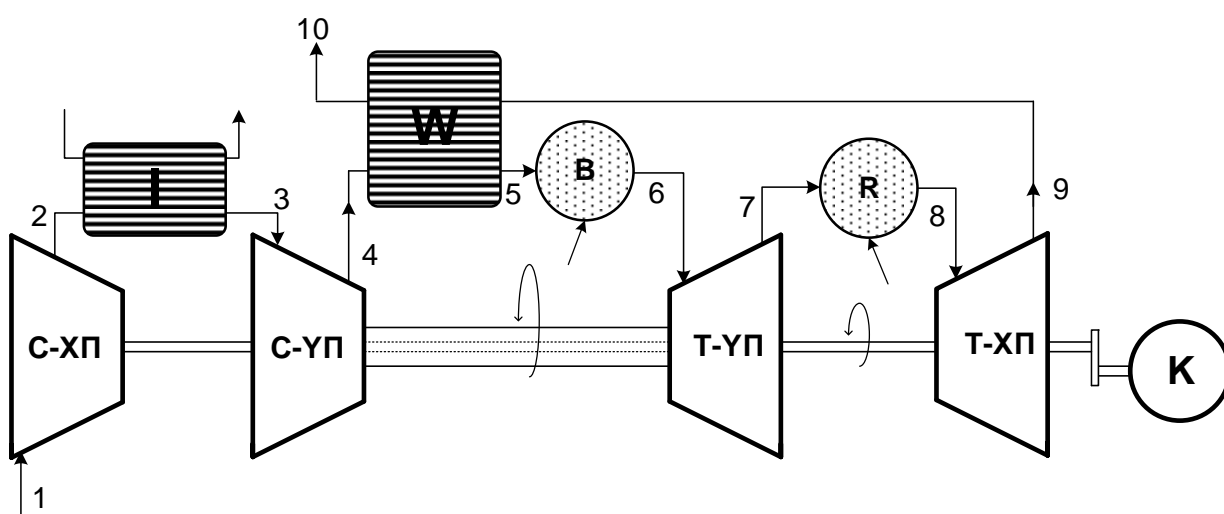
Σχήμα 1.8. Σχηματικό διάγραμμα διάταξης αεριοστροβιλικής εγκατάστασης μιας ατράκτου με παραγωγή ατμού από ανάκτηση θερμότητας καυσαερίων και χρήση του εντός του αεριοστροβίλου (STIG) [1]

1.4 Σύνθετες Εγκαταστάσεις με Ενδιάμεση Ψύξη και Αναθέρμανση

Με τις σύνθετες αεριοστροβιλικές εγκαταστάσεις επιδιώκουμε την αύξηση της παραγόμενης ισχύος. Τυπικά, γίνεται χρήση πολλαπλών συμπιεστών με ενδιάμεσες ψύξεις και αντίστοιχα πολλαπλών στροβίλων με ενδιάμεσες αναθερμάνσεις. Στόχος είναι η κατά το δυνατόν

προσέγγιση του ιδανικού κύκλου Carnot. Έτσι, λοιπόν, στις εγκαταστάσεις των Σχημάτων 1.9 και 1.10, μεταξύ των συμπιεστών παρεμβάλλεται εναλλάκτης θερμότητας (ψυγείο – intercooler), και μεταξύ των στρόβιλων αναθερμαντήρας, δηλαδή δεύτερος θάλαμος καύσης (reheater). Στο ενδιάμεσο ψυγείο, μειώνεται η θερμοκρασία του συμπιεσμένου αέρα, ιδανικά μέχρι τη θερμοκρασία T_1 , και αντίστοιχα στον αναθερμαντήρα, αυξάνεται η θερμοκρασία του μερικώς αποτονωμένου καυσαερίου, ιδανικά μέχρι τη (μέγιστη) θερμοκρασία (T_6 στα Σχήματα 1.9 και 1.10).

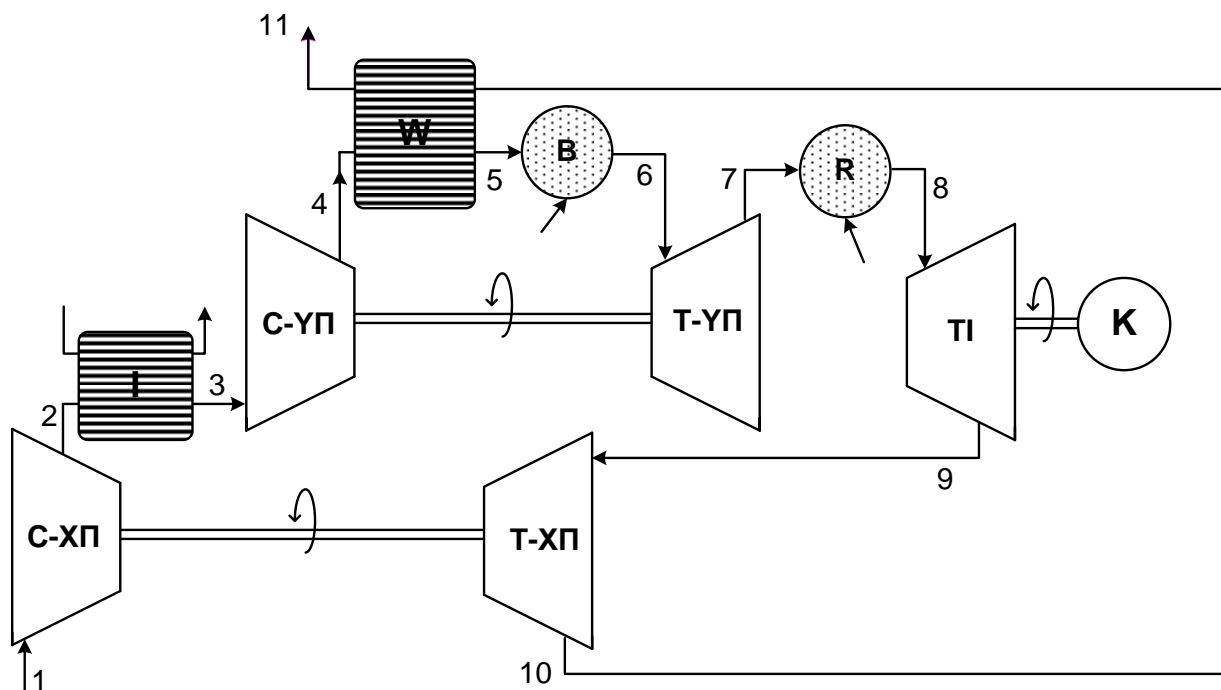
Εκμεταλλευόμαστε έτσι τη θερμοδυναμική αρχή που λέει ότι όσο χαμηλότερη η θερμοκρασία έναρξης της συμπίεσης, τόσο μικρότερο το απαιτούμενο έργο για την κίνηση του συμπιεστή αντίστοιχα, όσο μεγαλύτερη η θερμοκρασία κατά την έναρξη της αποτόνωσης, τόσο μεγαλύτερο το παραγόμενο έργο από το στρόβιλο, άρα και η ισχύς της εγκατάστασης.



Σχήμα 1.9 Σχηματικό διάγραμμα σύνθετης αεριοστροβιλικής εγκατάστασης με δυο συμπιεστές, δυο στρόβιλους (χαμηλής και υψηλής πίεσης αντίστοιχα), ενδιάμεσο ψυγείο I, αναθερμαντήρα R και ανακομιστή θερμότητας W, με χρήση συγκεντρικής απράκτου [1]

Η χρήση του ενδιάμεσου ψυγείου προϋποθέτει την ευχέρεια/εύκολη πρόσβαση σε κάποιο ψυκτικό, π.χ. νερό ποταμού, ή θαλασσινό σε ναυτικές εφαρμογές. Σε κάθε περίπτωση, πρόκειται για προσθήκη στην εγκατάσταση που αυξάνει σημαντικά το μέγεθος της και την απομακρύνει από την ιδανική κατάσταση της «απλής» μηχανής.

Τελικά, πάντως, η προσθήκη ενδιάμεσης ψύξης και δεύτερης συμπίεσης ή/και αναθερμαντήρα και δεύτερης αποτόνωσης οδηγεί σε μείωση του βαθμού απόδοσης της εγκατάστασης, για το λόγο αυτό συχνά οι εγκαταστάσεις με ενδιάμεση ψύξη/αναθέρμανση συνδυάζονται και με ανακομιστή θερμότητας.



Σχήμα 1.10 Σχηματικό διάγραμμα σύνθετης αεριοστροβιλικής εγκατάστασης με δύο συμπιεστές (χαμηλής και υψηλής πίεσης), τρεις στροβίλους (υψηλής πίεσης, στρόβιλο ισχύος και χαμηλής πίεσης), ενδιάμεσο ψυγείο I, αναθερμαντήρα R και ανακομιστή θερμότητας W, σε τρεις ατράκτους [1]

1.5 Συγκεντρωτικά Χαρακτηριστικά – Υποσυστήματα – Εφαρμογές

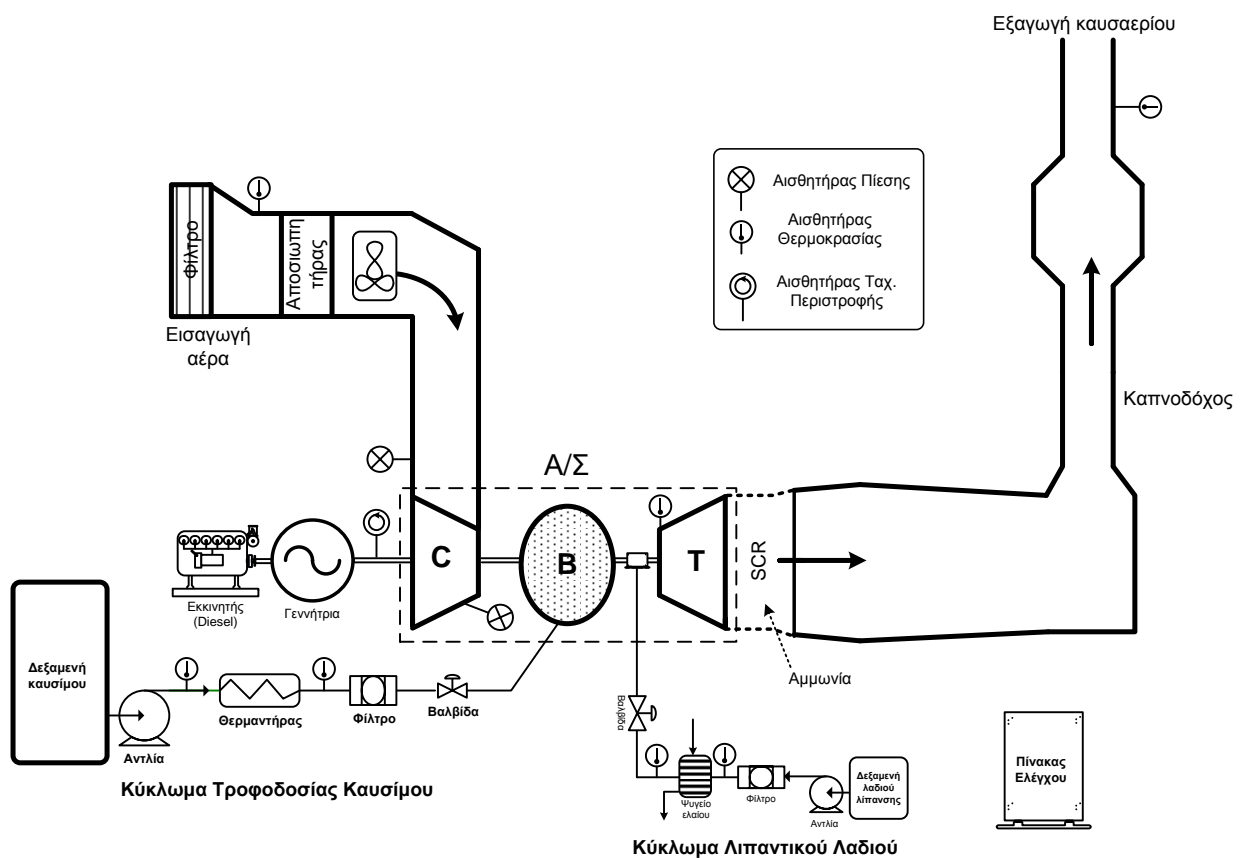
Συγκεντρωτικά, τα πλεονεκτήματα των αεριοστροβιλικών εγκαταστάσεων έναντι άλλων θερμικών μηχανών, και κυρίως των εμβολοφόρων κινητήρων που ανήκουν επίσης στην ευρύτερη οικογένεια των ΜΕΚ, είναι:

- Απλότητα εγκατάστασης (μικρό κόστος κτήσης) αλλά και υψηλή διαθεσιμότητα λειτουργίας,
- Ελάχιστες απαιτήσεις λίπανσης / ψύξης (μικρό κόστος συντήρησης)
- Απόλυτη ομοιομορφία λειτουργίας άρα και ομοιομορφία ταχύτητας περιστροφής και παραγόμενης ισχύος,
- Υψηλές ταχύτητες περιστροφής άρα και συγκέντρωση ισχύος,
- Μικρότερες απαιτήσεις βοηθητικού εξοπλισμού,
- Μικρότερες εκπομπές ρύπων (πρακτικά μόνο οξείδια του αζώτου), στοιχείο που πάντως σχετίζεται και με τα σχετικά καθαρότερα καύσιμα που χρησιμοποιούνται,
- Ευκολία/ταχύτητα εκκίνησης.

Στα βασικά μειονεκτήματα συγκαταλέγονται:

- Σταθερό επίπεδο θερμοκρασιών που οδηγεί σε μόνιμη θερμοκρασιακή καταπόνηση στο στρόβιλο,
- Χαμηλή μέγιστη θερμοκρασία κύκλου που οδηγεί σε χαμηλούς βαθμούς απόδοσης (μεγάλος κόστος χρήσης)
- Κατά βάση εφαρμογές μεγάλου μεγέθους (δεν υπάρχει ευελιξία όπως στους εμβολοφόρους κινητήρες για 'αποδοτικές' μονάδες μικρού μεγέθους),
- Δυσκολία ρύθμισης λειτουργίας σε ευρύ πεδίο στροφών (απαραίτητο για εφαρμογές αυτοκίνησης),
- Μικρότερη γκάμα καυσίμων, και κυρίως αδυναμία καύσης 'βαρέων' καυσίμων, που είναι και φθηνότερα,
- Μεγαλύτερο μέγεθος εισαγωγής/εξαγωγής εξαιτίας υψηλής πίεσης αέρα,
- Υψηλός θόρυβος (εντοπισμένος πρωτίστως στο κομμάτι του συμπιεστή, και λόγω πολύ υψηλών ταχυτήτων περιστροφής).

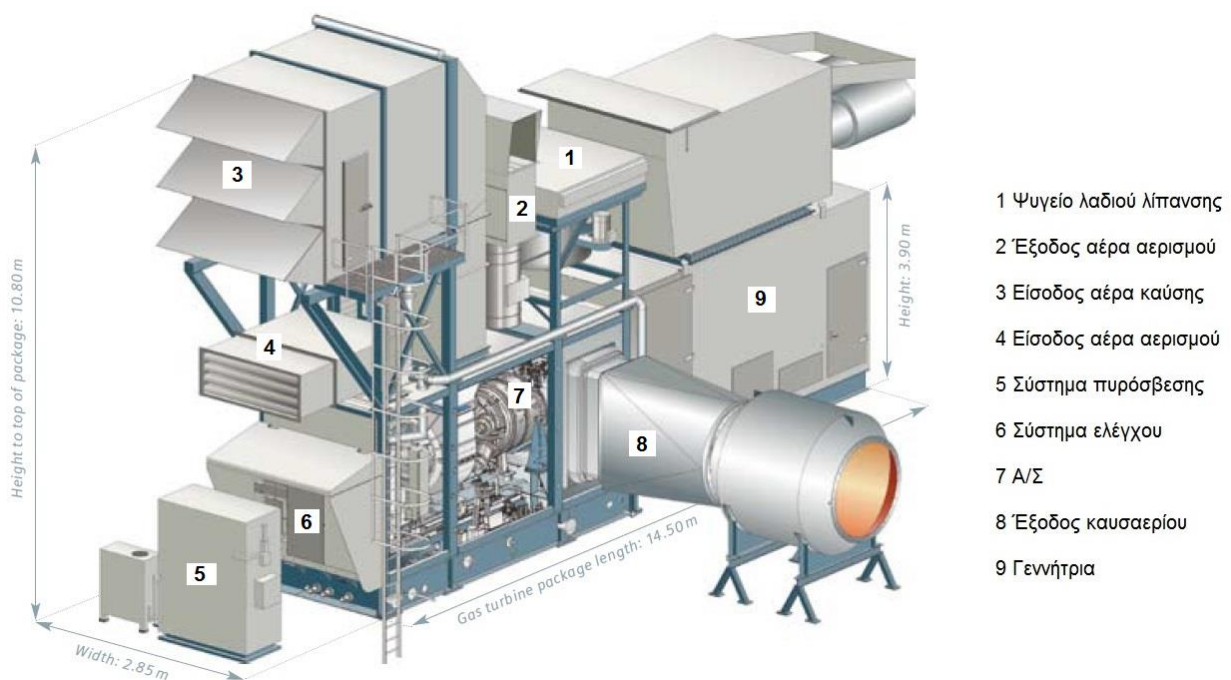
Βελτίωση σε ορισμένα από τα παραπάνω μπορεί να επιτευχθεί με χρήση ανακομιστή θερμότητας (σημαντική αύξηση στο βαθμό απόδοσης), χρήση ενδιάμεσων ψύξεων και αναθερμάνσεων (αύξηση παραγόμενου έργου), ανθεκτικότερα υλικά κατασκευής περυγίων στρόβιλου (π.χ. κεραμικά, τιτάνιο ή/και χρήση μονωτικών) για την αύξηση του βαθμού απόδοσης, καθώς επίσης και με τη χρήση του αεριοστρόβιλου σε συνδυασμένες εγκαταστάσεις.



Σχήμα 1.13α. Σχηματικό διάγραμμα αεριοστροβιλικής εγκατάστασης ανοικτού κυκλώματος μιας ατράκτου C-B-T για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας, μαζί με τα υποσυστήματα της [1]

Στα Σχήματα 1.13α και 1.13β παρουσιάζεται μια εγκατάσταση αεριοστροβίλου ηλεκτροπαραγωγής μιας ατράκτου μαζί με τα υποσυστήματά της. Αυτά είναι: η πηγή του καυσίμου (δεξαμενή, αντλία, φίλτρο, πιθανόν σύστημα προθέρμανσης), ο εκκινητής για την έναρξη λειτουργίας της εγκατάστασης, το σύστημα λίπανσης (δεξαμενή, αντλία, φίλτρο, σύστημα προθέρμανσης, ψυγείο) το σύστημα αντιρύπανσης, που πιθανότατα περιλαμβάνει καταλύτη τύπου SCR, καθώς και οι διάφορες διατάξεις ασφαλείας με το κατάλληλο σύστημα ελέγχου. Σε περιπτώσεις ηλεκτροπαραγωγής, όπου απαιτείται και σταθερή ταχύτητα περιστροφής της γεννήτριας, υπάρχει κατάλληλος ρυθμιστής στροφών (governor), μέσω του οποίου διατηρούνται σταθερές οι στροφές μετά από μεταβολή φορτίου (οι οποίες σε κάθε περίπτωση για εγκαταστάσεις πολλών MW είναι αρκετά αργές).

Ειδικότερα όσο αφορά την εκκίνηση, αυτή μπορεί να παρέχεται από έναν μικρό κινητήρα Diesel ή ηλεκτροκινητήρα, ο οποίος δίνει κίνηση στο συμπιεστή κατά τα πρώτα λεπτά λειτουργίας της εγκατάστασης ώστε να μπορέσει αυτός να συμπιέσει τον αέρα (απουσία λειτουργίας του στροβίλου). Παράλληλα, σπινθηριστής στην πρωτογενή ζώνη καύσης υποβοηθάει την έναρξη της καύσης. Τυπικά, ένας κινητήρας Diesel ισχύος 400-500 kW είναι ικανός να εκκινήσει μονάδα 60-80 MW, αλλά για μεγαλύτερες μονάδες, π.χ. 150 MW, μπορεί να χρειαστεί εκκινητής ισχύος έως και 5 MW. Εναλλακτικά, μπορεί να γίνει χρήση συμπιεσμένου αέρα ο οποίος εγχύεται στο συμπιεστή.



Σχήμα 1.13β. Φωτογραφία συνολικής αεριοστροβιλικής εγκατάστασης ανοικτού κυκλώματος μιας ατράκτου C-B-T για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας (πηγή Siemens, τύπος SGT-400 ισχύος 12,9 MW) [1]

Αντίστοιχα κατά την παύση λειτουργίας, διακόπτεται η παροχή καυσίμου αλλά το σύστημα συνεχίζει να λειτουργεί σε χαμηλές στροφές για λίγη ώρα ώστε να αποφευχθεί απότομη πτώση θερμοκρασιών που μπορεί επίσης να δημιουργήσει θερμικά προβλήματα.

Τυπικά στοιχεία μέτρησης/ελέγχου της εγκατάστασης εντοπίζονται σε:

- Παροχή καυσίμου,
- Παραγόμενη ισχύ,
- Ταχύτητα περιστροφής ατράκτου,
- Παροχή και θερμοκρασία λιπαντικού λαδιού,
- Προθέρμανση καυσίμου
- Ψύξη συμπιεστή και στροβίλου,

Παράλληλα, βασικά λειτουργικά όρια υπό έλεγχο είναι η:

- Θερμοκρασία προσβολής των περυγίων του στροβίλου,
- Μέγιστη ταχύτητα περιστροφής της ατράκτου
- Μέγιστη πίεση συμπίεσης
- «ασφαλής» λειτουργία συμπιεστή
- Επιτάχυνση / επιβράδυνση
- Θερμοκρασία / πίεση λαδιού λίπανσης.

Η βασική εφαρμογή των αεριοστροβιλικών εγκαταστάσεων είναι η ηλεκτροπαραγωγή, συνήθως ως μονάδες αιχμής (50/60 Hz, έως 100 MW), μίας ατράκτου, με χρήση ανακομιστή, και σπανιότερα ενδιάμεσων ψύξεων και αναθερμάνσεων, ή πολύ συχνά σήμερα με στρόβιλο ισχύος χωρίς μειωτήρα στροφών και χρήση στροβιλο-αντιδραστήρα ως αεριογόνου. Ως μονάδες βάσης (50/60 Hz, έως 400 MW) γίνεται σήμερα εκτεταμένη χρήση μόνο συνδυασμένων μονάδων. Εναλλακτικά, απαντώνται και μονάδες κλειστού κύκλου, επίσης τα τελευταία χρόνια, με ενδιάμεση ψύξη και χρήση πυρηνικής ενέργειας.

Σε επίπεδο πρόωσης, οι αεριοστρόβιλοι (υπο μορφή στροβιλο-αντιδραστήρων) χρησιμοποιούνται ευρύτατα σε αεροπορικές εφαρμογές (turbo-jet, turbo-fan, turbo-shaft/turbo-prop) μεγάλου μεγέθους. Αντιθέτως σε επίπεδο επίγεια πρόωσης, έγιναν κάποιες όχι ιδιαίτερα επιτυχημένες προσπάθειες σε αυτοκίνητα και τρένα (Κεφάλαια 2 και 3). Ο κύριος λόγος της αποτυχίας ήταν ο χαμηλός βαθμός απόδοσης στα χαμηλά φορτία από την άλλη πλευρά, οι χαμηλές εκπομπές ρύπων είναι ένας ενθαρρυντικός παράγοντας για πιθανές μελλοντικές εφαρμογές. Τη μοναδική χρήση αεριοστροβίλου ως μοναδική πηγή πρόωσης οχήματος σήμερα αποτελούν δυο πολεμικά άρματα μάχης (tanks), το ρωσικό T80 και το αμερικανικό M1 Abrams, ισχύος γύρω στα 1000 kW, κυρίως λόγω της ελαφρότερης κατασκευής τους, που τους δίνει μεγαλύτερη ευχέρεια ελιγμών στο πεδίο της μάχης.

Αντιθέτως, αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται σήμερα σε διάφορες εφαρμογές ναυτικής πρόωσης, κυρίως σε συνδυασμό με κινητήρες Diesel ή (σπανιότερα) ατμοστροβίλους ή και αυτόνομα, με ενδεχόμενη χρήση ηλεκτροκινητήρων πριν την κίνηση στις έλικες. Συχνά η χρήση των αεριοστροβίλων σε τέτοιες εφαρμογές είναι ως επιβοηθητικές μηχανές (booster) π.χ. σε πολεμικά πλοία κατά τη διάρκεια ελιγμών με χρήση στροβίλου ισχύος, και σε μεγάλα κρουαζιερόπλοια για την παροχή ηλεκτρισμού και θερμότητας στις καμπίνες. Η πολύ μεγαλύτερη πάντως συγκέντρωση ισχύος των αεριοστροβίλων έναντι των κινητήρων Diesel,

έχει ως αποτέλεσμα με τη χρήση τους να εξοικονομείται χώρος στο πλοίο για μεγαλύτερο φορτίο ή καμπίνες (Κεφάλαιο 4).

Επίσης, αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται συχνά για τη μεταφορά πετρελαίου ή φυσικού αερίου από πετρελαιοπηγές ή απλά για την παραγωγή θερμότητας υπό μορφή θερμού νερού ή ατμού λόγω της υψηλής θερμοκρασίας του απορριπτόμενου καυσαερίου.

Μια τελευταία, σχετικά, περίπτωση εφαρμογής αεριοστροβίλων είναι οι μικρο-στροβίλοι (micro-turbines). Πρόκειται για μικρές μονάδες (30-300kW) που χρησιμοποιούνται για την κάλυψη αναγκών ηλεκτρισμού και θερμότητας νοσοκομείων, ξενοδοχείων κλπ, με συνηθέστερο καύσιμο το φυσικό αέριο. [1],[2]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΣΕ ΟΧΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΟΤΟΣΥΚΛΕΤΕΣ

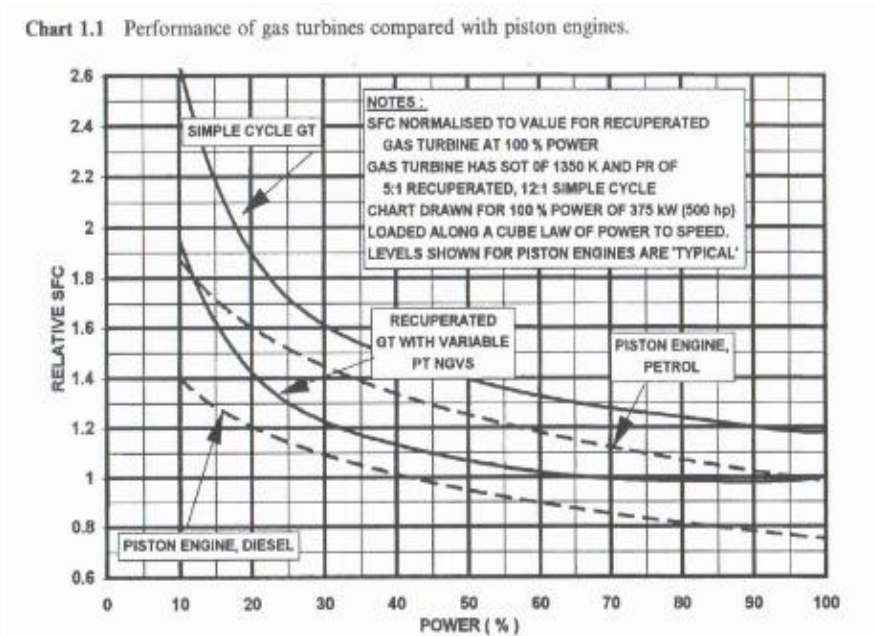
2.1 Σύγκριση αεριοστροβίλων με ταχύστροφους κινητήρες Diesel

Σε επίπεδο επίγειας πρόωσης (αυτοκίνητα, μοτοσυκλέτες, φορτηγά) έγιναν κάποιες προσπάθειες χρήσης αεριοστροβίλου ως πηγή πρόωσης, οι οποίες όμως δεν τελεσφόρησαν. Μερικές από αυτές τις προσπάθειες έμειναν στο εργαστήριο ως πρωτότυπα, ενώ μία εταιρεία κατάφερε να προχωρήσει σε μαζική παραγωγή.

Γενικά, για τη λειτουργία ενός οχήματος απαιτείται χαμηλή κατανάλωση, υψηλή ροπή αλλά και χαμηλές εκπομπές ρύπων, σε ένα ευρύ φάσμα στροφών και φορτίων, με δεδομένο ότι το όχημα κινείται σε διαρκώς μεταβαλλόμενες συνθήκες λειτουργίας που ποικίλλουν από την άφορτη λειτουργία ('ρελαντί') ως το πλήρες φορτίο. Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματα που παρουσιάζει η λειτουργία αεριοστροβίλων (όπως π.χ. χαμηλές εκπομπές ρύπων αλλά και υψηλή ροπή σε χαμηλές στροφές), βασικός λόγος αποτυχίας εφαρμογής τους ήταν ο χαμηλός βαθμός απόδοσης στα χαμηλά φορτία. Τα παραπάνω θα αναλυθούν ευθύς αμέσως παρουσιάζοντας τις βασικές διαφορές ανάμεσα σε ταχύστροφους κινητήρες diesel/otto και αεριοστροβίλους:

- Στο διάγραμμα 1.1 συγκρίνονται η ειδική κατανάλωση καυσίμου (specific fuel consumption - sfc) συναρτήσει του φορτίου για αεριοστροβίλους και μηχανές diesel στα επίπεδα ισχύος ενός τυπικού μεγάλου φορτηγού. Όπως φαίνεται στο σχήμα αυτό, η ειδική κατανάλωση καυσίμου για έναν απλό κύκλο αεριοστροβίλου είναι χειρότερη από την αντίστοιχη μίας μηχανής diesel για δεδομένη ισχύ. Γενικά, όσο χαμηλότερη είναι η αναγραφόμενη ισχύς τόσο μεγαλύτερη είναι και η διαφορά της ειδικής κατανάλωσης μεταξύ των δύο μηχανών. Αυτό συμβαίνει γιατί, όπως αναφέρθηκε στον προηγούμενο κεφάλαιο, η λειτουργία των αεριοστροβίλων περιορίζεται σε σχετικά «χαμηλές» θερμοκρασίες ώστε να αποφευχθεί η θερμική καταπόνηση των πτερυγίων του στροβίλου. Ως γνωστόν, βάσει της θερμοδυναμικής, χαμηλές θερμοκρασίες εργαζόμενου μέσου οδηγούν και σε χαμηλούς βαθμούς απόδοσης. Αντιθέτως, ο κινητήρας diesel, λόγω της διακοπτόμενης (και όχι συνεχούς όπως ο αεριοστροβίλος) λειτουργίας του, επιτυγχάνει πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες εντός ενός κύκλου λειτουργίας, στοιχείο που σε συνδυασμό και με άλλα χαρακτηριστικά λειτουργίας του κύκλου diesel (υψηλός βαθμός συμπίεσης, απουσία στραγγαλισμού στην εισαγωγή) οδηγεί σε πολύ υψηλότερο βαθμό απόδοσης άρα και χαμηλότερη κατανάλωση καυσίμου.
- Εκείνο το οποίο δημιουργεί μεγαλύτερα προβλήματα κατά τη χρήση αεριοστροβίλου ως πηγή πρόωσης οχημάτων σε σχέση με κινητήρα diesel είναι η επιπλέον σημαντική μείωση του βαθμού απόδοσης του πρώτου σε σχέση με τον δεύτερο στα μερικά φορτία, δηλαδή σε περιπτώσεις λειτουργίας, π.χ., εντός πόλης. Παρότι οι διαφορές βαθμού απόδοσης ενός αεριοστροβίλου σε σχέση με έναν κινητήρα Otto είναι μικρότερες στο

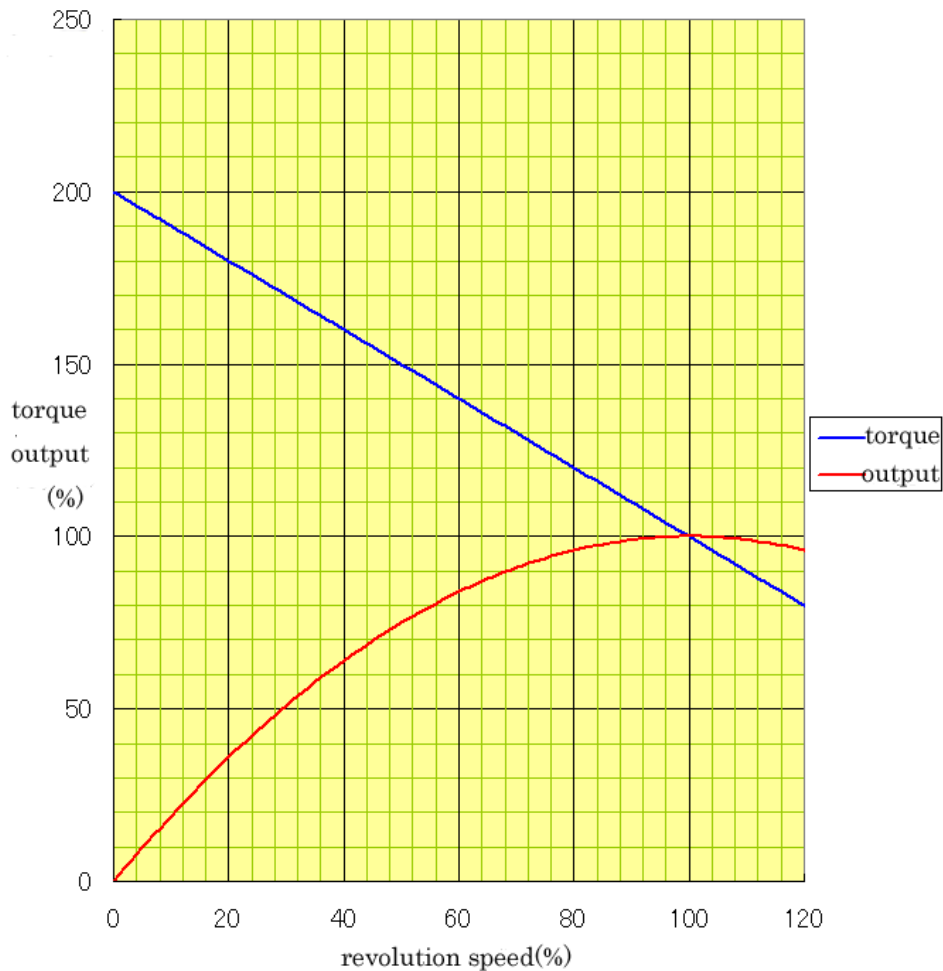
πλήρες φορτίο, η διαφορά (υπέρ του εμβολοφόρου κινητήρα) αυξάνεται και πάλι σημαντικά στα μερικά φορτία.



Διάγραμμα 1.1α Απόδοση αεριοστροβίλων σε σύγκριση με εμβολοφόρους κινητήρες συναρτήσει του φορτίου [3]

- Οι αεριοστροβίλοι με ανακομιστή θερμότητας έχουν ειδική κατανάλωση καυσίμου πιο κοντά σε αυτήν των κινητήρων diesel σε δεδομένη ισχύ 500 kW όπως φαίνεται στο διάγραμμα 1.1. Επιπλέον, σε λειτουργία σε συνδυασμένο κύκλο, ο αεριοστροβίλος έχει καλύτερη ειδική κατανάλωση από έναν κινητήρα diesel. Όταν, λοιπόν, οι εφαρμογές μπορούν να κάνουν χρήση της θερμότητας που αποβάλλεται, ο αεριοστροβίλος, έχει πλεονέκτημα. Αυτό συμβαίνει επειδή περισσότερο από το 95% της ενέργειας του καυσίμου που δεν μετατρέπεται σε ισχύ εμφανίζεται στα καυσαέρια σαν μια πηγή υψηλής θερμότητας που μπορεί θεωρητικά να ανακτηθεί. Για τους εμβολοφόρους κινητήρες, αντιθέτως, σημαντικό μέρος από τη θερμότητα που αποβάλλεται εμφανίζεται σε χαμηλού βαθμού μορφές, όπως θερμότητα στα λιπαντικά λάδια και στο ψυκτικό μέσο. Παρόλα αυτά, και ο ανακομιστής θερμότητας αλλά και ο συνδυασμένος κύκλος, απαιτούν πολύ μεγάλο όγκο, ο οποίος δεν είναι εν γένει διαθέσιμος σε οχήματα (και κυρίως αυτοκίνητα).
- Στο διάγραμμα 1.1β φαίνεται ένα ιδιαίτερα ευνοϊκό χαρακτηριστικό αεριοστροβιλικών εγκαταστάσεων. Σε εγκατάσταση με στροβίλο ισχύος (που είναι ουσιαστικά η μορφή της εγκατάστασης που χρησιμοποιείται σε εφαρμογές πρόωσης αεριοστροβίλων σε οχήματα), ο αεριοστροβίλος μπορεί να προσφέρει σημαντικά υψηλότερη ροπή σε χαμηλότερο φορτίο σε σχέση με ένα κινητήρα diesel, κάτι το οποίο αναμένεται να έχει θετική συνέπεια σε θέματα οδηγισιμότητας εντός πόλης αλλά και εκκίνησης με μεγάλο φορτίο (π.χ. φορτηγά) ή σε μεγάλη κλίση οδοστρώματος. Αντιθέτως σε κίνηση εκτός

πόλης, όπου απαιτούνται υψηλότερα φορτία, η καμπύλη ροπής του αεριοστροβίλου δεν είναι η ενδεδειγμένη.



Διάγραμμα 1.1β Αποδιδόμενη ροπή σε σχέση με την ταχύτητα περιστροφής [3]

- Ένα ιδιαίτερα ευνοϊκό χαρακτηριστικό των αεριοστροβίλων είναι ότι έχουν σημαντικά μικρότερο λόγο βάρους ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος. Για παράδειγμα ένας αεριοστροβίλος 5 MW θα έχει ειδικό βάρος λιγότερο από 1 ton/MW ενώ ένας diesel θα είχε 5 tons/MW. Αυτό το πλεονέκτημα αυξάνει με την ισχύ που παράγουν οι μηχανές πάνω από τα 10 MW, όπου οι κινητήρες diesel είναι σπάνια βιώσιμοι ανταγωνιστές στους αεριοστροβίλους.
- Οι αεριοστροβίλοι έχουν σημαντικά μικρότερο όγκο ανά μονάδα παραγόμενης ισχύος. Στο προηγούμενο παράδειγμα ο όγκος του αεριοστροβίλου θα ήταν 50% μικρότερος του αντίστοιχου κινητήρα diesel. Πρακτικά, λοιπόν, οι αεριοστροβίλοι χαρακτηρίζονται από (σημαντικά) μεγαλύτερη συγκέντρωση ισχύος (=ισχύς προς μέγεθος, όπου μέγεθος όγκος (ή βάρος) από ότι οι κινητήρες diesel, στοιχείο ιδιαίτερα σημαντικό σε εφαρμογές

πρόωσης. Σε μικρές ισχύεις, πάντως, οι διαφορές είναι μικρότερες ειδικά δε αν η σύγκριση γίνει με (τους γενικά πιο ταχύστροφους) κινητήρες Otto.

- Ο χρόνος εκκίνησης του αεριοστροβίλου είναι 10 με 60 sec σε αντίθεση με τους εμβολοφόρους κινητήρες που χρειάζονται ελάχιστα δευτερόλεπτα.
- Η δυναμική για χαμηλές εκπομπές ρύπων είναι κατά μια τάξη μεγέθους καλύτερη για τους αεριοστροβίλους. Ουσιαστικά εδώ αναφερόμαστε σε αιθάλη/σωματίδια και οξείδια του αζώτου (NO_x), με δεδομένο ότι οι εκπομπές μονοξειδίου το άνθρακα (CO) και ακαύστων υδρογονανθράκων από μοντέρνους κινητήρες diesel είναι πρακτικά αμελητέες. Μέχρι στιγμής αυτό το πλεονέκτημα των αεριοστροβίλων δεν έχει αυξήσει σε αξιοσημείωτο βαθμό τις πωλήσεις σε σχέση με τους πετρελαιοκινητήρες, παρότι με τη συνεχή αύξηση της αυστηρότητας των προδιαγραφών ρύπων αναμένεται ότι θα παίξει κάποιο ρόλο στο μέλλον. Από την άλλη πλευρά, οι κινητήρες diesel παράγουν λιγότερο διοξείδιο του άνθρακα (CO_2) λόγω της χαμηλότερης ειδικής κατανάλωσης που έχουν.
- Το κόστος συντήρησης ενός αεριοστροβίλου είναι χαμηλότερο από αυτό του εμβολοφόρου κινητήρα. Ο σημαντικότερος παράγοντας που συνεισφέρει εδώ είναι η χαμηλή κατανάλωση λιπαντικού λαδιού (μπορεί να φτάσει ακόμα και το 10% του καυσίμου σε μεγάλων διαστάσεων κινητήρες diesel).
- Ο αεριοστροβίλος έχει χαμηλότερο επίπεδο δονήσεων και χαμηλότερες εσωτερικές πιέσεις (πολύ καλύτερες, πρακτικά εγγενείς, συνθήκες ζυγοστάθμισης). Αυτό με τη σειρά του, οδηγεί σε δυνατότητα λειτουργίας σε πολύ υψηλότερες ταχύτητες περιστροφής (οι οποίες και αυξάνουν τελικά τη συγκέντρωση ισχύος όπως αναφέρθηκε παραπάνω). Από την άλλη όμως πλευρά, ο θόρυβος που παράγει είναι σε υψηλότερο επίπεδο λόγω ακριβώς των πολύ υψηλότερων ταχυτήτων περιστροφής του συμπιεστή.
- Ένας αεριοστροβίλος ως πηγή πρόωσης είναι θεωρητικά πιο αξιόπιστος και πιο εύκολο να συντηρηθεί από μια εμβολοφόρο μηχανή εξαιτίας της απλούστερης κατασκευής του και των λιγότερων κινούμενων εξαρτημάτων του αλλά στην πράξη έχει μεγαλύτερο ρυθμό φθοράς εξαιτίας των υψηλών ταχυτήτων που αναπτύσσει. Τα πτερύγια του στροβίλου είναι εξαιρετικά ευαίσθητα στη σκόνη και στην άμμο, έτσι λοιπόν στην έρημο πρέπει να τοποθετούνται φίλτρα αέρα και να αλλάζονται καθημερινά. Μια αστοχία στην τοποθέτηση του φίλτρου αέρα ή ένα θραύσμα που θα το τρυπούσε θα δημιουργούσε ζημιά στον κινητήρα. Οι εμβολοφόρες μηχανές, αντίθετα, είναι πιο ελαστικές σε περίπτωση που πάθει ζημιά το φίλτρο αέρα. [3]
- Τέλος πρέπει να αναφερθεί ότι λόγω της μαζικής κατασκευής κινητήρων diesel και Otto σε εφαρμογές αυτοκίνησης εδώ και πολλά χρόνια, το κόστος ενός εμβολοφόρου

κινητήρα είναι σημαντικά χαμηλότερο από αυτό ενός αεριοστροβίλου, παρά την πολύ πιο σύνθετη κατασκευή του.

Στα επόμενα θα παρουσιαστούν οι πιο σημαντικές προσπάθειες εφαρμογής συστημάτων πρόωσης σε οχήματα με αεριοστροβίλους.

2.1.1 Το πρώτο αυτοκίνητο με αεριοστρόβιλο της Chrysler

Η Chrysler ήταν μια από τις πρώτες εταιρίες που πειραματίστηκαν με αυτοκίνητα που είχαν ως κινητήρια πηγή αεριοστροβίλους. Το πρώτο αυτοκίνητο με αεριοστρόβιλο **A831** (gas turbine car) ήταν ένα Plymouth (Σχήμα 2.1) και έκανε την πρώτη του εμφάνιση στους δρόμους στις 25 Μαρτίου 1954. Απέδιδε περίπου 100 HP και το χαρακτηριστικό του ήταν ότι ο αεροστρόβιλος είχε στρογγυλούς αναθερμαντήρες που είχαν την δυνατότητα να ψύχονται κατά την περιστροφή τους. Συνολικά εξελίχθηκαν επτά γενιές αεροστροβίλων που τοποθετήθηκαν σε μοντέλα των Plymouth και Dodge. Οι φωτογραφίες και τα σχέδια που ακολουθούν αφορούν την 4^η γενιά που απέδιδε 130 HP και το αμάξωμα είχε σχεδιαστεί από την ιταλική Ghia. Η συγκεκριμένη γενιά μπορούσε να χρησιμοποιήσει ως καύσιμο Diesel ή αμόλυβδη βενζίνη ή κηροζίνη ή jet fuel JP-4, ακόμα και φυτικά έλαια. Το πρώτο ‘gas turbine car’ παραδόθηκε σε πελάτη στις 29 Οκτωβρίου 1963.

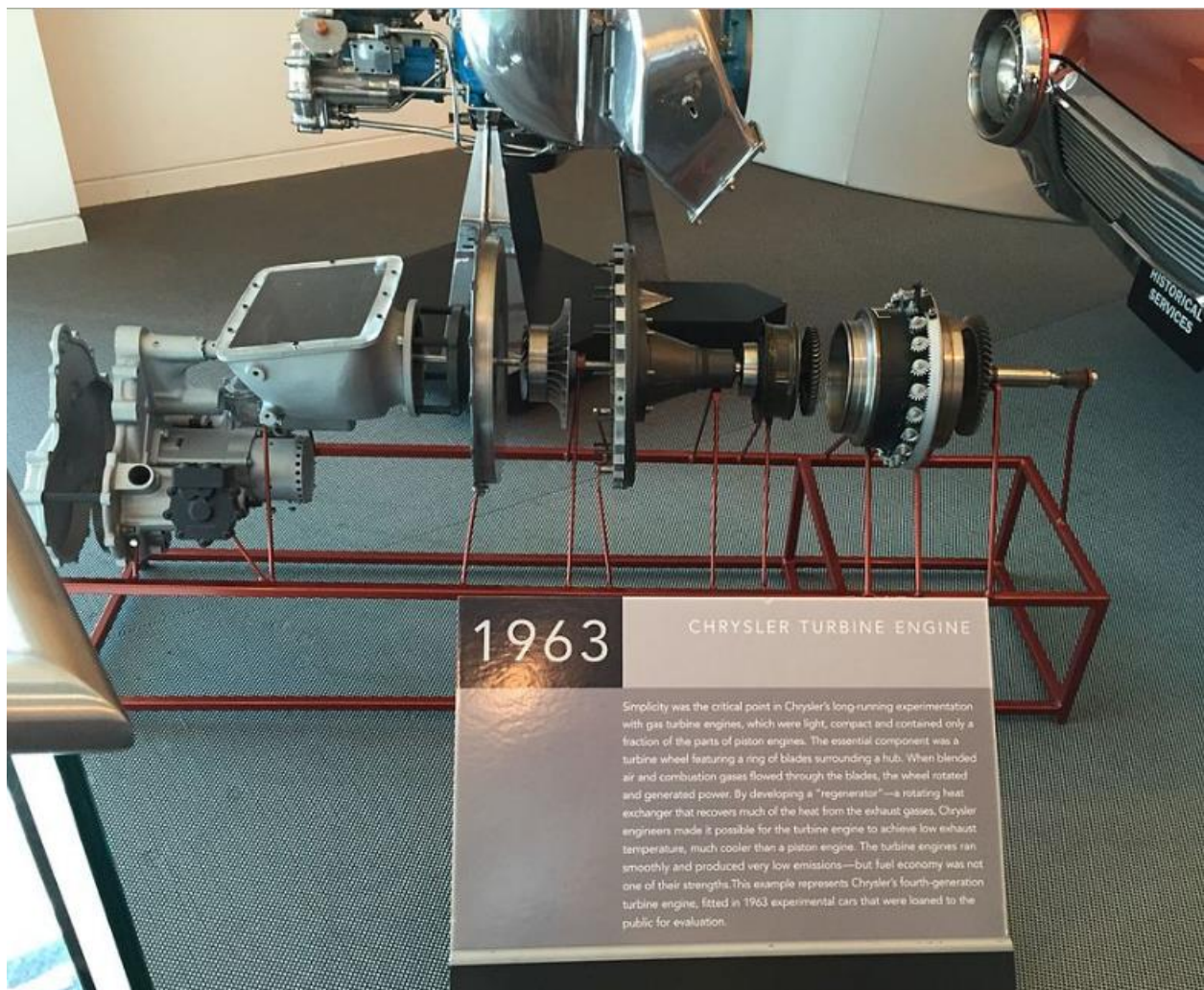


Σχήμα 2.1α Αυτοκίνητο με στρόβιλο της Chrysler [4]

Γενικότερα, τα ‘gas turbine cars’ ποτέ δεν μπόρεσαν να ξεπεράσουν τα βασικά προβλήματα όπως ο μεγάλος θόρυβος και η πολύ μεγάλη κατανάλωση καυσίμου. Στα μεγάλα υψόμετρα αντιμετώπιζαν προβλήματα στον σύστημα εκκινητή – γεννήτριας. Επιπλέον οι χρήστες δεν ήταν εξοικειωμένοι να ακολουθήσουν τη σωστή διαδικασία εκκίνησης (που απαιτούσε χρόνο από 10 έως 60 sec σε αντίθεση με τους κινητήρες diesel που χρειάζονται λιγότερα από 5 sec για να εκκινήσουν) με αποτέλεσμα να παρατηρείται το φαινόμενο απώλειας ισχύος του κινητήρα. Ένα

ακόμα σημαντικό μειονέκτημα που είχαν ήταν η έλλειψη ευελιξίας κάτι που έγινε προσπάθεια να αντιμετωπισθεί με τη χρήση κιβωτίων ταχυτήτων και αυτό γιατί οι αεριοστροβίλοι είναι κατασκευασμένοι για χρήσεις με μεγάλα φορτία και σε υψηλές στροφές κάτι το οποίο δεν ήταν απαραίτητο στα αυτοκίνητα. Επιπλέον ένα μεγάλο ποσό θερμότητας από το θάλαμο καύσης παρέμενε ανεκμετάλλευτο και αποβαλλόταν στο περιβάλλον παρά τη χρήση ανακομιστών θερμότητας.

Στο διάστημα 1966-1973 εξελίχθηκε η 6^η γενιά αεριοστροβίλου σε ένα Dodge Coronet η οποία δεν παρουσιάστηκε ποτέ στο κοινό. Η τελευταία γενιά υπήρξε μόνο ως σχέδιο εισάγοντας μια πατέντα με ένα ελεύθερο ρότορα που θα είχε κατανάλωση και εκπομπές ρύπων συγκρίσιμα με τους τότε εμβολοφόρους κινητήρες. Το σχέδιο αυτό τερματίστηκε το 1978. [4]



Σχήμα 2.1β Ο αεριοστροβίλος A381 που έδινε κίνηση στο όχημα της Chrysler [4]

2.1.2 General Motors Firebird

Εκτός από την Chrysler, άλλη μια αμερικανική εταιρεία, η General Motors (GM) αναμείχθηκε ενεργά στην εξέλιξη οχημάτων που χρησιμοποιούσαν αεριοστροβίλο για την κίνησή τους. Η GM παρουσίασε τα τέσσερα μοντέλα της με το όνομα Firebird (I, II, III, IV) αντίστοιχα τις

χρονιές 1953, 1956 και 1959 σχεδιασμένα από τον Harley Earl. Τα συγκεκριμένα μοντέλα ήταν εμπνευσμένα από καινοτομίες που χρησιμοποιούνταν στα πολεμικά αεροσκάφη. Κανένα από αυτά δε σχεδιάστηκε με σκοπό την μαζική παραγωγή παρά μόνο για να δείξει η GM τι μπορεί να εφαρμόσει από άποψη τεχνολογίας και σχεδιασμού.

Το 1953 κατασκευάστηκε το Firebird I (Σχήμα 2.2) το οποίο ήταν ουσιαστικά ένα αεροπλάνο τύπου jet πάνω σε τροχούς. Ήταν το πρώτο αυτοκίνητο με αεριοστρόβιλο που δοκιμάστηκε στις Η.Π.Α. Ο σχεδιασμός του δεν ήταν πρακτικός, στην ουσία ήταν ένα κουβούκλιο που περιείχε το πιλοτήριο σε σχήμα σφαίρας κατασκευασμένο από fiberglass, με κοντά φτερά και μια κάθετη ουρά. Ο αεριοστρόβιλος του παρήγαγε ισχύ 370 HP και είχε δύο ταχύτητες με τη θερμοκρασία καυσαερίων να φτάνει στους 677 °C. Δοκιμάστηκε δύο φορές συνολικά, με σκοπό να εκτιμηθεί η χρησιμότητα των αεροστροβίλων σε οχήματα και όχι η τελική ταχύτητα που θα μπορούσε να αναπτύξει. Τέλος αξίζει να σημειωθεί ότι το σύστημα φρένων του ήταν από την εξωτερική μεριά του τροχού για να ψύχεται ευκολότερα, ενώ διέθετε κάποια πτερύγια τα οποία το βοηθούσαν να επιβραδύνει στις μεγάλες ταχύτητες.



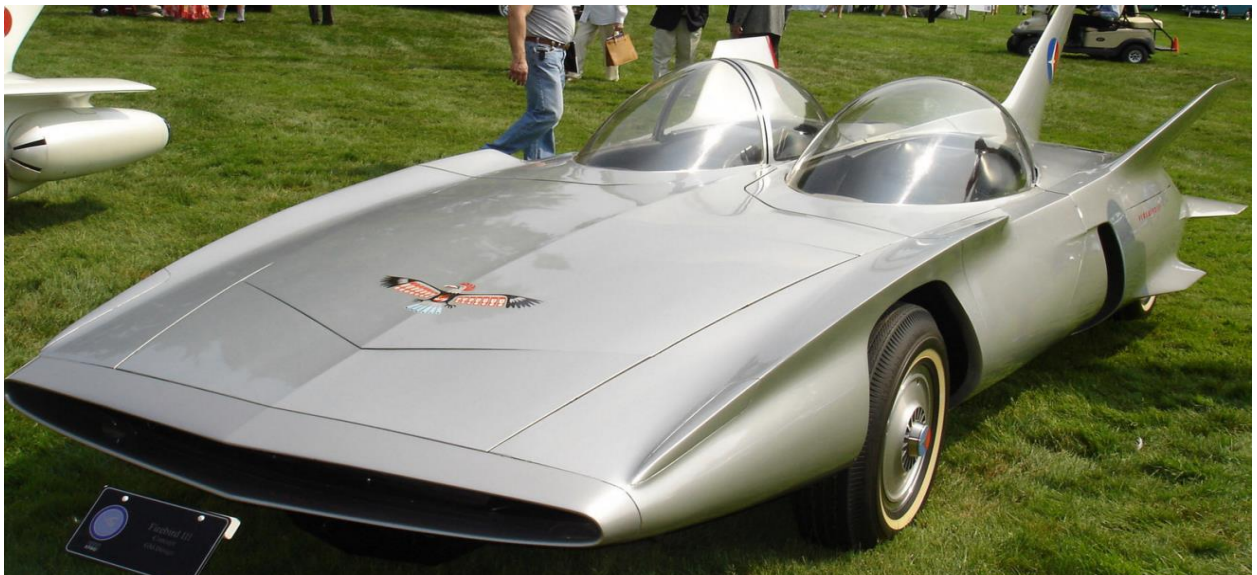
Σχήμα 2.2 Firebird I [5]

Το 1956 φτιάχτηκε το Firebird II (Σχήμα 2.3) το οποίο ήταν πιο πρακτικό, είχε τέσσερις θέσεις σαν οικογενειακό αυτοκίνητο και ο σχεδιασμός του ήταν διαφορετικός σε σχέση με τον προκάτοχό του έχοντας διατηρήσει το κουβούκλιο και το κάθετο φτερό στην ουρά ως κοινά στοιχεία. Ο κινητήρας του απέδιδε 200 HP και για να λυθεί το πρόβλημα της υπερθέρμανσης της εξάτμισης ήταν ανεφοδιασμένο με ένα σύστημα αναγέννησης το οποίο επέτρεπε στον κινητήρα να λειτουργεί περίξ των 538 °C. Το καύσιμο που χρησιμοποιούσε ήταν κηροζίνη, και η καινοτομία που έφερε αυτό το μοντέλο ήταν ότι χρησιμοποιούσε τέσσερα δισκόφρενα με πλήρη ανεξάρτητη ανάρτηση.



Σχήμα 2.3 Firebird II [5]

Η τρίτη έκδοση του Firebird (Σχήμα 2.4) έκανε την εμφάνισή της το 1959, με αμάξωμα από τιτάνιο και με επτά φτερά και ουρά τα οποία δοκιμάστηκαν σε αεροδυναμική σήραγγα. Ήταν διαθέσιμο με ισχύ 225 HP (Whirlfire GT – 305 gas turbine engine) ενώ επιπλέον διέθετε και έναν κινητήρα 2 κυλίνδρων 10 HP βενζίνης για να κινεί όλα τα περιφερειακά εξαρτήματα. Σε γενικές γραμμές, έφερε εξοπλισμό που στο μέλλον χρησιμοποιήθηκε από πολλά οχήματα. Το Firebird IV έκανε ντεμπούτο το 1964 στη Νέα Υόρκη· είχε και αυτό στοιχεία αεροσκάφους. [5]



Σχήμα 2.4 Firebird III [5]

2.1.3 Rover «Jet 1»

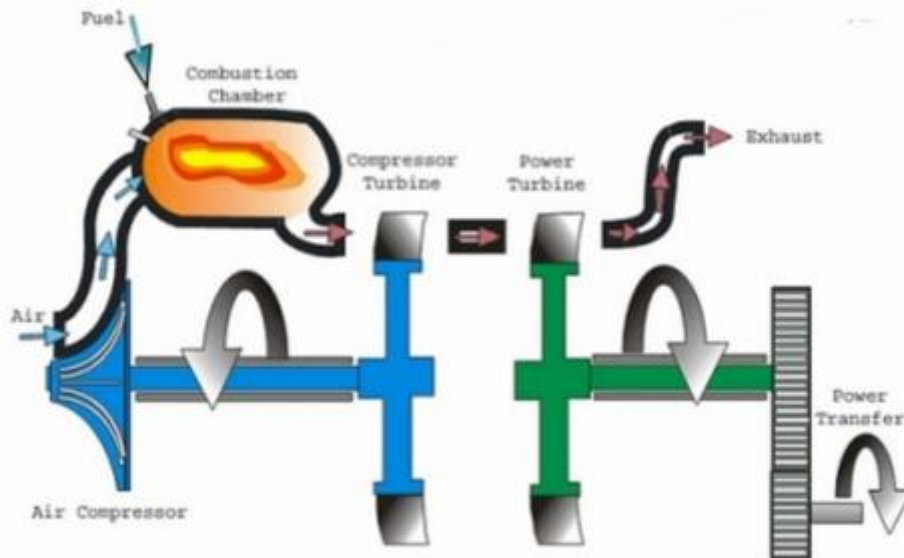
Στη Μεγάλη Βρετανία, οι άνθρωποι της Rover λαμβάνοντας υπόψιν τα πλεονεκτήματα των αεριοστροβίλων που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 2.1, και πιστεύοντας ότι θα αντιμετωπίσουν επιτυχώς τα μειονεκτήματά τους (πολύ μεγάλη κατανάλωση καυσίμου, σημαντική καθυστέρηση στην απόκριση) αποφάσισαν μετά το τέλος του πολέμου να υιοθετήσουν την τεχνολογία των αεριοστροβίλων για κάποια από τα αυτοκίνητά τους.

Το πρώτο πειραματικό Rover με αεριοστρόβιλο ήταν το «Jet 1» (Σχήμα 2.5α), που εξελίχθηκε με βάση το σασί του «P4 75». Τριθέσιο και με την τουρμπίνα τοποθετημένη στο κέντρο, ήταν έτοιμο για την πρώτη δημόσια εμφάνιση του τον Μάρτιο του 1950. Το αυτοκίνητο πρόλαβε να δείξει ένα μέρος των δυνατοτήτων του, πραγματοποιώντας επίδοση – ρεκόρ στην κάλυψη του μιλίου από στάση, ενώ συνέχισε να δίνει το παρών σε αγωνιστικές επιδείξεις ως τα μέσα της δεκαετίας του 1960.

Ενθαρρυμένη από την πρώτη απόπειρα, η Rover παρουσίασε ένα ακόμη αυτοκίνητο με αεριοστρόβιλο στο σαλόνι του Earl Court το 1956. Το «T3 Coupe», όπως ονομάστηκε, ήταν ένα αυτοκίνητο με ισχύ 112 HP και αμάξωμα από fiberglas που εκτός των άλλων διέθετε και τετρακίνηση, ενώ κάλυπτε τα 100 km/h από στάση σε 10,5 sec. Η τρίτη και τελευταία προσπάθεια της εταιρείας για ένα αυτοκίνητο παραγωγής με αεριοστρόβιλο, φαίνεται πως ήταν η καλύτερη, βασισμένο στο πλαίσιο του «P6 2000» το «T4» εμφανίστηκε στην έκθεση της Νέας Υόρκης το 1962.



Σχήμα 2.5α Το «Jet 1» της Rover [6]



Σχήμα 2.5β Διάγραμμα λειτουργίας του αεριοστροβίλου «Jet 1» της Rover [6]

2.1.4 Fiat Gas Turbine Type 8001

Μετά το τέλος του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου, η Fiat αποφάσισε να υιοθετήσει την τεχνολογία των αεριοστροβίλων στα αυτοκίνητα, εξελίσσοντας ένα δικό της πρωτότυπο. Το πρόγραμμα για την παρουσίαση ενός τέτοιου αυτοκινήτου ξεκίνησε το 1948 και χρειάστηκαν έξι χρόνια ώσπου να ολοκληρωθεί. Η τουρμπίνα ολοκληρώθηκε τον Ιανουάριο του 1953 και στις 14 Απριλίου του επόμενου έτους πραγματοποιήθηκε η πρώτη δοκιμή του. Την ημέρα εκείνη η ιταλική εταιρεία έγινε ο δεύτερος κατασκευαστής στον κόσμο μετά την βρετανική Rover, που παρουσίαζε αυτοκίνητο με κίνηση από αεριοστρόβιλο. [6]

Το διαθέσιμο coupe (Fiat Gas Turbine Type 8001) (Σχήμα 2.6), που μεταξύ άλλων ξεχώριζε και για τη σχεδιάσή του, ήταν πολύ αποδοτικό από αεροδυναμικής πλευράς. Οι δοκιμές στην αεροσήραγγα έδειξαν συντελεστή αεροδυναμικής αντίστασης μόλις 0,14, επίδοση που αποτελούσε παγκόσμιο ρεκόρ, το οποίο κράτησε για περίπου τριάντα χρόνια. Ο κινητήρας του διέθετε φυγοκεντρικό συμπιεστή δύο βαλβίδων και τρεις θαλάμους καύσης, ενώ η ισχύς του ανερχόταν στους 300 HP στις 22.000 rpm. Όσο για τη μέγιστη ταχύτητα, οι μηχανικοί της εταιρείας εκτιμούσαν πως ανερχόταν στα 250 km/h. Παρά την αισιοδοξία τους, οι μηχανικοί της Fiat δεν κατάφεραν να αξιοποιήσουν περαιτέρω το αεριοστροβιλοκίνητο πειραματικό τους δημιούργημα. Η υπερβολική κατανάλωση σε καύσιμο (το Fiat Turbina ήταν εφοδιασμένο με δύο δεξαμενές καυσίμων, των 50 L εκάστη) και τα άλυτα προβλήματα υπερθέρμανσης έβαλαν την ιδέα οριστικά στο αρχείο. Το αυτοκίνητο αυτή τη στιγμή βρίσκεται στο Μουσείο Αυτοκινήτου του Τορίνο.



Σχήμα 2.6 Το «Fiat Turbina» της Fiat [7]

Εκτός από τη Fiat, και η Toyota κατασκεύασε μερικά μοντέλα που έκαναν χρήση αεριοστροβίλων (Century gas turbine hybrid, Sports 800 Gas Turbine Hybrid και GTV) τα οποία δεν βγήκαν ποτέ στη γραμμή παραγωγής. [7]

2.1.5 Volvo Environmental Concept Car

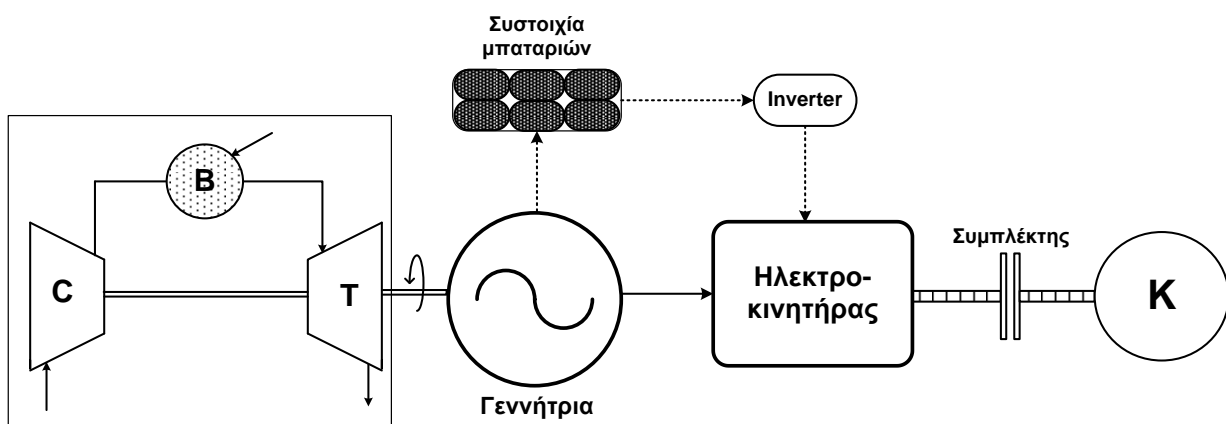
Στις αρχές του 1990 η Volvo παρουσίασε το Volvo Environmental Concept Car (ECC) (Σχήμα 2.7) το οποίο ήταν μια ιδέα για μια υβριδική μονάδα που θα έδινε κίνηση στο αυτοκίνητο από έναν ηλεκτροκινητήρα και έναν αεριοστρόβιλο. Σε αντίθεση με τα περισσότερα υβριδικά αυτοκίνητα παραγωγής τα οποία χρησιμοποιούν βενζινοκινητήρα για να επιταχύνουν αλλά και για να επαναφορτιστούν οι μπαταρίες, το Volvo ECC χρησιμοποιούσε έναν αεριοστρόβιλο για να κινήσει τις γεννήτριες ώστε να επαναφορτίσει τις μπαταρίες του.

Η κύρια ενεργειακή πηγή είναι ο αεριοστρόβιλος, ο οποίος λειτουργεί σειριακά με ηλεκτροκινητήρα. Το βασικό χαρακτηριστικό της εγκατάστασης αυτής που προορίζεται για εφαρμογές πρόωσης είναι ότι ο αεριοστρόβιλος δεν συνδέεται με τους τροχούς ή την έλικα. Κατ' επέκταση δεν υφίσταται αυξομειώσεις στην απαιτούμενη ισχύ και ταχύτητα περιστροφής. Αντιθέτως, το ρόλο αυτό έχει αναλάβει ένας ηλεκτροκινητήρας, Σχήμα 2.7β. Μέσω της υλοποίησης αυτής, πρακτικά ξεπερνιέται το βασικό πρόβλημα πρόωσης αεριοστροβίλων που αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή η προβληματική λειτουργία σε χαμηλά φορτία. Οι ηλεκτροκινητήρες χαρακτηρίζονται από πιο ευνοϊκή καμπύλη ροπής, κυρίως σε χαμηλές στροφές, χαρακτηριστικό ιδιαίτερα χρήσιμο σε εφαρμογές αυτοκίνησης. Ο αεριοστρόβιλος, όντας απομονωμένος από το κομμάτι της πρόωσης, λειτουργεί σε εκείνο το πεδίο των στροφών/φορτίων όπου είναι υψηλότερος ο βαθμός απόδοσής του και παράγει ηλεκτρική ενέργεια στην ενδιάμεση γεννήτρια. Παράλληλα, ο αεριοστρόβιλος μέσω της γεννήτριας, φορτίζει και τη συστοιχία μπαταριών, οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε ως έκτακτη ανάγκη είτε ως επιπλέον βοηθητική πηγή ενέργειας. Ο ηλεκτροκινητήρας με τη σειρά του,

μετατρέπει την ηλεκτρική ενέργεια σε μηχανική, οδηγώντας το σύστημα πρόωσης μέσω κατάλληλου συστήματος οδοντωτών τροχών. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό του συγκεκριμένου οχήματος είναι ότι ο αεριοστρόβιλος του ήταν τεχνολογίας πτωχής-προαναμειγμένης καύσης που λόγω χαμηλότερων θερμοκρασιών καύσης οδηγούσε σε πολύ χαμηλές εκπομπές NOx. Η μέγιστη ισχύς του ήταν 95 HP με τελική ταχύτητα 180 km/h, ενώ ο αεροδυναμικός συντελεστής άγγιζε το 0.23 το οποίο είναι πολύ χαμηλό νούμερο ακόμα και στις μέρες μας. Η μέγιστη αυτονομία του ήταν 668 km. [8]



Σχήμα 2.7α Volvo ECC (Environmental Concept Car) [8]



Σχήμα 2.7β Σχηματικό διάγραμμα υβριδικής εγκατάστασης αεριοστρόβιλου με ηλεκτροκινητήρα [1]

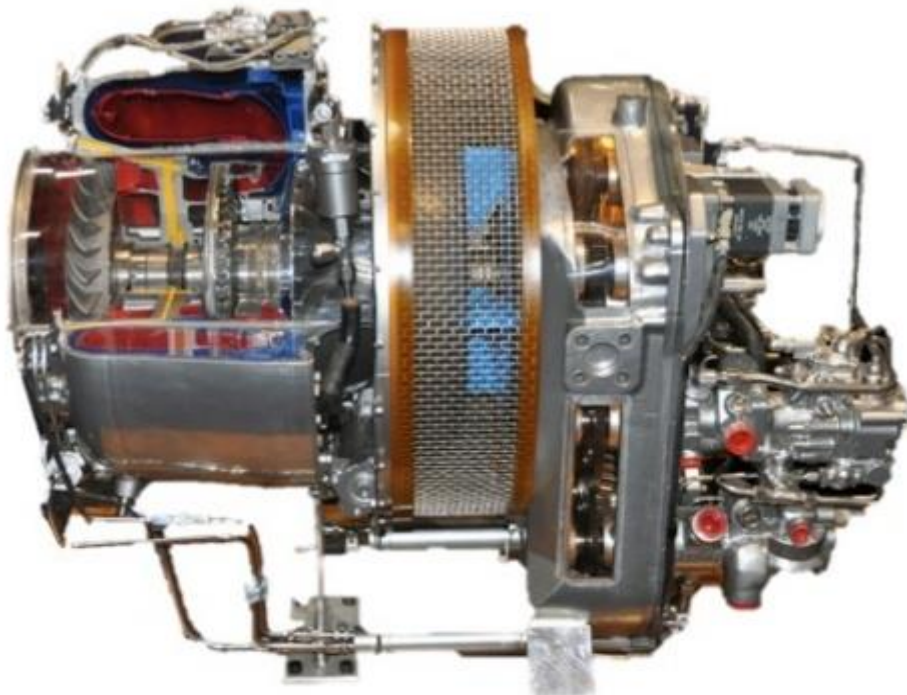
2.1.6 EcoJet concept car

Το 2006 η General Motors σχεδίασε το EcoJet concept car (Σχήμα 2.8α). Ήταν ένα αυτοκίνητο κατασκευασμένο να χρησιμοποιεί ως καύσιμο biodiesel, χρησιμοποιώντας έναν αεριοστρόβιλο (Honeywell LtS101) (Σχήμα 2.8β) αντί εμβολοφόρου κινητήρα. Η συγκεκριμένη μονάδα χρησιμοποιείται συνήθως σε ελικόπτερα και παρέχει 650 HP. Η κίνηση μεταδίδεται στους πίσω τροχούς μέσω ενός αυτόματου κιβωτίου τεσσάρων σχέσεων προσαρμοσμένο από μία Corvette C5. Η αυτόματη μετάδοση της κίνησης ήταν απαραίτητη επειδή ο στρόβιλος απαιτεί σταθερό

φορτίο και ένα μηχανικό κιβώτιο θα οδηγούσε στην υπερτάχυνση του στροβίλου. Το συγκεκριμένο μοντέλο διαθέτει 2 τεπόζιτα καυσίμων, το κυρίως τεπόζιτο περιέχει βιodiesel – σογιέλαιο ενώ το άλλο ρεζερβουάρ περιέχει καθαρό συμβατικό καύσιμο (κηροζίνη) για κινητήρες jet. Η κηροζίνη χρησιμοποιείται και για τη λειτουργία του κινητήρα αλλά και για να ‘καθαρίσει’ το σύστημα από τους μικροοργανισμούς που δημιουργούνται τρεφόμενοι από το βιodiesel. Τέλος, οι θερμοκρασίες που αναπτύσσονται στο σύστημα της εξάτμισης είναι της τάξης των 538 °C σε κανονική λειτουργία, ενώ σε πλήρη ισχύ αγγίζουν τους 982 °C. [9]



Σχήμα 2.8a EcoJet Concept Car [9]



Σχήμα 2.8β Ο Αεριοστροβίλος «Honeywell LtS101» του EcoJet Concept Car [9]

2.1.7 Jaguar C-X75

Στην έκθεση αυτοκινήτου του Παρισιού το 2010 η Jaguar παρουσίασε το C-X75 (Σχήμα 2.9). Ήταν ένα ηλεκτρο-υβριδικό μοντέλο δύο θέσεων με ισχύ 778 HP από τέσσερις ηλεκτροκινητήρες, όπου καθένας από αυτούς έδινε την ισχύ στον αντίστοιχο τροχό. Οι μπαταρίες που χρησιμοποιούσαν αυτοί οι ηλεκτροκινητήρες ήταν επαναφορτιζόμενες χρησιμοποιώντας δύο ντιζελοκίνητους μικρο-αεροστροβίλους της Bladon Jets αντί για 4-X κινητήρα οι οποίοι μπορούσαν να αυξήσουν την αυτονομία του αυτοκινήτου στα 900 km ενώ εξέπεμπαν 28 gr/km CO₂ στον ευρωπαϊκό κύκλο οδήγησης NEDC. Ακόμα ένα πλεονέκτημα αυτών των αεριοστροβίλων ήταν ότι μπορούσαν να χρησιμοποιήσουν ως καύσιμο biodiesel, φυσικό αέριο και LPG. Το συγκεκριμένο μοντέλο ενώ προγραμματιζόταν να βγει στη γραμμή παραγωγής κάνοντας χρήση υπερπληρωμένου κινητήρα σε αντίθεση με το πρότζεκτ που είχε αεριοστροβίλους, δεν βγήκε ποτέ στην παραγωγή εξαιτίας της οικονομικής κρίσης του 2011. [10]



Σχήμα 2.9 Jaguar C-X75 [10]

2.2 Αγωνιστικά αυτοκίνητα με χρήση αεριοστροβίλων

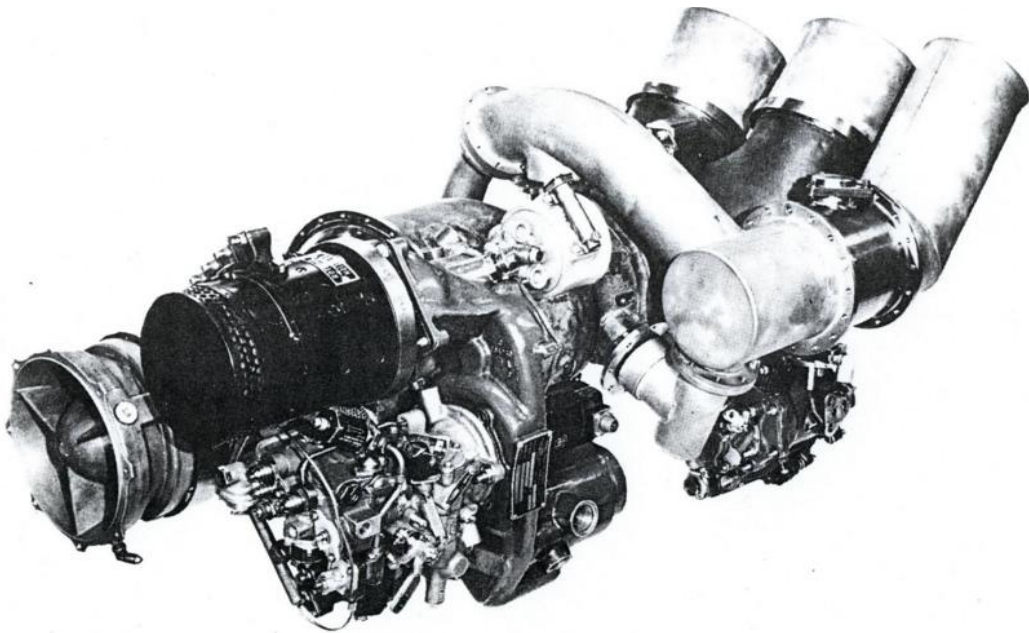
Το πρώτο αγωνιστικό αυτοκίνητο σαν σχέδιο δημιουργήθηκε το 1955 από την πολεμική αεροπορία των Η.Π.Α και δανειζόταν έναν αεριοστρόβιλο από τη Boeing. Στην πραγματικότητα η Rover ήταν η πρώτη εταιρεία σε συνεργασία με την BRM που κατασκεύασε αυτοκίνητο με αεριοστρόβιλο για αγωνιστική χρήση. Ήταν ένα όχημα τύπου coupe όπου συμμετείχε το 1963 στον 24ωρο αγώνα του Le Man, με μέση ταχύτητα 175,3 km/h και με μέγιστη ταχύτητα 229 km/h. Από την άλλη μεριά του ατλαντικού οι American Ray Heppenstall σε συνεργασία με τους Howmet Corporation και McKee Engineering κατασκεύασαν το δικό τους αγωνιστικό όχημα με αεριοστρόβιλο το 1968.

Το «Howmet TX» (Turbine eXperimental) (Σχήμα 2.10) ήταν ένα αμερικάνικο πρωτότυπο αυτοκίνητο αγώνων το οποίο θα δοκίμαζε κατά πόσο θα ήταν ανταγωνιστική η χρήση αεριοστροβίλου σε αυτοκίνητο αγώνα. Σχεδιάστηκε από τον οδηγό αγώνων Ray Heppenstall, με σασί από την McKee Engineering και αεριοστροβιλική μηχανή από την Continental Aviation & Engineering με την χρηματοδότηση της Howmet Corporation.

Οι αεριοστρόβιλοι (Continental TS325-1 2960 cc two – stage gas turbine mid – mounted) (Σχήμα 2.10β) που έδιναν ισχύ στο Howmet TX ήταν πρωτότυποι αφού είχαν σχεδιαστεί για ένα στρατιωτικό ελικόπτερο αλλά τελικά δεν χρησιμοποιήθηκαν ποτέ σε αυτό. Ζύγισαν 77 kg και μπορούσαν να παράξουν ισχύ 350 HP (260 kW) και 850 Nm ροπής στις 57000 rpm. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι στο συγκεκριμένο μηχανικό σύνολο υπήρχε βαλβίδα εκτόνωσης (waste-gate) του στορβίλου, η οποία εξουδετέρωνε την όποια υστέρηση υπήρχε στην απόκριση του πεντάλ γκαζιού που πατούσε ο οδηγός και στις στροφές που ανέβαζε η τουρμπίνα. Επιπλέον, όταν ο στρόβιλος λειτουργούσε στις μέγιστες στροφές του, η βαλβίδα εκτόνωσης βοηθούσε στη ρύθμιση της ποσότητας του καυσίμου που τροφοδοτείτο ο αεριοστρόβιλος.



Σχήμα 2.10α Howmet TX [11]



Σχήμα 2.10β Ο αεριοστρόβιλος «Continental TS325-1» του Howmet TX [11]

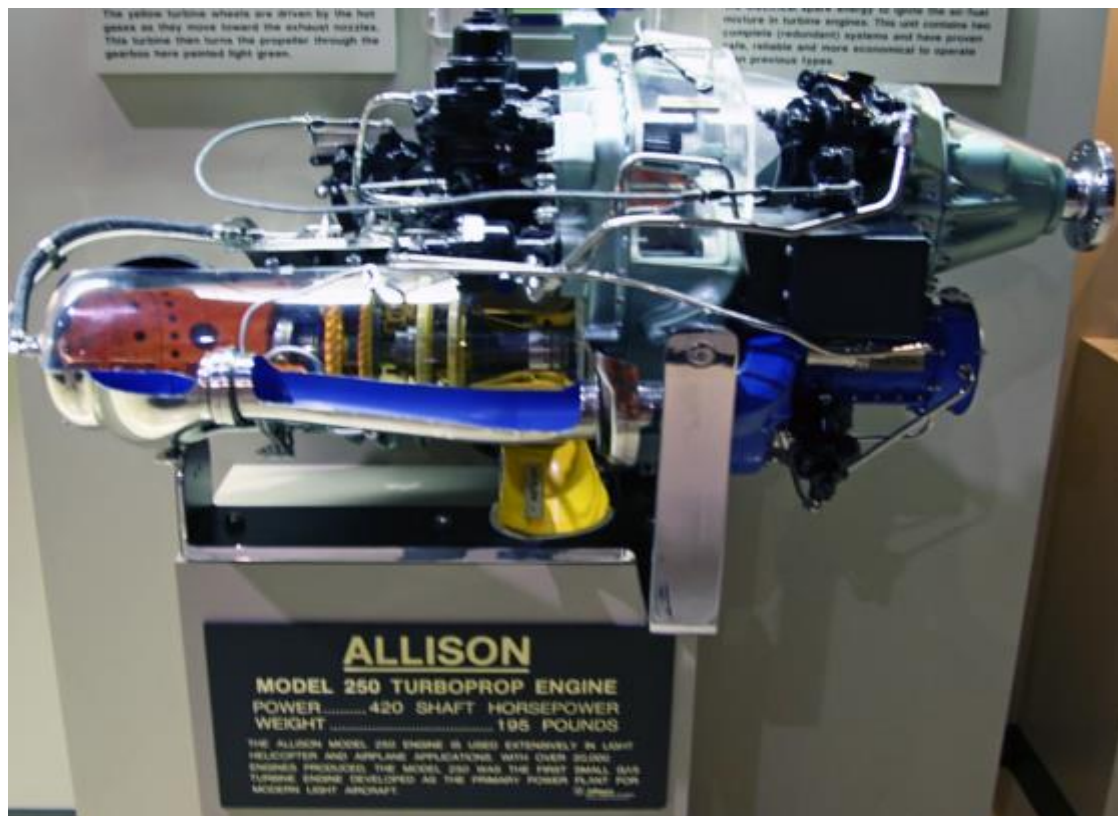
Εκτός από το Howmet TX κατασκευάστηκαν και μερικά άλλα αγωνιστικά οχήματα με αεριοστρόβιλο. Ένα από αυτά ήταν το STP – Paxton Turbocar με τον αεριοστρόβιλο ST6B-62 που συμμετείχε στον αγώνα του Indianapolis 500, όπως επίσης και το Lotus 56B της F1 που λάμβανε την ισχύ του από τον αεριοστρόβιλο της Pratt & Whitney STN 6/76 και κέρδισε στον αγώνα Indianapolis 500. [11]

2.3 Μοτοσυκλέτες (δίκυκλα) με αεριοστρόβιλο

Η πρώτη μοτοσυκλέτα με αεριοστρόβιλο έκανε την εμφάνισή της το 2000. Η MTT Turbine Superbike (Σχήμα 2.11α) είναι η πρώτη μοτοσυκλέτα παραγωγής με αεριοστρόβιλο, συγκεκριμένα η Rolls – Royce εφοδίαζε τη συγκεκριμένη μοτοσυκλέτα με τον αεριοστρόβιλο Allison model 250 (Σχήμα 2.11β) ο οποίος είχε ισχύ 283 kW (380 bHP) και τελική ταχύτητα 365 km/h. Αξίζει ακόμα να σημειωθεί ότι κατέχει το ρεκόρ Guinness ως την πιο ισχυρή μοτοσυκλέτα παραγωγής αλλά και ως την πιο ακριβή αφού κοστίζει 185.000 δολάρια. Αργότερα το 2006 η MTT κατασκεύασε το μοντέλο «Street Fighter» με 420 HP (310 kW) από τον αεριοστρόβιλο Allison 250 – C20B, ενώ το 2015 κυκλοφόρησαν ακόμα δύο νέα μοντέλα. Τα παραπάνω μοντέλα χρησιμοποιούσαν ως καύσιμο είτε κηροζίνη, είτε biodiesel, είτε Jet A, ενώ για τη μετάδοση της κίνησης χρησιμοποιούσαν κιβώτιο 2 σχέσεων. [11]



Σχήμα 2.11α Μοτοσυκλέτα με αεριοστρόβιλο (MTT Turbine Superbike) [12]



Σχήμα 2.11β Ο αεριοστρόβιλος «Allison model 250» της μοτοσυκλέτας MTT Turbine Superbike [12]

2.4 Άρματα μάχης με αεριοστρόβιλο

Ο γερμανικός στρατός στα μέσα του 1944 μελέτησε αρκετές περιπτώσεις αεριοστροβίλων για την πρόωση των αρμάτων μάχης. Ο πρώτος αεριοστρόβιλος (GT 101) που χρησιμοποίησε ο γερμανικός στρατός ήταν στο άρμα μάχης «Panther». Ο «GT 101» κατασκευαζόταν από την BMW και προέκυψε μετά από ένα πλήθος δοκιμών από άλλους αεριοστροβίλους οι οποίοι δεν είχαν τα επιθυμητά αποτελέσματα, το ίδιο συνέβη και με τα μοντέλα που ακολούθησαν δηλαδή το «GT 102» και «GT 103».

Η χρήση του αεριοστροβίλου στα άρματα μάχης είχε το πλεονέκτημα ότι ήταν σαφώς ελαφρύτερος από έναν αντίστοιχο κινητήρα diesel 600 HP, κάτι το οποίο θα βελτιώνει αισθητά το λόγο ισχύος προς το βάρος του οχήματος ενώ παράλληλα θα αύξανε την επιχειρησιακή του ικανότητα στις χερσαίες επιχειρήσεις αλλά και την ταχύτητα που θα μπορούσε να αναπτύξει. Παρόλα αυτά, υπήρχαν και μειονεκτήματα όπως η μη αξιοποίηση των καυσαερίων στα οποία η υψηλή θερμοκρασία τους παρέμενε ανεκμετάλλευτη και κατέληγε στο περιβάλλον. Επιπλέον η χρήση της κηροζίνης για καύσιμο στον αεριοστρόβιλο δεν απεδείχθη οικονομική.

Η δεύτερη φορά που χρησιμοποιήθηκε αεριοστρόβιλος, «PU2979», σε στρατιωτικό θωρακισμένο όχημα ήταν το 1954 σε ένα βρετανικό άρμα μάχης με την ονομασία «British Conqueror tank». Την ίδια εποχή ο σουηδικός στρατός παρήγαγε μαζικά το «Stridsvagn 103» με κινητήρα diesel από τη Rolls και αεριοστρόβιλο από την Boeing «GT 502» ισχύος 300 ίππων.

Έκτοτε οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται ως βοηθητικές μονάδες ισχύος σε άρματα μάχης και ως κύριες μονάδες ισχύος στο σοβιετικό άρμα T-80 (Σχήμα 2.12) και στο αμερικάνικο M1 Abrams (Σχήμα 2.13α).

Το άρμα μάχης T-80 είναι η εξέλιξη των αρμάτων T-64 και T-72. Πρόκειται για ένα ευέλικτο άρμα μάχης που κάνει χρήση του αεριοστροβίλου SG-1000 που αποδίδει 1000 HP και με αυτή την ισχύ το T-80 μπορούσε να αναπτύξει ταχύτητα 70 km/h σε αυτοκινητόδρομο και 48 km/h στην ύπαιθρο. Ο λόγος ισχύος προς το βάρος του είναι 23,8 HP/tn στοιχείο που σε συνδυασμό με το κιβώτιο 5 σχέσεων του έδινε τη δυνατότητα μεγάλης ευελιξίας. Μετά το T-80 ακολούθησαν το T-80B και T-80U που και αυτά έφεραν αεριοστρόβιλο αλλά και κινητήρα diesel.

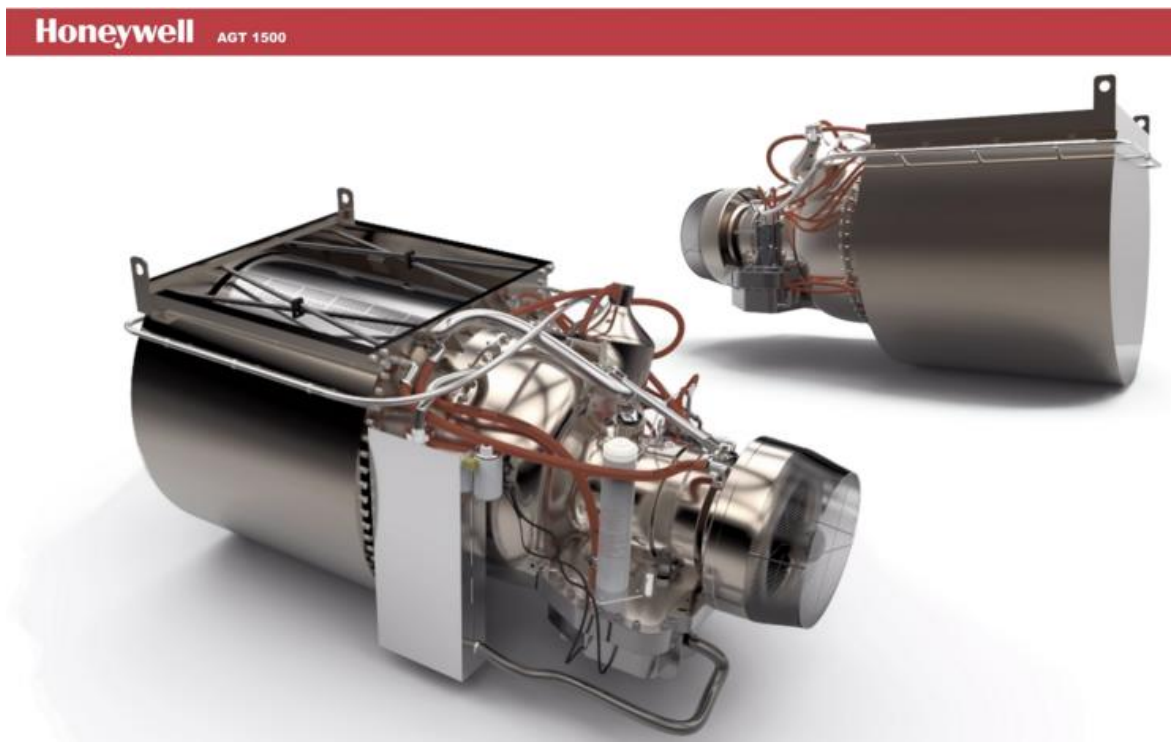


Σχήμα 2.12 Άρμα μάχης «T-80» με αεριοστρόβιλο [14]

Ένα άλλο άρμα μάχης με αεριοστροβιλική μηχανή που κατασκευάστηκε από τον αμερικάνικο στρατό ήταν το «Abrams M1». Έκανε την εμφάνισή του το 1980 και εξακολουθεί να είναι επιχειρησιακά ικανό μέχρι και σήμερα μέσα από τις αναβαθμίσεις που έχει δεχθεί. Το M1 είναι ένα βαριά οπλισμένο και θωρακισμένο άρμα μάχης που κινείται χάρις τον αεριοστρόβιλο «Honeywell AGT1500c» (Σχήμα 2.13β) ο οποίος αποδίδει 1500 HP και 3754 Nm ροπής (Πίνακας 2.13γ) δίνοντας στο άρμα δυνατότητα να αναπτύξει ταχύτητα 72 km/h σε αυτοκινητόδρομο και 48 km/h εκτός δρόμου. Σημαντικό πλεονέκτημα του συγκεκριμένου αεριοστροβίλου είναι ότι μπορεί να κάνει χρήση πολλαπλών καυσίμων, όπως: πετρέλαιο, ναυτικό πετρέλαιο, καύσιμο Jet αλλά και βενζίνη. Έλαβε μέρος στους πολέμους του Κόλπου, του Αφγανιστάν και του Ιράκ. [12],[13],[14]



Σχήμα 2.13α Άρμα μάχης με αεριοστρόβιλο «Abrams M1» [13]



Σχήμα 2.13β Ο αεριοστρόβιλος «Honeywell AGT1500c» του άρματος μάχης Abrams M1 [15]

Τεχνικά χαρακτηριστικά αεροστροβίλου «Honeywell AGT1500c»	
Ονομαστική Ισχύς	1.120 kW
Ροπή στις 3000 σ.α.λ	3.754 Nm
Καθαρό Βάρος	1.134 kg
Μήκος	1,629 m
Πλάτος	0,991 m
Ύψος	0,807 m
Ροή Μάζας Αερίων	5,36 kg/sec
Θερμοκρασία καυσαερίων	499 °C
Καύσιμα / Τύπος Λαδιού	Diesel, Jet Fuel, Gasoline, Marine Diesel /Συνθετικό
Ροπή αδράνειας Στροφείου	0,141 kgm ²
Λόγος Πιέσεων	14

Πίνακας 2.13γ Τεχνικά χαρακτηριστικά αεροστροβίλου «Honeywell AGT1500c»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΟΙ ΣΕ ΤΡΕΝΑ ΚΑΙ ΦΟΡΤΗΓΑ

3.1 Τρένα με αεριοστροβίλους

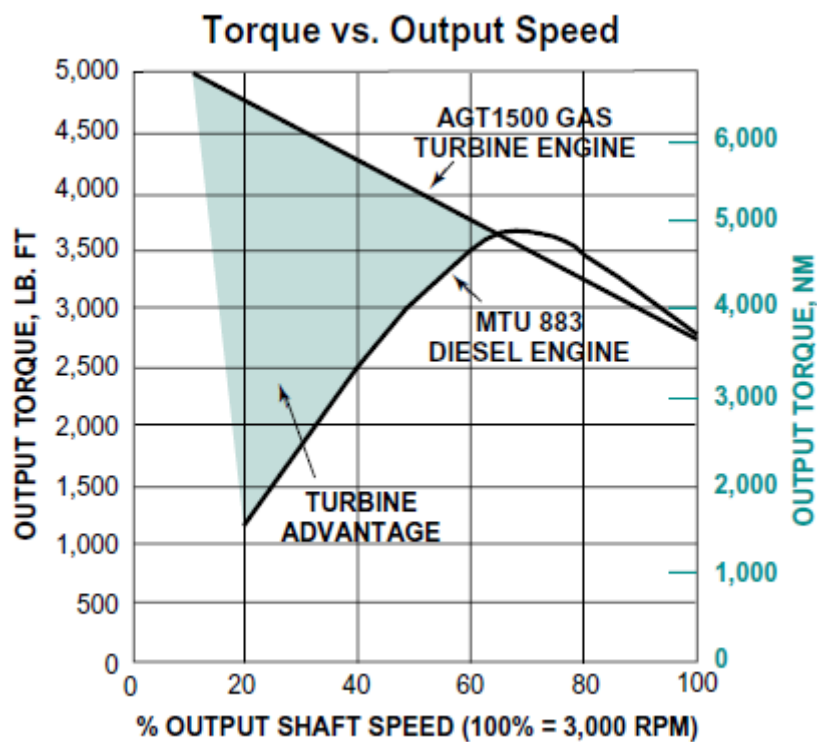
Ένα τρένο με αεριοστρόβιλο είναι μια επιβατική αμαξοστοιχία που χρησιμοποιεί έναν ή περισσότερους αεριοστροβίλους ως κύρια πηγή ισχύος της. Πάρα πολύ λίγα επιβατικά τρένα χρησιμοποιούν αυτό το σύστημα σήμερα, παρόλα αυτά η «Bombardier Transportation» έφτιαξε πρόσφατα ένα πρωτότυπο τρένο.

Ένα τρένο με αεριοστρόβιλο τυπικά αποτελείται από δύο βαγόνια (ένα στην αρχή και ένα στο τέλος του τρένου) και στο ενδιάμεσο υπάρχουν τα βαγόνια των επιβατών. Η μετάδοση της ισχύος στους τροχούς, που παράγει ο αεριοστρόβιλος γίνεται είτε με υδραυλικό είτε με ηλεκτρικό, ακόμα και μηχανικό κιβώτιο ταχυτήτων. Η χρήση του αεριοστροβίλου προσφέρει μερικά πλεονεκτήματα σε σχέση με μια εμβολοφόρο μηχανή (Διάγραμμα 1.2). Στον αεριοστρόβιλο υπάρχουν λίγα κινούμενα μέρη μειώνοντας την ανάγκη για λίπανση και τα έξοδα συντήρησης ενώ παράλληλα ο λόγος ισχύος προς το βάρος του οχήματος είναι πολύ μεγαλύτερος. Μια αεριοστροβιλική μηχανή δεδομένης ισχύος είναι φυσικά μικρότερη σε μέγεθος από μια εμβολοφόρο μηχανή της ίδιας ισχύος παρόλα αυτά το πρόβλημα με τις αεριοστροβιλικές μηχανές είναι ότι η ισχύς τους μειώνεται σημαντικά με τις ταχύτητες περιστροφής τους σε αντίθεση με τους εμβολοφόρους κινητήρες όπου η καμπύλη ισχύος τους είναι σχεδόν επίπεδη. [16]

Σε αντίθεση με τις εφαρμογές αυτοκινήτων που αναφέρθηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, όπου το μεγάλο πλεονέκτημα είναι η μη-ευνοϊκή λειτουργία του αεριοστροβίλου σε χαμηλά/μεσαία φορτία/στροφές, σε πιο 'βαριές' εφαρμογές, όπως η σιδηροδρομική πρόωση και η κίνηση βαρέων οχημάτων, το μέγιστο μειονέκτημα μίας αεριοστροβιλικής εγκατάστασης σε σχέση με αυτήν ενός εμβολοφόρου κινητήρα (πρακτικά, μόνο diesel) έγκειται στον πολύ χειρότερο βαθμό απόδοσης. Αυτός καθιστά ουσιαστικά ασύμφορη τη χρήση αεριοστροβίλου ως πηγή πρόωσης, με δεδομένο ότι πρόκειται για μεγάλων ισχύων κινητήρες, οι οποίοι επιπλέον λειτουργούν πολλές ώρες ημερησίως, άρα καταναλώνουν πολύ μεγάλες ποσότητες καυσίμου. Από την άλλη πλευρά, η μεγάλη ροπή ενός αεριοστροβίλου σε χαμηλές στροφές καθιστά πιο εύκολη την εκκίνησή του σε σχέση με έναν απλό κινητήρα diesel (οι τελευταίοι σε εφαρμογές σιδηροδρομικής πρόωσης συνδυάζονται συνήθως με ηλεκτροκινητήρες, σε σειριακή σύνδεση όπως στο Σχήμα 2.7β, για να βελτιωθεί η εκκίνησή τους υπό φορτίο). Βάσει των ανωτέρω, δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι οι εφαρμογές χρήσης αεριοστροβίλου σε πρόωση τρένων και βαρέων οχημάτων ήταν περιορισμένη. Τα βασικότερα παραδείγματα θα αναφερθούν στις παραγράφους που ακολουθούν.



Σχήμα 3.1 Τρένο με αεριοστρόβιλο στο Κίνγκστον του Καναδά



Διάγραμμα 1.2 Καμπύλη ροπής αεριοστρόβιλου συναρτήσει των στροφών

3.2 Ηνωμένο Βασίλειο

Η εταιρεία των βρετανικών σιδηρόδρομων επένδυσε στη δοκιμή αεριοστροβλικών κινητήρων στις αρχές του 1950. Τα περισσότερα παραδείγματα ήταν από το δυτικό τομέα του σιδηροδρομικού δικτύου εξαιτίας του μεγάλου όγκου φορτίου. Η τελευταία προσπάθεια πριν το «APT-E» ήταν το «GT3» το 1962 αλλά τελικά οι βρετανικοί σιδηρόδρομοι κατέληξαν στη χρήση πετρελαίου και ηλεκτρικού ρεύματος για την κίνηση των τρένων τους έτσι το σχέδιο εγκαταλείφθηκε.

3.2.1 «British Rail APT-E»

Το «APT-E» (Σχήμα 3.2) ήταν η μόνη αμαξοστοιχία το 1972 στους βρετανικούς σιδηρόδρομους που τροφοδοτείτο από αεριοστροβίλους. Αποτελούνταν από δύο βαγόνια που χρησιμοποιούνταν για να κινούν την αμαξοστοιχία και άλλα δύο βαγόνια ενδιάμεσα. Το καθένα από τα δύο βαγόνια που βρίσκονταν στην αρχή και στο τέλος της αμαξοστοιχίας ήταν εξοπλισμένο με τέσσερις αεριοστροβίλους της Rover «Leyland 2S/350» με ισχύ 300 HP η οποία σταδιακά ανέβηκε στους 330 HP. Το μήκος του τρένου έφτανε τα 21 μέτρα και η τελική του ταχύτητα άγγιζε τα 245 km/h. Η συγκεκριμένη μονάδα χρησιμοποιήθηκε μόνο για δοκιμές και δεν προχώρησε ποτέ σε μαζική παραγωγή καταλήγοντας μετά το τέλος των δοκιμών στο βρετανικό μουσείο σιδηροδρόμων. [17]



Σχήμα 3.2 «APT-E» σε διαδικασία δοκιμών το 1972[17]

3.2.2 British Rail GT3

Το «GT3» ήταν ένα πρωτότυπο τρένο που κατασκευάστηκε το 1961 με αεριοστρόβιλο «EM27L» που απέδιδε 2700 HP (2000 kW). Το σασί του ζύγιζε 125,5 tn και ήταν ενισχυμένο για να αντέχει τη ροπή του αεριοστροβίλου που του έδινε τη δυνατότητα να αναπτύξει ταχύτητα 140 km/h.[18]

3.3 Γαλλία

Οι γαλλικοί εθνικοί σιδηρόδρομοι (French National Railways) χρησιμοποίησαν αρκετές φορές αεριοστροβίλους στα τρένα τους στις περιοχές όπου δεν είχαν ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτές οι αμαξοστοιχίες αποτελούνταν τυπικά από δύο βαγόνια στην αρχή και στο τέλος που είχαν τις μονάδες αεριοστροβίλων, και τρία βαγόνια στο ενδιάμεσο. Η χρήση των συγκεκριμένων τρένων στη Γαλλία διήρκησε μέχρι το 2005. Το πρώτο πρωτότυπο «TGV» ήταν ανεφοδιασμένο με αεριοστρόβιλο κάτι που στη συνέχεια άλλαξε και έγινε ηλεκτροκίνητο.

3.3.1 TGS (Turbine a gaz special) Prototype – XR8575 Trainset

Το 1967 οι γαλλικοί εθνικοί σιδηρόδρομοι μετέτρεψαν μια ντιζελοκίνητη αμαξοστοιχία δύο βαγονιών της ANF Industrie σε ένα πρωτότυπο πειραματικό τρένο με αεριοστρόβιλο με την ονομασία «TGS». Το «TGS» αναμορφωμένο με το νέο του μηχανικό σύνολο και με την υπάρχουσα μετάδοση κίνησης κατάφερε να αναπτύξει ταχύτητα της τάξης των 252 km/h.

3.3.2 Class T 1000 ETG Trains

Αυτή η σειρά τρένων είναι η πρώτη με αεριοστρόβιλο. Η αμαξοστοιχία αποτελούταν από 4 βαγόνια 188 θέσεων και διέθετε έναν κινητήρα diesel και έναν αεριοστρόβιλο. Η αεριοστροβιλική μηχανή «Turmo III F3» (Σχήμα 3.3) είχε ισχύ 820 kW ενώ ο κινητήρας diesel 320 kW. Αυτά τα τρένα ανέπτυσαν ταχύτητες 160 km/h.



Σχήμα 3.3 Ο αεριοστρόβιλος «Turmo III F3»

3.3.3 Class T 2000 RTG Trains

Αυτή η αμαξοστοιχία αποτελούταν από 5 βαγόνια των 280 θέσεων, όπου ο ζυγός αριθμός βαγονιών ανεφοδιαζόταν με τον αεριοστρόβιλο «Turmo III F1» με ισχύ 820 kW ενώ ο μονός αριθμός βαγονιών με τον αεριοστρόβιλο «Turmo XII» με ισχύ 1.200 kW. Συνήθως όταν ανέπτυσε την ταχύτητα ταξιδιού, ο αεριοστρόβιλος των 820 kW σταματούσε να λειτουργεί. [19]

3.3.4 TGV 001 Experimental High-Speed Train

Το πειραματικό τρένο με αεριοστρόβιλο «TGV 001» (Σχήμα 3.4) πέτυχε το παγκόσμιο ρεκόρ ταχύτητας για αμαξοστοιχία με αεριοστρόβιλο που ήταν 318 km/h στις 8 Δεκεμβρίου του 1972. Ήταν ένα τρένο 5 βαγονιών με ισχύ 6500 HP που προερχόταν από 4 αεριοστροβίλους, οι οποίοι

είχαν μικρό μέγεθος και καλή αναλογία ισχύος προς βάρος, όπως επίσης και μεγάλη αυτονομία.
[20]



Σχήμα 3.4 «TGV 001» [20]

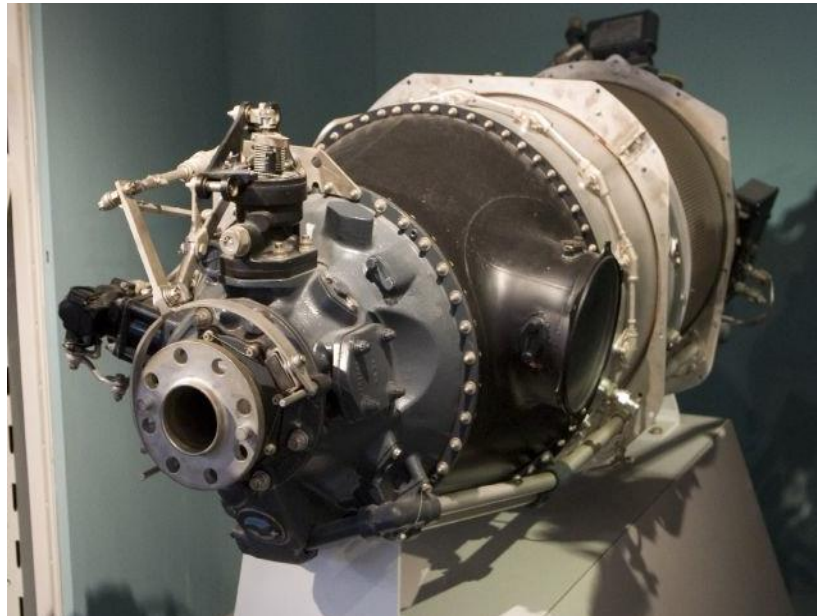
3.4 Ηνωμένες Πολιτείες

Τον Απρίλιο του 1950 η «Westinghouse» ολοκλήρωσε την κατασκευή ενός πειραματικού τρένου με τουρμπίνες συνολικής ισχύος 4000 HP (3000 kW) γνωστό ως «Blue Goose». Το εν λόγω τρένο μπορούσε να αναπτύξει ταχύτητα 160 km/h και παρόλο που πέτυχε στις δοκιμές επιβατών και φορτίου, ποτέ δεν υπήρξαν παραγγελίες για να ξεκινήσει η παραγωγή του.

Στη δεκαετία του 1960 η «United Aircraft» κατασκεύασε το «UAC Turbo Train» (Σχήμα 3.5α) το οποίο δοκιμάστηκε στην Πενσυλβάνια ενώ στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε από τους οργανισμούς αμερικανικών και καναδικών σιδηροδρόμων. Το «UAC Turbo Train» ήταν από τα πρώτα επιβατικά τρένα με αεριοστρόβιλο που κινούνταν με υψηλές ταχύτητες. Η ισχύς του ήταν 2000 HP και η μέγιστη ταχύτητά του 193 km/h, τιμές οι οποίες επιτυγχάνονταν χάρις τον αεριοστρόβιλο της Pratt & Whitney Canada PT6 (Σχήμα 3.5β).



Σχήμα 3.5α «UAC Turbo Train» [21]



Σχήμα 3.5β Ο αεριοστρόβιλος «PT6» που έδινε κίνηση στο «UAC Turbo Train» [21]

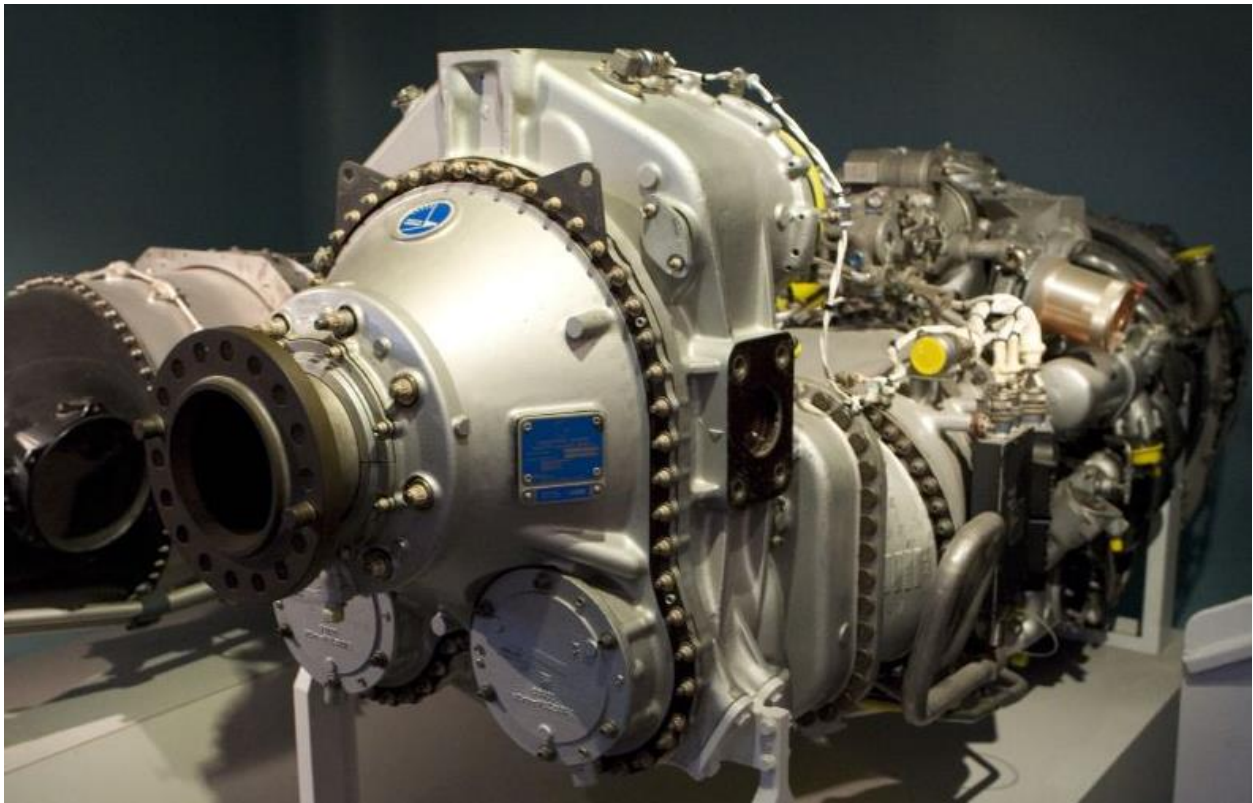
Η εταιρεία των σιδηροδρόμων του Long Island δοκίμασε το 1966 ένα πειραματικό αεριοστροβιλοκίνητο τρένο που ονομαζόταν «GT-1» το οποίο έπαιρνε την ισχύ του από δύο τουρμπίνες Garrett, όπου στη συνέχεια μετά από μετατροπές μετονομάστηκε σε «GT-2». Το 1977 δοκιμάστηκαν ακόμα οκτώ τρένα με διπλή δυνατότητα λειτουργίας είτε με αεριοστρόβιλο είτε με ηλεκτροκινητήρα. Πολύ αργότερα το 1997 η ομοσπονδία σιδηροδρόμων πρότεινε να αναπτυχθούν υψηλών ταχυτήτων αμαξοστοιχίες για τους βορειότερους διαδρόμους της χώρας όπου η ηλεκτροδότηση δεν ήταν οικονομική. Η «Bombardier Ltd» κατασκεύασε το «Jet Train» ένα τρένο που συνδύαζε αεριοστρόβιλο της «Pratt & Whitney Canada» τον PW100 παρέα με κινητήρα diesel.

Το «Jet Train» (Σχήμα 3.6^α) ήταν ένα πειραματικό επιβατικό τρένο υψηλών ταχυτήτων που προσπαθούσε να κάνει πιο ελκυστικό το Ευρωπαϊκό στυλ τρένων υψηλών ταχυτήτων στο

επιβατικό κοινό της Βορείου Αμερικής. Χρησιμοποιούσε πετρέλαιο για τον πετρελαιοκινητήρα του ενώ στις υψηλότερες ταχύτητες εκμεταλλευόταν τον αεριοστρόβιλό του. Ο αεριοστρόβιλος του (Σχήμα 3.6β) είχε ισχύ 3750 kW ενώ τού έδινε τη δυνατότητα να αναπτύξει μέγιστη ταχύτητα 240 km/h. [21],[22],[23]



Σχήμα 3.6α Το «Jet Train» της Bombardier Ltd [22]



Σχήμα 3.6β Ο αεριοστρόβιλος PW100 της Pratt & Whitney Canada που κινούσε το «Jet Train» [22]

3.5 Καναδάς

Οι καναδικοί σιδηρόδρομοι ήταν αυτοί που μαζί με τις Η.Π.Α χρησιμοποίησαν το «Turbo Train» την περίοδο 1968 έως 1982. Στη συνέχεια σταμάτησε η χρήση αμαξοστοιχιών με αεριοστρόβιλους και προτιμήθηκαν νηζελο-ηλεκτρικές αμαξοστοιχίες μέχρι το 2002 όπου ανακοινώθηκε η έναρξη κατασκευής του «JetTrain» το οποίο όμως δεν τελεσφόρησε εξαιτίας της έλλειψης χρηματοδότησης από την κυβέρνηση του Καναδά.

3.6 Σοβιετική Ένωση – Ρωσία

Δύο αεριοστρόβιλο-ηλεκτροκίνητοι τύποι αμαξοστοιχιών υποβλήθηκαν σε δοκιμές από το 1959 έως το 1970 από τη Σοβιετική Ένωση. Ο «G1-01» και ο «GP1» ήταν τα τρένα με ισχύ 2600 kW το καθένα που δοκιμάστηκαν εκείνη την εποχή.

Το 2006 οι ρωσικοί σιδηρόδρομοι εισήγαγαν το «GEM-10», η ισχύς του οποίου ανερχόταν στα 1000 kW και χρησιμοποιούσε ως καύσιμο υγροποιημένο φυσικό αέριο. Στη συνέχεια το 2007 έκανε την εμφάνισή του το «GT1-001» (Σχήμα 3.7) που είχε μέγιστη ισχύ 8300 kW ενώ χρησιμοποιούσε και αυτό για την κίνησή του υγροποιημένο φυσικό αέριο.[24]



Σχήμα 3.7 Το «GT1-001» των ρωσικών σιδηροδρόμων [24]

3.7 Αεριοστρόβιλοι σε φορτηγά

Τα φορτηγά χρησιμοποιούνται ευρέως στους τελευταίους δύο αιώνες χρησιμοποιώντας στο 80% του κύκλου οδήγησής τους το 65 με 100 % της ισχύος τους. Έτσι λοιπόν απαιτούν χαμηλή ειδική κατανάλωση καυσίμου, καλό λόγο ταχύτητας – ροπής για να επιταχύνουν με φορτίο και βάρος μηχανής πολύ μικρότερο σε σχέση με τον αντίστοιχο όλου του οχήματος.

Στις μέρες μας τα φορτηγά τροφοδοτούνται με ισχύ από κινητήρες diesel. Ένας αεριοστρόβιλος θα ήταν περισσότερο κατάλληλος για χρήση σε φορτηγό από ότι σε ένα αυτοκίνητο εξαιτίας των υψηλών αποθεμάτων ροπής και της ανάγκης για λιγότερες σχέσεις στο κιβώτιο ταχυτήτων (από 12 μόνο 3 έως 5). Παρόλα αυτά, η προσπάθεια για φορτηγά με αεριοστρόβιλους δεν τελεσφόρησε για να προχωρήσει σε παραγωγή εξαιτίας του χαμηλού βαθμού απόδοσης άρα του πολύ υψηλότερου κόστους καυσίμου.

Στη δεκαετία του 1950 οι αεριοστρόβιλοι θεωρούνταν μια εναλλακτική λύση ως προς τους κινητήρες βενζίνης και πετρελαίου. Η Boeing σε συνεργασία με την Kenworth εγκατέστησαν επιτυχώς σε ένα φορτηγό έναν (Σχήμα 3.8) αεριοστρόβιλο 175 HP. Ζύγιζε 90 kg σχεδόν 13 φορές λιγότερο από έναν κινητήρα diesel ίδιας ισχύος. Μειονεκτήματα του συγκεκριμένου οχήματος ήταν ότι επιτάχυνε αργά, είχε μεγάλες εκπομπές ρύπων και είχε τεράστια κατανάλωση (235 L/100 km).

Το 1966 η Chevrolet κατασκεύασε το «Turbo Titan III». Ήταν ένα φορτηγό που εφοδιαζόταν με τον αεριοστρόβιλο GT-309, ο οποίος απέδιδε ισχύ 280 HP κάνοντας χρήση ενός κιβωτίου ταχυτήτων που μείωνε τις στροφές του στρόβιλου από τις 35000 rpm στις 4000 rpm. Το εν λόγω μοντέλο προέκυψε μετά από 15 χρόνια έρευνας και ανάπτυξης πάνω στην τεχνολογία των

αεριοστροβίλων, ενώ παράλληλα δανειζόταν αρκετά στοιχεία από προηγούμενες κατασκευές που χρησιμοποιούσαν αεριοστροβίλους. [25],[26]



Σχήμα 3.8 Φορτηγό με αεριοστρόβιλο «Kenworth series 500»

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

ΧΡΗΣΗ ΤΩΝ ΑΕΡΙΟΣΤΡΟΒΙΛΩΝ ΩΣ ΜΕΣΟ ΠΡΟΩΣΗΣ ΣΤΗ ΝΑΥΤΙΛΙΑ

4.1 Γενικά για τους αεριοστροβίλους στη ναυτιλία

Συστήματα αεριοστροβίλων απλού ή συνδυασμένου κύκλου ή σε συνδυασμένη εγκατάσταση είναι διαδεδομένα σε ναυτικές εφαρμογές. Τα πλεονεκτήματα που διαθέτουν έναντι των εμβολοφόρων κινητήρων αλλά και η σταδιακή έρευνα και ανάπτυξη πάνω στη συγκεκριμένη τεχνολογία οδήγησε στην ‘κατάληψη’ ενός μεγάλου ποσοστού των μονάδων ισχύος σε διάφορους τύπους πλοίων. Οι συγκεκριμένες μονάδες ισχύος μπορούν να χρησιμοποιούνται είτε ως κύρια πηγή πρόωσης ενός πλοίου είτε ως βοηθητική (booster).

4.2 Πλεονεκτήματα

Τα πλεονεκτήματα των εγκαταστάσεων ναυτικών αεριοστροβίλων είτε απλού είτε συνδυασμένου κύκλου έναντι των κινητήρων diesel ποικίλουν, όπως αναφέρθηκαν και την Παράγραφο 2.1. Τα στοιχεία που θα αναφερθούν εδώ επικεντρώνονται σε σύγκριση μόνο με κινητήρες diesel και σε μεγάλες ισχύεις. Οι αεριοστροβίλοι κατά τη λειτουργία τους δεν εκπέμπουν μαύρο καπνό ενώ τα τελευταία χρόνια γίνονται όλο και πιο δημοφιλείς εξαιτίας των περιβαλλοντικών περιορισμών, λόγω των χαμηλών επιπέδων εκπομπών NO_x και SO_x. Οι χαμηλές εκπομπές οφείλονται στην υψηλή ποιότητα καυσίμου που χρησιμοποιούνται (SO_x) αλλά και στις χαμηλότερες θερμοκρασίες καύσης (NO_x).

Ο χρόνος από την έναρξη για την επίτευξη πλήρους φορτίου σε σχέση με εγκαταστάσεις κινητήρων diesel ή ατμοστροβίλου είναι πολύ μικρότερος. Ένας μεγάλος 2-X κινητήρας diesel φτάνει από την παύση σε πλήρες φορτίο σε περίπου 0,5 – 1 ώρα σε αντίθεση με τον αεριοστροβίλο που χρειάζεται μερικά δευτερόλεπτα.

Το σύνολο του συστήματος είναι σχετικά απλό και περιλαμβάνει μικρό αριθμό βοηθητικών μηχανημάτων. Είναι ένα σύστημα με έντονη αυτοματοποίηση όπου όλες οι λειτουργίες ελέγχονται από ενσωματωμένο σύστημα ελέγχου το οποίο παρακολουθεί την κατανάλωση καυσίμου και την κατάσταση του στροβίλου και ειδοποιεί τον χειριστή σε περίπτωση που οποιαδήποτε παράμετρος υπερβεί τις προκαθορισμένες τιμές. Παράλληλα με την ειδοποίηση, το σύστημα ελέγχου μειώνει αυτόματα το φορτίο του αεριοστροβίλου για την αποφυγή βλάβης.

Το σύστημα ελέγχου παρακολουθεί την κατάσταση του στροβίλου σε πραγματικό χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι η συντήρηση του συστήματος γίνεται όχι σε προκαθορισμένα διαστήματα αλλά όποτε απαιτείται. Επιπλέον, η τμηματική κατασκευή και το μέγεθος των στροβιλομηχανών επιτρέπει την άμεση αντικατάσταση τμημάτων ή και ολόκληρου του συστήματος εν πλω χωρίς

να δεσμεύεται το πλοίο σε χρονοβόρους δεξαμενισμούς. Λόγω της «ευκολίας» αποκατάστασης της βλάβης αυξάνεται η αξιοπιστία του συστήματος καθώς επίσης και η διαθεσιμότητα του λόγω γρήγορων επιδιορθώσεων.

Επειδή οι στροβιλομηχανές είναι περιστροφικές μηχανές, η παραγόμενη ισχύς είναι στη μορφή που χρειάζεται για να περιστρέψει την έλικα ή την ηλεκτρογεννήτρια. Παράλληλα επειδή πρόκειται για μηχανή συνεχόμενης ροής έχουν λιγότερους κραδασμούς και θόρυβο. Κατά συνέπεια τα έξοδα για εγκατάσταση ηχομόνωσης είναι πολύ λιγότερα.

Χαρακτηριστικό των αεριοστροβίλων είναι η δυνατότητα παραγωγής υψηλής ισχύος σε σχέση με μικρό μέγεθος και βάρος εγκατάστασης. Τέλος ο χαμηλός βαθμός απόδοσης έχει βελτιωθεί σε σχέση με τους εμβολοφόρους κινητήρες σε περίπου 40% για λειτουργία απλού κύκλου και 55% για συνδυασμένο κύκλο.

4.3 Μειονεκτήματα

Ένα από τα μειονεκτήματα των αεροστροβίλων σε σύγκριση με τους κινητήρες diesel, όπως έχει αναφερθεί ήδη, είναι η υψηλή κατανάλωση καυσίμου. Η θερμική απόδοση του αεριοστροβίλου είναι χαμηλότερη από αυτή των κινητήρων diesel συγκρίσιμης ισχύος. Ο βαθμός απόδοσης αεριοστροβίλων αεροπορικού τύπου ισχύος 20 – 30 MW είναι της τάξης από 36,5 έως 40 %. Αυτό κάνει την κατανάλωση καυσίμου απλού κύκλου του αεριοστροβίλου κατά 20% υψηλότερη από ενός κινητήρα diesel. Η θερμική απόδοση μικρών αεριοστροβίλων μεταξύ 2 – 5 MW δεν υπερβαίνει το 30 %.

Οι αεροστροβίλοι απαιτούν καύσιμο υψηλής ποιότητα και επομένως υψηλού κόστους. Λειτουργούν είτε με αέριο καύσιμο, είτε με υγρό καύσιμο, είτε και με τα δύο ταυτόχρονα, χωρίς κανένα περιορισμό ως προς την αναλογία μεταξύ των καυσίμων. Η περιεκτικότητα σε βανάδιο και θείο θα πρέπει να διατηρείται εντός των καθορισμένων ορίων έτσι ώστε να αποφευχθεί η διάβρωση, από υψηλές θερμοκρασίες, των περυγίων του στροβίλου, πράγμα που οδηγεί σε απώλεια λειτουργίας της μηχανής. Στην πραγματικότητα, ο περιορισμός του καυσίμου αποκλείει τελείως τη χρήση οποιουδήποτε ιζηματικού καυσίμου καθώς επίσης και των φθηνών κλασμάτων πετρελαίου.

Η αρχική επένδυση για έναν αεροστροβίλο της τάξης των 20 – 30 MW είναι περίπου 15 – 20 % υψηλότερη από κινητήρα diesel συγκρίσιμης ισχύος. Για μικρότερες μηχανές και ιδιαίτερα αν προέρχεται από μηχανές ελικοπτέρων, η διαφορά της τιμής είναι ακόμα υψηλότερη.

Το λειτουργικό περιβάλλον των ναυτικών αεριοστροβίλων αποτελεί από μόνο του μια πρόκληση. Αν και ο θαλασσινός αέρας που παρέχεται για την καύση δεν αποτέλεσε ποτέ ιδιαίτερο πρόβλημα για τους κινητήρες diesel ή τις εγκαταστάσεις ατμού, οι μεγάλες ποσότητες που απαιτούνται από τον αεροστροβίλο επιτρέπουν σημαντική ποσότητα υγρασίας να εισέλθει στη μηχανή. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα να πρέπει η μηχανή να προσαρμοστεί για να αποτραπεί η διάβρωση και το κλείσιμο των διελεύσεων από την εναπόθεση αλάτων. Μια άλλη πρόκληση

που πρέπει να αντιμετωπιστεί με τους αεριοστροβίλους είναι οι καταπονήσεις που υφίστανται από προνευτασμό, ταλαντεύσεις, κραδασμούς από την έλικα κλπ. Πρέπει επομένως, να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο σχεδιασμό και τη συντήρηση των συστημάτων στήριξης και απόσβεσης.

Γενικά οι αεριοστροβίλοι δεν είναι αναστρέψιμοι, ενώ οι κινητήρες diesel υπό προϋποθέσεις μπορούν να επιδράσουν στην ικανότητα εκτέλεσης ελιγμών του σκάφους. Όμως για εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου με ηλεκτρική πρόωση (COGES) δεν υφίσταται τέτοιο πρόβλημα αφού στην ηλεκτρική πρόωση η έλικα είναι αναστρέψιμη. Το ίδιο συμβαίνει και όταν η έλικα συνδέεται άμεσα με σύστημα συνδυασμένου κύκλου αφού μπορούν να χρησιμοποιηθούν μειωτήρες ανάποδης ώσης ή έλικες μεταβλητού βήματος.

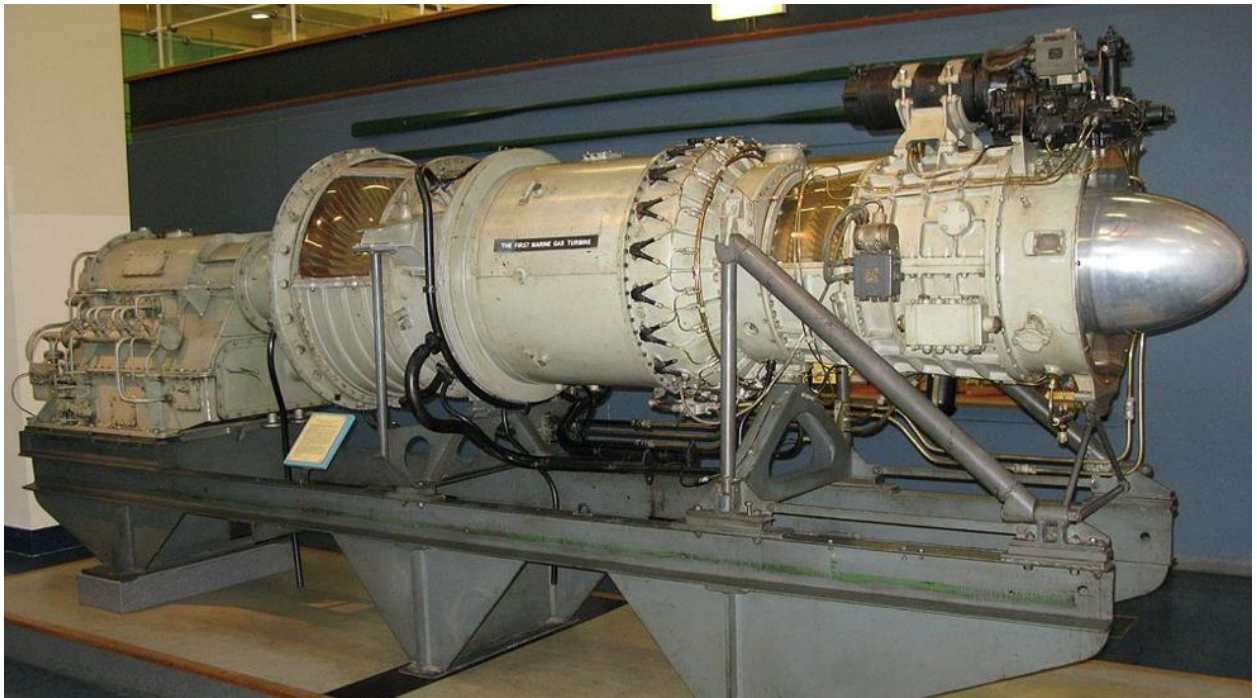
Οι κινητήρες diesel ανταποκρίνονται ταχύτερα στις μεταβολές φορτίου από τις εγκαταστάσεις συνδυασμένου κύκλου. Ο χρόνος απόκρισης του αεριοστροβίλου είναι συγκρίσιμος με αυτόν του κινητήρα diesel, όμως ο ατμοστροβίλος χρειάζεται περισσότερο χρόνο.

4.4 Πλοία με αεριοστροβίλους απλού κυκλώματος

Το πρώτο πλοίο που τροφοδοτείτο με ισχύ από αεριοστροβίλο ήταν ένα σκάφος του Βασιλικού ναυτικού της Αγγλίας. Το 1947 το «Motor Gun Boat» (Σχήμα 4.1α) ένα μικρό στρατιωτικό σκάφος (Σχήμα 4.1α) στο δεύτερο παγκόσμιο πόλεμο που εφοδιάστηκε με τον αεριοστροβίλο «G.1» της Metrovick (Σχήμα 4.1β). Είχε μήκος 35,66 m, ζύγιζε 95 tn και η ισχύς του ήταν σχεδόν 3000 kW. [27]



Σχήμα 4.1α Το πολεμικό πλοίο «MGB 2009» [27]



Σχήμα 4.1β Ο αεριοστρόβιλος «G.1» της Metrovick με τον οποίο ήταν ανεφοδιασμένο το πολεμικό πλοίο «MGB 2009»

Το πρώτο αμερικανικό πλοίο με αεριοστρόβιλο ήταν ένα σκάφος της ακτοφυλακής των Η.Π.Α που χρησιμοποιούταν για περιπολίες. Το «Point Thatcher» (Σχήμα 4.2) μήκους 25,5 m και βάρους 60 tn στις αρχές τις δεκαετίας του 1960 ήταν ένα σκάφος που ανεφοδιαζόταν με 2 αεριοστρόβιλους ισχύς 750 kW έκαστος.



Σχήμα 4.2 Πλοίο της ακτοφυλακής των Η.Π.Α με αεριοστρόβιλο

Στη συνέχεια υπήρξαν τρεις τύποι πλοίων του πολεμικού ναυτικού των Η.Π.Α στις αρχές του 1990, αντιτορπιτικά κλάσης «Arleigh Burke», καταδρομικά κλάσης «Ticonderoga» και ένα αμφίβιο πλοίο επιθέσεων τα οποία χρησιμοποίησαν αεριοστρόβιλο απλού κυκλώματος. Το κοινό όλων των παραπάνω σκαφών είναι ότι χρησιμοποιούν τον αεριοστρόβιλο «LM2500» της General Electric, ο οποίος αποδίδει ισχύ 19800 kW.

Το αντιτορπιτικό «USS Halsey» (Σχήμα 4.3) κλάσης «Arleigh Burke» είχε μήκος 154 m, βύθισμα 9,3 m και μπορούσε να αναπτύξει ταχύτητα 30 knots χάρις τους τέσσερις αεριοστρόβιλους «LM2500» της General Electric που διέθετε.



Σχήμα 4.3 Το αντιτορπιτικό «USS Halsey» κάπου στον Ειρηνικό ωκεανό το 2011

Το καταδρομικό «USS Bunker Hill» (Σχήμα 4.4) πλοίο της κλάσης «Ticonderoga» με μήκος 173 m, βύθισμα 10,2 m και αυτονομίας 11.000 km ανέπτυξε ταχύτητα 32,5 knots με τη βοήθεια των τεσσάρων αεριοστρόβιλων που διέθετε της General Electric. Συνολικά κατασκευάστηκαν 27 πλοία αυτού του τύπου με παρόμοια χαρακτηριστικά, ενώ ενδεικτικά αναφέρεται το «USS Bunker Hill».



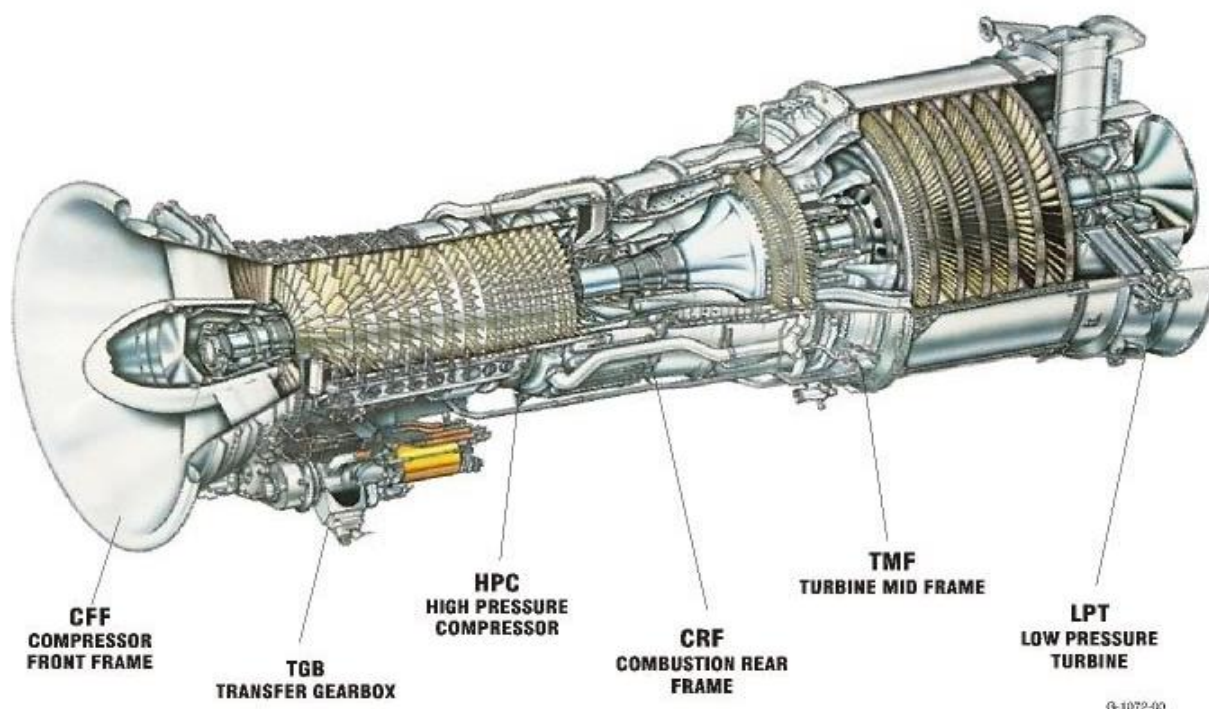
Σχήμα 4.4 Το «USS Bunker Hill» εν πλω στον Ατλαντικό ωκεανό το 2010

Ένα ακόμα σκάφος αμφίβιου τύπου με αεριοστρόβιλο της General Electric ήταν το «USS Wasp» το οποίο χρησιμοποιούνταν για να προσγειώνονται ελικόπτερα ή για να μεταφέρονται μικρότερα σκάφη αμφίβιων επιθέσεων. Το «USS Wasp» (Σχήμα 4.5) είχε μήκος 253 m, βύθισμα 8,1 m και ανέπτυξε ταχύτητα 22 knots με αυτονομία 17600 km.[28]



Σχήμα 4.5 «USS Wasp» το 2004

Ο «LM2500» (Σχήμα 4.6α) της General Electric είναι ένας αεριοστρόβιλος που χρησιμοποιείται στη ναυτιλία σε διάφορους τύπους πολεμικών πλοίων από διάφορες χώρες, ενώ κατασκευάζεται από τη GE Aviation της οποίας οι αεριοστρόβιλοι χρησιμοποιούνται σε διάφορες εφαρμογές όπως ναυτιλίας, πολεμικών εφαρμογών αλλά και αεροπορικών εφαρμογών. Είναι διαθέσιμος σε τρεις εκδόσεις, η πρώτη έκδοση με ισχύ 25060 kW και βαθμό απόδοσης 37%, η δεύτερη έκδοση «LM2500+» με ισχύ 30200 kW και βαθμό απόδοσης 39% που εάν συνδυαστεί με ηλεκτρική γεννήτρια αποδίδει 29 MW ηλεκτρικής ενέργειας και η τρίτη έκδοση «LM2500+G4» με ισχύ 35320 kW και βαθμό απόδοσης 39,3%. [29]



Σχήμα 4.6α Ο αεριοστρόβιλος «LM2500» της General Electric

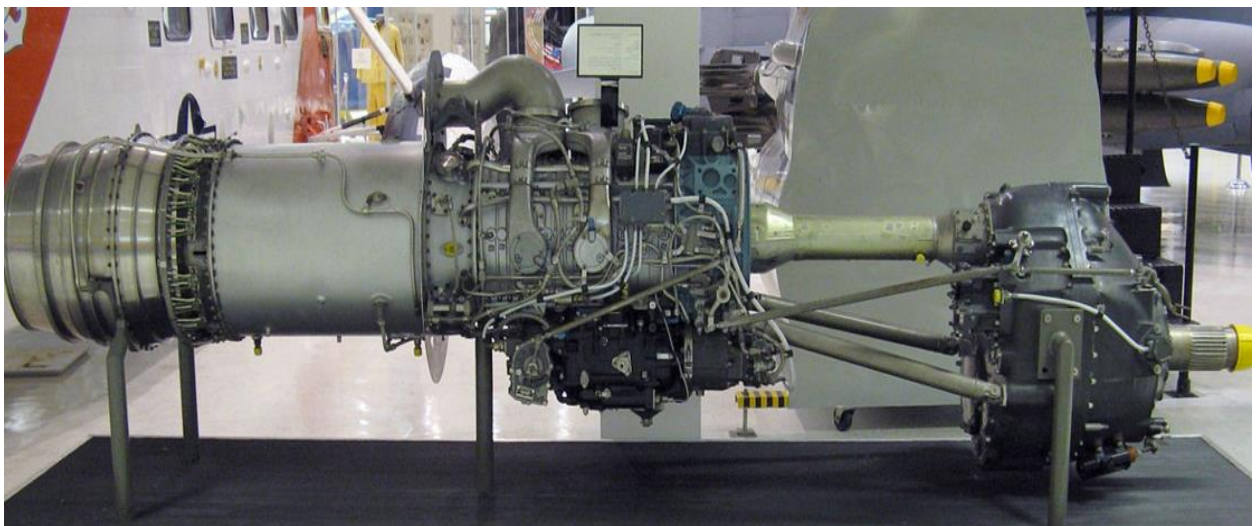
Τεχνικά χαρακτηριστικά αεροστροβίλου «LM2500»	
Ονομαστική Ισχύς	25.060 kW
Ειδική Κατανάλωση Καυσίμου	227 g/kW-hr
Βαθμός απόδοσης	9705 kJ/kWw-hr
Ροή Καυσαερίων	70,5 kg/sec
Θερμοκρασία Καυσαερίων	566 °C
Ταχύτητα περιστροφής	3600 σ.α.λ

Πίνακας 4.6β Τεχνικά χαρακτηριστικά του «LM2500»

Η Boeing το 1974 κατασκεύασε το «929 Jetfoil» (Σχήμα 4.7α) ένα επιβατικού τύπου καταμαράν που μπορούσε να μεταφέρει από 167 έως 400 επιβάτες. Το εν λόγω σκάφος ζύγιζε 30 tn και είχε βύθισμα 3 m. Η ταχύτητα που μπορούσε να αναπτύξει ήταν από 43 έως 47 knots με κατανάλωση 2150 l gas oil/h, μέσω δυο αεριοστροβίλων «Allison 501KF» (Σχήμα 4.7β) της Rolls Royce που διέθετε.



Σχήμα 4.7α Το «Boeing 929 Jetfoil» στο λιμάνι του Hong Kong



Σχήμα 4.7β Ο αεριοστροβίλος «Allison 501» της Rolls Royce

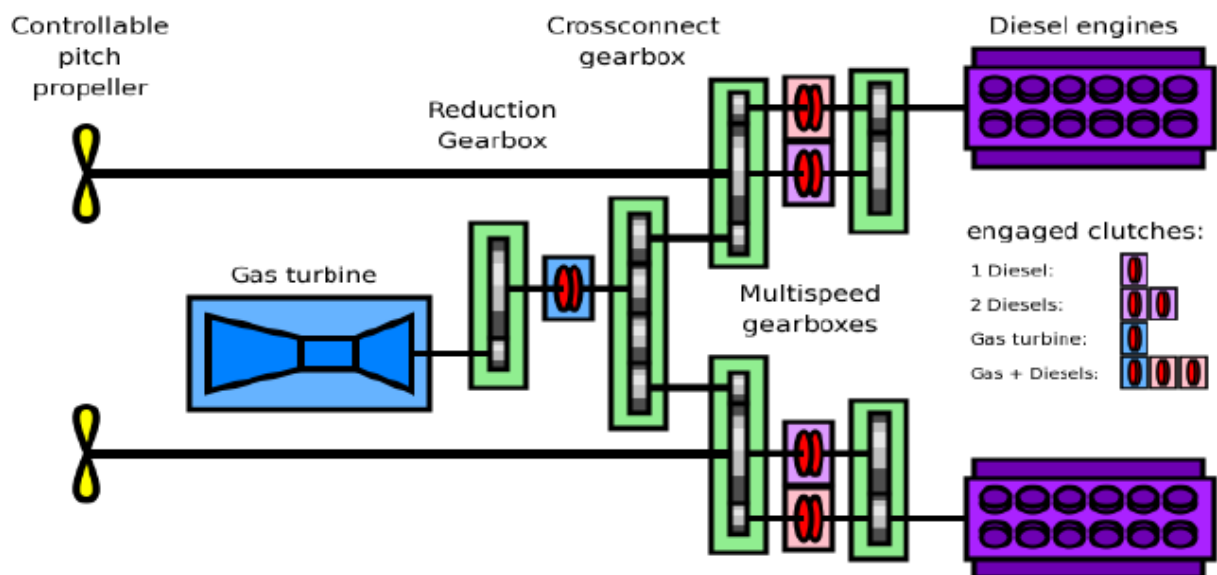
4.5 Πλοία με αεριοστρόβιλους συνδυασμένου κύκλου

Ο αεριοστρόβιλος σαν κινητήρας μπορεί να συνδυαστεί εύκολα με άλλες μηχανές για την πρόωση πλοίων. Οι λόγοι που έχουν αναπτυχθεί αυτοί οι συνδυασμοί ποικίλουν. Εξαιτίας του υψηλού κόστους ανάπτυξης, οι αεριοστρόβιλοι κατασκευάζονται σε λίγα διακεκριμένα μεγέθη με αισθητή διαφορά το ένα μέγεθος από το επόμενο. Προκειμένου να ικανοποιηθούν ενδιάμεσες ή μεγαλύτερες απαιτήσεις ισχύος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί συνδυασμός δύο ή περισσότερων μηχανών ίδιας ή και διαφορετικής ισχύος. Όπως προαναφέρθηκε, ο βαθμός απόδοσης του αεριοστρόβιλου είναι σημαντικά μικρός σε μερικά φορτία. Όταν γίνεται χρήση περισσότερων μηχανών τίθενται κάθε φορά σε λειτουργία τόσες όσες χρειάζονται έτσι ώστε η κάθε μία να λειτουργεί κοντά στην ονομαστική της ισχύ και επομένως σε περιοχή υψηλού βαθμού απόδοσης.

Η χρησιμοποίηση των συνδυασμών αεριοστρόβιλων με άλλους κινητήρες ως κύριες μηχανές πρόωσης επηρεάζει ένα εύρος ιδιοτήτων όπως η αποδοτικότητα του συστήματος, το βάρος και ο όγκος της εγκατάστασης, τα κόστη κτήσης, συντήρησης και επισκευής και, τέλος διάφορα λειτουργικά θέματα και η έναρξη του συστήματος.

4.5.1 Combined Diesel And Gas (CODAG)

Η συγκεκριμένη εγκατάσταση αποτελεί μια υβριδική εγκατάσταση όπου χρησιμοποιούνται δύο πηγές ενέργειας παράλληλα και ανεξάρτητα η μία από την άλλη (Σχήμα 4.8α).

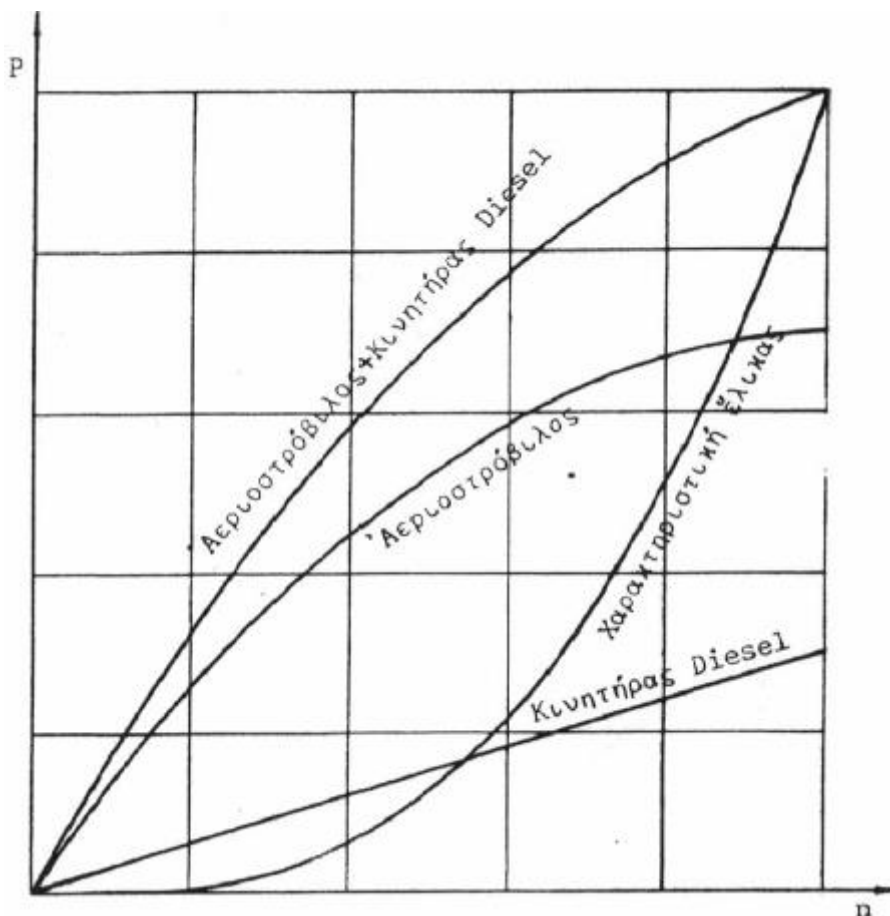


Σχήμα 4.8α Σχηματικό διάγραμμα συνδυασμένης εγκατάστασης κινητήρων Diesel με αεριοστρόβιλο (CODAG)

Στη συγκεκριμένη εγκατάσταση, που βρίσκει εφαρμογή κατά βάση σε ναυτική πρόωση, χρησιμοποιείται ως κύρια πηγή παραγωγής ισχύος και πρόωσης ο κινητήρας diesel, με δεδομένο τον υψηλό βαθμό απόδοσής του σε σχέση με τον αυτόν του αεριοστροβίλου. Η χρήση του αεριοστροβίλου έρχεται επικουρικά όταν υπάρχουν απαιτήσεις επιπλέον ισχύος, π.χ. κατά τη διάρκεια ελιγμών πολεμικών σκαφών έτσι, σύμφωνα με το (Σχήμα 4.8β) υπάρχει μεγαλύτερο απόθεμα ισχύος σε μεγαλύτερο εύρος στροφών. Εδώ συμβάλλει θετικά η δυνατότητα της πολύ γρήγορης εκκίνησης του αεριοστροβίλου, που αποτελεί και ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά του. Τυπικά, από μια ταχύτητα της τάξης των 20 knots/h με χρήση μόνο των κινητήρων diesel, η σύμπλεξη του αεριοστροβίλου μπορεί να αυξήσει την ταχύτητα σε 30 knots/h.

Όπως σε κάθε σχεδόν υβριδική εγκατάσταση, μπορούμε να αναγνωρίσουμε τις παρακάτω περιπτώσεις λειτουργίας:

- 2 κινητήρες diesel ως αποκλειστική πηγή πρόωσης
- 1 κινητήρα diesel (σε περίπτωση βλάβης του άλλου)
- Συνδυασμένη (κοινή) χρήση κινητήρων diesel και αεριοστροβίλου
- Αποκλειστική χρήση του αεριοστροβίλου (σε περίπτωση βλάβης και των δύο κινητήρων diesel)



Σχήμα 4.8β Χαρακτηριστική ισχύος στροφών συστήματος CODAG (Diesel – Αεριοστροβίλου)

Ένα τέτοιο σύστημα πρόωσης καταλαμβάνει μικρότερο όγκο από μια εγκατάσταση μόνο με κινητήρες diesel για την ίδια αποδιδόμενη ισχύ όμως απαιτούνται πιο περίπλοκα μηχανήματα μείωσης στροφών.[30]

4.5.1.1 Πολεμικά πλοία με χρήση συστήματος (CODAG)

Το 1961 το γερμανικό πολεμικό ναυτικό χρησιμοποίησε το πρώτο σύστημα πρόωσης (CODAG) στις φρεγάτες τύπου «Köln-class». Ένα από τα πλοία αυτού του τύπου ήταν η φρεγάτα «F220» (Σχήμα 4.9), η οποία είχε μήκος 105 m, ζύγισε 2090 tn και μπορούσε να αναπτύξει ταχύτητα 32 knots με αυτονομία 1670 km μέσω του (CODAG) συστήματός πρόωσής της. Διέθετε δύο αεριοστροβίλους Brown Boveri & Cie ισχύος 8832 kW ο καθένας σε συνδυασμό με τέσσερις κινητήρες diesel της MAN συνολικής ισχύος 12000 HP.



Σχήμα 4.9 Η γερμανική φρεγάτα «F220»

Το πολεμικό ναυτικό της Δανίας κατασκεύασε έξι σκάφη τύπου «Soloven», όπου το καθένα διέθετε τρεις αεριοστροβίλους της Bristol Proteus (Σχήμα 4.10) ισχύος 9510 kW σε συνδυασμό με δύο μηχανές diesel της General Motors ισχύος 340 kW για μεγαλύτερη οικονομία στις μικρότερες ταχύτητες. Επιπλέον από το 1974 έως το 2000 κατασκεύασαν δέκα ακόμα σκάφη με το ίδιο σύστημα πρόωσης με τη διαφορά ότι σε αυτά τα σκάφη η ισχύς των κινητήρων diesel ανερχόταν στα 600 kW με επίσης βελτιωμένη κατανάλωση στις μικρές ταχύτητες.



Σχήμα 4.10 Ο αεριοστρόβιλος «Bristol Proteus»

Το βασιλικό ναυτικό της Νορβηγίας από το 2011 έχει στη διάθεση του πέντε φρεγάτες τύπου «Fridtjof Nansen» (Σχήμα 4.11), οι οποίες χρησιμοποιούν σύστημα (CODAG) για την πρόωσή τους. Έχουν μήκος 134 m, ζυγίζουν 5290 tn και αναπτύσσουν ταχύτητα 26 knots. Διαθέτουν δύο μηχανές diesel BAZAN BRAVO των 4,5 MW και ένα αεριοστρόβιλο «LM2500» ισχύος 21,5 MW για τις υψηλές ταχύτητες.



Σχήμα 4.11 Οι νορβηγικές φρεγάτες τύπου «Fridtjof Nansen» με (CODAG) σύστημα πρόωσης

4.5.1.2 Επιβατηγά πλοία με χρήση συστήματος (CODAG)

Ένα πλοίο που έκανε χρήση του συστήματος (CODAG) ήταν το επιβατηγό «Queen Mary 2» (Σχήμα 4.12). Κατασκευασμένο από το ναυπηγείο Chantier de l' Atlantique, το επιβατηγό πλοίο έχει μήκος 345,03 m και πλάτος 40 m. Η εγκατάσταση πρόωσης αποτελείται από τέσσερις κινητήρες diesel Wartsila και συμπληρώνεται από δύο αεριοστροβίλους. Η συνολική ισχύς είναι 118 MW. Το σύστημα πρόωσης περιλαμβάνει τέσσερα ελικοπηδάλια, δύο σταθερά και δύο περιστρεφόμενα κατά 360°

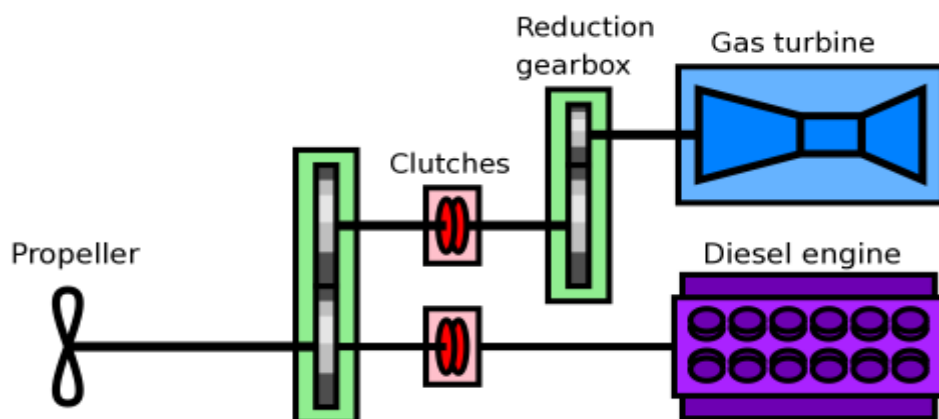


Σχήμα 4.12 Το κρουαζιερόπλοιο «Queen Mary 2»

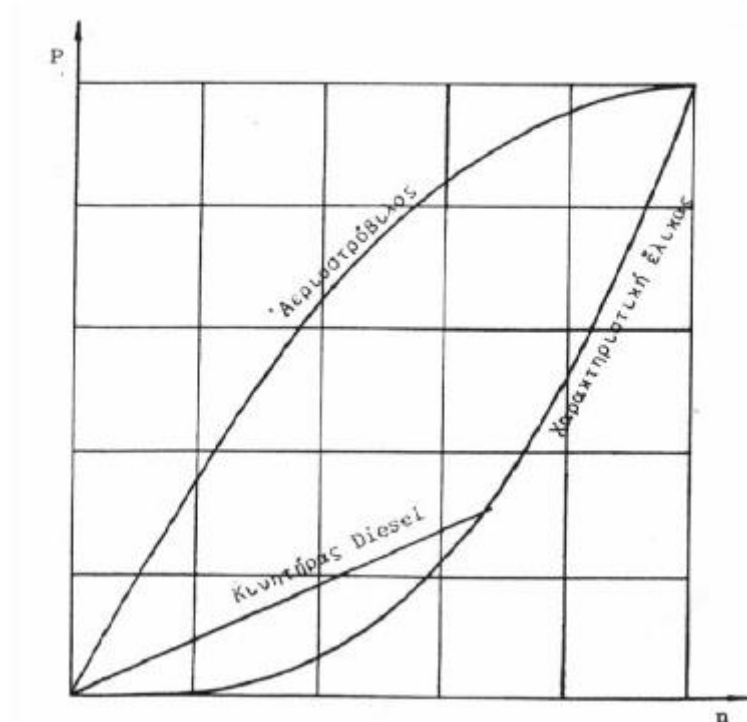
4.5.2 Combined Diesel Or Gas (CODOG)

Και αυτό το σύστημα πρόωσης (Σχήμα 4.13α), όπως και το προηγούμενο χρησιμοποιείται σε πλοία όπου η μέγιστη ταχύτητα είναι σημαντικά μεγαλύτερη από την ταχύτητα υπηρεσίας όπως τα πολεμικά πλοία.

Σε αυτή την περίπτωση η εγκατάσταση πρόωσης αποτελείται από αεριοστρόβιλο και κινητήρα diesel. Για κάθε ελικοφόρο άξονα υπάρχει ένας κινητήρας diesel που λειτουργεί μόνος του σε χαμηλές στροφές (Σχήμα 4.13β) και ένας αεριοστρόβιλος με συμπλέκτη ο οποίος λειτουργεί στο πλήρες φορτίο. Και οι δύο κινητήρες είναι συνδεδεμένοι με τον ελικοφόρο άξονα με συμπλέκτες και λειτουργούν ο καθένας ξεχωριστά κάθε φορά, σε αντίθεση με τα συστήματα CODAG, στα οποία γίνεται χρήση της συνδυασμένης αποδιδόμενης ισχύος και των δύο κινητήρων. Το πλεονέκτημα του CODOG σε σχέση με το CODAG είναι ο απλούστερος συμπλέκτης. Το μειονέκτημα είναι η ανάγκη για πιο ισχυρό ή και περισσότερους αεριοστρόβιλους για την ίδια μέγιστη αποδιδόμενη ισχύ και επιπλέον η κατανάλωση καυσίμου σε υψηλές στροφές είναι ακόμα μεγαλύτερη σε σχέση με το CODAG.



Σχήμα 4.13 Σχηματικό διάγραμμα διάταξης CODOG



Σχήμα 4.13β Χαρακτηριστικές ισχύος στροφών CODOG

Χαρακτηριστικό παράδειγμα σκάφους με διάταξη πρόωσης CODOG είναι η γερμανική αντιτορπιλική φρεγάτα «F123» (Σχήμα 4.13γ) τύπου «Bradenburg». Η φρεγάτα έχει μήκος 138,85 m, ζυγίζει 3600 tn και επιτυγχάνει ταχύτητα της τάξης των 29 knots με τη βοήθεια δύο αεριοστροβίλων General Electric LM2500 σε συνδυασμό με δύο κινητήρες diesel MTU 956 TB92 ισχύος 8,14 MW έκαστος.[31]

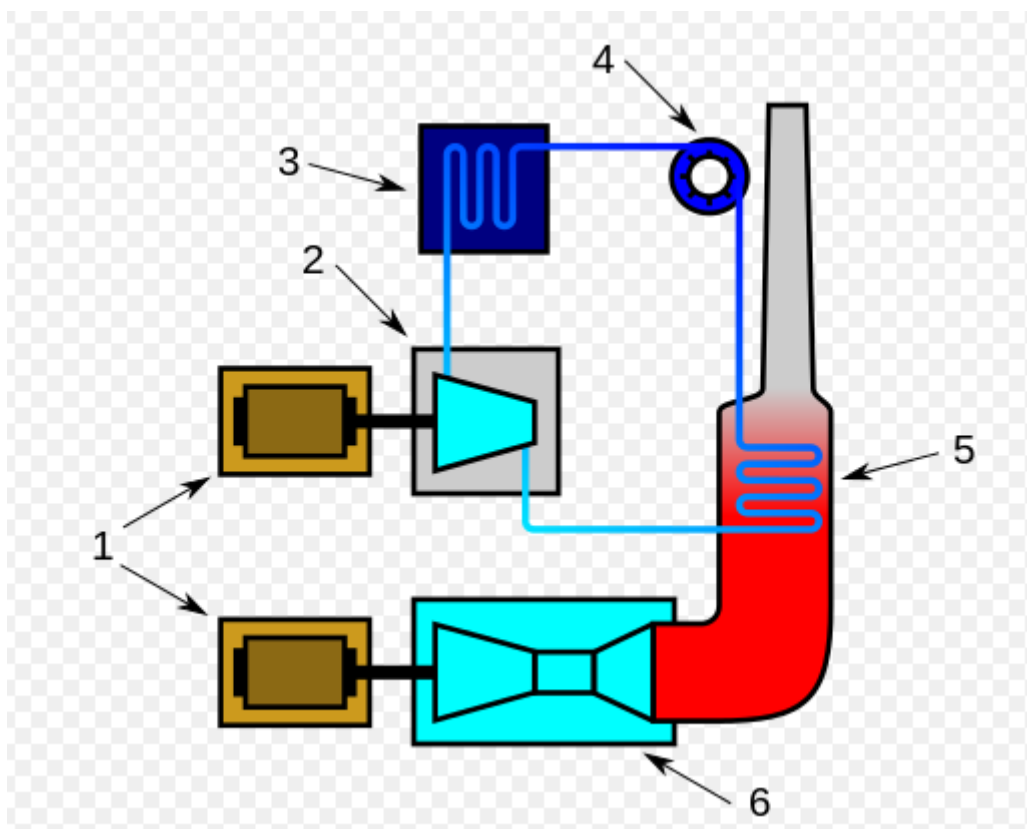


Σχήμα 4.13γ Η γερμανική φρεγάτα «F123» με διάταξη πρόωσης CODOG

4.5.3 Combined Gas turbine And Steam turbine (COGAS)

Το συνδυασμένο σύστημα αεριοστροβίλου και ατμού, COGAS, (Σχήμα 4.14) αναφέρεται σε εγκαταστάσεις πρόωσης που αποτελούνται από αεριοστρόβιλο και ατμοστρόβιλο. Σε αυτό, το μεγαλύτερο μέρος της θερμότητας των καυσαερίων του αεριοστροβίλου ανακτάται και παράγεται ατμός που κινεί τον ατμοστρόβιλο. Με αυτόν τον τρόπο μέρος από την χαμένη ενέργεια ανακτάται μειώνοντας έτσι την ειδική κατανάλωση καυσίμου της εγκατάστασης. Σε μεγάλες ηλεκτροπαραγωγικές εγκαταστάσεις ξηράς στις οποίες χρησιμοποιείται το σύστημα COGAS μπορούν να επιτευχθούν αποδόσεις μεγαλύτερες της τάξης του 50%.

Η διαφορά του συστήματος COGAS από πολλά άλλα συστήματα πρόωσης συνδυασμένου κύκλου είναι ότι δεν έχει φτιαχτεί για να λειτουργεί μόνο με το ένα σύστημα. Παρόλο που κάτι τέτοιο δεν αποκλείεται, το σύστημα δεν θα λειτουργούσε αποδοτικά με αυτόν τον τρόπο όπως συμβαίνει στα συνδυασμένα συστήματα κινητήρων diesel με αεριοστροβίλους όταν λειτουργούν μόνο με τους πρώτους. Το σύστημα COGAS προτάθηκε ως αναβάθμιση για τα πλοία που χρησιμοποιούσαν αεριοστροβίλους σαν κύρια ή μοναδική πηγή πρόωσης. [32]



Σχήμα 4.14 Διάταξη COGAS, όπου 1: Ηλεκτρικές γεννήτριες, 2: Ατμοστρόβιλος, 3: Συμπυκνωτής, 4: Αντλία, 5: Αναθερμαντήρας, 6: Αεριοστρόβιλος

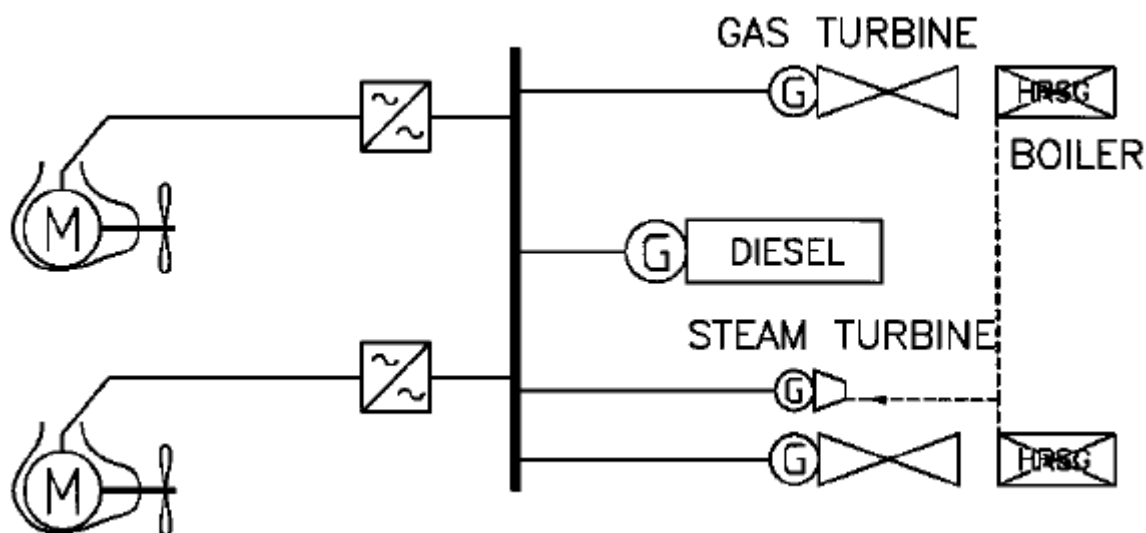
4.5.4 Combined Gas turbine and steam turbine intergrated Electric drive System (COGES)

Αν αντί οι στρόβιλοι να συνδέονται άμεσα με ελικοφόρο άτρακτο χρησιμοποιηθεί στροβιλο-ηλεκτρική μετάδοση, τότε το σύστημα της προηγούμενης παραγράφου είναι γνωστό και ως COGES (Σχήμα 4.15).

Το σύστημα αυτό αποτελείται από συνδυασμό αεριοστρόβιλου και ατμοστρόβιλου και εκμεταλλεύεται την υψηλή θερμοκρασία των καυσαερίων για την παραγωγή ατμού για τον ατμοστρόβιλο. Οι δύο κινητήρες κινούν τον ηλεκτροκινητήρα που χρησιμοποιείται για την πρόωση του πλοίου καθώς επίσης και για άλλες καταναλώσεις.

Από πρόσφατες μελέτες στις οποίες εξετάστηκαν διαφορετικοί συνδυασμοί εγκαταστάσεων COGES, προέκυψε ότι το σύστημα ηλεκτρικής πρόωσης με κινητήρα diesel έχει τις καλύτερες προοπτικές σε κρουαζιερόπλοιο που μεταφέρει 2500 επιβάτες, ιδιαίτερα αν ληφθούν υπόψη το κόστος εγκατάστασης και συντήρησης, καθώς και η εφεδρεία ισχύος πρόωσης. Βέβαια κάθε περίπτωση πρέπει να εξετάζεται ξεχωριστά σε συνάρτηση με τις εκάστοτε απαιτήσεις. Πιο συγκεκριμένα, στα ταχύπλοα σκάφη όπου το ζητούμενο είναι η υψηλή ισχύς και οι περιορισμοί στο βάρος και τον χώρο προτιμώνται αεριοστρόβιλοι με μηχανική εκκίνηση. Το σύστημα COGES είναι πιο αποδοτικό για κρουαζιερόπλοια όπου η λειτουργία σε μερική ισχύ είναι συχνή και η ανάγκη για ατμό για χρήση σε βοηθητικά μηχανήματα είναι μεγάλη. [33]

Το σύστημα COGES έχει προταθεί επίσης ως κύρια εγκατάσταση πρόωσης σε εμπορικά πλοία για να ικανοποιήσουν μελλοντικούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς στην περιοχή της Βαλτικής.



Σχήμα 4.15 Σχηματικό διάγραμμα συστήματος πρόωσης COGES

Τον Ιούλιο του 2000, το πρώτο κρουαζιερόπλοιο που χρησιμοποίησε το σύστημα COGES ήταν το «Millenium». Το εν λόγω σκάφος (Σχήμα 4.16) με μήκος 294 m και χωρητικότητας 2138 επιβατών μπορούσε να αναπτύξει ταχύτητα 21,8 knots κάνοντας συνδυασμένη χρήση αεριοστροβίλου και ατμοστρόβιλου.



Σχήμα 4.16 Το κρουαζιερόπλοιο «Millenium»

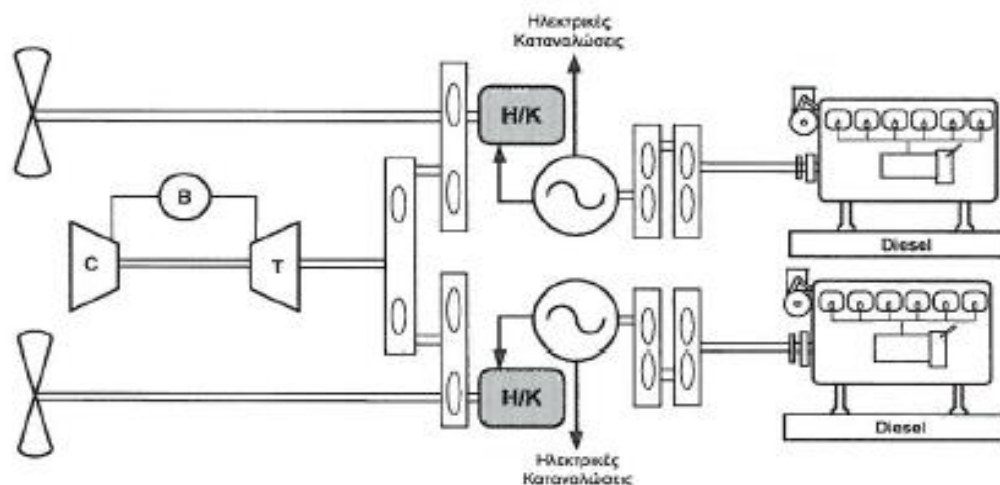
Η προωστήρια εγκατάσταση αποτελείται από ζεύγος ναυτικών αεριοστροβίλων GE LM2500 και έναν ατμοστρόβιλο οι οποίοι ο καθένας κινούν από μία ηλεκτρογεννήτρια εναλλασσόμενου ρεύματος. Το σύστημα συνδυασμένου κύκλου αεριοστροβίλων και ατμοστρόβιλων παρέχει ισχύ σε δύο ηλεκτρικές μονάδες ελικοπηδαλίων πρόωσης. Καθώς κάθε ελικοπηδάλιο μπορεί να περιστρέφεται οριζόντια κατά 360° δεν είναι απαραίτητη η ύπαρξη για γραμμές πηδαλίου, πρυμναίες έλικες, έδρανα μηχανισμού πηδαλίου κλπ.

Ο ατμοστρόβιλος του συστήματος ανακτά θερμότητα από τα καυσαέρια και παρέχει ενέργεια για ζεστό νερό και άλλες ηλεκτρικές ανάγκες όπως παραγωγή νερού, αναθέρμανση κλιματισμού, κουζίνες και καθαριστήρια.

Η κατανάλωση καυσίμου της εγκατάστασης είναι κατά 7% μικρότερη από μια αντίστοιχη εγκατάσταση με μεσόστροφο κινητήρα diesel, ενώ οι εκπομπές οξειδίων του αζώτου (NOx) μειώθηκαν κατά 80% και διοξειδίου του θείου (SO₂) κατά 98%.

4.5.5 Combined Diesel-electric And Gas (CODLAG)

Η συνδυασμένη εγκατάσταση CODLAG (Σχήμα 4.17) λειτουργεί με τη συνδρομή συστήματος κινητήρων diesel που παρέχουν ισχύ σε γεννήτρια. Η πρόωση μέσω έλικας πραγματοποιείται με τη βοήθεια ηλεκτροκινητήρων (ο κινητήρας diesel δεν συνδέεται μηχανικά με την έλικα). Επικουρικά όταν απαιτείται μεγαλύτερη ταχύτητα πλεύσης προστίθεται η ισχύς από τον αεριοστρόβιλο κατευθείαν στην άτρακτο της έλικας.



Σχήμα 4.17 Σχηματικό διάγραμμα διάταξης CODLAG [34]

Στο εν λόγω σύστημα μέρος της ηλεκτρικής ενέργειας των νηζελο-γεννητριών καλύπτει τις ιδιαίτερα σημαντικές απαιτήσεις του πλοίου. Παραλλαγή του συστήματος αυτού σε άλλο πλοίο χρησιμοποιεί αμμοστρόβιλους αντί κινητήρων diesel.

Ένα από τα πλοία που κάνουν χρήση του συστήματος πρόωσης CODLAG είναι το «GTS Finnjet» (Σχήμα 4.18) στη Φιλανδία για τη μεταφορά επιβατών μεταξύ Φιλανδίας και Γερμανίας. Το σκάφος διαθέτει 2 αεριοστρόβιλους Pratt & Whitney «FT 4C-1DLF» και δύο μηχανές diesel Wartsila ισχύος 66400 kW.

Ένα άλλο σκάφος με σύστημα πρόωσης CODLAG είναι η φρεγάτα «F222» του γερμανικού πολεμικού ναυτικού. Η φρεγάτα αυτή (Σχήμα 4.19) έχει μήκος 149,5 m, ζυγίζει 7200 tn και μπορεί να αναπτύξει ταχύτητα 20 knots κάνοντας χρήση μόνο των κινητήρων diesel με αυτονομία 7400 km. Το σύστημα CODLAG της περιλαμβάνει: έναν αεριοστρόβιλο 20 MW, δύο ηλεκτροκινητήρες 4,7 MW, τέσσερις νηζελογεννήτριες των 2,9 MW και τρία κιβώτια σύμπλεξης.

Στην ίδια κατηγορία ανήκει και η φρεγάτα «Type 81» (Σχήμα 4.20) του βασιλικού πολεμικού ναυτικού της Αγγλίας. Το συγκεκριμένο σκάφος διαθέτει τέσσερις νηζελογεννήτριες των 1510 kW, δύο ηλεκτροκινητήρες της General Electric και δύο αεριοστρόβιλους της Rolls Royce Marine Spey «SM1C» ισχύος 19500 kW. [34]



Σχήμα 4.18 Το «GTS Finnjet»



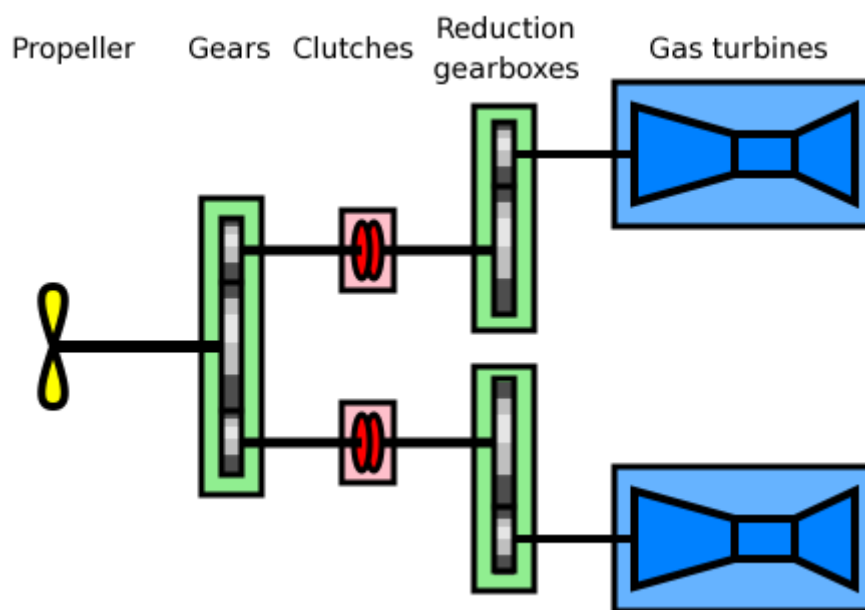
Σχήμα 4.19 Η φρεγάτα «F222» με σύστημα πρόωσης CODLAG



Σχήμα 4.20 Η φρεγάτα «F81» με σύστημα πρόωσης CODLAG

4.5.6 Combined gas and gas (COGAG)

Η συνδυασμένη εγκατάσταση COGAG (Σχήμα 4.21α) είναι ένας τύπος συστήματος πρόωσης πλοίων, όπου χρησιμοποιούνται δύο αεριοστρόβιλοι συνδεδεμένοι σε έναν άξονα κίνησης της προπέλας του σκάφους. Ένα κιβώτιο ταχυτήτων και συμπλέκτες επιτρέπουν τη σύμπλεξη ή την αποσύμπλεξη ενός ή και των δύο αεριοστρόβιλων με τον άξονα της προπέλας. Χρησιμοποιώντας δύο αεριοστρόβιλους υπάρχει το πλεονέκτημα της ύπαρξης δύο διαφορετικών τρόπων παροχής ισχύος. Η χρήση ενός μικρότερου αεριοστρόβιλου σε πλήρες φορτίο είναι αποδοτικότερη ως προς την κατανάλωση καυσίμου από τη χρήση δύο μεγάλων αεριοστρόβιλων σε μερικό φορτίο επιτρέποντας έτσι πιο οικονομικές μεταφορές με ταχύτητες ταξιδιού. [35]

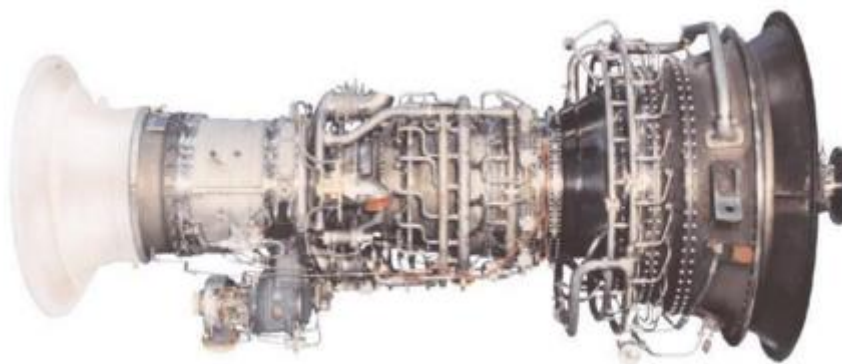


Σχήμα 4.21α Σχηματικό διάγραμμα COGAG

Ένα σκάφος που κάνει χρήση του συστήματος COGAG είναι το «Stena AB HSS semi-swath» (Σχήμα 4.21β). Πρόκειται για μια μορφή δίγαστρου σκάφους με μικρή επιφάνεια ισάλου. Κάθε πλοίο έχει δύο αεριοστρόβιλους LM1600 ισχύος 14920 kW έκαστος με βαθμό απόδοσης 37% (Σχήμα 4.21γ) και δύο LM2500 σε διάταξη COGAG. Έχει μήκος 126 m, πλάτος 40 m και η ταχύτητά τους μπορεί να ξεπεράσει τους 40 knots με μεταφορική ικανότητα 1500 επιβάτες και 375 αυτοκίνητα.



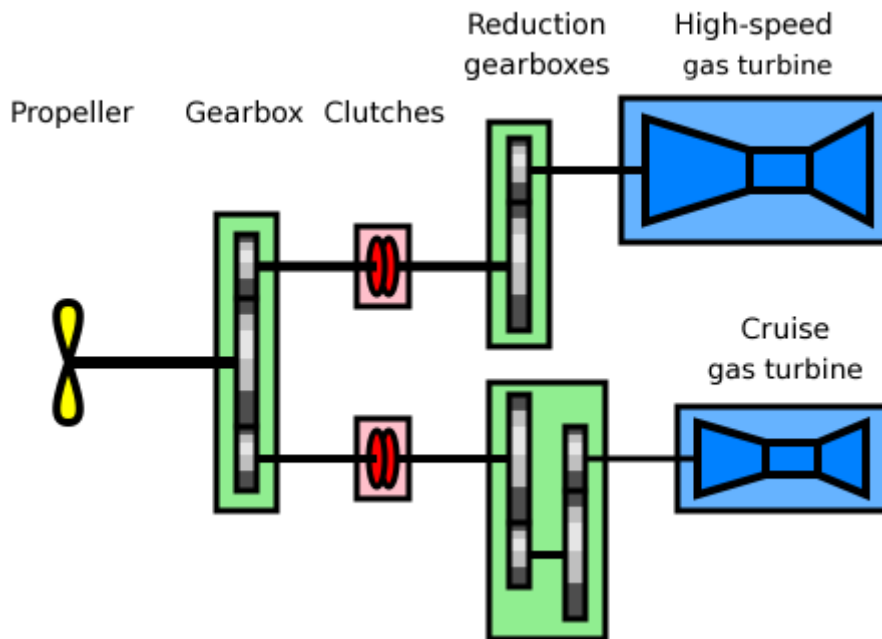
Σχήμα 4.21β Το καταμαράν «Stena AB HSS semi-swath»



Σχήμα 4.21γ Ο αεριοστρόβιλος «LM1600» που χρησιμοποιεί το παραπάνω σκάφος

4.5.7 Combined gas or gas (COGOG)

Το COGOG (Σχήμα 4.22) είναι ένα σύστημα πρόωσης μόνον με αεριοστρόβιλους. Ένας αεριοστρόβιλος με χαμηλή ισχύ χρησιμοποιείται για τις ταχύτητες ταξιδιού, ενώ ένας δεύτερος αεριοστρόβιλος με μεγαλύτερη ισχύ χρησιμοποιείται για διάφορες διεργασίες που απαιτούν ταχύτητα και περισσότερη δύναμη. Ένας συμπλέκτης επιτρέπει τη χρήση είτε του ενός είτε του άλλου αεριοστρόβιλου αλλά ποτέ και των δύο μαζί. Αυτό αποτελεί πλεονέκτημα επειδή δεν απαιτείται βαρύ ακριβό και πιθανώς αναξιόπιστο κιβώτιο ταχυτήτων. Ο λόγος που χρησιμοποιείται ένας μικρότερος αεριοστρόβιλος ο οποίος δουλεύει στο 100% των δυνατοτήτων από έναν μεγαλύτερο που θα δούλευε στο 50% των δυνατοτήτων του είναι, ότι είναι οικονομικά αποδοτικότερος. [36]

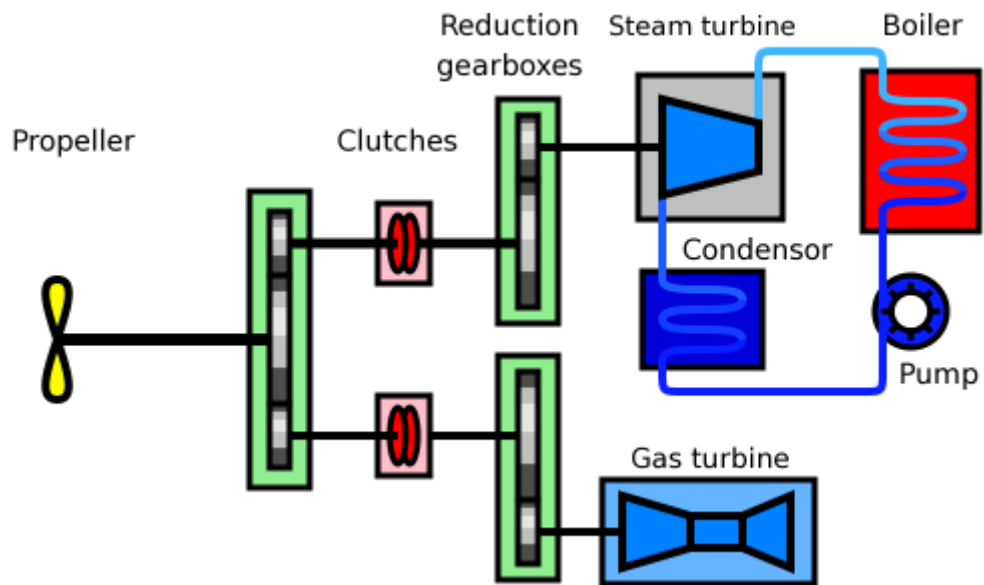


Σχήμα 4.22 Σχηματικό διάγραμμα διάταξης GOGOG

4.5.8 Combined steam and gas (COSAG)

Το σύστημα COSAG (Σχήμα 4.23α) είναι ένας συνδυασμός ατμοστρόβιλου και αεριοστρόβιλου για την πρόωση ενός πλοίου. Ένας σύστημα συμπλεκτών επιτρέπει τη χρήση καθενός ξεχωριστά ή και των δύο μαζί συνόλων ισχύος. Έχει το πλεονέκτημα της μεγάλης αυτονομίας ταξιδιού και αξιοπιστίας χάρις στον ατμοστρόβιλο, ενώ ο αεριοστρόβιλος του δίνει το πλεονέκτημα των γρήγορων επιταχύνσεων και του μικρού χρόνου εκκίνησης. Το εν λόγω σύστημα χρησιμοποιήθηκε κυρίων στην πρώτη γενιά πλοίων με αεριοστρόβιλους.

Στη δεκαετία του 1970 το βασιλικό ναυτικό της Αγγλίας χρησιμοποίησε το σύστημα COSAG για την πρόωση των φρεγατών τύπου «Tribal». Το «HMCS Eskimo» (Σχήμα 4.23β) που ανήκει στις φρεγάτες τύπου «Tribal» έχει μήκος 109,8 m, ζυγίζει 2300 tons και μπορεί να αναπτύξει ταχύτητα 27 knots χάρις το σύστημα COSAG. Διαθέτει έναν ατμοστρόβιλο 9300 kW και έναν αεριοστρόβιλο «G6» της Metrovick ισχύος 5600 kW. [37]



Σχήμα 4.23α Σχηματικό διάγραμμα διάταξης COSAG



Σχήμα 4.23β Το «HMS Eskimo»

4.6 Φορτηγά πλοία

Οι ναυτικοί αεριοστρόβιλοι δεν συναντώνται σε εμπορικά φορτηγά πλοία και η προοπτική της αλλαγής συναντά σημαντικές αντιδράσεις. Σε αντίθεση με τα φορτηγά πλοία, τα πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου επωφελούνται από τη χρήση αεριοστροβίλων οι οποίοι καταναλώνουν φυσικό αέριο ως καύσιμο. Με την ύπαρξη αεριοστροβίλων φυσικού αερίου που κινούν μηχανήματα υγροποίησης και αεριοποίησης κατά την άφιξη ή την αναχώρηση του πλοίου, η υιοθέτηση των αεριοστροβίλων σε μελλοντικά LNG είναι το επόμενο λογικό βήμα.

Τα πλοία μεταφοράς φυσικού αερίου (Σχήμα 4.24α και Σχήμα 4.24β) είναι μοναδικά για διάφορους λόγους. Είναι το μοναδικό είδος πλοίου που έχει τη δυνατότητα να χρησιμοποιήσει το φορτίο του ως πηγή καυσίμου. Ακόμα περισσότερο αφού το καύσιμο αυτό είναι φτηνότερο από το πετρέλαιο, ενώ είναι πολύ πιο φιλικό προς το περιβάλλον. Ιστορικά, υπήρχε πάντα μια επωφελής διαφορά τιμής για τη βενζίνη και όλες οι σχεδιάσεις διπλού καυσίμου (είτε εμβολοφόρες μηχανές είτε αεριοστρόβιλοι) κάνουν χρήση αυτού του πλεονεκτήματος κόστους για την υιοθέτηση της αλλαγής, με τον περιβαλλοντικό παράγοντα και τον παράγοντα ζωής του κινητήρα ως επιθυμητά και ισχυρά πλεονεκτήματα.

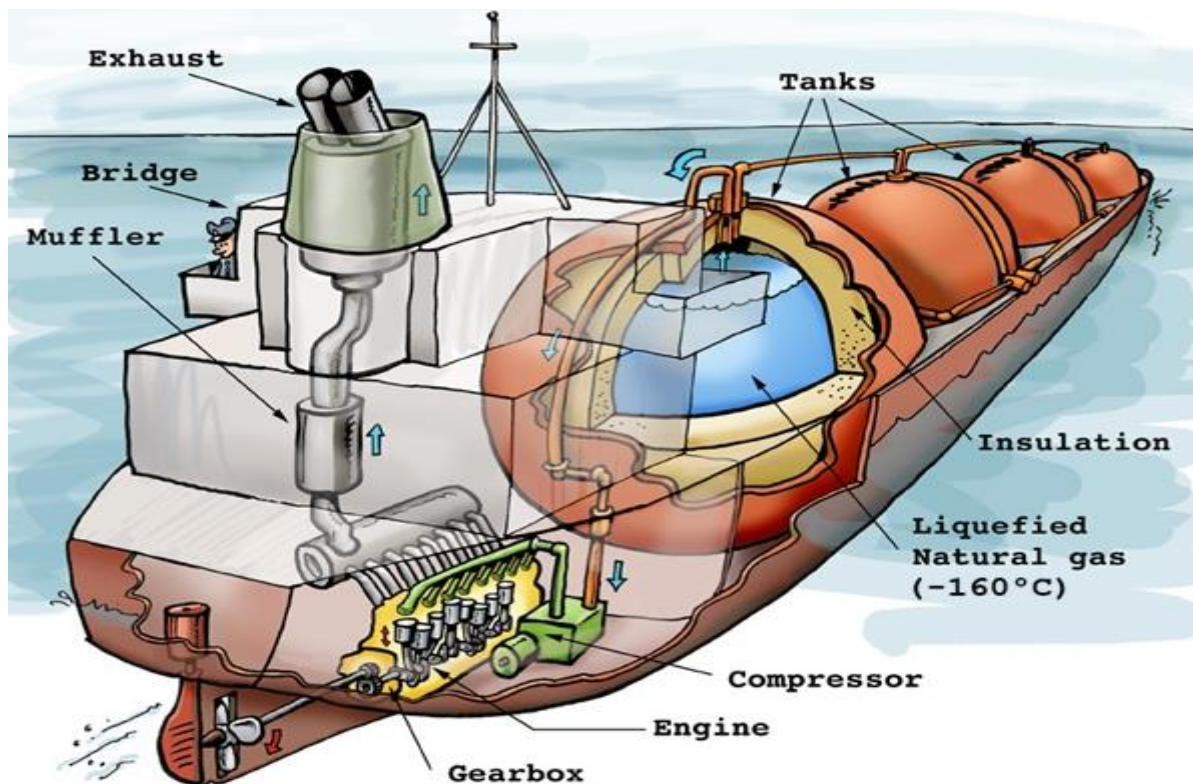
Ο στρόβιλος ισχύος κινεί την ηλεκτρογεννήτρια η οποία παρέχει ρεύμα στον κύριο πίνακα μέσω του οποίου διανέμεται σε όλους τους καταναλωτές. Η έλικα κινείται από ηλεκτροκινητήρα με έλεγχο της συχνότητας. Τα καυσάερια χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία ατμού οποίος χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με ατμοστρόβιλο ο οποίος επίσης τροφοδοτεί τον κύριο ηλεκτρικό πίνακα.

Τα πλεονεκτήματα της μεθόδου είναι η υψηλή θερμική απόδοση, μεγαλύτερη μεταφορική ικανότητα έως 13,8%, πλεόνασμα ισχύος πρόωσης και ηλεκτρικής ενέργειας, ικανότητα χρήσης διπλού καυσίμου, δεν απαιτείται κόστος επανασχεδίασης της γάστρας, ή έλικα σταθερού βήματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί χωρίς μειωτήρα στροφών για αναπόδοση, χαμηλό κόστος συντήρησης, απλοποιημένη διάταξη μηχανοστασίου, μικρότερα συστήματα παραγωγής ατμού και νερού ψύξης, μικρότερος χρόνος προμήθειας και τοποθέτησης στη ναυπηγική κλίνη λόγω ελέγχου και συναρμολόγησης στο εργοστάσιο.

Παρόλα αυτά όμως υπάρχουν και κάποια μειονεκτήματα όπως οι απώλειες μετατροπής ενέργειας στο ηλεκτρικό κινούμενο σύστημα, απαιτείται συμπιεστής αερίου για την παροχή αερίου καυσίμου σε πίεση 30 bar στον αεριοστρόβιλο, το σύστημα είναι πιο περίπλοκο και ακριβό από το μηχανικό, το λειτουργικό προφίλ της εγκατάστασης ισχύος μπορεί να χωριστεί σε μερικούς διακριτούς τρόπους λειτουργίας. [38]



Σχήμα 4.24α Πλοίο μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου



Σχήμα 4.24β Σχηματική αναπαράσταση διατάξεων πλοίου μεταφοράς LNG

4.7 Συμπεράσματα

Η εφαρμογή των ναυτικών αεριοστροβίλων έχει εξελιχθεί σημαντικά από το 1970 σε ένα ευρύ πεδίο εμπορικών και άλλων ναυτικών εφαρμογών. Η εξέλιξη αυτή προκύπτει από τις βελτιώσεις των τεχνικών δυνατοτήτων των αεριοστροβίλων καθώς επίσης και από την ευφυή χρήση συνδυασμένων συστημάτων τα οποία βελτιστοποιούν την απόδοση. Αυστηροί περιβαλλοντικοί περιορισμοί στα πλοία έχουν ενισχύσει τη χρήση των αεριοστροβίλων παράλληλα με την εφαρμογή νέων τεχνολογιών συντήρησης. Συμβόλαια πλήρους υποστήριξης, συμπεριλαμβανομένης της χρήσης απομακρυσμένης διάγνωσης, επιτρέπουν στους χειριστές να απολαμβάνουν τα πλεονεκτήματα της προηγμένης τεχνολογίας χωρίς να απαιτείται επένδυση σε υποδομή υποστήριξης.

Η εφαρμογή των ναυτικών αεριοστροβίλων αναμένεται να επεκταθεί και σε άλλους τύπους πλοίων καθώς φαίνονται τα πλεονεκτήματα σε υπάρχουσες εγκαταστάσεις. Τα χαρακτηριστικά που έκαναν τους αεριοστροβίλους ελκυστικούς σε ναυτικές εφαρμογές, το χαμηλό βάρος και ο μικρός όγκος, η υψηλή αξιοπιστία, το χαμηλό κόστος συντήρησης και οι χαμηλές εκπομπές εφαρμόζονται σε περισσότερες εμπορικές κατηγορίες.

Σε αντίθεση με τις ναυτικές εφαρμογές, η χρήση των αεριοστροβίλων σε εφαρμογές επίγειας πρόωσης, όπως στα αυτοκίνητα δεν τελεσφόρησε παρόλο που είχαν αρκετά πλεονεκτήματα. Οι προσπάθειες που έγιναν αποδείχθηκαν άκαρπες με αποτέλεσμα τα συγκεκριμένα αυτοκίνητα να μην προχωρήσουν σε μαζική παραγωγή. Τα προβλήματα που υπήρξαν δεν κατέστην δυνατό να ξεπεραστούν. Συγκεκριμένα, ο υπερβολικός θόρυβος, τα προβλήματα στη μετάδοση της κίνησης αλλά και στον έλεγχο των αυτοκινήτων, η καθυστέρηση στην απόκριση αλλά και οι τεράστιες εκπομπές οξειδίων του αζώτου όπως και κατανάλωση καυσίμου οδήγησαν στην εγκατάλειψη του εγχειρήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Ε. Γ. Γιακουμής, Αρχές Λειτουργίας Αεριοστροβίλων Ισχύος, Ε.Μ.Π (ηλεκτρονική έκδοση), 2014
- [2] Meherwan P. Boyce, Gas turbine engineering hand book, Gulf Professional Publishing, 2002
- [3] Walsh Philip and Paul Fletcher, Gas turbine performance, Blackwell Science London, 1998.
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Chrysler_Turbine_Car
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/General_Motors_Firebird
- [6] <http://carhistory.gr/load/content/pages/view/Rover+gas+turbine+cars#.VsSucPmLSM8>
- [7] <http://carhistory.gr/load/content/pages/view/Fiat+Turbina+#.VsSuwvmLSM8>
- [8] https://en.wikipedia.org/wiki/Volvo_ECC
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/EcoJet_concept_car
- [10] https://en.wikipedia.org/wiki/Jaguar_C-X75
- [11] https://en.wikipedia.org/wiki/Howmet_TX
- [12] https://en.wikipedia.org/wiki/MTT_Turbine_Superbike
- [13] https://en.wikipedia.org/wiki/M1_Abrams
- [14] <https://en.wikipedia.org/wiki/T-80>
- [15] http://www51.honeywell.com/aero/common/documents/myaerospacecatalog-documents/SurfaceSystems/AGT1500_Turbine_Technology.pdf
- [16] https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_turbine_train
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/British_Rail_APT-E
- [18] https://en.wikipedia.org/wiki/British_Rail_GT3
- [19] <https://en.wikipedia.org/wiki/Turbotrain>
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/TGV_001
- [21] https://en.wikipedia.org/wiki/UAC_TurboTrain
- [22] <https://en.wikipedia.org/wiki/JetTrain>
- [23] <https://en.wikipedia.org/wiki/Turboliner>
- [24] https://en.wikipedia.org/wiki/Gas_turbine-electric_locomotive
- [25] <http://www.trucksplanet.com/catalog/model.pHP?id=1278>
- [26] <http://www.trucksplanet.com/catalog/model.pHP?id=225>
- [27] https://en.wikipedia.org/wiki/Motor_Gun_Boat
- [28] https://en.wikipedia.org/wiki/Wasp-class_amphibious_assault_ship
- [29] <http://www.geaviation.com/marine/engines/military/lm2500/>
- [30] https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_diesel_and_gas
- [31] https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_diesel_or_gas
- [32] https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_gas_and_gas
- [33] Στυλιανή Ρισσάκη, Η Χρήση Των Αεριοστροβίλων Ως Μέσο Πρόωσης Στην Εμπορική Ναυτιλία, Πανεπιστήμιο Πειραιά (ηλεκτρονική έκδοση), 2010
- [34] https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_diesel-electric_and_gas
- [35] https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_gas_and_gas
- [36] https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_gas_or_gas
- [37] https://en.wikipedia.org/wiki/Combined_steam_and_gas
- [38] http://www.enautica.pt/publico/professores/baptista/NT_II/Gas_Familiarisation.pdf

[39] DOUG WOODYARD, Pounders Marine Diesel Engines And Gas Turbines, Butterworth-Heinmann, 2009