

# ارزیابی اثر نصب گوهی پاشنه بر کنترل ناپایداری و کاهش مقاومت یک شناور دوبنده‌ی نیمه‌پروازی

مهدی یوسفی‌فرد<sup>۱\*</sup>، اشکان مابودی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک؛ yusefifard@nit.ac.ir

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مهندسی معماری کشتی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، دانشکده مهندسی مکانیک؛ ashkan.maboodi@stu.nit.ac.ir

## چکیده

در این پژوهش تمرکز اصلی بر روی پایش ناپایداری‌های دینامیکی بوجود آمده در یک شناور دوبنده‌ی نیمه‌پروازی و کاهش دامنه‌ی این حرکات با استفاده از گوهی پاشنه می‌باشد. این کار با استفاده از تحلیل مدل در اعداد فرود متفاوت در دو حالت بدنه‌ی اولیه و بدنه‌ی مجهز به گوه انجام گرفته است. حل عددی نیز با استفاده از حل معادلات متوسط‌گیری شده‌ی ناویر-استوکس و کد متن‌باز اوپن‌فوم ارائه شده است. علاوه بر صحت‌سنجی روش حل عددی بر مبنای داده‌های تجربی می‌توان مشاهده نمود که نصب گوه در پاشنه‌ی شناور اثر بسیار مثبتی در کاهش دامنه‌ی ناپایداری حرکات شناور در آب آرام داشته است. تأثیر این کاهش ناپایداری را می‌توان در نمودار مقاومت-سرعت شناور نیز مشاهده نمود. مهمترین دست‌آورد این تحقیق ایجاد یک تانک عددی معتبر برای شبیه‌سازی حرکات دینامیکی شناور و ثبت دقیق جزئیات جریان سیال در اطراف بدنه‌های پروازی و نیمه‌پروازی می‌باشد. حاصل نصب گوه و تحلیل عددی و تجربی، ثبت کاهش ۱۲ درصدی در مقاومت شناور در سرعت طراحی آن می‌باشد.

## اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۰۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۰۵

کلمات کلیدی:

شناور دوبنده

بدنه‌ی نیمه‌پروازی

گوهی پاشنه

ناپایداری دینامیکی

## Evaluation of the effect of stern wedge on instability control and reduction of the resistance of a semi-planing catamaran

Mahdi Yousefifard<sup>1\*</sup>, Ashkan Maboodi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Babol Noshirvani University of Technology; yusefifard@nit.ac.ir

<sup>2</sup> Master of Science, Babol Noshirvani University of Technology; ashkan.maboodi@stu.nit.ac.ir

## ARTICLE INFO

Article History:

Received: 25 Jul. 2019

Accepted: 26 Nov. 2019

Keywords:

Catamaran

Semi-planing hull

Stern wedge

Hydrodynamics instability

## ABSTRACT

In this research, the main focus is on monitoring the dynamic instability created in a semi-planing catamaran and reducing the amplitude of these movements using a stern wedge. This is done using the model analysis in different Froude numbers in both the original and modified body conditions. Numerical analysis is also provided by solving the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations and OpenFOAM open-source code. In addition to verifying the numerical solution method based on experimental data, it can be seen that the installation of a stern wedge of the ship has a very positive effect on reducing the range of dynamic motions in calm water. The effect of this motion decrease can also be seen in the resistance-speed chart. The most important achievement of this research is the creation of a numerical tank for simulating dynamic motions and accurate recording of details of fluid flow around the planing and semi-planing hulls. The result of the stern wedge installation and numerical and experimental analysis is a 12 percent reduction in ship resistance at design speed.

## ۱ - مقدمه

استفاده از ابزارهایی نظیر گوه<sup>۱</sup>، فلپ<sup>۲</sup> و یا اینترسپتور<sup>۳</sup> برای بهبود رفتار دینامیکی بدنه‌ی شناورهای پروازی<sup>۴</sup> و نیمه پروازی<sup>۵</sup> رایج است. ایجاد نیروی برآ<sup>۶</sup> در چنین بدنه‌هایی منجر به کاهش سطح خیس و به تبع آن کمتر شدن مقاومت (بخصوص در سرعت‌های زیاد) می‌گردد. استفاده از گوهی پاشنه نیز یکی از ابزارهای مؤثر در حوزه‌ی شناورهای نیمه پروازی می‌باشد که می‌تواند منجر به تغییر در توزیع فشار کف شناور و جلوگیری ناپایداری حرکات دینامیکی شناور گردد. در ادامه سعی شده است مهم‌ترین پژوهش‌های انجام گرفته در خصوص کنترل دینامیکی شناورها و کاهش مقاومت آنها ارائه گردد.

کارافیات در سال ۱۹۸۷ اثر نصب گوهی پاشنه بر کاهش مصرف سوخت یک شناور نظامی از نوع فریگیت<sup>۷</sup> را با استفاده از روش تحلیلی بر اساس تاریخچه‌ی داده‌های چنین شناورهایی بررسی نمود [۱]. نتایج نشان می‌دهد نصب گوه در چنین شناورهایی می‌تواند تا ۶ درصد کاهش توان در سرعت بیشینه را به همراه داشته باشد. کار آنها یکی از اولین تحقیقات انجام گرفته در این حوزه می‌باشد. بوجوویچ و ساهو اثرات نصب گوه بر عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور جابجایی با سرعت بالا را ارزیابی نموده و توانستند با استفاده از چنین ابزاری توان مورد نیاز برای دستیابی به سرعت طراحی این شناور را کاهش دهند [۲].

اخیراً نیز جادمیکو و همکاران تحقیق کاملی را در خصوص اثرات نصب گوه و فلپ در پاشنه‌ی یک شناور تندرو تک‌بدنه بر روی مقاومت این شناور و مقایسه‌ی این دو مورد ارائه نمودند [۳]. آنها با استفاده از شبیه‌سازی به روش عددی توانستند ۳/۵ درصد مقاومت شناور را در سرعت طراحی و با استفاده از فلپ در پاشنه کاهش دهند. سالاس و تامپیر در سال ۲۰۱۳ با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی اثر سه تجهیز نصب شده بر روی بدنه‌ی شناورهای جابجایی<sup>۸</sup> و نیمه جابجایی<sup>۹</sup> بر روی کاهش مقاومت آنها را ارزیابی نمودند [۴]. آنها با نصب فلپ پاشنه و اینترسپتور در شناور جابجایی و همچنین ایجاد اسپریریل<sup>۱۰</sup> در شناور نیمه جابجایی توانستند مقاومت آنها را در یک بازه‌ی ۵ تا ۱۰ درصدی کاهش دهند. اثرات نصب اینترسپتور در پاشنه‌ی شناورهای تندرو برای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی آنها در آب آرام توسط جانگام و همکاران مورد بررسی قرار گرفته و توزیع فشار ناشی از افزودن آن بر مبنای روش حل عددی ارائه شده است [۵]. جان و همکاران نیز با استفاده از روش آزمایشگاهی، اثر نصب گوه و فلپ در پاشنه و همچنین اینترسپتور را بر عملکرد شناورهای تندرو تک و دوبنده بررسی نمودند [۶]. هدف اصلی از انجام آزمایش آنها دستیابی به بهترین ابزار برای بهبود عملکرد هیدرودینامیکی یک شناور با در نظر گرفتن جنبه‌های اقتصادی تغییر فرم بدنه بوده است.

تحقیق تجربی کاملی بر روی ابعاد اینترسپتور نصب شده بر روی یک شناور تندرو بر عملکرد هیدرودینامیکی آن به روش عددی توسط منصوری و همکاران انجام شده است [۷]. آنها از یک تحلیل عددی مبتنی بر روش حجم محدود استفاده نموده و توانستند اثرات منفی طراحی ابعاد نامناسب اینترسپتور بر افزایش مقاومت از یک سو و تأثیر مثبت در کاهش مقاومت و کنترل تریم شناور را از سوی دیگر ارائه نمایند. همچنین در تحقیق آنها، رابطه‌ی ریاضی بین عدد رینولدز و ابعاد اینترسپتور بدست آمده است. سانگ و همکاران اخیراً اثرات نصب اینترسپتور و فلپ در پاشنه‌ی نوع خاصی از شناور را مورد ارزیابی قرار داده و حتی طرح‌های ترکیبی با استفاده از این دو نوع ابزار را نیز بررسی نمودند [۸]. آنها این بررسی را در بازه‌ی از اعداد فرود انجام داده و اثربخشی بیشتر نصب این ابزارها در محدوده‌ی خاصی از اعداد فرود را اثبات نمودند. اثر نصب اینترسپتور در شناورهای تفریحی و کاهش نیروی درگ آنها نیز توسط دی و کوپر به روش آزمایشگاهی بررسی شده است [۹]. آنها تأثیر نصب اینترسپتور را با فلپ‌هایی که بیرون از آب نصب می‌گردند مقایسه نمودند و توانستند با استفاده از نصب اینترسپتور، در بازه‌ی مشخصی از سرعت، توان لازم برای شناور را کاهش دهند.

اخیراً پارک و همکاران با استفاده از روش آزمایشگاهی توانستند یک سامانه‌ی مجهز به اینترسپتور متغیر را طراحی کنند تا بتواند در شرایط مختلف دریانوردی بهترین عملکرد را ارائه دهد [۱۰]. آنها آزمایش‌های خود را در آب آرام و همچنین در موج منظم و نامنظم انجام داده و مقدار تریم شناور در امواج را نیز تا حد زیادی کاهش داده و به تبع آن توانستند مقدار نیروی درگ کمتری را ثبت نمایند. منصوری و فرناندز نیز با به کارگیری روش عددی توانستند اثرات نصب اینترسپتور بر کنترل ناپایداری حرکات جابجایی عمودی<sup>۱۱</sup> و غلتش طولی<sup>۱۲</sup> شناور پروازی را بررسی نمایند [۱۱].

آوکی و بارلاس تحقیق آزمایشگاهی برای ارزیابی اثرات نصب اینترسپتور بر روی بدنه‌های پروازی را ارائه نمودند [۱۲]. آنها اینترسپتورهایی با ابعاد مختلف را در پاشنه‌ی یک بدنه‌ی پروازی نصب نموده توانستند بهترین عملکرد را در حالتی که ارتفاع اینترسپتور متغیر است بدست آورند. در تحقیقی دیگر، منصوری و فرناندز توانستند با استفاده از روش عددی و آزمایشگاهی اثرات نصب اینترسپتور بر افزایش نیروی لیفت و درگ یک شناور تندرو را مورد ارزیابی قرار داده و ارتباط منطقی بین ابعاد و سرعت شناور و همچنین مشخصات اینترسپتور ارائه نمایند [۱۳]. قدیمی و همکاران نیز اثرات نصب گوه در پاشنه‌ی یک شناور تندرو بر بهبود عملکرد هیدرودینامیکی آن در آب آرام را به روش آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند [۱۴]. آنها با نصب گوه و ثبت اطلاعاتی نظیر مقاومت بدنه و مقدار جابجایی عمودی و غلتش طولی توانستند ناپایداری هیدرودینامیکی بدنه‌ی پروازی را حذف نمایند.

در معادله‌ی (۳) منظور از  $U_r$  همان سرعت دامنه‌ی جریان است که اثرات سرعت در مرز مشترک آب و هوا را اعمال می‌نماید [۱۷]. از سوی دیگر، کشش سطحی در معادله‌ی (۴) بصورت  $f_\sigma = \sigma k \nabla \alpha$  تعریف می‌شود که در آن  $\sigma$  همان کشش سطحی آب (۰/۰۷ کیلوگرم بر مجذور ثانیه)،  $k$  انحنا ی سطح آزاد سیال است که با استفاده از تعریف نسبت حجمی ( $\alpha$ ) قابل محاسبه می‌باشد. چگالی و ویسکوزیته‌ی دینامیکی ترکیبی نیز در این روش با استفاده از تعاریف زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$\begin{cases} \rho = \alpha \rho_l + (1 - \alpha) \rho_g \\ \mu = \alpha \mu_l + (1 - \alpha) \mu_g \end{cases} \quad (5)$$

علاوه بر معادلاتی که برای بقای جرم و مومنتوم ارائه شد و همچنین معادلات روش حجم سیال، نیاز است تا معادلات مربوط به انتقال تنش برشی<sup>۱۷</sup> نیز بعنوان روش شبیه‌سازی جریان آشسته در نظر گرفته شود [۱۸].

همچنین، معادله‌ی تغییرات مرکز جرم شناور عبارت است از:

$$m \frac{dv}{dt} = f \quad (6)$$

که در آن،  $m$  بیانگر جرم شناور،  $f$  نشان‌دهنده‌ی برآیند نیروهای وارد بر شناور و  $v$  نیز سرعت حرکت در مرکز جرم شناور می‌باشد. معادله‌ی حاکم بر حرکت زاویه‌ای نیز بر اساس دوران حول مرکز جرم شناور به شکل زیر نوشته می‌شود:

$$M \frac{d\omega}{dt} + \omega \times M \omega = n \quad (7)$$

در حالی که  $M$  تاز سور ممان اینر سی،  $\omega$  سرعت زاویه‌ای جسم صلب و  $n$  نیز ممان تحریک اعمال شده بر شناور می‌باشد. نیروی اعمال شده در معادله‌ی (۶) و همچنین ممان تحریک اشاره شده در معادله‌ی (۷) با استفاده از حل عددی جریان سیال و بر مبنای توزیع فشار بر سطح زیر آب شناور در هر زمان بدست می‌آیند. جایجائی شناور در هر لحظه بر اساس سرعت و فشار اعمال شده از سوی سیال به بدنه محاسبه می‌گردد.

## ۲ - معرفی مسئله

شناور مورد بررسی در این پژوهش، یک شناور دوبدنه از نوع نیمه‌پروازی بوده که می‌بایست به سرعت ۲۳ گره‌ی دریایی (معادل عدد فرود<sup>۱۸</sup> ۰/۷۴۷) دست یابد. در شکل ۱ نمایی از فرم بدنه‌ی این شناور ارائه شده است.

همانطور که مشاهده می‌گردد، تمرکز بیشتری بر روی کنترل دینامیکی بدنه‌های پروازی (بخصوص با استفاده از ابزارهایی نظیر اینترسپتور) وجود داشته و به کاهش مقاومت بدنه‌های نیمه‌پروازی با استفاده از ابزارهای ساده‌تر نظیر گوه کمتر توجه شده است. به همین دلیل در این مطالعه کاهش حرکات و همچنین مقاومت یک شناور دوبدنه‌ی نیمه‌پروازی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

## ۲ - معادلات حاکم

حرکت سیال بوسیله‌ی حل معادلات متوسطگیری شده‌ی ناویر-استوکس<sup>۱۳</sup> شبیه‌سازی می‌گردد. همچنین تکنیک حجم سیال<sup>۱۴</sup> به همراه تراکم مصنوعی<sup>۱۵</sup> برای تشخیص مرز آب و هوا در شبیه‌سازی جریان دوفازی مورد استفاده قرار گرفته است. جزئیات چگونگی اعمال این روش در نرم‌افزار اوپن‌فوم توسط جاساک [۱۵] و همچنین روش [۱۶] ارائه شده و در اینجا بطور خلاصه مروری بر آنها مشاهده می‌گردد.

معادلات حرکت سیال دوفازی شامل معادلات بقای جرم و مومنتوم بوده که به شرح زیر نوشته می‌شوند:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(U - U_g)U) = \\ - \nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) + \\ (\nabla U) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma \end{aligned} \quad (2)$$

که در اینجا،  $U$  و  $U_g$  به ترتیب سرعت سیال و سرعت حرکت سلول‌های شبکه می‌باشند. همچنین  $p_d$  فشار دینامیک است که از رابطه‌ی  $p_d = p - \rho g \cdot x$  بدست می‌آید (یعنی تفاضل فشار کل و فشار هیدرواستاتیک). شتاب گرانش نیز به صورت  $g = (0, 0, -9.81)$  تعریف می‌گردد. ویسکوزیته‌ی دینامیکی مؤثر نیز برابر است با  $\mu_{eff} = \rho(v + v_t)$ ، که در آن  $v$  و  $v_t$  به ترتیب معرف ویسکوزیته‌ی سینماتیک و گردابه‌ای<sup>۱۶</sup> می‌باشند.  $f_\sigma$  هم ترم منبعی در اثر کشش سطحی است.

همانطور که اشاره شد، تکنیک حجم سیال برای ارائه‌ی تخمین دقیقی از سطح آزاد سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. معادله‌ی انتقال در این روش به شرح زیر تعریف می‌گردد:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(U - U_g)\alpha] + \nabla \cdot [U_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (3)$$

که در اینجا  $\alpha$  بیانگر نسبت حجمی می‌باشد، که می‌توان بر اساس آن مشخصات سیال درون هر سلول را محاسبه نمود.

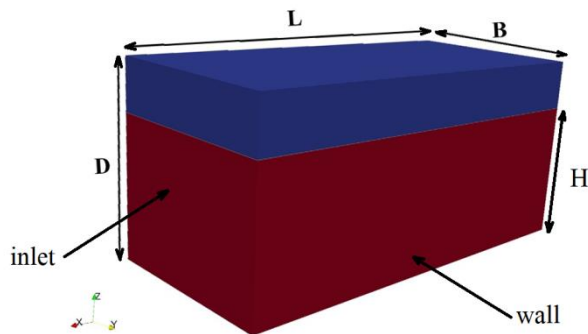
$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{air} \\ \alpha = 1 & \text{water} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{interface} \end{cases} \quad (4)$$

مدل	شناور اصلی	مشخصه
۰/۷۴۷	۰/۷۴۷	عدد فرود در سرعت طراحی

ابعاد تانک عددی نیز بر اساس پژوهش‌های مشابه توسط سایر محققین و همچنین شبیه‌سازی‌های عددی انجام گرفته توسط حلگر اینتردایم فوم<sup>۱۹</sup> برای تحلیل دینامیکی شناورها به روش عددی انتخاب شده است. در شکل ۲ ابعاد تانک عددی و نوع شرایط مرزی اعمال شده در آنها ارائه شده است. ابعاد دامنه‌ی حل عددی عبارت است از:

- طول دامنه (L): ۱۵ متر
- عرض دامنه (B): ۸ متر
- ارتفاع دامنه (D): ۷ متر
- عمق آب (H): ۵ متر

شرط مرز ورودی بر اساس سرعت شناور تعریف شده است. در خروجی نیز از شرط فشار جهت تعادل جریان سیال بهره گرفته شده است. همچنین جهت بررسی کامل اثرات متقابل هر دو بدنه، شناور به صورت کامل شبیه سازی شده و در مرزهای اطراف تانک عددی از شرط عدم لغزش استفاده شده است. در نقاط منطبق بر بدنه‌ی مدل نیز شرط عدم لغزش سیال اعمال شده است.

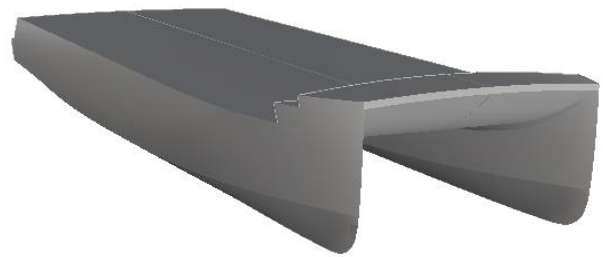


شکل ۲ - ابعاد دامنه‌ی حل و نوع شرایط مرزی اعمال شده

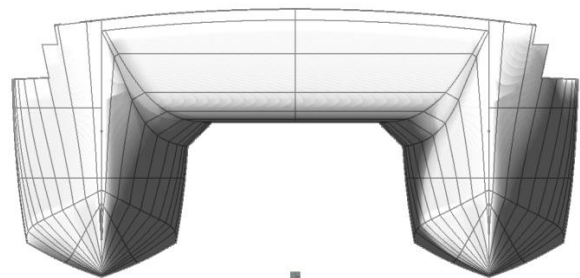
در جدول ۲ مشخصات فیزیکی سیال و در جدول ۳ تنظیمات حل عددی ارائه گردیده است.

جدول ۲- ثابت‌های مشخصات فیزیکی در حل عددی

ثابت‌های فیزیکی	ویسکوزیته‌ی سینماتیکی (ν)	چگالی آب	کشش سطحی	شتاب جاذبه
	[m <sup>2</sup> /s]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[N/m]	[m/s <sup>2</sup> ]
مقادیر	۱×۱۰ <sup>-۶</sup>	۹۹۸	۰/۰۷	(۰،۰،۹/۸۱)



(الف)



(ب)

شکل ۱ - طرح شناور دوبنده‌ی تحلیل شده در این پژوهش

در جدول ۱ نیز مشخصات شناور اصلی و مدل تجربی و عددی ارائه شده است. محدودیت در ساخت مدل چوبی با استفاده از دستگاه برش باعث شده است تا حداکثر طول خط آب معادل ۱/۶ متر برای ساخت مدل تجربی انتخاب شود. مدل عددی نیز به همین اندازه در نرم‌افزار راینو ساخته شده است.

جدول ۱- مشخصات شناور اصلی، مدل عددی و تجربی

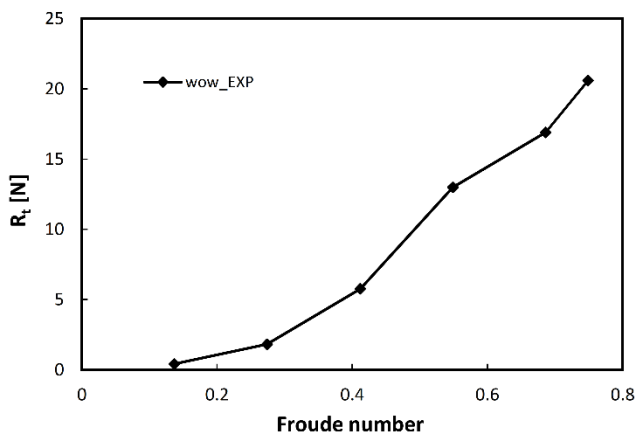
مدل	شناور اصلی	مشخصه
۱ : ۱۵/۹۶	۱	مقیاس
۰/۰۷۷۵	۱/۲۳۷	آبخور در وسط شناور (متر)
۰/۰۷۴	۱/۱۸۲	آبخور در عمود سینه (متر)
۰/۰۸۱	۱/۲۹۷	آبخور در عمود پاشنه (متر)
۰/۰۷۷۹	۱/۲۴۴	آبخور در مرکز شناوری (COF) (متر)
۰/۰۰۶۸	۰/۱۰۹	تیریم پاشنه (متر)
۱/۶	۲۵/۵۴۸	طول خط آبخور (متر)
۰/۴۹۹۹	۷/۹۷۹	بیشترین عرض (متر)
۰/۱۵۵	۲/۴۸۷	حداکثر عرض هر نیم بدنه (متر)
۰/۶۷۶	۱۷۲/۱۷۷	سطح خیس (متر مربع)
۰/۴۱	۱۰۴/۵۹۵	مساحت صفحه آبخور (متر مربع)
۰/۷۱۲	۰/۷۱۲	ضریب منشوری CP
۰/۵۵۲	۰/۵۵۲	ضریب ظرافت بدنه CB
۰/۸۶	۰/۸۶	ضریب صفحه‌ی آبخور Cwp
۰/۷۱۴	۱۱/۳۹۵	فاصله تا مرکز بویانسی LCB
۰/۶۹۸	۱۱/۱۴۸	فاصله تا مرکز شناوری LCF
۲/۹۶	۱۱/۸۳	سرعت طراحی (متر بر ثانیه)
۰/۰۲۱۱	۸۶	جایجایی (تن)

### ۳- نتایج تحلیل تجربی

در این پژوهش از تحلیل آزمایشگاهی برای صحت‌سنجی حل عددی که در ادامه ارائه خواهد شد استفاده می‌گردد. بر اساس مشخصات فیزیکی ارائه شده در جدول ۱ مدلی از جنس چوب ساخته شده و پس از تنظیم مقدار جرم و محل مرکز جرم، مقدار مقاومت حاصل از تست کشش در آب آرام برای مدل بدون گُوه اندازه‌گیری شده است. داده‌های ثبت شده در آزمایشگاه شامل مقدار نیروی اعمال شده در محل مرکز شناوری و همچنین نوسانات عمودی سینه و پاشنه می‌باشد.

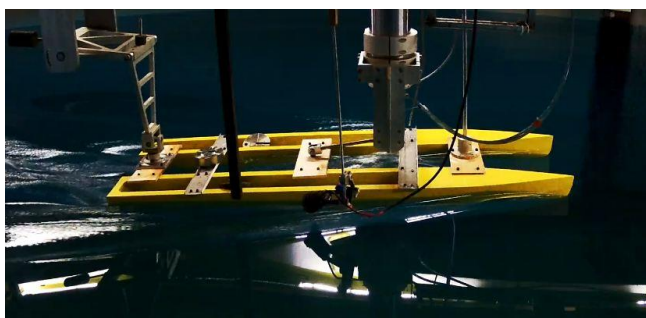
#### ۳-۱- بررسی تجربی شناور بدون گُوه

در شکل ۴ این داده‌ها در ۶ سرعت متفاوت ثبت شده و نمودار نیروی مقاومت بر حسب عدد فرود رسم گردیده است.



شکل ۴ - نیروی متوسط ثبت شده در آزمایشگاه در هر عدد فرود برای حالت بدون گُوه

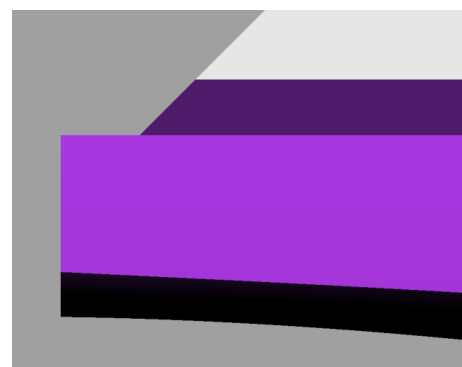
همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، شیب قابل توجه نمودار مقاومت بر حسب عدد فرود در اعداد فرود بیش از ۰/۷ کاملاً بر رفتار شناور در سرعت طراحی تأثیرگذار است. در شکل ۵ نیز نمایی از موج تولید شده در پاشنه شناور در سرعت طراحی و در مدل شناور دوبنده در دو حالت با و بدون گُوه ارائه شده است.



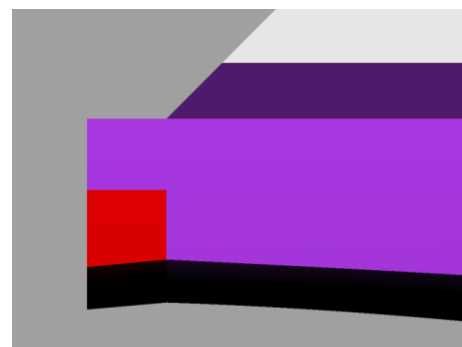
(الف)

جدول ۳- مقادیر تنظیمات مورد استفاده در حلگر	
متغیر	مقادیر
حداکثر عدد کورانت	۰/۵
گام زمانی اولیه (ثانیه)	۰/۰۰۰۱
فاکتور ضریب آرامش (فشار)	۰/۴
فاکتور ضریب آرامش (سرعت)	۰/۸

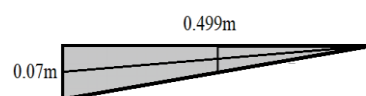
لازم به ذکر است که مقدار اولیه‌ی گام زمانی توسط کد عددی در هر تکرار به‌روز شده و مقدار آن با بیش از ۰/۰۵ ثانیه نیز رسیده است. بر همین اساس مقدار زمان متوسط برای انجام محاسبات هر تکرار نیز حدود ۳ ثانیه ثبت شده است و انجام محاسبات برای ۲۰ ثانیه حرکت شناور بیش از ۲۴ ساعت به طول انجامیده است. در شکل ۳ نیز نمایی از پاشنه‌ی شناور در دو حالت با و بدون گُوه مشاهده می‌گردد. گُوه‌ی طراحی شده برای این شناور (نمونه‌ی اصلی) نیز دارای ارتفاع ۷۰ میلیمتر و طول ۴۹۹ میلیمتر می‌باشد. مشخصه‌ی اصلی این گُوه زاویه‌ی آن بوده که معادل ۸ درجه در نظر گرفته شده است.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۳ - پروفیل پاشنه‌ی شناور بدون گُوه (سمت چپ)، با گُوه (سمت راست) و برش طولی گُوه (پایین)

در جدول ۴ مقدار عدم قطعیت بدست آمده در هر عدد فرود بر اساس دستورالعمل اشاره شده ارائه گردیده است.

جدول ۴- بررسی عدم قطعیت تحلیل تجربی		
عدم قطعیت (درصد)	سرعت مدل (متر بر ثانیه)	عدد فرود
۰/۹۸	۰/۴۶	۰/۱۳۷
۰/۹۶	۰/۹۲	۰/۲۷۴
۰/۸۶	۱/۳۸	۰/۴۱۲
۰/۸۸	۱/۸۴	۰/۵۴۹
۰/۸۲	۲/۳۰	۰/۶۸۶
۰/۷۹	۲/۵۳	۰/۷۴۹

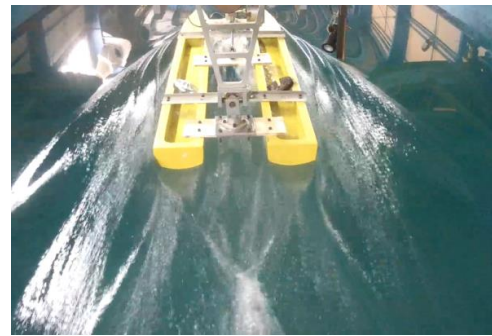
خطای ناشی از ساخت مدل توسط دستگاه برش سه‌بندی با مقایسه‌ی حجم جابجائی مدل و مقدار اندازه‌گیری شده از مدل مقیاس اصلی در نرم‌افزار راینو محاسبه شده است. از خطای کالیبراسیون دینامومتر و تغییرات دمای آب حین آزمایش، با توجه به مستندات موجود صرف‌نظر شده است. بنابراین تنها نوسانات سرعت آزمایش در حین انجام آزمون کشش و همچنین تغییرات مقدار نیروی ناشی از تکرار آزمایش در نظر گرفته شده است.

آزمایش کشش در سرعت طراحی ۵ مرتبه و در سایر سرعت‌ها سه مرتبه تکرار شده است و برای تعیین مقدار مقاومت از میانگین داده‌ها در این آزمایش‌ها استفاده شده است. مقدار بدست آمده برای عدم قطعیت نیروی مقاومت در سرعت طراحی کمتر ۰/۸ درصد بدست آمده است. البته این مقدار در سرعت‌های کم، اندکی بیشتر بوده، اما همچنان کمتر از یک درصد بدست آمده است. در جدول ۲ نتایج بررسی عدم قطعیت در اعداد فرود مختلف و برای مدل بدون گویه ارائه شده است.

#### ۴- نتایج حل عددی

متغیرهای ثبت شده در حل عددی از تنوع بیشتری برخوردار است و می‌توان کانتورها و نمودارهای مورد نیاز را در مرحله‌ی پس‌پردازش بدست آورد. همانند تحلیل تجربی، در اینجا نیز اولین نمودار بدست آمده، مقدار نیرو بر حسب عدد فرود برای مدل عددی در دو حالت با و بدون گویه می‌باشد. با این کار می‌توان اثرات نصب گویه را بخصوص در سرعت طراحی این شناور مشاهده نمود.

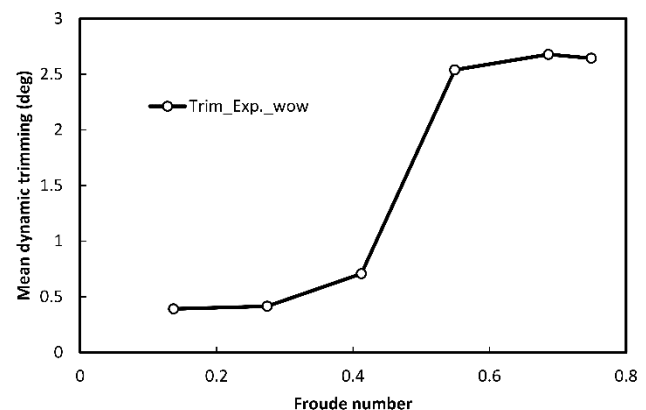
در اینجا از تحلیل شش درجه آزادی استفاده شده است و به مدل اجازه داده شده است تا بر مبنای مشخصات فیزیکی خود و نیروی اعمال شده از سوی آب، حرکت کند. نیروی اعمال شده در راستای افقی و عمودی ثبت شده و همچنین مقدار جابجائی عمودی و غلتش طولی شناور با زمان نیز بررسی شده است.



(ب)

شکل ۵- آزمایش مدل شناور بدون گویه در سرعت طراحی

در شکل ۶ مقدار متوسط تریم ثبت شده برای مدل تجربی در هر سرعت نیز ارائه شده است. لازم به ذکر است که این مقدار بر حسب درجه و جهت مثبت آن در حالتی است که سینه‌ی شناور به سمت بالا حرکت کرده باشد. از طرفی مقدار آن بصورت متوسط تغییرات تریم دینامیکی شناور در هر سرعت ارائه شده است.



شکل ۶- تریم ثبت شده‌ی شناور در حالت بدون گویه در سرعت‌های مختلف

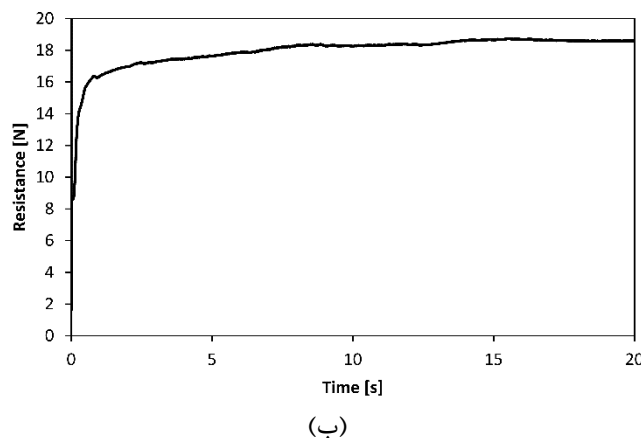
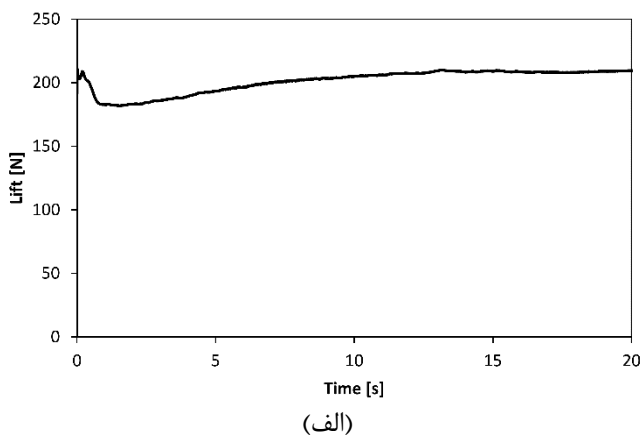
افزایش شدید تریم شناور با افزایش سرعت منجر به ناپایداری دینامیکی شده که در بخش تحلیل عددی بیشتر به آن پرداخته می‌شود. تحلیل تجربی شناور بدون گویه برای استفاده در صحت‌سنجی نتایج حل عددی صورت گرفته و دوباره در بخش عددی به آنها پرداخته خواهد شد.

#### ۳-۲- بررسی عدم قطعیت تحلیل تجربی

بر اساس دستورالعمل ارائه شده توسط کنفرانس بین‌المللی حوضچه‌ی کشش [۱۹] عدم قطعیت ناشی از تحلیل تجربی می‌تواند ناشی از موارد زیر باشد:

- ✓ هندسه‌ی مدل
- ✓ کالیبراسیون دینامومتر
- ✓ دمای آب
- ✓ سرعت کشش
- ✓ تکرار آزمایش

در شکل ۸ نمودار تغییرات نیروی برا و پسا برای مدل در سرعت طراحی ارائه شده است. مقاومت نهایی شناور بر اساس متوسط گیری داده‌ها در ۵ ثانیه‌ی انتهایی محاسبه گردیده است.



شکل ۸ - نیروی برا (الف) و مقاومت (ب) متوسط ثبت شده در حل عددی در سرعت طراحی

با توجه به وجود داده‌های آزمایشگاهی برای مدل بدون گُوه، مقدار مقاومت در هر عدد فرود به نمونه‌ی اصلی تعمیم داده شده و مقدار توان مؤثر بدست آمده برای هر عدد فرود حاصل از حل عددی و بررسی آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه شده و در شکل ۹ ارائه گردیده است. همانطور که در این شکل مشاهده می‌گردد، تطابق مناسبی بین نتایج تجربی و عددی وجود دارد. بخصوص با نزدیک شدن به نقطه‌ی طراحی، این تطابق افزایش می‌یابد. در شکل ۱۰ مقادیر خطای محاسبه شده ارائه شده است. بیشترین خطا در عدد فرود ۰/۴۱۲ ثبت شده که کمتر از ۱۰ درصد می‌باشد. خطای حل عددی در نواحی اطراف سرعت طراحی کمتر از ۳ درصد بوده است.

همچنین برای حل عددی از یک رایانه مجهز به پردازنده Core i7-6700K با فرکانس مرجع ۴ گیگاهرتز و بهره‌گیری از ۶۴ گیگابایت حافظه استفاده شده است. برای اطمینان از پایداری نتایج، ۲۰ ثانیه از رفتار دینامیکی شناور شبیه‌سازی شده است. تولید شبکه با بیش از ۱ میلیون سلول برای شبیه‌سازی باعث شده است که زمان صرف شده برای هر تحلیل عددی بیش از ۲۴ ساعت باشد.

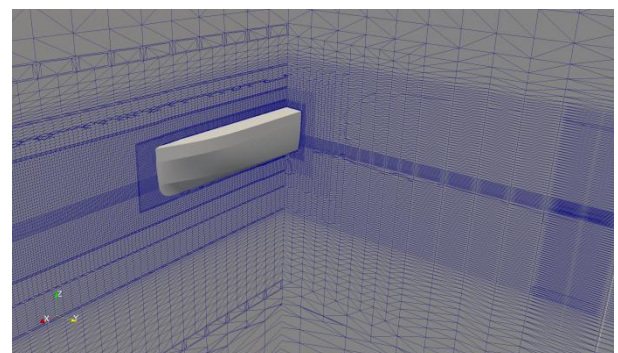
#### ۱-۴- بررسی استقلال از شبکه

قبل از ارائه‌ی نتایج حل عددی، مشخصات شبکه‌ی مورد استفاده در این حل ارائه شده است. شبکه‌ی اولیه در اینجا یک مکعب بوده که ابعاد آن در بخش ۲ بر حسب ابعاد شناور ارائه شده است. در جدول ۳ مشخصات شبکه‌بندی دامن‌ه‌ی حل ارائه شده است. مقادیر  $i, j$  و  $k$  به ترتیب تعداد سلول‌ها در راستای  $x, y$  و  $z$  در حالت اولیه می‌باشد. سپس با استفاده از شش مرحله بهبود، شبکه‌بندی ریزتر شده تا در نهایت، یک لایه شبکه‌ی بسیار ریز اطراف شناور را احاطه کند. پنج حالت مختلف شبکه‌بندی در نظر گرفته شده و اثرات ریز شدن سلول‌ها تا جایی که نتیجه‌ی حل عددی برای تخمین مقاومت در سرعت طراحی تغییر نکند ادامه داده شده است. مقدار مقاومت و درصد تغییر نسبت به شبکه‌ی بزرگ‌تر در جدول ۵ ارائه شده است. لازم به ذکر است که حالت  $D$  بعنوان شبکه‌بندی نهایی انتخاب شده است.

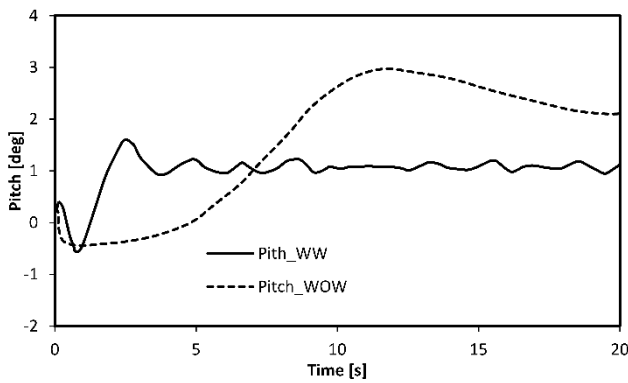
جدول ۵- بررسی تأثیر شبکه بر دقت حل عددی مقدار

درصد خطا از حل تجربی	مقاومت (نیوتن)	تعداد سلول نهایی	تعداد سلول $i, j, k$	$\frac{F}{\rho V^2 L^3}$
۲۳/۰۵	۲۵/۳۴	۵۷۵،۴۸۷	۵۰-۲۲-۱۰۲	A
۱۴/۶۲	۲۳/۶۰	۶۸۴،۵۹۷	۵۴-۲۴-۱۰۸	B
۷/۲۳	۲۲/۰۸	۸۴۲،۹۵۶	۵۶-۲۶-۱۱۴	C
۲/۵۷	۲۱/۱۲	۱،۰۷۹،۲۱۸	۶۰-۲۸-۱۲۲	D
۲/۳۸	۲۱/۰۸	۱،۳۰۶،۹۰۱	۶۴-۳۰-۱۲۸	E

در شکل ۷ نیز نمایی از برش شبکه‌ی اطراف مدل شناور ارائه شده است.



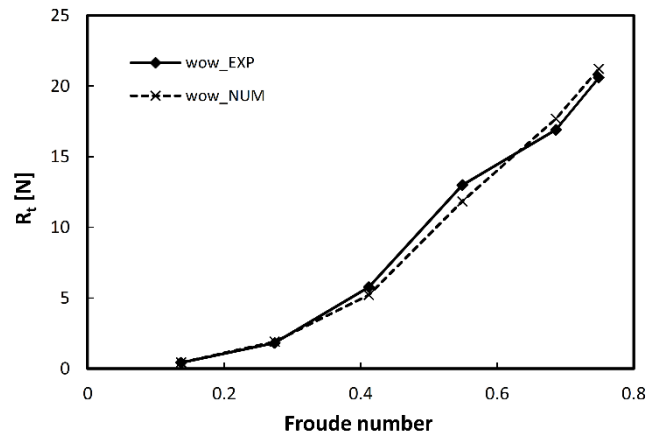
شکل ۷ - برش طولی و عرضی شبکه‌ی اطراف مدل عددی یکی از بدنه‌ها



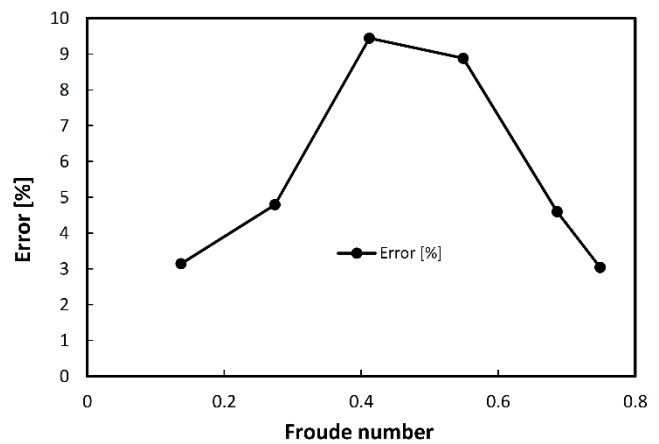
شکل ۱۲ - حرکت غلتش طولی شناور در دو حالت با و بدون گویه در سرعت طراحی

تغییرات محل مرکز جرم در راستای عمودی (جابجایی عمودی) نسبت به محل آن در حالت آب آرام و سرعت صفر اندازه‌گیری شده است. این حرکت در حالت بدون گویه دارای نوسان بسیار زیادی بوده و این نوسان در بازه‌ی زمانی بزرگی رخ می‌دهد. پس از نصب گویه، جابجایی عمودی به سرعت به حالت پایدار رسیده و تغییرات آن بسیار اندک می‌باشد. اما در خصوص غلتش طولی این موضوع کمی متفاوت است. یعنی نوسانات غلتش طولی همچنان مشاهده شده و ناپایداری دینامیکی در این حرکت کاملاً مشهود می‌باشد. در صورتی که با نصب گویه در پاشنه، زاویه‌ی تریم ثابت (با دامنه‌ی نوسانات ناچیز) و رو به پاشنه ایجاد شده است. همچنین مقدار تریم شناور با نصب گویه در پاشنه تا حد زیادی کاهش می‌یابد که این موضوع در ادامه مورد بررسی بیشتری قرار می‌گیرد.

در شکل ۱۰ نمودار مقاومت ثبت شده برای دو حالت با و بدون گویه در تحلیل عددی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، افزودن گویه به پاشنه‌ی شناور باعث کاهش مقاومت از سرعت ۲/۳ متر بر ثانیه به بعد شده است (معادل عدد فرود ۰/۶۸۶). در این صورت می‌توان مطمئن بود که با استفاده از چنین ابزاری می‌توان عملکرد هیدرودینامیکی مناسبی را انتظار داشت، در صورتی که سرعت طراحی شناور در محدوده‌ی عدد فرود بیش از ۰/۷، در نظر گرفته شود. (که در مورد این شناور کاملاً صادق می‌باشد).

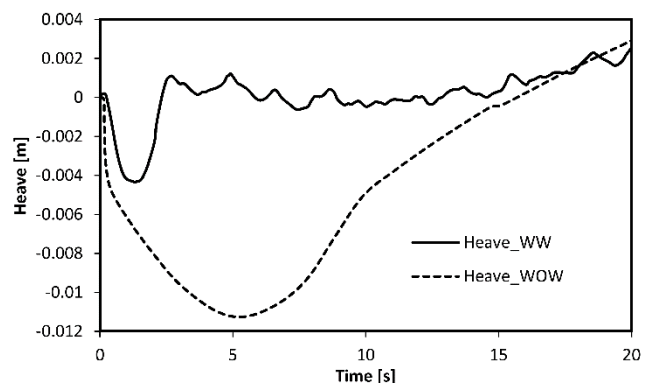


شکل ۹ - مقایسه‌ی مقاومت شناور اصلی بدون گویه ناشی از دو تحلیل تجربی و عددی

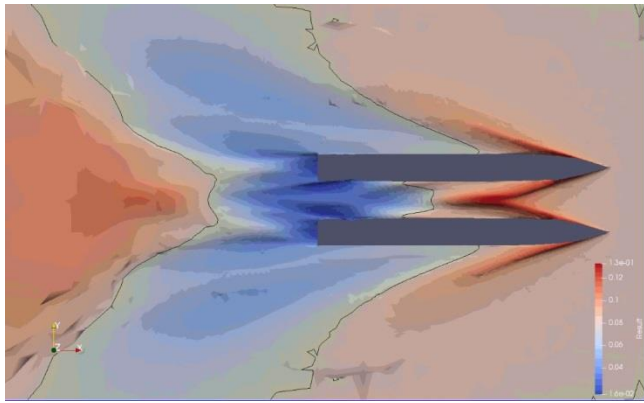


شکل ۱۰ - مقدار خطای ناشی مقایسه‌ی مقاومت شناور اصلی بدون گویه در دو تحلیل تجربی و عددی

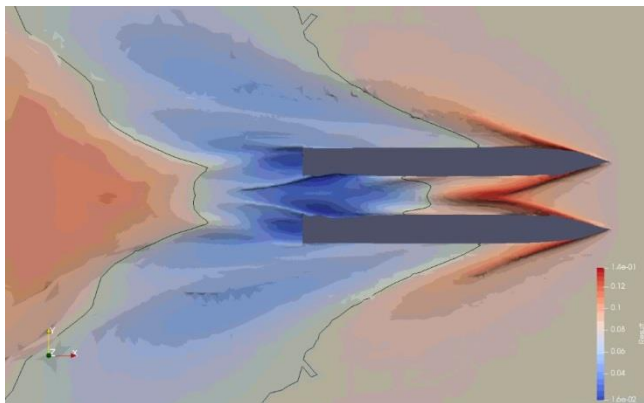
در شکل ۱۱ و ۱۲ نیز تغییرات ثبت شده برای دو حرکت جابجایی عمودی و غلتش طولی در یک بازه‌ی زمانی مشخص ارائه شده است.



شکل ۱۱ - حرکت جابجایی عمودی شناور در دو حالت با (WW) و بدون گویه (WOW) در سرعت طراحی



(الف)



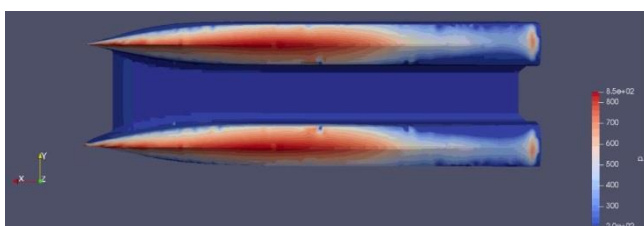
(ب)

شکل ۱۳ - نیروی متوسط ثبت شده در حل عددی در هر سرعت برای دو حالت با و بدون گُوه

در شکل ۱۵ برشی در ارتفاع معادل سطح آرام آب (خط سیاه‌رنگ) ایجاد شده تا نقاط بالاتر (با رنگ قرمز) و پایین‌تر (با رنگ آبی) از آن قابل تشخیص باشد. نصب گُوه در پاشنه اثرات کمی بر جریان پشت پاشنه داشته و کاهش ارتفاع آب در این ناحیه مشاهده می‌گردد.

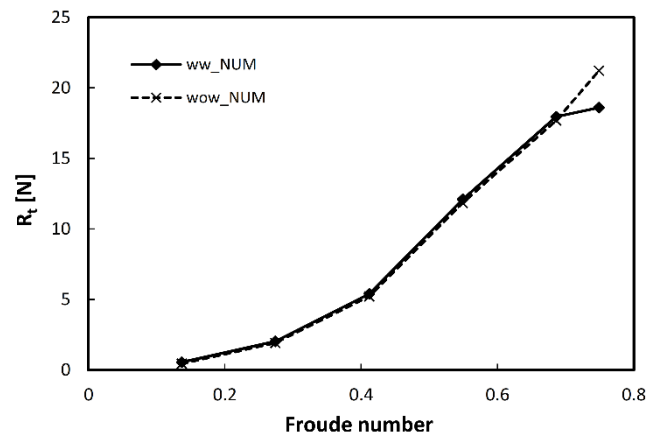


(الف)



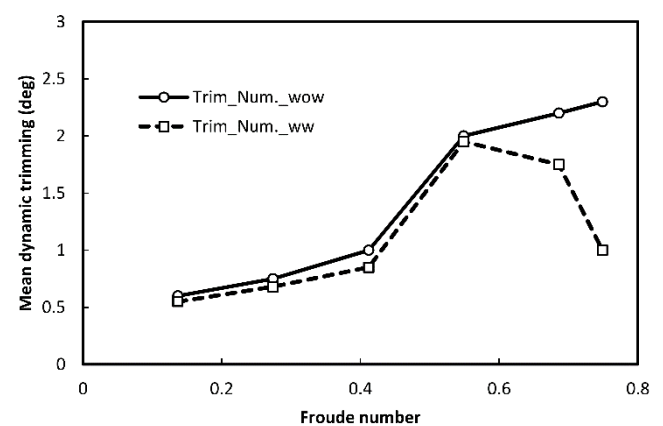
(ب)

شکل ۱۵ - کانتور سطح آزاد آب در حالت بدون گُوه (الف) و با گُوه (ب) در سرعت طراحی



شکل ۱۳ - نیروی متوسط ثبت شده در حل عددی در هر سرعت برای دو حالت با و بدون گُوه

همانطور که مشاهده می‌گردد، در سرعت  $2/53$  متر بر ثانیه مقدار مقاومت مدل در حل عددی برای شناور با و بدون گُوه به ترتیب  $18/6$  و  $21/2$  نیوتن بدست آمده است. در این سرعت، نصب گُوه توانسته است بیش از  $12$  درصد نیروی مقاومت شناور را کاهش دهد. این مقدار در مقابل کاهش مصرف سوخت در طی مدت عملکرد این شناور کاملاً قابل توجه می‌باشد. البته ذکر این نکته ضروری است که نصب گُوه اثر مثبتی در کاهش مقاومت در سرعت‌های کم ندارد. کاهش مقاومت شناور در سرعت طراحی قابل توجه می‌باشد. این امر با در نظر گرفتن کاهش نوسانات دینامیکی شناور کاملاً قابل توجه می‌باشد. در شکل ۱۴ نیز اثرات نصب گُوه بر تغییرات زاویه‌ی تریم شناور در هر سرعت ارائه شده است.



شکل ۱۴ - مقایسه‌ی اثر نصب گُوه بر تغییرات تریم دینامیکی متوسط شناور در هر سرعت

همانطور که مشاهده می‌گردد، نصب گُوه در پاشنه منجر به کاهش تریم دینامیکی متوسط شناور شده است. اما این کاهش از عدد فرود  $0/6$  به بعد خودنمایی می‌کند. علت آن هم ایجاد نیروی برای مناسب در سرعت‌های بیشتر است. در ادامه کانتور سطح آزاد آب در سرعت طراحی (شکل ۱۵) و همچنین فشار وارد شده بر کف شناور (شکل ۱۶) در دو حالت با و بدون گُوه ارائه شده است.

سرعت‌های کم شده است، کنترل ناپایداری دینامیکی شناور در سرعت‌های زیاد منجر به کاهش مقاومت در سرعت طراحی گردیده است. بر اساس حل عددی معتبر، در این پژوهش اثرات نصب گویه منجر به افزایش سرعت طراحی گردید و اختلاف ۱۲ درصدی برای مقاومت شناور در دو حالت با و بدون گویه ثبت گردید. توزیع فشار در کف شناور ثبت شده و دامنه‌ی تغییرات ناپایداری‌های دینامیکی شناور مورد مقایسه قرار گرفته است. روش عددی حاضر که مبتنی بر حلگر اینتردایم فوم نرم‌افزار اوپن فوم می‌باشد نیز توانسته است به‌خوبی حرکات دینامیکی شناور را ثبت نموده و می‌توان از آن برای توسعه‌ی چنین روش‌هایی در شناورهای پروازی با سرعت‌هایی بسیار بیشتر نیز استفاده نمود.

## ۵ - تشکر و قدردانی

می‌بایست از همکاری دلسوزانه‌ی جناب آقای مهندس هاشمی ریاست محترم آزمایشگاه ملی دریایی شهدای خلیج فارس که امکان انجام آزمایش‌هایی با کیفیت بسیار زیاد را برای حمایت از این پژوهش فراهم آوردند تشکر و قدردانی نمود.

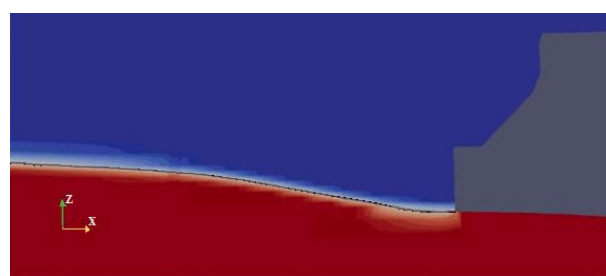
## کلید واژگان

- 1- Stern wedge
- 2- Flap
- 3- Interceptor
- 4- Planing
- 5- Semi-planing
- 6- Lift
- 7- Frigate
- 8- Displacement
- 9- Semi-displacement
- 10- Sprayrail
- 11- Heave
- 12- Pitch
- 13- Reynolds-Average Navier-Stokes (RANS)
- 14- Volume OF Fluid (VOF)
- 15- Artificial compression
- 16- Eddy viscosity
- 17- Shear Stress Transport
- 18- Froude number
- 19- interDyMFOam

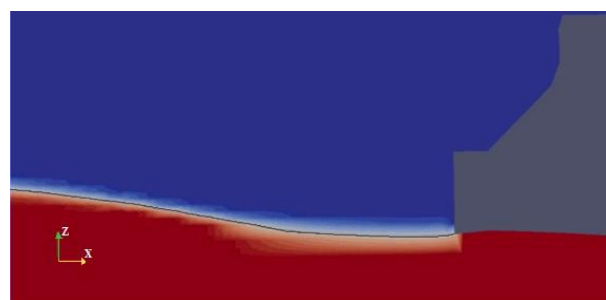
## ۶ - مراجع

- 1- Karafiath, G., Fisher, S.C., (1987), *The effect of stern wedges on ship powering performance*. Naval Engineering Journal, May, p.27-11.
- 2- Bojovic, P., Sahoo, P.K., (2004) *Effect of stern wedges and advanced spray rail system on calm water resistance of high-speed displacement hull forms*, Proceedings of Pacific 2004 International Maritime Conference; 2004 February 3-5; Sydney.
- 3- Jadmiko, E., Syarif, I., Arif, L., (2018), *Comparison of Stern Wedge and Stern Flap on Fast Monohull*

همچنین در شکل ۱۶ افزایش محسوس فشار در ناحیه‌ی اطراف گویه مشاهده می‌گردد که دلیل اصلی آن نصب گویه و ایجاد نیروی برآ و به تبع آن تغییر پروفیل فشار در آن ناحیه می‌باشد. علاوه بر آن، در شکل ۱۷ برش طولی از خط مرکزی یک نیم‌بدنه ارائه شده و تغییرات سطح آزاد در آن ناحیه مشاهده می‌گردد. افزودن گویه به ناحیه‌ی پاشنه‌ی شناور باعث کاهش ارتفاع پاشش آب در ناحیه‌ی پشت ترانزوم شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۷ - برش سطح آزاد آب در انتهای شناور در دو حالت بدون (الف) و با (ب) گویه در سرعت طراحی

## ۵- بحث و نتیجه‌گیری

همانطور که مشاهده گردید، در اینجا از دو روش عددی و تجربی برای ارزیابی اثرات نصب گویه پاشنه در عملکرد هیدرودینامیکی شناور دوبنده‌ی نیمه‌پروازی بهره گرفته شد. بدنه‌هایی از جنس چوب با مقیاس تقریبی یک به شانزده ساخته شده و در حوضچه‌ی آزمایشگاه ملی شهدای خلیج فارس در آب آرام و در سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. از سوی دیگر، مدلی با همان طول در یک تانک عددی که در نرم‌افزار متن‌باز اوپن فوم تولید شده است با استفاده از روش عددی به دقت تحلیل شده و نتایج آن با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه گردیده است. مقدار مقاومت شناور اصلی در محدوده‌ای که نتایج آزمایشگاهی بدست آمده بود با داده‌های تجربی مقایسه شد و اختلاف اندکی بدست آمد. بر همین اساس اثر متغیرهایی نظیر مقدار مقاومت در هر سرعت، جایجائی عمودی، غلتش طولی و سایر عوامل مؤثر در ناپایداری شناور در دو حالت با و بدون گویه مورد ارزیابی قرار گرفته است. اثرات نصب گویه در پاشنه‌ی چنین بدنه‌ای در سرعت طراحی کاملاً مشهود می‌باشد. هرچند نصب گویه باعث افزایش ناچیز نیروی مقاومت شناور در

- 16- Rusche, H., (2002), *Computational Fluid Dynamics of Dispersed Two-phase Flows at High Phase Fractions*, Imperial College, London, UK (Ph.D.thesis).
- 17- Berberović, E., Van Hinsberg, N., Jakirlić, S., Roisman, I., Tropea, C., (2009), *Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: dynamics of the cavity evolution*, Physical Review E., Vol.79(3), p.36306.
- 18- Menter, F.R., (2009), *Review of the shear-stress transport turbulence model experience from an industrial perspective*, International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol.23(4), p.305-12.
- 19- ITTC, Recommended Procedures. General Guideline for Uncertainty Analysis in Resistance Tests. 7.5-02-02-02, 2014.
- Vessel Resistance*, International Journal of Marine Engineering Innovation and Research, Vol.3(2), p.41-9.
- 4- Salas, M., Tampier, G., (2013), *Assessment of appendage effect on forward resistance reduction*, Ship Science & Technology, Vol.7(13), p.37-9.
- 5- Jangam, S., Subramanian, V.A., Krishnankutty, P., (2019), *Computational Study on the Hydrodynamic Effects of Interceptors Fitted to Transom of Planing Vessel*, Proceedings of the Fourth International Conference in Ocean Engineering (ICOE2018), Lecture Notes in Civil Engineering 22; 2019 Jan 18; Singapore.
- 6- John, Sh., Khan, M.D.K., Praveen, P.C., Korulla, M., Panigrahi, P.K., (2011), *Hydrodynamic performance enhancement using stern wedges, stern flaps and interceptors for ships*, International Conference on Ship and Offshore Technology; 2011Dec 8-9; INDIA Kharagpur.
- 7- Mansoori, M., Fernandes, A.C., Ghassemi, H., (2017), *Interceptor design for optimum trim control and minimum resistance of planning boats*, Applied Ocean Research, Vol.69, p.100-6.
- 8- Song, K., Guo, Ch., Gong, J., Li, P., Wang, L., (2018), *Influence of interceptors, stern flaps, and their combinations on the hydrodynamic performance of a deep-vee ship*, Ocean Engineering, Vol.170, p.306-15.
- 9- Day, A.H., Cooper, Ch., (2011), *An experimental study of interceptors for drag reduction on high-performance sailing yachts*, Ocean Engineering, Vol.38, p.983-12.
- 10- Park, J.Y., Choi, H., Lee, J., Choi, H., Woo, J., Kim, S., et al., (2019), *An experimental study on vertical motion control of a high-speed planning vessel using a controllable interceptor in waves*, Ocean Engineering, Vol.173, p.841-10.
- 11- Mansoori, M., Fernandes, A.C., (2016), *The interceptor hydrodynamic analysis for controlling the porpoising instability in high speed*, Applied Ocean Research, Vol.57, p.40-12.
- 12- Avci, A.G., Barlas, B., (2019), *An experimental investigation of interceptors for a high speed hull*, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, Vol.11(1), p.256-18.
- 13- Mansoori, M., Fernandes, A.C., (2015), *Hydrodynamics of the interceptor on a 2-D flat plate by CFD and experiments*, Journal of Hydrodynamics, Vol.27(6), p.919-15.
- 14- Ghadimi, P., Sajedi, S.M., Tavakoli, S., (Articles in Press), *Experimental Study of the Wedge Effects on the Performance of a Hard-chine Planing Craft in Calm Water*, Scientia Iranica, DOI: 10.24200/sci.2018.20607.
- 15- Jasak, H., (1996), *Error Analysis and Estimation for the Finite Volume Method with Applications to Fluid Flows*, Imperial College, London, UK (Ph.D.thesis).