شبیه‌سازی برخورد گوه با سیال غیرنیوتنی هرشل‌بالکلی-دیلاتانت به کمک روش حل عددی RANS

شهاب نیر[۱] ، خسرو حسینی[۲*]، مهران خیرخواهان[۳]

[۱] دانشجوی دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، sh.nayyer@semnan.ac.ir
[۲] دانشیار و عضو هیأت علمی گروه مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، khhoseini@semnan.ac.ir
[۳] دانش آموخته دکتری مهندسی آب و سازه‌های هیدرولیکی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، mehran.kheirkhahan@semnan.ac.ir

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۷/۱۲
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

کلمات کلیدی:
ضریب ویسکوزیته سیال
توان نرخ کرنش
چگالی سیال
پدیده Shear Thickening
مسأله Ditching

چکیده

در مسأله اندرکنش جسم صلب و سیال از روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی برای شبیه‌سازی برخورد جسم متحرک به سیال‌ها استفاده شده است. برخورد گوه با توجه به خصوصیات سیال دیلاتانت و تأثیر تغییر این خصوصیات بر شرایط حرکت گوه در تحقیق حاضر با استفاده از مدل عددی Flow-3D مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه نتایج تحلیل حاضر با نتایج مشاهداتی نشان داد که این مدل با خطای متوسط ۰/۵ درصد و R^2 =۰/۹۹۹، توانایی مناسبی در شبیه‌سازی این نوع سیال دارد. بررسی اثر تغییرات خصوصیات سیال بر حرکت گوه و توزیع سرعت و فشار در سیال نیز نشان داد که تغییر چگالی بیشترین تأثیر را در تغییر سرعت گوه دارد. به نحوی که با افزایش ۲/۸ برابری آن سرعت نفوذ گوه در حدود ۱۶ درصد کاهش می‌یابد. همچنین مشخص شد که با کاهش فاصله برخورد بین دو گوه، سرعت نفوذ گوه‌ها به داخل سیال تا ۸ درصد کاهش می‌یابد.

Wedge Impact Simulation into the Non-Newtonian Herschel-Bulkley Dilatant Fluid with RANS Numerical Method

Shahab Nayyer[1], Khosrow Hosseini [2*], Mehran Kheirkhahan[3]

[1]*PhD student in water engineering and hydraulic structures, faculty of civil engineering, Semnan university; sh.nayyer@semnan.ac.ir*
[2]*Associate Prof. in water engineering and hydraulic structures, faculty of civil engineering, Semnan university; khhoseini@semnan.ac.ir*
[3]*PhD in water engineering and hydraulic structures, faculty of civil engineering, Semnan university; mehran.kheirkhahan@semnan.ac.ir*

ARTICLE INFO

Article History:
Received: 4 Oct. 2019
Accepted: 8 Feb. 2020

Keywords:
Fluid viscosity coefficient
Strain rate power
Fluid density
Shear thickening phenomenon
Ditching problem

ABSTRACT

In the interaction of rigid body and fluid problem different methods and techniques are used for simulating the impact of a moving object in the fluids. So, wedge impact model is investigated according to the Dilatant fluid characteristics and the effect of these features on moving wedge using flow-3D software. Comparison of present analysis and observational results showed that this model with 0.5 percent mean error and with R^2=0.999 has good performance in simulating this kind of fluid. Also Studying the effect of fluid characteristics changes on moving wedge and velocity and pressure distribution in fluid indicated that variety of density has maximum effect on the wedge velocity change, so that with 2.8 times increase in density, velocity of wedge decreases about 16 percent. Also, it was found that with decreasing in collision distance between two wedges, wedges penetration velocity into fluid decreases up to 8 percent.

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.9.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.1]

۱ – مقدمه

بررسی اندرکنش نیروها بین جسم صلب با سیال‌های مختلف، به دلیل ضربات ناگهانی، محکم و تأثیرگذار، همواره مورد توجه محققان و مهندسان بوده است. لذا بررسی شدت و چگونگی تغییرات این اندرکنش جزء موضوعات مهم در طراحی سازه‌ها، کشتی‌ها، هواپیما-های آب‌نشین و نظایر آن است. سیال‌های مختلف با توجه به خصوصیات رئولوژی[1] خود اثرات متفاوتی بر اجسام دارند که بررسی اثر هریک از این خصوصیات به صورت مجزا کمک می‌کند تا رفتار سیال بهتر پیش‌بینی شود. براساس رفتار، سیالات به دو گروه نیوتنی و غیرنیوتنی تقسیم می‌شود. اگر بین نرخ کرنش و تنش رابطه خطی برقرار باشد سیال نیوتنی که شیب این خط ویسکوزیته سیال نیوتنی می‌باشد و هر حالتی غیر از آن سیال غیر نیوتنی است. وجود تنش آستانه حرکت نیز مؤید بر غیرنیوتنی بودن سیال نیز است. دما و فشار از عوامل تأثیرگذار در ویسکوزیته سیال هستند که اگر ثابت باشند ویسکوزیته نیز ثابت خواهد بود. سیالاتی که ویسکوزیته آن‌ها علاوه بر وابستگی به دما و فشار به شدت تغییر شکل اعمال شده نیز بستگی دارد سیالات غیرنیوتنی هستند. بسیاری از سیالات مورد استفاده در صنعت و موجود در طبیعت غیرنیوتنی هستند.

با توجه به شرایط سیال غیرنیوتنی نسبت به زمان، این نوع سیال به دو گروه وابسته به زمان که در آن نرخ کرنش ذرات سیال به مقدار تنش‌برشی و مدت زمان برش و همچنین سیال غیرنیوتنی مستقل از زمان که تنها به تنش برشی هر ذره وابسته است، تقسیم می‌شود. سیالاتی که با گذشت زمان ویسکوزیته ظاهری ($\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$) آن‌ها کم می‌شود، سیالات تیکسوتروپی[2] سیالاتی که با گذشت زمان ویسکوزیته ظاهری آن‌ها افزایش می‌یابد، رئوپکتیک[3] و سیالاتی که علاوه بر ویسکوزیته، خواصی که مربوط به الاستیسیته جامدات باشد نیز از خود نشان می‌دهند، ویسکوالاستیک[4] نامیده می‌شوند.

در سیال اتساعی[5] که مستقل از زمان است با افزایش نرخ کرنش، ویسکوزیته ظاهری افزایش می‌یابد در حالی که برای سیال شبه-پلاستیک[6] کاهش می‌یابد

در برخی از سیالات مستقل از زمان تا مقدار تنش خارجی وارد بر سیال از تنش تسلیم بیشتر نشود سیال جاری نخواهد شد که به آن سیال ویسکوپلاستیک[7] می‌گویند. رفتار این سیال (تغییرات تنش-برشی- نرخ کرنشی) بعد از جاری شدن نیز حائز اهمیت است که می‌تواند خطی (نیتوتنی) و غیر خطی (غیرنیوتنی) باشد. در سیال ویسکوپلاسیتک اگر ویسکوزیته ظاهری با افزایش نرخ کرنش کاهش یابد به آن سیال هرشل-بالکلی‌شبه‌پلاسیتک گفته می‌شود و اگر ویسکوزیته ظاهری آن با افزایش نرخ کرنش افزایش یابد، سیال هرشل-بالکلی دیلاتانت نامیده می‌شود [۱ و ۲].

تفاوت رفتار سیال‌های نیوتنی و غیرنیوتنی باعث شده است تا بررسی این سیال‌ها مورد توجه و مطالعه قرار گیرد. به طور مثال تفاوت رفتار سیال در برابر برخورد با یک جسم دارای سرعت مانند فرود اضطراری هواپیما روی سطح آب دریا و یا حرکت اجسام متحرک در داخل این سیالات نظیر حرکت شناورها و یا زیر دریایی‌ها و تغییرات سرعت در این اجسام از نمونه‌های واقعی مسائل مربوط به سیال غیرنیوتنی است. مطالعه آزمایشگاهی و عددی نظیر روش هیدوردینامیک ذرات هموار در مسأله برخورد گوه به سیال نیوتنی و غیرنیوتنی با توجه به اهمیت آن همواره مورد توجه محققین مختلفی بوده است که برخی از مهم‌ترین آن‌ها در ادامه مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

محققان بسیاری نظیر فاسانلا و همکاران [۳] ، پنتکوت و همکاران [۴] آنهیلاری و همکاران [۵، ۶] از روش هیدرودینامیک ذرات هوار (SPH) برای مدلسازی فرود اضطراری هواپیما (Ditching) روی سطح آب استفاده کرده‌اند. این مطالعات شامل شبیه‌سازی سه‌بعدی سیال و توزیع فشار و صحت‌سنجی با مدل آزمایشگاهی بوده است. پدیده برخورد گوه با سطح سیال توسط اوگر و همکاران [۷] به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شد. ایشان جهت بررسی نیروی وارد بر گوه با استفاده از شبکه غیریکنواخت، از میانیابی فشار در یک سطح عمود بر سطح گوه و تصویرسازی ذرات سیال به روی سطح گوه استفاده کردند.

یان و ما [۸] رویکرد QALE-FEM را بر اساس تئوری پتانسیل غیرخطی جهت حصول به اندرکنش موج و جسم دوبعدی شناور استفاده کردند. گونگ و همکاران [۹] با استفاده از شرط مرزی غیرانعکاسی[8] جهت کاهش انعکاس صدا از مرز و معادله حالت جهت محاسبه فشار بر روی سطح گوه، پدیده برخورد گوه با سطح سیال را شبیه‌سازی کردند. پانسیرولی [۱۰] چندین مطالعه مربوط به SPH را خلاصه نویسی و گردآوری کرد و بیان داشت که صحت‌سنجی نتایج همچنان در سطح استاندارد دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) نیست.

روش SPH برای نواحی سیال و روش اجزاء محدود برای مدلسازی نواحی سازه‌ها در مطالعات مختلف استفاده شده است. اگرچه مطالعات محدودی در مورد استفاده از نواحی مختلف در یک روش محاسباتی وجود دارد، اما در مقایسه با نتایج آزمایشگاهی، قادر به ارائه نتایج دقیق بوده است [۱۱ و ۱۲]. روش MLM[9] که بر اساس روش ونگر هست برای تحلیل ورود گوه نامتقارن به داخل آب استفاده شد. این کار با مقایسه حل کامل غیر خطی و مدل MLM اعتبار سنجی شد [۱۳]. در سال ۲۰۱۳ از ترکیب روش‌های اویلری و لاگرانژی که ابتداً توسط ویلا [۱۴] توسعه داده شده بود جهت شبیه‌سازی برخورد گوه به سیال و محاسبه نیروی ذرات مرزی، توسط کوکووینیس و همکاران [۱۵] استفاده شد. گردابی و نیک‌سرشت [۱۶] نیز با استفاده از روش WCSPH[10] برخورد گوه به سیال نیوتنی و غیرنیوتنی از نوع هرشل‌بالکلی-دیلاتانت را به صورت دوبعدی مدل کردند. ایشان با تغییر سه پارامتر لزجت، تنش تسلیم و توان نرخ

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.9.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.1]

کرنش در سیال هرشل-بالکلی، مقادیر نیرو، فشار و سرعت گوه را مقایسه کردند.

در تحقیقی مسأله برخورد با آب برای مقطع گوه و کشتی با استفاده از نرم‌افزار Open-Foam و مدل عددی IBM[11] شبیه‌سازی شد و محققان بیان داشتند که نتایج هر دو مدل عددی در مقایسه با آزمایشگاهی رضایت بخش است [۱۷].

شا و همکاران [۱۸] برخورد آب با گوه صلب را در حالت دوبعدی به صورت آزمایشگاهی و عددی بررسی کردند. ایشان در مدلسازی عددی از هیدرودینامیک ذرات هموار و شبکه‌های حل لاگرانژی در نرم‌افزار LS-DYNA استفاده کردند. نتایج ایشان نشان داده که این تکنیک از دقت بالایی برخوردار است به نحوی که به عنوان یک روش مناسب در شبیه‌سازی فورد اضطراری هواپیما در آب قابل استفاده است. در تحقیقی دیگر شادمانی و قدیمی [۱۹] با استفاده از روش اجزا محدود- حجم محدود برخورد گوه نامتقارن با زوایای مختلف را شبیه‌سازی کردند. ورود متقارن و نامتقارن گوه به داخل آب را با استفاده از روش SPH در سال ۲۰۱۴ بررسی شد. نتایج نشان داد که اگرچه توزیع فشار از نتایج سایر تحقیقات تبعیت می‌کند، اما موقعیت فشار اوج محاسباتی با سایر مطالعات متفاوت است [۲۰].

شبیه‌سازی عددی هیدرودینامیک جریان توسط نهاوندیان و ایزدی [۲۲] حول بدن آبزیان در سیال ویسکوز به عنوان یکی از چالشی‌ترین مباحث دینامیک سیالات محاسباتی عنوان شد که ایشان با استفاده از نرم‌افزار Fluent انجام دادند. ایشان به صورت دو بعدی تغییرات ضرایب درگ و لیفت و اثر حرکت بدن آبزی بر میدان سرعت و فشار را مورد بررسی قرار دادند و بیان داشتند که فرکانس حرکت دلفین و طول متحرک دُم دلفین بر این پارامترها اثر قابل توجهی دارد. توزیع فشار بر روی گوه هنگام ورود به آب به روش تست مدل نیز یکی دیگر از تحقیقات انجام شده در این زمینه است. نتایج محققان در این پژوهش نشان داد که با کاهش سرعت گوه، محل وقوع بیشترین فشار تغییر نکرده اما مقدار بیشینه فشار کاهش می‌یابد [۲۳]. برخورد پرتابه استوانه‌ای به سطح آب به منظور بررسی رفتار پرتابه و تنش‌های وارده به آن توسط مقدم و همکاران [۲۴] انجام شد. ایشان با استفاده از روش اویلری-لاگرانژی و نرم‌افزار LS-DYNA مدلسازی را انجام داده و بیان داشتند که که تغییر سرعت پرتابه در افزایش کرنش پلاستیک، تنش اثر گذار است و همچنین کاهش سرعت پرتابه در اثر برخورد با آب مشخص است.

همانطور که ملاحظه می‌شود روش‌ها و تکنیک‌های مختلفی جهت شبیه‌سازی برخورد جسم متحرک (گوه) به سیال‌های نیوتنی و غیرنیوتنی استفاده شده است. این روش‌ها عموماً نیاز به کد نویسی دقیق و صرف وقت زیاد دارند، این موضوع در حالی است که نرم-افزارهای مناسب دوبعدی و سه‌بعدی جهت شبیه‌سازی سیال‌های مختلف و اجسام صلب و اندرکنش آن‌ها منتشر شده است. لذا با توجه به پهنه وسیعی از نتایج آزمایشگاهی موجود، همچنین ضرورت مسأله و با توجه به سرعت مدلسازی و دقت، نیاز به مطالعات بیشتر، دقیق‌تر و روش‌های حل عددی دیگر در مدل برخورد جسم صلب به سیال نیوتنی و غیر نیوتنی و اعتبارسنجی آن احساس می‌شود. لذا در پژوهش حاضر با استفاده از مدل عددی FLOW-3D این مسأله شبیه‌سازی شده تا به عنوان یک روش حل عددی سریع و کارامد مورد بررسی و تحقیق قرار گیرد.

۲- شرح مسئله

در پژوهش حاضر برخورد جسم صلب به سیال نیوتنی و غیرنیوتنی از نوع هرشل‌بالکلی- دیلاتانت با استفاده از نرم‌افزار FLOW-3D به صورت دوبعدی شبیه‌سازی شده است. تاکنون شبیه‌سازی برخورد گوه با سیال غیرنیوتنی توسط این نرم‌افزار انجام نشده، در حالی که یکی از کاربردهای این برنامه شبیه‌سازی سیالات غیرنیوتنی است. در تحقیق حاضر از نتایج گردابی و نیک‌سرشت [۱۶] جهت صحت-سنجی و مقایسه استفاده شد. در نهایت تأثیر تغییرات نرخ کرنش، چگالی و ویسکوزیته بر سرعت جسم صلب، شکل سیال، سرعت و فشار آن نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت. برخورد دو گوه در کنار یکدیگر با سیال غیر نیوتنی و با فاصله‌های مختلف و تأثیر آن‌ها بر یکدیگر که نمونه‌ای از مدلسازی تیر فرود هواپیمای آب‌نشین است در این تحقیق شبیه‌سازی و بررسی شده است.

۳- روش حل

۳-۱- معادلات حاکم بر مدل عددی

نرم‌افزار Flow-3D یک نرم افزار نیرومند تحلیلی در زمینه دینامیک سیالات محاسباتی می‌باشد. این مدل شامل الگوهای فیزیکی بسیاری از جمله آشفتگی، محیط‌های متخلخل، آبشستگی، انواع سیالات، اجسام صلب و ... است. این نرم افزار قابلیت تحلیل سه‌بعدی و دوبعدی میدان جریان را دارد و محدوده کاربردی بسیار وسیعی در مسائل مربوط به سیالات دارد. یکی از قابلیت‌های این برنامه در زمینه آنالیزهای هیدرولیکی، توانایی در استفاده از روش جزء حجمی[12] در مدل کردن جریان‌های با سطح آزاد است که مسائل موجود در روش‌های مبتنی بر آزمون و خطا را برطرف کرده است. این روش، حجم سیال در هر سلول مستطیلی را ثبت می‌کند. این حجم با احجام سلول‌های مجاور مقایسه می‌شود تا شیب، موقعیت و انحنای سیال درون سلول مشخص شود. این نرم‌افزار از دو روش عددی VOF[13] و FAVOR[14] برای شبیه‌سازی هندسی بهره می‌گیرد [۲۱]. همانطور که بیان شد یکی از کاربردهای این نرم‌افزار مدلسازی سیال با مشخصات مختلف است. مدل Flow-3D از روابط مختلفی نظیر تابع کاررائو[15] و تابع توانی[16] جهت حل ویسکوز استفاده می‌کند. در تحقیق حاضر معادلات حاکم بر جریان سیال شامل معادله

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.9.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.1]

پیوستگی (رابطه ۱)، اندازه حرکت (رابطه ۳) و رابطه تابع توانی (رابطه ۴) است. معادله پیوستگی در رابطه (۱) ارائه شده است به نحوی که برای سیال تراکم‌ناپذیر که ρ ثابت است رابطه (۱) به رابطه (۲) تغییر می‌کند. معادله حرکت برای اجزا سرعت سیال (u, v, w) در سه جهت نیز به همان صورت رابطه ناویر-استوکس به همراه چند بخش اضافی است که در رابطه (۳) ارائه شده است.

$$v_f\frac{\partial p}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u A_x)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v A_y)}{\partial y}=R_{DIF}+R_{SOR} \quad (۱)$$

$$\frac{\partial(uA_x)}{\partial x}+\frac{\partial(vA_y)}{\partial y}=\frac{R_{SOR}}{\rho} \quad (۲)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial u}{\partial x}+vA_y\frac{\partial u}{\partial y}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x}+G_x+f_x-b_x \quad (۳)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t}+\frac{1}{V_F}\left\{uA_x\frac{\partial v}{\partial x}+vA_y\frac{\partial v}{\partial y}\right\}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial y}+G_y+f_y-b_y$$

$$\mu=\mu_0\left(\frac{1}{2}e_{ij}e_{ij}\right)^{\frac{n-1}{2}} \quad (۴)$$

$$e_{ij}=\frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right) \quad (۵)$$

که در این روابط، V_F کسر حجمی جریان، ρ چگالی سیال، u و v اجزا سرعت به ترتیب در جهت‌های x و y، مقادیر A_x و A_y کسرهای سطحی برای جریان در دو جهت، R_{DIF} عبارت پخش آشفتگی و R_{SOR} منبع جرم هستند. همچنین پارامترهای G، f و b به ترتیب شتاب بدنه، شتاب ویسکوز و اتلاف جریان در محیط متخلخل یا صفحات متخلخل است. در رابطه ۴ و ۵، μ ویسکوزیته محاسباتی در سیال، μ_0 ثابت ویسکوزیته، e_{ij} نرخ کرنش محاسباتی از سرعت سیال (رابطه ۵) و n شاخص رابطه تابع توانی است.

به دلیل پیچیدگی در تعریف مساله و مشخصات فیزیکی سیالهای مختلف استفاده شده و همچنین در راستای تمرکز بر اندرکنش بین گوه و سیال، از مدل حل جریان لایه‌ای[۱۷] استفاده شده است.

سیال‌هایی با مشخصات درج شده در جدول ۱ که دارای چگالی ۱۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب هستند جهت اعتبارسنجی و مدلسازی استفاده شده است.

جدول۱- مشخصات سیالات استفاده شده جهت اعتبار سنجی

نوع سیال	ضریب ویسکوزیته ($Pa.s^N$)	تنش تسلیم (Pa)	توان نرخ کرنش
سیال ۱	۰/۰۰۰۲	10	۱/۶
سیال ۲	۰/۰۰۰۲	200	۱/۶
سیال ۳	۰/۰۰۰۲	200	۱/۳۵
سیال ۴	۰/۰۰۰۱	10	۱/۶
سیال ۵	۰/۰۰۱	-	-

۳-۲- مدلسازی گوه و سیال

جهت حل مسأله برخورد، یک مخزن به عرض ۲/۴ متر و ارتفاع اولیه سیال ۱/۲ متر در نظر گرفته شده است. جهت برخورد جسم متحرک از گوه‌ای به جرم ۲۴۱ کیلوگرم و زاویه راس ۱۲۰ درجه و طول قاعده ۵۰ سانتی‌متر استفاده شد. سرعت اولیه گوه ۶/۰۹ متر بر ثانیه است که در لحظه برخورد با سیال ۶/۱۵ متر بر ثانیه می‌شود. مدل‌های مختلفی از سیال با مشخصات متفاوت جهت بررسی تأثیر تغییر هریک از پارامترهای ضریب ویسکوزیته، چگالی و توان نرخ کرنش بر سرعت برخورد و حرکت گوه در سیال مورد استفاده قرار گرفت. در این شبیه‌سازی‌ها مقادیر ضریب ویسکوزیته در بازه ۰/۰۰۰۲ تا ۰/۲، چگالی ۱۰۰۰ تا ۲۸۰۰ و توان نرخ کرنش از ۰/۰۵ تا ۱/۶ در مدلسازی‌های مختلف در نظر گرفته شده است. این ابعاد و مقادیر بر اساس پژوهش گردابی و نیک‌سرشت [۱۶] انتخاب شده است.

مدل برخورد گوه متحرک با سیال در تحقیق حاضر با سه شبکه حل مختلف یکنواخت با تعداد سلول‌های ۵۰۴۰۰، ۵۵۲۶۰ و ۶۳۰۰۰ مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل ۱ مدل گوه و میدان حل را نشان میدهد. نتایج حاصل از این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد مش مقادیر خطا به ترتیب از ۱/۶۱ درصد به ۰/۱ درصد و ۰/۰۵ درصد کاهش می‌یابد. جهت بررسی و ارزیابی مش با کمترین میزان خطا از روش‌های آماری ارائه شده در رابطه ۶ نیز استفاده شد که مقادیر آن شامل R^2=0.999، RMSE=0.06 و MAE=0.04 بوده، که مربوط به میدان حل با ۶۳۰۰۰ سلول است.

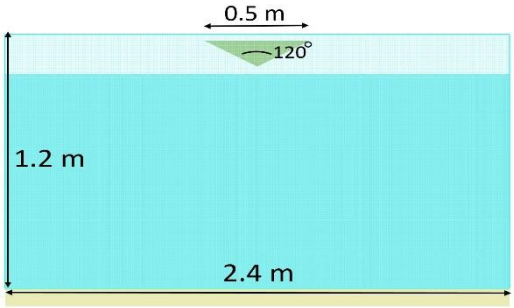
$$R^2=1-\left[\frac{\sum_{i=1}^{N}(o-p)^2}{\sum_{i=1}^{N}o^2-\left(\frac{\sum_{i=1}^{N}P^2}{N}\right)}\right] \quad (۶\text{-الف})$$

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(o-p)^2}{N}} \quad (۶\text{-ب})$$

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.9.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.1]

$$MAE = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}|o - p| \qquad (ج-۶)$$

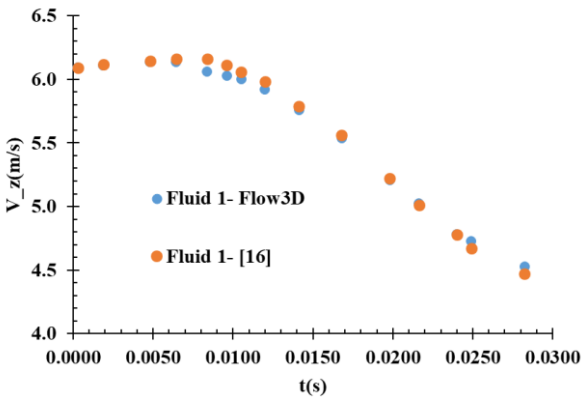
که در رابطه (۶)، O مقادیر گزارش شده توسط گردابی و نیک‌سرشت [۱۶] و P مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل عددی هستند.



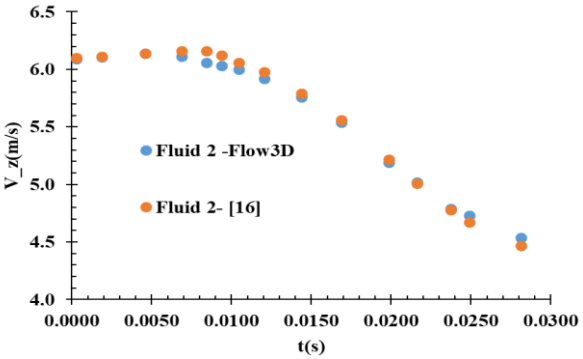
شکل ۱- میدان حل، گوه و سیال مدل شده در نرم‌افزار Flow-3D

۴- تحلیل نتایج

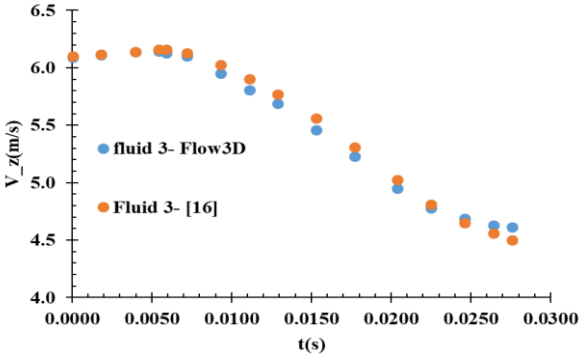
در مطالعه انجام شده توسط گردابی و نیک‌سرشت [۱۶]، مقادیر تغییرات سرعت گوه بعد از برخورد و ورود به سیال ارائه شده است. در تحقیق حاضر نیز با بررسی شرایط استقلال شبکه حل، مدلسازی سیال‌های جدول ۱ جهت بررسی سرعت حرکت گوه در سیال انجام شد. مقایسه مقادیر محاسبه شده توسط گردابی و نیک‌سرشت [۱۶] با مقادیر محاسباتی توسط مدل عددی Flow-3D در شکل ۲ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مدل عددی مورد استفاده در تحقیق حاضر، Flow-3D، دارای دقت بالایی است به نحوی که میزان خطا در سیال ۱ تا سیال ۵ به ترتیب برابر با ۰/۰۵، ۰/۰۸، ۰/۴، ۱/۱۷ و ۰/۷ درصد می‌باشد. لذا در ادامه با توجه به این بررسی و دقت قابل قبول و مناسب مدل عددی Flow-3D، سیال‌های مختلف شبیه‌سازی و بررسی شده‌اند.



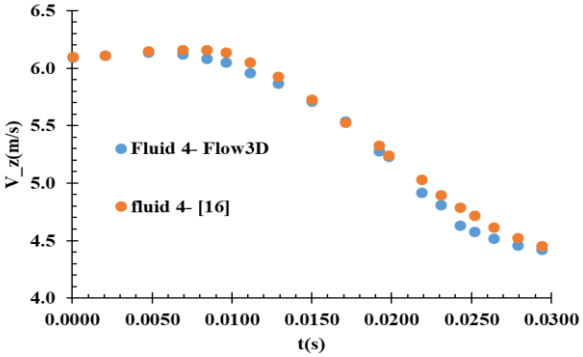
سیال ۱



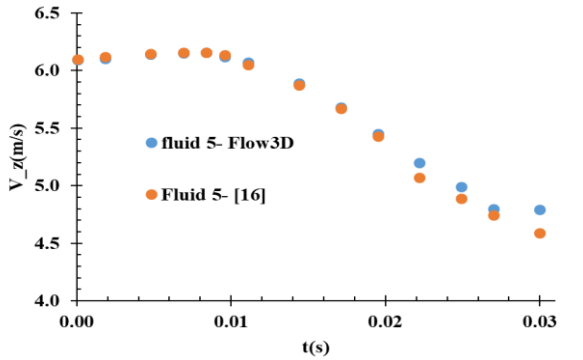
سیال ۲



سیال ۳



سیال ۴



سیال ۵

شکل ۲- مقایسه تغییرات سرعت حرکت گوه در سیال با مرجع

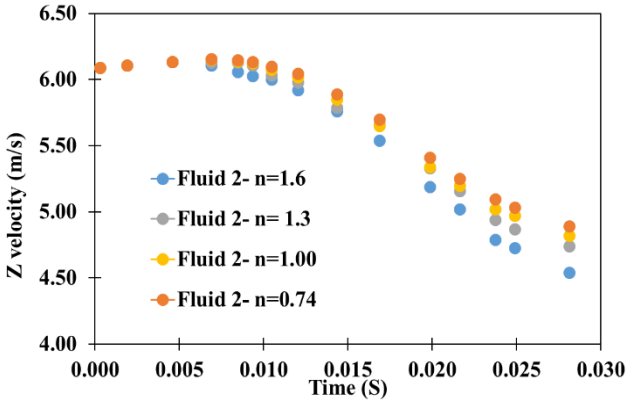
جهت بررسی تأثیر تغییرات توان نرخ کرنش، سیال ۲ به عنوان مرجع انتخاب شد و مقادیر مختلف توان برای آن بررسی و شبیه‌سازی شد. نتایج نشان داد که با کاهش حدود ۹۵ درصدی توان نرخ کرنش از

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.9.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.1]

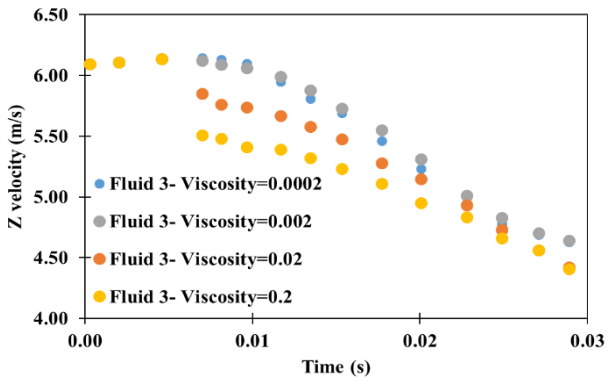
۱/۶ به ۰/۰۵ مقادیر سرعت گوه در سیال نهایتاً تا ۳ درصد به طور متوسط افزایش می‌یابد. نتایج مربوط به مقادیر توان نرخ کرنش n=1.6، n=1.3، n=1 و n=0.74 در شکل ۳ نمایش داده شده است. همانطور که مشخص است تا قبل از برخورد گوه به سیال، مقادیر سرعت گوه در همه شبیه‌سازی‌ها یکسان و در حدود ۶/۱۶ متر بر ثانیه است، اما به محض برخورد گوه به سیال سرعت آن کاهش می‌یابد. مقدار این کاهش در سیال‌ها با توان نرخ کرنش مختلف، متفاوت است.

یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار بر تغییرات سرعت گوه در سیال هرشل‌بالکلی-دیلاتانت، ثابت ویسکوزیته است. با تغییر ضریب ویسکوزیته از ($pa.s^N$) ۰/۰۰۰۲ تا ۰/۲، سیال مرجع ۳ مورد بررسی و شبیه‌سازی قرار گرفت. همانطور که در شکل ۴ مشخص است، نتایج نشان داد که نهایتاً در حدود ۶ درصد سرعت گوه تغییر کرده و کاهش می‌یابد.

نکته قابل توجه در این سیال‌ها، افت شدید و ناگهانی سرعت گوه در لحظه برخورد با سیال برای ویسکوزیته‌های ($pa.\ s^N$) ۰/۰۲ و ($pa.\ s^N$) ۰/۲ است، که به دلیل رفتار سیال دیلاتانت و پدیده غلظت برشی[1] است. بعد از مدت کوتاهی که مقادیر کرنش کاهش می‌یابد سرعت گوه به سرعت گوه در حالات دیگر نزدیک می‌شود. زمانی که این سیال غیرنیوتنی در حالت عادی است و هیچ تنش و نیرویی به آن اعمال نمی‌شود، خواص آن بسیار مشابه با مایعات است، ولی اگر نیروی زیادی به آن اعمال شود ویسکوزیته آن افزایش می‌یابد و رفتاری مانند یک جامد از خود نشان می‌دهد، یعنی با افزایش آهنگ کرنش، مقاومت آن افزایش می‌یابد. این پدیده به وضوح در شکل ۴ مشخص است.



شکل ۳- مقایسه تغییرات مقادیر سرعت حرکت گوه در سیال با توجه به تغییرات توان نرخ کرنش



شکل ۴ - مقایسه تغییرات مقادیر سرعت حرکت گوه در سیال با توجه به تغییرات ثابت ویسکوزیته ($pa.s^N$)

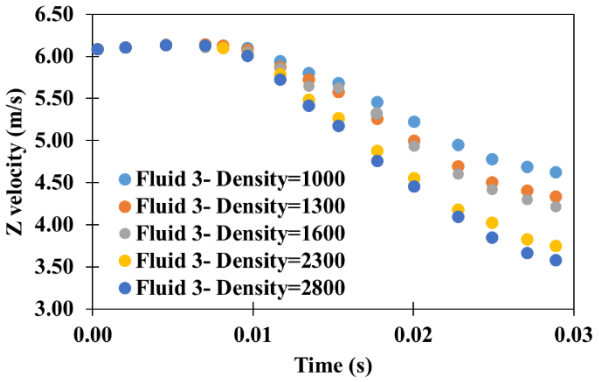
با بررسی اثر تغییرات توان نرخ کرنش و ویسکوزیته، مشاهده شد که این پارامترها تغییر چندانی در مقادیر نهایی سرعت گوه ایجاد نمی‌کند. اما یکی دیگر از پارامترهایی که در تحقیق حاضر بررسی شد، چگالی است. برای سیال مرجع ۳، مقادیر چگالی از ۱۰۰۰ تا ۲۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب (۲/۸ برابر) تغییر داده شد تا اثر این مشخصه بر سرعت گوه نیز بررسی گردد. در شکل ۵ مجدداً مشخص است که تا قبل از برخورد گوه به سیال سرعت گوه در تمام مدل‌ها یکسان بوده است اما با برخورد گوه به سیال تغییرات مقادیر سرعت متفاوت است. به نحوی که با افزایش ۲/۸ برابری چگالی، سرعت گوه تا ۱۶ درصد کاهش یافته است.

تغییرات سطح آزاد سیال در زمان t=0.024 ثانیه در سیال۲، ۳، ۵ و برای سیال‌های منتخب در شکل ۶ و همچنین تغییرات سطح آزاد سیال ۲ ارائه شده توسط گردابی و نیک‌سرشت [۱۶] نیز در شکل ۷ نمایش داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بعد از ۰/۰۲۴ ثانیه راس گوه در سیال ۲ در هردو شکل در تراز ۱/۱ متر قرار دارد. همچنین تغییرات سطح سیال نیز در هر دو شکل مشابه و یکسان است. این نتیجه نیز دقت مدل عددی Flow-3D را در شبیه‌سازی برخورد گوه و سیال مشخص می‌کند.

شکل ۶ (ه) نشان دهنده سطح آزاد سیال ناشی از برخورد گوه با آب (سیال ۵) می‌باشد. مقایسه شکل ۶ (الف) و (ب) که مربوط به سیال ۲ است، نشان می‌دهد که تغییرات توان نرخ کرنش علاوه بر سرعت گوه، تغییر چندانی در سطح آزاد سیال نیز ایجاد نمی‌کند. مقایسه شکل ۶ (ج) با شکل ۶ (د) و (و) که مربوط به سیال ۳ است نشان می‌دهد که تغییرات سطح سیال با تغییر در ویسکوزیته و چگالی بسیار متفاوت خواهد بود.

[1] Shear Thickening

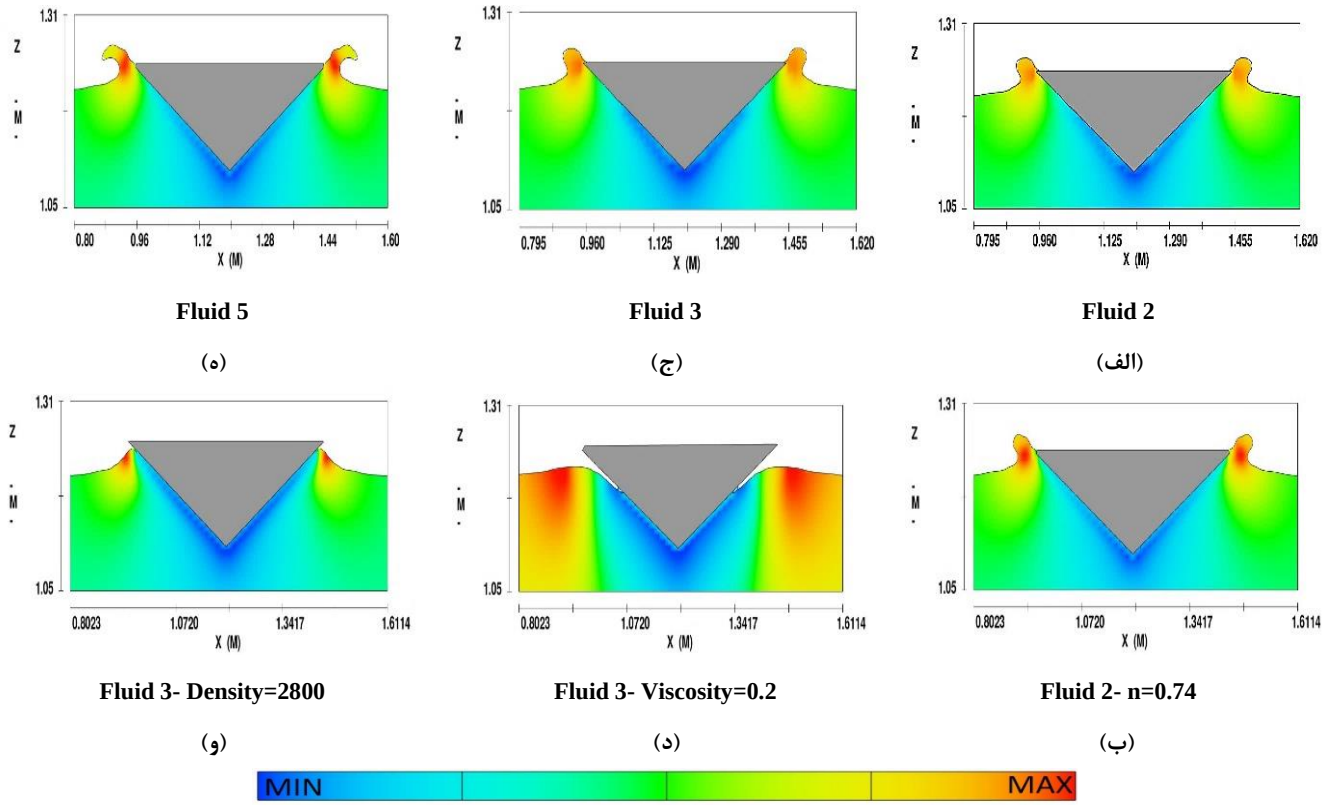
[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.9.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.1]



شکل ۵ - مقایسه تغییرات مقادیر سرعت حرکت گوه در سیال با توجه به تغییرات چگالی (Kg/m^3)

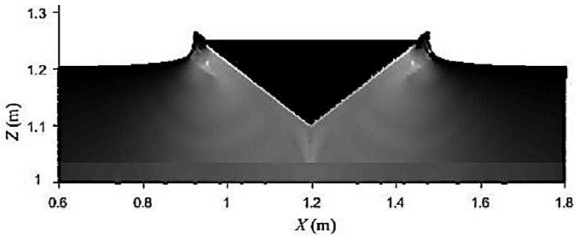
تغییرات فشار و سرعت در سیال۲، ۳، ۵ و منتخب در شکل ۸ نشان داده شده است. سیال‌های مختلف را بر اساس تفاوت آن‌ها نسبت به یکدیگر مقایسه می‌کنیم. سیال ۲ و ۳ (شکل ۸ (الف) و (ب)) تنها تفاوت اندکی در مقدار توان نرخ کرنش دارند. بر همین اساس تفاوت چندانی در محل مقادیر حداکثری و حداقلی سرعت و فشار ندارند، به نحوی که محل پیشانی پرش در هر دو سیال نیز این موضوع را تأیید می‌کند. بیشترین مقادیر سرعت و فشار به ترتیب در پیشانی پرش و سطح تماس گوه با سیال است. مقایسه این دو سیال با سیال ۵ (شکل ۸ (ج)) که آب است نشان می‌دهد که مقادیر حداکثری سرعت در آب بیشتر بوده، به طوری که در زمان مشابه پیشانی پرش مسافت بیشتری را طی کرده است. توزیع فشار حداکثری نیز برای سیال ۵ در نوک گوه قرار دارد اما برای سیال‌های ۲ و ۳ در سطح تماس می‌باشد. توان نرخ کرنش در سیال ۲ مقداری برابر با n=1.6 دارد، با کاهش ۵۰ درصدی این مقدار به n=0.74 (شکل ۸ (د))، محل مقادیر حداکثری سرعت و فشار تغییر نداشته، اما مقدار آن‌ها نیز تغییر کرده و افزایش داشته است. مقایسه محل پیشانی پرش این دو سیال نیز گواه بر این مسأله می‌باشد.

ضریب ویسکوزیته و چگالی سیال ۳ به ترتیب مقداری برابر با ۰/۰۰۰۲($pa.s^N$) و ۱۰۰۰ Kg/m^3 دارد. با تغییر ضریب ویسکوزیته از ۰/۰۰۰۲ ($pa.\ s^N$) به ۰/۲ ($pa.\ s^N$)، مشاهده می‌شود (شکل ۸ (ه)) که سرعت پیشانی پرش سیال به شدت کاهش یافته و مقادیر حداکثری سرعت نیز در محل تماس سطح گوه با سیال ایجاد شده است. محل مقادیر حداکثری فشار نیز در نزدیکی دو رأس کناری گوه شکل گرفته است. همچنین تغییر چگالی (شکل ۸ (و)) نیز در شکل پرش ایجاد شده تأثیر قابل توجهی داشته اما این تأثیر در تغییر شکل به اندازه تغییر ضریب ویسکوزیته نبوده است.

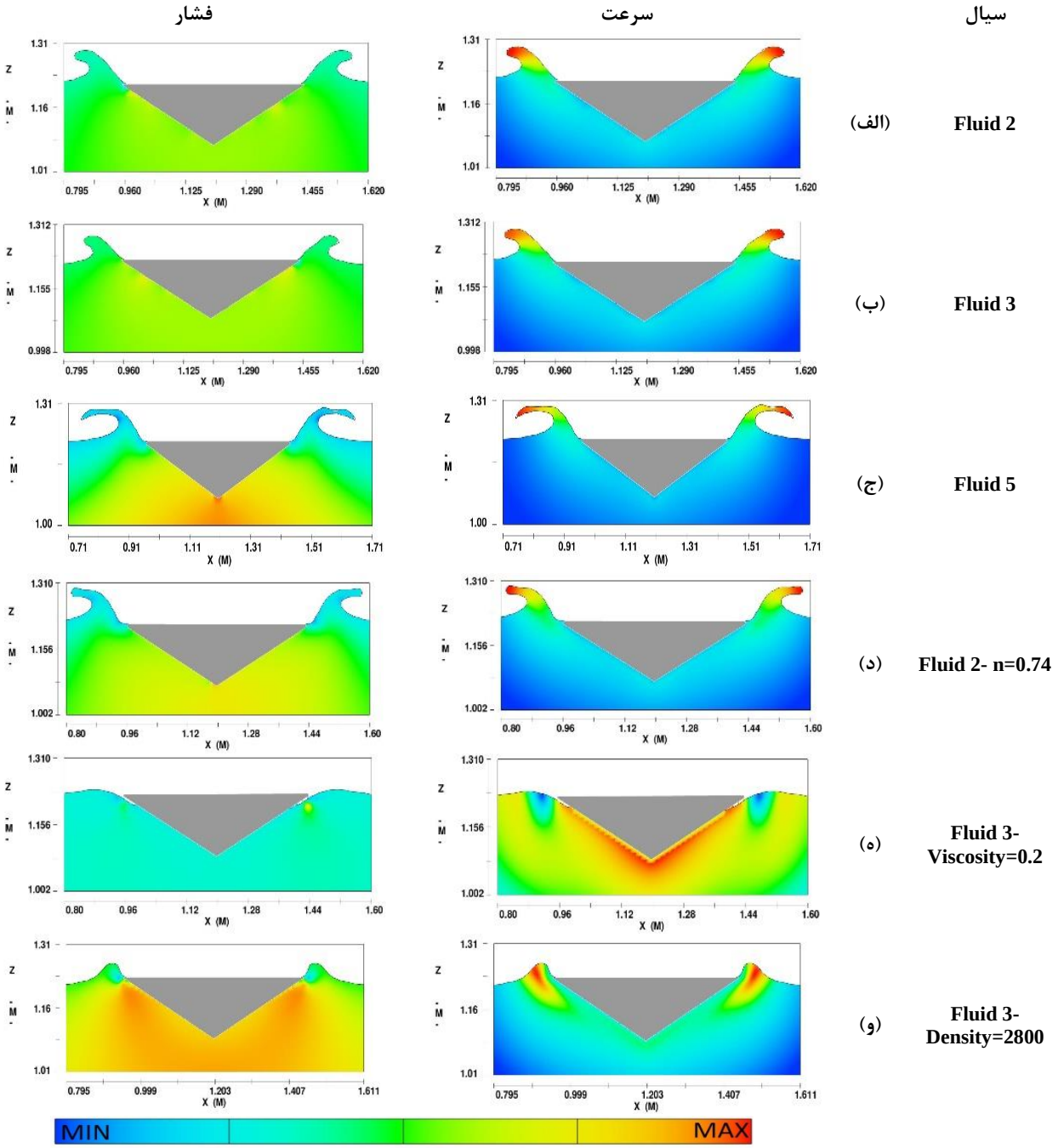


شکل ۶- مقایسه تغییرات سطح آزاد سیال در زمان t=0.024 ثانیه برای سیال‌های منتخب

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.9.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.1]



شکل۷- تغییرات سطح آزاد سیال ۲ در زمان t=0.024 ثانیه [۱۶]



شکل ۸- تغییرات سرعت و فشار برای سیال‌های مختلف در زمان t=0.3 ثانیه

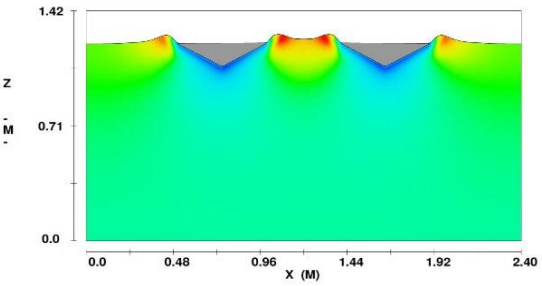
شبیه‌سازی نرم‌افزار Flow-3D با دقت مناسب این شرایط را فراهم می کند تا بتوان شکل‌های مختلفی از شرایط مسأله را مدلسازی کرد. همانطور که در بخش مقدمه بیان شد فرود اضطراری بالگرد روی سطح آب (Ditching) یکی از مسائلی است که همواره مورد توجه محققان می‌باشد که اغلب با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) بوده است.

همچنین در واقعیت اکثر بالگردها با دو تیر فرود موازی و با سرعت یکسان روی سطح آب فرود می‌آیند (شکل ۹). لذا جهت بررسی این

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.9.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.1]

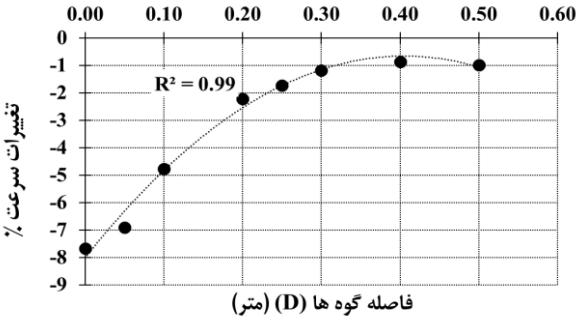
مسأله، در این پژوهش تغییرات سرعت عمودی گوه در برخورد دو گوه در کنار یکدیگر به سطح سیال نیز بررسی شده است. سیال مرجع ۲ با مشخصات درج شده در جدول ۱ جهت این شبیه‌سازی انتخاب شد. با توجه به اینکه طول قاعده گوه ۵۰ سانتی‌متر است، گوه‌ها با فواصل (D)، ۱/۰، ۰/۸، ۰/۶، ۰/۵، ۰/۴، ۰/۲، ۰/۱ برابر قاعده و همچنین بدون فاصله شبیه‌سازی شدند. در این حالت دو عامل تغییرات سرعت و همچنین پرش سیال بین دو گوه به سمت بالا باید بررسی شود. نتایج مربوط به تغییرات سرعت حرکت گوه‌ها در داخل سیال در شکل ۱۰ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش فاصله تغییرات سرعت به صورت تابعی درجه دو ($\Delta V = -45D^2 + 36.3D - 8$) کاهش می‌یابد. اما با کاهش فاصله پرش سیال بین دو گوه به سمت بالا بر اثر فشار افزایش می‌یابد که می‌تواند باعث آسیب به سیستم و جسم متحرک شود. بنابراین باید حالتی بهینه در انتخاب فاصله جهت کاهش سرعت نفوذ گوه‌ها با توجه به مشخصات سیال انتخاب گردد.

الف- بالگرد با تیر فرود موازی



ب- برخورد گوه با سیال مرجع ۲

شکل ۹- برخورد گوه به سیال با سرعت یکسان و فاصله D



شکل ۱۰- تغییرات سرعت گوه با فاصله D از گوه مشابه در مقایسه با گوه تک

۵- نتیجه‌گیری

در مطالعه انجام شده توسط گردابی و نیک‌سرشت [۱۶]، مقادیر تغییرات سرعت گوه بعد از برخورد و ورود به سیال ارائه شده است. در تحقیق حاضر نیز با استفاده از مدل عددی Flow-3D و مدلسازی حرکت گوه در سیال و اثر تغییرات چگالی، ویسکوزیته و توان نرخ کرنش سیال‌های هرشل‌بالکلی-دیلاتانت بر سرعت گوه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی در ادامه بیان شده است. این نتایج گواه آن است که مدل عددی Flow-3D نیز توانایی مناسبی در شبیه‌سازی سیال‌های غیرنیوتنی و اندرکنش آن با جسم صلب را داراست.

- جهت اعتبارسنجی مدل عددی Flow-3D، برخورد گوه با سیال غیرنیوتنی برای ۵ سیال مختلف با استفاده از تابع توانی جهت حل ویسکوز انجام شد. مقادیر خطای محاسباتی برای این ۵ سیال به طور متوسط در حدود ۰/۵ درصد و مقادیر شاخص‌های آماری R^2=0.999، RMSE=0.06 و MAE=0.04 است.
- بررسی تأثیر تغییرات توان نرخ کرنش نشان داد که با افزایش توان نرخ کرنش مقادیر سرعت گوه در سیال کاهش اندکی می‌یابد. مقدار این کاهش در سیال‌ها با توان نرخ کرنش مختلف، متفاوت است اما این تفاوت زیاد نیست.
- با چند برابر شدن ضریب ویسکوزیته، نتایج نشان داد که سرعت گوه تغییر کرده و کاهش می‌یابد. نکته قابل توجه دیگر شبیه سازی پدیده غلظت برشی است. کاهش ناگهانی سرعت گوه در لحظه برخورد با سیال برای مقادیر ویسکوزیته زیاد، مشاهده گردید، اما با گذشت زمان مقادیر سرعت در ویسکوزیته‌های مختلف به یکدیگر نزدیک شد.
- تغییر مقادیر چگالی نشان داد که با افزایش ۲/۸ برابری چگالی، سرعت گوه تا ۱۶ درصد کاهش می‌یابد. مقادیر تغییرات سرعت در ابتدای برخورد گوه به سیال‌ها تفاوت چندانی ندارد اما با گذشت زمان مقادیر آن با یکدیگر تفاوت معناداری پیدا می‌کنند. در واقع تغییر ثابت ویسکوزیته و چگالی در هر مرحله عکس یکدیگر رفتار می‌کنند.
- نتایج بررسی تغییرات سطح آزاد سیال بعد از برخورد گوه نشان داد که تغییرات توان نرخ کرنش علاوه بر سرعت گوه، تغییر چندانی در سطح آزاد سیال نیز ایجاد نمی‌کند اما با تغییر در ویسکوزیته و چگالی، بسیار متفاوت خواهد بود. برای تغییرات سطح آزاد، جهت اعتبارسنجی مدل، نتایج با تحقیق گردابی و نیک‌سرشت [۱۶] مقایسه و تطبیق داده شد که حاکی از دقت مناسب مدل عددی Flow-3D است.
- جهت شبیه‌سازی مسأله Ditching، در این پژوهش تغییرات سرعت عمودی در برخورد دو گوه در کنار یکدیگر به سطح سیال نیز بررسی شد. نتایج نشان داد با کاهش فاصله بین دو گوه مقادیر

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]
[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.9.8]
[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.1]

سرعت نفوذ به داخل سیال به صورت تابعی درجه دو کاهش و پرش سیال بین دو گوه به سمت بالا افزایش می‌یابد.

کلید واژگان

1- Rheology
2- Thixotropic
3- Rheopectic
4- Viscoelastic
5- Dilatant
6- Pseudo plastic
7- Visco plastic
8- Non-Reflection Boundary Treatment
9- Modified Log Vinovich Model
10- Weakly Compressible Smooth Particle Hydrodynamics
11- Immersed Boundary Method
12- Volume Fraction Method
13- Volume of Fluid
14- Fractional Area-Volume Obstacle Representation
15- Carreau Function
16- Power Law
17- Laminar

فهرست علائم

A_x	کسر سطحی برای جریان در جهت x
A_y	کسر سطحی برای جریان در جهت y
b	اتلاف جریان
e_{ij}	نرخ کرنش محاسباتی از سرعت سیال
f	شتاب ویسکوز
G	شتاب بدنه
n	شاخص رابطه تابع توانی
o	مقادیر مشاهداتی
p	مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل عددی
R_{DIF}	پخش آشفتگی
R_{SOR}	منبع جرم
u	سرعت در جهت x
v	سرعت در جهت y
V_F	کسر حجمی جریان
ρ	چگالی سیال
μ	ویسکوزیته محاسباتی در سیال
μ_0	ثابت ویسکوزیته

۶- مراجع

1- Chhabra RP, Richardson JF (1999) *Non-Newtonian flow in the process industries*: fundamentals and engineering applications. Butterworth-Heinemann.

2- GhasemiKafrudi, E., Hashemabadi, S. H., (2015), *Numerical and Analytical Study of Drilling Mud Flow through the Annulus with Cross Non-Newtonian Model*, journal of Petroleum Research, Vol.25(810, p. 30-43. (In Persian)

3- Fasanella EL, Jackson KE, Sparks CE, Sareen AK (2005) *Water impact test and simulation of a composite energy absorbing fuselage section*, Journal of the American Helicopter Society 50(2):150-164.

4- Pentecôte N, Vigliotti A (2003) *Crashworthiness of helicopters on water: Test and simulation of a full-scale WG30 impacting on water*, International journal of crashworthiness 8(6):559-572.

5- Anghileri M, Castelletti LM, Francesconi E, Milanese A, Pittofrati M (2011) *Rigid body water impact–experimental tests and numerical simulations using the SPH method*, International Journal of Impact Engineering 38(4):141-151.

6- Anghileri M, Castelletti LM, Francesconi E, Milanese A, Pittofrati M (2014) *Survey of numerical approaches to analyse the behavior of a composite skin panel during a water impact*, International Journal of Impact Engineering 63:43-51.

7- Oger G, Doring M (2006) Alessandrini B, Ferrant P. *Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries*, Journal of computational physics 213(2):803-822.

8- Yan S, Ma QW (2007) *Numerical simulation of fully nonlinear interaction between steep waves and 2D floating bodies using the QALE-FEM method*, Journal of Computational physics 221(2):666-692.

9- Gong, K., Liu, H., Wang, B.L., (2009), *Water entry of a wedge based on SPH model with an improved boundary treatment*, Journal of Hydrodynamics 21(6):750-757.

10- Panciroli R (2013) *Hydroelastic impacts of deformable wedges*, In Dynamic failure of composite and sandwich structures, Springer, Dordrecht.

11- Groenenboom PH, Cartwright BK (2010) *Hydrodynamics and fluid-structure interaction by coupled SPH-FE method*, Journal of Hydraulic Research 48(S1):61-73.

12- Campbell JC, Vignjevic R (2012) *Simulating structural response to water impact*, International Journal of Impact Engineering 49:1-10.

13- Qin H, Zhao L, Shen J (2011) *A modified Logvinovich model for hydrodynamic loads on an asymmetric wedge entering water with a roll motion*, Journal of marine science and application 10(2):184-189.

14- Vila JP (1999) *On particle weighted methods and smooth particle hydrodynamics*, Mathematical models and methods in applied sciences 9(02):161-209.

15- Koukouvinis PK, Anagnostopoulos JS, Papantonis DE (2013) *Simulation of 2D wedge impacts on water*

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.9.8]

[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.1]

using the SPH–ALE method, Acta Mechanica 224(11):2559-2575.

16- Gerdabi, J., Nikseresht, A. H., (2018), *2D Simulation of a wedge impact problem into the Newtonian and Herschel Bulkley Dilatant Non-Newtonian fluids, using WCSPH method,* Modares Mechanical Engineering, Vol.18(4), P.39-50. (In Persian)

17- Yang L, Yang H, Yan S, Ma Q, Bihnam M (2016) *Comparative study on water impact problem,* In The 26th International Ocean and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers.

18- Shah S, Orifici A, Watmuff J (2015) *Water impact of rigid wedges in two-dimensional fluid flow,* Journal of Applied Fluid Mechanics 8(2):329-338.

19- Shademani R, Ghadimi P (2017) *Asymmetric Water Entry of Twin Wedges with Different Deadrises, Heel Angles, and Wedge Separations using Finite Element Based Finite Volume Method and VOF,* Journal of Applied Fluid Mechanics 10(1).

20- Farsi M, Ghadimi P (2015) *Simulation of 2D symmetry and asymmetry wedge water entry by smoothed particle hydrodynamics method,* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering 37(3):821-835.

21- Hedaiati-Far, m., Pour-Lak, M., (2014), *Fluid dynamics Simulation with Flow-3D,* Atinegar publication, Tehran. (In Persian)

22- Nahavandian, M., Izadi, A., (2019), *Numerical Simulation of Flow Hydrodynamic Around Dolphin Body in Viscous Fluid,* Journal of Marine Engineering, Vol.15(29), p.147-165. (In Persian)

23- Zeraatgar, H., Hassani Chalaksara, E., Yousefnejad, R., Javaherian, M. J., (2012), *Parametric Investigation of Pressure Distribution on Wedge Water Entry by Experiment,* Journal of Marine Engineering, Vol.8(15), p.75-83. (In Persian)

24- Moghaddam, M. H., Jalili, M. M., Dashti, A., Shafiei, A., (2018), *3Dimensional Impact Simulation of Cylindrical Projectile with Water Surface to Predict Projectile's Behavior and the Stresses Induced in it,* Journal of Marine Engineering.Vol.13(26), p.123-129. (In Persian)

[Downloaded from marine-eng.ir on 2025-11-04]

[DOR: 20.1001.1.17357608.1399.16.31.9.8]

[DOI: 10.29252/marineeng.16.31.1]