



بررسی عددی کاهش نیروی درگ جریان بوسیله سطوح ریبلیتی در هندسه و ابعاد مختلف

حسین صفری^{۱*}، علیرضا رئوف پناه^۲

* ۱- دانشجوی، گروه مهندسی مکانیک، واحد یادگار امام (ره)، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. hossfri.unive@gmail.com

۲- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد یادگار امام (ره)، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۰۳، بازنگری: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۰۵

چکیده

امروزه، با توجه به کم بودن منابع انرژی، صنایع توجه بیشتری به مساله بهره وری انرژی نشان می دهند. در بخش های کاهش مصرف انرژی و افزایش سرعت کشتی ها و زیردریایی ها، بحث مقاومت اصطکاکی سطح نقش بسیار مهمی دارد. سطوح ریبلیتی، یک روش منفعل هستند که توانایی کاهش درگ (پسا) سطوح را دارا می باشند. این مطالعه، به بررسی عددی کاهش پسای ۴ هندسه مختلف و جدید ریبلیتی در ابعاد و سرعت های مختلف می پردازد. جریان در محدوده رژیم جریان آرام بوده و ریبلیت ها به صورت عمود بر جهت جریان قرار گرفته اند. همچنین توزیع تنش برشی و فشار استاتیکی بر روی سطوح ریبلیتی مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج نشان دادند که هندسه های ۱ و ۴ میزان کاهش پسای بالاتری را (در حدود ۱۰/۷٪ و ۱۰/۲٪) نسبت به هندسه های ۲ و ۳ (در حدود ۷/۷٪ و ۴/۴٪) به ترتیب، ارائه می دهند. برخلاف هندسه های ۱ و ۴، هندسه های ۲ و ۳ نیروی پسای اصطکاکی بالاتری را نسبت به نیروی پسای فشاری بر روی سطوح خود دارند. همچنین مطالعه تغییرات سرعت نشان داد که هندسه های ۱ و ۴ کاهش درگ بالاتری را به ترتیب در هر کدام از سرعت ها دارند.

* hossfri.unive@gmail.com عهده دار مکاتبات:

کلمات کلیدی: ریبلیت، کاهش درگ، شبیه سازی عددی.

۱- مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون مصرف سوخت های فسیلی در اثر رشد اقتصاد و از طرفی محدودیت این منابع و افزایش آلاینده های زیست محیطی، استفاده از روش هایی برای کاهش مصرف انرژی توسط صنایعی از جمله صنایع هوانوردی و دریانوردی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان یک بخش مهم از صنعت حمل و نقل، بخش های ناوبری و کشتیرانی مقدار بسیار زیادی از سوخت را مصرف می کنند. مقاومت بدنه کشتی های دریایی شامل پسای فشاری، اصطکاک پوسته ای (ویسکوز) و مقاومت تولید موج می باشد. مقاومت اصطکاکی کشتی های سرعت بالا برابر ۴۰ تا ۵۰ درصد مقاومت کل آنها می باشد در حالی که برای کشتی های سرعت پایین این عدد بین ۷۰٪ تا ۸۰٪ می باشد. ریبلیت ها میکروشیارهای طولی، عرضی و همچنین زاویه دار هستند که بر روی سطح دیواره شکل دهی شده و دو هدف کاهش نیروی پسای جریان عبوری از روی

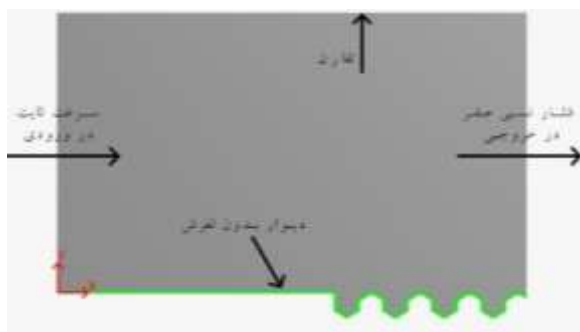
نحوه استناد به این مقاله: حسین صفری، علیرضا رئوف پناه. بررسی عددی کاهش نیروی درگ جریان بوسیله سطوح ریبلیتی در هندسه و ابعاد مختلف. مهندسی مکانیک تبدیل انرژی. ۱۴۰۱؛ ۹ (۲): ۳۵-۵۶.

DOR: [20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5](https://doi.org/10.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5)

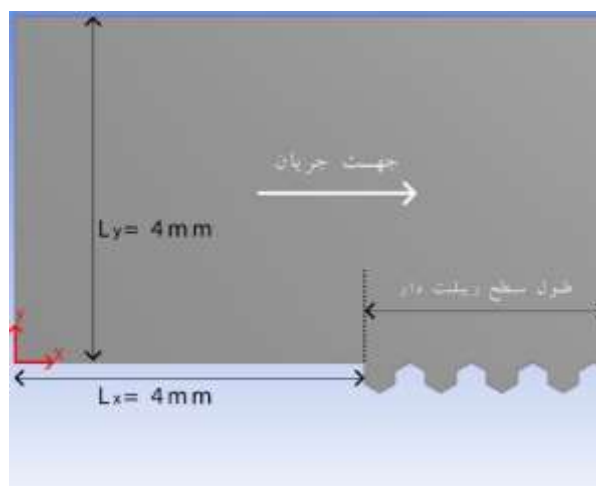
دیواره و افزایش مساحت سطح برای انتقال حرارت و مونتوم را ارائه می دهند. مفهوم ریبلیت از پوست کوسه الهام گرفته شده است که دارای شیارهای V شکل می باشد و سبب می شود که نیروی درگی را که این شکارچیان سریع در حال حرکت در زیر آب حس می کنند، بسیار کاهش یابد. پوست کوسه شامل دندانه های پوستی زبری بوده که این شیارها بر روی بدن کوسه از سر تا دم آن متفاوت می باشند و طوری طراحی شده اند که با حرکت پرتابی بدن کوسه هنگام شنا هماهنگ باشند. دستیابی به کاهش نیروی پسای ناشی از اصطکاک پوسته ای از طریق استفاده از ریبلیت ها، موضوع تحقیقات متمرکز در طول چندین دهه اخیر بوده است. بنابراین اهمیت دادن به تحقیقات در راستای کاهش درگ ویسکوز مهم می باشد، زیرا می تواند بهبودی سرعت و حفظ انرژی در یک زمان را تحقق بخشد. مطالعات آزمایشگاهی فراوانی برای بررسی اثر ریبلیت ها در کاهش پسا انجام شده است. ک. کوئلتنسج و همکاران [1] ریبلیت های همگرا و واگرا را بر روی سطح داخل لوله در یک جریان توربولانس مورد بررسی قرار دادند. طبق نتایج آنها تغییرات چشمگیری در میدان سرعت نزدیک دیواره مشاهده شد. در نزدیکی دیواره، الگوهای ریبلیتی همگرا و واگرا تفاوت های قابل توجهی را با توجه به میانگین زمانی سرعت جریان سو U و نوسانات جریان سوی سرعت نشان دادند. همچنین مقدار کاهش درگ تا حدود ۱۰٪ بدست آمد. هکان رپ و همکاران [2] سطوح ریبلیتی میکروساختاری با ریبلیت های مستطیلی که با استفاده از روش فوتولیتوگرافی بر روی یک سطح سیلیکونی ساخته شده بودند را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که مکانیسم کاهش پسا با افزایش ضخامت لایه ویسکوز موثر ایجاد می شود، که ناشی از تفاوت در ارتفاعات پیش آمدگی ریبلیت ها در جریان های موازی و متقاطع می باشد. دویونگ بیون و همکاران [3] به بررسی ویژگی های جریان بر روی سطح ریبلیتی مصنوعی فوق آبریز که از طبیعت الهام گرفته شده بود، پرداختند. نتایج بررسی آنها، افزایش ناگهانی پروفیل سرعت در نزدیکی دیواره را نشان داد. همچنین تولید گردابه در داخل شیار ریبلیت ها سبب افزایش سرعت و ایجاد نوسانات سرعت در جریان عبوری شده که مربوط به مقدار بالاتر تنش برشی در نزدیکی قله های شیارهای ریبلیتی می باشد. اگریم سارین و همکاران [4] فیلم های ریبلیتی را بر روی ایرفویل های توربین بادی به کار بردند. در نتایج بدست آمده آنها ریبلیت های با سایز بهینه، کاهش درگ ۴٪ الی ۵٪ را تولید کردند، در حالیکه، ریبلیت های با سایز بهینه نشده در بعضی موارد درگ را تا ۱۰٪ الی ۱۲٪ افزایش دادند. وا اف فو و همکاران [5] به بررسی تاثیر مساحت سطح ریبلیتی الهام گرفته از پوست کوسه بر روی عملکرد کاهش درگ آنها پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که با افزایش فاصله عرضی ریبلیت، نسبت کاهش درگ ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. میتسورو کوریتا و همکاران [6] به بررسی کاهش اصطکاک پوسته ای بدنه یک هواپیمای آزمایشی که با ریبلیت پوشش داده شده بود، پرداختند. داده های اندازه گیری شده ی میانگین توزیع سرعت در لایه مرزی در حین پرواز، از نظر کیفی تطابق قابل قبولی را با داده های تست تونل باد ارائه دادند. بنابراین نشان داده شد که طرح ریبلیتی آنها در پرواز به طور موثری عمل می کند. چونگای هوای و همکاران [7] به بررسی کاهش نیروی درگ یک جریان با سیال سورفکتانت، در یک کانال با ریبلیت های طولی پرداختند. آنها دریافتند که عملکرد کاهش درگ محلول سورفکتانت بوسیله شیارهای طولی (ریبلیت ها) افزایش می یابد. ام اف تاجی و همکاران [8] به بررسی جریان توربولانس دارای گرادیان فشار، بر روی دیواره های ریبلیتی همگرا شونده در یک کانال باز پرداختند. نتایج نشان داد که گرادیان فشار مورد نظر، تاثیرات قابل توجهی را بر روی ویژگی های درگ جریان ندارند. یانگ شائوگینگ و همکاران [9] به بررسی تاثیر ساختارهای منسجم ریبلیتی عمود بر جهت جریان بر روی لایه مرزی توربولانس پرداختند. آنها کاهش درگی برابر با ۶/۱۷٪ را بدست آوردند. یوبو ژانگ و دفوچه [10] شیارهای V شکل دو بعدی را در یک جریان توربولانس مورد بررسی قرار دادند. مقایسه نتایج توربولانس بر روی دیواره های صاف و ریبلیتی نشان داد که حضور دیواره ریبلیتی منجر به تغییرات قابل توجهی در آشفتگی جریان (توربولانس) می شود. همچنین میزان تراکم ریبلیت ها، نقش مهمی را در کاهش نیروی پسا، بازی می کند. هانگ وی ما و همکاران [11] به بررسی جریان لایه مرزی توربولانس گذرنده از روی دو صفحه تخت و ریبلیتی پرداختند. آنها با استفاده از تکنیک جریان حباب هیدروژن در تونل آب به بصری سازی جریان داخل آن پرداختند. جیان فنگ هو و همکاران [12] به بررسی توانایی روش ۲ بعدی و ۳ بعدی سرعت سنجی تصویری ذره و سرعت سنجی پیمایشی ذره، به جهت مشخص سازی ساختار ۳ بعدی جریان توربولانس بر روی یک سطح ریبلیتی با شیارهایی با فاصله ۷۵۰ μm ، پرداختند.

نتایج میزان کاهش اصطکاک پوسته ای برابر $1/6\%$ و کاهش تنش برشی دیواره برابر $4/7\%$ را بر روی سطح ریبلیتی نشان دادند. در این میان محققینی به بررسی تحلیلی ریبلت ها پرداختند. ام. اسکول [13] در یک مطالعه تحلیلی به بررسی کاهش نیروی درگ در یک جریان کوئت در یک سیال نیوتنی بین دو سطح که یکی از سطوح صاف و دیگری دارای ریبلت هایی عمود بر جهت جریان به شکل سطح موجی شکل می بود، پرداخت. نتایج نشان داد که سطح موجی با قله های تیز منجر به کاهش پسای 10% در مقایسه با سطح موجی سینوسی با همان پارامترهای هندسی می شود. روش حل عددی مستقیم نیز به عنوان ابزاری بسیار سودمند و با دقت بالا مورد توجه بعضی از پژوهشگران قرار گرفته است. بنس چاپ و دبلیو پی بروگم [14] به بررسی یک الگوی ریبلیتی با چیدمان همگرا، واگرا با طول موج عمود بر جریان پرداختند. آنها دریافتند که وجود ریبلت های همگرا، واگرا برای کاهش درگ توربولانس مضر به نظر می رسد. آلفرد فردمن و همکاران [15] به بررسی کاهش نیروی درگ در یک جریان کوئت مابین دو صفحه با شرایط مرزی جریان مورب پرداختند. آنها نتایج مدل ریاضی را در محدوده زیرلایه ویسکوز جریان بدست آوردند. نتایج بدست آمده، کاهش نیروی درگ سطح ریبلیتی را تا 15% ، نسبت به سطح صاف قرار گرفته در بالای کانال و همچنین تا 10% ، نسبت به سطح صاف قرار گرفته در بخش موثر جریان نشان می دهد. جین لی و همکاران [16] تاثیر عدد رینولدز بر روی کاهش درگ سطح ریبلیتی تحت جریان توربولانس را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که با افزایش عدد رینولدز، عملکرد کاهش درگ سطح بهبود می یابد. همچنین اثر نوسانات در حرکت های جریانی بزرگ مقیاس (حرکات توده ای جریان)، در رینولدزهای بالا کاهش می یابد. میکائیل بی مارتل و همکاران [17] مکانیزم کاهش نیروی درگ یک سطح سوپرهیدروفوبیک شامل میکروشیارهای ریبلیتی در یک کانال با رژیم جریان توربولانس را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها دریافتند که سطوح سوپرهیدروفوبیک، توانایی کاهش درگ در جریان توربولانس را بوسیله تغییر در زیرلایه لمینار ایجاد می کنند. السمنی و همکاران [18] به بررسی جریان کانال توربولانس دارای عدد رینولدز کم بر روی ریبلت های مستطیلی که به صورت غیریکنواخت بر روی تنها یکی از دیواره های کانال قرار گرفته بودند، پرداختند. بیشترین میزان کاهش درگ بدست آمده برابر 11% بود. همچنین دریافتند که افزایش درگ زمانی رخ می دهد که فاصله بیشتر از 30 برابر واحدهای دیواره باشد. علاوه بر روش حل عددی مستقیم، از مدل های آشفتگی نیز جهت شبیه سازی جریان بر روی ریبلت ها استفاده شده است. ژائو ون و همکاران [19] به بررسی کاهش نیروی درگ آیرودینامیکی وارد بر صفحات بدنه موتور خودرو با استفاده از سطوح ریبلیتی الهام گرفته از طبیعت پرداختند. نتایج آنها نشان داد زمانی که سرعت خودرو به 30 m/s می رسد، نرخ کاهش درگ تا $10/31\%$ بدست می آید. ژوگانگ و همکاران [20] اثر شیارهای عرضی عمود بر جریان را بر روی نیروی اصطکاکی وارد بر سطح مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها کاهش درگ $12/5\%$ را نسبت به سطح صاف نشان داد. جینگ کوی و یابو فو [21] به بررسی کاهش نیروی درگ و افت فشار در یک جریان میکروکانال پرداختند. آنها ۴ نوع سطح ریبلیتی مختلف را مورد ارزیابی قرار دادند. بائو وانگ و همکاران [22] به بررسی کاهش نیروی درگ سطح با استفاده از گردابه های تشکیل شده در میکروشیارهای مقطعی سطح پرداختند. نتایج آنها تشکیل گردابه هایی در شیارهای ریبلیتی را نشان دادند که این گردابه ها، دلیل اصلی برای کاهش درگ می باشند. در بالای گردابه ها، جهت دوران مطابق با جریان اصلی بود که سبب کاهش تنش های وارد از طرف جریان بر سطح می شوند. دابلیو. لی و همکاران [23] نیروی درگ توربولانس سطوح محرک موجی شکل، تحت دو حالت دارای ریبلت و بدون ریبلت را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان می دهد که ترکیب سطح ریبلیتی با حرکت موجی عرضی، کاهش درگ موضعی را افزایش داده و در مقایسه با یک جریان لایه مرزی بر روی یک سطح صاف غیر فعال (بدون موج)، کاهش درگ محلی را تا $DR=9/4\%$ نتیجه خواهد داد. در حالی که کاهش درگ با توجه به سطح ریبلیتی (تنها) برابر $DR = 4/7\%$ می باشد. آرون بومسما و فوتیس سوتیروپولوس [24] با استفاده از روش شبیه سازی گردابه ای بزرگ به بررسی کاهش نیروی درگ ریبلت های حلزونی شکل در گردایان های فشار معکوس پرداختند. به طور کلی، ریبلت های حلزونی شکل در گردایان فشار معکوس، خصوصیات کاهش دهنده درگ خود را حفظ می کنند، اما شبیه سازی های این مطالعه گواه این است که فقط تحت گردایان فشار معکوس متوسط تا قوی این خصوصیات افزایش یافته اند. امیررضا رستگاری و ریحانه اخوان [25] مکانیزم کاهش درگ را بر روی ۳ طرح ریبلیتی شامل میکروشیارهای طولی، عرضی و زائده های ناپیوسته مورد بررسی قرار دادند. آنها مقادیر کاهش درگ را به ترتیب برای میکروشیارهای ذکر شده برابر

۵% تا ۸۳% برای مورد اول، ۴%- تا ۲۰% درصد برای مورد دوم و ۱۴% تا ۸۱% برای مورد سوم بدست آوردند. سان ژی هونگ و شی تینگ تینگ [26] ریبلیت های مثلی را بر روی یک روتور سرعت بالا تحت جریان هوای توربولانس مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصل از تنش برشی دیواره نشان می دهد که روتورهای سرعت بالا با سطح ریبلیتی، می تواند نیروی درگ وارده از سمت هوا را تا مقدار قابل قبولی کاهش دهد و عمق شیار ریبلیت و فاصله داخلی بین آنها، بر نیروی درگ کل تاثیرگذار است. بهراد زینلی و همکاران [27] ویژگی ها و ضریب درگ جریان توربولانس بر روی سطح یک سیلندر که بخشی از آن ریبلیتی شده بود را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج حاصل از ضریب درگ، تنش برشی سطح و سرعت لغزشی نشان دادند که اعمال حالت سوپرهیدروفوبیک در پشت سیلندر بین 90° تا 180° ، تاثیر کمی را در کاهش ضریب درگ دارد، درحالی که اعمال این حالت در جلوی سیلندر بین 0° تا 90° ، بدرستی ضریب درگ را کاهش خواهد داد. گویان-کینگ و همکاران [28] به بررسی ریبلیت های مورب مثلی تحت تاثیر جهت گیری زاویه جریان نسبت به زاویه قرار گیری ریبلیت ها پرداختند. آنها میزان مقاومت اصطکاکی و نرخ کاهش درگ را بر روی این ریبلیت ها، مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاصله نشان دادند که با افزایش سرعت و همچنین زاویه انحراف (بردار سرعت نسبت به راستای ریبلیت ها)، مقاومت فشاری به وضوح افزایش خواهد یافت، همراه با کاهش در مقاومت ویسکوز. بیشترین نرخ کاهش درگ ریبلیت های بدست آمده در کار آنها ۳۳/۷% می باشد. با توجه به موارد بیان شده، اهمیت استفاده از ریبلیت ها در کاهش درگ سطوح قابل استفاده در تجهیزات و صنایع آشکار شد. هدف اصلی در این پژوهش بررسی ۴ هندسه جدید ریبلیتی و همچنین بررسی تاثیر ابعاد و سرعت های مختلف جریان آزاد بر روی این هندسه ها با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی می باشد. برخلاف اکثر مطالعات قبلی که به بررسی ریبلیت ها در یک جریان توربولانس پرداخته اند، در این پژوهش بررسی کارکرد سطوح ریبلیتی ارائه شده در محدوده جریان آرام مد نظر می باشد. در پژوهش حاضر با استفاده از فرضیات ساده شونده ای، هندسه ای ۲ بعدی در نظر گرفته شده و سپس اثر استفاده از ۴ نوع هندسه مختلف جدید در کاهش میزان پسای وارد بر سطح در رژیم جریان آرام مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۲: شرایط مرزی جریان.



شکل ۱: شماتیکی از فضای محاسباتی و ابعاد هندسی ریبلیت ها شامل w (عرض)، h (ارتفاع)

۲- هندسه، شرایط مرزی و معادلات حاکم

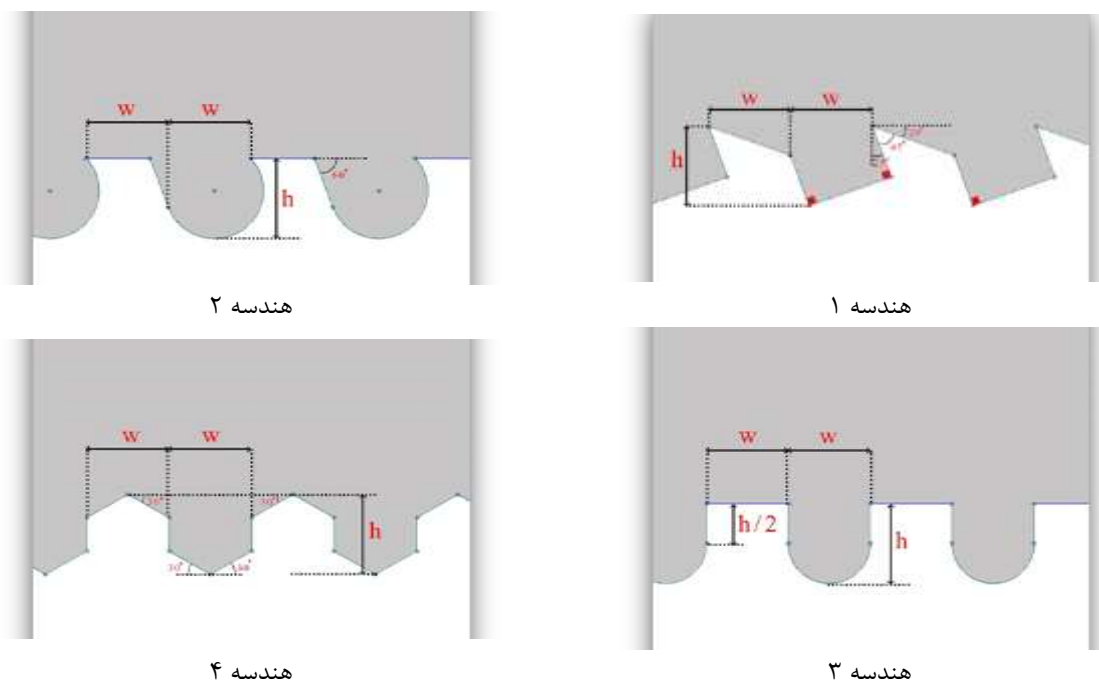
صورت مسئله در پژوهش حاضر شبیه سازی جریان در یک فضای دوبعدی است که در شکل ۱ نشان داده شده است. سطح پایینی فضای محاسباتی در قسمت ابتدایی صاف است تا شبیه اثر جریان روی صفحه تخت را ایجاد نماید. در قسمت انتهایی فضای محاسباتی، هندسه های ریبلیتی به صورت عمود بر جریان چیده شده اند. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای جریان

نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. در ورودی از شرط مرزی سرعت ثابت (۸ متر بر ثانیه) استفاده شده است. فشار نسبی در خروجی صفر می‌باشد. باید توجه داشت با توجه به ثابت بودن چگالی سیال و فرض تراکم‌ناپذیری، مقدار مطلق فشار تأثیری در حل مسأله ندارد. دیواره پایینی فضای محاسباتی دارای شرط عدم لغزش بوده و در سطح بالایی نیز شرط مرزی تقارن استفاده شده است. ۴ نوع هندسه ریبلیتی در نظر گرفته شده در ۴ اندازه $w=h=0.15\text{mm}$, 0.25mm , 0.35mm , 0.45mm در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین زوایای مربوط به هر هندسه در تمامی ابعاد ثابت در نظر گرفته شده است. تمامی معادلات حاکم بر مسئله شامل معادلات پایستگی جرم و تکانه به روش حجم محدود گسسته‌سازی و حل شده‌اند. معادلات پایستگی جرم و تکانه به ترتیب توسط روابط (۱) و (۲) بیان می‌شوند.

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

که در روابط فوق ρ ، u ، p و μ به ترتیب چگالی، سرعت، فشار و گرانیوی دینامیکی سیال هستند. لازم به ذکر است که برای ارتباط سرعت و فشار در معادلات پایستگی جرم و تکانه از «روند حل کاپلدا» استفاده شده است. همچنین تمامی عبارات جابه‌جایی در معادله تکانه با روش بادسوی مرتبه دوم گسسته‌سازی شده‌اند. معیار همگرایی برای باقیمانده معادلات پایستگی جرم و تکانه برابر با ۶-۱۰ در نظر گرفته شده است. سیال کاری آب با چگالی $998/2\text{ kg/m}^3$ و گرانیوی 0.001003 Pa.s در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: ۴ نوع هندسه ریبلیتی مورد بررسی

لازم به ذکر است که عدد رینولدز برای جریان روی سطح به صورت زیر تعریف می‌گردد:

¹ Coupled algorithm

$$Re_x = \frac{\rho U_{\infty} L_x}{\mu} \quad (3)$$

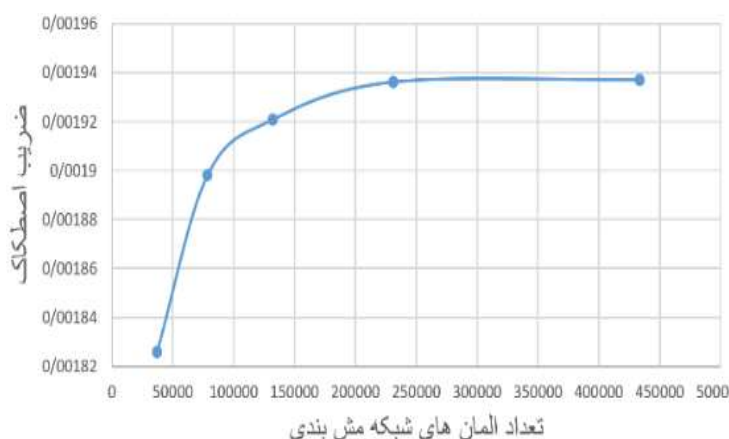
در این رابطه U_{∞} سرعت جریان آزاد بوده و L_x نیز فاصله از ابتدای سطح (مبدأ مختصات) است. به این ترتیب بزرگترین عدد رینولدز در انتهای سطح رخ خواهد داد. با توجه به اینکه طولانی‌ترین سطح در پژوهش حاضر ۱۰/۱mm است، بنابراین بزرگترین عدد رینولدز 9×10^4 خواهد بود که از مقدار 5×10^5 که عدد رینولدز بحرانی (گذار از جریان آرام به آشفته) جریان روی سطح است بسیار کوچکتر بوده و می‌توان از برقراری جریان آرام روی سطح اطمینان حاصل کرد. البته باید به این نکته اشاره کرد که به دلیل وجود ریبلت‌ها اغتشاشاتی در میدان جریان به وجود می‌آید (نسبت به سطح صاف بدون ریبلت) که می‌تواند باعث گذار از جریان آرام به آشفته در اعداد رینولدز کوچکتری شود. بنابراین شرایط جریان و هندسه در پژوهش حاضر به گونه‌ای انتخاب شده است تا عدد رینولدز جریان کوچک باشد و گذار به جریان آشفته رخ ندهد.

۳-۱) استقلال حل از شبکه

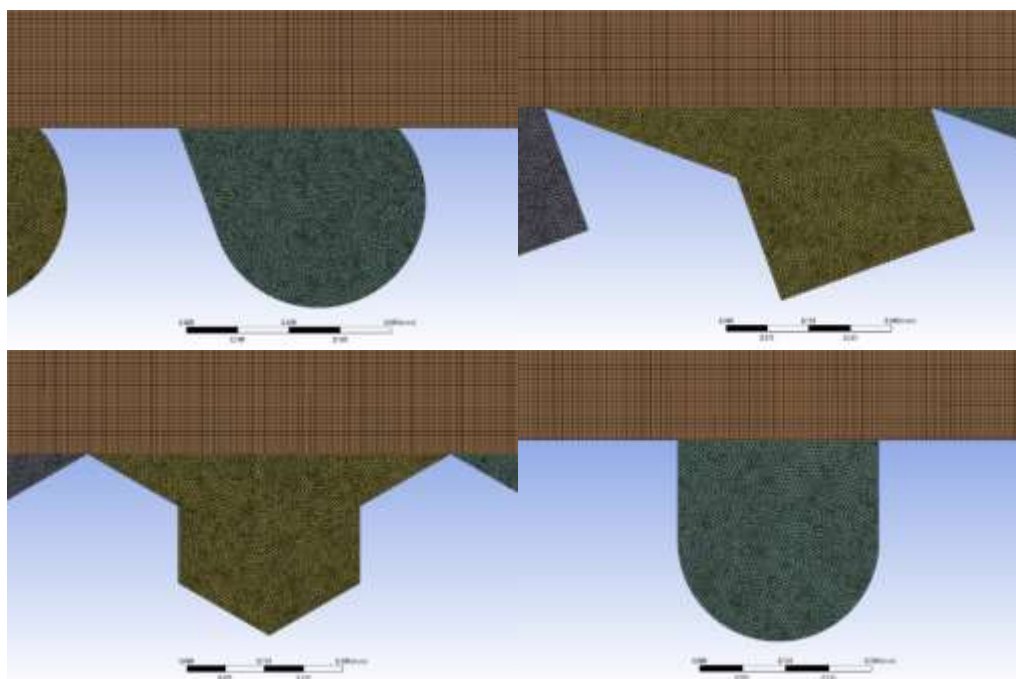
به منظور بررسی استقلال حل از شبکه، هندسه دو بعدی مطابق شکل ۱ با عرض، ارتفاع و فاصله ریبلت ۰/۱۵mm در نظر گرفته شده است. پنج شبکه محاسباتی مختلف تولید شده و مقادیر ضریب اصطکاک متوسط روی دیواره ریبلت‌ها برای هر کدام محاسبه شده است. ضریب اصطکاک متوسط مطابق رابطه (۴) تعریف شده است.

$$\bar{C}_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2} \rho U_{\infty}^2} \quad (4)$$

در این رابطه τ_w مقدار تنش برشی متوسط بر روی دیواره ریبلت‌دار است. نتایج مربوط به ضریب اصطکاک متوسط روی دیواره ریبلت‌ها در شکل ۴ نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد مش از مش شماره ۴ به مش شماره ۵ مقدار ضریب اصطکاک متوسط تنها ۰/۰۵٪ تغییر می‌کند (از ۰/۰۰۱۹۳۶ به ۰/۰۰۱۹۳۷ تغییر می‌یابد). بنابراین مش شماره ۴ برای سایر شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است زیرا هم از دقت کافی برخوردار بوده و هم در هزینه محاسباتی صرفه‌جویی می‌کند. لازم به ذکر است که در تمامی هندسه‌ها از مش مثلثی برای داخل شیار ریبلت‌ها و از مش سازمان‌یافته (چهارضلعی) برای بخش‌های بالای ریبلت‌ها استفاده شده است. نمایی از شبکه محاسباتی تولید شده در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴: بررسی استقلال حل از شبکه.

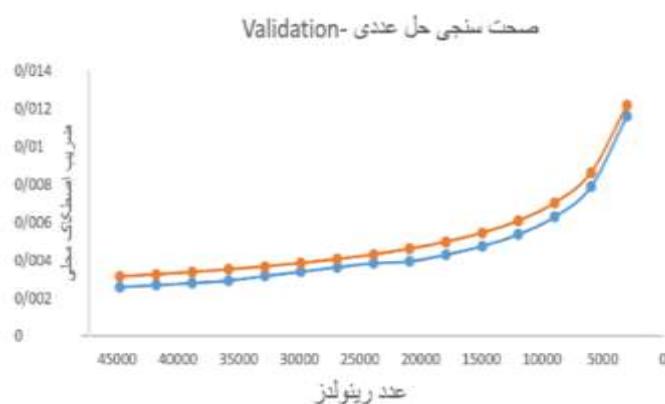


شکل ۵: نمایی از شبکه محاسباتی تولید شده در مجاورت ریبلت‌ها.

۲-۳) صحت سنجی حل عددی :

به منظور اطمینان از صحت نتایج حاصل از حل عددی نیاز است تا ابتدا صحت روش حل عددی سنجیده شود. برای این منظور می‌توان نتایج حاصل از حل عددی را با نتایج تجربی یا تحلیلی موجود مقایسه نمود. در پژوهش حاضر به منظور سنجش صحت حل عددی، جریان بر روی سطح صاف مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور صحت‌سنجی حل عددی مقادیر ضریب اصطکاک بر روی سطحی صاف بر روی دیواره پایینی که طولی برابر با سطح ریبلتی و در همان مکان سطح ریبلتی (شکل ۱) از شبیه‌سازی محاسبه شده و با نتایج مربوط به فرمول تحلیلی زیر مقایسه شده است:

$$C_f = 0.664 Re_x^{-0.5} \quad (3)$$



شکل ۶: صحت‌سنجی حل عددی.

نتایج مربوط به شبیه‌سازی و فرمول تحلیلی در شکل ۶ با هم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد تطابق مناسبی میان نتایج برقرار است. بنابراین صحت روش عددی انتخاب شده تأیید می‌گردد.

همچنین به عنوان صحت سنجی دوم، مقاله دکتر علیرضا رئوف پناه و مهندس میرزایی [۳۱] که بررسی عددی کاهش پسای ریبلیت‌های مستطیلی می‌باشد نیز مورد شبیه‌سازی قرار گرفته و نتایج بدست آمده با نتایج کار آنها مقایسه شده است. همانطور که در نمودارهای شکل ۷ مشاهده می‌گردد تطابق مناسبی میان نتایج برقرار است. بنابراین صحت روش عددی انتخاب شده تأیید می‌گردد.

جدول ۱. داده‌های مربوط به رفرنس [31]

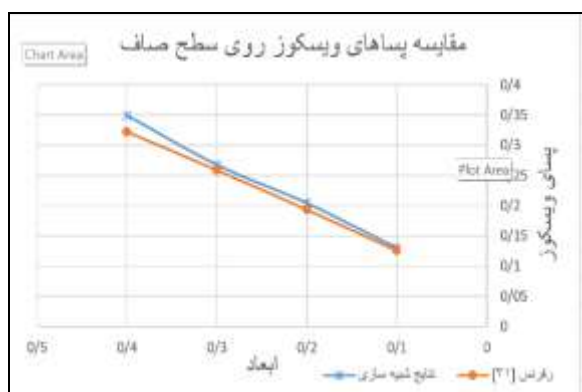
	حالت سطح	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل
هندسه ۱	بدون ریبلیت	-	۰٫۱۲۵۳	۰٫۱۲۵۳
	با ریبلیت	۰٫۰۳۸۴	۰٫۰۷۷۱	۰٫۱۱۵۵
هندسه ۲	بدون ریبلیت	-	۰٫۱۹۳۱	۰٫۱۹۳۱
	با ریبلیت	۰٫۰۹۱۲	۰٫۰۷۹۹	۰٫۱۷۱۱
هندسه ۳	بدون ریبلیت	-	۰٫۲۵۸۵	۰٫۲۵۸۵
	با ریبلیت	۰٫۱۴۴۷	۰٫۰۷۸۳	۰٫۲۲۲۹
هندسه ۴	بدون ریبلیت	-	۰٫۳۲۱۹	۰٫۳۲۱۹
	با ریبلیت	۰٫۱۹۹۸	۰٫۰۷۳۲	۰٫۲۷۳۰

۴- نتایج و بحث

شبیه‌سازی‌ها در ۴ ابعاد ۰٫۱۵ و ۰٫۲۵ و ۰٫۳۵ و ۰٫۴۵ $w=h$ بر حسب میلیمتر بر روی ۴ هندسه مختلف، مطابق شکل ۳ انجام شده است. در تمامی شبیه‌سازی‌ها نسبت $w/h = 1$ (نسبت جنبی) و زوایای خاص مربوط به هر هندسه (مطابق شکل ۳) ثابت در نظر گرفته شده است. مشخصات هر کدام از ۱۶ هندسه شبیه‌سازی شده در جدول ۲ نشان داده شده است. در ادامه اثر تغییر عرض و ارتفاع ریبلیت‌ها در کاهش میزان پسای وارد بر سطح بررسی شده است. لازم به ذکر است که تمامی مقادیر ارائه شده برای پسای وارد بر سطوح در بخش‌های بعد، مقادیر متوسط پسا می‌باشد.

۴-۱: اثر تغییر ابعاد ریبلیت‌ها

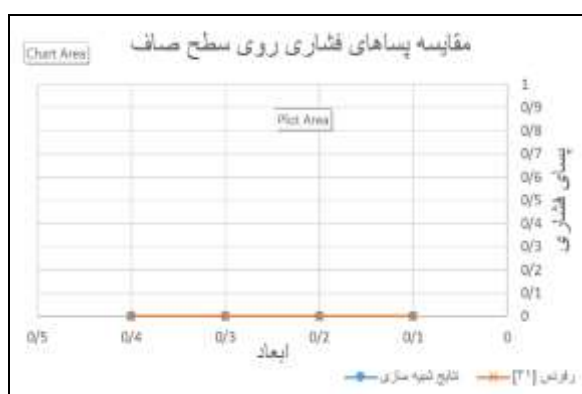
اثر تغییر ابعاد ریبلیت‌ها (ارتفاع و عرض برابر) در کاهش پسای وارد بر سطح در شکل ۸ نشان داده شده است. همچنین پسای وارد بر سطح بدون ریبلیت متناظر نیز در این شکل نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که استفاده از این هندسه‌های ریبلیتی اثر قابل قبولی در کاهش میزان پسای وارد بر سطح دارد. همچنین مطابق شکل ۸ هندسه ۱ بیشترین میزان کاهش پسا و هندسه ۳ کمترین میزان کاهش پسا را نسبت به سطح صاف دارد.



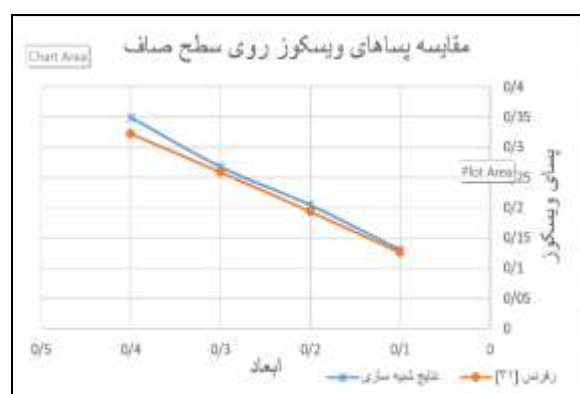
نمودار ۲-۷



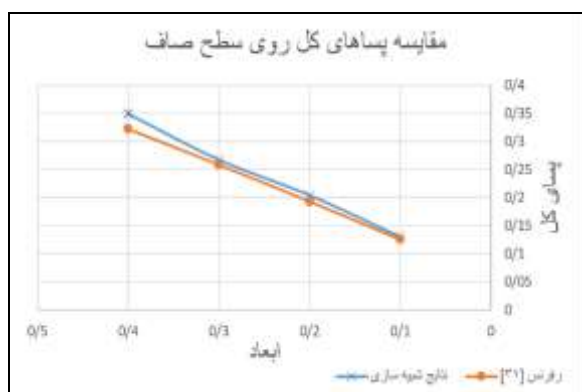
نمودار ۱-۷



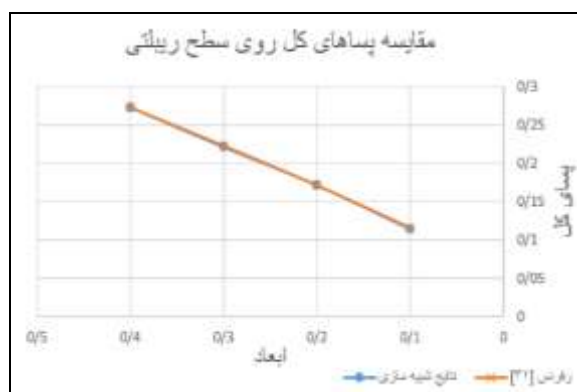
نمودار ۴-۷



نمودار ۳-۷



نمودار ۶-۷

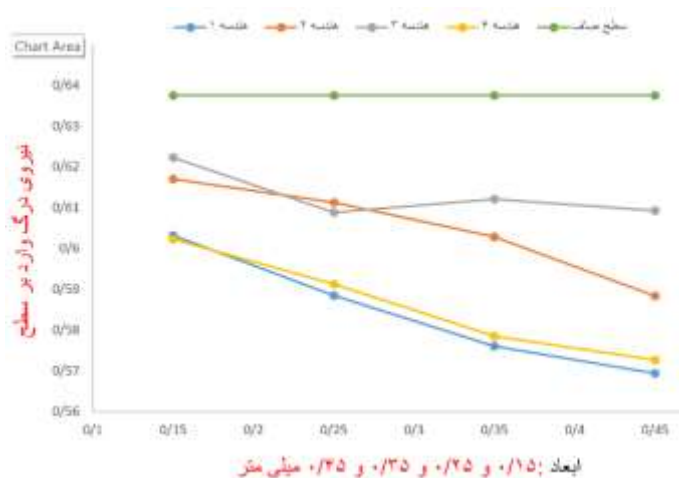


نمودار ۵-۷

شکل ۷: نمودارهای صحت سنجی با رفرنس [31]: شامل ۶ نمودار

جدول ۲. مشخصات ابعادی هندسه های ریبلیتی ها (ابعاد به میلیمتر)

نام	عرض	ارتفاع	نام	عرض	ارتفاع
هندسه ۱	0.15	0.15	هندسه ۳	0.15	0.15
هندسه ۱	0.25	0.25	هندسه ۳	0.25	0.25
هندسه ۱	0.35	0.35	هندسه ۳	0.35	0.35
هندسه ۱	0.45	0.45	هندسه ۳	0.45	0.45
هندسه ۲	0.15	0.15	هندسه ۴	0.15	0.15
هندسه ۲	0.25	0.25	هندسه ۴	0.25	0.25
هندسه ۲	0.35	0.35	هندسه ۴	0.35	0.35
هندسه ۲	0.45	0.45	هندسه ۴	0.45	0.45



شکل ۸. پسای وارد بر سطح در راستای جریان بر حسب ارتفاع

پسای وارد بر سطح در حالت بدون ریبلیت تنها ناشی از اثر تنش برشی (اصطکاک) در سطح مشترک سیال و جامد است، اما در حالت سطح ریبلیت دار بخشی از پسا به دلیل تنش برشی و بخشی دیگر به دلیل نیروی فشاری است. مقایسه میان اندازه هر کدام از این نیروها و درصد کاهش پسا در هر کدام از این ۴ هندسه در جداول ۳ تا ۶ نشان داده شده است. مشاهده می گردد که جمع پسای فشاری و اصطکاکی در حالت سطح ریبلیت دار کمتر از پسای اصطکاکی در حالت سطح بدون ریبلیت متناظر است. کمترین درصد کاهش پسا در هندسه ۳ با ابعاد ۰/۱۵mm با میزان کاهش پسای ۲/۳٪ و بیشترین میزان کاهش پسا در هندسه ۱ با ابعاد ۰/۴۵mm با میزان کاهش پسای ۱۰/۷٪ مشاهده می گردد. همچنین از نتایج موجود در جدول ۳ مشاهده می گردد که هندسه های ۱ و ۴ دارای پسای فشاری بالاتر و پسای اصطکاکی کمتری نسبت به هندسه های ۲ و ۳ می باشند. همچنین در تمام هندسه ها با افزایش ابعاد ریبلیت ها، درصد کاهش پسا نیز افزایش می یابد.

جدول ۳: مقایسه سهم پسای فشاری و اصطکاکی و درصد کاهش پسای هندسه ۱

هندسه ۱	حالت سطح	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل	درصد کاهش پسا
هندسه ۱ 0/15 mm	بدون ریبیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبیت	0/5310	0/0721	0/6031	5/3
هندسه ۱ 0/25 mm	بدون ریبیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبیت	0/5406	0/0478	0/5884	7/7
هندسه ۱ 0/35 mm	بدون ریبیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبیت	0/5492	0/0267	0/5760	9/6
هندسه ۱ 0/45 mm	بدون ریبیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبیت	0/5292	0/0401	0/5693	10/7

جدول ۴: مقایسه سهم پسای فشاری و اصطکاکی و درصد کاهش پسای هندسه ۲

هندسه ۲	حالت سطح	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل	درصد کاهش پسا
هندسه ۲ 0/15 mm	بدون ریبیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبیت	0/2149	0/4019	0/6169	3/2
هندسه ۲ 0/25 mm	بدون ریبیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبیت	0/2075	0/4036	0/6111	4/1
هندسه ۲ 0/35 mm	بدون ریبیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبیت	0/2143	0/3883	0/6027	5/4
هندسه ۲ 0/45 mm	بدون ریبیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبیت	0/2676	0/3206	0/5883	7/7

جدول ۵. مقایسه سهم پسای فشاری و اصطکاکی و درصد کاهش پسای هندسه ۳

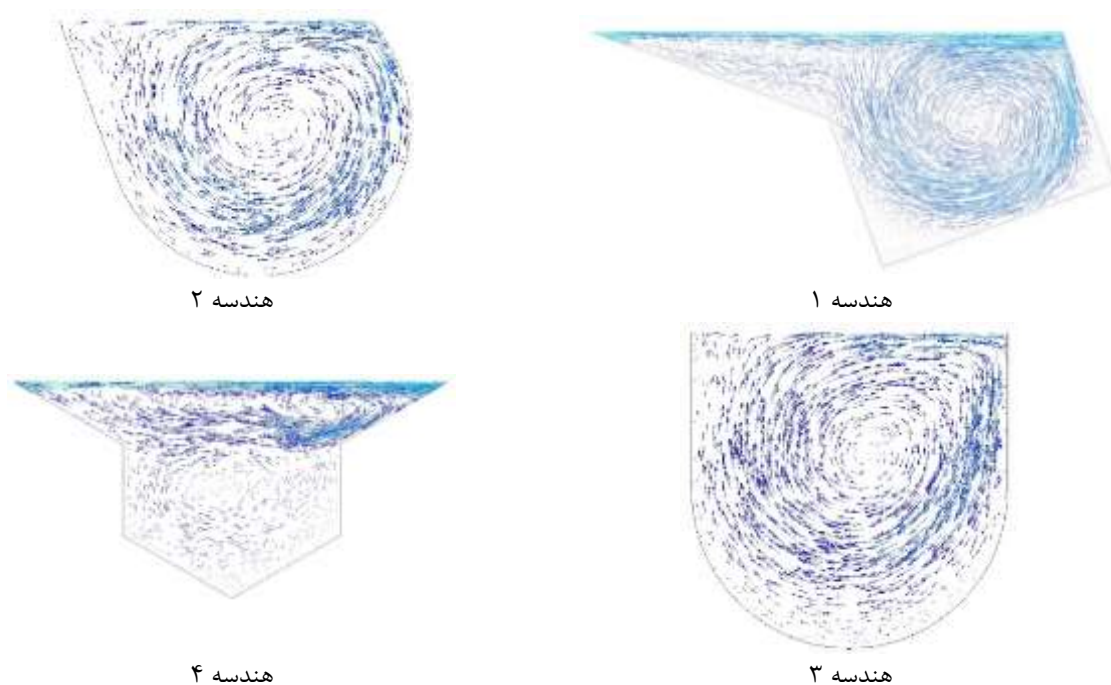
هندسه ۳	حالت سطح	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل	درصد کاهش پسا
هندسه ۳ 0/15 mm	بدون ریبلیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلیت	0/1885	0/4337	0/6222	2/3
هندسه ۳ 0/25 mm	بدون ریبلیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلیت	0/1775	0/4312	0/6087	4/5
هندسه ۳ 0/35 mm	بدون ریبلیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلیت	0/1891	0/4229	0/6120	3/98
هندسه ۳ 0/45 mm	بدون ریبلیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلیت	0/1889	0/4202	0/6091	4/4

جدول ۶: مقایسه سهم پسای فشاری و اصطکاکی و درصد کاهش پسای هندسه ۴

هندسه ۴	حالت سطح	پسای فشاری	پسای اصطکاکی	پسای کل	درصد کاهش پسا
هندسه ۴ 0/15 mm	بدون ریبلیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلیت	0/5259	0/0763	0/6022	5/5
هندسه ۴ 0/25 mm	بدون ریبلیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلیت	0/5698	0/0213	0/5912	7/2
هندسه ۴ 0/35 mm	بدون ریبلیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلیت	0/5928	-0/0143	0/5784	9/2
هندسه ۴ 0/45 mm	بدون ریبلیت	-	0/6374	0/6374	-
	با ریبلیت	0/5868	-0/0142	0/5725	10/2

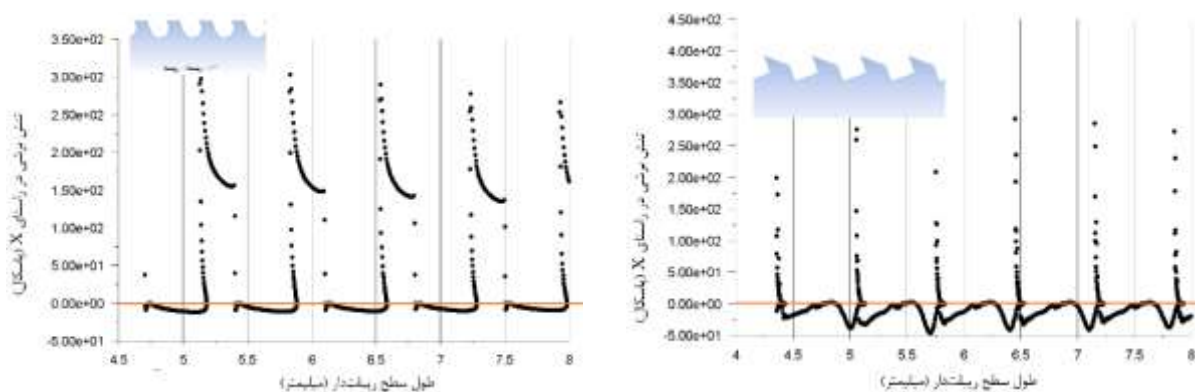
برای بررسی میدان جریان در سطح ریبلیت دار و فرآیند عملکرد ۴ نوع هندسه ی ریبلیتی در کاهش پسا، بردارهای سرعت در داخل شیار ریبلیت برای ۴ هندسه مختلف شکل ۳ در شکل ۹ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که بردارهای سرعت در تمامی ریبلیت های یک نوع هندسه مشابه می باشند. کاهش پسای اصطکاکی با تغییر هندسه و ابعاد ریبلیت ها (که در جدول ۳ تا ۶ قابل ملاحظه است) را می توان با توجه به بردارهای سرعت رسم شده در شکل ۹ توضیح داد. همانطور که ملاحظه می شود در قسمت پایینی ریبلیت (دره ریبلیت) در هندسه های ۱ تا ۳ جهت جریان سیال به سمت چپ (خلاف جهت جریان اصلی که در راستای مثبت محور X است) می باشد؛ بنابراین پسای اصطکاکی در سطح پایینی ریبلیت ها در جهت منفی محور X بوده و باعث کاهش میزان پسای اصطکاکی کل در راستای X می گردد. اما در هندسه ۴ در قسمت پایینی ریبلیت (دره ریبلیت)، جهت جریان سیال به سمت راست (در جهت جریان اصلی که در راستای مثبت محور X است) می باشد؛ بنابراین پسا اصطکاکی در سطح پایینی ریبلیت های هندسه ۴ در جهت مثبت محور X بوده و باعث افزایش پسا (البته به میزان بسیار کم) در این هندسه در دو

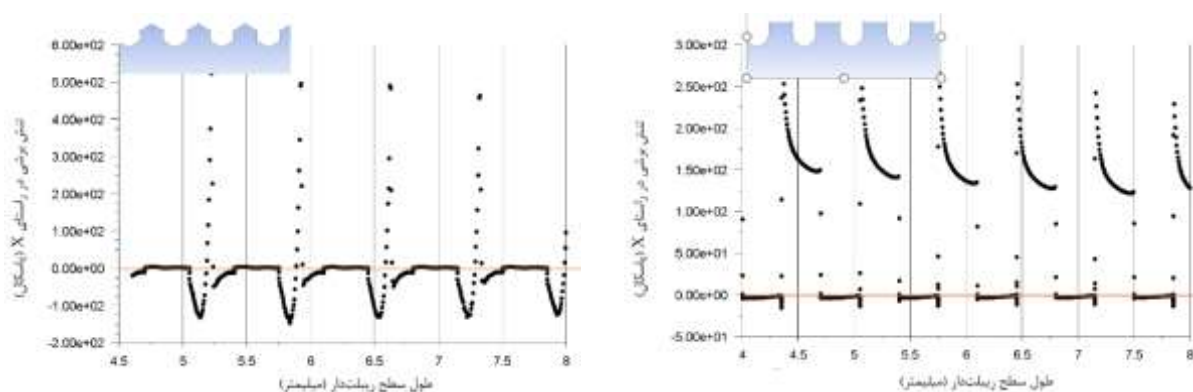
ابعاد 0.35 mm و 0.45 mm و کاهش پسا در دو ابعاد 0.15 mm و 0.25 mm می شود. با این وجود هندسه ۴ دومین هندسه ای است که بیشترین میزان کاهش پسا را دارد و بیشترین میزان کاهش پسا در همان ابعاد 0.35 mm و 0.45 mm میلیمتر است و دلیل آن سهم بسیار کم پسای اصطکاکی آن در پسای کل می باشد.



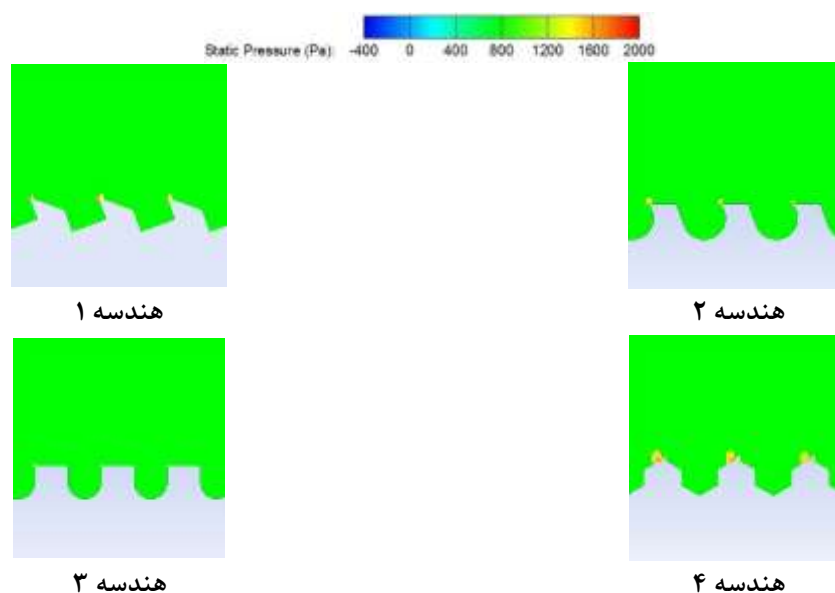
شکل ۹: نمایش بردارهای سرعت در اولین

به منظور بررسی دقیق تر توزیع پسای اصطکاکی، نمودار توزیع مؤلفه تنش برشی در راستای محور X روی سطح ریبلت دار در هر ۴ هندسه مورد مطالعه در شکل ۱۰ رسم شده است. توزیع تغییرات فشار در ابتدای سطح ریبلت دار برای ۴ نوع هندسه در شکل ۱۱ رسم شده است. مشاهده می شود که به دلیل برخورد جریان سیال به نوک ریبلت ها نواحی پرفشاری ایجاد می گردد که در واقع نقطه سکون جریان نیز می باشد. اندازه این فشار در هندسه ۳ کمترین مقدار و در هندسه ۴ بیشترین مقدار را دارد. این موضوع در تطابق با نتایج نشان داده شده در جداول ۳ تا ۶ نیز می باشد.





شکل ۱۰: توزیع تنش برشی در راستای محور X روی سطوح ۴ هندسه



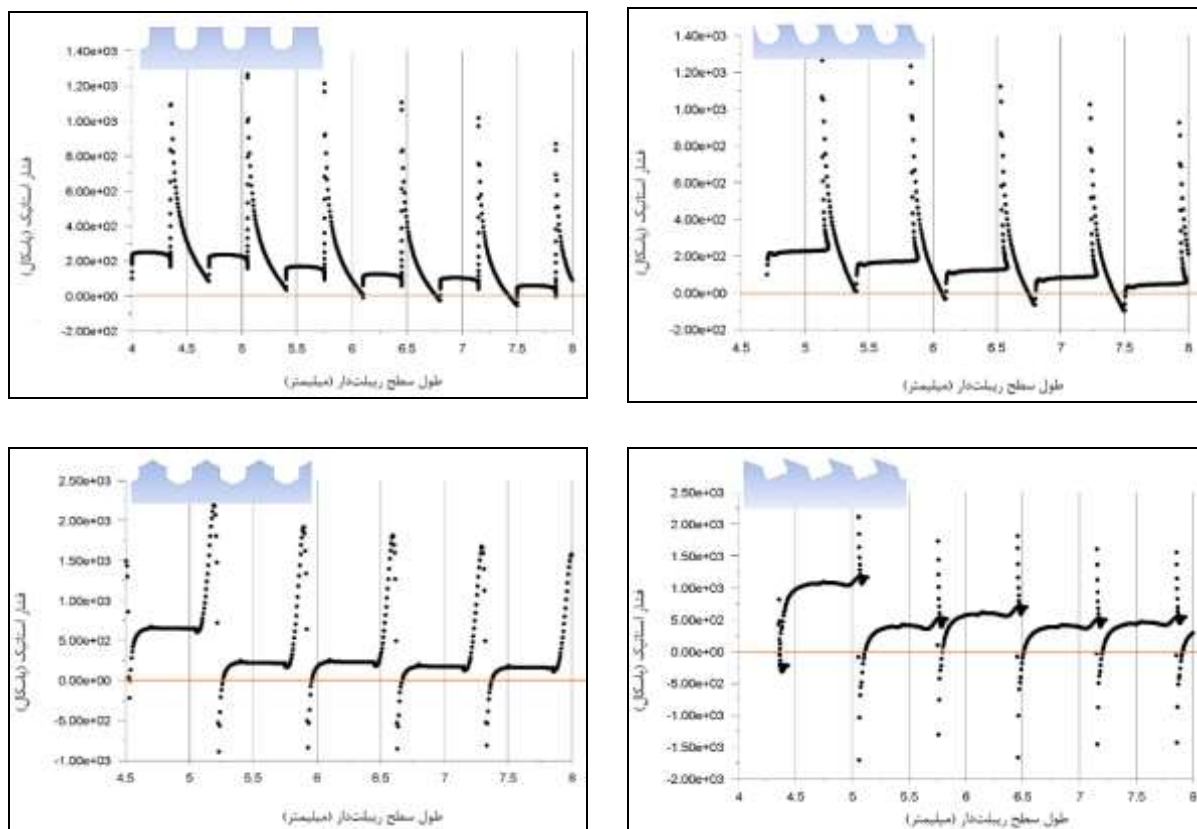
شکل ۱۱: توزیع فشار روی ریبلت‌ها

در نهایت می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش ابعاد (عرض و ارتفاع) ریبلت‌ها در ۳ هندسه ی ۱ و ۲ و ۴ مقدار پسای کل وارد بر سطح، در مقایسه با سطح صاف بدون ریبلت متناظر، کاهش می‌یابد و این خود یک مزیت است زیرا که ساخت ابعاد بزرگتر هم آسان تر و هم به صرفه تر است. همانطور که در شکل ۱۲ مشخص است در جریان داخل شیار هندسه های ۱ و ۴، یک لایه برشی در سمت بالا و چپ قسمت داخلی ریبلت‌ها ایجاد می‌شود. منظور از این لایه برشی فضایی در میدان جریان داخل ریبلت است که جهت جریان در ضخامت اندکی به طور کامل عکس شده است.



شکل ۱۲: نمایش لایه برشی در میدان جریان داخل ریبلت در هندسه های ۱ و ۴

به منظور بهتر مشخص شدن نحوه توزیع فشار بر روی ریبلت‌ها، توزیع فشار بر روی سطح ریبلت‌دار هر ۴ هندسه در شکل ۱۳ رسم شده است. مقدار این نیروی فشاری تحت عنوان پسای فشاری در جداول ۳ تا ۶ آورده شده است.

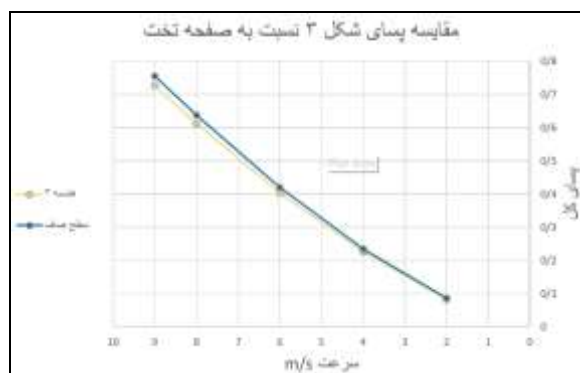
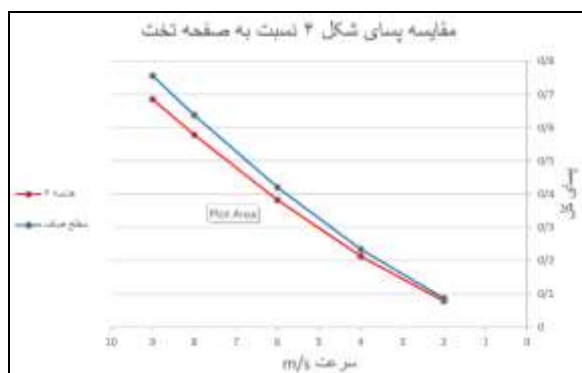
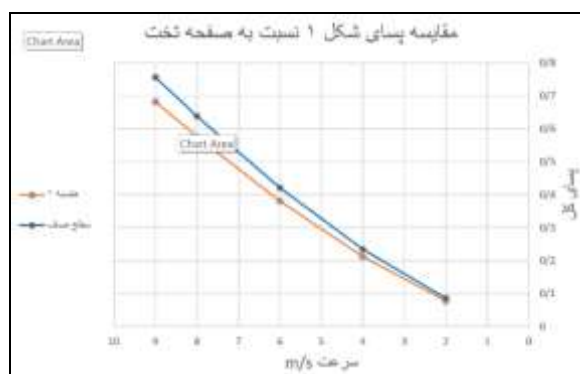
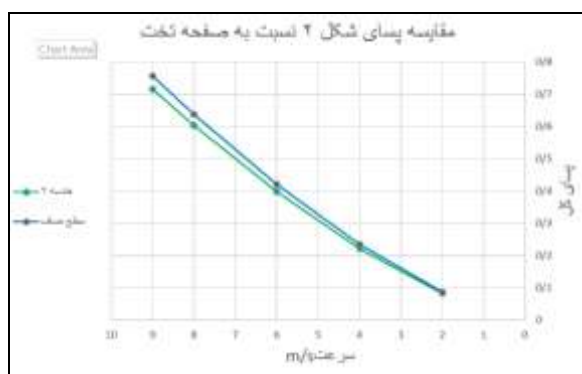


شکل ۱۳: توزیع فشار روی سطح ریبلت‌دار در هندسه ۳

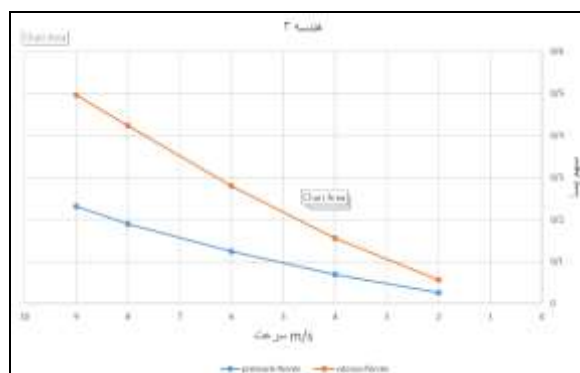
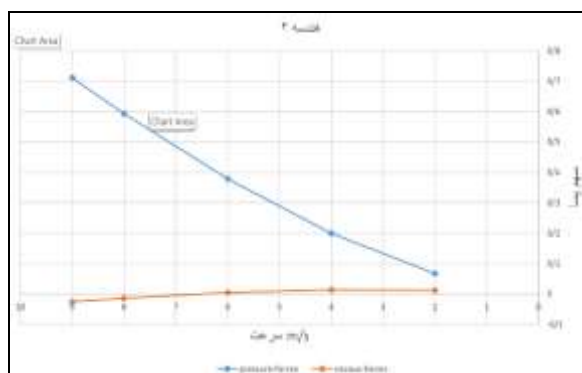
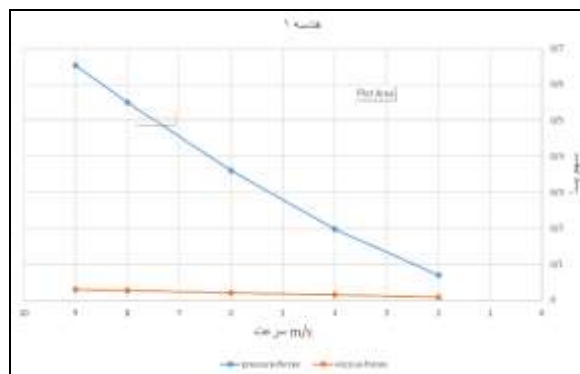
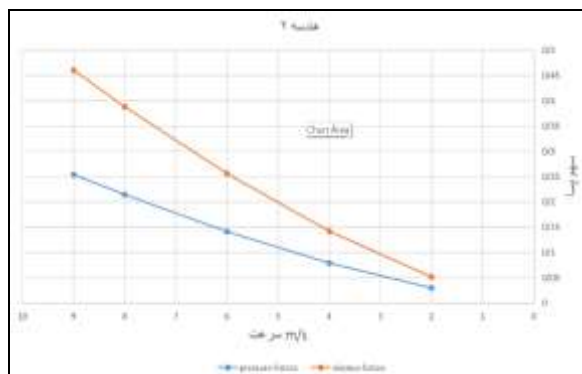
۴-۱) اثر سرعت جریان آزاد

به منظور تعیین اثر سرعت جریان آزاد بر روی عملکرد ۴ هندسه ریبلتی در کاهش میزان پسا، شبیه‌سازی‌ها بر روی هر ۴ هندسه مختلف در ابعاد ثابت $0/35 \text{ mm}$ و در سرعت‌های مختلف جریان آزاد برابر ۲ و ۴ و ۶ و ۸ و ۹ متر بر ثانیه انجام شده است. در شکل ۱۴ نمودار پسای کل ۴ هندسه ریبلتی نسبت به سطح صاف آورده شده است.

مقایسه میان سهم پسای اصطکاکی و فشاری وارد بر ۴ هندسه ریبلت‌دار در سرعت‌های مختلف جریان آزاد در شکل ۱۵ نمایش داده شده است.



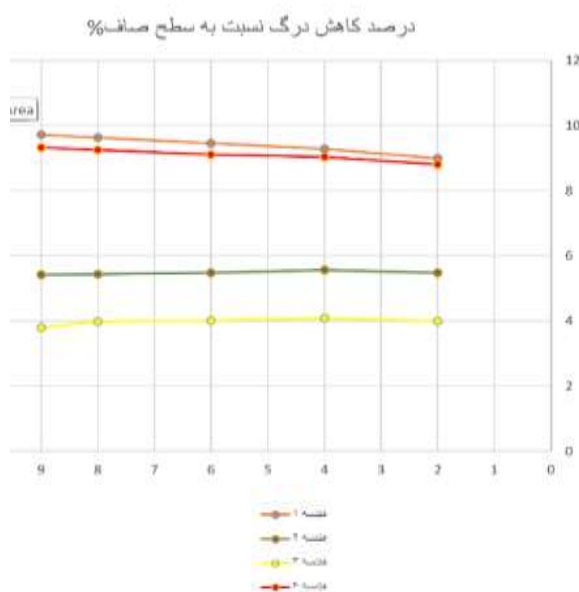
شکل ۱۴: مقایسه پسای کل وارد بر ۴ هندسه ریبلت دار و سطح بدون ریبلت در سرعت های مختلف جریان آزاد.



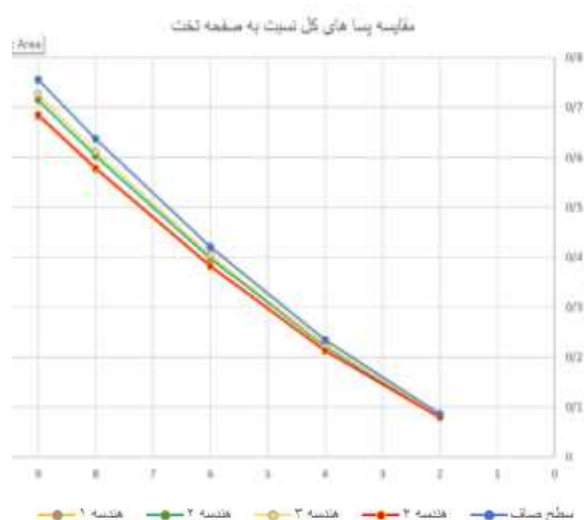
شکل ۱۵: مقایسه سهم پسای اصطکاکی و فشاری وارد بر سطح ۴ هندسه ریبلت دار در سرعت های مختلف جریان آزاد.

همانطور که ملاحظه می‌گردد در سرعت‌های مختلف در هندسه‌های ۱ و ۴ سهم پسای فشاری از پسای اصطکاکی بیشتر است و در هندسه‌های ۲ و ۳ سهم پسای اصطکاکی از پسای فشاری بیشتر است. با افزایش سرعت اختلاف میان پسای فشاری و اصطکاکی در هندسه‌های ۱ و ۴ بسیار بیشتر از هندسه‌های ۲ و ۳ می‌شود.

پسای کل وارد بر سطح هر ۴ هندسه ریبیل‌دار در سرعت‌های مختلف جریان آزاد با پسای وارد بر سطح بدون ریبیل متناظر در شکل ۱۶ مقایسه شده است. ملاحظه می‌شود که پسای وارد بر سطح هر ۴ هندسه همواره کمتر از پسای وارد بر سطح بدون ریبیل است که این موضوع به خوبی نشان‌دهنده عملکرد موفقیت‌آمیز این ۴ هندسه در کاهش پسای وارد بر سطح در محدوده رژیم جریان آرام است.



شکل ۱۷: نمودار درصد کاهش پسای ۴ هندسه در ابعاد ۰/۳۵ میلی متری و در سرعت‌های مختلف نسبت به سطح صاف



شکل ۱۶: نمودار سهم پسای کل ۴ هندسه در ابعاد ۰/۳۵ میلی متری و در سرعت‌های مختلف نسبت به سطح صاف

برای مشاهده بهتر درصد کاهش پسای وارد بر سطح ۴ هندسه نسبت به سطح بدون ریبیل در سرعت‌های مختلف جریان آزاد، نمودار درصد کاهش پسا برای ۴ هندسه در شکل ۱۷ رسم شده است.

مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت جریان آزاد در هندسه‌های ۱ و ۴ درصد کاهش پسا نیز افزایش می‌یابد اما در هندسه‌های ۲ و ۳ درصد کاهش پسا با افزایش سرعت مقدار بسیار کمی کاهش می‌یابد که در جدول ۷ نیز مقادیر عددی آن قابل مشاهده می‌باشد. کمترین درصد کاهش پسا مربوط به هندسه ۳ و در سرعت ۹ m/s و بیشترین درصد کاهش پسا مربوط به هندسه ۱ و در سرعت ۹ m/s است. متوسط درصد کاهش پسا در هندسه ۱ برابر ۹/۴٪، در هندسه ۲ برابر ۵/۴٪، در هندسه ۳ برابر ۳/۹٪ و در هندسه ۴ برابر ۹/۰۹٪ درصد محاسبه شده است.

جدول ۷: درصد کاهش پسای مربوط به ۴ هندسه در اندازه ثابت ۰.۳۵ میلیمتر و سرعت متغیر

هندسه	سرعت	drag reduction %
1	2m/s	8/99
1	4m/s	9/28
1	6m/s	9/44
1	8m/s	9/63
1	9m/s	9/72
2	2m/s	5/48
2	4m/s	5/56
2	6m/s	5/47
2	8m/s	5/43
2	9m/s	5/41
3	2m/s	3/99
3	4m/s	4/08
3	6m/s	4
3	8m/s	3/98
3	9m/s	3/78
4	2m/s	8/79
4	4m/s	9/04
4	6m/s	9/1
4	8m/s	9/24
4	9m/s	9/31

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی اثر استفاده از ۴ نوع هندسه ریبلیتی مختلف در ۴ ابعاد مختلف، بر کاهش میزان پسای وارد بر سطح در جریان آرام پرداخته شد. برای این منظور از دینامیک سیالات محاسباتی در فضای دوبعدی استفاده گردید تا حرکت جریان آب بر روی سطح شبیه سازی شود. اثر پارامترهای هندسی ۴ نوع هندسه ریبلیتی شامل عرض و ارتفاع و هم چنین ابعاد مختلف هرکدام از هندسه ها و هم چنین اثر میزان سرعت جریان آزاد بر روی کاهش پسای وارد بر سطح مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه مهم ترین نتایج به دست آمده به شرح زیر می باشد:

- ۱- ریبلیتهای هندسه ۱ و ۴ نسبت به سایر هندسه ها درصد کاهش پسای بالاتری را نشان دادند
- ۲- میزان پسای وارد بر سطح در ۳ هندسه ۱، ۲ و ۴ با افزایش ابعاد هندسه ها افزایش می یابد.
- ۳- بیشترین و کمترین مقدار کاهش پسا در یک سرعت ثابت و با تغییر ابعاد هندسه ها به ترتیب مربوط به هندسه ۱ و در اندازه ۰/۴۵mm و هندسه ۳ و در اندازه ۰/۱۵mm با میزان درصد کاهش پساهای ۱۰/۶٪ و ۲/۳٪ می باشد.
- ۴- بیشترین و کمترین مقدار کاهش پسا در یک اندازه ثابت (۰/۳۵mm) و با تغییر سرعت جریان آزاد (۲m/s) به ترتیب مربوط به هندسه ۱ و در سرعت ۹m/s و هندسه ۳ در سرعت ۹m/s به ترتیب با میزان درصد کاهش پساهای ۹/۷٪ و ۳/۷٪ می باشد.
- ۵- پسای کل وارد بر سطح بدون ریبلیت تنها به دلیل پسای اصطکاکی است اما پسای وارد بر سطح ریبلیت دار مجموع پسای اصطکاکی و فشاری می باشد.
- ۶- در هندسه های ۱ و ۴، سهم پسای فشاری بیشتر از پسای اصطکاکی وارد بر سطح ریبلیت دار است اما در هندسه های ۲ و ۳ سهم پسای اصطکاکی بیشتر از سهم پسای فشاری است.
- ۷- با توجه به نتایج حاصله هندسه های ۱ و ۴ مناسب ترین گزینه از لحاظ دارا بودن بیشترین میزان کاهش پسا می باشند، اما از لحاظ قابلیت ساخت و تولید هندسه ۴ مناسب ترین گزینه می باشد.

فهرست علائم :

واحد	علائم انگلیسی
	C_D ضریب پسا
	C_f ضریب اصطکاک
mm	h ارتفاع ریبلت
mm	w عرض ریبلت
mm	S=2w فاصله ریبلت ها
m/s	U_∞ سرعت جریان آزاد
	Re عدد رینولدز
	علائم یونانی
kg/m ³	ρ چگالی
	ν ویسکوزیته
	سینماتیکی
Pa	τ_w تنش برشی دیواره

مراجع

- [1] Koeltzsch, K., A. Dinkelacker, and R. Grundmann, Flow over convergent and divergent wall riblets. Experiments in fluids, 2002. 33(2): p. 346-350.
- [2] Byun, D. and H.C. Park. Drag reduction on micro-structured super-hydrophobic surface. in 2006 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics. 2006. IEEE.
- [3] Sareen, A., et al., Drag reduction using riblet film applied to airfoils for wind turbines. Journal of Solar Energy Engineering, 2014. 136(2): p. 021007.
- [4] Tachie, M. F., Agelinchaab, M., & Shah, M. K. (2007). Turbulent flow over transverse ribs in open channel with converging side walls. International journal of heat and fluid flow, 28(4), 683-707.
- [5] Scholle, M., Hydrodynamical modelling of lubricant friction between rough surfaces. Tribology International, 2007. 40(6): p. 1004-1011.
- [6] Benschop, H. and W.-P. Breugem, Drag reduction by herringbone riblet texture in direct numerical simulations of turbulent channel flow. Journal of Turbulence, 2017. 18(8): p. 717-759.
- [7] Martell, M. B., Rothstein, J. P., & Perot, J. B. (2010). An analysis of superhydrophobic turbulent drag reduction mechanisms using direct numerical simulation. Physics of Fluids, 22(6), 065102.
- [8] Wang, B., et al., Drag Reduction by Microvortices in Transverse Microgrooves. Advances in Mechanical Engineering, 2014. 6: p. 734012.
- [9] Li, W., et al., Turbulent drag reduction by spanwise traveling ribbed surface waves. European Journal of Mechanics-B/Fluids, 2015. 53: p. 101-112.
- [10] Rastegari, A., & Akhavan, R. (2015). On the mechanism of turbulent drag reduction with super-hydrophobic surfaces. Journal of Fluid Mechanics, 773.
- [11] Zeinali, B., Ghazanfarian, J., & Lessani, B. (2018). Janus surface concept for three-dimensional turbulent flows. Computers & Fluids, 170, 213-221.
- [12] Gu, Yun-qing, et al. "Characteristics and mechanism investigation on drag reduction of oblique riblets." Journal of Central South University 24.6 (2017): 1379-1386.
- [13] Rapp, H., I. Zoric, and B. Kasemo, Microstructured Surfaces for Drag Reduction Purposes: Experiments and Simulations on Rectangular 2D Riblets. MRS Online Proceedings Library Archive, 2005. 899.
- [14] Hou, Jianfeng, Babak Vajdi Hokmabad, and Sina Ghaemi. "Three-dimensional measurement of turbulent flow over a riblet surface." Experimental Thermal and Fluid Science 85 (2017): 229-239.
- [15] Lee, J., Jelly, T. O., & Zaki, T. A. (2015). Effect of Reynolds number on turbulent drag reduction by superhydrophobic surface textures. Flow, Turbulence and Combustion, 95(2-3), 277-300.

- [16] El-Samni, O. A., H. H. Chun, and H. S. Yoon. "Drag reduction of turbulent flow over thin rectangular riblets." *International Journal of Engineering Science* 45.2-8 (2007): 436-454.
 - [17] Song, X. W., Zhang, G. G., Wang, Y., & Hu, S. G. (2011). Use of bionic inspired surfaces for aerodynamic drag reduction on motor vehicle body panels. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 12(7), 543-551.
 - [18] Arenas, I., et al., Comparison between super-hydrophobic, liquid infused and rough surfaces: a direct numerical simulation study. *Journal of Fluid Mechanics*, 2019. 869: p. 500-525.
 - [19] Fu, Y., C. Yuan, and X. Bai, Marine drag reduction of shark skin inspired riblet surfaces. *Biosurface and Biotribology*, 2017. 3(1): p. 11-24.
 - [20] Kurita, M., et al. Flight Test of a Paint-Riblet for Reducing Skin-Friction. in 2018 Applied Aerodynamics Conference. 2018.
 - [21] Huang, C., Liu, D., & Wei, J. (2016). Experimental study on drag reduction performance of surfactant flow in longitudinal grooved channels. *Chemical Engineering Science*, 152, 267-279.
 - [22] Yang, S., Li, S., Tian, H., Wang, Q., & Jiang, N. (2015). Coherent spanwise structures in turbulent boundary layer over drag-reducing riblets. *Transactions of Tianjin University*, 21(4), 317-323.
 - [23] Zhang, Y., & Che, D. (2012). Effects of two-dimensional V-shaped grooves on turbulent channel flow. *Experiments in fluids*, 52(2), 315-328.
 - [24] Ma, Hongwei, Qiao Tian, and Hui Wu. "Experimental study of turbulent boundary layers on groove/smooth flat surfaces." *Journal of Thermal Science* 14.3 (2005): 193-197.
 - [25] Gang, Z., et al., Investigation on the Effect of Transverse Grooves on Friction Force, in *Advanced Tribology*. 2009, Springer. p. 787-790.
 - [26] Cui, J. and Y. Fu, A numerical study on pressure drop in microchannel flow with different bionic micro-grooved surfaces. *Journal of Bionic Engineering*, 2012. 9(1): p. 99-109.
 - [27] Boomsma, A. and F. Sotiropoulos, Riblet drag reduction in mild adverse pressure gradients: a numerical investigation. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2015. 56: p. 251-260.
 - [28] Zhi-hong, S., & Ting-ting, S. Drag Reduction Study on Rotors with Triangle Groove Surface. In 2009 International Conference on Energy and Environment Technology.
 - [29] Friedmann, E., Portl, J., & Richter, T. (2009). A study of shark skin and its drag reducing mechanism. In *Advances in Mathematical Fluid Mechanics* (pp. 271-285). Springer, Berlin, Heidelberg.
 - [30] Dean, Brian, and Bharat Bhushan. "The effect of riblets in rectangular duct flow." *Applied Surface Science* 258.8 (2012): 3936-3947.
- [۳۱] حاجی‌خان میرزایی، امیر، رئوف پناه، علیرضا. (۱۳۹۸). بررسی عددی فرآیند کاهش پسا در جریان آرام با استفاده از ریبلت‌های مستطیلی. علوم کاربردی و محاسباتی در مکانیک، ۳۱(۱)، ۱۷۳-۱۶۵-۱۶۵. doi: 10.22067/fum-mech.v31i1.79677۱۶۵-۱۷۳.

چکیده انگلیسی:

A Numerical Investigation of Flow Drag Reduction by Riblet Surfaces in different geometries and dimensions

Hosein safari ^{1*}, Alireza Raoufpanah ²

1- Mechanical engineering, Islamic Azad University, Yadegar-e-Imam Khomeini (rah) Branch, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Mechanical engineering, Islamic Azad University, Yadegar-e-Imam Khomeini (rah) Branch, Tehran, Iran.

Received: March 2022

Accepted: June 2022

Abstract

Nowadays, due to the shortage of energy resources, the industries pay more attention to the energy efficiency. in terms of transportation, reducing of energy consumption and increasing the speed of marine vessels and submarines, the surface friction resistance holds an important role. riblets surfaces are a passive method that have ability of surface drag reduction. This study, investigates numearically, the drag reduction of 4 different and new geometries of riblets in different dimensions and velocities. the flow is in the laminar regime range and riblets are aligned perpendicular to the flow direction. Also the distribution of shear stress and static pressure on the riblet surfaces are examined. The Results showed that geometries 1 and 4 have a higher drag reduction (about 10.7% and 10.2%) relative to the geometries 2 and 3 (about 7.7% and 4.4%) Respectively. Unlike geometries 1 and 4, geometries 2 and 3 have a higher viscose force relative to the pressure force on their surfaces. Also the study of speed changes showed that geometries 1 and 4 have a higher drag reduction in each speed respectively.

Key words: Riblet, Drag Reduction, Numerical Simulation Efficiency.

*corresponding author: hossfri.unive@gmail.com

Cite this article as: Hosein safari, Alireza Raoufpanah. A Numerical Investigation of Flow Drag Reduction by Riblet Surfaces in different geometries and dimensions. Journal of Energy Conversion, 2022, 9(2), 33-53.

DOR: [20.1001.1.20089813.1401.9.2.2.5](https://doi.org/10.20089813.1401.9.2.2.5)