

## افزایش عملکرد حرارتی در مبدل حرارتی پیل سوختی پلیمری به کمک جابجایی آشوبناک

پیام رحیم مشائی<sup>۱</sup>، سید مصطفی حسینعلی پور<sup>۲</sup>، کاظم اسماعیل پور<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناس ارشد، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مکانیک، آزمایشگاه CAE&CFD، P\_R\_mashai@mecheng.iust.ac.ir

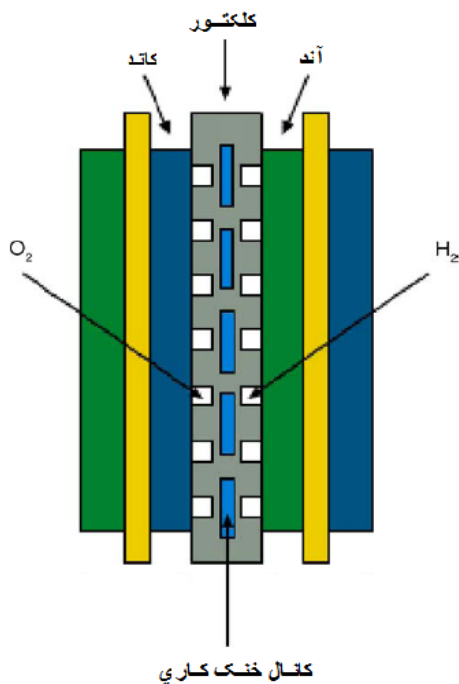
<sup>۲</sup> دانشیار، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مکانیک، آزمایشگاه CAE&CFD، Alipour@iust.ac.ir

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری، دانشگاه علم و صنعت، دانشکده مکانیک، آزمایشگاه CAE&CFD، kazem.esmailpour@gmail.com

ایجاد جابجایی آشوبناک با استفاده از اغتشاشات هندسی به منظور افزایش اختلاط و انتقال حرارت نظر محققین زیادی را به خود جلب

### چکیده

محدودیت منابع فسیلی و تاثیرات مخرب آن بر محیط زیست، متخصصان انرژی و محیط زیست را مجبور به استفاده از سیستم های انرژی نو کرده است. توسعه فن آوری پیل سوختی پلیمری به عنوان یک فن آوری مطلوب جهت تولید انرژی، یکی از راه کار های مناسب به منظور برون رفت از مشکلات به وجود آمده می باشد؛ چرا که علاوه بر تجدید پذیری هیدروژن (به عنوان سوخت) باعث آلودگی محیط زیست نیز نمی شود. یکی از عوامل موثر بر عملکرد پیل سوختی پلیمری یکنواختی دمایی می باشد. از یک طرف باید دمایی مناسب برای واکنش الکتروشیمیایی فراهم شود و از طرف دیگر دما نباید به اندازه ای بالا رود که منجر به آسیب رساندن به قسمت های مختلف پیل سوختی شود بنابراین نیاز به ساختار های جدید برداشت حرارت در این پیل ها همواره توجه محققین مکانیک سیالات را به خود جلب نموده است. در این مطالعه نوع جدیدی از کانال آشوبناک به منظور خنک کاری پیل سوختی پیشنهاد شده است. ابتدا با رد گیری دو ذره مجاور هم وجود جریان آشوبناک در کانال مورد مطالعه اثبات گردید. نتایج بدست آمده نشان دادند که انتقال حرارت کانال آشوبناک حدود ۳/۵ برابر کانال ساده می باشد، اگرچه افت فشار نیز ۲/۵ برابر افزایش می یابد.



شکل ۱: شماتیک ساده از پیل سوختی پلیمری [۱].

کرده است. جابجایی آشوبناک به این معنا است که ذرات سیال منطبق بر خط جریان نمی باشند [۲]. حسینعلی پور و همکارانش [۳] با رد گیری ذرات و محاسبه نمایی لیپانف وجود اختلاط آشوبناک را در یک کانال با ساختار کارتن تخم مرغ نشان دادند. عدد رینولدز جریان مورد مطالعه آن ها بین ۹۰۰-۱۰۰ بود. آن ها همچنین به بررسی و مقایسه انتقال حرارت کانال آشوبناک با کانال ساده پرداختند و نشان دادند کانال آشوبناک باعث افزایش ۷/۵-۲/۵ برابر در عدد ناسلت می شود. آرچاریا و همکارانش [۴] اختلاط آشوبناک را در یک کویل اصلاح شده مورد بررسی قرار دادند و مقایسه هایی را با یک کویل ساده انجام دادند. آن ها نشان دادند که اختلاط آشوبناک باعث افزایش ۶-۸٪ ضریب انتقال حرارت می شود اگرچه افت

### واژه های کلیدی

پیل سوختی پلیمری-جابجایی آشوبناک-انتقال حرارت-افت

فشار.

### مقدمه

یکی از نکات مهم در طراحی پیل های سوختی پلیمری، استفاده از سیستم های سرمایشی با بازدهی بالا می باشد. علاوه بر این به منظور دستیابی به فرآیند الکتروشیمیایی مناسب باید میدان دما در پیل یکنواخت و در محدوده ۹۰-۸۰ درجه سانتیگراد باشد. پیل های سوختی به اندازه توان الکتریکی، انرژی حرارتی تولید می کنند [۱]، که باید از سیستم تخلیه گردد. یکی از راه های ساده خنک کاری، استفاده از کانال های ساده و موازی می باشد. شکل ۱ نحوه استقرار کانال های خنک کاری را در پیل سوختی نشان می دهد. نظریه

$$\text{div}(\rho V \cdot V) = -\nabla P + \mu \nabla^2 V \quad (2)$$

بقای انرژی:

$$\text{div}(\rho V T) = \frac{k}{c_p} \text{div}(\text{grad} T) \quad (3)$$

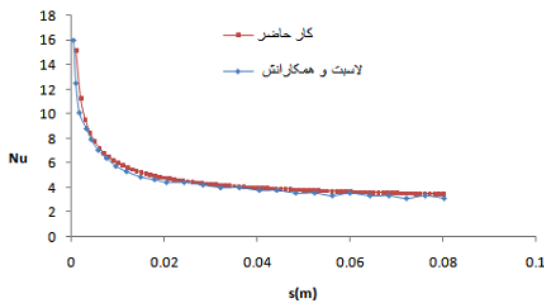
که  $T, P, V$  به ترتیب سرعت، فشار و دمای سیال می باشد. همچنین  $\rho, \mu, k$  و  $c_p$  به ترتیب چگالی، لزجت دینامیکی، گرمای ویژه و ضریب رسانندگی گرمایی سیال می باشند.

### روش حل

برای سیال ورودی شرط پروفیل سرعت یکنواخت اعمال شده است. دمای  $300\text{K}$  برای سیال ورودی در نظر گرفته شده است. پیل های سوختی پلیمری کنونی شاری حدود  $5000\text{ w/m}^2$  تولید می کنند [۱]. ولی با توجه به پیش بینی افزایش تولید توان الکتریکی، از شار حرارتی  $10000\text{ w/m}^2$  در مطالعه حاضر استفاده شده است. قابل ذکر است که شرایط مرزی برای هر دو هندسه یکسان می باشد. معادلات بقا و شرایط مرزی ذکر شده در قسمت های قبل با فرضیات جریان آرام و عدد رینولدز  $250$  با استفاده از نرم افزار المان محدود انسیس نگارش  $5/4$  حل گردید.

### اعتبار سنجی حل عددی

برای اعتبار سنجی حل عددی عدد ناسلت موضعی برای کانال مستقیم محاسبه گردید و با نتایج مطالعه لاسبت (۴) و همکارانش مقایسه شد. همانطور که شکل ۴ نشان می دهد نتایج کار حاضر مطابقت خوبی با نتایج بدست آمده از کار لاسبت و همکارانش دارد.



شکل ۴: اعتبار سنجی حل عددی

### نتایج

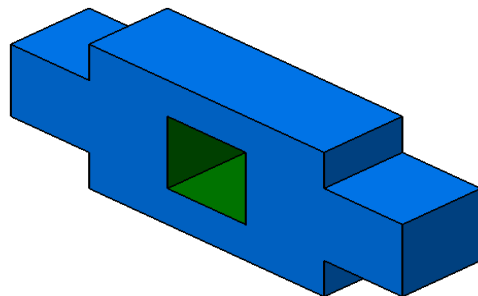
آشوب در جریان یکی از مشخصه های جریان آشوبناک حساسیت به شرایط اولیه می باشد [۶]: بدین معنی که دو ذره مجاور هم مسیر های متفاوتی را طی می کنند. به منظور رد گیری ذرات به صورت لاکرانژی، موقعیت ذره با گذشت زمان با انتگرال گیری از روابط ۴ مشخص می شود. انتگرال گیری با نوشتن کد در انسیس و استفاده از روش رانگ کوتا انجام شده است.

فشارنیز  $2/5-1/5$  افزایش می یابد. یاماگیشی و همکارانش [۵] اختلاط و انتقال حرارتی را در یک هندسه آشوبناک مورد مطالعه قرار دادند. هندسه آشوبناک مورد مطالعه آن ها از خم های  $90$  درجه تشکیل شده بود که جریان بار ها تغییر مسیر می داد.

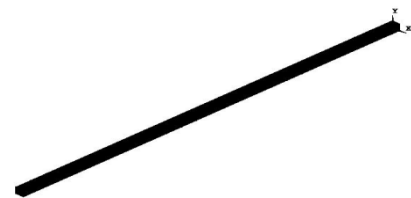
هدف این مقاله ارزیابی کیفی افزایش اختلاط در مکانیزم آشوبناک نسبت به اختلاط در مکانیزم غیر آشوبناک و اثر آن بر انتقال حرارت، در دو هندسه متفاوت برای پیل سوختی پلیمری می باشد.

### هندسه های مورد مطالعه و معادلات حاکم

برای بررسی مکانیزم آشوبناک بر انتقال حرارت از هندسه ای استفاده گردید که جریان توسط موانع مربعی ایجاد شده در آن وجود جریان های چرخشی، بار ها از مسیر مستقیم منحرف می گردد. به جای در نظر گرفتن کل مبدل حرارتی با تمام کانال های خنک کننده آن، عملکرد حرارتی یک تک کانال بررسی شده است. سطح مقطع ورودی کانال آشوبناک مربعی با ضلع  $1\text{ mm}$  است. طول تا نشده یک پرپوداز کانال آشوبناک  $5/5\text{ mm}$  می باشد. موانع مربعی شکل در جهت طول به صورت پرپودیک تکرار می شود. یک پرپود از هندسه آشوبناک در شکل ۲ نشان داده شده است. کانال آشوبناک مورد مطالعه از  $14$  پرپود تشکیل شده است. کانال ساده نیز با طول و قطر هیدرولیکی مشابه کانال آشوبناک در شکل ۳ نمایش داده شده است.



شکل ۲: یک پرپود از کانال آشوبناک مورد مطالعه



شکل ۳: کانال ساده مورد مطالعه.

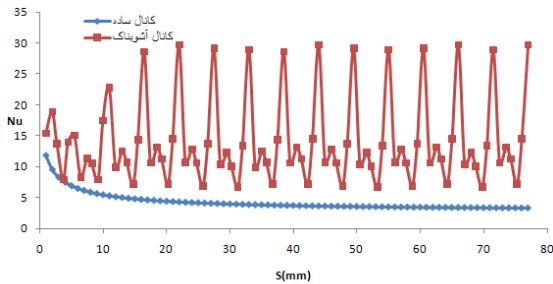
سه معادله اساسی حاکم بر جریان لزج عبارتند از:

بقای جرم:

$$\text{div}(V) = 0 \quad (1)$$

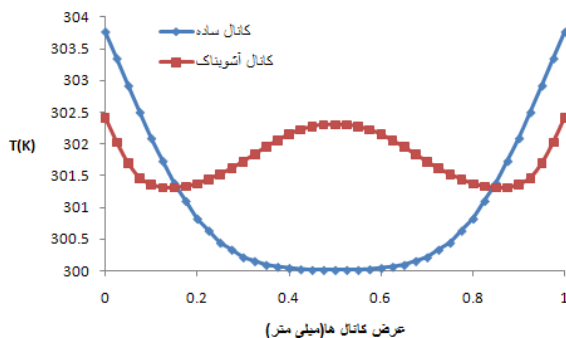
بقای مومنتوم:

هیدرولیکی در هر مقطع و  $q''$  شار حرارتی ثابت است. در شکل ۷ تغییرات عدد ناسلت با مختصات منحنی الخط برای کانال ها رسم شده است.



شکل ۷: تغییرات عدد ناسلت در امتداد کانال ها.

برای کانال مستقیم، یک کاهش به صورت توانی در عدد ناسلت مشاهده می شود که دارای مقدار مجانب ۳ و میانگین حدوداً ۴ می باشد. در هندسه آشوبناک بعد از دو پرپود که توسعه یافتگی جریانی و گرمایی حاصل می گردد، عدد نوسلت حول یک مقدار میانگین ۱۴ مشاهده می شود. وجود آشوب در جریان باعث می گردد ذرات سیال از هم فاصله گرفته و این جدایی ذرات سیال باعث کشیدگی و تاشدگی متوالی المان های سیال می شود. در نتیجه این امر اختلاط بهبود می یابد؛ ذرات سردتر از مرکز کانال به نواحی گرمتر دیواره (و برعکس) منتقل می شوند و انتقال حرارت افزایش می یابد. از طرفی وجود نواحی برخوردی باعث نفوذ دو جریان سیال در هم می شود که انتقال حرارت را به طور محسوسی بالا می برد. حداکثر عدد نوسلت نیز مربوط به این نواحی است که در شکل ۷ به خوبی قابل تشخیص می باشد. پروفیل دما برای هر دو کانال در فاصله ۲۷ mm از مقطع ورودی در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود پروفیل دما در هر دو جهت افقی و قائم در کانال آشوبناک نسبت به هندسه دیگر یکنواخت تر است.



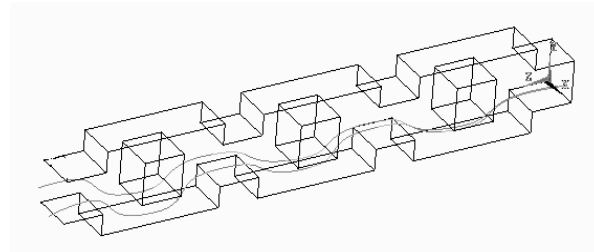
شکل ۸: پروفیل دما در ۲۷ میلی متر از مقطع ورودی برای هر دو هندسه جریان (در جهت عمودی).

$$u = \frac{dx}{dt} \Rightarrow x = x_0 + \int_{t_0}^t u dt$$

$$v = \frac{dy}{dt} \Rightarrow y = y_0 + \int_{t_0}^t v dt \quad (4)$$

$$w = \frac{dz}{dt} \Rightarrow z = z_0 + \int_{t_0}^t w dt$$

در روابط فوق  $u, v, w$  سرعت سیال در جهت های  $x, y, z$  می باشد. رد گیری دو ذره مجاور هم در کانال آشوبناک (برای ۳ تناوب) و در کانال ساده به ترتیب در شکل های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵: حساسیت به شرایط اولیه در کانال آشوبناک



شکل ۶: عدم حساسیت به شرایط اولیه در کانال ساده (نمای روبرو)

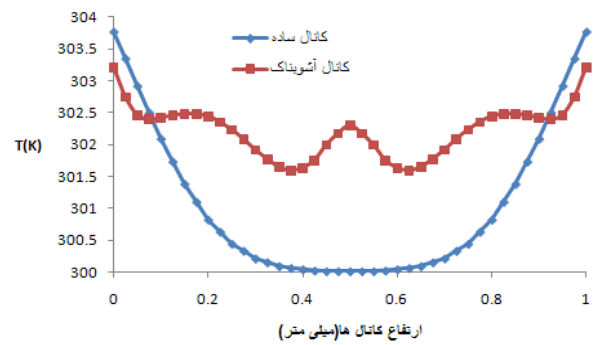
انتگرالگیری با فاصله زمانی  $10^{-4}$  s انجام شد. این مقدار با توجه به حداکثر سرعت جریان در نظر گرفته شده است. در کانال مستقیم، جریان تا انتهای جریان با مانعی برخورد نکرده و تغییر مسیر نمی دهد. در حالی که در کانال آشوبناک مسیر جریان در یک راستا نبوده و جریان ورودی تا انتهای کانال با موانع متعددی برخورد کرده و تغییر مسیر می دهد. این امر موجب می شود تا در کانال آشوبناک، جریان حساس به شرایط اولیه شده و ذرات با شرایط اولیه نزدیک به هم به علت وجود اغتشاشات هندسی، مسیر های متفاوتی را طی کنند.

انتقال حرارت: به منظور بررسی عملکرد حرارتی کانال ها از پارامتر بی بعد عدد ناسلت استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$Nu = \frac{q'' D_h}{(T_m - T_w) k} \quad (5)$$

که  $T_m$  دمای بالک سیال در سرتاسر سطح مقطع کانال است.  $T_w$  دمای دیواره کانال و  $k$  ضریب رسانندگی گرمایی سیال (در اینجا آب) می باشد که برابر  $0.16$  می باشد. همچنین  $D_h$  قطر

برخورد به موانع مسیر های متفاوتی را طی می کنند، با عبور از موانع به هم برخورد می کند که این ناحیه برخوردی نیز باعث بهبود انتقال حرارت می گردد. هندسه آشوبناک به دلایل ذکر شده ۳/۵ برابر انتقال حرارت را افزایش می دهد که علی رغم افزایش افت فشار ۲/۵ برابری، می توان از آن به عنوان جایگزین مناسب کانال های ساده در خنک کاری پیل های سوختی استفاده کرد. در مطالعات آینده تاثیرات هندسی کانال آشوبناک و اعداد رینولدز بر انتقال حرارت و افت فشار مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

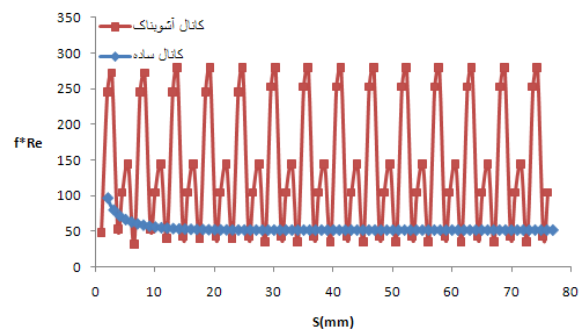


شکل ۹: پروفیل دما در ۲۷ میلی متر از مقطع ورودی برای هر دو هندسه جریان (در جهت افقی).

افت فشار: برای محاسبه افت فشار می توان افت فشار را به صورت ترمی از ضریب اصطکاک به صورت زیر بیان کرد:

$$f = -\left(\frac{dP}{ds}\right) \frac{D_h}{1/2 \rho U_m^2} \quad (6)$$

که  $\frac{dP}{ds}$  گرادیان فشار محلی در طول مختصات منحنی الخط جریان است. با توجه به اینکه این پارامتر به رینولدز وابسته است اغلب ترجیح داده می شود  $f \times Re$  محاسبه گردد. شکل ۱۰ تغییرات  $f \times Re$  را بر حسب مختصات منحنی جریان نشان می دهد. وجود مانع در کانال آشوبناک باعث شده است که مقدار متوسط افت فشار در این هندسه حدود ۲/۵ برابر کانال مستقیم باشد که این امر ناشی از برخورد جریان به موانع مربعی و تغییر مسیرهای مداوم آن می باشد.



شکل ۱۰: تغییرات پارامتر  $f \times Re$  در امتداد کانال ها.

### جمع بندی و کار های آینده

در این مقاله عملکرد دو هندسه با کاربرد سرمایه‌ی در پیل های سوختی پلیمری مورد بررسی قرار گرفت. در هندسه آشوبناک ذرات به موانعی برخورد می کنند و تحت تاثیر جریان های چرخشی قرار می گیرند. این امر باعث می شود که ذرات گرمتر کنار دیواره به مرکز جریان و برعکس جابجا شوند. این عامل سبب می گردد اختلاط و در نتیجه انتقال حرارت بهبود یابد. از طرف دیگر جریان سیال که بعد از

### مراجع

- [1] Lasbet.Y ,Auvity.B and Peerhossaini.H,2006, , "A chaotic heat exchanger for PEMFC cooling applications." Journal of Power source, 156(1), pp 114-118.
- [2] Palomares.B , Guerrero.A ,Mendez.A and Tolentino.F, 2009, "An experimental analysis of the flow pattern in heat exchangers with an egg carton configuration", International Journal Heat and Fluid Flow 30, 58-171.
- [3] Hosseinalipour S.M., Mashaei P.R. and Taheri. P., 2010, "Improvement of mixing and heatTransfer characteristic of laminar flows by corrugated plates with an egg carton configuration", 2th Fluid Dynamics Conference, Shiraz University.
- [4] Acharya N., Sen M.,and Chang H.,2001, "Anaysis of heat transfer enhancement in coiled tube heat exchanger." Internatinal Journal of Heat and mass Transfer, 44(Noveber), pp 3189-3199.
- [5] Yamagashi , A., Inaba T., and Yamagushi Y.,2007, "Chaotic analysis of mixing enhancement in steady laminar flows through multiple pipe bends." Internatinal Journal of Heat and mass Transfer, 50, pp 1238-1247.
- [6] Hilborn R., " Chaos and Nonlinear Dynamics ; An Introduction for Scientists and Engineers.", Cambridge University Press, 2001.