بررسی عددی افزایش نیروی لیفت در یک هاورکرافت با تغییر در پارامترهای هندسی قطعه هادی جریان و کانال هوا

حسین صادقی [۱] ، مهرشاد یساری[۲]، محسن پورفلاح[۳]*، محمد ملاعلی‌پور[۴]، احمدعلی ربیع نتاج درزی[۵]

[۱] کارشناسی ارشد، مهندس مکانیک، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل ، m.sadeghi1373945@gmail.com
[۲] کارشناسی ارشد، مهندس مکانیک، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل ، mehrshad.y.1373@gmail.com
[۳] استادیار، مهندس مکانیک، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل ، m.pourfallah@ustmb.ac.ir
[۴] استادیار، مهندس مکانیک، دانشگاه مازندران، بابلسر، m.mollaalipour@umz.ac.ir
[۵] استادیار، مهندس مکانیک، دانشگاه مازندران، بابلسر، a.rabienataj@umz.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۹
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۱۴

کلمات کلیدی:
هاورکرافت
قطعه هادی جریان
کانال هوا
نیروی لیفت
دینامیک سیالات محاسباتی

چکیده

هاورکرافت یک شناور مدرن است که توانایی جابجایی بر روی سطوح مختلفی چون آب و سطح زمین را دارد. وجه تمایز هاورکرافت و دیگر شناورها در این است که هاورکرافت‌ها بر روی لایه ای از هوا مستقر شده و سپس حرکت می‌کنند که این عامل اصلی سریع‌تربودن حرکت آن‌ها می‌باشد. درواقع این ویژگی منحصر به فرد هاورکرافت است که موجب می‌شود از آن استفاده‌های مختلف نظامی، تفریحی، حمل ونقل و غیره به عمل آید. در این مقاله مطالعه عددی جریان هوای آشفته تراکم ناپذیر در حالت پایا گذرنده از سیستم تعلیق هاورکرافت مورد بحث قرار گرفته است. بدین منظور هاورکرافت در نرم افزار کتیا مدل شده و پس از انتقال به نرم افزار انسیس– فلوئنت و اعمال شرایط مرزی و با حل معادلات حاکم بر مسئله، نتایج بصورت کانتورهای فشار، سرعت و منحنی نیروی لیفت ارائه شده‌اند. در این پژوهش سعی شده است تأثیر تغییر پروفیل قطعه هادی جریان و کانال انتقال هوا بر توزیع فشار و سرعت و همچنین نیروی لیفت وارده بر زیر سازه مشاهده شود. در نهایت مناسب‌ترین شکل از لحاظ توزیع فشار و مقدار نیروی لیفت از میان پروفیل‌های ارائه شده، پروفیل قطعه با شیب ۸ درجه بود که موجب بهبود نتیجه نسبت به پروفیل اولیه شده است. همینطور مشخص شد که تغییر شکل‌های اعمال شده برای پروفیل مقطع کانال، بهبودی در میزان نیروی لیفت هاورکرافت اولیه ایجاد نکرده است.

Numerical Investigation of Lift Force Increase in a Hovercraft by Changing the Geometrical Parameters of Flow Transfer Part and Air Channel

Hossein Sadeghi[1], Mehrshad Yassari[2], Mohsen Pourfallah[3*], Mohammad Molla-Alipour[4], Ahmad Ali Rabienataj Darzi[5]

[1] Department of Mechanical engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran ; m.sadeghi1373945@gmail.com
[2] Department of Mechanical engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran ; mehrshad.y.1373@gmail.com
[3] Department of Mechanical engineering, Mazandaran University of Science and Technology, Babol, Iran ; m.pourfallah@ustmb.ac.ir
[4] Department of Mechanical engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran; m.mollaalipour@umz.ac.ir
[5] Department of Mechanical engineering, University of Mazandaran, Babolsar, Iran; a.rabienataj@umz.ac.ir

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 18 Apr. 2019
Accepted: 05 Dec. 2019

Keywords:
Hovercraft
Flow transfer part
Air channel
Lift force
Computational Fluid Dynamics (CFD)

ABSTRACT

Hovercraft is a modern air-cushion vehicle (ACV) that has the ability to move on a variety of surfaces, such as water and land. The distinguishing feature of the hovercraft and other vessels is that the hovercrafts are deployed on a layer of air and then propelled, which is a major factor in the faster movement of them. In fact, this is a unique feature of the hovercraft, which makes it possible to use various military, recreational, transportation, and, research limitations/implications and so on. In this paper, the numerical study of the incompressible turbulent air flow in a steady state of the hovercraft suspension system is discussed. For this purpose, hovercraft is modeled in CATIA software. After transferring to the Ansys-Fluent software and applying the boundary conditions, and solving the equations governing the problem, the results are presented as pressure, velocity and curve of the lift force. In this research, we have tried to observe the effect of changing the profile of the flow transfer part and air channel on the distribution of pressure and velocity as well as the lift force applied to the substructure. Finally, the most suitable form for the distribution of the pressure and the amount of lift force from the presented profiles was the flow transfer part profile with a gradient of 8 degrees, which showed improvement in the result from the initial profile. It was also found that the deformations applied to the channel sectional profile did not improve the rate of initial lift force of the hovercraft.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]

۱ - مقدمه

امروزه شناورهای متنوعی برای دست‌یابی به اهداف مختلف بطور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از مواردی که استفاده از شناورها را با مشکلات زیادی مواجه کرده وجود نواحی باتلاقی و کم عمق است، که به همین منظور از هاورکرافت‌ها در این مناطق استفاده می‌شود. در هاورکرافت، جریان هوا از طریق پروانه به زیر سازه منتقل شده و سبب می‌شود تا سازه بر روی توده‌ای از هوای تحت فشار قرار گیرد. وجود این نکته سبب می‌شود تا این وسیله بتواند بدون محدودیت در نواحی باتلاقی، کم عمق و خشک حرکت کرده و از سرعت بالایی برخوردار باشد.

در حالت کلی می‌توان دو قسمت سیستم تعلیق و رانش را برای حرکت هاورکرافت‌ها در نظر گرفت که هر یک از این قسمت‌ها از زیرمجموعه‌ها و قطعات بسیار زیادی تشکیل می‌شوند. تفاوت اصلی این شناور نسبت به دیگر شناورها وجود سیستم تعلیق می‌باشد که با توجه به پیچیدگی‌های نسبتاً زیاد آن هنوز بررسی‌های گسترده‌ای بر روی آن انجام نشده است و در حقیقت مطالعات انجام شده در حوزه هاورکرافت بیشتر به بخش سیستم رانش آن محدود شده است. هدف این مقاله اما تجزیه و تحلیل عددی بر روی سیستم تعلیق یک نوع هاورکرافت می‌باشد. در ادامه تعدادی از پژوهش‌های انجام شده در زمینه هاورکرافت که توسط محققین این حوزه صورت گرفته، آورده شده است.

ملاعلی پور و همکاران [۱] به بررسی عددی جریان آشفته و تراکم ناپذیر در یک هاورکرافت دو موتوره کلاس متوسط با استفاده از نرم افزار انسیس- فلوئنت پرداختند. هدف اصلی از انجام این پروژه رسیدن به توزیع یکنواخت‌تر سرعت و فشار در طول هاورکرافت با بکارگیری تیغه هادی جریان بود. در انتها توزیع متوازن سرعت و فشار و در پی آن افزایش ۳ درصدی نیروی لیفت با افزایش طول تیغه مشاهده شده است.

نواف سعید و همکاران [۲] آنالیز جریان درهم و پایای هوای اطراف یک هاورکرافت را با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی برای بهینه‌سازی شکل هاورکرافت انجام دادند و همچنین بهترین محل برای فن‌های بالابر را به دست آوردند. آن‌ها از سه شکل مستطیلی، نیم دایره‌ای و مثلثی برای جلوی هاورکرافت در شبیه سازی خود بهره بردند که در نهایت هاورکرافت با جلوی نیم دایره ای به دلیل داشتن نیروی درگ اصطکاکی کمتر، مورد تأیید آن‌ها قرار گرفت. همچنین نتایج آن ها نشان داد، بهترین محل برای قرارگیری ورودی فن‌های بالابر، بر روی سطح شیب دار جلوی هاورکرافت و نزدیک نقطه رکود آن است، که انتخاب این قسمت برای قرارگیری فن به دلیل کاهش ۴ درصدی ضریب درگ می‌باشد.

کایا و اوزکان [۳] با استفاده از نرم افزار انسیس فلوئنت، جریان سه بعدی، تراکم ناپذیر، پایا و درهم هوای اطراف و درون یک مدل ساده هاورکرافت را بررسی کردند. در شبیه‌سازی آنها فرض بر این بود که هاورکرافت بر روی سطح زمین قرار دارد. به علاوه تفاوت در خواص آیرودینامیکی هاورکرافت و وسیله نقلیه جاده‌ای مورد بحث بود. نتایج حاصله از تحقیق نشان داد نیروی لیفت هاورکرافت، با افزایش فاصله هوایی به صورت نمایی کاهش می‌یابد و به صورت خطی با فشار فن رابطه مستقیم دارد. همچنین نیروی درگ هاورکرافت به میزان قابل توجهی از وسایل نقلیه جاده‌ای بزرگ تر بوده و با افزایش فاصله هوایی افزایش می‌یابد.

اثرات تغییر در پارامترهای حفره‌های خروجی هوا بر چگونگی تغییر شکل بالشتک لاستیکی هاورکرافت توسط زارع و همکاران [۴] انجام شد. در تحقیق آنها معادلات تعادل حاکم بر مسئله، با استفاده از روش عددی نیوتن - رافسون حل گردید. مطالعات آن‌ها نشان داد افزایش بدون بعد طول یا عرض سوراخ‌ها سبب کاهش ارتفاع لوپ انعطاف‌پذیر شده که نهایتاً منجر به کاهش قابلیت هاورکرافت می‌شود، که تغییر در اندازه طولی سوراخ اثر پررنگ‌تری دارد.

میرکی و همکاران [۵] روند طراحی، ساخت و تست یک مدل هاورکرافت را با انتخاب مدل یک پنجم مورد بررسی قراردادند. در این تست ها وضعیت فشار در قسمت‌های مختلف بالشتک، ارتفاع هاورینگ، زاویه تریم و محدوده مناسب مرکز ثقل هاورکرافت استخراج شد. در آخر، در حالت هاورینگ استاتیکی، پایداری استاتیکی اولیه مورد بررسی قرار گرفت و با محدوده بیان شده در استانداردهای این نوع شناور مقایسه‌ای صورت پذیرفت که نشان می داد بالشتک در این مدل از پایداری مناسبی برخوردار است.

خصوصیات نگهداری هاورکرافت تحت حرکت جابجایی، چرخشی و دورانی و تغییر فشار بالشتک با استفاده از نرم افزار متلب، توسط ژو و همکاران [۶] بحث و بررسی شد. نتایج این تحقیق برخی از موقعیت‌های خطرناک را نشان می‌دهد که در آن ارتعاش سمپاتیک در حرکت اتفاق می افتد که دامنه‌ها بسیار بالاتر از دامنه در شرایط معمولی می‌باشند که باید این شرایط کاری خطرناک در طراحی هاورکرافت حذف شوند.

رجبی و همکاران [۷] تحلیل سه بعدی آیرودینامیک هاورکرافت را در نرم افزار انسیس سی اف ایکس با بهره بردن از تئوری سیال تراکم ناپذیر و جریان توربولانس انجام دادند. نتایج آن ها نشان داد که افزایش دبی جریان هوای ورودی به فن و همچنین کاهش فاصله میان بالشتک وسطح، منجر به افزایش نمایی نیروی لیفت مورد نیاز شناور می‌گردد.

هینچی و سولیوان [۸]، به صورت تحلیلی به بررسی پایداری هاورکرافت در آب‌های عمیق با مدل‌سازی حرکت سیال در مجاورت بالشتک آن پرداختند. در نهایت این نتیجه حاصل شد که زیاد شدن

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]

تغییرات در پایداری در اثر کاهش وزن و درنتیجه کاهش فشار بالشتک روی می‌دهد.

کیل و همکاران [۹] در تحقیق خود با استفاده از نرم افزار کتیا مدلی ساده با مقیاس کوچک از یک هاورکرافت را در نظر گرفته و شبیه سازی هوای گذرنده از درون فن را با استفاده از نرم افزار انسیس- فلوئنت انجام دادند. در این مطالعه با یافتن مقادیر پارامترهایی مانند فشار و سرعت برای یک وزن مشخص هاورکرافت، الگوی جریان بهینه شده و در پی آن نیروی لیفت هاورکرافت هم بهینه می‌شود که از آن می‌توان برای طراحی مدل واقعی بهره برد.

پیدا کردن حداکثر مقدار نسبت لیفت به درگ و همین طور سرعت طراحی هاورکرافت و عملکرد اقتصادی آن با استفاده از معادلات اثبات شده، توسط منتل [۱۰] انجام شد. تحلیل انجام شده توسط او عاملی مهم در تسریع و بهینه‌سازی امور مربوط به طراحی هاورکرافت می‌باشد. به علاوه می توان به جنبه مثبت آن از لحاظ اقتصادی قبل از شروع توسعه هاورکرافت‌های پیچیده‌تر و گران‌تر در صنایع تولیدی اشاره نمود.

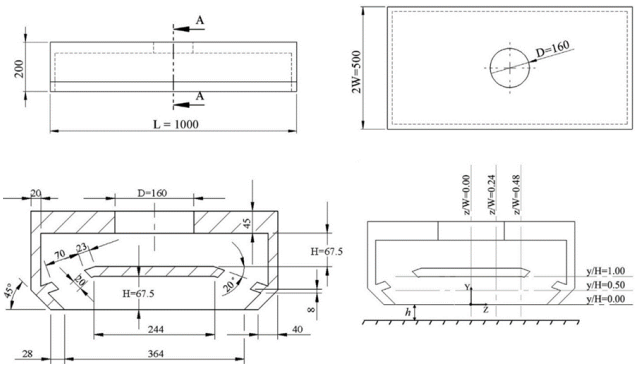
در پژوهش حاضر، جهت دستیابی به یک سیستم تعلیق مناسب و توزیع مناسب فشار در قسمت‌های مختلف هاورکرافت، با تحلیل نرم افزاری سعی شده است تا با اعمال تغییراتی در شکل پروفیل قطعه هادی جریان و همین‌طور مقطع کانال انتقال هوا، یک شکل مناسب برای آن‌ها طراحی گردد.

۲- تعریف مسئله

در این مقاله، تحلیل عددی سه بعدی در حالت پایای جریان هوای آشفته تراکم ناپذیر گذرنده از درون سیستم تعلیق یک هاورکرافت با استفاده از نرم افزار انسیس- فلوئنت مورد آنالیز قرار گرفته است. در این شبیه‌سازی، جریان هوا، از دریچه واقع در قسمت جلوی هاورکرافت به داخل هاورکرافت آمده و سپس از قسمت ورودی به کانال جانبی و بعد از آن از طریق حفره‌هایی که دور تا دور کانال تعبیه شده به زیر سازه منتقل می‌شود تا موجب نیروی بالابرندگی هاورکرافت شود. در شبیه‌سازی مذکور جریان هوا از طریق چرخش فن واقع در دریچه ورودی هاورکرافت به داخل رانده شده و پس از گذر از کانال و حفره‌های آن و رسیدن به زیر سازه هاورکرافت، از فاصله هوایی بین زمین و بالشتک هاورکرافت به خارج هدایت می‌شود.

۲-۱- صحت سنجی روش حل

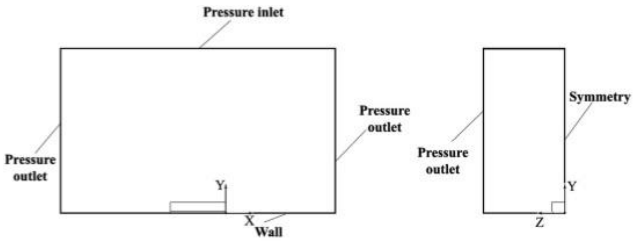
با توجه به این که تاکنون مقاله‌ای در مورد هاورکرافت مورد نظر این مسئله، با هندسه پیچیده آن و بویژه موضوع سیستم تعلیق آن یافت نشده است، از این جهت برای اعتبارسنجی نتایج از مقاله‌ای که در مورد یک مدل ساده‌تری از هاورکرافت بوده و در آن پیدا کردن مقدار نیروی لیفت مدنظر است، مورد تحلیل عددی قرار گیرد. در مقاله ذکر شده که توسط کایا و اُزکان[۳] تدوین گردیده، سعی شده نیروی لیفت برای یک مدل ساده از هندسه هاورکرافت پیدا شود. در شکل ۱ هاورکرافت مذکور نشان داده شده است.



شکل ۱- مدل ساده هاورکرافت

در این پژوهش نیز سعی شده است که با مدل کردن هندسه هاورکرافت بالا و شبکه بندی و سپس اعمال شرایط مرزی ذکر شده در مسئله، به نتایج حاصله راجع به نیروی لیفت در آن مقاله رسید.

به منظور حل مسئله، یک فضای محاسباتی به شکل مکعب در اطراف هاورکرافت در نظر گرفته شده است که طول آن 5L، عرض آن 3L و ارتفاع آن نیز 3L می‌باشد.(L=1000mm). شکل ۲ مکعب مذکور را نشان می‌دهد.



شکل ۲- دامنه حل و شرایط مرزی مسئله

برای بخش شبکه بندی از مش‌های ترکیبی تتراهدرال (چهار وجهی) و هگزاهدرال (شش وجهی) استفاده شده است. تعداد مش-های بکار رفته حدود ۲ میلیون بوده که این مقدار پس از تست استقلال حل از شبکه که در جدول ۱ به نمایش درآمده، بدست آمده است.

جدول ۱- استقلال حل از شبکه

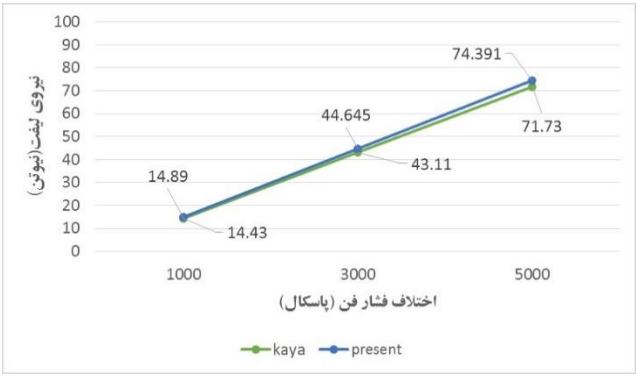
تعداد مش(میلیون)	۱،۵	۲	۲،۵	۳
نیروی لیفت (نیوتن)	۱۲،۳۶	۱۴،۸۹	۱۴،۷۵	۱۴،۸۰

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]

لازم به‌ذکر است که استقلال شبکه جدول بالا برای حالت ارتفاع گپ ۲۰ میلیمتر و اختلاف فشار فن ۱۰۰۰ پاسکال صورت گرفته است.

شرایط مرزی بکار رفته در مسأله به شرح زیر است:

- جریان تراکم ناپذیر در نظر گرفته شده است.
- معادله انرژی استفاده نشده است.
- معادلات حاکم بر میدان جریان کاملاً آشفته است و از روش توربولانسی کا اپسیلن استاندارد استفاده شده است.
- همانطور که در شکل ۲ مشخص است، به علت تقارن موجود، نیمی از هندسه مدل شده و در مرز تقارن از شرط سیمتری استفاده شده است.
- در قسمت ورودی هاورکرافت از شرط مرزی فن استفاده شده است و برای سه اختلاف فشار متفاوت ۱۰۰۰ و ۳۰۰۰ و ۵۰۰۰ پاسکال نتایج مورد ارزیابی قرار گرفتند.
- برای گسسته سازی معادلات مومنتوم، انرژی جنبشی آشفتگی و نرخ اتلاف جریان از طرح بالادست مرتبه دوم استفاده شده است.
- در اینجا مقادیر نیروی لیفت برای ارتفاع گپ ۲۰ میلیمتر بدست آمده و اختلاف ناچیز حدود ۳ درصدی با نتیجه حاصله از مقاله مذکور مشاهده شد که صحت روش استفاده شده برای تحلیل عددی را نشان می‌دهد. این نتایج در نمودار ۱ ترسیم شده اند. لازم به ذکر است که نتایج حاصله از شبیه سازی عددی در مقاله کایا و ازکان حدود ۸ درصد با نتایج تجربی اختلاف داشت.



نمودار ۱- صحت سنجی نتایج

۲-۲- هندسه مسئله

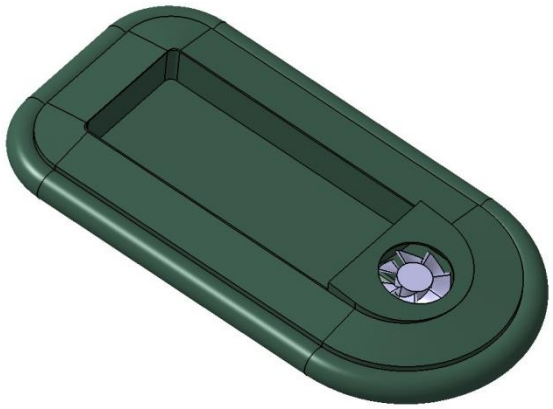
هاورکرافتی که برای شبیه‌سازی از آن استفاده شده، شناوری با دو موتور مجزا برای سیستم تعلیق و رانش است و در دانشگاه مازندران ساخته شده است. در شکل ۳ نمایی از این هاورکرافت به نمایش در آمده است.



شکل ۳- نمونه اصلی هاورکرافت ساخته شده در دانشگاه مازندران

این نوع خاص هاورکرافت دارای طول ۶ متر و عرض ۲/۸ متر بوده و به علاوه ارتفاع آن در حالت خاموش ۵۵ سانتیمتر و پس از باز شدن بالشتک حدود ۸۰ سانتیمتر می‌باشد. همچنین فن این هاورکرافت که وظیفه تأمین نیروی لیفت را بر عهده دارد، دارای ۷ پره بوده و قطر آن ۸۵ سانتی متر است. طراحی فن هاورکرافت نیز به گونه ای انجام شده است که بتواند نیروی فشاری لازم را برای تحمل وزن این هاورکرافت که حدود ۱۰۰۰۰ نیوتن است را مهیا نماید.

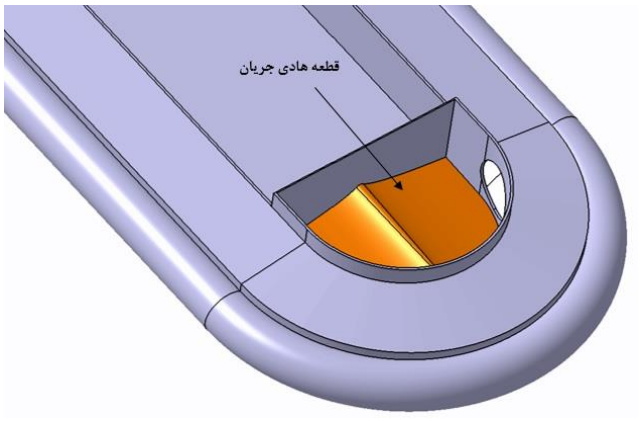
لازم به‌ذکر است قطر کوچک و بزرگ ۸۵ حفره واقع در کانال به ترتیب ۴ و ۲۰ سانتی متر می‌باشد. به علاوه قطر ۴ حفره واقع در جلوی هاورکرافت که در واقع ورودی کانال می‌باشند، ۴۵ سانتیمتر می‌باشد. هندسه مذکور در نرم افزار کتیا مدل شده که در شکل ۴ هاورکرافت مذکور نمایش داده شده است:



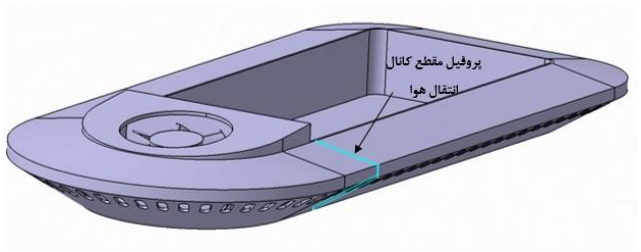
شکل ۴- هاورکرافت ترسیم شده در نرم افزارکتیا

همچنین در شکل ۵ و شکل ۶ به ترتیب، قطعه هادی جریان و پروفیل مقطع کانال به صورت سه بعدی به نمایش در آمده‌اند.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]

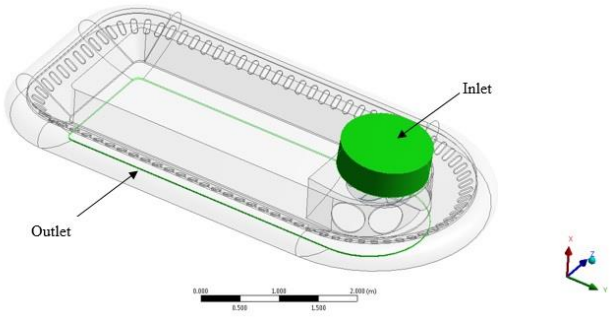


شکل ۵- نمای سه بعدی از قطعه هادی جریان



شکل ۶- نمایی از پروفیل مقطع کانال هوا

پس از طراحی هندسه هاورکرافت لازم است تا شبکه مورد نظر برای تحلیل مهیا شود. از این‌رو ابتدا باید محل عبور جریان هوا از درون سازه هاورکرافت مشخص شود تا دیگر به پوسته جامد هاورکرافت نیازی نباشد و تنها آن قطعه را در قسمت انسیس-مشینگ ، مش زده و سپس تحلیل انجام گیرد. در شکل ۷ ورودی و خروجی هاورکرافت نشان داده شده است.

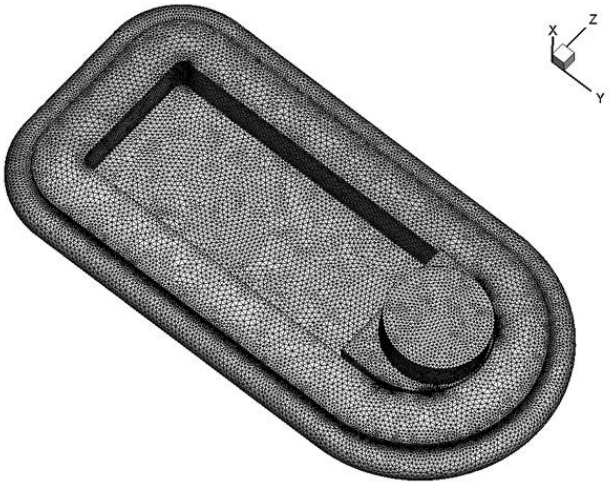


شکل ۷- ورودی و خروجی هاورکرافت

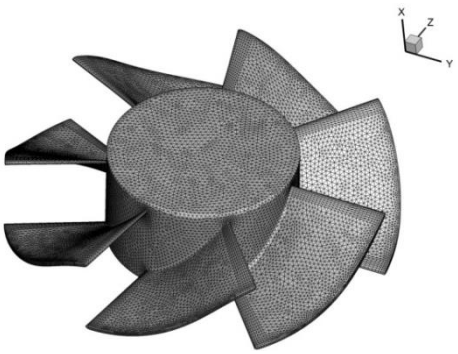
همانطور که از تصویر مشخص است، برای شبیه‌سازی بهتر مسئله، استوانه‌ای بر روی قسمت ورودی قرار گرفته که قطر آن کمی بزرگتر از دریچه ورودی هاورکرافت بوده و برای شبیه‌سازی، صفحه‌های استوانه به عنوان ورودی در نظر گرفته شده است. به علاوه فرض شده است که انتهای بالشتک هاورکرافت حدود ۲ سانتیمتر از زمین فاصله دارد. همچنین حول فن، استوانه ای کمی بزرگتر از آن طراحی شده تا فن را از آن جدا کرده و در استوانه در مدلسازی بجای خود فن، شرط چرخش بگیرد. در این مورد در قسمت شرایط مرزی توضیحات لازم ارایه خواهد شد. بنابراین هندسه مسئله شبکه‌بندی شده است، شامل دو قطعه سیال بوده که اولی استوانه‌ای است که فضای اطراف فن را در بر گرفته است و دیگری فضای درون هاورکرافت منهای آن استوانه است که جریان هوا از آن عبور می‌کند.

۲-۳- شبکه بندی

بنا به پیچیدگی مدل مورد نظر، عمدتاً از مش‌های چهاروجهی، در شبکه‌بندی بهره برده شده است. همچنین به علت اینکه گرادیان جریان در نزدیکی دیواره زیاد است در شبکه‌بندی از مش لایه مرزی استفاده شده است. همچنین سعی شده تا در مناطقی که حساسیت بیشتر است، مانند ورودی، خروجی و نزدیک دیواره از مش‌های ریزتری استفاده شود. لازم به ذکر است در شبکه بندی انتخاب شده، تعداد سلول بکار رفته برای فن و بدنه هاورکرافت به ترتیب ۹۶۶۱۱۹ و ۲۹۷۱۹۰۶ می باشد. همچنین حداقل اندازه مش بکار رفته برای این هندسه ۳ میلیمتر است. در شکل‌های ۸ تا ۱۰ هندسه شبکه بندی شده به نمایش در آمده است.

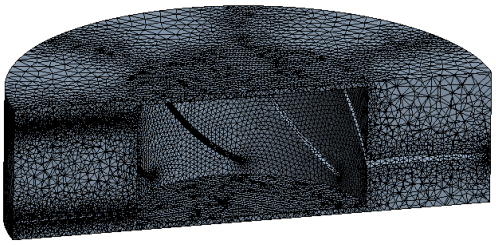


شکل ۸- مش بدنه هاورکرافت



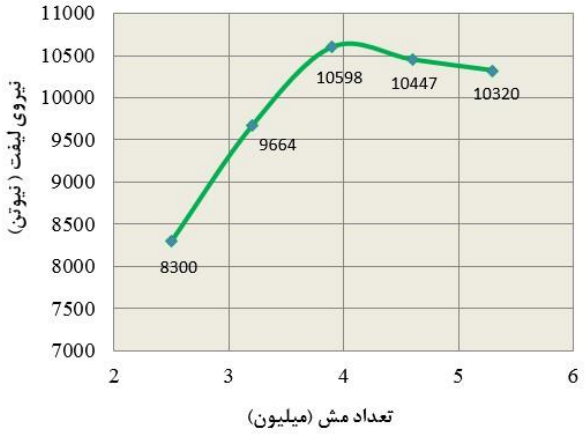
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]

شکل ۹- مش سطح فن



شکل ۱۰- برشی از مش استوانه حول فن

شبکه مطلوب از میان ۵ شبکه بندی با تعداد مش های مختلف انتخاب شده که نتایج حاصله از مقدار نیروی لیفت هر کدام پس از شبیه‌سازی در نمودار ۲ گردآوری شده‌اند.



نمودار ۲- استقلال حل از شبکه

با توجه به نمودار، شبکه بندی با تعداد سلول ۳۹۳۸۰۲۵ و نیروی لیفت ۱۰۵۹۸ نیوتن اتخاذ شده است. که حدود ۲ درصد با نیروهای لیفت حاصله از شبیه سازی با تعداد مش های ۴/۶ و ۵/۳ میلیون اختلاف دارد که به معنای دقت خوب شبکه بندی است. توجه به این نکته ضروری است که این مقدار برای نیروی لیفت وارده بر هاورکرافت با توجه به وزن هاورکرافت که حدود ۱۰۰۰۰ نیوتن می‌باشد، مورد تأیید قرار گرفته است.

۲-۴- معادلات حاکم

معادلات پیوستگی و مومنتوم حاکم بر مسئله در ادامه ارائه شده اند.

$$\partial_t(\rho)+\partial_i(\rho u_i)=0 \qquad (۱)$$

$$\partial_t(\rho u_i)+\partial_j(\rho u_i u_j)=\mu\partial_{jj}u_i-\partial_i P+\rho g_i+S_i \qquad (۲)$$

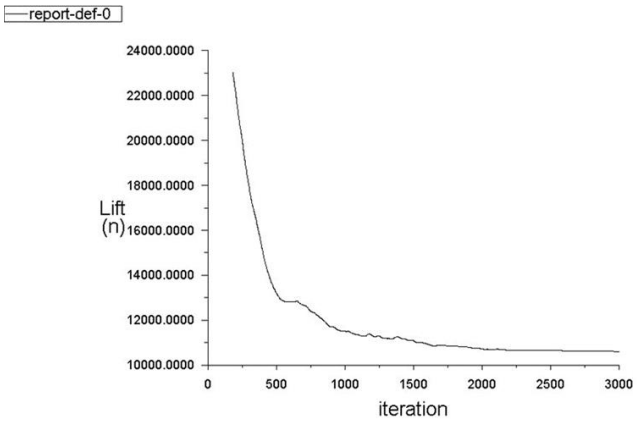
برای شبیه‌سازی جریان آشفته نیز از روش توربولانسی کا اپسیلون ریلایزبل بهره برده شده است.

همانطور که ذکر شد، هندسه به دو بخش بدنه و استوانه حول فن تقسیم شده است که برای شبیه سازی جریان چرخشی در فن، از روش frame motion برای استوانه حول فن استفاده شده است. سرعت دورانی در نظر گرفته شده برای این استوانه ۳۴۰۰ دور بر دقیقه می‌باشد. برای ورودی و خروجی از شرط مرزی فشار، برای میانیابی معادله فشار از روش استاندارد و برای معادلات مومنتوم از روش طرح بالا دست مرتبه دوم استفاده شده است. به علاوه جهت تسریع در رسیدن به جواب، معادلات انرژی جنبشی آشفته و نرخ اتلاف آشفتگی با روش طرح بالا دست مرتبه اول حل شده است. به علاوه از الگوریتم سیمپل برای حل معادلات استفاده شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

پس از اعمال شرایط ذکر شده در قسمت قبل برای هاورکرافت مورد نظر در نرم افزار انسیس- فلوئنت و پس از اجرای شبیه‌سازی، نتایج حاصله که متشکل از کانتورهای فشار، سرعت و مقدار نیروی لیفت می‌باشند، در این قسمت مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند.

در نمودار ۳ مقدار نیروی لیفت برای نمونه اولیه هاورکرافت شبیه‌سازی شده، نشان داده شده است. همانطور که از این نمودار بر می‌آید پس از رسیدن به همگرایی، مقدار نیروی لیفت به ۱۰۵۹۸ نیوتن می رسد.

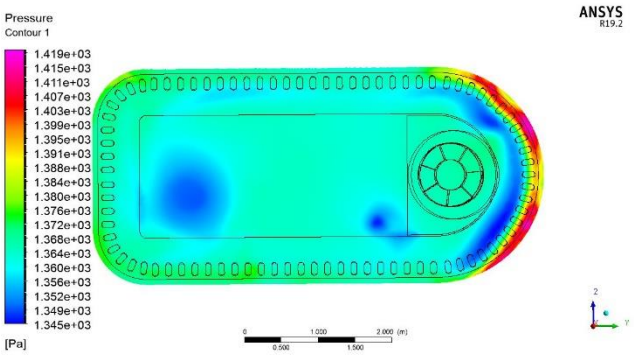


نمودار ۳- نیروی لیفت هاورکرافت اولیه

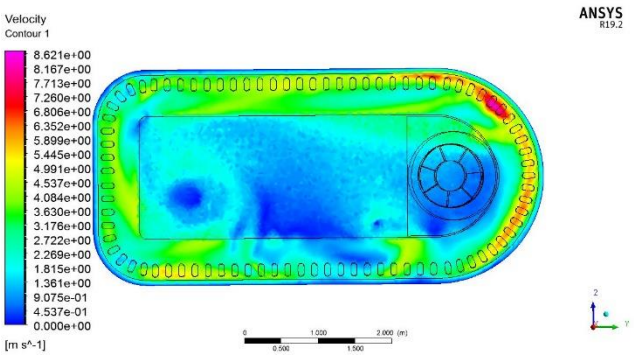
در شکل ۱۱ و شکل ۱۲ به ترتیب کانتورهای توزیع فشار و سرعت برای شبیه‌سازی مذکور نمایش داده شده است. در این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]

کانتورها قسمت‌های روشن به معنای فشار و سرعت کمتر و بخش-های تیره به معنای فشار و سرعت بیشتر می‌باشند. همانطور که از این کانتورها مشخص است، به دلیل قرارگیری فن در قسمت جلوی هاورکرافت، فشار در این ناحیه نسبت به قسمت‌های دیگر هاورکرافت بیشتر است. به علاوه ایجاد گردابه در نقاط انتهایی هاورکرافت بیانگر کم شدن فشار هوا در آنجا بوده که این می‌تواند عاملی برای ناپایداری هاورکرافت باشد.



شکل ۱۱- کانتور توزیع فشار در یک صفحه افقی در نزدیکی سطح زیر هاورکرافت اولیه

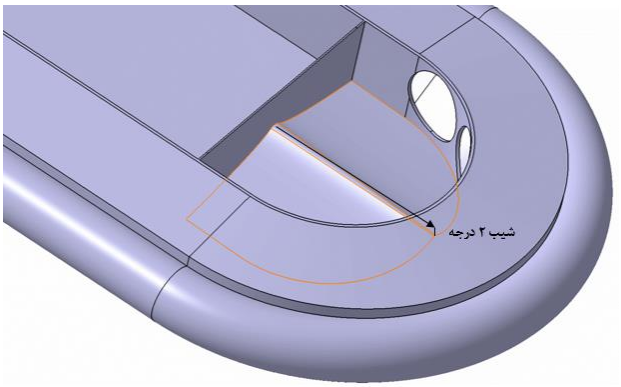


شکل ۱۲- کانتور توزیع سرعت در یک صفحه افقی در نزدیکی سطح زیر هاورکرافت اولیه

هدف این مقاله در واقع پیدا کردن راهی برای بهبود ناپایداری و نهایتاً مقدار نیروی لیفت حاصله برای هاورکرافت اولیه می‌باشد. بدین منظور در این پژوهش سعی شده با تغییر در پروفیل‌های قطعه هادی جریان و کانال جانبی، توزیع مناسب‌تری برای جریان هوا در زیر سازه هاورکرافت ایجاد شود.

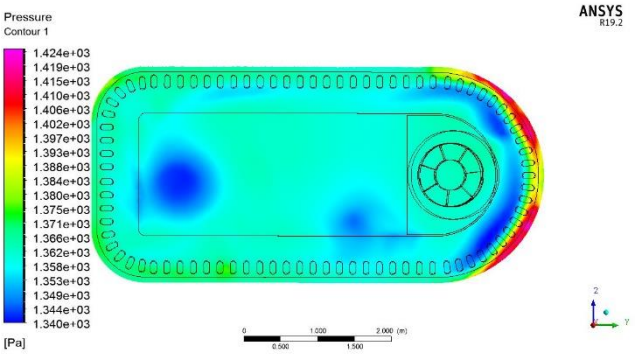
۳-۱- تغییر در شکل قطعه هادی جریان

جهت دستیابی به نیروی لیفت و توزیع متوازن‌تر فشار، چهار پروفیل متفاوت برای قطعه با شیب‌های صفر، چهار، شش و هشت درجه در نرم افزار کتیا ترسیم شده و پس از آن در نرم افزار انسیس-فلوئنت با در نظر گرفتن شرایط یکسان با تحلیل بدست آمده اولیه یعنی قطعه با شیب دو درجه مورد آنالیز قرار گرفتند. در شکل ۱۳ شیب قطعه ترسیم شده در هاورکرافت اولیه در نرم افزار کتیا نشان داده شده است.

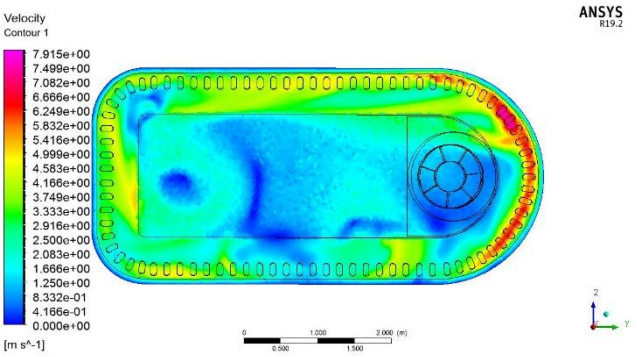


شکل ۱۳- شیب قطعه در هاورکرافت اولیه

درشکل‌های ۱۴ و ۱۵ و شکل‌های ۱۶ و ۱۷ به ترتیب کانتور فشار و سرعت برای قطعه با شیب صفر درجه و چهار درجه به نمایش در آمده است.

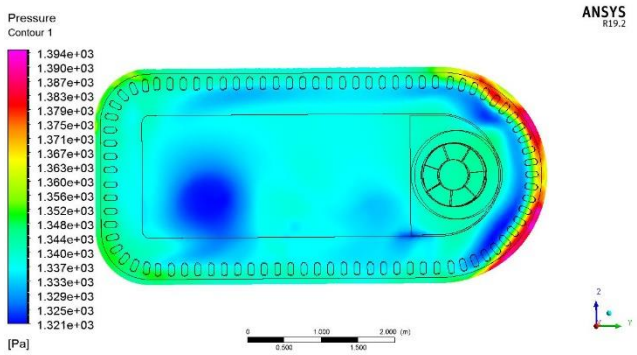


شکل ۱۴- کانتور توزیع فشار برای قطعه با شیب صفر درجه

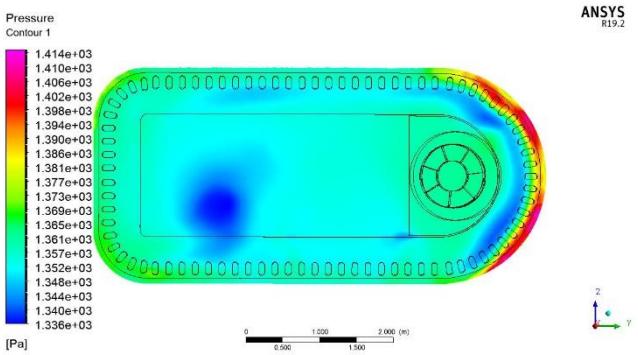


شکل ۱۵- کانتور توزیع سرعت برای قطعه با شیب صفر درجه

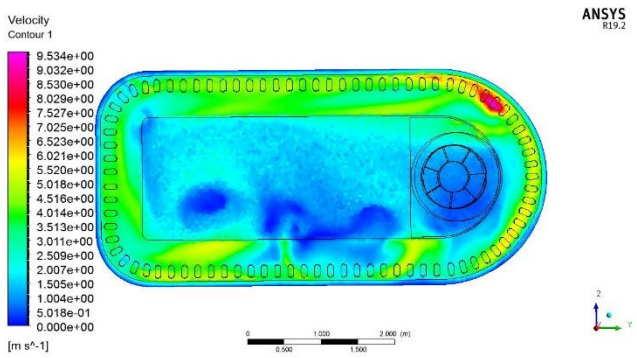
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]



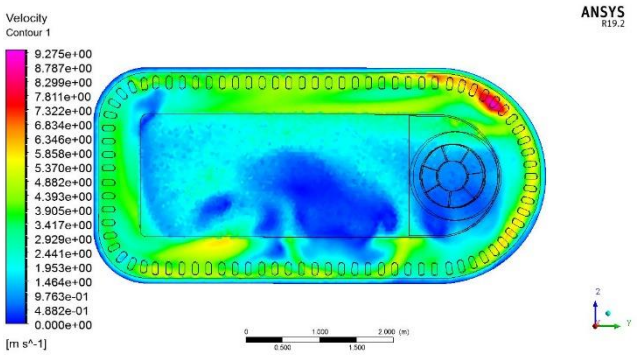
شکل ۱۶- کانتور توزیع فشار برای قطعه با شیب ۴ درجه



شکل ۱۸- کانتور توزیع فشار برای قطعه با شیب ۶ درجه



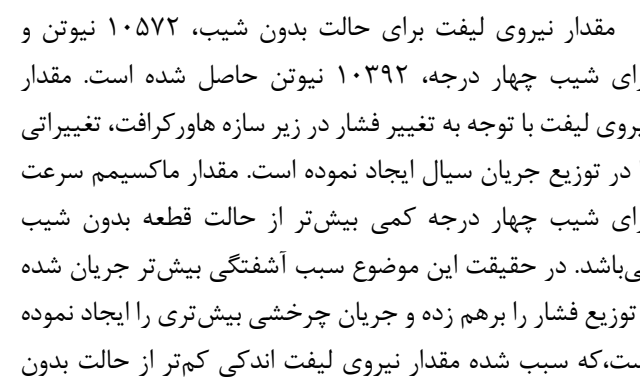
شکل ۱۷- کانتور توزیع سرعت برای قطعه با شیب ۴ درجه



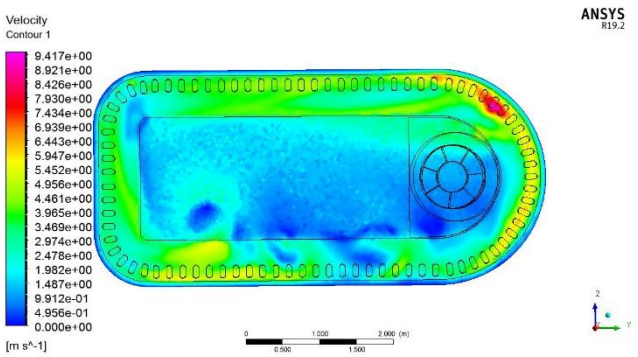
شکل ۱۹- کانتور توزیع سرعت برای قطعه با شیب ۶ درجه

مقدار نیروی لیفت برای حالت بدون شیب، ۱۰۵۷۲ نیوتن و برای شیب چهار درجه، ۱۰۳۹۲ نیوتن حاصل شده است. مقدار نیروی لیفت با توجه به تغییر فشار در زیر سازه هاورکرافت، تغییراتی را در توزیع جریان سیال ایجاد نموده است. مقدار ماکسیمم سرعت برای شیب چهار درجه کمی بیش‌تر از حالت قطعه بدون شیب می‌باشد. در حقیقت این موضوع سبب آشفتگی بیش‌تر جریان شده و توزیع فشار را برهم زده و جریان چرخشی بیش‌تری را ایجاد نموده است،که سبب شده مقدار نیروی لیفت اندکی کم‌تر از حالت بدون شیب باشد. در حالتی که شیب قطعه صفر است، ماکسیمم سرعت جریان کاهش یافته و جریان از آشفتگی کم‌تری برخوردار بوده و مقدار نیروی لیفت اندکی افزایش یافته است.

در شکل‌های ۱۸ و ۱۹ و شکل‌های ۲۰ و ۲۱ به ترتیب کانتور فشار و سرعت برای قطعه با شیب شش درجه و هشت درجه به نمایش در آمده است.



شکل ۲۰- کانتور توزیع فشار برای قطعه با شیب ۸ درجه

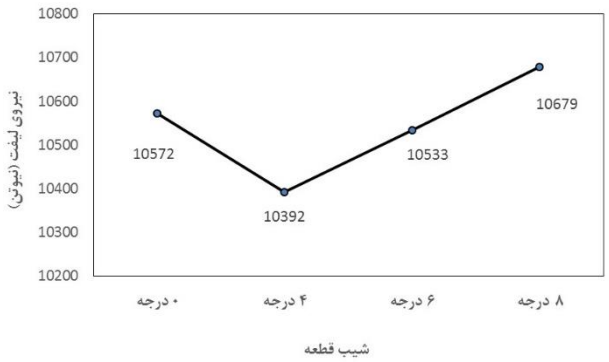


شکل ۲۱- کانتور توزیع سرعت برای قطعه با شیب ۸ درجه

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]

مقدار نیروی لیفت حاصل شده در حالت شیب شش درجه ۱۰۵۳۳ نیوتن و برای شیب هشت درجه ۱۰۶۷۹ نیوتن بوده است. مقدار فشار نیز در شیب هشت درجه نسبت به شش درجه بیش‌تر می‌باشد.

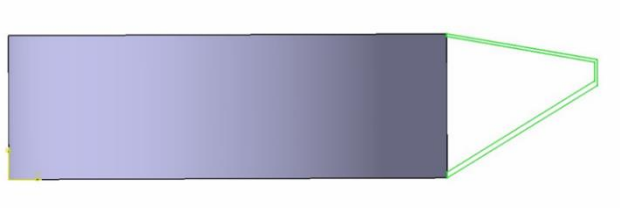
درمیان تمامی حالات در نظر گرفته شده برای شیب قطعه، بیش‌ترین نیروی لیفت ممکنه قطعه با شیب هشت درجه ارائه داده است. در حقیقت آن شیب از قطعه، نتیجه بهتری را ارائه داده است که، مقدار آن از شیب فن مورد بررسی بیش‌تر بوده است. لازم به ذکر است که در تمام موارد بالا شیب فن ۶ درجه بود. در نمودار ۴ نیروی لیفت برای شیب‌های متفاوت قطعه آورده شده است.



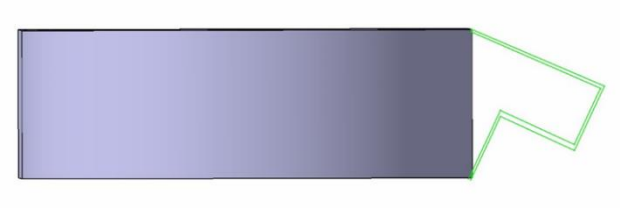
نمودار ۴- نیروی لیفت در شیب های مختلف قطعه هادی جریان

۳-۲- تغییر در شکل کانال انتقال هوا

پس از بررسی نتایج تغییر شکل قطعه هادی جریان به عنوان یکی از اجزای سیستم تعلیق هاورکرافت، در ادامه اثرات تغییر شکل مقطع کانال بر نیروی لیفت مورد تحلیل قرار می‌گیرد. از این رو با تغییر کلی در شکل کانال اولیه (شکل ۲۲) به صورتی که در شکل ۲۳ مشخص شده است، سعی شده است تا نتایج توزیع فشار و سرعت آن مورد تجزیه و تحلیل قرار گیرد. در حقیقت ایده اصلی ترسیم این کانال این بود که برخلاف کانال اولیه که حفره‌های خروجی هوا در آن طوری قرار گرفته بودند که هوا پس از گذر از حفره‌ها، به جداره بالشتک برخورد می‌کرد و این مشکلاتی را برای مقاوم‌سازی بالشتک ایجاد می‌کرد، در کانال جدید، با متمایل کردن صفحه قرارگیری سوراخ‌ها به سمت داخل، دیگر شاهد مشکل اعمال نیروی زیاد به بالشتک نخواهیم بود.



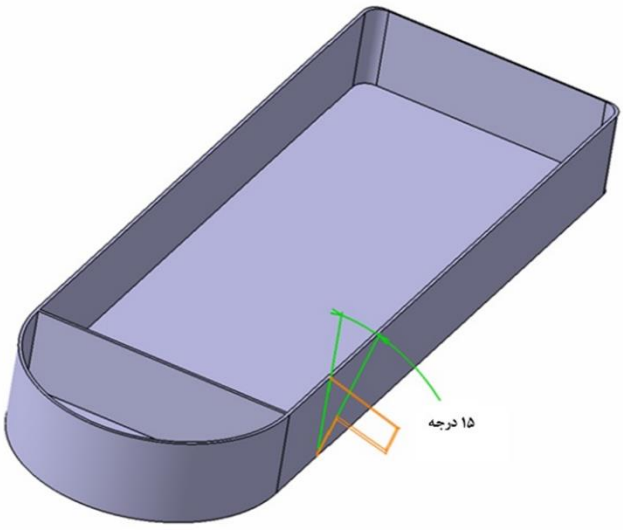
شکل ۲۲- کانال اولیه



شکل ۲۳- کانال تغییر شکل یافته

چهار پروفیل متفاوت برای کانال که تفاوت آن‌ها در زاویه اتصال صفحه کانال به بدنه هاورکرافت است، با زوایای ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵ درجه در نرم افزار کتیا ترسیم شده و پس از تشکیل شبکه برای هرکدام از شکل‌های تغییر یافته و اعمال شرایط مرزی، نتایج بدست آمده در فلوئنت بصورت کانتورهایی به نمایش در آمده اند که در ادامه توضیح داده می‌شوند.

در شکل ۲۴ نمونه ای از پروفیل کانال با زاویه اتصال ۱۵ درجه نشان داده شده است.



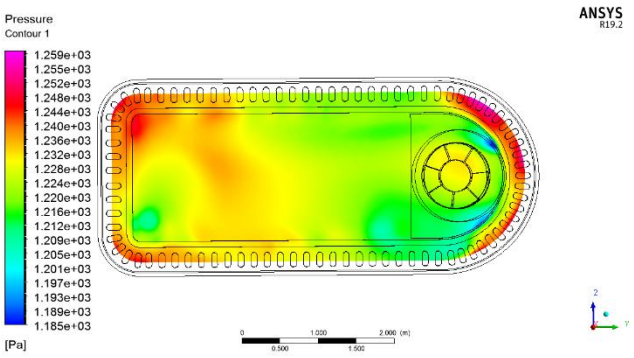
شکل ۲۴- نمونه ای از پروفیل کانال جدید با زاویه اتصال ۱۵ درجه

شکل‌های ۲۵ و ۲۶ به ترتیب کانتورهای توزیع فشار و سرعت برای کانال با پروفیل ۱۵ درجه را نشان می‌دهند. مقدار نیروی لیفت برای این شبیه سازی ۹۵۴۸ نیوتن محاسبه شده است.

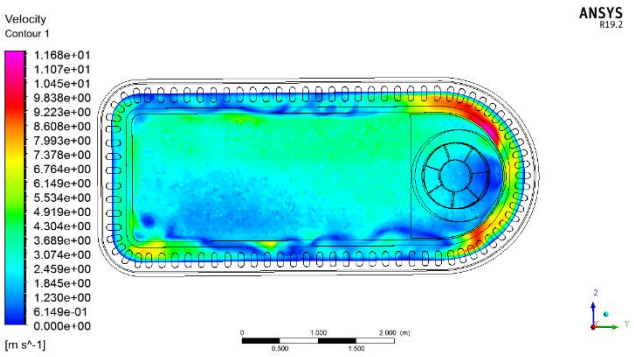
[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]

از کانتور فشار مشخص است فشار در انتهای هاورکرافت بیشتر از جلوی آن است که این به علت زاویه کم کانال است. در واقع هوا پس از خروج از حفره‌های ورودی کانال جانبی هاورکرافت، با توجه به زاویه کم کانال نسبت به محور عمود، به انتهای هاورکرافت منتقل می‌شود که این سبب تجمع هوا در انتهای هاورکرافت می‌شود. همچنین به دلیل آنکه یک صفحه، جلوی انتقال سریع هوا به داخل بالشتک را گرفته، بنابراین از میزان فشار هوا کم شده که این در نهایت موجب کم شدن نیروی لیفت حاصله می‌شود.

کانتور سرعت نیز برای این کانال، بیانگر عدم توزیع یکنواخت جریان هوا در هاورکرافت می‌باشد، به طوری که در یک سمت سرعت بیشتر از سمت دیگر هاورکرافت می‌باشد.



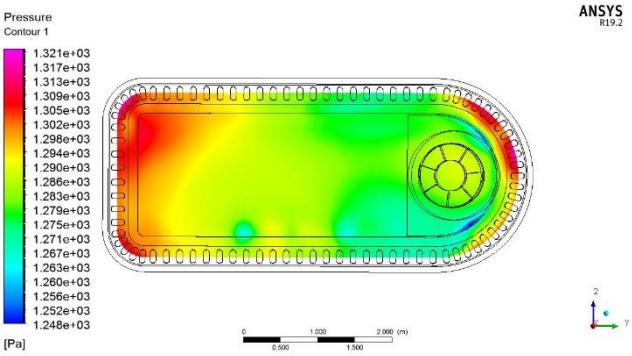
شکل ۲۵- کانتور توزیع فشار برای کانال ۱۵ درجه



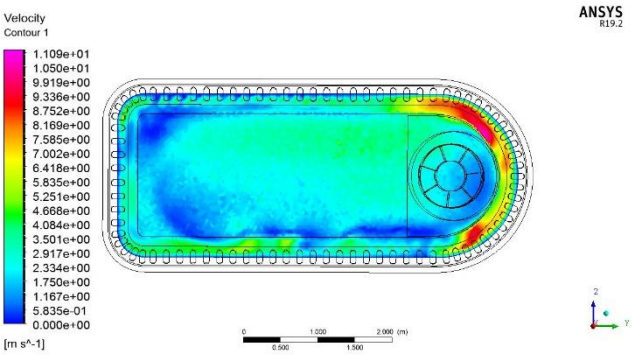
شکل ۲۶- کانتور توزیع سرعت برای کانال ۱۵ درجه

در شکل ۲۷ کانتور فشار برای هاورکرافت با پروفیل ۲۵ درجه نشان داده شده است. همانطور که مشخص است، به مانند شکل قبلی، فشار در انتهای هاورکرافت بیشتر از جلوی آن شده است، این در حالیست که توزیع فشار نسبت به پروفیل قبلی، نامتوازن‌تر است. اما مقدار نیروی لیفت ۱۰۰۱۰ نیوتن، مجدداً این موضوع را اثبات می‌کند که لزوماً توازن فشار موجب بیشتر شدن نیروی لیفت نخواهد شد. در اینجا شاید بتوان گفت که با افزایش زاویه بازشدگی کانال، هوا راحت‌تر به درون بالشتک انتقال داده شده که همین موجب بیش‌تر شدن فشار وارده بر زیر سازه هاورکرافت شده است.

شکل ۲۸ نیز کانتور سرعت همین هاورکرافت را نشان می‌دهد. از این کانتور نیز معلوم است که در نواحی انتهایی هاورکرافت سرعت جریان نزدیک به صفر بوده که این موجب می‌شود تا تجمع هوا و در نتیجه فشار هوا در انتهای هاورکرافت بیشتر باشد.



شکل ۲۷- کانتور توزیع فشار برای کانال ۲۵ درجه



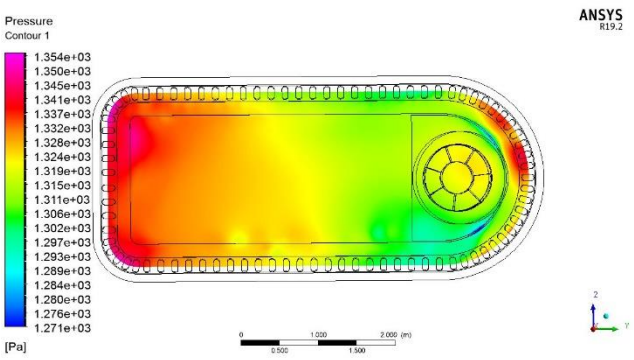
شکل ۲۸- کانتور توزیع سرعت برای کانال ۲۵ درجه

شکل ۲۹ کانتور مربوط به فشار را برای هاورکرافت با کانال ۳۵ درجه نشان می‌دهد. با مشاهده این کانتور درمی‌یابیم که توزیع فشار در این کانال نسبت به دو کانال ۱۵ و ۲۵ درجه متوازن‌تر است. به علاوه از محدوده فشار برای این کانتور نیز، این استنباط می‌شودکه میزان نیروی لیفت بیشتری نسبت به دو نمونه قبلی حاصل شده است که عدد ۱۰۲۸۴ نیوتن برای نیروی لیفت، مؤید این قضیه است. در حقیقت باید اشاره کرد که با تغییر شکل کانال، هوا راحت‌تر به زیر سازه انتقال داده شده که همین عاملی برای زیاد شدن نیروی لیفت شده است.

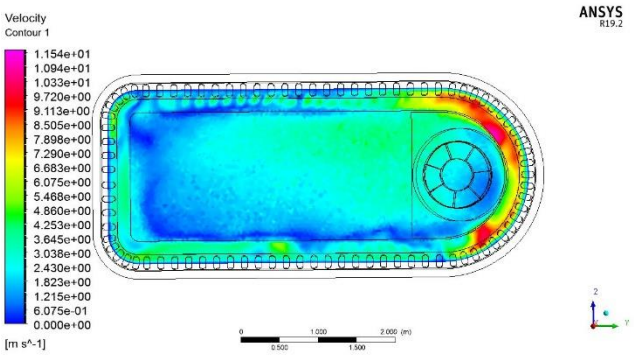
شکل ۳۰ که کانتور سرعت همین کانال را نشان می‌دهد بیانگر آن است که توزیع سرعت جریان نسبت به کانال ۱۵ و ۲۵ درجه کمی یکنواخت‌تر است و این به این علت است که با افزایش زاویه کانال، جریان هوا در کنار اینکه خیلی خوب به انتهای هاورکرافت

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]

انتقال پیدا کرده است، از قسمت‌های جلویی هاورکرافت نیز خیلی بیشتر به درون بالشتک انتقال داده می‌شود که این در نهایت موجب اعمال نیروی بالابرندگی بیشتر شده است.



شکل ۲۹- کانتور توزیع فشار برای کانال ۳۵ درجه

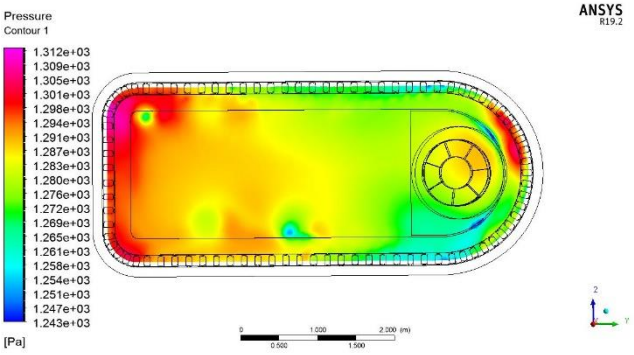


شکل ۳۰- کانتور توزیع سرعت برای کانال ۳۵ درجه

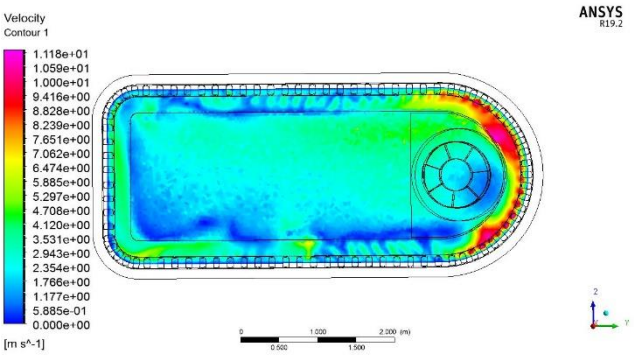
در شکل‌های ۳۱ و ۳۲ نتایج مربوط به توزیع فشار و سرعت را برای هاورکرافت با کانال ۴۵ درجه آورده شده است. برای این کانال مقدار نیروی لیفت ۹۹۹۲ نیوتن محاسبه شده است.

با بررسی کانتور فشار این برداشت می‌شود که آن میزان توازن فشاری که از کانتور مربوطه برای پروفیل ۳۵ درجه مشاهده شده، در کانال ۴۵ درجه حاصل نشده است. به علاوه محدوده فشار برای این کانال نیز نشان می‌دهدکه میزان فشار وارده بر زیر هاورکرافت از کانال قبلی کمتر است که این کمتر بودن نیروی لیفت را تصدیق می‌کند. در حقیقت برای چرایی این امر باید گفت که برای اینکه وزن هاورکرافت ثابت بماند، همه کانال‌ها طوری طراحی شده اند که تقریباً طول محیط آن‌ها یکسان باشد، و این موضوع موجب شده تا با افزایش زاویه کانال، صفحه بالایی کانال کمی به سمت پایین متمایل شود که این خروج هوا از کانال را کمی سخت می‌کند. که همین ماجرا سبب شده تا بهترین نیروی لیفت از کانال ۳۵ درجه بدست آید.

بررسی کانتور سرعت برای این کانال نیز نشان می‌دهد که توزیع سرعت جریان خیلی مشابه کانتور سرعت مربوط به پروفیل ۱۵ درجه است و به مانند آن کانال، توزیع غیر یکنواختی دارد.

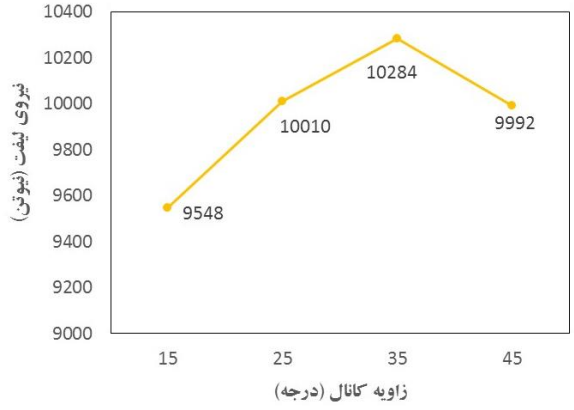


شکل ۳۱- کانتور توزیع فشار برای کانال ۴۵ درجه



شکل ۳۲- کانتور توزیع سرعت برای کانال ۴۵ درجه

در نمودار ۵ مقادیر نیروی لیفت برای تمامی تغییر شکل‌های در نظر گرفته شده برای کانال آورده شده است. می‌توان گفت که با افزایش زاویه کانال تا ۳۵ درجه مقدار فشار بیش‌تری به سطح زیر سازه اعمال می‌شود و البته این میزان نیرو از نیروی لیفت هاورکرافت اولیه کم‌تر است.



نمودار ۵- نیروی لیفت در زوایای مختلف کانال هوا

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]
[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]

در انتها تمامی موارد شبیه‌سازی شده به صورت خلاصه در قالب جدول ۲ ارائه شده‌اند. لازم به ذکر است که نیروی لیفت هاورکرافت اولیه با شیب قطعه ۲ درجه و با شکل کانال اولیه، ۱۰۵۹۸ نیوتن محاسبه شده است.

جدول ۲- خلاصه نتایج شبیه سازی

شیب قطعه(درجه)	صفر	۴	۶	۸
نیروی لیفت حاصله(نیوتن)	۱۰۵۷۲	۱۰۳۹۲	۱۰۵۳۳	۱۰۶۷۹
زاویه کانال	۱۵	۲۵	۳۵	۴۵
نیروی لیفت حاصله(نیوتن)	۹۵۴۸	۱۰۰۱۰	۱۰۲۸۴	۹۹۹۲

۴ - جمع بندی نتایج

هاورکرافت شناوری دو منظوره است که می تواند در عرصه‌های گوناگون در بسیاری از موارد به عنوان یک گونه مهم از شناورها تلقی شود. توزیع متناسب و هر چه بهتر جریان هوا در آن جهت دستیابی به نیروی لیفت بهتر به عنوان یکی از مسائل حیاتی و مهم در حوزه این شناورها همواره مورد توجه بسیاری از محققین بوده است. در این پروژه با استفاده از نرم افزار کتیا، هندسه مسئله مدل شده و تحلیل عددی در نرم افزار انسیس- فلوئنت انجام شده است. مطابق بر تحلیل‌های انجام شده بر روی مدل‌های مختلف پروفیل قطعه و کانال انتقال هوا، در نهایت مشخص شد برای حالت قطعه با شیب ۸ درجه یعنی شیب بیش‌تر قطعه نسبت به فن، بیش‌ترین نیروی لیفت نتیجه شده است. به علاوه از بررسی نتایج مربوط به تغییر شکل کانال نیز این نتیجه حاصل شد که با افزایش زاویه کانال تا ۳۵ درجه مقدار فشار بیش‌تری به سطح زیر سازه اعمال می‌شود که البته این میزان نیرو از نیروی لیفت هاورکرافت اولیه کمتر است. در حقیقت در دو حالت مورد اشاره، هوا راحت‌تر به درون بالشتک هاورکرافت منتقل شده و سبب تجمع بیش‌تر هوا در آن ناحیه شده که این موجب وارد شدن فشار بیش‌تری به سطح زیر هاورکرافت و نهایتاً اعمال نیروی لیفت بیش‌تر به آن می‌شود.

فهرست علائم

فشار [$kgm^{-1}s^{-2}$]	P	سرعت [ms^{-1}]	u_i
شتاب گرانش [ms^{-2}]	g	منبع خارجی	S_i
لزجت دینامیکی [$kgm^{-1}s^{-1}$]	μ	چگالی [kgm^{-3}]	ρ

۶- مراجع

1- Molla-Alipour, M., Imani Parsa, S.A. and Rabienataj Darzi A.A., (2017), *Numerical investigation of guide blade effect on the pressure distribution and lift force of hovercraft*, 1th International Conference on Modern Technologies in Science, Amol, Iran. (In Persian)

2- Saeid, N.H., Yunus, E. and Fei, O.C., (2014), *CFD SIMULATION OF AIR FLOW AROUND A HOVERCRAFT*, 5th Brunei International Conference on Engineering and Technology.

3- Kaya, K. and Özcan, O., (2013), *A numerical investigation on aerodynamic characteristics of an air-cushion vehicle*, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol. 120, p. 70-80.

4- Zare, K., Yarmahmoudi, A. and Zarei, M., (2015), *Investigation of the influence of air outlet holes parameters on the shape and intensity of the deformation of the close cushion in hovercrafts*, 17th Marine Industry Conference, Kish Island, Iran. (In Persian)

5- Miraki, R., Khalili, A., Rajabi, I. and Azarnia, SH., (2016), *Design, construction and setting up the aerostatic tests of hovercraft cushion*. 18th Marine Industry Conference, Kish Island, Iran. (In Persian).

6- ZHOU, J., TANG, W. and ZHANG, S., (2009), *Sea Keeping Analysis of Air Cushion Vehicle with Different Wave Angles under the Operation Resistance*, Journal of Shanghai Jiaotong University (Science), Vol. 14, p. 471-475.

7- Rajabi, I., Behzadi, M.R., Khalili, A. and Miraki Baseri, R., (2016), *Aerodynamic simulation and analysis of air cushion vehicle hovering system*, 18th Marine Industry Conference, Kish Island, Iran. (In Persian)

8- Hinchey, M.J. and Sullivan, P.A., (1993), *On hovercraft overwater heave stability*, Journal of Sound and Vibration, Vol. 163, p. 261-273.

9- Kale, A.V., Ghogare, A.J., Yerrawar, R.N. and Biradar, P.B., (2017), *Design & Air Flow Simulation of Small Scale Working Model Of Hovercraft*, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, p. 23-28.

10- Mantle, P.J., (2017), *Maximum lift-drag ratio of air cushion craft*, The Aeronautical Journal, Vol. 121, p.693-709.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2026-11-04]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1398.15.30.6.6]

[DOI: 10.29252/marineeng.15.30.81]