

# تحلیل جریان سیال غیر نیوتنی در مبدل‌های قاب و صفحه‌ای به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

پژوهش‌نفت

سال هجدهم  
شماره ۵۸  
صفحه ۵۴-۴۷، ۱۳۸۷

محمد رضا جعفری نصر<sup>۱</sup> و فرناز متوسلی<sup>۲\*</sup>

۱- شرکت پژوهش و فناوری پتروشیمی

۲- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

farnazmote@yahoo.it

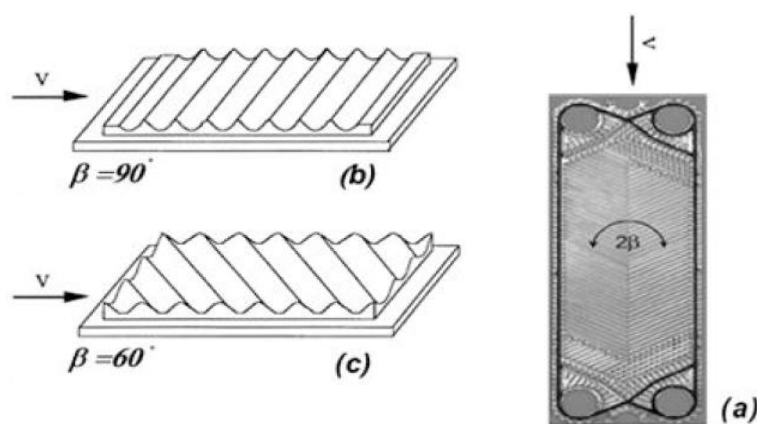
## مقدمه

مبدل‌های گرمایی چند جریانی از نوع قاب و صفحه‌ای (PHE)، به علت ویژگی‌های خاص خود همچون تمیز شدن راحت و تطبیق پذیری مواد سازنده‌شان، اهمیت خاصی دارند. به علت کارایی گرمایی بالا و حجم و وزن کم، امروزه به این نوع مبدل توجه خاصی می‌شود. آنها مواقعی که به حجم و وزن کم و یا کارایی گرمایی بالا نیاز باشد به کار می‌روند. از این مبدل‌ها در سامانه‌های تهویه مطبوع (به جای چگالنده‌ها و تبخیر کننده)، صنایع سلولزی، دارویی، غذایی، پلیمری، شیمیایی، اتومبیل سازی و هوافضا که به لوازمی کم حجم و کارایی بالا نیاز است، استفاده می‌شود. مهمترین کاربرد مبدل‌های حرارتی انتقال حرارت مایع-مایع در جریان آشفته است. صفحات موج‌دار مبدل‌های صفحه‌ای موجب ایجاد آشفتگی در رینولدزهای پایین می‌شوند و این آشفتگی باعث افزایش انتقال حرارت و انتقال جرم محلی می‌شود. الگوهای شیارهای روی صفحه مبدل‌های صفحه‌ای بسیار متنوع‌اند و با کنترل نزدیک و دقیق دما سبب افزایش و بهبود انتقال حرارت می‌شوند. این برای سیالاتی مانند مواد غذایی و امولسیون‌های پلیمری که در برابر تغییرات حرارتی حساس هستند بسیار مفید است [۱].

## چکیده

امروزه مبدل‌های صفحه‌ای برای گرم و سرد کردن جریان‌های مختلف کاربرد زیادی در صنایع شیمیایی، غذایی و دارویی دارند. چون بسیاری از سیالات استفاده شده در این صنایع خواص رئولوژیکی غیر نیوتنی دارند، در این تحقیق به کمک دینامیک سیالات محاسباتی یا CFD دو بعدی، رفتار جریان محلول کربوکسی متیل سلولز (CMC) در غلظت‌های وزنی ۰/۵ تا ۲ درصد، به عنوان سیال غیر نیوتنی پاورلا در محدوده رینولدز ۱۰ تا ۳۰۰ و دمای ثابت (۲۰ درجه سانتیگراد)، در زوایای مختلف شورون مبدل‌های صفحه‌ای تحلیل شده است. برای ایجاد هندسه و شبکه‌بندی، حل معادلات حاکم با روش حجم محدود و تحلیل دینامیکی نتایج به ترتیب از نرم‌افزارهای FLUENT، Gambit و Techplot استفاده شده است. در نهایت روابط عدد رینولدز و ضریب اصطکاک تعیین و تأثیر زاویه شورون و پارامترهای رئولوژیکی بر ضریب اصطکاک و رژیم جریان بررسی شده است. نتایج حاصل از محاسبات CFD با اطلاعات تجربی مقایسه و همخوانی خوبی بین آنها دیده شد.

واژه‌های کلیدی: مبدل‌های قاب و صفحه‌ای، سیال پاورلا، ضریب اصطکاک، CFD<sup>۱</sup>



شکل ۱- هندسه کانال جریان: (a) یک صفحه متداول شورون با موجهای سینوسی، (b) و (c) مشخصات ظاهری کانال در دو زاویه ۶۰ و ۹۰ درجه

$\sigma$  تنش برشی (Pa)،  $K$  ضریب پایداری ( $\text{Pa s}^n$ )،  $\gamma$  تنش برشی ( $\text{s}^{-1}$ ) و  $n$  شاخص رفتار جریان است. در مبدل‌های صفحه‌ای، نواحی جریان چرخشی نقاط ضعف در برابر رسوب هستند: هر قدر زمان اقامت اجزای سیال طولانی‌تر شود، حرارت آن بالاتر می‌رود و احتمال رسوب‌دهی بیشتر می‌شود. بنابراین با شناخت بیشتر مکانیزم جریان سیال می‌توان با برگزیدن جریان مناسب، در عین بالا بردن انتقال حرارت در سیال، تا حد امکان جلوی رسوب‌دهی را گرفت. از سوی دیگر، به مدل‌های ریاضی انتقال حرارت و افت فشار برای طراحی بهینه مبدل‌های صفحه‌ای نیاز است و این مدل‌ها به نوع سیال وابسته هستند. در کنار تخمین افت فشار، توسعه روابط ضریب اصطکاک فاینینگ در شرایط ایزوترم درون مبدل‌های صفحه‌ای می‌تواند در سایر زمینه‌ها نیز بسیار مفید باشد؛ از جمله پیش‌بینی توزیع نامتناسب جریان دهنه به کانال در این مبدل‌ها و توسعه روش‌هایی که تعیین منحنی ضریب اصطکاک را برای سیالات غیر نیوتنی در سایر سیستم‌ها و مجراها ممکن می‌کند [۵]. توجه محققان به رفتار جریان و همچنین انتقال حرارت و جرم درون کانال‌های صفحه‌ای موج‌دار در سال‌های گذشته جلب و تحقیقاتی در این زمینه انجام شده است [۱-۹]. هدف از این تحقیق بررسی تأثیر زاویه شورون و پارامترهای رئولوژیکی سیال پاورلا بر رژیم جریان و ضریب اصطکاک فاینینگ در شرایط ایزوترم است.

متداولترین الگوی شیار مبدل‌های صفحه‌ای الگوی جناقی یا شورون<sup>۱</sup> با پروفایل سینوسی است (شکل ۱). محدوده زاویه شورون ( $\beta$ ) می‌تواند از ۰ تا ۹۰ درجه متغیر باشد اما عموماً مقدار آن ۲۵ الی ۶۰ درجه است [۲]. معمولاً، انتقال حرارت بین سطح و سیال مجاور آن را می‌توان با مقدار انتقال حرارت محلی مشخص کرد. مقدار انتقال حرارت محلی نیز خود به رژیم جریان (آرام، گذرا و آشفته) و ساختار دینامیکی میدان جریان در نزدیکی نقطه مورد نظر بستگی دارد. علاوه بر این عوامل، وجود نواحی چرخشی نیز انتقال حرارت و جرم را کنترل می‌کند. نواحی چرخشی هم به شکل سطح انتقال حرارت و مقادیر رئولوژیکی سیال وابسته هستند [۳]. گذر جریان از آرام به آشفته یکی از مهمترین مباحثی است که در مکانیک سیالات، هم سیالات نیوتنی و هم سیالات غیرنیوتنی، بررسی شده است. بر اساس مطالعات تئوری، حداقل برای سیال نیوتنی، به نظر می‌رسد که گذر از جریان آرام به آشفته ناشی از مکانیزم ناپایداری‌های غیرخطی مرتبط با پیش-آشفته‌گی‌های کوچک باشد. اما وضعیت سیالات غیرنیوتنی پیچیده‌تر و حساس‌تر و تعیین یک قالب ریاضی و تعمیم آن برای سایر حالات مشابه بسیار مشکل است [۴]. در سیالات غیرنیوتنی رابطه تنش برشی و مقدار کنش خطی نیست و مدل‌های مختلفی برای بیان رفتار آنها وجود دارند که یکی از متداولترین آنها مدل اسوالد دو وائل<sup>۲</sup> است که به مدل پاورلا<sup>۳</sup> هم معروف است:

$$\sigma = K (\dot{\gamma})^n \quad (1)$$

1. Chevron  
2. Ostwald-De Waele  
3. Power-Law

### شرح و بیان مسئله

#### خواص رئولوژیکی سیال فرایند

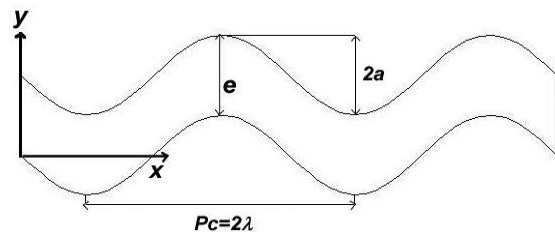
محلول آبی کربوکسی متیل سلولز (CMC) در غلظت‌های وزنی ۰/۵ تا ۲ درصد به عنوان سیال فرایند استفاده شده است. برزیات<sup>۱</sup> و دووین<sup>۲</sup> [۳] رفتار سودوپلاستیکی CMC را در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد با یک رئومتر مخروط و صفحه‌ای بررسی و مدل رئولوژیکی پاورلا را برای آن پیشنهاد کردند (معادله ۱). مقادیر ضریب پایداری  $K$  و شاخص رفتار جریان  $n$  این سیال در غلظت‌های مختلف در جدول ۱ نشان داده شده‌اند:

جدول ۱- خواص رئولوژیکی CMC در ۲۰°C [۴]

غلظت وزنی برحسب درصد	$n$	$K(Pa s^n)$	$\gamma (s^{-1})$
۰/۵	۰/۹	۰/۰۱۸۰	۲۰-۶۵۰
۱	۰/۸۴	۰/۰۸	۵۰-۶۰۰
۱/۵	۰/۷۷	۰/۳۸	۶۰-۵۵۰
۲	۰/۶۹	۱/۲۳	۷۰-۵۱۰

#### جزئیات مدل

درون یک کانال دو بعدی، شامل بخش‌های صفحه بالایی موجدار، صفحه پایینی موج‌دار و کانال موجی شکل، مدل‌سازی شده است (شکل ۲).



شکل ۲- اجزای هندسی کانال موج‌دار

کانال مطالعه شده در این تحقیق را قبلاً برزیات و دووین در آزمون‌های خود استفاده کرده بودند [۳]. جزئیات ابعاد کانال در جدول ۲ خلاصه شده‌اند. موج‌های کانال پروفایل سینوسی دارند که با رابطه زیر بیان می‌شوند:

$$y = a \left( \sin \frac{\pi x}{\lambda} \right) \quad (2)$$

نسبت عرض کانال به فاصله صفحات تقریباً ۲۶ است که تأثیر لبه‌های ورودی به جریان را به حداقل می‌رساند. نکته دیگر اینکه ابعاد کانال در واقع ۵ برابر ابعاد کانال

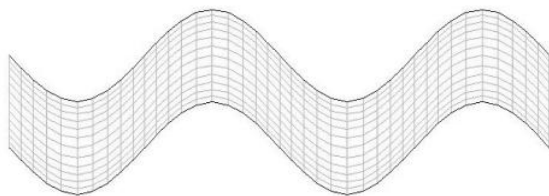
جدول ۲- مشخصات ابعاد کانال [۴]

۶۵ mm	Pc : Pitch of corrugation = 2λ
۲۰ mm	دامنه موج: 2a
۲۰ mm	فاصله بین صفحات: e
۵۲۳ mm	عرض کانال: w
۱۱	تعداد موجها: Nc
۲۵°-۹۰°	زاویه شورون: β
۳۳ mm	قطر هیدرویک: D <sub>h</sub>

در یک مبدل واقعی قاب و صفحه‌ای است. متوالی<sup>۳</sup> و مانگلیک<sup>۴</sup> [۱] پارامتری را به نام نسبت ظاهری تعریف کرده‌اند:

$$\gamma = \frac{4a}{\lambda} \quad (3)$$

مقدار نسبت ظاهری در هندسه مطالعه شده  $\gamma=1/23$  است. برای محاسبات و تولید هندسه و شبکه‌بندی دو طول موج از کل کانال از نرم‌افزار Gambit 2.0 استفاده شد. شبکه‌های ایجاد شده مستطیلی بودند و به نحوی توزیع شدند که بیشترین تراکم در نزدیکی دیواره‌ها باشد (شکل ۳).

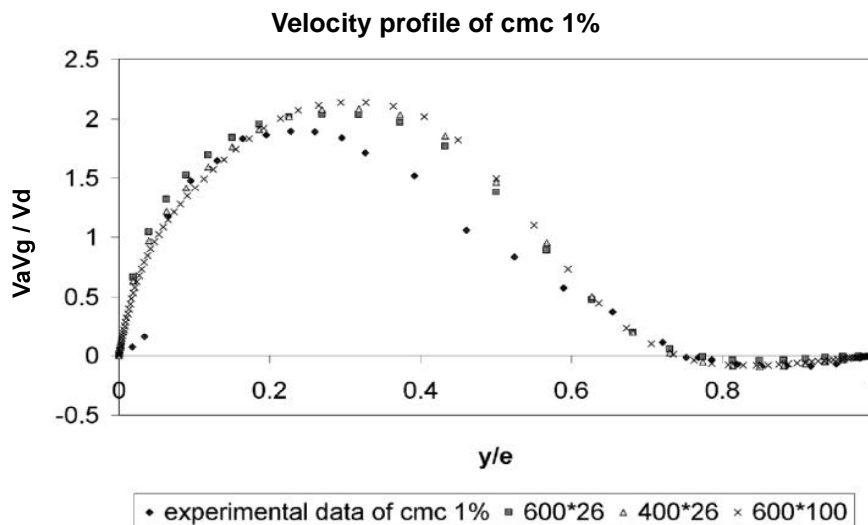


شکل ۳- تصویر شماتیک از شبکه‌بندی کانال

سرعت میانگین ورودی CMC به عنوان شرط مرزی ورودی در نظر گرفته شده و بر دیواره‌ها شرط عدم لغزش<sup>۵</sup> و دمای یکنواخت دیواره اعمال شد. جریان پایدار و نسبتاً آرام است. محدوده عدد رینولدز مطالعه شده ۱۰ الی ۳۰۰ و زاویه شورون ۲۵ تا ۹۰ است.

مسئله با روش عددی حجم محدود و در نرم افزار FLUENT 6.0.12 با یک کامپیوتر Pentium 4 با حافظه MB RAM 512، و تمام معادلات تا رسیدن به باقی‌مانده  $10^{-4}$ ، حل شدند. شبکه‌بندی کانال به صورت (X×Y) بیان و پس از انجام آزمون وابستگی شبکه مشخص شد که شبکه‌ای با (۴۰۰×۲۶) کمترین خطا را دارد و سریعتر به

1. Bereiziat
2. Devienne
3. Metwally
4. Manglik
5. No Slip



شکل ۴- آزمون وابستگی شبکه (XxY) در  $Re=141$  و زاویه شورون  $90^\circ$  درجه برای مقایسه شبکه‌ها و رسیدن به سریع‌ترین و دقیق‌ترین شبکه‌بندی

در این رابطه  $Re_g$  عدد رینولدز تعمیم یافته،  $\rho$  دانسیته سیال ( $kg/m^3$ ) و در هندسه مطالعه شده  $\xi=39$  و  $v=2$  است [۳].

پاسخ می‌رسد (شکل ۴). برای نتایج عددی با مقادیر تجربی از کار آزمایشگاهی برزیات و دووین استفاده شد [۳].

### تحلیل نتایج

#### رژیم جریان

عدد رینولدز بحرانی  $Re_g^{cr}$  مقداری است که در آن گذر از جریان آرام به متلاطم آغاز می‌شود. در مبدل‌های صفحه‌ای، وجود نواحی جریان چرخشی علت اصلی بروز زودهنگام گذر از جریان آرام به متلاطم در رینولدزهای پایین (پایین‌تر از  $200$ ) رخ می‌دهد [۶ و ۱]. مقدار رینولدز بحرانی با افزایش زاویه شورون افزایش می‌یابد. فرناندز<sup>۳</sup> و همکارانش برای سیال آب مقدار رینولدز بحرانی را، به ترتیب برای زوایای شورون  $30^\circ$  و  $65^\circ$  و  $10$  و  $50$  گزارش داده‌اند [۹]. شکل ۵ تغییرات  $Re_g^{cr}$  را در زوایای مختلف شورون و برای غلظت‌های مختلف CMC نشان می‌دهد.

با افزایش زاویه شورون، مقدار  $Re_g^{cr}$  نیز افزایش می‌یابد (شکل ۶). بین زوایای  $25^\circ$  و  $30^\circ$  مقدار این تغییرات  $Re_g^{cr}$  بسیار ناچیز و تقریباً ثابت است که علت آن می‌تواند اختلاف اندک دو زاویه باشد. از سوی دیگر شیب تغییرات  $Re_g^{cr}$  با افزایش زاویه افزایش می‌یابد و در محدوده  $60^\circ$  تا  $90^\circ$  به بیشترین حد خود می‌رسد. نحوه تغییرات  $Re_g^{cr}$  با

### عدد رینولدز تعمیم یافته

تعریف کلاسیک عدد رینولدز برای سیالات غیر نیوتنی قابل استفاده نبوده و دیگر پارامتر مؤثر و واحدی برای بیان حرکت نیست. با این حال در مورد سیالات غیر نیوتنی عدد رینولدز را می‌توان با تعریف دوباره ویسکوزیته تعمیم یافته،  $\mu_g$  و برای مجرای با سطح مقطع دلخواه دوباره تعریف کرد. رابطه ویسکوزیته تعمیم یافته به صورت معادله زیر است [۹]:

$$\mu_g = K \xi^{n-1} \left( \frac{V_{avg}}{D_h} \right)^{n-1} \left( \frac{v \cdot n + 1}{(v + 1) \cdot n} \right)^n \quad (4)$$

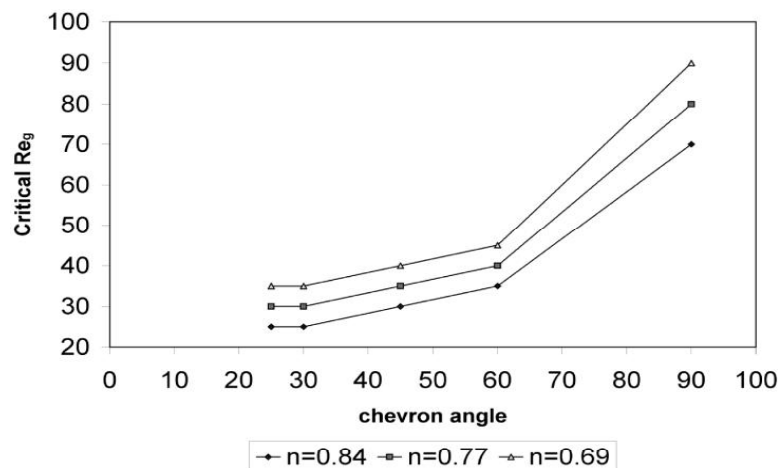
در معادله (۴)،  $\mu_g$  ویسکوزیته تعمیم یافته (Pa.s)،  $\xi$  و  $v$  پارامترهای هندسی مجرا (بدون واحد) و  $V_{avg}$  سرعت متوسط سیال (m/s) است. سپس می‌توان تابع هذلولی  $\Delta(n)$  را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\Delta(n) = \frac{v \cdot n + 1}{(v + 1) \cdot n} \quad (5)$$

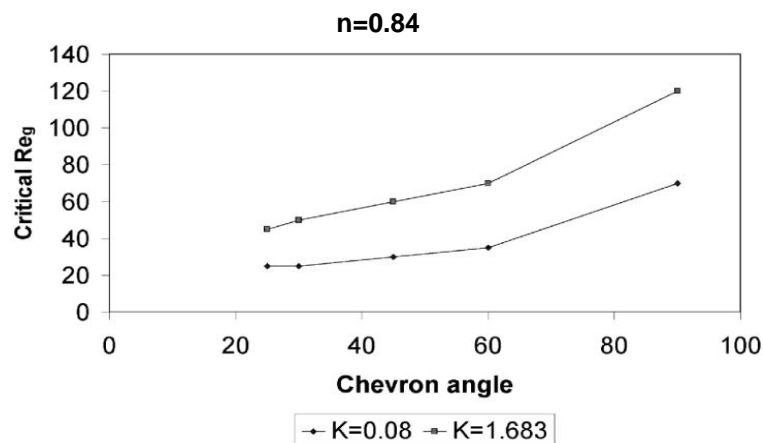
با گذاردن معادلات (۴) و (۵) در تعریف کلاسیک رابطه رینولدز و ساده کردن آن می‌توان به رابطه تعمیم یافته عدد رینولدز، که متزن<sup>۱</sup> و ریڈ<sup>۲</sup> تعریف کرده‌اند، دست یافت [۱۰]:

$$Re_g = \frac{\rho V_{avg}^{2-n} D_h^n}{K \xi^{n-1} (\Delta(n))^n} \quad (6)$$

1. Metzner  
2. Reed  
3. Fernandes



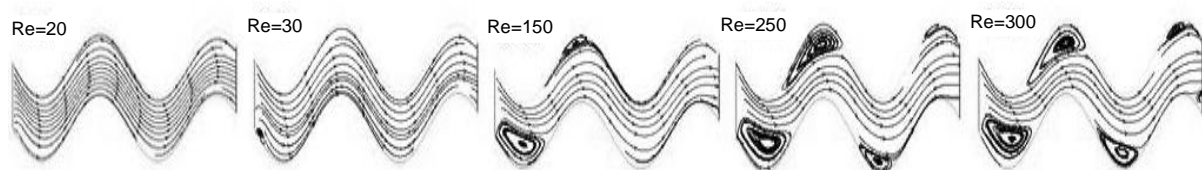
شکل ۵- تغییرات  $Re_g^{cr}$  در زوایای مختلف شورون و شاخص مختلف جریان  $n$



شکل ۶- تغییرات  $Re_g^{cr}$  در زوایای مختلف شورون و ضرایب پایداری مختلف و  $n=0.84$

هر چند نحوه تغییرات  $Re_g^{cr}$  با زاویه در هر دو سیال مشابه است، مقدار  $Re_g^{cr}$  در زوایای یکسان برای زرده تخم مرغ، که ضریب پایداری بزرگتری دارد، بیشتر است. نواحی گردابه‌ای جریان CMC درون کانال موج دار به این شکل ایجاد می‌شوند: اول در ابتدای کانال و گودی اول چرخابه‌ای کوچک تشکیل می‌شود. سپس با افزایش مقدار  $Re_g$  اندازه این گردابه بزرگتر می‌شود و به تدریج درون موج‌های بعدی نیز گردابه‌های بعدی تشکیل می‌شوند و در طول کانال گسترش می‌یابند (شکل ۷). پیژینهو نیز تأخیر در گسترش جریان گذرا را برای جریان سیالات پاورلا

شاخص رفتار جریان ( $n$ ) را نیز می‌توان از شکل ۶ دریافت. با کاهش  $n$  در زاویه ثابت، مقدار  $Re_g^{cr}$  افزایش می‌یابد. پیژینهو و همکارانش نیز اخیراً تغییرات مشابهی را بین رینولدز بحرانی و شاخص رفتار جریان درون لوله‌ها گزارش داده‌اند [۱۲]. یکی دیگر از پارامترهای رئولوژیکی ضریب پایداری  $K$  است. برای بررسی تأثیر این پارامتر دو سیال پاورلا با شاخص‌های رفتار یکسان ( $n=0.84$ ) در نظر گرفته شدند: CMC-۱ با غلظت وزنی ۱٪ و پارامترهای رئولوژیکی  $n=0.84$  و  $K=0.08 \text{ Pa.s}^n$  و ۲- زرده تخم مرغ با  $n=0.84$  و  $K=1.683 \text{ Pa.s}^n$  [۱۲].



شکل ۷- گسترش جریانات گردابه‌ای در طول کانال با افزایش  $Re_g$  (مقطع طولی، CMC ۱/۵٪، زاویه شورون ۲۵ درجه)

## ضریب اصطکاک

یکی از عوامل مهم برای محاسبه افت فشار در مبدلهای صفحه‌ای ضریب اصطکاک است:

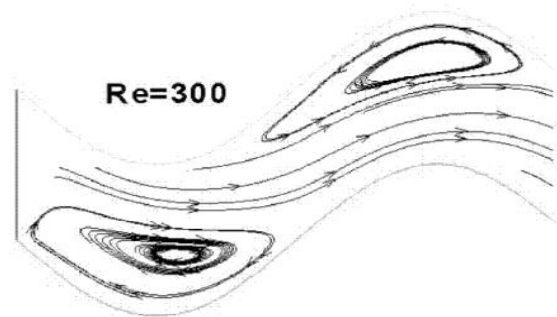
$$f = \frac{2\sigma_w}{\rho V_{avg}^2} \quad (7)$$

$f$  ضریب اصطکاک فاینینگ و  $\sigma_w$  تنش برشی در دیواره است. ساندرز رابطه کلی زیر را برای ارتباط ضریب اصطکاک و عدد رینولدز،  $f-Re_g$ ، درون مبدلهای صفحه‌ای پیشنهاد داده است [۱۳]:

$$f = K_p Re_g^{-z} \quad (8)$$

ثوابت  $K_p$  و  $z$  با زاویه شورون تغییر می‌کنند و باید تعیین شوند. جدول ۳ مقدار این ثوابت را برای غلظت ۱ درصد از CMC نشان می‌دهد. مقدار  $K_p$  با افزایش زاویه کاهش می‌یابد. فرناندز و همکارانش [۸] و ساندرز [۱۳] نیز گزارش داده‌اند که مقدار ضریب  $K_p$  با افزایش زاویه کاهش می‌یابد. شکل ۹ تغییرات  $f-Re_g$  را در زاویه ۳۰ درجه و در شاخص‌های مختلف جریان نشان می‌دهد. همپوشانی

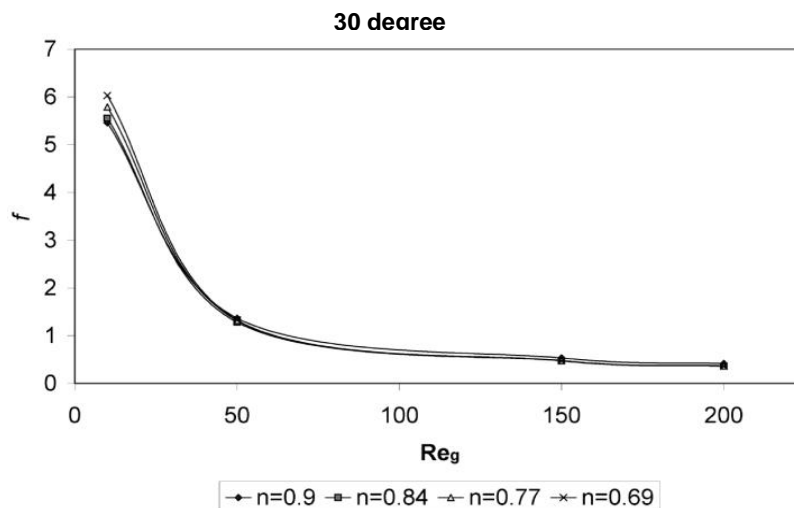
(از جمله محلول CMC) درون لوله‌ها دیده است [۱۱]. با افزایش  $Re_g$ ، گردابه‌ها رشد می‌کنند و به هسته مرکزی جریان نزدیکتر می‌شوند. در رینولدزهای تعمیم یافته که به اندازه کافی بزرگ باشند گردابه‌ها کاملاً با هسته مرکزی جریان ترکیب می‌شوند و جریان را آشفته می‌کنند. به گزارش محرابیان و پولتر، جهت چرخش گردابه‌ها در گودی‌ها هم جهت جریان اصلی (در جهت عقربه‌های ساعت) و در قله‌ها خلاف جهت جریان اصلی (خلاف جهت عقربه‌های ساعت) است (شکل ۸) [۶].



شکل ۸- جهت چرخش در گردابه‌ها

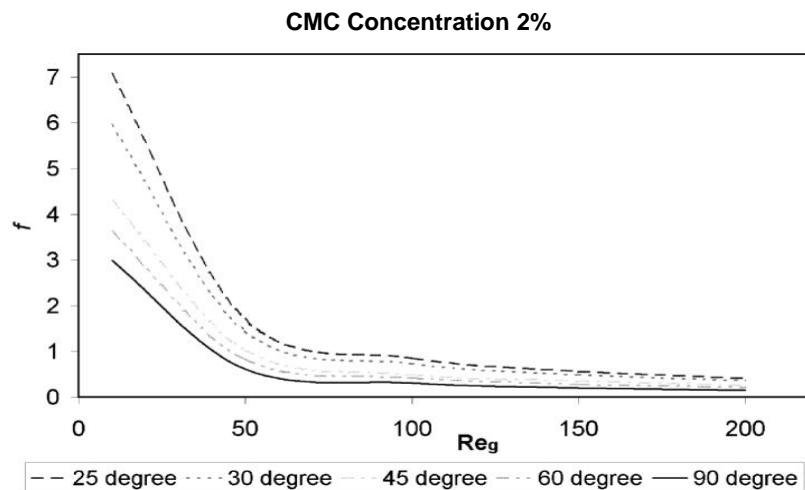
جدول ۳- ثوابت رابطه  $f-Re_g$  برای غلظت ۱ درصد از CMC

$10 < Re_g \leq 200$	$r^2$	$f = K_p Re_g^{-z}$	$Z$	$K_p$	زاویه شورون
	۰/۹۹۹۵	$f = 62/19 Re_g^{-0.95}$	۰/۹۵	۶۲/۱۹	۲۵
	۰/۹۹۹۱	$f = 45/13 Re_g^{-0.91}$	۰/۹۱	۴۵/۱۳	۳۰
	۰/۹۹۹۲	$f = 34/0.4 Re_g^{-0.91}$	۰/۹۱	۳۴/۰۴	۴۵
	۰/۹۹۹۸	$f = 30/17 Re_g^{-0.93}$	۰/۹۳	۳۰/۱۷	۶۰
	۰/۹۹۹۹	$f = 29/49 Re_g^{-1}$	۱	۲۹/۴۹	۹۰



شکل ۹- تغییرات  $f$  بر حسب عدد رینولدز در شاخص‌های مختلف جریان





شکل ۱۰- تغییرات  $f-Re_{\rho}$  در زوایای مختلف شورون،  $n=0.69$

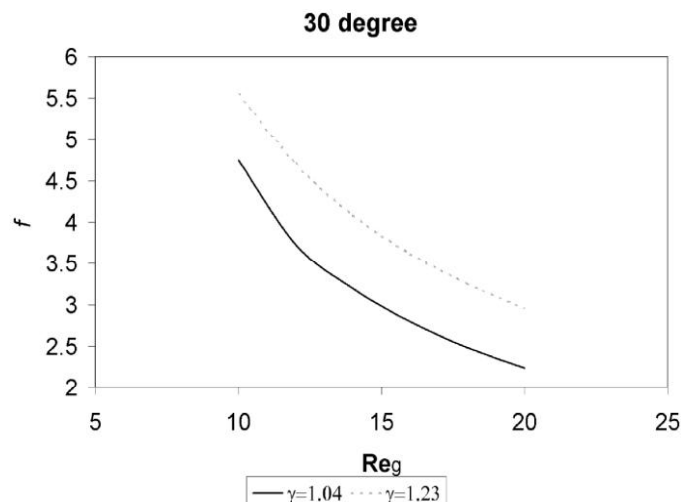
مبدل مطالعه شده فرناندز و همکارانش [۷]،  $\gamma=1/0.4$  است. طبق مطالعات متوالی و مانگلیک [۱] با افزایش مقدار  $\gamma$ ، ضریب اصطکاک افزایش می‌یابد و این با تغییرات شکل ۱۱ همخوانی دارد.

#### نتیجه گیری

هدف از این تحقیق مطالعه رفتار جریان یک سیال غیر نیوتنی (CMC) درون مبدلهای قاب و صفحه‌ای برای تعیین تأثیرات پارامترهای رئولوژیکی و زاویه شورون بر رژیم جریان و رابطه  $f-Re_{\rho}$  بود و از شبیه‌سازی و تحلیل دو بعدی CFD استفاده شد. با افزایش زاویه شورون و کاهش  $n$  رینولدز بحرانی افزایش می‌یابد.  $n$  نیز تأثیری بر تغییرات  $f-Re_{\rho}$  ندارد اما  $f-Re_{\rho}$  به شدت تابعی از زاویه شورون و عدد رینولدز است.

نسبی منحنی نشان می‌دهد رابطه  $f-Re_{\rho}$  می‌تواند مستقل از تغییرات  $n$  باشد.

اما مطابق با آنچه در شکل ۱۰ دیده می‌شود، در  $n$  ثابت (غلظت ۲٪ وزنی از CMC)، با افزایش زاویه شورون مقدار  $f$  نیز افزایش می‌یابد که با نتایج فرناندز و همکارانش همخوانی دارد [۷ و ۸]. برای اطمینان از صحت نتایج، در شکل ۱۱ تغییرات  $f-Re_{\rho}$  که فرناندز و همکارانش در محدوده جریان آرام و برای سیال پاورلای عصاره آب سیب در زاویه ۳۰ درجه به دست آورده‌اند با نتایج تغییرات  $f-Re_{\rho}$  محلول CMC مقایسه شده‌اند [۷]. نحوه تغییرات و شیب خط تقریباً یکسان است اما مقدار ضریب اصطکاک در رینولدز برابر برای محلول CMC، به علت تفاوت ابعاد صفحه، بیش از ضریب اصطکاک عصاره آب سیب در همان رینولدز است. مقدار نسبت ظاهری در



شکل ۱۱- مقایسه تغییرات  $f$  بین CMC ( $\gamma=1/23$ ) و عصاره آب سیب ( $\gamma=1/0.4$ ) در ۳۰ درجه شورون

## منابع

- [1] Manglik R.M. & Ding J. "Laminar flow heat transfers to viscous power-law fluids in double-sine ducts", *Int. J. Heat Mass Transfer*, Vol. 40, No. 6, pp. 1379-1390, 1996.
- [2] Metwally H.M. & Manglik R.M. "Enhanced heat transfer due to curvature-induced lateral vortices in laminar flows in sinusoidal corrugated-plate channels", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, pp. 2283-2292, 2004.
- [3] Bereziat D. & Devienne R. "Experimental characterization of newtonian and non-newtonian fluid flows in corrugated channels", *International Journal of Engineering Science*, Vol. 37, pp. 1461-1479, 1999.
- [4] Perona P. "An experimental investigation of laminar-turbulent transition in complex fluids", *Journal of Food Engineering*, Vol. 60, pp. 137-145, 2003.
- [5] Fernandes S.C., Dias R.P., Nobrega J.M., Alfonso I.M., Melo L.F. & Maia J.M. "Thermal behavior of stirred yoghurt during cooling in plate heat exchanger", *Journal of food Engineering*, Vol. 76, pp. 433-439, 2006.
- [6] Mehrabian M.A. & Poulter R. "Hydrodynamic and thermal characteristics of corrugated channels: computational approach", *Applied Mathematical*, Vol. 24, pp. 304-312, 2000.
- [7] Fernandes S.C., Dias R.P., Nobrega J.M. & Maia J.M. "Effect of corrugated angle on the hydrodynamic behavior of power-law fluids during a flow in plate heat exchangers", *5th International Congress on Enhanced, Compact and Ultra-Compact heat exchangers; Science, Engineering and Technology*, Hoboken, USA, CHE2005-65, pp. 491-495, 2005.
- [8] Fernandes S.C., Dias R.P., Nobrega J.M., Alfonso I.M., Melo L.F. & Maia J.M. "Laminar flow in chevron-type plate heat exchangers: CFD analysis of tortuosity, shape factor and friction factor", *Chemical Engineering and processing*, Vol. 46, pp. 825-833, 2007.
- [9] Delpelace F. & Leuliet J.C. "Generalized reynolds number for the flow of power law fluids in cylindrical ducts of arbitrary cross-section", *Chem Eng Journal*, Vol. 56, pp. 33-37, 1995.
- [10] Metzner A.B & Reed J.C. "Flow of non-newtonian fluids-correlation of the laminar, transition, and turbulent-flow regions", *A.I.Ch.E. Journal*, Vol. 1, pp. 434-440, 1995.
- [11] Peixinho J., Desaubry C. & Lebouché M. "Heat transfer of a non-newtonian fluid (carbopol aqueous solution) in transitional pipe flow", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 51, Issues 1-2, pp. 198-209, 2008.
- [12] Telis-Romero J. Thomaz C.E.P., Bernardi M., Telis V.R.N & Gabas A.L., "Rheological properties and fluid dynamic of egg yolk", *Journal of food engineering*, Vol. 74, pp. 191-197, 2006.
- [13] Saunders E.A.D. "Heat exchangers, selection, design and construction", *Longman Scientific & Technical*, pp. 367-8, 2002.