



خاصی از روش مکانیکی است که در سال‌های اخیر به برجستگی رسیده است و به عنوان یکی از اجزای مهم افزایش فرآیند در کاربردهایی همچون لوله گرمایی چرخان، تبخیرکن چرخان، پمپ گرمایی و غیره می‌باشد [۳]. چرخش استوانه دایره‌ای در مسیر جریان به‌طور گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است که می‌توان به مطالعات چنگ و لو [۱۵] بسکوک و همکاران [۱۶] و کلیک [۱۷] اشاره کرد. بدر و دنیس [۱۸] به بررسی همرفت اجباری لایه‌ای از یک استوانه چرخان پرداختند و نشان دادند که میدان دما به‌طور قابل توجهی تحت تاثیر سرعت چرخش استوانه قرار دارد همچنین دریافتند که با افزایش سرعت چرخش، ضریب انتقال گرما کاهش می‌یابد. هونگ تینگ و همکاران [۱۹] انتقال گرمای همرفتی از یک استوانه چرخان را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که چرخش می‌تواند منجر به یک گرداب انحرافی و توزیع غیر یکنواخت عدد ناسلت شود. اثرات یک استوانه زبر چرخان بر روی روند همرفت طبیعی توسط حسن زاده و همکاران [۲۰] بررسی شد. چرخش یک محور در یک محفظه پر از هوا توسط گوجون و همکاران [۲۱] ارزیابی شد. میدان جریان و عملکرد انتقال گرما در کانال‌های چرخشی با اشکال مختلف توسط نبلی و همکاران [۲۲] مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج آن‌ها نشان داد که چرخش تاثیر زیادی بر روی میدان جریان و عملکرد انتقال گرما دارد. مارو و همکاران [۲۳] به تقویت انتقال گرما در لوله مبادله‌کن گرمایی (که سرعت انتقال گرمای کمی دارد) بوسیله‌ی چرخش لوله پرداختند. مورانا و ایواموتو [۲۴] تاثیر چرخش دیواره داخلی را بر انتقال گرما در جریان عبوری از یک استوانه بررسی کردند و دریافتند که چرخش باعث افزایش سرعت انتقال گرما می‌شود. کاوال هریوو همکاران [۲۵] بطور آزمایشگاهی به جریان عبوری از یک استوانه بیضوی نزدیک یک صفحه صاف پرداختند. آن‌ها نشان دادند که هم‌پوشانی لایه مرزی و دنباله استوانه، بر روند تشکیل و ریزش گرداب تاثیر می‌گذارد. میخو و همکاران [۲۶] به‌طور آزمایشگاهی ریزش گردابه و انتقال گرما در اطراف یک استوانه با جریان متقاطع ضربه‌ای را بررسی کردند و نشان دادند که ضربه‌های وارد شده به جریان ورودی می‌تواند انتقال گرما را به‌طور متوسط افزایش دهد.

مطالعات کمی در خصوص اثرات چرخش تیغه بر افزایش انتقال گرما صورت گرفته است. ایزدپناه و همکاران [۲۷] اثر تیغه چرخان را بر افزایش انتقال گرمای جریان سیال نیوتنی و غیر نیوتنی از یک کانال بررسی کردند و نتیجه گرفتند که بسته به شاخص قانون قدرت، تیغه چرخان یا ثابت می‌تواند تاثیرات بیشتری در انتقال گرما داشته باشد و با افزایش شاخص مقدار انتقال گرما کاهش یابد. پورغلام و همکاران [۲۸] به‌طور عددی اثر تیغه چرخان را بر انتقال گرمای همرفتی اجباری در عدد رینولدز ۵۰ و ۱۰۰ درون یک کانال با صفحات موازی بررسی کردند. آن‌ها نتایج خود را با نتایج موجود در رابطه با کانال مستقیم و بدون حضور تیغه، کانال همراه با تیغه ثابت و کانال همراه با تیغه دوران کننده مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که در رینولدز ۵۰ تیغه دوران کننده و در رینولدز ۱۰۰ تیغه ثابت برای افزایش انتقال گرما از اهمیت بیشتری برخوردار است. حسام و همکاران [۲۹] افزایش آهنگ انتقال گرما از دیواره یک کانال عریض را با استفاده از حرکت نوسانی-دورانی یک استوانه مورد مطالعه عددی قرار دادند. در این مطالعه از میدان مغناطیسی برای ایجاد حرکت استوانه استفاده گردید

است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که آهنگ انتقال گرمای همرفتی حداکثر تا ۳۰٪ و در طول دیواره پایین دست استوانه تا ده برابر قطر استوانه می‌تواند افزایش داده شود. سوریا ونگ و همکاران [۳۰] در یک مطالعه تجربی، افزایش انتقال گرما از یک سطح مسطح با جوشش استخری آب در روی آن را به کمک قرار دادن تیغه‌های نازک دوار در نزدیکی سطح مذکور مورد بررسی قرار دادند. این تیغه‌ها از جنس مس به قطر ۳ و طول ۵ سانتی متر و به تعداد دو تا چهار عدد ساخته شده و به فاصله معینی از سطح افقی در داخل آب نصب شدند. چرخش این تیغه‌های نازک بصورت غیرفعال و در اثر برخورد حبابهای بالارونده بخار صورت می‌گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که در صورت استفاده از تعداد تیغه‌های بیشتر و نصب آن در نزدیکی سطح می‌توان افزایش انتقال گرما از سطح را افزایش داد.

از مرور مطالعات ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که به منظور افزایش انتقال گرمای همرفتی از دیواره‌های یک کانال از چرخش تیغه و یا استوانه‌هایی بهره گرفته شده است اما به منظور افزایش انتقال گرما بصورت همرفتی آزاد از سطوح مسطح که معمولا آهنگ کمتری در مقایسه با جریان درون کانال دارد مطالعات زیادی گزارش نشده است. با توجه به اهمیت و کاربرد این موضوع در مواردی از قبیل خنک کاری سطوح الکترونیکی، ورقه‌های فلزی و شیشه همچنین خشک نمودن ورقه‌های کاغذ و پارچه در مطالعه حاضر به بررسی جریان و آهنگ انتقال گرما از یک صفحه مسطح گرم پرداخته شده است که در قسمت بالای آن یک تیغه نازک در حال دوران است. امتداد تیغه عمود بر صفحه بوده و حرکت دورانی آن باعث تغییر آهنگ انتقال گرما از صفحه می‌شود. تاثیر پارامترهای مختلف از قبیل ابعاد و سرعت دورانی تیغه در افزایش انتقال گرما از صفحه همچنین جزئیات میدان‌های جریان و دما که بصورت پریدیک ایجاد می‌شوند بطور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- هندسه مورد مطالعه

به منظور انجام تحقیق حاضر، صفحه‌ای مسطح بطول  $L$  در نظر گرفته شد. در بالای این صفحه، تیغه‌ای به طول  $D$  بطور عمود بر صفحه مذکور که انتهای تیغه به اندازه  $d$  از صفحه فاصله داشت منظور گردید. مرکز دوران تیغه در بالای صفحه و در قسمت مرکزی لحاظ شده و یک دامنه محاسباتی دو بعدی با طول و ارتفاع یکسان تشکیل گردید. طول تیغه به عنوان پارامتر هندسی اصلی برابر  $3/8$  سانتی متر و ضخامت آن برابر ۱ میلی متر فرض گردید. مقادیر  $L/D$  و  $d/D$  به ترتیب در محدوده ۴-۲ و  $0/4-0/1$  تغییر داده شده و تاثیر آنها روی نتایج اصلی بصورت توزیع عدد ناسلت روی صفحه بررسی شدند. با فرض اینکه این ابعاد در مقایسه با بعد عمود بر صفحه کوچکتر می‌باشند از اثرات لبه‌ها در دو انتها صرف‌نظر شده و مسئله بصورت دو بعدی تحلیل گردید. به منظور بررسی اثر حرکت دورانی تیغه از روش مش لغزنده استفاده گردید. برای این منظور قسمتی از دامنه دو بعدی به شکل یک دایره هم مرکز با مستطیل و به شعاع اندکی بزرگتر از طول تیغه جدا شد تا در محاسبات عددی همراه با تیغه بصورت مش

جملات وزشی و همرفتی با روش جریان مخالف<sup>۲</sup> مرتبه دوم و جملات پخش با روش مرکزی و مرتبه دوم تقریب شدند. عبارتهای دارای مشتقات سرعت و دما از روش گرین-گوس در حجم کوچک شبکه‌ها تقریب شده و ارتباط سرعت و فشار با استفاده از الگوریتم SIMPLE برقرار گردید. دقت همگرایی بصورت باقی مانده‌های کمتر از  $10^{-4}$  در معادلات بقا در این قسمت از محاسبات منظور گردید. برای شبیه سازی حرکت دورانی تیغه، مسیر حرکت به گام‌هایی با فواصل زمانی برابر تقسیم شده و برای هر گام زمانی، حل عددی به کمک نرم افزار Fluent در حالت گذرا انجام گردید. نتایج حل عددی در پایان هر گام زمانی به عنوان شرایط اولیه‌ی حل، در گام زمانی بعدی مورد استفاده قرار گرفته و با تکرار این روش، دوران کامل تیغه شبیه سازی شد. سرعت دوران تیغه با معادله شماره (۵) بیان می‌شود.

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

در این رابطه T دوره تناوب دوران تیغه می باشد. به عنوان مثال با لحاظ نمودن ۰/۱ ثانیه برای این دوره تناوب، سرعت دورانی تیغه عملاً برابر  $20\pi$  رادیان بر ثانیه حاصل می‌گردد. با استفاده از این پارامتر، عدد رینولدز دورانی تیغه بصورت زیر تعریف شده است:

$$Re_D = \frac{\omega D^2}{\nu} \quad (6)$$

که در آن  $\nu$  لزجت سینماتیکی هوا در دمای متوسط صفحه و هوای اطراف می باشد. لازم به ذکر است که ضریب انتقال گرمای همرفتی نیز با استفاده از همین پارامتر هندسی بی بعد شده و بصورت عدد ناسلت به فرم زیر بیان گردید:

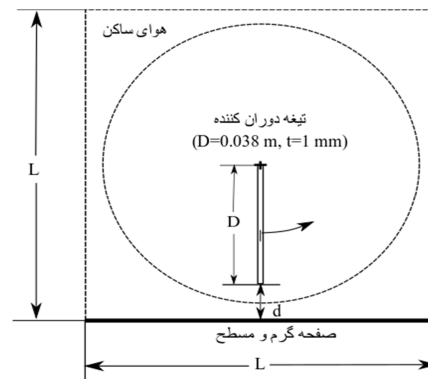
$$Nu_D = \frac{hD}{k} \quad (7)$$

#### ۴- شرایط مرزی، مش بندی و اعتبار سنجی روش

##### عددی

قسمت پایین دامنه محاسباتی به صورت دیوار گرم با دمای ثابت (۳۲۰ کلوین) در نظر گرفته شد و سه ضلع دیگر آن بصورت خروجی با فشار ثابت اتمسفر در نظر گرفته شدند. سطوح بیرونی تیغه به عنوان یک جسم صلب به صورت دیواره با شرط عدم لغزش برای مولفه‌های سرعت و آدیاباتیک برای انتقال گرما در نظر گرفته شد. مرز دایره ای شکل قرار گرفته در بین دو قسمت احاطه کننده تیغه و بیرون از آن از دامنه محاسباتی بصورت شرط مرزی رابط<sup>۳</sup> در بین این دو قسمت در نظر گرفته شد. سیال درون دامنه محاسباتی هوا با دمای ۳۰۰ کلوین با فشار استاندارد و به صورت ساکن در ابتدا فرض گردید. خواص فیزیکی هوا نیز در دمای متوسط صفحه گرم و هوای اطراف برآورد شد. به منظور افزایش دقت در محاسبه مقادیر آهنگ انتقال گرمای همرفتی موضعی، از مش ریز در مجاورت صفحه پایینی استفاده گردید. ابعاد مش در جهت عمود بر صفحه با ضریب ۱/۲ افزایش یافت در حالی که اولین خط مش از صفحه پایینی به اندازه ۰/۲ میلی متر فاصله داشت. برای انجام محاسبات سریع و کاهش تعداد نقاط شبکه بندی به یک

لغزنده<sup>۱</sup> عمل کند. هندسه‌ی مورد مطالعه و ناحیه حل در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- طرحواره هندسه مورد مطالعه

#### ۳- معادلات حاکم و روش حل

در این مطالعه برای بررسی جریان و توزیع دمای ایجاد شده در بالای یک صفحه مسطح که در اثر دوران یک تیغه بوجود می آید، معادلات حاکم شامل معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی در حالت دوبعدی، لایه‌ای و گذرا بصورت ذیل در نظر گرفته شدند [۳۱].

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (2)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (3)$$

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = k \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \quad (4)$$

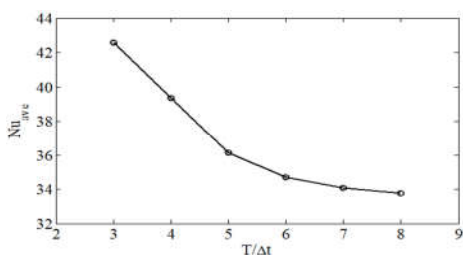
که در آن u و v به ترتیب سرعت در راستای x و y می باشد. T دما و P فشار بوده و  $C_p$  و  $k$  و  $\mu$  به ترتیب گرمای ویژه در فشار ثابت، رسانایی گرمایی و لزجت دینامیکی هوا به عنوان سیال کارکن می‌باشند. در معادله (۳) با لحاظ نمودن این فرض که نیروی شناوری ناشی از تغییرات دما در مقایسه با نیروی اینرسی ناشی از حرکت اجباری سیال ناچیز می باشد از اثرات گرانش صرف نظر گردید. طبیعت معادلات اساسی فوق به گونه‌ای است که می‌توان با انتگرال گیری کلی روی حجم کنترل‌ها، مجهولات مسئله را بدست آورد و به تحلیل جریان پرداخت. از آنجایی که در اغلب موارد این انتگرال گیری به صورت تحلیلی مشکل می‌باشد، لذا از روش عددی استفاده می‌گردد.

برای انجام تحلیل عددی از نرم افزار Fluent استفاده گردید. برای این منظور معادلات بقای جرم، اندازه حرکت و انرژی در حالت گذرا و دو بعدی و لایه‌ای به شکلی که قبلاً بیان گردید در نظر گرفته شدند. روش حل به صورت غیرصریح بوده و برای تقریب جملات مربوط به حالت گذرا از مرتبه اول استفاده گردید. گرادیان فشار با روش استاندارد،

<sup>2</sup> upwind  
<sup>3</sup> Interface

<sup>1</sup> Sliding mesh

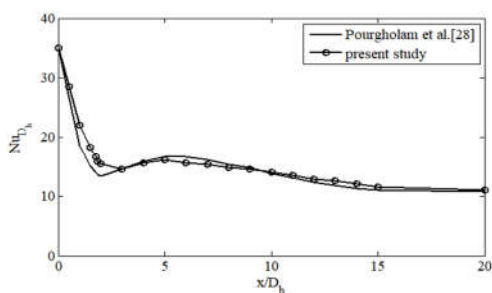
نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است. با توجه به این شکل، مقدار گام زمانی برابر یک هشتم دوره تناوب به عنوان یک مقدار مناسب انتخاب گردید تا در ادامه تحلیل عددی از آن استفاده شود.



شکل ۴- تغییرات عدد ناسلت متوسط در گام‌های زمانی مختلف  
 $Re=5465, d/D=0.105$

#### ۲-۴- اعتبار سنجی روش عددی

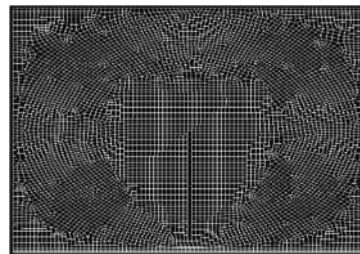
با عنایت به این مطلب که مطالعه مشابهی با مطالعه حاضر در بین مقالات منتشر شده در این زمینه توسط مولف یافت نشد به منظور ارزیابی دقت روش عددی استفاده شده از نتایج مطالعه پورغلام و همکاران [۲۸] استفاده گردید. در مطالعه مذکور جریان لایه‌ای سیال در بین دو صفحه موازی در نظر گرفته شده و یک تیغه دورانی در مرکز کانال باعث تغییر در میدان جریان و در نتیجه در توزیع آهنگ انتقال گرما شده است. عدد رینولدز جریان بر اساس قطر هیدرولیکی کانال عریض برابر ۵۰ در نظر گرفته شده در حالی که تیغه نازک به طول یک ششم قطر هیدرولیکی کانال مذکور با سرعت ۳۰۰ دور در دقیقه حول نقطه‌ای در وسط کانال در حال دوران بوده است. دوران این تیغه، توزیع ضریب انتقال گرمای همرفتی را در حوالی موقعیت تیغه متاثر نموده است. با استفاده از قطر هیدرولیکی کانال به عنوان پارامتر هندسی و مقدار ثابت برای رسانایی گرمایی هوا، ضریب انتقال گرمای همرفتی به صورت عدد بی بعد ناسلت بیان شده است. روش عددی حاضر یکبار در شرایطی کاملاً مشابه با مطالعه مذکور اجرا شده و نتایج بدست آمده به همراه نتایج مطالعه مذکور در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵- تغییرات عدد ناسلت در دیواره یک کانال عریض بر اثر دوران تیغه در مرکز کانال ( $Re_{Dh} = 50, D/D_h = 1/6$ )

بر اساس این نمودار می‌توان اظهار نمود که دقت روش عددی استفاده شده در مطالعه حاضر قابل قبول می‌باشد.

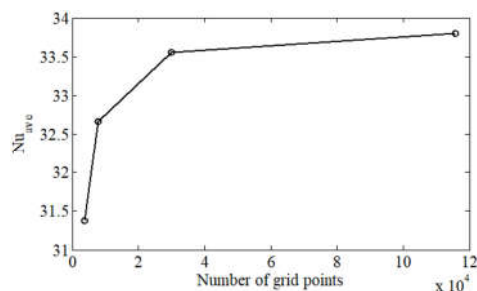
میزان بهینه، پس از چند ردیف شبکه بندی در مجاورت صفحه گرم، ابعاد بقیه مش‌ها در داخل دامنه به مقدار معین و ثابتی افزایش داده شد که در بخش بررسی استقلال جواب از مش بندی مقادیر مربوط به آن بیان شده است. در شکل ۲ یک نمونه از مش بندی انجام شده با استفاده از نرم افزار Gambit نشان داده شده است.



شکل ۲- نمونه ای از مش بندی انجام شده با استفاده از نرم افزار Gambit

#### ۴-۱- استقلال جواب از گام زمانی و ابعاد مش

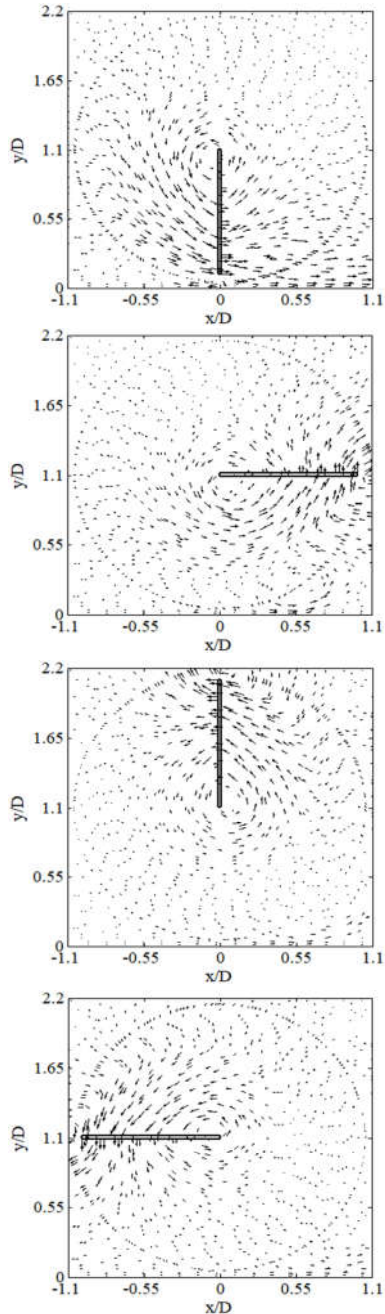
به منظور انتخاب یک شبکه بندی مناسب، چندین شبکه بندی با ابعاد مختلف انتخاب گردید و به ازای هر کدام مقدار عدد ناسلت متوسط روی سطح پس از انجام تحلیل عددی محاسبه گردید. در هر کدام از شبکه بندی‌ها علاوه بر ایجاد مش لایه مرزی در مجاورت صفحه گرم، اندازه مش برای شبکه بندی در ناحیه دورتر از صفحه افقی، با اندازه‌های  $1/5 - 1$  و  $0.5 - 0.25$  میلی متر انتخاب گردید. در شکل ۳ تغییرات عدد ناسلت متوسط در روی صفحه به ازای تعداد نقاط مش بندی کل دامنه محاسباتی نشان داده شده است. با توجه به این نتایج می‌توان اظهار نمود که شبکه بندی با ابعاد  $0.5$  میلی متر برای قسمت اصلی دامنه محاسباتی می‌تواند مقدار مناسبی باشد لذا در ادامه محاسبات از این شبکه بندی استفاده گردید.



شکل ۳- تغییرات عدد ناسلت متوسط برای شبکه با ابعاد مختلف  
 $Re=5465, d/D=0.105$

در شبیه سازی ناپایا می‌بایست بررسی استقلال نتایج از اندازه گام زمانی نیز صورت گیرد. انتخاب یک گام زمانی مناسب طوری که با کوچک تر شدن آن تغییر زیادی در پاسخ مسئله دیده نشود و همچنین زمان حل نیز در حد قابل قبولی باشد، می‌تواند به نوبه‌ی خود مهم و تاثیرگذار باشد. در این بررسی گام زمانی طبق شکل ۴، از مقدار یک سوم دوره تناوب شروع شده و به مقدار یک هشتم آن کاهش داده شد. در هر مورد عدد ناسلت متوسط روی صفحه گرم محاسبه گردید. این

دوران تیغه و در موقعیت‌های بعدی شعاع چرخش این حرکت گردایی بیشتر شده و از شدت آن کاسته می‌شود. جریان ایجاد شده در سمت چپ و در مجاورت صفحه نیز با دوران تیغه بطور مرتب ضعیف تر شده است.

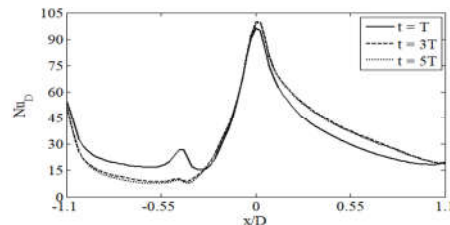


شکل ۷- میدان جریان در یک دوره تناوب در موقعیت‌های مختلف از دوران تیغه-الف)  $\theta=0^\circ$  (ب)  $\theta=90^\circ$  (ج)  $\theta=180^\circ$  (د)  $\theta=270^\circ$   
 $Re=5465, d/D=0.105$

متطابق با این میدان جریان، آهنگ انتقال گرمای همرفتی که

## ۵- بیان نتایج

در تحلیل عددی حاضر که بصورت گذرا انجام شده است شرایط اولیه برای هوای درون دامنه محاسباتی شرایط سکون با دمای ۳۰۰ کلوین در نظر گرفته شد. بر اساس نتایج بدست آمده، با دوران تیغه این شرایط اولیه به تدریج مستهلک شده و پس از چند بار چرخش کامل تیغه، میدان‌های دما و سرعت بصورت کاملاً تناوبی تغییر می‌کنند. در شکل ۶ توزیع عدد ناسلت روی صفحه در پایان چند دوره تناوب نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد که اثر شرایط سکون اولیه پس از سپری شدن پنج تا شش دوره تناوب تا حدود زیادی از بین رفته و تغییرات کاملاً تناوبی برای دوره‌های تناوب بعدی بدست آورده می‌شود.



شکل ۶- توزیع عدد ناسلت در انتهای دوره تناوب اول، سوم و پنجم  
 $Re=5465, d/D=0.105$

از آنجا که آهنگ انتقال گرما از صفحه گرم، ریشه در میدان جریان توسعه یافته در مجاورت صفحه دارد ابتدا مشخصات میدان جریان در طول یک دوره تناوب مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور توزیع سرعت جریان، درون دامنه محاسباتی در فواصل مساوی و برابر یک چهارم دوره تناوب ذخیره گردید. در شکل ۷ این توزیع سرعت‌ها در تعداد محدودی از نقاط درون دامنه محاسباتی به منظور ایجاد وضوح بیشتر نشان داده شده است. در تمامی این شکل‌ها اندازه سرعت در نقاط مختلف با استفاده از سرعت انتهای تیغه دوران کننده که برابر ۲/۳۹ متر بر ثانیه می‌باشد و برابر سرعت بیشینه در درون دامنه محاسباتی می‌باشد بی‌بعد شده است. بر اساس این تصاویر، زمانی که تیغه در شروع یک دوره تناوب از موقعیت  $\theta=0^\circ$  در جهت خلاف عقربه‌های ساعت از موقعیت قائم عبور می‌کند توده‌ای بزرگ از سیال پشت سر تیغه و موافق با آن در حرکت می‌باشد در حالی که در همین طرف، جریان مخالفی در مجاورت صفحه و در جهت خلاف محور X شکل گرفته است. این جریان چندان قدرتمند نبوده بطوری که در فاصله کوتاهی از موقعیت  $x/D=0$  مستهلک شده است. در مقابل، جریان ورودی ضعیفی از مرزهای سمت چپ به موازات صفحه به سمت مرکز مشاهده می‌گردد. همچنین، جریان زیادی از سیال از قسمت جلوی تیغه به موازات صفحه گرم حرکت کرده و از مرزهای سمت راست خارج می‌شود.

زمانی که تیغه در ضمن حرکت خود در موقعیت‌های  $\theta=90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$  قرار می‌گیرد. جریان قابل توجهی تنها در مجاورت تیغه در کل دامنه محاسباتی مشهود می‌باشد و در هر کدام از این حالت‌ها خروج جریان از مرزهای فشار ثابت از دو طرف انتهای تیغه بسته به موقعیت آن شکل می‌گیرد. در مجاورت صفحه افقی و در موقعیت  $\theta=90^\circ$  در نیمه سمت راست یک جریان گردایی مشاهده می‌شود که ضمن

بصورت توزیع عدد ناسلت در شکل ۸ نشان داده شده است در موقعیت  $\theta = 0^\circ$  بیانگر مقدار بیشینه‌ای در نزدیکی مرکز می‌باشد. آهنگ انتقال گرما در نیمه سمت راست به دلیل وجود جریان شدید به موازات صفحه در آن سمت نسبت به سمت دیگر بسیار بیشتر می‌باشد. در سمت چپ صفحه، جریان ورودی از مرزهای این سمت در ابتدا به دلیل ضخامت ناچیز لایه مرزی گرمایی، آهنگ انتقال گرمای بیشتری ایجاد نموده است. اما به دلیل ضعیف بودن آهنگ این جریان، انتقال گرمای همرفتی در فاصله کوتاهی از مرز سمت چپ به مقدار زیادی کاهش یافته است. همچنین در محل برخورد دو جریان با جهت های مخالف هم، که در حدود  $x/D = -0.5$  اتفاق می افتد برآمدگی کوچکی در توزیع انتقال گرما قابل مشاهده است.

در سه موقعیت دیگر از دوران تیغه و مطابق با میدان جریان‌های ایجاد شده، توزیع عدد ناسلت در روی صفحه افقی از الگوی مشابهی تبعیت می‌کند که در آن آهنگ انتقال گرما در نیمه راست صفحه گسترده‌تری نسبت به نیمه سمت چپ دارد در حالی که ضمن دور شدن تیغه از موقعیت  $\theta = 0^\circ$  از آهنگ انتقال گرما به طور مرتب کاسته می‌شود. وجود جریان‌های برگشتی در مجاورت مرزهای سمت راست و چپ نیز به نوبه خود به افزایش انتقال گرما در آن نواحی منجر شده است.

#### ۵-۱- بررسی تاثیر پارامترهای مختلف در توزیع عدد ناسلت

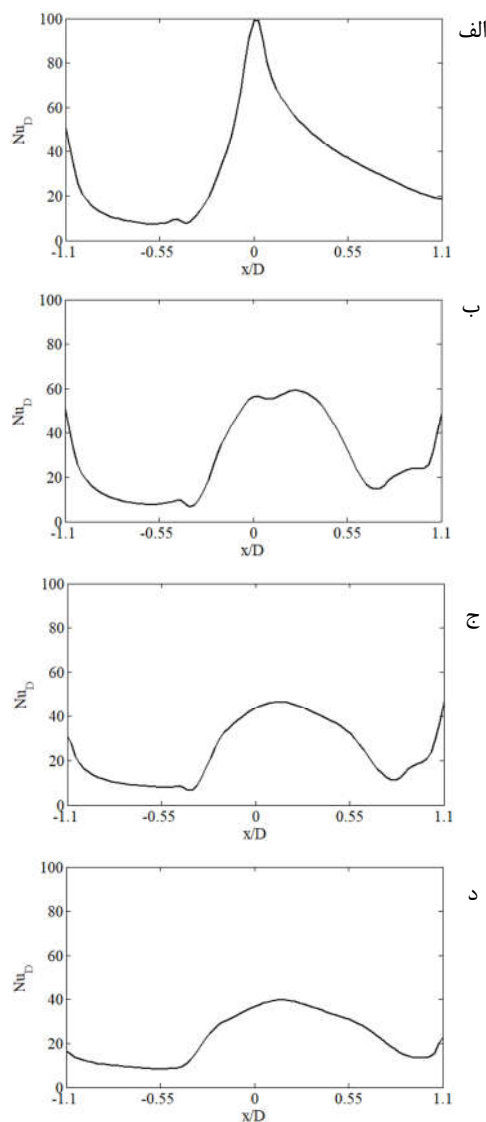
در قسمت بیان نتایج مشخص گردید که توزیع انتقال گرما در روی صفحه افقی مورد بحث در اثر دوران تیغه بصورت تناوبی ایجاد می‌شود. ضریب انتقال گرمایی همرفتی در روی صفحه برای چنین هندسه‌ای می‌تواند تابعی از پارامترهای مختلف شامل رسانایی گرمایی و لزجت سینماتیکی سیال کارکن (که در این بحث هوا در نظر گرفته شد)، طول تیغه نازک و سرعت دورانی آن، فاصله انتهایی تیغه در حالت قائم از صفحه افقی و نیز موقعیت نقطه مورد نظر در روی صفحه باشد. لازم به ذکر است که بر اساس بررسی های انجام گرفته، تاثیر طول و ارتفاع دامنه محاسباتی بر روی نتایج بدست آمده در قسمت مرکزی از صفحه افقی قابل نظر بود و تنها افزایش عدد ناسلت در نزدیکی مرزهای دو طرف که بر اثر جریان های برگشتی از این مرزها صورت می‌گیرد مجدداً به نزدیکی مرزهای جدید در دو طرف دامنه منتقل می‌شدند. لذا از اثر ناچیز این پارامترهای هندسی صرف نظر گردید. لذا ضریب انتقال گرمای همرفتی می‌تواند بصورت زیر بیان شود:

$$h = f(v, k, D, d, x, \omega) \quad (6)$$

با استفاده از آنالیز ابعادی می‌توان عدد ناسلت را بر اساس رابطه ۶ بصورت زیر نوشت:

$$Nu_D = f(Re_D, d/D, x/D) \quad (7)$$

به منظور بررسی تاثیر تغییرات عدد رینولدز دورانی بر روی توزیع عدد ناسلت، از تغییر دوره تناوب تیغه در محدوده زمانی  $0.4 - 0.1$  ثانیه استفاده گردید. بر اساس زمان دوره تناوب، سرعت دورانی تیغه تعیین شده و بر اساس آن عدد رینولدز دورانی محاسبه گردید. با توجه به این واقعیت که آهنگ انتقال گرما در زمان عبور تیغه از مقابل صفحه در مقایسه با سایر زمانها از شدت بیشتری برخوردار می‌باشد در شکل ۹ تغییرات عدد ناسلت در چنین وضعیتی به ازای اعداد رینولدز دورانی مختلف نشان داده شده‌است. این شکل نشان می‌دهد که توزیع عدد ناسلت در روی صفحه از الگوی مشابهی پیروی می‌کند که در آن مقدار عدد ناسلت در موقعیت نزدیک به مرکز صفحه بیشینه بوده و در نیمه راست به دلیل جهت چرخش تیغه که در خلاف عقربه‌های ساعت در نظر گرفته شده‌است در مقایسه با نیمه چپ از شدت و وسعت بیشتری برخوردار است. با افزایش عدد رینولدز دورانی، عدد ناسلت در همه نقاط روی صفحه و مخصوصاً در نیمه راست آن افزایش یافته است که دلیل آن ایجاد جریان قوی تر به دلیل سرعت بالای تیغه دورانی در این ناحیه می‌باشد.



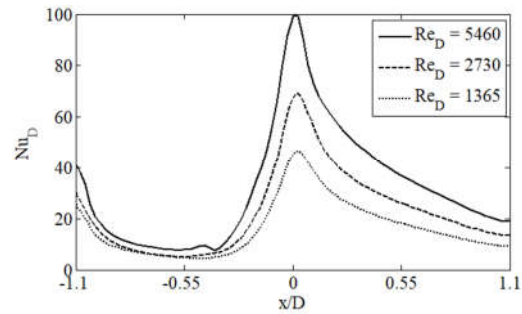
شکل ۸- توزیع عدد ناسلت در یک دوره تناوب در موقعیت‌های مختلف از دوران تیغه-الف)  $\theta = 0^\circ$  (ب)  $\theta = 90^\circ$  (ج)  $\theta = 180^\circ$  (د)  $\theta = 270^\circ$   
 $Re=5465, d/D=0.105$



کاهش در مرکز صفحه بیش از ۵۰٪ محاسبه شده است. با افزایش عدد رینولدز دورانی تیغه، آهنگ انتقال گرما از صفحه به مقدار قابل توجهی خصوصاً در سمت مقابل تیغه افزایش یافته است. افزایش مقدار  $d/D$  هر چند باعث کاهش آهنگ انتقال گرما از صفحه می‌شود اما تاثیر آن در توزیع عدد ناسلت به استثناء ناحیه کوچکی در ناحیه مرکزی صفحه، در سایر قسمت‌ها خیلی قابل توجه نمی‌باشد.

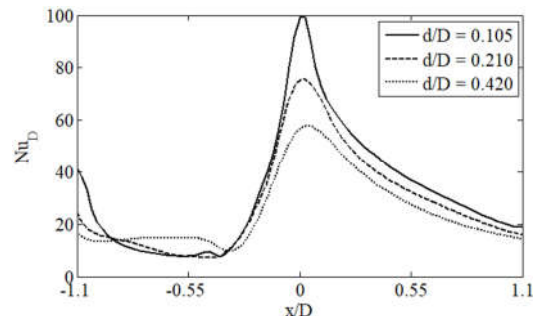
## ۷- مراجع

- [1] Rahman A., Tafti D., Characterization of Heat Transfer Enhancement for an Oscillating Flat Plate-Fin. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 147, pp. 11900, 2019.
- [2] Agyenim F., Eames P., Smyth M., A Comparison of Heat Transfer Enhancement in a Medium Temperature Thermal Energy Storage Heat Exchanger Using Fins. *Sol Energy*, Vol. 83, No.9, pp. 1509–1520, 2009.
- [3] Systems HR., Reay D., Bay W., Review Paper Heat Transfer Enhancement - -A Review of Techniques and Their Possible Impact on Energy Efficiency in The U.K . Vol. 1, No.1, pp. 1-40, 1991.
- [4] Garoosi F., Hoseininejad F., Rashidi MM., Numerical Study of Heat Transfer Performance of Nanofluids in a Heat Exchanger. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 105, pp. 436–455, 2016.
- [5] Nagarani N., Mayilsamy K., Murugesan A., Kumar GS., Review of Utilization of Extended Surfaces in Heat Transfer Problems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 29, pp. 604–613, 2013.
- [6] Gawande VB., Dhoble AS., Zode DB., Effect of Roughness Geometries on Heat Transfer Enhancement in Solar Thermal Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 32, pp. 347–378, 2014.
- [7] Sheikholeslami M., Gorji-Bandpy M., Ganji DD., Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, pp. 444–469, 2015.
- [8] Wu JM., Zhao J., A Review of Nanofluid Heat Transfer and Critical Heat Flux Enhancement—Research Gap to Engineering Application. *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 66, pp. 13–24, 2013.
- [9] Shi J., Hu J., Schafer SR., Chen C-L., Numerical Study of Heat Transfer Enhancement of Channel Via Vortex-Induced Vibration. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 70, pp. 838–845, 2014.
- [10] Tang J., Hu X., Yu Y., Electric Field Effect on The Heat Transfer Enhancement in a Vertical Rectangular Microgrooves Heat Sink. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 150, pp. 106222, 2020.
- [11] Jafar AB., Shafie S., Ullah I., MHD Radiative Nanofluid Flow Induced by a Nonlinear Stretching Sheet in a Porous Medium. *Heliyon*, Vol. 6, No. 6, pp. e04201, 2020.
- [12] Ashafa S., Ahmed A.A., Sakir A.A., Analytical Solution of The Effect of MHD Inclination and Unsteady Heat Transfer in a Laminar, Transition and Turbulent Flow of a Basic Gaseous Micro-Flow Past a Vertically Moving Oscillating Plate. *merican Journal of Engineering & Natural Sciences (AJENS)*, Vol. 1, pp. 29, 2017.
- [13] Ellahi R., Alamri S.Z., Basit A., Majeed A., Effects of MHD and Slip on Heat Transfer Boundary Layer Flow Over a Moving Plate Based on Specific Entropy Generation. *Journal of Taibah University for Science*, Vol. 12, No.4, pp. 476–482, 2018.
- [14] Rahimi M., Soran RA., Slot Jet Impingement Heat Transfer for The Cases of Moving Plate and Moving Nozzle. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Vol. 38, No.8, pp. 2651–2659, 2016.
- [15] Cheng M., Luo L., Characteristics of Two-Dimensional



شکل ۹- توزیع عدد ناسلت به ازای اعداد رینولدز مختلف  $d/D = 0.105$

به منظور بررسی تاثیر پارامتر هندسی  $d/D$  فاصله انتهای تیغه از صفحه افقی به ازای مقدار ثابت  $D$  تغییر داده شد بطوریکه مقدار این پارامتر بی بعد در محدوده  $0.105 - 0.420$  تغییر کند. به ازای سه حالت از این مقادیر تغییرات عدد ناسلت در شکل ۱۰ نشان داده شده است. این شکل نشان می‌دهد که با افزایش مقدار  $d/D$  به ازای عدد رینولدز دورانی ثابت و معین، عدد ناسلت در روی صفحه هدف به ویژه در نیمه راست کاهش می‌یابد. اما تغییرات در نیمه سمت چپ از الگوی معینی پیروی نمی‌کند البته مقدار عدد ناسلت در این سمت و در فواصل دورتر از مرکز صفحه، بسیار کمتر از سایر نواحی می‌باشد که دلیل وجود جریان خیلی ضعیف در این نواحی و در مجاورت صفحه خواهد بود.



شکل ۱۰- توزیع عدد ناسلت به ازای مقادیر مختلف  $d/D$ ،  $Re_D = 5460$

## ۶- نتیجه گیری

در این تحقیق، انتقال گرمای همرفتی از یک صفحه مسطح تحت تاثیر دوران یک تیغه نازک در مجاورت صفحه به صورت عددی بررسی شده است. بر اساس نتایج حاصله، انتقال گرمای همرفتی از صفحه بسته به موقعیت دورانی تیغه دارای توزیع متفاوتی در هر لحظه از یک دوره تناوب می‌باشد. با عبور تیغه از موقعیت قائم و از مجاورت صفحه، آهنگ انتقال گرما در ناحیه مرکزی صفحه افزایش می‌یابد اما بسته به جهت دوران تیغه، در قسمت پشت تیغه آهنگ انتقال گرما در مقایسه با قسمت جلوی آن به طور محسوسی کمتر است. همچنین در حالی که در سمت مقابل تیغه تا فاصله حدود  $x/D = 1$  انتقال گرمای محسوسی از صفحه مشاهده می‌شود در سمت پشت تیغه چنین ناحیه ای فقط تا حدود  $x/D = -0.2$  مشهود است. آهنگ انتقال گرما از صفحه، با دور شدن تیغه از مقابل صفحه بطور مرتب کاهش می‌یابد و این

- Flow Around a Rotating Circular Cylinder Near a Plane Wall. *Physics of Fluids*, Vol. 19, No.6, pp. 063601, 2007.
- [16] Beskok A., Raisee M., Celik B., et al, Heat Transfer Enhancement in a Straight Channel Via a Rotationally Oscillating Adiabatic Cylinder. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 58, pp. 61–69, 2012.
- [17] Celik B., Raisee M., Beskok A., Heat Transfer Enhancement in a Slot Channel Via a Transversely Oscillating Adiabatic Circular Cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 53, No.4, pp. 626-634, 2010.
- [18] Badr HM., Dennis SCR., Laminar Forced Convection From a Rotating Cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 28, No.1, pp. 253–264, 1985.
- [19] Ma H., Zhou W., Lu X., et al, Investigation on The Air Flow and Heat Transfer From a Horizontal Rotating Cylinder. *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 95, pp. 21–28, 2015.
- [20] Hassanzadeh R., Rahimi R., Khosravipour A., et al, Analysis of Natural Convection in a Square Cavity in The Presence of a Rotating Cylinder With a Specific Number of Roughness Components. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 116, 2020.
- [21] Yu G., Lian Z., Gan W., Ji J., Numerical Investigation on The Effect of Harmonic Horizontal-Axis Rotation on Laminar Natural Convection in an Air-Filled Enclosure. *International Journal of Heat and Mass Transf*, Vol. 152, pp. 119533, 2020.
- [22] Al-Zurfi N., Alhusseney A., Nasser A., Effect of Rotation on Forced Convection in Wavy Wall Channels. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 149, pp. 119177, 2020.
- [23] Ali MAM., El-Maghlany WM., Eldrainy YA., Attia A., Heat Transfer Enhancement of Double Pipe Heat Exchanger Using Rotating of Variable Eccentricity Inner Pipe. *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 57, No.4, pp. 3709–3725, 2018.
- [24] Murata A., Iwamoto K., Heat and Fluid Flow in Cylindrical and Conical Annular Flow-Passages with Through Flow and Inner-Wall Rotation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 32, No.2, pp. 378–391, 2011.
- [25] Cavalheiro M.G., Woiski E.R., and Del Rio Vieira E., Experimental Study of Flow Past an Elliptic Cylinder Near a Flat Plate. *Conference At Belem do Para*, Berzil, 2014.
- [26] Mikheev NI., Molochnikov VM., Mikheev AN., Dushina OA., Hydrodynamics and Heat transfer of Pulsating Flow Around a cylinder. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 109, pp. 254–265, 2017.
- [27] Izadpanah E., Babaie Rabiee M., Sadeghi H., Talebi S., Effect of Rotating and Oscillating Blade on The Heat Transfer Enhancement of Non-Newtonian Fluid Flow in a Channel. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 113, pp. 1277–1282, 2017.
- [28] Pourgholam M., Izadpanah E., Motamedi R., Habibi SE., Convective Heat Transfer Enhancement in a Parallel Plate Channel By Means of Rotating or Oscillating Blade in The Angular Direction. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 78, pp. 248–257, 2015.
- [29] Hussam WK., Thompson MC., Sheard GJ., Enhancing Heat Transfer in a High Hartmann Number Magnetohydrodynamic Channel Flow Via Torsional Oscillation of a Cylindrical Obstacle. *Physics of Fluids*, Vol. 24, No.11, pp. 113601, 2012.
- [30] Suriyawong A., Saisorn S., Wongwises S., Pool Boiling Heat Transfer Enhancement of Distilled Water With Passive Rotating Blades Installed Above The Heating Surface. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 87, pp. 109–116, 2017.
- [31] Sarhan AR., Karim MR., Kadhim ZK., Naser J., Experimental Investigation on The Effect of Vertical