



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^{۳*}

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.

چکیده

پژوهش حاضر به مطالعه‌ی عددی یک رآکتور گداخت هسته‌ای و اهمیت سرعت سیال هیدرودینامیک مغناطیسی در فرآیند هم‌جوشی هسته‌ای پرداخته است. در رآکتورهای گداخت هسته‌ای سیال توسط یک لایه جداکننده، از بدنه‌ی اصلی بلنکت فاصله می‌گیرد. ساختار جداکننده از دو جهت حائز اهمیت فراوان است. این ساختار در اولویت اول به‌عنوان عایق حرارتی عمل می‌کند. در اولویت دوم از جداکننده برای تنظیم فشار استفاده می‌شود. 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 مربع و افزایش ۱۲ برابری افت فشار در بلنکت با سطح مقطع مستطیل می‌شود.

کلمات کلیدی

سیال هیدرودینامیک مغناطیسی، بلنکت، افت فشار، میدان مغناطیسی، مطالعه‌ی عددی، هم‌جوشی هسته‌ای

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, Shahrood University of Technology, Shahrood, 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

۱- مقدمه

یافته‌های بسیار مهمی در رابطه با هم‌جوشی هسته‌ای و هیدرودینامیک مغناطیسی دست یافته است. تحقیقات روی هم‌جوشی هسته‌ای از قرن ۲۰ میلادی شروع شدند. تحقیقات در این زمینه با پژوهش کیم^۵ و همکارانش [۲] روی سرعت سیال هیدرودینامیک مغناطیسی شروع آغاز شد. کمی بعدتر وانگ^۶ 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 ۲۰۱۳ لی^۸ 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 ورودی کانال استفاده شود، دمای بدنه به‌شدت کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۹، یوان ما^{۱۰} و همکارانش [۷] تأثیر ضخامت لایه‌ی هارتمن بر شدت انتقال حرارت از بدنه را بررسی کردند و با بررسی معادله‌ی استفان-بولتزمن^{۱۱}، 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

به بررسی رفتار دینامیکی سیال رسانا که تحت تأثیر میدان مغناطیسی قرار گرفته، هیدرودینامیک مغناطیسی^۱ می‌گویند. امروزه هیدرودینامیک مغناطیسی بخش مهمی از صنایع دفاعی، نظامی، تجهیزات هوافضا و رآکتورهای هم‌جوشی هسته‌ای است. به رآکتورهای هم‌جوشی هسته‌ای، توکامک گفته می‌شود. بلنکت^۲ یکی از مهم‌ترین قسمت‌های یک توکامک است که وظیفه‌ی تولید سوخت، انتقال انرژی و محافظت از سایر قسمت‌های توکامک در برابر تشعشعات 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 هم‌جوشی هسته‌ای، پیوند بین ایزوتوپ هیدروژن (دوتریوم و تریتیوم) است. ایتر^۳ در حال حاضر بزرگ‌ترین رآکتور هم‌جوشی است. سیال استفاده‌شده در این پروژه بین‌المللی فلز مایع سرب-لیتیم^۴ ۱۷ است. اهمیت این 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 می‌کنند افت فشار سیال، سرعت جریان آن و میزان انتقال حرارت است [۱]. اگرچه هنوز هم محققین نتوانسته‌اند نتایج پژوهش‌های خودشان را به‌صورت عملی اجرا کنند، اما بشر به

۱- Magneto hydrodynamic

۲- Blanket

۳- ITER

۴- Pb_Li17

۵- Kim

۶- Wang

۷- Starke

۸- Lee

۹- Fernández

۱۰- Yuan Ma

۱۱- Stefan Boltzmann

آنجایی که نیروگاه‌های شکافت هسته‌ای مشکلات زیادی، از جمله 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 به صورت 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، به صورت ویژه و برای اولین بار، به تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر افت فشار سیال، به عنوان یک عامل کنترلی در نظر گرفته شده است.

۲- مدل سازی کانال بلنکت

در شکل ۱، یک کانال با سطح مقطع مربع و در شکل ۲، یک کانال با سطح مقطع مستطیل در نظر گرفته شده است. ابعاد سطح مقطع کانال شکل ۱، 25×25 میلی‌متر و در جهت جریان سیال، 500 میلی‌متر است. ابعاد سطح مقطع کانال شکل ۲، 25×50 میلی‌متر است و طول کانال مشابه شکل ۱، 500 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 تسلا و ۴ تسلا مورد بررسی قرار گرفته است.

را بررسی کردند. طبق نتایج آن‌ها، میزان افت فشار با این کار به شدت کاهش یافت. در سال ۲۰۲۰، سوتو^۱ و همکارانش [۹] تأثیر میزان زبری بدنه‌ی جداکننده بر افت فشار را بررسی کردند. طبق نتایج گزارش شده 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 در نتیجه رسیدن به واکنش هم‌جوشی هسته‌ای در مدت زمان کوتاه‌تری امکان‌پذیر می‌شود [۱۰]. از سمتی دیگر، انتقال حرارت از داخل بلنکت به پوسته‌ی بیرونی یکی از مشکلات عمده در مسیر دستیابی به هم‌جوشی 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^۲، 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 هیدرودینامیک مغناطیسی مانع از عملی شدن این ایده شد [۱۱]. طی آخرین تحقیقات، گروهی از دانشمندان تلاش کردند تا با استفاده از لیتیم به عنوان ماده‌ی خنک‌کننده، 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 به دنبال یافتن یک منبع انرژی پاک و بی‌خطر هستند. از

۱- Soto

۲- Silicon Carbide

در نظر گرفتن فرضیات بالا، سایر معادلات حاکم بر سیال مگنتوهیدرودینامیک از روابط زیر به دست می‌آیند [۱۳]:

$$\rho \vec{V} \cdot \nabla \vec{V} = -\nabla P + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{J} + \vec{B}$$

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

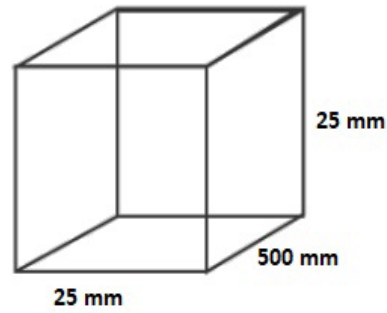
$$\vec{J} = -\sigma(-\nabla\phi + \vec{U} \times \vec{B})$$

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

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

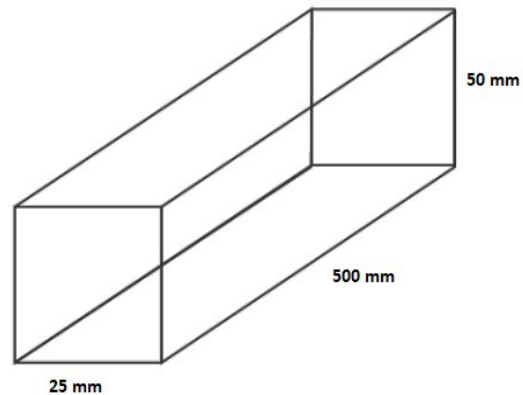
$$\rho C_p (\vec{V} \cdot \nabla T) = K (\nabla^2 T) + \frac{J^2}{\sigma} + Q_n$$

در روابط بالا، متغیرهای \vec{J} ، ϕ و \vec{u} به ترتیب بردار چگالی جریان، پتانسیل الکتریکی و بردار سرعت سیال می‌باشند. معادلات ۲ تا ۸ به ترتیب معادلات ناویر استوکس، پیوستگی، پایستگی جریان، قانون اهم، مومنتوم، هارتمن و انرژی می‌باشند. جهت بررسی صحت نتایج، تمامی نتایج به دست آمده از حل عددی معادلات با نتایج مرجع [۱۴] مقایسه شده و در شکل‌های ۵ تا ۸ قابل رؤیت می‌باشند. برای شبیه‌سازی کامپیوتری معادلات، از نرم‌افزار انسیس فلونت ۲۰ استفاده شده است. از روش سیمپل برای حل مسئله و به دست آمدن رابطه‌ی فشار-سرعت استفاده شده است. همچنین جهت هم‌گرایی نتایج، معیار هم‌گرایی در تمامی معادلات ۶-۱۰ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱. کانال با سطح مقطع مربع.

Channel with square cross section .1 Figure



شکل ۲. کانال با سطح مقطع مستطیل.

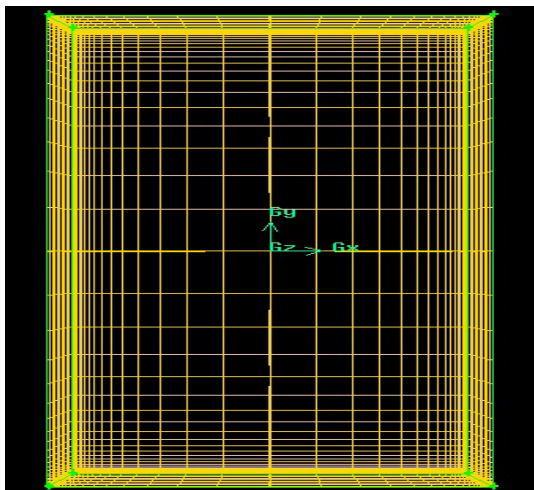
Channel with rectangle cross section .2 Figure

۳- معادلات حاکم بر مساله

خواص سیال سرب-لیتیوم ۱۷ ثابت در نظر گرفته شده است. مقدار رینولدز مغناطیسی کوچک‌تر از یک است و مقدار آن از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

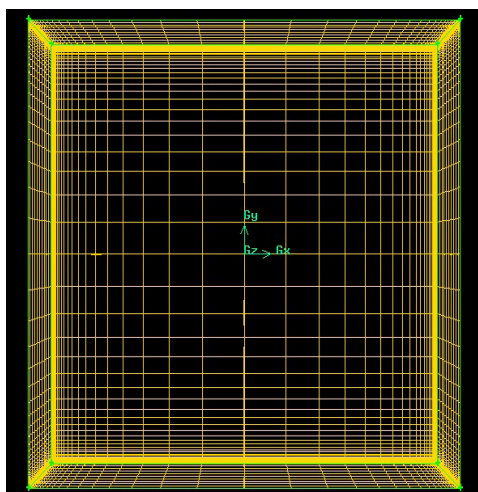
$$R_m = \mu_0 \sigma u L$$

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



شکل ۳. شبکه‌بندی کانال با سطح مقطع مستطیل.

Figure 3. Channel mesh with rectangle cross section



شکل ۴. شبکه‌بندی کانال با سطح مقطع مربع.

Figure 4. Channel mesh with square cross section

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 به شدت افزایش می‌دهد. به همین دلیل از شبکه‌ای با تعداد گره ۱۲۰۰۰۰۰ استفاده شده است. نتایج به دست آمده از حل عددی و بررسی

۴- شرایط مرزی

سرعت ورودی در تمامی حالت‌ها 0.1 m/s بوده است و به عنوان شرط مرزی سرعت ورودی^۱ تعریف شده است. یک شرط مرزی فشار خروجی^۲ برای تنظیم فشار در خروجی کانال در 0 Atm 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 نمی‌کند.

شرط مرزی ورودی:

$$u = v = 0, \quad w = w_0, \quad P_{in} = P_0 \quad (6)$$

شرط مرزی خروجی:

$$u = v = \frac{\partial w}{\partial n} = 0, \quad \varphi_{out} = 0, \quad P_{out} = 0 \quad (7)$$

۵- بررسی نتایج

۵-۱- استقلال از شبکه و اعتبارسنجی نتایج

همان‌طور 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.

۱- velocity inlet

۲- pressure outlet

استقلال از شبکه در جدول‌های ۱ تا ۴ رؤیت می‌شوند. سیدورنکو و شیشکو [۱۴] در شکل‌های ۵ تا ۸ مقایسه همچنین هر سه شبکه‌بندی مورد استفاده در جدول ۶ قابل‌رؤیت هستند. جهت بررسی اعتبار نتایج به‌دست‌آمده از حل عددی، سرعت در مقطع خروجی کانال با نتایج

سیدورنکو و شیشکو [۱۴] در شکل‌های ۵ تا ۸ مقایسه شده است. بررسی و مقایسه‌ی نتایج نشان می‌دهد که میزان خطا کمتر از ۶ درصد است. به‌همین دلیل می‌توان به صحت نتایج حل عددی در این پژوهش اعتماد کرد.

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

Table 1. Mesh independency results in square duct in 4T

تعداد سلول‌های شبکه	سرعت ماکزیمم	درصد خطا	افت فشار	درصد خطا
۸۵۷۰۹۲	۰.۵۷۳۲۶۴۷۵/۰	-	۲۶۷/۳۱۵۴	-
۱۲۰۰۰۰۰	۰.۶۱۲۱۸۴۵۳/۰	۷۸۹۱۴۵۸۵۳/۶	۲۵۶/۲۹۸۴	۳۸۹۸۷۳۴۶۳/۵
۲۲۰۰۰۰۰	۰.۶۰۹۸۵۷۲۴/۰	۳۸۰۱۶۱۵۱۸/۰	۴۵۳/۲۹۹۷	۴۴۲۲۲۰۷۷۵/۰

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

Table 2. Mesh independency results in square duct at 1T

تعداد سلول‌های شبکه	سرعت ماکزیمم	درصد خطا	افت فشار	درصد خطا
۸۵۷۰۹۲	۰.۲۸۲۴۵۵۵۲/۰	-	۸۸۴۳/۳۶۵	-
۱۲۰۰۰۰۰	۰.۲۹۷۷۸۶۹۱/۰	۴۲۷۸۹۵۳۳۷/۵	۳۴۵/۳۴۱	۷۰۶۸۳۶۰۱۳/۶
۲۲۰۰۰۰۰	۰.۲۹۶۷۶۷۲۲/۰	۳۴۲۴۲۲۷۰۸/۰	۰.۹۹۹/۳۴۳	۵۱۴۱۰۱۵۰۹/۰

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

Table 3. Mesh independency results in rectangle duct at 4T

تعداد سلول‌های شبکه	سرعت ماکزیمم	درصد خطا	افت فشار	درصد خطا
۸۵۷۰۹۲	۰.۶۳۸۱۴۷۲۵/۰	-	۴۹۲/۶۸۲۵	-
۱۲۰۰۰۰۰	۰.۶۷۰۹۴۸۸/۰	۱۴۰۱۲۲۴۴/۵	۶۸۴/۶۵۰۴	۷۰۰۱۴۴۶۹۳/۴
۲۲۰۰۰۰۰	۰.۶۷۴۴۵۲۳/۰	۵۲۲۱۷۰۹۹۱/۰	۵۴۸/۶۵۳۷	۵۰۵۲۳۵۹۱۹/۰

جدول ۴. نتایج استقلال از شبکه در کانال با سطح مقطع مستطیل در میدان ۱ تسلا

Table 4. Mesh independency results in rectangle duct at 1T

تعداد سلول‌های شبکه	سرعت ماکزیمم	درصد خطا	افت فشار	درصد خطا
۸۵۷۰۹۲	۰.۳۱۵۴۸۴۲۶/۰	-	۵۲۹/۵۷۴	-
۱۲۰۰۰۰۰	۰.۳۲۹۹۹۷۲/۰	۶۰۰۰۵۸۳۳۶/۴	۱۱۶/۵۴۶	۹۴۵۴۴۲۲۶۷/۴
۲۲۰۰۰۰۰	۰.۳۳۲۴۷۵۹/۰	۷۵۱۲۷۴۱۳۴/۰	۹۴۳/۵۴۸	۵۱۷۶۵۵۵۹/۰

بهمنظور بالا بردن دقت نتایج به دست آمده طبق مطالعات انجام شده [۱۵]، باید تعداد گره در لایه‌ی هارتمن^۱ و در لایه‌ی دیوار جانبی^۲ ۷ عدد باشد. عدد هارتمن، ضخامت لایه‌ی هارتمن و ضخامت لایه‌ی جانبی از روابط زیر به دست می‌آیند [۱۶]:

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

$$\delta_{Side\ wall} \sim Ha^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

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

همچنین جهت به دست 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 بر حسب متر و نسبت مش هارتمن و دیواره‌ی جانبی در جدول ۵ مشاهده می‌شوند.

جدول ۵. محاسبات ضخامت لایه‌های مرزی.

Table 5. Thickness of boundary layer calculations

نسبت مش دیواره‌ی جانبی	نسبت مش هارتمن	ضخامت دیواره‌ی جانبی	ضخامت هارتمن	سطح مقطع
۸۲۱۵/۱	۲۷۸۷/۱	۰.۶۲۰۱/۰	۰.۰۳۸۴/۰	مربع
۲۳/۱	۳۱/۱	۰.۴۳۸/۰	۰.۰۱۹/۰	مستطیل

۱- Hartmann

۲- side wall

جدول ۶. تعداد سلول‌های شبکه.

.Cell numbers ۶ Table

شماره‌ی شبکه	شبکه ۱	شبکه ۲	شبکه ۳
تعداد سلول‌های شبکه	۸۵۷۰۹۲	۱۲۰۰۰۰۰	۲۲۰۰۰۰۰

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 می‌شود. اثر متقابل جریان القایی و میدان مغناطیسی اعمال شده باعث ایجاد نیروی لورنتز^۱ می‌شود. نیروی لورنتز باعث افزایش افت فشار می‌شود. به همین دلیل پروفیل سرعت در مرکز کانال کاهش یافته و یک‌نواخت می‌شود. در تمام محاسبات انجام شده، سرعت ورودی 0.1 m/s می‌باشد. همچنین کانال‌ها از جنس فولاد ضدزنگ و فلز مایع خنک‌کننده سرب-لیتیم ۱۷ می‌باشد. لازم به ذکر است که خواص فیزیکی هر دو ماده به ترتیب در جدول‌های ۷ و ۸ ذکر شده است.

جدول ۷. خواص فیزیکی فولاد [۱۲].

Table ۷. Physical characteristics of Steel [۱۲].

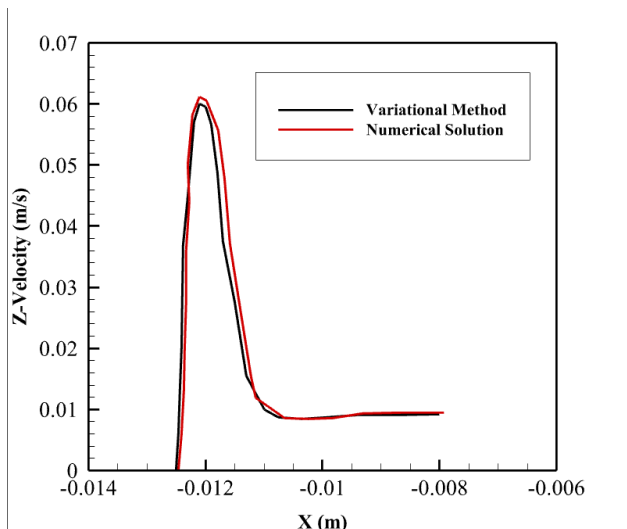
جنس	ضریب هدایت الکتریکی (s/m)
فولاد	$1/01 \times 10^6$

جدول ۸. خواص فیزیکی سرب-لیتیم [۱۳].

Table ۸. Physical characteristics of PbLi [۱۳].

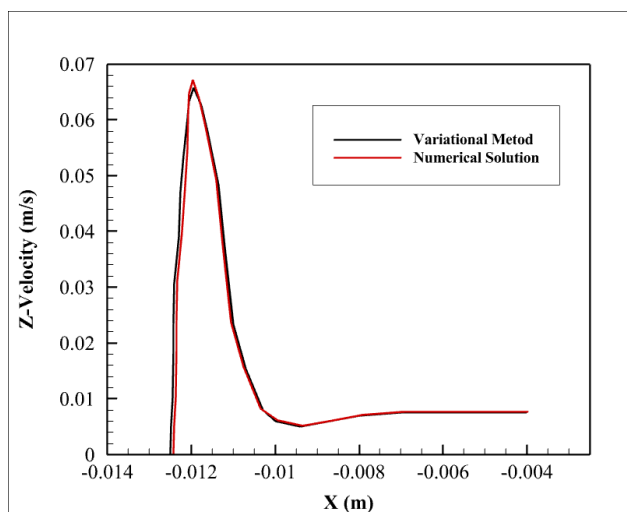
جنس	ضریب هدایت الکتریکی (s/m)	چگالی (s/m^3)	ویسکوزیته‌ی مغناطیسی (Pa.s)	نفوذپذیری مغناطیسی (۱-H.m)
PbLi۱۷	۷۶۱۶/۷	۹	۰۰۱۸/۰	۲۵۷/۱

۱- Lorentz Force



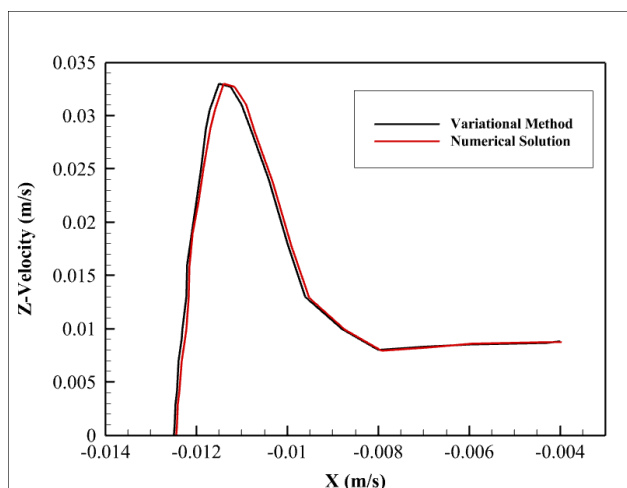
شکل ۶. اعتبارسنجی کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۴ تسلا.

Figure 6. Validation in Square cross section at 4T



شکل ۷. اعتبارسنجی کانال با سطح مستطیل در میدان ۴ تسلا.

Figure 7. Validation in rectangular cross section at 4T

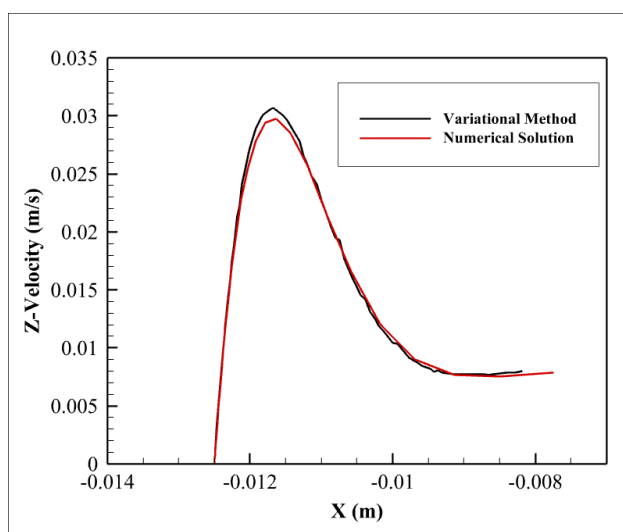


شکل ۸. اعتبارسنجی کانال با سطح مقطع مستطیل در میدان ۱ تسلا.

Figure 8. Validation in rectangular cross section at 1T

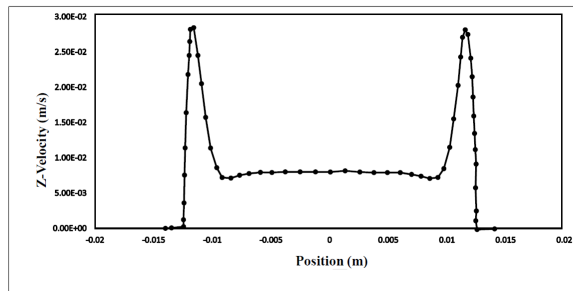
الف: تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر پروفیل سرعت

در این قسمت از پژوهش، تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر سرعت جریان عبوری از کانال بررسی شده است. در شکل‌های ۵ تا ۸، پروفیل 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 می‌شود. اثر شدید نیروی لورنتس در قسمت مرکزی کانال باعث شده است تا هسته‌ی مرکزی یک سرعت ثابت داشته باشد. به دلیل برقراری شرط عدم لغزش در دیواره‌های داخلی کانال، سرعت در دیواره‌های کانال صفر می‌باشد. میدان مغناطیسی اعمال شده منجر به توزیع سهموی پتانسیل الکتریکی در طول دیواره‌های جانبی می‌شود. از آنجایی که چگالی جریان ورودی از دیواره‌های جانبی ثابت است، حداکثر پتانسیل در مرکز دیواره‌های جانبی منجر به میدان الکتریکی بالاتر در دیواره‌های جانبی می‌شود و طبق قانون اهم، سرعت در لایه‌ی جانبی افزایش می‌یابد. به همین دلیل بیشترین مقدار سرعت در نزدیکی دیواره‌های جانبی مشاهده می‌شود.



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

Figure 5. Validation in square cross section at 1T



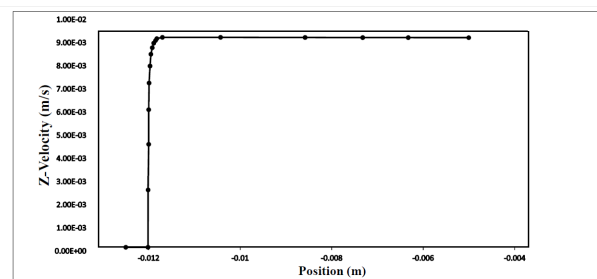
شکل ۱۰. پروفیل کامل سرعت در کانال با سطح مقطع مربع در میدان ۱ تسلا.

Figure 10. Full velocity profile in channel with square cross section at 1 T.

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 درآمده‌اند. 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 می‌کند نیز افزایش می‌یابد. با افزایش نیروی لورنتز، افت فشار جریان در طول کانال نیز افزایش می‌یابد. شکل ۱۱ نشان می‌دهد که با افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۱ تسلا 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.

برای بررسی دقیق‌تر تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر پروفیل سرعت، در شکل ۹، پروفیل سرعت در غیاب میدان در کانال با سطح مقطع مربع ارائه شده است. طبق نتایج به دست آمده، پروفیل سرعت کاملاً متفاوت از حالتی است که میدان اعمال می‌شود. سرعت در غیاب میدان، پس از رسیدن به مقدار ماکزیمم نه تنها کاهش نمی‌یابد، بلکه ثابت باقی مانده و عرض کانال را در یک مقدار ثابت طی می‌کند که دلیل این امر عدم حضور میدان مغناطیسی می‌باشد. 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 رسم‌شده در شکل ۱۰ نشان می‌دهد که پروفیل 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 می‌کند.



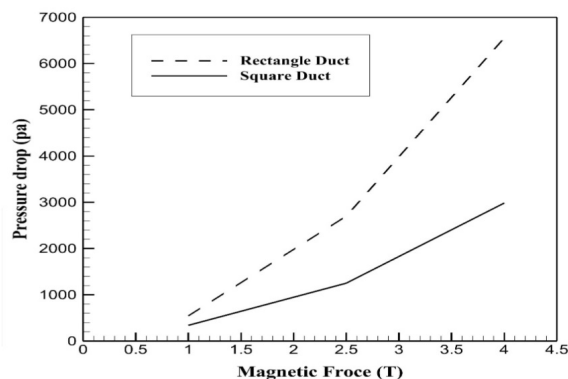
شکل ۹. پروفیل سرعت در کانال با سطح مقطع مربع بدون حضور میدان.

Figure 9. Velocity profile in channel with square cross section in the absence of the magnetic field.

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 به ترتیب ۱۱ و ۹ درصدی سرعت ماکزیمم روی دیواره‌های جانبی، در میدان ۱ تسلا و ۴ تسلا می‌شود. 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 می‌شود، می‌توان نتیجه گرفت که تغییر ابعاد کانال و استفاده از سطح مقطع مستطیل اصلاً ایده‌آل نیست. در واقع معایب این سطح مقطع بسیار بیشتر از مزایای آن است. بهترین نتایج در حالتی به دست می‌آیند که نسبت ارتفاع به عرض کانال ۱ باشد.

با در نظر گرفتن سطح مقطع مربع به عنوان حالت ایده‌آل و بررسی تأثیر شدت میدان مغناطیسی بر سرعت ماکزیمم روی دیواره‌های جانبی، مشاهده می‌شود که با افزایش میدان مغناطیسی از ۱ به ۴ تسلا، سرعت ماکزیمم در کانال با سطح مقطع مربع، ۲ برابر افزایش می‌یابد. از طرفی دیگر، سرعت در مرکز کانال مقدار ثابتی معادل 0.1 m/s باقی می‌ماند و تغییرات آن قابل چشم‌پوشی است. با در نظر گرفتن میزان افزایش افت فشار ناشی از شدت میدان مغناطیسی، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش شدت میدان مغناطیسی باعث افزایش شدید افت فشار می‌شود. به طور کلی می‌توان از شدت میدان مغناطیسی برای کنترل جریان و پایدار کردن رفتار



شکل ۱۱. نمودار افت فشار در میدان‌های مغناطیسی.

Figure 11. Diagram of pressure drop in magnetic fields.

ج: تأثیر تغییر ابعاد سطح مقطع کانال

نتایج موجود در جدول‌های ۱ تا ۴ (شبکه‌بندی با 1200000) 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، به ترتیب ۱۱ و ۹ درصد در میدان ۱ تسلا و ۴ تسلا افزایش می‌یابد. با افزایش ارتفاع کانال و به دلیل ثابت بودن طول کانال، سطح مقطع کانال مستطیل افزایش می‌یابد. با افزایش سطح مقطع کانال، مقدار نیروی لورنتز کاهش می‌یابد. در نتیجه سرعت در دیواره‌های کناری افزایش می‌یابد.

۶- نتیجه‌گیری

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

طبق نتایج به دست آمده، پروفیل سرعت به صورت شکل ام است و گرادیان سرعت سیال در دیواره‌های کناری افزایش شدیدی داشته است. بر این اساس می‌توان نتیجه گرفت که نیروی لورنتزی که بر اثر اعمال میدان

μ (kg/s.m)	لزجت دینامیکی سیال
μ_0 (H/m)	تراوایی مغناطیسی
ν (m ² /s)	لزجت سینماتیکی سیال
ρ (kg/m)	چگالی
σ (s/m)	هدایت الکتریکی سیال
φ	پتانسیل الکتریکی

مگنتوهیدرودینامیک در فرآیند هم‌جوشی هسته‌ای استفاده کرد. به‌این ترتیب به سادگی می‌توان 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 هم‌جوشی هسته‌ای در نظر گرفته می‌شود، اما می‌توان در رآکتور هم‌جوشی هسته‌ای از افت فشار به‌عنوان عامل کنترلی استفاده کرد؛ به این ترتیب که در صورت وقوع شرایط بحرانی، می‌توان 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.

۸-مراجع

- [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.
- [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.

۷-فهرست علائم

نشانه	علامت (لاتین)
\bar{B} (kg/s ² .A)	چگالی شار مغناطیسی
\bar{J} (C/s)	چگالی جریان الکتریکی
Ha	عدد هارتمن
Re_m	رینولدز مغناطیسی
R	نسبت افت فشار
P (pa)	فشار سیال
L	طول
V (m/s)	سرعت سیال
C_w	نسبت بین هدایت الکتریکی دیواره‌ها و هدایت الکتریکی سیال
x,y,z	جهت‌های مختصاتی
نشانه	علامت (یونانی)

- [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. Ricipito, A. Aiello, O. Gastaldi, F. Gabriel, Lead-lithium 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-Bercedero, 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 nano-coating 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).