مجله مهندسی مکانیک مدرس، مهر 1396، دوره 17، شماره 7، ص‌ص 343-352

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

مطالعه‌ی عددی کوبش گُوِه‌ی صلب به سطح آب در حالت متقارن و نامتقارن با به‌کارگیری نرم‌افزار اوپِن‌فوم

مبین معصومی[1]، مهدی یوسفی‌فرد[2*]، عباس رامیار[3]

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی معماری کشتی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل
* بابل، صندوق پستی 4714871167، yousefifard@nit.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: 14 اردیبهشت 1396
پذیرش: 24 خرداد 1396
ارائه در سایت: 06 مرداد 1396

کلید واژگان:
زاویه‌ی دِدرایز
اوپِن‌فوم
گُوِه‌ی صُلب
ضریب فشار

چکیده

در این مقاله، مسئله‌ی ورود گُوِه‌ی صلب تحت شرایط مختلف به آب با استفاده از روش تحلیل عددی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. این مسئله همچنان بعنوان یکی از موضوعات بنیادی در مطالعات هیدرودینامیکی مطرح بوده و به‌عنوان مرجعی برای مطالعات پدیده‌هایی نظیر کوبش شناخته می‌شود. محاسبه‌ی دقیق فشار ناشی از پدیده‌ی برخورد به سطح آب می‌تواند در تحلیل مناسب سازه‌ی شناورها به‌کار گرفته شود. در این پژوهش، با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی براساس کد متن‌باز اوپِن‌فوم و حل عددی معادلات حاکم بر سیال دوفازی، متغیرهای مهمی نظیر سرعت و فشار سیال مورد ارزیابی قرار گرفته است. به منظور بررسی صحت نتایج عددی به‌دست آمده از تحلیل حاضر، مقادیر مربوط به حداکثر فشار و محل و زمان دقیق وقوع آن و همچنین توزیع ضریب فشار در محل برخورد، با نتایج آزمایشگاهی معتبر ارائه شده در سایر پژوهش‌ها مورد مقایسه قرار گرفته است. این بررسی‌ها در سرعت‌ها و زوایای برخود متفاوت انجام شده است. با مقایسه‌ی نتایج حل عددی و مقادیر آزمایشگاهی، خطایی در محدوده‌ی 2 تا 9 درصد مشاهده گردید. علاوه بر آن، متغیرهای مؤثر در مقدار فشار اعمال شده به گُوِه نظیر سرعت ورود به آب و زوایای دِدرایز مختلف بدنه نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند.

Numerical investigation of symmetry and asymmetry rigid wedge slamming using OpenFOAM code

Mobin Masoomi[1], Mahdi Yousefifard[2*], Abas Ramiar[2]

1- Department of Naval Architecture, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
2- Department of Mechanical Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran
* P.O.B. 4714871167 Babol, Iran, yousefifard@nit.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 04 May 2017
Accepted 14 June 2017
Available Online 28 July 2017

Keywords:
Deadrise Angle
OpenFOAM
Rigid Wedge
Pressure Coefficient

ABSTRACT

In this article, rigid wedge water entry problem under different conditions is evaluated using numerical scheme Rigid wedge water entrycontinues to be one of the fundamental issues raised in the hydrodynamics studies and is known as a reference for the study of slamming phenomena. The exact calculation of the pressure caused by the slamming phenomenon can be used to analyze the appropriate structural analysis of the ships. In the current study, important variables such as speed and fluid pressure are investigated using computational fluid dynamics method based on the open source OpenFOAM code by numerical solution of the governing equations of tow phase fluid. In order to verify the simulation results obtained from this research, Tthe values of the maximum pressure and the location and exact time of its occurrence and also pressure coefficient distribution at the impact region have been compared by experimental results of other studies. These investigations have been utilized at different impact velocities and angles. By comparing the numerical results and experimental values, an error was found in the range of 2% to 9%. In addition, variables affecting the pressure applied to the wedge such as water entry velocity and different deadrise angles have been studied.

1- مقدمه

دستیابی به سرعت بیشتر در محیط دریا منجر به ساخت شناورهای پیشرفته‌تر و به تبع آن بروز مسائل دشوارتر در طراحی و تحلیل آنها شده است. افزایش سرعت، بهبود خواص هیدرودینامیکی و کاهش هزینه‌های ساخت منجر به نیاز برای تحلیل‌های دقیق پدیده‌هایی شده است که شناورهای پیشرفته با آن‌ها مواجه می‌شوند. اندرکنش سازه و سیال، بخصوص در شرایطی که حرکت جسم در سطح مشترک دو سیال انجام می‌گیرد، نیازمند بهره‌گیری از روش‌های حل عددی کارآمد و همچنین اطمینان از درستی روش حل می‌باشد. گسترش دانش در حوزه‌ی دینامیک سیالات محاسباتی[1] و همچنین در دسترس بودن توان محاسباتی رایانه‌های جدید این امکان را فراهم آورده است تا مسائلی از این دست را بتوان با دقت و کیفیت

[1] Computational Fluid Dynamics (CFD)

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Masoomi, M. Yousefifard, A. Ramiar, Numerical investigation of symmetry and asymmetry rigid wedge slamming using OpenFOAM code, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 7, pp. 343-352, 2017 (in Persian)

بیشتری مورد بررسی قرار داد. لزوم اطمینان از صحت کار عددی باعث می‌شود تا برای انجام درست این تحقیق از تمامی ابزارهای لازم نظیر صحه‌گذاری با نتایج تجربی معتبر و همچنین بررسی دقیق اثرات فیزیک حل عددی بر دقت نتایج بهره‌ی لازم گرفته شود.

یکی از مسائلی که در حوزه‌ی هیدرودینامیک شناورهای تندرو همچنان به‌عنوان یک مرجع برای ساده‌سازی تحلیل حرکات این شناورها مورد استفاده قرار می‌گیرد، پدیده‌ی ورود جسم صلب گُوِه‌ای شکل به آب و تحلیل دقیق سیال و سازه در لحظه‌ی برخورد می‌باشد. نتایج حاصل از چنین تحلیل‌هایی منجر به ارائه‌ی روابط ساده‌تر که مبنای تئوری‌های تخمین حرکات دینامیکی شناورهای تندرو است می‌گردد.

در پدیده‌ی ورود جسم به آب، زاویه‌ی سطح آب و جسم (بدنه‌ی شناور) از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد (زاویه‌ی دِدرایز). در واقع هر چه این زاویه دارای مقدار عددی کمتری باشد، هنگام وقوع پدیده‌ی کوبش[1]، بارهای بزرگتری به سازه اعمال می‌گردد. پیش‌بینی مکان و زمان دقیق وقوع فشار بیشینه در تحلیل‌های سازه‌ای خودنمائی می‌کند. تحلیل دقیق چنین پدیده‌هایی به روش عددی دارای دشواری‌های زیادی است. زمان بسیار کوتاه برخورد (چند میلی ثانیه)، تغییرات ناگهانی فشار، تغییرِشکل سطح آزاد و پاشش سیال، پاره‌ای از این موارد را شامل می‌شود.

مسأله‌ی ورود جسم به آب اولین بار با استفاده از مدل ریاضی بر مبنای تئوری مومنتوم و جرم اضافه توسط فون‌کارمن در سال 1929 مورد بررسی قرار گرفت [1]. واگنر در سال 1932 اثر بالاآمدگی سطح آب را نیز به مسأله اضافه و مدل ریاضی دقیق‌تری به‌دست آورد [2]. این نتایج به عنوان پایه‌ای جهت تحقیقات در سالیان بعد مورد استفاده قرار گرفت. در طول چند دهه، از روش‌های مختلف عددی و تحلیلی برای بررسی عوامل تأثیرگذار در دقت نتایج خروجی و ارتقاء حل در مسأله ورود گُوِه به آب و پدیده‌ی کوبش استفاده شد. به‌عنوان مثال، تا قبل از سال 1987 معمولاً اثرات جاذبه در این‌گونه مسائل در نظر گرفته نمی‌شد، ولی گرین‌هو در سال 1987 مسأله‌ی دو بعدی ورود گُوِه به سیال را با در نظر گرفتن جاذبه مورد بررسی قرار داد [3]. تحقیقات گرین‌هو مؤید این مطلب است که جز در منطقه‌ی پاشش جت در پیرامون ناحیه‌ی تماس، جاذبه می تواند نادیده گرفته شود. در واقع در یک حالت کلی می‌توان نتیجه گرفت که اگر رابطه‌ی $V > 2gt$ برقرار باشد، می‌توان اثرات جاذبه را نادیده گرفت (V سرعت برخورد و t زمان برخورد است). دوبرول‌کایا نیز توانست با در نظر گرفتن دسته‌ای از معادلات غیرخطی یکپارچه و حل این معادلات به صورت عددی، این نوع از مسائل را شبیه‌سازی کند [4]. البته، این تحلیل فقط برای سرعت ثابت وارد شدن به آب و جاذبه‌ی صفر معتبر بود.

در ادامه‌ی بررسی‌های صورت پذیرفته به منظور ارزیابی تأثیر متغیرهای مختلف بر روی جواب نهایی، موزافریجا و همکاران در سال 1997 تأثیر لزجت را در این پدیده بررسی کردند [5]. آن‌ها به این نتیجه دست یافتند که ویسکوزیته‌ی سیال تنها برای پیش‌بینی شکل سطح آزاد دارای اهمیت بوده و مقادیری که برای نیروهای هیدرودینامیکی و توزیع فشار در سطحِ تر شده از گُوِه به‌دست آمده، تطابق تقریبی با مدل غیرلزج دارد. در ادامه‌ی این بررسی‌ها، کروبکین [6] در سال 1997 وکامپانا و همکاران [7] در سال 1998 اثر سیال قابل تراکم را در این مسأله مورد بررسی قرار دادند. همچنین ژائو و همکاران در سال 1996 یک روش المان مرزی غیرخطی را برای حل این مسئله ارائه دادند [8]. در تحقیق اخیر، مسأله‌ی کوبش با استفاده از ارضاء شرایط مرزی چرخشی سطح آزاد، اصل بقاء جرم، مونتوم و انرژی مورد بررسی قرار گرفته است. این روش در سال 2005 به یک مسأله‌ی سه‌بُعدی توسط فالتینسن و چژیان تعمیم یافت [9]. البته مسائل مربوط به ورود گُوِه‌ی نامتقارن در مقایسه با ورود گُوِه‌ی متقارن کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند. از سوی دیگر، توسعه‌ی روش‌های تحلیلی که بر مبنای حل جریان پتانسیل صورت گرفته‌اند نیز توسط محققینی نظیر گارابدیان [10] در سال 1953 و بورگ [11] در سال 1975 با تکیه بر مسئله‌ی ورود گُوِه‌ی نامتقارن به آب صورت گرفته است.

در تحقیق پیش‌رو نیز هر دو حالت ورود متقارن و نامتقارن گُوِه مورد ارزیابی قرار گرفته است. ابتدا معادلات حاکم بر جریان لزج که توسط کد اوپن‌فوم مورد استفاده قرار گرفته است ارائه خواهد شد. قبل از شروع حل عددی مسئله، اثرات شبکه و دامنه‌ی حل بر کیفیت حل عددی بررسی می‌شود. صحت‌سنجی روش عددی نیز با مقایسه‌ی نتایج در حالات مختلف با مقادیر حاصل از آزمایش سایر محققین صورت می‌پذیرد. همچنین اثرات زوایای برخورد و سرعت گُوِه در لحظه‌ی ورود به آب نیز ارائه شده است.

2- معادلات حاکم

همانطور که اشاره شد، می‌توان حل مسئله‌ی ورود گُوِه به آب را با استفاده از جریان پتانسیل نیز انجام داد. چنین رویکردی در مواجهه با هندسه‌ی پیچیده و سرعت زیاد گُوِه کاربرد خود را از دست خواهد داد. بنابراین در تحقیق حاضر از حلگری استفاده شده است که توانایی حل معادلات ناویر-استوکس را در سیال دوفازی داشته باشد. معادلات کلی حاکم بر حرکت سیال شامل معادلات بقای جرم و مومنتوم به شکل زیر می‌باشد [12].

$$\nabla \cdot U = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U U) = -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot \mu \nabla U + (\nabla U) \cdot \nabla \mu \tag{2}$$

که در این معادلات، U بردار سرعت سیال، ρ و μ به ترتیب چگالی و ویسکوزیته‌ی دینامیک سیال، g بردار گرانش و p_d بیانگر فشار دینامیک سیال می‌باشد. فشار کل را نیز می‌توان از معادله‌ی 3 بدست آورد.

$$p = p_d + \rho g \cdot x \tag{3}$$

از روش حجم سیال برای شبیه‌سازی سطح آزاد استفاده شده است و در این روش، توزیع سیال در سلول‌ها توسط تعریف تابع شاخص فاز[2] (γ) تعیین می‌گردد. اگر متغیر اسکالر γ مقداری برابر یک داشته باشد، یعنی در آن سلول آب وجود دارد و اگر این مقدار برابر صفر باشد، به معنی وجود هوا در سلول مورد نظر می‌باشد. این تابع در معادله‌ی انتقال زیر صدق می‌کند:

$$\frac{\partial \gamma}{\partial t} + \nabla \cdot (U\gamma) + \nabla \cdot \left(U_r \gamma (1-\gamma)\right) = 0 \tag{4}$$

که U_r میدان سرعت کمکی برای متراکم نمودن سطح آزاد است. حل معادله‌ی (3) این امکان را فراهم می‌آورد تا بتوان چگالی و ویسکوزیته سیال را در هر نقطه از میدان جریان به‌دست آورد.

$$\rho(x) = \rho_{water}\gamma(x) + \rho_{air}\left(1-\gamma(x)\right) \tag{5}$$

$$\mu(x) = \mu_{water}\gamma(x) + \mu_{air}\left(1-\gamma(x)\right) \tag{6}$$

الگوریتم PISO برای کوپل فشار و سرعت سیال تراکم‌ناپذیر در این پژوهش مورد استفاده قرار گرفته است [13]. از طرفی، معادله‌ی مشخصه‌ی فاز به‌صورت صریح نسبت به زمان و با استفاده از روش تفاضل محدود حل شده است.

[1] slamming

[2] Phase indicator function

3- روش حل عددی

تست‌های مربوط به کوبش همواره از حساس‌ترین آزمایش‌ها درحوزه‌ی هیدرودینامیک شناخته می‌شود. در بسیاری از موارد نیاز است تا چندین آزمایش برای یک نمونه انجام شده و نهایتاً برآیندی از نتایج به‌دست آمده به‌عنوان مقدار نهایی در نظر گرفته شود. در این مقاله از روش عددی به منظور به‌دست آوردن فشار استفاده خواهد شد.

شرایط آزمایش به گونه‌ای است که در آن گوه صلب بر روی ریل‌هایی ثابت شده و دقیقاً در راستای معین به سطح آب برخورد می‌کند. به منظور شبیه‌سازی عددی نیز از همین رویه بهره گرفته شده است. البته با انجام شبیه‌سازی‌های مکرّر، مشاهده گردید که در صورت استفاده از گُوِه‌ی ثابت و حرکت سیال به سمت آن، نتایج دقیق‌تری حاصل می‌گردد. برای به‌دست آوردن سرعت برخورد با توجه به ارتفاع گوه نسبت به سطح آب در نمونه آزمایشگاهی می‌توان از معادله‌ی (7) استفاده کرد.

$$V^2 - V_0^2 = 2gh \qquad (7)$$

با استفاده از این روش می‌توان به نتایج مشابه با هزینه‌ی زمانی کمتر و حجم محاسبات پایین‌تر دست یافت. یکی از موارد اساسی در تعیین فشار، به منظور صحت‌سنجی، تعیین محل قرارگیری فشارسنج برای اندازه‌گیری دقیق فشار می‌باشد. از آن‌جا که طبیعتاً پدیده‌ی کوبش با سرعت بسیار زیادی رخ می‌دهد، جانمایی صحیح فشارسنج‌ها برای دست‌یابی به نتایج مشابه با آزمایش از ملزومات کلیدی تلقی می‌گردد. بدین سبب با استفاده از تکنیک‌های موجود در نرم‌افزار پاراویو[1] و با طراحی فشارسنج‌های مجازی در فضای حل مسأله در نرم افزار اوپن‌فوم می‌توان جانمایی از فشارسنج‌ها را مطابق پژوهش برجسته و همکاران [14] پیاده‌سازی نمود.

3-1- ابعاد تانک عددی

ابعاد حوضچه تأثیر بسزایی در نتایج نهایی شبیه‌سازی به دنبال خواهد داشت. از این‌رو آگارد در سال 2013 مطالعاتی را انجام دادند و ابعاد بهینه برای چنین مسأله‌ای در تحقیق ایشان مورد ارزیابی قرار گرفت [15]. در پژوهشِ حاضر به منظور بررسی صحت نتایج براساس مقادیر به‌دست آمده از آزمایش انجام گرفته توسط برجسته و همکاران [14]، ابعاد حوضچه‌ی عددی این تحقیق نیز معادل کار آزمایشگاهی موردنظر انتخاب شده و در جدول 1 ارائه گردیده است.

محل قرارگیری فشارسنج‌ها که به دلیل تغییرات شدید موضعی فشار در سطح گُوِه از اهمیت بالایی در روند حل و نتایج خروجی برخوردار هستند به صورتی که در "شکل 1" نشان داده شده است جانمایی می‌شود. فشارسنج‌ها به دو قسمت در بال راست و چپ گُوِه تقسیم شده، که از لحاظ فواصل میان فشارسنج‌ها طرف راست و چپ مشابه هستند و از فاصله یکسانی نسبت به رأس گُوِه قرار می‌گیرند. در جدول 2 نیز مکان دقیق نصب فشارسنج‌ها براساس فاصله از رأس گُوِه ارائه شده است.

3-2- مشخصات گُوِه

از گوه‌ای با طول بال 0.3 متر با زوایای دِدرایز 15، 20، 25، 30 و 35 درجه

جدول 1 ابعاد حوضچه‌ی عددی

Table 1 The numerical tank dimensions

شماره‌ی حوضچه	ارتفاع (متر)	عرض (متر)	طول (متر)
I	0.681	0.572	1.22

[1] paraview

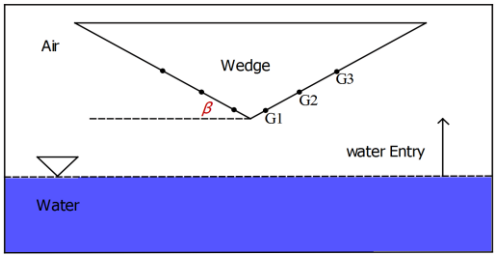

Fig. 1 Arrangement of pressure gauge on the wedge surface

شکل 1 جانمائی فشارسنج‌ها بر روی سطح گُوِه

جدول 2 مکان قرارگیری فشارسنج‌ها نسبت با رأس گُوِه

Table 2 Position of pressure gauges based on the wedge apex

شماره‌ی فشارسنج	فاصله از رأس گُوِه
G1 (فشارسنج 1)	16 میلی‌متر
G2 (فشارسنج 2)	71 میلی‌متر
G3 (فشارسنج 3)	126 میلی‌متر

به‌صورت گُوِه‌ی متقارن استفاده خواهد شد. از سوی دیگر، به منظور بررسی برخورد گُوِه‌ی نامتقارن نیز از زوایای انحراف 5 و 10 درجه در دامنه‌ی حل استفاده شده است. چگونگی انحراف گُوِه در "شکل 2" نشان داده شده است. با توجه به حساسیت بالای پدیده‌ی کوبش، از شبیه‌سازی‌های متعددی با توجه به زوایا و سرعت برخورد گُوِه به آب استفاده شده که در جدول 3 نشان داده شده است. آب از ورودی با سرعت ثابت وارد شده و به گوه صلب دوبعدی برخورد می‌کند. در این مقاله سرعت‌های متفاوتی نیز برای برخورد با آب در نظر گرفته شده است.

3-3- شبکه‌بندی

شبکه‌بندی با استفاده از سلول های 8 و 4 وجهی ساخته شده ودامنه‌ی کلی

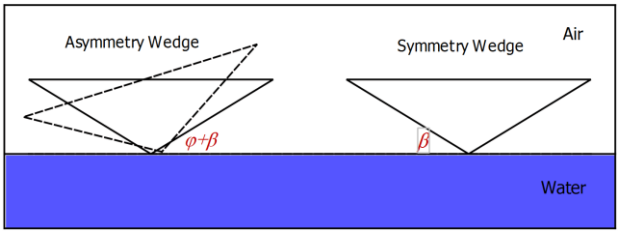

Fig. 2 Inclination angle of wedge based on the fluid surface

شکل 2 نحوه‌ی انحراف گُوِه نسبت به سطح آزاد

جدول 3 ویژگی‌های هندسی گُوِه و شرایط مختلف برخورد

Table 3 Geometrical wedge properties and different impact condition

شماره‌ی حل	زاویه‌ی انحراف(φ)	ارتفاع سقوط گوه(h)	زاویه‌ی دِدرایز($\beta_\circ$)
S1	-	0.5 متر	15 درجه
S2	-	0.5 متر	30درجه
S3	5 درجه	0.5 متر	20 درجه
S4	-	0.75 متر	15 درجه
S5	-	0.2 متر	25 درجه
S6	-	0.2 متر	15 درجه
S7	10 درجه	0.5 متر	20 درجه
S8	-	0.5 متر	20 درجه
S9	-	0.5 متر	25 درجه
S10	-	0.5 متر	35 درجه

حل به چند زیر دامنه تقسیم‌بندی شده است. این تقسیم‌بندی دامنه به منظور دستیابی به بهترین کیفیت برای ردیابی سطح آزاد و نواحی که در آن‌ها گرادیان‌های بالای سرعت و فشار رخ می‌دهد به وجود آمده است. علاوه بر این که یک سطح لایه‌ای (لایه‌بندی) هم به دامنه‌ی سلول‌ها افزوده شده تا سطوح تقابل بین گُوِه‌ی صلب و دامنه‌ی حل سیال با صحت و دقت هر چه بیشتر شبکه‌بندی شود. تعداد لایه‌ها در ابزار اسنپی‌هگزمش[1] برابر با 4 در نظر گرفته شده است. نمایی روبه‌رو و دو بُعدی از نحوه‌ی شبکه‌بندی گُوِه با زاویه‌ی دِدرایز 30 درجه به عنوان نمونه‌ای از گُوِه‌های مختلف با رعایت اصول ذکر شده، در "شکل 3" نشان داده شده است، به منظور شبیه‌سازی هر چه دقیق‌تر جریان در مجاورت دیواره‌ی گُوِه، براساس سرعت جریان و اندازه‌ی شبکه در مجاورت سطح گُوِه، مقدار Y^+ عددی بین 2.3e-4 و 6.25e-4 بسته به سرعت جریان متغیر می‌باشد. اندازه‌ی شبکه و گام‌های زمانی باید همیشه به‌صورت همزمان در نظر گرفته شوند، به این دلیل که همگرایی و پایداری حل بستگی مستقیم به ارتباط این دو پارامتر خواهد داشت، از این‌رو از معیاری با نام عدد کورانت[2] که ارتباط بین این دو پارامتر را معین می‌کند استفاده خواهد شد. به منظور ایجاد بهینه‌ترین حالت برای شبکه‌بندی، از سه نوع شبکه‌بندی مطابق جدول 4 استفاده شده تا بهترین اندازه‌ی شبکه هم از لحاظ صحّت نتایج خروجی و هم از لحاظ هزینه‌ی محاسباتی بدست آید. بعد از انجام شبیه‌سازی، نتایج حل به‌صورت "شکل 4" نمایش داده می‌شود. از آن‌جایی که در مسأله‌ی کوبش، مقدار عددی که برای حداکثر فشار رخ می‌دهد را نمی‌توان به‌عنوان متغیری برای همگرایی قرار داد، بنابراین برای بررسی کیفیت شبکه، از ضریب فشار می‌توان به عنوان پارامتر معیار استفاده نمود. مقادیر بدست آمده برای ضریب فشار براساس رابطه‌ی (8) مورد بررسی قرار گرفته است.

$$C_{p_{\max}} = \frac{p_{\max}}{0.5\rho_w {V_0}^2} \tag{8}$$

نتایج ضریب فشار ناشی از کوبش حاصل از شبیه‌سازی برخورد گُوِه مربوط به حل s4 که در آن از گُوِه با زاویه دِدرایز 15 درجه و ارتفاع سقوط 0.75 متر استفاده شده است، با درجات مختلف کیفی از مش به صورت نمودارِ مقایسه‌ای، در "شکل 4" نمایش داده شده است. علاوه بر مشاهده‌ی میزان خطای ایجاد شده در اثر تفاوت میان کیفیت شبکه‌بندی، به این نکته نیز می‌توان پی برد که با ریزتر شدن سلول‌ها، مقادیر حداکثر ضریب فشار نیز

جدول 4 مشخصات شبکه‌بندی دامنه‌ی حل عددی

Table 4 Grids specification in numerical solution domain

مشخصات شبکه	کیفیت زیاد (H_Q)	کیفیت متوسط (M_Q)	کیفیت کم (L_Q)
تعداد کلی سلول‌ها	12232	9301	2812
اندازه‌ی کل دامنه (متر)	(0.1, 0.1)	(0.1, 0.1)	(0.1, 0.1)
شبکه‌ی حول سطح آزاد	(0.1, 0.0125)	(0.1, 0.0125)	(0.1, 0.0125)
شبکه‌ی اطراف گوه‌ی صلب	(0.5, 0.0062)	(0.5, 0.0062)	(0.5, 0.0062)
در طول دیواره‌ی گُوِه	(0.000625, 0.00625)	(0.00625, 0.00625)	(0.00125, 0.5)
تعداد لایه های سطحی اطراف گُوِه	4	4	4

[1] snappyhexmesh
[2] Courant number

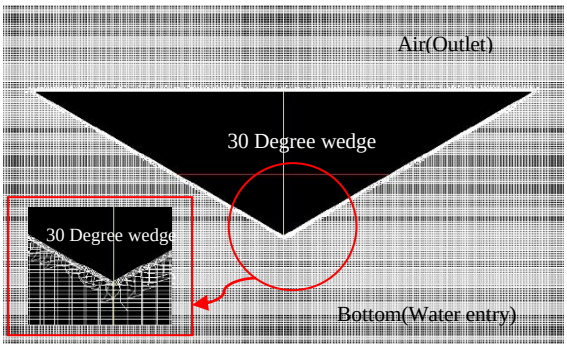

Fig. 3 View of grid of solution domain

شکل 3 نمائی از شبکه‌بندی دامنه حل

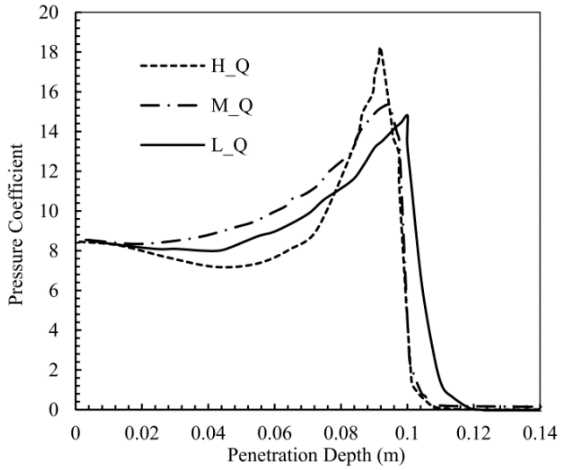

Fig. 4 Effects of the mesh quality on pressure coefficient (s4)

شکل 4 تأثیر کیفیت شبکه بر ضریب فشار (S4)

افزایش یافته است، که این امر ناشی از حساس بودن پدیده‌ی کوبش به تغییرات مکان و زمان خواهد بود.

به منظور سهولت در امر محاسبات و بهبود شبکه در شبیه‌سازی عددی، سعی شده در آزمایشات گُوِه بدون انحراف و متقارن از شرط تقارن بهره گرفته شود. بدین منظور فقط نیمه‌ی سمت راست گُوِه از رأس گُوِه تا انتهای آن با شرط مرزی متقارن در نظر گرفته شده است.

3-4- شرایط مرزی

به منظور شبیه‌سازی ورود آب، نرخ جریان با سرعت ورودی[3] که در قسمت کف دامنه محاسباتی قرار دارد به‌عنوان شرط مرزی در نظر گرفته شده است (شکل5). همچنین برای خروج هوا از دامنه حل و جلوگیری از افزایش فشار

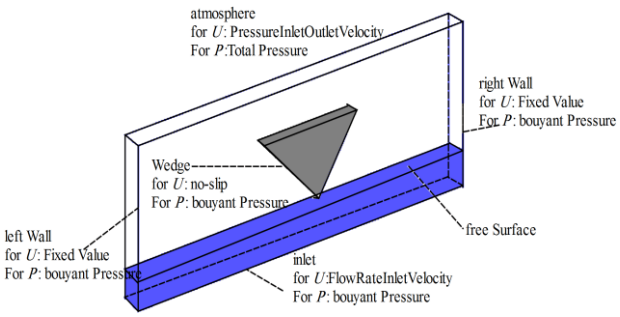

Fig. 5 Boundary conditions of solution domain

شکل 5 شرایط مرزی دامنه حل

[3] flow rate inlet velocity

فاز هوا از شرط مرزی فشار سرعت ورودی و خروجی[1] در قسمت بالای دامنه محاسباتی استفاده شده است. در حالت‌هایی که از شرط تقارن برای گُوِه استفاده شده است، برای مرز دیواره‌ی چپ از شرط مرزی تقارن صفحه‌ای بهره گرفته شده است. برای سطوح گُوِه‌ی صلب دو بعدی نیز از شرط عدم لغزش[2] استفاده شده که در صورت در نظر نگرفتن ویسکوزیته این شرط تبدیل به لغزش آزاد[3] خواهد شد.

3-5- شرایط اولیه

همان‌طور که اشاره گردید، سطح آزاد آب با استفاده از تکنیک حجم سیال[4] در نرم‌افزار اوپن‌فوم شبیه‌سازی می‌شود. در دامنه حل، این سطح با فاصله‌ای معین نسبت به رأس گوه قرار می‌گیرد تا در هنگام برخورد شرایط سرعت و فشار سطح آزاد به شرایط یکنواخت موردنظر برسند. سرعت اولیه‌ی برخورد با توجه به ارتفاع‌های مختلف برخورد متفاوت خواهد بود، که در شرط مرزی ورودی برای سرعت، با اختصاص مقادیری برای نرخ جریان به‌دست خواهد آمد و فشار اولیه‌ی مرجع نیز برابر با صفر در نظر گرفته می‌شود. ثابت‌های فیزیکی به‌کار رفته در حل عددی مسئله در جدول 5 گنجانده شده‌اند.

3-6- مشخصات حلگر

به منظور شبیه‌سازی پدیده‌ی کوبش از مجموعه کدهای متن‌باز نرم‌افزار اوپن‌فوم، حلگر اینترِفوم[5] که یک حلگر چندفازی بوده و برای جریان‌های تراکم‌ناپذیر که دارای سطح آزاد هستند مناسب می‌باشد، استفاده شده است [16].

مهم‌ترین تنظیماتی که می‌توان در این حلگر مورد استفاده قرار داد، عدد کورانت، گام‌زمانی و فاکتور ضریب آرامش برای سرعت و فشار می‌باشد. مشخصات متغیرهای مربوط به تنظیمات حلگر به اختصار در جدول 6 نشان داده شده‌اند.

بعد از اعمال تنظیمات نهایی حلگر، محاسبات نهایی توسط رایانه‌ای مجهز به 8 گیگابایت حافظه‌ی رم و پردازشگر Core i5-2640 @ 3.5GHz، انجام پذیرفت. زمان تقریبی برای حل به طور متوسط 10 ساعت می‌باشد که این زمان به دلیل ایجاد تغییرات مناسب در حلگر و شبکه‌بندی بهینه محقق گشته است.

4- صحت‌سنجی حل عددی

صحت‌سنجی روش حل عددی با مقایسه‌ی بیشترین مقادیر ضریب فشار در زوایای دِدرایز مختلف و همچنین تغییرات بیشترین مقدار فشار در موارد منتخب بر حسب زمان انجام شده است. صحت‌سنجی نتایج براساس گُوِه با حالت چاین خشک ارائه شده که در بخش 2-5 به صورت جامع‌تری به شرایط این حالت پرداخته شده است.

4-1- مقایسه‌ی ضریب فشار

به‌منظور ارزیابی صحت نتایج و مقایسه‌ی آن با محققین پیشین می‌توان از مفهوم ضریب فشار استفاده نمود که یکی از معیارهای اصلی به منظور صحت‌سنجی نتایج در چنین مسائلی می‌باشد. بدین منظور براساس ده نمونه‌ی آزمایشی که در جدول 3 ارائه شده‌اند، موارد S1، S2، S7، S8، S9 و S10 در زوایای دِدرایز 15، 20، 25، 30 و 35 درجه با ارتفاع سقوط 0.5 متری انتخاب شده‌اند. با جایگزینی مقادیر حداکثر فشار در رابطه‌ی ضریب فشار، می‌توان مقادیر مورد نظر برای ضریب حداکثر فشار را به‌دست آورد. به منظور بررسی هر چه بهتر صحت حل عددی صورت پذیرفته، نتایج به صورت همزمان با داده‌های حل تحلیلی واگنر [2] و نتایج آزمایشگاهی برجسته و همکاران [14] مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفتند. با مقایسه‌ی اعداد مربوط به حداکثر ضریب فشار، خطای روش عددی پژوهش حاضر نسبت به نتایج آزمایشگاهی حداکثر بین 2٪ تا 9٪ متغییر خواهد بود. که این تغییر وابستگی شدیدی به زاویه دِدرایز گُوِه خواهد داشت. به صورتی‌که که هرچه زوایای دِدرایز کوچک‌تر می‌شوند، نتایج حل عددی و تحلیلی تا حدودی از نتایج آزمایشگاهی فاصله می‌گیرند. نمودار مربوط به صحت نتایج با بکارگیری ضریب فشار در "شکل 6" گنجانده شده است.

جدول 5 ثابت‌های مشخصات فیزیکی در حل عددی

Table 5 Physical constant properties of the numerical solution

ثابت‌های فیزیکی	ویسکوزیته‌ی سینماتیکی(υ)	چگالی آب [kg/m³]	کشش سطحی [N/m]	شتاب جاذبه [m/s²]
مقادیر	0.000001	1000	0.07	9.81

جدول 6 مقادیر تنظیمات مورد استفاده در حلگر

Table 6 Solver setting values

متغیر	مقادیر
حداکثر عدد کورانت	0.5
گام زمانی (ثانیه)	0.00002
فاکتور ضریب آرامش (فشار)	0.4
فاکتور ضریب آرامش (سرعت)	0.8

4-2- مقایسه‌ی بیشینه‌ی فشار

معمولاً از بیشینه‌ی ضریب فشار به عنوان معیاری برای بررسی صحت نتایج استفاده می‌شود. با این وجود، در پژوهش حاضر همان‌طور که در "شکل‌های 7 و 8" مشاهده می‌گردد، خروجی نتایج مرتبط با بیشینه‌ی فشار نیز تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند. همان‌طور که در بخش مربوط به صحت نتایج با معیار ضریب فشار نیز اشاره گردید، عموماً نتایج حاصل از شبیه‌سازی با استفاده از گُوِه‌هایی با زاویه‌ی دِدرایز کوچک، به دلیل فرضیاتی نظیر ثابت بودن سرعت و کم نشدن سرعت برخورد به آب در حین کوبش و در نظر

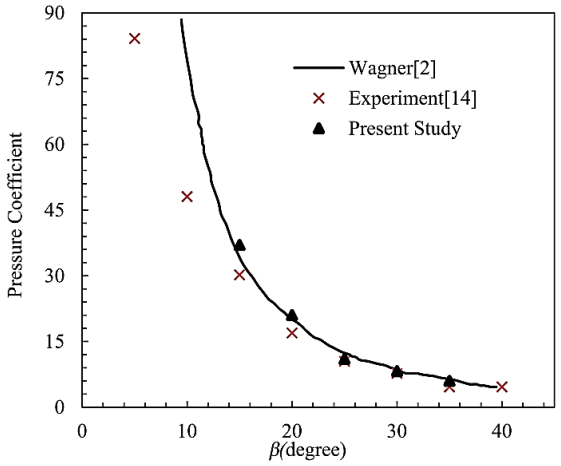

Fig. 6 Comparison of the maximum pressure coefficient at different deadrise angles

شکل 6 مقایسه‌ی بیشینه‌ی ضرایب فشار در زوایای دِدرایز مختلف

[1] pressure inletoutlet velocity
[2] no-slip
[3] free-slip
[4] VOF (Volum Of Fluid)
[5] interFoam

نگرفتن تراکم‌پذیری آب و هوا از نتایج آزمایشگاهی فاصله می‌گیرند. در واقع عوامل ذکر شده، در زاوایای دِدرایز کم تأثیر بیشتری از خود نشان می‌دهند. البته، در حل عددی صورت پذیرفته در پژوهش حاضر با توجه به "شکل 8" مشاهده می‌شود که نتایج گُوِه β=15 درجه با ارتفاع سقوط 0.75 متر نیز تطابق مناسبی با نتایج آزمایشگاهی برخوردار است.

5- نتایج حل عددی

در ادامه، اثر عواملی نظیر زاویه‌ی برخورد، ارتفاع اولیه‌ی گُوِه و همچنین زاویه‌ی دِدرایز بر روی نتایج بررسی شده و روند کلی جوابها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همچنین بروز پدیده‌ی خیسی چاین در ورود گُوِه‌ی نامتقارن و اثرات آن در تغییرات فشار نیز مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

5-1- تأثیر تغییر زاویه‌ی برخورد و و انحراف گُوِه

بررسی تأثیرات انحراف گُوِه از موضوعات جالب مورد بررسی است. چرا که این شبیه‌سازی در شرایطی انجام می‌گردد که شناور در حالت غیرپایدار و با زوایای متفاوت به سطح آب برخورد کرده و پدیده‌ی کوبش در حالت نامتقارن

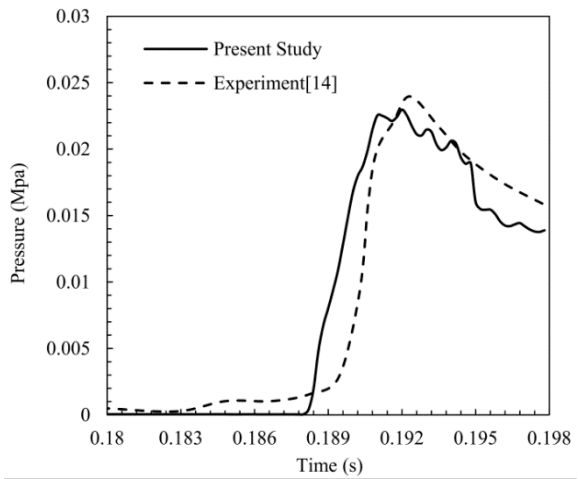

Fig. 7 Comparison of the maximum pressure at different times (β=25deg, h=0.2m)

شکل 7 مقایسه‌ی نتایج بیشینه‌ی فشار در زمان‌های مختلف (β=25deg, h=0.2m)

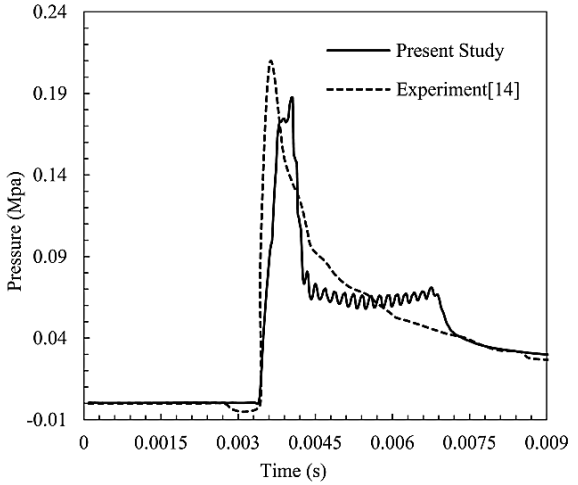

Fig. 8 Comparison of the maximum pressure at different times (β=15deg, h=0.75m)

شکل 8 مقایسه‌ی نتایج بیشینه‌ی فشار در زمان‌های مختلف (β=15deg, h=0.75m)

رخ می‌دهد. بنابراین با استفاده از گُوِه‌های نامتقارن که دارای درجات انحراف متفاوتی می‌باشند (براساس شکل9)، می‌توان تخمین مناسبی از فشارهای ثبت شده انجام داد. با مقایسه‌ی نیروی وارد بر گُوِه، تغییرات قابل ملاحظه‌ای بین گوه با β=15 درجه و β=30 درجه مشاهده می‌شود، که در واقع افزایش 280 درصدی را نشان می‌دهد. همان‌طور که از "شکل 9" مشخص است، در دو حالت انحراف φ=5, 10 درجه، نیروی اعمالی تقریباً یکسان و برابر با 48 نیوتن می‌باشد. با این تفاوت که زمان وقوع آن در گُوِه با انحراف 10 درجه، زودتر از گُوِه با انحراف 5 درجه می‌باشد.

در "شکل 10" از یک گُوِه با β=20 درجه و زوایه‌ی انحراف φ=5 درجه استفاده شده است. با توجه به نمودار، افزایش ناگهانی فشار به میزان 45 درصد و در سمت چپ گُوِه ایجاد می‌شود. علاوه بر این، نامتقارن شدن گُوِه نیز مکان و زمان وقوع حداکثر فشار را از زمان 0.013 به زمان 0.011 تغییر داده است. هرچه انحراف گُوِه بیشتر شود، بر درصد افزایش فشار افزوده و زمان وقوع حداکثر فشار نیز به سمت زمان برخورد اولیه‌ی آب به گُوِه، میل خواهد کرد. در "شکل 11 و 12" نتایج مربوط به برخورد گُوِه با زاویه‌ی انحراف 10 درجه و ارتفاع سقوط 0.5 متر در دو موقعیت مکانی فشارسنج G1 و فشارسنج G2 بررسی شده است.

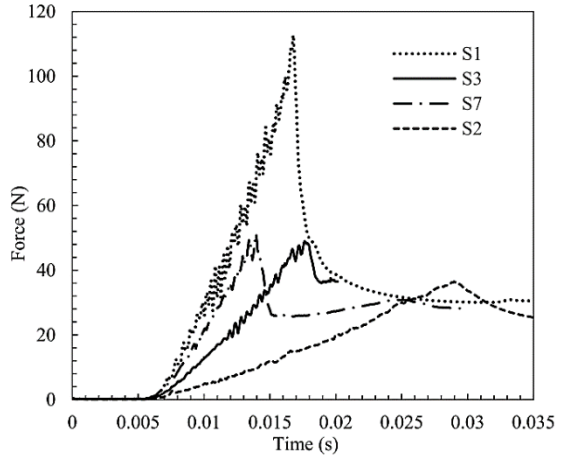

Fig. 9 Comparison of acting force on the wedge at different impact angles VS time

شکل 9 مقایسه‌ی نیروی وارد شده بر گُوِه در زوایای برخورد مختلف به ازای زمان

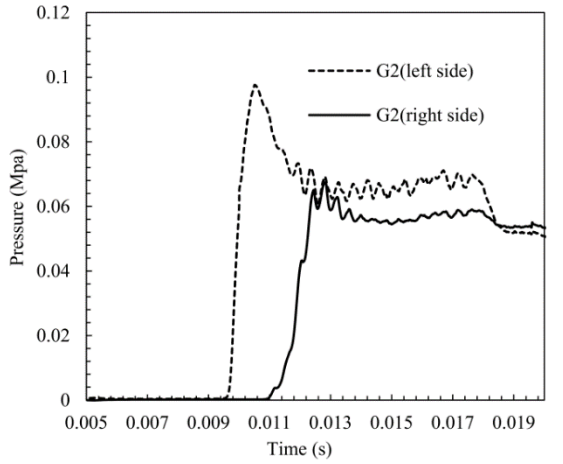

Fig. 10 Comparison of maximum pressure at both sides of wedge at pressure gauge G2 (β=20deg, h=0.5m, φ=5deg)

شکل 10 مقایسه‌ی بیشینه‌ی فشار در محل فشارسنج 2 در دو سمت گُوِه (β=20deg, h=0.5m, φ=5deg)

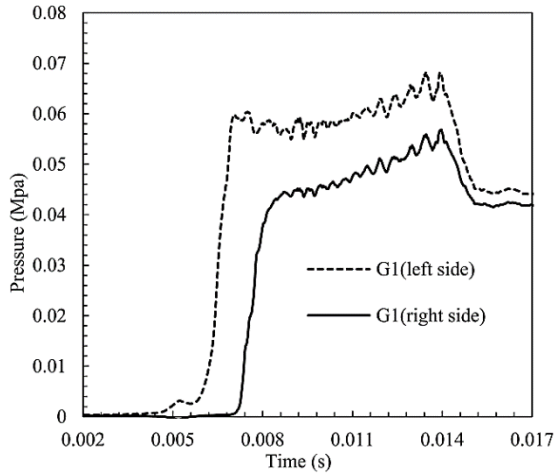

Fig. 11 Comparison of maximum pressure at both sides of wedge at pressure gauge G1 (β=20deg, h=0.5m, φ=10deg)

شکل 11 مقایسه‌ی بیشینه‌ی فشار در محل فشارسنج 1 در دو سمت گُوِه (β=20deg, h=0.5m, φ=10deg)

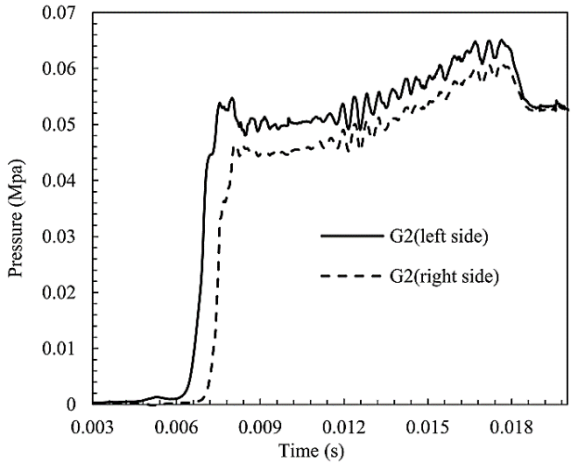

Fig. 12 Comparison of maximum pressure at both sides of wedge at pressure gauge G2 (β=20deg, h=0.5m, φ=10deg)

شکل 12 مقایسه‌ی بیشینه‌ی فشار در محل فشارسنج 2 در دو سمت گُوِه (β=20deg, h=0.5m, φ=10deg)

5-2-پدیده‌ی خیسی چاین

در این پژوهش سعی شده به شبیه‌سازی برخورد گُوِه در حالت چاین خشک که همواره از نتایج با قابلیت اطمینانِ بالاتری برخوردار است پرداخته شود. یعنی حل عددی مسئله تا زمانی ادامه می‌یابد که سطح آب پایین‌تر از سطح بالایِ گُوِه قرار می‌گیرد و آب از چاین گُوِه عبور نمی‌کند. با این وجود در ورود گُوِه‌ی نامتقارن که در "شکل 13" نشان داده شده است، قسمت چپ گُوِه که زاویه‌ی کم‌تری با آب می‌سازد با تقدم وارد آب شده و سبب بروز پدیده‌ی خیسی چاین در یک سمت از گُوِه خواهد شد. بنابراین بررسی رفتار گُوِه و متغیرهای فیزیکی جریان و نحوه‌ی تغییرات آن بعد از بروز خیسی چاین اهمیت خواهد یافت.

در پدیده‌ی ورود گُوِه به آب، نیروی کلی وارد بر گُوِه حاصل از سه نیروی، مومنتوم جریان، جاذبه و مومنتوم جرم افزوده می‌باشد، که بیشترین تأثیر مربوط به نیروی ناشی از جرم افزوده خواهد بود. در حالت چاین خشک ضرائب جرم افزوده (C_m و C_{my}) براساس رابطه‌ی (9) برای هر زاویه‌ی دِدرایز در کل زمان برخورد ثابت بوده و تغییر ندارند. البته با گذر آب از چاین و وقوع خیسی، مقدار جرم افزوده با روندی کند و با مقادیری کوچک افزایش می‌یابد.

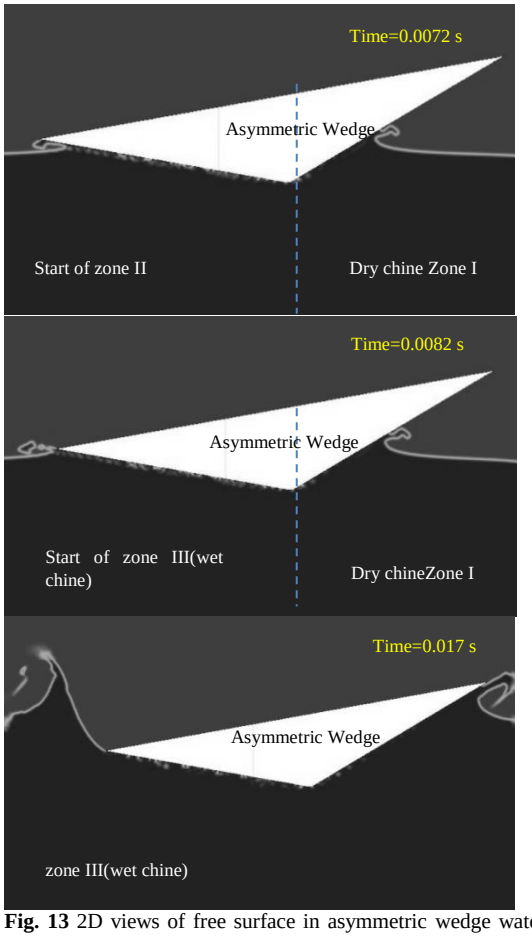

Fig. 13 2D views of free surface in asymmetric wedge water entry at different time steps (S7)

شکل 13 نمای دوبُعدی سطح آب در برخورد گُوِه‌ی نامتقارن در زمان‌های مختلف (موبوط به حالت S7)

روند این تغییرات توسط ضریبی با عنوان C_{mb} که یک ضریب بی‌بُعد از جرم افزوده می‌باشد و توسط کِلِرک و تیویتنس در سال 2008 ارائه شده است ارزیابی می‌شود [17]. بر این اساس برای گُوِه با زوایای دِدرایز مختلف این ضریب استخراج خواهد شد.

$$C_{my} = \frac{\pi}{2}\{0.15 + \frac{0.85}{\cos(\beta)}\left(1 - \frac{2\beta}{\pi}\right)^3\} \quad (9)$$

$$C_{mb} = \frac{\text{added mass}}{\rho(\frac{\pi}{2})(\frac{\beta}{2})^2} \quad (10)$$

در روابط بالا ρ چگالی سیال و β هم زاویه دِدرایز می‌باشد. به منظور بررسی دقیق‌تر پدیده‌ی خیسی چاین و تأثیرات مربوط به آن، در ابتدا از برخورد یک گُوِه با زاویه‌ی 30 درجه و استفاده از سه فشارسنج P1، P2 و P3 با فواصل 0.058، 0.065 و 0.068 از رأس گُوِه بهره گرفته شده است. بر این اساس، سه ناحیه‌ی اصلی را در برخورد گُوِه با توجه به "شکل 14" می‌توان متصور بود. ناحیه‌ی اول مربوط به برخورد با چاینِ خشک می‌باشد. ناحیه دوم که فشار در آن کاهش می‌یابد مربوط به زمانی خواهد بود که در آن آب بالا آمده و روی سطح گُوِه (جت آب) در حال گذر از سطح گُوِه و پخش شدن در هوا می‌باشد. بنابراین فشار در این مرحله کاهش خواهد یافت. ناحیه‌ی سوم که مربوط به خیسی چاین می‌باشد و همان‌طور که قبلاً هم اشاره شد، نیروی جرم افزوده با روندی کند افزایش می‌یابد که همین روند را می‌توان در خروجی‌های فشارسنج‌ها مشاهده کرد. نحوه‌ی تغییرات فشار مربوط به گُوِه با تغییر در زوایای دِدرایز متفاوت خواهد بود.

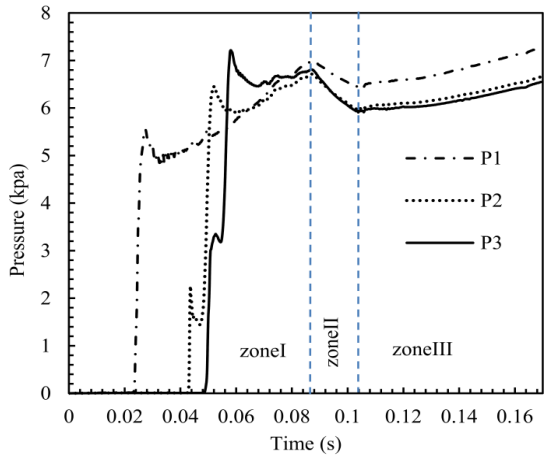

Fig. 14 Comparison result of pressure Gauges for 30 degree wedge impact in 3 zone

شکل 14 مقایسه نتایج خروجی فشارسنج‌ها در برخورد گُوِه با زاویه دِدرایز 30 درجه در سه ناحیه

5-3- پدیده‌ی گیرافتادن هوا

با توجه به کم شدن زاویه‌ی برخورد در سمت چپ گُوِه در شبیه‌سازی حالت S7، میزان خیسی سطح گُوِه در قسمت چپ، تقریباً دو برابر قسمت راست خواهد بود. از این‌رو در قسمت چپ گُوِه که زاویه‌ای 10 درجه با آب می‌سازد در لحظات اولیه‌ی برخورد، پدیده گیرافتادگی هوا که معمولاً در برخورد مقاطع با زاویه دِدرایز کوچک ایجاد می‌شود، نمایان خواهد شد. [18]، می‌توان به وضوح اثرات این پدیده را که همان به وجود آمدن حباب‌های هوا در نزدیکی سطح برخورد گُوِه می‌باشد، در "شکل 15" که بیانگر کانتور کسر حجمی آب و هوا می‌باشد مشاهده نمود. از این‌رو یکی از ویژگی‌های حلگر اینترفوم در مسأله‌ی کوبش توانایی نشان دادن گیرافتادگی هوا می‌باشد، که در اکثر حلگرهای دینامیک سیالات محاسباتی، این پدیده به درستی شبیه‌سازی نمی‌شود و یا اصلاً وقوع چنین پدیده‌ای ثبت نخواهد شد. با توجه به "شکل 15" به وضوح می‌توان پی به وجود حباب‌های هوا در نقاط بسیار نزدیک به سطح میانی گُوِه و آب برد. وقوع چنین پدیده‌ای می‌تواند سبب ایجاد فشارهای موضعی و آنی بر روی سطح گوه شود. تغییرات فشار در زمان‌های مختلف را می‌توان در "شکل 16" مشاهده کرد. همان طور در این شکل مشخص است، حداکثر فشار در زمان 0.015 ثانیه رخ می‌دهد که این زمان قبل از وقوع خیسی چاین می‌باشد و در محدوده‌ی چاین خشک رخ می‌دهد، بعد از آن فشار روند نزولی به خود می‌گیرد.

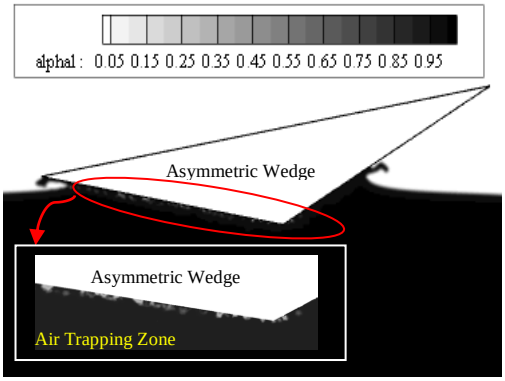

Fig. 15 Appearance of Air Trapping at wedge impact (S7)

شکل 15 نمایش گیرافتادگی هوا در برخورد گُوِه مربوط به حل S7

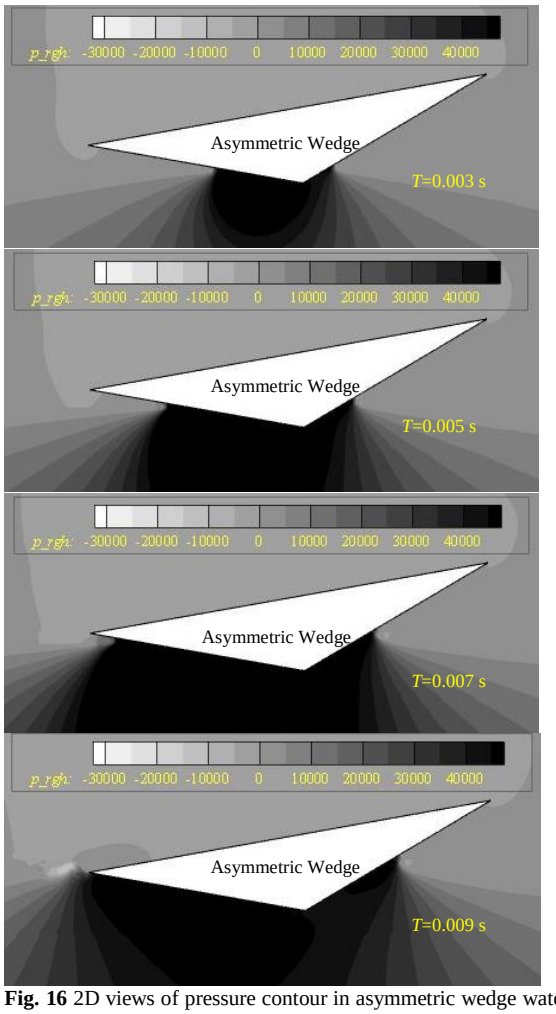

Fig. 16 2D views of pressure contour in asymmetric wedge water entry at different time steps (S7)

شکل 16 نمای دوبُعدی کانتور فشار در برخورد گُوِه‌ی نامتقارن موبوط به حالت S7

5-4- تأثیر سرعت برخورد گُوِه به سطح آب

سرعت برخورد گُوِه به آب از جمله متغیرهای مؤثر در پدیده‌ی کوبش می‌باشد. در حالت واقعی، سرعت جسم بعد از برخورد کاهش یافته تا به صفر برسد. اما از آن‌جایی که بررسی پدیده‌ی کوبش در زمان‌های کوتاه انجام می‌شود، سرعت را همان سرعت ورودی به آب و ثابت در نظر می‌گیرند. تغییرات نیروهای اعمالی بر گُوِه با سرعت‌های مختلف برخورد را می‌توان در نمودار "شکل 17" مشاهده نمود. در این شکل ارتفاع‌های برخورد 0.5 و 0.2 متری از برخورد گُوِه با دِدرایز 15 درجه شبیه‌سازی شدند، که در واقع گُوِه ثابت بوده و آب با سرعت معادل سقوط گوه از ارتفاع 0.5 و 0.2 متری یعنی به‌ترتیب 3.16 و 2 متر بر ثانیه به گُوِه برخورد خواهد کرد. به منظور بررسی دقیق‌تر در حوزه‌ی تأثیرپذیری فشار از سرعت برخورد، از متغیر بی‌بُعد ضریب فشار استفاده می‌گردد. بدین منظور، شبیه‌سازی با استفاده از گُوِه با زاویه‌ی دِدرایز 30 درجه و از سرعت‌های معادل سقوط گُوِه در ارتفاع‌های 0.05، 0.2، 0.5، 0.75، 1 و 1.25 متر استفاده شده است. با استناد به "شکل 18" می‌توان مشاهده نمود که با افزایش سرعت برخورد در فشارسنج G2 مقادیر مربوط به حداکثر فشار کاهش خواهد یافت. البته این کاهش در فشارسنج G1 به صورت نوسانی خواهد بود.

5-5- تأثیر زاویه‌ی برخورد گُوِه به آب

از مهم‌ترین پارامترهای تأثیرگذار در فشار اعمالی از سیال به بدنه‌ی جسم در

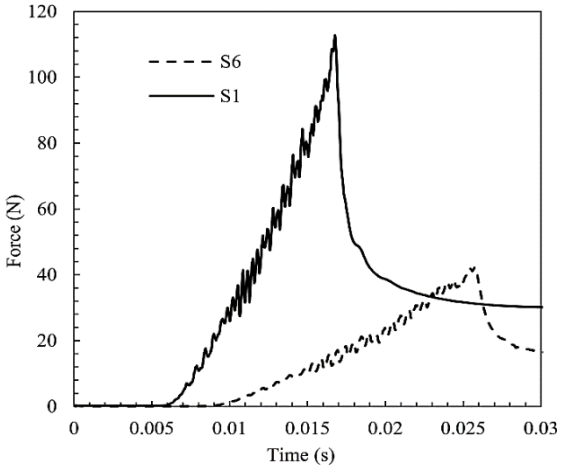

Fig. 17 2D Comparison of acting force on the wedge at different falling heights VS time (β=15deg)

شکل 17 مقایسه‌ی نیروی وارد بر گُوِه در زمان‌ها و با ارتفاع‌های مختلف (β=15deg)

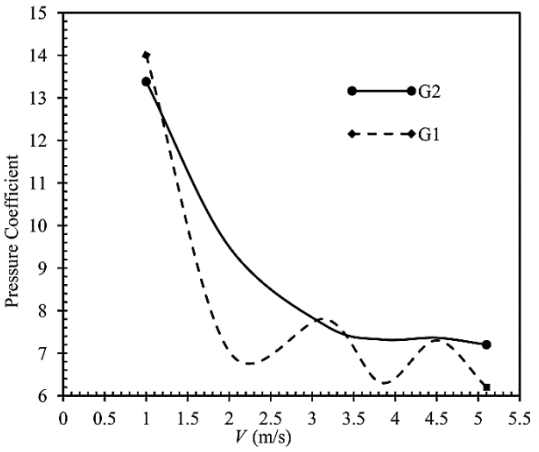

Fig. 18 maximum pressure coefficient values at pressure gauge G1 &G2

شکل 18 مقادیر ضرائب حداکثر فشار ثبت شده توسط فشارسنج‌های G1 و G2

حین پدیده‌ی کوبش، زاویه‌ای است که بدنه با سطح آزاد آب می‌سازد. نتایج حل عددی مربوط به حالت‌های S2، S5 و S6 در زوایای دِدرایز مختلف و شرایط برابر برخورد، در "شکل 19" نمایش داده شده است. از نکات قابل توجه در این نمودار، کاهش 38 درصدی در حداکثر فشار اعمالی بر گُوِه، با افزایش 10 درجه‌ای در زاویه دِدرایز می‌باشد، که البته در گام بعدی با افزایش 5 درجه‌ای در زاویه‌ی دِدرایز (از 25 به 30 درجه) کاهش 12 درصدی در حداکثر فشار مشاهده می‌گردد.

6-5- بررسی محل نصب فشارسنج‌ها

همان‌طور که پیشتر نیز بیان شد، پدیده‌ی کوبش از جمله پدیده‌هایی بوده که از سرعت بالایی برخوردار می‌باشد. بنابراین تأثیرات مربوط به آن، به سرعت در سطح گُوِه جابه‌جا می‌گردند. از این رو روش چیدمان فشارسنج و موقعیت قرارگیری آن‌ها می‌تواند یکی از اصول اولیه در تخمین دقیق فشارهای وارده بر گُوِه تلقی گردد. با توجه به نمودار استخراج شده در "شکل 20" می‌توان حساسیت بالای محل وقوع حداکثر فشار در پدیده‌ی کوبش را مورد ارزیابی قرار داد. براساس فاصله‌ی 55 میلی‌متری بین فشارسنج‌ها مشاهده می‌شود، با برخورد آب با فشارسنج اول (G1)، فشار ثبت شده به صورت تقریبی 0.07 مگاپاسکال می‌باشد. با ادامه‌ی حرکت و جابه‌جایی 55 میلی‌متری روی سطح

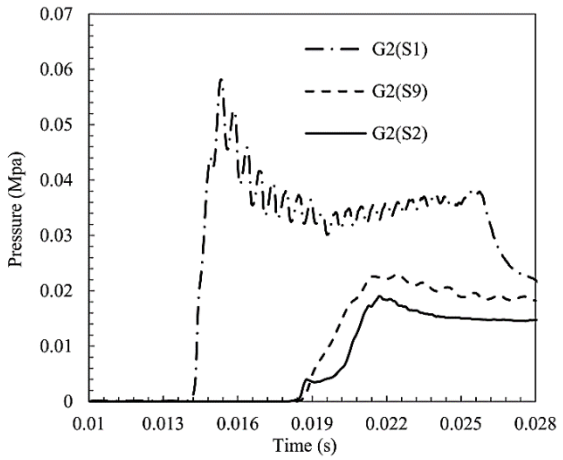

Fig. 19 Comparison of maximum pressure at pressure gauge G2 at different deadrise angles

شکل 19 مقایسه‌ی بیشینه‌ی فشار در محل فشارسنج 2 در دِدرایزهای مختلف

گُوِه، فشار به 0.13 مگاپاسکال افزایش می‌یابد. یعنی فشار به صورت تقریبی دو برابر افزایش را نشان می‌دهد. همین روند برای فشارسنج G2 و G3 نیز صدق خواهد کرد. البته مقادیر ذکر شده برای فشار و میزان و درصد افزایش فشار با توجه به موقعیت قرارگیری فشارسنج برای حل مربوط به S6 می‌باشد، که در آن از گُوِه با زاویه‌ی دِدرایز 15 درجه و ارتفاع سقوط 0.2 متر استفاده شده است. البته می‌توان این‌طور از نتایج سایر حل‌های عددی انتظار داشت که نتایجی مشابه با روند حل S6 داشته باشند.

6- بحث و نتیجه‌گیری

ماهیت پدیده‌ی کوبش از لحاظ محاسباتی جزء مسائل با حساسیت بالا محسوب می‌شود، که دلیل آن را می‌توان در کوتاه بودن زمان وقوع حداکثر فشار جست‌وجو کرد. البته موقعیت‌یابی مختصات وقوع حداکثر فشار را نیز باید به حساسیت‌های این پدیده اضافه نمود. بدین منظور در این مقاله از سرعت‌های مختلف و زوایای مختلف برخورد استفاده شده تا به بررسی صحت نتایج حل عددی در شرایط مختلف کوبش پرداخته شود. با مقایسه‌ی نمودارهای ارائه شده در حالت چاین خشک و قبل از وقوع خیسی چاین می‌توان دریافت که با افزایش زاویه‌ی دِدرایز، فشار ناشی از کوبش بر روی

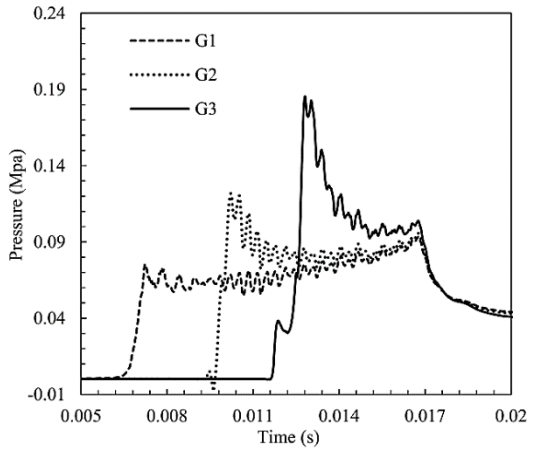

Fig. 20 Comparison of maximum pressure values at pressure gauge G1, G2 and G3 (β=15deg, h=0.2m)

شکل 20 مقایسه‌ی مقادیر بیشینه‌ی فشار در محل فشارسنج‌های 1، 2 و 3 (β=15deg, h=0.2m)

بدنه کاهش می‌یابد. دلیل این امر را می‌توان در ضریب بالا روندگی[1] آب و طول خیس شده‌ی بدنه جست‌وجو کرد. برطبق مطالعات صورت گرفته توسط پانسیرولی و همکاران 60 تا 80 درصد انرژی برخورد صرف بالا رفتن آب از سطح جسم خواهد شد که در متون علمی با عنوان، آب بالا آمده[2] شناخته می‌شود [19]. این عامل، خود به دو بخش آب بالا آمده و اسپری جت تقسیم می‌شود. بنابراین با افزایش زاویه‌ی دِدرایز، طول خیسی از سطح گُوِه کاهش یافته و در نتیجه درصد بالایی از حجم آب برخوردی به گُوِه به سمت بالا حرکت می‌کند، که به تبعِ آن فشار کمتری به گُوِه اعمال می‌گردد. از سوی دیگر، با به‌کارگیری فشارسنج‌های مختلف در طول صفحات گُوِه و مقایسه‌ی فشارهای ثبت شده در نمودارها، می‌توان به این نتیجه رسید که حداکثر فشار تقریباً در میانه‌ی صفحات گُوِه به ثبت می‌رسد. در نهایت با در نظر گرفتن گوه‌های نامتقارن با زوایای انحراف متفاوت و استفاده از فشارسنج‌هایی در سمت راست و چپ گُوِه می‌توان به این درک از مسأله کوبش رسید که تغییرات هر چند کوچک در زاویه‌ی دِدرایز می‌تواند منتج به تغییرات قابل توجهی در فشار اعمالی از سیال به سطح گُوِه شود. از طرفی با مقایسه‌ی نتایج در این مقاله با نتایج آزمایشگاهی، دقت بالای حل عددی به اثبات رسیده، که خطایی به صورت میانگین 5 درصد را شامل می‌گردد. بنابراین از این حلگر می‌توان در مسائلی که به منظور به‌دست آوردن فشارهای ناشی از برخورد آنی سازه و سیال در شرایط مختلف برخورد تعریف می‌گردد استفاده نموده و نتایج قابل قبولی به‌دست آورد. همچنین، مقادیر بیشینه‌ی فشار و توزیع آن در مقابل زمان می‌تواند به‌عنوان منبعی برای تحلیل‌های سازه‌ای شناورهای تندرو که در معرض پدیده‌ی کوبش قرار دارد مورد استفاده قرار گیرد.

7- مراجع

[1] T. Von Karman, The impact on seaplane floats during landing, *National Advisory Committee for Aeronautics*, Vol. 321, No. 9, pp. 309-313 , 1929.

[2] H. Wagner, Phenomana associated with impacts and sliding on liquid surfaces, *Mathematic and Mechanic*, Vol. 12, No. 4, pp. 193-215, 1932.

[3] M. Greenhow, Wedge entry into initially calm water, *Applied Ocean Research*, Vol. 9, No. 4, pp. 214–223, 1987.

[4] Z. N. Dobrovol'skaya, On some problems of similarity flow of fluid with a free surface, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 36, No. 4, pp. 805–829, 1969.

[5] S. Muzaferija, M. Peric, P. Sames, T. Schellin, A two-fluid Navier–Stokes solver to simulate water entry, *Proceedings of 22nd Symposium of Naval Hydrodynamics*, Washington DC, pp. 638–651, 1997.

[6] A. A. Korobkin, Water impact problems in ship hydrodynamics, *Advances in Marine Hydrodynamics*, Vol. 5, No. 4, pp. 323–371, 1996.

[7] E. F. Campana, A. Carcaterra, E. Ciappi, A. Iafrati, Parametric analysis of slamming forces: compressible and incompressible phases, *Proceedings of 3rd International Conference on Hydrodynamic*, Seoul, Korea, pp. 167–172, 1998.

[8] R. Zhao, O. M. Faltinsen, J. Aarsnes, Water entry of arbitrary two-dimentional sections with and without flow sepration, *Proceedings of the 21st Symposium on Naval Hydrodynamics*, National Academy Press, Washington DC, pp. 408-423, 1996.

[9] O. M. Faltinsen, M. Chezian, A generalized wagner method for three-dimensional slamming, *Journal of Ship Research*, Vol. 49, No. 4, pp. 591, 2005.

[10] P. R. Garabedian, Oblique water entry of a wedge, *Communications on Pure Applied Mathematics*, Vol. 6, No. 2, pp. 157–165, 1953.

[11] S. F. Borg, Some contributions to the wedge-water entry problem, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Vol. 253, No. 6, pp. 1-1218 1957.

[12] H. Rusche, *Computational Fluid Dynamics of Disperesed Two-Phase Flows at High Phase Functions*, Ph.D Thesis, University of London, 2002.

[13] R. Issa, Solution of the impilicitly discretized fluid flow equations by operator splitting, *Journal of Computational Physics*, Vol. 62, No. 1, pp. 40-65, 1985.

[14] M. Barjasteh, H. Zeraatgar, M. J. Javaherian, An experimental study on water entry of asymmetric wedge, *Applied Ocean Research*, Vol. 58, No. 1, pp. 292–304, 2016.

[15] O. Aagaard, *Hydroelastic Analysis of Flexible Wedges*, Master Thesis, Norwegion university of science and Technology, 2013.

[16] http://www.openfoam.com, The open source CFD toolbox and OpenFOAM UserGuide.

[17] A. C. Fairlie-Clarke, T. Tveitnes, Momentum and gravity effects during the constant velocity water entryof wedge-shaped sections, *Applied Ocean Engineering*, Vol. 35, No. 7, pp. 706–716, 2008.

[18] S. Seng, *Slamming and Whiping Analysis of Ships*, Ph.D Thesis, DTU Mechanical engineering, 2012.

[19] R. Panciroli, A. Shams, M. Porfiri, Experiments on the Water entry of curved wedges: High speed imaging and particle image velocity, *Applied Ocean Engineering*, Vol. 94, No. 10, pp. 213–222, 2015.

[1] pile-up
[2] risen water