مکانیک / سال ۱۴۰۱ /دوره پاییز و زمستان /شماره ۱ /صفحه ۱۲۵-۱۲۵



نشریه علم و فناوری در مهندسی مکانیک

DOI: 10.22034/STME.2023.168720



مطالعهی عددی و بررسی تأثیر میدان مغناطیسی بر سرعت و افت فشار سیال هیدرودینامیک مغناطیسی در بلنکت مبین غفاری شاد ^۱، مصطفی والیزاده اردلان ^۲، علی جوادی^{3*}

> ۱- دانشجوی کارشناسی ارشد؛ دانشکدهی مهندسی، گروه مکانیک ، دانشگاه برگامو، برگامو ، ایتالیا. ۲- دکترای تخصصی؛ دانشکدهی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران. ۳- دکترای تخصصی؛ دانشکدهی مهندسی ، گروه مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

چکیدہ

پژوهش حاضر به مطالعهی عددی یک رآکتور گداخت هستهای و اهمیت سرعت سیال هیدرودینامیک مغناطیسی در فرآیند هم جوشی هسته ای پرداخته است. در رآکتورهای گداخت هستهای سیال توسط یک لایه جداکننده، از بدنهی اصلی بلنکت فاصله می گیرد. ساختار جداکننده از دو جهت حائز اهمیت فراوان است. این ساختار در اولویت اول بهعنوان عایق حرارتی عمل می کند. در اولویت دوم از جداکننده برای تنظیم فشار استفاده می شود. موضوعاتی که در این پژوهش برای بررسی انتخاب شدهاند عبارتند از: تأثیر شدت میدان مغناطیسی، پروفیل و ابعاد سطح مقطع بلنکت و ضخامت دیوارهها بر سرعت جریان و افت فشار سیال هیدرودینامیک مغناطیسی. همچنین پروفیل تغییرات سرعت جریان تحت تأثیر شدت میدان مغناطیسی بهمنظور انتخاب بهترین سطح مقطع ممکن برای بلنکت در طول کانال رسم شده است. نتایج بهدستآمده نشان میدهند که سرعت ماکزیمم در بلنکت با سطح مقطع مستطیلی در میدان ۱ تسلا، ۱۱ درصد و در میدان ۴ تسلا، ۹ درصد بیشتر از بلنکت با سطح مقطع مربع است. همچنین افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۱ تسلا به ۴ تسلا باعث افزایش ۹ برابری افت فشار در بلنکت با سطح مقطع میشتر از بلنکت با سطح مقطع مربع است. همچنین افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۱ تسلا به ۴ تسلا باعث افزایش ۹ برابری افت فشار در بلنکت با سطح مقطع مربع و افزایش ۱۲ برابری افت فشار در بلنکت با سطح مقطع مستطیلی در میدان ۱ تسلا، ۱۰ درمید و در میدان ۴ تسلا، ۹ درصد مربع و افزایش ۱۲ برابری افت فشار در بلنکت با سطح مقطع مستطیلی می و افزایش ۹ برابری افت فشار در بلنکت با سطح مقطع

كلمات كليدي

سيال هيدروديناميك مغناطيسي، بلنكت، افت فشار، ميدان مغناطيسي، مطالعهي عددي، همجوشي هستهاي

Numerical study of the effect of magnetic field on velocity and pressure drop of magneto hydrodynamic fluid in blanket

Mobin Ghafari Shad¹, Mostafa Valizadeh Ardalan², Ali Javadi^{3*}

1- Department of Mechanical Engineering, University of Bergamo, Bergamo, Italy.

2- Department of Mechanical Engineering, Shahroud University of Technology, Shahroud, Iran.

3- Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

Abstract

The present study investigates the structure of a nuclear fusion reactor and the importance of magnetic hydrodynamic fluid. In reactors, the fluid is separated from the main body of the blanket by a separating layer. The separating structure is important in two ways. This structure primarily acts as a thermal insulator. The second priority is used for the separator to adjust the pressure and reduce it. The topics selected in this study are: the effect of magnetic field strength, profiles and dimensions of a blanket, wall thickness, flow velocity and pressure drop, as well as the profile of flow velocity changes due to magnetic field strength. The results show that the maximum velocity in blanket with rectangular cross section in 1T field is 11% and in 4T field is 9% faster than blanket with square cross section. Also, increasing the magnitude of the magnetic field from 1T to 4T causes a 9-fold increase in pressure drop in the blanket with a square cross-section and an 11-fold increase in the pressure drop in the blanket with a rectangular cross-section.

Keywords

Magneto hydrodynamics, Blanket, Pressure drop, Magnetic field, Numerical study, Nuclear fusion

*على جوادى، alijavadi91@yahoo.com

۱۱٤ نشریه مکانیک/ سال۱۴۰۱/ دوره پاییز و زمستان/ شماره ۱

۱- مقدمه

به بررسی رفتار دینامیکی سیال رسانا که تحت تأثير ميدان مغناطيسي قرار گرفته، هيدروديناميک مغناطیسی می گویند. امروزه هیدرودینامیک مغناطیسی بخش مهمی از صنایع دفاعی، نظامی، تجهیزات هوافضا و رآکتورهای همجوشی هستهای است. به رآکتورهای همجوشی هستهای، توکامک گفته می شود. بلنکت کی از مهمترین قسمتهای یک توکامک است که وظیفهی تولید سوخت، انتقال انرژی و محافظت از سایر قسمتهای توکامک در برابر تشعشات شدید را دارد. برای دستیابی به همجوشی هستهای، یک میدان قوی مغناطیسی مورد نیاز است. به همین دلیل بلنکتها همواره در معرض شدیدترین میدانهای مغناطیسی هستند. منظور از همجوشى هستهاى، پيوند بين ايزوتوپ هيدروژن (دوتریوم و تریتیوم) است. ایتر^۳در حال حاضر بزرگترین رآکتور همجوشی است. سیال استفادهشده در این پروژه بينالمللي فلز مايع سرب-ليتيم ١٧ است. اهميت اين سیال توانایی بالای آن در انتقال حرارت و ظرفیت بالای آن برای تولید تریتیوم است. مهمترین موضوعاتی که محققین در رابطه با این سیال بررسی می کنند افت فشار سيال، سرعت جريان أن و ميزان انتقال حرارت است [۱].

اگرچه هنوز هم محققین نتوانستهاند نتایج پژوهشهای خودشان را بهصورت عملی اجرا کنند، اما بشر به

Archive of SID.ir

یافتههای بسیار مهمی در رابطه با همجوشی هستهای و هيدروديناميک مغناطيسي دست يافته است. تحقيقات روی همجوشی هستهای از قرن ۲۰ میلادی شروع شدند. تحقیقات در این زمینه با پژوهش کیم^۵ و همکارانش [7] روى سرعت سيال هيدروديناميك مغناطيسي شروع آغاز شد. کمی بعدتر وانگ و همکارانش [۳] مطالعاتی دربارهی جنس مادهی جداکننده و تأثیر آن بر افت فشار انجام دادند. در سال ۲۰۰۹، استارک^۷ [۴] تأثیر سیال هیدرودینامیک مغناطیسی را بهصورت عملی در رآکتور پروژهی بینالمللی ایتر بررسی کرد. در سال ۲۰۱،۳ لی[^]و همکاران [۵] به بررسی عددی افت فشار سیال در کانالی با سطح مقطع دایره پرداختند. آنها دریافتند که تغییر سطح مقطع ورودی کانال راندمان همجوشی را تا ۳۵ درصد کاهش میدهد. در سال ۲۰۱۷، فرناندز ^۹ از طرف یک مؤسسهی پژوهشهای بینالمللی [۶]، تأثیر استفاده از خنککنندهی گازی هلیومی بر دمای بدنه را بررسی کرد. او متوجه شد که اگر از ۳ داکت گاز هلیوم در سطح مقطع ورودى كانال استفاده شود، دماى بدنه بهشدت کاهش می یابد. در سال ۲۰۱۹، یوآن ما^{۱۰} و همکارانش [۷] تأثیر ضخامت لایهی هارتمن بر شدت انتقال حرارت از بدنه را بررسی کردند و با بررسی معادلهی استفان-بولتزمن،'' به نتایج مهمی دست یافتند. کمی بعدتر در سال ۲۰۱۹، هولین و همکارانش [۸] ساختار بدنهی جداکننده را با مواد نانو پوشش دادند و میزان افت فشار

- 1- Magneto hydrodynamic
- ۲– Blanket
- ۳– ITER
- **F** Pb_Li17
- ۵- Kim
- ۶– Wang
- **γ**− Starke
- ∧-Lee
- ۹– Fernández
- ৸– Yuan Ma
- 11- Stefan Boltzmann

نشریه مکانیک/ سال۱۴۰۱/ دوره پاییز و زمستان/ شماره۱

آنجایی که نیروگاههای شکافت هستهای مشکلات زیادی، ازجمله زبالههای هستهای و خطر همیشگی انفجار را دارند، محققین در تلاش برای دستیابی به واکنش همجوشی هستهای هستند. با توجه به این دو حقیقت که با گذشت نزدیک به نیم قرن، هنوز بشر نتوانسته بهصورت عملی به همجوشی هستهای دست یابد و همچنین تحقیقات زیادی در این زمینه در جوامع علمی ایران صورت نگرفته است، این موضوع برای پژوهش انتخاب شده است. در این پژوهش، تغییر سطح مقطع کانال بلنکت از مربع به مستطیل بررسی شده است. همچنین تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر سرعت سیال و مقدار افت فشار نیز مورد بررسی قرار گرفتهاند. در این پژوهش، بهصورت ویژه و برای اولین بار، به تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر افت فشار سیال ، به عنوان یک عامل کنترلی درنظر گرفته شده است.

۲- مدلسازی کانال بلنکت

در شکل ۱، یک کانال با سطح مقطع مربع و در شکل ۲، یک کانال با سطح مقطع مستطیل درنظر گرفته شده است. ابعاد سطح مقطع کانال شکل ۱، ۲^۵ × ۲^۵ میلیمتر و در جهت جریان سیال، ۵۰۰ میلیمتر است. ابعاد سطح مقطع کانال شکل ۲، ۵۰۰ میلیمتر است.

میدان مغناطیسی B در جهت محور Y به کانال اعمال میشود. فلز مذاب سرب-لیتیوم ۱۷ نیز در جهت محور Z حرکت میکند. دیوارههای خارجی کانال عایق هستند. رفتار سیال از جهت افت فشار و تغییرات سرعت، در میدانهای ۱ تسلاو ۴ تسلا مورد بررسی قرار گرفته است.

را بررسی کردند. طبق نتایج آنها، میزان افت فشار با این کار بهشدت کاهش یافت. در سال ۲۰۲۰، سوتو و همکارانش [۹] تاثیر میزان زبری بدنهی جداکننده بر افت فشار را بررسی کردند. طبق نتایج گزارششده استفاده از یک جداکننده با سطحی متخلخل افت فشار را تا ۱۲ درصد افزایش میدهد. نتایج آخرین تحقیقات در سال ۲۰۲۱ نشان میدهد که اگر بدنهی اصلی بلنکت از جنس فولاد ضدزنگ مارتنزیتی ساخته شود، میزان ناپایداری سیال هیدرودینامیک مغناطیسی در حالت پلاسما افزایش یافته و درنتیجه رسیدن به واکنش همجوشی هستهای در مدت زمان کوتاهتری امکان پذیر می شود [۱۰]. از سمتی دیگر، انتقال حرارت از داخل بلنکت به پوستهی بیرونی یکی از مشکلات عمده در مسیر دستیابی به هم جوشی هستهای است. به همین دلیل در سال ۲۰۲۱، گروهی از محققان تصمیم گرفتند تا با تغییر جنس بدنهی بلنکت از فولاد مارتنزیتی به آلیاژ کاربید سیلیسیم'، میزان حرارت خروجی از بلنکت را کاهش دهند. اگرچه استفاده از آلیاژ کاربید سیلیسیم باعث کاهش ۲۳ درصدی میزان انتقال حرارت از بلنکت به پوسته شد، ولی افت فشار شدید سیال هيدروديناميك مغناطيسي مانع از عملي شدن اين ايده شد [۱۱]. طي آخرين تحقيقات، گروهي از دانشمندان تلاش کردند تا با استفاده از لیتیم به عنوان مادهی خنک کننده، میزان دمای پوسته بیرونی را کاهش دهند، اما نتایج نشان میدهد که گاز هلیم بهترین خنککنندهی ممکن برای استفاده در رآکتورهای همجوشی هستهای است [۱۲].

با توجه به افزایش روزافزون جمعیت جهان و روبهپایان بودن سوختهای فسیلی، دانشمندان سالهاست که بهدنبال یافتن یک منبع انرژی پاک و بیخطر هستند. از

1- Soto

r- Silicon Carbide

درنظر گرفتن فرضیات بالا، سایر معادلات حاکم بر سیال
مگنتوهیدرودینامیک از روابط زیر بهدست میآیند [۱۳]:
$$ho \vec{V}. \nabla \vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{J} + \vec{B}$$

 $(\nabla . \vec{J}) = 0 \ (\nabla . \vec{u}) = 0$

$$\overline{J} = -\sigma(-\overline{\nabla}\varphi + \overline{U} \times \overline{B})$$

$$(\overline{U}.\overline{\nabla})\overline{U} = -\frac{\overline{\nabla}P}{\rho} + \nu\nabla^2\overline{U} + \frac{\overline{J}\times\overline{B}}{\rho}$$

$$H_a = LB_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho V}}$$

$$\rho C_{P}(\overline{V}.\overline{\nabla}T) = K(\nabla^{2}T) + \frac{J^{2}}{\sigma} + Q_{n}^{\dots}$$

در روابط بالا، متغیرهای \vec{l} ، ϕ و \vec{u} بهترتیب بردار چگالی جریان، پتانسیل الکتریکی و بردار سرعت سیال میباشند. معادلات ۲ تا ۸ بهترتیب معادلات ناویر استوکس، پیوستگی، پایستگی جریان، قانون اهم، مومنتوم، هارتمن و انرژی میباشند. جهت بررسی صحت نتایج، تمامی نتایج بهدستآمده از حل عددی معادلات با نتایج مرجع [۱۴] مقایسه شده و در شکلهای ۵ تا ۸ قابلرؤیت میباشند. برای شبیه سازی کامپیوتری معادلات، از نرمافزار انسیس فلوئنت ۲۰ استفاده شده است. از روش سیمپل برای حل مسئله و به دستآمدن رابطهی فشار – سرعت استفاده شده است. همچنین جهت هم گرایی نتایج، معیار هم گرایی در تمامی معادلات ۶ – ۱۰ درنظر گرفته شده است.



شكل ١. كانال با سطح مقطع مربع.

Channel with square cross section .1 Figure





Channel with rectangle cross section .* Figure

۳- معادلات حاکم بر مساله

خواص سیال سرب-لیتیوم ۱۷ ثابت درنظر گرفته شده است. مقدار رینولدز مغناطیسی کوچکتر از یک است و مقدار آن از رابطهی زیر بهدست میآید:

$$R_m = \mu_0 \sigma u L$$

 $\mu_0 = \frac{1}{256} \times 10^{-6} (H/m)$ که در آن $\mu_0 = \frac{1}{256} \times 10^{-6} (H/m)$ هدایت $\mu_0 = \frac{1}{256} \times 10^{-6} (H/m)$ الکتریکی سیال و L طول مشخصه میباشد. با

Archive of SID.ir ۱۱۷ مالیک/ سال ۱۴۰۱/ دوره یاییز و زمستان/ شماره ۱

۴- شرایط مرزی

سرعت ورودی در تمامی حالتها m/s سرعت ورودی در تمامی حالتها v/۰۱ m/s به عنوان شرط مرزی سرعت ورودی تعریف شده است. یک شرط مرزی فشار خروجی^۲ برای تنظیم فشار در خروجی کانال در Atm ۰ اسفاده شده است. در تمام سطوح دیواره داخلی، شرایط مرزی بدون لغزش اعمال شده است. سطوح خارجی و دیوارهها به عنوان سطوح عایق مدلسازی شدهاند تا اطمینان حاصل شود که هیچ جریان الکتریکیای از این مرزها عبور نمی کند.

شرط مرزی ورودی:

u = v = 0 , $w = w_0$, $P_{in} = P_0$ (7)

شرط مرزی خروجی:

$$u = v = \frac{\partial w}{\partial n} = 0$$
, $\varphi_{out} = 0$, $P_{out} = 0$ (Y)

۵-۱- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی نتایج
 همان طور که در شکلهای ۳ و ۴ مشخص است، از یک
 شبکهبندی متشکل از ۷۰ گره در جهت x، ۷۰ گره در
 جهت y و ۲۴۵ گره در جهت z است.



Channel mesh with rectangle cross section .* Figure



شکل ۴. شبکهبندی کانال با سطح مقطع مربع. Channel mesh with square cross section .۴ Figure.

طبق نتایج، استفاده از این شبکهبندی درصد خطا را بسیار کاهش میدهد. استفاده از شبکهای با تعداد گرهی کمتر باعث کاهش دقت نتایج میشود. همچنین استفاده از شبکه با تعداد گرهی بالاتر، باعث ایجاد تغییرات ناچیزی میشود و فقط زمان محاسبات را بهشدت افزایش میدهد. به همین دلیل از شبکهای با تعداد گره ۱۲۰۰۰۰ استفاده شده است. نتایج بهدستآمده از حل عددی و بررسی

1- velocity inlet

Y- pressure outlet



۱۱۸ نشریه مکانیک/ سال۱۴۰۱/ دوره پاییز و زمستان/ شماره۱

استقلال از شبکه در جدولهای ۱ تا ۴ رؤیت می شوند. سیدورنکو و شیشکو [۱۴] در شکلهای ۵ تا ۸ مقایسه همچنین هر سه شبکهبندی مورد استفاده در جدول ۶ شده است. بررسی و مقایسهی نتایج نشان میدهد که قابل رؤیت هستند. جهت بررسی اعتبار نتایج بهدست آمده میزان خطا کمتر از ۶ درصد است. به همین دلیل می توان از حل عددی، سرعت در مقطع خروجی کانال با نتایج به صحت نتایج حل عددی در این پژوهش اعتماد کرد.

Archive of SID.ir

جدول ۱. بررسی استقلال از شبکه در کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۴ تسلا

تعداد سلولهای شبکه	سرعت ماكزيمم	درصد خطا	افت فشار	درصد خطا
۸۵۲۰۹۲	• ۵۷۳۲۶۴۷۵/•	-	787/2124	-
17	•۶١٢١٨۴۵٣/•	۲۸۹۱۴۵۸۵۳/۶	۲۵۶/۲۹ <i>۸۴</i>	۳۸۹۸V۳۴۶۳/۵
77	۰۶۰۹۸۵۷۲۴/۰	۳X•1۶۱۵۱۸/•	422/2991	44777 • VVQ/ •

FT Mesh independency results in square duct in .) Table

جدول ۲. نتایج استقلال از شبکه در کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۱ تسلا

NT Mesh independency results in square duct at .Y Table

تعداد سلولهای شبکه	سرعت ماكزيمم	درصد خطا	افت فشار	درصد خطا
٨٥٢٠٩٢	• 77740007/•	-	እ <i>እ۴۳/۳۶</i> ۵	-
17	• ۲ ۹ ۷ ۷ ۸ ۶ ۹ ۱ / •	4211492221/2	240/261	V•8AT8•1T/8
	• ۲۹۶۷۶۷۲۲/•	٣۴۲۴۲۲۷۰۸/۰	• १११/٣۴٣	۵۱۴۱۰۱۵۰۹/۰

جدول ۳. نتایج استقلال از شبکه در کانال با سطح مقطع مستطیل در میدان ۴ تسلا

FT Mesh independency results in rectangle duct at . Table

تعداد سلولهای شبکه	سرعت ماكزيمم	درصد خطا	افت فشار	درصد خطا
۸۵۷۰۹۲	·۶۳۸۱۴۷۲۵/·	-	497/8820	-
17	۰۶۷۰۹۴۸۸/۰	14.12246/0	FXF/FQ+F	V··144597/4
77	•\$744222/•	۵۲۲۱۷۰۹۹۱/۰	۵۴۸/۶۵۳۷	۵۰۵۲۳۵۹۱۹/۰

Archive of SID.ir ۱۱۹ ۱۹۲۱ دوره پاییز و زمستان/ شماره۱

تعداد سلولهای شبکه	سرعت ماكزيمم	درصد خطا	افت فشار	درصد خطا
۸۵۲۰۹۲	• ٣ ነ ۵ ۴ ۸ ۴ ۲ ۶/ •	-	549/544	-
17	• *T 999 V T/•	۶۰۰۰۵۸۳۳۶/۴	118/248	940447757/4
77	• 3774709/•	VQ1206126/.	946/048	۵۱۷۶۵۵۵۹/۰

جدول ۴. نتایج استقلال از شبکه در کانال با سطح مقطع مستطیل در میدان ۱ تسلا ۱T Mesh independency results in rectangle duct at .۴ Table

بهمنظور بالا بردن دقت نتایج بهدست آمده طبق مطالعات انجام شده [۱۵]، باید تعداد گره در لایهی هارتمن ۲ و در لایهی دیوار جانبی^۲ ۷ عدد باشد. عدد هارتمن، ضخامت لایهی هارتمن و ضخامت لایهی جانبی از روابط زیر بهدست می آیند [۱۶]:

$$\delta_{Hatmann} \sim Ha^{-1}$$
 (9)

$$\delta_{\text{Side wall}} \sim Ha^{\frac{1}{2}} \tag{(1)}$$

$$Ha = LB \sqrt{\frac{\sigma}{\rho \upsilon}} , \quad \text{Re} = \frac{UL}{\upsilon}$$
(11)

همچنین جهت بهدست آوردن تعداد گرهها و ضخامت لایهی هارتمن و لایهی جانبی از روابط ۹ و ۱۰ استفاده شده است. به دیوارهای عمود بر میدان مغناطیسی، لایهی هارتمن و به دیوارهای موازی با میدان لایهی کناری یا دیوارهی جانبی گفته میشود. ضخامت لایهی هارتمن و دیوارهی جانبی برحسب متر و نسبت مش هارتمن و دیوارهی جانبی در جدول ۵ مشاهده میشوند.

جدول ۵. محاسبات ضخامت لایه های مرزی.

.Thickness of boundary layer calculations .& Table

نسبت مش دیوارهی جانبی	نسبت مش هارتمن	ضخامت دیوارهی جانبی	ضخامت هارتمن	سطح مقطع
٨٢ ١۵/١	TYXY/1	• 87 • 1/•	• • ٣ ٨ ۴/ •	مربع
۲۳/۱	۳۱/۱	۰ ۴۳۸/۰	۰۰۱٩/۰	مستطيل

۱۲۰ نشریه مکانیک/ سال۱۴۰۱/ دوره پاییز و زمستان/ شماره۱

جدول ۶. تعداد سلولهای شبکه.

 .Cell numbers .۶ Table			
 شبکه ۳	شبکه ۲	شبکه ۱	شمارەي شبكە
 77	17	۸۵۷۰۹۲	تعداد سلولهای شبکه

۵-۲- نتایج حل عددی

طبق قوانین فیزیک، اگر به یک جریان الکتریکی القایی، یک میدان مغناطیسی خارجی اعمال شود، ذرات در جهت چرخش انگشتان دست حرکت خواهند کرد؛ از همین قانون، برای کنترل مسیر حرکت سیال مگنتوهیدرودینامیک استفاده می شود. اثر متقابل جریان القایی و میدان مغناطیسی اعمال شده باعث ایجاد نیروی لورنتز ^۱ می شود. نیروی لورنتز باعث افزایش افت فشار می شود. به همین دلیل پروفیل سرعت در مرکز کانال کاهش یافته و یک نواخت می شود. در تمام محاسبات انجام شده، سرعت ورودی ۱۳/۶ می باشد. همچنین کانال ها از جنس فولاد ضدزنگ و فلز مایع خنک کننده سرب ایتیم ۱۷ می باشد. لازم به ذکر است که خواص فیزیکی هر دو ماده به ترتیب در جدول های ۷ و ۸ ذکر شده است.

جدول ۷. خواص فيزيكي فولاد [۱۲].

.[17] Physical characteristics of Steel .v Table

ضریب هدایت الکتریکی (s/m)	جنس
1/01 × 10 ⁶	فولاد

جدول ٨. خواص فيزيكي سرب-ليتيم [١٣].

.[1٣] Physical characteristics of Pbli .A Table

نفوذپذیری مغناطیسی (۱-H.m)	ویسکوزیتهی مغناطیسی (Pa.s)	چگالی (s/m ^۳)	ضریب هدایت الکتریکی (s/m)	جنس
Y0V/1	•• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •	٩	VI)1/V	PbLivy

1- Lorentz Force

نشریه مکانیک/ سال۱۴۰۱/ دوره پاییز و زمستان/ شماره۱



شکل ۶. اعتبارسنجی کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۴ تسلا. ۲. Validation in Square cross section at .۶ Figure.



شکل ۲. اعتبارسنجی کانال با سطح مستطیل در میدان ۴ تسلا. ۲. TValidation in rectangular cross section at .۷ Figure



شکل ۸. اعتبار سنجی کانال با سطح مقطع مستطیل در میدان ۱ تسلا.

AT Validation in rectangular cross section at A Figure

الف: تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر پروفیل سرعت

در این قسمت از پژوهش، تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر سرعت جریان عبوری از کانال بررسی شده است. در شکلهای ۵ تا ۸، یروفیل سرعت تحت تأثیر میدان ۱ تسلا و ۴ تسلا در کانال با سطح مقطع مربع و مستطیل رسم شده است. در هستهی مرکزی کانال، یک سرعت ثابت مشاهده می شود. اثر شدید نیروی لورنتس در قسمت مرکزی کانال باعث شده است تا هستهی مرکزی یک سرعت ثابت داشته باشد. بهدلیل برقراری شرط عدم لغزش در دیواره های داخلی کانال، سرعت در دیواره های کانال صفر می باشد. میدان مغناطیسی اعمال شده منجر به توزیع سهموی یتانسیل الکتریکی در طول دیواره های جانبی میشود. از آنجایی که چگالی جریان ورودی از دیواره های جانبی ثابت است، حداکثر پتانسیل در مرکز دیوارههای جانبی منجر به میدان الکتریکی بالاتر در دیواره های جانبی می شود و طبق قانون اهم، سرعت در لایهی جانبی افزایش می یابد. به همین دلیل بیشترین مقدار سرعت در نزدیکی دیواره های جانبی مشاهده میشود.



شکل ۵. اعتبارسنجی کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۱ تسلا.

.)T Validation in square cross section at .& Figure



۱ شکل ۱۰. پروفیل کامل سرعت در کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۱ تسلا.

Full velocity profile in channel with square cross section at .11 Figure .1T $\ensuremath{\mathsf{NT}}$

ب: تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر افت فشار

برای یافتن تأثیر میدان مغناطیسی اعمال شده بر افت فشار جریان در طول کانال، مقادیر افت فشار برای میدانهای مغناطیسی مختلف و همچنین سطح مقطعهای مربع و مستطیل محاسبه شدهاند و نتایج در شکل زیر به نمایش درآمده اند. نتایج محاسبات نشاندهندهی آن است که با افزایش شدت میدان مغناطیسی، مقدار افت فشار نیز افزایش مییابد. با افزایش شدت میدان مغناطیسی، مقدار نیروی لورنتز که برخلاف جریان در طول کانال عمل فشار جریان در طول کانال نیز افزایش مییابد. شکل ۱۱ فشار میدهد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۱ نسان میدهد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۱ مربع ۹ برابر و در کانال با سطح مقطع افزایش مییابد.

برای بررسی دقیقتر تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر یروفیل سرعت، در شکل ۹، پروفیل سرعت در غیاب میدان در کانال با سطح مقطع مربع ارائه شده است. طبق نتایج بهدست آمده، پروفیل سرعت کاملاً متفاوت از حالتی است که میدان اعمال می شود. برخلاف حالتی که میدان اعمال می شود، سرعت در غیاب میدان، پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم نهتنها کاهش نمی یابد، بلکه ثابت باقی ماندہ و عرض کانال را در یک مقدار ثابت طی میکند که دلیل این امر عدم حضور میدان مغناطیسی می باشد. در شکل ۱۰ نیز سرعت در حضور میدان مغناطیسی ۱ تسلا رسم شده تا بتوان آن را با نتایج شکل ۹ مقایسه کرد. همچنین برای اطمینان از تقارن پروفیل سرعت، در سطح مقطع با هندسهی مربع و میدان مغناطیسی ۱ تسلا، یک بار پروفیل سرعت در عرض کانال بهطور کامل رسم شده است. نمودار رسم شده در شکل ۱۰ نشان می دهد که یروفیل سرعت یک تقارن کامل دارد، سرعت در هر دو دیوارهی جانبی صفر بوده، در نزدیکی دیوارهها به مقدار ماکزیمم خود رسیده است و در مرکز کانال یک مقدار ثابت را تجربه می کند.



شکل ۹. پروفیل سرعت در کانال با سطح مقطع مربع بدون حضور

ميدان.

Velocity profile in channel with square cross section in the .4 Figure .absence of the magnetic field

نشریه مکانیک/ سال۱۴۰۱/ دوره پاییز و زمستان/ شماره ۱

مغناطیسی خارجی ایجاد میشود، باعث کاهش سرعت در مرکز کانال میشود. همچنین نیروی لورنتز باعث افزایش افت فشار در طول کانال میشود. با افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۱ به ۴ تسلا، مقدار افت فشار در کانال با سطح مقطع مربع ۹ برابر و در کانال با سطح مقطع مستطیل ۱۲ برابر افزایش مییابد.

تغییر سطح مقطع ورودی کانال از مربع به مستطیل باعث افزایش بهترتیب ۱۱ و ۹ درصدی سرعت ماکزیمم روی دیوارههای جانبی، در میدان ۱ تسلاو ۴ تسلامی شود. مقدار افزایش سرعت ماکزیمم روی دیوارههای جانبی در مقایسه با میزان افزایش افت فشار بسیار ناچیز است. از آنجایی که افزایش شدت میدان مغناطیسی باعث افزایش ۱۱ برابری افت فشار در طول کانال با سطح مقطع مستطیل می شود، می توان نتیجه گرفت که تغییر ابعاد کانال و استفاده از سطح مقطع مستطیل اصلاً ایدهآل نیست. درواقع معایب این سطح مقطع بسیار بیشتر از مزایای آن است. بهترین نتایج در حالتی به دست می آیند که نسبت ارتفاع به عرض کانال ۱ باشد.

با درنظر گرفتن سطح مقطع مربع به عنوان حالت ایده آل و بررسی تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر سرعت ماکزیمم روی دیواره های جانبی، مشاهده می شود که با افزایش میدان مغناطیسی از ۱ به ۴ تسلا، سرعت ماکزیمم در کانال با سطح مقطع مربع، ۲ برابر افزایش می یابد. از طرفی دیگر، سرعت در مرکز کانال مقدار ثابتی معادل امرفی دیگر، سرعت در مرکز کانال مقدار ثابتی معادل امرفی دیگر، سرعت در مرکز کانال مقدار ثابتی معادل امرفی دیگر، سرعت در مرکز کانال مقدار ثابتی معادل از شدت میدان میناطیسی، می توان نتیجه گرفت که افزایش شدت میدان مغناطیسی باعث افزایش شدید افت فشار می شود. به طور کلی می توان از شدت میدان مغناطیسی برای کنترل جریان و پایدار کردن رفتار



شکل ۱۱. نمودار افت فشار در میدانهای مغناطیسی. Diagram of pressure drop in magnetic fields .۱۲ Figure

ج: تأثير تغيير ابعاد سطح مقطع كانال

نتایج موجود در جدولهای ۱ تا ۴ (شبکهبندی با ۱۲۰۰۰۰) نشان میدهد که با تغییر ابعاد سطح مقطع کانال و تغییر نسبت ارتفاع به عرض کانال از ۱ و افزایش آن به ۲، سرعت ماکزیمم روی دیوارههای جانبی، بهترتیب ۱۱ و ۹ درصد در میدان ۱ تسلا و ۴ تسلا افزایش مییابد. با افزایش ارتفاع کانال و بهدلیل ثابتبودن طول کانال، سطح مقطع کانال مستطیل افزایش مییابد. با افزایش سطح مقطع کانال، مقدار نیروی لورنتز کاهش مییابد.

۶- نتیجه گیری

به کمک شبیهسازی فلز مایع خنککنندهی سرب-لیتیم ۱۷ در یک بلنکت و بررسی رفتار مگنتوهیدرودینامیکی، نتایج زیر استخراج میشود:

طبق نتایج بهدست آمده، پروفیل سرعت به صورت شکل ام است و گرادیان سرعت سیال در دیواره های کناری افزایش شدیدی داشته است. بر این اساس می توان نتیجه گرفت که نیروی لورنتزی که براثر اعمال میدان

μ (kg/s.m)	لزجت دینامیکی سیال
$\mu_0\left(H/m\right)$	تراوایی مغناطیسی
v (m2/s)	لزجت سينماتيكي سيال
$\rho\left(kg/m\right)$	چگالی
$\sigma\left(s/m ight)$	هدایت الکتریکی سیال
φ	يتانسيا ، الكتريكي

[1] S. Smolentsev, N. Morley, M. Abdou, R. Munipalli, R. Moreau, Current approaches to modeling MHD flows in the dual coolant lead lithium blanket, Magneto hydrodynamics, 42(2-3) (2006) 225-236.

۸-مراجع

[2] C.N. Kim, A.H. Hadid, M.A. Abdou, Development of a computational method for the full solution of MHD flow in fusion blankets, Fusion Engineering and Design, 8 (1989) 265-270.

[3] X. Wang, E. Mogahed, I. Sviatoslavsky, MHD, heat transfer and stress analysis for the ITER self-cooled blanket design, Fusion Engineering and Design, 24(4) (1994) 389-401.

[4] K. Starke, L. Buhler, S. Horanyi, Experimental MHD–flow analyses in a mock-up of a test blanket module for ITER, Fusion Engineering and Design, 84(7-11) (2009) 1794-1798.

[5] F.C. Li, D. Sutevski, S. Smolentsev, M. Abdou, Experimental and numerical studies of pressure drop in PbLi flows in a circular duct under non-uniform transverse magnetic field, Fusion Engineering and Design, 88(11) (2013) 3060-3071.

۱۲٤ نشریه مکانیک/ سال۱۴۰۱/ دوره پاییز و زمستان/ شماره۱

مگنتوهیدرودینامیک در فرآیند هم جوشی هستهای استفاده کرد. به این ترتیب به سادگی می توان با افزایش شدت میدان مغناطیسی خارجی، افت فشار را افزایش داد و فرآیند گداخت را پایدار کرد.

اگرچه افت فشار سیال هیدرودینامیک مغناطیسی بهعنوان یک عامل نامطلوب در فرآیند هم جوشی هستهای درنظر گرفته می شود، اما می توان در رآکتور هم جوشی هستهای از افت فشار به عنوان عامل کنترلی استفاده کرد؛ به این ترتیب که درصورت وقوع شرایط بحرانی، می توان با افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۱ تسلا به ۴ تسلا، افت فشار را طبق نتایج فوراً کاهش داد و رآکتور را به حالت پایداری رساند.

۷-فهرست علائم

نشانه	علامت (لاتين)
$\overline{B}(kg/s2.A)$	چگالی شار مغناطیسی
Ī (C/s)	چگالی جریان الکتریکی
На	عدد هارتمن
Re_m	رينولدز مغناطيسي
R	نسبت افت فشار
P (pa)	فشار سيال
L	طول
V(m/s)	سرعت سيال
C _W	نسبت بین هدایت الکتریکی دیوارهها و هدایت الکتریکی سیال
x,y,z	جهتهای مختصاتی
نشانه	علامت (يونانى)



نشریه مکانیک/ سال ۱۴۰۱/ دوره پاییز و زمستان/ شماره ۱

[12] Smolentsev, S., et al., MHD and heat transfer considerations for the US DCLL blanket for DEMO and ITER TBM. Fusion Engineering and Design, (2021).83(10): p. 1788-1791.

[13] Z.H. Liu, L. Chen, M.J. Ni, N.M. Zhang, Effects of magnetohydrodynamic mixed convection on fluid flow and structural stresses in the DCLL blanket, International Journal of Heat and Mass Transfer, 135 (2019) 847-859.

[14] S.I. Sidorenko, A.Y. Shishko, Variational method of calculation of MHD flows in channels with large aspect ratios and conducting walls, Magneto Hydrodynamics, 27(4) (1991) 437-445.

[15] E.M. De Les Valls, L. Sedano, L. Batet, I. Ricapito, A. Aiello, O. Gastaldi, F. Gabriel, Leadlithium eutectic material database for nuclear fusion technology, Journal of Nuclear Materials 376(3) (2008) 353-357.

[16] L. Buhler, S. Horanyi, and E. Arbogast, Experimental investigation of liquid-metal flows through a sudden expansion at fusion-relevant Hartmann numbers Fusion Engineering and Design (2007) 82 2239–2245. [6] I. Fernández-Berceruelo, D. Rapisarda, I.
Palermo, L. Maqueda, D. Alonso, T. Melichar,
O. Frýbort, L. Vála, Á. Ibarra, Thermal-hydraulic
design of a DCLL breeding blanket for the EU
DEMO, Fusion Engineering and Design, 124 (2017)
822-826.

[7] YuanMa, RasulMohebbi, M.M.Rashidi, ZhigangYang, Mikhail A.Sheremet, Numerical study of MHD nanofluid natural convection in a baffled U-shaped enclosure, International Journal of Heat and Mass Transfer, 130 (2019) 123134-.

[8] H. Hulin, Y. Shimou, A. Fawad, Effect of nanocoating on corrosion behaviors of DCLL blanket channel, International Journal of Heat and Mass Transfer, 141 (2019) 444-456.

[9] C. Soto, S. Smolentsev, C. García-Rosales, Mitigation of MHD phenomena in DCLL blankets by Flow Channel Inserts based on a SiC-sandwich material concept, Fusion Engineering and Design, 151 (2020) 111381.

[10] J. Slabber, PBMR Safety analyses and tests in South Africa Presentation at the IAEA Workshop on Safety demonstration and market potential for high temperature gas cooled reactors, 273 (2020).

[11] J. Jonas and I. Fernandez, components internal and external del Programa Consolider TECNO FUS Technical report, EURATOM-CIEMAT Association, CSD 079 (2021).