

Hydromagnetic Propulsion System in Marine Applications: A Literature Review

Milad Nasiri^a, Mostafa Nazemizadeh^{b*}

^a Department of Mechanical engineering, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.
^b Department of Mechanical engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran.

Review Article

Use your device to scan
and read the article online



Citation: Nazemizadeh M, Nasiri M. Hydromagnetic Propulsion System in Marine Applications: A Literature Review. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2022;2(1):13-34.

 <https://10.52547/masm.2.1.13>.

KEYWORDS

Propulsion System,
Hydromagnetic,
Marine,
Review,
Literature.

ABSTRACT

In this paper, the hydromagnetic propulsion system in marine application is taken into account. If the conduction fluid channel is exposed to a magnetic field and an electric field perpendicular to the fluid flow, under the interaction of electric current and magnetic field, a force is generated to flow the fluid, which is the basis of hydromagnetic propulsion systems. Hydromagnetic propulsion systems have a variety of applications which the most important ones are molten metal transfer system, small hydromagnetic pumps and marine propulsion system. Therefore, in this research, a literature review is performed and 70 valid scientific references in this field are studied and presented. Various classifications of the hydromagnetic thrust system are presented based on the installation location, type of electric field, type of fluid conducting channel, etc. The operating applications of hydromagnetic thrust systems are presented for all types of marine and submarine cargos. This paper can be a benchmark for future researches on hydromagnetic propulsion systems.

Extended Abstract

1. Introduction

Hydromagnetic propulsion is one of the newest and most efficient propulsion systems employed in marine industries. The magnetic hydrodynamics (MHDs) is related to flow of electrically conductive fluid such as seawater, under perpendicular magnetic electrical fields. The science of magnetic magneto-hydrodynamics is originated since 1930 [1]. One of the applications of hydromagnetic systems is related to marine hydromagnetic thrusters. In this type of propulsion systems, there is no moving parts such as propellers and due to the interaction of electric field and magnetic field, seawater flows in a channel and generates thrust for surface and subsurface marine vehicles.

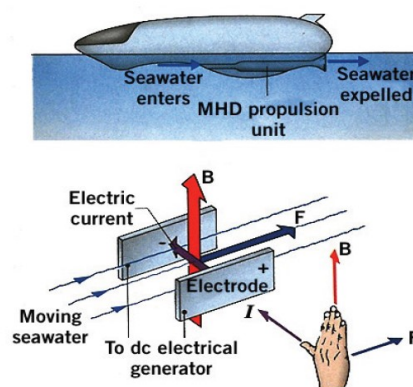


Figure 1. Hydromagnetic thruster [6]

* Corresponding author. Tel.: 09127376322

E-mail address: nazemi@mut-es.ac.ir

DOI: <https://10.52547/masm.2.1.13>.

Received: April 27, 2022; Received in revised form: May 01, 2022; Accepted: May 17, 2022

2022 Published by Arak University Press. All rights reserved.



2. Advantages of hydromagnetic thruster

Hydromagnetic propulsion system exhibits various advantages over their conventional marine propulsion systems and is used as the thruster of the surface and subsurface vessels in developed countries. Some of the advantages of this type of propulsion system are:

- In this system, common rotating components such as mechanical impellers, shafts and gearboxes are removed which result in reducing mechanical vibrations and floating acoustic noise.
- Despite of the high speed limit in propellers and cavitation phenomenon, the hydromagnetic thruster does not have these limitations.
- By removing the impeller and engine, the weight of the thrust system is greatly reduced.
- Compared to propeller drive system, maintenance costs are significantly reduced.
- Compared to common marine thrust systems, it has less resistance force.
- To install the common propulsion systems, the body have to be drilled, which in turn decreases the sealing and decreases the safety of the body. In contrast, the hydromagnetic thruster has flexibility in design and construction.
- In an emergency, there is some energy stored in the magnet of the hydromagnetic thrust system that can be used to move the marine vehicle. Therefore, it can also be considered as an emergency drift system.

2.1. A survey on marine hydromagnetic propulsion

The first idea of using the hydromagnetic propulsion system in marine applications was first proposed by Rice in 1961 [7]. The first practical concept of hydromagnetic marine thruster was proposed by Phillips [8]. Way [9] also designed and built a 10 feet long, 900 pound submarine driven by a hydromagnetic thruster with a 0.015 Tesla magnetic field and a 30-volt power supplier.

With the advent of superconducting materials, it became possible to create medium and large magnetic fields for magnetic hydrodynamic propulsion systems. Recent research has made it possible to fabricate superconducting magnetic materials with strength of 6 to 10 Tesla. Saji and Iwata [14] built the first ship model with a superconducting hydromagnetic propulsion system called the ST-500 in 1980. The model was a 12 feet long wooden ship which could reach a speed of 2 feet per second. Swallow et al. [15] studied detail performance of the hydromagnetic propulsion systems for submarines. They expressed the internal and external configurations of the thruster and presented various arrangements of the thrust system on the submarine. Moreover, they developed a mathematical model of fluid flow in the duct for the hydromagnetic propulsion system.

Meng [16] analyzed a submarine with a water jet propulsion system combined with an auxiliary hydromagnetic thruster. The magnetic field included a superconducting coil with a liquid helium cooling system. He [17] also studied a submarine propelled by a hydromagnetic thruster.

Furthermore, extensive researches on hydromagnetic propulsion systems were conducted by the JAFSA Research Center in Japan, which led to the construction of three marine models [25]. The first model with a length of 3 meters had a thrust system with a power of 1.2 Tesla and a voltage of 48 volts and reached a speed of 1.8 kilometers per hour. Regarding to two decades research and development of the propulsion system in Japan, Lin [26] studied the design and construction of a model ship with a hydromagnetic propulsion system and introduced a model ship called the YAMATO-1. In this ship, two magnetic propulsion systems were placed on the bottom and sides. Each propulsion system consisted of 6 hydromagnetic annular channels which had separate superconducting magnets and electrodes.

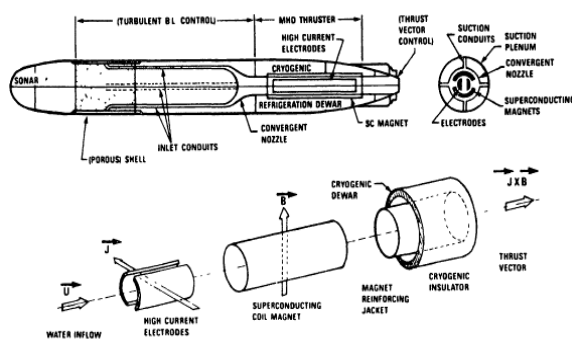


Figure 2. A submarine with MHD thruster [17]



Figure 3. YAMATO-1 ship [26]

This model ship was 30 meters long, 10 meters wide and 3.5 meters high. Its speed is about 8 knots and each propulsion system generated about 8,000 Nm of Lorentz force under a 4 Tesla magnetic field and a current of 4,000 amps. Motorola et al. [27] continued research and development on the Yamato in 1985 and performed the first sea test in October 1991. Takzawa et al. [28] also studied the performance of Yamato 1 superconducting hydromagnetic thrusters. They described the dimensional and functional characteristics of the model ship and propulsion system.

Doss and Geyer [33] studied superconducting magnets for marine applications of hydromagnetic thrust systems. They proposed a one-dimensional model to describe the hydromagnetic thrust. The results showed that the efficiency of the system

increases with increasing magnetic field strength and thrust channel diameter. In [34], design and simulation of magnetic hydrodynamic pumps were studied for marine application. Also, basic governing equations of the thrust system were presented. Aoki et al. [36] analyzed the fluid flow in the rectangular hydromagnetic thrust channel. They combined Navier-Stokes relationships for fluid with Maxwell relationships, and modeled Lorentz forces under the influence of the electromagnetic field. Three-dimensional numerical simulation of a hydromagnetic thrust system was also compared with experimental results.

In [38], an experimental study on the interaction of electrolysis and hydrodynamics in hydromagnetic thrust systems was investigated. Results showed that the electrolysis of microbubbles had little effect on the flow and electrolysis could be controlled. Mitchell and Gubser [39] studied ship propulsion using a superconducting hydromagnetic propulsion system. They studied high-temperature superconducting magnets and showed that for speeds of 40 knots with a 5 Tesla magnetic field, the system efficiency would be above 50%. Therefore, the construction of high-powered electric machines and magnets allows high-speed motion. Chekab and Ghadimi [45] investigated the effect of hydromagnetic channel curvature on the efficiency of the thrust system in a relatively weak magnetic field. They presented a numerical solution for the longitudinal and lateral curvature of the hydromagnetic duct and its effect on its thrust and efficiency. They showed that negative curvature increases the thrust force and longitudinal curvature changes the thrust force.

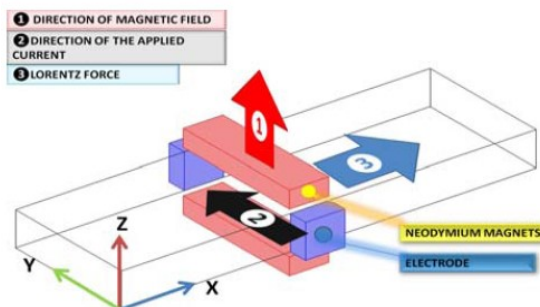


Figure 4. Hydromagnetic thruster [36]

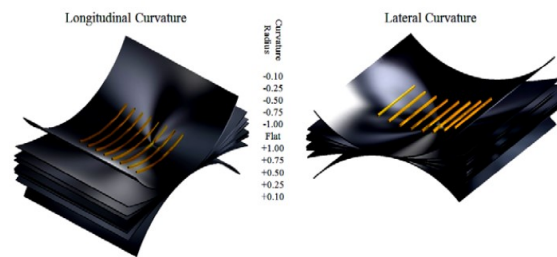


Figure 5. Hydromagnetic thruster [45]

Cébron et al. [60] theoretically and experimentally analyzed a magnetic hydrodynamic ship model to prove the Lorentz force and fluid flow. They compared theoretical and experimental results. The channel length of the thrust system was about 10 cm and the magnetic field strength was about 1 Tesla and the 3-cell lithium battery was used.

3. Conclusion

In this paper, the hydromagnetic propulsion system is considered for marine application. Hydromagnetic systems have a variety of applications which the most important ones are: molten metal transfer system, small hydromagnetic pumps and marine propulsion system. Therefore, in this research, a literature review on hydromagnetic propulsion system in marine application has been done and 70 valid scientific researchers have been studied and presented. Also, the types of hydromagnetic thrust system classifications were presented based on the installation position, type of electric field, type of fluid duct, etc. Moreover, the functional range of the hydromagnetic thrust system for different types of surface and subsurface vehicles was stated. By reviewing various articles, it was shown that in general, the hydromagnetic propulsion system is divided into three categories: small ones used in micropumps, medium category used in AUVs and ship models and heavy ones used in ships and submarines.



سیستم رانش هیدرومغناطیسی در کاربرد دریایی: مروری بر ادبیات موضوع

میلاد نصیری الف، مصطفی ناظمی زاده ب*

الف کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران، nasiri.m@gmail.com

ب استادیار، مجتمع دانشگاهی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، nazemizadeh@aut.ac.ir

چکیده	واژگان کلیدی
<p>در این مقاله سیستم رانش هیدرومغناطیسی با در نظر گرفتن کاربرد دریایی مورد توجه قرار می‌گیرد. چنانچه کانال جریان سیال رسانایی تحت اثر میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی عمود بر جریان سیال قرار گیرد، تحت اثر متقابل جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی، نیرویی در جهت حرکت جریان سیال تولید شود که اساس عملکرد سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی محسوب می‌شود. سیستم‌های هیدرومغناطیسی دارای کاربردهای متنوعی هستند که از مهم‌ترین کاربردهای آن می‌توان به سیستم انتقال فلزات مذاب، پمپ‌های کوچک هیدرومغناطیسی و سیستم رانش دریایی اشاره نمود. لذا در این تحقیق، مروری بر ادبیات موضوع سیستم رانش هیدرومغناطیسی با کاربرد دریایی انجام شده و ۷۰ مرجع معتبر علمی در این زمینه مطالعه و ارائه می‌شود. انواع تقسیم‌بندی سیستم رانش هیدرومغناطیسی بر اساس موقعیت نصب، نوع میدان الکتریکی، نوع مجرای سیال و ... ارائه می‌شود. محدوده عملکردی سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای انواع شناورهای سطحی و زیرسطحی ارائه می‌شود. این مقاله می‌تواند مبنایی برای تحقیقات آینده بر سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی باشد.</p>	<p>سیستم رانش هیدرومغناطیسی دریایی مرور ادبیات موضوع تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۷ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۷</p>

۱- مقدمه

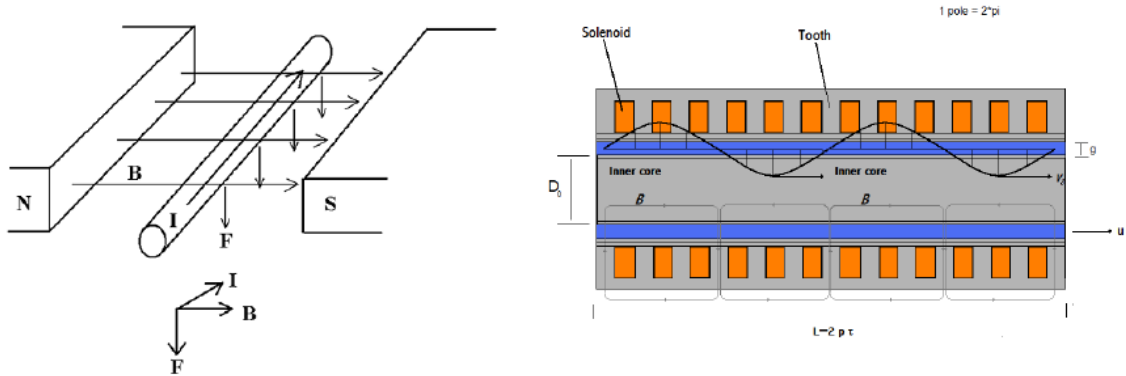
سیستم رانش هیدرومغناطیسی یکی از جدیدترین و کارآمدترین سیستم‌های رانش محسوب می‌شود که امروزه به طور گسترده‌ای در صنایع دریایی و زیر دریا به عنوان سیستم رانش مورد استفاده قرار می‌گیرد. اصطلاحا هیدرودینامیک مغناطیسی^۱ در رابطه با تقابل و تعامل جریان سیال رسانای الکتریکی نظیر آب دریا، میدان مغناطیسی و الکتریکی تعریف می‌شود. چنانچه کانال جریان سیال رسانایی تحت اثر میدان مغناطیسی و میدان الکتریکی عمود بر جریان سیال قرار گیرد، با ایجاد جریان الکتریکی بین الکترودها و تحت اثر متقابل جریان الکتریکی و میدان مغناطیسی که عمود بر جهت جریان سیال است، نیرویی در جهت حرکت جریان سیال تولید شود که اساس عملکرد سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی محسوب می‌شود. علم هیدرودینامیک مغناطیسی یا مکانیک سیالات مغناطیسی از سال ۱۹۳۰ رشد کرده است و تاکنون در حاکم توسعه و پیشرفت می‌باشد [۱].

سیستم‌های هیدرومغناطیسی دارای کاربردهای متنوعی هستند که از مهم‌ترین کاربردهای آن می‌توان به سیستم انتقال فلزات مذاب، پمپ‌های کوچک هیدرومغناطیسی و سیستم رانش دریایی اشاره نمود.

سیستم‌های هیدرومغناطیسی انتقال فلزات مذاب بر اساس قانون فارادی برای القا فلزات مایع انجام می‌شود [۲]. فلزات مذاب

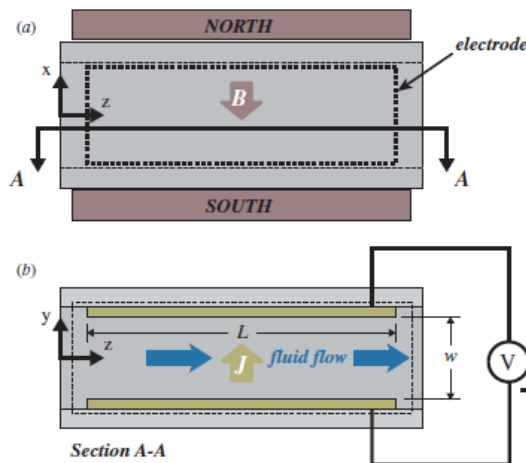
^۱ Magnetohydrodynamic (MHD)

دارای خورندگی و کاپیتاسیون بالا بوده و لذا استفاده از پمپ‌های متداول برای انتقال آن‌ها ناکارآمد است و سیستم انتقال هیدرومغناطیسی کارایی و کاربرد دارد. دستگاه هیدرومغناطیسی برای جابجایی فلزات مذاب توسط بیخوسکی و پانوف [۳] ابداع و ارائه گردید. این دستگاه شامل یک پمپ هیدرومغناطیسی درون یک حمام فلز مذاب بود. میدان مغناطیسی توسط یک سولنوئید ایجاد شده و با ایجاد میدان مغناطیسی القایی، باعث جریان سیال مذاب می‌گردد.



شکل ۱ سیستم هیدرومغناطیسی برای انتقال فلزات مذاب [۳]

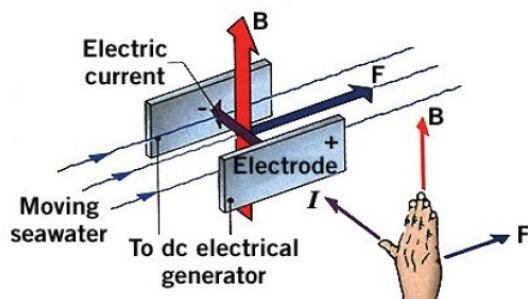
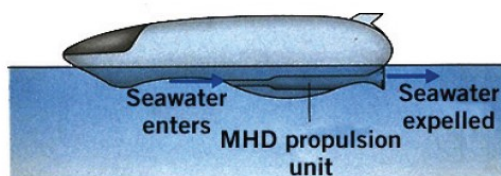
پمپ‌های کوچک هیدرومغناطیسی یا میکروپمپ‌های مگنتوهیدرودینامیک نیز از اصول هیدرودینامیک مغناطیسی پیروی کرده و عامل حرکت سیال در این میکروپمپ‌ها نیروی لورنتز^۲ می‌باشد. در سال‌های اخیر از مگنتوهیدروپمپ‌ها به منظور هدایت محلول‌های رسانا در میکرو سیستم‌ها استفاده شده است. در این پمپ‌ها ابعاد کانال در مقیاس میکرو و نانو بوده و برای کاربردهای جابجایی سیالات در کانال‌های میکرو و کاربردهای بیولوژیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. اولین نمونه ساخت میکروپمپ‌های هیدرومغناطیسی توسط جانگ و لی و به منظور پمپاژ در میکروکانال‌ها با استفاده از مگنتوهیدرودینامیک بوده است [۴].



شکل ۲ میکروپمپ هیدرومغناطیسی [۵]

کاربرد دیگر سیستم‌های هیدرومغناطیسی مربوط به سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی دریایی می‌باشد که در بخش بعدی به تفصیل مورد توجه قرار می‌گیرد. در این نوع سیستم‌های رانش دریایی، عضو متحرکی به نام پروانه وجود ندارد و در اثر اندرکنش میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی، آب دریا در یک کانال رانش جریان یافته و تولید نیروی رانش یا تراست برای شناور سطحی و زیرسطحی می‌کند.

² Lorentz force



شکل ۳ سیستم رانش هیدرومغناطیسی [۶]

۲- مفاهیم سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی

در این بخش سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی با کاربرد دریایی مورد توجه قرار گرفته و مروری بر تحقیقات انجام شده بر این نوع سیستم رانش پرداخته می‌شود. سیستم رانش هیدرومغناطیسی دارای مزایا و ویژگی‌های متنوعی نسبت به سیستم‌های رانش متداول دریایی بوده و لذا در رانش شناورهای سطحی و زیرسطحی مورد استفاده کشورهای پیشرفته جهان قرار گرفته‌اند. برخی از مزایای این نوع سیستم رانش دریایی عبارت است از:

- در این سیستم اجزاء چرخنده‌ی رایج نظیر پروانه‌ی مکانیکی، شفت و گیربکس حذف شده و منجر به کاهش ارتعاشات مکانیکی و نویز آکوستیکی شناور می‌شود. لذا این سیستم قابلیت مخفی بودن بیش‌تر دارد.
- با توجه به محدودیت سرعت بالا در شناورها پروانه‌ای به علت افزایش پدیده کاویتاسیون، سیستم رانش هیدرومغناطیسی دچار این مشکل نیست.
- با حذف پروانه و موتور، میزان بسیار زیادی از وزن سیستم رانش کاهش می‌یابد.
- نسبت به سیستم رانش پروانه، هزینه‌های تعمیر و نگهداری کاهش چشمگیری دارد.
- با توجه به نوع سیستم رانش، نیروی مقاومت کمتری دارد.
- برای نصب سیستم رانش، سوراخ‌کاری بدنه از بین رفته که این خود باعث افزایش آب‌بندی و افزایش ایمنی بدنه می‌شود. لذا انعطاف در طراحی و ساخت داشته و قابلیت حمل بار بیشتری را ایجاد می‌کند.

تحت شرایط اضطراری مقداری انرژی ذخیره‌شده در مغناطیس سیستم رانش هیدرومغناطیسی وجود دارد که می‌تواند برای به حرکت در آوردن شناور مورد استفاده قرار گیرد. لذا به عنوان یک سیستم رانش اضطراری نیز محسوب می‌شود.

ایده‌ی استفاده از سیستم رانش هیدرومغناطیسی در شناورهای دریایی برای اولین بار توسط رایس در سال ۱۹۶۱ ارائه گردید [۷] و اولین تحقیق علمی پیرامون مفهوم کاربردی رانش هیدرومغناطیسی در دریا توسط فیلیپس [۸] بیان شد. فیلیپس به تحلیل سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای یک زیردریایی با اعمال میدان مغناطیسی به بزرگی ۰/۶ تسلا و با در نظر گرفتن ضریب هدایت آب دریا در حدود ۴ موس بر متر پرداخت. در محاسبات انجام‌شده، سرعت زیردریایی حدود ۱۰ نات به دست آمد اما بازده سیستم ناچیز بود. وی [۹] نیز بر اساس روابط تئوری ارائه‌شده برای سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی، به طراحی و ساخت یک زیردریایی به طول ۱۰ فوت و وزن ۹۰۰ پوند با میدان مغناطیسی ۰,۰۱۵ تسلا و منبع تغذیه ۳۰ ولت پرداخت. او توانست برای مدل ارائه‌شده با رانش هیدرومغناطیسی به سرعت ۱ فوت بر ثانیه برسد [۹].

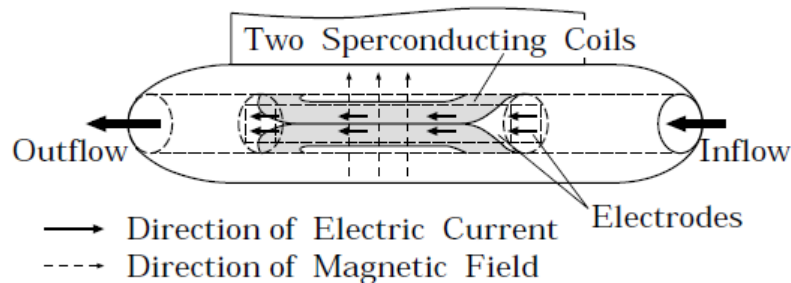
۱-۲- تقسیم‌بندی سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی

سیستم‌های رانش از جنبه‌های مختلف نظیر محل نصب، نوع میدان الکتریکی، نوع کانال رانش سیال، نوع چیدمان و ... قابل تقسیم‌بندی هستند. در ادامه برخی از این جنبه‌ها مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۱-۲- تقسیم بندی بر اساس موقعیت نصب

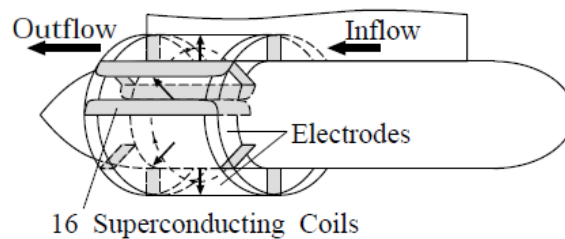
بر اساس موقعیت قرارگیری و نصب سیستم رانش هیدرومغناطیسی در شناور دریایی، این سیستم رانش به دو نوع داخلی و خارجی تقسیم‌بندی می‌شود. در نوع خارجی، سیستم رانش هیدرومغناطیسی خارج از بدنه شناور سطحی و زیرسطحی تعبیه می‌شود. در حالی که در سیستم رانش داخلی، سیستم رانش درون بدنه کشتی یا زیردریایی تعبیه شده و قرار دارد. از طرفی در برخی مراجع [۱۰]، نواحی نصب سیستم رانش بر زیردریایی به سه نوع داخلی، حلقوی و غلاف پایه تقسیم‌بندی شده است.

در سیستم رانش داخلی، مجرای سیستم رانش هیدرومغناطیسی درون شناور تعبیه می‌شود و با عبور جریان از این مجرا، رانش شناور تامین می‌شود.



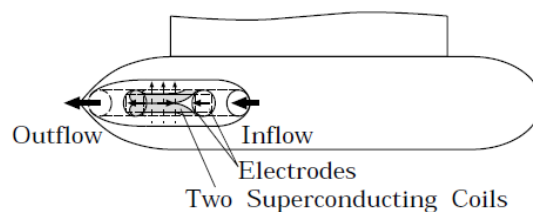
شکل ۴ سیستم رانش هیدرومغناطیسی داخلی [۱۰]

در سیستم رانش حلقوی، سیستم رانش هیدرومغناطیسی بر بدنه بیرونی زیردریایی به صورت حلقوی نصب می‌شود.



شکل ۵ سیستم رانش هیدرومغناطیسی حلقوی [۱۰]

از طرفی در سیستم رانش غلاف پایه، رانش هیدرومغناطیسی در قسمت انتهایی زیردریایی و خارج از بدنه نصب می‌شود.



شکل ۶ سیستم رانش هیدرومغناطیسی غلاف پایه [۱۰]

۲-۱-۲- تقسیم بندی بر اساس میدان الکتریکی

سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی بر اساس میدان و جریان الکتریکی به دو نوع جریان مستقیم^۳ و جریان متناوب^۴ دسته‌بندی می‌شوند. در سیستم رانش هیدرومغناطیسی جریان مستقیم از دو الکتروود به همراه منبع جریان مستقیم برای تأمین میدان الکتریکی استفاده می‌شود. الکتروودها معمولاً از جنس گرافیت می‌باشد. این نوع رانش در مقایسه با نوع متناوب دارای بازده بالاتری بوده، اما میزان میدان مغناطیسی کمتری داشته و توان کمتری ایجاد می‌کند. همچنین یکی از معایب این نوع سیستم رانش الکتروود آب و تشکیل حباب‌های هیدروژن در مجاورت الکتروودها است که رسانایی جریان را کاهش می‌دهد. این پدیده اصطلاحاً فلشینگ^۵ نامیده می‌شود و برای اجتناب از آن از الکتروودهای پراکنده‌کننده گازها^۶ استفاده می‌شود. از طرفی سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی جریان متناوب دارای هیچ‌گونه الکتروودی نبوده و بر اساس قانون فارادی مبنی بر القای میدان مغناطیسی در سیم‌پیچ‌های حامل جریان متناوب کار می‌کنند. سیستم رانش هیدرومغناطیسی جریان متناوب بدون الکتروود و میدان الکتریکی بوده و بر اساس قانون القای فارادی عمل می‌کند. این سیستم رانش دارای بازده کمتر و توان بیشتری بوده و البته اخیراً با ابداع مواد سوپرهادی^۷ یا ابررسانا راندمان و کارایی این نوع سیستم مورد توجه بسیاری قرار گرفته است.

۲-۱-۳- تقسیم بندی بر اساس مجرای رانش

سیستم رانش هیدرومغناطیسی بر اساس نوع مجرا به مجرای خطی و مارپیچ تقسیم می‌شود. البته این نوع تقسیم‌بندی در برخی مراجع [۱۱-۱۲] برای سیستم‌های رانش متناوب بیان شده است که قابل تعمیم نیز می‌باشد. در سیستم رانش هیدرومغناطیسی با مجرای خطی، مجرا به صورت کانال افقی توخالی است.



شکل ۷ سیستم رانش هیدرومغناطیسی با مجرای خطی [۱۱]

در سیستم رانش هیدرومغناطیسی با مجرای مارپیچ، کانال جریان آب به صورت مارپیچ می‌باشد. در این نوع سیستم از سیم‌پیچ، الکتروودهای استوانه‌ای هم‌مرکز و دیواره‌ی عایق مارپیچی است. در این سیستم رانش با استفاده از سیم‌پیچ‌های ابررسانا می‌توان محدوده وسیعی از میدان مغناطیسی را به سهولت به کار برد. در این نوع سیستم رانش، میدان مغناطیسی توسط سلونوئید سوپرهادی در جهت طولی بر آب دریا تأثیر می‌گذارد و جریان الکتریکی در آب بین الکتروودهای استوانه‌ای جریان دارد. بنابراین لورنتز، نیروی برآیند الکترومغناطیسی آب دریا را به دور آند می‌چرخاند. جریان دورانی آب دریا با استفاده از دیواره‌ی عایق مارپیچ و یکسو کننده‌ی به جریان محوری تبدیل می‌شود و نیروی پیشران تولید می‌شود.

از طرفی در برخی مراجع [۱۳]، تقسیم‌بندی سیستم رانش بر اساس مقطع مجرا انجام شده است. در این تقسیم‌بندی، سیستم رانش با مجرای مقطع دایروی و مقطع مستطیلی به صورت مجزا دسته‌بندی و بررسی می‌شود.

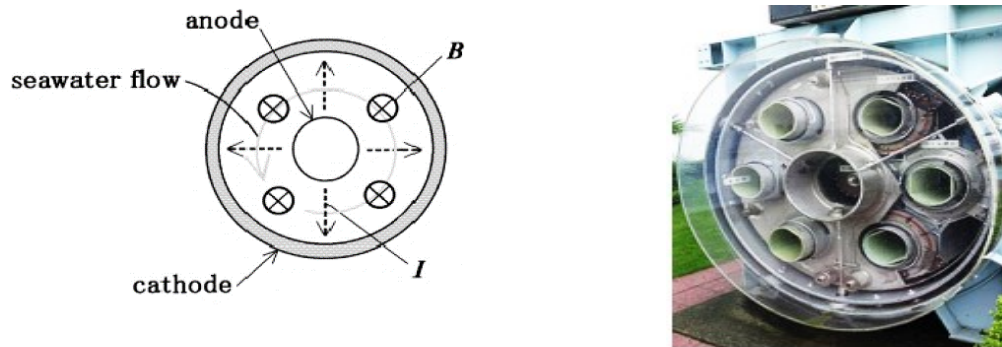
³ Direct Current (DC)

⁴ Alternating Current (AC)

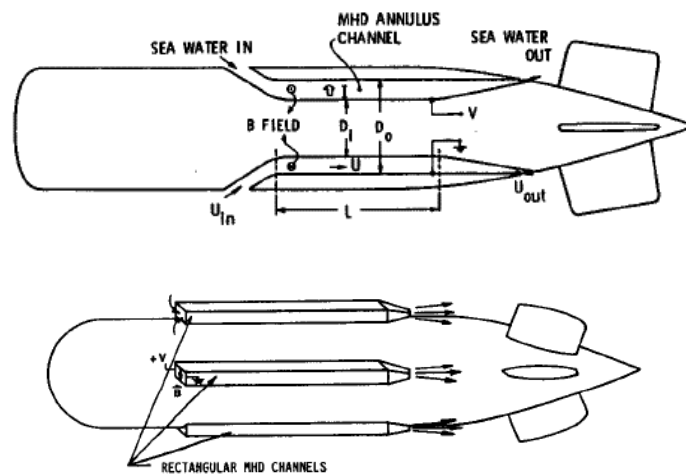
⁵ flashing

⁶ Gas diffusion

⁷ Superconductive material



شکل ۸ سیستم رانش هیدرومغناطیسی با مجرای مارپیچ [۱۱]



شکل ۹ سیستم رانش هیدرومغناطیسی با مجرای مقطع دایروی و مستطیلی [۱۳]

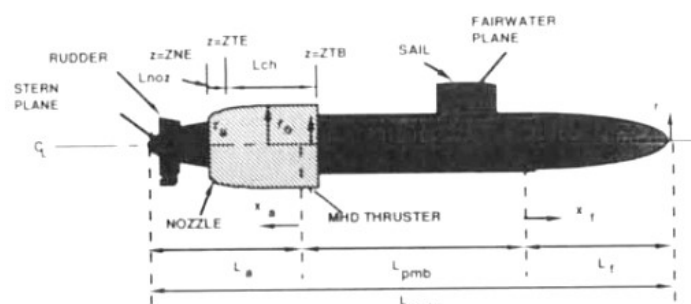
۳- مروری بر تحقیقات بر سیستم رانش هیدرومغناطیسی

ایده‌ی استفاده از سیستم رانش هیدرومغناطیسی در شناورهای دریایی برای اولین بار توسط رایس در سال ۱۹۶۱ ارائه گردید [۷]. اولین مفهوم کاربردی رانش هیدرومغناطیسی در دریا توسط فیلیپس [۸] ارائه گردید. وی [۹] نیز بر اساس روابط تئوری ارائه‌شده برای سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی، به طراحی و ساخت یک زیردریایی به طول ۱۰ فوت و وزن ۹۰۰ پوند با میدان مغناطیسی ۰٫۱۵ تسلا و منبع تغذیه ۳۰ ولت پرداخت. او توانست برای مدل ارائه‌شده با رانش هیدرومغناطیسی به سرعت ۱ فوت بر ثانیه برسد.

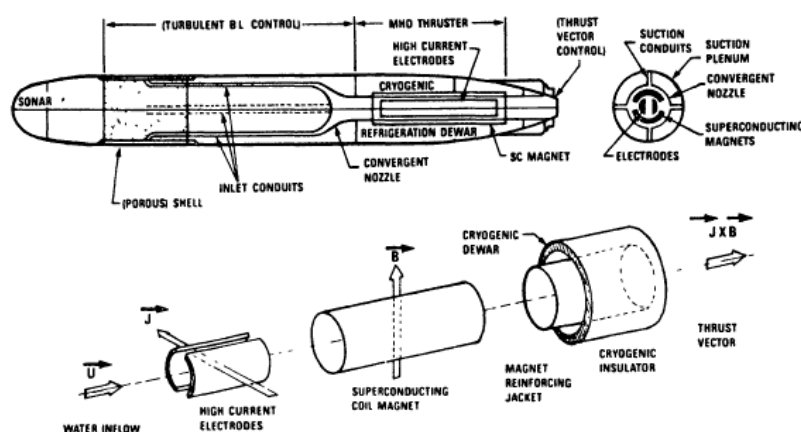
با پیدایش مواد ابررسانا، ایجاد میدان مغناطیسی متوسط و بزرگ برای سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی امکان‌پذیر شد. تحقیقات اخیر امکان ساخت مواد مغناطیسی ابررسانا دارای شدت میدان ۶ تا ۱۰ تسلا را فراهم کرده است. همچنین تکنولوژی ساخت ابررساناهای دمابالا در حال گسترش بوده و هم‌زمان ساخت انواع شناور با کامپوزیت‌های کم‌وزن امکان استفاده از سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی را گسترش فراوان داده است. ایواتا و ساجی [۱۴] برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ به ساخت یک مدل کشتی به نام *ST-500* دارای سیستم رانش هیدرومغناطیسی ابررسانا پرداختند. مدل ارائه‌شده توسط آن‌ها یک مدل کشتی چوبی به طول ۱۲ فوت بود که توسط رانش هیدرومغناطیسی به سرعت ۲ فوت بر ثانیه رسید. در این طراحی و ساخت از مگنت‌های ابررسانای با قدرت متوسط استفاده شد و بازده سیستم به حد کافی نبود. اسوالو و همکارانش [۱۵] به مطالعه دقیق کارایی سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی برای زیردریایی‌ها پرداختند. آن‌ها با بیان سیستم رانش داخلی و خارجی و ارائه انواع چیدمان سیستم رانش بر روی زیردریایی، با در نظر گرفتن چیدمان حلقوی و ارائه یک مدل ریاضی جریان سیال در مجرای

سیستم رانش هیدرومغناطیسی به تحلیل مسئله پرداختند. آن‌ها اثرات پارامترهای مختلف نظیر شدت میدان مغناطیسی، شدت جریان الکتریکی و طول مجرای رانش را بر سرعت جریان آب مورد مطالعه قرار داده و به ارائه نتایج پرداختند. آن‌ها همچنین به تحلیل مشخصات مورد نیاز مگنت‌های و موقعیت نصب آن بر رانش زیردریایی پرداختند.

مگن [۱۶] به تحلیل یک شناور زیرسطحی با استفاده از سیستم رانش واتر جت توأمان با سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای تقویت سیستم پرداختند. میدان مغناطیسی توسط سیم‌پیچ ابرسانا با سیستم خنک‌کننده هلیوم مایع در نظر گرفته شد. آن‌ها به مطالعه مکش جریان لایه‌مرزی به سیستم هیدرومغناطیسی برای کاهش جریان متلاطم در مجاور شناور و کاهش نویز انتشار یافته توسط آن پرداختند. همچنین او [۱۷] به مطالعه زیردریایی دریایی تحت اثر میدان هیدرومغناطیسی پرداختند. آن‌ها از یک غلاف هیدرومغناطیسی حول محیط زیردریایی برای مکش جریان درون سیستم هیدرومغناطیسی و کنترل لایه‌مرزی جریان متلاطم استفاده کردند.

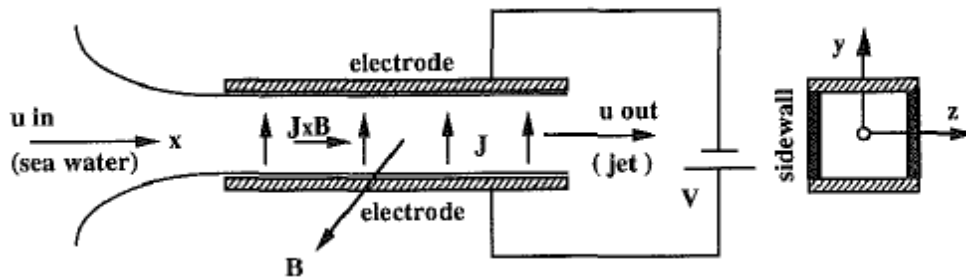


شکل ۱۰ مدل ریاضی سیستم رانش هیدرومغناطیسی بر زیردریایی [۱۵]



شکل ۱۱ چیدمان حلقوی سیستم رانش هیدرومغناطیسی بر بدنه زیردریایی [۱۷]

داس و روی [۱۸] به ارائه یک مدل کامپیوتری جریان سیال هیدرومغناطیسی سه‌بعدی برای مطالعه مشخصات جریان در سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی دریایی پرداختند. آن‌ها چیدمان خطی سیستم رانش هیدرومغناطیسی را برای مقادیر مختلف میدان مغناطیسی مورد بررسی قرار دادند. اثر میدان مغناطیسی قوی بر میدان الکتریکی و جریان آب به ویژه لایه‌مرزی جریان مورد مطالعه قرار گرفت. مشخصات مختلف جریان سیال بر عملکرد سیستم رانش هیدرومغناطیسی بررسی و اثر میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی بر جریان آب بررسی گردید. نتایج نشان داد که اصطکاک دیواره کانال باعث سرعت غیریکنواخت جریان درون آن می‌شود. لذا بایستی اثرات اصطکاک جداره کانال مورد بررسی قرار گیرد. همچنین آن‌ها [۱۹] به تحلیل سیستم‌های رانش و ژنراتورهای هیدرودینامیک مغناطیسی در یک کانال مستطیلی پرداختند. آن‌ها مدل سه‌بعدی کامپیوتری برای معادلات جزئی حاکم بر جریان سیال و میدان الکتریکی ارائه کردند. آن‌ها اثر میدان مغناطیسی و اصطکاک دیواره‌ها را در این تحقیق مجدداً مورد بررسی قرار دادند. آنها نشان دادند که توزیع سرعت جریان در دیواره‌های کناری نسبت به دیواره‌های الکتروود دارای نوسان و تغییرات نسبی بیشتری است. همچنین اصطکاک در دیواره‌های کناری حائز اهمیت و بررسی است.



شکل ۱۲ کانال سیستم رانش هیدرومغناطیسی با مقطع مستطیلی [۱۹]

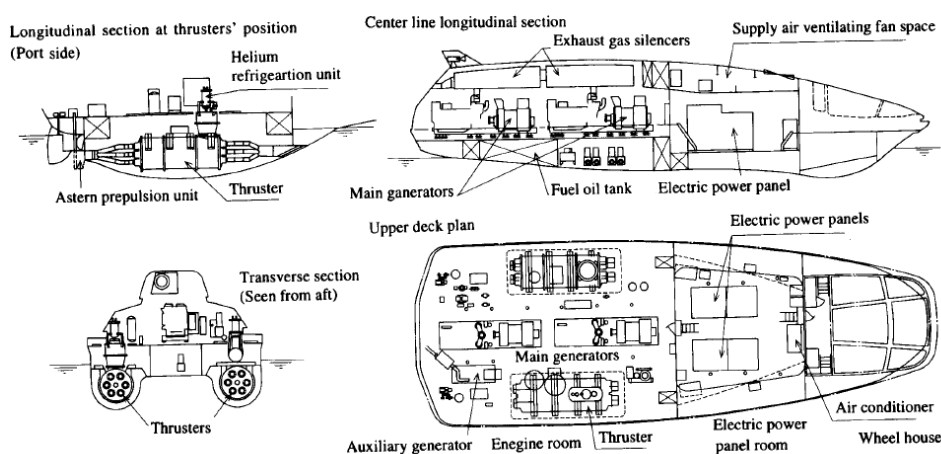
تیکسادور [۲۰] به مطالعه کارایی سیستم هیدرومغناطیسی در رانش وسایل دریایی پرداخت. او با بیان مفاهیم اولیه سیستم رانش هیدرومغناطیسی دریایی، به مطالعه روند تحقیقات در این زمینه پرداخت. همچنین مطالعه بر انواع چیدمان و محرک‌های الکتریکی سیستم رانش انجام و خصوصیات هر یک بررسی شد. هولک و جونز [۲۱] به بررسی عملکرد و عمر مفید الکترودهای سیستم رانش هیدرومغناطیسی در آب دریا پرداختند. آن‌ها برای سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی با زمان کارکرد کم، پیشنهاد الکترودهای خاصی را دادند که به صورت شیمیایی و الکتریکی خورده شده و با جریان سیال برای افزایش ضریب هدایت مخلوط می‌شوند. آن‌ها به صورت تجربی نیز بر الکترودها تحقیق کرده و الکترود لیتیوم را با ضریب هدایت الکتریکی تقریباً دو برابر ارائه دادند. همچنین در [۲۲] خواص الکتریکی سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی دریایی مطالعه شد. دو نوع چیدمان خطی الکترود مورد مطالعه قرار گرفت و به صورت تجربی میزان ایجاد حباب و اثر آن بر جریان الکتریکی بررسی شد. در این تحقیق الکترودهای مختلف تحت اثر ولتاژهای گوناگون آزمایش گردد تا میزان ایجاد حباب در آن‌ها بررسی شود. همچنین لین و دیگران [۲۳] به تحلیل خواص الکترود و مغناطیس‌ها بر عملکرد سیستم رانش پرداختند و آن‌دهای پایدار *DSA* از جنس الکترود تیتانیوم دارای روپوش اکسید روتینیوم را پیشنهاد دادند. مجموعه آزمایشگاهی با جریان مستقیم تهیه و اثرات کنترل‌پذیر الکترودها بررسی شد. همچنین در [۲۴] تحقیق تجربی بر رفتار الکتروشیمیایی الکترودها در سیستم رانش هیدرومغناطیسی به منظور افزایش هدایت الکتریکی آب دریا انجام گردید.

تحقیقات گسترده بر روی سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی در ژاپن توسط مرکز تحقیقاتی جافسا (*JAFSA*) انجام شد که منجر به ساخت سه مدل شناور گردید [۲۵]. اولین مدل به طول ۳ متر دارای سیستم رانش به قدرت ۱٫۲ تسلا و ولتاژ ۴۸ ولت و جریان ۱۰۰ آمپر بود که مدل به سرعت ۱٫۸ کیلومتر بر ساعت رسید. لین [۲۶] در بیان تحقیقات انجام شده در دو دهه برای تحقیق و توسعه سیستم رانش در ژاپن، به طراحی و ساخت یک کشتی مدل دارای سیستم رانش هیدرومغناطیسی به معرفی یک کشتی مدل به نام *YAMATO-I* اشاره کرد. در این کشتی دو سیستم رانش مغناطیسی بر قسمت پایین و کناره‌ها قرار داده شد. هر سیستم رانش شامل ۶ کانال حلقوی هیدرومغناطیسی که هر کانال به صورت مجزا دارای مغناطیس‌های ابررسانا و الکترود بود.

این کشتی مدل دارای طول ۳۰ متر، عرض ۱۰ متر و ارتفاع ۳٫۵ متر بود. وزن کلی کشتی حدود ۲۸۰ تن و سرعت آن در حدود ۸ نات دریایی است. هر سیستم رانش آن در حدود ۸۰۰۰ نیوتن نیروی لورنتز تحت میدان مغناطیسی ۴ تسلا و جریان ۴۰۰۰ آمپر ایجاد کرد. برای ایجاد مگنت از سیم‌پیچ کابل‌های ابررسانا نیوبیوم تیتانیوم دو لایه استفاده کرد و طول کانال هیدرومغناطیسی در حدود ۳ متر در نظر گرفته شد. همچنین از گاز هلیوم برای خنک کاری و ایجاد دمای مناسب کابل‌های ابررسانا استفاده شد. موتورا و دیگران [۲۷] تحقیق و توسعه بر کشتی مدل یاماتو را در سال ۱۹۸۵ آغاز و تست دریا در اکتبر سال ۱۹۹۱ انجام دادند. آن‌ها مروری بر نوع سیستم رانش و نقشه‌های آن به همراه مشخصات ابعادی و عملکردی کشتی مدل ارائه دادند. همچنین تاکزاوا و دیگران [۲۸] به مطالعه عملکرد تراسترهای الکترود هیدرومغناطیسی ابررسانا کشتی یاماتو پرداختند. آن‌ها مشخصات ابعادی و عملکردی این کشتی مدل به همراه سیستم رانش به کاربرده را تشریح کردند.

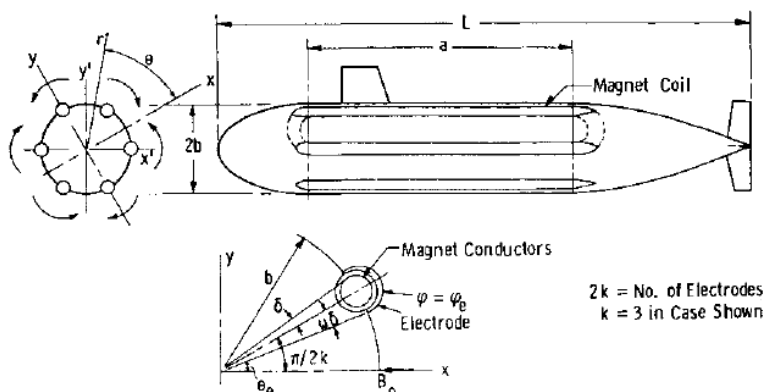


شکل ۱۳ کشتی مدل یاماتو [۲۶]



شکل ۱۴ شماتیک و پیکربندی کشتی مدل یاماتو [۲۸]

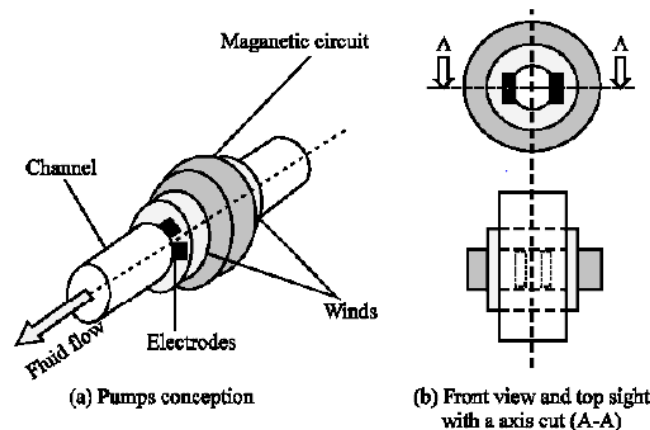
وی [۲۹] کاربرد سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای زیردریایی‌های غول‌پیکر را مورد مطالعه قرار داد. او تحلیل ریاضی دقیق برای سیستم رانش هیدرومغناطیسی جریان مستقیم با مجرای خارجی ارائه داد. آن‌ها چندین مدل زیردریایی با وزن‌های مختلف را تحت اثر سیستم رانش مغناطیسی بررسی کردند. آن‌ها سرعت ۲۹ نات برای زیردریایی در نظر گرفتند. همچنین آن‌ها با بیان روابط حاکم بر سیستم رانش مغناطیسی جریان مستقیم، مطالعه‌ای بر کاربرد سیم‌پیچ‌های ابرسانا انجام دادند. همچنین او یک مدل زیردریایی ۱۰ فوت به نام *EMS-I* با وزن ۹۰۰ پوند و مجرای رانش حدود ۱ متر و مقطع دایروی ۲۲ سانتی‌متر با میدان مغناطیسی ۰,۰۲ تسلا ارائه دادند و مدل زیردریایی ۱,۵ کیلومتر بر ساعت سرعت داشت.



شکل ۱۵ زیردریایی با رانش هیدرومغناطیسی [۲۹]

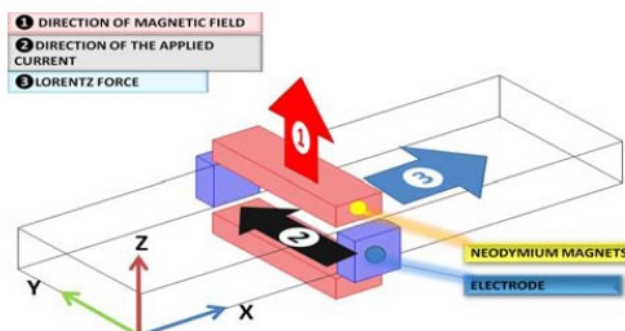
در [۳۰] به مطالعه رانش سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای کاربرد زیردریایی پرداخته شد. بر اساس اصول حاکم بر رانش

هیدرودینامیک مغناطیس، بازده سیستم مورد توجه و بهینه‌سازی شد. آن‌ها چهار مدل زیردریایی مدل را بررسی و سرعت زیردریایی ۲ نات مورد بررسی بود. لین و دیگران [۳۱] رانش هیدرومغناطیسی برای وسایل زیرسطحی را تحلیل کردند. آن‌ها به مطالعه بازده سیستم برای شرایط هندسه مجرا و سرعت‌های ورودی مختلف مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند برای زیردریایی‌های با عنق کاری بالاتر از ۳۰ متر نیاز به میدان مغناطیسی حدود ۵ تسلا و استفاده از مغناطیس‌های ابرسانا است. منگ [۳۲] به کنترل فعال لایه‌مرزی زیردریایی با استفاده از سیستم رانش هیدرومغناطیسی پرداختند. او ردیفی از سیستم رانش را بر بدنه زیردریایی قرار داد به طوری که برآیند میدان الکتریکی و مغناطیسی نیروی لورنتز در جهت طولی ایجاد کرده و جریان لایه‌مرزی را به داخل کانال رانش هدایت و از انتهای بدنه خارج می‌کند. لذا جریان مغشوش لایه‌مرزی کنترل و نوین ایجاد می‌کند. کاهش یافت. داس و گری [۳۳] به مطالعه مغناطیس‌های ابرسانا برای کاربرد دریایی سیستم رانش هیدرومغناطیسی پرداختند. آن‌ها یک مدل سیستم رانش دارای جریان یک‌بعدی ارائه دادند و آن را با مدل میدان الکتریکی دوبعدی ترکیب کردند. مدل ارائه‌شده نشان‌دهنده نیاز به میدان مغناطیسی بسیار قوی برای رانش زیردریایی را نشان داد و اثرات اتلاف اصطکاک بر آن بررسی شد. مطالعات پارامتری برای میدان مغناطیسی ۵ تا ۲۰ تسلا و قطر مجرای ۰٫۵ تا ۲ متر در نظر گرفته و سرعت جریان حدود ۵ تا ۲۰ متر بر ثانیه حاصل شد. اثرات اصطکاک بر سیستم چشمگیر بوده و بازده آن را کاهش می‌دهد. نتایج نشان داد که بازده سیستم با افزایش قدرت میدان مغناطیسی و قطر کانال رانش افزایش می‌یابد. در [۳۴] طراحی و شبیه‌سازی پمپ رانش هیدرودینامیک مغناطیسی برای آب دریا مطالعه شد. معادلات اساسی حاکم بر جریان پایا و تراکم ناپذیر سیستم رانش ارائه شد. روش حجم کنترل برای حل مدل هیدرودینامیکی و مغناطیسی استفاده گردید و نشان داده شد که عملکرد سیستم رانش به طول و شعاع کانال وابسته است. همچنین نتایج عددی به منظور بررسی مشخصات عملکرد سیستم رانش جریان مستقیم ارائه شد.



شکل ۱۶ سیستم رانش جریان مستقیم [۳۴]

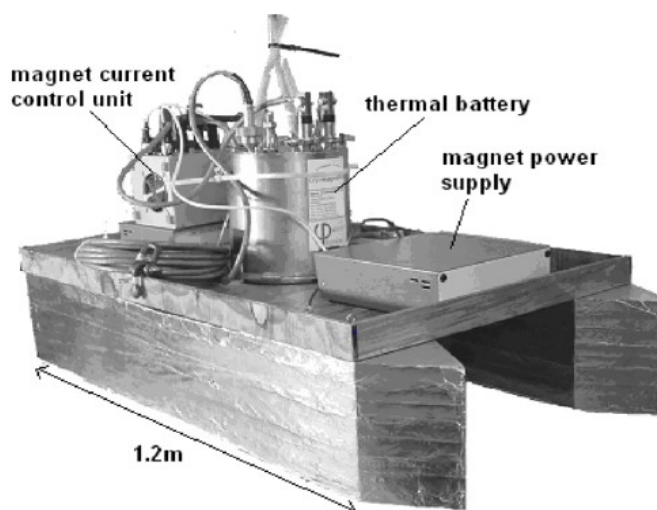
لین و همکارانش [۳۵] به طراحی و مطالعه تراسترهای هیدرومغناطیسی دریایی ابعاد کوچک پرداختند. آن‌ها با ترسیم جریان سیال در سیستم رانش، نرخ جریان و بازده آن را محاسبه کردند. مقاومت هیدرولیکی هر یک از سیستم‌های رانش محاسبه و با اندازه‌گیری‌های تجربی نیروی پیش‌رانش برای محاسبه بازده ترکیب شد. نتایج برای مقادیر مختلف میدان مغناطیسی و جریان الکتریکی بررسی شد. آوکی و دیگران [۳۶] به تحلیل جریان سیال در کانال رانش هیدرومغناطیسی مقطع مستطیل پرداختند. آن‌ها روابط ناویر-استوکس برای سیال با روابط ماکسول ترکیب شد و نیروی لورنتز تحت اثر میدان الکترومغناطیسی مدل‌سازی کردند. شبیه‌سازی عددی سه‌بعدی سیستم رانش هیدرومغناطیسی به همراه نتایج تجربی ارائه شد. سرعت و نرخ جریان سیال برای جریان الکتریکی‌های متفاوت در میدان مغناطیسی ثابت شبیه‌سازی شد و در نهایت یک پیکربندی بهینه ارائه گردید. مجموعه آزمایشگاهی در ابعاد چند سانتی‌متر و با میدان مغناطیسی ۰٫۳ تسلا ارائه شد و سرعت جریان در حدود ۰٫۱ متر بر ثانیه گزارش شد.



شکل ۱۷ سیستم رانش هیدرومغناطیسی [۳۶]

داس و گیر [۳۷] به بررسی دلایل علاقه به مفهوم رانش هیدرومغناطیسی دریایی پرداختند. آن‌ها موارد مهم در عملکرد سیستم رانش شامل اتلاف‌های نازل، اتلاف‌های اهمی و اصطکاکی، اثرات سه‌بعدی و الکترولیز را مورد توجه قرار دادند. همچنین یک مدل تحلیلی دوبعدی برای سیستم رانش ارائه و نشان داده شد که اثرات اتلاف اصطکاکی حائز اهمیت است. در [۳۸] مطالعه تجربی بر تأثیر متقابل الکترولیز و هیدرودینامیک در سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی پرداخته شد. نتایج نشان داد که الکترولیز میکرو حباب‌ها اثر چندانی بر جریان نداشته و الکترولیز با جریان امکان کنترل دارد. میشل و گابسر [۳۹] به مطالعه رانش کشتی با استفاده از سیستم رانش هیدرومغناطیس ابررسانا پرداختند. آن‌ها به مطالعه مغناطیس‌های ابررسانا دما بالا پرداختند و نشان دادند برای سرعت‌های ۴۰ نات و بالاتر با میدان مغناطیسی ۵ تسلا، بازده سیستم بالاتر از ۵۰ درصد می‌شود. بنابراین ساخت ماشین‌های الکتریکی و مغناطیس‌های پر قدرت امکان حرکت شناور سرعت بالا را مهیا می‌سازد.

هالس و همکارانش [۴۰] به طراحی و ساخت یک قایق مدل دارای سیستم رانش هیدرومغناطیس ابررسانا پرداختند. آن‌ها از الکترودهای آلومینیومی برای عبور جریان از آب دریا به همراه میدان مغناطیسی در حدود ۰٫۲ تسلا برای رانش قایق استفاده کردند که سرعتی در حدود ۶ کیلومتر بر ساعت برای مدل ایجاد گردید.

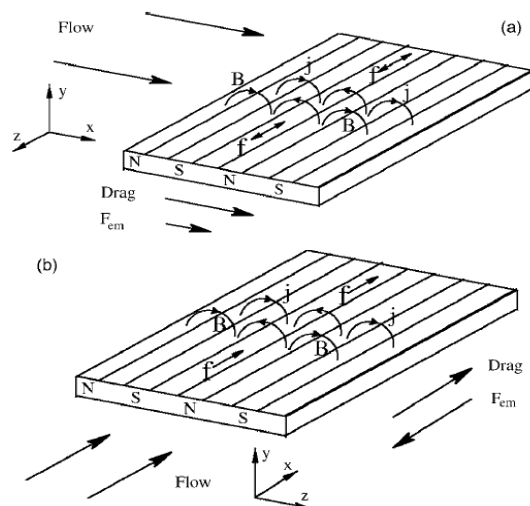


شکل ۱۸ قایق مدل دارای سیستم رانش هیدرومغناطیسی [۴۰]

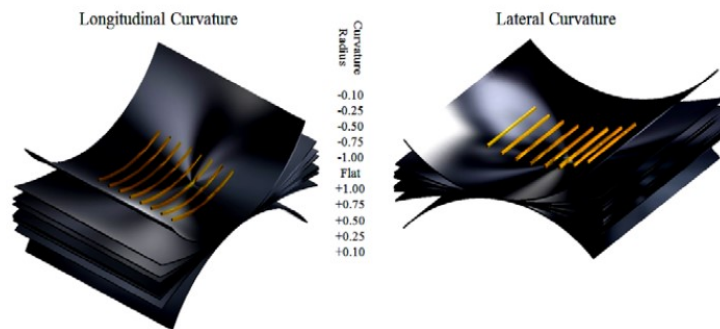
پتريک و ديگران [۴۱] به مطالعه کاربردی بودن سیستم رانش در مقیاس بزرگ پرداختند. آن‌ها در تحلیل خود میدان مغناطیسی ۲ تسلا و بالاتر را در نظر گرفتند و کارایی مغناطیس‌های ابررسانا را در سیستم‌های رانش عملی بیان کردند. در [۴۲] عملکرد تراستر هیدرودینامیک مغناطیسی آب دریا با انجام تست در میدان مغناطیسی ۲ تسلا بررسی شد. نتایج این تحلیل برای اعتبارسنجی مدل‌ها کامپیوتری سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی به کار رفت. جزئیات طراحی و تست با جزئیات بیان و نتایج کیفی تجربی با نتایج شبیه‌سازی مقایسه و اعتبارسنجی شد. هومسی و دیگران [۴۳] به تحلیل و بیان اصول پمپ‌های کوچک هیدرودینامیک مغناطیسی جریان مستقیم پرداختند. پمپ در یک کانال کوچک با دانسیته جریان بالا بدون ایجاد حباب و با

الکترودهای از جنس پلاتینیوم کار کرد. کاربرد پمپ برای الکترولیت دارای یون بالا توسط میدان مغناطیسی جریان مستقیم بوده و قابل تعمیم برای کاربردهای بیولوژیکی و دریایی بود. شاتروف و گرث [۴۴] اثر کاهش درگ هیدرودینامیکی بر بازده رانش را مطالعه کردند. آن‌ها شبیه‌سازی عددی جریان متلاطم کانال تحت اثر میدان الکترومغناطیسی را بررسی کردند. آن‌ها دو مورد را مطالعه کردند: یکی جریان الکتریکی متناوب زمانی تحت اثر میدان مغناطیسی ثابت که ایجاد نیروی لورنتز متناوب می‌کند؛ و دیگری یک میدان الکتریکی ثابت و یک میدان مغناطیسی پایا که ایجاد نیروی لورنتز پایا می‌کند.

چکاب و قدیمی [۴۵] اثر انحنا کانال هیدرومغناطیسی بر بازده سیستم رانش را در میدان مغناطیسی نسبتاً ضعیف بررسی کردند. آن‌ها حل عددی برای انحنا طولی و جانبی مجرای هیدرومغناطیسی ارائه و اثر آن بر رانش و بازده را نشان دادند. آن‌ها نشان دادند که انحنا منفی باعث افزایش نیروی رانش شده و انحنا طولی نیز نیروی تراست را تغییر می‌دهد.



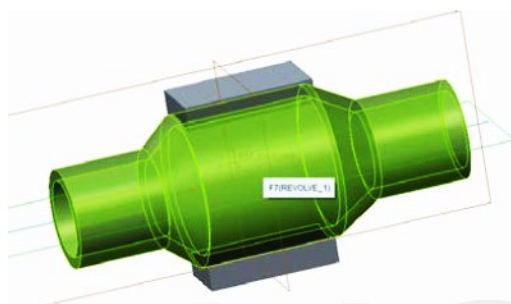
شکل ۱۹ رانش هیدرومغناطیسی با میدان مغناطیسی متناوب [۴۴]



شکل ۲۰ انحنا کانال رانش هیدرو مغناطیسی [۴۵]

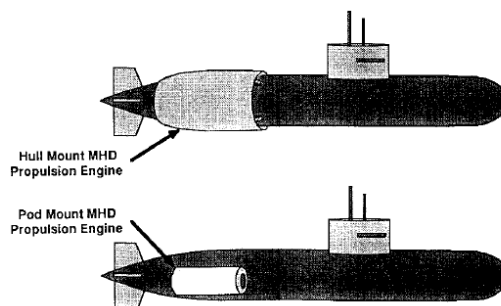
مجید علی‌عسگر و همکارانش [۴۶] در مقاله‌ای با عنوان بررسی پیشراننده مگنتوهیدرودینامیکی در شناورها، با بهینه‌سازی پارامترسیال ورودی، به مروری کلی و عمومی بر سیستم رانش، فواید و ویژگی‌های آب دریا پرداختند. آن‌ها هدایت الکتریکی آب دریا و اثر آن بر عملکرد سیستم رانش را به صورت کیفی بررسی کردند. چودهاری و دیگران [۴۷] به تحلیل عملکرد تراست سیستم رانش هیدرومغناطیسی با استفاده از نرم‌افزار انسیس فلونت^۸ پرداختند. آن‌ها اثر مجراهای مختلف رانش با نازل‌های مختلف را بررسی کرده و بدنه سیستم رانش را از آلیاژ نیکل در نظر گرفتند. آن‌ها طول کانال را حدود ۱۰ سانتی‌متر و قطر کانال را برابر ۲ سانتی‌متر با میدان مغناطیسی ۰٫۳۵ تسلا در نظر گرفتند. همچنین میدان الکتریکی از نوع جریان مستقیم در نظر گرفته و سرعت حاصل از مدل‌سازی با کامپیوتر برابر با حدود ۵ متر بر ثانیه حاصل شد.

^۸ Ansys Fluent



شکل ۲۱ مدل سیستم رانش در نرم افزار تحلیلی [۴۷]

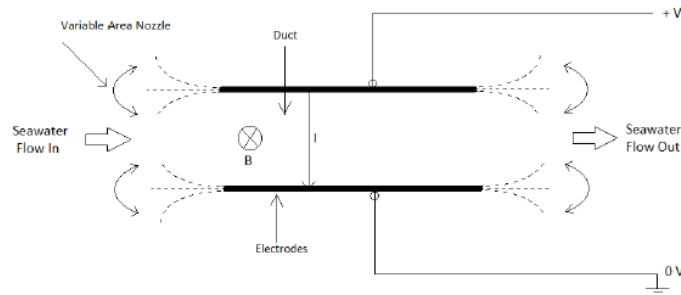
گیلبرت و لین [۴۸] به مطالعه سیستم رانش هیدرودینامیک مغناطیسی دریایی برای کاربرد زیردریایی پرداختند. آن‌ها تئوری حاکم بر پمپ‌های هیدرومغناطیسی را بیان کرده و از حجم کنترل دوگانه برای محاسبه سرعت وسیله، نیروی رانش و بازده توان استفاده کردند. آن‌ها کارایی این سیستم رانش برای وسایل کوچک به ویژه ربات‌های زیردریایی *ROV* و *AUV* را نشان دادند. نتایج نشان‌دهنده اثر هدایت الکتریکی در آب دریا و قدرت میدان مغناطیسی بر عملکرد بود. در [۴۹] به مطالعه اساسی تراسترهای هیدرومغناطیسی جریان متناوب برای رانش کشتی‌ها پرداخته شد. با در نظر گرفتن تئوری هیدرومغناطیسی و هیدرودینامیک، معادلات ترکیبی جریان سیال و میدان مغناطیسی برای سیستم رانش دریایی تحلیل و شبیه‌سازی شد. رابطه میان سرعت جریان و سرعت انتقال موج میدان مورد مطالعه قرار گرفت و نشان داده شد که میدان مغناطیسی بالاتر با فرکانس بیشتر باعث افزایش سرعت جریان می‌شود. آکاگی و دیگران [۵۰] به طراحی بهینه سیستم رانش مغناطیسی ابررسانا برای رانش شناور سطحی پرداختند. آن‌ها با بیان انواع چیدمان و پیکربندی سیستم رانش در شناور، به طراحی بهینه سیستم رانش پرداختند. بر اساس تئوری هیدرودینامیک و میدان مغناطیسی، یک مدل ریاضی دوبعدی برای تراستر هیدرومغناطیسی جریان متناوب ارائه شد و بر کارایی مواد ابررسانا در سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی اشاره شد. همچنین در [۵۱] به طراحی مفهومی سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای ربات زیردریایی پرداخته شد. تراپانس و دیگران [۵۲] به ارائه یک سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای ربات زیردریایی با کاربرد رانش کمکی و به منظور اتصال ربات زیردریایی به بدنه شناور پرداختند. آن‌ها مدل تحلیل رانش هیدرومغناطیسی به همراه تحلیل عددی آن را ارائه دادند. داس و گیر [۵۳] به بیان کلی بر عملکرد سیستم رانش دریایی و مکانیزم‌های اتلاف در آن‌ها پرداختند. اتلاف‌هایی نظیر اصطکاک، الکتروشیمیایی اتلاف نازل بررسی شد و مدل ساده و دقیق برای بیان ارتباط مقدار مطلق اتلاف و بازده رانش ارائه گردید. همچنین مطالعه پارامتری برای بیان سرعت و نیروی رانش وسیله زیردریایی برحسب پارامترهای سیستم رانش نظیر قدرت میدان مغناطیسی ارائه گردید. چووی و نایت [۵۴] به کاربرد روش حل تقریبی جداسازی برای تحلیل سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی پرداختند. آن‌ها با بیان دو پیکربندی سیستم رانش بر ربات زیردریایی، فقط به بررسی حالت نصب بر بدنه پرداختند. همچنین حل عددی برای تحلیل سیستم رانش ارائه شد. جریان سیال ویسکوز و غیر ویسکوز مورد مطالعه و نیروی لورنتز برای جریان به دست آمد.



شکل ۲۲ پیکربندی مختلف سیستم رانش هیدرومغناطیسی [۵۴]

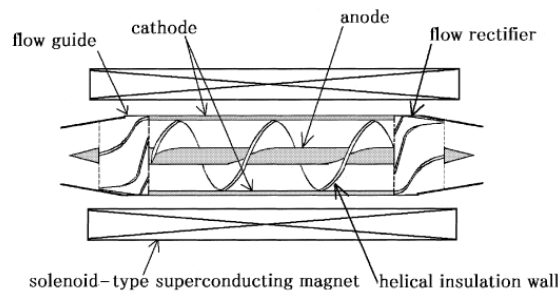
جمال‌آبادی [۵۵] به مطالعه تحلیلی پایداری سیستم رانش هیدرودینامیک دریایی در حضور میدان الکترومغناطیسی دارای نوسان عرضی پرداخت. معادلات دیفرانسیل جزئی حاکم بر جریان سیال با در نظر گرفتن نیروی الکترومغناطیسی بیان و با استفاده از روش عددی حل شد. سرعت بیشینه در کانال رانش بر اساس پارامترهای مختلفی نظیر عدد رینولدز جریان، شدت

میدان مغناطیسی، فرکانس میدان الکتریکی و مغناطیسی بیان و پایداری جریان بررسی شد. بانسال و بیریزولا [۵۶] به کاربرد سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای ربات‌های زیردریایی هوشمند (AUV) پرداختند. معادلات اساسی سیستم رانش با در نظر گرفتن اثر متقابل الکترومغناطیسی برای محاسبه نیروی لورنتز بیان شد و آب دریا به عنوان سیال جاری در کانال در نظر گرفته شد. آن‌ها کانال رانش به طول ۱۵ سانتی‌متر و قطر ۵ سانتی‌متر در نظر گرفتند. با در نظر گرفتن نازل، معادلات تقریبی برای محاسبه نیروی رانش ربات زیردریایی ارائه و پارامترهای مختلف طراحی بررسی شد.



شکل ۲۳ سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای ربات زیردریایی [۵۶]

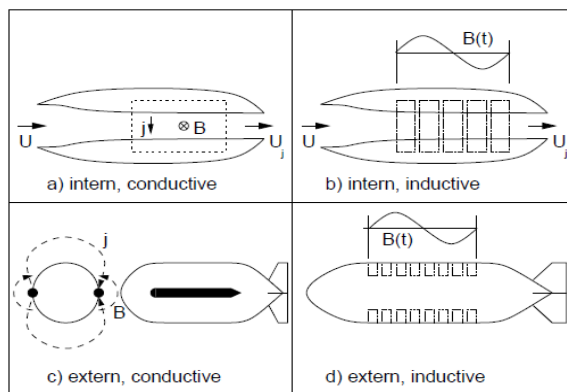
لین بری و وو [۵۷] به مطالعه عمومی کاربرد و پیشرفت‌های سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای رانش دریایی پرداختند. روابط اساسی برای سیستم رانش بیان و اثر پارامترهای مختلف بر بازده سیستم رانش بررسی شد. تمپلمیر [۵۸] به مشخصه‌های الکتریکی سیستم رانش هیدرودینامیک مغناطیسی برای جریان آب دریا پرداختند. او به هدایت الکتریکی و دمای آب و اثر آن بر سیستم رانش هیدرومغناطیسی پرداختند. همچنین ویژگی الکتروود و ایجاد حباب نیز مورد مطالعه قرار گرفت. نیشیگای و همکارانش [۵۹] به مطالعه شناورهای هیدرومغناطیسی ابررسانا با دیواره مارپیچ پرداختند. آن‌ها تست‌های تجربی سیستم رانش مارپیچ با میدان مغناطیسی شدت بالا در حدود ۴۰ تسلا را برای کانال رانشی در حدود ۲۰ سانتی‌متر و قطر ۱۰ سانتی‌متر مورد مطالعه قرار دادند. جریان الکتریکی از ۱۰ تا ۷۰۰ آمپر در نظر گرفته شد و تست انجام شد. نتایج نشان داد که بازده با افزایش میدان مغناطیسی و الکتریکی افزایش می‌یابد.



شکل ۲۴ سیستم رانش هیدرومغناطیسی با دیواره مارپیچ [۵۹]

سبرون و همکارانش [۶۰] به تحلیل تئوری و تجربی یک مدل کشتی هیدرودینامیک مغناطیسی برای اثبات نیروی لورنتز و رانش جریان سیال پرداختند. تحلیل آن‌ها برای مقایسه و تأیید بین نتایج تئوری و تجربی ارائه شد. طول کانال سیستم رانش حدود ۱۰ سانتی‌متر و شدت میدان مغناطیسی در حدود ۱ تسلا و باتری لیتیومی ۳ سلولی در نظر گرفته شد. آن‌ها اثرات پارامترهای مختلفی نظیر هدایت الکتریکی، میدان مغناطیسی و ... را بر نیروی رانش و بازده بررسی کردند. در [۶۱] کارایی سیستم رانش هیدرومغناطیسی دینامیکی برای زیردریایی‌ها مطالعه شد. آن‌ها در فاز اول مدل کامپیوتری برای سیستم رانش ارائه دادند و در فاز دوم به تست‌های تجربی سیستم رانش در میدان مغناطیسی ۲ تسلا پرداختند. همچنین آن‌ها دو مدل برای سیستم رانش در نظر گرفته و به مدل‌سازی دراگ در کانال رانش پرداختند. همچنین آن‌ها [۶۲] کارایی سیستم رانش

هیدرومغناطیسی را بررسی و نتایج تحلیلی را با نتایج تجربی برای میدان مغناطیسی ۲ تسلا مقایسه کردند. ویبر و دیگران [۶۳] به مروری اجمالی بر تحقیقات انجام شده بر سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی برای کنترل جریان در میدان مغناطیسی ضعیف پرداختند. آن‌ها بر اساس محل قرارگیری سیستم رانش و همچنین نوع جریان الکتریکی، سیستم رانش به چهار دسته تقسیم‌بندی می‌شود. آن‌ها بازده و نیروی دراگ در سیستم رانش را مورد مطالعه و بررسی قرار دادند.



شکل ۲۴ دسته‌بندی سیستم رانش هیدرومغناطیسی [۶۳]

تمپلیر و همکارانش [۶۴] به بررسی نوین در سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی در آب دریا پرداختند. آن‌ها نتایج تحلیلی و تجربی را برای یک سیستم رانش ابعاد کوچک ارائه دادند. آن‌ها طول کانال را برابر با ۱۳ سانتی‌متر در نظر گرفته و جریان الکتریکی ۱۲ آمپر و ولتاژ ۳۰ ولت را برای سیستم رانش تجربی قرار دادند. جنس آند و کاتود از آلومینیوم و فولاد خاص در نظر گرفته شد و نتایج مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در [۶۵] به بهینه‌سازی هندسه سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای کاهش تلفات پرداختند. آن‌ها به مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی سیستم رانش پرداخته و اثر پارامترهای مختلف را بر عملکرد سیستم بررسی کردند. پنگ و دیگران [۶۶] به مطالعه تحلیلی عملکرد سیستم رانش هیدرومغناطیسی مارپیچ در میدان مغناطیسی قوی پرداختند. ضریب اصطکاک معادل برای اتلاف در سیستم رانش تعریف و مقدار آن با تست‌های تجربی مشخص گردید. در [۶۷] عملکرد و مشخصات جریان تراسترهای هیدرودینامیک مغناطیسی با سیال آب دریا مطالعه شد. با تعیین فاکتور اصطکاک، پارامترهای مختلفی نظیر ابعاد هندسی، ضریب بار و شدت میدان مغناطیسی بر عملکرد سیستم رانش بررسی شد. لین و دیگران [۶۸] به تحلیل عملکرد وسایل زیردریایی با رانش هیدرودینامیک مغناطیسی دریایی پرداختند. آن‌ها سیستم رانش جریان مستقیم در نظر گرفته و با لحاظ حجم کنترل به بیان معادلات حاکم بر آن پرداختند. همچنین کارایی این سیستم رانش برای زیردریایی‌های کوچک به‌ویژه ربات‌های زیردریایی بررسی شد. در [۶۹] به تحقیقات انجام شده بر کشتی مدل همس یک (HEMSI) و مراحل تحقیق و ساخت آن به‌تفصیل بیان شد. همچنین در [۷۰] تحقیق نظری و تجربی رانش هیدرومغناطیسی برای وسایل دریایی ارائه شد. روابط حاکم بر سیستم رانش برای محاسبه نیروی رانش لورنتز بیان و الکترودها به‌صورت خطی در کانال رانش در نظر گرفته شد. روابط برای سیستم رانش یک ربات زیردریایی توسعه و پارامترهای مختلف مورد تحلیل و نتایج تجربی نیز ارائه شد.

در پایان و با مطالعه ۷۰ مرجع می‌توان بیان نمود که سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی در سه دسته اصلی قابل تقسیم است:

دسته اول سیستم هیدرومغناطیسی برای کاربرد میکروپمپ‌ها می‌باشد که دارای مشخصات شامل ابعاد در حد چند صد میکرون تا چند میلی‌متر است. همچنین مشخصات فنی آن شامل میدان مغناطیسی‌های ضعیف چند صدم تا دهم تسلا و میدان الکتریکی چند میلی‌آمپر است که اختلاف فشار در حدود چند صد پاسکال ایجاد کرده و کاربردهای پزشکی دارد.

دسته دوم سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی برای کاربرد ربات‌های زیردریایی و مدل‌های شناور می‌باشد. مشخصات ابعادی این سیستم هیدرومغناطیسی چند ده تا صد سانتی‌متر بوده و دارای مشخصات فنی میدان مغناطیسی در حدود چند دهم تا چند تسلا و میدان الکتریکی دارای ولتاژ و جریان در حدود چند تا چند ده ولتاژ و آمپر است.

دسته سوم سیستم‌های رانش هیدرومغناطیسی برای کاربرد زیردریایی و شناورها مورد کاربرد قرار می‌گیرد. مشخصات ابعادی این نوع سیستم رانش در حدود چند ده متر است. مشخصات فنی و عملیاتی میدان مغناطیسی سیستم در حدود ده تسلا و میدان الکتریکی در حدود چند صد ولت و چند صد آمپر است. بنابراین سیستم رانش هیدرومغناطیسی بنابر تحقیقات به سه دسته یا رده کوچک با کاربرد میکروپمپ‌ها، رده متوسط با کاربرد ربات‌ها و شناورهای مدل دریایی و رده سنگین با کاربرد شناورها و زیردریایی دسته‌بندی و بررسی گردید.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله سیستم رانش هیدرومغناطیسی با در نظر گرفتن کاربرد دریایی مورد توجه قرار گرفته است. سیستم‌های هیدرومغناطیسی دارای کاربردهای متنوعی هستند که از مهم‌ترین کاربردهای آن می‌توان به سیستم انتقال فلزات مذاب، پمپ‌های کوچک هیدرومغناطیسی و سیستم رانش دریایی اشاره نمود. لذا در این تحقیق، مروری بر ادبیات موضوع سیستم رانش هیدرومغناطیسی با کاربرد دریایی انجام شده و ۷۰ مرجع معتبر علمی در این زمینه مطالعه و ارائه گردیده است. همچنین انواع تقسیم‌بندی سیستم رانش هیدرومغناطیسی بر اساس موقعیت نصب، نوع میدان الکتریکی، نوع مجرای سیال و ... ارائه شد و محدوده عملکردی سیستم رانش هیدرومغناطیسی برای انواع شناورهای سطحی و زیرسطحی بیان شد. با مرور مقالات مختلف نشان داده شد که در حالت کلی سیستم رانش هیدرومغناطیسی به سه دسته یا رده کوچک با کاربرد میکروپمپ‌ها، رده متوسط با کاربرد ربات‌ها و شناورهای مدل دریایی و رده سنگین با کاربرد شناورها و زیردریایی دسته‌بندی می‌گردد.

۵- مراجع

- [1] Davidson PA. An introduction to magnetohydrodynamics; Cambridge University Press, 2002.
- [2] Lielausis O. Liquid-metal magnetohydrodynamics. Atomic Energy Review, 1975; 13(3): 527-581.
- [3] Bykhovsky D G, Panov AN. U.S. Patent No. 5,009,399. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1991.
- [4] Nguyen NT, Huang X, Chuan TK. MEMS-micropumps: a review. Journal of fluids Engineering, 2002; 124(2): 384-392.
- [5] Laser DJ, Santiago JG. A review of micropumps. Journal of micromechanics and microengineering, 2004; 14(6): R35.
- [6] <https://www.skewsme.com/mhd.html>
- [7] Rice WA. U.S. Patent No. 2,997,013. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1961.
- [8] Phillips OM. The prospects for magnetohydrodynamic ship propulsion. Journal of ship research, 1962; 43: 43-51.
- [9] Way S. Propulsion of submarines by Lorantz forces in surrounding, Mechanical Engineering, 1965; 87(5):142.
- [10] Akagi S, Fujita K, Soga K. Optimum design of thruster system for superconducting electromagnetic ship propulsion, 1994.
- [11] Han J, Sha C, Peng Y. Fundamental Study on Alternating Magnetic Field MHD Thruster. 17th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives, 2002.
- [12] Negahdari MR, Shafie zadeh E, Enayat A. Application of electromagnetic propulsion system as a submarine thruster, 4th congress of Marine Industries, Iranian Marine Engineering Association, 2012 (in Persian).
- [13] Gilbertt JB, Lint TF. Analyses of underwater magnetohydrodynamic propulsion. 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1990.

- [14] Saji Y, Iwata A, Sato S. Construction of model ship ST-500 with superconducting electromagnetic thrust system. 8th Int. Crogenic Engineering Conf, 1980
- [15] Swallow DW, Sadovnik I, Gibbs JS, Guro H, Nguyen LV, Van Den Bergh HH. Magnetohydrodynamic submarine propulsion systems. Naval Engineers Journal, 1991; 103(3): 141-157.
- [16] Meng JC. Superconducting electromagnetic thruster (No. PAT-APPL-16 324). DEPARTMENT OF THE NAVY WASHINGTON DC, 1994.
- [17] Meng JCS. Superconducting electromagnetic thruster for seawater propulsion. Proc Second Workshop on Magnetohydrodynamic Submarine Propulsion, San Diego, CA, 1989.
- [18] Doss, E., & ROY, G. (1991). Flow characteristics inside MHD seawater thrusters. Journal of Propulsion and Power, 7(4), 635-641.
- [19] Doss ED, Roy GD. Flow development and analysis of MHD generators and seawater thrusters. Journal of fluids engineering, 1992; 114(1): 68-72.
- [20] Tixador, P. Magnetic levitation and MHD propulsion. Journal de Physique III, 1994; 4(4): 581-593.
- [21] Holleck GL, Jones GS. Sacrificial electrodes for the enhancement of seawater conductivity, Third ONR Propulsion Meeting, Middletown, RI, 1990.
- [22] Tempelmeyer KE. Electrical Characteristics of a Seawater MHD Thruster (No. DTRC-90/017). DAVID TAYLOR RESEARCH CENTER BETHESDA MD, 1990.
- [23] Lin TF, Aumiller DL, Gilbert JB, Cosio MJ, Brandt BL, Rubin LG. Study of the influence of electric and magnetic fields on seawater magnetohydrodynamic propulsion. Second International Offshore and Polar Engineering Conference, International Society of Offshore and Polar Engineers, 1992.
- [24] Moreno JE. Electrochemical aspects of magnetohydrodynamic thrusters. Florida Atlantic University, 2011.
- [25] Taussig R. A foreign technology assessment of superconductor technology applied to MHD ship propulsion, Spectra Technology. Inc., STI, 1705, 1988.
- [26] Lin TF. Superconducting magnetohydrodynamic ship propulsion—A worldwide research effort. Scientific Information Bul-letin-Office of Naval Research Asian Office, 1988: 237-242.
- [27] Motora S, Takezawa S, Tamama H. Development of the MHD ship YAMATO-1. OCEANS, 1991.
- [28] Takezawa S, Tamama H, Sugawawa K, Sakai H. Operation of the thruster for superconducting electromagnetic propulsion ship “YAMATO 1”. Bulletin of the MESJ, 1995; 23(1): 46.
- [29] Way S. Electromagnetic propulsion for cargo submarines. Journal of Hydronautics, 1968; 2(2): 49-57.
- [30] Bednarczyk AA. Nuclear electric magnetohydrodynamic propulsion for submarine. Massachusetts Inst of Tech Cambridge, 1989.
- [31] Lin TF, Gilbert JB, Roy GD. Analyses of magnetohydrodynamic propulsion with seawater for underwater vehicles. Journal of Propulsion and Power, 1991; 7(6):1081-1083.
- [32] Meng JC. Magnetohydrodynamic boundary layer control System U.S. Patent No. 5,273,465. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office, 1993.
- [33] Doss ED, Geyer HK. The need for superconducting magnets for MHD seawater propulsion. 25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, 1990.
- [34] Bennecib N, Abdessemed R, Drid S. Design and flow simulation for a new DC pump MHD for seawater, J. Appl. Fluid Mech, 2009; 2(2): 23-28.
- [35] Lin TF, Aumiller DL, Gilbert JB, Coslo MJ. Studies of several small seawater MHD thrusters using the high-field solenoid of MIT's bitter magnet laboratory. Annual report, Pennsylvania State Univ., University Park, PA (United States). Applied Research Lab, 1993.
- [36] Aoki LP, Maunsell MG, Schulz HE. A Magnetohydrodynamic study of behavior in an electrolyte fluid using numerical and experimental solutions. Revista de Engenharia Térmica, 2018; 11(1-2): 53-60.
- [37] Doss ED, Geyer HK. MHD seawater propulsion. 1993.
- [38] Boissonneau P, Thibault JP. Experimental analysis of couplings between electrolysis and hydrodynamics in the context of MHD in seawater. Journal of Physics D: Applied Physics, 1999; 32(18): 2387.

- [39] Mitchell DL, Gubser DU. Magnetohydrodynamic ship propulsion with superconducting magnets. *Journal of Superconductivity*, 1988; 1(4): 349-364.
- [40] Hales P, Hirst P, Milward S, Harrison S, Jones H. A solid-nitrogen cooled high-temperature superconducting magnet for use in magnetohydrodynamic marine propulsion. *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2006; 16(2): 1419-1422.
- [41] Petrick M, Libera J, Bouillard JX, Pierson ES, Hill D. Results from a large-scale MHD propulsion experiment (No. ANL/CP-76633; CONF-920677-16; CONF-921038-4). Argonne National Lab., IL, 1992.
- [42] Picologlou B, Doss E, Black D, Sikes W. Experimental determination of magnetohydrodynamic seawater thruster performance in a two Tesla test facility (No. ANL/CP-76576; CONF-920801-22). Argonne National Lab., IL (United States), 1992.
- [43] Homsy A, Koster S, Eijkel JC, van den Berg A, Lucklum F, Verpoorte E, de Rooij NF. A high current density DC magnetohydrodynamic (MHD) micropump. *Lab on a Chip*, 2005; 5(4): 466-471.
- [44] Shatrov V, Gerbeth G. Magnetohydrodynamic drag reduction and its efficiency. *Physics of Fluids*, 2007; 19(3): 035109.
- [45] Chekab MA, Ghadimi P Curvature Effects on the Electromagnetic Force, Efficiency, and Heat Transfer of a Weak Low Profile Magneto-Hydrodynamic Blanket Propulsion System. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 2017; 10(5): 1261-1270.
- [46] Askari Saiar M, Akbari Vakil Abadi K, Dabghian AA. Investigation of magnetohydrodynamic thrusters in marine vehicles by optimization of inlet fluid parameter. *International congress of Engineering Science and Sustainable Urban Development*, Polytechnic University of Denmark, 2018 (in Persian).
- [47] Choudhary UK, Pratap A, Performance analysis of MHD thruster using CAE tools. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 2015; 6(5): 335-338.
- [48] Gilbertt JB, Lint TF. Analyses of underwater magnetohydrodynamic propulsion. *25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1990.
- [49] Han J, Sha C, Peng Y. Fundamental study on alternating magnetic field MHD thruster. *17th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, 2002.
- [50] Akagi S, Fujita K, SOGA K. Optimal design of thruster system for superconducting electromagnetic ship propulsion, 1994.
- [51] Sedor G. A conceptual design of a propulsion system for an autonomous underwater vehicle, 1989.
- [52] Trapanese M, Raimondi FM, Curto D, Rao D. A magnetohydrodynamic auxiliary propulsion system for docking assistance of autonomous vehicle. *OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey*, 2016.
- [53] Doss ED, Geyer HK. An overview of MHD seawater thruster performance and loss mechanisms, *SAE Technical Paper* 1992.
- [54] Choi D, Knight CJ. Application of scalar implicit approximate factorization for underwater magnetohydrodynamic propulsion concept analyses. *AIAA journal*, 1993; 31(2):286-293.
- [55] Jamalabadi MA. Analytical study of magnetohydrodynamic propulsion stability. *Journal of Marine Science and Application*, 2014; 13(3):281-290.
- [56] Bansal P, Brizzolara S. Application perspectives of magneto-hydro-dynamics to propel autonomous underwater vehicles. In *SNAME Maritime Convention*. The Society of Naval Architects and Marine Engineers, 2018.
- [57] Lineberry JT, Wu YS. Criteria for MHD sea mater propulsion. *25th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference*, 1990.
- [58] Tempelmeyer KE. Electrical characteristics of a seawater MHD thruster. *DAVID TAYLOR RESEARCH CENTER BETHESDA MD*, 1990.
- [59] Nishigaki K, Sha C, Takeda M, Peng Y, Zhou K, Yang A, Wada H. Elementary study on superconducting electromagnetic ships with helical insulation wall. *Cryogenics*, 2000; 40(6), 353-359.

- [60] Cébron D, Viroulet S, Vidal J, Masson JP, Viroulet P. Experimental and theoretical study of magnetohydrodynamic ship models. *PloS one*, 2017; 12(6):e0178599.
- [61] Doss ED, Sikes WC. Feasibility of MHD submarine propulsion (No. ANL-92/35; NNS--2732/1). Argonne National Lab., IL (United States); Newport News Shipbuilding and Dry Dock Co., 1992.
- [62] Picologlou BF, Doss ED, Geyer HK, Sikes WC, Ranellone RF. MHD seawater thruster performance: A comparison of predictions with experimental results from a two Tesla test facility (No. ANL/CP-77194; CONF-921038-5). Argonne National Lab., IL (United States), 1992.
- [63] Weier T, Shatrov V, Gerbeth G. Flow control and propulsion in poor conductors. In *Magnetohydrodynamics*, Springer, Dordrech, 2007.
- [64] Ternpelmeyer KE, Norfolk J, Nesbitt S, Gordon J. Noise in a small MHD-type seawater thruster in real and simulated ocean waters. *OCEANS 91*, 1991.
- [65] Kom CH, Brunet Y. Optimization of a MHD thruster geometry to minimize leakage fields. *IEEE transactions on magnetics*, 1995; 31(3), 2182-2185.
- [66] Peng Y, Sha C, Zhou K, Yang A, Qing J. Performance analyses of helical MHD thruster in 14 Tesla. 33rd plasmadynamics and lasers conference, 2002.
- [67] Doss ED. Performance and flow characteristics of MHD seawater thruster (No. CONF-9010293-1). Argonne National Lab., IL (USA), 1990.
- [68] LIN, T., GILBERT, J., & Roy, G. D. (1990, July). Performances of Underwater Vehicles Using Sea-Water Magnetohydrodynamic Propulsion. In 26th Joint Propulsion Conference (p. 2475).
- [69] Yan LG, Sha CW, Zhou K, Peng Y, Yang AH, Qin JQ. Progress of the MHD ship propulsion project in China, *IEEE transactions on applied superconductivity*, 2000; 10(1):951-954.
- [70] Bansal P. Theoretical and Experimental Investigation of Magneto Hydrodynamic Propulsion for Ocean Vehicles (Doctoral dissertation, Virginia Tech), 2018.