

بررسی پسای اصطکاکی در سکان مدل مجهز به میکروریبلت دندانه‌ای با مقطع NACA0025 با استفاده از شبیه‌سازی عددی

غلامرضا صالحی^۱، پویان ادیبی^۲، سعید نیازی^۳، طالب زارعی^۴

۱- دانشجوی دکترای دانشگاه هرمزگان

۲ و ۳- استادیار گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

۴- دانشیار گروه مهندسی مکانیک دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه هرمزگان

چکیده:

بحران انرژی و آلودگی‌های زیست‌محیطی از چالش‌های مهمی است که بشر در عصر حاضر با آن روبرو است. کاهش سوخت‌های فسیلی نیز اهمیت اندیشیدن چاره‌ای برای این چالش‌ها را دوچندان می‌نماید. یکی از راه‌های کاهش مصرف انرژی، شناخت نیروی‌های مقاوم و یافتن راه‌هایی برای غلبه بر آنها است. کاهش نیروی پسا می‌تواند به کاهش مصرف سوخت و افزایش سرعت کاربری منجر گردد. در صنعت حمل‌ونقل دریایی و جابجایی شناورها در دریا که بیش از ۹۰ درصد حمل‌ونقل جهان را شامل می‌گردد؛ مقابله با نیروی مقاومی که بر شناورها و متعلقات آن از سوی آب وارد می‌شود؛ بسیار ضرورت دارد. یکی از موارد مهمی که در طراحی شناور باید مدنظر قرار گیرد بررسی وضعیت کاهش پسا در متعلقات است که کمتر مورد توجه محققان قرار می‌گیرد. سکان از متعلقات زیرآبی در انواع شناورهای دریایی است. در این پژوهش به مطالعه کاهش نیروی پسای وارد از سوی آب به سکان پرداخته می‌شود. مطالعه موردی بر روی سکانی با مقطع NACA0025 انجام شده‌است. ریبلت‌ها در چند نسبت مختلف بر روی هیدروفویل سکان ایجاد و نیروی پسای اعمال‌شده با استفاده از شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار استارسی‌ام محاسبه گردیده‌است. نتایج نشان می‌دهد که در نسبت ارتفاع ریبلت صد میکرون و فاصله دویست میکرون، بیشترین میزان کاهش پسا به اندازه ۱۲/۵ درصد مشاهده می‌شود.

واژه‌های کلیدی:

ریبلت، پسا، نیروی مقاومت، هیدروفویل، میکروریبلت.

Investigating the Effect of Riblets on Frictional Drag Reduction on a Rudder Hydrofoil: A Numerical Simulation

Gholamreza salehi¹, Pouyan Adibi², Saeid niazi³, Taleb zareei⁴

1,2,3,4 Department of Mechanical Engineering, Hormozgan university, bandar abbas, Iran

Abstract:

The energy and environmental crisis pose significant challenges to humanity, necessitating solutions to reduce energy consumption. In the marine transportation industry, where over 90% of global transportation occurs, addressing resistance forces acting on vessels and their components in water is crucial for efficient design. The rudder, an essential underwater accessory in marine vessels, plays a vital role in drag reduction, leading to improved fuel efficiency and performance. This research focuses on investigating the reduction of drag force exerted by water on a rudder with NACA0025 section. Riblets of varying dimensions are implemented on the rudder hydrofoil, and the resulting drag force is calculated using simulation in STAR CCM software. The findings reveal that a riblet height of 100 microns and a distance of 200 microns yield the maximum drag reduction of 12.5%.

Keywords:

Riblet, Drag, Resistance Force, Hydrofoil, Microriblet.

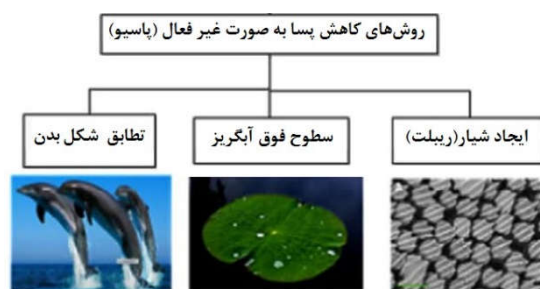
۱- مقدمه

کاربرد شناورهای تندرو بسیار متداول شده است. استفاده از این نوع شناور در زمینه‌های تفریحی، نظارتی و حتی نظامی باعث شده تقاضا برای طراحی، ساخت و به دنبال آن دستیابی به سرعت‌های بالاتر افزایش چشمگیری داشته باشد. تاکنون پژوهش‌های فراوان و معتبری در دنیا و همچنین توسط محققان داخلی بر روی انواع شناورهای تندرو صورت پذیرفته است. [۱-۷]. با توجه به بحران‌هایی مانند آلودگی هوا، کاهش ذخایر سوخت‌های فسیلی، هزینه‌های بالای تولید، جابجایی و مصرف سوخت که در دنیا وجود دارد تحقیقات بسیاری برای به حداقل رساندن این بحران‌ها صورت پذیرفته است [۸-۱۱].

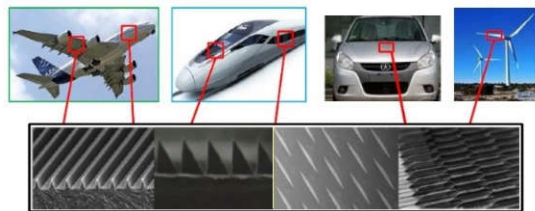
از دیرباز ارجاع به طبیعت برای حل چالش‌های بشری در جوامع اولیه مرسوم بوده و در جوامع مدرن نیز محققین برای حل چالش‌های پیچیده در صنایع به سراغ عوامل طبیعی رفته و با الهام از روشی که طبیعت این مشکلات را حل یا تعدیل نموده به دنبال راهکاری برای فائق آمدن بر چالش‌های صنعتی هستند. یکی از چالش‌هایی که در صنایع هوایی و دریایی عامل مصرف سوخت است نیروی پسا یا دود از طرف سیال به اجزای مختلف متحرک‌های دریایی و هوایی است. تحقیقات روزافزونی در این خصوص انجام گردیده است [۱۲-۱۳]. روش‌های کاهش پسا در صنایع پیشرفته به دودسته عمده فعال و غیرفعال تقسیم می‌گردند [۱۴]. به روش‌هایی که نیاز به مصرف انرژی جداگانه دارند مانند پاشش گاز یا حباب، در لایه‌مرزی یا قسمتی از بدنه، گرم کردن یا سرد کردن بخشی از دیواره تماس جسم متحرک با سیال، ایجاد مکش در قسمتی از دیواره مشترک با سیال [۱۵-۱۷]، روش‌های فعال یا اکتیو و همچنین روش‌هایی که نیاز به مصرف جداگانه انرژی نداشته و با تغییرات کلی در شکل یا فرم بدنه یا استفاده از ابزار و روش خاص، عامل کاهش پسا می‌گردند مانند استفاده از ریبلت‌ها، سطوح آب‌گریز و سطوح نرم و انعطاف‌پذیر، روش‌های غیرفعال یا پاسیو می‌گویند [۱۸-۲۲]. از آن‌جاکه موضوع کاهش نیروی پسا توسط ریبلت از موضوعات جاری در تحقیقات پژوهشگران است [۲۳-۲۸]، طبیعی است برای یافتن راه‌های جدید از روش مهندسی معکوس و با الهام از طبیعت مانند سایر چالش‌ها استفاده گردد [۲۹-۴۱]. بررسی پوست کوسه‌ماهی‌های سریع و مکانیزم شیارها، برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های روی آن باعث

الهام محققان برای استفاده از این ساختار جهت کاهش نیروی پسا در هیدرودینامیک و آیرودینامیک بوده است [۴۲]. در شکل (۲) نمونه‌هایی از کاربرد ریبلت‌ها در صنایع مختلف مشاهده می‌شود [۴۳].

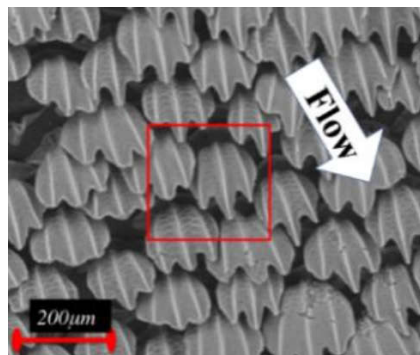
در شکل (۳) نیز وضعیت برآمدگی‌ها و فرورفتگی‌های روی سطح پوست کوسه که در واقع نقش شیار (ریبلت) را دارند به همراه راستای جریان مشخص گردیده است [۴۴]. شکل (۴) نیز مکمل تصویر واقعی است [۴۵]. در شکل (۵) نیز وضعیت قرارگیری ریبلت‌ها همراه با مقیاس فاصله و ابعاد ارائه گردیده است [۴۶].



شکل ۱- برخی روش‌های غیرفعال کاهش پسا [۴۲]

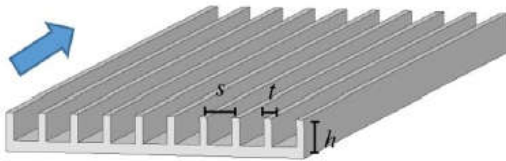


شکل ۲- استفاده از ریبلت در صنایع مختلف [۴۳]

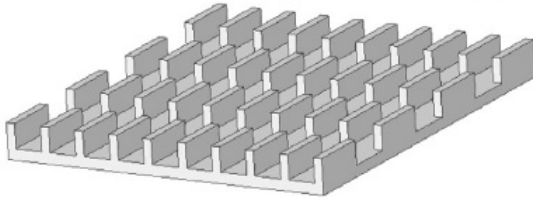


شکل ۳- وضعیت ریبلت روی پوست کوسه [۴۶]

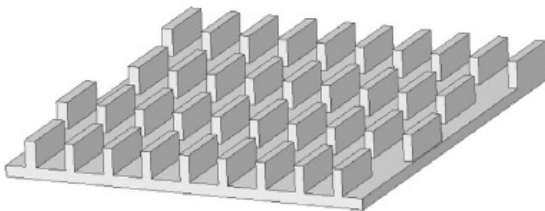
آرایش‌های مختلف نحوه قرارگیری ریبلت‌ها صرفاً برای یک نوع ریبلت (تیغه‌ای) نشان داده شده است.



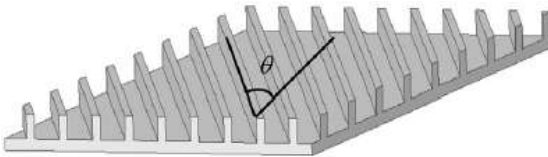
شکل ۷- ریبلت با آرایش ممتد



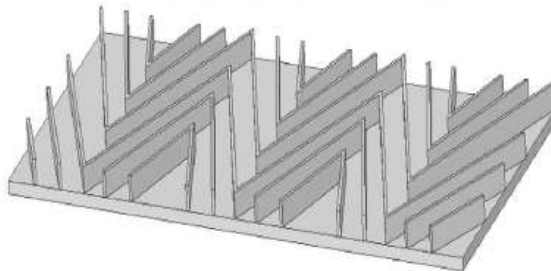
شکل ۸- ریبلت با آرایش غیر ممتد و پشت سرهم



شکل ۹- ریبلت با آرایش غیر ممتد و غیر پشت سرهم



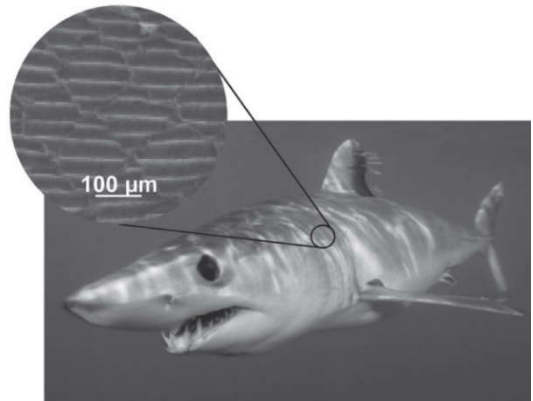
شکل ۱۰- ریبلت ممتد و زاویه‌دار نسبت به جهت جریان



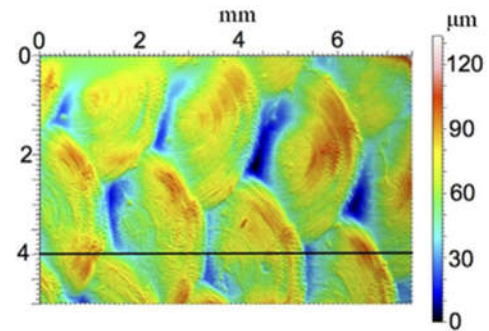
شکل ۱۱- ریبلت زاویه‌دار نسبت به جهت جریان و غیر ممتد

ابعاد مشخص شده در شکل‌های بالا بزرگ‌نمایی شده‌اند؛ ابعاد واقعی ریبلت در محدوده میکرون قرار دارد. این ابعاد در میزان درصد کاهش یا افزایش پسا نیز تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای دارند.

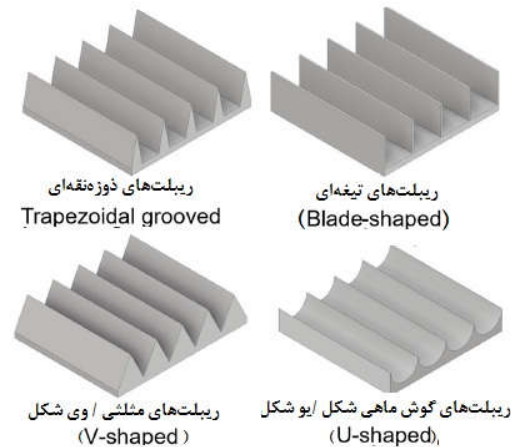
مؤلفه‌های مؤثر در میزان تأثیر ریبلت در کاهش پسا بسیار متنوع هستند. نوع ریبلت، عدد رینولدز، نسبت بی‌بعد ارتفاع و فاصله قرارگیری ریبلت‌ها از همدیگر هر کدام می‌تواند بر میزان کاهش و حتی افزایش پسا مؤثر



شکل ۴- محل قرارگیری ریبلت روی پوست کوسه [۴۵]

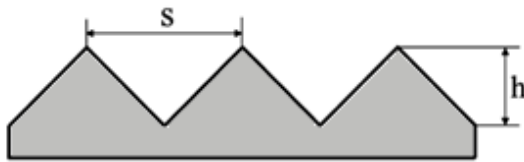


شکل ۵- نحوه قرار گرفتن ریبلت روی پوست ماهی [۴۶] ریبلت‌ها فرم‌ها و مدل‌های مختلفی دارند به نحوی که هم مدل ریبلت و هم نحوه قرارگیری و آرایش آن‌ها در کنارهم، در کاهش پسا مؤثر است. در شکل (۶) نمونه‌های اصلی که رایج است نشان داده شده است.



شکل ۶- مدل ریبلت‌های مرسوم در تحقیقات [۴۶]

بیان شد علاوه بر شکل ریبلت‌ها، نحوه قرارگیری آن‌ها نیز در میزان کاهش پسا مؤثر است. نحوه قرارگیری ریبلت‌ها می‌تواند هم به صورت ممتد و هم به صورت بخش‌بخش ایجاد گردد که در آرایش‌های پشت سرهم و غیر پشت سرهم قرار می‌گیرد. در شکل‌های (۷) تا (۱۱)



شکل ۱۲- هندسه ریبلت دندانه‌ای

۲-۵- ضریب اصطکاک

ضریب اصطکاک تئوری صفحه صاف نیز که با عکس توان $0.1/2$ رینولدز ارتباط دارد طبق رابطه (۴) به دست می‌آید.

$$C_f = 0.074Re^{-0.2} \quad (4)$$

عدد رینولدز بستگی به سرعت سیال دارد.

۲-۶- اندازه بی‌بعد ارتفاع و فاصله ریبلت

رابطه‌های شماره (۵) و (۶) معادله ابعاد بی‌بعد مربوط به ریبلت هستند.

$$s^+ = \frac{sU}{\nu} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (5)$$

$$h^+ = \frac{hU}{\nu} \sqrt{\frac{C_f}{2}} \quad (6)$$

U در این روابط سرعت جریان است، ν ویسکوزیته سینماتیکی، S و h نیز به ترتیب فاصله و ارتفاع ریبلت‌ها برابر شکل شماره (۱۲) است. C_f نیز ضریب اصطکاک تئوری صفحه تخت که برابر رابطه (۴) (ضریب حل تئوری بلازیوس) تعریف می‌گردد.

۲-۷- درصد تأثیر ریبلت

در صد کاهش پسا در حضور ریبلت توسط رابطه (۷) تعریف می‌شود. این رابطه را می‌توان به صورت راندمان ریبلت نیز نشان داد که اختلاف دو ضریب پسا در حضور ریبلت و بدون حضور ریبلت است.

$$DR\% = 100 \times \frac{CD(with\ rib) - CD(no\ rib)}{CD(with\ rib)} \quad (7)$$

در این رابطه DR% مخفف در صد کاهش پسا است؛ در واقع اختلاف پسا در حضور ریبلت و پسا بدون حضور ریبلت است. اگر کاهش پسا را تحت عنوان راندمان تعریف کنیم می‌توان به صورت زیر نشان داد.

باشند. لذا بررسی حالت‌های مختلف از لحاظ عددی و تطبیق با نتایج پژوهش‌های صورت گرفته ضروری است.

۲- مؤلفه‌های مؤثر در کاهش پسا با ریبلت

مؤلفه‌های زیادی وجود دارند که در میزان کاهش یا افزایش ضریب پسا مؤثرند. در این میان تعدادی مهم‌ترینند:

۲-۱- عدد رینولدز

اولین و یکی از مهم‌ترین مؤلفه‌های مؤثر بر نیروی پسا عدد رینولدز است؛ که معادله آن به صورت رابطه (۱) نشان داده شده است.

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (1)$$

که در این معادله U سرعت جریان، L طول جسم (با Lx نیز نشان داده می‌شود) و ν ویسکوزیته سینماتیکی سیال است.

۲-۲- ضریب پسا

معادله دوم، معادله ضریب پسا است:

$$C_d = \frac{F_d}{\frac{1}{2}\rho U^2 s} \quad (2)$$

در معادله (۲) s, ρ, F_d به ترتیب نیروی پسا، چگالی سیال و سطح خیس شده (مساحت سطح تماس سیال و جسم) هستند؛ U نیز سرعت جسم در سیال یا سرعت سیال گذرنده در تماس با جسم ساکن است.

۲-۳- سرعت برشی

معادله سرعت برشی از رابطه (۳) به دست می‌آید که ریشه دوم نسبت تنش برشی به چگالی سیال است.

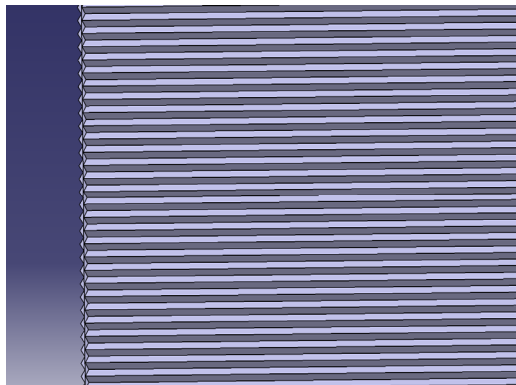
$$u_\tau = \left[\frac{\tau_w}{\rho} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

۲-۴- مشخصات هندسی ریبلت دندانه‌ای

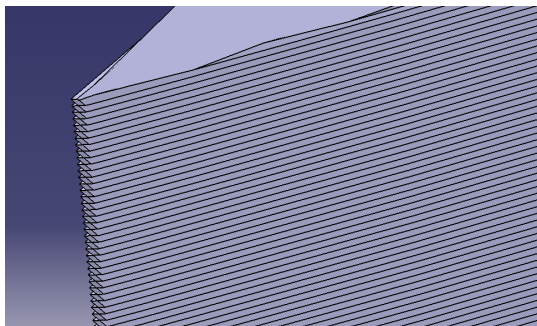
ارتفاع ریبلت از سطح صفحه پایه که با h نمایش داده می‌شود و فاصله هر ریبلت تا ریبلت بعدی که با S نمایش داده می‌شوند. هندسه این ابعاد در شکل (۱۲) ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات ارتفاع و فاصله ریبلت‌های روی مقطع

#	ارتفاع (h) متر	فاصله (s) متر
1	0.0001	0.0001
2	0.0001	0.00014
3	0.0001	0.0002
4	0.00025	0.0005
5	0.0005	0.0005



شکل ۱۵- شیارها (ریبلت) روی مقطع هیدروفویل



شکل ۱۶- شماتیک ریبلت روی سطح هیدروفویل سکان

۲-۲- مش‌بندی و دامنه حل

مش‌بندی‌ها نیز که یکی از جنبه‌های کلیدی اجرای شبیه‌سازی است با استفاده از نرم‌افزار استار سی سی‌ام صورت می‌گیرد. البته این فرآیند شامل مراحل مختلفی است. در شکل‌های (۱۷) و (۱۸)، (۱۹) و (۲۰) چگونگی مش‌بندی اطراف هیدروفویل را نشان می‌دهد. اطراف ریبلت‌ها باید به‌گونه‌ای باشد که وضعیت جریان قابل‌پایش باشد. به‌منظور مش‌بندی مؤثر، اطراف مؤثر مجموعاً از حدود ۳۷ میلیون سلول استفاده می‌گردد.

$$\eta = \frac{F(\text{بدون ریبلت}) - F(\text{با ریبلت})}{F(\text{بدون ریبلت})} \times 100 \quad (۸)$$

در این رابطه η راندمان (برحسب درصد) و F نیروی وارد بر سطح است.

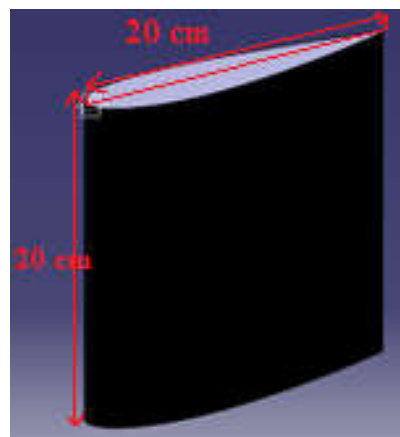
۳- روش

۱-۳- تولید هندسه

برای تنظیم چهارچوب حل معادلات، یک مدل با نرم‌افزارهای CAD تولید می‌کنیم. برای این کار مقطع NACA0025 را انتخاب می‌کنیم. مقطع هیدروفویل تولید شده در نرم‌افزار کتیا در شکل (۱۳) نشان داده شده است. اندازه‌های ارتفاع و طول ۲۰ سانتی‌متر تعیین و ریبلت‌ها (شیار) را ایجاد می‌کنیم. مدل سه‌بعدی ریبلت خورده شده در شکل (۱۳) قابل مشاهده است.



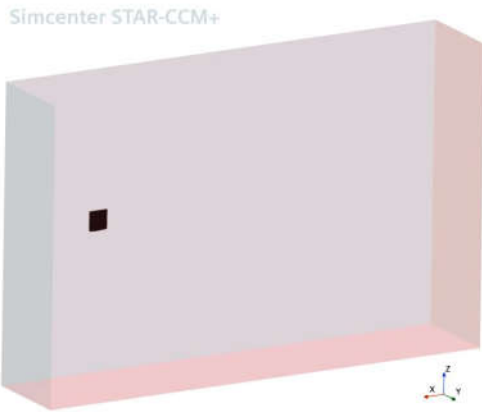
شکل ۱۳- مقطع هیدروفویل NACA0025



شکل ۱۴- هیدروفویل سکان دارای ریبلت

در شکل (۱۵) نمای نزدیک و بزرگ‌نمایی شده ریبلت‌ها نشان داده شده است. به‌این‌علت که در ابعاد میکرون هستند نمایش در شکل کامل امکان‌پذیر نیست؛ اما در شکل (۱۶) به‌صورت شماتیک مشخص گردیده است. ابعاد ریبلت‌ها در چند ارتفاع و فاصله متفاوت برای بررسی و مقایسه ایجاد می‌گردد. اندازه‌ها در جدول (۱) ارائه گردیده است.

با در نظر گرفتن ابعاد بزرگ‌تر جهت اطمینان از پاسخ‌ها در نرم‌افزار استارسی‌سی‌ام در شکل (۲۱) نشان داده شده است.



شکل ۲۱- دامنه حل معادلات و فضای اطراف سکان

۳-۳- معادلات حاکم و تنظیمات حل گر

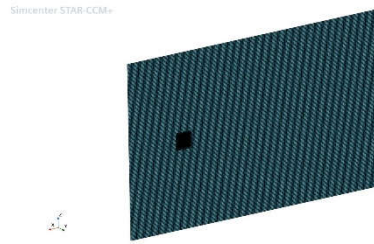
شبیه‌سازی جریان روش‌های مختلفی دارند که برای پیش‌بینی جریان می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از هر کدام از این روش‌ها بستگی به شرایط ویژگی‌های جریان دارد. برای شبیه‌سازی جریان از معادلات متوسط‌گیری شده ناویراستوکس استفاده می‌گردد:

$$\frac{\partial(pU)}{\partial t} + \nabla \cdot (pUU) = -\nabla p + \quad (9)$$

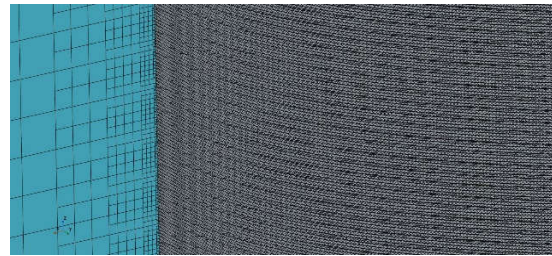
$$\nabla \cdot [\mu(\nabla U + (\nabla U)^T)] + pg - \nabla \left(\frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot U) \right) - \nabla \cdot (\overline{pU'U'})$$

$$-\overline{pU'U'} = \mu_t (\nabla U + (\nabla U)^T) - \frac{2}{3} pkI - \frac{2}{3} (\nabla \cdot U)I \quad (10)$$

معادله (۹) در بیانگر معادله RANS است. آخرین جمله به‌عنوان تنش رینولدز شناخته می‌شود. برای حل آن از فرضیه بوسینسک استفاده می‌شود که در معادله (۱۰) نشان داده شده است. این فرضیه تنش رینولدز را به گرادیان سرعت متوسط با ضریب μ_t مرتبط می‌کند که ویسکوزیته گردابی نام دارد. برای تخمین ویسکوزیته گردابی مدل‌های فراوانی وجود دارد. از آنجاکه این شبیه‌سازی نیاز به تمرکز گسترده‌ای در نزدیکی سطوح هندسه موردنظر دارد از مدل دو معادله‌ای $k - \omega SST$ (کی-اومگا اس‌اس‌تی) استفاده می‌کنیم. این مدل در طول دهه‌ها برای تقریب بهتر توسعه یافته است. مدل

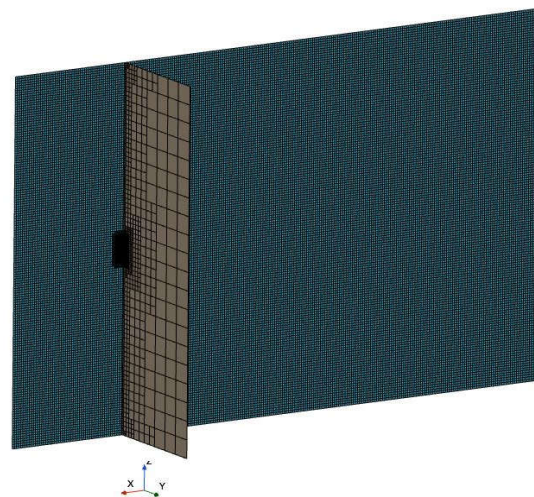


شکل ۱۷- محل قرارگیری هیدروفویل سکان در دامنه

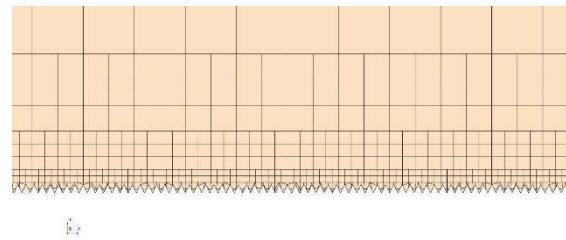


شکل ۱۸- نحوه مش‌بندی در لبه حمله و نزدیک مقطع

Simcenter STAR-CCM+



شکل ۱۹- سکان در دامنه محاسباتی حل و مش‌بندی دامنه

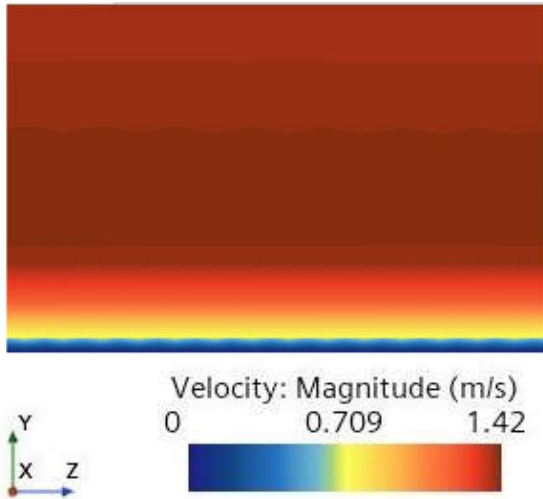


شکل ۲۰- بزرگ‌نمایی مش‌بندی در نزدیک ریبلت‌ها

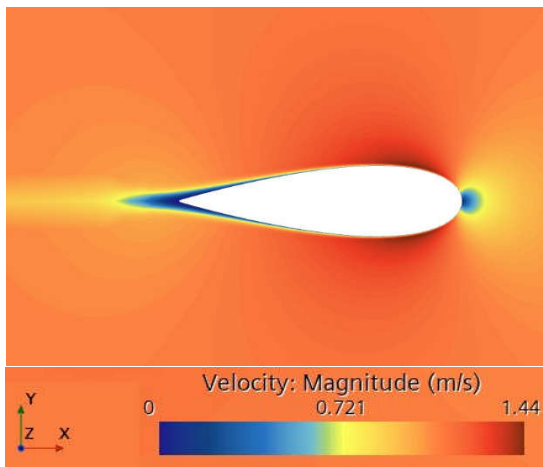
همان‌طور که در شکل‌های (۱۷)، (۱۸) و (۱۹) مشخص گردیده در تنظیمات مش‌بندی در نزدیکی بدنه حداقل دو نقطه در داخل ریبلت‌ها جهت پایش وضعیت سرعت پیش‌بینی گردیده است. فضای دامنه حل معادلات

۴-۱- کانتور سرعت فشار

کانتورهای سرعت در حالت بدون ریبلت و با نسبت ریبلت‌های مختلف به دست آمده از شبیه‌سازی عددی برابر تنظیمات انجام شده در شکل‌های (۲۳) تا (۳۲) ارائه گردیده است. باید توجه داشت که نمای ارائه گردیده نمای روبروی سکان در حالت وسط است.



شکل ۲۳- کانتور سرعت در حالت بدون ریبلت



شکل ۲۴- کانتور سرعت در حالت بدون ریبلت نمای بزرگ

مورد استفاده در این مطالعه SST است که بر اساس فرموله کردن تنش برشی انتقالی عمل می‌کند. در این مدل ویسکوزیته گردابی به صورت زیر فرض می‌گردد.

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 w, S F_2)} \quad (11)$$

K انرژی جنبشی آشفتگی، ω نرخ اضمحلال،

مدل سازی معادلات به صورت زیر انجام می‌شود:

$$\frac{D}{Dt}(\rho k) = \nabla \cdot (\rho D_k \nabla k) + \rho G - \frac{2}{3} \rho k (\nabla \cdot u) - \rho \beta^* \omega k + S_k \quad (12)$$

$$\frac{D}{Dt}(\rho \omega) = \nabla \cdot (\rho D_\omega \nabla \omega) + \frac{\rho \gamma G}{v} - \frac{2}{3} \rho \gamma \omega (\nabla \cdot u) - \rho \beta \omega^2 - \rho (F_1 - 1) C D_{k\omega} + S_\omega \quad (13)$$

$$k = \frac{3}{2} (I |u_{ref}|)^2 \quad (14)$$

$$\omega = \frac{k^{0.5}}{C_\mu^{0.25} L} \quad (15)$$

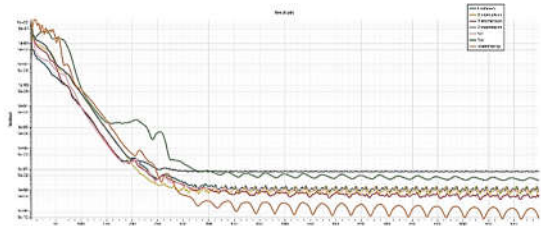
معادلات (۱۴) و (۱۵) همان‌طور که مشخص است

انرژی جنبشی آشفتگی (k) و نرخ اضمحلال (ω) را مدل می‌نماید. برای مقاردهی اولیه از روابط (۱۲) و (۱۳) استفاده می‌گردد.

C_μ مقدار ثابتی است که اندازه آن ۰/۹ است. بعد از محاسبه این مقدار، روند محاسبات ادامه می‌یابد؛ البته برای حل این معادلات الگوریتم‌های خاص نیز توسعه یافته و از روش‌های صریح یا نیمه ضمنی مبتنی بر فشار و حل معادلات خطی فشار استفاده می‌گردد [47]. این مدل به علت پایداری روش کارآمدی است و از محاسبات کمتری برخوردار است؛ به‌ویژه برای جریان‌های ساده‌تر همگرایی سریع‌تر حاصل می‌گردد.

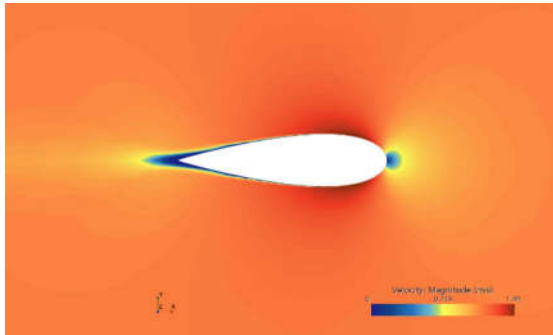
۴-۳- معیار همگرایی

معیار همگرایی حل مقدار 10^{-7} در نظر گرفته شد. تا مطمئن شویم معادلات به همگرایی قابل قبولی خواهند رسید. شکل (۲۲) نمودار همگرایی حل معادلات را نشان می‌دهد.

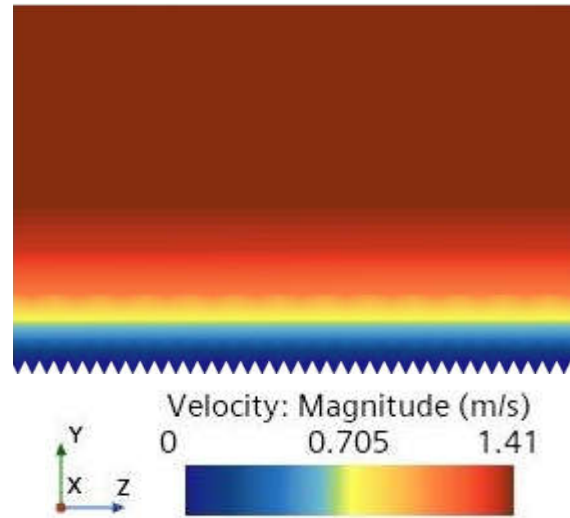


شکل ۲۲- نمودار همگرایی حل معادلات

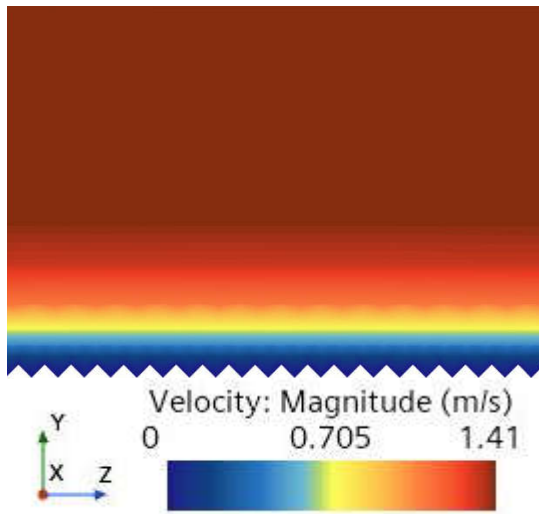
۴- نتایج و بحث



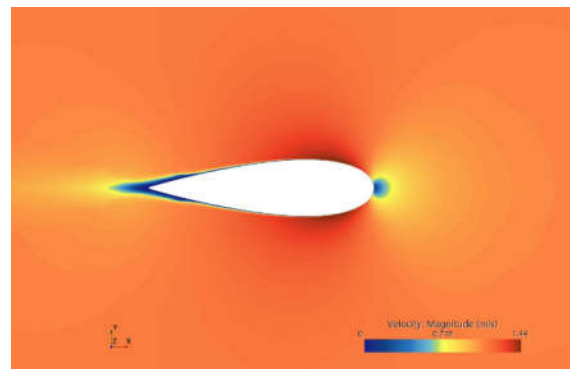
شکل ۲۸- کانتور سرعت در $h=100$ و $S=140$ میکرون
نمای بزرگ



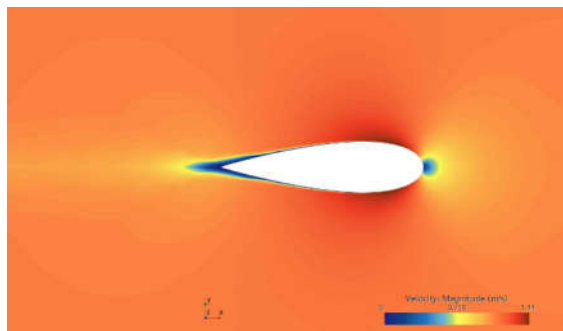
شکل ۲۵- کانتور سرعت $h=100$ و $S=100$ میکرون



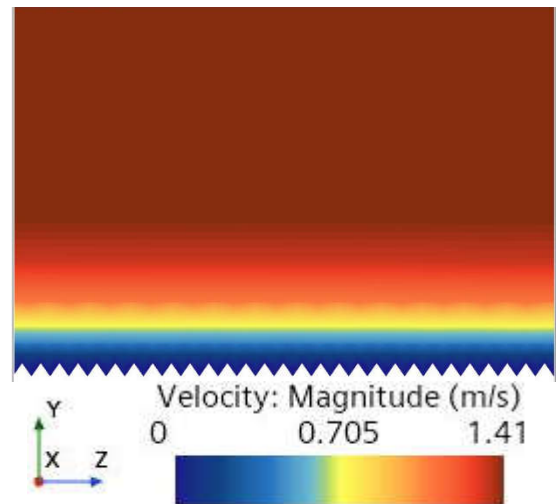
شکل ۲۹- کانتور سرعت در $h=100$ و $S=200$ میکرون



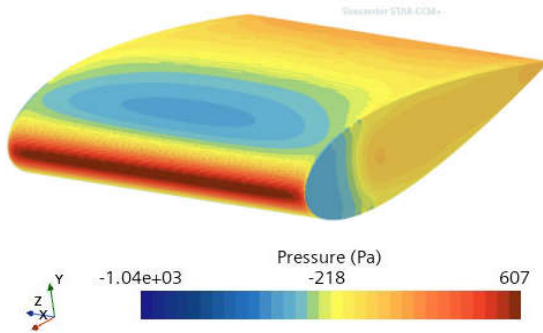
شکل ۲۶- کانتور سرعت $h=100$ و $S=100$ میکرون
نمای بزرگ



شکل ۳۰- کانتور سرعت در $h=100$ و $S=200$ میکرون



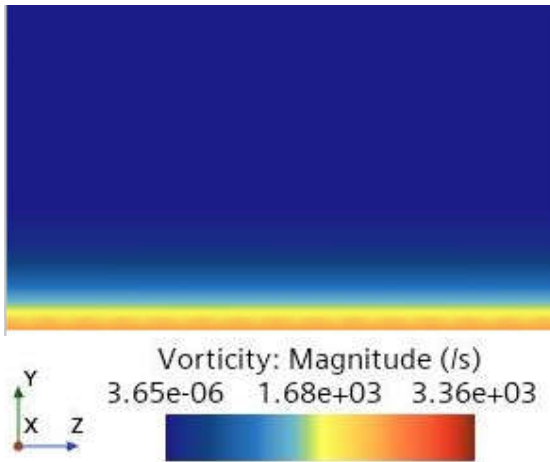
شکل ۲۷- کانتور سرعت در $h=100$ و $S=140$ میکرون



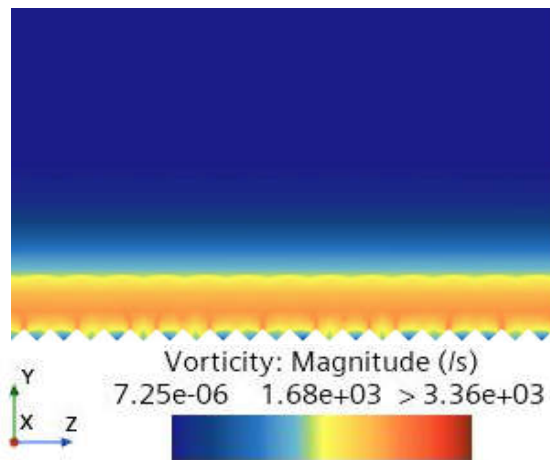
شکل ۳۳- کانتور فشار در اطراف مقطع سکان

۲-۴- وضعیت گردابه‌ها در اطراف ریبلت

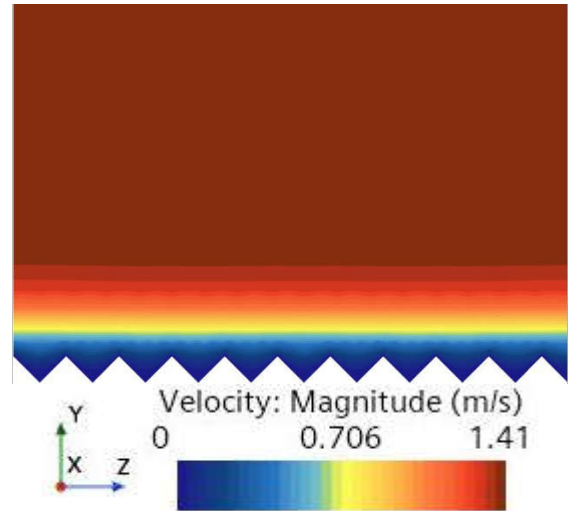
در شکل‌های (۳۴) و (۳۵) وضعیت گردابه‌ها در اطراف ریبلت با کمترین پسا و حالت بدون ریبلت مشخص نمایش داده شده است.



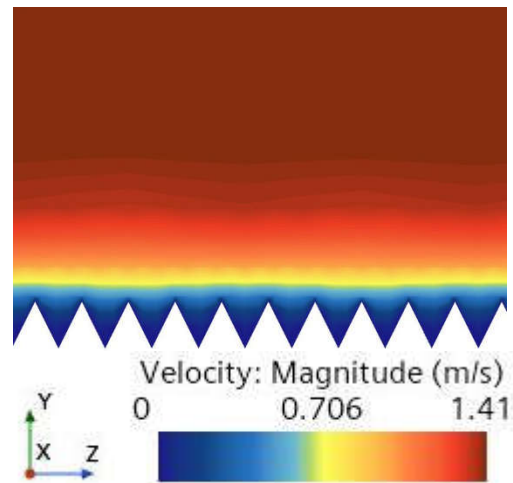
شکل ۳۴- کانتور وُرتیسیتی در حالت بدون ریبلت



شکل ۳۵- کانتور وُرتیسیتی در $h=100$ و $S=200$ میکرون



شکل ۳۱- کانتور سرعت $h=250$ و $S=500$ میکرون



شکل ۳۲- کانتور سرعت $h=500$ و $S=500$ میکرون

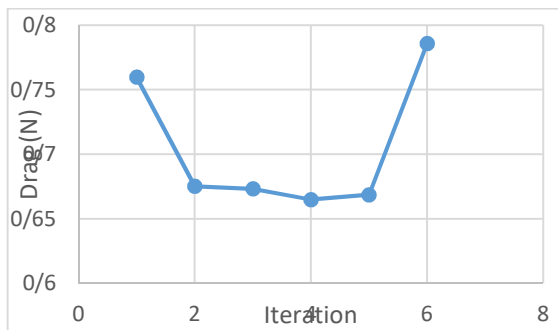
با توجه به شکل‌های ارائه شده مشخص است لایه درونی کم سرعت و نزدیک به سطح ریبلت‌های ۱۰۰-۲۰۰ فاصله بیشتری از نوک ریبلت‌ها دارد. در حالت بدون ریبلت نیز طول این ارتفاع لایه از سطح کمتر است. به بیانی دیگر دورتر شدن لایه جریان آشفته و پرسرعت از سطح باعث دور شدن ناحیه حامل گردابه‌های بزرگ‌تر است؛ این موضوع باعث کاهش ویسکوزیته آشفتگی و نهایتاً کاهش میزان تنش در دیواره می‌گردد لذا طبیعی است که شاهد کاهش پسا باشیم. نکته مهم این است که در مقابل این کاهش پسا افزایش سطح ناشی از ایجاد ریبلت باعث افزایش پسا می‌گردد. لذا نکته مهم پیدا کردن حالتی است که این کاهش پسا بیشتر از افزایش باشد. در شکل (۳۳) کانتور فشار بر روی بدنه ارائه گردیده است.

جدول ۲- مقادیر به دست آمده در حالت های مختلف

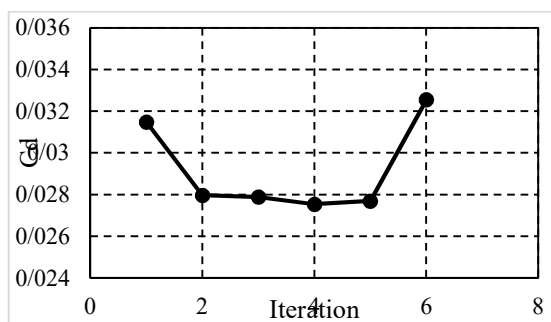
ریبیلت

#	وضعیت ریبیلت	نیروی پسا	ضریب پسا
۱	بدون ریبیلت	۰,۷۵۹۷۷۱۴۲۸	۰,۰۳۱۴۷۲۲۷۱
۲	۱۰۰-۱۰۰	0.675126863	0.027966013
۳	۱۰۰-۱۴۰	0.673235953	0.027887686
۴	100-200	0.664866213	0.027540983
۵	250-500	0.668542862	0.027693282
۶	500-500	0.785754	0.032548559

همان طور که مشخص است کمترین میزان خروجی در حالت شماره (۴) و در ارتفاع ۱۰۰ میکرون و فاصله ۲۰۰ میکرون از یکدیگر به دست آمده است. شکل های (۳۶) و (۳۷) وضعیت تغییرات نیروی پسا و ضریب پسا را برابر مقادیر جدول (۲) نشان می دهد.



شکل ۳۶- نیروی پسا در آرایش های مختلف ریبیلت



شکل ۳۷- ضریب پسا در آرایش های مختلف ریبیلت

همان طور که در شکل های بالا مشخص است کمترین میزان کاهش ضریب و نیروی پسا در آرایش شماره (۴) به ارتفاع صد میکرون و فاصله دو بیست میکرون از یکدیگر است. نکته قابل توجه این است که اثر ریبیلت دارای یک ناحیه بهینه است و در یک ناحیه محدود دارای اثر کاهش پسا است و چنانچه این ناحیه درست انتخاب نگردد شاهد

همان طور که مشاهده می شود ایجاد ناحیه با سرعت کم در فضای بین ریبیلت ها می تواند عامل کاهش ایجاد گردابه های در تماس با سطح گردد. نکته دیگر ایجاد ناحیه گردابه و پرتنش و گردابه در نزدیکی دندانها است.

۳-۴- مکانیزم کاهش فشار در ریبیلت

با توجه به بررسی های انجام شده می توان این گونه بیان کرد که جریان در زیر لایه لزوج، منظم بوده و در لایه های بیرونی آشفته، نامنظم و درهم. حرکات درهم در بالای این زیر لایه می تواند به دلیل انتقال گردابه های در جهت جریان که در سطح زیر لایه لزوج تولید شده باشد. گردابه هایی که در واقع حول محور در راستای جهت سرعت متوسط می گردند. این گردابه ها می چرخند و در جهت سطح جریان پیدا می کنند. به طور طبیعی در راستای عمود بر راستای جریان نیز دارای حرکت هستند. اندرکنش بین گردابه ها و سطح و همچنین بین گردابه های مجاور که در هنگام حرکت باهم برخورد دارند باعث آغاز حرکت انفجاری شده که در آن گردابه ها به سرعت از زیر لایه لزوج به سمت لایه مرزی خارجی انتقال می یابند. زمانی که گردابه ها به بیرون منتقل شدند با دیگر گردابه ها برخورد داشته و طوری می گردند که بردارهای سرعت لحظه ای، در راستای حرکت جریان، به بزرگی بردارهای سرعت متوسط جریان اضافه شوند [۴۸]. این عامل (انفجار و انتقال) گردابه ها به بیرون از زیر لایه لزوج از روش های انتقال مومنوم به سیال هستند و عوامل حائز اهمیت در مقدار پسا اعمال شده می باشند. کاهش رفتار انتقالی گردابه ها در راستای جریان یکی از اهداف کلیدی برای کاهش پسا است؛ زیرا احتمال کاهش پسا با این روش قابل توجه است [۴۹]؛ بنابراین می توان نتیجه گرفت: ریبیلت ها از سه طریق موجب کاهش پسا می شوند، اولاً با ایجاد مانع برای انتقال گردابه ها از زیر لایه لزوج به بیرون و افزایش تنش برشی و در نتیجه افزایش پسا و دوم با جابجایی گردابه های سطحی به بالاتر و کاهش اثرات متقابل این گردابه ها بر سطح جسم شناور و نهایتاً اینکه با به تأخیر انداختن جدایش جریان که این موارد به نوعی دارای همپوشانی هستند و به همدیگر نیز بستگی دارند.

۴-۴- بررسی نتایج و خروجی ها

در جدول شماره (۲) مقادیر ضریب پسا و نیروی پسا در حالت های مختلف ارتفاع ریبیلت و فاصله ریبیلت ها از یکدیگر ارائه گردیده است.

۶-مراجع

- [1] Sajedi, S. M., and Ghadimi, P. Experimental and Numerical Assessment of the Effect of Transverse, Pointed Aft, and Re-entrant Vee Steps as well as Ventilation on Hydrodynamic Performance of Mono-hull Planing Crafts in Calm Water. *Iranian Journal of Science and Technology-Transactions of Mechanical Engineering*, 46(3), pp.715–731, 2022. doi:<https://doi.org/10.1007/s40997-022-00519-8>.
- [2] Najafi, A., Nowruzi, H., Ameri, M.J. and Karami, M. An experimental study of the wetted surfaces of two- stepped planing hulls. *Ocean Engineering*, 222, p. 108589, 2021. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.108589>.
- [3] Najafi, A., Nowruzi, H., and Ameri, M. J. Hydrodynamic assessment of stepped planing hulls using experiments. *Ocean Engineering*, 217, p.107939, 2020. doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107939>.
- [4] Nowruzi, H., and Najafi, A. An experimental and CFD study on the effects of different pre-swirl ducts on propulsion performance of series 60 ship. *Ocean Engineering*, [online] 173, pp.491–509, 2019.
- [5] Najafi, A., Nowruzi, H., and Ghassemi, H. Performance prediction of hydrofoil- supported catamarans using experiment and ANNs. *Applied Ocean Research*, 75, pp.66–84, 2018. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apor.2018.02.017>.
- [6] Ghadimi, P., Sajedi, S. M., Ghadimi, A., and Sheikholeslami, M. R. Experimental and numerical probe into the effects of adding one and two steps to a mono-hull planing vessel on its performance in calm water. *Scientia Iranica*, 2021. doi:<https://doi.org/10.24200/sci.2021.57177.5101>.
- [7] Ghadimi, P., Sajedi, S. M., and Tavakoli, S. Experimental Study of the Wedge Effects on the Performance of a Hard-chine Planing Craft in Calm Water. *Scientia Iranica*, 0(0), 2018. doi:<https://doi.org/10.24200/sci.2018.20607>.
- [8] Saraji, M. K., Aliasgari, E., Streimikiene, D. Assessment of the challenges to renewable energy technologies adoption in rural areas: a Fermatean CRITICVIKOR approach, *Technical Forecasting and Social Change* 189, 122399, 2023.
- [9] Energy and Mineral Regulatory Commission (EMRC), <https://emrc.gov.jo/>, accessed on 10 Feb 2023 [in Arabic].

افزایش نیروی پسا خواهیم بود. برابر خروجی‌ها میزان یا اثر ریبلت در مقدار بهینه به اندازه ۱۲/۵ درصد کاهش پسا در مقایسه باحالت بدون ریبلت هستیم.

۴-۵-اعتبارسنجی نتایج

برای اعتبار سنجی مقادیر به دست آمده به نتایجی که سایر پژوهشگران در تحقیقات به دست آورده‌اند رجوع می‌کنیم این نتایج در جدول (۳) ارائه گردیده است.

جدول ۳- نتایج تحقیقات و میزان کاهش پسا

ردیف	نوع مقطع	درصد کاهش پسا/%	مرجع
۱	NACA	۴/۳	[۵۰]
۲	NACA	۱۳/۳	[۵۱]
۳	NACA	۱۳	[۵۲]
۴	Flat plate	۷/۳۳	[۵۳]
۵	Flat plate	۹	[۵۴]

بیشینه کاهش پسای به دست آمده حاصل از پژوهش جاری برابر ۱۲/۵ درصد کاهش در نیروی پسا است این موضوع مؤید تطابق خوبی با نتایج تحقیقات مراجع ذکر شده است.

۵-نتیجه‌گیری

در بررسی اثر ریبلت بر روی سکان با مقطع NACA0025 با ابعاد مختلف در پژوهش حاضر نتایج زیر به دست آمد:

- ۱-ریبلت‌ها باوجود اثر افزایش مساحت سطح خیس در تماس با شناور می‌توانند در شرایط خاصی از ابعاد عامل کاهش ضریب پسا گردند.
- ۲-وضعیت نسبت ارتفاع و فاصله به صورت بی‌بعد تأثیر قابل ملاحظه‌ای در یافتن محدوده اثر کاهش ریبلت دارد.
- ۳-در ابعاد ارتفاع ۱۰۰ میکرون و فاصله ۲۰۰ میکرون ریبلت‌ها از یکدیگر شاهد بیشترین میزان کاهش نیروی پسا و ضریب پسا به اندازه ۱۲/۵ درصد نسبت به حالت بدون ریبلت بوده‌ایم.
- ۴-در ابعاد ارتفاع ۵۰۰ میکرون و فاصله ۵۰۰ میکرون شاهد افزایش نیروی پسا هستیم.

- [22] Huey, J. C., Gene, E. K., Michael, S. F., et al, DRA for gas pipelining successful in gulf of mexico trial, *Oil Gas J.* 98 (23), 54–58, 2000.
- [23] Mitchell Quinn, Dylan McGrath, Duncan C. Bell, Henry C. Bilinsky, Joseph Builth-Williams, Christoph Feichtinger, Peter A. Leidl, Andreas Flanschger and Shahfiq Shahjahan. "Advancements in Drag-Reducing Riblet Film Production for Aviation and Other Applications," AIAA 2022-0920. AIAA SCITECH 2022 Forum. January 2022.
- [24] Hu, j., and Yao, Zh. Drag reduction of turbulent boundary layer over sawtooth riblet surface with superhydrophobic coat. *Physics of Fluids* 1 January, 35 (1): 015104, 2023. <https://doi.org/10.1063/5.0132403>
- [25] Chan, Kevin, L. Skvortsov, A., and Ooi, A. Effect of straight riblets of the underlying surface on wall bounded flow drag, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 102, 109160, ISSN 0142-727X, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2023.109160>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142727X23000590>).
- [26] Chan, Kevin, L. Skvortsov, A., and Ooi, A. Effect of straight riblets of the underlying surface on wall bounded flow drag, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Volume 102, 109160, ISSN 0142-727X, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2023.109160>.
- [27] Cafiero, G., and Iuso, G. Drag reduction in a turbulent boundary layer with sinusoidal riblets, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Volume 139, 110723, ISSN 0894-1777, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2022.110723>.
- [28] Soleimani, Sh. and, Eckels, S. A review of drag reduction and heat transfer enhancement by riblet surfaces in closed and open channel flow, *International Journal of Thermofluids*, Volume 9, 100053, ISSN 2666-2027, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100053>. Volume 9, 2021, 100053, ISSN 2666-2027,
- [29] Gordon, J. E. *The new science of strong materials, or why you don't fall through the floor*, 2nd Ed., Pelican–Penguin, London, UK 1976.
- [30] *Design and Nature II Comparing Design in Nature with Science and Engineering* (Eds: M. W. Collins, C. A. Brebbia), WIT Press, Southampton, UK 2004.
- [10] Nchofoung, T.N., Fotio, H. K., Miamo, C. W. Green taxation and renewable energy technologies adoption: a global evidence, *Renew. Energy Focus* 44, 334–343 Volume 2023 ISSN 1755-0084, 2023. doi: 10.1016/j.ref.2023.01.010
- [11] Erős, N., Török, Z., Hossu, C. A., Réti, K. O., Maloş, C., Kecskés, P., Morariu, S. D., Benedek, J., Hartel, T. Assessing the sustainability related concepts of urban development plans in Eastern Europe: a case study of Romania, *Sustain. Cities Soc.* 85, 104070 Volume ISSN 2210-6707, 2022. doi: 10.1016/j.scs.2022.104070
- [12] Khan, A., Shah, I., Aziz, S., Waqas, M., Zaman, U. K. U., Jung, D. W. Numerical and Experimental Analysis of Drag and Lift Forces on a Bullet Head. *Aerospace*, 9, 816, 2022. <https://doi.org/10.3390/aerospace9120816>
- [13] Rahman, M. R. Computational Analysis of Aerodynamic Parameters for Supersonic Artillery Projectiles *International journal of mechanical engineering. J. Mech. Civ. Eng.* 6, 1–18, 2020.
- [14] Croke, T. C., Thomas, F. O. Active and passive turbulent boundary-layer drag reduction, *AIAA J.* 56 (10), 3835–3847, 2018.
- [15] Cecil, S. L. Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 42, 183–203, 2009.
- [16] Krope, A., and Lipus, L. C. Drag reducing surfactants for district heating, *Appl. Therm. Eng.* 30 (8), 833–838, 2010.
- [17] Zheng, X. B., Jiang, N., and Zhang, H. redetermined control of turbulent boundary layer with a piezoelectric oscillator, *Chin. Phys. B* 25 (1), 014703, 2016.
- [18] Wang, X. TRPIV Experimental research of drag reduction mechanism by a riblet surface, Tianjin University, Tianjin, 2017.
- [19] White, C. M., and Mungal, M. G. Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives, *Annu. Rev. Fluid Mech.* 40, 235–256, 2008.
- [20] Shokry, F., Abd Elfattah, M., El-Gayar, D. A., et al. Effect of drag reducing polymers and impeller geometry on the rate of mass Fig. 17 The relation between vortexes and heat transfer at the wall of a cylindrical stirred tank reactor in relation to catalytic reactor design, *Alexandria Eng. J.* 59 (1), 509–518, 2020.
- [21] Lai, S. C. S. *Mimicking nature: physical basis and artificial synthesis of the lotus-effect*, University of Leiden, Friesland, 2003.

[46] Bliamis, C., Vlahostergios, Z., Misirlis, D., Yakinthos, K. Numerical Evaluation of Riblet Drag Reduction on a MALE UAV. 9, 218, Aerospace 2022.

<https://doi.org/10.3390/aerospace9040218>

[47] Caretto L. S., Gosman A. D., Patnakar S. V., and Spalding, D. B. Two Calculation Procedures for Steady, Three-Dimensional Flows With Recirculation, 1972.

[48] Bixler, G. D., and Bhushan, B. Biofouling: lessons from nature. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 370(1967): p. 2381-2417, 2012.

[49] Heydarian, A., Rishchri, M., Dehghanian, A. and Kazempour, A. Numerical Simulation of the Effects of Micro Riblets on Hydrodynamics Parameters of Planning Vessels. *High Speed craft*, 15(48), pp.42–50, 2016. [in Persian]

[50] Han, M., Lim, H. C., Jang, Y. G., Seung, S. L., Lee, S. J. Paper # 0-7803-7731-1, presented at 12 th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems, Boston, MA 2003.

[51] Caram, J. M., Ahmed, A. Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. J. 1991, 29, 1769.

[52] Sundaram, S., Viswanath, P. R., Rudrakumar, S. Am. Inst. Aeronaut. Astronaut. J. 34, 676.

[53] Gu, Y., Fan, T., Mou, J., Wu, D., Zheng, S. and Wang, E. Characteristics and mechanism investigation on drag reduction of oblique riblets. *Journal of Central South University*, 24(6), pp.1379–1386, 2017.

doi:<https://doi.org/10.1007/s11771-017-3542-5>.

[54] Rohr, J. J., Andersen, G. W., Reidy, L.W., Hendricks, E. W. A comparison of the dragreducingbenefits of riblets in internal and external flows, *Exp. Fluids* 13 (6), 361–368, 1992.

[31] Learning from Nature How to Design New Implantable Biomaterials (Eds: R. L. Reis, S. Weiner), Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA 2004.

[32] Bhushan, B. *Philos. Trans. R. Soc.*, 367, 1445, 2009.

[33] Bhushan, B. *Biomimetics: Bioinspired Hierarchical-Structured Surfaces for Green Science and Technology*, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany 2012.

[34] *Bulletproof Feathers How Science Uses Nature's Secrets to Design Cutting Edge Technology*, (Ed: R. Allen), Ivy Press, London 2010.

[35] *Bio-Inspired Innovation and National Security* (Eds: R. E. Armstrong, M. D. Drapeau, C. A. Loeb, J. J. Valdes), National Defense University Press, Washington, DC 2010.

[36] Bar-Cohen, Y. *Biomimetics: Nature Based Innovation*, CRC Press, Boca Raton, FL 2011.

[37] G. K. Batchelor, *An Introduction to Fluid Dynamics*, Cambridge University Press, Cambridge 1970.

[38] Blevins, R. D. *Applied Fluid Dynamics Handbook*, Van Nostrand- Reinhold, New York 1984.

[39] *Standard Handbook for Aeronautical and Astronautical Engineers* (Ed: M. Davies), McGraw-Hill, New York 2002.

[40] White, F. *Viscous Fluid Flow*, 3 rd ed., McGraw Hill, New York 2006.

[41] Fox, R. W. and McDonald, A. T. *Introduction to Fluid Mechanics*, 11 th Ed. John Wiley & Sons, New York 2011.

[42] Fu, Y.F., Yuan, C.Q. and Bai, X.Q. *caramsurfaces. Biosurface and Biotribology*, 3(1), pp.11–24, 2017.

doi:<https://doi.org/10.1016/j.bsbt.2017.02.001>.

[43] Sayad Saravi, S., and Cheng, K. A Review of drag reduction by riblet and micro-textures in the turbulent boundary. *European Scientific Journal*, 9(33), 2013.

doi:<https://doi.org/10.19044/ESJ.2013.V9N33P>.

[44] Boomsma, A., and Sotiropoulos, F. Direct numerical simulation of shark skin denticles in turbulent channel flow. *Physics of Fluids* 28, 035106, 2016.

[45] Bixler, G. D., and Bhushan, B. Fluid Drag Reduction with Shark-Skin Riblet Inspired Microstructured Surfaces. *Advanced Functional Materials*, 23(36), 4507–4528, 2013.

<https://doi.org/10.1002/adfm.201203683>