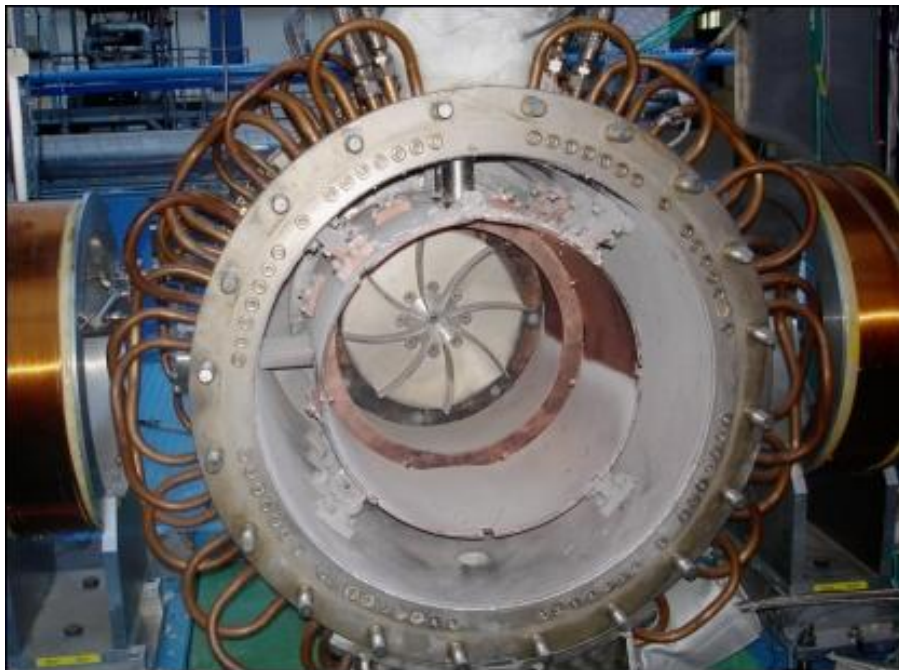


**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΜΑΓΝΗΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ



**ΣΠΟΥΔΑΣΤΕΣ: ΚΑΡΑΦΕΡΗΣ ΦΩΤΙΟΣ (Α.Μ. 7268)
ΣΑΚΕΛΛΑΡΙΟΥ ΓΕΩΡΓΙΟΣ (Α.Μ. 7395)**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: ΤΖΙΡΤΖΙΛΑΚΗΣ ΕΥΣΤΡΑΤΙΟΣ

ΠΑΤΡΑ 2023

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Το παρόν τεύχος αποτελεί την πτυχιακή εργασία που εκπονήθηκε στο Τμήμα Μηχανολόγων Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Πελοποννήσου και έχει ως θέμα τις μηχανολογικές εφαρμογές της μαγνητοϋδροδυναμικής.

Σκοπός της πτυχιακής αυτής εργασίας είναι η παρουσίαση των βασικών αρχών της μαγνητοϋδροδυναμικής που συνενώνει την ηλεκτροδυναμική και τη ρευστοδυναμική και περιγραφή των σημαντικότερων εφαρμογών της στην παραγωγή ισχύος, την προώθηση πλοίων και την κατεργασία των υλικών.

Θέλουμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας στον επιβλέποντα Καθηγητή μας κ. Τζιρτζιλάκη Ευστράτιο για την ανάθεση του θέματος και για τη βοήθειά του στην εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Υπεύθυνη Δήλωση Σπουδαστών: Οι κάτωθι υπογεγραμμένοι σπουδαστές έχουμε επίγνωση των συνεπειών του Νόμου περί λογοκλοπής και δηλώνουμε υπεύθυνα ότι είμαστε συγγραφείς αυτής της Πτυχιακής Εργασίας, αναλαμβάνοντας την ευθύνη επί ολοκλήρου του κειμένου εξ ίσου, έχουμε δε αναφέρει στην Βιβλιογραφία μας όλες τις πηγές τις οποίες χρησιμοποιήσαμε και λάβαμε ιδέες ή δεδομένα. Δηλώνουμε επίσης ότι, οποιοδήποτε στοιχείο ή κείμενο το οποίο έχουμε ενσωματώσει στην εργασία μας προερχόμενο από Βιβλία ή άλλες εργασίες ή το διαδίκτυο, γραμμένο ακριβώς ή παραφρασμένο, το έχουμε πλήρως αναγνωρίσει ως πνευματικό έργο άλλου συγγραφέα και έχουμε αναφέρει ανελλιπώς το όνομά του και την πηγή προέλευσης.

Οι σπουδαστές

Καραφέρης Φώτιος

Σακελλαρίου Γεώργιος

.....
(Υπογραφή)

.....
(Υπογραφή)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται οι βασικές αρχές της μαγνητοϋδροδυναμικής (MHD).

Στο δεύτερο κεφάλαιο περιγράφονται αναλυτικά οι MHD γεννήτριες παραγωγής ισχύος και οι δυνατές διαμορφώσεις αυτών.

Το τρίτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στις εφαρμογές της MHD στην κατεργασία των μετάλλων.

Στο τέταρτο κεφάλαιο περιγράφονται οι MHD αντλίες και οι εφαρμογές τους.

Το πέμπτο κεφάλαιο είναι αφιερωμένο στο ιδιαίτερα σημαντικό θέμα της προώθησης πλοίων με MHD προωθητές καθώς και στις δυνατότητες που προσφέρει η MHD στον έλεγχο της ροής των ρευστών.

Στο έκτο κεφάλαιο περιγράφεται η χρήση μαγνητικών πεδίων για τον περιορισμό του πλάσματος στις αντιδράσεις σύντηξης.

Τέλος, στο έβδομο κεφάλαιο περιέχονται τα συμπεράσματα της εργασίας αυτής.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ	
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	
ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ	
1.1 Γενικά.....	3
1.2 Ιστορική αναδρομή.....	4
1.3 Βασικές εξισώσεις.....	6
1.4 Βασικές έννοιες της Φυσικής του Πλάσματος.....	8
2. ΜΑΓΝΗΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ	
2.1 Γενικά.....	12
2.2 Μαγνητοϋδροδυναμική γεννήτρια ισχύος.....	13
2.3 Γεννήτρια Faraday.....	17
2.4 Γεννήτρια Hall.....	18
2.5 Γεννήτρια δίσκου.....	21
2.6 Συστήματα παραγωγής ισχύος.....	22
2.6.1 Σύστημα ανοικτού κύκλου.....	22
2.6.2 Σύστημα κλειστού κύκλου.....	23
2.7 Απόδοση καναλιού MHD.....	25
2.8 Συστήματα MHD με άνθρακα.....	25
2.8.1 Άμεσος συνδυασμένος κύκλος MHD άνθρακα-ατμού....	26
2.8.2 Κορυφαίος συνδυασμένος κύκλος αεριοποίησης MHD- ατμού.....	28
2.8.3 Συνδυασμένος κύκλος αεριοποίησης ουράς MHD- ατμού.....	30
2.8.4 Τριπλός κύκλος αεριοποίησης ουράς MHD-	

αεριοστρόβιλος/στρόβιλος ατμού.....	32
2.8.5 Μονάδα MHD κλειστού κύκλου άνθρακα με δύο βρόχους.....	33
2.8.6 Τριπλός συνδυασμένος κύκλος αδρανούς αερίου MHD	35
2.8.7 Συνδυασμένος κύκλος SOFC και MHD.....	37
2.9 Πλεονεκτήματα και τεχνικές προκλήσεις.....	38
2.9.1 Πλεονεκτήματα.....	38
2.9.2 Προκλήσεις.....	39
2.10 Αριθμητική Εφαρμογή.....	40
3. ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ	
3.1 Γενικά.....	43
3.2 Εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία και το επιδερμικό φαινόμενο.....	43
3.3 Μαγνητική ανάδευση με εναλλασσόμενα μαγνητικά πεδία υψηλής συχνότητας.....	45
3.4 Χύτευση χάλυβα, αλουμινίου και κραμάτων.....	48
3.4.1 Ο φούρνος επαγωγής.....	48
3.4.2 Το ψυχρό χωνευτήριο.....	50
3.4.3 Τήξη μετεωρισμού.....	52
3.4.4 Ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα.....	54
3.4.5 Ηλεκτρομαγνητική χύτευση.....	56
4. ΜΑΓΝΗΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΤΛΗΣΗ	
4.1 Γενικά.....	57
4.2 Αρχή λειτουργίας.....	58
4.3 Εφαρμογές της μαγνητοϋδροδυναμικής άντλησης.....	60
4.4 Άντληση θαλασσινού νερού.....	61
4.5 Άντληση υγρών μετάλλων.....	63
4.6 Άντληση τήγματος αλάτων.....	63
5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΩΘΗΣΗ	
5.1 Γενικά.....	64

5.2 Ηλεκτρομαγνητική προώθηση.....	64
5.3 Μείωση οπισθέλκουσας.....	74
5.3.1 Καθυστέρηση μετάβασης.....	74
5.3.2 Τυρβώδη οριακά στρώματα.....	77
5.4 Ανύψωση και ικανότητα ελιγμών.....	79
6. ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΥΝΤΗΞΗ	
6.1 Γενικά.....	82
6.2 Ενέργεια σύντηξης.....	82
6.3 Μαγνητικός περιορισμός.....	84
6.4 Αντιδραστήρας Tokamak.....	85
7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	87
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	89

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μαγνητοϋδροδυναμική (Magnetohydrodynamics, MHD) είναι η μελέτη των μαγνητικών ιδιοτήτων και της συμπεριφοράς των ηλεκτρικά αγώγιμων ρευστών. Παραδείγματα τέτοιων μαγνητορευστών περιλαμβάνουν το πλάσμα, τα υγρά μέταλλα, το αλμυρό νερό και τους ηλεκτρολύτες. Η λέξη "magnetohydrodynamics" προέρχεται από το magneto- που σημαίνει μαγνητικό πεδίο, το hydro- που σημαίνει νερό και το dynamics που σημαίνει κίνηση.

Η θεμελιώδης ιδέα πίσω από την MHD είναι ότι τα μαγνητικά πεδία μπορούν να προκαλέσουν ηλεκτρικά ρεύματα σε ένα κινούμενο αγώγιμο ρευστό, τα οποία με τη σειρά τους πολώνουν το ρευστό και αυτή η πόλωση του ρευστού αλλάζει αμοιβαία το ίδιο το μαγνητικό πεδίο. Το σύνολο των εξισώσεων που περιγράφουν την MHD είναι ένας συνδυασμός των εξισώσεων δυναμικής των ρευστών Navier-Stokes και των εξισώσεων του ηλεκτρομαγνητισμού του Maxwell. Αυτές οι διαφορικές εξισώσεις πρέπει να επιλύονται ταυτόχρονα, είτε αναλυτικά είτε αριθμητικά.

Το φαινόμενο MHD παρατηρήθηκε για πρώτη φορά από τον W. Ritchie το 1833. Τα πρώτα πειράματα σχετικά με τις επιδράσεις του μαγνητικού πεδίου σε ηλεκτροχημικά συστήματα χρονολογούνται πριν από περισσότερο από έναν αιώνα και έχουν αποδοθεί στον M. Faraday.

Ωστόσο, η ανάπτυξη της MHD ως ανεξάρτητου επιστημονικού κλάδου ξεκίνησε το πρώτο μισό του 20ού αιώνα όταν οι αστροφυσικοί συνειδητοποίησαν πόσο πανταχού παρόντα είναι τα μαγνητικά πεδία και το πλάσμα σε όλο το σύμπαν.

Το 1940, ο Σουηδός ηλεκτρολόγος μηχανικός Hannes Alfvén διατύπωσε τις βασικές αρχές της MHD και το 1970 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής για την πρωτοποριακή του δουλειά στον τομέα αυτό. Ο H. Alfvén θεωρείται ότι είναι ο ιδρυτής της μαγνητοϋδροδυναμικής. Για την MHD ενδιαφέρονται επιστήμονες από διάφορους τομείς, όπως η φυσική πλάσματος, η αστροφυσική, η

γεωφυσική, η ναυπηγική, η μηχανική ροής υγρών μετάλλων και η παραγωγή ενέργειας. Ο λόγος για την ευρεία χρήση της MHD είναι ότι παρέχει έναν μη επεμβατικό τρόπο ελέγχου της ροής των αγώγιμων υγρών

1. ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΕΣ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα μαγνητικά πεδία επηρεάζουν πολλές φυσικές και τεχνητές ροές. Έτσι, χρησιμοποιούνται συνήθως στη βιομηχανία για τη θέρμανση, την άντληση, την ανάδευση και την ανύψωση υγρών μετάλλων. Στη φύση, υπάρχει το γήινο μαγνητικό πεδίο που διατηρείται λόγω της κίνησης ρευστού στον πυρήνα της γης, το ηλιακό μαγνητικό πεδίο που παράγει ηλιακές κηλίδες και ηλιακές εκλάμψεις και το γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο που πιστεύεται ότι επηρεάζει τον σχηματισμό αστεριών από διαστρικά νέφη.

Η μελέτη αυτών των ροών ονομάζεται Μαγνητοϋδροδυναμική (magnetohydrodynamics, MHD). Επισήμως, η MHD ασχολείται με την μελέτη της αλληλεπίδρασης της ροής ενός ρευστού και των μαγνητικών πεδίων. Τα ρευστά πρέπει να είναι ηλεκτρικά αγωγικά και μη μαγνητικά. Έτσι, η MHD περιορίζεται σε υγρά μέταλλα, θερμά ιονισμένα αέρια (πλάσματα) και ισχυρούς ηλεκτρολύτες.

Η αμοιβαία αλληλεπίδραση ενός μαγνητικού πεδίου, B , και ενός πεδίου ταχύτητας, u , προκύπτει εν μέρει ως αποτέλεσμα των νόμων των Faraday και Ampere, και εν μέρει λόγω της δύναμης Lorentz που ασκείται από το μαγνητικό πεδίο σε ένα σώμα που διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα. Οι σχετικές εξισώσεις θα αναφερθούν στην συνέχεια. Μπορούμε όμως να πούμε ποιοτικά ότι η συνολική διαδικασία αλληλεπίδρασης μπορεί να χωριστεί σε τρία μέρη:

1. Η σχετική κίνηση ενός αγωγικού ρευστού μέσα σε μαγνητικό πεδίο προκαλεί την ανάπτυξη μιας ηλεκτρεγερτικής δύναμης από επαγωγή, σύμφωνα με τον νόμο του Faraday. Η επαγόμενη ΗΕΔ προκαλεί την ροή επαγωγικού ρεύματος μέσα στο ρευστό.
2. Εξαιτίας του επαγωγικού ρεύματος δημιουργείται ένα δεύτερο, επαγόμενο, μαγνητικό πεδίο σύμφωνα με τον νόμο του Ampere. Το μαγνητικό πεδίο αυτό προστίθεται στο αρχικό μαγνητικό πεδίο.

3. Το συνολικό μαγνητικό πεδίο ασκεί στο επαγόμενο ρεύμα δύναμη Lorentz. Αυτή η δύναμη δρα στο αγώγιμο ρευστό και έχει τέτοια κατεύθυνση ώστε να εμποδίζει την σχετική κίνηση του αγώγιμου ρευστού μέσα στο μαγνητικό πεδίο.

1.2 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Αν και οι νόμοι του μαγνητισμού και της ροής των ρευστών ήταν ήδη γνωστοί, η MHD άρχισε να αναγνωρίζεται ως μία νέα επιστημονική περιοχή στα τέλη της δεκαετίας του 1930 ή στις αρχές του 1940. Ο λόγος είναι ότι οι μηχανικοί της εποχής δεν είχαν διακρίνει τις δυνατότητες που προσφέρει η MHD. Έτσι, αν και έγιναν μερικά απομονωμένα πειράματα από φυσικούς του 19^{ου} αιώνα, όπως ο Faraday, που προσπάθησε να μετρήσει την τάση κατά μήκος του Τάμεση που προκαλείται από την ροή του ποταμού μέσα στο μαγνητικό πεδίο της γης, δεν υπήρξε σημαντική πρόοδος έως τα μέσα του εικοστού αιώνα.

Τα πράγματα άρχισαν να αλλάζουν, όταν οι αστροφυσικοί συνειδητοποίησαν ότι τα μαγνητικά πεδία και το πλάσμα υπάρχουν παντού στο σύμπαν και παίζουν καθοριστικό ρόλο σε πάρα πολλά φαινόμενα. Η εξέλιξη κορυφώθηκε το 1942 με την ανακάλυψη του κύματος Alfvén, ένα φαινόμενο που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για την MHD και για την αστροφυσική. Πρόκειται για την μετάδοση εγκάρσιων κυμάτων από μία μαγνητική δυναμική γραμμή, όπως ακριβώς γίνεται και με τη διάδοση εγκάρσιων κυμάτων σε μία χορδή.

Την ίδια εποχή, οι γεωφυσικοί άρχισαν να υποψιάζονται ότι το μαγνητικό πεδίο της γης δημιουργήθηκε από τη ροή του υγρού μετάλλου του πυρήνα της (θεωρία Δυναμό), μια υπόθεση που παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1919 από τον Larmor στο πλαίσιο των ερευνών του σχετικά με το μαγνητικό πεδίο του ήλιου. Η θεωρία αυτή αποτελεί ένα πεδίο εντατικής ερευνητικής προσπάθειας μέχρι σήμερα.

Οι φυσικοί πλάσματος, από την άλλη πλευρά, απέκτησαν ενδιαφέρον για την MHD στη δεκαετία του 1950, στα πλαίσια της έρευνας για την επίτευξη ελεγχόμενης θερμοπυρηνικής σύντηξης. Ενδιαφέρονταν ιδιαίτερα για την ευστάθεια ή την έλλειψη ευστάθειας σε πλάσματα που περιορίζονται από μαγνητικά πεδία.

Η ανάπτυξη μηχανολογικών εφαρμογών που βασίζονται στην MHD ήταν πιο αργή και ουσιαστικά άρχισε τη δεκαετία του 1960. Ωστόσο, υπήρξε κάποια πρωτοποριακή εργασία από τον μηχανικό J. Hartmann, ο οποίος εφηύρε την ηλεκτρομαγνητική αντλία το 1918. Ο Hartmann έκανε επίσης μια συστηματική θεωρητική και πειραματική διερεύνηση της ροής του υδραργύρου μέσα σε ένα ομογενές μαγνητικό πεδίο. Σήμερα, ο Hartmann θεωρείται ο πατέρας της μαγνητοϋδροδυναμικής των υγρών μετάλλων, και μάλιστα ο όρος «ροή Hartmann» χρησιμοποιείται σήμερα ευρέως για την περιγραφή αγώγιμων ροών παρουσία μαγνητικού πεδίου. Όμως, όπως ήδη αναφέρθηκε, παρά τις έρευνες του Hartmann, ήταν μόνο στις αρχές της δεκαετίας του 1960 που η MHD άρχισε να αξιοποιείται στην τεχνολογία. Η ώθηση για αυτό ήταν σε μεγάλο βαθμό αποτέλεσμα τριών τεχνολογικών καινοτομιών:

1. Η ανάγκη για άντληση του υγρού νατρίου που χρησιμοποιήθηκε ως ψυκτικό σε αντιδραστήρες ταχείας παραγωγής.
2. Η ελεγχόμενη θερμοπυρηνική σύντηξη απαιτεί να περιοριστεί το θερμό πλάσμα μακριά από υλικές επιφάνειες με τη χρήση μαγνητικών δυνάμεων.
3. Η μαγνητοϋδροδυναμική παραγωγή ισχύος, στην οποία το ιονισμένο αέριο προωθείται μέσω ενός μαγνητικού πεδίου, θεωρήθηκε ότι μπορεί να προσφέρει την προοπτική βελτιωμένης απόδοσης στους σταθμούς παραγωγής ενέργειας.

Αυτή η τελευταία καινοτομία αποδείχθηκε ανέφικτη και η αποτυχία της έχει σχολιαστεί εκτενώς στην επιστημονική βιβλιογραφία. Αντίθετα αποδείχθηκε ότι η MHD μπορεί να προσφέρει πολλά στη μεταλλουργική βιομηχανία. Δύο δεκαετίες αργότερα, τα μαγνητικά πεδία άρχισαν να χρησιμοποιούνται για τη θέρμανση, άντληση, ανάδευση και ανύψωση υγρών μετάλλων στις μεταλλουργικές βιομηχανίες. Το βασικό σημείο είναι ότι η δύναμη Lorentz παρέχει ένα μη παρεμβατικό μέσο ελέγχου της ροής των μετάλλων. Με δεδομένη την εμπορική πίεση για την παραγωγή φθηνότερων, καλύτερων και πιο συνεπών υλικών, η MHD παρέχει ένα μοναδικό μέσο άσκησης καλύτερου ελέγχου στις διαδικασίες της χύτευσης και της εξευγενισμού.

1.3 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΞΙΣΩΣΕΙΣ

Για την πλήρη περιγραφή των μαγνητοϋδροδυναμικών φαινομένων απαιτείται ο συνδυασμός των εξισώσεων της ηλεκτροδυναμικής, που είναι γνωστές ως εξισώσεις Maxwell, και των εξισώσεων της ρευστοδυναμικής. Οι βασικές εξισώσεις της MHD είναι: Εξισώσεις Maxwell (εξισώσεις ηλεκτροδυναμικής):

$$\nabla \times \vec{B} = \mu \vec{J} \quad (\text{νόμος Ampere}) \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{νόμος Faraday}) \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (\text{νόμος Gauss για τον ηλεκτρισμό}) \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (\text{νόμος Gauss για τον μαγνητισμό}) \quad (1.4)$$

Δύναμη Lorentz:

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (1.5)$$

Νόμος του Ohm:

$$\vec{J} = \sigma(\vec{E} + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (1.6)$$

Εξίσωση συνέχειας:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \quad (1.7)$$

Από τον δεύτερο νόμο του Νεύτωνα παίρνουμε την εξίσωση:

$$\frac{Du}{Dt} = -\nabla(P/\rho) + \nu \nabla^2 u + (\vec{J} \times \vec{B})/\rho \quad (1.8)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει και η εξίσωση της στροβιλότητας, ω :

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{u} \times \vec{\omega}) + \nu \nabla^2 \omega + \vec{\nabla} \times (\vec{J} \times \vec{B})/\rho \quad (1.9)$$

Πίνακας 1.1 Βασικά Μεγέθη και Μονάδες

Σύμβολο	Μέγεθος	Μονάδες Μέτρησης (SI)
B	Μαγνητική επαγωγή	Tesla (T)
J	Πυκνότητα ρεύματος	A/m ²
μ	Μαγνητική διαπερατότητα	N/A ²
σ	Ειδική αγωγιμότητα	S/m
ν	Κινηματικό ιξώδες	m ² /s

Η μαγνητική διαπερατότητα, μ , δείχνει τον βαθμό στον οποίο ένα μαγνητικό πεδίο διεισδύει σε ένα υλικό μέσο.

Στον πίνακα 1.2 παρουσιάζονται οι σημαντικότεροι αδιάστατοι αριθμοί που χρησιμοποιούνται στη MHD. Ο αριθμός Reynolds εκφράζει το λόγο των δυνάμεων αδράνειας προς τις δυνάμεις τριβής, η παράμετρος αλληλεπίδρασης το λόγο των δυνάμεων Lorentz προς τις δυνάμεις αδράνειας, ο αριθμός Hartman το λόγο των δυνάμεων Lorentz προς τις δυνάμεις τριβής και τέλος ο μαγνητικός αριθμός Reynolds εκφράζει το λόγο της μετατόπισης προς τη διάχυση του B.

Πίνακας 1.2 Βασικοί Αδιάστατοι Αριθμοί

Όνομα	Σύμβολο	Ορισμός
Αριθμός Reynolds	Re	ul/ν
Παράμετρος Αλληλεπίδρασης	N	$\sigma B^2 l / \rho u$
Αριθμός Hartman	Ha	$B l (\sigma / \rho \nu)^{1/2}$
Μαγνητικός Αριθμός Reynolds	R_m	ul/λ

Στον παραπάνω πίνακα, ρ είναι η πυκνότητα του υλικού, και u , l είναι αντίστοιχα η χαρακτηριστική ταχύτητα και το χαρακτηριστικό μήκος του συστήματος. Η παράμετρος λ ονομάζεται συντελεστής μαγνητικής διάχυσης του υλικού και δίνεται από την σχέση:

$$\lambda = \frac{1}{\mu_0 \sigma} \quad (1.10)$$

όπου: $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ είναι η μαγνητική διαπερατότητα του κενού και σ είναι η ειδική ηλεκτρική αγωγιμότητα του υλικού.

1.4 ΒΑΣΙΚΕΣ ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΤΟΥ ΠΛΑΣΜΑΤΟΣ

Το πλάσμα υπάρχει σε πολλές μορφές στη φύση και έχει ευρεία χρήση στην επιστήμη και την τεχνολογία. Είναι ένα ειδικό είδος ιονισμένου αερίου και γενικά αποτελείται από:

- ✓ θετικά φορτισμένα ιόντα
- ✓ ηλεκτρόνια
- ✓ ουδέτερα (άτομα, μόρια, ρίζες).

Κάτω από ειδικές συνθήκες, το πλάσμα μπορεί επίσης να περιέχει και αρνητικά ιόντα. Ονομάζουμε πλάσμα ένα ιονισμένο αέριο αν είναι οιονει ουδέτερο και οι ιδιότητές του κυριαρχούνται από ηλεκτρικές ή/και μαγνητικές δυνάμεις.

Το πλάσμα μπορεί να παραχθεί εργαστηριακά από μια κατάλληλη μορφή εκκένωσης αερίου χαμηλής πίεσης. Το πλάσμα που προκύπτει συνήθως χαρακτηρίζεται ως «κρύο πλάσμα», αν και τα ηλεκτρόνια μπορεί να έχουν θερμοκρασίες αρκετών δεκάδων χιλιάδων Kelvins (δηλαδή πολύ θερμότερες από την επιφάνεια του ήλιου), ενώ τα ιόντα και το ουδέτερο αέριο έχουν πολύ χαμηλότερες θερμοκρασίες. Ωστόσο, λόγω της εξαιρετικά χαμηλής μάζας τους, τα ηλεκτρόνια δεν μπορούν να μεταφέρουν μεγάλο μέρος της θερμικής τους ενέργειας στα βαρύτερα συστατικά του πλάσματος ή στα τοιχώματα του δοχείου. Επομένως, αυτός ο τύπος ψυχρού πλάσματος δεν μεταφέρει πολύ θερμότητα στο περιβάλλον του και μπορεί να χαρακτηριστεί ως «πλάσμα χαμηλής ενθαλπίας».

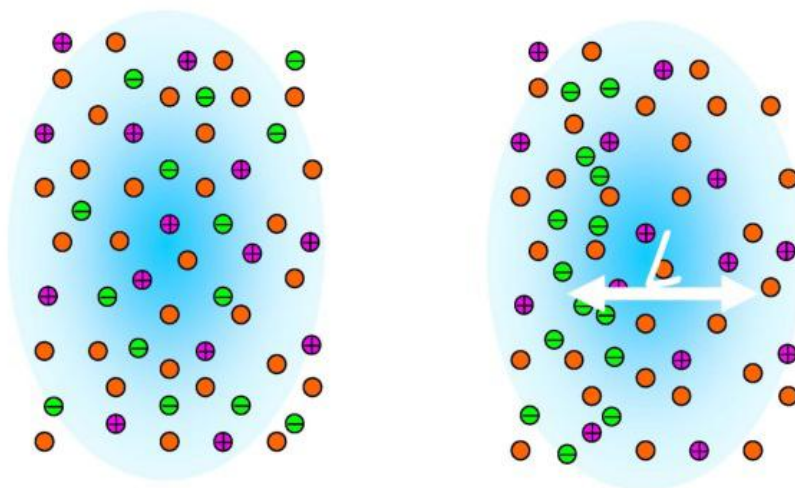
Για την περιγραφή του πλάσματος ορίζουμε τις συγκεντρώσεις σωματιδίων (particle densities) ως πλήθος σωματιδίων ανά μονάδα όγκου. Οι συγκεντρώσεις αυτές είναι γενικά συναρτήσεις της θέσης, δηλαδή έχουν διαφορετικές τιμές σε διαφορετικά σημεία του πλάσματος. Για τα θετικά ιόντα χρησιμοποιείται το σύμβολο n_i και για τα ηλεκτρόνια το σύμβολο n_e . Το ποσοστό των ουδέτερων ατόμων που έχουν ιονιστεί με

αποτέλεσμα να προκύψουν θετικά ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια ονομάζεται βαθμός ιονισμού (degree of ionization) του πλάσματος και αυξάνεται σημαντικά με αύξηση της θερμοκρασίας.

Στην περίπτωση ιόντων με μοναδιαίο θετικό φορτίο και επειδή το πλάσμα είναι συνολικά ηλεκτρικά ουδέτερο θα πρέπει να ισχύει:

$$n_i \sim n_e \quad (1.11)$$

Τα ιόντα είναι πολύ μεγαλύτερα από τα ηλεκτρόνια και συνεπώς δεν είναι ευκίνητα. Θεωρούμε λοιπόν ότι μένουν σταθερά στις θέσεις τους. Αντίθετα, τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινηθούν λόγω κάποιου εξωτερικού ηλεκτρικού πεδίου. Συνεπώς, η συγκέντρωσή τους παρουσιάζει τοπικές διακυμάνσεις και γι αυτό το λόγο στην παραπάνω σχέση βλέπουμε ότι οι συγκεντρώσεις ιόντων και ηλεκτρονίων είναι περίπου ίσες και όχι ακριβώς ίσες. Αυτό σημαίνει ότι θα υπάρχουν περιοχές με καθαρό θετικό ή αρνητικό φορτίο και συνεπώς δεν έχουμε όπως λέμε «τοπική ουδετερότητα». Πάντως λόγω της συνολικής ουδετερότητας του πλάσματος ο συνολικός αριθμός των ηλεκτρονίων είναι ίσος με τον συνολικό αριθμό των θετικών ιόντων.



Σχήμα 1.1 Σχηματική αναπαράσταση του διαχωρισμού φορτίου στο πλάσμα. Στο δεξιό σχήμα η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων είναι μεγαλύτερη στην αριστερή περιοχή και η συγκέντρωση των ιόντων είναι μεγαλύτερη στη δεξιά περιοχή [2].

Στο σχήμα 1.1 βλέπουμε πως μπορεί να συμβεί διαχωρισμός φορτίων (charge separation), δηλαδή απόκλιση από την τοπική ουδετερότητα με την κίνηση των ηλεκτρονίων προς τα αριστερά λόγω κάποιου εξωτερικού αιτίου. Στο σχήμα 1.1 βλέπουμε πως μπορεί να συμβεί διαχωρισμός φορτίων (charge separation), δηλαδή απόκλιση από την τοπική ουδετερότητα με την κίνηση των ηλεκτρονίων προς τα αριστερά λόγω κάποιου εξωτερικού αιτίου.

Βασικά στοιχεία της συμπεριφοράς του πλάσματος είναι η θωράκιση του ηλεκτρικού πεδίου και οι ταλαντώσεις.

Τα ηλεκτρόνια τείνουν να συγκεντρωθούν γύρω από τα θετικά ιόντα λόγω της ηλεκτρικής έλξης με αποτέλεσμα το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργεί το ιόν γύρω του να εμφανίζεται μειωμένο και να φθίνει εκθετικά με την απόσταση από αυτό. Η εκθετική μείωση του ηλεκτρικού δυναμικού που δημιουργεί το φορτίο του ιόντος είναι της μορφής:

$$V \propto e^{-\frac{x}{\lambda_D}} \quad (1.12)$$

όπου λ_D είναι το μήκος Debye-Huckel το οποίο υπολογίζεται από την σχέση:

$$\lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{e^2 n_e} \right)^{1/2} \quad (1.13)$$

όπου:

$\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$ F/m είναι η ηλεκτρική επιδεκτικότητα του κενού

$k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K είναι η σταθερά του Boltzmann

T_e είναι η θερμοκρασία των ηλεκτρονίων σε K

$e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ C είναι το στοιχειώδες φορτίο

n_e είναι η συγκέντρωση των ηλεκτρονίων

Για τυπικά εργαστηριακά πλάσματα το μήκος Debye-Huckel είναι αρκετά μικρό, της τάξης των μερικών μm. Παρόλα αυτά ο αριθμός των σωματιδίων σε μία σφαίρα Debye, δηλαδή σε μία σφαίρα ακτίνας ίσης με λ_D , είναι συνήθως αρκετά μεγάλος ώστε να θεωρείται έγκυρη η στατιστική μελέτη του πλάσματος.

Αν συμβεί διαχωρισμός φορτίου στο πλάσμα με οποιονδήποτε τρόπο, τότε η συνισταμένη ηλεκτρική δύναμη μεταξύ θετικών ιόντων και

ηλεκτρονίων δρα ως δύναμη επαναφοράς θέτοντας το νέφος ηλεκτρονίων του πλάσματος σε μία συλλογική κίνηση (ταλάντωση) με κυκλική συχνότητα:

$$\omega_p = \left(\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e} \right)^{1/2} \quad (1.14)$$

όπου:

$m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$ είναι η μάζα του ηλεκτρονίου.

Η ω_p είναι γνωστή ως συχνότητα πλάσματος (plasma frequency).

Το πλάσμα μπορεί να θεωρηθεί και να μελετηθεί ως ιδανικό αέριο αν η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια των ιόντων και ηλεκτρονίων είναι μικρή σε σύγκριση με την μέση κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων. Σε αυτήν την περίπτωση μπορούμε να πούμε ότι οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων είναι αμελητέες σε συμφωνία με την υπόθεση του ιδανικού αερίου. Αυτό συμβαίνει όταν ισχύει:

$$\lambda_D \gg \lambda_n = \frac{1}{n_e^{1/3}} \quad (1.15)$$

όπου λ_n είναι η μέση απόσταση μεταξύ των ηλεκτρονίων του πλάσματος. Αν η συνθήκη (1.15) δεν ισχύει τότε το πλάσμα είναι μη-ιδανικό ή ισχυρά συζευγμένο.

Το πλάσμα θεωρείται από πολλούς επιστήμονες ως η «τέταρτη κατάσταση της ύλης» και εμφανίζεται πολύ συχνά στη φύση. Για παράδειγμα το εσωτερικό και οι ατμόσφαιρες των αστέρων είναι σε κατάσταση πλάσματος. Το πλάσμα έχει επίσης πάρα πολλές εφαρμογές σε διάφορους τομείς της επιστήμης. Η πιο σημαντική εφαρμογή του είναι στην παραγωγή ισχύος από την θερμοπυρηνική σύντηξη. Για να συμβεί σύντηξη δύο θετικά φορτισμένων πυρήνων πρέπει αυτοί να έρθουν πολύ κοντά παρά την ισχυρή ηλεκτρική άπωση που αναπτύσσεται. Για να υπερνικηθεί η ηλεκτρική άπωση πρέπει οι πυρήνες να έχουν μεγάλες κινητικές ενέργειες και αυτό επιτυγχάνεται όταν η ύλη είναι σε κατάσταση πλάσματος το οποίο είναι μάλιστα περιορισμένο σε μικρή περιοχή του χώρου. Ο περιορισμός αυτός επιτυγχάνεται με τη χρήση κατάλληλου μαγνητικού πεδίου.

2. ΜΑΓΝΗΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΙΣΧΥΟΣ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Σε όλα τα συστήματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας που χρησιμοποιούν υδροηλεκτρικούς, θερμικούς ή πυρηνικούς πόρους, η αρχική δυναμική ή θερμική ενέργεια μετατρέπεται πρώτα σε μηχανική και στη συνέχεια η μηχανική ενέργεια μετατρέπεται σε ηλεκτρική. Η αρχική μετατροπή σε μηχανική ενέργεια είναι συνήθως υψηλής απόδοσης (70 έως 80%), αλλά η μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια γίνεται με χαμηλή απόδοση (40 έως 45%). Επιπλέον, οι μηχανικές διατάξεις που απαιτούνται για τη μετατροπή της θερμικής ενέργειας σε μηχανική ενέργεια είναι συνήθως πολλές και αρκετά δαπανηρές. Αυτό απαιτεί τεράστιο κόστος επένδυσης καθώς επίσης και κόστος συντήρησης.

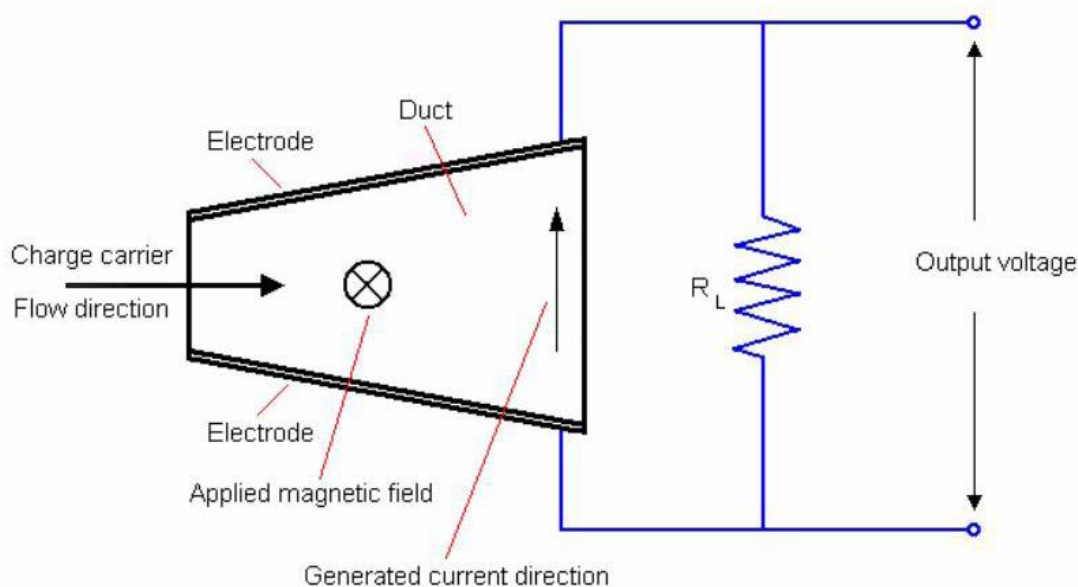
Οι επιστήμονες σκέφτονται να εξαλείψουν το μηχανικό σύστημα και να μετατρέψουν τη θερμική άμεσα σε ηλεκτρική ενέργεια τα τελευταία 50 χρόνια και περισσότερο. Δυστυχώς, κανένα σύστημα δεν έχει αναπτυχθεί ακόμη σε υψηλές τιμές ισχύος για να ανταγωνιστεί τα συμβατικά συστήματα. Εκτός από αυτό η αποδοτικότητα μιας τέτοιας μετατροπής παρέμεινε σημαντικά κακή (λιγότερο από 10%), επομένως, αυτά τα συστήματα παραγωγής ενέργειας δεν έχουν αναπτυχθεί σε μεγάλη κλίμακα.

Στα συμβατικά συστήματα μετατροπής σημειώνεται σημαντική απώλεια ενέργειας κατά τη μετάβαση από θερμική σε μηχανική ενέργεια (θερμοδυναμική μετατροπή). Η έρευνα εστιάζει τις προσπάθειές της σε διαδικασίες μετατροπής που δεν χρησιμοποιούν αυτό το βήμα. Η απουσία κινούμενων μηχανικών μερών μπορεί να επιτρέψει την επίτευξη θερμοκρασιών λειτουργίας πολύ υψηλότερων από αυτές των τυπικών συμβατικών διαδικασιών, με αποτέλεσμα, τουλάχιστον δυνητικά, υψηλότερη απόδοση μετατροπής. Αυτές οι διαδικασίες είναι γνωστές ως άμεσες μετατροπές. Η μαγνητοϋδροδυναμική γεννήτρια είναι μία από τις

μεθόδους άμεσης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, οι οποίες εξετάζονται τα τελευταία χρόνια για βιομηχανικές εφαρμογές.

2.2 ΜΑΓΝΗΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΙΣΧΥΟΣ

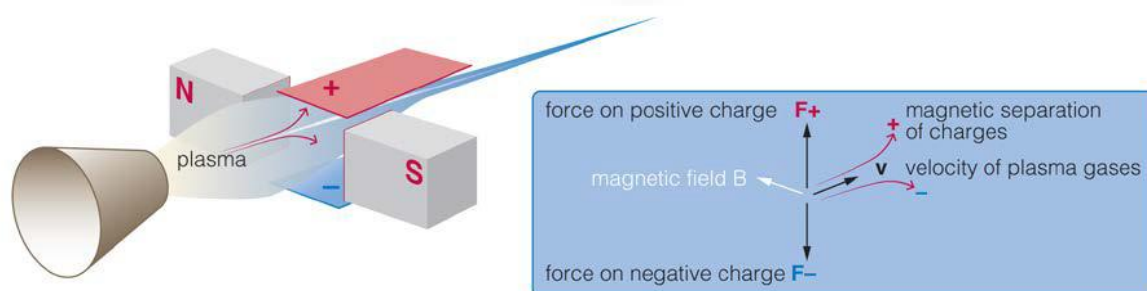
Η μαγνητοϋδροδυναμική γεννήτρια ισχύος είναι μια συσκευή που παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω της αλληλεπίδρασης ενός κινούμενου ρευστού (συνήθως ιονισμένου αερίου ή πλάσματος) και ενός μαγνητικού πεδίου. Όπως όλες οι διαδικασίες άμεσης μετατροπής, οι γεννήτριες MHD μπορούν επίσης να μετατρέψουν τη θερμική ενέργεια απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια χωρίς κινούμενα μέρη. Με αυτόν τον τρόπο, οι στατικοί μετατροπείς ενέργειας, χωρίς κινούμενα μηχανικά μέρη, μπορούν να βελτιώσουν τη δυναμική μετατροπή, λειτουργώντας σε θερμοκρασία υψηλότερη από τις συμβατικές διαδικασίες. Η τυπική διαμόρφωση της γεννήτριας MHD φαίνεται στο σχήμα 2.1.



Σχήμα 2.1 Σχηματική αναπαράσταση τυπικής μαγνητοϋδροδυναμικής γεννήτριας [3].

Η βασική αρχή της παραγωγής ενέργειας MHD είναι εξαιρετικά απλή. Η αρχή της γεννήτριας MHD φαίνεται στο σχήμα 2.2. Τυπικά, ένα θερμό ηλεκτρικά αγώγιμο αέριο παράγεται με θερμικό ιονισμό του

αερίου σε υψηλή πίεση με καύση κάποιου ορυκτού καυσίμου. Στη συνέχεια στη γεννήτρια MHD, το θερμό, ηλεκτρικά αγώγιμο αέριο επιταχύνεται από ένα ακροφύσιο και στη συνέχεια εγχέεται σε ένα κανάλι με μεγάλη ταχύτητα. Ένα ισχυρό μαγνητικό πεδίο δημιουργείται σε όλο το κανάλι. Το αέριο αναγκάζεται μέσω του καναλιού με κινητική ενέργεια και διαφορά πίεσης που επαρκούν για να ξεπεράσει τη μαγνητική δύναμη λόγω επαγωγής. Σύμφωνα με τον νόμο επαγωγής του Faraday, δημιουργείται ένα ηλεκτρικό πεδίο που δρα σε μια διεύθυνση κάθετη τόσο στη ροή του αερίου όσο και στο μαγνητικό πεδίο. Τα τοιχώματα του καναλιού παράλληλα με το μαγνητικό πεδίο χρησιμεύουν ως ηλεκτρόδια και επιτρέπουν στη γεννήτρια να παρέχει ηλεκτρικό ρεύμα σε ένα εξωτερικό κύκλωμα.



Σχήμα 2.2 Βασική αρχή της μαγνητοϋδροδυναμικής παραγωγής ισχύος [6].

Το σύστημα MHD αποτελεί μια θερμική μηχανή, που περιλαμβάνει διαστολή του αερίου από υψηλή σε χαμηλή πίεση με τρόπο παρόμοιο με αυτόν που χρησιμοποιείται σε μία συμβατική στροβιλογεννήτρια αερίου. Στην στροβιλογεννήτρια, το αέριο αλληλεπιδρά με τις επιφάνειες των λεπίδων για να οδηγήσει τον στρόβιλο και τη συνδεδεμένη ηλεκτρική γεννήτρια. Στο σύστημα MHD, η κινητική ενέργεια του αερίου μετατρέπεται απευθείας σε ηλεκτρική ενέργεια καθώς αφήνεται να διασταλεί.

Καθώς το ιονισμένο αέριο κινείται μέσα στο μαγνητικό πεδίο, στα φορτισμένα σωματίδια που αποτελούν το αέριο ασκείται μία δύναμη Lorentz που είναι κάθετη στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και στην ταχύτητα των σωματιδίων. Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται λόγω του νόμου της επαγωγής του Faraday δίνεται από την σχέση:

$$\vec{E} = \vec{u} \times \vec{B} \quad (2.1)$$

όπου \vec{u} είναι η ταχύτητα του ιονισμένου αερίου και \vec{B} είναι η ένταση του μαγνητικού πεδίου. Το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο ισοδυναμεί βέβαια με μία ηλεκτρεγερτική δύναμη από επαγωγή. Η πυκνότητα του επαγόμενου ρεύματος δίνεται από την σχέση:

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (2.2)$$

όπου σ είναι η ειδική αγωγιμότητα του ιονισμένου αερίου και \vec{E} είναι η ένταση του ηλεκτρικού πεδίου που δημιουργείται από τη διαφορά δυναμικού E . Η επιβραδύνουσα δύναμη που ασκείται στον αγωγό είναι η δύναμη Lorentz, η οποία δίνεται από την σχέση:

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (2.3)$$

Σε έναν μετατροπέα MHD ο ηλεκτρικός αγωγός αντικαθίσταται από ένα ρεύμα πλάσματος σε υψηλή ταχύτητα και με υψηλή θερμοκρασία για να ιονιστεί μερικώς. Έτσι, η τρέχουσα ροή δεν αποτελείται μόνο από ηλεκτρικά ουδέτερα μόρια αλλά και από ένα μείγμα θετικών ιόντων και ηλεκτρονίων. Όταν ένα αέριο υψηλής ταχύτητας ρέει σε συγκλίνοντες-αποκλίνοντες αγωγούς και διέρχεται από το μαγνητικό πεδίο, προκαλείται ηλεκτρεγερτική δύναμη (ΗΕΔ) κάθετα και προς την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου και προς την κατεύθυνση της ροής του αερίου. Τα ηλεκτρόδια στα απέναντι πλευρικά τοιχώματα του καναλιού ροής MHD παρέχουν μια διασύνδεση σε ένα εξωτερικό κύκλωμα. Τα ηλεκτρόνια περνούν από το ρευστό σε ένα τοίχωμα σε ένα ηλεκτρόδιο, σε ένα εξωτερικό φορτίο, στο ηλεκτρόδιο στο απέναντι τοίχωμα και στη συνέχεια πίσω στο ρευστό, ολοκληρώνοντας το κύκλωμα.

Έτσι, η ροή καναλιού MHD είναι μια πηγή συνεχούς ρεύματος που μπορεί να εφαρμοστεί απευθείας σε ένα εξωτερικό φορτίο ή μπορεί να συνδεθεί με έναν μετατροπέα ισχύος για να παράγει εναλλασσόμενο ρεύμα. Η ηλεκτρική ενέργεια που παράγεται είναι ανάλογη με τη μείωση της κινητικής ενέργειας και της ενθαλπίας του ρεύματος του ρευστού.

Τα φαινόμενα MHD ροής μπορούν να παραχθούν με ηλεκτρόνια σε μεταλλικά υγρά όπως υδράργυρο και νάτριο ή σε θερμά αέρια που περιέχουν ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια. Και στις δύο περιπτώσεις, τα ηλεκτρόνια είναι πολύ ευκίνητα και κινούνται εύκολα μεταξύ των ατόμων και των ιόντων, ενώ διατηρείται η τοπική ουδετερότητα καθαρού φορτίου. Οποιοσδήποτε μικρός όγκος του ρευστού περιέχει τα ίδια συνολικά θετικά φορτία στα ιόντα και συνολικά αρνητικά φορτία, επειδή οποιαδήποτε σημαντική ανισοκατανομή του φορτίου θα δημιουργούσε μεγάλες ηλεκτροστατικές δυνάμεις για την επαναφορά της ομοιογένειας.

Οι περισσότερες θεωρητικές και πειραματικές εργασίες και μελέτες ανάπτυξης και εφαρμογής σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας έχουν επικεντρωθεί στην χρήση ιονισμένου αερίου υψηλής θερμοκρασίας ως ρευστό εργασίας. Δυστυχώς, τα περισσότερα κοινά αέρια δεν ιονίζονται σημαντικά σε θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται με χημικές αντιδράσεις ορυκτών καυσίμων. Αυτό καθιστά απαραίτητη τη σπορά των θερμών αερίων με μικρές ποσότητες ιονισμένων υλικών όπως αλκαλικά μέταλλα. Υλικά όπως το καίσιο και το κάλιο έχουν αρκετά χαμηλές ενέργειες ιοντισμού ώστε να ιονίζονται σε θερμοκρασίες που επιτυγχάνονται με αντίδραση καύσης στον αέρα. Η ανάκτηση και η επαναχρησιμοποίηση των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ως σπόροι από τα καυσαέρια θεωρείται συνήθως απαραίτητη τόσο από οικονομική άποψη όσο και από άποψη πρόληψης της ρύπανσης.

Το ενδιαφέρον για την MHD παραγωγή ενέργειας ενισχύεται από την παρατήρηση ότι η αλληλεπίδραση ενός πλάσματος με ένα μαγνητικό πεδίο θα μπορούσε να συμβεί σε πολύ υψηλότερες θερμοκρασίες από ότι είναι δυνατό σε μια περιστρεφόμενη μηχανική τουρμπίνα. Οι περιοριστικές επιδόσεις από την άποψη της απόδοσης μιας θερμικής μηχανής περιορίζονται από τον κύκλο Carnot. Ένα σύστημα που χρησιμοποιεί γεννήτρια MHD προσφέρει τη δυνατότητα μιας τελικής απόδοσης από 60 έως 65%. Αυτό φυσικά είναι πολύ καλύτερο από την απόδοση 35 έως 40% που μπορεί να επιτευχθεί σε ένα σύγχρονο συμβατικό θερμοηλεκτρικό σταθμό.

Η ισχύς εξόδου μιας γεννήτριας MHD για κάθε κυβικό μέτρο του όγκου του καναλιού της είναι ανάλογη με το γινόμενο της αγωγιμότητας του αερίου, το τετράγωνο της ταχύτητας του αερίου και το τετράγωνο της δύναμης του μαγνητικού πεδίου από το οποίο διέρχεται το αέριο. Για να λειτουργούν ανταγωνιστικά οι γεννήτριες MHD με καλές επιδόσεις και

λογικές φυσικές διαστάσεις, η ηλεκτρική αγωγιμότητα του πλάσματος πρέπει να είναι σε θερμοκρασίες πάνω από 1800K περίπου.

Εκτός από τη γεννήτρια ισχύος MHD, άλλες συσκευές είναι απαραίτητες για τη διαμόρφωση του συνολικού συστήματος. Είναι απαραίτητο να καεί το καύσιμο και το οξειδωτικό, να προστεθεί ο σπόρος και να γίνουν ρυθμίσεις για την εξαγωγή της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας. Πρέπει να σημειωθεί ότι μια γεννήτρια MHD παράγει μια έξοδο συνεχούς ρεύματος που χρειάζεται έναν μετατροπέα υψηλής ισχύος για να μετατρέψει την έξοδο σε εναλλασσόμενο ρεύμα για σύνδεση στο δίκτυο.

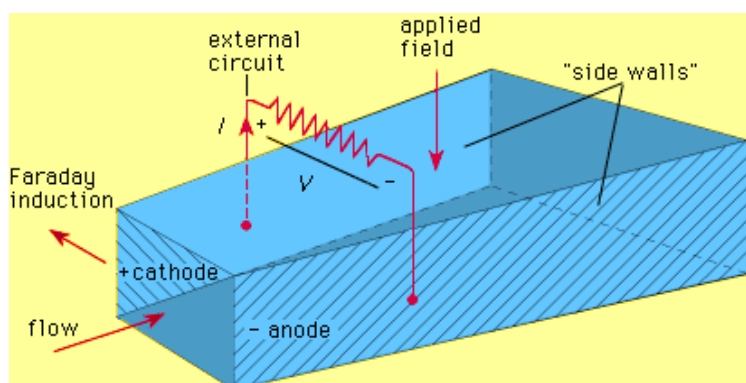
Το καύσιμο είναι συνήθως ορυκτό και το οξειδωτικό μέσο είναι ο αέρας, για προφανείς οικονομικούς λόγους. Για μεγάλα συστήματα, θα πρέπει να ληφθούν ορισμένες προφυλάξεις για τον περιορισμό του ποσού των απωλειών. Ο αέρας μπορεί να εμπλουτιστεί με περισσότερο οξυγόνο και η προθέρμανση του εισερχόμενου οξειδωτικού γίνεται απαραίτητη για να επιτραπεί ο θερμικός ιονισμός. Στην πράξη, πρέπει να εξεταστούν ορισμένα ζητήματα κατά την εφαρμογή μιας γεννήτριας MHD: απόδοση γεννήτριας, κόστος και παραγωγή τοξικών προϊόντων. Αυτά τα ζητήματα επηρεάζονται από την επιλογή ενός από τα διαθέσιμα σχέδια γεννητριών MHD. Αυτές οι διαμορφώσεις γεννητριών παρουσιάζονται στις επόμενες ενότητες.

2.3 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ FARADAY

Μια απλή γεννήτρια Faraday αποτελείται από ένα σωλήνα σε σχήμα σφήνας από κάποιο μη αγωγίμο υλικό. Όταν ένα ηλεκτρικά αγωγίμο ρευστό ρέει μέσω του σωλήνα, παρουσία ενός σημαντικού κάθετου μαγνητικού πεδίου (το οποίο μπορεί να δημιουργείται είτε από έναν μόνιμο μαγνήτη είτε από έναν ηλεκτρομαγνήτη), επάγεται μία ηλεκτρεγερτική δύναμη κάθετα στο μαγνητικό πεδίο και τη ροή του ρευστού (σχήμα 2.3). Η ΗΕΔ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή της ηλεκτρικής ισχύος τοποθετώντας τα ηλεκτρόδια στις πλευρές σε γωνίες 90 μοιρών προς το μαγνητικό πεδίο. Στη γεννήτρια Faraday, το μέγεθος της διαθέσιμης ηλεκτρικής ισχύος στην έξοδο της γεννήτριας δεν

είναι μόνο ανάλογο με την επιφάνεια διατομής του σωλήνα αλλά και με την ταχύτητα της ροής του αγώγιμου ρευστού.

Το κύριο μειονέκτημα του συστήματος παραγωγής Faraday είναι ότι μπορεί να υπάρχει διαδρομή βραχυκυκλώματος μέσω των ηλεκτροδίων στις πλευρές του σωλήνα που χρησιμοποιείται. Επιπλέον, ο σχεδιασμός υποφέρει επίσης από τους περιορισμούς που επιβάλλονται στην πυκνότητα του ρευστού καθώς και στον τύπο του μαγνητικού πεδίου που χρησιμοποιείται. Λόγω της ροής του ρευστού και της επιβραδύνουσας δύναμης που είδαμε παραπάνω η θερμοκρασία και η ταχύτητα του ρευστού μειώνονται. Το σύστημα υποφέρει επίσης από το πρόβλημα που δημιουργείται από το ρεύμα του φαινομένου Hall που καθιστά τη γεννήτρια Faraday πολύ αναποτελεσματική. Μια μεγάλη γεννήτρια Faraday χρειάζεται ένα εξαιρετικά ισχυρό μαγνητικό πεδίο το οποίο μπορεί να αναπτυχθεί με υπεραγώγιμους μαγνήτες.



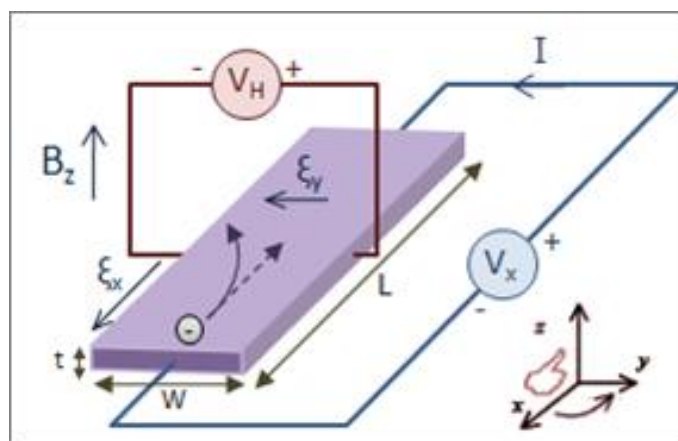
Σχήμα 2.3 Σχηματική αναπαράσταση μιας γεννήτριας Faraday [3].

2.4 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ HALL

Η πιο κοινή τεχνική για να ξεπεραστούν τα προβλήματα της γεννήτριας Faraday είναι το φαινόμενο Hall μέσω του οποίου δημιουργείται ένα ρεύμα που ρέει με το ρευστό.

Σύμφωνα με το φαινόμενο Hall όταν ένα ηλεκτρικό ρεύμα βρεθεί μέσα σε μαγνητικό πεδίο, που είναι κάθετο στο ρεύμα, τότε αναπτύσσεται μία τάση (που ονομάζεται τάση Hall), κάθετα στο μαγνητικό πεδίο και στο ηλεκτρικό ρεύμα.

Όπως βλέπουμε στο σχήμα 2.4 ένας αγωγός διαρρέεται από ηλεκτρικό ρεύμα στη διεύθυνση x και βρίσκεται μέσα σε μαγνητικό πεδίο το οποίο είναι στη διεύθυνση z . Λόγω της μαγνητικής δύναμης που τους ασκείται, τα κινούμενα ηλεκτρόνια του αγωγού εκτρέπονται στη διεύθυνση y με αποτέλεσμα την ανάπτυξη του ηλεκτρικού πεδίου E_y . Με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται μια ανισοκατανομή του ηλεκτρικού φορτίου στη διεύθυνση y .



Σχήμα 2.4 Σχηματική αναπαράσταση του φαινομένου Hall [4].

Όταν η ηλεκτρική δύναμη από το ηλεκτρικό πεδίο E_y εξισορροπήσει τη μαγνητική δύναμη η εκτροπή των ηλεκτρονίων σταματάει. Η τάση που μετράται στη διεύθυνση y ονομάζεται τάση Hall και είναι ίση με:

$$V_H = E_y \cdot w \quad (2.4)$$

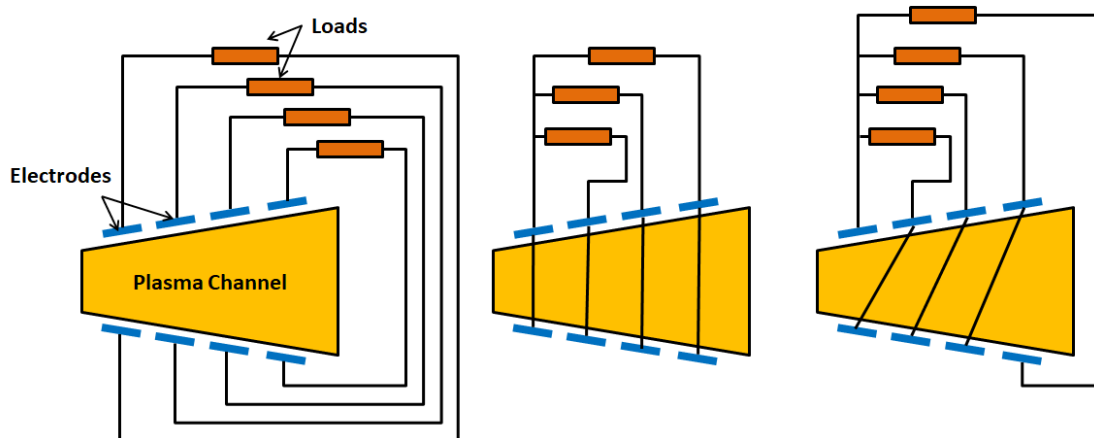
Στη γεννήτρια Faraday, η μεγάλη ποσότητα ρεύματος που παράγεται στην έξοδο της γεννήτριας αλληλεπιδρά με το μαγνητικό πεδίο που υπάρχει στο σύστημα και ως εκ τούτου έχει ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση των φορτισμένων σωματιδίων προς την κάθετη κατεύθυνση της διαδρομής ροής ρευστού λόγω του φαινομένου Hall. Ως αποτέλεσμα, παράγεται ένα εγκάρσιο ρεύμα κάθετο στην κατεύθυνση ροής του ρευστού και το συνολικό ρεύμα που παράγεται βρίσκεται ως το διανυσματικό άθροισμα του εγκάρσιου ρεύματος και του αξονικού ρεύματος. Για να ξεπεραστεί αυτό το πρόβλημα, να μειωθεί η απώλεια

ενέργειας και να βελτιωθεί η απόδοση, αναπτύσσονται άλλες διαμορφώσεις, όπως η MHD γεννήτρια Hall. Στη γεννήτρια Hall, καθένα από τα ορθογώνια ηλεκτρόδια χωρίζεται σε μια σειρά τμημάτων και τοποθετείται το ένα δίπλα στο άλλο και στις δύο πλευρές του καναλιού του ρευστού. Για να συλλέξουμε την ηλεκτρική ισχύ σε υψηλότερη τάση με μικρότερο πλάτος ρεύματος, όλα τα τμήματα ηλεκτροδίων της ίδιας πλευράς του καναλιού διατηρούνται μονωμένα μεταξύ τους, αλλά όλα τα τμήματα συνδέονται σε σειρά και συνδέονται με τα αντίστοιχα αντίθετα ηλεκτρόδιά τους.

Η γεννήτρια Hall αναπτύσσεται με τις συστοιχίες τμηματοποιημένων μικρού μήκους ηλεκτροδίων που χρησιμοποιούνται στη θέση των μονών ορθογώνιων ηλεκτροδίων. Η ηλεκτρική ισχύς συλλέγεται από το πρώτο και το τελευταίο ηλεκτρόδιο και μεταξύ όλων των άλλων ενδιάμεσων ηλεκτροδίων, ένα ηλεκτρόδιο βραχυκυκλώνεται στο ηλεκτρόδιο που βρίσκεται ακριβώς απέναντι από αυτό που τοποθετείται στην άλλη πλευρά του καναλιού ρευστού. Ως αποτέλεσμα, οι απώλειες της γεννήτριας Hall είναι πολύ λιγότερες σε σύγκριση με μια γεννήτρια Faraday.

Η επαγόμενη τάση λαμβάνεται επίσης με υψηλότερη τιμή επειδή υπάρχει μικρότερη βραχυκύκλωση του τελικού επαγόμενου ρεύματος. Ωστόσο, αυτός ο σχεδιασμός έχει προβλήματα επειδή η απόδοση της γεννήτριας είναι πολύ ευαίσθητη στο φορτίο της.

Μερικές φορές τα τμήματα ηλεκτροδίων ενός συστήματος Hall MHD βραχυκυκλώνονται με τα διαγώνια ηλεκτρόδια της αντίθετης πλευράς του καναλιού σχηματίζοντας μία λοξή διάταξη των ηλεκτροδίων. Σε αυτά τα MHD συστήματα Hall λοξού ηλεκτροδίου, τα ηλεκτρόδια συνδέονται σε ένα λοξό μοτίβο για να ευθυγραμμίσουν τους άξονες των ηλεκτροδίων με την κατεύθυνση του διανυσματικού αθροίσματος των ρευμάτων λόγω των φαινομένων Faraday και Hall. Αυτή η κεκλιμένη δομή της διακεκομμένης και βραχυκυκλωμένης διάταξης ηλεκτροδίων μας επιτρέπει να εξάγουμε τη μέγιστη ποσότητα ηλεκτρικής ενέργειας από το αγωγίμο ρευστό. Το σύστημα MHD Faraday κατακερματισμένου ηλεκτροδίου, το σύστημα MHD Hall και σύστημα MHD λοξού ηλεκτροδίου παρουσιάζονται στα σχήματα 2.5α, 2.5β και 2.5γ αντίστοιχα.



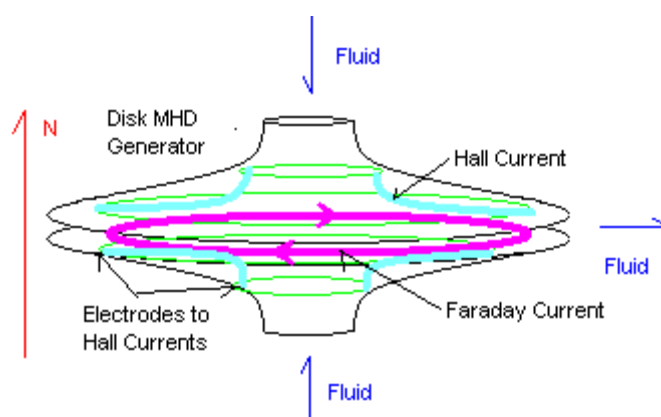
Σχήμα 2.5 Τύποι MHD γεννήτριας: (α) γεννήτρια Faraday κατακερματισμένου ηλεκτροδίου (β) γεννήτρια Hall, (γ) γεννήτρια με λοξό ηλεκτρόδιο [5].

2.5 ΓΕΝΝΗΤΡΙΑ ΔΙΣΚΟΥ

Η τρίτη, επί του παρόντος πιο αποτελεσματική απάντηση είναι η γεννήτρια δίσκου φαινομένου Hall. Αυτός ο σχεδιασμός κατέχει επί του παρόντος ρεκόρ απόδοσης και πυκνότητας ενέργειας για την MHD παραγωγή ισχύος. Μια γεννήτρια δίσκου έχει ρευστό που ρέει μεταξύ του κέντρου ενός δίσκου και έναν αγωγό τυλιγμένο γύρω από την άκρη. Το μαγνητικό πεδίο διέγερσης δημιουργείται από ένα ζεύγος κυκλικών πηνίων Helmholtz πάνω και κάτω από το δίσκο. Τα ρεύματα Faraday ρέουν σε ένα τέλειο βραχυκύκλωμα (ελάχιστης ηλεκτρικής αντίστασης) γύρω από την περιφέρεια του δίσκου. Τα ρεύματα φαινομένου Hall ρέουν μεταξύ των δακτυλιοειδών ηλεκτροδίων κοντά στο κέντρο και των δακτυλιοειδών ηλεκτροδίων κοντά στην περιφέρεια.

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα αυτού του σχεδιασμού είναι ότι ο μαγνήτης είναι πιο αποδοτικός. Πρώτον, το μαγνητικό πεδίο που δημιουργεί έχει απλές παράλληλες δυναμικές γραμμές. Δεύτερον, επειδή το ρευστό υποβάλλεται σε επεξεργασία σε ένα δίσκο, ο μαγνήτης μπορεί να είναι πιο κοντά στο ρευστό και οι δυνάμεις του μαγνητικού πεδίου αυξάνονται πολύ (είναι αντιστρόφως ανάλογες της 7ης δύναμης της απόστασης). Τέλος, η γεννήτρια είναι συμπαγής για την ισχύ της, οπότε ο

μαγνήτης είναι επίσης μικρότερος. Ο μαγνήτης που προκύπτει χρησιμοποιεί ένα πολύ μικρότερο ποσοστό της παραγόμενης ισχύος.



Σχήμα 2.6 Σχηματική αναπαράσταση μιας γεννήτριας δίσκου [3].

2.6 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΙΣΧΥΟΣ

Τα συστήματα MHD ταξινομούνται ευρέως σε δύο τύπους: σύστημα ανοικτού κύκλου και σύστημα κλειστού κύκλου.

2.6.1 Σύστημα ανοικτού κύκλου

Σε ένα σύστημα ανοικτού κύκλου MHD, το αέριο καύσης χρησιμοποιείται ως ρευστό εργασίας, ενώ το πλάσμα βρίσκεται σε κατάσταση θερμοκίνησης ισορροπίας. Ως καύσιμο μπορεί να χρησιμοποιηθεί φυσικό αέριο, πετρέλαιο ή αεριοποιημένος άνθρακας από κάποια μονάδα αεριοποίησης άνθρακα. Για άμεση παραγωγή ενέργειας από μονάδες MHD με κάρβουνο, ο άνθρακας επεξεργάζεται πρώτα και καίγεται στον καυστήρα σε υψηλή θερμοκρασία περίπου 2300–2700 °C και πίεση έως 1,2 MPa με προθερμασμένο αέρα για παραγωγή πλάσματος. Υπάρχει ένα χαμηλότερο όριο θερμοκρασίας (περίπου 2000 °C) κάτω από το οποίο η ηλεκτρική αγωγιμότητα γίνεται ουσιαστικά μηδενική. Ενδέχεται να μην υπάρχει φυσικό όριο στην ανώτερη θερμοκρασία εργασίας στο βαθμό που τα υλικά μπορούν να το αντέξουν. Για να επιτευχθούν τόσο υψηλές θερμοκρασίες, ο πεπιεσμένος αέρας, που χρησιμοποιείται για την καύση του άνθρακα στο θάλαμο καύσης, πρέπει να προθερμανθεί στους 1100 °C τουλάχιστον. Είναι δυνατόν να αρκεί και μια χαμηλότερη

θερμοκρασία προθέρμανσης εάν ο αέρας είναι εμπλουτισμένος σε οξυγόνο. Το καυτό αέριο από τον καυστήρα στη συνέχεια προστίθεται με μια μικρή ποσότητα σπόρου, γενικά ανθρακικό κάλιο, για να αυξηθεί η ηλεκτρική αγωγιμότητα του αερίου. Το προκύπτον θερμό και υπό πίεση ρευστό εργασίας διαστέλλεται μέσω ενός ακροφυσίου, έτσι ώστε να έχει υψηλή ταχύτητα και στη συνέχεια περνά μέσα από το μαγνητικό πεδίο της γεννήτριας MHD. Το θερμό αέριο διαστέλλεται μέσω της γεννήτριας που έχει τη μορφή ρουκέτας και περιβάλλεται από έναν ισχυρό μαγνήτη.

Η κίνηση του αερίου μέσω του μαγνητικού πεδίου προκαλεί τη μετακίνηση των θετικών και αρνητικών φορτισμένων ιόντων στα ηλεκτρόδια και με αυτόν τον τρόπο δημιουργείται ηλεκτρικό ρεύμα. Το αέριο που εξέρχεται από τη γεννήτρια καθαρίζεται πριν απορριφθεί στην ατμόσφαιρα. Αφού το αέριο δεν κυκλοφορεί και δεν επαναχρησιμοποιείται, πρόκειται για έναν ανοικτό κύκλο.

Οι περισσότερες πειραματικές μελέτες, μέχρι στιγμής, αφορούσαν το σύστημα ανοικτού κύκλου και αυτή η προσέγγιση ισχύει για μετασκευές MHD σε υπάρχοντες σταθμούς παραγωγής ενέργειας.

2.6.2 Σύστημα κλειστού κύκλου

Όπως υποδηλώνει το όνομα, το ρευστό εργασίας σε ένα σύστημα κλειστού κύκλου MHD κυκλοφορεί σε κλειστό βρόχο και θερμαίνεται από τα αέρια καύσης χρησιμοποιώντας έναν εναλλάκτη θερμότητας. Επομένως, η πηγή θερμότητας και το υγρό εργασίας είναι ανεξάρτητα. Διερευνώνται δύο γενικοί τύποι γεννητριών MHD κλειστού κύκλου: το σύστημα ευγενών αερίων με σπορά και το σύστημα υγρών μετάλλων.

Σύστημα ευγενών αερίων με σπορά

Σε αυτό το σύστημα, ο φορέας είναι συνήθως ένα ευγενές αέριο όπως το ήλιο ή το αργό. Η ηλεκτρική αγωγιμότητα του υγρού εργασίας διατηρείται με ιονισμό ενός υλικού από αλκαλικό μέταλλο που έχει προστεθεί (καίσιο ή κάλιο), όπως στο σύστημα ανοικτού κύκλου. Όταν χρησιμοποιούνται αδρανή αέρια σε γεννήτριες MHD κλειστού κύκλου, είναι δυνατόν να μειωθεί σημαντικά η ελάχιστη θερμοκρασία εργασίας λόγω ιονισμού σε κατάσταση που δεν είναι κατάσταση ισορροπίας.

Το αέριο φορέας λειτουργεί με τη μορφή του κύκλου Brayton: σε ένα σύστημα κλειστού κύκλου το αέριο συμπιέζεται και η θερμότητα τροφοδοτείται από την πηγή, σε ουσιαστικά σταθερή πίεση. Το

συμπιεσμένο αέριο στη συνέχεια διαστέλλεται στη γεννήτρια MHD και η πίεση και η θερμοκρασία του μειώνονται. Μετά την έξοδο από τη γεννήτρια, η θερμότητα αφαιρείται από το αέριο με ένα ψυγείο. Αυτό είναι το στάδιο απόρριψης θερμότητας του κύκλου. Τέλος το αέριο επανασυμπιέζεται και επιστρέφεται για αναθέρμανση.

Η θερμότητα που παράγεται από την καύση του καυσίμου μεταφέρεται στο αέριο φορέα του κύκλου MHD σε έναν κύριο εναλλάκτη θερμότητας. Τα προϊόντα καύσης, αφού περάσουν από προθερμαντήρα αέρα και συστήματα ελέγχου εκπομπών ρύπων αέρα, απορρίπτονται στην ατμόσφαιρα.

Σύστημα υγρού μετάλλου

Σε αυτό το σύστημα, χρησιμοποιείται ένα υγρό μέταλλο με υψηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία με ένα αέριο φορέα (ρευστό εργασίας δύο φάσεων) ή ένα πτητικό υγρό (διαφορετικό ή ίδιο με το ηλεκτρικά αγωγίμο ρευστό) ως το ρευστό εργασίας. Το υγρό μέταλλο έχει το πλεονέκτημα της υψηλής ηλεκτρικής αγωγιμότητας σε σύγκριση με τα πλάσματα και επομένως η παρεχόμενη θερμότητα δεν χρειάζεται να είναι πολύ υψηλή. Η κύρια δυσκολία με τέτοια συστήματα είναι η δημιουργία ροής υγρού με αρκετά υψηλή ταχύτητα.

Ένα αδρανές αέριο είναι ένας βολικός φορέας. Το αέριο φορέας συμπιέζεται και θερμαίνεται περνώντας μέσα από έναν εναλλάκτη θερμότητας εντός του θαλάμου καύσης. Το θερμό αέριο στη συνέχεια ενσωματώνεται στο υγρό μέταλλο για να σχηματίσει το ρευστό εργασίας. Το τελευταίο αποτελείται από φυσαλίδες αερίου ομοιόμορφα διασκορπισμένες σε περίπου ίσο όγκο υγρού μετάλλου. Το υγρό εργασίας εισάγεται στη γεννήτρια MHD μέσω ενός ακροφυσίου με τους συνήθεις τρόπους. Το αέριο φορέας παρέχει την απαιτούμενη υψηλή ταχύτητα του ηλεκτρικού αγωγού. Μετά τη διέλευση από τη γεννήτρια, το υγρό μέταλλο διαχωρίζεται από το αέριο φορέα. Τέλος, το αέριο φορέας ψύχεται, συμπιέζεται και επιστρέφεται στον θάλαμο καύσης για αναθέρμανση και ανάμιξη με το ανακτημένο υγρό μέταλλο.

Ένα από τα πλεονεκτήματα του MHD κλειστού κύκλου είναι ότι μπορεί να επιτευχθεί μεγαλύτερη πυκνότητα ισχύος λόγω της υψηλότερης ηλεκτρικής αγωγιμότητας στο κανάλι της γεννήτριας. Αυτό οδηγεί σε μια συμπαγή γεννήτρια με μικρότερο υπεραγώγιμο μαγνήτη σε σύγκριση με τη γεννήτρια MHD ανοικτού κύκλου, αν και το σύστημα

ηλεκτροπαραγωγής κλειστού κύκλου είναι σχετικά πιο πολύπλοκο. Ένα άλλο πλεονέκτημα είναι ότι η υψηλή ισχύς είναι δυνατή ακόμη και σε σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες αερίου γύρω στους 1700 °C. Πιστεύεται από ορισμένους ότι τα συστήματα MHD κλειστού κύκλου με υψηλή απόδοση και μικρότερο εξοπλισμό ταιριάζουν καλύτερα σε μικρές μονάδες ισχύος 100 MWe, ενώ οι μονάδες ηλεκτροπαραγωγής MHD άνθρακα ανοικτού κύκλου γίνονται οικονομικοί άνω των 200 MWe.

2.7 ΑΠΟΔΟΣΗ ΚΑΝΑΛΙΟΥ MHD

Η φυσικώς εφικτή θερμική απόδοση μιας γεννήτριας MHD αναφέρεται συνήθως ως λόγος εξαγωγής ενθαλπίας καναλιού. Η καθαρή απόδοση ενός σταθμού παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας MHD θα εξαρτάται από τη διαμόρφωση του εργοστασίου και τις τεχνολογίες που υιοθετούνται. Μόλις αποφασιστεί η σχεδιαστική ιδέα ενός σταθμού ηλεκτροπαραγωγής MHD και επιλεγούν οι τεχνολογίες, η απόδοση της εγκατάστασης καθορίζεται από την αναλογία εξαγωγής ενθαλπίας καναλιού MHD. Ο λόγος εξαγωγής ενθαλπίας για γεννήτρια MHD μπορεί να κυμαίνεται από 30-35%. Οι αναλογίες εξαγωγής ενθαλπίας που έχουν αποδειχθεί πειραματικά μέχρι τώρα για MHD ανοικτού κύκλου είναι 15% με κανάλι δίσκου με κλονισμό και 11% με γραμμικό κανάλι Faraday κάτω από μαγνητικό πεδίο 3,2 T. Για μια γεννήτρια MHD κλειστού κύκλου, μια αναλογία εξαγωγής ενθαλπίας 19% με μια γεννήτρια MHD δίσκου επιτεύχθηκε από το Τεχνικό Ινστιτούτο του Τόκιο.

2.8 ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ MHD ΜΕ ΑΝΘΡΑΚΑ

Σε εφαρμογές παραγωγής ενέργειας, οι γεννήτριες MHD μπορούν να συνδυαστούν με διάφορα είδη συσκευών μετατροπής ενέργειας για να σχηματίσουν διαφορετικούς κύκλους. Σε μονάδες ηλεκτροπαραγωγής MHD που λειτουργούν με άνθρακα, το σύστημα ανοικτού κύκλου MHD που χρησιμοποιεί το αέριο καύσης ως ρευστό εργασίας είναι μια

προφανής επιλογή. Παλαιότερες μελέτες έχουν δείξει ότι η παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας MHD ανοικτού κύκλου έχει μεγαλύτερη δυνατότητα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας χαμηλού κόστους. Ωστόσο, έχουν προταθεί και έννοιες σταθμών ηλεκτροπαραγωγής MHD που χρησιμοποιούν συστήματα MHD κλειστού κύκλου. Πολλές παραλλαγές της διαμόρφωσης συστήματος ενδέχεται να είναι δυνατές.

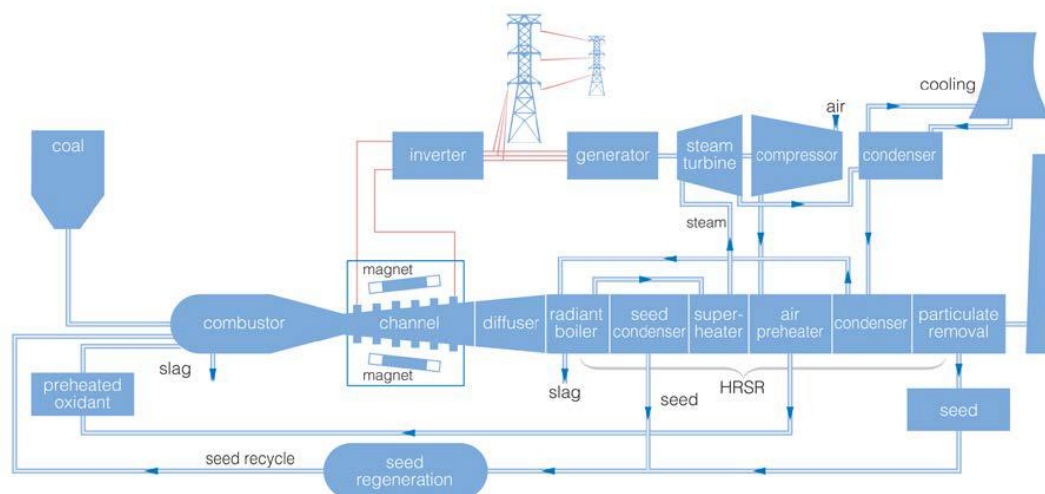
Τα συστήματα MHD που λειτουργούν με άνθρακα χρησιμοποιούν τον άνθρακα ως καύσιμο για να παράγουν το πλάσμα στο οποίο καίγεται ο άνθρακας σε θερμοκρασία επαρκή για την παροχή θερμικού ιονισμού. Ωστόσο, καθώς το ρευστό διέρχεται από τον θάλαμο MHD και διαστέλλεται κατά μήκος του θαλάμου, η ηλεκτρική αγωγιμότητα καθώς και η θερμοκρασία μειώνονται. Ένα σύστημα MHD με καύση άνθρακα θα μπορούσε να συνδυαστεί με μια συμβατική θερμοηλεκτρική μονάδα για να αυξηθεί η απόδοση της παραγωγής ενέργειας. Σε θερμοηλεκτρικό σταθμό συζευγμένο με MHD, το θερμό πλάσμα περνάει πρώτα από τη γεννήτρια MHD για να παράγει ηλεκτρική ενέργεια μέσω της μαγνητοϋδροδυναμικής αρχής και στη συνέχεια το πλάσμα που εξέρχεται από την έξοδο του MHD καναλιού χρησιμοποιείται για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιώντας την τεχνική παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας με ατμοστρόβιλο.

2.8.1 Άμεσος συνδυασμένος κύκλος MHD άνθρακα-ατμού

Η εξάτμιση μιας γεννήτριας MHD είναι σχεδόν τόσο ζεστή όσο η φλόγα ενός συμβατικού λέβητα ατμού. Αυτή η θερμότητα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παράγει περισσότερη ενέργεια, η οποία βελτιώνει σημαντικά την αποδοτικότητα και την οικονομία των μονάδων παραγωγής ενέργειας MHD που λειτουργούν με ορυκτά καύσιμα. Ένας τυπικός δυαδικός κύκλος MHD-ατμού ανοικτού κύκλου φαίνεται στο Σχήμα 10. Αυτή η διαμόρφωση υιοθετήθηκε και δοκιμάστηκε από το πρόγραμμα POC των ΗΠΑ. Αποτελείται από έναν πρωτεύοντα (topping) κύκλο πλήρωσης που βασίζεται σε μια γεννήτρια MHD και έναν δευτερεύοντα (bottoming) κύκλο ατμού. Ένας διαχύτης συνδέει τους δύο κύκλους. Στον κύκλο πλήρωσης, ο άνθρακας και ο σπόρος (γενικά άλας καλίου) τροφοδοτούνται μαζί με θερμαινόμενο αέρα στον καυστήρα και καίγονται υπό πίεση 0,5-1 MPa για να φτάσουν την απαιτούμενη θερμοκρασία που είναι περίπου 2500 °C. Το εμπλουτισμένο αέριο

καύσης ιονίζεται σε αυτή τη θερμοκρασία για να παράγει το πλάσμα που ρέει μέσω του μαγνητικού πεδίου στο κανάλι MHD στο οποίο η θερμική και κινητική ενέργεια του αερίου καύσης μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια. Ο διαχύτης είναι ενσωματωμένος στο κανάλι για να αυξήσει την εξαγωγή ενέργειας. Η εξαγωγή ενέργειας συνεχίζεται έως ότου η θερμοκρασία γίνει πολύ χαμηλή για να έχει χρήσιμη ηλεκτρική αγωγιμότητα.

Το αέριο καύσης που εξέρχεται από τον διαχύτη εισέρχεται στη συνέχεια σε έναν λέβητα ακτινοβολίας (γεννήτρια ατμού) σε θερμοκρασία στην περιοχή 1900–2200 °C. Η ενέργεια εξάγεται στον δευτερεύοντα κύκλο με την παραγωγή ατμού για να οδηγήσει τον ατμοστρόβιλο, ο οποίος βρίσκεται στον ίδιο άξονα με ηλεκτρική γεννήτρια και συμπιεστή, για να παράγει επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια και να συμπιέσει τον αέρα (και το οξυγόνο) που απαιτείται για την απαιτούμενη πίεση για καύση. Το αέριο καύσης που φεύγει από το λέβητα περνά μέσα από εναλλάκτες θερμότητας, στους οποίους η θερμική ενέργεια του αερίου ανακτάται μέσω της προθέρμανσης του αέρα καύσης. Το αέριο χαμηλής θερμοκρασίας από τους εναλλάκτες ανάκτησης θερμότητας ρέει μέσω μιας συσκευής ελέγχου σωματιδίων όπου τα σωματίδια αφαιρούνται. Οι σπόροι διαχωρίζονται από την τέφρα και αναγεννιούνται.



Σχήμα 2.7 Ένας τυπικός συνδυασμένος κύκλος MHD άνθρακα με ατμό [6].

Για τον έλεγχο των εκπομπών NO_x από την καύση άνθρακα, ο άνθρακας καίγεται στον καυστήρα κάτω από στοιχειομετρικές συνθήκες. Η καύση ολοκληρώνεται στη συνέχεια σε έναν δευτερεύοντα καυστήρα που βρίσκεται κάτω από τον λέβητα στον δευτερεύοντα κύκλο. Στον καυστήρα αυτόν, οι ενώσεις θείου που προέρχονται από άνθρακα μετατρέπονται σε SO_x που αντιδρά με ιόντα καλίου για να σχηματίσει K_2SO_4 . Αυτή η αντίδραση μειώνει το περιεχόμενο SO_x στο αέριο καύσης σε κάτω από το επιτρεπτό επίπεδο. Το K_2SO_4 εναποτίθεται στον καυστήρα και συλλέγεται και μεταφέρεται σε μονάδα αναγέννησης σπόρων.

Εκτός από έναν λέβητα ακτινοβολίας και έναν δευτερεύοντα καυστήρα, το σύστημα ανάκτησης θερμότητας σε έναν σταθμό παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας MHD περιλαμβάνει επίσης έναν υπερθερμαντήρα ατμού, έναν θερμαντήρα ατμού, έναν προθερμαντήρα αέρα και έναν εξοικονομητή. Προτιμάται υψηλότερη θερμοκρασία οξειδωτικού (1370-1650 °C) για να επιτευχθεί υψηλή απόδοση. Επομένως, εγκαθίσταται ένας προθερμαντήρας αέρα ανάντη του λέβητα ακτινοβολίας. Το αέριο καύσης που εξέρχεται από τον διαχύτη MHD εισέρχεται απευθείας σε έναν εναλλάκτη θερμότητας τροφοδοσίας για να προθερμάνει τον αέρα. Ο προθερμασμένος συνδυασμένος κύκλος MHD-ατμού που προέρχονται από αέρα θεωρείται ότι παρέχει την καλύτερη απόδοση. Ωστόσο, ο αναγεννητικός θερμαντήρας αέρα θα πρέπει να λειτουργεί σε μια περιογή θερμοκρασιών από τη θερμοκρασία περιβάλλοντος στη θύρα εισόδου αέρα έως τη θερμοκρασία εξάτμισης που είναι περίπου 2000 °C. Συμπύκνωση και στερεοποίηση σκωρίας μπορεί να λάβει χώρα σε περιοχές όπου οι θερμοκρασίες είναι κάτω από τους 1300 °C. Η αλλαγή των θερμοχημικών ιδιοτήτων των πυρίμαχων υλικών που αλληλεπιδρούν με τη σκωρία που περιέχει σπόρους είναι επίσης ένα κρίσιμο πρόβλημα. Παρόλο που έχει γίνει εκτεταμένη ερευνητική εργασία και έχει σημειωθεί πρόοδος δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί ο κατάλληλος αναγεννητικός εναλλάκτης θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας.

2.8.2 Κορυφαίος συνδυασμένος κύκλος αεριοποίησης MHD-ατμού

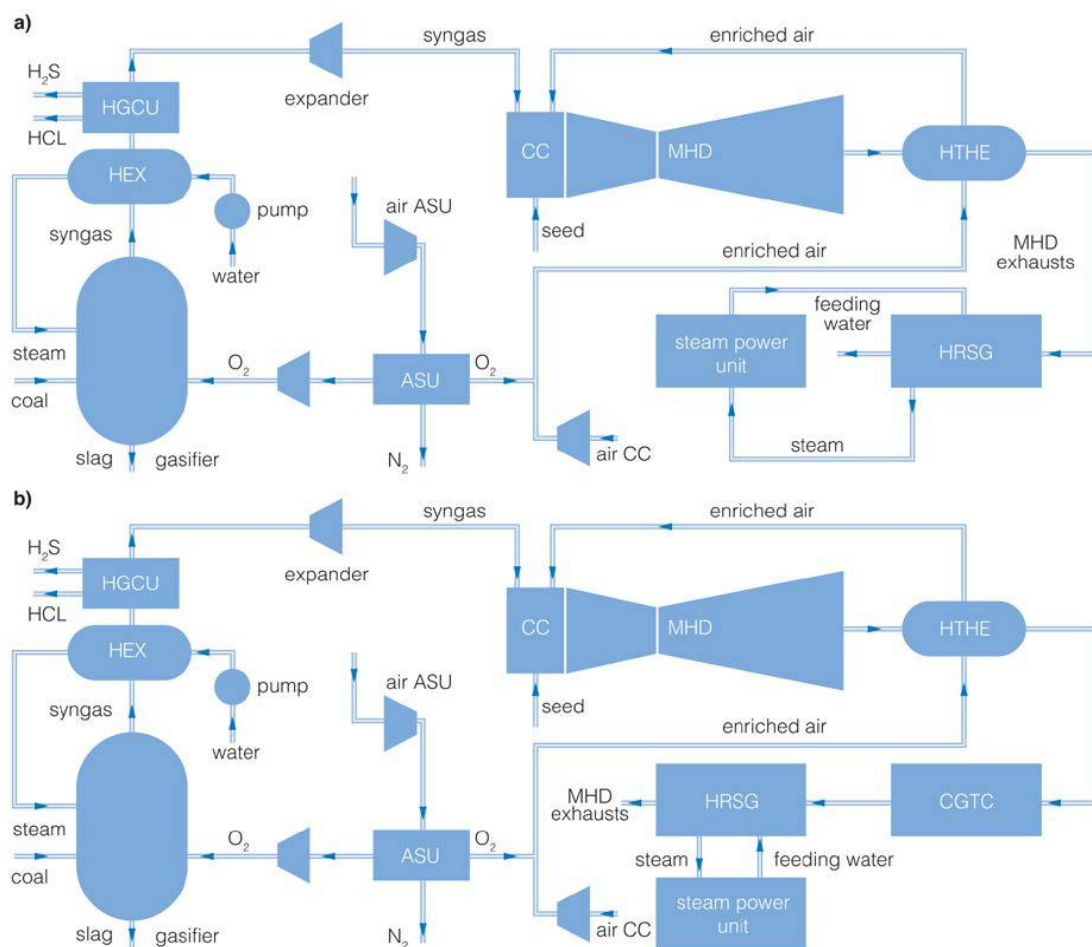
Στις εγκαταστάσεις αυτού του είδους, το συνθετικό αέριο (syngas) που προέρχεται από άνθρακα χρησιμοποιείται ως καύσιμο. Ο άνθρακας αεριοποιείται και αφαιρείται η σκωρία πριν από τη διαδικασία καύσης

και ως εκ τούτου χρησιμοποιείται καθαρό αέριο καύσης στη γεννήτρια MHD και στον κατάντη εξοπλισμό που επιτρέπει την υιοθέτηση μιας πιο αποτελεσματικής διαμόρφωσης κύκλου. Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8a, το σύστημα αποτελείται από μία νησίδα αεριοποίησης όπου ο άνθρακας μετατρέπεται σε σύνθετο αέριο χρησιμοποιώντας αέρα (ή οξυγόνο) και ατμό και μία μονάδα ισχύος που βασίζεται σε γεννήτρια MHD ανοικτού κύκλου σε συνδυασμό με μονάδα ισχύος ατμού. Τα κύρια συστατικά της νησίδας αεριοποίησης είναι μια μονάδα διαχωρισμού αέρα (ASU) όταν οξυγόνο αντί αέρα χρησιμοποιείται για αεριοποίηση και καύση του άνθρακα, αεριοποιητής και μονάδα καθαρισμού θερμού αερίου (HGCU) όπου αφαιρούνται τα όξινα αέρια όπως H_2S και HCl . Προκειμένου να ικανοποιηθεί η θερμοκρασία λειτουργίας της μονάδας HGCU, το σύνθετο αέριο που βγαίνει από τον αεριοποιητή ψύχεται σε έναν εναλλάκτη θερμότητας (HEX) δημιουργώντας τον υπερθερμασμένο ατμό για τις αντιδράσεις αεριοποίησης.

Ανάλογα με τον τύπο του αεριοποιητή (ατμοσφαιρικό ή υπό πίεση), το σύνθετο αέριο είτε συμπιέζεται είτε εκτονώνεται στην πίεση λειτουργίας του καυστήρα πριν εισέλθει και καεί σε αυτόν. Το αέριο καύσης σπέρνεται με άλας καλίου και στη συνέχεια ρέει μέσω της γεννήτριας MHD όπου παράγεται ηλεκτρική ενέργεια. Η περιεκτικότητα σε θερμική ενέργεια του αερίου καύσης που εξέρχεται από τον διαχύτη MHD ανακτάται πρώτα σε εναλλάκτη θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας (HTHE) για προθέρμανση του αέρα καύσης (ή οξυγόνου) και στη συνέχεια σε γεννήτρια ατμού ανάκτησης θερμότητας (HRSG) για παραγωγή ατμού για την παραγωγή επιπλέον ηλεκτρικής ενέργειας στη μονάδα ισχύος ατμού. Εδώ, το HTHE τοποθετείται ακριβώς κάτω από τον διαχύτη MHD, επειδή το αέριο καύσης δεν περιέχει σκωρία. Επομένως, ο αέρας καύσης μπορεί να προθερμανθεί έως τους $1800\text{ }^{\circ}C$ από έναν αναγεννητικό θερμαντήρα αέρα.

Προκειμένου να βελτιωθεί η ανάκτηση θερμότητας των καυσαερίων MHD, έχει προταθεί ένας προηγμένος ολοκληρωμένος συνδυασμένος κύκλος αεριοποίησης-MHD-ατμού/αεριοστροβίλου, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.8b. Σε αυτή τη διαμόρφωση, η γεννήτρια MHD είναι ενσωματωμένη με ατμοστρόβιλο και κλειστό κύκλο αεριοστροβίλου που τροφοδοτείται με άζωτο. Πραγματοποιήθηκαν αναλύσεις των επιδόσεων του κύκλου και τα αποτελέσματά έδειξαν ότι η ολοκληρωμένη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου

κύκλου MHD-ατμού με θερμοκρασία προθέρμανσης αέρα 1800 °C θα μπορούσε να επιτύχει απόδοση μονάδας 51% (HHV), σε σύγκριση με 52,8% (HHV) που λαμβάνεται από την άμεση μονάδα συνδυασμένου κύκλου MHD-ατμού με καύση άνθρακα με θερμοκρασία προθέρμανσης αέρα 800 °C. Η ενσωματωμένη μονάδα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας συνδυασμένου κύκλου MHD-ατμού/αεριοστροβίλου θα μπορούσε να επιτύχει απόδοση έως και 60% (HHV). Υψηλότερες αποδόσεις θα μπορούσαν να επιτευχθούν με τη βελτιστοποίηση των συνθηκών λειτουργίας του πρωτεύοντα (γεννήτρια MHD) και του δευτερεύοντα κύκλου (μονάδες ισχύος στροβίλων ατμού/αερίου).

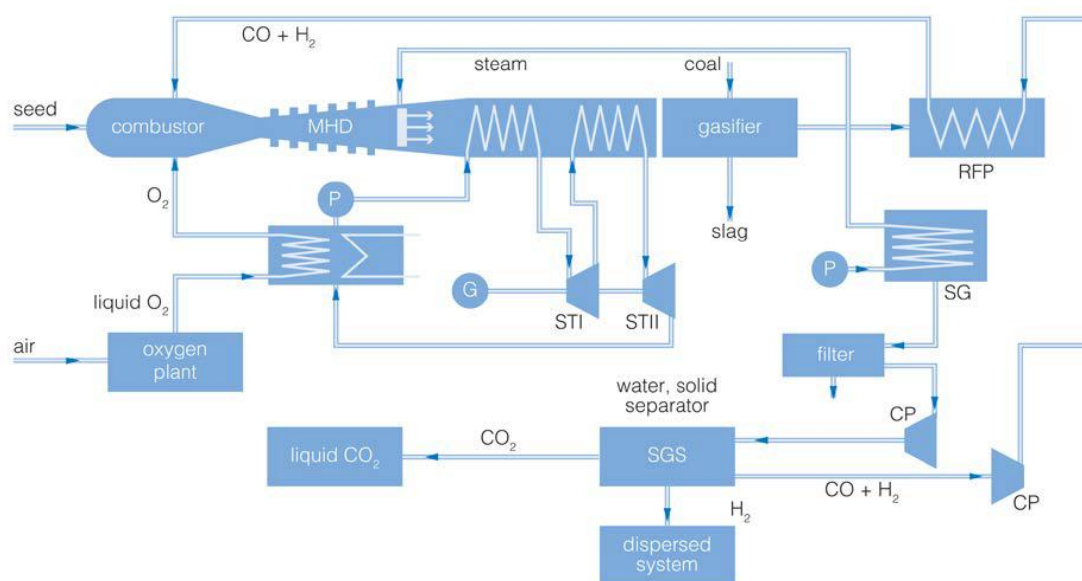


Σχήμα 2.8 Κορυφαίος συνδυασμένος κύκλος αεριοποίησης MHD-ατμού [6].

2.8.3 Συνδυασμένος κύκλος αεριοποίησης ουράς MHD-ατμού

Η ιδέα της χρήσης της θερμικής ενέργειας της εξάτμισης MHD για την εξαέρωση του άνθρακα για την παραγωγή συνθετικού αερίου που

καίγεται σε έναν καυστήρα MHD υπάρχει εδώ και αρκετές δεκαετίες. Το 1973, οι ερευνητές αξιολόγησαν τη θερμοχημική σύνθεση άνθρακα με εξατμίσεις MHD και ένα συνδυασμένο σύστημα MHD-ατμού όπου η γεννήτρια MHD λειτουργούσε υπό ανακυκλοφορία συνθετικού καυσίμου. Έκτοτε, συστήματα παραγωγής ενέργειας βασισμένα στον κύκλο MHD-ατμού με αεριοποίηση ουράς έχουν μελετηθεί από ερευνητές σε όλο τον κόσμο και έχουν προταθεί διάφορες διαμορφώσεις κύκλου.



Σχήμα 2.9 Ένας αναγεννητικός συνδυασμένος κύκλος αεριοποίησης ουράς MHD-ατμού με δέσμευση άνθρακα [6].

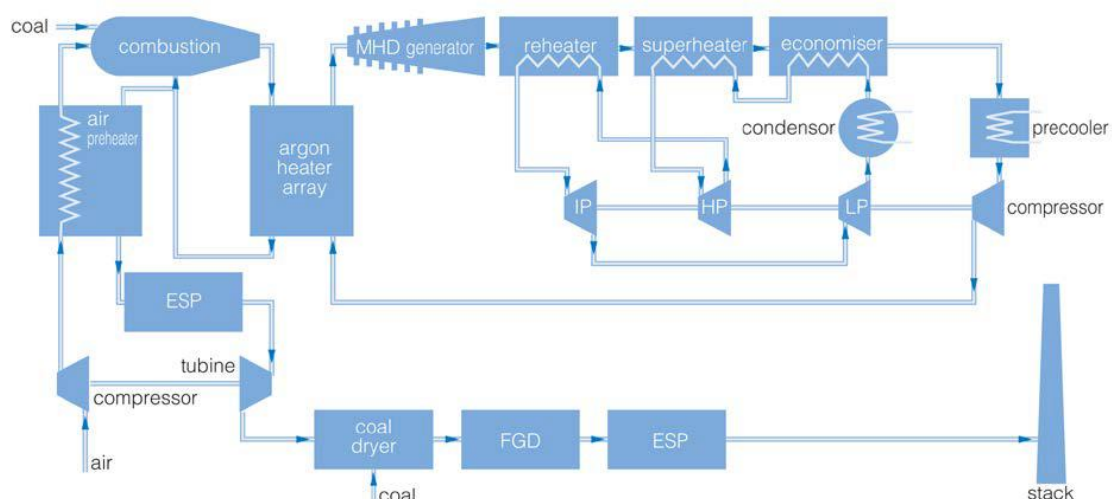
Πιο πρόσφατα, προτάθηκε ένα συνδυασμένο σύστημα MHD-ατμού με αεριοποίηση ουράς και καύση προθερμασμένου συνθετικού αερίου χρησιμοποιώντας καθαρό οξυγόνο στον καυστήρα MHD. Δείχτηκε ότι, ως σύστημα παραγωγής ενέργειας από άνθρακα, ο θερμοχημικός, αναγεννητικός κύκλος MHD είχε μοναδικά πλεονεκτήματα έναντι των συνδυασμένων κύκλων θερμοχημικών, αναγεννητικών αεριοστροβίλων, κυρίως τη δυνατότητα ενός κύκλου πλήρωσης με υψηλή απόδοση συστήματος και μηδενικές εκπομπές CO₂. Το σχήμα 2.9 δείχνει έναν συνδυασμένο κύκλο αεριοποίησης MHD-ατμού με έναν προθερμαντήρα καυσίμου που είναι εγκατεστημένος δίπλα στον θερμοχημικό αεριοποιητή και με δέσμευση άνθρακα. Σε αυτή τη διαμόρφωση, η παραγωγή ατμού πραγματοποιείται στον διαχύτη MHD

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.10, ο αεριοποιητής είναι διατεταγμένος δίπλα στον διαχύτη MHD, στον οποίο πραγματοποιείται αεριοποίηση άνθρακα όταν αναμιγνύεται άνθρακας και λίγος επιπλέον ατμός με τα καυσαέρια MHD. Η θερμότητα της εξάτμισης αναγεννάται κυρίως ως χημική ενέργεια του συνθετικού καυσίμου. Η θερμότητα του συνθετικού αερίου αναζωογονείται στον αναγεννητή I (RG I) με παραγωγή ατμού για τον αεριοποιητή και για τον ατμοστρόβιλο, και με προθέρμανση του συνθετικού αερίου καθώς και του οξειδωτικού (αέρας ή/και οξυγόνο). Το ψυχθέν αέριο που βγαίνει από τον RG I περνά μέσα από ένα φίλτρο όπου απομακρύνονται σωματίδια, K_2SO_4 και νερό από το αέριο. Το συνθετικό αέριο στη συνέχεια χωρίζεται στα δύο. Το ένα μέρος αποστέλλεται σε βρόχο αεριοστροβίλου και το άλλο, αφού αφαιρεθεί το CO_2 από το αέριο στον διαχωριστή CO_2 , συμπιέζεται, προθερμαίνεται και στη συνέχεια αποστέλλεται στον καυστήρα MHD. Το συνθετικό αέριο που περιέχει CO_2 που παρέχεται στον βρόχο του αεριοστροβίλου καίγεται με αέρα σε έναν καυστήρα αεριοστροβίλου. Το αέριο καύσης πηγαίνει στη γεννήτρια ατμού (RG II) πριν τελικά αποφορτιστεί μέσω μιας καμινάδας.

2.8.5 Μονάδα MHD κλειστού κύκλου άνθρακα με δύο βρόχους

Η Ολλανδική Ένωση Μαγνητουδρودυναμικής διεξήγαγε μελέτες σχεδιασμού ανοικτού και κλειστού συνδυασμένου κύκλου MHD-ατμού για σταθμούς ισχύος με χρήση άνθρακα. Η σχεδιαστική ιδέα που χρησιμοποιείται για το σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κλειστού κύκλου MHD-ατμού φαίνεται στο σχήμα 2.11. Αποτελείται από δύο βρόχους. Ο πρώτος βρόχος έχει καυστήρα άνθρακα. Τα θερμά αέρια που φεύγουν από τον καυστήρα χωρίζονται σε δύο ροές. Η πρώτη κύρια ροή τροφοδοτείται σε θερμαντήρες υψηλής θερμοκρασίας όπου το υγρό εργασίας (αργό με σπόρους καισίου) θερμαίνεται σε θερμοκρασία περίπου 1700 °C. Η δεύτερη ροή κατευθύνεται σε προθερμαντήρα οξειδωτή για τον καυστήρα. Χρησιμοποιείται μονάδα συμπιεστή αεριοστροβίλου-αέρα για τη συμπίεση και την παροχή του οξειδωτή. Ο αεριοστρόβιλος χρησιμοποιεί προϊόντα καύσης προ-καθαρισμένα από σωματίδια σε ηλεκτροστατικούς ιζηματοποιητές (ESP). Η περιεκτικότητα σε θερμότητα των αερίων που εξέρχονται από τον αεριοστροβίλο χρησιμοποιείται για την ξήρανση άνθρακα σε στεγνωτήρα άνθρακα και το καυσαέριο περνά στη συνέχεια τις συσκευές καθαρισμού

καυσαερίων πριν εκφορτιστεί μέσω μιας καμινάδας. Ο δεύτερος βρόχος περιέχει έναν πρωτεύοντα κύκλο γεννήτριας MHD και έναν δευτερεύοντα κύκλο γεννήτριας ατμού-στροβίλου SC (steam cleaner). Υπάρχουν ακόμη συστήματα για έγχυση, ανάκτηση και αναγέννηση καισίου, καθώς και σύστημα καθαρισμού αργού τα οποία δεν φαίνονται στο Σχήμα 2.11.

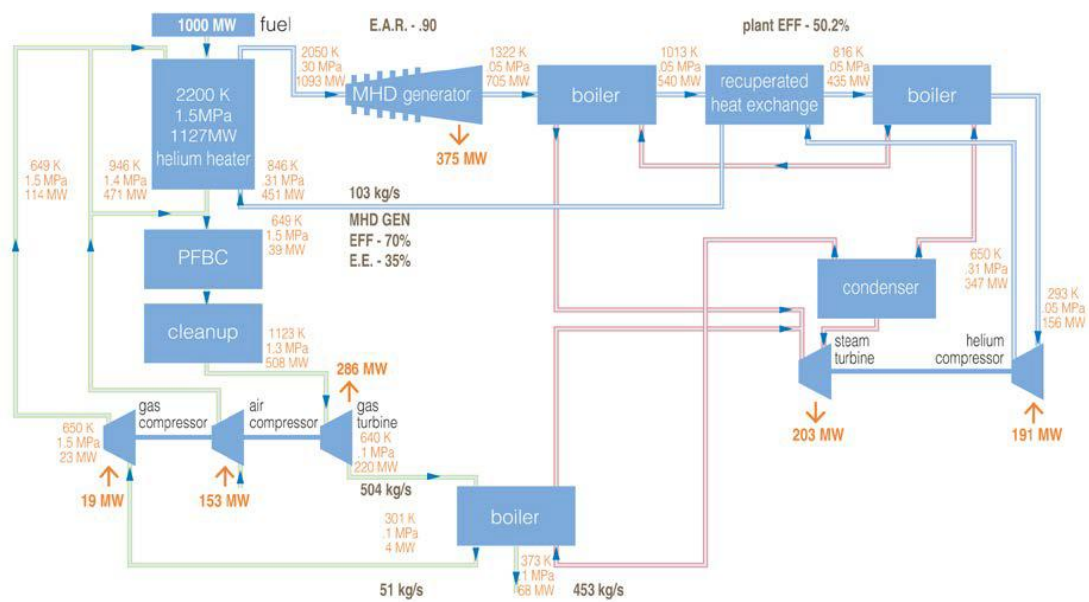


Σχήμα 2.11 Σύστημα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας κλειστού κύκλου MHD με διπλό βρόχο με άνθρακα [6].

Έχει δείξει ότι ο σταθμός ηλεκτροπαραγωγής MHD κλειστού κύκλου παρουσιάζει ορισμένα πλεονεκτήματα έναντι των μονάδων MHD ανοικτού κύκλου, συμπεριλαμβανομένων, ειδικότερα, της μείωσης της μέγιστης θερμοκρασίας στο κανάλι MHD και της χρήσης μη ισορροπημένου ιοντισμού πλάσματος αργού-καισίου. Τα αποτελέσματά των σχετικών μελετών έδειξαν ότι, υποθέτοντας ότι ο λόγος εξαγωγής ενθαλπίας καναλιού ήταν 34,3%, θα μπορούσε να αναμένεται καθαρή απόδοση μονάδας 41,8%. Ωστόσο, η μονάδα θα απαιτούσε τη χρήση ενός δαπανηρού εναλλάκτη θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας που θα αντιστοιχούσε στο 35% του κόστους αρχικής επένδυσης που θα αυξήσει φυσικά το κόστος της ηλεκτρικής ενέργειας (COE).

2.8.6 Τριπλός συνδυασμένος κύκλος αδρανούς αερίου MHD

Ερευνητές στην Ιαπωνία πρότειναν έναν τριπλό συνδυασμένο κύκλο αδρανούς αερίου MHD που συνδυάζει μια γεννήτρια MHD κλειστού κύκλου με αεριοστροβίλους και γεννήτριες ατμού-τούρμπο, κάτι που είναι παρόμοιο με το σύστημα παραγωγής ισχύος δύο βρόχων MHD-ατμού. Το κύριο χαρακτηριστικό της διαμόρφωσης της εγκατάστασης είναι ότι ένας καυστήρας υπό πίεση ρευστοποιημένης κλίνης (PFBC) χρησιμοποιείται ως δευτερεύων καυστήρας.

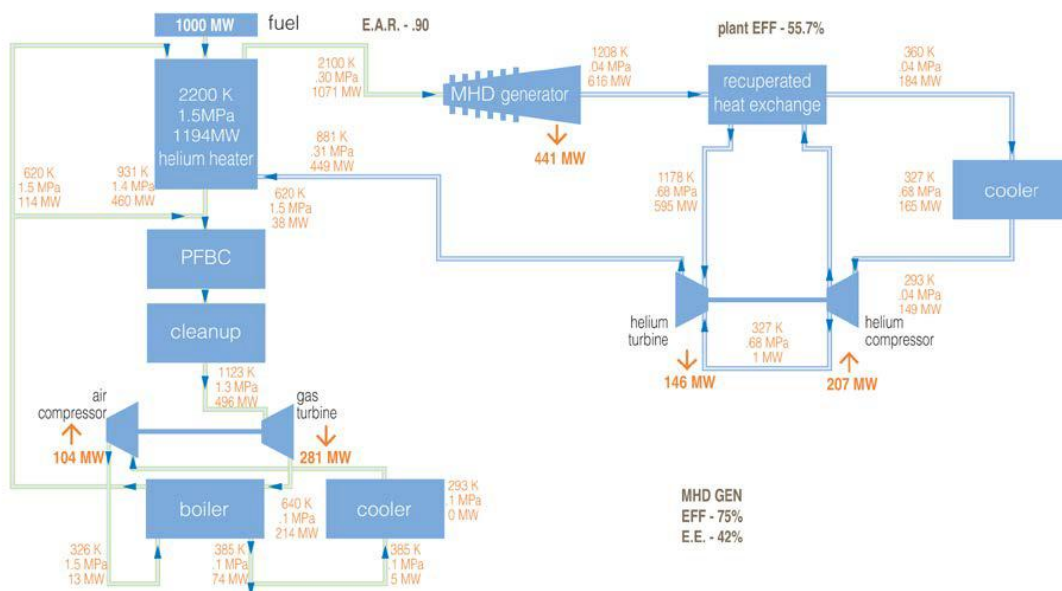


Σχήμα 2.12 Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος παραγωγής ισχύος με τριπλό συνδυασμένο κύκλο MHD άνθρακα-αδρανών αερίων [6].

Όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12, ο άνθρακας αναμιγνύεται με πεπιεσμένο αέρα και ένα μέρος των ανακυκλωμένων καυσαερίων (τα καυσαέρια προστίθενται για έλεγχο θερμοκρασίας) και στη συνέχεια καίγεται στον κύριο καυστήρα. Ο κύριος καυστήρας ενσωματώνεται σε θερμαντήρα ηλίου (υγρό εργασίας). Τα προϊόντα καύσης που φεύγουν από τον κύριο καυστήρα (θερμαντής ηλίου) εισέρχονται στο PFBC, όπου παρέχεται επιπλέον αέρας για την ολοκλήρωση της καύσης σε θερμοκρασίες 850-950 °C. Ο ασβεστόλιθος εγχέεται στο PFBC για αποθείωση στον κλίβανο. Στο PFBC, η θερμότητα που απελευθερώνεται από την καύση άκαυστου άνθρακα χρησιμοποιείται για να αυξήσει τη θερμοκρασία του αερίου καύσης και δεν παράγεται ατμός. Επομένως, η

κύρια λειτουργία του PFBC είναι ένας εξοπλισμός καύσης και αφαίρεσης θείου και όχι λέβητας. Το αέριο καύσης που εξέρχεται από το PFBC, μετά την απομάκρυνση σωματιδίων με τη χρήση μιας συσκευής καθαρισμού καυσαερίων, κατευθύνεται για να οδηγήσει έναν αεριοστρόβιλο. Οι ρυθμίσεις για τον κύκλο πλήρωσης και εξάτμισης του MHD είναι ουσιαστικά οι ίδιες με αυτές στη διαμόρφωση του σταθμού ηλεκτροπαραγωγής MHD δύο βρόχων, εκτός από το ότι εγκαθίσταται λέβητας δίπλα στον διαχύτη MHD, ανάντη του εναλλάκτη θερμότητας.

Έχει προταθεί επίσης ένας βελτιωμένος κύκλος παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας αδρανούς αερίου MHD, ο λεγόμενος συνδυασμένος κύκλος MHD/Brayton με καύση άνθρακα. Σε αυτήν τη βελτιωμένη διαμόρφωση του κύκλου ισχύος, το θερμό αέριο ήλιο που εξέρχεται από τη γεννήτρια MHD εισέρχεται πρώτα σε έναν ανακτητικό εναλλάκτη θερμότητας και στη συνέχεια σε μια γεννήτρια ατμού (λέβητας). Φεύγοντας από το λέβητα, το αέριο ήλιο συμπιέζεται και θερμαίνεται ξανά στον ανακτήσιμο εναλλάκτη θερμότητας πριν κατευθυνθεί για να οδηγήσει έναν στρόβιλο αερίου ηλίου για να παράγει επιπλέον ισχύ. Το αέριο ήλιο αποστέλλεται στη συνέχεια στον θερμαντήρα ηλίου στον κύκλο πλήρωσης (σχήμα 2.13). Οι ερευνητές ισχυρίστηκαν ότι με αυτήν τη βελτιωμένη διαμόρφωση του κύκλου ισχύος, θα μπορούσε να επιτευχθεί υψηλή απόδοση των εγκαταστάσεων.

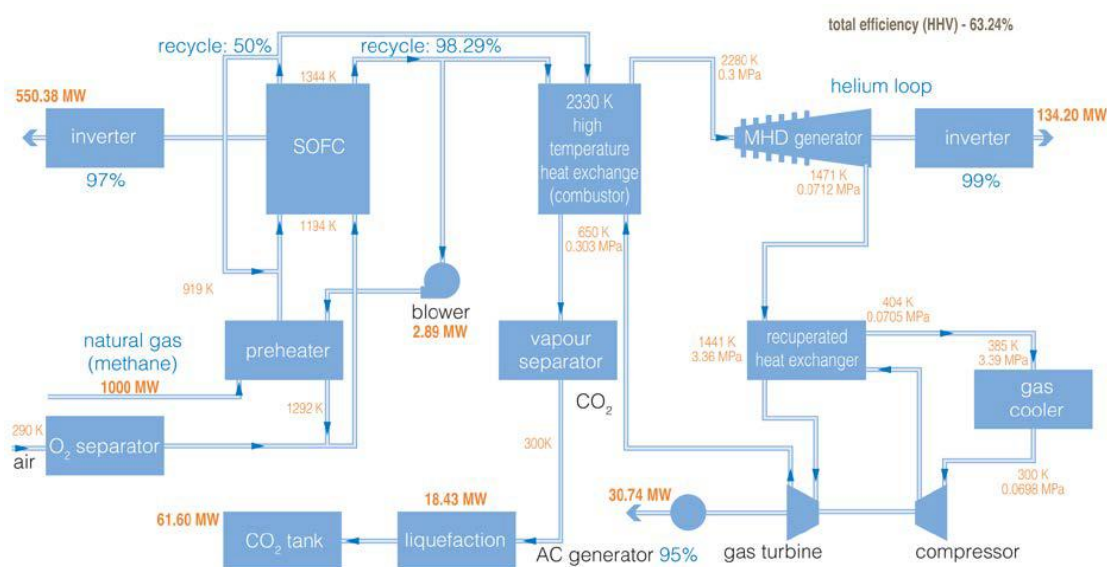


Σχήμα 2.13 Συνδυασμένος κύκλος MHD/Brayton με καύση άνθρακα [6].

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης του PFBC ως καυστήρα είναι οι χαμηλές εκπομπές NO_x και SO_2 λόγω της χαμηλής θερμοκρασίας καύσης και της αποθείωσης του κλιβάνου και επομένως, εξαλείφεται η ανάγκη για συσκευές καθαρισμού καυσαερίων.

2.8.7 Συνδυασμένος κύκλος SOFC και MHD

Στο προτεινόμενο σύστημα συνδυασμένης παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας SOFC/MHD, ένα SOFC χρησιμοποιείται ως πρωτεύων και μια γεννήτρια MHD κλειστού κύκλου χρησιμοποιείται ως δευτερεύων κύκλος. Η διαμόρφωση του συνδυασμένου συστήματος παραγωγής ενέργειας SOFC/MHD φαίνεται στο σχήμα 2.14.



Σχήμα 2.14 Το προτεινόμενο σύστημα συνδυασμένης παραγωγής ενέργειας SOFC/MHD με CCS [6].

Στον κύκλο πλήρωσης, καύσιμο και οξυγόνο τροφοδοτούν το SOFC όπου η ηλεκτρική ενέργεια παράγεται σε θερμοκρασία περίπου $1000\text{ }^\circ\text{C}$. Το SOFC λειτουργεί σε ατμοσφαιρική πίεση και αποτελείται από έναν βρόχο ανακυκλοφορίας καυσαερίων. Τα αέρια που εξέρχονται από το SOFC χωρίζονται σε δύο ροές, το ένα ανακυκλώνεται πίσω στο SOFC μέσω ενός βρόχου ανακυκλοφορίας και η δεύτερη ροή τροφοδοτείται σε έναν καυστήρα (ενσωματωμένο σε θερμαντήρα ηλίου) όπου η μετατροπή των καυσίμων ολοκληρώνεται σε θερμοκρασίες έως $2100\text{ }^\circ\text{C}$. Στον δευτερεύοντα κύκλο, το ρευστό που λειτουργεί με

σπαρμένο αέριο (ήλιο) με πίεση περίπου 0,3 MPa θερμαίνεται στον θερμαντήρα ηλίου σε θερμοκρασία περίπου 2000 °C και στη συνέχεια ρέει μέσω του καναλιού MHD για παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Το θερμό αέριο που φεύγει από το MHD ρέει μέσω ενός εναλλάκτη θερμότητας ανάκτησης, όπου μέρος της θερμικής του ενέργειας ανακτάται πριν ψυχθεί σε ψυγείο αερίου. Το ψυχθέν αέριο συμπιέζεται, επαναθερμαίνεται στον ανακτητικό εναλλάκτη θερμότητας και κατόπιν κατευθύνεται για να οδηγήσει έναν στρόβιλο αερίου ηλίου για να παράγει επιπλέον ηλεκτρική ενέργεια. Το αέριο ήλιο που εξέρχεται από τον αεριοστρόβιλο αποστέλλεται στη συνέχεια πίσω στον θερμαντήρα ηλίου για να επαναλάβει τον κύκλο.

Επειδή το καθαρό οξυγόνο χρησιμοποιείται ως οξειδωτικό, τα προϊόντα καύσης περιέχουν κυρίως υδρατμούς και διοξείδιο του άνθρακα. Οι υδρατμοί μπορούν εύκολα να διαχωριστούν από το CO₂ με συμπύκνωση αφήνοντας ένα καυσαέριο κυρίως CO₂ έτοιμο για δέσμευση και αποθήκευση άνθρακα. Πολλοί ερευνητές θεωρούν ότι αυτός είναι ένας ιδανικός συνδυασμός κύκλου ισχύος επειδή τόσο το σύστημα SOFC όσο και το σύστημα κλειστού κύκλου MHD λειτουργούν στο βέλτιστο εύρος θερμοκρασίας τους και μπορεί να αναμένεται υψηλή απόδοση της εγκατάστασης.

2.9 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΠΡΟΚΛΗΣΕΙΣ

2.9.1 Πλεονεκτήματα

Η γεννήτρια MHD λειτουργεί σε υψηλές θερμοκρασίες και ως εκ τούτου, μπορεί δυνητικά να επιτύχει υψηλότερες αποδόσεις από αυτές που λαμβάνονται από τις συμβατικές μονάδες παραγωγής ατμού. Προηγούμενες εργασίες για αναλύσεις κύκλων MHD δείχνουν ότι τα συστήματα MHD μπορούν να επιτύχουν απόδοση μονάδας 45-55%, με δυνατότητα αύξησης αυτής στο 60%. Μια γεννήτρια MHD δεν έχει κινούμενα μέρη, επομένως μπορεί να είναι πιο αξιόπιστη. Επίσης, έχει τη δυνατότητα να κάνει γρήγορες εκκινήσεις σε πλήρη φόρτωση και ως εκ τούτου, είναι δυνατή η χρήση MHD για παραγωγής ισχύος αιχμής και υπηρεσία έκτακτης ανάγκης. Το MHD μπορεί να επεκταθεί σε μεγάλες μονάδες. Παρόλο που είναι δύσκολο να προβλεφθεί το κόστος με

ακρίβεια, τα ευρήματα από τεχνικές και οικονομικές αναλύσεις των συστημάτων ισχύος MHD υποδηλώνουν ότι το κόστος επένδυσης των σταθμών ηλεκτροπαραγωγής MHD θα μπορούσε να είναι ανταγωνιστικό και το κόστος λειτουργίας είναι χαμηλότερο από αυτό των συμβατικών σταθμών ατμού. Επιπλέον, τα συστήματα παραγωγής ενέργειας MHD έχουν καλές περιβαλλοντικές επιδόσεις και είναι συμβατά με συστήματα CCS για τη δέσμευση του CO₂.

2.9.2 Προκλήσεις

Παρά τη σημαντική πρόοδο που σημειώθηκε κατά τη δεκαετία του 1980 και στις αρχές της δεκαετίας του 1990 για την ανάπτυξη σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας MHD που λειτουργούν με άνθρακα σε εμπορική κλίμακα, απαιτούνται πολλές τεχνολογικές εξελίξεις πριν από την γενική εμπορική χρήση των συστημάτων παραγωγής ενέργειας MHD. Διάφορες τεχνικές προκλήσεις παραμένουν στην τεχνολογία MHD με άνθρακα, ανάλογα με τη διαμόρφωση του κύκλου παραγωγής ενέργειας. Τα τεχνικά ζητήματα που πρέπει να επιλυθούν περιλαμβάνουν:

- ✓ εναλλάκτη θερμότητας υψηλής θερμοκρασίας/προθερμαντήρα αέρα.
- ✓ οικονομικά αποδοτικό σύστημα ανάκτησης και αναγέννησης σπόρων.
- ✓ έλεγχος αφαίρεσης σκωρίας στον καυστήρα MHD.
- ✓ ηλεκτρόδια ανθεκτικά σε υψηλές θερμοκρασίες.
- ✓ βέλτιστος σχεδιασμός της γεννήτριας MHD και των εξαρτημάτων της και ανθεκτική λειτουργία του καναλιού MHD υψηλής θερμοκρασίας.
- ✓ διαδικασία αεριοποίησης ουράς.

Επίσης, παρά το γεγονός ότι έχουν τεθεί σε λειτουργία και έχουν δοκιμαστεί πρωτεύοντες και δευτερεύοντες κύκλοι, και η αεριοποίηση του άνθρακα είναι μια ώριμη τεχνολογία, μια μονάδα που ενσωματώνει δύο ή όλα αυτά τα συστήματα δεν έχει λειτουργήσει ποτέ. Προβλήματα μπορεί να προκύψουν όταν διαφορετικές διαδικασίες ενσωματωθούν μαζί. Επιπλέον, είναι πιθανό να προκύψουν προβλήματα όταν το ενσωματωμένο σύστημα επεκταθεί σε μεγάλης κλίμακας παραγωγή.

Συνοψίζοντας, η τεχνολογία MHD παρέχει μια πιθανή εναλλακτική προσέγγιση στην παραγωγή ενέργειας από άνθρακα. Έχουν προταθεί διάφορα προγράμματα παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας MHD με άνθρακα. Μεταξύ των προτεινόμενων σχεδίων, ο άμεσος συνδυασμένος κύκλος MHD-ατμού με άνθρακα που περιγράφεται στην Ενότητα 4.4.1 είναι ο πιο ανεπτυγμένος και δοκιμασμένος. Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα της τεχνολογίας παραγωγής ενέργειας MHD είναι η δυνατότητά της να επιτύχει υψηλή ενεργειακή απόδοση. Ωστόσο, υπάρχουν πολλά τεχνικά εμπόδια και απαιτείται εκτεταμένη έρευνα και ανάπτυξη για την κατασκευή μιας μονάδας παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας MHD μεγάλης κλίμακας που να χρησιμοποιεί άνθρακα.

2.10 ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ

Μία μαγνητοϋδροδυναμική γεννήτρια με όγκο $V=10 \text{ m}^3$ έχει ρεύμα βραχυκύκλωσης 12000 A/m^2 . Η αγωγιμότητα του ρευστού λειτουργίας είναι $\sigma=20 (\Omega \cdot \text{m})^{-1}$. Αν η ροή παραμένει ανεπηρέαστη όταν ο συντελεστής φορτίου είναι $K=0,6$, θα υπολογίσουμε την ισχύ εξόδου και την πυκνότητα ρεύματος.

Η πυκνότητα ρεύματος, από τον νόμο του Ohm είναι ανάλογη του συνολικού ηλεκτρικού πεδίου, δηλαδή:

$$J=\sigma (uB-E_L) \text{ (A/m}^2\text{)}$$

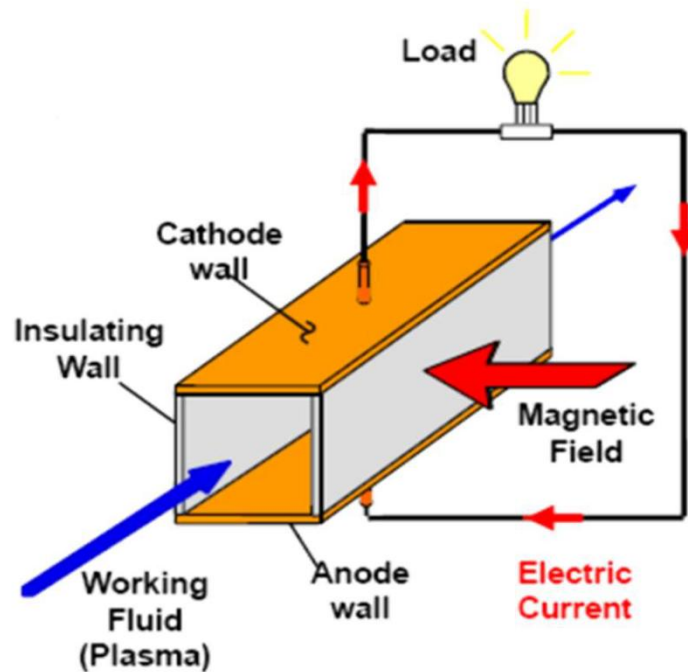
όπου uB είναι το μέτρο του επαγόμενου ηλεκτρικού πεδίου και E_L είναι το ηλεκτρικό πεδίο στο φορτίο. Αν το εξωτερικό κύκλωμα είναι ανοικτό, τότε $J=0$ και συνεπώς:

$$E_{L, \text{ open}}= uB \text{ (V/m)}$$

Με μία πεπερασμένη ηλεκτρική αντίσταση, έχουμε ροή ηλεκτρικού ρεύματος, το ηλεκτρικό πεδίο μειώνεται σε ένα κλάσμα της τιμής ανοικτού κυκλώματος. Έτσι, μπορούμε να γράψουμε:

$$E_L = KuB$$

όπου ο συντελεστής K ονομάζεται συντελεστής φορτίου (load factor) και παίρνει τις τιμές: $0 \leq K \leq 1$.



Σχήμα 2.15 Το βασικό κύκλωμα μιας MHD γεννήτριας [17].

Χρησιμοποιώντας τον συντελεστή φορτίου, η πυκνότητα ρεύματος γράφεται:

$$J = \sigma u B (1 - K)$$

Η ισχύς που προσφέρεται στο φορτίο ανά μονάδα όγκου της γεννήτριας είναι:

$$P_{out} = J E = \sigma u^2 B^2 K (1 - K) \quad (\text{W/m}^3)$$

Στη συνέχεια γράφουμε τον 1^ο Θερμοδυναμικό Νόμο για σταθεροποιημένη ροή για έναν όγκο ελέγχου:

$$m(h_1 + u_1^2/2) = m(h_2 + u_2^2/2) + mw \quad (\text{J/s})$$

όπου m είναι ο ρυθμός ροής μάζας του ρευστού στη γεννήτρια. Το έργο είναι θετικό γιατί ένα μέρος της ενέργειας του ρευστού μετατρέπεται σε ηλεκτρική ενέργεια με αποτέλεσμα τη ροή ρεύματος στο φορτίο. Αν θεωρήσουμε σταθερή την ταχύτητα, παίρνουμε:

$$h_2 = h_1 - w = h_1 - P_{out} \cdot V/m = h_1 - \sigma u^2 B^2 K(1-K)/\rho \quad (\text{kJ/kg})$$

όπου ρ είναι η πυκνότητα του ρευστού.

Συνεπώς, το παραγόμενο έργο μειώνει τη θερμική ενέργεια του ρευστού. Είναι απαραίτητη η χρήση ενός συμπιεστή, ώστε το ρευστό να έχει μεγάλη ενθαλπία εισόδου και συνεπώς να παράγει περισσότερο έργο. Στην περίπτωση βραχυκυκλώματος, η αντίσταση φορτίου είναι μηδέν, συνεπώς $K=0$ και άρα:

$$J_{sc} = \sigma u B = 12000 \text{ A/m}^2$$

Άρα το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο είναι:

$$uB = J_{sc}/\sigma = 12000/20 = 600 \text{ V/m}$$

Η ισχύς εξόδου θα είναι:

$$P_{out} = J E = \sigma u^2 B^2 K(1-K) V = 17,28 \text{ MW}$$

Η πυκνότητα ηλεκτρικού ρεύματος θα είναι:

$$J = \sigma u B(1-K) = 4800 \text{ A/m}^2$$

Παρατηρούμε ότι η ισχύς εξόδου είναι ανάλογη του τετραγώνου του μαγνητικού πεδίου και επίσης είναι ανάλογη του τετραγώνου της ταχύτητας του ρευστού.

3. ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΕΣ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα μαγνητικά πεδία παρέχουν ένα ευέλικτο, μη παρεμβατικό μέσο ελέγχου της κίνησης των υγρών μετάλλων. Μπορούν να απωθήσουν υγρές-μεταλλικές επιφάνειες, να σταματήσουν μία ανεπιθύμητη κίνηση ή να προκαλέσουν την κίνηση υγρών. Στη δεκαετία του 1970, οι μεταλλουργοί άρχισαν να αναγνωρίζουν την ευελιξία της δύναμης του Lorentz, και έτσι τα μαγνητικά πεδία χρησιμοποιούνται πλέον συνήθως για τη θέρμανση, την άντληση, την ανάδευση, τη σταθεροποίηση, την απόθεση και τον μετεωρισμό των υγρών μετάλλων.

Οι μεταλλουργικές εφαρμογές της MHD αντιπροσωπεύουν μια συνένωση δύο πολύ διαφορετικών τεχνολογιών, της βιομηχανικής μεταλλουργίας και της ηλεκτρολογίας.

3.2 ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΚΑΙ ΤΟ ΕΠΙΔΕΡΜΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

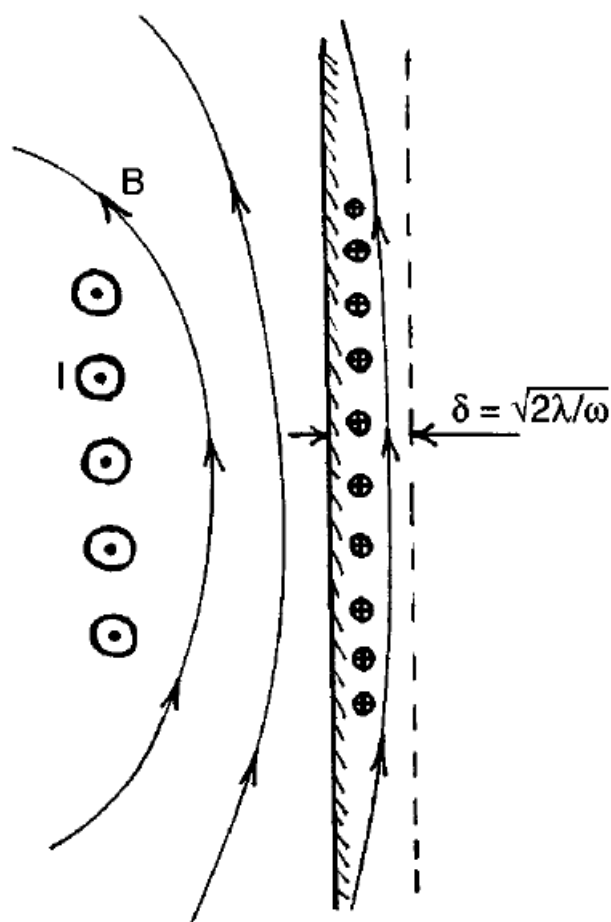
Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι εφαρμογές των εναλλασσόμενων μαγνητικών πεδίων υψηλής συχνότητας. Εδώ μας απασχολεί ιδιαίτερα η ικανότητα των μαγνητικών πεδίων υψηλής συχνότητας να θερμάνουν, να προκαλέσουν αιώρηση και να αναδεύσουν τα υγρά. Όλες αυτές οι διαδικασίες ελέγχονται από το λεγόμενο επιδερμικό φαινόμενο (skin effect), που είναι η ικανότητα ενός αγωγίου μέσου, στερεού ή υγρού, να μην επιτρέψει την εισχώρηση των πεδίων υψηλής συχνότητας.

Γενικά, λοιπόν, ένα μαγνητικό πεδίο υψηλής συχνότητας προκαλεί ηλεκτρικά ρεύματα στην επιφάνεια ενός αγωγού των οποίων η κατανομή είναι τέτοια ώστε να θωρακίζουν το εσωτερικό του αγωγού από το

επιβαλλόμενο πεδίο. Αυτά τα ρεύματα περιορίζονται σε ένα λεπτό επιφανειακό στρώμα πάχους:

$$\delta \sim (2\lambda/\omega)^{1/2} \quad (3.1)$$

που ονομάζεται επιδερμικό βάθος. Με το ω συμβολίζεται η κυκλική συχνότητα του εναλλασσόμενου μαγνητικού πεδίου και λ είναι ο συντελεστής μαγνητικής διάχυσης του υλικού.



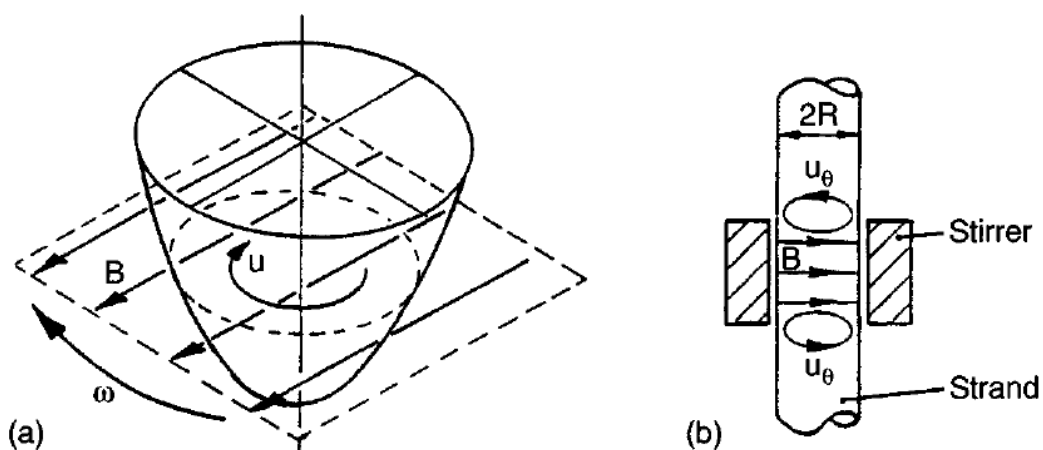
Σχήμα 3.1 Ένα υψίσυχο μαγνητικό πεδίο θωρακίζεται από το εσωτερικό ενός αγωγού λόγω του σχηματισμού επιφανειακών ρευμάτων τα οποία περιορίζονται σε ένα λεπτό στρώμα πάχους δ [1].

Στην πραγματικότητα, λαμβάνουμε ως λειτουργικό ορισμό του όρου «υψηλής συχνότητας» ότι το δ πρέπει να είναι πολύ μικρότερο από οποιαδήποτε σχετική γεωμετρική κλίμακα μήκους, όπως για παράδειγμα το χαρακτηριστικό μέγεθος του σώματος. Το γεγονός ότι ένα μαγνητικό

πεδίο είναι θωρακισμένο και δεν μπορεί να εισχωρήσει στο εσωτερικό ενός αγωγού δεν είναι, από μόνο του, ιδιαίτερα σημαντικό για την μεταλλουργική MHD. Ωστόσο, η ύπαρξη ενός λεπτού επιφανειακού στρώματος επαγόμενου ηλεκτρικού ρεύματος είναι χρήσιμο. Τα αντίθετα ρεύματα απωθούν το ένα το άλλο, και έτσι ο αγωγός που φαίνεται στο σχήμα 3.1 θα αντιμετωπίσει μια πλάγια απωστική δύναμη. Επιπλέον, τα επαγόμενα ρεύματα θα θερμάνουν τον αγωγό. Η ικανότητα των μαγνητικών πεδίων υψηλής συχνότητας να απωθούν και να θερμαίνουν αγωγίμα υλικά, υγρά ή στερεά, είναι το κλειδί για πολλές βιομηχανικές διεργασίες.

3.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΑΝΑΔΕΥΣΗ ΜΕ ΕΝΑΛΛΑΣΣΟΜΕΝΑ ΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΠΕΔΙΑ ΥΨΗΛΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ

Τα πλινθώματα που παράγονται με τις παραδοσιακές μεθόδους χύτευσης δεν είναι καθόλου ομοιογενή. Όλες αυτές οι ανομοιογένειες που εμφανίζονται στην τελική δομή, έχει αποδειχθεί ότι μπορούν να αποφευχθούν σε κάποιο βαθμό, με την ανάδευση του υγρού μετάλλου. Αυτό επιτυγχάνεται εύκολα με τη χρήση περιστρεφόμενου μαγνητικού πεδίου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.2.



Σχήμα 3.2 Μαγνητική ανάδευση (a) του αλουμινίου, (b) του χάλυβα [1].

Η ανάδευση έχει το πρόσθετο όφελος της προώθησης της πυρήνωσης και της ανάπτυξης κρυστάλλων που έχουν άξονες του ίδιου περίπου μεγέθους (equi-axed crystals) , δηλαδή κρύσταλλοι σαν νιφάδες χιονιού σε βάρος των δενδριτικών κρυστάλλων (αυτοί όπως τα έλατα) που είναι μεγάλοι, ανισότροποι και γενικά ανεπιθύμητοι. Εκτός από αυτά τα μεταλλουργικά οφέλη, έχει διαπιστωθεί ότι η ανάδευση έχει συμπτωματικά και μια σειρά από λειτουργικά πλεονεκτήματα, όπως το ότι επιτρέπει υψηλότερες θερμοκρασίες χύτευσης και ταχύτερους ρυθμούς χύτευσης.

Τα ξεκάθαρα πλεονεκτήματα της μαγνητικής ανάδευσης οδήγησαν σε μια ευρεία διάδοση της εφαρμογής αυτής της τεχνολογίας στη δεκαετία του 1980, ιδιαίτερα στην βιομηχανία του χάλυβα. Στην πραγματικότητα, έως το 1985, περίπου το 20% των slab casters (χυτευτές που παράγουν μεγάλα χαλύβδινα πλινθώματα) και το 50% των bloom casters (χυτευτές που παράγουν μεσαίου μεγέθους χαλύβδινα πλινθώματα) είχαν ενσωματώσει μαγνητική ανάδευση.

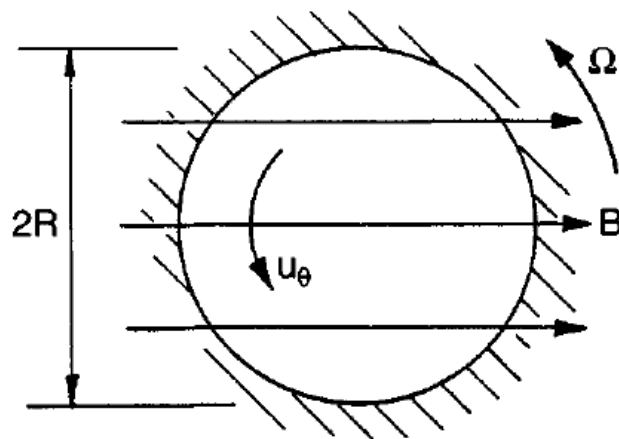
Ωστόσο, το θέμα της μαγνητικής ανάδευσης απασχόλησε περισσότερο την επιστημονική κοινότητα. Ενώ ορισμένοι κατασκευαστές ανέφεραν σημαντικά οφέλη, άλλοι αντιμετώπισαν προβλήματα. Για παράδειγμα, η υπερβολική ανάδευση στην παραγωγή χάλυβα μπορεί να οδηγήσει στην παράσυρση αποβλήτων από την ελεύθερη επιφάνεια και στη μείωση του πάχους του στερεού χαλύβδινου κελύφους στη βάση του καλουπιού. Αυτό το τελευταίο φαινόμενο είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο γιατί μπορεί να οδηγήσει σε ρήξη της στερεάς επιδερμίδας.

Στη βιομηχανία του αλουμινίου αντιμετωπίστηκαν διαφορετικά προβλήματα. Εδώ διαπιστώθηκε ότι, σε ορισμένα κράματα, η μακροσυσσωμάτωση αυξήθηκε αντί να μειωθεί με ανάδευση, ενδεχομένως επειδή οι φυγόκεντρες δυνάμεις τείνουν να διαχωρίζουν κρυστάλλινα θραύσματα που έχουν διαφορετική σύνθεση.

Στα μέσα της δεκαετίας του 1980 ήταν σαφές ότι υπήρχε ανάγκη πιο συστηματικής μελέτης των επιδράσεων της μαγνητικής ανάδευσης και αυτό, με τη σειρά του, απαιτούσε από τους μεταλλουργούς και τους κατασκευαστές του σχετικού εξοπλισμού να αναπτύξουν μια ποσοτική εικόνα του πεδίο ταχύτητας που προκαλείται. Τα πρώτα, απλά μοντέλα που άρχισαν να εμφανίζονται στις αρχές της δεκαετίας του 1980, συνήθως βασίζονταν σε προσομοιώσεις υπολογιστών. Ωστόσο, τα μοντέλα αυτά ήταν κάπως απλοϊκά και τα αποτελέσματα που προέκυψαν

ήταν μάλλον παραπλανητικά. Η δυσκολία προέκυψε επειδή οι πρώτοι ερευνητές, πολύ φυσικά, προσπάθησαν να απλοποιήσουν το πρόβλημα. Ένα προφανές σημείο εκκίνησης ήταν να εξετάσουν μια δισδιάστατη εξιδανίκευση της διαδικασίας. Δυστυχώς, αποδεικνύεται ότι οι σημαντικότερες δυναμικές διαδικασίες είναι όλες τρισδιάστατες, και έτσι οι δισδιάστατες εξιδανικεύσεις της μαγνητικής ανάδευσης είναι απελπιστικά ανεπαρκείς. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε και τα πρώιμα μοντέλα δύο διαστάσεων και τα πιο ρεαλιστικά τρισδιάστατα μοντέλα.

Υπάρχουν πολλοί τρόποι για να προκαλέσουμε κίνηση σε μια πισίνα υγρού-μετάλλου. Το πιο συνηθισμένο μέσο ανάδευσης είναι η χρήση περιστρεφόμενου, οριζόντιου μαγνητικού πεδίου, μια ιδέα που χρονολογείται από το 1932. Το πεδίο λειτουργεί μάλλον σαν ένας επαγωγικός κινητήρας, με το υγρό να παίρνει τη θέση του ρότορα (σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3 Ένα μονοδιάστατο μοντέλο της ανάδευσης [1].

Στην πράξη, ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο μπορεί να δημιουργηθεί με μια ποικιλία τρόπων, ο καθένας από τους οποίους παράγει μια ελαφρώς διαφορετική χωρική δομή για το B. Το πεδίο δεν είναι ποτέ απόλυτα ομοιόμορφο ούτε καθαρά οριζόντιο. Ωστόσο, οι λεπτομέρειες δεν έχουν μεγάλη σημασία. Το βασικό σημείο είναι ότι ένα περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο, το οποίο είναι κυρίως οριζόντιο, προκαλεί μία δύναμη Lorentz που, κατά μέσο όρο στον χρόνο, είναι μια προδιαγεγραμμένη συνάρτηση της θέσης, είναι ανεξάρτητη από την

ταχύτητα του μετάλλου, και της οποίας η κυρίαρχη συνιστώσα είναι αζιμουθιακή, δηλαδή $(0, F_\theta, 0)$ σε σφαιρικές συντεταγμένες (r, θ, z) .

Τα σημαντικά ερωτήματα είναι:

- i) πώς εξαρτάται η επαγόμενη ταχύτητα από τη δύναμη Lorentz;
- ii) μήπως η επαγόμενη ταχύτητα μεταβάλλεται στον χώρο μιμούμενη τις χωρικές μεταβολές της εφαρμοζόμενης δύναμης Lorentz (δηλαδή ισχυρός στροβιλισμός σε περιοχές όπου το F_θ είναι έντονο και ασθενής στροβιλισμός όπου το F_θ είναι ασθενές);
- iii) Υπάρχουν σημαντικές δευτερεύουσες ροές $(u_r, 0, u_z)$;

Οι απαντήσεις αποδεικνύονται να είναι:

- (i) $u_\theta \sim B$
- (ii) Το u_θ δεν μιμείται τις χωρικές μεταβολές της δύναμης Lorentz
- (iii) οι δευτερεύουσες ροές είναι έντονες και κυριαρχούν στη δυναμική του υγρού μετάλλου.

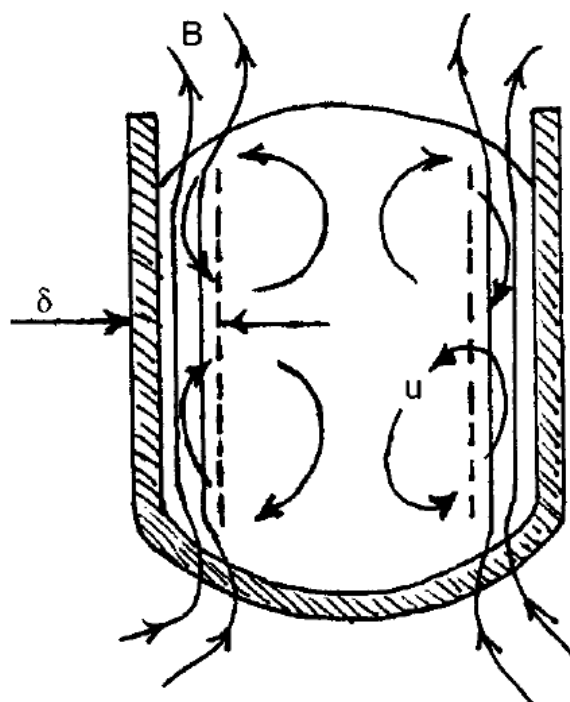
Είναι ο λεπτός, αλλά κρίσιμος, ρόλος που παίζουν οι δευτερεύουσες ροές που ακυρώνει τα αποτελέσματα των πρώιμων δισδιάστατων μοντέλων και κάνει αυτό το πρόβλημα πιο ενδιαφέρον από ότι θα μπορούσε αλλιώς να είναι.

3.4 ΧΥΤΕΥΣΗ ΧΑΛΥΒΑ, ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ ΚΑΙ ΚΡΑΜΑΤΩΝ

3.4.1 Ο Φούρνος Επαγωγής

Ο πρώτος φούρνος επαγωγής σχεδιάστηκε από τον Ferranti το 1887. Έφτασε λίγο πολύ η σημερινή του μορφή γύρω στο τέλος του αιώνα και έχει αλλάξει ελάχιστα τα τελευταία εκατό χρόνια. Ο λεγόμενος «χωρίς πυρήνα» φούρνος επαγωγής αποτελείται από ένα κυλινδρικό, πυρίμαχο δοχείο, γεμάτο με υγρό μέταλλο και περιβάλλεται από επαγωγικό πηνίο υψηλής συχνότητας που έχει τη μορφή σωληνοειδούς. Το πηνίο δημιουργεί ένα μαγνητικό πεδίο που είναι σχεδόν παράλληλο με τον άξονα του δοχείου, το οποίο περιορίζεται στο επιδερμικό βάθος του λιωμένου υλικού. Ο πρωταρχικός σκοπός του μαγνητικού πεδίου είναι η θέρμανση του μετάλλου, αν και έχει και το πρόσθετο αποτέλεσμα της ανάδευσης του υγρού. Αυτή η ανάδευση αποδεικνύεται χρήσιμη

επειδή παρέχει έναν αποτελεσματικό μηχανισμό για την μεταφορά της θερμότητας που δημιουργείται στα όρια, στο εσωτερικό του υγρού. Ωστόσο, έχει το μειονέκτημα ότι οι υπερβολικές ταχύτητες μπορούν να οδηγήσουν στη διάβρωση του τοιχώματος του δοχείου. Η δύναμη ανάδευσης περιορίζεται σε περιοχές όπου το μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται κατά μήκος της επιφάνειας του τήγματος.



Σχήμα 3.4 Ο φούρνος επαγωγής [1].

Η παρατήρηση του σχήματος 3.4, στο οποίο παριστάνεται σχηματικά ένας φούρνος επαγωγής, υποδηλώνει ότι αυτή η δύναμη ανάδευσης περιορίζεται σε μεγάλο βαθμό στις γωνιακές περιοχές του κλιβάνου όπου το μαγνητικό πεδίο εισέρχεται και εξέρχεται από το μέταλλο. Στην πραγματικότητα, αυτό συμβαίνει συνήθως, και έτσι η κίνηση στο ρευστό καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την κατανομή του μαγνητικού πεδίου σε ένα σχετικά μικρό μέρος του κλιβάνου.

Αυτό έχει δύο συνέπειες. Πρώτον, υπάρχει η ενδιαφέρουσα πιθανότητα του ελέγχου της ροής κάνοντας μικρές τοπικές αλλαγές στο B . Δεύτερον, εάν η κινητήρια δύναμη για την ταχύτητα u είναι μάλλον ευαίσθητη σε μικρά γεωμετρικά χαρακτηριστικά τότε μπορεί να είναι δύσκολο να διατυπωθούν απλές, αξιόπιστες εκτιμήσεις της μέσης ταχύτητας. Παρόλα αυτά, μπορούμε να περιμένουμε ότι το μοτίβο της

ροής θα είναι σε γενικές γραμμές αυτό που φαίνεται στο σχήμα 3.4. Η περιστροφική δύναμη Lorentz θα κινεί το υγρό κατά μήκος των τοίχων από τις γωνιακές περιοχές, όπου η μαγνητική πίεση είναι χαμηλή, στο μέσο του κλιβάνου όπου το μαγνητικό πεδίο είναι υψηλό. Αυτή η ροή θα επανακυκλοφορήσει πίσω στον πυρήνα του κλιβάνου, δίνοντάς μας ένα μοτίβο άξονοσυμμετρικής ροής που αποτελείται από δύο τοροειδείς δίνες. Εάν η δύναμη ανάδευσης στη μία γωνία υπερτερεί κατά πολύ της δύναμης στην άλλη, τότε μία από τις τοροειδείς δίνες μπορεί να εξασθενήσει.

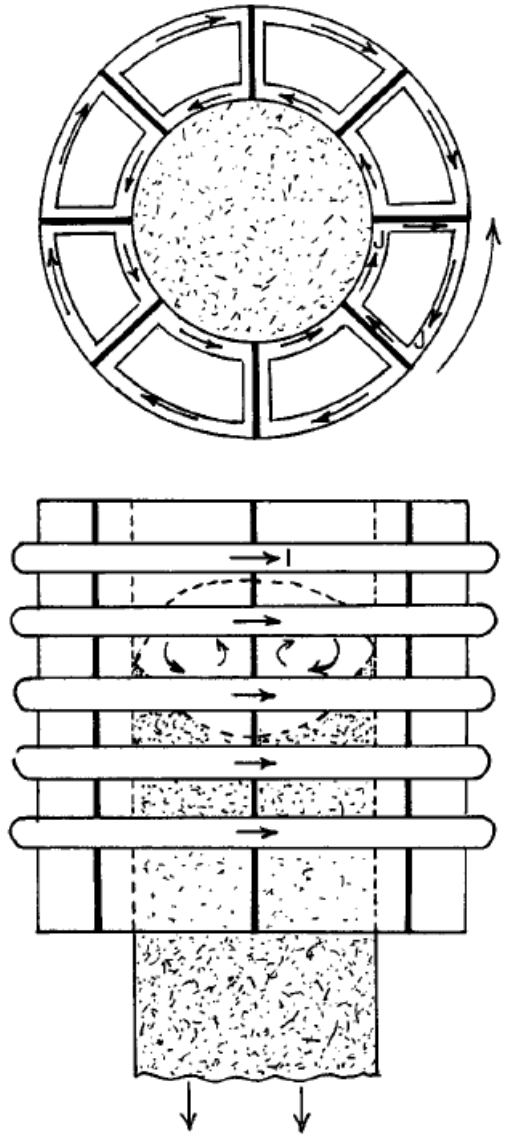
Μία απλή εκτίμηση του μέτρου της ταχύτητας οδηγεί στο αποτέλεσμα:

$$u \sim \frac{3B_0}{\sqrt{\rho\mu}} \quad (3.2)$$

3.4.2 Το Ψυχρό Χωνευτήριο

Θα περιγράψουμε στη συνέχεια μια συσκευή που είναι γνωστή ως ψυχρό χωνευτήριο. Αυτές οι συσκευές έχουν σχεδιαστεί για να λιώνουν και να χυτεύουν ένα μέταλλο σε μία μόνο λειτουργία. Το πάνω μέρος του χωνευτηρίου λειτουργεί σαν επαγωγικός φούρνος, στον οποίο τροφοδοτείται στερεό υλικό. Αυτό λιώνει επαγωγικά για να σχηματίσει μια δεξαμενή υγρού. Το κάτω μέρος λειτουργεί σαν ένα καλούπι χύτευσης, στο οποίο το υγρό μέταλλο παγώνει σε επαφή με τους κρύους τοίχους του χωνευτηρίου. Σε λειτουργία σταθερής κατάστασης στερεά θραύσματα τροφοδοτείται από πάνω, ενώ το πλίνθωμα εξέρχεται από τον πυθμένα.

Μια σχηματική αναπαράσταση της διαδικασίας φαίνεται στο σχήμα 3.5. Το όνομα «κρύο χωνευτήριο» προέρχεται από το γεγονός ότι οι τοίχοι του δοχείου κατασκευάζονται από υδρόψυκτα μεταλλικά τμήματα που προκαλούν την ψύξη του λιωμένου υλικού καθώς αυτό έρχεται σε επαφή με το τοίχωμα του δοχείου. Αυτό είναι αρκετά διαφορετικό από έναν επαγωγικό φούρνο του οποίου τα μονωτικά, πυρίμαχα τοιχώματα είναι ζεστά, αφήνοντας το μέταλλο ως υγρό. Το ευρηματικό μέρος του ψυχρού χωνευτηρίου βρίσκεται στην κατασκευή του τοίχου.



Σχήμα 3.5 Ένα ψυχρό χωνευτήριο αποτελείται από υδρόψυκτα τμήματα που περιβάλλονται από ένα επαγωγικό πηνίο υψηλής συχνότητας [1].

Για να θερμανθεί το μέταλλο είναι απαραίτητο να βρούμε κάποιο τρόπο για να επιτρέψουμε στο μαγνητικό πεδίο να περάσει από το αγωγικό τοίχωμα του χωνευτηρίου. Αυτό επιτυγχάνεται με την κατάτμηση του τοίχου, όπως φαίνεται στο σχήμα 3.5. Κάθε τμήμα είναι ηλεκτρικά μονωμένο και έτσι τα επαγόμενα κυκλικά ρεύματα (eddy currents) που προκαλούνται στην εξωτερική επιφάνεια του τοίχου, και που συνήθως θωρακίζουν το εσωτερικό από το εφαρμοζόμενο πεδίο, είναι αναγκασμένα να κυκλοφορήσουν γύρω από κάθε τμήμα. Το τελικό αποτέλεσμα είναι μία ομαλή κατανομή ρεύματος στην εσωτερική

επιφάνεια του τοίχου, η οποία με τη σειρά της δημιουργεί μαγνητικό πεδίο στο εσωτερικό του χωνευτηρίου. Είναι σαν ο τμηματοποιημένος τοίχος να είναι διαφανής στο μαγνητικό πεδίο. Το κάτω μέρος του δοχείου λειτουργεί ακριβώς όπως ένα συμβατικό καλούπι χύτευσης, με το υγρό να παγώνει σε επαφή με το υδρόψυκτο μεταλλικό τοίχωμα.

Όπως και στη συμβατική χύτευση, είναι απαραίτητο να τροφοδοτηθούν μικρές ποσότητες της ροής χύτευσης στο κενό μεταξύ του πλινθώματος και του τοιχώματος του χωνευτηρίου. Αυτό λειτουργεί ως λιπαντικό και παρέχει ένα λεπτό θερμικό φράγμα μεταξύ του πλινθώματος και των τοίχων.

Τα ψυχρά χωνευτήρια χρησιμοποιούνται επίσης για να λιώσουν το υλικό σε παρτίδες, όπως ένας φούρνος επαγωγής. Σε τέτοιες περιπτώσεις, ο πυθμένας του χωνιού καλύπτεται χρησιμοποιώντας μια τμηματική, υδρόψυκτη πλάκα. Το μεγαλύτερο μέρος του περιεχομένου του χωνιού είναι τότε υγρό, αλλά διατηρούμε μια λεπτή κρούστα από στερεό μέταλλο (που ονομάζεται κρανίο) δίπλα στους τοίχους και τη βάση. Αυτό χρησιμοποιείται συχνά για να λιώσει πολύ αντιδραστικά μέταλλα, όπως το τιτάνιο ή το νικέλιο, τα οποία θα μπορούσαν προσβάλλουν το πυρίμαχο τοίχωμα ενός συμβατικού κλιβάνου.

3.4.3 Τήξη Μετεωρισμού

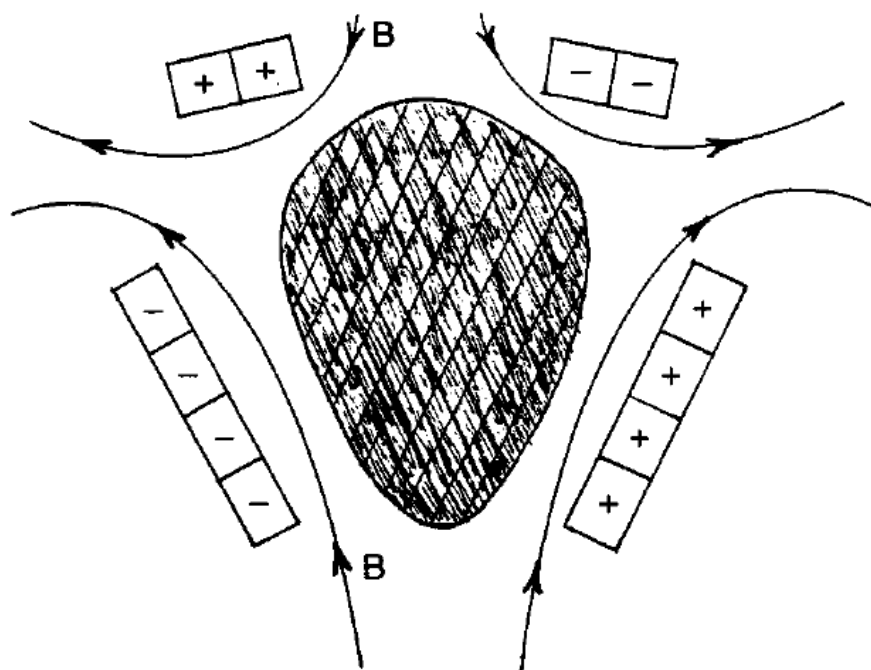
Περνάμε τώρα στις βιομηχανικές και εργαστηριακές διαδικασίες όπου η πρωταρχική λειτουργία του μαγνητικού πεδίου είναι να απομακρύνει ή να απωθεί το υγρό μέταλλο. Αυτά, φυσικά, βασίζονται στην ύπαρξη μαγνητικής πίεσης:

$$p_m = B^2/4\mu \quad (3.3)$$

Σε αυτήν την ενότητα εστιάζουμε στην τήξη μετεωρισμού, μια τεχνική που αρχικά προτάθηκε από το 1923, αλλά έπρεπε να περιμένει μέχρι τη δεκαετία του 1950 για να δοκιμαστεί στο εργαστήριο, και τη δεκαετία του 1960 για να αναπτυχθεί εμπορικά.

Η τήξη με μετεωρισμό χρησιμοποιείται πλέον πολύ συχνά στο εργαστήριο ως μέσο τήξης μικρών δειγμάτων από εξαιρετικά αντιδραστικά μέταλλα. Χρησιμοποιείται επίσης ως μέσο μέτρησης της επιφανειακής τάσης των υγρών μετάλλων.

Στο σχήμα 3.6 παρουσιάζεται μια απλή συσκευή μετεωρισμού. Αποτελείται από ένα τοροειδές πηνίο, τυλιγμένο σε σχήμα καλαθιού, στο κάτω μέρος, πάνω στο οποίο κάθονται τα μεταλλικά σταγονίδια Ένα δεύτερο, μικρότερο, πηνίο βρίσκεται πάνω από το δείγμα και αυτό διαρρέεται από ρεύμα που έχει διαφορά φάσης 180° με το κάτω πηνίο. Θα δούμε στη συνέχεια ότι υπάρχει ένα αυστηρό όριο στο μέγεθος των δειγμάτων που μπορεί να μετεωρίζεται με αυτόν τον τρόπο: συνήθως το μέγεθος των σταγονιδίων δεν είναι περισσότερο από ένα ή δύο εκατοστά. Δεδομένου ότι χρειαζόμαστε $\delta <$ μέγεθος σταγονιδίου για να δημιουργήσουμε μαγνητική πίεση, αυτό σημαίνει ότι απαιτούνται υψηλές συχνότητες, της τάξης των 100 kHz.



Σχήμα 3.6 Τήξη μετεωρισμού ενός μικρού τεμαχίου μετάλλου [1].

Τα δύο πηνία που φαίνονται στο Σχήμα 3.6 έχουν πολύ διαφορετικές λειτουργίες. Το κάτω πηνίο παρέχει στήριξη έναντι του βάρους του μετάλλου. Το επάνω πηνίο, από την άλλη πλευρά, απαιτείται για να παρέχει σταθερότητα. Δηλαδή η εισαγωγή του άνω πηνίου δημιουργεί μια διαμόρφωση πεδίου η οποία, απουσία δείγματος, έχει ένα μηδενικό σημείο κάπου στον άξονα μεταξύ των δύο πηνίων. Ένα μικρό δείγμα δοκιμής τοποθετημένο σε τέτοιο σημείο είναι σταθερό όσον

αφορά τις μικρές πλευρικές κινήσεις γιατί κάθε κίνηση του δείγματος το φέρνει σε μια περιοχή υψηλότερου μαγνητικού πεδίου, και η προκύπτουσα μεταβολή της μαγνητικής πίεσης θα τείνει να ωθήσει το μέταλλο πίσω προς το μηδενικό σημείο. Τουλάχιστον αυτό ισχύει στη θεωρία. Στην πράξη, συχνά αναπτύσσονται αστάθειες όπως κάθετες ταλαντώσεις και περιστροφές.

Προκειμένου να κατανοήσουμε το σχήμα του αιωρούμενου σταγονιδίου και να προβλέψουμε τη μέγιστη μάζα που μπορεί να αιωρηθεί, είναι απαραίτητο να ληφθεί υπόψη η ισορροπία μεταξύ μαγνητικής πίεσης, πίεσης ρευστού (η οποία οφείλεται στο ίδιο βάρος) και επιφανειακής τάσης. Συνήθως αυτή η ισορροπία μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ψευδοστατική, με την έννοια ότι η επίδραση της κίνησης στην πίεση του ρευστού μπορεί να αγνοηθεί.

Αποδεικνύεται ότι το κρίσιμο μέγεθος του σταγονιδίου δίνεται από την σχέση:

$$h_c \sim \frac{\gamma}{\rho g \delta} \quad (3.4)$$

Όπου: γ είναι ο συντελεστής επιφανειακής τάσης, ρ η πυκνότητα του υλικού, g η επιτάχυνση της βαρύτητας και δ το επιδερμικό βάθος. Σταγόνες με μεγαλύτερο μέγεθος από το h_c θα τείνουν να στάζουν κοντά στον άξονα.

3.4.4 Ηλεκτρομαγνητική Βαλβίδα

Ας υποθέσουμε ότι αυξάνουμε τη μάζα του σταγονιδίου που φαίνεται στο σχήμα 3.6 έως ότου το κρίσιμο μέγεθος, h_c , ξεπερνιέται. Η σταγόνα θα αρχίσει να στάζει και αν το μέγεθος γίνει αρκετά μεγάλο ένα μικρό τζετ θα αναδυθεί, με επίκεντρο τον άξονα. Αν η μάζα των σταγονιδίων αναπληρώνεται συνεχώς από πάνω έχουμε μια υποτυπώδη μορφή ηλεκτρομαγνητικής βαλβίδας. Η απλούστερη υλοποίηση μιας τέτοιας συσκευής φαίνεται στο σχήμα 3.7. Αυτή παρέχει μία δυνατότητα διαμόρφωσης της ροής ενός πίδακα υγρού-μετάλλου χωρίς την ανάγκη μηχανικών κινούμενων μερών. Με την αύξηση της ισχύος στο επαγωγικό πηνίο, ο ρυθμός ροής που διαπερνά την ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα μειώνεται.

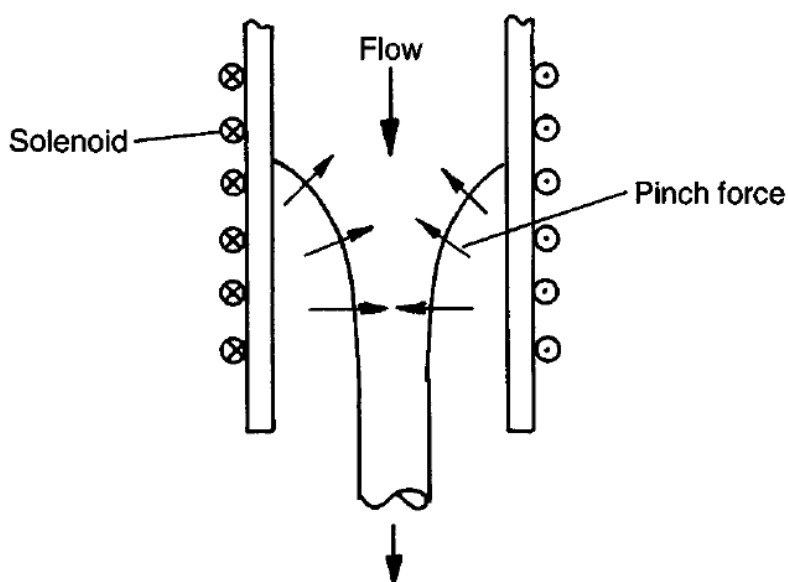
Μια απλή εκτίμηση της μείωσης του ρυθμού ροής μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας την εξίσωση του Bernoulli από κάποια ανάντη θέση, ως

πούμε την επιφάνεια της δεξαμενής που τροφοδοτεί τη βαλβίδα, στο σημείο στο οποίο ο πίδακας διαχωρίζεται από τον τοίχο του ακροφυσίου. Η πίεση στον πίδακα στο σημείο διαχωρισμού είναι p_m . Απουσία τριβών, η εξίσωση Bernoulli δίνει:

$$\rho gH = (1/2)\rho u^2 + p_m \quad (3.5)$$

όπου H είναι το ύψος του υγρού πάνω από το σημείο διαχωρισμού. Η μέση ταχύτητα στο σημείο διαχωρισμού είναι τότε:

$$u = [2gH - B^2/(2\rho\mu)]^{1/2} \quad (3.6)$$



Σχήμα 3.7 Μία απλή ηλεκτρομαγνητική βαλβίδα [1]

Φυσικά, πρόκειται για μια μάλλον απλοϊκή εκτίμηση, η οποία αγνοεί τις απώλειες λόγω τριβών και τις διακυμάνσεις της ταχύτητας κατά μήκος του πίδακα. Για παράδειγμα, προβλέπει ότι η ροή κλείνει τελείως σε μία κρίσιμη τιμή μαγνητικής πίεσης:

$$p_m = \rho gH \quad (3.7)$$

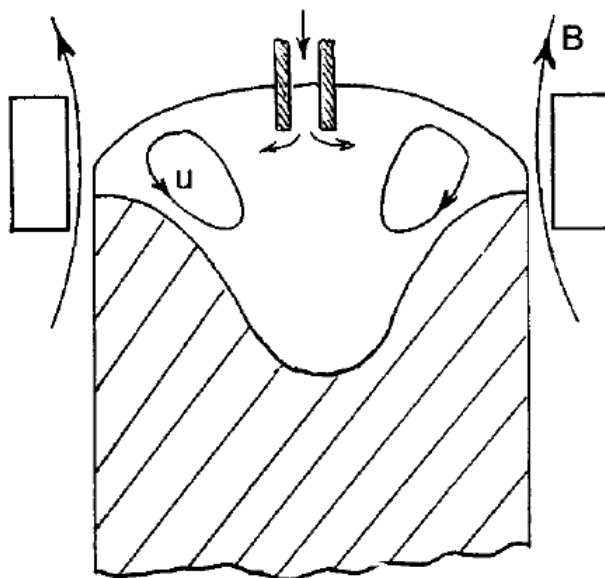
όμως είναι γνωστό ότι αυτό δεν μπορεί να ισχύει σε μία αξονοσυμμετρική διαμόρφωση. Παρόλα αυτά, τα πειράματα δείχνουν ότι

η (3.6) καταγράφει σε γενικές γραμμές την συμπεριφορά της διάταξης εφόσον το p_m δεν είναι πολύ κοντά στην κρίσιμη τιμή.

3.4.5 Ηλεκτρομαγνητική Χύτευση

Μια εντελώς διαφορετική εφαρμογή της μαγνητικής απόθησης απεικονίζεται στο σχήμα 3.8. Αυτό δείχνει την ηλεκτρομαγνητική χύτευση αλουμινίου, μια διαδικασία που αναπτύχθηκε από τον Getselev στην ΕΣΣΔ το 1971 και χρησιμοποιείται τώρα σε όλη την Ευρώπη και τη Βόρεια Αμερική. Στην πραγματικότητα, είναι πανομοιότυπη με τη συμβατική χύτευση του αλουμινίου, εκτός από το ότι η υδρόψυκτη μούχλα που κανονικά περιβάλλει τη δεξαμενή υγρών αντικαθίσταται από ένα πηνίο επαγωγής υψηλής συχνότητας. Ωστόσο, το καλούπι και το πηνίο εκπληρώνουν παρόμοιους ρόλους: απαιτούνται και τα δύο για τη συντήρηση του σχήματος της πιάνας, το πρώτο το επιτυγχάνει με μηχανική υποστήριξη ενώ το δεύτερο χρησιμοποιεί μαγνητική πίεση.

Είναι αξιοσημείωτο ότι η διαδικασία αποδεικνύεται σταθερή. Το κύριο πλεονέκτημα της ηλεκτρομαγνητικής χύτευσης είναι ότι βελτιώνεται η επιφανειακή ποιότητα του πλινθώματος. Αυτό σημαίνει ότι η επιφάνεια του πλινθώματος δεν απαιτεί περαιτέρω κατεργασία πριν από την κύλιση.

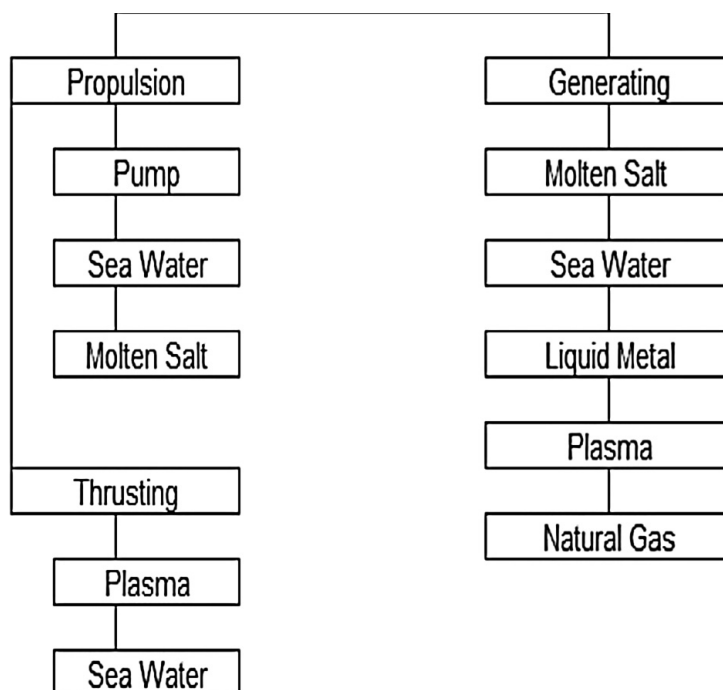


Σχήμα 3.8 Ηλεκτρομαγνητική Χύτευση του αλουμινίου [1].

4. ΜΑΓΝΗΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΑΝΤΛΗΣΗ

4.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η ηλεκτρομαγνητική πρόωση υψηλής ταχύτητας μελετάται και χρησιμοποιείται ευρέως από τα διαστημόπλοια στα στρατιωτικά υποβρύχια και την παραγωγή ενέργειας. Για παράδειγμα, ορισμένα συστήματα πρόωσης απαιτούν δύναμη άντλησης χωρίς την ύπαρξη κινούμενων μερών. Άλλα συστήματα όπως τα διαστημόπλοια δεν έχουν αέρα και δεν έχουν αρκετό καύσιμο για ώθηση. Συστήματα με πολύ υψηλή θερμοκρασία όπως λιωμένα μέταλλα ή υγρά μπορεί να προωθούνται ή να κατευθύνονται χρησιμοποιώντας μαγνητοϋδροδυναμική δύναμη. Η MHD δύναμη μπορεί να παρέχει δύναμη ώθησης για προωθητή πλάσματος που χρησιμοποιείται σε διαστημόπλοια.



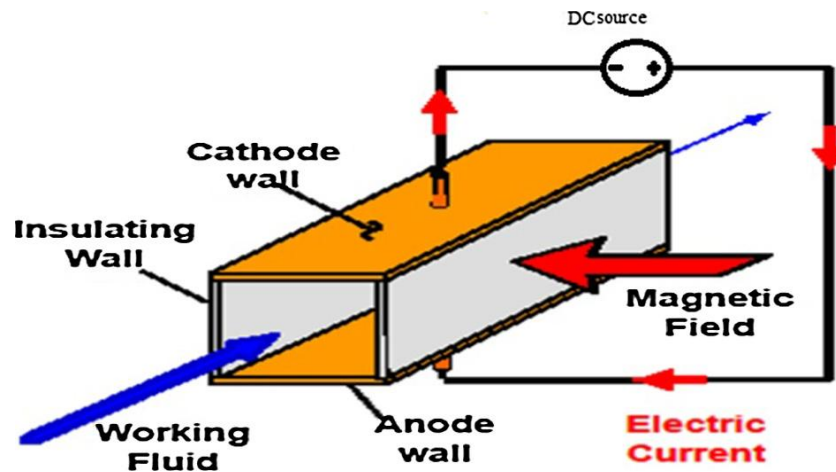
Σχήμα 4.1 Εφαρμογές της μαγνητοϋδροδυναμικής άντλησης [9].

Από την άλλη πλευρά, αγώγιμα μέταλλα και λιωμένα άλατα μπορούν να παράξουν ισχύ βάσει της μαγνητοϋδροδυναμικής αρχής. Η θεραπευτική MHD μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή μικροαντλιών για την άντληση αίματος με σκοπό τη διατήρηση του επιπέδου σακχάρου στο αίμα. Οι μικροαντλίες MHD έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον από ερευνητές και εταιρείες τεχνολογίας, γιατί μπορούν να δώσουν λύση στα περισσότερα προβλήματα μετακίνησης μικρών τμημάτων. Ορισμένες εφαρμογές της μαγνητοϋδροδυναμικής άντλησης φαίνονται στο Σχήμα 4.1.

4.2 ΑΡΧΗ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑΣ

Η βασική αρχή της μαγνητοϋδροδυναμικής άντλησης είναι απλή. Δημιουργείται ένα ηλεκτρικό ρεύμα με συγκεκριμένη κατεύθυνση μέσω ενός ηλεκτρικά αγώγιμου ρευστού όπως το θαλασσινό νερό. Στη συνέχεια, επιβάλλεται μέσω του ρευστού ένα μαγνητικό πεδίο υψηλής έντασης κάθετα στο ηλεκτρικό ρεύμα. Αυτός ο συνδυασμός ηλεκτρικού πεδίου (στο οποίο οφείλεται το ηλεκτρικό ρεύμα), κάθετου μαγνητικού πεδίου και της σχετικής κίνησης των ιόντων έχει ως αποτέλεσμα μια δύναμη Lorentz με κατεύθυνση που ορίζεται από το εξωτερικό γινόμενο των διανυσμάτων του ηλεκτρικού ρεύματος και του μαγνητικού πεδίου.

Εάν η συσκευή που περιέχει τον ηλεκτρομαγνήτη και το περίβλημα είναι σταθερή, τότε ουσιαστικά αντλείται το υγρό. Εάν όμως η συσκευή είναι ελεύθερη να κινηθεί, τότε θα ανακρουστεί σύμφωνα με τον δεύτερο νόμο κίνησης του Νεύτωνα. Έτσι, η διάταξη μπορεί να αναφέρεται ως αντλία ή προωθητήρας αντίστοιχα. Τα κύρια δομικά στοιχεία της αντλίας MHD είναι το ακροφύσιο εισόδου, το κυρίως σώμα και ο διαχύτης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2. Ο υπεραγώγιμος μαγνήτης και τα ηλεκτρόδια είναι διατεταγμένα στο κυρίως σώμα έτσι ώστε τα ηλεκτρικά και μαγνητικά πεδία να είναι κάθετα μεταξύ τους.



Σχήμα 4.2 Δομή μιας μαγνητοϋδροδυναμικής αντλίας [9].

Μερικά από τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των αντλιών MHD σε σχέση με τις συμβατικές αντλίες συνοψίζονται παρακάτω.

Πλεονεκτήματα:

- Απλή και συμπαγής κατασκευή
- Μπορεί να εργαστεί σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες περιβάλλοντος
- Αθόρυβη λειτουργία λόγω του ότι δεν περιέχει κινούμενα μέρη
- Πιο αξιόπιστη γιατί δεν περιέχει κινούμενα μέρη
- Υψηλή απόδοση
- Μικρός χρόνος εκκίνησης
- Απαιτείται ελάχιστη συντήρηση
- Ευκολότερη κατασκευή σε μικροκλίμακα
- Υψηλή πυκνότητα ισχύος

Μειονεκτήματα:

- Δεν είναι δυνατή η ευρεία χρήση λόγω των περιορισμών που τίθενται από την τεχνολογία των υπεραγωγών
- Αντίστροφη ροή στο τέλος του μαγνητικού πεδίου
- Οι μεγάλοι μαγνήτες που απαιτούνται είναι μια σημαντική δαπάνη
- Έλλειψη αναλυτικών μοντέλων που προβλέπουν με ακρίβεια την συμπεριφορά τους
- Μη ομοιογενής κατανομή του προφίλ ταχύτητας του ρευστού και εμφάνιση αστάθειας της ροής κάτω από ορισμένες συνθήκες λειτουργίας

4.3 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΗΣ ΜΑΓΝΗΤΟΥΔΡΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ ΑΝΤΛΗΣΗΣ

Παρά το γεγονός ότι η βασική αρχή της MHD ήταν γνωστή εδώ και πολλά χρόνια, μόνο λίγες πρακτικές εφαρμογές έχουν διερευνηθεί. Τα συστήματα MHD εξακολουθούν να έχουν να αντιμετωπίσουν σημαντικές προκλήσεις προτού μπορέσουν να γίνει πρακτικά εφαρμόσιμα. Τα προβλήματα μπορεί να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες:

- α) Προβλήματα που σχετίζονται με τη φυσική και την τεχνολογία των υπεραγωγών.
- β) Πρακτικές τεχνικές για την εξέταση της δυνατότητας σχεδιασμού και κατασκευής συστημάτων προώθησης MHD.

Γενικά, θεωρείται ότι η αντλία MHD μπορεί να σχεδιαστεί με ελευθερία διαμόρφωσης και μεγέθους, ώστε να μπορεί να έχει υψηλή προωστική απόδοση, καθώς δεν απαιτείται μετατόπιση. Ορισμένες πιθανές διαμορφώσεις των συστημάτων προώθησης MHD έχουν προταθεί για την πρόωση πλοίων. Ωστόσο, δεν έχει ακόμη διαπιστωθεί ποια είναι η βέλτιστη διαμόρφωση του συστήματος.

Η αντλία MHD είναι απλή και συμπαγής και έχει μία υψηλή πυκνότητα ισχύος. Ως εκ τούτου, είναι ιδιαίτερα ελκυστική για στρατιωτικές εφαρμογές. Το γεγονός ότι είναι συμπαγής καθώς και η απουσία περιστροφής έχουν ένα πολύ σημαντικό πλεονέκτημα: την μείωση του θορύβου, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην πρόωση των υποβρυχίων.

Στη δεκαετία του 1960 κατασκευάστηκαν λίγα θαλάσσια μοντέλα, αλλά με μικρή επιτυχία. Πρόσφατες εξελίξεις στην υπεραγωγιμότητα και στους υπεραγώγιμους μαγνήτες έδωσαν νέα ώθηση στην έρευνα πάνω στην MHD προώθηση, όπως επίσης και στην παραγωγή ισχύος MHD. Η Ιαπωνική ερευνητική ομάδα JAFSA συνέβαλε σημαντικά στη ανάπτυξη προωθητήρων MHD για πλοία υψηλής ταχύτητας. Η JAFSA κατασκεύασε ένα λειτουργικό μοντέλο 3 μέτρων.

Καταρχάς, πρέπει να τονιστεί ότι μία αντλία MHD είναι ακριβώς η αντίστροφη μηχανή μιας γεννήτριας MHD με τον ίδιο τρόπο που ένας ηλεκτρικό κινητήρας είναι το αντίστροφο μιας ηλεκτρικής γεννήτριας.

Η σχετική έρευνα έχει αποκαλύψει πολλές επιπλοκές που μπορεί να μειώσουν σημαντικά την εφικτή απόδοση μιας αντλίας MHD.

Ωστόσο, η απόδοσή της εξακολουθεί να είναι αρκετά ελκυστική για εφαρμογές υποβρύχιας πρόωσης. Οι κύριες γνωστές πρακτικές εφαρμογές των αντλιών MHD είναι η άντληση θαλασσινού νερού, λιωμένου μετάλλου, λιωμένων αλάτων και νανορευστών και θα παρουσιαστούν στις επόμενες ενότητες.

4.4 ΑΝΤΛΗΣΗ ΘΑΛΑΣΣΙΝΟΥ ΝΕΡΟΥ

Οι μαγνητοϋδροδυναμικοί προωθητήρες (MHD thrusters) έχουν αναγνωριστεί από καιρό ως ελκυστικοί υποψήφιοι για εφαρμογές πρόωσης πλοίων, κυρίως γιατί αυτά τα συστήματα δεν χρειάζονται τα συμβατικά περιστρεφόμενα εξαρτήματα κίνησης. Ο MHD προωθητήρας είναι ουσιαστικά μια ηλεκτρομαγνητική αντλία που λειτουργεί στο θαλασσινό νερό. Το ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται απευθείας μέσω του θαλασσινού νερού και αλληλεπιδρά με ένα εφαρμοζόμενο μαγνητικό πεδίο. Αυτή η αλληλεπίδραση του μαγνητικού πεδίου και του ηλεκτρικού ρεύμα στο θαλασσινό νερό έχει ως αποτέλεσμα να ασκείται δύναμη Lorentz στο νερό και η αντίδραση σε αυτή τη δύναμη είναι η δύναμη που ωθεί την συσκευή προς τα εμπρός. Η έννοια της ηλεκτρομαγνητικής προώθησης έχει εξεταστεί πολλές φορές τα τελευταία 35 χρόνια ως εναλλακτική μέθοδος πρόωσης για πλοία επιφανείας και υποβρύχια. Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζονται περισσότερες λεπτομέρειες πάνω στην ηλεκτρομαγνητική προώθηση.

Πρέπει επίσης να σημειωθεί ότι έχουν γίνει πολλές μελέτες πάνω στην επίδραση των μαγνητικών πεδίων στη ροή των νανορευστών (nanofluids) με βάση το νερό. Με τον όρο νανορευστό εννοούμε μια νέα κατηγορία ρευστών μεταφοράς θερμότητας τα οποία παρουσιάζουν πολύ υψηλή θερμική αγωγιμότητα και αποτελούνται από νανοσωματίδια (nanoparticles) ή συσσωματώματα νανοσωματιδίων μεγέθους μικρότερου των 100 nm.

Έχουν μελετηθεί νανορευστά με νανοσωματίδια οξειδίου του χαλκού (CuO), τριοξειδίου του αργιλίου (Al₂O₃). Ανάμεσα στα άλλα μελετήθηκε η επίδραση των τιμών των αριθμών Hartmann και Reynolds στο ρυθμό μεταφοράς θερμότητας στα παραπάνω νανορευστά. Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι ο ρυθμός μεταφοράς θερμότητας αυξάνεται

παρουσία μαγνητικού πεδίου, ειδικά στην περίπτωση που το μέγεθος των νανοσωματιδίων είναι όσο μικρότερο γίνεται.

Η μικροαντλία (nanopump) DC MHD μπορεί να λειτουργήσει σε υψηλές πυκνότητες ρεύματος σε μικρο-ρευστά κανάλια χωρίς να εισάγει φυσαλίδες αερίου στο κανάλι άντλησης. Το κύριο χαρακτηριστικό του σχεδιασμού της τρέχουσας γενιάς είναι μια μικρο-κατεργασμένη δομή που μοιάζει με παγωτό που συνδέει το κανάλι άντλησης με τις πλευρικές δεξαμενές, όπου βρίσκονταν ηλεκτρόδια πλατίνας. Η πυκνότητα ρεύματος μπορεί να φτάσει ακόμα και 4000 A/m^2 χωρίς αισθητή θέρμανση Joule μέσα στο σύστημα. Η απόδοση της αντλίας μελετήθηκε ως συνάρτηση της πυκνότητας ρεύματος, της έντασης του μαγνητικού πεδίου, καθώς και του pH.

Η μικροαντλία αναμένεται να χρησιμοποιηθεί για τη μεταφορά διαλυμάτων ηλεκτρολυτών που είχαν σχετικά υψηλή ιοντική ισχύ σε περιβάλλον DC μαγνητικού πεδίου. Επίσης, έχει προβλεφθεί η εφαρμογή αυτής της αντλίας για τη μελέτη βιολογικών δειγμάτων σε ένα μικροσκοπικό σύστημα υψηλής ανάλυσης. Γενικά, η MHD προσφέρει έναν κομψό τρόπο ελέγχου της ροής υγρών σε μικροσυσκευές χωρίς την ανάγκη μηχανικών εξαρτημάτων.

Οι πρόσφατες εξελίξεις της MHD άντλησης θαλασσινού νερού περιλαμβάνουν τη χρήση της αντλίας Electro-MHD (EMHD) για την ανάκτηση πετρελαιοκηλίδων στο θαλασσινό νερό. Η αντλία αυτή βασίζεται στις διαφορετικές καταστάσεις ροής λαδιού, αέρα και θαλασσινού νερού κάτω από την επίδραση της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, της βαρύτητας, της άνωσης και της δύναμης μεταξύ των φάσεων. Η μέθοδος ανάκτησης που βασίζεται στη λεπτή μεμβράνη λαδιού EMHD είναι ουσιαστικά μια τριφασική ροή αέρα-λαδιού-θαλασσινού νερού υπό την επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Μετά από δέκα χρόνια πειραμάτων στη ροή αέρα-λαδιού-θαλασσινού νερού κάτω από ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, ένα πρωτότυπο αντλίας με παροχή $35 \text{ m}^3/\text{h}$ δοκιμάστηκε με επιτυχία.

4.5 ΑΝΤΛΗΣΗ ΥΓΡΩΝ ΜΕΤΑΛΛΩΝ

Μία διάταξη μεταφοράς λιωμένου μετάλλου εφευρέθηκε από τους Bykhovsky και Panov το 1991. Η συσκευή περιλαμβάνει μια φυγοκεντρική MHD αντλία, διατεταγμένη μέσα σε λουτρό λιωμένου μετάλλου. Είναι εξοπλισμένη με μεταλλικό περίβλημα, ένα κάλυμμα, μια μεταλλική ράβδο, καθώς και ένα σωληνοειδές πηνίο. Όλα αυτά τα εξαρτήματα σχηματίζουν ένα κλειστό μαγνητικό κύκλωμα, ενώ ένα μαγνητικό πεδίο παράγεται εντός του θαλάμου εργασίας. Ο θάλαμος εργασίας συνδέεται ερμητικά με το σωλήνα για την εκροή του λιωμένου μετάλλου.

4.6 ΑΝΤΛΗΣΗ ΤΗΓΜΑΤΟΣ ΑΛΑΤΩΝ

Τα τετηγμένα άλατα χρησιμοποιούνται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες για τη μεταφορά θερμότητας από τις ενεργές ζώνες. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε λιωμένα μέταλλα και κράματά είτε λιωμένα άλατα όπως άλατα φθορίου. Η άντληση αυτών των υγρών με κλασικές αντλίες είναι μάλλον δύσκολη και η διάρκεια ζωής των αντίστοιχων διατάξεων είναι σχετικά χαμηλή. Επομένως, μία καλή επιλογή είναι οι ηλεκτρομαγνητικές αντλίες που δεν έχουν καθόλου κινητά μέρη. Οι πιο απλές συσκευές αυτού του είδους είναι οι αντλίες MHD. Το μαγνητικό τους πεδίο δημιουργείται είτε από ένα σύστημα διατεταγμένων πηνίων σε σχήμα σέλας που διαρρέονται από συνεχές ρεύμα είτε από ένα σύστημα μόνιμων μαγνητών.

Η χρήση λιωμένου φθορίου, και ειδικά το μείγμα $\text{LiF} - \text{BeF}_2$ που ονομάζεται «Flibe» έχει μελετηθεί εκτενώς. Το Flibe είχε προταθεί ως κύριο ψυκτικό υγρό βρόχου γιατί παρουσιάζει σημαντικά εγγενή πλεονεκτήματά, όπως η σταθερότητα σε υψηλή θερμοκρασία και η χαμηλή ηλεκτρική αγωγιμότητα.

5. ΕΛΕΓΧΟΣ ΡΟΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΩΘΗΣΗ

5.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο τρόπος με τον οποίο ρέουν τα υγρά στη φύση δεν είναι πάντα αυτός που θα ήθελαν οι μηχανικοί και η βελτιστοποίηση της εν λόγω γεωμετρίας μπορεί να μην είναι πάντα δυνατή ή επαρκής. Ο ενεργός έλεγχος της ροής μπορεί να είναι μια λύση με γενικά λαμπρές προοπτικές: έχει τη δυνατότητα εξοικονόμησης ενέργειας καθυστερώντας την έναρξη της μετάβασης στην τύρβη, θα μπορούσε να μειώσει την τυρβώδη επιδερμική τριβή, μπορεί να βελτιώσει την άντωση και/ή να μειώσει την οπισθέλκουσα εμποδίζοντας τον διαχωρισμό της ροής από αεροτομές σε υψηλές γωνίες προσβολής ή θα μπορούσε να ενισχύσουν την ανάμειξη. Αυτά είναι μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα. Η επιστημονική βιβλιογραφία περιέχει πάρα πολλές εφαρμογές σε προωθητές ή ενεργοποιητές (actuators) και σε έλεγχο ροής.

Στη συνέχεια θα εστιάσουμε σε έναν συγκεκριμένο τύπο, τον ηλεκτρομαγνητικό ενεργοποιητή ή αλλιώς τον ενεργοποιητή δύναμης Lorentz. Η εφαρμογή του στη ρευστοδυναμική έχει κυρίως οραματιστεί σε τρεις περιοχές. Η πρώιμη έρευνα που ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960 είδε δυνατότητες για αποτελεσματική πρόωση MHD. Υπήρχαν επίσης κάποιες πρώτες ιδέες για τη σταθεροποίηση του οριακού στρώματος και τον έλεγχο του διαχωρισμού. Ωστόσο, μόλις τη δεκαετία του 1990 μελετήθηκαν λεπτομερώς.

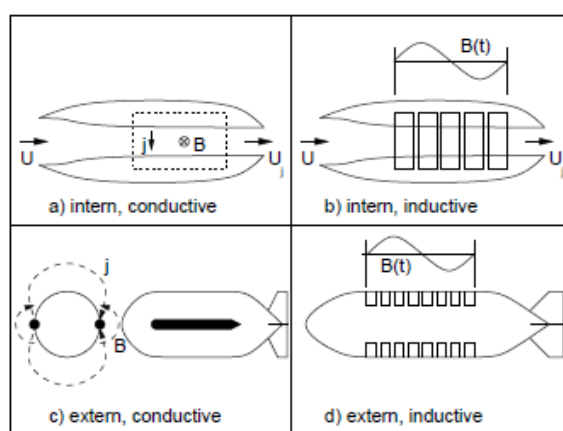
5.2 ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΠΡΟΩΘΗΣΗ

Η ηλεκτρομαγνητική πρόωση στο θαλασσινό νερό έχει ήδη προταθεί από τον Rice το 1961. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η ιδέα είχε προσελκύσει την προσοχή αρκετών εφευρετών εκείνη την εποχή. Οι

κύριοι λόγοι για αυτό ήταν η φαινομενικά κομψή αρχή λειτουργίας που δεν χρησιμοποιεί κινούμενα μέρη.

Οι προτεινόμενες εφαρμογές περιλαμβάνουν τη σιωπηλή πρόωση ναυτικών υποβρυχίων [12], τη χρήση σε υποβρύχια φορτίου υψηλής ταχύτητας [11] και την προώθηση μελλοντικών πλοίων επιφανείας υψηλών ταχυτήτων χωρίς τον κίνδυνο σπηλαιώσης [13].

Συμβατικά, οι μέθοδοι ηλεκτρομαγνητικής πρόωσης είναι υποδιαιρείται σε τέσσερις ομάδες όπως φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 5.1.

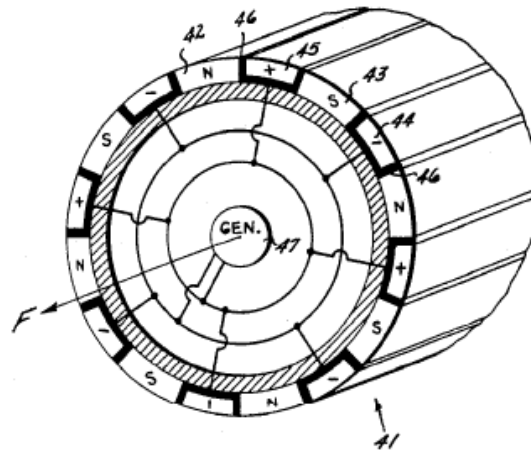


Σχήμα 5.1 Ταξινόμηση των μεθόδων ηλεκτρομαγνητικής πρόωσης [10].

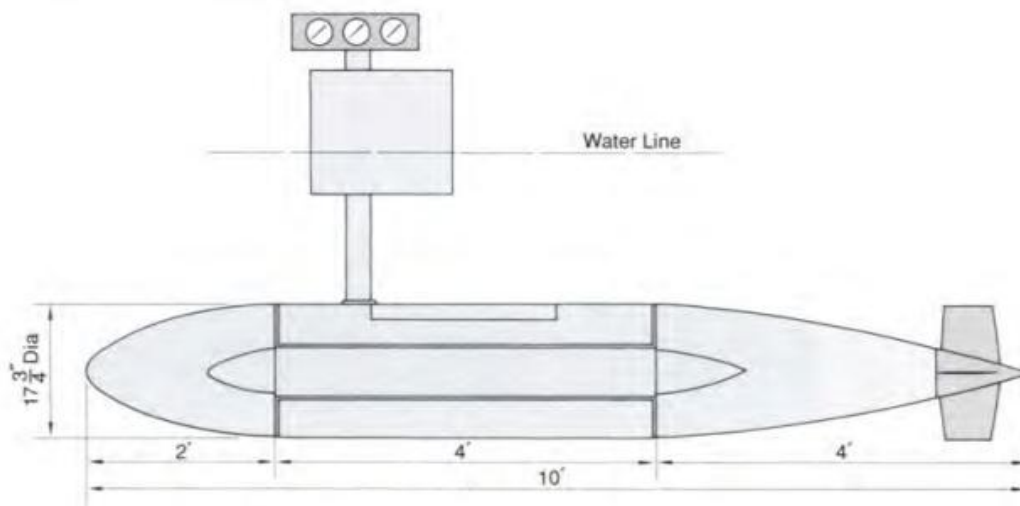
Αν εφαρμόζεται και ηλεκτρικό και μαγνητικό πεδίο, το σύστημα πρόωσης ονομάζεται αγωγίμο (conductive) και φαίνεται στο σχήμα 5.1a και 5.1c. Εάν εφαρμόζεται μόνο ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο, η μέθοδος αναφέρεται ως επαγωγική (inductive) και φαίνεται στο σχήμα 5.1b και 5.1d. Τα συστήματα εσωτερικής ροής (σχήμα 5.1a και 5.1b) χρησιμοποιούν έναν αγωγό με ηλεκτρομαγνητική αντλία, ενώ στα εξωτερικά συστήματα, τα πεδία διεισδύουν στην περιβάλλουσα θάλασσα (σχήμα 5.1c και 5.1d).

Η διάταξη των ηλεκτροδίων και μαγνητών που προτάθηκε από τον Rice και φαίνεται στο σχήμα 5.2 ανήκει στην κατηγορία c, δηλαδή πρόκειται για εξωτερική αγωγίμη προώθηση. Το 1966, ο S. Way κατασκεύασε ένα μοντέλο υποβρυχίου με το όνομα EMS-1 με έναν ηλεκτρομαγνητικό προωθητή εξωτερικού αγωγίμου τύπου στο Πανεπιστήμιο της Καλιφόρνια, Σάντα Μπάρμπαρα. Το μοντέλο είχε μήκος περίπου 3 μέτρα. Ένας διπολικός ηλεκτρομαγνήτης παρείχε μια

μαγνητική επαγωγή στο κύτος της τάξης των 0,015T. Τροφοδοτούμενο από μπαταρίες μολύβδου-οξέος, το υποβρύχιο έφτασε σε μέγιστη ταχύτητα περίπου. 0,8 κόμβοι (0,4 m/s). Αυτό το πείραμα τράβηξε ακόμη και την προσοχή των ΜΜΕ εκείνη την εποχή.



Σχήμα 5.2 Διάταξη ηλεκτροδίων (45) και μόνιμων μαγνητών (42) που προτάθηκε από τον Rice για να προωθήσει ένα κυλινδρικό σώμα σε θαλασσινό νερό [10].



Σχήμα 5.3 Σχηματική αναπαράσταση του υποβρυχίου ηλεκτρομαγνητικής προώθησης EMS-1 [11].

Ωστόσο, εκτός από την κύρια δυνατότητα της προώθησης ενός θαλάσσιου σκάφους από ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, ορισμένα

θεμελιώδη προβλήματα που ενυπάρχουν στην ηλεκτρομαγνητική πρόωση στο θαλασσινό νερό, τα οποία είχαν ήδη σημειωθεί από τους επιστήμονες, αποδείχθηκαν πλέον στην πράξη. Ειδικά, η δυσμενής αναλογία της εισροής ισχύος σε σχέση με τη διαθέσιμη ώθηση ήταν εντυπωσιακή. Μετά από μια περίοδο ενεργούς έρευνας, οι δραστηριότητες των ΗΠΑ στην ηλεκτρομαγνητική πρόωση μειώθηκαν σημαντικά μέχρι το τέλος της δεκαετίας του 1960.

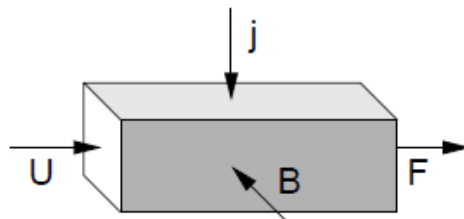
Ο λόγος για το έλλειμμα αποδοτικότητας εξηγείται εύκολα. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο της ηλεκτρομαγνητικής πρόωσης, η πυκνότητα της δύναμης Lorentz f που παράγει την ώθηση οφείλεται στην πυκνότητα ρεύματος j και στη μαγνητική επαγωγή B .

$$\vec{f} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (5.1)$$

Δεδομένου ότι οι μαγνητικοί αριθμοί Reynolds είναι μικροί για εφαρμογές θαλασσινού νερού, τα επαγόμενα μαγνητικά πεδία μπορούν να θεωρηθούν αμελητέα και το B γίνεται το μόνο εφαρμοζόμενο πεδίο. Η πυκνότητα ρεύματος δίνεται από το νόμο του Ohm:

$$\vec{j} = \sigma(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (5.2)$$

Εδώ, το E δηλώνει την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου, το v το πεδίο ροής και το σ την ηλεκτρική αγωγιμότητα του μέσου.



Σχήμα 5.4 Αρχή λειτουργίας ενός εσωτερικού αγωγίμου ηλεκτρομαγνητικού προωθητή [10].

Λόγω της απλότητάς της, η εσωτερική αγωγή πρόωση (τύπου α) όπως απεικονίζεται στο σχήμα 5.4 επιλέχθηκε για την επίδειξη των

βασικών κριτηρίων απόδοσης της ηλεκτρομαγνητικής πρόωσης στο θαλασσινό νερό.

Πρωταρχικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η ποσότητα της απαραίτητης ισχύος εισόδου για την επίτευξη μιας συγκεκριμένης ώθησης (ενεργειακό ισοζύγιο) και η συνολική ώση που είναι διαθέσιμη για την προώθηση του σκάφους με συγκεκριμένη ταχύτητα (ισορροπία ορμής).

Η ώθηση ανά μονάδα όγκου ισούται με την πυκνότητα της δύναμης Lorentz η οποία έχει μέτρο $f = jB$ στην περίπτωση που φαίνεται στο σχήμα 5.4, υποθέτοντας ομοιόμορφα και ορθογώνια ηλεκτρομαγνητικά πεδία και πεδία ροής. Η ιδανική απόδοση μετατροπής της ηλεκτρικής σε μηχανική ισχύ είναι ο λόγος της προωστικής ισχύος ή της ώσης ανά μονάδα όγκου $P_T = jBv$ προς τη συνολική ισχύ που παρέχεται ανά μονάδα όγκου $P_E = jE$, όπου v υποδηλώνει την ταχύτητα ροή και E την ένταση του ηλεκτρικού πεδίου. Συνεπώς η απόδοση είναι ίση με:

$$\eta = \frac{P_T}{P_E} = \frac{vB}{E} = \frac{1}{\varphi} \quad (5.3)$$

Βλέπουμε λοιπόν ότι η ιδανική απόδοση είναι το αντίστροφο του συντελεστή φορτίου (load factor) φ :

$$\varphi = \frac{E}{vB} \quad (5.4)$$

Ο συντελεστής φορτίου εκφράζει την αναλογία του εφαρμοζόμενου E προς το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο vB .

Αντικαθιστώντας την πυκνότητα ρεύματος στην (5.1) με το νόμο του Ohm (5.2) και λαμβάνοντας υπόψη ότι το επαγόμενο ηλεκτρικό πεδίο δρα αντίθετα στο εφαρμοζόμενο, τότε η συνολική ηλεκτρομαγνητική ώθηση F μπορεί να εκφραστεί ως:

$$F = \sigma v B^2 (\varphi - 1) V \quad (5.5)$$

Εδώ με το σύμβολο V δηλώνεται ο όγκος του αγωγού.

Έτσι, για μέγιστη ιδανική απόδοση ($\eta = \varphi = 1$), η επιτεύξιμη ώθηση είναι μηδέν. Ωστόσο, για την προώθηση ενός σκάφους, απαιτείται η συνήθως μη μηδενική συνολική υδροδυναμική αντίσταση D να

εξισορροπείται από την ώθηση. Σε μια πρόχειρη εκτίμηση, η συνολική αντίσταση στις τυρβώδεις ροές είναι ανάλογη με το τετράγωνο της ταχύτητας ροής: $D = kv^2$. Λαμβάνοντας υπόψη την ισότητα $D = F$ και τις σχέσεις (5.3) και (5.5), παίρνουμε για την ιδανική ηλεκτρική απόδοση την σχέση:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{kv}{\sigma VB^2}} \quad (5.6)$$

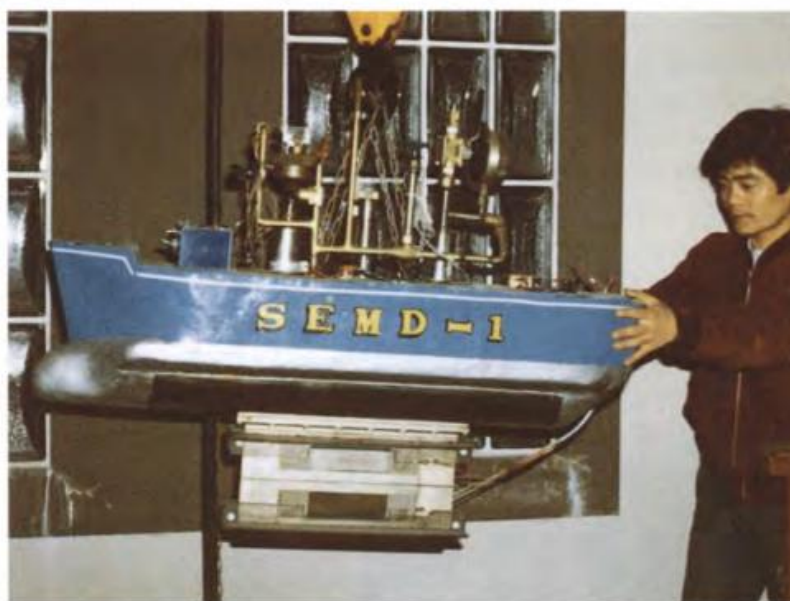
Για να μεγιστοποιηθεί η απόδοση σε μια δεδομένη ταχύτητα v , το γινόμενο $V \cdot B^2$ θα πρέπει επομένως να επιλέγεται όσο το δυνατόν μεγαλύτερο. Αυτό είχε γίνει αντιληπτό αρκετά νωρίς. Λόγω της εμφανούς ανάγκης για υψηλά μαγνητικά πεδία, ήδη από το 1963 έχει προταθεί η χρήση υπεραγωγίων μαγνητών.

Παρόμοιες παρατηρήσεις μπορούν να γίνουν για μεθόδους εξωτερικής αγωγίμης πρόωσης. Το βασικό συμπέρασμα είναι πάντα η ανάγκη ανάπτυξης της υψηλότερης δυνατής μαγνητικής επαγωγής στο μεγαλύτερο διαθέσιμο όγκο.

Οι επαγωγικές διευθετήσεις έχουν επίσης διερευνηθεί από πολύ νωρίς και στις έρευνες αυτές μελετήθηκε η σύζευξη των ηλεκτρομαγνητικών και των υδροδυναμικών μερών του προβλήματος. Γενικά, η πρακτική εφαρμογή της επαγωγικής προσέγγισης περιορίζεται από το γεγονός ότι οι υπεραγωγοί μαγνήτες που παρέχουν ένα εναλλασσόμενο μαγνητικό πεδίο δεν είναι εύκολα διαθέσιμοι, κυρίως γιατί απαιτούνται χαμηλές θερμοκρασίες για τη διατήρηση των υλικών στην υπεραγωγίμη κατάσταση. Επομένως, η μέγιστη ένταση του μαγνητικού πεδίου και κατά συνέπεια η απόδοση είναι αρκετά περιορισμένη. Ωστόσο, προτάθηκε και πραγματοποιήθηκε πειραματικά μια έξυπνη προσέγγιση του προβλήματος που συνίσταται στην περιστροφή του μαγνήτη συμπεριλαμβανομένου του κρουστάτη. Δυστυχώς, η προσπάθεια να γίνει αυτό σε μια πραγματική εφαρμογή μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα που αντισταθμίζουν τα όποια πλεονεκτήματα.

Ο Saji και οι συνεργάτες του κατασκεύασαν δύο μοντέλα πλοίων, τα SEMD-1 και ST-500, με υπεραγωγίμους μαγνήτες στη δεκαετία του 1970. Και στις δύο περιπτώσεις, οι προωθητήρες ήταν εξωτερικού αγωγίμου τύπου. Το SEMD-1 που δοκιμάστηκε το 1976 είχε έναν σχετικά ογκώδη μαγνήτη μήκους 0,6 μέτρων με μέγιστη μαγνητική

επαγωγή περίπου 1T. Ο μαγνήτης ήταν τοποθετημένος κάτω από το κύτος του σκάφους. Τα πειράματα έδειξαν μέγιστη απόδοση μόλις 0,1%.



Σχήμα 5.5 Το υπεραγώγιμο MHD προώθησης μοντέλο πλοίου SEMD-1 [11].

Το 1979 κατασκευάστηκε το μοντέλο ST-500 με έναν μαγνήτη μέγιστης επαγωγής 2T, ο οποίος ενσωματώνεται ομαλά στο κύτος του σκάφους. Σε δοκιμές δεξαμενής ρυμούλκησης επιτεύχθηκε μέγιστη ταχύτητα 0,6 m/s με συνολική ώθηση 15 N.

Ενώ οι προωθητήρες εξωτερικού αγωγίου τύπου έχουν διερευνηθεί σε βάθος κυρίως αριθμητικά, η έρευνα στις δεκαετίες του 1980 και του 1990 επικεντρώθηκε στην εσωτερική αγωγή πρόωση. Αυτός ο τύπος προτιμήθηκε επειδή επιτρέπει μεγάλους όγκους προωθητή με σχετικά ομοιογενείς κατανομές ηλεκτρομαγνητικών πεδίων.



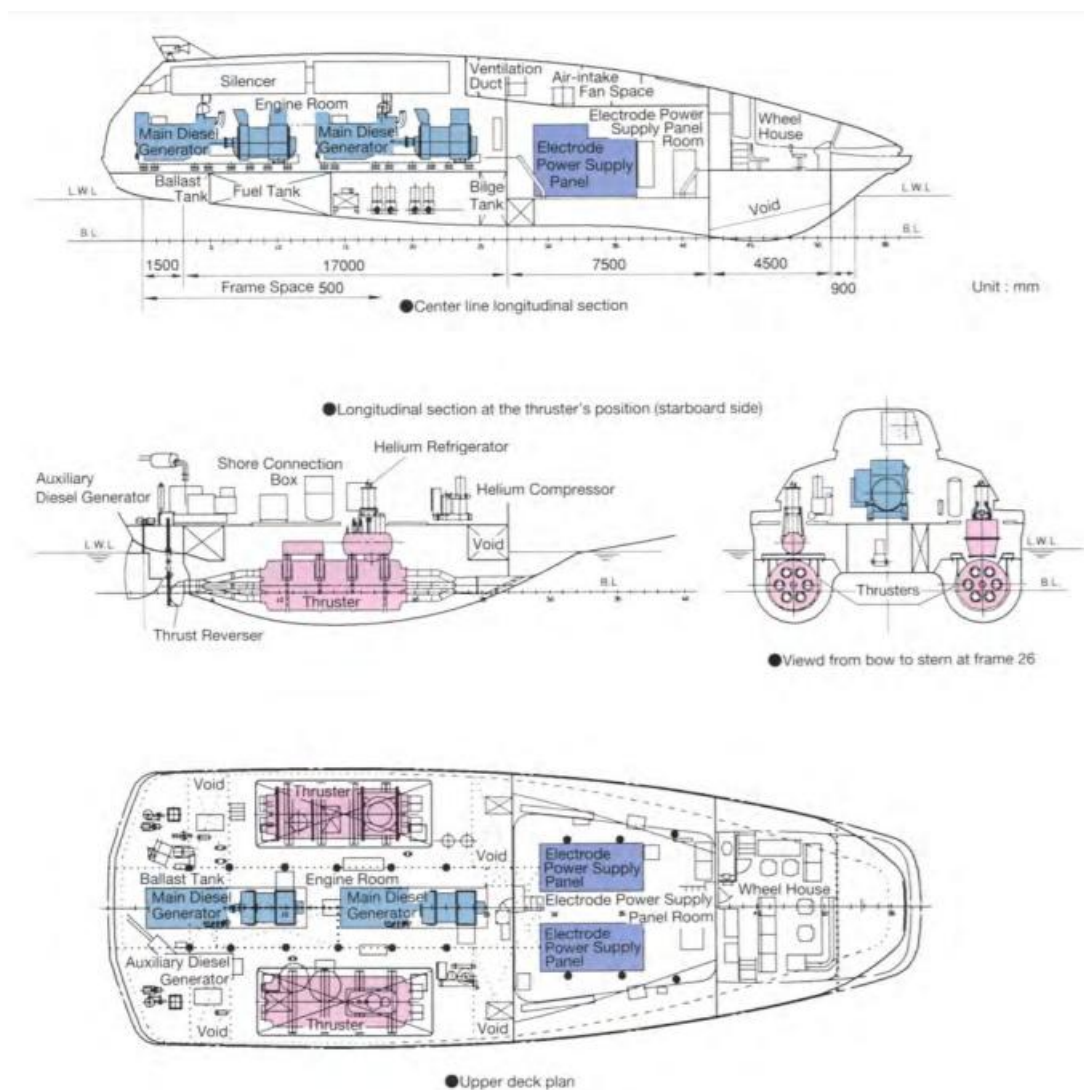
Σχήμα 5.6 Το υπεραγώγιμο MHD προώθησης μοντέλο πλοίου ST-500 [11].



Σχήμα 5.7 Το YAMATO-1 στον κόλπο του Kobe στην Ιαπωνία το 1992 [11].

Το πιο αξιοσημείωτο επίτευγμα σε αυτόν τον τομέα ήταν χωρίς αμφιβολία η επιτυχημένη θαλάσσια δοκιμή του YAMATO-1 το 1992, ένα πλοίο μήκους 30 μέτρων με εκτόπισμα 185 τόνων που προωθείται από δύο ηλεκτρομαγνητικά ωστήρια με μέση μαγνητική επαγωγή 4T τα

ποία παρέχουν ώθηση 8000N το καθένα. Το YAMATO-1 έφτασε σε τελική ταχύτητα 6,6 κόμβων και μέγιστη ηλεκτρική απόδοση 1,4%.



Σχήμα 5.8 Η δομή του υπεραγώγιμου πειραματικού πλοίου YAMATO-1 [11].

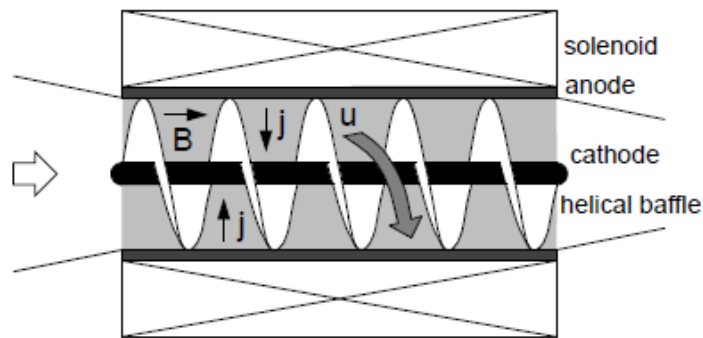
Έχουν αναφερθεί σημαντικά υψηλότερες αποδόσεις σε πειράματα στο Naval Undersea Warfare Center (NUWC) και στο Argonne national Laboratory (ANL) στις ΗΠΑ, όπου ηλεκτρομαγνητικοί προωθητές ενσωματώθηκαν σε κλειστούς βρόχους θαλασσινού νερού. Αναφέρθηκε μία μέγιστη απόδοση περίπου 2,7% για μαγνητική επαγωγή 3,3 T και συντελεστή φορτίου, ϕ , περίπου 20. Επίσης αναφέρθηκε ότι η απόδοση θα μπορούσε να αυξηθεί περαιτέρω σε σχεδόν 10% για έναν μαγνήτη 6T στο NUWC και σε ιδιαίτερα υψηλές τιμές, περίπου 38%, για πειράματα

με μαγνήτη 6T στο ANL. Ωστόσο, αυτή η εντυπωσιακή συσκευή είχε βάρος μεγαλύτερο από 173 τόνους.

Για την απλή διάταξη σταυρωτού πεδίου που σκιαγραφείται στο σχήμα 5.4 και χρησιμοποιήθηκε σε μια τροποποιημένη μορφή για τους προωθητές του YAMATO-1 και στα πειράματα στο NUWC και στο ANL, είναι απαραίτητη η χρήση υπεραγώγιμων διπολικών μαγνητών. Αυτού του είδους οι μαγνήτες απαιτούν τεράστια δομική ενίσχυση για να αντέξουν τις πολύ ισχυρές μαγνητικές δυνάμεις, με αποτέλεσμα βαριές κατασκευές και σχετικά χαμηλές μέγιστες τιμές έντασης μαγνητικού πεδίου.

Γενικά, τα υπεραγώγιμα σωληνοειδή πηνία επιτρέπουν χαμηλότερο βάρος και υψηλότερη μέγιστη ένταση πεδίου από τους διπολικούς μαγνήτες. Επομένως οι εξελίξεις των προωθητηρίων επικεντρώθηκαν στη χρήση σωληνοειδών. Ωστόσο, το αξονικό μαγνητικό πεδίο απαιτεί μια ειδική διάταξη ηλεκτροδίων και διαφραγμάτων που σχηματίζουν έναν λεγόμενο «ελικοειδή προωθητή» όπως προτάθηκε από τους ερευνητές το 1991. Ωστόσο, η αύξηση της ηλεκτρικής απόδοσης λόγω της υψηλότερης έντασης μαγνητικού πεδίου συνοδεύεται από αύξηση των υδροδυναμικών απωλειών στον προωθητή που εισάγονται από το διάφραγμα και τις άλλες πλάκες καθοδήγησης. Το 1995, οι Lin και Gilbert χρησιμοποίησαν έναν ελικοειδή προωθητή μαγνητικής επαγωγής 12T σε κλειστό βρόχο θαλασσινού νερού και μετρήθηκε μία ηλεκτρική απόδοση σχεδόν 20%. Το 1998, Κινέζοι ερευνητές χειρίστηκαν ένα μοντέλο πλοίου HEMS-1 μήκους 3,5 μέτρων με εκτόπισμα 1 τόνο σε πισίνα θαλασσινού νερού. Εξοπλισμένο με ελικοειδή προωθητή με μαγνητική επαγωγή 5T, έδωσε μέγιστη ταχύτητα 0,68 m/s.

Το 1999 ένας ελικοειδής προωθητής βασισμένος σε σωληνοειδές μαγνητικής επαγωγής 14T κατασκευάστηκε και δοκιμάστηκε από μία ερευνητική ομάδα Κινέζων και Ιαπώνων σε έναν κλειστό βρόχο θαλασσινού νερού. Αναφέρθηκαν ιδανικές αποδόσεις που ξεπερνούν το 60%, ενώ η μέγιστη απόδοση συμπεριλαμβανομένων όλων των απωλειών ήταν 13% για συντελεστή φορτίου ίσο με 2,6.



Σχήμα 5.9 Σχηματική απεικόνιση ενός ελικοειδή προωθητή [10].

Εν τω μεταξύ, σε παγκόσμιο επίπεδο η ερευνητική δραστηριότητα πάνω στην MHD-προώθηση μειώθηκε γιατί οι μαγνητικές επαγωγές που είναι προσιτές επί του παρόντος με τους υπάρχοντες υπεραγωγίμους μαγνήτες επιτρέπουν αποδόσεις προωθητήρα, οι οποίες είναι πολύ χαμηλότερες από αυτές των ανταγωνιστικών μεθόδων πρόωσης. Αυτό το πρόβλημα υπερβαίνει προς το παρόν όλα τα προβλεπόμενα πλεονεκτήματα. Ωστόσο, με γνώμονα την απλότητα της προσέγγισης και της κατασκευής, η MHD-προώθηση συνεχίζει να είναι μια ελκυστική εναλλακτική λύση.

5.3 ΜΕΙΩΣΗ ΟΠΙΣΘΕΛΚΟΥΣΑΣ

Ἡ δυναμική αντίσταση ρευστού μπορεί να είναι διαφορετικής προέλευσης. Ο ηλεκτρομαγνητικός έλεγχος ροής στο θαλασσινό νερό έχει επικεντρωθεί κυρίως στην επιδερμική αντίσταση τριβής (skin friction drag) και σε μικρότερο βαθμό στην αντίσταση πίεσης (pressure drag ή form drag). Η κυματική αντίσταση (wave drag) έχει επίσης αντιμετωπιστεί από τους ερευνητές με κύριο σκοπό την ακύρωση του κρουστικού κύματος σε υπερηχητική πτήση.

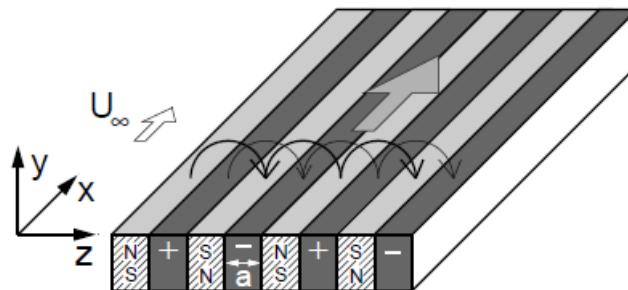
5.3.1 Καθυστέρηση Μετάβασης

Ο Gailitis και ο Lielausis πρότειναν το 1961 να χρησιμοποιηθεί μια διάταξη με λωρίδες ηλεκτροδίων και μαγνητών όπως σκιαγραφείται στο σχήμα 5.10 για να καθυστερήσει τη μετάβαση ενός στρωτού οριακού

στρώματος. Εκτός από την επίπεδη γεωμετρία, οι πηγές του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου είναι παρόμοιες με το σύστημα πρόωσης που κατοχυρώθηκε με δίπλωμα ευρεσιτεχνίας από τον Rice το ίδιο έτος (σχήμα 5.2). Ωστόσο, η ιδέα των Gailitis και Lielausis δεν ήταν η ώθηση της πλάκας με ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις, αλλά η αντιστάθμιση των απωλειών της ροής λόγω του ιξώδους κοντά στο τοίχωμα. Για τη διάταξη ηλεκτροδίου-μαγνήτη στο σχήμα 5.10 ο λόγος των ηλεκτρομαγνητικών προς τις δυνάμεις τριβής, δηλαδή ο αριθμός Hartmann Z , μπορεί να γραφτεί ως

$$Z = \frac{1}{8\pi} \frac{j_0 M_0 a^2}{\rho \nu U_\infty} \quad (5.7)$$

Εδώ το M_0 υποδηλώνει τη μαγνήτιση των μόνιμων μαγνητών, j_0 είναι η εφαρμοζόμενη πυκνότητα του ηλεκτρικού ρεύματος, a το πλάτος των ηλεκτροδίων, ρ η πυκνότητα του ρευστού, ν το κινηματικό του ιξώδες και U_∞ η ταχύτητα της εξωτερικής ροής. Για $Z = 1$, η ανάπτυξη του οριακού στρώματος μπορεί να ανασταλεί.



Σχήμα 5.10 Γεωμετρία λωρίδων ηλεκτροδίων και μαγνητών για δύναμη παράλληλη στο τοίχωμα όπως προτάθηκε από τους Gailitis και Lielausis 1961 [12].

Υποθέτουμε μια ομοιόμορφη κατανομή της πυκνότητας της δύναμης Lorentz στην κατεύθυνση την παράλληλη με το τοίχωμα και εκθετική μείωση με την απόσταση y από το τοίχωμα. Τότε προκύπτει ως λύση του οριακού στρώματος καθώς και των εξισώσεων Navier–Stokes

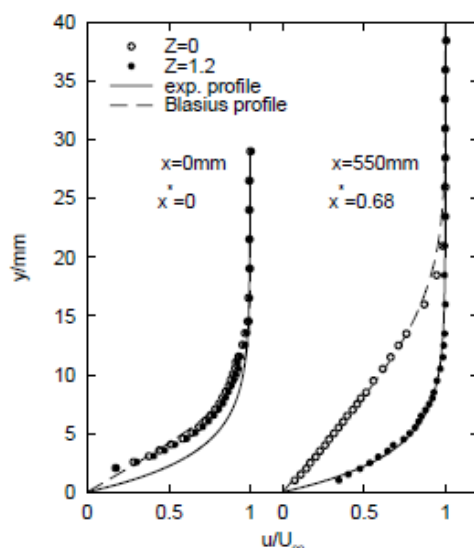
μια εκθετική κατανομή της συνιστώσας u της ταχύτητας που είναι παράλληλη με το τοίχωμα:

$$\frac{u}{U_\infty} = 1 - e^{-\frac{\pi}{a}y} \quad (5.8)$$

Το εκθετικό προφίλ του οριακού στρώματος είναι παρόμοιο με αυτό του οριακού στρώματος ασυμπτωτικό αναρρόφησης και επομένως θα πρέπει να έχει παρόμοια χαρακτηριστικά όσον αφορά τη σταθερότητα, δηλαδή, ένας κρίσιμος αριθμός Reynolds με βάση το πάχος μετατόπισης περίπου $Re_{\delta_{crit}} = 4,7 \times 10^4$ σε σύγκριση με την πολύ χαμηλότερη τιμή $Re_{\delta_{crit}} = 520$ για το οριακό στρώμα Blasius. Η ανάπτυξη ενός εκθετικού προφίλ για μια κατανομή δύναμης:

$$f \sim \exp(-\pi y/a) \text{ και } Z = 1 \quad (5.9)$$

έχει δειχθεί αριθμητικά μέσω της επίλυσης των εξισώσεων του οριακού στρώματος.



Σχήμα 5.11 Ανάπτυξη ενός εκθετικού προφίλ οριακού στρώματος κάτω από την επίδραση της δύναμης Lorentz [10].

Η πειραματική εργασία εκείνη την εποχή περιορίστηκε σε ποιοτικές παρατηρήσεις περιπτώσεων ροής που διαφέρουν σημαντικά από τα οριακά στρώματα μηδενικής κλίσης πίεσης. Ωστόσο, υπάρχουν

κάποια διαθέσιμα πειραματικά στοιχεία. Το σχήμα 5.11 παρουσιάζει μετρήσεις laser-Doppler που δείχνουν πειστικά τον μετασχηματισμό ενός οριακού στρώματος με προφίλ Blasius με $Re_{\delta 1}$ περίπου ίσο με 290 σε ένα εκθετικό προφίλ.

Η καθυστέρηση μετάβασης υπόσχεται τεράστιες δυνατότητες εξοικονόμησης λόγω μείωσης της επιδερμικής τριβής. Συγκρίνοντας την τυπική στρωτή με την τυρβώδη επιδερμική τριβή, αυτή η εξοικονόμηση μπορεί να είναι τόσο μεγάλη ώστε να αντισταθμίζει τις πολύ χαμηλές ηλεκτρικές αποδόσεις η. Ωστόσο, όπως είναι γνωστό, μόνο η γραμμική ευστάθεια του οριακού στρώματος ασυμπτωτικού προφίλ δεν αποτελεί επαρκή προϋπόθεση για την καθυστέρηση μετάβασης. Στην πράξη, πολλές επιπλέον επιδράσεις, π.χ. δεκτικότητα στο περιβάλλον διαταραχής και η επίδραση της πραγματικής κατανομής δύναμης πρέπει να ληφθούν υπόψη. Μέχρι στιγμής, αυτές οι πτυχές του προβλήματος έχουν μόνο εν μέρει αντιμετωπιστεί.

Το 1962 υπολογίστηκαν οι απαιτήσεις ισχύος για τη σταθεροποίηση του οριακού στρώματος με επαγόμενα πεδία και βρέθηκε ότι υπερβαίνουν κατά πολύ την πιθανή εξοικονόμηση. Έως τώρα οι δυνάμεις Lorentz έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο για τροποποιήσεις του μέσου προφίλ ροής. Τεχνικές που δρουν στις διαταραχές (ακύρωση κύματος) προσφέρουν δυνητικά υψηλότερες αποδόσεις, αλλά συνδέονται με εξελιγμένα συστήματα αισθητήρων-ενεργοποιητών.

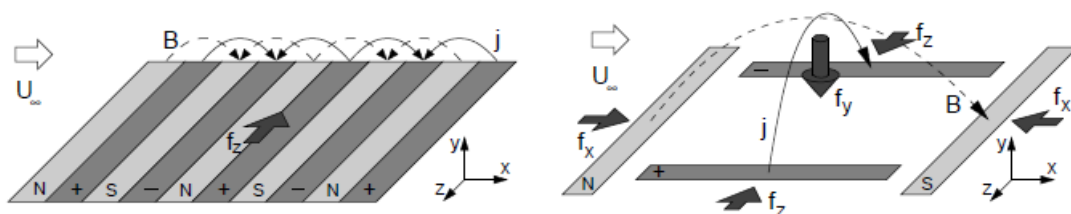
5.3.2 Τυρβώδη Οριακά Στρώματα

Δεδομένου ότι ο έλεγχος μετάβασης περιορίζεται πρακτικά σε αριθμούς Reynolds μήκους $Re_x < 4 \times 10^7$, οι τεχνικές για τη μείωση της επιδερμικής τριβής σε τυρβώδη οριακά στρώματα (turbulent boundary layers, TBL) είναι επιθυμητές σε πολλές περιπτώσεις. Αν και ήδη από το 1970 έχει μελετηθεί η δυνατότητα να περιοριστεί η ανάπτυξη ενός TBL από μία δύναμη Lorentz ομόροπη στη ροή, ήταν μόνο στις αρχές της δεκαετίας του 1990 που ο ηλεκτρομαγνητικός έλεγχος των TBL άρχισε να αποκτά όλο και αυξανόμενο ενδιαφέρον.

Κυρίως τρεις διαφορετικές διαμορφώσεις δυνάμεων έχουν διερευνηθεί κατά σειρά για τον έλεγχο των TBLs:

- ✓ δυνάμεις παράλληλες στο τοίχωμα κατά την κατεύθυνση της ροής
- ✓ δυνάμεις παράλληλες στο τοίχωμα και κάθετες στη ροή
- ✓ δυνάμεις κάθετες στο τοίχωμα.

Έχουν εφαρμοστεί δυνάμεις παράλληλες στο τοίχωμα στην κατεύθυνση του ρεύματος (σχήμα 5.10) σε πολλές πειραματικές αλλά και αριθμητικές μελέτες. Αυτή η διαμόρφωση της δύναμης αυξάνει αντί να μειώσει τη διατμητική τάση του τοιχώματος, επειδή η επιτάχυνση του ρευστού πλησίον του τοιχώματος οδηγεί σε μεγαλύτερη κλίση του προφίλ μέσης ταχύτητας κατά την κατεύθυνση της ροής. Ωστόσο, το κέρδος ορμής λόγω της δύναμης Lorentz ξεπερνά την αύξηση της τριβής αντίστασης. Ενώ η μέση ταχύτητα και η επιδερμική τριβή αυξάνονται κοντά στο τοίχωμα, οι κυμαινόμενες συνιστώσες τους αποσβένονται για υψηλότερη ορμή εισόδου. Η δυνατότητα ενός TBL σταθερού πάχους με χρήση δυνάμεων κατά την κατεύθυνση του ρεύματος έχει επαληθευτεί πειραματικά.



Σχήμα 5.12 Διατάξεις μαγνητών και ηλεκτροδίων για ακτινικές δυνάμεις (αριστερά) και δυνάμεις κάθετες στο τοίχωμα (δεξιά) [10].

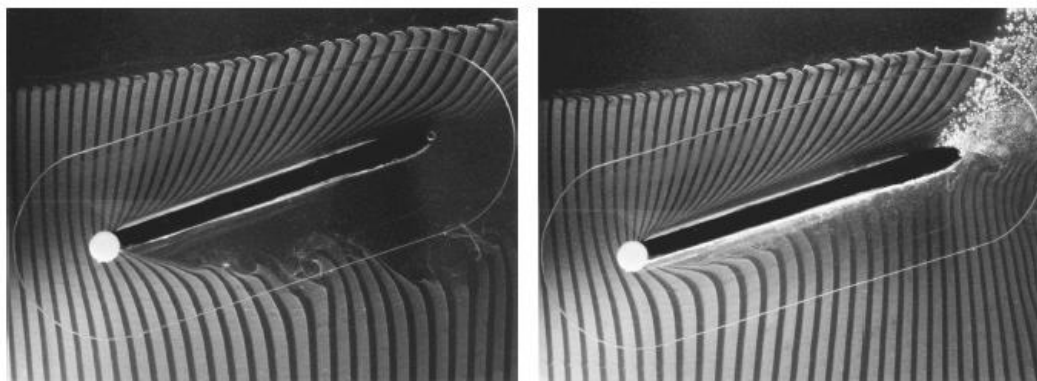
Πολλοί ερευνητές χρησιμοποίησαν δυνάμεις κάθετες στο τοίχωμα και εξαρτώμενες από το χρόνο. Έχουν αναφερθεί αρκετά επιτυχημένα πειράματα με ένα πλήθος ηλεκτρομαγνητικών ενεργοποιητών (πλακίδια) που δημιουργούν μείωση της τυρβώδους επιδερμικής τριβής κατά 55% σε μία περίπτωση, ακόμη και πάνω από 90% σε άλλη περίπτωση καθώς και συνολική μείωση της αντίστασης περισσότερο από 50%.

Ο φυσικός μηχανισμός πίσω από αυτή τη μείωση της οπισθέλκουσας υποτίθεται ότι είναι μια συνολική αναδιοργάνωση του οριακού στρώματος σε περιστροφικές περιοδικές δομές. Πρέπει πάντως να επισημανθεί ότι άλλες πειραματικές ερευνητικές ομάδες προσπάθησαν αλλά δεν μπόρεσαν να αναπαράγουν τα παραπάνω αποτελέσματα. Είναι γενικά αποδεκτό ότι η πραγματική κατανομή δύναμης που παράγεται από τα ηλεκτρομαγνητικά πλακίδια είναι αρκετά περίπλοκη και μπορεί να διαδραματίσει κρίσιμο ρόλο στα πειράματα αυτού του είδους.

5.4 ΑΝΥΨΩΣΗ ΚΑΙ ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΕΛΙΓΜΩΝ

Εκτός από τη μείωση της οπισθέλκουσας, υπάρχουν και άλλοι στόχοι στον έλεγχο ροής. Ένας πολύ σημαντικός στόχος είναι η πρόληψη του διαχωρισμού προκειμένου να δημιουργηθεί μία συγκεκριμένη τιμή άντωσης (lift) που θα χρησιμοποιηθεί είτε για την ικανότητα εκτέλεσης ελιγμών είτε για την επίτευξη της ευστάθειας θαλάσσιων σκαφών. Για αυτές τις εφαρμογές η ενεργειακή απόδοση δεν είναι πάντα ο πρωταρχικός στόχος. Δίνεται μάλλον έμφαση στη βιωσιμότητα μιας συγκεκριμένης αύξησης της άντωσης σε σύγκριση με την μη ελεγχόμενη περίπτωση.

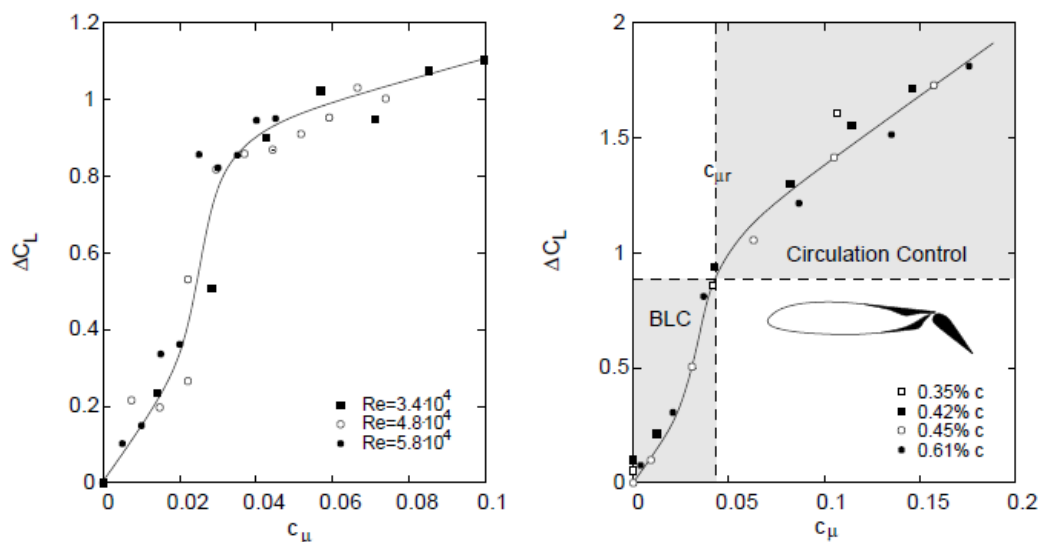
Η καταστολή του διαχωρισμού στην πλευρά της αναρρόφησης των κεκλιμένων υδροπτερυγών επιτυγχάνεται εύκολα από μια δύναμη παράλληλη στο τοίχωμα που ενεργεί κατά την κατεύθυνση της ροής. Οι απεικονίσεις ροής στο σχήμα 5.13 δείχνουν έλεγχο διαχωρισμού σε περίπτωση επίπεδης πλάκας με κλίση 18° σε αριθμό Reynolds, $Re = 1,2 \times 10^4$. Τα ηλεκτρόδια και οι μαγνήτες κατανέμονται πρακτικά σχεδόν σε ολόκληρο το μήκος, οδηγώντας σε ομοιόμορφη επιτάχυνση της ροής του οριακού στρώματος κατά μήκος της πλάκας.



Σχήμα 5.13 Διαχωρισμένη ροή στην πλευρά της αναρρόφησης μιας κεκλιμένης επίπεδης πλάκας (αριστερά). Επανασυνδεδεμένη ροή που οφείλεται σε δύναμη Lorentz παράλληλη στο τοίχωμα παράλληλο κατά την κατεύθυνση του ρεύματος (δεξιά) [10].

Η επανασυνδεμένη ροή φαίνεται στο δεξιό μέρος του σχήματος 5.13. Ενώ από τη μία πλευρά μειώνει την οπισθέλκουσα, από την άλλη πλευρά αποκαθιστά την άντωση της πλάκας.

Το σχήμα 5.14 το δείχνει αυτό με μετρήσεις του συντελεστή άντωσης C_L σε μία υδροπτέρυγα. Σε σταθερή γωνία προσβολής 17° , η ροή στην πλευρά της αναρρόφησης είναι ήδη διαχωρισμένη σε χαμηλούς αριθμούς Reynolds $3,4 \cdot 10^4 \dots 5,8 \cdot 10^4$. Η επίδραση της δύναμης Lorentz χαρακτηρίζεται από έναν συντελεστή ηλεκτρομαγνητικής ορμής c_μ . Ο συντελεστής c_μ συνδέει την συνολική ηλεκτρομαγνητική ορμή εισόδου με τη δυναμική πίεση και έχει αποδειχθεί ότι επιτρέπει την άμεση σύγκριση των εναλλακτικών μεθόδων ελέγχου.



Σχήμα 5.14 Αύξηση της άντωσης έναντι του συντελεστή ορμής για ηλεκτρομαγνητικά ελεγχόμενη υδροπτέρυγα στις 17° (αριστερά) και για σταθερό φύσημα πάνω από ένα πτερύγιο με κλίση 45° (δεξιά) [10].

Δύο καθεστώτα ελέγχου μπορούν να διακριθούν στο σχήμα 5.14: σε χαμηλές τιμές του συντελεστή ορμής, το οριακό στρώμα επανασυνδέεται σταδιακά στην επιφάνεια, μια διαδικασία που οδηγεί σε απότομη αύξηση της άντωσης. Πάνω από μία ορισμένη τιμή του συντελεστή ορμής, $c_{\mu cr}$, που είναι απαραίτητη για πλήρη επανασύνδεση, μπορεί να παρατηρηθεί περαιτέρω αύξηση της άντωσης που είναι πιο αδύναμη και ανάλογη με την τετραγωνική ρίζα του c_μ . Αυτά τα δύο καθεστώτα έχουν παρατηρηθεί από πολύ νωρίς στον έλεγχο διαχωρισμού

και ονομάζονται "έλεγχος οριακού στρώματος" (boundary layer control, BLC) και από κάποιους ερευνητές «έλεγχος κυκλοφορίας» (circulation control).

Η προσεκτική σύγκριση των πειραματικών αποτελεσμάτων αποκαλύπτει ότι οι απαιτήσεις ισχύος για τον αρχικό σχεδιασμό που βασίζεται σε συμβατικούς μόνιμους μαγνήτες μπορεί να αποτρέψει την εφαρμογή σε θαλάσσια σκάφη.

Μπορούν να χρησιμοποιηθούν δυνάμεις Lorentz περιοδικές στον χρόνο για να διεγείρουν τη διαχωρισμένη ροή. Αυτό πράγματι μειώνει την απαραίτητη ορμή εισόδου για την ανάκτηση της άντωσης της προσαρτημένης ροής κατά περισσότερο από μια τάξη μεγέθους. Ωστόσο, για την αύξηση της μέγιστης άντωσης απαιτούνται συντελεστές ορμής συγκρίσιμοι με εκείνους που απαιτούνται με σταθερές ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις. Παρόλα αυτά, οι ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις έχουν αποδειχθεί ότι είναι ένα ευέλικτο εργαλείο για τη μελέτη της περιοδικής διέγερσης διαχωρισμένων ροών. Για παράδειγμα έχει αποδειχθεί ότι χρησιμοποιώντας διαφορετικές κυματομορφές διέγερσης, η απόδοση αυξάνεται κατά 70% σε σταθερές ορμές εισόδου.

6. ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΥΝΤΗΞΗ

6.1 ΓΕΝΙΚΑ

Η έρευνα πάνω στην πυρηνική σύντηξη με σκοπό την παροχή μιας επιστημονικής βάσης για την παραγωγή ενέργειας σύντηξης διεξάγεται εδώ και 50 χρόνια. Η παγκόσμια έρευνα για τη σύντηξη κατευθύνεται τελικά στην κατασκευή και επίδειξη ενός πειραματικού σταθμού παραγωγής ενέργειας σύντηξης και σκοπεύει μακροπρόθεσμα να παίξει σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ενέργειας στο τέλος αυτού του αιώνα. Η έρευνα για τη σύντηξη είναι ένας συνδυασμός που περιλαμβάνει:

- 1) την ανάπτυξη μιας επιστημονικής βάσης για τον περιορισμό του πλάσματος και την ενεργοποίηση τεχνολογιών για τη σύντηξη.
- 2) δοκιμές στη φυσική του πλάσματος καθώς και τεχνολογιών σχετικών με τη σύντηξη με σκοπό την παραγωγή ενέργειας
- 3) την ολοκληρωμένη επίδειξη παραγωγής ισχύος σύντηξης.

Η συνεχής αλληλεπίδραση μεταξύ αυτών των τριών τομέων έρευνας είναι θεμελιώδης για την επιτυχία της έρευνας σύντηξης.

6.2 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΤΗΞΗΣ

Το ζήτημα της παραγωγής ενέργειας με τη χρήση αντιδράσεων σύντηξης εμφανίστηκε στις αρχές του 20ου αιώνα όταν προτάθηκε η θεωρία της σχετικότητας και της κβαντικής μηχανικής. Το 1942, ο εφευρέτης του αντιδραστήρα σχάσης, Ιταλός φυσικός Enrico Fermi (1901–1954), ενώ γευμάτιζε στο Columbia Faculty Club, πρότεινε στον Edward Teller (1908–2003) τη δυνατότητα καύσης δευτερίου για την ανάπτυξη μιας μεγάλης πηγής ενέργειας. Με βάση την πρότασή του, ο Teller έκανε διάφορους υπολογισμούς και διαπίστωσε ότι η σύντηξη μεταξύ δευτερίου (D) και τριτίου (T) είναι μια πιθανότητα. Το τρίτιο και το δευτέριο αντιδρούν με σχετικά χαμηλή ενέργεια, δημιουργώντας Ήλιο

και ένα νετρόνιο. Δεδομένου ότι το ήλιο έχει υψηλότερη ενέργεια σύνδεσης, μπορούμε να δημιουργήσουμε μια τεράστια ποσότητα ενέργειας. Η ενέργεια σύνδεσης είναι η συνολική ενέργεια των πρωτονίων και νετρονίων ενός πυρήνα.

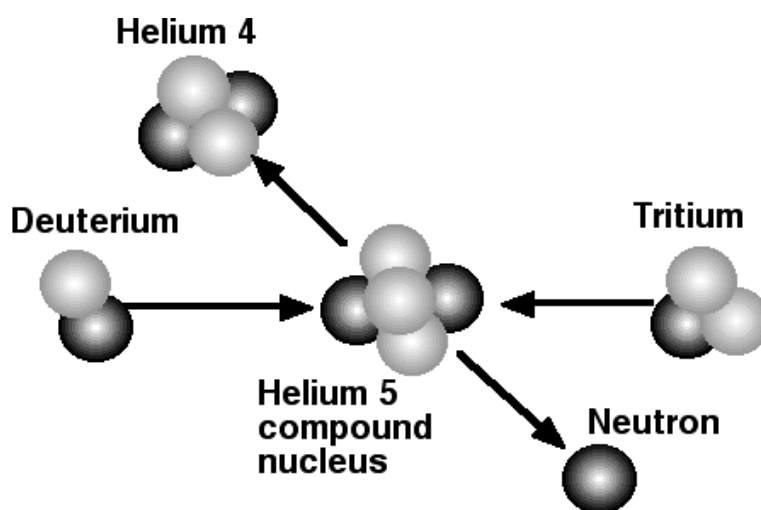
Ο πυρήνας του δευτερίου αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο. Μεταξύ των συνδυασμών των δύο πυρήνων, p-p, n-n και p-n, μια δεσμευμένη κατάσταση είναι δυνατή μόνο για το p-n, το οποίο είναι το δευτέριο. Το δευτέριο ανακαλύφθηκε το 1932 από τον Αμερικανό χημικό H.C. Urey ο οποίος έδειξε ότι ένα στα 7000 άτομα υδρογόνου είναι δευτέριο.

Το υδρογόνο με μαζικό αριθμό 3 ονομάζεται τρίτιο. Η λέξη «τρίτιο» προέρχεται από την ελληνική λέξη που σημαίνει «τρίτος». Ο πυρήνας του τριτίου αποτελείται από ένα πρωτόνιο και δύο νετρόνια. Το τρίτιο είναι ένα ασταθές ισότοπο και διασπάται σε ήλιο-3 εκπέμποντας ένα ηλεκτρόνιο υψηλής ενέργειας και ένα νεutrino. Η αντίδραση αυτή ονομάζεται βήτα διάσπαση και έχει χρόνο ημιζωής 12,26 χρόνια. Το τρίτιο παρήχθη για πρώτη φορά στο εργαστήριο από τον Αυστραλό φυσικό M. Oliphant (1901–2000) το 1934 με σύγκρουση δευτερίου.

Το τρίτιο ως καύσιμο για τη σύντηξη DT παράγεται από την πυρηνική αντίδραση των νετρονίων με το λίθιο (Li). Το λίθιο έχει δύο ισότοπα (${}^6\text{Li}$ και ${}^7\text{Li}$) και η περιεκτικότητα των ${}^6\text{Li}$ και ${}^7\text{Li}$ στο φυσικό Li είναι 7,4% και 92,4%, αντίστοιχα. Η ποσότητα του λιθίου στο θαλασσινό νερό είναι περίπου 233 δισεκατομμύρια τόνοι και μπορεί να θεωρηθεί άπειρος πόρος εάν δημιουργηθούν τεχνολογίες χαμηλού κόστους για την ανάκτηση λιθίου από το θαλασσινό νερό.

Το ήλιο (He) είναι ένα στοιχείο με δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια και ο μαζικός του αριθμός είναι 4. Η προέλευση του ονόματος του ηλίου είναι η ελληνική λέξη Ήλιος. Κατά τη διάρκεια έκλειψης Ηλίου που παρατηρήθηκε στην Ινδία στις 18 Αυγούστου 1868, ο Βρετανός αστρονόμος J.N. Lockyer (1836–1920) παρατήρησε το ηλιακό στέμμα και ανακάλυψε ένα νέο φάσμα εκπομπών. Θεώρησε ότι η εκπομπή προήλθε από ένα άγνωστο στοιχείο, το οποίο ονόμασε «ήλιο». Η ενέργεια σύνδεσης του ${}^4\text{He}$ είναι εξαιρετικά μεγάλη σε σύγκριση με αυτές του υδρογόνου και του λιθίου. Η τόσο μεγάλη ενέργεια σύνδεσης για τον συγκεκριμένο πυρήνα εξηγείται από το πυρηνικό «μοντέλο των φλοιών».

Η αντίδραση του δευτερίου με το τρίτιο οδηγεί αρχικά στον σχηματισμό ενός πυρήνα ${}^5\text{Li}$, ο οποίος στη συνέχεια διασπάται σε ${}^4\text{Li}$ και νετρόνιο (n). Η αντίδραση φαίνεται σχηματικά στο σχήμα 6.1.



Σχήμα 6.1 Σχηματική απεικόνιση της αντίδρασης σύντηξης του δευτερίου και του τριτίου [14].

6.3 ΜΑΓΝΗΤΙΚΟΣ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΟΣ

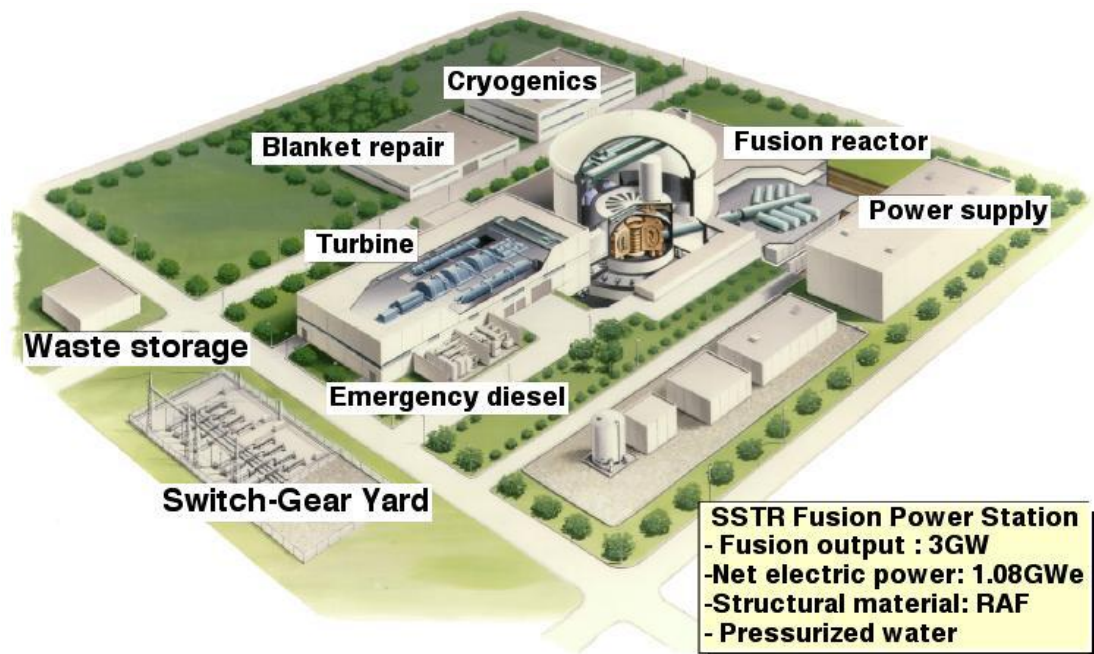
Οι αντιδράσεις σύντηξης συνδυάζουν ελαφρούς ατομικούς πυρήνες όπως το υδρογόνο για να σχηματίσουν βαρύτερους όπως το ήλιο, παράγοντας ενέργεια. Για να ξεπεραστεί η ηλεκτροστατική άπωση μεταξύ των θετικά φορτισμένων πυρήνων, πρέπει να έχουν θερμοκρασία δεκάδων εκατομμυρίων βαθμών, δημιουργώντας ένα πλάσμα. Επιπλέον, το πλάσμα πρέπει να βρίσκεται σε επαρκή πυκνότητα για αρκετό χρόνο. Αυτό σημαίνει ότι πρέπει να περιοριστεί σε μικρό χώρο ώστε η πυκνότητα των σωματιδίων του πλάσματος να είναι μεγάλη.

Στον αντιδραστήρα φυσικής σύντηξης, τον Ήλιο, ένα πυκνό και καυτό πλάσμα, περιορίζεται λόγω του βαρυτικού πεδίου. Το χαρακτηριστικό της βαρυτικής δύναμης είναι ότι είναι ένα κεντρικό πεδίο δύναμης και η δύναμη δρα προς την κατεύθυνση των δυναμικών γραμμών, προς το κέντρο του Ήλιου. Για το λόγο αυτό, η «φιάλη περιορισμού» όπως λέγεται, δηλαδή ο χώρος στον οποίο περιορίζεται το πλάσμα έχει τοπολογία σφαίρας.

Στον ανθρωπογενή αντιδραστήρα σύντηξης ένα πλάσμα υψηλής θερμοκρασίας περιορίζεται παγιδεύοντας φορτισμένα σωματίδια με τη δύναμη Lorentz μέσα σε ένα μαγνητικό πεδίο για να συντηρηθεί η αντίδραση σε ένα μικρό χώρο που είναι το 1 προς 100 εκατομμύρια του Ήλιου. Το χαρακτηριστικό της μαγνητικής δύναμης είναι ότι δρα στην κάθετη κατεύθυνση προς τη δυναμική γραμμή. Για το λόγο αυτό, η φιάλη περιορισμού έχει μια τοπολογία τόρου.

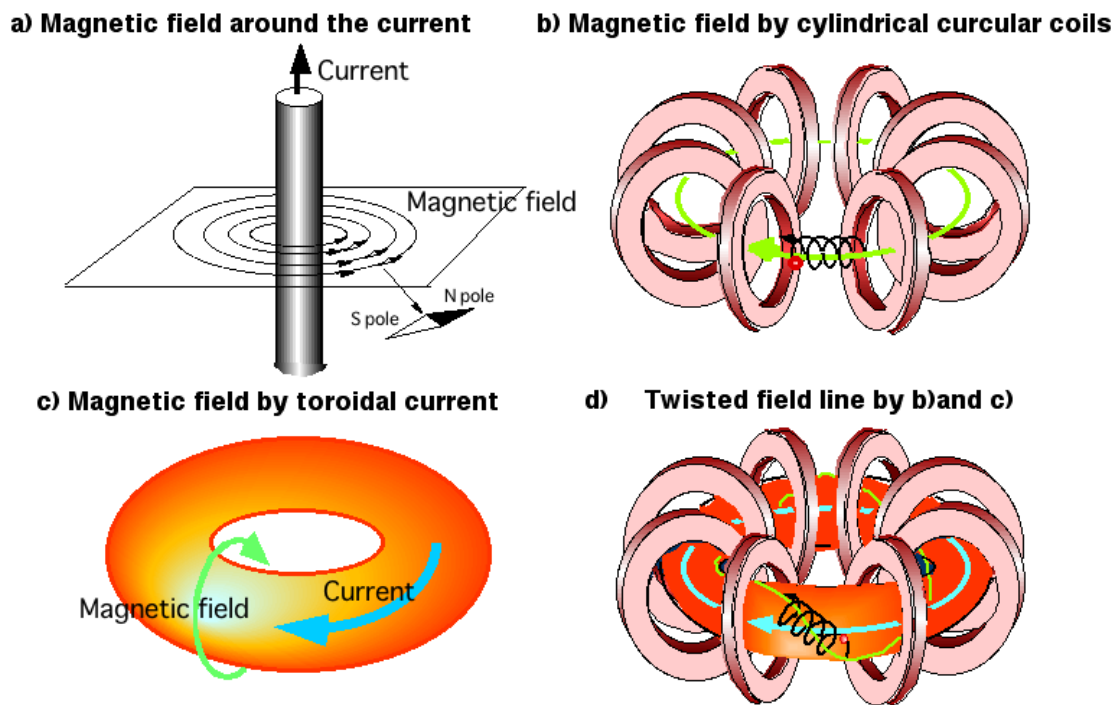
6.4 ΑΝΤΙΔΡΑΣΤΗΡΑΣ ΤΟΚΑΜΑΚ

Ο αντιδραστήρας Tokamak έχει τη συμμετρία του τόρου και αυτή η συμμετρία παρέχει στιβαρότητα στη διατήρηση μιας επιφανειακής ροής έναντι διαφόρων παραμετρικών αλλαγών. Γι αυτό το λόγο, η διαμόρφωση αυτή είναι πρωτοπόρα στην έρευνα σύντηξης. Ο Tokamak παρήγαγε σημαντική ισχύ σύντηξης (>10 MW), ενώ άλλα πειράματα σύντηξης μαγνητικού περιορισμού παρέμειναν πολύ χαμηλότερα. Η γεωμετρική συμμετρία παρέχει καλό περιορισμό των ταχέως κινούμενων φορτισμένων σωματιδίων.



Σχήμα 6.2 Πανοραμική άποψη της διάταξης της εγκατάστασης SSTR [14].

Ωστόσο, αυτή η διαμόρφωση απαιτεί ένα καθαρό δακτυλιοειδές ρεύμα πλάσματος, το οποίο οδηγείται κυρίως με επαγωγή. Αυτή η μέθοδος είναι αρκετά αποτελεσματική αφού η ηλεκτρική αγωγιμότητα ενός πλάσματος με θερμοκρασία που αντιστοιχεί σε ενέργεια 10 keV ($1\text{eV}=1,6\cdot 10^{-19}\text{J}$) είναι 20 φορές υψηλότερη από αυτή του Cu σε θερμοκρασία δωματίου. Στο σχήμα 6.2 φαίνεται η διάταξη της εγκατάστασης SSTR (Steady State Tokamak Reactor). Η διαμόρφωση Tokamak φαίνεται στο σχήμα 6.3.



Σχήμα 6.3 Δημιουργία της διαμόρφωσης Tokamak: (α) Εάν το ρεύμα ρέει, δημιουργείται ένα μαγνητικό πεδίο γύρω από το ρεύμα. (β) Η διάταξη κυκλικών πηνίων γύρω από τον δακτύλιο και η ενεργοποίηση του πηνίου παράγει ένα μαγνητικό πεδίο στην τοροειδή διεύθυνση. (γ) Το τοροειδές ρεύμα πλάσματος παράγει ένα μαγνητικό πεδίο που συνδέει τον τόρο. (δ) Ο συνδυασμός των (β) και (γ) δημιουργεί αυτές τις στριμμένες γραμμές μαγνητικού πεδίου και ονομάζεται Tokamak [14].

7. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μαγνητοϋδροδυναμική (MHD) είναι η μελέτη της δυναμικής των ηλεκτρικά αγώγιμων ρευστών. Η θεμελιώδης ιδέα πίσω από την MHD είναι ότι το μαγνητικό πεδίο μπορεί να προκαλέσει την ροή ηλεκτρικού ρεύματος σε ένα κινούμενο αγώγιμο ρευστό, το οποίο με τη σειρά του δημιουργεί δύναμη στο ρευστό και επίσης δημιουργεί γύρω του μαγνητικό πεδίο το οποίο αλλάζει την τιμή του συνολικού μαγνητικού πεδίου. Η MHD έχει ήδη πολλές εφαρμογές σε διάφορα τεχνολογικά πεδία. Επίσης, εξετάζεται η δυνατότητα χρήσης της σε όλο και περισσότερες εφαρμογές.

Στη γεννήτρια MHD το πλεονέκτημα ότι δεν υπάρχουν κινούμενα μέρη επιτρέπει την εργασία σε υψηλότερες θερμοκρασίες από μια συμβατική διάταξη μετατροπής ενέργειας. Μια γεννήτρια MHD είναι δυνατό να εργαστεί σε θερμοκρασία περίπου 3000K, και σε αυτές τις θερμοκρασίες η μέγιστη θεωρητική απόδοση θα ήταν κοντά στο 90%. Στο εγγύς μέλλον τα MHD συστήματα παραγωγής ενέργειας, θα μπορούν να αυξήσουν την απόδοση της εγκατάστασης μπορεί να αυξηθεί αυξάνοντας τη θερμοκρασία εργασίας, χωρίς να χρησιμοποιεί συμπυκνωτή ατμού για τη μείωση της θερμότητας των καυσαερίων και επίσης θα προσφέρει την δυνατότητα κατασκευής συστήματος ανακυκλοφορίας της ενέργειας.

Προφανώς η ουσία του ηλεκτρομαγνητικού ελέγχου ροής καθώς και της πρόωσης μέσα σε ρευστά χαμηλής αγωγιμότητας είναι η απόδοση που περιορίζεται από την εφικτή μέγιστη ένταση μαγνητικού πεδίου. Το 1961 είχε αναφερθεί ότι πρακτικά είμαστε μόνο στο ένα δέκατο της αγωγιμότητας και στο ένα δέκατο της έντασης του μαγνητικού πεδίου που θα θέλαμε. Αλλά επίσης έχει ειπωθεί ότι οι σχεδιαστές μηχανικοί πολλές φορές καταφέρνουν να παρακάμπτουν προβλήματα και να καταφέρνουν πράγματα που έχουν θεωρηθεί αδύνατα. Μέχρι αυτή τη στιγμή, η πρακτική εφαρμογή των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων για πρόωση και έλεγχος της ροής εξαρτώνται από την πρόοδο στην παραγωγή πηγών ικανών να δώσουν για υψηλά μαγνητικά πεδία.

Στις περισσότερες εργασίες μέχρι τώρα εφαρμόστηκε ο ηλεκτρομαγνητικός έλεγχος ροής χρησιμοποιώντας μόνο λίγες απλές διαμορφώσεις δύναμης. Μια βασική δυνατότητα βελτιστοποίησης έγκειται στην προσαρμογή των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων, τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Η χρονική βελτιστοποίηση των ενεργών δυνάμεων Lorentz μπορεί τελικά να καταλήξει σε μία λύση του προβλήματος.

Ανεξάρτητα από την αποτελεσματικότητα, οι δυνάμεις Lorentz έχουν ελκυστικά χαρακτηριστικά να προσφέρουν στη βασική έρευνα για τους μηχανισμούς ελέγχου ροής. Αποτελούν μοναδική δυνατότητα για μια εύκολα ελεγχόμενη πηγή ορμής απεριόριστου εύρους εφαρμογών και εξαιρετικής ευελιξίας.

Η MHD χρησιμοποιείται για την άντληση ρευστών που είναι δύσκολο να αντληθούν με συμβατικές αντλίες. Οι προωθητές θαλασσινού νερού MHD είναι πολλά υποσχόμενοι για μια ποικιλία εφαρμογών που απαιτούν υψηλούς ρυθμούς ροής και υψηλή ταχύτητα, ενώ οι μικροαντλίες MHD και οι νανοαντλίες έχουν μια ποικιλία εφαρμογών, ιδιαίτερα στη βιοτεχνολογία.

Η MHD αντλία τηγμάτων μετάλλων προσφέρει μία σημαντική αντικατάσταση της συμβατικής αντλίας επειδή τα κινούμενα μέρη των συμβατικών αντλιών δεν αντέχουν τη θερμοκρασία του λιωμένου μετάλλου. Η MHD αντλία τηγμάτων αλάτων χρησιμοποιείται με επιτυχία στους πυρηνικούς αντιδραστήρες γιατί μπορεί να χειριστεί με επιτυχία το αλμυρό νερό ψύξης χωρίς να φθαρεί όπως οι συμβατικές αντλίες. Η ανάγκη για

Οι αντλίες MHD αυξάνονται λόγω των πλεονεκτημάτων τους και έχουν ευρύ πεδίο εφαρμογών. Για παράδειγμα, η άνοδος των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας έχει αυξήσει τη ζήτηση για έναν τρόπο άντλησης και διεύθυνσης του θερμαινόμενου από τον ήλιο υγρού.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- 1) Davidson P.A., An Introduction to Magnetohydrodynamics, Cambridge University Press 2001.
- 2) K. Wiesemann, A Short Introduction to Plasma Physics, CERN Accelerator School: Ion Sources – Proceedings, 2014.
- 3) Ajith Krishnan R, Jinshah B S, Magnetohydrodynamic Power Generation, International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 3, Issue 6, June 2013.
- 4) https://en.wikipedia.org/wiki/Hall_effect
- 5) Tushar Kanti Bera, A Magnetohydrodynamic (MHD) Power Generating System: A Technical Review, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering **955** (2020) 012075.
- 6) Qian Zhu, High-efficiency power generation – review of alternative systems, IEA Clean Coal Centre, March 2015.
- 7) Naoyuki Kayukawa, Open-cycle magnetohydrodynamic electrical power generation: a review and future perspectives, Progress in Energy and Combustion Science 30 (2004) 33–60.
- 8) V. K. Rohatgi and N. Venkatramani, Recent advances in open cycle MHD electrical power generation, Sadhana, Vol. 7, Part 1, June 1984, pp. 1-72, India.
- 9) O.M. Al-Habahbeh, M. Al-Saqqa, M. Safi, T. Abo Khater, Review of magnetohydrodynamic pump applications, Alexandria Engineering Journal (2016) 55, 1347-1358.
- 10) Weier T, Shatrov V, Gerbeth G. Flow control and propulsion in poor conductors. In: Magnetohydrodynamics, Springer 2007, p. 295-312.
- 11) Yohei Sasakawa, YAMATO-1 World'S First Superconducting Magnetohydrodynamic Propulsion Ship, The Ship & Ocean Foundation.
- 12) Gailitis A. and Lielausis O., On a possibility to reduce the hydrodynamic resistance of a plate in an electrolyte. Appl Magnetohydrodynamics, Rep Phys Inst 12: 143–146 (1961).
- 13) T. Albrecht, J. Stiller, H. Metzkes, T. Weier, and G. Gerbeth, Electromagnetic flow control in poor Conductors, Eur. Phys. J. Special Topics 220, 275–285 (2013).

- 14) Mitsuru Kikuchi, A Review of Fusion and Tokamak Research Towards Steady-State Operation: A JAEA Contribution, *Energies* 3, 1741-1789 (2010).
- 15) CeÂbron D, Viroulet S, Vidal J, Masson J-P, Viroulet P Experimental and theoretical study of magnetohydrodynamic ship models. *PLoS ONE* 12(6): e0178599 (2017).
- 16) Fonseca,W.d.S., Araújo, R.C.F., Silva, M.d.O.e, Cruz, D.O.d.A., Analysis of the Magnetohydrodynamic Behavior of the Fully Developed Flow of Conducting Fluid. *Energies* **2021**, 14, 2463.
- 17) Montisci A., MHD Generators, <https://eumhd.com/wp-content/uploads/2021/04/Montisci.pdf>