

# تحلیل عددی انتقال حرارت و افت فشار به کمک دینامیک سیالات محاسباتی در یک گرمکن خورشیدی بهبودیافته

زهره ریسی، مسعود حق شناس فرد<sup>\*</sup>، وجیه زارعی، شبنم شریف یزد

اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی شیمی

پیام‌نگار: haghshenas@cc.iut.ac.ir

## چکیده

در این مطالعه رفتار حرارتی جریان آشفته هوادر یک کانال سه بعدی که با میله‌ها و آشفته‌سازهای نوع دلتا-وینگلت<sup>۱</sup> مجهز شده به صورت عددی تحلیل شده در حالی که شار حرارتی ثابتی روی دیواره بالایی کانال اعمال شده است. محاسبات با استفاده از روش محاسباتی حجم محدود و الگوریتم سیمپل<sup>۲</sup> برای شدت جریان‌های در محدوده رینولدزهای ۲۲۰۰۰-۵۰۰۰ انجام شده است. صحت نتایج به دست آمده از محاسبات عددی در قیاس با نتایج تجربی گزارش شده در مقالات قبلی تأیید شده به طوری که افزایش بیشتر در عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای استفاده همزمان از میله و گردابه‌ساز را تأیید کرده است. همچنین رفتار جریان سیال و انتقال گرما برای کانال پیشنهادی که دیواره‌های بالایی و پایینی آن میله‌دار شده و همزمان گردابه‌سازها در ورودی آن نصب شده‌اند افزایش قابل ملاحظه ناسلت را در مقایسه با حالت‌های مطالعه شده پیشین نشان داده است.

کلمات کلیدی: انتقال گرما، میله، گردابه‌ساز، ناسلت، ضریب اصطکاک

## ۱- مقدمه

سیال به طور موثری باعث افزایش نرخ انتقال حرارت می‌شوند. مطالعات وسیعی برای ارزیابی میزان افزایش در انتقال حرارت و بهبود رفتار جریان سیال با مجهز کردن کانال‌ها با وسایلی از قبیل میله، تیغه<sup>۴</sup>، گردابه‌سازهای متنوع و غیره انجام شده است که در اغلب آنها تنها از یک دسته از این وسایل برای افزایش بازدهی گرمایی مجرا استفاده گردیده و مطالعات کمی برای استفاده همزمان از این وسایل جانبی صورت گرفته است. تیانپونگ<sup>۵</sup> و همکارانش [۱] رفتار حرارتی جریان درهم سیال را در استفاده از میله‌های متساوی‌الساقین مثلثی که بر روی دو دیواره مقابل هم یک کانال نصب شده‌اند بررسی کرده است. آنها گزارش داده‌اند که به کمک

در زمینه کاربرد کانال‌های میله‌دار برای ارتقای عملکرد انتقال حرارت و ضریب اصطکاک برای مبدل‌های حرارتی، تلاش‌های متعددی صورت گرفته است. بهبود انتقال حرارت و رفتار جریان سیال در این کانال‌های تجهیز شده، به دلیل تغییر در لایه‌های مرزی حرارتی و هیدرودینامیکی می‌باشد. علاوه بر استفاده از میله‌ها<sup>۶</sup>، گردابه‌سازها با ایجاد جریان‌های چرخشی طولی به منظور افزایش انتقال حرارت، ضریب اصطکاک موثر نشان داده‌اند. در واقع، تمام این وسایل ایجادکننده آشفته‌گی با افزایش میزان درهم بودن جریان

4. Baffle  
5. Thianpong

1. Delta-Winglet Vortex Generators  
2. Simple  
3. Ribs

و گروه تحقیقاتیش [۷] گزارش شده است. افزایش در انتقال حرارت برای جریان سیال از میان یک کانال دایره‌ای شکل توسط پرومونگ و گروه مطالعاتیش بررسی شده است [۹]. نتایج دلالت دارد که میزان انتقال گرما برای کانال مجهز شده با آشفته ساز بیشتر از کانال هموار و فاقد آشفته ساز است. همچنین پرومونگ [۱۰] رفتار انتقال حرارت جریان آشفته تناوبی از میان یک کانال مربعی را به صورت عددی تحلیل نموده است. کانال مربعی آن‌ها بوسیله میله‌های ۷ شکل<sup>۹</sup> با زاویه حمله<sup>۹</sup> ۶۰ درجه مجهز شده که این میله‌ها روی دیواره‌های مقابل هم قرار داده شده‌اند. نتایج کار آن‌ها با نتایج حاصل از داده‌های آزمایشی که در همان شرایط انجام گرفته‌اند در تطابق خوبی هستند.

یک مطالعه عددی در مورد رفتار جریان سیال و انتقال حرارت در یک کانال مستطیلی با دو نوع میله‌های شکاف‌دار و فاقد شکاف<sup>۱۰</sup> توسط یانگ<sup>۱۱</sup> و هوانگ<sup>۱۲</sup> انجام شده است [۱۱]. آنها گزارش دادند که میله‌های شکاف‌دار عملکرد حرارتی بهتری از کانال با میله‌های معمولی و فاقد شکاف دارند.

پرومونگو گروه تحقیقاتیش [۱۲ و ۱۳] مطالعات عددی برای ارزیابی اثرات جریان آرام تناوبی و شدت انتقال گرما در یک مجرای سه بعدی با دو آرایش متفاوت از تیغه‌های V- شکل زاویه‌دار را انجام داده‌اند. تیغه‌های با زاویه حمله ۴۵ درجه و با ارتفاع‌های مختلف بکار گرفته شده‌اند. در هر دو بررسی افزایش در عدد ناسلت و ضریب اصطکاک گزارش شده است.

یک‌دسته از آزمایش‌ها برای ارزیابی افزایش انتقال حرارت برای جریان آشفته هوا از میان یک کانالی که شامل بافل‌های نوع V با زاویه حمله ۶۰ درجه توسط پرومونگ صورت گرفته است [۱۴]. آنها نشان داده‌اند افزایش نسبت گرفتگی و یاکاهش در نسبت گام، افزایش قابل‌ملاحظه‌ای در عدد ناسلت و فاکتور اصطکاک را به دنبال دارد.

توری<sup>۱۳</sup> و همکاران وی [۱۵] یک لوله با مقطع دایره‌ای که با گردابه‌سازهای نوع دلتا - وینگلت مجهز شده است برای بررسی رفتار انتقال حرارت و جریان سیال مطالعه کرده و افزایش در انتقال

استفاده از این کانال میله دار شده، افزایش زیادی در میزان انتقال حرارت و افت فشار مشاهده شده است. مومین<sup>۱</sup> و همکارانش [۳] مقادیر ناسلت و ضریب اصطکاک را برای زمانی که از میله‌های V شکل با زاویه ۶۰ درجه بر روی صفحه جاذب یک گرمکن حرارتی استفاده شده است گزارش داده‌اند. پرومونگ<sup>۲</sup> و همکارانش [۲] اثرات به کارگیری میله‌های با اشکال مختلف هندسی در عبور هوا از میان یک کانال مستطیلی را مطالعه کرده و نشان داده‌اند که بیشترین افزایش در عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به آرایش نقطه پایین دست میله‌های سه‌گوش قرار گرفته در یک خط<sup>۳</sup> متعلق بوده است. تاثیر نسبت پیچش و نسبت فاصله روی عملکرد انتقال حرارت در یک مبدل لوله‌ای که با المان‌های نوارهای دوتایی پیچیده شده مجهز شده‌اند بوسیله ایسما- ارد<sup>۴</sup> و همکارانش مطالعه شده است [۴]. نتایج نشان داد که با استفاده از وسایل دوتایی ایجادکننده جریان چرخشی با نسبت‌های کمتر پیچش و فاصله، عدد ناسلت و ضریب اصطکاک به میزان چشمگیری افزایش داشته است. ساهو<sup>۵</sup> و همکارش [۵] عملکرد انتقال گرمای یک کانالی را که دیواره بالایی آن با میله‌های عرضی شکسته<sup>۶</sup> ۹۰ درجه مجهز شده در یک گرمکن گرمکن خورشیدی هوا بررسی کرده‌اند. آنها افزایش در عدد ناسلت را برای این کانال در مقایسه با کانال هموار گزارش کرده‌اند. توری<sup>۷</sup> و همکارانش [۶] تأثیر قرار دادن گردابه‌سازهای نوع وینگلت در یک مبدل حرارتی لوله‌ای پره‌دار را مطالعه کردند و پی بردند که به دلیل تاخیر در جدایش لایه‌های مرزی میزان انتقال گرما و نیز افت فشار در اعداد رینولدز، اندکی افزایش داشته است. در یک مطالعه دیگر در سال ۲۰۱۰ ویژگی‌های انتقال گرما و افت اصطکاک برای جریان آشفته هوا در یک کانال که با میله‌های مثلثی و گردابه‌سازهای نوع وینگلت مجهز شده، مطالعه شده است [۸]. نشان داده شده است که ترکیب این دو نوع آشفته ساز، عملکرد انتقال حرارت و میزان ضریب اصطکاک را به میزان قابل‌توجهی افزایش داده است. بهبود در عملکرد انتقال حرارت در کانال مستطیلی که همزمان با گردابه‌ساز و میله لبه دار تجهیز شده توسط چومپوخام<sup>۸</sup>

1. Momin
2. Promvong
3. In-Line Wedge rib Pointing Downstream Arrangement
4. Eiamsa-ard
5. Sahu
6. Broken 90° Transverse Ribs
7. Torii
8. Chompookham

9. Inline 60° V-Discrete ribs
10. Slit/Solid Ribs
11. Yang
12. Hwang
13. Torri

گزارش شده تنها تعداد محدودی مطالعه تجربی و عددی وجود دارد. علاوه بر این برخلاف همان تعداد انگشت شمار مطالعات پیشین که بر رژیم‌های آرام حرکت سیال در مجراها دلالت داشته‌اند، در این ارزیابی رفتار انتقال حرارت و جریان سیال برای عبور در هم هوا از میان یک کانال مستطیلی محاسبات ارائه شده است. در ادامه بررسی‌ها یک طراحی کاملاً جدید که استفاده از میله‌ها بر دو دیواره مقابل هم را در کنار نصب گردابه‌سازهای نوع دلتا - وینگلت در بر دارد ارائه شده است. به بیان دیگر برای اولین بار اثرات میله‌دار کردن همزمان دو دیواره بالا و پایینی کانال در کنار حضور گردابه‌سازها بر روی افزایش انتقال حرارت و میزان افت فشار جریان مطالعه شده است.

## ۲- شرح سیستم مورد مطالعه

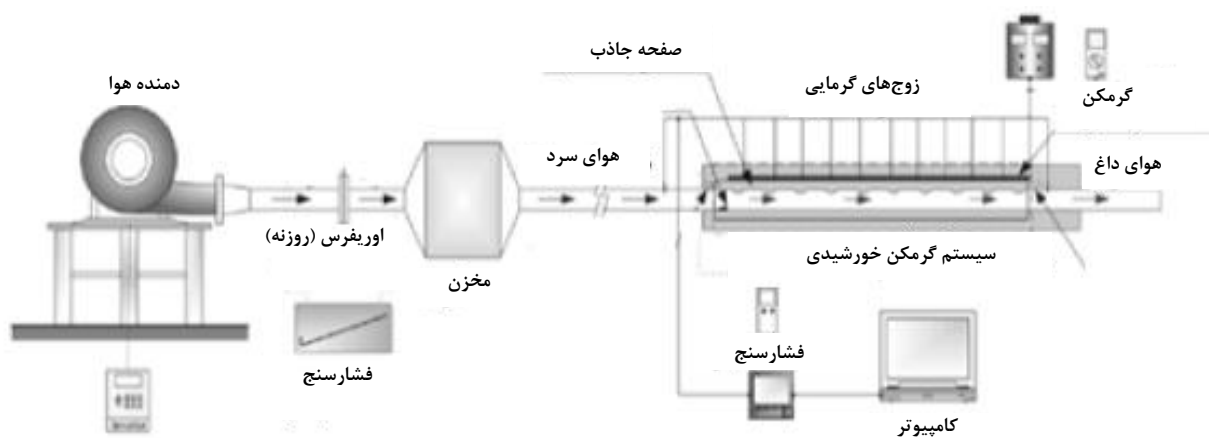
مطابق با شکل (۱) هوا از طریق خط لوله دایره‌ای از دمنده فشار قوی با توان ۱/۴۵ کیلووات به مخزنی جریان دارد. در حالی که یک اریفیس متر بر روی این خط لوله قرار داده شده و سپس هوا از مخزن به کانال مستطیلی مورد مطالعه هدایت شده است. کانال مذکور شامل یک ناحیه ورودی و یک ناحیه آزمایشی است که در کل طول ۲۰۰۰ میلی‌متر دارند.

گرما و کاهش در افت فشار را گزارش داده است. گروه مطالعاتی چن<sup>۱</sup> [۱۶] اثرات افزایش در انتقال گرما را در یک مبدل حرارتی لوله‌ای بیضوی مطالعه کرده‌اند که در آن گردابه‌سازهای نوع وینگلت با آرایش شطرنجی به‌کار گرفته شده‌اند. افزایش در شدت انتقال گرما به دلیل تولید گردابه‌های قوی‌تر گزارش شده است.

آزمایشاتی برای ارزیابی انتقال گرما و افت فشار روی یک مبدل حرارتی لوله‌ای با پره‌های ساده که با گردابه‌سازهای نوع وینگلت مجهز شده‌اند توسط جوردر<sup>۲</sup> و جاکوبی<sup>۳</sup> طراحی شده که افزایش در ضریب انتقال حرارت در هوای درون مبدل را مشاهده کرده‌اند [۱۷]. بیس‌واس<sup>۴</sup> ارتقاء در عملکرد انتقال گرما برای یک مبدل حرارتی که با گردابه‌سازها تجهیز شده است را نسبت به مبدل حرارتی بدون این آشفته سازها گزارش کرده‌اند [۱۸].

ژو<sup>۵</sup> و همکارانش [۱۹] طی یک مطالعه عددی افزایش در عدد ناسلت برای جریان حرکت آشفته هوا از میان یک کانال مستطیلی را نشان داده‌اند در حالیکه گردابه‌ها و المان‌های زیری روی دو دیواره مقابل هم قرار گرفته‌اند.

اغلب مطالعات انجام شده در این زمینه بر استفاده از هریک از آشفته سازهایی همانند میله و گردابه‌ساز به صورت مجزا و نه همزمان با هم تمرکز داشته‌اند و در زمینه مجهز کردن کانال‌ها با استفاده همزمان از این دو نوع وسیله جانبی تعداد معدودی مقاله



شکل ۱- دیاگرام اجمالی تجهیزات فرایند مورد مطالعه [۲۰]

1. Chen  
4. BisWas

2. Joardar  
5. Zhu

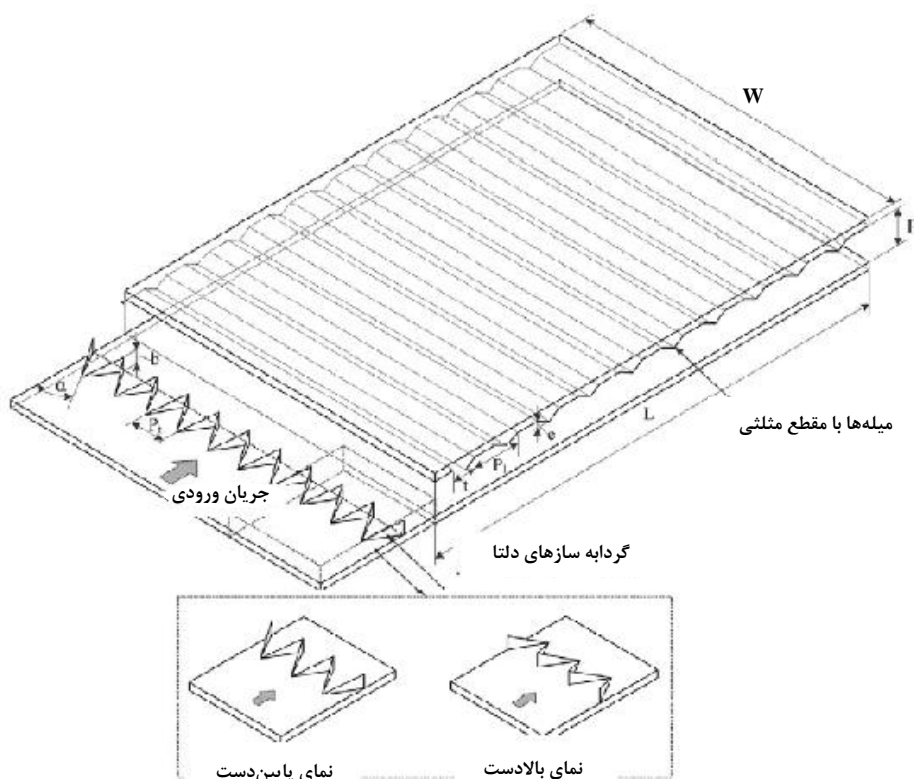
3. Jacobi

کامل مجموعه مورد بررسی، مشابه تجهیزات ذکر شده در مطالعه تجربی است که قبلاً در این زمینه ارائه شده است [۲۰].

### ۳- مدل‌سازی سیستم توسط دینامیک محاسباتی سیال

دینامیک محاسباتی سیال ابزاری توانمند برای تحلیل مسائل جریان سیال، انتقال حرارت و جرم است که با روش‌های عددی این مسائل را حل می‌کند. در این مطالعه عدد ناسلت و ضریب اصطکاک برای ارزیابی تاثیر استفاده همزمان از میله و گردابه ساز در یک کانال مستطیلی بر افزایش انتقال حرارت و رفتار جریان سیال با کمک دینامیک محاسباتی سیال محاسبه شده‌اند. معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و معادله انرژی می‌باشند. همچنین برای توصیف رفتار ناآرام جریان سیال از مدل توربولنسی  $k-k\ell-\omega$  استفاده شده است. ارزیابی تاثیر استفاده از میله‌ها و گردابه‌سازها با محاسبه عدد بی‌بعد ناسلت و ضریب اصطکاک انجام شده است که نحوه محاسبه این دو کمیت با توجه به خروجی‌های نرم‌افزار انسیس/فلونت به صورت مختصر در ادامه مطلب ذکر شده است.

بخش آزمایشی به صورت یک کانال افقی مستطیل شکل با ابعاد  $(W=300\text{ mm}$  و  $H=30\text{ mm})$  شامل یک صفحه جاذب و ده عدد گردابه‌ساز از نوع دلتا-وینگلت برای مطالعه رفتار سیالاتی و حرارتی جریان آشفته هوا از میان این مجرا است. صفحه جاذب با طول  $440$  میلی‌متر، متشکل از ده عدد میله با مقطع مثلثی (شکل (۲)) با طول گام  $40$  میلی‌متر و ارتفاع  $6$  میلی‌متر بر روی دیواره بالایی این مجرا نصب شده است. در حالیکه شار حرارتی ثابت  $2500$  وات بر مترمربع بر این صفحه اعمال شده است. گردابه‌سازهای از نوع دلتا - وینگلت (شکل (۲)) ظاهراً با سه زاویه حمله مختلف  $30$ ،  $45$  و  $60$  درجه، با ارتفاع  $12$  میلی‌متر و طول گام  $30$  میلی‌متر بر روی دیواره پایینی کانال و در قسمت ورودی آن نصب شده‌اند. دو آرایش متمایز بالادست و پایین دست نیز برای بررسی تاثیر نحوه چیدمان این آشفته سازها مطالعه شده است (شکل (۲)). هوا در دمای  $298$  کلوین با شدت جریان‌های مختلفی که بر مبنای عدد رینولدز در محدوده  $22000-5000$  می‌باشد از میان این مجرا و به کمک یک وزنده عبور داده شده است. جزئیات



شکل ۲- شرح اجمالی کانال مورد مطالعه در دو آرایش مختلف نقطه بالادست (PU) و نقطه پایین دست (PD) [۲۰]

### ۱-۳ تعیین ناسلت و فاکتور اصطکاک به منظور ارزیابی

#### عملکرد انتقال حرارت و افت فشار سیال در کانال

متغیرهای مستقل در این بررسی عدد بی بعد رینولدز، زاویه حمله و نحوه قرارگیری و آرایش گردابه‌سازها می‌باشند که عدد رینولدز بر مبنای قطر هیدرولیکی کانال محاسبه شده است:

$$Re = \frac{UD_h}{v_{air}} \quad (1)$$

متوسط ضریب انتقال حرارت برای کانالی که شار یکنواخت  $q''$  بر روی صفحه بالایی آن اعمال شده است از رابطه سرمایه‌ش نیوتن به صورت زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$h = \frac{q''}{T_s - T_{bulk}} \quad (2)$$

در این رابطه  $T_s$  و  $T_{bulk}$  به ترتیب دمای سطح دیواره کانال و دمای توده سیال هستند و دمای توده سیال، میانگین دمای هوا در ورودی و خروجی کانال است. بنابراین عدد ناسلت به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$Nu = \frac{hD_h}{k} \quad (3)$$

$K$  ضریب هدایت حرارتی سیال است.

جهت ارزیابی میزان افت فشار در کانال از تعریف ضریب اصطکاک ( $f$ ) استفاده شده است که معیاری از افت فشار و هندسه کانال را به همراه خواص فیزیکی سیال (نوع سیال) در خود در بر دارد:

$$f = \frac{(\frac{\Delta P}{L})D_h}{\frac{1}{2}\rho U^2} \quad (4)$$

که  $U$  متوسط سرعت سیال در طول کانال است. قابل ذکر است که تمامی خواص در دمای توده سیال محاسبه و جایگزین شده‌اند.

دیتوس-بولتر<sup>۱</sup> روابطی تجربی مربوط به محاسبه ناسلت و بلازیوس<sup>۲</sup> را برای تخمین ضریب اصطکاک ارائه داده‌اند که با دقت قابل قبولی در مطالعه تجربی مرتبط با این مقاله ذکر شده که پروموتنگو همکارانش با خطای تقریبی ۰.۸٪ نتایج تجربی خود را مورد تأیید قرار داده‌اند [۲۰]:

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (5) \quad \text{برای گرمایش}$$

$$f = 0.316 Re^{-0.25} \quad 3000 \leq Re \leq 20000 \quad (6)$$

### ۲-۳ معادلات اساسی جریان سیال

به منظور ارزیابی عددی رفتار انتقال حرارت و جریان هوا در کانال ذکر شده معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی به شرح زیر می‌باشند:

معادله پیوستگی:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (7)$$

معادله موازنه اندازه حرکت:

$$\rho \frac{Du}{Dt} = -\nabla p - [\nabla \cdot \tau] + \rho g \quad (8)$$

معادله موازنه انرژی:

$$\rho \hat{C}_p \frac{Dt}{Dt} = -(\nabla \cdot q) - \left( \frac{\partial \ln v}{\partial \ln T} \right) \frac{Dp}{Dt} - (\tau \cdot \nabla u) \quad (9)$$

در روابط بالا  $t$  معرف زمان،  $\rho$  چگالی،  $u$  سرعت سیال،  $p$  فشار سیال،  $\tau$  تنسور تنش،  $g$  شتاب گرانش،  $\hat{C}_p$  ظرفیت حرارتی ویژه در فشار ثابت به ازای واحد جرم سیال،  $T$  دما و  $q$  فلاکس حرارتی می‌باشد. برای در نظر گرفتن اثرات درهمی جریان و محاسبه

1. Dittus- Boelter  
2. Blasius

پارامترهای دره‌می جریان از مدل‌های دره‌می استفاده می‌شود که در ادامه به آن پرداخته شده است.

### ۳-۳ الگوسازی جریان دره‌م [۲۱]

یک مدل توربولنسی گردابه-گرانروی<sup>۱</sup> که از سه معادله انتقالی اضافی کمک می‌گیرد در این تحقیق بکار برده شده است که این مدل بر مبنای چارچوب مدل k-omega است. سه معادله کمکی مدل موردنظر که Transition k-kl- $\omega$  نامیده می‌شود، به منظور محاسبه انرژی جنبشی دره‌می ( $K_T$ )، انرژی جنبشی آرام ( $K_L$ ) و متغیر تعیین مقیاس<sup>۲</sup> ( $\omega$ ) از سه رابطه زیر استفاده می‌نماید:

$$\frac{DK_T}{Kt} = P_{K_T} + R_{BP} + R_{NAT} - \omega K_T - D_T + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( v + \frac{\alpha_T}{\sigma_T} \right) \frac{\partial K_T}{\partial x_j} \right] \quad (10)$$

$$\frac{DK_L}{Dt} = P_{K_L} - R_{BP} - R_{NAT} - D_L + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v) \frac{\partial K_L}{\partial x_j} \right] \quad (11)$$

$$\frac{D\omega}{Dt} = C_{\omega 1} \frac{\omega}{K_T} P_{K_T} + \left( \frac{C_{\omega R}}{f_{\omega}} - 1 \right) \frac{\omega}{K_T} (R_{BP} + R_{NAT}) - C_{\omega 2} \omega^2 + C_{\omega 3} + f_{\omega} \alpha_T f_{\omega}^2 \frac{\sqrt{K_T}}{d^3} \quad (12)$$

متغیر تعیین مقیاس در این مدل همان  $\omega = \varepsilon / K_T$  است که در این تعریف  $\varepsilon$  نرخ اتلاف می‌باشد.

جملات مختلف در این روابط، مکانیزم‌های تولید، مصرف و انتقال را در بر دارند.

در واقع این مدل از معکوس مقیاس زمانی دره‌می ( $\omega$ ) به جای نرخ تلفات ( $\varepsilon$ ) استفاده می‌کند. جزییات مدل دره‌می استفاده شده در این مطالعه و تعاریف تمامی کمیت‌ها و پارامترهای این معادلات به تفصیل در مرجع شماره [۲۱] آمده است. مدل توربولنسی

استفاده شده در این جا یک مدل چرخانه-گرانروی بر مبنای مدل K-Omega می‌باشد که علاوه بر استفاده از تمام فرضیات و مزایای مدل K-Omega، اثرات مربوط به نوسانات فرکانس پایین سرعت را با معرفی و استفاده از یک معادله انتقال سوم لحاظ می‌کند و بنابراین برای جریان‌های دره‌م و گذار قابل استفاده است. از آنجا که در این مطالعه محدوده رینولدز بررسی شده وسیع است به نظر می‌رسد این مدل بویژه برای رینولدزهای ۵۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ مناسبتر می‌باشد. همچنین، پیشتر دقت و موفقیت آمیز بودن این مدل در مطالعات عددی برای مسائل متعدد گزارش شده است [۲۱].

### ۳-۴ ترسیم هندسی و حل معادلات حاکم بر مسئله

جهت ترسیم هندسی مورد مطالعه و شبکه‌بندی کانال از نرم‌افزار گمبیت استفاده شده در حالی که حل معادلات حاکم بر مساله با نرم‌افزار انسیس/فلونتت فراهم گردیده است.

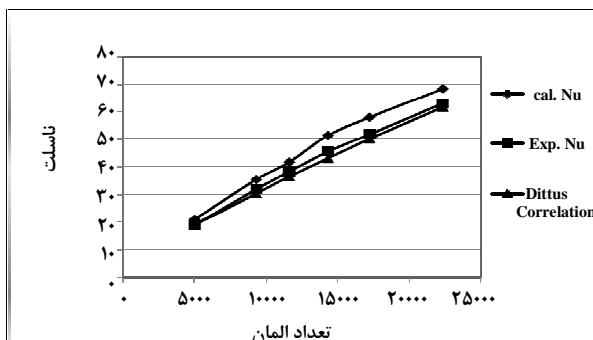
در گام اول به منظور بررسی استقلال از مش‌بندی پاسخ‌ها برای تعدادهای مختلف از مش‌ها مدل‌سازی انجام شده است. همانطور که ذکر شد با کمک نرم‌افزار گمبیت اقدام به ترسیم و مش‌بندی هندسه‌های مورد مطالعه با المان‌های هیبرید شش وجهی گردید. جهت بررسی استقلال از مش، اختلاف ناسلت محاسبه شده با داده‌های بدست آمده از CFD (مطابق با رابطه (۳)) و ناسلت تجربی گزارش شده در رینولدز ۱۷۳۰۰ و در تعداد مش‌های متفاوت برای هر هندسه مقایسه گردید که نتایج حاصل در شکل (۳) نشان داده شده است. با توجه به شکل به صورت کلی با افزایش بیشتر تعداد مش، اختلاف بین ناسلت بدست آورده شده توسط CFD و ناسلت گزارش شده تجربی، کمتر، و خطای محاسبه ناسلت نیز باز هم کمتر شده است. نتایج بدست آمده نشان داد که ریزتر کردن شبکه گره‌ها و افزایش تعداد آنها به بیش از ۷۴۰۸۹۲ تاثیر چندانی بر پاسخ‌ها نداشته است. لذا شبکه‌بندی هندسه‌ها با تعداد المان‌های مذکور انجام گرفت که درصد خطای محاسبه ناسلت با این تعداد مش قابل قبول می‌باشد در حالی که زمان محاسبات نیز، نسبت به تعداد مش‌های بیشتر، کوتاه‌تر شده است.

1. Eddy-Viscosity  
2. Scale-Determining Variable

#### ۴- نتایج

در این مطالعه اثر استفاده همزمان از میله‌های مثلثی و گردابه‌سازهای نوع دلتا - وینگت بر افزایش میزان انتقال حرارت و رفتار جریان درهم هوا در یک کانال مستطیلی به صورت عددی ارزیابی شده است. حل معادلات حاکم بر مسأله به کمک الگوریتم ساده برای مدل آشفتگی ذکر شده انجام شده است. مقادیر ناسلت ضریب اصطکاک با داشتن کانتورهای دما، فشار و سرعت محاسبه شده‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با داده‌های تجربی گزارش شده توسط پرومونگ و گروهش [۲۰] که در شرایط کاملاً یکسان با هر مورد مطالعاتی این مقاله انجام شده‌اند مقایسه و تأیید شده‌اند.

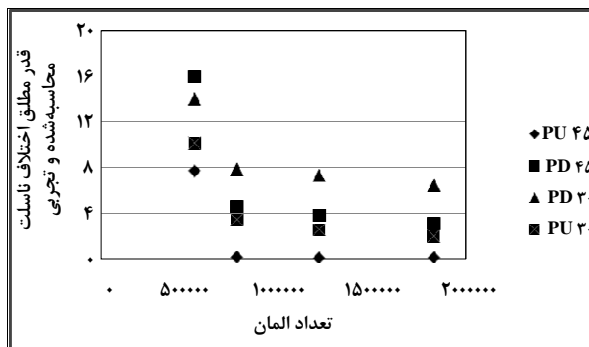
در این تحقیق ابتدا مرحله استقلال نتایج از مش‌بندی ارائه شده است. برای این منظور المان‌هایی با اندازه‌های مختلف انتخاب شده و مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که میزان اختلاف در دماهای به دست آمده در حالتی که تعداد شبکه‌ها بیشتر از ۷۴۰۸۹ بوده ناچیز است و تأثیر اندکی بر روی ناسلت دارد. بنابراین، این شبکه‌بندی کانال که از مش‌بندی ساختاریافته شش وجهی تشکیل شده مبنای انجام کار قرار گرفته است. ابتدا برای کانال هموار و فاقد میله و گردابه‌ساز، مقایسه بین نتایج تجربی و مدل‌سازی ارائه شده است که در شکل (۵) و (۶) دیده می‌شوند.



شکل ۵- نمودار تغییرات ناسلت - رینولدز برای کانال هموار

مطابق با این شکل نتایج عددی با نتایج گزارش شده تجربی در تطابق خوبی بوده و ماکزیمم خطا در ناسلت ۱/۱۵٪ و در ضریب اصطکاک ۱۳/۸٪ می‌باشد. همچنین نتایج به دست آمده با نتایج ارائه شده توسط روابط دیتوس - بولتر<sup>۱</sup> برای ناسلت و بلازیوس<sup>۲</sup> به منظور

1. Dittus-Boelter Correlation  
2. Blasius Correlation



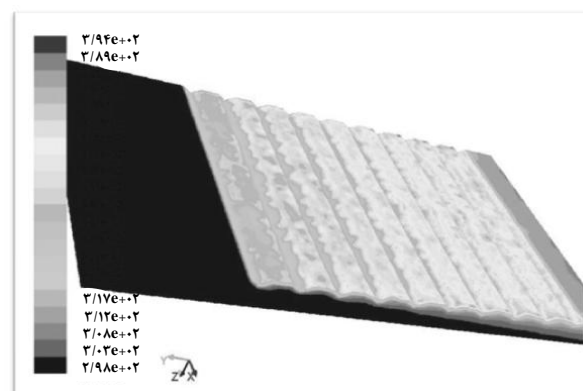
شکل ۳- قدر مطلق اختلاف ناسلت محاسبه شده از نرم‌افزار با ناسلت تجربی بر حسب تعداد المان

شرایط مرزی ورودی سیستم "سرعت ورودی" و برای جریان هوای خروجی شرط "فشار خروجی" انتخاب شده است در حالیکه برای باقی سطوح کانال، شرط مرزی عدم لغزش "دیواره" اعمال شده است. جریان هوا در دمای ۲۹۸ کلوین به صورت آشفتگی با مشخصات زیر استفاده شده است.

جدول ۱- مقادیر خواص هوای ورودی به کانال در دمای ۲۹۸K

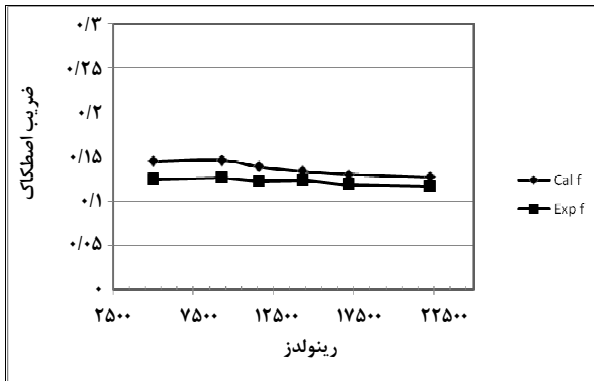
خواص هوا	گرانروی ( $\frac{Kg}{m.s}$ )	چگالی ( $\frac{Kg}{m^3}$ )	گرمای ویژه ( $\frac{j}{Kg.K}$ )
در دمای ۲۹۸K	۰/۰۰۰۱۷۸۹	۱/۲۲۵	۱۰۰۶/۴۳

شکل (۴) کانتور دما در ناحیه آزمایشی کانال را برای گردابه‌سازهای با زاویه حمله ۴۵ درجه و با آرایش بالادست جریان نشان می‌دهد.

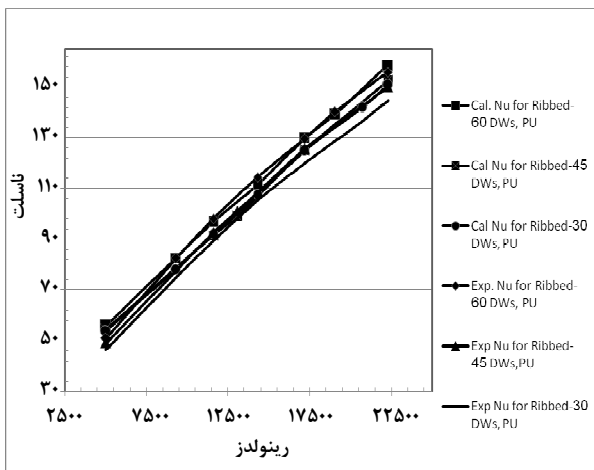


شکل ۴- کانتور دما برای کانال با میله‌ها و گردابه‌سازهای با زاویه حمله ۴۵ و آرایش نقطه بالادست

میله‌ها و یا تنها دلتا - وینگلت‌ها، انتظار می‌رود که کانالی که با هر دو نوع وسیله مجهز شده باشد افزایش بیشتری در شدت انتقال حرارت و ضریب اصطکاک را داشته باشد. بنابراین به منظور افزایش انتقال حرارت مبدلی که به این صورت طراحی شده باشد تحلیل‌ها انجام گرفته و نتایج آن در شکل زیر ارائه شده است.



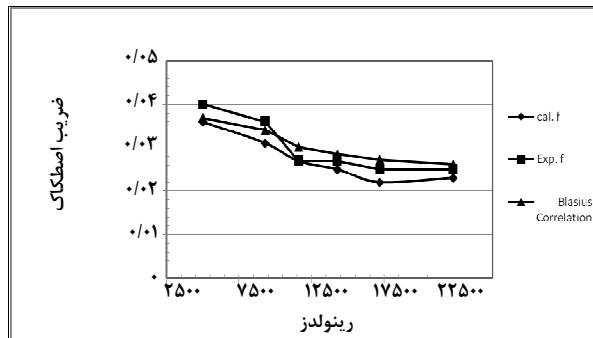
شکل ۸- نمودار تغییرات ضریب اصطکاک - رینولدز برای کانال میله‌دار



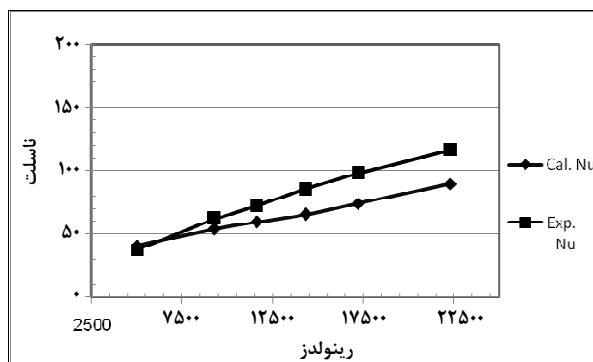
شکل ۹- نمودار تغییرات نسلت - رینولدز برای کانال با میله و گردابه‌ساز و آرایش نقطه بالادست

شکل (۱۰) کانتورهای دما را برای کانال مجهز شده با میله و گردابه‌سازها با زاویه حمله  $30^\circ$  و برای زمانیکه نوع چیدمان آشفته‌سازها بالادست می‌باشد در سه رینولدز متفاوت نشان می‌دهد. مطابق با کانتورهای دمایی ملاحظه شده است که با افزایش رینولدز و افزایش سرعت هوای ورودی به کانال، آشفستگی بیشتر جریان سیال توزیع یکنواخت‌تر دما و نیز اختلاف کمتر در دمای سطح کانال و

تخمین ضریب اصطکاک مقایسه شده است [۲۰]. همان‌طور که دیده می‌شود نتایج دینامیک محاسباتی سیال با متوسط خطای  $12/5\%$  و  $11\%$  به ترتیب در ناسلت و ضریب اصطکاک با پیش‌بینی‌های دو رابطه ارائه شده توسط دیتوس - بولتر و بلازیوس همخوانی خوبی دارند.



شکل ۱۰- نمودار تغییرات ضریب اصطکاک - رینولدز برای کانال هموار



شکل ۱۱- نمودار تغییرات نسلت - رینولدز برای کانال میله‌دار

- بررسی کانال میله دار

مطابق با شکل‌های (۷) و (۸) در این حالت با وجود موانع بر سر راه جریان سیال، جریان برگشتی و چرخش قوی‌تر را در پی داشته و در نتیجه انتظار می‌رود که ناسلت و ضریب اصطکاک نسبت به کانال هموار افزایش داشته باشند که این پیش‌بینی در نتایج ارائه شده در شکل‌ها تأیید شده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهند ضریب اصطکاک در این هندسه تقریباً مقدار ثابتی داشته است و متوسط افزایش آن نسبت به کانال هموار به  $12/5\%$  رسیده است.

- بررسی کانال مجهز شده با میله و گردابه‌ساز

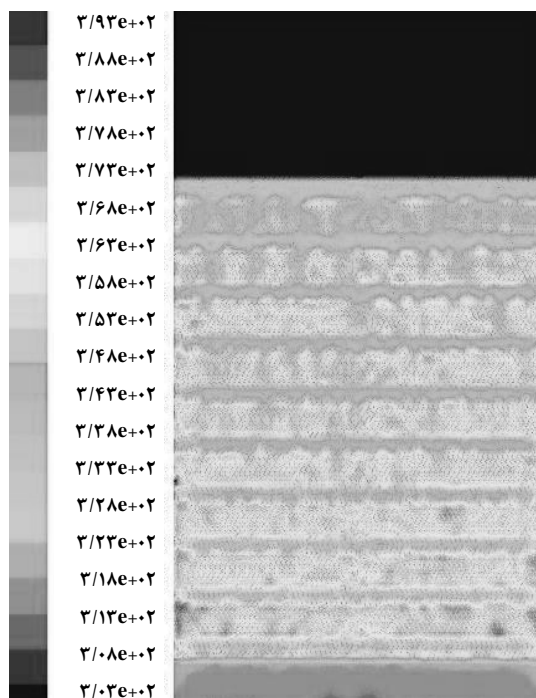
با توجه به افزایش ناسلت و ضریب اصطکاک با استفاده از تنها

متوسط دمای سطح کانال نیز کمتر شده است. بنابراین افزایش در ناسلت مطابق با شکل (۹) با افزایش در رینولدز مشاهده شده است.

متوسط دمای توده هوا را به همراه داشته است. همچنین در رینولدزهای بالاتر و در واقع برای آشفتگی بیشتر جریان در کانال،



11600Re=(ب)

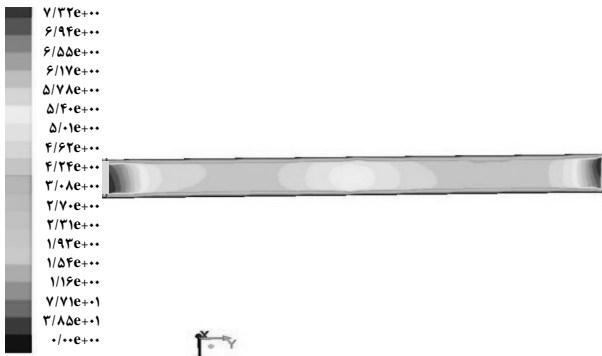


5000 Re=(الف)

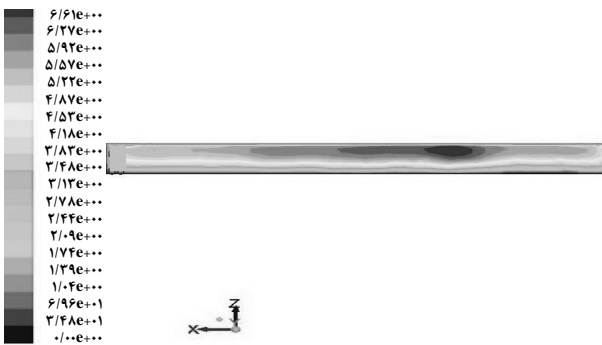


Re=17300(پ)

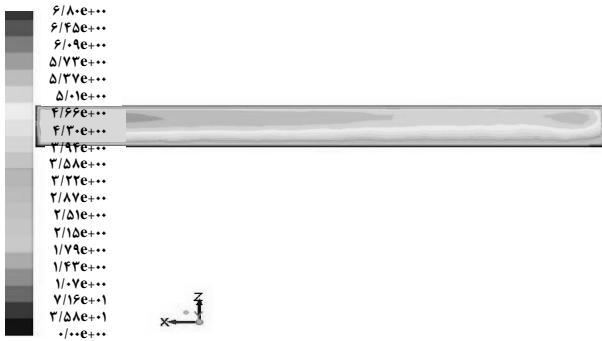
شکل ۱۰- کانتورهای دما برای آرایش کانال میله‌دار با دلتاوینگلت با زاویه حمله  $30^\circ$  و آرایش بالادست در سه رینولدز متفاوت



الف) کانال هموار



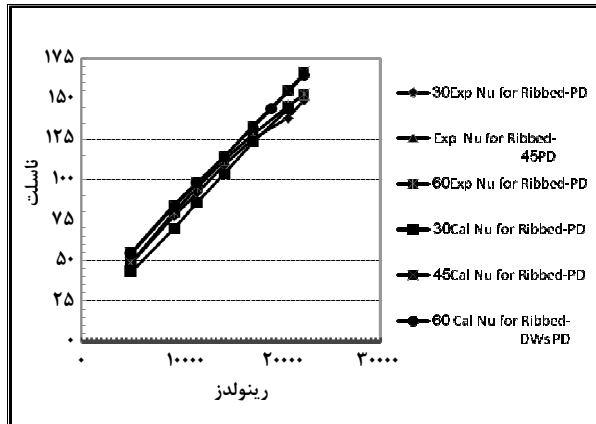
ب) کانال میله دار



پ) کانال مجهز به میله و گردابه ساز با زاویه حمله ۳۰ درجه و آرایش بالادست

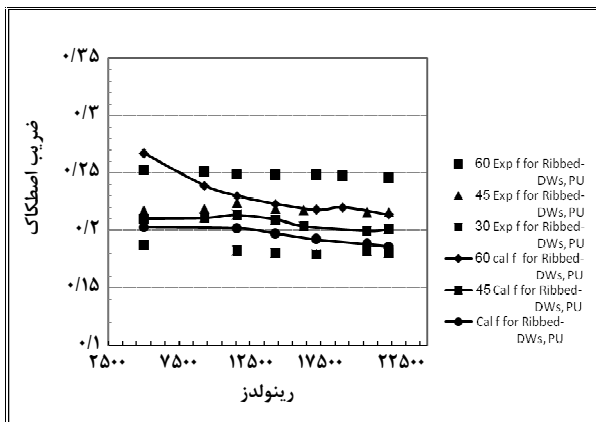
شکل ۱۳- کانتورهای سرعت برای سه آرایش مختلف  $Re=17300$

میزان سرعت سیال در خروجی کانال کاهش داشته که با توجه به یکسان بودن سرعت سیال در ورودی کانال در هر سه حالت ذکر شده در شکل (۱۳)، افزایش در افت فشار را تأیید کرده است. در واقع استفاده از میله‌ها و سپس گردابه‌سازها با ایجاد جریان‌های برگشتی و تقویت اثرات گردابه‌ها، باعث کاهش در متوسط سرعت سیال در کانال شده و در نتیجه افزایش در ضریب اصطکاک را به دنبال داشته است که با نتایج نشان داده شده در شکل‌های (۶)، (۸)



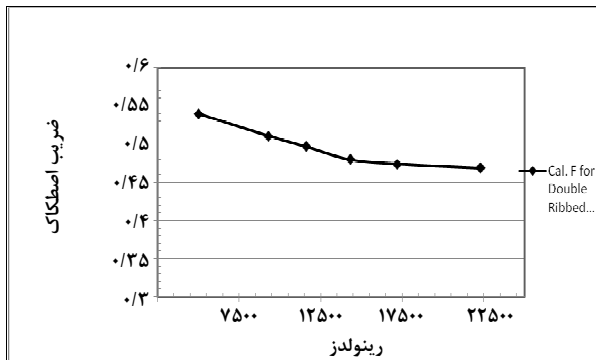
شکل ۱۱- نمودار تغییرات ناسلت - رینولدز برای کانال با میله و گردابه‌ساز و آرایش نقطه پایین‌دست

مطابق با شکل‌های (۹)، (۱۱) و (۱۲) مجرای مجهز شده با میله و دلتا-وینگلت با زاویه حمله بزرگتر، بازدهی بیشتری در رفتار انتقال گرما و جریان سیال داشته است. همچنین تغییر آرایش بین دو حالت بالادست و پایین دست تفاوت اندکی در نتایج را نشان داده و چیدمان نوع پایین دست را مؤثرتر از بالا دست ارائه کرده است.



شکل ۱۲- نمودار تغییرات ضریب اصطکاک - رینولدز برای کانال با میله و گردابه ساز و آرایش نقطه بالادست

همانگونه که ذکر شد هر یک از این وسایل جانبی که در کانال نصب شده‌اند با اختلال و تغییر لایه‌های مرزی هیدرودینامیک و گرمایی و نیز به کمک شدت بخشیدن به جریان‌های چرخش و گردابه‌ای، افزایش در انتقال حرارت و افت فشار را در پی داشته‌اند. مطابق با کانتورهای سرعت در خروجی کانال به وضوح دیده می‌شود که با مجهز کردن کانال به میله‌ها و سپس گردابه‌سازها به ترتیب



شکل ۱۵- نمودار تغییرات ضریب اصطکاک- رینولدز برای کانال با دو دیواره میله‌دار و گردابه‌ساز با زاویه حمله  $60^\circ$  و در آرایش نقطه پایین دست

کمک دینامیک محاسباتی سیال بررسی شده و در هر بخش نتایج با داده‌های تجربی موجود مقایسه شده‌اند. طبق نتایج گزارش شده از نرم‌افزار، استفاده از ترکیب کردن میله و گردابه‌ساز نوع دلتا- وینگلت (DWs) افزایش قابل ملاحظه در انتقال حرارت را در مقایسه با کانال هموار داشته است و ناسلت با افزایش عدد رینولدز نسبت به حالت کانال هموار و یا کانالی که تنها میله دارد افزایش داشته است که این به دلیل اختلال میله‌ها در توسعه یافتن لایه مرزی جریان سیال و ایجاد جریان چرخشی- برگشتی در پشت میله‌هاست است در حالیکه گردابه‌سازها جریان گردابه ای طولی ایجاد می‌کنند که به شستشوی<sup>۱</sup> جریان برگشتی به دام افتاده در پشت میله‌ها در مرکز جریان کمک می‌کند که این موارد با نتایج حاصل از آزمایشات تجربی انجام شده در این زمینه، همخوانی قابل قبول داشتند.

همچنین استفاده از میله و گردابه‌ساز نوع دلتا- وینگلت با زاویه حمله بزرگتر، انتقال حرارت بیشتری را نسبت به زاویه حمله کمتر فراهم می‌کند که هم داده‌های تجربی و هم نتایج دینامیک محاسباتی سیال این امر را نشان داده‌اند. مطابق با شکل‌ها نحوه چیدمان و آرایش گردابه‌ساز (پایین دست و بالادست) تاثیر اندکی روی نتایج داشته و ناسلت در حالت پایین دست، کمی بیشتر از دیگران بوده است.

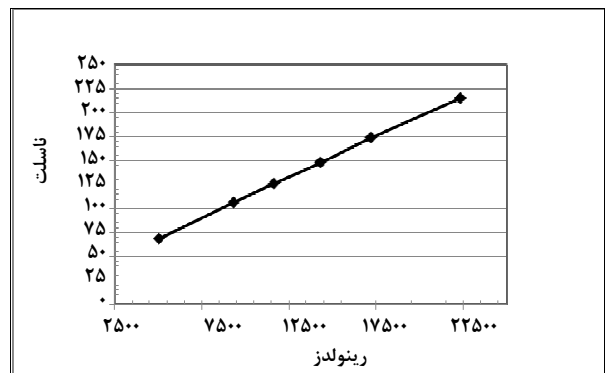
علاوه بر این، استفاده همزمان از هندسه ترکیبی میله‌ها و گردابه‌سازها باعث افزایش قابل ملاحظه در ضریب اصطکاک نسبت به کانال هموار و نیز کانالی که تنها میله‌دار است شده است. آرایش

1. Wash Up

و (۱۲) همخوانی دارد.

#### - بررسی کانالی با دو دیواره میله‌دار و گردابه ساز

تاکنون در تمامی مطالعات انجام شده و گزارش شده در مقالات قبلی، کانالی را که هر دو دیواره بالایی و پایینی آن میله‌دار شده باشد و نیز گردابه‌ساز در ورودی آن همزمان نصب شده باشد بررسی و پیشنهاد نشده است. با توجه به نتایج گزارش شده در بخش قبل بالاترین ناسلت و میزان انتقال حرارت را آرایش پایین دست برای گردابه‌ساز با زاویه حمله  $60^\circ$  داشته است و از سوی دیگر مطابقت داشتن نتایج به دست آمده از نرم‌افزار با نتایج تجربی موجود و بنابراین طرح پیشنهادی ما بر اساس این نوع آرایش صورت گرفته است. پس در این جا تحلیل‌ها برای این حالت و برای گردابه ساز با زاویه حمله  $60^\circ$  و در حالت آرایش پایین دست انجام شده و نتایج آن در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) دیده می‌شود.



شکل ۱۴- نمودار تغییرات ناسلت - رینولدز برای کانال با دو دیواره میله‌دار و گردابه‌ساز با زاویه حمله  $60^\circ$  و در آرایش نقطه پایین دست

آشفته‌گی بیشتر جریان سیال و اختلال بیشتر و شدیدتر در توسعه لایه‌های مرزی سرعت و حرارت افزایش قابل ملاحظه در ناسلت و افت اصطکاک را نشان داده است. در حقیقت، میله‌های نصب شده در کف کانال مذکور گردابه‌های قوی‌تر و جریان‌های چرخشی بیشتری را به دنبال داشته است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه اثرات استفاده همزمان از دو وسیله جانبی نصب شده در کانال مستطیلی که جریان آشفته هوا از میان آن می‌گذرد به

- [9] Promvonge, P., Eiamsa-ard, S., "Heat transfer enhancement in a tube with combined conical-nozzle inserts and swirl generator", *Energy Conversion and Management*, Vol. 47pp. 2867-2882, (2006).
- [10] Promvonge, P., Changcharoen, W., Kwankaomeng, S., Thianpong, C., "Numerical heat transfer study of turbulent square-duct flow through inline V-shaped discrete ribs", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 1392-1399, (2011)
- [11] Yang, Y. T., Hwang, Ch. W., "Numerical calculations of heat transfer and friction characteristics in rectangular ducts with slit and solid ribs mounted on one wall", *International Journal of Computation and Methodology*, Vol. 45, pp363-375,(2004).
- [12] Promvonge, P., Kwankaomeng, S., "Periodic laminar flow and heat transfer in a channel with 45° staggered V-baffles", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 841-849, (2010).
- [13] Promvonge, P., Sripattanapipat, S., Kwankaomeng, S., "Laminar periodic flow and heat transfer in square channel with 45\_ inline baffles on two opposite walls", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 49, pp. 963-975, (2010).
- [14] Promvonge, P., "Heat transfer and pressure drop in a channel with multiple 60° V-baffles", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 835-840,(2010).
- [15] Torii, K., Kwak, K. M., Nishino, K., "Heat transfer enhancement accompanying pressure-loss reduction with winglet-type vortex generators for fin-tube heat exchangers", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp. 3795-3801, (2000).
- [16] Chen, Y., Fiebig, M., Mitra, N. K., "Heat transfer enhancement of finned oval tubes with staggered punched longitudinal vortex generators", *International journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 43, pp. 417-435, (2000).
- [17] Joardar, A., Jacobi, A. M., "Heat transfer enhancement by winglet-type vortex generator arrays in compact plain-fin-and-tube heat exchangers", *International Journal of Refrigeration*, Vol. 31, pp. 87-97, (2008).
- [18] BisWas, G., Mitra, N. K., Fiebig, M., "Heat transfer enhancement in fin-tube heat exchangers by winglet type vortex generators", *International journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 283-291, (1994).
- [19] Zhu, J. X., Fiebig, M., Mitra, N. K., "Numerical investigation of turbulent flows and heat transfer in a rib-roughened channel with longitudinal vortex generators", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp. 495-501, (1995).
- [20] Promvonge, P., Khanoknaiyakarn, C., Kwankaomeng, S., Thianpong, C., "Thermal behavior in solar air heater channel fitted with combined rib and delta-winglet", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, pp.749-756, (2011).
- [21] Walters, D. K., Cokljat D., "A three equation eddy-viscosity model for Reynolds-Averaged Navier-Stokes simulations of transitional flow", *Journal of fluid engineering*, Vol. 130, pp. 401-414, (2008).
- باین دست میزان افت فشار بیشتری از حالت بالادست داشته است. همچنین با افزایش زاویه حمله میزان ضریب اصطکاک بیشتر شده است بنابراین استفاده از گردابه‌ساز با زاویه حمله کمتر و چیدمان بالادستی می‌تواند به کاهش افت فشار کمک کند.
- بطور کلی مطابق با آنالیزهای CFD، میزان افزایش در ضریب اصطکاک به عدد رینولدز، زاویه حمله و نحوه آرایش گردابه‌سازها ارتباط داشته است که با آنچه از داده‌های تجربی بدست آمده است مطابقت دارد.
- بنابراین با توجه به همخوانی قابل قبول نتایج آنالیزهای نرم‌افزاری و نتایج آزمایشگاهی در این مورد مطالعاتی، می‌توان گفت دینامیک محاسباتی سیال یک ابزار توانمند، سریع و قابل اعتماد در بررسی رفتار سیال در کانال مورد نظر بوده است.

### مراجع

- [1] Thianpong, C., Chompookham, T., Skullong, S., Promvonge, P., "Thermal characterization of turbulent flow in a channel with isosceles triangular ribs", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 712-717, (2009).
- [2] Promvonge, P., Thianpong, C., "Thermal performance assessment of turbulent channel flows over different shaped ribs", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 35, pp. 1327-1334, (2008).
- [3] Momin, A. M. E, Saini, J. S., Solanki, S. C., "Heat transfer and friction in solar air heater duct with V-shaped rib roughness on absorber plate", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp.3383-3396, (2002).
- [4] Eiamsa-ard, S., Thianpong, C., Eiamsa-ard, P., Promvonge, P., "Thermal characteristics in a heat exchanger tube fitted with dual twisted tape elements in tandem", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 39-46, (2010).
- [5] Sahu, M. M., Bhagoria, J. L., "Augmentation of heat transfer coefficient by using 90° broken transverse ribs on absorber plate of solar air heater", *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 2057-2073, (2005).
- [6] Torii, K., Kwak, K. M., Nishino, K., "Heat transfer enhancement accompanying pressure-loss reduction with winglet-type vortex generators for fin-tube heat exchangers", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 45, pp.3795-3801, (2002).
- [7] Chompookham, T., Thianpong, C., Kwankaomeng, S., Promvonge, P., "Heat transfer augmentation in a wedge-ribbed channel using winglet vortex generators", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 163-169, (2010).
- [8] Promvonge, P., Chompookham, T., Kwankaomeng, S., Thianpong, C., "Enhanced heat transfer in a triangular ribbed channel with longitudinal vortex generators", *Energy Conversion and Management*, Vol. 51, pp.1242-1249, (2010).