

## مطالعه عددی و بررسی اثر میدان مغناطیسی بر میدان سرعت و افت فشار در بلنکت دوتایی

حسن ثنائی<sup>۱</sup>، فرامرز سرحدی<sup>۱\*</sup>، سعید فراهت<sup>۱</sup>، سید محمد جوادی<sup>۲</sup>

۱- گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۲- گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۱۰/۲۵

بازنگری: ۱۳۹۹/۰۳/۰۲

پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۳۱

ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۴/۲۷

### کلمات کلیدی:

مگنتوهیدرودینامیک

بلنکت دوتایی

مطالعه عددی

افت فشار

**خلاصه:** پژوهش حاضر به مطالعه ساختار یک بلنکت دوتایی و بررسی رفتار هیدرودینامیک سیال فلز مایع تحت تاثیر میدان مغناطیسی برای یک راکتور گداخت هسته‌ای پرداخته شده است. مطالعه عددی صورت گرفته بر روی جریان داخل یک مجرای بلنکت می‌باشد که سیال توسط جداکننده از بدنه جدا شده است. از این ساختار جداکننده هم به عنوان عایق حرارتی و هم به عنوان کاهنده افت فشار استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن هدایت الکتریکی برای سیال، اصول مگنتوهیدرودینامیک نیز در نظر گرفته شده است. موضوعاتی که برای بررسی انتخاب شده است عبارتند از: تاثیر شدت میدان مغناطیسی، هدایت الکتریکی دیواره جداکننده، ضخامت ساختار جداکننده و فاصله آن تا دیواره اصلی، بر میزان افت فشار و همچنین تبیین رفتار پروفیل سرعت تحت تغییر میدان مغناطیسی. با توجه به نتایج به دست آمده افزایش شدت میدان مغناطیسی از  $0.4 T$  تا  $1 T$  باعث افزایش ۴ برابری افت فشار می‌گردد. همچنین کاهش هدایت الکتریکی دیواره جداکننده از  $500 S/m$  تا  $5 S/m$  باعث کاهش افت فشار ۳۵ درصدی می‌شود. بررسی‌های انجام شده در خصوص تغییر ضخامت ساختار جداکننده در ۱۶ حالت مختلف نشان داد که تغییر ضخامت، با عرض شکاف برابر تاثیر چندانی بر افت فشار ندارد ولی با افزایش فاصله آن تا دیواره، افت فشار و به تبع آن توان پمپاژ کاهش می‌یابد.

### ۱- مقدمه

پروژه بین‌المللی گداخت<sup>۳</sup>، در دست پژوهش و تحقیق می‌باشد نوع دوتایی<sup>۴</sup> آن می‌باشد. سیال مورد استفاده در این نوع بلنکت‌ها فلز مایع سرب-لیتیوم<sup>۵</sup> می‌باشد؛ در نتیجه در سال‌های اخیر توجه ویژه‌ای به این سیال شده است و آن هم به این دلیل است که تولید تریتیوم از برخورد نوترون به این فلز به دست آمده و این نوع سیال دارای توانایی بالاتری نسبت به سیالات معمولی در انتقال حرارت هستند و همچنین امکان استفاده در دماهای بالا را دارا می‌باشد. در این زمینه محققین با روش‌های مختلف سعی در رفتارشناسی سیال به خصوص افت فشار، سرعت سیال و بهبود انتقال حرارت کرده‌اند. در شکل ۱ نحوه حرکت سیال در یک بلنکت دوتایی نشان داده شده است. همچنین سطح مقطع یک کانال بلنکت مذکور در شکل ۲ دیده می‌شود [۱].

هیدرودینامیک مغناطیسی<sup>۱</sup> شاخه‌ای از علم است که به بررسی و رفتارشناسی دینامیک سیال رسانا، تحت میدان مغناطیسی می‌پردازد. هیدرودینامیک مغناطیسی در اکثر صنایع مهم مانند اهداف نظامی، صنعت هوا فضا، پمپ‌های مگنتوهیدرودینامیک و همچنین راکتورهای هسته‌ای به طور گسترده‌ای مورد توجه قرار گرفته است. از مهم‌ترین قسمت‌های یک راکتور هم‌جوشی هسته‌ای، توکامک، می‌توان به بلنکت اشاره نمود که سه وظیفه اصلی تولید سوخت چرخه، انتقال انرژی و محافظت سایر اجزای راکتور از تشعشعات را دارد. میدان شدید مغناطیسی جهت محصورسازی پلاسما برای تولید هم‌جوشی (پیوند بین دو ایزوتوپ هیدروژن به نام‌های دوتریوم و تریتیوم) از ملزومات این نوع راکتورها می‌باشد و بنابراین بلنکت‌ها در معرض این میدان مغناطیسی قوی می‌باشند. یکی از انواع بلنکت‌ها<sup>۲</sup> که در

3 International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

4 Dual Coolant Lead-Lithium (DCLL)

5 Pb-Li17

1 Magneto Hydrodynamics (MHD)

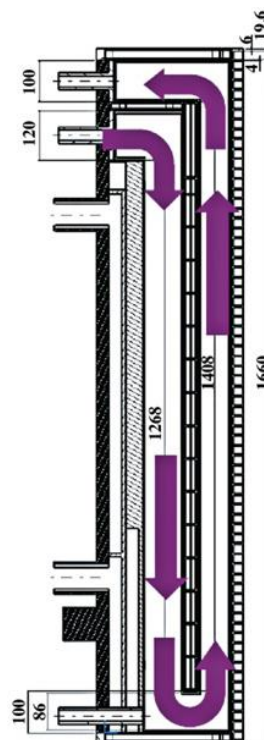
2 Blanket

\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Email: fsarhaddi@eng.usb.ac.ir



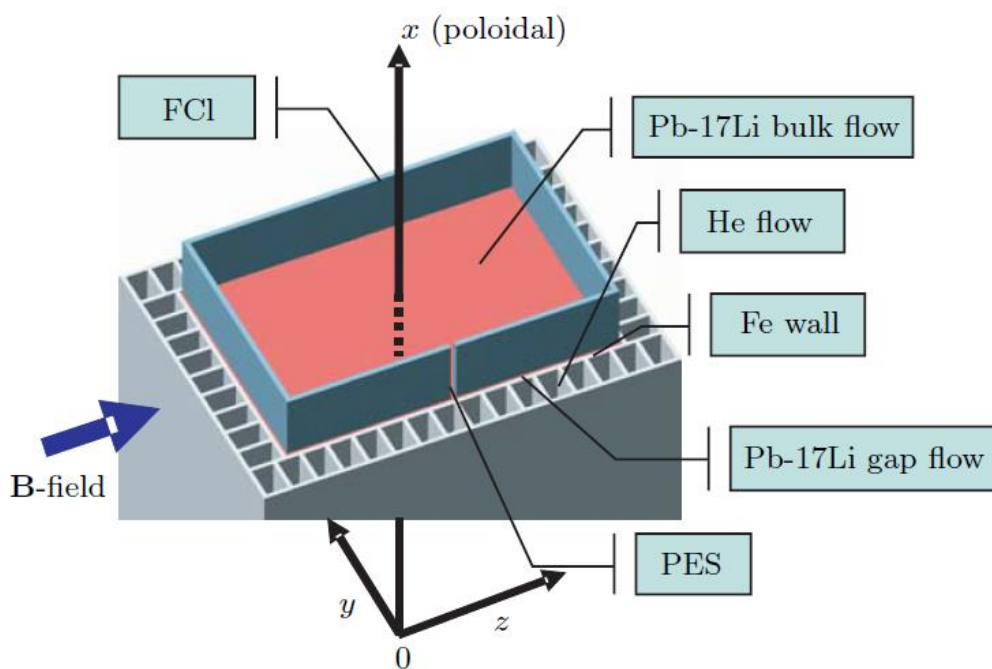
به منظور جلوگیری از کوپلینگ جریان القایی و میدان مغناطیسی، کاهش افت فشار و افزایش دمای فلز مایع، کانال‌های عبور جریان<sup>۱</sup> از جنس کربید سیلیکون، بین بدنه اصلی و مایع مذاب قرار می‌گیرد (شکل ۲).

مطالعات و بررسی‌های گسترده‌ای در زمینه تاثیر میدان مغناطیسی بر روی فلز مذاب در سال‌های اخیر توسط محققین انجام پذیرفته است. از پژوهش‌های انجام شده تا قبل سال ۲۰۰۰ می‌توان از مطالعات کیم<sup>۲</sup> [۲] در خصوص نوع شکل‌گیری پروفیل سرعت، وانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۳] در زمینه پوشش‌دادن ساختار جداکننده و اثر آن بر میزان افت فشار و انتقال حرارت، کريلوف<sup>۴</sup> و همکاران [۴] در حیطه نتایج آزمایشگاهی اثر تغییر سطح مقطع در انتقال حرارت نام برد. در سال ۲۰۰۹ استارک<sup>۵</sup> و همکاران [۵] به بررسی تجربی جریان هیدرودینامیک مغناطیسی در ماکت بلنکت پروژه بین‌المللی گداخت در ابعاد واقعی پرداختند. از نتایج آن‌ها این بود که با افزایش سرعت و کاهش میدان مغناطیسی توزیع جریان نابرابر و یا حتی جریان برگشتی مشاهده می‌شود که البته چنین جریاناتی خارج از محدوده عملکرد پروژه بین‌المللی گداخت می‌باشد. در سال ۲۰۱۱



شکل ۱. چرخش فلز مایع در بلنکت دوتایی [۱]

Fig. 1. Liquid metal circulation in DCLL blanket [1]



شکل ۲. مقطع بلنکت دوتایی [۱]

Fig. 2. DCLL blanket cross section [1]

- 1 Flow channel insert (FCI)
- 2 Kim
- 3 Wang
- 4 Kirillov
- 5 Stark

۲۰۱۹ هولین<sup>۶</sup> و همکاران [۱۱] با پوشش دادن ساختار جداکننده با نانومواد، کاهش افت فشار را به اندازه بزرگی یک مرتبه مشاهده نمودند. همچنین این عمل کاهش ۵۰ درصدی عدد ناسلت را در پی داشت. در سال ۲۰۲۰ سوتو<sup>۷</sup> و همکاران [۱۲] با استفاده از ساختار جداکننده با جنس متخلخل به بررسی افت فشار در میدان‌های مغناطیسی ۴ و ۱۰ تسلا پرداختند و افت فشار به ترتیب ۱۲۰ و ۳۰۰ پاسکال بر متر برای آن‌ها گزارش نمودند.

در ۱۰ سال اخیر [۶-۱۲]، توجه اکثر محققان به بلنکت‌های دوتایی جلب گردیده و مواردی مانند جنس دیواره جداکننده، انبساط‌های ناگهانی، خم‌ها، تغییرات کلی در سطح مقطع، تغییر سرعت سیال ورودی و تغییر میدان مغناطیسی مورد مطالعه آن‌ها قرار گرفته است. با این حال بررسی موضوعاتی همچون اثر ضخامت ساختار جداکننده، هدایت الکتریکی و فاصله شکاف در کاهش افت فشار می‌تواند در بهبود عملکرد بلنکت دوتایی مفید واقع شود. با عنایت به این که تغییر ساختاری گسترده در بلنکت باعث اختلال در دیگر وظایف آن می‌گردد و همچنین عدم بررسی موضوعات مذکور، در کار حاضر در نظر است که تاثیر میدان مغناطیسی بر سیال رسانای دارای هدایت الکتریکی در یک کانال مستطیلی با ساختار جداکننده بررسی شود. قسمت اصلی سیال توسط دیواره‌ای جداکننده جهت کاهش اثر میدان مغناطیسی بر سیال و به تبع آن کاهش افت فشار، از بدنه اصلی کانال جدا شده است. تاثیر میدان مغناطیسی بر پروفیل سرعت و افت فشار مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تاثیر عدد هارتمن که مشخصه شدت میدان مغناطیسی می‌باشد بر افت فشار و بررسی ضخامت و جنس دیواره جداکننده نیز از موارد دیگری است که در این مطالعه مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- تعریف مسئله

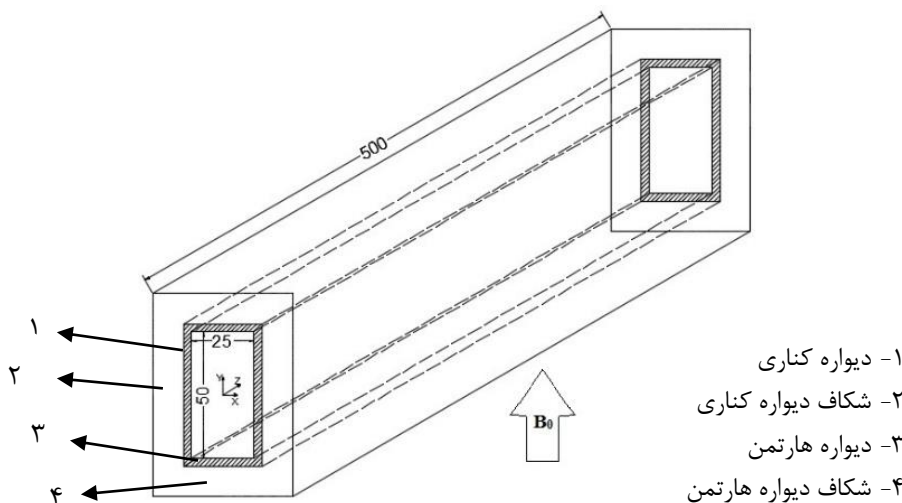
در شکل ۳ یک کانال از یک بلنکت دوتایی در نظر گرفته شده است [۱۳]. ابعاد سطح مقطع کانال سیال اصلی ۵۰×۲۵ میلی‌متر و در راستای جهت جریان ۵۰۰ میلی‌متر می‌باشد. جهت بررسی رفتار حرکتی سیال به ویژه افت فشار از کانال‌های عبور جریان با ضخامت‌های ۰.۲، ۰.۳ و ۰.۴ میلی‌متر و فاصله شکاف ۱، ۲، ۳ و ۴ میلی‌متر استفاده شده است.

مالانگ<sup>۱</sup> و همکاران [۶] دریافتند با خروج سیال فلز مذاب با دمای ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد، اگر المان کلیدی طرح یعنی کانال‌های عبور جریان از جنس کربید سیلیکون باشد راندمان تا ۵۵ درصد افزایش می‌یابد ولی با جنس فرتیک-مارتنزیتی<sup>۲</sup> این راندمان به ۳۵ درصد افت پیدا می‌کند. در سال ۲۰۱۳ لی<sup>۳</sup> و همکاران [۷] به بررسی نتایج تجربی و عددی سه‌بعدی افت فشار سیال هیدرودینامیک مغناطیسی در کانال با مقطع دایره تحت میدان غیریکنواخت مغناطیسی در دو مقطع ورودی و خروجی پرداختند. بررسی آن‌ها نشان داد فشار سیال در مجاورت دیوار عمود بر میدان مغناطیسی نسبت به دیواره موازی بیشتر است که این اختلاف به علت وجود جریان‌های مختلف القایی در دو حالت ذکر شده می‌باشد. در سال ۲۰۱۵ بوهرلر<sup>۴</sup> و همکاران [۸] در یک موسسه تحقیقاتی به نحوه تجهیز و مدل‌سازی تجربی برای بررسی جریان هیدرودینامیک مغناطیسی پرداختند. جریان در یک حلقه، در یک لوله صاف و خوردگی و غیره از موضوع‌های مورد بررسی آن‌ها بود. در این مطالعه، افت فشار در رینولدز و بزرگی میدان مغناطیسی‌های مختلف گزارش شده است. در سال ۲۰۱۷ فرناندز<sup>۵</sup> و همکاران [۹] به بررسی عددی یک بلنکت دوتایی پرداختند. آن‌ها با اندازه‌گیری دمای فلز مذاب از ورودی تا خروجی و همچنین دمای ساختار بدنه اصلی پیشنهاد دادند با اجرای ۴ کانال گاز خنک‌کننده هلیوم برای ساختار بدنه که تحمل دما تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد را دارد، دمای بدنه اصلی نزدیک به دیواره تا ۸۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌یابد. در سال ۲۰۱۸ بوهرلر<sup>۴</sup> و همکاران [۱۰] به بررسی تاثیر داکت جداکننده در یک کانال با مقطع دایره بر روی افت فشار و تحت تاثیر جریان هیدرودینامیک مغناطیسی پرداختند. آن‌ها دریافتند با کم کردن نسبت هدایت دیواره (نسبت بین هدایت الکتریکی دیواره‌ها و هدایت الکتریکی سیال،  $C_w$ ) مقدار افت فشار در بلنکت در بازه قابل قبولی قرار می‌گیرد. به طور مثال افت فشار در یک کانال با دمای فلز مذاب ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، طول ۰/۰۵ متر، نسبت هدایت دیواره ۱ و سرعت ۰/۱ متر بر ثانیه، تحت میدان مغناطیسی ۱۰ تسلا برابر ۰/۰۷۵ مگاپاسکال خواهد بود. اما اگر همین نسبت هدایت دیواره ۰/۱ شود، افت فشار برابر با ۰/۰۱ مگاپاسکال خواهد شد. در سال

- 1 Malang
- 2 Ferritic/Martensitic
- 3 Li
- 4 Bühler
- 5 Fernández

6 Hulin

7 Soto



شکل ۳. نحوه فرارگیری کانال‌های عبور جریان در یک بلنکت دوتایی

Fig. 3. FCI arrangement in a DCLL blanket

جدول ۱. مشخصات فیزیکی فلز مذاب [۱۳]

Table 1. Physical characteristics of molten metal [13]

هدایت الکتریکی S/m	ویسکوزیته دینامیکی kg/m. s	چگالی kg/m <sup>3</sup>	نوع سیال
۷۷۶۱۶۰	۰/۰۰۱۸	۹۷۷۶	فلز مذاب سرب-لیتیوم

از اثر میدان مغناطیسی القایی در مقابل تاثیر میدان مغناطیسی خارجی اعمال شده صرف نظر شده است [۱۳]. رینولدز مغناطیسی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_m = \mu_0 \sigma u L \quad (1)$$

که در آن  $\mu = 1/256 \times 10^{-6} \text{ H/m}$  تراوایی مغناطیسی (برابر خلاء فرض شده است) [۱۶]،  $u$  سرعت سیال، هدایت الکتریکی سیال  $\sigma$  و  $L$  طول مشخصه (نصف طول دیواره عمود بر میدان مغناطیسی [۱]) می‌باشد. تحت این فرضیات معادلات مگنتوهیدرودینامیک حاکم بر جریان می‌تواند به صورت زیر نوشته شود [۱۲].

$$\nabla \cdot \vec{u} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla (v \nabla \vec{u}) + \frac{1}{\rho} (\vec{J} \times \vec{B}) \quad (3)$$

فلز مذاب سرب-لیتیوم با مشخصات جدول ۱ در راستای  $Z$  در حال حرکت است. میدان مغناطیسی خارجی  $B$  در جهت  $Y$  به کانال اعمال می‌گردد. دیواره خارجی از نظر هدایت الکتریکی عایق در نظر گرفته شده است. خصوصیات کامپوزیت کانال‌های عبور جریان بسته به تکنیک‌های ساخت، ناخالصی‌ها و شرایط دیگری که دارد هدایت الکتریکی آن بین  $5-650 (\Omega m)^{-1}$  قابل تغییر است. لذا جهت بررسی رفتار از سه حالت ۵، ۱۰۰ و ۵۰۰ استفاده شده است. همچنین رفتار سیال با تغییر اندازه بزرگی میدان مغناطیسی خارجی ۰/۱، ۰/۴، ۰/۷ و ۱ تسلا اعمال شده، مورد مطالعه قرار گرفته است.

### ۳- معادلات حاکم

خواص فلز مذاب مانند چگالی ویسکوزیته و هدایت الکتریکی در این شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده است. میدان مغناطیسی همگن خارجی در راستای  $Y$  به هندسه مطروحه اعمال می‌شود. از آن جایی که مقدار رینولدز مغناطیسی بسیار کوچک‌تر از یک می‌باشد،

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

در این جا  $\varphi_w, j_{n,w}, j_{n,f}$  و  $\varphi_f$  به ترتیب بردار نرمال چگالی

$$\varphi_f = \varphi_w, \quad j_{n,f} = j_{n,w}, \quad \frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0, \quad \frac{\partial P}{\partial n} = 0 \quad (8)$$

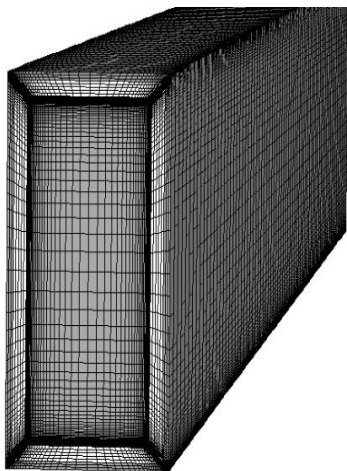
جریان الکتریکی دیواره، بردار نرمال چگالی جریان الکتریکی سیال، پتانسیل الکتریکی دیواره و پتانسیل الکتریکی سیال می باشد.

### ۵- بررسی نتایج

#### ۵-۱- استقلال شبکه و اعتبارسنجی

همان طور که در شکل ۴ مشاهده می شود شبکه بندی بهینه متشکل از ۵۰ گره در راستای X، ۱۰۰ گره در راستای Y و ۷۰ گره در راستای Z است. نتایج نشان می دهد افزایش گره ها باعث تغییرات ناچیزی در میانگین سرعت در خروجی کانال می شود و فقط باعث بیشتر شدن زمان حل معادلات می گردد. نتایج بررسی آزمون استقلال جواب ها از شبکه بندی انجام شده در جدول ۲ قابل رویت می باشد و همچنین جهت بررسی اعتبار نتایج عددی، سرعت در خروجی کانال با نتایج تقریبی سیدورنکو و شیشکو [۱۳] در شکل ۵ ارائه شده است. با بررسی های به عمل آمده میزان خطا بین ۳ تا ۶ درصد می باشد که از این لحاظ می توان به حل عددی پژوهش حاضر اعتماد نمود.

نکته قابل ذکر این است که طبق مطالعات انجام شده [۱۵]، تعداد گره ها باید در راستای X و Y در ضخامت لایه هارتمن و لایه کناری به ترتیب بین ۳ تا ۵ و بین ۵ تا ۷ می باشد. عدد هارتمن، ضخامت لایه



شکل ۴. شبکه بندی استفاده شده کل مجرای یک بلنکت

Fig. 4. The grid/mesh generated in the entire channel of a blanket

$$\vec{J} = \sigma(-\nabla\varphi + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} = 0 \quad (5)$$

معادلات (۲) تا (۵) به ترتیب معادله پیوستگی، مومنتوم، قانون اهم و بقاء جریان می باشد. در روابط بالا متغیرهای  $\varphi, \vec{J}$  و  $\vec{u}$  به ترتیب بردار چگالی جریان، پتانسیل الکتریکی و بردار سرعت سیال می باشند. در این مطالعه عدد بدون بعد رینولدز نشانگر نسبت نیروی اینرسی به لزجت و عدد هارتمن نشانگر نسبت نیروی الکترو مغناطیسی به لزجت می باشد که در بخش بعدی معرفی می شوند. هندسه مسئله در نرم افزار گمبیت تولید و شبکه بندی شده است. شبکه مورد استفاده همان طور که در شکل ۴ نشان داده شده در ناحیه نزدیک به دیواره که گرادیان های سرعت بالاست، ظریف تر شده است. همچنین در این مطالعه جهت شبیه سازی کامپیوتری از نرم افزار انسیس فلوئنت ۱۹/۲ استفاده شده است که جهت بررسی راستی آزمایی نرم افزار، از اعداد رینولدز و هارتمن ۱۳۵۷ و ۵۲۰ مطابق با مرجع [۱۳] استفاده شده است. جهت حل مسئله از حل کننده فشار محور و برای ارتباط فشار و سرعت از روش سیمپل استفاده شده است. برای گسسته سازی معادلات فشار، مومنتوم و پتانسیل الکتریکی از طرح بالادست مرتبه دوم استفاده شده است. معیار همگرایی برای معادله پیوستگی  $10^{-4}$  و برای سایر معادلات  $10^{-6}$  در نظر گرفته شده است.

#### ۴- شرایط مرزی

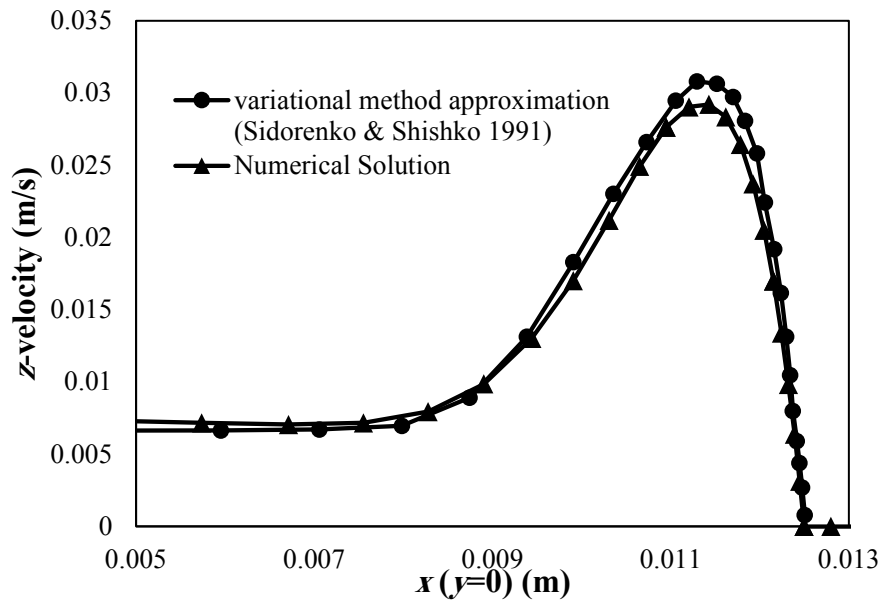
در شکل ۳ کانال مورد بررسی این تحقیق نشان داده شده است. میدان  $B_0$  یکنواخت و همچنین در ورودی، جریان آرام و سرعت فلز مذاب  $0.1/0$  m/s به صورت یکنواخت اعمال می گردد. سرعت های صفر روی دیواره ها (روی بدنه اصلی و کانال های عبور جریان، شرط عدم لغزش) شرایط مرزی در معادلات مومنتوم می باشند. جهت حصول اطمینان از عدم عبور جریان الکتریکی از سطوح خارجی، بدنه اصلی به عنوان سطح عایق مدل سازی شده است و سایر شرایط مرزی به شکل زیر می باشد [۱۴]:

شرط مرزی ورودی:

شرط مرزی خروجی:

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

شرط مرزی جامد:



شکل ۵. مقایسه نتایج عددی پژوهش حاضر با نتایج تقریبی سیدورنکو و شیشکو [۱۳]

Fig. 5. Comparison of the numerical results of the present study with the approximate results of Sidorenko and Shishko [13]

$$Ha = LB_0 \sqrt{\frac{\sigma}{\rho\nu}}, \quad Re = \frac{UL}{\nu} \quad (11)$$

می‌گردد [۱۵].

### ۵-۲- نتایج حل عددی

از اثر متقابل جریان الکتریکی القایی با میدان مغناطیسی نیروی لورنتز به وجود می‌آید که این نیرو مخالف گرادیان فشار می‌باشد. در نتیجه پروفیل سرعت در هسته جریان سیال تخت می‌شود. هم‌زمان با افزایش عدد هارتمن نیروی میرای الکترومغناطیسی افزایش پیدا می‌کند به همین دلیل برای عدد رینولدز معلوم، افت فشار به همراه افزایش عدد هارتمن افزایش پیدا می‌کند. نسبت بین هدایت الکتریکی دیواره‌ها و هدایت الکتریکی سیال و تغییر ساختار داخلی کانال اصلی، تاثیر زیادی بر روی شکل جریان دارد. در تمامی مقایسه‌های انجام شده سرعت ورودی و عدد رینولدز به ترتیب  $0.1 \text{ m/s}$  و  $1357$  می‌باشد.

### ۵-۲-۱- اثر شدت میدان مغناطیسی

تاثیر میدان مغناطیسی بر جریان را می‌توان با بررسی عدد هارتمن

جدول ۲. نتایج آزمون استقلال جواب‌ها از شبکه‌بندی

Table 2. Mesh independency results

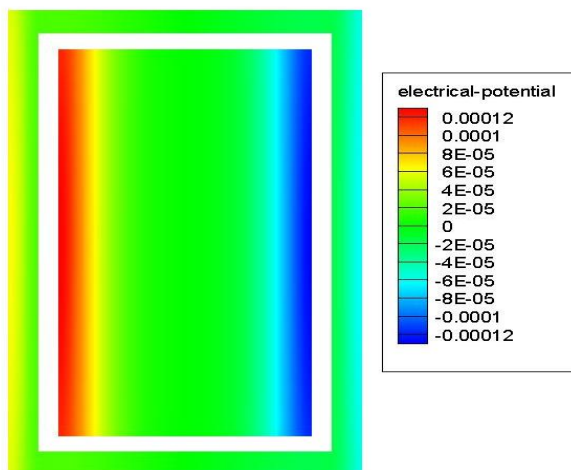
تعداد گره‌ها	$V_z/W_0$ در خروجی
$40 \times 80 \times 70$	۳/۲۲۹۹۶۳
$50 \times 100 \times 70$	۳/۱۵۳۶۵۸
$70 \times 120 \times 70$	۳/۱۵۳۷۹۹
$50 \times 100 \times 50$	۳/۲۰۱۲۹۸
$50 \times 100 \times 70$	۳/۱۵۳۶۵۸
$50 \times 100 \times 120$	۳/۱۵۳۷۱۱

هارتمن و دیواره کناری متناسب با روابط زیر می‌باشد [۱۵]:

شایان ذکر است که از روابط (۹) و (۱۰) جهت محاسبه تعداد گره مربوطه و تعیین ضخامت لایه هارتمن و لایه کناری استفاده

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

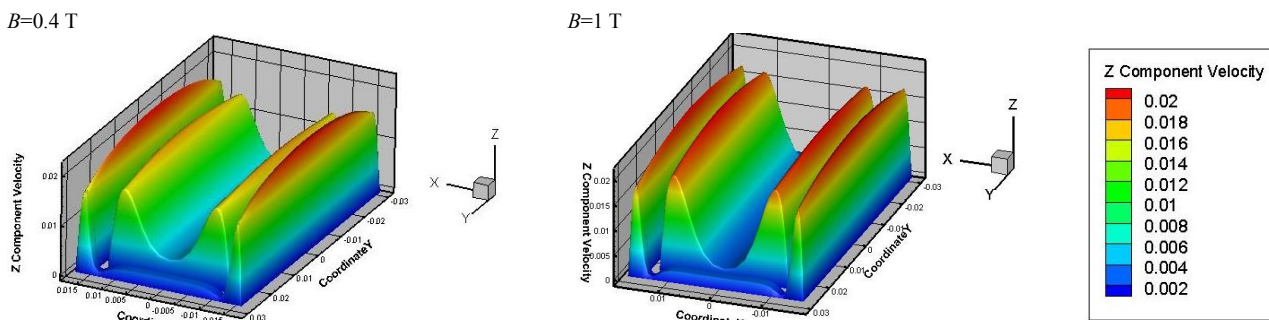
$$\delta_{side\ wall} \sim Ha^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$



شکل ۸. توزیع پتانسیل الکتریکی ناشی از میدان مغناطیسی ( $B=1T$ )  
 Fig. 8. Distribution of electric potential due to magnetic field ( $B=1T$ )

می‌شود. از این شکل می‌توان نتیجه‌گیری کرد که با افزایش عدد هارتمن و در نتیجه افزایش شدت میدان مغناطیسی، پروفیل سرعت در مرکز کانال به شکل  $M^1$  در می‌آید.

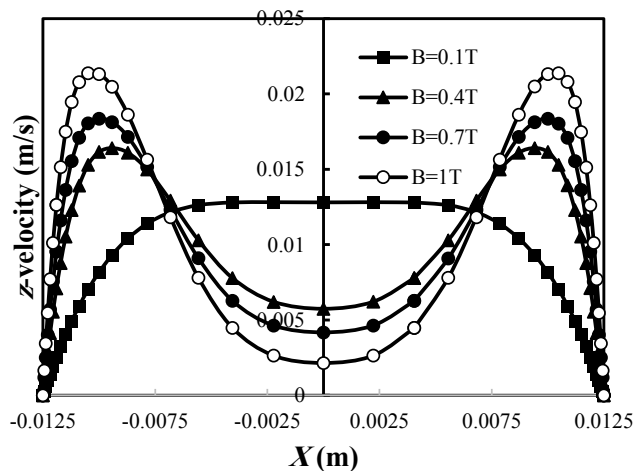
شکل ۷ بیان‌گر تشکیل پروفیل سرعت شکل ام در راستای جریان سیال می‌باشد و افزایش گرادیان سرعت در نزدیکی دیواره‌های کناری کاملاً مشخص می‌باشد. در شکل ۸ توزیع پتانسیل الکتریکی ناشی از اعمال میدان مغناطیسی و حرکت سیال نشان داده شده است. همچنین در شکل ۹ کاهش فشار در راستای کانال و سیال اصلی نیز آورده شده است که حاکی از افزایش افت فشار بر اثر افزایش شدت میدان مغناطیسی می‌باشد. افزایش نزدیک به ۴ برابری افت فشار در اثر افزایش میدان مغناطیسی از ۰/۴ تا ۱ تسلا را می‌توان در شکل ۹ مشاهده نمود. با توجه به شکل ۹ برای افت فشار بر حسب میدان مغناطیسی می‌توان رابطه خطی تقریبی  $\Delta P \approx 4 \cdot B - 2$  را



شکل ۷. توزیع سرعت در خروجی کانال و نحوه تشکیل پروفیل سرعت شکل  $M^1$

Fig. 7. Velocity distribution at the channel outlet and the formation of the M-type velocity profile

1 M-type



شکل ۶. اثر تغییر میدان مغناطیسی بر پروفیل سرعت در خروجی کانال ( $y=0$ )

Fig. 6. The effect of magnetic field variation on the velocity profile at the outlet of the channel ( $y=0$ )

جستجو کرد. تاثیر حالت‌های مختلف شدت میدان مغناطیسی (تغییر عدد هارتمن) بر پروفیل سرعت محوری در خط مرکزی سطح مقطع کانال (روی محور  $X$ ) در شکل ۶ ارائه شده است. اعداد متناظر هارتمن، با شدت میدان مغناطیسی ۰/۱، ۰/۴، ۰/۷ و ۱ تسلا به ترتیب ۵۲، ۲۰۸، ۳۶۴ و ۵۲۰ می‌باشد.

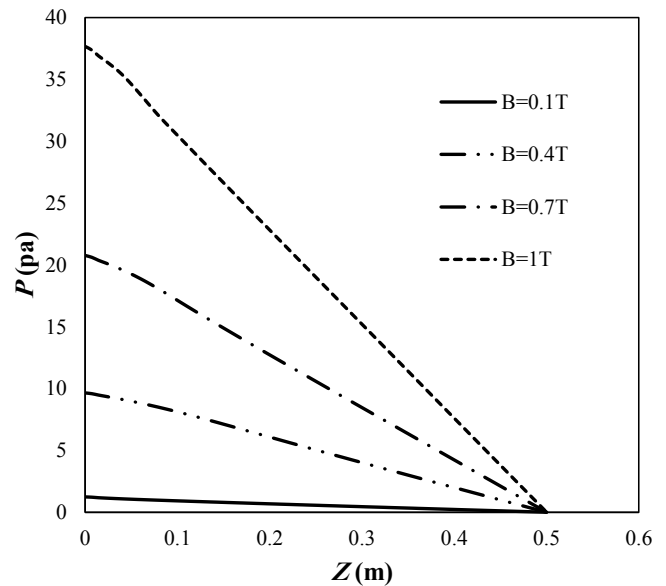
از این پس دیواره‌های عمود بر میدان مغناطیسی را دیواره هارتمن و دیواره‌های موازی با میدان را دیواره‌های کناری نامیده می‌شود. همان‌طور که دیده می‌شود برای حالت  $B=1T$  پروفیل سرعت در صورت مقایسه، تخت‌تر از حالت  $B=1T$  است. حضور میدان مغناطیسی نسبتاً قوی باعث پدید آمدن نیرویی خلاف جهت جریان به نام نیروی لورنتز در وسط کانال می‌شود. نیروی حجمی لورنتز شکل پروفیل سرعت را کاملاً عوض می‌کند و باعث کاهش سرعت در مرکز کانال و افزایش شدید گرادیان سرعت در دیواره‌های کناری

ناحیه کاملاً توسعه یافته به مقدار ثابتی کاهش پیدا می کند. از این موضوع می توان نتیجه گرفت که جریان کاملاً توسعه یافته در ناحیه ورودی باعث کاهش در افت فشار می شود. موضوع قابل توجه دیگر این است که افت فشار در شکاف هارتمن بیشتر از شکاف دیواره کناری می باشد که می توان علت را در این دانست که چگالی جریان در ناحیه دیواره هارتمن بزرگ تر از دیواره کناری می باشد. به طور کلی می توان بیان داشت افت فشار از اثر متقابل جریان القایی با میدان مغناطیسی می باشد. لذا از ضابطه ریاضی  $\Delta P \sim \vec{J} \times \vec{B}$  پیروی می کند.

### ۵-۲-۲- اثر تغییر ضخامت کانال های عبور جریان و فاصله شکاف

به منظور بررسی تاثیر ضخامت کانال های عبور جریان بر افت فشار، مدل بدون کانال های عبور جریان نیز مدل شده است. به طور واضح می توان دید که استفاده از یک جداره عایق جداکننده جریان سیال اصلی با بدنه، افت فشار را تا حد زیادی کاهش می دهد و دلیل آن را می توان در تغییر جریان الکتریکی و پتانسیل الکتریکی توسط عایق بیان داشت. ضریب  $R$  بیان گر نسبت افت فشار در حالت بدون کانال های عبور جریان به حالت دارای کانال های عبور جریان جهت تبیین مساله تعریف می گردد [۱۰].

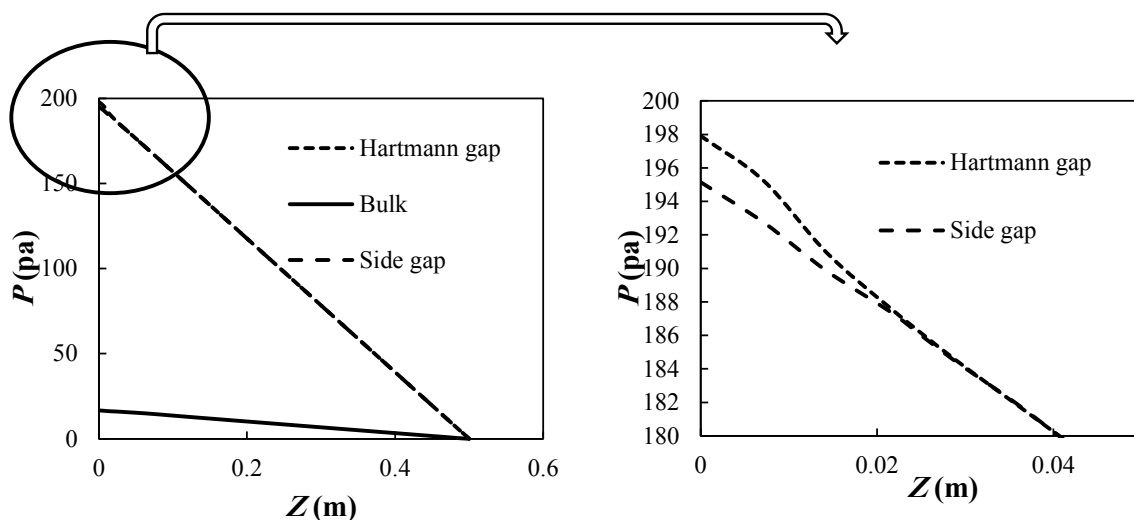
شکل ۱۱ نشان می دهد افت فشار در حالت ضخامت ۲ میلی متر



شکل ۹. اثر تغییر میدان مغناطیسی بر توزیع فشار در امتداد جریان  
Fig. 9. The effect of magnetic field variation on pressure distribution along the flow

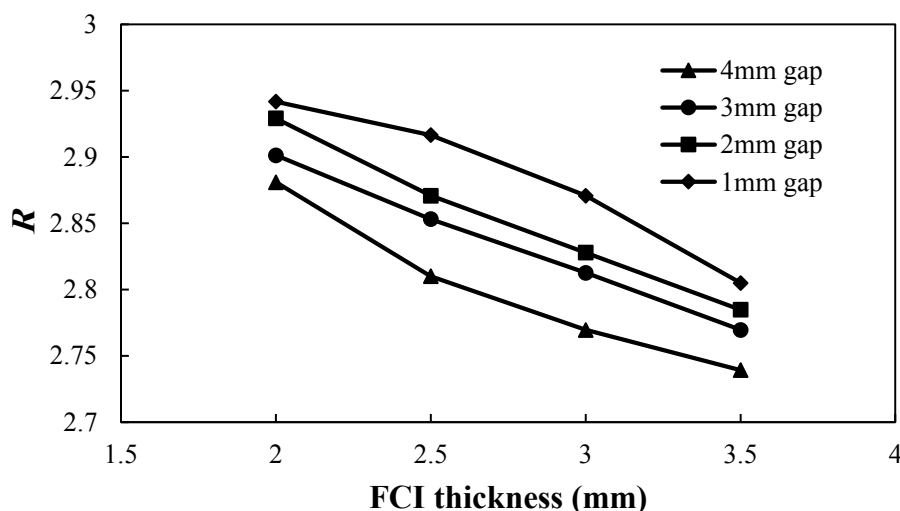
استخراج نمود. این رابطه بیان می کند که افت فشار با افزایش میدان مغناطیسی افزایش می یابد.

در قسمت شکاف هارتمن (فاصله بین کانال های عبور جریان و بدنه اصلی) نیز می توان افت فشار را در دو ناحیه در حال توسعه یافتگی و توسعه یافته بررسی نمود (این دو ناحیه در کانتورهای سرعت به خوبی دیده می شوند). با توجه به شکل ۱۰ می توان دریافت در ناحیه در حال توسعه یافتگی افت فشار نسبتاً بیشتری وجود دارد ولی در



شکل ۱۰. توزیع فشار در امتداد جریان برای حالت  $Ha = 520$ ,  $(FCI=2mm, Gap=1mm)$   
Fig. 10. Pressure distribution along the flow for  $Ha=520$ ,  $(FCI=2mm, Gap=1mm)$





شکل ۱۱. اثر تغییر ضخامت کانال‌های عبور جریان و فاصله شکاف بر نسبت افت فشار،  $Ha = 520$

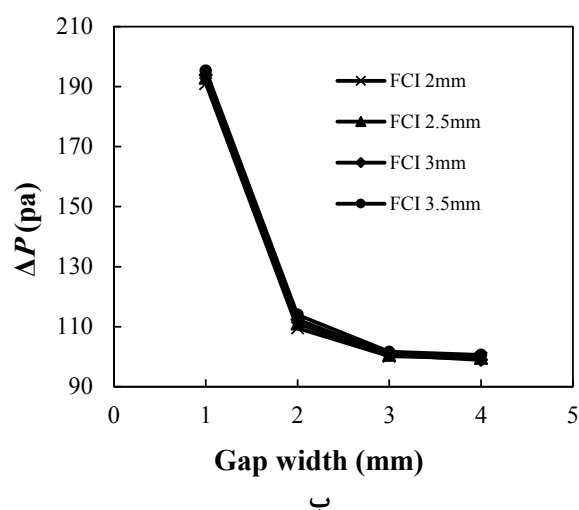
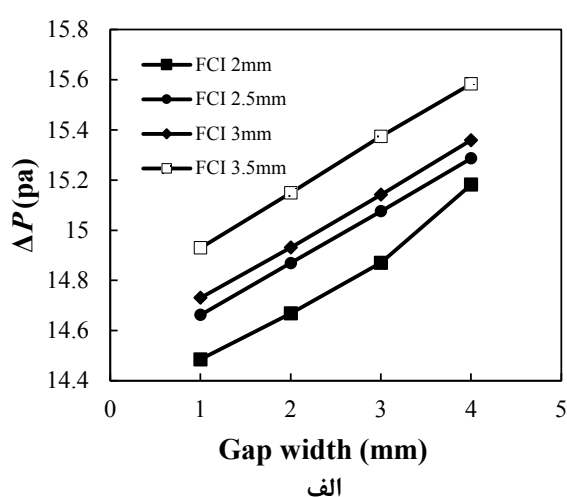
Fig. 11. Effect of the FCI thickness and the gap width on the MHD pressure drop factor (R),  $Ha=520$

۳ برابر نسبت به حالت بدون کانال‌های عبور جریان کاهش می‌یابد. در شکل ۱۲ افت فشار در جریان اصلی و شکاف هارتمن با تغییر ضخامت و فاصله گپ نشان داده شده است. این اختلاف فشار بین ورودی و خروجی کانال مورد نظر است. همان‌گونه که در شکل ۱۲ (الف) مشخص است کانال‌های عبور جریان ضخیم‌تر و شکاف عریض‌تر منجر به افت فشار بیشتری در جریان اصلی می‌شود و برای همان مقدار شکاف و با کاهش ضخامت کانال‌های عبور جریان افت فشار کاهش می‌یابد.

و گپ ۱ میلی‌متر به ماکزیمم حالت خود می‌رسد و بر عکس آن در

$$R = \frac{\left(\frac{dP}{dz}\right)_{No-FCI}}{\left(\frac{dP}{dz}\right)_{FCI}} \quad (12)$$

حالت ضخامت  $3/5$  میلی‌متر و گپ ۴ میلی‌متر به کمترین مقدار خود می‌رسد. البته در این حالت افت فشار تفاوت کوچکی دارند ولی نکته قابل توجه این است که در هر ۱۶ حالت مقدار افت فشار حدود



شکل ۱۲. تاثیر ضخامت کانال‌های عبور جریان و فاصله شکاف بر (الف) افت فشار در جریان اصلی،  $Ha = 520$  (ب) ماکزیمم افت فشار در شکاف،  $Ha = 520$

Fig. 12. Effect of the FCI thickness and gap width on the (a) Pressure drop in the bulk flow with  $Ha=520$ , (b) Max pressure drop in the gap with  $Ha=520$

افزایش نیروی لورنتز می‌شود و در نتیجه سرعت‌های بالاتری به وجود می‌آید (۲ جت کناری شکل ۱۳). می‌توان علت را در این دانست که به علت قانون پایستگی بار، خطوط جریان الکتریکی در مقطع کانال به صورت بسته می‌باشند. حرکت خطوط میدان از سمت دیواره کناری آغاز شده و سپس در راستای دیوار هارتمن حرکت خود را به سمت دیوار مقابل دیوار کناری ادامه می‌دهد، در نتیجه نیروی لورنتز در نزدیکی دیواره‌های کناری به شدت کاهش می‌یابد و به همین دلیل کاهش قدرت جت‌های سرعت در نزدیک دیواره‌های کناری مشاهده می‌شود. کاهش افت فشار با کاهش هدایت الکتریکی کانال‌های عبور جریان کاملاً مشهود است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود با کاهش هدایت الکتریکی از ۵۰۰ به ۵ اهم، افت فشار حدود ۳۵ درصد کاهش می‌یابد (شکل ۱۴).

#### ۶- نتیجه‌گیری

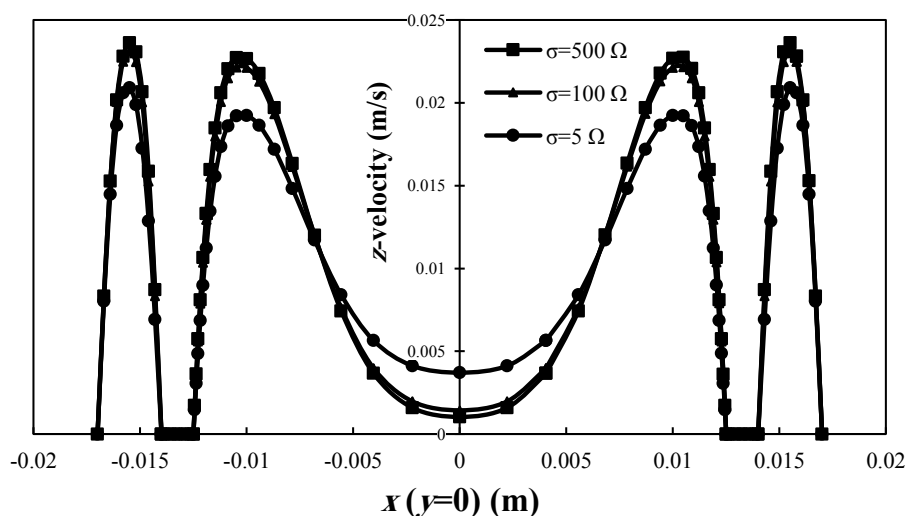
با استفاده از شبیه‌سازی عددی صورت گرفته بر روی جریان فلز مایع، داخل بلنکت دوتایی و اثر رفتار مگنتوهیدرودینامیک بر روی آن می‌توان نتایج زیر را استخراج نمود:

\* حضور میدان مغناطیسی باعث پدید آوردن نیرویی خلاف جهت جریان به نام نیروی لورنتز در کانال می‌گردد که منجر به تشکیل پروفیل سرعت به صورت شکل M می‌گردد و باعث افزایش شدید گرادین سرعت در دیواره‌های کناری می‌شود. همچنین مشاهده گردید که با افزایش شدت میدان مغناطیسی افت فشار افزایش می‌یابد.

می‌توان علت این امر این است که در مقطعی که جریان سیال کمتر است، چگالی جریان الکتریکی و نیروی لورنتز بیشتر شده که باعث افت فشار بیشتری می‌گردد. در واقع علت افزایش افت فشار در ناحیه شکاف هم به همین صورت می‌باشد. شکل ۱۲ (ب) نیز نشان می‌دهد شکاف عرضی‌تر افت فشار را در ناحیه شکاف کاهش می‌دهد در حالی که تغییر ضخامت تاثیر چندانی بر افت فشار با عرض شکاف برابر، در ناحیه شکاف ندارد. با مقایسه افت فشارها در این دو ناحیه می‌توان به این نتیجه رسید که از افت فشار در ناحیه سیال اصلی در مقام مقایسه با ناحیه شکاف می‌توان صرف‌نظر نمود. در نهایت بررسی تغییر ضخامت و فاصله شکاف در افت فشار، این موضوع روشن می‌گردد که با عرض شکاف بیشتر افت فشار و به طبع آن توان پمپاژ کاهش می‌یابد.

#### ۵-۲-۳- اثر تغییر هدایت الکتریکی کانال‌های عبور جریان

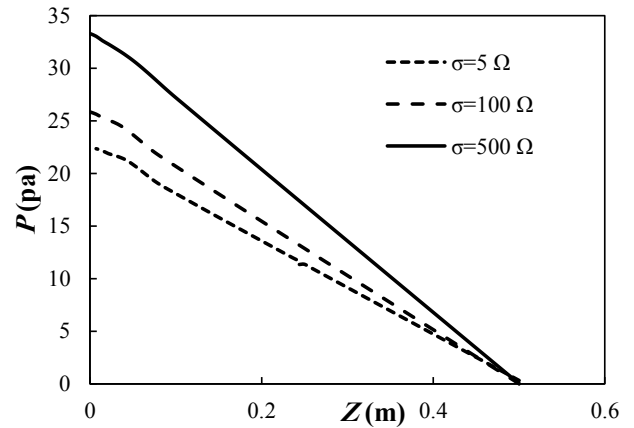
جریان القاشده در تعامل با میدان مغناطیسی نیروی لورنتز را ایجاد می‌کند که این نیرو در نهایت منجر به تشکیل پروفیل سرعت به صورت شکل ام می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۳ مشخص است، با کاهش  $\sigma$ ، جت سرعت در دیواره‌های کناری به شدت کاهش می‌یابد ولی با این حال در  $\sigma = 5 \Omega$  این جت‌های سرعت از بین نمی‌رود و این نشان می‌دهد که دیواره عایق کامل نمی‌باشد. سرعت در دو بخش شکاف متفاوت است. در شکاف هارتمن جریان تقریباً راکد است ولی در شکاف دیواره کناری جریان الکتریکی با میدان مغناطیسی باعث



شکل ۱۳. اثر تغییر هدایت الکتریکی کانال‌های عبور جریان بر پروفیل سرعت در خروجی ( $y=0$ )

Fig. 13. The effect of changing in the electrical conductivity of FCI on the outlet velocity profile ( $y=0$ )

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
	علامت (یونانی) نشانه
$\mu$ (kg/s.m)	لزجت دینامیکی سیال
(H/m) $\mu$	تراوایی مغناطیسی
$\nu$ (m <sup>2</sup> / s)	لزجت سینماتیکی سیال
$\rho$ (kg/m)	چگالی
$\sigma$ (s/m)	هدایت الکتریکی سیال
$\phi$	پتانسیل الکتریکی



شکل ۱۴. اثر تغییر هدایت الکتریکی کانال‌های عبور جریان بر توزیع فشار در امتداد جریان

Fig. 14. The effect of changing in the electrical conductivity of FCI on pressure distribution along the flow

می‌توان بیان داشت که افزایش شدت میدان مغناطیسی از ۰/۴ تا ۱ تسلا، افزایش ۴ برابری افت فشار را در پی دارد.

\* کانال‌های عبور جریان ضخیم‌تر و شکاف عریض‌تر، افت فشار بیشتری را در جریان اصلی تولید می‌کند و با همان مقدار شکاف و کاهش ضخامت کانال‌های عبور جریان افت فشار نیز کاهش می‌یابد. شکاف عریض‌تر باعث افت فشار در ناحیه شکاف می‌گردد ولی تغییر ضخامت تاثیر چندانی بر افت فشار با عرض شکاف برابر، در ناحیه شکاف ندارد. با مقایسه افت فشارها می‌توان گفت که از افت فشار در ناحیه سیال اصلی در مقام مقایسه با ناحیه شکاف می‌توان از آن صرف‌نظر نمود.

\* با کاهش هدایت الکتریکی از ۵۰۰ به ۵ اهم، افت فشار حدود ۳۵ درصد کاهش می‌یابد. این موضوع را می‌توان ناشی از کاهش نیروی لورنتز در نزدیکی دیواره‌های کناری و همچنین کاهش قدرت جت‌های سرعت در نزدیک دیواره‌های کناری دانست.

#### فهرست علائم

علامت (لاتین) نشانه

$\bar{B}$  (Kg / s<sup>2</sup>.A) چگالی شار مغناطیسی

$\bar{J}$  (c / s) چگالی جریان الکتریکی

Ha عدد هارتمن

Re<sub>m</sub> رینولدز مغناطیسی

R نسبت افت فشار

- 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, *Magnetohydrodynamics*, 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. I.R. Kirillov, C.B. Reed, L. Barleon, K. Miyazaki, Present understanding of MHD and heat transfer phenomena for liquid metal blankets, *Fusion Engineering and Design*, 27 (1995) 553-569.
  5. K. Starke, L. Bühler, 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.
  6. S. Malang, M. Tillack, C. Wong, N. Morley, S. Smolentsev, Development of the lead lithium (DCLL) blanket concept, *Fusion Science and Technology*, 60(1) (2011) 249-256.
  7. F.C. Li, D. Sutevski, S. Smolentsev, M. Abdou,

- by Flow Channel Inserts based on a SiC-sandwich material concept, *Fusion Engineering and Design*, 151 (2020) 111381.
13. S.I. Sidorenko, A.Y. Shishko, Variational method of calculation of MHD flows in channels with large aspect ratios and conducting walls, *Magnetohydrodynamics*, 27(4) (1991) 437-445.
  14. 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.
  15. S.J. Xu, M. J. Ni, Direct simulation of MHD flows in dual-coolant liquid metal fusion blanket using a consistent and conservative scheme, *Theoretical and Applied Mechanics Letters* 1.1 (2011) 012006.
  16. 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.
  - 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.
  8. L. Bühler, C. Mistrangelo, J. Konys, R. Bhattacharyay, Q. Huang, D. Obukhov, S. Smolentsev, M. Utili, Facilities, testing program and modeling needs for studying liquid metal magnetohydrodynamic flows in fusion blankets, *Fusion Engineering and Design*, 100 (2015) 55-64.
  9. I. Fernández-Berqueruelo, 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.
  10. L. Bühler, C. Mistrangelo, Pressure drop and velocity changes in MHD pipe flows due to a local interruption of the insulation, *Fusion Engineering and Design*, 127 (2018) 185-191.
  11. 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.
  12. C. Soto, S. Smolentsev, C. García-Rosales, Mitigation of MHD phenomena in DCLL blankets

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

H. Sanaei, F. Sarhaddi, S. Farahat, S. M. Javadi, *Numerical study and investigation of the Effect of Magnetic Field on Fluid Hydrodynamic behavior*, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 53(5)(2021) 2857-2868.  
DOI: [10.22060/mej.2020.17736.6657](https://doi.org/10.22060/mej.2020.17736.6657)

