

بهینه‌سازی عددی وزن و سرعت عملیاتی تونل شناور

به کمک طرح آزمایش تاگوچی

حمید کاظمی^۱ و روزبه شفقت^۲ و علی حاجی‌آبادی^۳

گروه پژوهشی انرژی‌های دریای پایه

دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۴/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۲۹)

چکیده

در این پژوهش، در ابتدا شکل معمول یک شناور تک‌بدنه و تندروی مشخص، با حفظ پارامترهای هندسی، نظیر زاویه ددرایز، خط کیل، پهناي شناور و طول شناور به فرم تونل‌دار تبدیل شده است. با در نظر گرفتن شرایط بار کامل و بدون بار صورت گرفته، فرایند بهینه‌سازی ابعاد تونل نیز در بیشینه وزن و سرعت عملیاتی انجام شده است. توجه شود که برای کاهش پسا، پارامترهای هندسی زیادی در بخش‌های مختلف تونل در طراحی و بهینه‌سازی تونل موثرند. در این مطالعه، سعی بر آن بوده که برای دستیابی به شکل بهینه تونل، اثرات سه پارامتر دهانه تونل، ارتفاع تونل و ارتفاع گوشواره (بلید) به صورت همزمان بررسی شوند. جهت دستیابی به این هدف، شبیه‌سازی عددی به کمک روش حجم محدود با در نظر گرفتن شبکه متحرک، انجام شده است. برای مدل‌سازی آشفتگی از مدل $k-\epsilon$ و برای شبیه‌سازی سطح آزاد از مدل دو فازی حجم سیال استفاده شده است. برای انتخاب نمونه‌های مورد نیاز برای آزمون عددی، از روش تاگوچی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که دهانه تونل تاثیرگذارترین پارامتر در افزایش سرعت عملیاتی می‌باشد. همچنین، با بهینه‌سازی تونل می‌توان پسا را تا حدود ۲۰ درصد در وزن و سرعت عملیاتی کاهش داد.

واژه‌های کلیدی: شناور تندروی تونل‌دار، شبکه دینامیکی، پسا، مدل حجم سیال، طرح آزمایش تاگوچی

Numerical Optimization of Weight and Velocity of a Tunneled High Speed Hull, Using Taguchi Method

H. Kazemi, R. Shafaghat and A. Hajiabadi

Sea Based Energy Research Group

Babol Noshirvani University of Technology

(Received: 24/June/2018 ; Accepted: 20/December/2018)

In this study, the usual shape of a specific mono-hull changes into tunneled one keeping the geometrical parameters, including deadrise angle, keel line, beam width, and the hull length, constant. In this research, the specific shape of a speed monohull changed into a tunneled, keeping the geometric parameters, including the deadrise angle, keel line, hull width and length constant. The analysis carried out considering full load (10kg) and without load (3kg) conditions and optimization of the tunnel dimensions was performed in the maximum operational weight (10kg) and velocity (10m/s). Various geometrical parameters are effective on drag reduction of different sections of the tunnel, when designing and manufacturing the hull. In order to reduce drag, various geometrical parameters in different parts of the tunnel are effective in design and optimization. In this study, it has been attempted to investigate the effects of three parameters, namely: tunnel aperture, tunnel height, and blade simultaneously, in order to achieve an optimum shape of the tunnel. For this purpose, numerical simulation of the problem was carried out by means of finite volume method, considering moving mesh. For turbulence modeling, $k-\epsilon$ model and for simulating the free surface, volume of fluid (VOF) method were employed. The design of test and optimization were conducted, using Taguchi method. The results show that the tunnel aperture is the most effective parameter in increasing operational speed. Furthermore, one can reduce the drag by about twenty percent in the operational weight and speed through optimizing the tunnel.

Keywords: Tunneled High Speed Hull, Dynamic Mesh, Drag, Volume of Fluid Model, Taguchi Method

۱- دانشیار، (نویسنده پاسخگو): rshafaghat@nit.ac.ir

۲- کارشناس ارشد، h.kazemi@stu.nit.ac.ir

۳- کارشناس ارشد، ahagiabaad@gmail.com

۱- مقدمه

آزمایشگاهی حساسیت شرایط بارگذاری در یک شناور تندرو کاتامارن با نیم بدنه غیرمتغرن را مورد بررسی قرار دادند.

در بیشتر کارهای ارائه شده در زمینه شناورهای تندروی تونل دار، بر اساس طرح موجود پوسته تونل دار، به بررسی عملکرد آن پرداخته شده است؛ لذا در این پژوهش ابتدا بر اساس روش تبدیل شناور تک بدنه به بدنه تونل دار که در کار یوسفی و همکاران [۲] معرفی شده است، یک شناور تندروی تک بدنه، با حفظ چهارچوب اصلی، به یک شناور تونل دار تبدیل شده، عملکرد شناور تونل دار (در مقایسه با شناور تک بدنه) مورد بررسی قرار می گیرد. پارامترهای هندسی زیادی در تونل های جانبی بر عملکرد شناور تونل دار موثرند. این پارامترها را می توان به دو دسته کلی ابعاد تونل و متعلقات آن دسته بندی نمود. متعلقات تونل شامل بخش هایی نظیر استپ های سقف تونل، پله های طولی و پله روی گوشواره تونل می شود. در این مطالعه با در نظر گرفتن پارامترهای ابعادی، سه پارامتر دهانه تونل، ارتفاع تونل و ارتفاع گوشواره به عنوان پارامترهای ابعادی اصلی در فرایند بهینه سازی ابعاد تونل مدنظر خواهند بود. پس از تعیین ابعاد بهینه ی تونل، مشخصه های هیدرودینامیکی شناور تونل دار با ابعاد بهینه برای تونل، با شناور تک بدنه پایه مورد مقایسه قرار خواهد گرفت. به منظور تولید بدنه شناورهای تونل دار با ابعاد هندسی متنوع، جهت به کارگیری در فرایند بهینه سازی، از طرح آزمایش تاگوچی^۲ و در وضعیت عملیاتی بهره گرفته می شود.

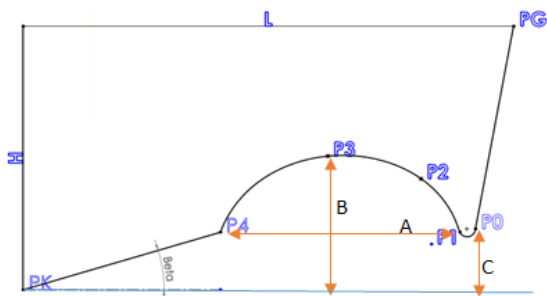
۲- تولید هندسه

در این بخش به ارائه جزئیات هندسه مدل پایه (تک بدنه) و تونل دار پایه پرداخته شده است. سپس ۱۶ مدل با استفاده از طرح آزمایش تاگوچی به منظور بررسی سه پارامتر ارتفاع تونل، دهانه تونل و ارتفاع تهیه شد.

۲-۱- تبدیل شناور پایه تک بدنه به فرم تونل دار

بدنه ی تونل دار با حفظ چهارچوب اصلی یک شناور تک بدنه تولید شده است (شکل ۲). برای این منظور از شناور مدل تک بدنه پروازی استفاده می شود. در جدول ۱ مشخصات هندسی شناور پایه و شناور تونل دار پایه ارائه شده است؛ با

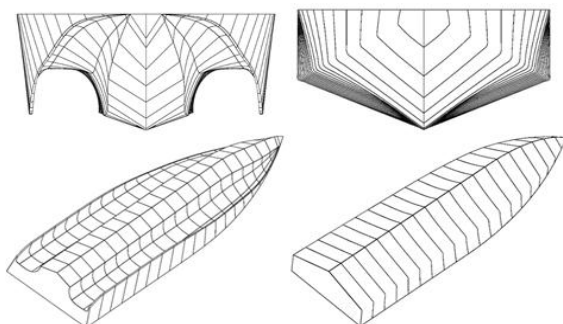
به کارگیری تونل های طولی در یک شناور تندرو، به عنوان یکی از روش های مناسب کاهش پسا معرفی شده است؛ اما به طور قطع نمی توان گفت با ایجاد تونل در بدنه شناور، پسا شناور کاهش یافته یا قدرت مانور آن افزایش می یابد. به کارگیری تونل در یک شناور زمانی مفید واقع می شود که شناخت بیشتر نسبت به پارامترهای هندسی موثر تونل و تاثیر متقابل پارامترها بر عملکرد شناور در طراحی تونل به دست آید. پارامترهای هندسی گوناگون در بخش های مختلف تونل (مانند بخش گوشواره تونل، ابعاد تونل و متعلقات تونل) بر عملکرد شناور تاثیر گذارند. در زمینه شبیه سازی شناورهای تندروی تونل دار، کارهای کمی صورت گرفته است. بیشتر کارهای انجام شده در زمینه شناورهای تونل دار، مربوط به شناور کاتاماران است. در سال ۲۰۱۳ ویجیاما و همکاران [۱] به صورت آزمایشگاهی به بررسی پارامترهای هندسی موثر بر شناور مدل بلیدرانر پرداختند. در این کار که به کمک هشت نمونه آزمایشگاهی صورت گرفت، به بررسی تاثیر وزن، مرکز جرم و نقش پله عرضی بر عملکرد شناور سه بدنه پرداخته شد. در سال ۲۰۱۳ یوسفی و همکاران [۲] شناور تندرو و تک بدنه کوگار را به شناور تونل دار تبدیل کردند و موفق شدند تا ۱۴ درصد کاهش پسا را در بیشینه سرعت شناور مشاهده نمایند. قصابزاده و قاسمی [۳-۴] با تولید یک پوسته چند بدنه، به کمک مدل عددی و آزمایشگاهی، به بررسی رفتار شناور در سرعت های مختلف پرداختند. شن و همکاران [۵] به کمک روش شبکه متحرک، عملکرد شناور کاتاماران را بررسی نموده، نتایج به دست آمده را با دو روش سویتسکی^۱ و موری مقایسه کردند. سالاری و همکاران [۶] به بررسی عددی حساسیت شرایط بارگذاری در شناور تندرو پله دار پرداختند. الکساندر گری و همکاران [۷] به شبیه سازی پوسته ی تریماران به کمک نرم افزار CFX پرداختند و نتایج به دست آمده را با نتایج تجربی مقایسه کردند. کاظمی مقدم و همکاران [۸] و کاظمی مقدم و شفقت [۹] در مطالعه عددی به ترتیب به بررسی پارامتری اثر اندازه ارتفاع و دهانه تونل بر پارامترهای هیدرودینامیکی شناور تونل دار پرداختند. حاجی آبادی و همکاران [۱۰] با استفاده از روش



شکل (۱): پارامترهای مختلف مقطع شناور تونل دار.

جدول (۱): مشخصات هندسی شناور تک‌بدنه پایه و شناور تونل دار اولیه.

مشخصات هندسی شناور	واحد	تونل دار	تک‌بدنه
طول شناور	cm	۱۰۰	۱۰۰
عرض شناور	cm	۳۱	۳۱
ارتفاع کلی	cm	۱۴/۴	۱۴/۴
ددرایز میانگین	deg	۲۶	۲۶
وزن شناور (بار سبک)	kg	۳/۱۹	۳/۱۹
وزن شناور (بار سنگین)	kg	۱۰	۱۰
وزن بار کل	kg	۲۴/۴۷	۲۰/۹
مرکز جرم از کیل ^۲	cm	۵	۵
مرکز جرم از پاشنه	cm	۲۰	۲۰
تیریم ^۳ اولیه	deg	۴	۶,۵
آب‌خور ^۴ اولیه	cm	۶/۹۳	۸/۷
تعداد تونل		-----	۲
ارتفاع تونل پاشنه	cm	-----	۷/۱
ارتفاع تونل پاشنه	cm	-----	۷/۸



شکل (۲): شناور تک‌بدنه پایه و شناور تونل دار پایه تولید شده در نمای مختلف.

توجه به جدول ۱، شناور تک‌بدنه پایه به طول ۱۰۰ cm، ارتفاع ۱۴/۴ cm، بیشینه عرض ۳۱ cm و زاویه ددرایز میانگین ۲۶ deg می‌باشد.

برای دست‌یابی به طرحی جامع جهت تولید بدنه تونل‌دار از هندسه یک شناور تک‌بدنه، فرم بدنه شناور تونل‌دار به سه قسمت اصلی تقسیم می‌شود که به‌طور مستقل بیشترین تأثیر را بر عملکرد هیدرودینامیکی شناور دارند:

۱- بدنه منشوری، در این بخش مهم‌ترین پارامترها شامل عرض بدنه منشوری، زاویه خیز کف در هر مقطع طولی و پروفیل تغییرات آنها در طول مورد نظر می‌باشد،

۲- تونل، در این بخش مهم‌ترین پارامترها شامل عرض تونل، ارتفاع تونل، پروفیل تغییرات این دو در طول شناور و شکل سطح مقطع تونل مورد نظر می‌باشد و

۳- گوشواره تونل، در این بخش مهم‌ترین پارامترها شامل زاویه انحراف، ارتفاع و پروفیل تغییرات در طول شناور مورد نظر می‌باشد.

با توجه به تقسیم‌بندی صورت گرفته، به‌طور ساده می‌توان گفت: یک شناور تونل‌دار از ترکیب دو قسمت تونل و بدنه منشوری ایجاد می‌شود. بر این اساس زاویه خیز کف، عرض بدنه منشوری، شکل سطح مقطع تونل، عرض و ارتفاع تونل در هر مقطع، تغییرات عرض و ارتفاع بخش گوشواره شناور و لبه بالایی شناور^۱ مشخص خواهد شد. بهترین روش برای هموار شدن حجم تولید شده از اتصال مقاطع طولی، داشتن پیوستگی در تغییرات این پارامترها بر اساس طول شناور می‌باشد. در این صورت می‌بایست تابع هر یک از این پارامترها در طول شناور مشخص شود تا منحنی تغییرات پارامترها پیوسته و حجم تولید شده، کاملاً هموار باشد.

به‌منظور برقراری ارتباط موثر بین پارامترها از اعداد بی‌بعد مشخصی استفاده شده است که با داشتن عرض، ارتفاع و زاویه ددرایز هر مقطع از شناور پایه، می‌توان با معرفی ۵ نقطه، مشخصات هندسی هر مقطع عرضی دلخواه را در شناور تونل‌دار به‌دست آورد (شکل ۱). پس از تعیین مشخصات هندسی مقاطع عرضی مورد نیاز در طول شناور، پارامترهای هندسی شناور تونل‌دار، به‌طور کامل مشخص شده، فرم اولیه شناور تونل‌دار مدل به‌دست می‌آید (شکل ۲).

2- Keel
3- Trim
4- Draft

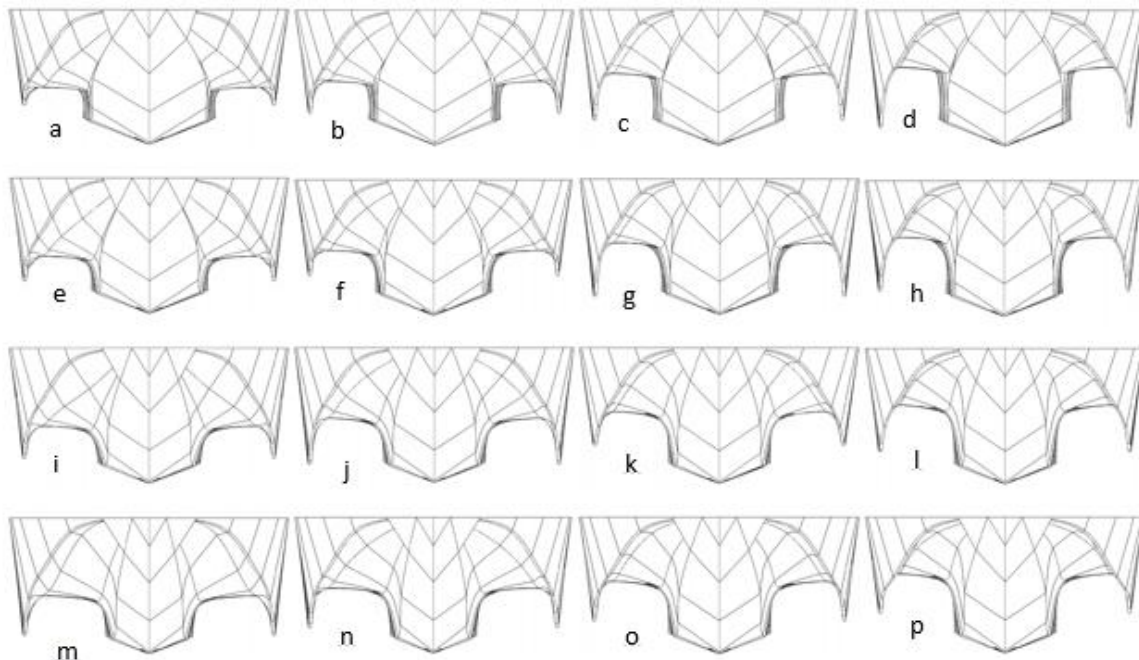
1- Gunwale

مقادیر هر یک در جدول ۲ ارائه شده است. با توجه به ۳ فاکتور و ۴ سطح در نظر گرفته شده تاگوچی ۱۶ طرح آزمایش را ارائه می‌دهد که در جدول ۵ نشان داده شده است. برای تولید پوسته‌های مختلف سه پارامتر نشان داده در شکل ۱، دهانه تونل (A)، ارتفاع تونل (B) و ارتفاع گوشواره (C) به صورت ترکیبی بر اساس طرح آزمایش تاگوچی با نسبت ۱۰٪ از اندازه اولیه تغییر می‌یابند. در شکل ۳ پوسته‌های تولید شده بر این اساس نشان داده شده است.

جدول (۲): ارزش عددی مرتبه فاکتورهای در روش تاگوچی.

ارزش عددی فاکتورها (cm)			
مرتبه فاکتورها	دهانه تونل	ارتفاع تونل	ارتفاع گوشواره
۱	۶/۱۳	۶/۰۸	۳
۲	۶/۹۳	۶/۸۴	۲/۷
۳	۷/۷۳	۷/۶	۲/۴
۴	۸/۵۴	۸/۳۶	۲/۱

۲-۲- تولید پوسته‌های تونل دار با ابعاد مختلف تونل
 حال برای بهینه‌سازی شناور تونل دار، با تغییر در پارامتر ارتفاع تونل، دهانه تونل و ارتفاع گوشواره و با استفاده از طرح آزمایش تاگوچی مدل‌های هندسه‌های مختلف تولید می‌شود. طراحی آزمون‌ها، روش‌هایی هستند که با کمترین هزینه و صرف وقت، بیشترین بازدهی را به وجود می‌آورند. یکی از قوی‌ترین و پربازده‌ترین این الگوریتم‌ها، روشی است که توسط مبتکر آن، تاگوچی، نام‌گذاری شده است. این روش با تقلیل تعداد آزمون‌ها و همچنین استفاده از فاکتور سیگنال به نوبت، بررسی لازم را به عمل آورده و سطوح بهینه آزمایش و همچنین تعامل فاکتورها را با هم نشان می‌دهد. در این روش طرح آزمایش به کمک ترکیب گروه‌های ویژه‌ای از آرایه‌های اورتوگونال صورت می‌گیرد. مهمترین مزیت استفاده از طرح آزمایش تاگوچی بررسی اثر فاکتور مد نظر با در نظر گرفتن تاثیر متقابل بقیه عوامل است. فاکتورهای مورد بررسی در این کار سه فاکتور هندسی دهانه تونل، ارتفاع تونل و ارتفاع گوشواره می‌باشد. برای هر یک از این فاکتورها ۴ سطح در نظر گرفته شده است که



شکل (۳): پروفیل شناورهای پیشنهادی طرح آزمایش تاگوچی.

۳- معادلات حاکم

در این بخش معادلات حاکم بر مسئله ارائه شده است. معادلات حاکم شامل معادلات بقای جرم، مومنتوم، آشفتگی و حرکت جسم صلب است.

۳-۱- معادله بقای جرم و اندازه حرکت

با فرض جریان تراکم‌ناپذیر، معادله‌ی بقای جرم (پیوستگی)، به کار گرفته شده است. برای بیان معادله‌ی بقای اندازه حرکت، از معادلات ناویر-استوکس استفاده شده است.

۳-۲- معادلات حرکت جسم صلب

برای مدل‌سازی حرکت شناور در طول زمان، از حل معادلات حرکت جسم صلب استفاده شده است. برای بررسی حرکت جسم صلب از دو دستگاه مختصات استفاده می‌شود. سیستم مختصات XYZ که سیستم مختصات اینرسی بوده و به زمین متصل می‌باشد و سیستم مختصات xyz که سیستم آزاد دارای شتاب و سرعت دلخواه می‌باشد. معادلات استفاده شده، معادلات حرکت شش درجه آزادی شناور می‌باشد. با توجه به شبیه‌سازی حرکت شناور در آب آرام و اهمیت دو حرکت پیچ و هیو از چهار آزادی حرکت دیگر صرف نظر شده و فقط دو درجه آزادی در نظر گرفته شده است.

۳-۳- معادله سطح آزاد

در حالتی که جریان همراه با سطح آزاد باشد و با توجه به تغییر شکل‌های سطح آزاد و شکست امواج، مدل‌سازی سطح آزاد از اهمیت بالایی برخوردار است. یوسفی و همکاران در سال ۲۰۱۴ [۱۱] با استفاده از یک روند الگوبرداری به بررسی روش‌های حل جریان بر روی شناورهای تندرو پرداختند؛ بر اساس این الگو برداری، مدل‌سازی سطح آزاد بر اساس روش تسخیر سطح آزاد و رویکرد حجمی VOF مناسب‌ترین روش برای شبیه‌سازی است. در این حالت یک معادله انتقال برای محاسبه نسبت حجمی دو فاز سیال حل می‌شود.

۳-۴- مدل‌سازی آشفتگی

با توجه به ماهیت آشفتنه جریان ($Re=5/000/000$)، آشفتگی به کمک مدل دو معادله‌ی $k-\epsilon$ مدل‌سازی شده

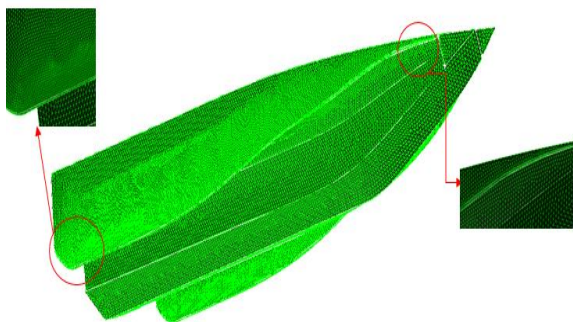
است. در مدل $k-\epsilon$ میدان آشفتنه بر حسب دو متغیر انرژی جنبشی جریان آشفتنه^۱ k و نرخ اضمحلال ویسکوز انرژی جنبشی آشفتنه^۲ ϵ بیان شده است.

۴- روش حل عددی

در این مطالعه از روش حجم محدود در نرم‌افزار آنسیس فلونت برای مدل‌سازی حرکات شناور استفاده شده است. در ادامه جزئیات مدل‌سازی این کار ارائه شده است.

۴-۱- شبکه بندی میدان حل و تعیین شرایط مرزی

با توجه به اهمیت تحلیل رفتار جریان در اطراف و بر روی شناور، بر روی پوسته شناور از مش‌های با سایز ۳mm تا ۱۰mm استفاده شده است. برای نمونه مش روی بدنه شناور تونل‌دار در شکل ۴ نشان داده شده است، همان‌طور که در شکل ۴ مشخص است کوچکترین اندازه شبکه بر روی گوشواره تونل ایجاد شده است. ابعاد دامنه محاسباتی و فواصل دامنه تا شناور در شکل ۵ نشان داده شده است. در اطراف بدنه، به دلیل هندسه پیچیده از شبکه‌بندی بی‌سازمان^۳ با المان‌های چهاروجهی تتراهدرال^۴ و مش لایه مرزی استفاده شده است. ارتفاع لایه اول شبکه با توجه به استفاده از توابع دیواره استاندارد به‌گونه‌ای تعیین شده است تا مقدار y^+ در محدوده ۲۰۰ قرار بگیرد. برای کاهش تعداد سلول‌ها در نواحی دور از بدنه از شبکه سازمان‌یافته با المان‌های مکعبی هگزاهدرال^۵ استفاده می‌شود.

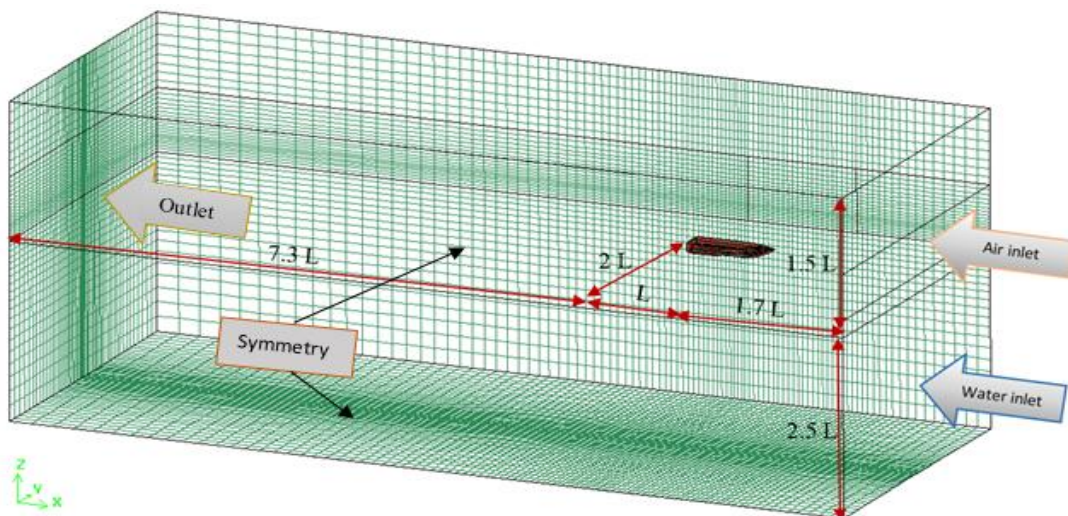


شکل (۴): مش روی بدنه شناور تونل‌دار.

1- Turbulence Kinetic Energy (TKE)
2- Viscous Dissipation of Turbulence Kinetic Energy
3- Unstructured
4- Tetrahedral
5- Hexahedral

نسبت لزجت آشفتگی ۱۰ در نظر گرفته شده است. شرط مرزی خروجی برای تعیین فشار سیال در خروجی جریان، شرط فشار خروجی است. برای محدوده دامنه حل با توجه به همگرایی بهتر شرط مرزی تقارن، از این شرط مرزی استفاده شده است [۱۲]. آخرین و مهم‌ترین مرز، مرز شناور است که باید جابه‌جایی مرز را بر روی آن اعمال نمود. شرط مرزی دیواره، بدون لغزش انتخاب می‌شود تا با ایجاد تنش برشی بر روی آن، مدلی از واقعیت بدنه شناور باشد.

برای سطح آزاد از مش با سایز ۲۰mm تا ۳۰mm و در نواحی دور از بدنه با یک روند افزایشی، شبکه‌بندی از اندازه ۴۰mm تا ۸۰mm بر روی ناحیه بیرونی انجام شده است. در شبیه‌سازی عددی جریان سیال، علاوه بر مطرح بودن بحث ریاضی حل معادلات، باید نوع و فیزیک جریان در مرزهای دامنه محاسباتی نیز به حل‌گر شناسانده شود. شرط مرزی برای ورودی جریان برای آب و هوا سرعت ورودی بوده، برای تعریف سرعت جریان و تمام خاصیت‌های اسکالر جریان در ورودی به کار می‌رود. در این بخش شدت آشفتگی ۰.۵٪ و



شکل (۵): ایجاد دامنه محاسباتی برای حل جریان روی شناور.

جدول (۳): تنظیمات مورد استفاده در نرم‌افزار

انسیس - فلونت و روش حل عددی.

ردیف	عنوان	روش انتخابی
۱	حل‌گر	Unsteady, Segregated, implicit, dynamesh
۳	روش دوفازی	VOF
۴	روش گسسته سازی	نسبت حجمی
		مومنتوم
		فشار
		انرژی جنبشی توربولانسی
		نرخ اتلاف توربولانسی

۲-۴- الگوریتم حل مساله

در این مساله از آنالیز ناپایا، برای به‌دست آوردن مقادیر متغیرها در زمان‌های مختلف استفاده می‌شود. گام زمانی بر اساس عدد کورانت ۰/۳ برای سرعت‌های مختلف به‌دست می‌آید [۱۱]. در محاسبه گام زمانی کوچکترین اندازه شبکه و بیشترین مقدار سرعت محلی در نظر گرفته شده است. برای ضریب کشش سطحی، مقدار 0.073 N/m اعمال شده است. سایر تنظیمات در جدول ۳ نشان داده شده است.

شرط توقف حل مساله، علاوه بر ارضای معادلات حاکم پیوستگی و مومنتوم (مرتب ۵-)، آشفتگی (مرتب ۶-) و سطح آزاد (مرتب ۶-)، دستیابی به موقعیت درست فیزیکی در شرایط مورد نظر است که این امر با بررسی مرکز فشار بر روی سطح بدنه صورت گرفته است.

۵- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا نتایج مربوط به اعتبارسنجی و استقلال از شبکه آورده شده، سپس نتایج حاصل از ایجاد تونل در بدنه شناور پایه مورد بررسی قرار می‌گیرد. در بخش پایانی، نتایج مربوط به پوسته‌های تولیدی بر اساس طرح آزمایش تاگوچی و نیز مقایسه نتایج به‌دست‌آمده برای شناور تونل‌دار بهینه با شناور تک‌بدنه پایه ارائه می‌شود.

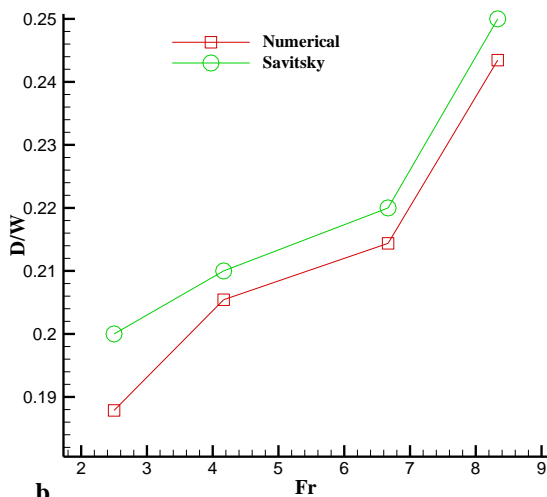
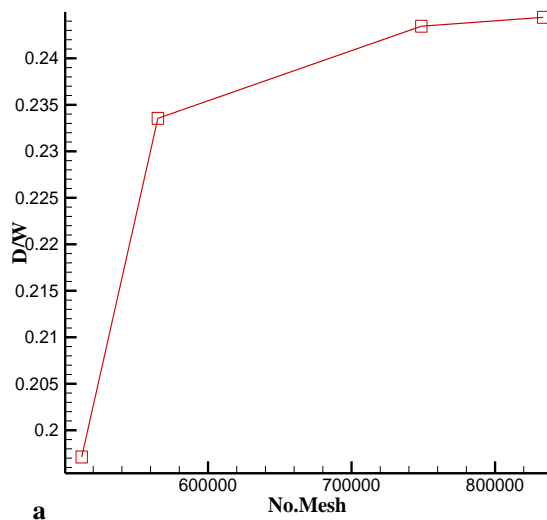
۵-۱- اعتبارسنجی و بررسی استقلال حل از شبکه

برای اعتبارسنجی حل عددی از روش نیمه تجربی سویتسکی [۱۳] و نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. روش سویتسکی، روشی معتبر برای پیش‌بینی مقاومت و پارامترهای هیدرودینامیکی شناور تندرو تک‌بدنه می‌باشد. در شکل ۶-ا با بی‌بعدسازی پسا بر حسب وزن شناور، استقلال حل از شبکه برای شناور تونل‌دار اولیه و در سرعت 10 m/s نشان داده شده است. شکل ۶-ب نیز مقادیر به‌دست‌آمده برای اعداد فرود مختلف را برای دو روش عددی و سویتسکی نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده تطابق مناسبی بین نتایج روش عددی سویتسکی در محدوده مورد بررسی به جز در فرو $2/5$ می‌باشد. در اعداد فرود بالای ۴ کمتر از ۳٪ است. در بخشی دیگر از کار برای اطمینان از نتایج مدل‌سازی شناور تونل‌دار نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید. شناور مدل مورد بررسی در آزمایشگاهی با نسبت ۱ به $4/75$ و طول $2/7\text{ m}$ است. نتایج آزمایشگاهی ارائه‌شده در جدول ۴ نشان داده شده است. همان‌طور که در نتایج دیده می‌شود نتایج مدل‌سازی از دقت بالا و مناسبی برخوردار است.

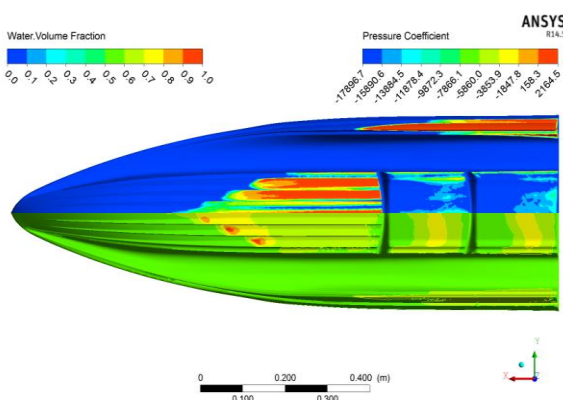
در شکل ۷ بخشی از نتایج مدل‌سازی هندسه اعتبارسنجی شامل: کانتور فشار و فاز بر روی کف بدنه شناور در یک شکل، موقعیت شناور نسبت به سطح آزاد و الگوی امواج در سرعت 12 m/s نشان داده شده است.

جدول (۴): مقایسه نتایج آزمایشگاهی و عددی.

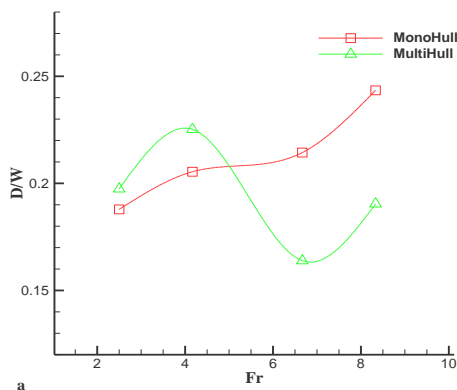
ردیف	سرعت	نتایج آزمایشگاهی		نتایج عددی	
		پسا	تریم	پسا	تریم
۱	۲	۹۰/۴	۳/۲۹	۹۶/۵	۳/۲۱
۲	۶	۲۶۰/۴	۳/۴۶	۲۶۶/۰	۳/۲۵
۳	۱۲	۳۷۱/۴	۳/۰۱	۳۶۹/۴	۳/۰۱



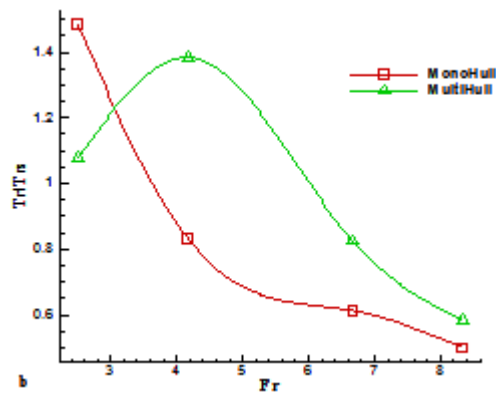
شکل (۶): (a) بررسی استقلال از شبکه (b) اعتبارسنجی حل.



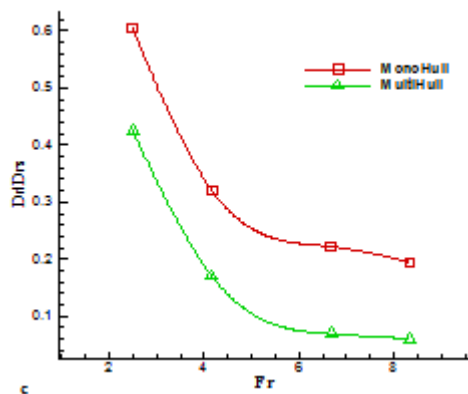
شکل (۷): نتایج اعتبارسنجی مدل آزمایشگاهی در سرعت 12 m/s (a) کانتور فاز و فشار کف بدنه، (b) موقعیت شناور نسبت به سطح آزاد، (c) الگوی موج.



a



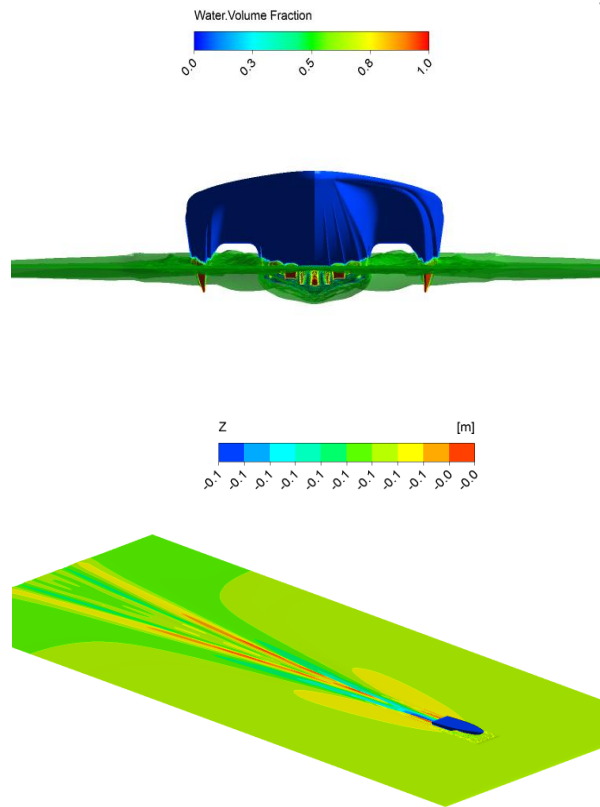
b



c

شکل (۸): تغییرات پارامترهای هیدرودینامیکی با ایجاد تونل در شناور پایه (a) نمودار پسا (b) نمودار تریم (c) نمودار آب‌خور.

بر اساس شکل ۸-ب تریم شناور تک‌بدنه با افزایش سرعت روند یکنواخت و رو به کاهشی دارد؛ در حالی که در مورد شناور تونل‌دار، رفتار متفاوتی مشاهده شده، تا پیش از رسیدن به مود پروازی، تریم شناور افزایش یافته، بعد از رسیدن به مود پروازی، تریم شناور روند کاهشی را نشان می‌دهد. در مورد آب‌خور شناور، با توجه به شکل ۸-ج، در هر دو پوسته تک‌بدنه و چند بدنه رفتار مشابهی دیده می‌شود؛ به طوری که در هر دو پوسته با افزایش سرعت،



شکل (۷): ادامه

۵-۲- بررسی اثر تونل‌دار کردن شناور

در این بخش به بررسی افزودن تونل در بدنه شناور در حالت بار سبک، با ۳kg وزن پرداخته شده است. با توجه به شکل ۸-ا، در شناور تک‌بدنه با افزایش سرعت، پسا کل شناور افزایش یافته است؛ ولی با ایجاد تونل در بدنه شناور، در سرعت‌های بالا و پس از رسیدن به مود پروازی، پسا کل شناور تونل‌دار از شناور اولیه کمتر می‌شود؛ البته در سرعت‌های پایین و پیش از مود پروازی، اندازه پسا کل شناور تونل‌دار از شناور اولیه بیشتر است دلیل پسا بیشتر در سرعت پایین سطح تماس بیشتر شناور تونل‌دار نسبت به شناور تک‌بدنه است در سرعت‌های بالاتر با تغییر مود شناور از حالت نیمه جابجایی به پروازی سطح تر شده کاهش پیدا کرده است. برای بررسی رفتار شناور، دو پارامتر هیدرودینامیکی زاویه تریم و عمق غوطه‌وری شناور مد نظر می‌باشد که برای مقایسه بهتر، این دو پارامتر به ترتیب با تریم اولیه و آب‌خور اولیه شناور بی‌بعد شده‌اند.

پایه و شناور تک بدنه پایه ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود افزودن تونل در بدنه و بر اساس الگوی اولیه، در حالت بار کامل باعث افزایش پسا می‌شود؛ حال آن در شرایط بدون بار، نتایج شبیه‌سازی عددی نمایان‌گر کاهش پسا بود. از بین ۱۶ مدل شناور تونل‌دار ارائه شده، تنها در هفت مدل، کاهش پسا رخ داده است که این امر اهمیت بهینه‌سازی تونل شناور را در شرایط بار و سرعت عملیاتی، بیش از پیش نمایان می‌رساند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بهترین مدل ارائه شده، مدل شماره ۳، با ۱۷/۷ درصد کاهش پسا می‌باشد.

آب‌خور شناور به طور یکنواخت کاهش می‌یابد. در ضمن نسبت آب‌خور به آب‌خور اولیه، در شناور تونل‌دار، نسبت به شناور تک‌بدنه کمتر است.

۵-۳- بررسی نتایج بهینه‌سازی

نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی عددی، برای مدل‌های پیشنهادی طرح آزمایش تاگوچی، در جدول ۵ ارائه شده است. محاسبات این بخش با فرض بار کامل، ۹kg انجام شده است. در ردیف‌های ۱ تا ۱۶ طرح آزمایش تاگوچی و نتایج به‌دست‌آمده از روش عددی ارائه شده است. در ردیف ۱۷ و ۱۸، به ترتیب نتایج به‌دست‌آمده برای شناور تونل‌دار

جدول (۵): مدل‌های پیشنهادی تاگوچی و نتایج تحلیل عددی.

ردیف	شماره شکل	دهانه تونل	ارتفاع تونل	ارتفاع گوشواره	تریم (deg)	آبخور (cm)	پسا (N)
۱	a	۱	۱	۱	۵/۷۵	۲/۴۸	۱۹/۵۳
۲	b	۱	۲	۲	۶/۲۷	۲/۳	۱۶/۶۴
۳	c	۱	۳	۳	۶/۵۱	۲/۱	۱۶/۰۳
۴	d	۱	۴	۴	۶/۴۰	۲/۳۲	۱۷/۴۷
۵	e	۲	۱	۲	۶/۱۷	۲/۴۸	۱۷/۱۶
۶	f	۲	۲	۱	۷/۰۰	۲/۳۳	۱۷/۵۵
۷	g	۲	۳	۴	۷/۵۰	۲/۰۷	۱۹/۹۶
۸	h	۲	۴	۳	۷/۴	۲/۱۹	۱۸/۲۰
۹	i	۳	۱	۳	۵/۳۶	۳/۱۱	۱۹/۹۵
۱۰	j	۳	۲	۴	۷/۰۰	۲/۷۴	۲۱/۹۷
۱۱	k	۳	۳	۱	۷/۸۵	۲/۶۶	۱۹/۳۲
۱۲	l	۳	۴	۲	۹/۰۰	۳/۶۶	۲۲/۲۶
۱۳	m	۴	۱	۴	۵/۴	۲/۶	۲۲/۰۳
۱۴	n	۴	۲	۳	۷/۰۰	۳/۰۶	۲۳/۲۴
۱۵	o	۴	۳	۲	۸/۰۰	۲/۴	۲۳/۶۷
۱۶	p	۴	۴	۱	۸/۵۰	۲/۳	۱۹/۰۷
۱۷	شکل ۲	ابعاد در جدول ۱			۸/۵	۳/۱	۲۲/۰۱
۱۸	شکل ۲	ابعاد در جدول ۱			۳	۳/۱۱	۱۹/۴۷

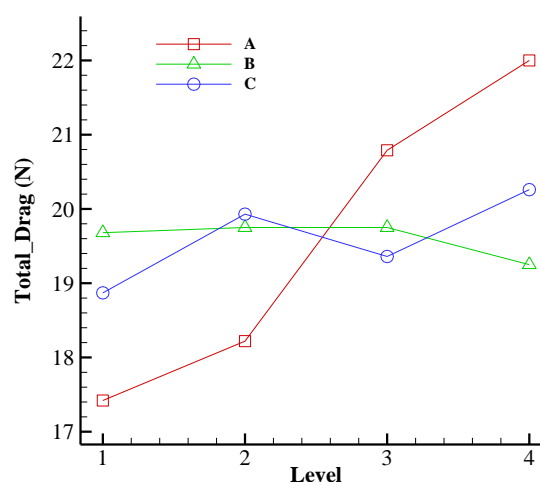
(B) و ارتفاع گوشواره (C) نمایش داده شده است. شیب منحنی پارامتر A تندتر از دو منحنی دیگر است پس اهمیت و تاثیر گذاری این پارامتر بیشتر است. با کاهش دهانه تونل پسا شناور کاهش می‌یابد. کاهش دهانه تونل موجب افزایش فشار بر سقف تونل و بیرون آمدن بیشتر

در شکل ۹ نتایج حاصل از تحلیل تاگوچی نشان داده شده است. از شکل ۹ دو نوع برداشت می‌توان داشت؛ اول این که با توجه به شیب منحنی می‌توان به اهمیت پارامتر پی برد و دوم به تاثیر تغییر ابعاد بر تابع هدف در حضور عوامل دیگر. در شکل ۳ پارامتر دهانه تونل (A)، ارتفاع تونل

۷- مراجع

1. Ma, W., Sun, H., Zou, J., and Yang, H. "Test Research on the Resistance Performance of High-Speed Trimaran Planing Hull", *Pol. Marit. Res.*, Vol. 20, No. 4, pp. 45-51, 2013.
2. Yousefi, R., Shafaghat, R., and Shakeri, M. "High-speed Planing Hull Drag Reduction, Using Tunnels", *Ocean Eng.*, Vol. 84, pp.54-60, 2014.
3. Ghassabzadeh, M. and Ghassemi, H. "Determining of the Hydrodynamic Forces on the Multi-hull Tunnel Vessel in Steady Motion", *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, Vol. 36, No.4, pp. 697-708, 2014.
4. Ghassabzadeh, M. and Ghassemi, H. "Numerical Hydrodynamic of Multi-hull Tunnel Vessel", *Open J. Fluid Dyn.*, Vol. 3, No. 3, p.198, 2013.
5. Shen, H.L., Lu, W., and Su, Y.M. "Numerical Prediction Method of Resistance Performance of Catamaran Planing Vessels", *Appl. Mech. Mater.*, Vol. 344, pp. 19-22, 2013.
6. Salari, M., Kazemi, H., and Doustdar, M.M. "Hydrodynamic Analysis of Stepped Planning Vessels-Sensitivity Analysis of Loading Condition to Air Breathing of Transvers Steps", *F.M.A.*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-12, 2017.
7. Muljowidodo, K., Nugroho, S.A., Prayogo, N., and Budiyo, A. "Design and Simulation Analysis of Flying Trimaran USV", *Indian Journal of geomatic Science.*, Vol. 41, pp. 569-574, 2012.
8. Moghadam, H.K., Shafaghat, R., and Yousefi, R. "Numerical Investigation of the Tunnel Aperture on Drag Reduction in a High-speed Tunneled Planing Hull", *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.*, Vol. 37, pp. 1719-1730, 2015.
9. Kazemi Moghadam, H. and Shafaghat, R. "Numerical Investigation on the Effect of Tunnel Height on Drag Reduction in a High Speed Trimaran", *Int. J. Marit. Tech.* Vol. 5, pp. 55-62, 2016.
10. Hajiabadi, A., Shafaghat, R., and Kazemi Moghadam, H. "A Study Into the Effect of Loading Conditions on the Resistance of Asymmetric High-speed Catamaran, Based on Experimental Tests", *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 57, No. 3, pp. 1713-1720, 2018.
11. Yousefi, R., Shafaghat, R., and Shakeri, M. "Hydrodynamic Analysis Techniques for High-Speed Planing Hulls", *Appl. Ocean Res.*, Vol. 42, pp. 105-113, 2013.
12. Kazemi Moghadam, H., Shafaghat, R., and Yousefi, R. "The Effect of Various Boundary Conditions on the Quality of the Numerical Simulation of a Planning Hull", *The 3rd Int. Conf., High Speed Vessel*, 2014 (in Persian).
13. Savitsky, D. "Hydrodynamic Analysis of Planing Hulls", *Mar. Technol*, Vol. 1, pp. 71-95, 1964.

شناور از آب می شود که موجب کاهش پسا می شود. همچنین با افزایش اندازه گوشواره پسا شناور افزایش می یابد افزایش گوشواره تونل موجب تماس بیشتر این بخش با آب و افزایش پسا فشاری می شود. ارتفاع تونل اثر پایینی بر عملکرد شناور دارد به طوری که از شکل ۹ مشخص است در ۳ سطح مختلف تأثیری بر پسا نداشته است و در سطح چهارم تأثیر اندکی داشته است.



شکل (۹): نتایج تحلیل تاگوچی.

۶- نتیجه گیری

همان طور که ملاحظه شد در ابتدا شکل یک شناور تندروی پایه با حفظ پارامترهای هندسی شناور نظیر زاویه ددرایز، خط کیل، پهناى شناور و طول شناور به فرم تونل دار تغییر یافته است. جهت دستیابی به شکل بهینه برای تونل، با استفاده از طرح آزمایش تاگوچی ۱۶ آزمایش طراحی شد و نتایج مورد نیاز با روش عددی به دست آمد. با توجه به نتایج به دست آمده ایجاد تونل در بدنه شناور امکان دارد با کاهش پسا همراه نباشد بنابراین، انتخاب هندسه تونل مناسب ضروری است. پارامتر دهانه تونل و ارتفاع گوشواره مهمترین عامل بر کاهش پسا بود و در محدوده مورد بررسی با کاهش دهانه پسا شناور نیز کاهش می یابد. شرایط بارگذاری در بهینه سازی تونل عامل بسیار مهمی است. همان طور که ملاحظه شد شناور تونل دار پایه در بارگذاری سبک با کاهش پسا همراه بود ولی در بارگذاری سنگین پسا را افزایش داد. در این حالت در بهترین مدل (c) در شرایط عملیاتی پسا تا ۱۷/۷ درصد کاهش پیدا کرد.