

بررسی استفاده از مغشوش ساز برای کاهش نیروی مقاومت زیرسطحی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی

محمد صادقی^{*}

Mohamad.Sadeghi1@aut.ac.ir، تهران، ایران، امیرکبیر، دانشگاه مهندسی دریا، دانشکده مهندسی دریا،

چکیده:

امروزه، استفاده از زیرسطحی‌ها در حوزه‌های نظامی، تحقیقاتی و علمی دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای است. بنابراین، طراحی، تحلیل و ساخت آنها نیز از امور بسیار مهم در سنجش توانایی علمی و تکنولوژی محسوب می‌شود. یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های طراحان زیرسطحی‌ها، کاهش نیروی مقاومت آنها برای کاهش مصرف سوخت، راندمان بالاتر و مانورپذیری بهتر است. بنابراین، روش‌های متفاوتی نظیر بهینه‌سازی بدنه زیرسطحی‌ها و روش‌هایی برای مغشوش ساختن جریان اطراف بدنه زیرسطحی‌ها استفاده شده است. در تحقیق حاضر، با استفاده از روش شبیه‌سازی عددی در محیط نرم‌افزار ANSYS-FLUENT و استفاده از ریبلت بر روی بدنه زیردریایی سابوف، که یک مدل آزمایشگاهی تحقیقاتی محققان است، نیروی مقاومت کاهش یافته است. به منظور دستیابی به چیدمان بهینه این ریبلت‌ها بر روی بدنه زیردریایی سابوف، از چهار شیوه توزیع سطوح ریبلت بر روی بدنه زیردریایی سابوف استفاده شده است. در نهایت، مشاهده گردید که استفاده از ۳۲ ردیف ریبلت بر روی بدنه زیردریایی، باعث کاهش ۳۲ درصدی مقاومت ناشی از لزجت سیال بر روی بدنه زیردریایی می‌گردد. اما، بهینه‌ترین حالت برای کاهش مقاومت کل، حالتی است ریبلت‌ها با زاویه ۴۵ درجه، معادل هشت ردیف از ریبلت‌ها، روی بدنه زیردریایی نصب شوند تا باعث کاهش ۱۳/۸ درصدی نیروی مقاومت کل شوند.

واژه‌های کلیدی:

زیرسطحی، مغشوش‌ساز، نیروی مقاومت، دینامیک سیالات محاسباتی (CFD).

Investigation on effect of turbulence simulator on reducing resistance force by CFD method

Mihamad Sadeghi

Marine Engineering, Amir Kabir University of technology, Tehran, Iran

Abstract:

Today, the use of submarines in the military, research and scientific fields is extremely important. Therefore, their design, analysis and construction are also very important in measuring scientific ability and technology. One of the main concerns of submarine designers is to reduce their resistance to reduce fuel consumption, higher efficiency and better maneuverability. Therefore, different methods such as subsoil body optimization and methods have been used to confuse the flow around the submarine body. In the present study, using a numerical simulation method in the ANSYS-FLUENT software and the use of a riblet on the submarine body, which is a laboratory model for researchers' research, the force of resistance is reduced. In order to achieve the optimal arrangement of these riblets on the submarine body of Subbof, Four methods of distribution of riblet surfaces on the submarine body of Subbof have been used. Finally, it was observed that the use of 32 rows of riblets on the submarine body reduces the resistance caused by fluid stagnation on the submarine body by 32%. But the most optimal way to reduce the total resistance is to place the riblets at a 45-degree angle, equivalent to eight rows of riblets, on the submarine body to reduce the total resistance force by 13.8 percent.

Keywords:

Submarine, Turbulence simulator, Resistance force, CFD (Computational Fluid Dynamics).

امروزه، با پیشرفت صنایع دریایی، نقش زیردریایی‌ها به عنوان بخشی از صنایع دریایی، چه در حوزه‌های علمی و فناوری و چه در حوزه‌ی نظامی قابل انکار نیست. طراحی زیردریایی جزو صنایع با فناوری بسیار بالا محسوب شده و در اختیار معدودی از کشورها است.

در حوزه‌ی تحلیل زیرسطحی، روش‌های محاسبه مقاومت و تکنیک‌های کاهش آن همواره از جمله موضوعات مورد بحث بوده و هست. یکی از این روش‌ها، استفاده از مغشوش کردن جریان اطراف بدنه است، چون بیشترین نیروی مقاومت اصطکاکی در این نواحی اتفاق می‌افتد.

در سال ۲۰۰۵م لی و همکاران [۱] به مقایسه‌ی جریان حول استوانه‌های شیشه‌ای صاف و ریبلت‌دار پرداختند. نتایج حاکی از آن است که تنها در اعداد رینولدزی خاص درگ سطح زبر از درگ سطح صاف کمتر می‌باشد. تیان و همکاران [۲] در سال ۲۰۰۷م بزرگی مقدار سرعت‌ها، بزرگی مقدار گردابه‌ها و اندازه‌ی ضخامت لایه مرزی را برای ریبلت‌هایی به شکل محدب و مقعر و یک مدل صاف، باهم مقایسه کرده‌اند. آنها از مدل آشفنگی نیمه‌تجربی $k-\epsilon$ که بر اساس معادلات انتقالی انرژی جنبشی توربولانس (k) و نرخ استهلاک آن (ϵ) می‌باشد، بهره گرفته‌اند. نتایج نشان داد که سطح ناصاف در مقایسه با سطح صاف در شرایط جریان هوا با سرعت پایین بر روی جسم مدور، می‌تواند نیروی درگ را کاهش دهد. در سال ۲۰۱۰م ژانگ و همکاران [۳] به شبیه‌سازی جریان بین یک صفحه صاف و یک صفحه زبر با ریبلت‌هایی به شکل پوست کوسه پرداختند. در این پژوهش، پارمترهایی همچون تنش برشی، سرعت، شدت توربولانس و کاهش درگ مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج بیانگر پایین‌تر بودن تنش برشی کل بر روی سطح با پوست کوسه نسبت به سطح صاف بوده است و این کاهش نیروی درگ در پوست کوسه را نشان می‌دهد. در سال ۲۰۱۱م فوس [۴] به بررسی اثر هشت نوع زبری بر ضریب درگ سطح پرداخت. او با تعریف معیاری به عنوان میزان زبر بودن سطح نتیجه گرفت که سطوحی با برخی مشخصه‌ها (برآمدگی‌های فاصله‌دار از یکدیگر)، در هیچ رینولدزی درگ را کاهش نمی‌دهند. برخی سطوح در بازه‌ی کوچکی از اعداد رینولدز ضریب درگ را اندکی

کاهش داده و سطوح با مشخصه‌هایی خاص (برآمدگی-های نزدیک به هم) در بازه‌ی وسیعی از اعداد رینولدز ضریب درگ را به شدت کاهش می‌دهند.

ریبلت‌ها، بیرون‌زدگی‌هایی هستند که در مسیر جریان برخوردی به جسم و ایجاد یک ناحیه ناهمسانگرد، باعث کاهش نیروی درگ از طریق مغشوش ساختن جریان اطراف جسم می‌گردند. این روش، یکی از معدود روش‌های آزمایش‌شده در کاهش نیروی مقاومت در سازه‌های آیرودینامیکی و هیدرودینامیکی است.

ریبلت‌ها به صورت گسترده در آزمایشگاه‌های تونل باد مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته‌اند. والش لیندرمن^۱ [۵] با استفاده از انواع اشکال هندسی اعم از مثلثی، مربعی، سینوسی و U شکل تأثیر آنها بر کاهش نیروی مقاومت را مشاهده کنند. در تحقیق آنها، نیروی مقاومت حداکثر تا ۱۰ درصد کاهش پیدا کرد.

در بررسی‌های بعدی، والش [۶] و بعد از آن، چوی^۲ [۷] و بوشل^۳ [۸] به دنبال کاهش نیروی مقاومت هواپیما از طریق استفاده از ریبلت رفتند. همچنین، جیمینز^۴ [۹] با انجام تست تجربی، کاهش نیروی مقاومت از طریق استفاده از ریبلت را مشاهده نمود.

تجربه‌ی استفاده از ریبلت در کانال‌های نفتی، برای افزایش سرعت انتقال مورد استفاده قرار گرفت. در کانال‌های نفتی، به دلیل سرعت پایین، انتقال نسبت به تونل‌های باد، بحث ابعاد بزرگ‌تر ریبلت‌ها و استفاده از هندسه بهینه مطرح است. به عنوان مثال، بچرت و ...^۵ [۱۰] آزمایش‌های گسترده‌ای را روی سطوح تیغه‌ای و دوزنقه‌ای انجام دادند و نتیجه گرفتند که سطوح دوزنقه‌ای، عملکرد بهتر و تعمیر نگهداری بهتری دارد.

تاکنون، تحقیقات زیادی روی انواع هندسه ریبلت‌ها انجام گرفته است. اما، هیچکدام به اندازه استفاده از سطوح زبر بدن جانوران آبری مورد توجه نبوده است. بروس و ...^۶ [۱۱] به بررسی هندسه بدنه پوسته کوسه در کانال‌های نفتی و بچرت [۱۲] به بحث کاهش درگ ناشی

¹ Walsh, Linderman

² Choi

³ Boshel

⁴ Jimenes

⁵ Bechert et.al

⁶ Brus et.al

از استفاده از این سطوح پرداختند. ایتو^۷ [۱۳] با آزمایش روی سطوح خزه و استخراج هندسه آنها، نیروی درگ را ۱۲ درصد کاهش دهد.

در طراحی ریل‌ها، باید عوامل خارجی و محیطی نیز در نظر گرفته شوند. یکی از این عوامل، خوردگی سطوح ریل است که باعث تأثیر بر عملکرد آنها می‌گردد. این تأثیر نامطلوب، ناشی از تغییرات گرادیان فشاری است که بر اثر از بین رفتن ریل‌ها به وجود می‌آید و توسط والش [۶] مورد بررسی واقع شده است. گرچه این عامل در واقع بسیار تأثیرگذار نیست، اما بر عملکرد دیگر ریل‌ها تأثیر می‌گذارد. ساویل و کاستولز^۸ [۱۴] با بررسی گرادیان فشار در یک بال هواپیما، نتیجه گرفتند این پدیده همواره وجود داشته و تأثیر اندکی بر کارکرد ریل‌ها دارد. در حالی که ناین‌استات و دبیس‌چاپ^۹ [۱۵] با آزمایش پدیده‌ی گرادیان فشار نامطلوب در تونل باد، به این نتیجه رسیدند که عملکرد ریل‌های مثلثی می‌تواند ۷ تا ۱۳ درصد کاهش یابد.

همچنین، از ریل‌ها با موفقیت در کاهش نیروی درگ کلی ایرفویل‌ها [۱۶] و هواپیماها [۱۷] با فاصله‌ی بهینه ۳۰-۷۰ میکرون استفاده شده است. زودروچ^{۱۰} [۱۸] با بررسی استفاده از ریل‌ها در یک هواپیمای تجاری ایرباس ۳۲۰ که حدود ۷۰ درصد بال توسط ریل‌ها پوشیده شده بودند، مشاهده کرد که ۲ درصد مصرف سوخت کاهش یافته است. خلاصه تست‌ها، نتایج و شرایط نگهداری در کار روبرت^{۱۱} [۱۹] قابل مشاهده است. اختلافی که بین نتایج آزمایشگاه و حالت واقعی وجود دارد، دور از ذهن نیست. همه‌ی مقاومت جسم، اصطکاکی نیست [۲۰]. بنابراین، باید به این نکته نیز توجه داشت که کاهش نیروی مقاومت اصطکاکی، همواره منتج به کاهش نیروی مقاومت کل نمی‌شود.

همان طور که گفته شد، اهمیت نقش زیرسطحی‌ها در عملیات‌های نظامی و پژوهش‌های دریایی بسیار بالا است. بنابراین، طراحی، تحلیل و ساخت آنها دارای اهمیت بسیار زیادی برای صنایع هر کشوری است. تاکنون، کلیه کارهای انجام‌شده در زمینه‌ی استفاده از ریل، در

حوزه‌ی هوایی بوده است و صنایع دریایی سهم بسیار کمی از پیشرفت داشته است. در این تحقیق، بنا بر آن بود که با استفاده از شبیه‌سازی به کمک دینامیک سیالات محاسباتی، اثر استفاده از ریل بر کاهش نیروی مقاومت زیرسطحی بررسی گردد. به همین منظور، ابتدا شبیه‌سازی در سه حالت شبکه‌بندی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج با داده‌های آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته و معتبرسازی شدند. سرعت در نظر گرفته‌شده در این آزمایش، ۳/۴۲۲ متر بر ثانیه معادل عدد رینولدز ۲۳۰۰۰۰۰۰ است. پس از انجام تنظیمات حل عددی، سناریو تست اجرا می‌شود که به بررسی چهار حالت قرارگیری ریل‌ها بر روی بدنه زیردریایی سابوف می‌پردازد. نهایتاً مشاهده می‌گردد که نیروی مقاومت ناشی از ویسکوزیته سیال بر روی بدنه زیردریایی در حالتی که ۳۲ ردیف ریل بر روی بدنه قرار می‌گیرد، کاهش ۳۲ درصدی نیروی مقاومت ویسکوز را در پی دارد. اما، بهینه‌ترین حالت برای کاهش مقاومت کل، حالتی است ریل‌ها با زاویه ۴۵ درجه، معادل ۸ ردیف از ریل‌ها، روی بدنه زیردریایی نصب شوند تا باعث کاهش ۱۳/۸ درصدی نیروی مقاومت کل شوند.

۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر حرکت جسم متقارن محوری عبارتند از: معادله‌ی پیوستگی و معادلات مومنتموم در راستای محورهای مختصات کارتزین که در روابط (۱) تا (۴) ارائه شده‌اند (با اعمال قوانین میانگین‌گیری). جمله‌های پرایم‌دار، جمله‌های نوسانی می‌باشند.

⁷ Itoh

⁸ Savill, Coustols

⁹ Nienwstadt, Debisschop

¹⁰ Szodruch

¹¹ Robert

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} \quad (1)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \nabla^2 \bar{u} - \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}'^2) - \frac{\partial}{\partial y} (\bar{u}'\bar{v}') - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{u}'\bar{w}') \quad (2)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \nabla^2 \bar{v} - \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}'\bar{v}') - \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}'^2) - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{v}'\bar{w}') \quad (3)$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \nu \nabla^2 \bar{w} - \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}'\bar{w}') - \frac{\partial}{\partial y} (\bar{v}'\bar{w}') - \frac{\partial}{\partial z} (\bar{w}'^2) \quad (4)$$

ناحیه ۲: بدنه میانی

$$\frac{r_2(x)}{1} = \frac{d}{2l} \quad (6)$$

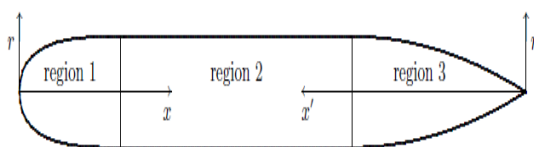
$$0.2 \leq \frac{x}{l} \leq 1 - \frac{3d}{l}$$

ناحیه ۳: دم سهمیگون با طول ۳d

$$\frac{r_3(x')}{d} = \frac{1}{2} - \frac{1}{18} \left(3 - \frac{x'}{d} \right)^2 \quad (7)$$

$$x' = l - x$$

نواحی مختلف این جسم متقارن محوری در شکل ۱ نمایش داده شده است. همچنین، مشخصات زیردریایی سابوف که در تحقیق حاضر مورد بررسی قرار گرفته، در جدول ۱ ارایه گردیده است.



شکل (۱): هندسه‌ی مورد مطالعه متشکل از دماغه،

ناحیه میانی و دم.

جدول (۱): مشخصات زیردریایی سابوف.

پارامتر	مقدار (کمیت)
طول کلی	۶ m
قطر در وسط	۰/۶۸۶ m
مساحت اطراف بدنه	۵/۹۸۹ m ²
حجم داخل بدنه	۰/۶۹۹ m ³

یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر درصد کاهش نیروی مقاومت، نحوه‌ی چیدمان ریبلت بر روی بدنه و هندسه آن است. در شکل ۲ نحوه‌ی قرارگیری ریبلت‌ها در چهار حالت مختلف را نشان می‌دهد. همچنین، در همان شکل، ابعاد منتخب برای ریبلت و نوع هندسه آن ارایه گردیده است. ایده‌ی اصلی استفاده از این نوع هندسه، شباهتی است که ریبلت‌ها به پوست بدن کوسه‌ماهی دارند که بر اساس مطالعات صورت گرفته، دارای اثر بسیار خوبی بر کاهش نیروی مقاومت زیردریایی است.

به منظور یافتن تنش‌های رینولدز و به دلیل پیچیدگی هندسه‌ی مورد مطالعه از معادلات k-e و k-w استفاده شده است. برای بستن معادلات آشفتگی، بر اساس نوع جریان، یک درصد معین را به شدت آشفتگی اختصاص می‌دهند. جریان‌هایی از سیال، مانند جریان‌های خارجی اطراف اتوموبیل‌ها، جسم‌های متقارن محوری زیر آب، شاتل‌های فضایی و البته، تونل‌های باد با کیفیت عالی جزو جریان‌های با آشفتگی پایین قلمداد می‌شوند و برای شدت آشفتگی درصد زیر واحد اعمال می‌گردد. در کنار شدت آشفتگی، تخصیص یک پارمتر آشفتگی دیگر نیز به همگرایی حل کمک شایانی می‌نماید. نسبت لزجت گردابه‌ای به لزجت مولکولی برای جریان‌های خارجی (معمولاً مقداری بین ۱ تا ۱۰) و قطر هیدرولیکی و مقیاس طول آشفتگی (به عنوان کمیت‌هایی فیزیکی وابسته به اندازه گردابه‌های بزرگ دارای انرژی در جریان آشفتگی) برای جریان‌های داخلی از جمله‌ی این پارامترها هستند [۲۱].

۳- شبیه‌سازی عددی

در این بخش، به نحوه‌ی رسم هندسه، شبکه‌بندی، دامنه‌ی محاسباتی و شرایط مرزی و تنظیمات حل عددی پرداخته خواهد شد.

بدنه‌ای که انتخاب شده است، مدل بدنه استاندارد DREA^{۱۲} از موسسه توسعه و تحقیقات دفاعی کانادا می‌باشد. هندسه این جسم متقارن محوری از سه ناحیه تشکیل می‌شود که معادله نواحی مختلف در زیر ارائه شده است (L طول جسم متقارن محوری و d قطر آن می‌باشد):

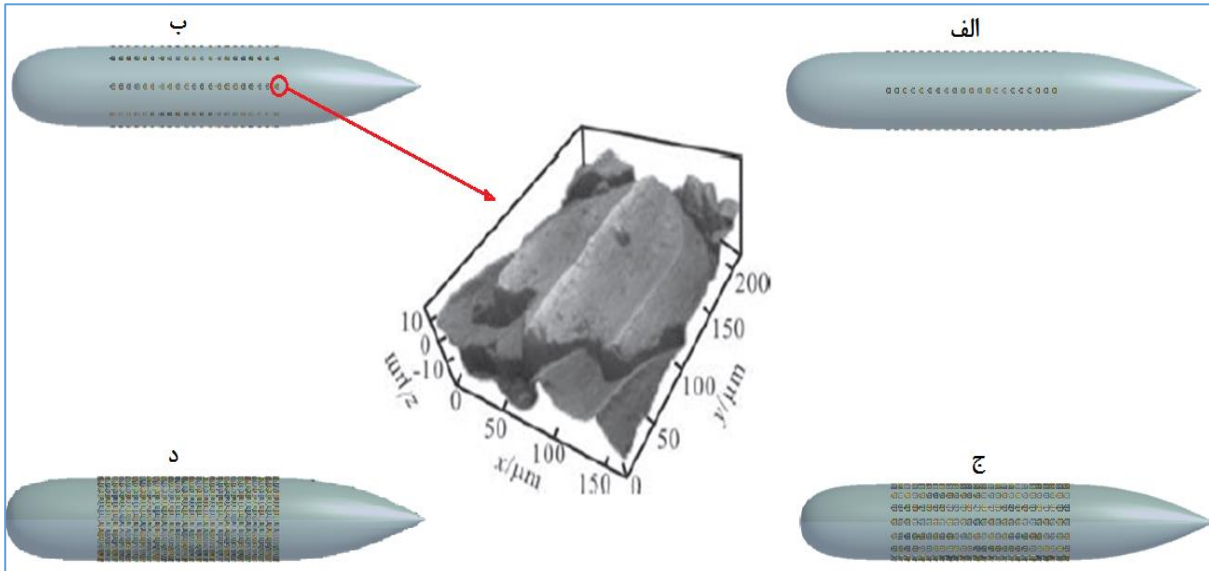
ناحیه ۱: دماغه با طول 0.2L

$$\frac{r_1(x)}{1} = \frac{d}{1} \left[2.56905 \sqrt{\frac{x}{1}} - 3.48055 \frac{x}{1} \right] \quad (8)$$

$$+ 0.49848 \left(\frac{x}{1} \right)^2 + 3.40732 \left(\frac{x}{1} \right)^3$$

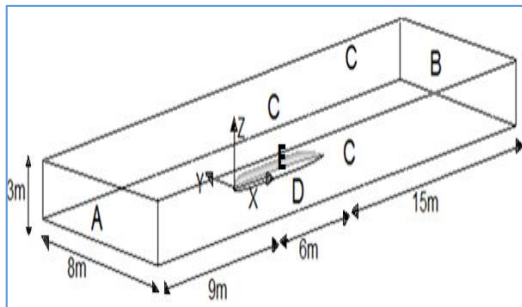
$$0 \leq \frac{x}{1} \leq 0.2$$

¹²Defense Research Establishment Atlantic



شکل (۲): آرایش‌های متفاوت پوست کوسه روی بدنه‌ی جسم متقارن محوری.

سرعت، مماس بر هر یک از این صفحات در نظر گرفته شده است. صفحه‌ی B به عنوان خروجی فرض شده و شرط فشار خروجی برای آن لحاظ شده است. صفحه‌ی E به عنوان صفحه‌ی تقارن و صفحه‌ی E (بدنه‌ی شناور) نیز دیواره با اصل عدم لغزش در نظر گرفته شده است.



شکل (۳): دامنه‌ی محاسباتی مورد مطالعه.

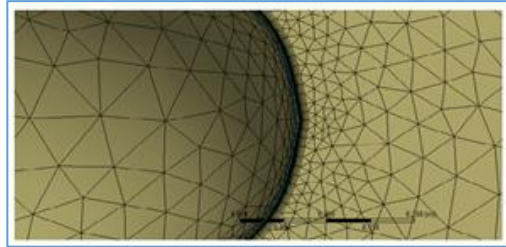
برای شبکه‌بندی هندسه‌ی مورد نظر از ماژول شبکه‌بندی نرم‌افزار انسیس [۲۳] استفاده شده است. در جسم متقارن محوری صاف، به دلیل عدم پیچیدگی هندسه و به جهت بالا بردن دقت حل نزدیک دیواره، المان‌های نزدیک بدنه، ساختاریافته و ریز و المان‌های دورتر، بدون ساختار و درشت در نظر گرفته شده‌اند و برای نزدیک دیواره شبکه لایه‌ی مرزی^{۱۳} فعال گردید. تعداد لایه‌ها برای مدل $k-w$ ، ۲۵ و برای مدل $k-e$ ، ۱۰ و فاصله‌ی لایه‌ها در مدل $k-w$ نسبت به مدل $k-e$ کوچک‌تر لحاظ

بر اساس شکل ۲، ریبلت‌ها به صورت طولی در ناحیه‌ای از زیرسطحی که به صورت استوانه‌ای است، نصب شده‌اند. علت انتخاب این ناحیه برای استفاده از ریبلت، این است که ناحیه دماغه زیردریایی اکثرآ تحت نیروی مقاومت فشاری است و سهم نیروی ناشی از لزجت، بسیار کمتر است. ناحیه دم زیردریایی نیز به علت پدیده‌ی جدایش جریان، تحت نیروی ویسکوز-فشاری قرار می‌گیرد و برای نصب ریبلت و تأثیرگذاری بر کاهش نیروی مقاومت مناسب نیست. در ناحیه استوانه‌ای بدنه، به علت غالب بودن نیروی مقاومت ناشی از لزجت بهترین ناحیه برای نصب ریبلت‌ها است.

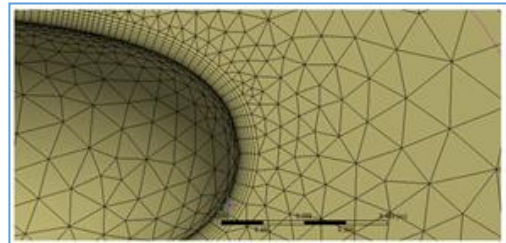
در شکل ۳ دامنه‌ی محاسباتی نشان داده شده است. دامنه‌ی محاسباتی به اندازه‌ی ۱/۵ برابر طول جسم متقارن محوری از سمت چپ و به اندازه‌ی ۲/۵ برابر طول جسم متقارن محوری از سمت راست، تعریف شده است. همچنین، ارتفاع دامنه‌ی محاسباتی به اندازه‌ی طول جسم متقارن محوری می‌باشد تا نتایج به دست آمده مستقل از اندازه‌ی دامنه‌ی محاسباتی گردد. با توجه به تقارن شکل، از نصف مدل در شبیه‌سازی استفاده شده است تا در زمان و هزینه‌ی محاسبات صرفه‌جویی به عمل آید. در شکل ۳، شرایط مرزی اعمال شده نیز بدین شرح است: صفحه A ورودی در نظر گرفته شده و شرط سرعت ورودی عمود بر صفحه به آن اعمال گردیده است. صفحات C نیز هم-سرعت با صفحه‌ی A فرض شده‌اند، با این تفاوت که

¹³Inflation

گردید (به منظور ارضای محدوده‌ی مجاز پارامتر بی‌بعد y^+ که بیانگر فاصله‌ی بی‌بعد اولین گره از دیواره می‌باشد). شبکه‌بندی در شکل ۴ نمایش داده شده است.



(الف)

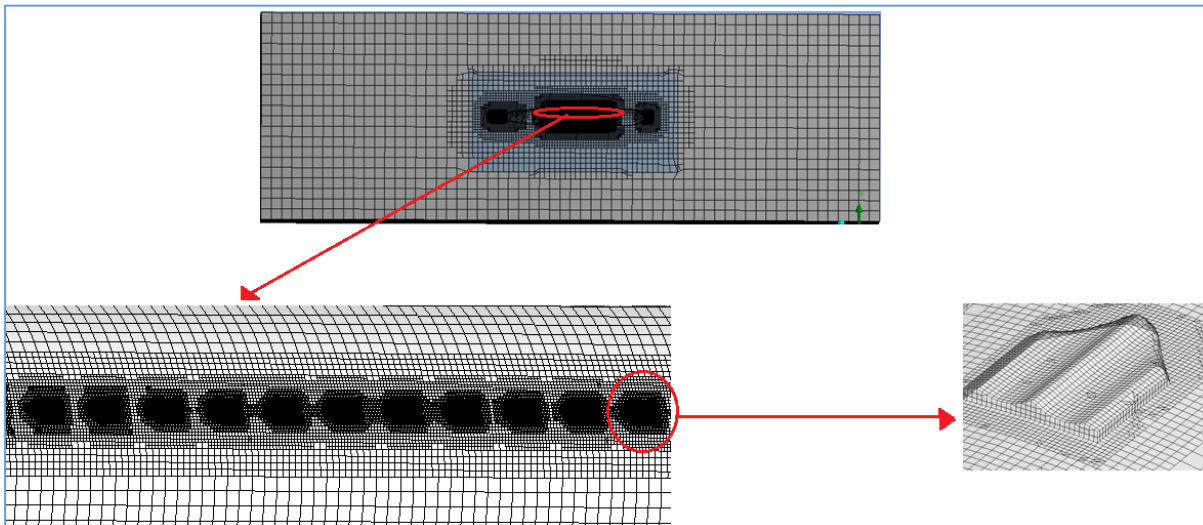


(ب)

شکل (۴): شبکه لایه مرزی. (الف) برای مدل $k-\epsilon$ ، w ، (ب) برای مدل $k-e$.

اما در جسم متقارن محوری زبر، به دلیل پیچیدگی هندسه، از شبکه‌بندی اجزای روی هم سوار شده^{۱۴} استفاده گردید. شبکه‌بندی جسم متقارن محوری زبر به همراه شمایی از یک ردیف خطی و تصویر واضح از شبکه‌بندی اطراف یک پوست در شکل ۵ ارائه شده است.

¹⁴Assembly meshing



شکل (۵): شبکه‌بندی اجزای روی هم سوار شده برای جسم متقارن محوری زیر آب.

درصد خطای اندکی بین نتایج دیده می‌شود.

جدول (۲): اعتبارسنجی نتایج حل با مراجع معتبر.

درصد خطا	مقاومت کل (نیوتون)	روش‌های محاسبه درگ
-	258.2	مرجع [25] (تست تونل باد)
9.75	283.4	مرجع [26]
3.3	249.66	مطالعه حاضر (مدل k-e)
5.88	243	مطالعه حاضر (مدل k-w)

۵- نتایج و تحلیل

به منظور بررسی استقلال از شبکه‌ی محاسباتی حل مورد نظر برای سه شبکه‌ی دیگر تکرار گردید و نمودار تغییرات نیروهای پسا با تعداد سلول‌ها در شکل ۶ نمایش داده شده است.

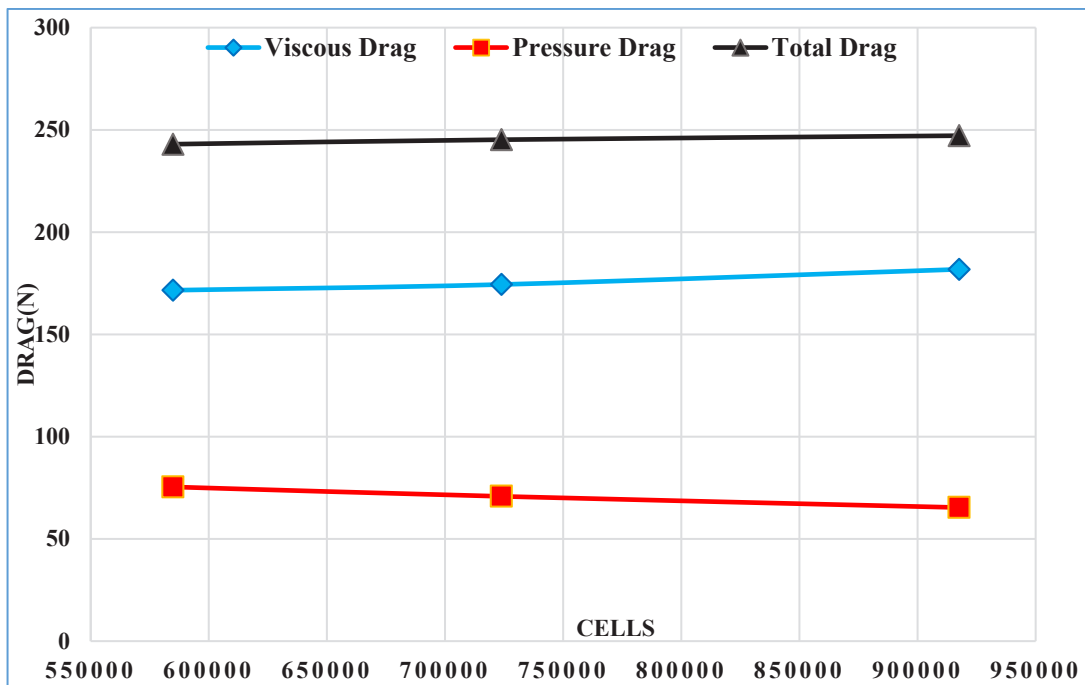
حل عددی به کمک نرم‌افزار فلوئنت ۱۶ [۲۴] که یکی از ماژول‌های نرم‌افزار انسیس می‌باشد، صورت پذیرفته است. جریان در حالت دایم حل شده است. به دلیل جریان تراکم‌ناپذیر از حل‌کننده‌ی فشار مینا^۱ استفاده گردیده و به منظور کاهش هزینه‌ی محاسبات از الگوریتم حل تفکیکی^۲ بهره گرفته شده است. جهت بالا بردن دقت حل نیز معادلات از روش Upwind مرتبه دوم گسسته‌سازی شده‌اند.

۴- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی نتایج حل عددی، نیروی درگ کلی جسم متقارن محوری صاف در سرعت ۳/۴۲۲ متر بر ثانیه معادل عدد رینولدز ۲۳۰۰۰۰۰۰ است. علت انتخاب این عدد رینولدز، حالتی است که جریان از حالت آرام به مغشوش تغییر پیدا می‌کند. چون در حالت آرام نیروی مقاومت اصطکاکی و در حالت مغشوش، نیروی مقاومت فشاری غالب است. با نتایج مراجع ۹ و ۱۰ مقایسه شده است که در جدول ۲ نمایش داده شده است. برای زیردریایی در حالت مغروق، نتایج تجربی حاصل از تست تونل باد در سال ۱۹۸۸ و پروژه عددی مشابهی از مؤسسه توسعه و تحقیقات دفاعی کانادا و همچنین، مقاله‌ای از دانشگاه بنگلادش برای مدل مشابه وجود دارد که مورد استفاده قرار گرفته است. همان طور که دیده می‌شود

¹Pressure Based

²SIMPLE



شکل (۶): تغییرات نیروهای درگ با افزایش سلول‌های شبکه.

باشد، دقت نتایج بالاتر است. جدول ۳ نشان‌دهنده‌ی این سه پارامتر است.

جدول (۳): پارامترهای R, P, GCI برای شبکه‌بندی‌های مختلف.

%GCI	P	R
8.396	1.852	0.283

بر اساس جدول ۳ مشاهده می‌گردد که پارامترهای R, P, GCI در محدوده‌های مجاز بوده و نشان‌دهنده‌ی این است که شبیه‌سازی، مسیر درستی است. به منظور حصول اطمینان از صحت عملکرد هر یک از شبکه‌های به کار گرفته‌شده برای مدل‌های k-e و k-w مقادیر پارامتر بی‌بعد y^+ در طول جسم متقارن محوری استخراج شده و نمودار تغییرات آن در شکل ۷ برای مدل k-e و در شکل ۸ برای مدل k-w نمایش داده شده است. از آنجا که محدوده‌ی مجاز پارامتر y^+ برای مدل k-e به صورت $30 < y^+ < 300$ و برای مدل k-w به صورت $y^+ < 5$ می‌باشد بنابراین، شکل‌های ۷ و ۸ حاکی از صحت کاربرد شبکه‌های به کار رفته در هر یک از مدل‌های آشفته‌گی می‌باشند.

به منظور اطمینان از تعدا شبکه‌ها جهت شبیه‌سازی، سه پارامتر R, P و GCI (Grid Convergence Index) در شبیه‌سازی‌های عددی ارائه می‌گردد که به صورت روابط ۸، ۹ و ۱۰ ارائه می‌گردند.

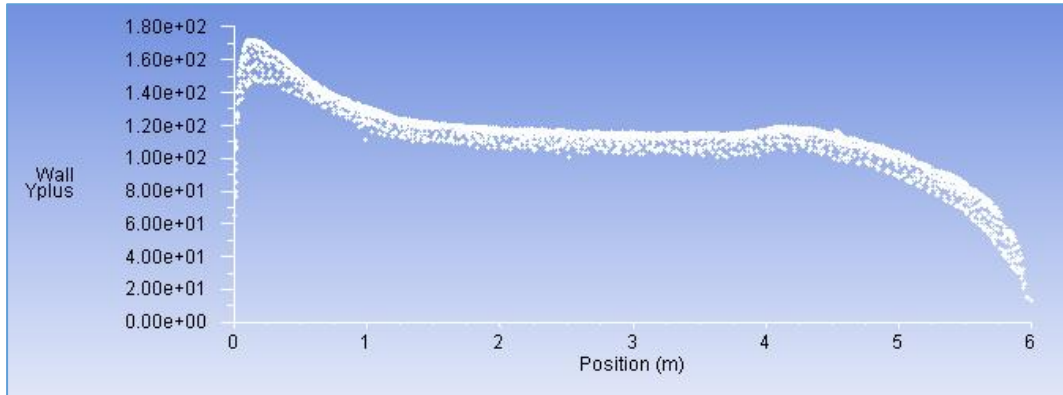
$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \quad (8)$$

$$P = \frac{\ln\left(\frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}}\right)}{\ln(r)} \quad (9)$$

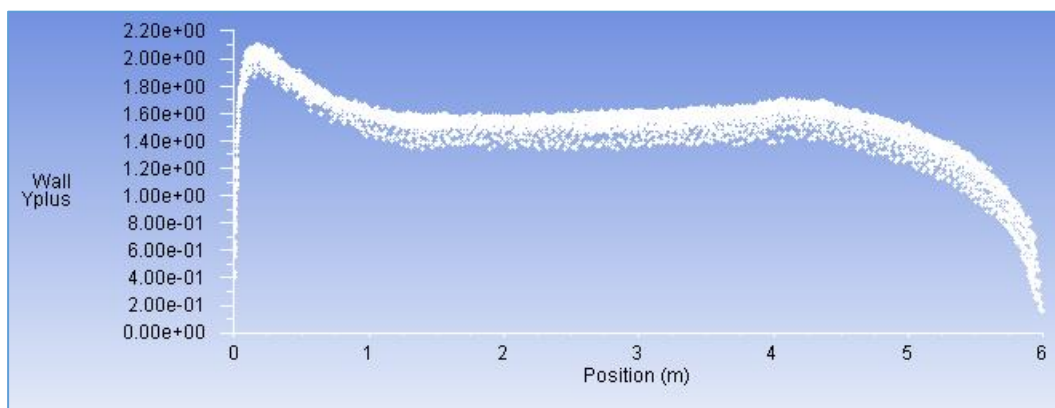
$$CI = F_s \frac{|\varepsilon_{21}|}{r^p - 1} \quad (10)$$

در روابط فوق، ε_{21} اختلاف نتایج بین شبکه‌بندی ریز و متوسط، ε_{32} اختلاف نتایج برای شبکه‌بندی بین شبکه‌بندی متوسط و درشت، r نسبت مقدار مرجع برای شبکه‌بندی است. نسبت مقدار مرجع برای شبکه‌بندی ۱/۴۱۴ در نظر گرفته است. همچنین، F_s در این شبیه‌سازی برابر ۱/۲۵ در نظر گرفته شده است.

نکته‌ی بسیار مهم در مقادیر قابل قبول برای هر یک از پارامترهای معرفی شده است که نشان‌دهنده‌ی همگرایی نتایج است. مقادیر قابل قبول برای پارامتر $0 < R < 1$ است. برای پارامتر P هر چقدر مقدار به دست آمده به عدد ۲ نزدیک‌تر باشد، نتایج همگرایی بیشتری دارند. پارامتر GCI بر حسب درصد است که هر چقدر مقدارش کمتر



شکل (۷): تغییرات y^+ در طول جسم متقارن محوری برای مدل k-e.



شکل (۸): تغییرات y^+ در طول جسم متقارن محوری برای مدل k-w.

با هندسه جسم متقارن محوری ساده (بدون مانع) مقایسه شده است. لازم به ذکر است که کلیه تست‌ها برای سرعت $۳/۴۲۲$ متر بر ثانیه معادل عدد رینولدز ۲۳۰۰۰۰۰۰ است.

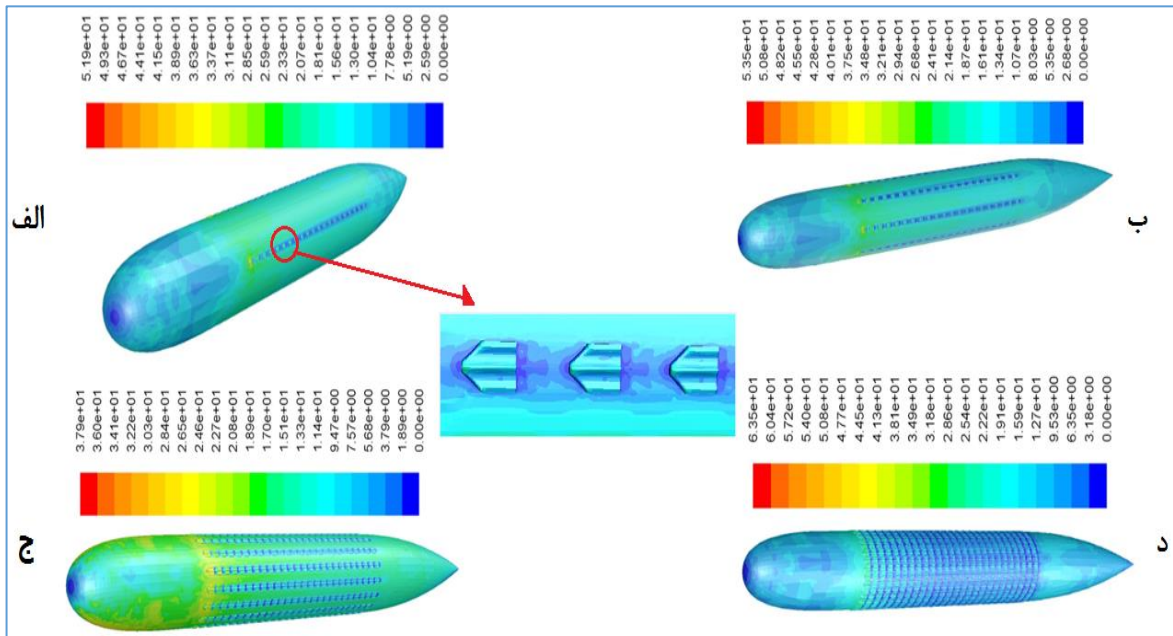
با توجه به اینکه با انجام اعتبارسنجی درستی روند حل عددی مورد بررسی قرار گرفته و از درستی آن اطمینان حاصل شده است، در جدول ۴ نیروی درگ به دست آمده برای چهار آرایش موانع به شکل پوست کوسه ارائه شده و

جدول (۴): تغییرات درگ در آرایش‌های مختلف موانع.

میزان تغییر درگ کل	نیروی درگ اصطکاکی (نیوتون)	نیروی درگ فشاری (نیوتون)	نیروی درگ کل (نیوتون)	هندسه
-	۱۷۷/۹۶	۷۱/۰۴	۲۴۹	جسم متقارن محوری استاندارد
-۱۲٪	۱۵۹/۳۲	۵۹/۶۸	۲۱۹	جسم متقارن محوری استاندارد با ۴ ردیف مانع
-۱۳٪	۱۵۲/۲۴	۶۱/۷۶	۲۱۴	جسم متقارن محوری استاندارد با ۸ ردیف مانع
+۰٪/۴	۱۵۰/۴۲	۱۰۱/۲۸	۲۵۱/۷	جسم متقارن محوری استاندارد با ۱۶ ردیف مانع
+۳۰٪	۱۲۰/۲۲	۲۱۱/۹	۳۳۲/۱۴	جسم متقارن محوری استاندارد با ۳۲ ردیف مانع

موانع بیش از تعدادی مشخص، مقدار درگ کل افزایش می‌یابد. این موضوع در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. پژوهش حاضر نشان می‌دهد فاصله‌ی زاویه‌ای ۴۵ درجه موانع خطی (جسم متقارن محوری استاندارد با ۸ ردیف مانع) مناسب‌ترین الگو برای کاهش درگ است.

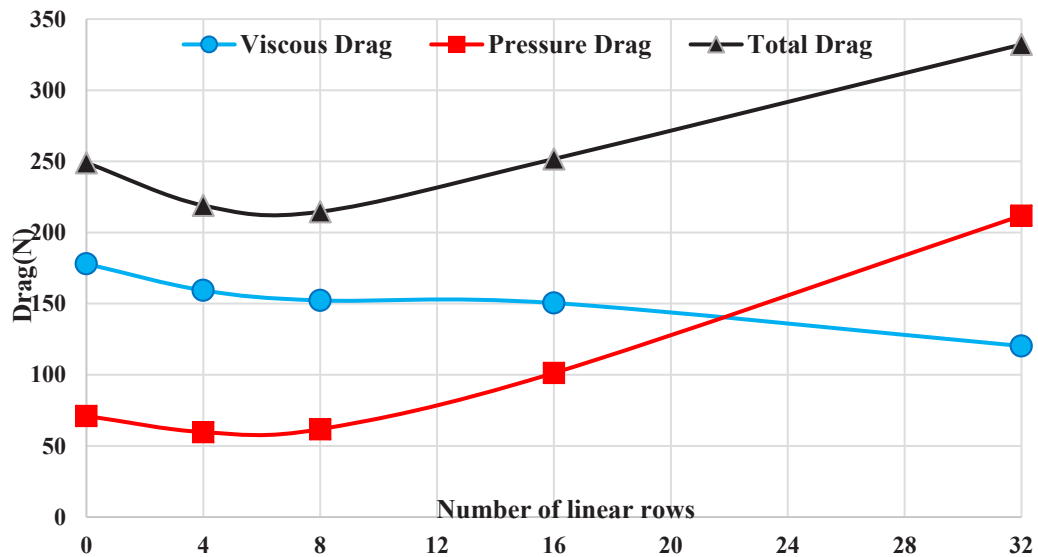
همان طور که مشخص است گرچه با افزایش ردیف‌ها درگ اصطکاکی به طور مداوم کاهش می‌یابد (کانتور نیروی درگ اصطکاکی اطراف جسم متقارن محوری یا آرایش‌های مختلف پوست کوسه در شکل ۹ نمایش داده شده است) اما درگ شکلی رو به رشد است و تنها در آرایشی معین، مقدار درگ کل مینیمم است و با افزایش



شکل (۹): کانتور نیروی درگ اصطکاکی اطراف جسم متقارن محوری. (الف) با چهار ردیف خطی از موانع، (ب) با هشت ردیف خطی از موانع، (ج) با شانزده ردیف خطی از موانع، (د) با سی و دو ردیف خطی از موانع.

زیرسطحی، بهترین حالت برای قرارگیری ریبلت‌ها، به صورت ۸ ردیف روی بدنه‌ی زیردریایی است.

شکل ۹ به خوبی نشان‌دهنده‌ی این موضوع است که ریبلت‌ها به خوبی نیروی اصطکاکی ناشی از لزجت سیال را کاهش داده‌اند. اما با توجه نتیجه ناشی از مقاومت کل



شکل (۱۰): روند تغییرات هریک از نیروهای درگ با افزایش ریبلت‌ها (با افزایش ردیف‌های خطی).

۶- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، برای رسیدن به یک الگوی مناسب از چینش ریبلت بر روی جسم متقارن محوری به منظور کاهش درگ ابتدا جریان حول وسیله استاندارد صاف شبیه‌سازی شده و با مراجع معتبر مورد اعتبارسنجی قرار گرفت. در ادامه، با در نظر گرفتن چهار نوع چینش متقارن حول سطح وسیله با فاصله‌های زاویه‌ای متفاوت از ردیف‌های خطی، جریان حول جسم متقارن محوری زیر شبیه‌سازی شده و هریک از نیروهای درگ اصطکاکی، فشاری و کلی آن با جسم متقارن محوری صاف مقایسه شد. نتایج بیانگر عدم سیر نزولی درگ کلی با افزایش ردیف‌های خطی بوده و آن بدین معنی است که همواره با زیرتر شدن سطح جسم متقارن محوری نمی‌توان انتظار کاهش مداوم درگ کلی را داشت، اگرچه درگ اصطکاکی اکیداً با افزایش زیری سطح یک سیر نزولی را داراست. در پژوهش حاضر، به منظور کاهش هزینه‌های ساخت، فاصله‌ی زاویه‌ای بهینه استخراج و ۴۵ درجه پیشنهاد می‌گردد.

مراجع:

- [1] Lee, S. J., Lee, S. I., and Park, C. W., "Reducing the drag on a circular cylinder by upstream installation of a small control rod," Fluid Dynamics Research, Vol. 34, 2004, pp. 233-250.
- [2] Tian, L. M., Lu-quan, R., Qing-ping, L., Zhi-wu, H., and Xiao, J., "The mechanism of drag reduction around bodies of revolution using bionic non-smooth surfaces," Journal of Bionic Engineering, Vol. 4, No. 2, 2007, pp. 109-116.
- [3] Zhang, D. Y., Yue-Hao, L., Xiang, L. I., and Hua-Wei, C., "Numerical simulation and experimental study of drag-reducing surface of a real shark skin," Journal of Hydrodynamics, Ser. B 23, No. 2, 2011, pp. 204-211.
- [4] Fuss Franz, K., "The effect of surface skewness on the super /postcritical coefficient of drag of roughend cylinders," Procedia Engineering, Vol. 13, 2011, pp. 284-289.
- [5] Walsh, M. J., and Lindemann, A. M., "Optimization and application of riblets for turbulent drag reduction," AIAA paper 84-0347, 1984.

[6] Walsh, M. J., "Riblets, in viscous drag reduction in boundary layers," eds D. M. Bushnell & J. N. Hefner, New York, NY: AIAA. 1990, pp. 203-261.

[7] Choi, K.-S., "European drag-reduction research—recent developments and current status," Fluid Dyn. Res. Vol. 26, 2000, pp. 325-335. (doi:10.1016/S0169-5983(99)00030-1)

[8] Bushnell, D. M., "Aircraft drag reduction—a review," Proc. Inst. Mech. Eng. 217, 2003, pp. 1-18. (doi:10.1243/095441003763031789)

[9] Jiménez, J., "Turbulent flows over rough walls," Annu. Rev. Fluid Mech. Vol. 36, 2004, pp. 173-196. (doi:10.1146/annurev.fluid.36.050802.122103)

[10] Bechert, D. W., Bruse, M., Hage, W., der Hoeven, J. G. T. V., and Hoppe, G., "Experiments on drag-reducing surfaces and their optimization with adjustable geometry," J. Fluid Mech., Vol. 338, 1997, pp. 59-87. (doi:10.1017/S0022112096004673)

[11] Bruse, M., Bechert, D. W., der Hoeven, J. G. T. V., Hage, W. and Hoppe, G., "Experiments with conventional and with novel adjustable drag-reducing surfaces. In Near-wall turbulent flows," eds R. M. C. So, C. G. Speziale & B. E. Launder, Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. 1993, pp. 719-738.

[12] Bechert, D. W., Bruse, M., Hage, W. and Meyer, R., "Biological surfaces and their technological application—laboratory and flight experiments on drag reduction and separation control," AIAA paper 97-1960, 1997.

[13] Itoh, M., Tamano, S., Iguchi, R., Yokota, K., Akino, N., Hino, R. and Kubo, S., "Turbulent drag reduction by the seal fur surface," Phys. Fluids 18, 065102, 2006. (doi:10.1063/1.2204849)

[14] Coustols, E., and Savill, A. M., "Turbulent skin-friction drag reduction by active and passive means: part I," In Skin friction drag reduction. AGARD report 786, Neuilly-sur-Seine, France: AGARD, 1992, pp. 8.1-8.53.

[15] Debisschop, J. R., and Nieuwstadt, F. T. M., "Turbulent boundary layer in an adverse pressure gradient: effectiveness of riblets,"

- AIAA J. 34, 1996, pp. 932–937. (doi:10.2514/3.13170).
- [16] Lee, S.-J., and Jang, Y.-G, “Control of flow around a NACA 0012 airfoil with a micro-riblet film.” *J. Fluids Struct.* Vol. 20, 2005, pp. 659–672. (doi:10.1016/j.jfluidstructs.2005.03.003).
- [17] Viswanath, P. R., “Aircraft viscous drag reduction using riblets,” *Prog. Aerosp. Sci.* 38, 2002, pp. 571–600. (doi:10.1016/S0376-0421(02)00048-9)
- [18] Szodruch, J., “Viscous drag reduction on transport aircraft,” AIAA paper 91-0685, 1991.
- [19] Robert, J. F., “Drag reduction: an industrial challenge,” In *Skin friction drag reduction*, GARD report 786, Neuilly-sur-Seine, France: AGARD.
- [20], 1992, pp. 2.1–2.15.
- [21] Roskam, J., “Airplane design. Part VI: preliminary calculation of aerodynamic, thrust and power characteristics,” Ottawa, KS: Roskam Aviation and Engineering Corporation, 1987.
- [22] David C., W., “Turbulence modeling for CFD,” La Canada, CA: DCW industries, Vol. 2, 1998.
- [23] David, C. P., Marie, P., “Solid Works 2013 Tutorial,” SDC Publications, 2013.
- [24] Meshing, Ansys 16.0 User’s Guide, Ansys Inc, 2015.
- [25] Fluent, Ansys 16.0 User’s Guide, Ansys Inc, 2015.
- [26] Wind Tunnel Test of the DREA Six Meter Long Submarine Model-Force Data Analysis, Ottawa, Department of Research and Development Canada-Atlantic, National Defense, Fall 1988.
- [27] Karim, M. M., Rahman, M. M and Alim, M. A., “Computation of turbulent viscous flow around submarine hull using unstructured grid,” *J. Ship Technol*, Vol. 5, No. 1 , 2009, pp. 973-1423.