

## Calculation of Amphibian Floating Drag under the Effect of Sea Waves Using Computational Fluid Dynamics

S. Amini<sup>1</sup>

M. RostamiVarnousfaaderani<sup>\*2</sup>

M. Dehghan Manshadi<sup>3</sup>

H. Norouzi<sup>4</sup>

Malek Ashtar Shahinshahr University of Technology, Shahinshahr, Iran  
(Received: 2024/07/06, Revised: 2024/09/29, Accepted: 2024/11/05, Published: 2024/12/01)  
DOR: <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1403.13.2.9.7>

### ABSTRACT

Hovercrafts are amphibious marine vehicles that are capable of moving on the surface of the water and land. In this article, hovercraft drag has been calculated at different speeds and in three states. The first state of floating completely submerged in the air, the second floating above the surface of the ground and the third considering the waves below the float. In the second and third cases, numerical modeling has been done with different floating distances from the ground or the sea. Simulation in the first and second states is done in single phase and in the third state in two phases. 14 and 16 simulations have been done in single-phase and two-phase modes, respectively. A total of 30 simulations were carried out, a parametric study on the variables of water depth, wave length and height, floating speed and distance from the surface were considered. The cells of the solution domain is of trimmer type and structured in the Star CCM software, and for the numerical solution, the finite volume method is used in the Fluent software. The standard  $k-\omega$  turbulence model has been used to model turbulence in single-phase mode, and the  $k-\omega$  sst model has been used in two-phase mode. In order to identify and simulate the free surface of the flow in the third state, the fluid volume fraction method has been used. In order to validate, the numerical modeling of the drag of the KCS container carrier was carried out, and the comparison of the numerical results with the experimental results were in good agreement. The results showed that increasing the height of the waves decreases and increasing the wavelength increases the drag force. Also, reducing the distance from the surface reduces the drag force.

**Keywords:** Amphibious craft, Sea Waves, Drag Force, Two Phase, Free Surface

### محاسبه درگ شناور دوزیست تحت اثر امواج دریا با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی

حسین نوروزی<sup>۱</sup>



مجتبی دهقان منشادی<sup>۲\*</sup>

محمود رستمی ورنوسفادرائی<sup>۳\*</sup>

صالح امینی<sup>۴</sup>

دانشگاه صنعتی مالک اشترشاهین شهر، شاهین شهر، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۶، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۷/۰۸، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۵، انتشار: ۱۴۰۳/۰۹/۱۱)

### چکیده

هواناوها وسایل دریایی دوزیستی هستند که قابلیت حرکت بر روی سطح آب و زمین را دارند. در این مقاله درگ هواناوا در سرعت‌های مختلف و در سه حالت محاسبه شده است. حالت اول شناور کاملاً مغروق در هوا، حالت دوم شناور بالاتر از سطح زمین و حالت سوم با در نظر گرفتن امواج در زیر شناور است. در حالت‌های دوم و سوم مدل‌سازی عددی با فواصل مختلف شناور از زمین یا دریا انجام شده است. شبیه‌سازی در حالت‌های اول و دوم به صورت تک‌فازی و در حالت سوم به صورت دوفازی انجام شده است. شبیه‌سازی در حالت‌های تک‌فازی و دوفازی به ترتیب به تعداد ۱۴ و ۱۶ مورد صورت گرفته است. در مجموع سی شبیه‌سازی انجام شده، مطالعه پارامتریک بر متغیرهای عمق آب، طول و ارتفاع موج، سرعت شناور و فاصله از سطح در نظر گرفته شده‌اند. شبکه بندی دامنه حل از نوع تریمر و ساختار یافته در نرم افزار استار سی ام تولید و جهت حل عددی از روش حجم محدود در نرم افزار فلونت استفاده شده است. برای مدل‌سازی آشفتگی در حالت تک فازی از مدل توربولانسی  $k-\omega$  استاندارد و در حالت دو فازی از مدل  $k-\omega$  sst استفاده شده است. جهت شناسایی و شبیه سازی سطح آزاد جریان در حالت سوم، روش کسر حجمی سیال بکار برده شده است. به منظور اعتبارسنجی، مدل‌سازی عددی درگ شناور کانتینربر KCS انجام شد و مقایسه نتایج عددی با آزمایشگاهی از مطابقت خوبی برخوردار بودند. نتایج نشان دادند که افزایش ارتفاع امواج باعث کاهش و افزایش طول موج باعث افزایش نیروی درگ می‌شود. همچنین کاهش فاصله از سطح باعث کاهش نیروی درگ می‌گردد.

**واژه‌های کلیدی:** شناور دوزیست، امواج، نیروی درگ، دوفازی، سطح آزاد

۱- دانشجوی دکتری: salehamini@mut-es.ac.ir

۲- استادیار: rostamivf@aut.ac.ir

۳- استاد: dehghanmanshadi@gmail.com

۴- دکتری: mrostamivf@gmail.com

## ۱- مقدمه

هواناو یا هاورکرافت نوعی وسیله‌ی «هوادریایی» و چند منظوره است که روی بالشتکی از هوا حرکت می‌کند و توانایی حرکت روی دریا، یخ، خاک و گل را دارد. هواناو این کار را با کمک بالشتک هوا انجام می‌دهد، در حقیقت باید گفت که هواناو روی هوا حرکت می‌کند و با سطحی که روی آن حرکت می‌کند تماسی ندارد. به همین جهت هم نیروی درگ کمتری ایجاد می‌شود و هم به دلیل عدم نیاز به پروانه داخل آب جهت به حرکت در آوردن وسیله می‌توان با هواناو داخل خشکی حرکت کرد و این وسیله بی‌نیاز از اسکله است. هاورکرافت‌ها با محدوده سرعت صد کیلومتر در ساعت و نسبت توان به وزن نسبتاً بالا، وسایل نقلیه‌ای با راندمان بالا هستند [۱، ۲].

سعید و یونس به شبیه‌سازی جریان اطراف یک هواناو پرداختند. هندسه سه مدل مستطیلی، مثلثی و نیم دایره‌ای با استفاده از نرم افزار فلونتت مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد نیروی درگ به ترتیب در نوع نیم دایره، مثلثی و مستطیلی کمتر است [۳]. با تغییر هندسه از نوع مستطیلی به نیم دایره نیروی درگ حدوداً ۲۵ درصد کاهش می‌یابد. زارع و همکاران به بررسی تأثیر پارامتر سوراخ‌های خروجی هوا به روی فرم و شدت تغییر شکل بالشتک بسته در هاورکرافت‌ها پرداختند [۴]. کهنسال و موسوی به طراحی هاورکرافت پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که با اضافه کردن بال به هواناو قدرت مانور پذیری و راندمان بالا می‌رود و مصرف سوخت کاهش می‌یابد [۵]. رجیبی و همکاران به شبیه‌سازی عددی در نرم افزار سی اف ایکس و تحلیل آیرودینامیکی هاورینگ شناورهای بالشتک هوایی پرداختند و یافتند که افزایش دبی فن و کاهش زاویه گپ موجب افزایش نمایی نیروی هاورینگ می‌شود [۶]. ملاعلی پور و همکاران به بررسی عددی تأثیر جریان بر روی توزیع فشار و نیروی لیفت هاورکرافت پرداختند [۷]. پگورلوا و همکاران به بررسی مقاومت موج‌سازی با وجود صفحات یخ پرداختند و نتایج نشان می‌دهد با افزایش سرعت و ضخامت یخ مقادیر درگ افزایش می‌یابد [۸]. کیان و دای به صورت تجربی به بررسی تأثیر وجود سطح آب بر رفتار آیرودینامیکی ایرفویل متقارن NACA 0012 پرداختند. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد با تغییر ارتفاع ایرفویل از سطح آب، آیرودینامیک جریان تغییر می‌کند و شکل موج ایجاد شده در سطح آب بواسطه‌ی حضور ایرفویل در زاویه‌ی حمله ثابت و ارتفاع‌های

مختلف از سطح، تغییر می‌کند [۹]. کوهن و همکاران مقاومت ناشی از امواج سطحی تولید شده توسط یک هاورکرافت را در آب کم عمق مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان می‌دهد حداکثر مقاومت موج در عدد فرود یک رخ می‌دهد و کاهش ویسکوزیته آب گل آلود مقدار مقاومت کاهش می‌یابد [۱۰]. احمد و گوتارانته در یک مطالعه‌ی تجربی به بررسی تأثیر اثر سطح بر آیرودینامیک یک قایق پرنده در ارتفاع ۲ متری از سطح آب با سرعت ۷۰ متر بر ثانیه پرداختند [۱۱]. جامعی و همکاران در مقاله‌ای با عنوان "ویژگی‌های آیرودینامیکی بال مرکب تحت اثر سطح" با استفاده از نرم افزار فلونتت، به بررسی اثر سطح زمین بر آیرودینامیک یک بال در ارتفاع‌های مختلف از سطح پرداخته است. نتایج ارائه شده در این مرجع، نشان می‌دهد برای بال با مقطع ساده و قابل تغییر، با نزدیک شدن به سطح، ضریب برآ افزایش یافته و ضریب پسا کاهش پیدا می‌کند [۱۲]. پگورلوا و کوزین یک هاورکرافت را در آب کم عمق با پوششی از یخ مدلسازی کردند. نتایج نشان می‌دهد سرعت عرضی تأثیر کمی بر مقاومت دارد و افزایش ضخامت یخ باعث کاهش مقاومت خواهد شد [۱۳]. منتل نیز نسبت بهینه لیفت به درگ هاورکرافت را مورد مطالعه قرار داد [۱۴]. پتفت و همکاران یک هاورکرافت را در نرم افزار انسیس فلونتت شبیه‌سازی کردند و اثر تغییرات سرعت جریان هوای ورودی به داخل سیستم و همچنین تغییرات فاصله هوایی بالشتک هوا از سطح زمین را مورد بررسی قرار دادند [۱۵].

پس از بررسی مطالعات اولیه، چنین به نظر می‌رسد که همواره بررسی پدیده اثر سطح و شبیه‌سازی امواج مورد توجه محققین بوده است. ولی توجه هم‌زمان به هر دو موضوع کمتر اتفاق افتاده است و نیز مطالعه روی هندسه هواناوها اخیراً مورد توجه قرار گرفته است.

در این مقاله درگ هواناو در سرعت‌های مختلف و در سه حالت محاسبه خواهد شد: در حالت اول شناور کاملاً مغروق در هوا، در حالت دوم شناور بالاتر از سطح زمین و سوم با در نظر گرفتن امواج در زیر شناور. در حالت‌های دوم و سوم مدل‌سازی عددی با فواصل مختلف شناور از زمین یا دریا انجام خواهد شد. مدل‌سازی در حالت‌های اول و دوم به صورت تک‌فازی و در حالت سوم به صورت دوفازی انجام می‌شود. در واقع مقاله حاضر به بررسی پدیده اثرات سطوح مختلف و امواج دریا بر حرکت هواناو می‌پردازد. شبکه‌بندی دامنه حل در نرم‌افزار استار سی سی‌ام تولید و جهت حل

همچنین ضریب درگ به دست آمده در مطالعات یاد شده از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$C_T = \frac{R}{\frac{1}{2}\rho L^2 V^2} \quad (4)$$

عدد فرود از رابطه زیر محاسبه می شود که در آن  $V$  سرعت و  $L$  طول هواناو و  $g$  شتاب گرانش است.

$$Fr = \sqrt{\left(\frac{V^2}{Lg}\right)} \quad (5)$$

### ۳- اعتبارسنجی

به دلیل عدم دسترسی به نتایج آزمایشگاهی مدل هواناو بررسی شده در این مقاله برای اعتبارسنجی شبیه سازی عددی از هندسه شناور KCS (مدل با طول ۳/۰۶۶m) و نتایج آزمایشگاهی شیواچو [۱۸] استفاده می شود. به این ترتیب که شبیه سازی عددی با هندسه KCS به منظور محاسبه درگ و مقایسه با نتایج آزمایشگاهی انجام می شود. شبیه سازی در امواج منظم از روبرو انجام می شود. مشخصات موج انتخابی به شرح جدول (۱) انتخاب شده است.

جدول (۱): مشخصات موج و سرعت کشتی

سرعت کشتی (متر بر ثانیه)	۱.۴۲۶
ارتفاع موج (متر)	۰.۰۹۹۷
طول موج (متر)	۵.۹۸۰

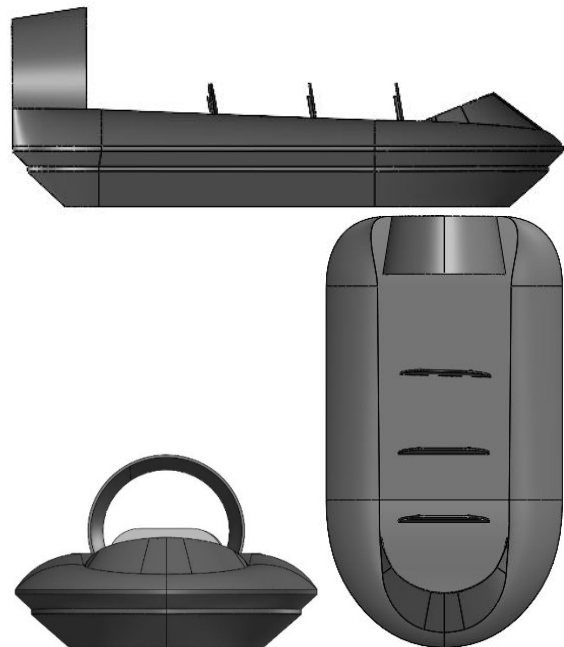
شرایط مرزی و ابعاد دامنه مطابق با جدول (۲) اعمال شده است که  $L_{BP}$  طول بین دو عمود شناور است.

جدول (۲): شرایط مرزی و ابعاد دامنه

Boundary	Position	Boundary Condition
Inlet	2.5 $L_{BP}$	Velocity Inlet
Outlet	4.0 $L_{BP}$	Pressure Outlet
Symmetry	-	Symmetry
Side	2.0 $L_{BP}$	Velocity Inlet
Top	1.5 $L_{BP}$	Velocity Inlet
Bottom	2.5 $L_{BP}$	Velocity Inlet

جریان ناپایا و تراکم ناپذیر و مدل توربولانسی دو معادله ای  $k - \omega sst$  به کار رفته است [۱۹-۲۱]. شکل (۲) نحوه شبکه بندی کشتی KCS را نشان می دهد.

عددی از روش حجم محدود در نرم افزار فلوئنت استفاده خواهد شد. در شکل (۱) هندسه هواناو در سه نما نشان داده شده است. ابعاد هندسه هواناو دارای طول ۴/۴۴m، عرض ۲/۱۵m و ارتفاع ۱/۱۷m و مساحت سطح خارجی هواناو  $۲۷/۳۹m^2$  متر مربع است.



شکل (۱): هندسه هواناو

### ۲- معادلات حاکم

معادلات حاکم بر جریان سیال، معادلات بقای جرم و ممنتوم هستند که عبارتند از [۱۶]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (1)$$

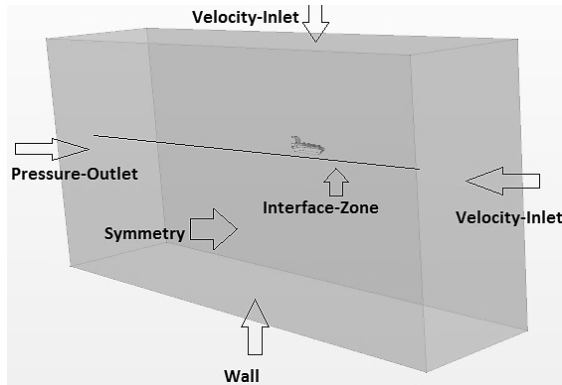
$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + F_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (2)$$

که در آن  $p$  فشار استاتیک،  $\tau_{ij}$  تانسور تنش،  $\rho g$  و  $F$  نیروهای جسمی گرانشی و جسمی خارجی هستند که تانسور تنش  $\tau_{ij}$  به صورت زیر است:

$$\tau_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij} \quad (3)$$

که  $\mu$  لزجت مولکولی و ترم دوم در سمت راست تأثیرپذیری ناشی از انبساط حجمی است.

در این مقاله جهت تعیین تنش های رینولدز از مدل های  $k-\omega$  در حالت تک فازی و از مدل  $k-\omega sst$  در حالت دوفازی استفاده می شود [۱۷].

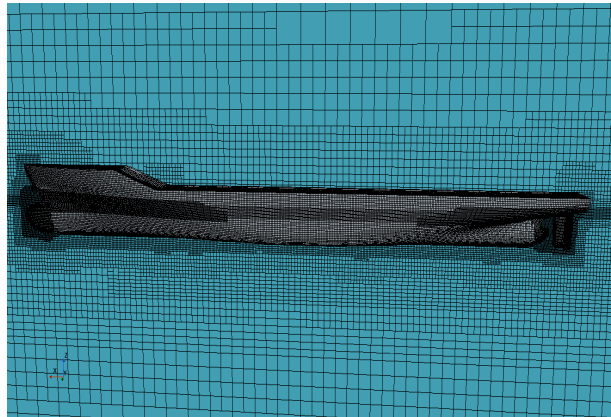


شکل (۵): دامنه و شرایط مرزی در حالت شبیه‌سازی دوفازی یافتن شبکهٔ بهینه از جمله مهم‌ترین مراحل شبیه‌سازی‌های عددی است تا با انتخاب شبکه‌ای با کمترین تعداد سلول، علاوه بر کنترل روند همگرایی و محاسبه نزدیک‌ترین جواب‌ها به واقعیت باعث کاهش زمان محاسبات نیز شود. جهت دستیابی به همگرایی مناسب شبیه‌سازی عددی بایستی در نقاطی که نیاز به شبکه دقیق است، کیفیت مش کنترل شود. بنابراین شبکه‌های مختلف بررسی شد تا با کمترین تعداد سلول به نتایج دقیق دست‌یافت. همچنین جریان‌های ناپایا توجه به گام زمانی دارای اهمیت است. استفاده از عدد کورانت که به سرعت جریان  $u$  و اندازه اولین سلول روی دیواره  $\Delta x$  وابسته است، موجب انتخاب گام زمانی مناسب خواهد شد. گام زمانی را می‌توان برای ارضای شرط عدد کورانت  $C_{FL}$  یا برای حل ویژگی‌های جریان مورد نظر تعیین کرد.

$$CFL = \sum \frac{u_i dt}{\Delta_i} = \frac{u_x dt}{\Delta x} + \frac{u_y dt}{\Delta y} + \frac{u_z dt}{\Delta z} \quad (5)$$

$$= \frac{U \Delta T}{\Delta x} \leq 0.5 - 1$$

با توجه به تغییر سرعت در حالت‌های مختلف شبیه‌سازی مقدار محاسبه شده برای عدد کورانت متغییر خواهد بود اما در نظر گرفتن یک مقدار ثابت برای عدد کورانت توصیه می‌شود زیرا تغییرات مکرر در گام زمانی منجر به افزایش زمان محاسبات و باقیمانده می‌شود. علاوه بر این جهت انتخاب گام زمانی در مبحث امواج توصیه شده است حداقل ۱۰۰ مرحله زمانی در هر دوره برخورد باید برای شبیه‌سازی موج منظم استفاده شود [۲۲]. توصیه‌های دیگری در خصوص گام زمانی وجود دارد اما توجه به نحوه همگرایی، دقت نتایج و کاهش زمان محاسبات ضروری است. در نهایت با توجه به موارد ذکر شده گام زمانی ۰,۰۰۵ انتخاب شده است.



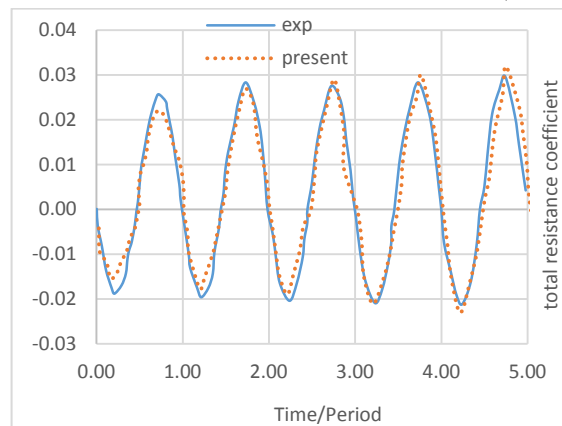
شکل (۲): شبکه بندی کشتی kcs

شکل (۳) شبیه سازی کشتی در سطح آزاد آب و نحوه تشکیل موج را نشان می‌دهد.



شکل (۳): شبیه سازی کشتی در سطح آزاد آب

شکل (۴) نتایج به دست آمده در این شبیه سازی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه می‌کند. نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی دارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت روش اتخاذ شده جهت شبیه سازی مطالعه حاضر قابلیت لازم را دارا است.

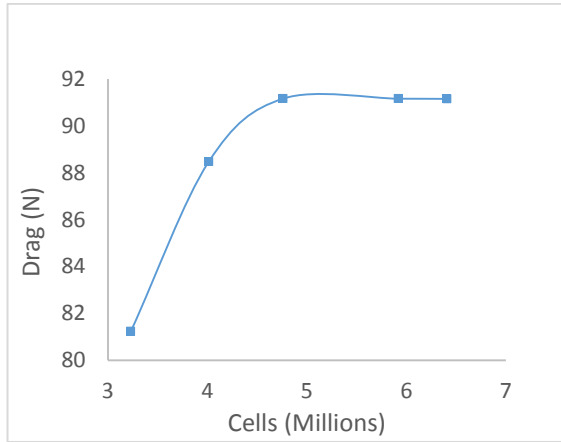


شکل (۴): مقایسه نتایج اعتبارسنجی با نتایج شیواچو [۱۸]

#### ۴- تنظیمات مدل سازی عددی

ابعاد دامنه محاسباتی طوری باید انتخاب گردد که تأثیری در نتایج به دست آمده نداشته باشد و زمان محاسبات را کاهش دهد. بدین منظور دامنه محاسباتی با ابعاد ۶۵m طول، ۳۰m عرض و ۳۰m ارتفاع بکار گرفته شده است. در شکل (۵) دامنه و شرایط مرزی در حالت دوفازی نشان داده شده است.

ناچیزی در مقدار نیروی درگ دارد و تنها زمان محاسبات را افزایش می‌دهد.



شکل (۷): استقلال از شبکه

۶- بررسی عدم قطعیت

جهت بررسی عدم قطعیت، نسبت همگرایی ( $R_G$ ) نتایج حل با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$R_G = \frac{\varepsilon_{G_{32}}}{\varepsilon_{G_{21}}} \quad (۶)$$

$$\varepsilon_{G_{21}} = \varnothing_2 - \varnothing_1$$

$$\varepsilon_{G_{32}} = \varnothing_3 - \varnothing_2$$

که در آن  $\varnothing$  مقدار محاسبه شده در هر کدام از شبکه بندی‌ها است. با توجه به رابطه فوق حالت‌های مختلف همگرایی در جدول (۳) خلاصه شده است [۱۶].

جدول (۳): محدوده همگرایی

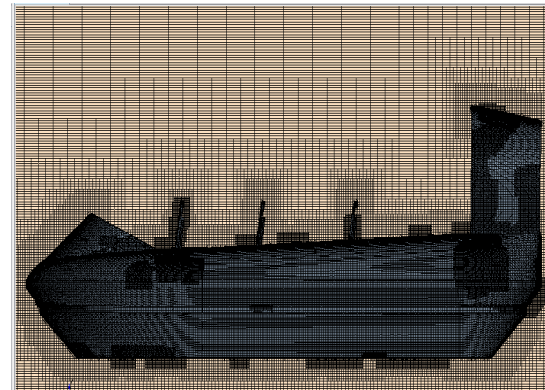
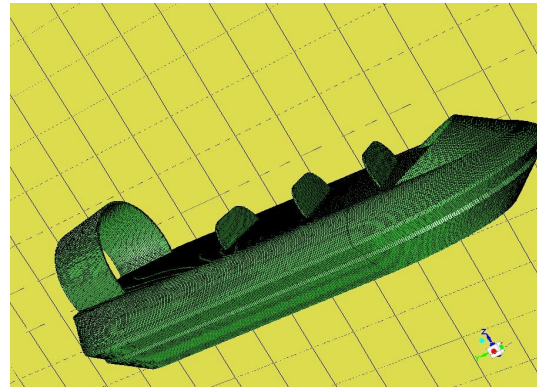
نتیجه	$R_G$	حالت
همگرایی یکنواخت	$0 < R_G < 1$	۱
همگرایی نوسانی	$-1 < R_G < 0$	۲
واگرایی یکنواخت	$R_G > 1$	۳
واگرایی نوسانی	$R_G < -1$	۴

در حالت‌های سوم و چهارم واگرایی اتفاق می‌افتد و در حالت‌های اول و دوم می‌توان عدم قطعیت را بررسی نمود. نسبت همگرایی محاسبه شده در این شبیه‌سازی بین سه شبکه متوالی در جدول (۴) خلاصه شده است.

جدول (۴): محاسبه شاخص همگرایی شبکه

$R_G$	شبکه			پارامتر مدنظر
	III	II	I	
درگ (N)	۹۱,۱۶۱	۹۱,۱۵۹	۹۱,۱۶۳	۰/۵

توسط نرم‌افزار Star ccm شبکه‌ای از نوع شبکه با سازمان و غیریکنواخت در دامنه محاسباتی ایجاد شده است. به دلیل وجود گرادیان‌های شدید سرعت در نزدیکی بدنه، تراکم نودهای شبکه با یک نسبت رشد کوچک به بیرون دامنه منتقل شده است. همچنین تراکم شبکه در فصل مشترک دو سیال در حالت دو فاز نسبت سایر نقاط دامنه حل بیشتر است. در شکل (۶) شبکه‌بندی بدنه و دامنه حل نشان داده شده است. به منظور تولید شبکه محاسباتی با تراکم سلول بالا در مناطقی که به آن نیاز است حجم‌های محلی از شکل‌های مختلف ایجاد و اندازه سلول هر کدام اختصاص داده شده است. لازم به ذکر است در شبکه‌بندی فصل مشترک دو سیال به منظور جلوگیری از دمپ شدن موج تعداد مش افزایش یافته است و ناحیه دمپینگ موج نیز لحاظ شده است.

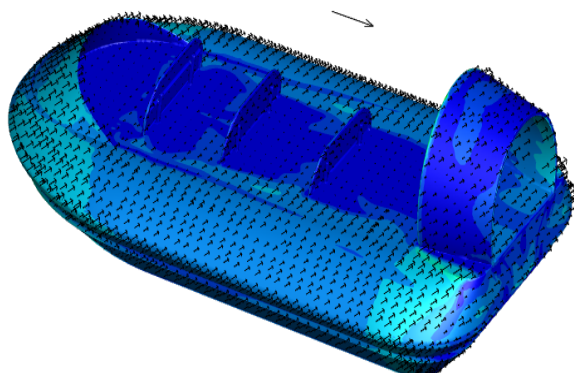
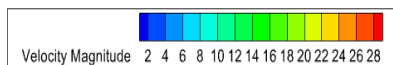


شکل (۶): شبکه‌بندی روی بدنه و دامنه در نمای جانبی

۵- استقلال از شبکه

در شکل (۷) بررسی تعداد سلول‌ها بر روند محاسبات نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشخص است تعداد سلول‌های بیش از ۵ میلیون در حالت تک فاز تأثیر

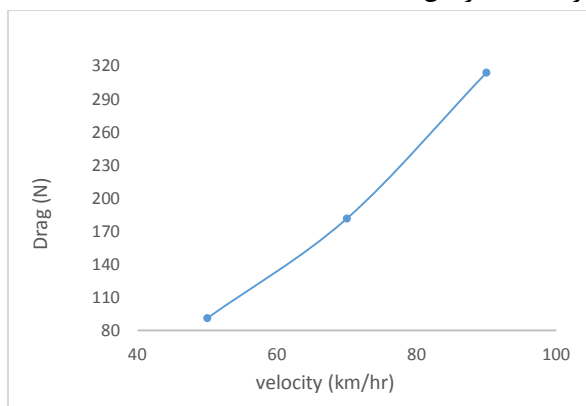
های انتهایی سرعت سیال در تماس با بدنه کمتر است که می‌تواند زمینه ساز جدایش جریان باشد.



شکل (۸): وکتورها و کانتور سرعت روی بدنه در شبیه

سازی حرکت هواناو در هوا

در شکل (۹) تغییرات نیروی درگ با سرعت نشان داده شده است. با افزایش سرعت مقدار نیروی درگ با شیب تقریباً ثابت افزایش یافته است.



شکل (۹): تغییرات نیروی درگ با سرعت

در شکل (۱۰) به ترتیب کانتور فشار، کانتور سرعت و کانتور ویسکوزیته توربولانسی نشان داده شده است. همانطور که در اشکال مشاهده می‌شود با افزایش سرعت، فشار کاهش می‌یابد. در سطوح جلویی هواناو که در معرض برخورد مستقیم با هوا است کمترین سرعت و بیشترین فشار قابل مشاهده است. همانگونه که انتظار می‌رود با کاهش سرعت، انرژی جنبشی جریان کاهش یافته و جریان میل به جدایش بیشتری پیدا کرده و بنابراین ویسکوزیته توربولانسی افزایش می‌یابد.

مقدار شاخص همگرایی محاسبه شده نشان‌دهنده همگرایی نوسانی است. شاخص همگرایی شبکه<sup>۱</sup> نشان‌دهنده فاصله بین نتیجه حل و مقدار دقیق است که در حالت دوم (همگرایی نوسانی) از رابطه زیر ارزیابی می‌شود.

$$GCI = \frac{1}{2} |\phi_U - \phi_L| * 100\% \quad (7)$$

که در آن  $\phi_U$  و  $\phi_L$  حداکثر و حداقل نتایج حاصل از مطالعه همگرایی مربوطه هستند که در این مقاله پارامتر  $\phi$  به مقدار نیروی درگ اشاره دارد. مقدار محاسبه شده شاخص همگرایی در بین شبکه‌های متوالی در جدول (۵) نشان داده شده است.

جدول (۵): عدم قطعیت در همگرایی نوسانی

GCI%	$\phi_L$ (N)	$\phi_U$ (N)	پارامتر مدنظر
۰,۲	۹۱,۱۵۹	۹۱,۱۶۳	درگ

مقدار شاخص همگرایی محاسبه شده نشان‌دهنده قبل اطمینان بودن شبکه‌بندی دوم است.

## ۷- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌های عددی انجام شده در این تحقیق را می‌توان به بخش‌های زیر تقسیم‌بندی نمود:

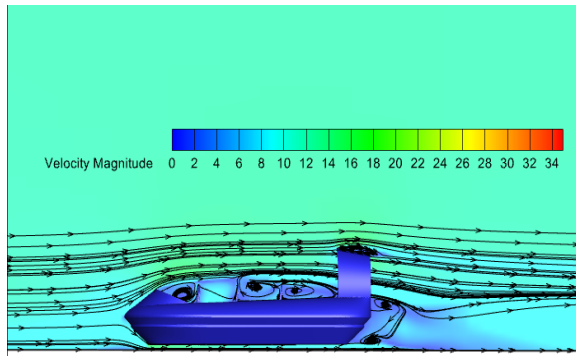
- ۱- شبیه‌سازی حرکت هواناو در هوا
- ۲- شبیه‌سازی حرکت هواناو در نزدیکی سطح زمین
- ۳- شبیه‌سازی حرکت هواناو در نزدیکی سطح آب با در نظر گرفتن امواج دریا

### ۷-۱- شبیه‌سازی حرکت هواناو در هوا

در ابتدا حرکت هواناو در هوا با سرعت‌های ثابت شبیه‌سازی شده است. سلول‌های تولید شده از نوع با سازمان غیریکنواخت و به تعداد ۳,۲ میلیون هستند. جریان پایا و تراکم ناپذیر است و از مدل توربولانسی  $k-\omega$  استاندارد استفاده شده است. جهت گسسته‌سازی معادلات از روش مرتبه دوم upwind، حل عددی از نوع صریح و الگوریتم سیمپل است. در این حالت از شبیه‌سازی هواناو ثابت در نظر گرفته شده است اما هوا با سرعت  $50 \text{ km/hr}$  از روی هواناو عبور می‌کند. با توجه به انتخاب مدل آشفتگی  $k-\omega$  تعداد سلولها به دلیل انتخاب  $Y^+$  کمتر از یک افزایش قابل توجهی دارند.

در شکل (۸) وکتورها و کانتور سرعت روی بدنه نشان داده شده است. همانگونه که در شکل مشخص است در قسمت‌های جلویی بدنه سرعت سیال بیشتر و در قسمت-

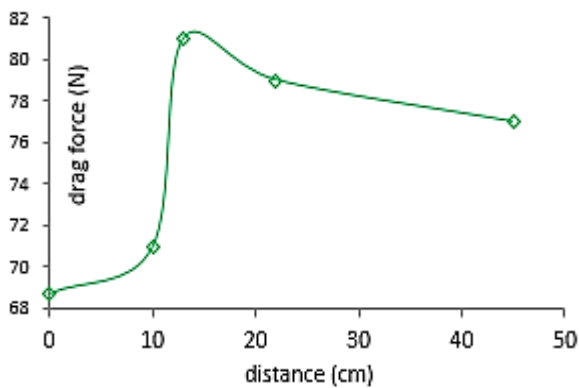
<sup>1</sup> Grid Convergence Index



شکل (۱۱): خطوط جریان و کانتور سرعت در فاصله ۱۵cm از

سطح زمین

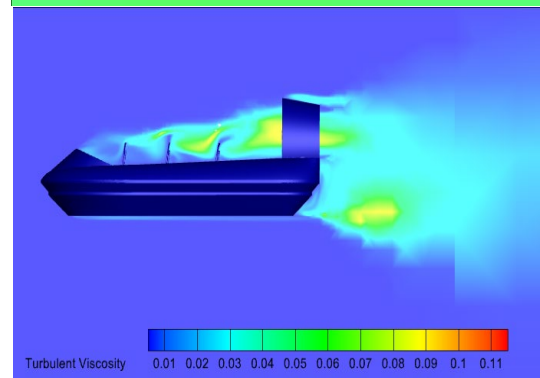
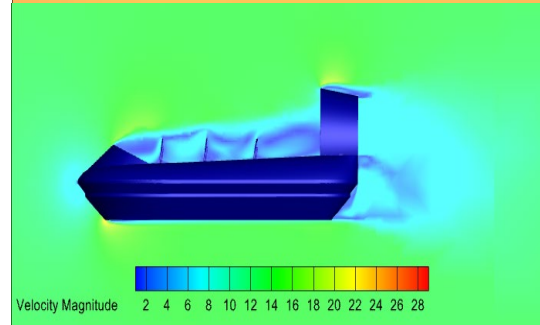
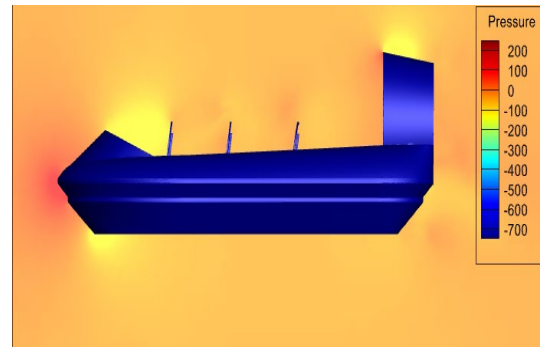
شکل (۱۲) مقدار تغییرات نیروی درگ را در فواصل مختلف از سطح زمین و سرعت ۵۰ km/hr را بیان می‌کند. با توجه به شکل هر چه فاصله از سطح بیشتر می‌شود نیروی درگ نیز بیشتر می‌شود. علت این است که هوای بیشتری با سطح زیرین تماس پیدا می‌کند. ولی نقاط مربوط به فواصل ۱۳cm و ۲۲cm نقاط ماکزیمم درگ محسوب می‌شوند که شیب نمودار را در یک روند صعودی حفظ نمی‌کنند. که البته دلیل آن می‌تواند تشکیل لایه مرزی به علت زیادتر شدن فاصله سطح و توانای عبور هوا از بین دولایه مرزی سطح زمین و سطح زیرین هواناو باشد.



شکل (۱۲): نیروی درگ در مقایسه با فاصله از سطح زمین در

سرعت ۵۰ km/hr

در شکل (۱۳) کانتور سرعت به ترتیب در فاصله ۱۵ و ۳۰cm از سطح زمین در سرعت ۵۰ km/hr نمایش داده شده است. همانطور که در شکل نشان داده شده است با افزایش فاصله از سطح زمین، گرادیان سرعت در پشت مدل افزایش یافته است. ضخامت لایه مرزی تشکیل شده روی سطح زمین قبل از برخورد جریان به هاورکرافت برابر است.

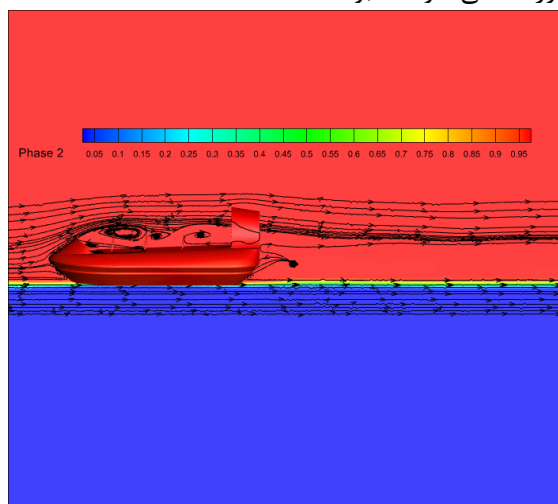


شکل (۱۰): به ترتیب از بالا کانتورهای فشار، سرعت و ویسکوزیته توربولانسی در شبیه سازی حرکت هواناو در هوا در سرعت ۵۰ km/hr

## ۷-۲- شبیه سازی حرکت هواناو در نزدیکی سطح زمین

در این حالت شبیه سازی حرکت هواناو در فواصل ۱۰، ۱۳، ۲۲، ۴۵cm از سطح زمین و سرعت های ۵۰، ۷۰ و ۹۰ km/hr انجام شده است. در مجموع در این حالت تعداد ۱۱ شبیه سازی انجام گرفته است. در تمام این حالت های شبیه سازی جریان پایا، تراکم ناپذیر و مدل توربولانسی  $k-\omega$  است. در شکل (۱۱) خطوط جریان و کانتور سرعت در فاصله ۱۵cm از سطح زمین نشان داده شده است. با توجه به شکل در قسمت های کابین و پشت هاورکرافت به دلیل کاهش فشار گردابه ها تشکیل شده اند و جدایش جریان اتفاق می افتد.

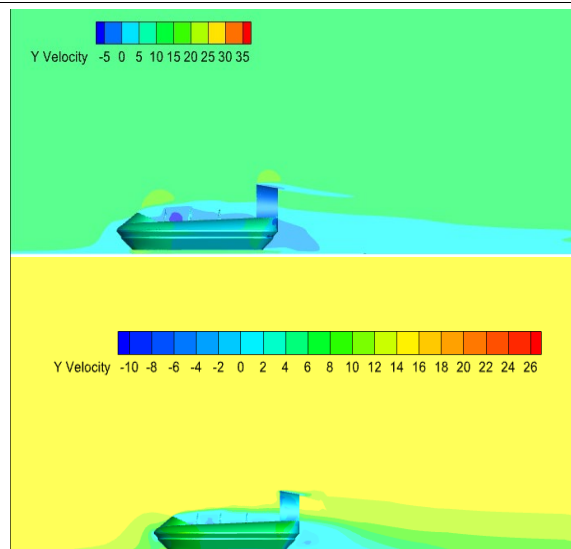
در این قسمت شبیه‌سازی حرکت هواناو روی سطح آب و با حضور امواج انجام شده است. در این حالت از شبیه سازی جریان دو فازی در نظر گرفته شده و جهت شبیه سازی سطح آزاد از مدل کسر حجمی سیال استفاده شده است. مطالعه پارامتریک در این شبیه سازی‌ها بر اساس تغییرات سرعت، عمق کانال، طول موج و ارتفاع موج انجام گردیده است. در این حالت از شبیه سازی، فاصله از سطح آب ۱۰ سانتی متر انتخاب شده است. جریان ناپایا، تراکم‌ناپذیر و مدل توربولانسی  $k-\omega$  SST برای شبیه‌سازی دوفازی انتخاب شده است. جهت کاهش زمان محاسبات و به دلیل متقارن بودن هواناو نسبت به محور طولی نیمی از جسم شبیه‌سازی شده است. تعداد شبکه در دامنه محاسباتی ۳,۳ میلیون است. همچنین برای تولید امواج از الگوی موج مرتبه اول [۱۹] استفاده شده و تاثیر آن بر نیروی پسا بررسی شده است. امواج سطحی از نوع منظم مرتبه اول از ابتدای دامنه محاسباتی در فصل مشترک دوسیال تولید شده است. در شکل (۱۵) کانتور دوفازی سطح آب و هوا و همچنین خطوط جریان نشان داده شده است. در شبیه سازی دوفازی سرعت سیال آب و هوا یکسان در نظر گرفته شده است. همانطور که در شکل مشخص است در قسمت‌های کابین و پشت هواناو گردابه‌ها تشکیل شده‌اند. با ارتفاع گرفتن از سطح هواناو به تدریج خطوط جریان به صورت افقی خواهند بود.



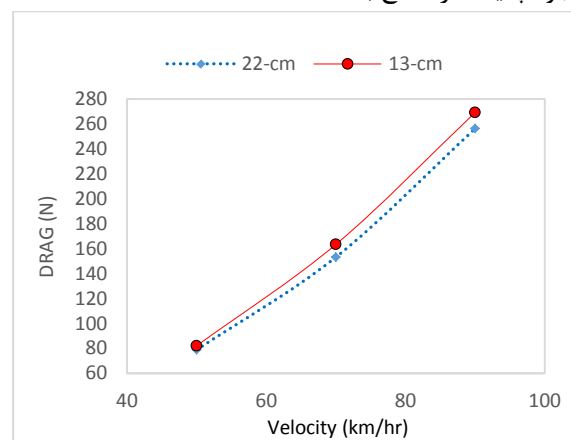
شکل (۱۵): کانتور دو فازی

شبیه‌سازی دو فازی و بررسی اثر سرعت

در این مرحله، شبیه‌سازی‌ها در سرعت‌های ۵۰ و ۶۰ و ۷۰ km/hr انجام شدند. فاصله هواناو از سطح آب ۱۰ cm و



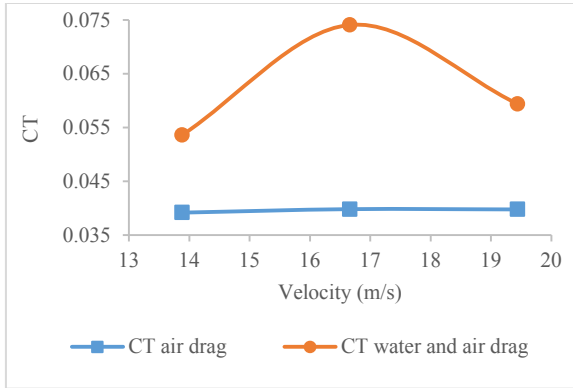
شکل (۱۳): به ترتیب از بالا کانتور سرعت و لایه مرزی در فاصله ۱۵ و ۳۰ cm از سطح زمین با سرعت ۵۰ km/hr شکل (۱۴) مقادیر نیروی درگ را برای سرعت‌های مختلف در فواصل ۱۳ و ۲۲ cm از سطح زمین نشان می‌دهد. مقادیر درگ برای سه سرعت ۵۰، ۷۰ و ۹۰ km/hr ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهند که با افزایش سرعت، نیروی درگ بیشتر شده است. زیرا اغتشاشات جریان بیشتر شده و درگ اصطکاکی افزایش یافته و در نتیجه نیروی درگ کلی افزایش می‌یابد. همچنین نیروی درگ بر حسب سرعت در فاصله ۱۳ cm بیشتر از فاصله ۲۲ cm نسبت به زمین است. لازم به ذکر است در تمامی فواصل از سطح زمین، مقادیر نیروی درگ کمتر از نیروی درگ محاسبه شده در شبیه سازی با جریان هوا است. که این خود می‌تواند دلیلی بر وجود پدیده اثر سطح باشد.



شکل (۱۴): تغییرات نیروی درگ بر حسب در فواصل مختلف از سطح زمین

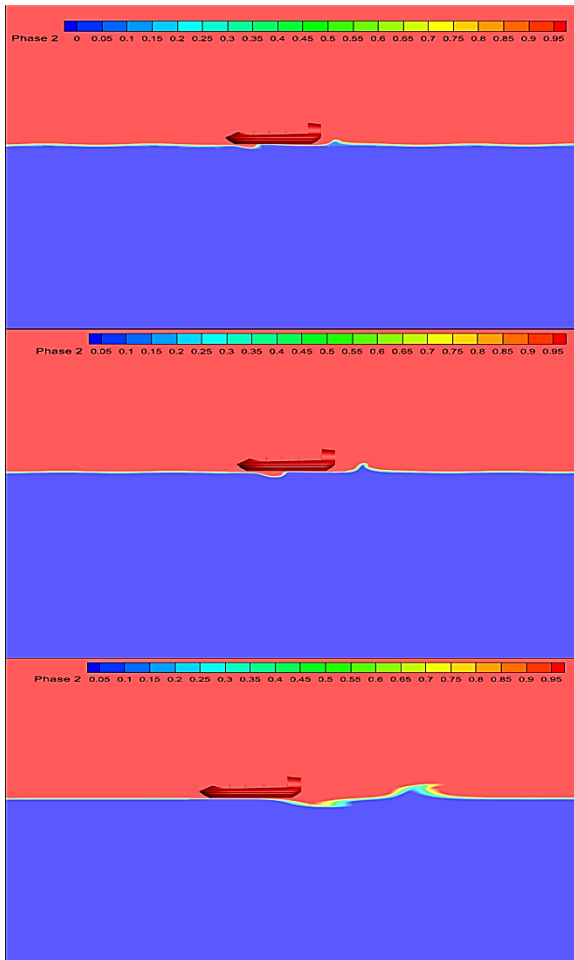
۳-۷- شبیه‌سازی حرکت هواناو در نزدیکی سطح آب و در حضور امواج دریا





شکل (۱۷) مقایسه ضریب درگ در حالت دوفازی و تک فازی

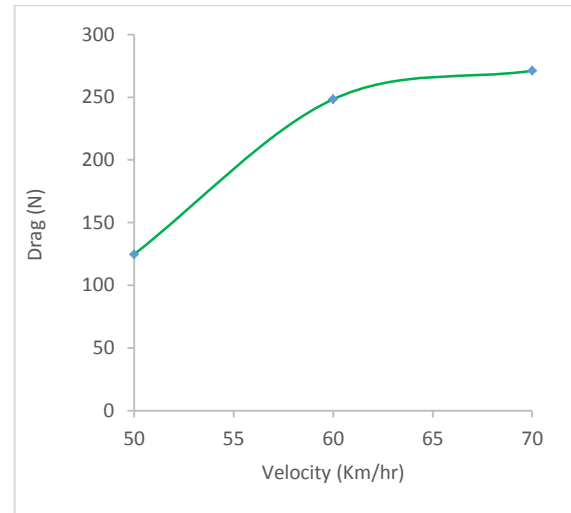
در شکل (۱۸) کانتوهای دوفازی به ترتیب در سرعت-های ۵۰، ۶۰ و ۷۰ km/hr در زمان‌های متفاوت از شبیه سازی نشان داده شده است. با توجه به شکل با افزایش سرعت ارتفاع امواج در پشت هاورکرافت بیشتر می‌شود.



شکل (۱۸): کانتور دوفازی به ترتیب از بالا در سرعت ۵۰، ۶۰ و ۷۰ km/hr

طول موج ۵m و ارتفاع امواج ۱۰cm و عمق کانال ۲۰m انتخاب شده است.

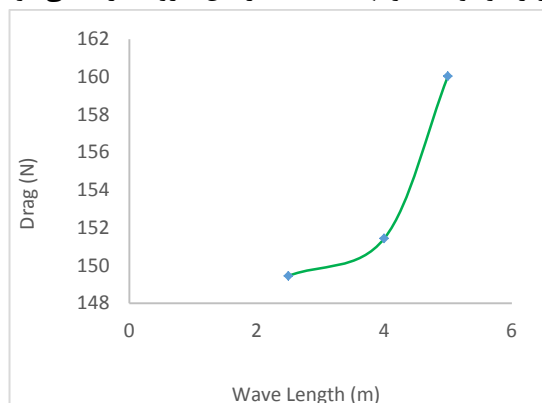
شکل (۱۶) تغییرات درگ بر حسب سرعت نشان داده شده است. همانگونه که در نمودار مشخص شده است با افزایش سرعت نیروی درگ بیشتر می‌شود. با توجه به این نمودار با افزایش سرعت از ۵۰ به ۶۰ km/hr نیروی درگ تقریباً دو برابر می‌شود. ولی با افزایش سرعت از ۶۰ به ۷۰ km/hr نیروی درگ حدوداً ده درصد افزایش داشته است. در سرعت ۵۰ کیلومتر در ساعت عدد فرود برابر یک می‌شود و سرعت انتشار امواج با سرعت انتقال ذرات آب برابر است. درگ اصطکاکی ناشی از هوا در اطراف هواناو کم شده است. در نتیجه در این سرعت کاهش قابل ملاحظه‌ای برای ضریب درگ بوجود می‌آید.



شکل (۱۶): تغییرات نیروی درگ بر حسب سرعت در حالت دوفازی

شکل (۱۷) ضریب درگ هاورکرافت در حالت دوفازی را با حالت تک فازی مقایسه می‌کند. همانگونه که در شکل نشان داده شده است در حالت دوفازی ضریب درگ افزایش قابل توجهی دارد که عمدتاً ناشی از لزجت سیال آب در تماس با هاورکرافت است. در سرعت بیشترین مقدار ضریب درگ در هر دو حالت از شبیه سازی محاسبه می‌شود.

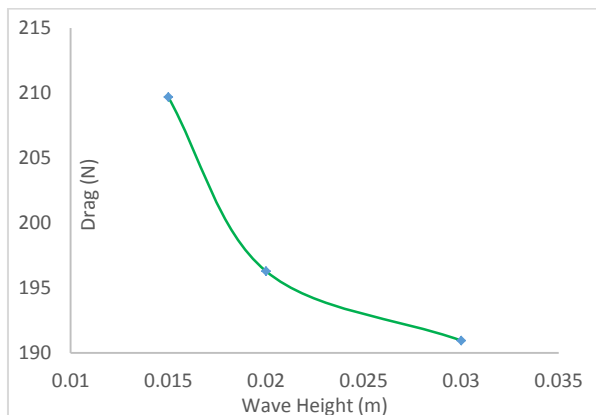
هواناو فراهم است و این موضوع باعث عبور جریان بیشتری از زیر هواناو شده و نهایتاً باعث افزایش نیروی درگ می‌شود.



شکل (۲۰): تغییرات نیروی درگ بر حسب طول موج

شبیه‌سازی دو فازی و بررسی اثر ارتفاع موج

در این مرحله شش شبیه‌سازی انجام شد. سه مورد از شبیه‌سازی‌ها با ارتفاع امواج ۵، ۲، و ۳cm با طول موج ۱،۵m و سه مورد از شبیه‌سازی‌ها با ارتفاع موج ۲/۵ و ۵ و ۱۰cm با طول موج ۵m انجام شدند. فاصله هواناو از سطح آب ده سانتی متر، طول امواج در شکل اول ۱،۵ متر و در شکل دوم ۵m است. عمق کانال ۲۰m و سرعت هواناو ۵۰km/hr انتخاب شده است. شکل‌های (۲۱ و ۲۲) تغییرات نیروی درگ را با ارتفاع موج بیان می‌کنند. قابل مشاهده است که با افزایش ارتفاع امواج نیروی درگ کاهش می‌یابد. زیرا ارتفاع امواج مانعی جهت عبور هوا و کاهش سرعت هوا در سطح زیرین هواناو بوده که نهایتاً منجر به کاهش نیروی درگ می‌شود. البته در شکل ۱۸ با افزایش ارتفاع موج از ۲،۵ به ۵cm مقدار نیروی درگ به مقدار کمی افزایش یافته است که می‌تواند به دلیل افزایش اغتشاش جریان باشد.

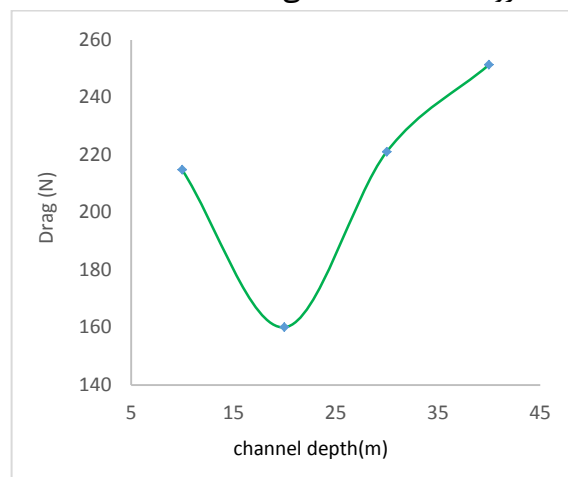


شکل (۲۱): تغییرات نیروی درگ بر حسب ارتفاع موج در

طول موج ۱،۵m

## شبیه‌سازی دوفازی و بررسی اثر عمق کانال

در این مرحله، شبیه‌سازی‌ها در چهار عمق کانال ۱۰ و ۲۰ و ۳۰ و ۴۰ متر انجام شدند. فاصله هواناو از سطح آب ۱۰cm ، طول ۵m ، ارتفاع امواج ۵cm و سرعت ۵۰km/hr است. شکل (۱۹) مقادیر نیروی درگ بر حسب عمق کانال را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود به جز در عمق کانال ۲۰m با افزایش عمق کانال نیروی درگ افزایش می‌یابد. چون با افزایش عمق امواج بزرگتری تولید خواهند شد و این امواج به سمت پایین دست جریان حرکت می‌کنند. نیروی درگ از عمق ده تا عمق بیست متری کاهش و از عمق بیست متری به بالا افزایش می‌یابد. در عمق کانال ۲۰m به دلیل اینکه عدد فرود برابر یک می‌شود جریان بحرانی شکل می‌گیرد و موج با همان سرعت جریان آب به سمت پایین دست حرکت می‌کند. درگ اصطکاکی ناشی از هوا در اطراف هواناو نیز کم شده است و منجر به کاهش نیروی درگ کل شده است. با نگاه کلی به نتایج می‌توان دریافت در عدد فرود یک نیروی درگ موجی کاهش می‌یابد و ماکزیمم نیروی درگ در اعداد فرود ۰،۵ تا ۱ بدست می‌آید.



شکل (۱۹): تغییرات نیروی درگ هواناو با عمق کانال

شبیه‌سازی دو فازی و بررسی اثر طول موج

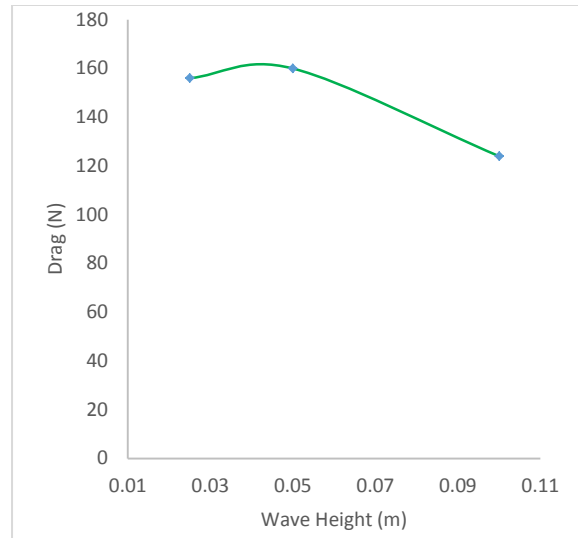
در این مرحله، شبیه‌سازی‌ها در سه طول موج ۲،۵، ۴ و ۵m انجام شدند. فاصله هواناو از سطح آب ۱۰cm ، ارتفاع امواج پنج سانتی متر، عمق کانال ۲۰m و سرعت هواناو ۵۰km/hr انتخاب شده است. شکل (۲۰) تغییرات نیروی درگ بر حسب طول موج را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش طول موج نیروی درگ افزایش می‌یابد. زیرا امکان حرکت هوا در یک دامنه وسیع‌تر در زیر

عددی با فواصل مختلف شناور از زمین یا دریا انجام شده است. مدل سازی در حالت های اول و دوم به صورت تک فازی و در حالت سوم به صورت دوفازی انجام شده است. شبیه سازی در حالت های تک فازی و دوفازی به ترتیب به تعداد ۱۴ و ۱۶ مورد صورت گرفته است. در مجموع سی شبیه سازی انجام شده، مطالعه پارامتریک بر متغیرهای عمق آب، طول و ارتفاع موج، سرعت شناور و فاصله از سطح در نظر گرفته شده اند. شبکه بندی دامنه حل از نوع تریمر و ساختار یافته در نرم افزار استار سی سی ام تولید و جهت حل عددی از روش حجم محدود در نرم افزار فلوئنت استفاده شده است. برای مدلسازی آشفتگی در حالت تک فازی از مدل توربولانسی  $k-\omega$  استاندارد و در حالت دو فازی از مدل  $k-\omega$  SST استفاده شده است. جهت شناسایی و شبیه سازی سطح آزاد جریان در حالت سوم، روش کسر حجمی سیال بکار برده شده است. خلاصه ای از نتایج بدست آمده به شرح زیر است.

اگر هواناو به صورت کامل در هوا باشد، نیروی درگ بیشتری نسبت به حالت بافاصله از سطح زمین دارد. همچنین افزایش ارتفاع از سطح زمین باعث افزایش نیروی درگ می شود که این موضوع بیانگر مفید بودن پدیده اثر سطح است. در این حالت نیروی درگ تا سی درصد قابل تقلیل است. افزایش سرعت باعث افزایش درگ اصطکاکی به دلیل افزایش اغتشاشات جریان و در نتیجه باعث افزایش پسای کلی می شود. باتوجه به کانتورهای فشار می توان فن های مربوط به هاورینگ و پیشرانس را در مناطق پر فشار تعبیه کرد تا به دلیل وجود مقدار هوای بیشتر در این مناطق راندمان آنها بالاتر برود.

افزایش عمق کانال در صورتی که عدد فرود بحرانی نباشد، باعث افزایش ضریب پسا می شود. در شرایطی که عدد فرود نزدیک به یک باشد؛ یعنی جریان بحرانی داشته باشیم، مقدار نیروی درگ کاهش می یابد.

هرچه طول موج افزایش یابد، نیروی درگ نیز افزایش می یابد. با افزایش ارتفاع موج و در نتیجه بالارفتن قله موج به دلیل کاهش مقدار هوای ورودی بین سطح آب و سطح زیرین هواناو نیروی درگ کاهش می یابد. افزایش دوبرابری طول موج باعث افزایش حدود ۸۰ درصدی نیروی درگ می شود.



شکل (۲۲): تغییرات نیروی درگ بر حسب ارتفاع موج در طول موج  $\Delta m$

در ادامه نتایج به دست آمده برای تحلیل دوفازی در جدول ۳ به صورت خلاصه آمده است.

جدول (۳): نتایج تحلیل دو فازی

درگ (نیوتن)	سرعت (km/h)	طول موج (متر)	ارتفاع موج (متر)	عمق (متر)	نوع شبه سازی
۱۲۵	۵۰	۵	۰.۱	۲۰	بررسی اثر سرعت
۲۵۰	۶۰	۵	۰.۱	۲۰	
۲۷۱	۷۰	۵	۰.۱	۲۰	
۲۱۵	۵۰	۵	۰.۰۵	۱۰	بررسی اثر عمق
۱۶۰	۵۰	۵	۰.۰۵	۲۰	
۲۲۱	۵۰	۵	۰.۰۵	۳۰	
۲۵۱	۵۰	۵	۰.۰۵	۴۰	
۱۴۹	۵۰	۲.۵	۰.۰۵	۲۰	بررسی اثر طول موج
۱۵۱	۵۰	۴	۰.۰۵	۲۰	
۱۶۰	۵۰	۵	۰.۰۵	۲۰	
۲۱۰	۵۰	۱.۵	۰.۰۱۵	۲۰	بررسی اثر ارتفاع موج
۱۹۶	۵۰	۱.۵	۰.۰۲	۲۰	
۱۹۱	۵۰	۱.۵	۰.۰۳	۲۰	
۱۵۶	۵۰	۵	۰.۰۲۵	۲۰	
۱۴۹	۵۰	۵	۰.۰۵	۲۰	
۱۲۵	۵۰	۵	۰.۱	۲۰	

## ۸- نتیجه گیری

در این مقاله درگ هواناو در سرعت های مختلف و در سه حالت محاسبه شده است. حالت اول شناور کاملاً مغروق در هوا، دوم شناور بالاتر از سطح زمین و سوم با در نظر گرفتن امواج در زیر شناور. در حالت های دوم و سوم مدل سازی

determination of the force applied to the air cushion. 29th Annual International Conference of Iranian Association of Mechanical Engineers and 8th International Conference on Thermal Power Plants Industry; Tehran2020.

[16] Amini S, Rostami Varnousfaaderani M, Dehghan Manshadi M, Norouzi H. Numerical simulation of submarine motions in three degrees of freedom in irregular waves for drag force estimation. *Fluid Mechanics & Aerodynamics*. 2024;12(2):69-83.

[17] Farajollahi AH. Experimental Investigation of the Effects of Arrangement of Vortex Generators on Behavior of a Vortical Flow around an Axisymmetric Body. 2019.

[18] Shivachev E, Khorasanchi M, Day S, Turan O. Impact of trim on added resistance of KRISO container ship (KCS) in head waves: An experimental and numerical study. *Ocean Engineering*. 2020;211:107594.

[19] Hsiun C-M, Chen Co-K. Aerodynamic characteristics of a two-dimensional airfoil with ground effect. *Journal of aircraft*. 1996;33(2):386-92.

[20] Pasandidehfard M-, Saberinia M, Izadfar M. Analysis of Submerged 2D Hydrofoils with Finite Depth. *Fluid Mechanics & Aerodynamics Journal*. 2020;8(2):1-17 (in persian).<https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.23223278.1398.8.2.1.4>

[21] Chun H, Chang R. Turbulence flow simulation for wings in ground effect with two ground condition fixed and moving ground. 2003.

[22] ITTC, editor Recommended

Procedures and Guidelines, Resistance Test. 26th ITTC Resistance Committee, 75-02-02-01; 2011.

[1] Sadeghizadeh MR, Hemayati M. Flying Boats. Tehran. 2005. (In Persian) Malek Ashtar University of Technology.

[2] Yun L, Bliault A, Doo J. WIG craft and ekranoplan. *Ground Effect Craft Technology*. 2010;2.

[3] Saeid NH, Yunus E, Fei OC. CFD simulation of air flow around a hovercraft. 2014.

[4] Zare K, Mohammadi A, Zarei M. Effect of air outlet hole parameter on shape and intensity of closed padding change in havercrafts. 17th Marine Industry Conference2015.

[5] Kohansal A, Mousavi M. Design of Havercraft. 17th Marine Science Conference; 2015; Bushehr University1394.

[6] Rajabi I, Behzadi M, Khalili A. simulation and aerodynamic analysis of air hovercraft hovering. 17th Marine Labor Conference; Malek Ashtar University2016. (In Persian).

[7] Milaadipour M, Parsa MI, Rabi A. Numerical Investigation of the Effect of the Conductor Blade on the Distribution of Pressure and Lifting Capacity of Havercraft. Conference on New Technologies in Science; Mazandaran University2017. (In Persian).

[8] Pogorelova AV. Wave resistance of an air-cushion vehicle in unsteady motion over an ice sheet. *Journal of applied mechanics and technical physics*. 2008;49:71-9.

[9] Qian J-l, Dai C. Unsteady flow structure of an airfoil in ground effect. *Journal of Shanghai University (English Edition)*. 2010;14(3):228-34.

[10] Cohen M, Miloh T, Zilman G. Wave resistance of a hovercraft moving in water with nonrigid bottom. *Ocean engineering*. 2001;28(11):1461-78.

[11] Ahmed N, Goonaratne J. Lift augmentation of a low-aspect-ratio thick wing in ground effect. *Journal of Aircraft*. 2002;39(2):381-4.

[12] Saeed-Jame A-M, Agoes-Priyanto N-A. AERODYNAMIC CHARACTERISTICS OF A COMPOUND WING DURING GROUND EFFECT.

[13] Pogorelova A, Kozin V, editors. Effect of current on wave resistance of an air cushion vehicle. *Journal of Physics: Conference Series*; 2019: IOP Publishing.

[14] Mantle P. Maximum lift-drag ratio of air cushion craft. *The Aeronautical Journal*. 2017;121(1239):693-709.

[15] Petoft H, Rahi A, Fakhari V. simulation of the air flow inside the hovercraft system and