ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدر س

mme.modares.ac.ir

مطالعه عددی و آزمایشگاهی مسئله ورود یک پرتابه به آب و بررسی اثر سرعت برخورد بر زمان و عمق جدایش حباب

محمدرضا عرفانيان¹، محمد مقيمان^{2*}

1- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد 2- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد "مشهد، صندوق يستى moghiman@um.ac.ir ،91775-1111

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله مسئله ورود به آب یک پرتابه سه بعدی با دماغه نیم کروی با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای حل عددی یک مدل سه بعدی از پرتابه با دماغه نیم کروی و در شرایط شش درجه آزادی در نظرگرفته شده است. از الگوریتم کوپل اویلری- لاگرانژی برای در نظر گرفتن برهمکنش بین سیال و سازه (پرتابه) استفاده شده است. از طریق تماس اویلری- لاگرانژی، جسم	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 17 مهر 1393 پذیرش: 26 آبان 1393 ارائه در سایت: 29 آذر 1393
لاگرانژی (پرتابه) میتواند با ماده اویلری (آب) برهم کنش نماید. همچنین از یک معادله حالت برای بیان رفتار هیدرودینامیکی ماده اویلری	کلید واژگان:
استفاده شده است. نتایج حل عددی هم با نتایج آزمایشگاهی موجود مربوط به سقوط کره در مقالات و هم با نتایج آزمایشگاهی کار حاضر که	ورود به آب
مربوط به پرتابه است، مقایسه شده است. آزمایش برای یک پرتابه با دماغه نیم کروی و در یک تانک آب مجهز به سیتم پرتابگر و دوربین سرعت	كوپل اويلري–لاگرانژي
بالا انجام شده است. نتایج شبیهسازی عددی شامل شکل حباب هوای تشکیل شده و مسیر حرکت پرتابه با نتایج آزمایشگاهی کار حاضر مقایسه	پرتابه
شده است. تطابق خوب نتایج عددی و آزمایشگاهی دقت و کاربرد الگوریتم عددی را آشکار میکند. همچنین مشاهده گردید که لحظه وقوع بدان مدار تاریخ از معنی ندار و بر از مار می بردان و الزنان و معتی زرد و بر بر بر نما از از می مدارد.	لحظه جدایش حباب

Numerical and Experimental Investigation of a Projectile Water Entry Problem and Study of Velocity Effect on Time and Depth of Pinch-off

Mohammad Reza Erfanian¹, Mohammad Moghiman^{2*}

Department of Mechanical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran *P.O.B. 91775-1111 Mashhad, Iran, Moghiman@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper Received 09 October 2014 Accepted 17 November 2014 Available Online 20 December 2014

Keywords: Water entry Coupled Eulerian - Lagrangian Projectile Pinch - off time

ABSTRACT

In this study, the water entry problem of a spherical-nose projectile is investigated numerically and experimentally. For the numerical simulations, a three dimensional model of the projectile with six-degree-of-freedom rigid body motion is considered. A Coupled Eulerian-Lagrangian (CEL) method is employed for modeling fluid-structure interactions. Through Eulerian-Lagrangian contact, Eulerian material can interact with Lagrangian elements. Also, an equation of state model describes the hydrodynamic behavior of the material. The numerical results are well compared with the available experimental results of a falling sphere in the literature and also the experiments of the current study. The experiments are performed for a spherical-nose projectile in a water tank equipped with a launching system and a high speed camera. The simulation results such as air cavity shape and the projectile trajectory are compared with the presented experiment data. The good agreement observed between the numerical results and those of the experiments, revealed the accuracy and capability of the proposed numerical algorithm. Also, it has been shown that the pinch-off time is a weak function of impact velocity, however, increasing velocity leads to a linear increase in depth of pinch-off.

1- مقدمه

برخوردار است. در سه دهه اخیر محققین فراوانی با استفاده از روشهای مختلف به بررسی مسئله ورود به آب پرداختهاند. پژوهشهای انجام شده را می توان به سه دسته کلی تقسیم بندی کرد: پژوهش های آزمایشگاهی، حلهای تحلیلی و شبیهسازیهای عددی. الف. پژوهش های آزمایشگاهی. پژوهش های آزمایشگاهی اولیه برای اندازه گیری نیروهای برخورد حین ورود به آب نیز به دلیل ناتوانی ابزار در

تحمل شوکی که در حین برخورد تحمل می شود و همچنین ناتوانی ابزار در

مطالعه برخورد هيدروديناميك اجسام جامد با سطح آب بيش از 70 سال است که از اهمیت ویژهای برای طراحان سازه برخوردار میباشد. پیشبینی صحیح نیروهای برخورد با آب، به ویژه در اولین لحظات برخورد که بیشترین نیروها اتفاق می افتد، در طراحی موشکها، فضاییماها و در طراحی سازههای دریایی که بایستی نیروهای برخورد آب را تحمل کنند، از اهمیت بسیاری

Please cite this article using: M. R. Erfanian, M. Moghiman, Numerical and Experimental Investigation of a Projectile Water Entry Problem and Study of Velocity Effect on Time and Deptrior Pinen off Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 2, pp. 53-60, 2015 (In Persian)



آب کرههای آب گریز³ و استوانههای عمودی انجام دادند. آنها یک مدل

تئوری برای پیشبینی پارامترهای مهمی همچون عمق و زمان جدایش

حباب 4، عمق استوانه در زمان جدایش حباب و حجم کویتی پشت کره توسعه

دادند[11]. گرچه تاکنون حلهای تحلیلی مختلفی برای مسئله ورود به آب

اجسام مختلف ارائه شده است، اما این روشها به دلیل فرضیات ساده

کننده ای که برخی از اثرات مهم از جمله لزجت جریان را نادیده می گیرند، با

مختلف در مورد کنش میان سازه- سیال انجام شده است را می توان به دو

دیدگاه کلی تقسیمبندی نمود: روشهای شبیهسازیهای تقریبی و روشهای

شبیهسازی مستقیم. در روش های شبیهسازی های تقریبی از فرض های ساده-

كنندهاى همچون فرض جريان پتانسيل يا جريان استوكس استفاده مىشود و

به همین علت توانایی در نظر گرفتن برخی اثرات مهم از جمله اثر لزجت و

جدایش جریان را ندارند. مروری جامع بر روشهای شبیهسازی تقریبی توسط

به صورت دوبعدی بررسی کردهاند [14]. کیم و همکاران در سال 2007

مسئله ورود به آب را برای اجسام متقارن با استفاده از روش هیدرودینامیک

ب. شبیهسازیهای عددی. شبیهسازیهای عددی که توسط محققین

گسترش رایانه های امروزی جای خود را به شبیه سازی های عددی دادهاند.

پاسخ سریع در حین اندازه گیری های دینامیک، دشوار بوده است. اولین پژوهشهای تجربی به سال 1930 باز می گردد که واتانابه [2،1] برخورد مخروطها با آب را مطالعه کرده است. مخروطها که وزنهای مختلفی داشتند و از ارتفاعهای گوناگون به داخل آب رها میشدند، مجهز به یک اندازهگیر پیزوالکتریک متصل به نوسان سنج بودند تا امکان ثبت تغییرات نیروی حاصل از برخورد با آب وجود داشته باشد. چنین نتایج آزمایشگاهی در تأیید نتایج و روابط تحلیلی ارائه شده بسیار مؤثر بود. در سال 1992، کول و همکاران آزمایشهایی را برای بررسی ورود به آب مایل یک جسم با ابعاد واقعی (راکت) با هدف محاسبه فشار حباب انجام دادند[3]. ابزار و تجهیزات ثبت نتایج در داخل راکت قرار داده شد. هرچند که نتایج برای یک سرعت، یک زاویه ورود و یک شکل دماغه ارائه گردید، اما درک مناسبی از تغییرات فشار حاصل شد. بررسیهای آزمایشگاهی در سال 1993 نیز توسط نیو و همکاران با مطالعه برخورد به آب اجسام منشوری با دماغههای متفاوت، ادامه پیدا كرد[4]. اجسام با استفاده از يك محفظه هواى فشرده و يك شير مغناطيسى که توانایی تنظیم زوایای ورود مختلف را داشت، به داخل آب شلیک شدند. شتاب جسم توسط یک شتابسنج سه محوری اندازه گیری گردید. همچنین برای اولین بار هر دو فرایند پاشش قطرات آب¹و شکل گیری حباب هوا توسط دوربین پر سرعت ثبت و به تصویر کشیده شد. در سال 2010 آریستوف و همکاران در یک تحقیق جامع ورود به آب عمودی کرههای با چگالی مختلف را با استفاده از روشهای آزمایشگاهی و تئوری مورد بررسی قرار دادند. آنها زمان و عمق جدایش حباب و عمق نفوذ کره در لحظه جدایش را با استفاده از مشاهدات آزمایشگاهی محاسبه نمودند [5].

در قسمت آزمایشگاهی پژوهش حاضر، مسئله ورود به آب مایل یک پرتابه با دماغه نیم کروی و بدنه استوانهای با چهار بالک مربعی در انتهای آن بررسی و تغییرات مکانی آن برحسب زمان و زمان جدایش حباب آن محاسبه شده است.

ب. حلهای تحلیلی. اولین پژوهشی که در مورد تعیین تحلیلی نیروهای برخورد به آب منتشر شده است به سال 1929 باز میگردد. ونکارمن با استفاده از اصول ساده همچون بقای مومنتوم و مفهوم جرم اضافه شده، نیروهای برخوردی را که به هنگام ورود به آب شناورها به آنها اعمال می شوند، محاسبه کرده است[6]. ون کارمن فرض کرد که در حین اولین مراحل برخورد، مومنتوم مجموعه آب و جسم ثابت باقی میماند و سرعت جسم کاهش مییابد در حالی که به دلیل اضافه شدن جرمی از آب که با سرعت لحظهای جسم جامد حرکت میکند، جرم جسم اضافه می شود که به جرم اضافه شده² معروف است. برمبنای نظریه ونکارمن، تعیین نیروی حداكثر برخورد وابسته به تعیین جرم اضافه شده و مشتق آن است. محاسبه جرم اضافه شده شدیداً به تغییر شکل سطح آزاد آب وابسته است که اغلب محاسبه آن بسیار دشوار است. تا سال 1959، بیشتر پژوهشهای انجام شده توسط محققین، به گسترش تصویر فیزیکی ارائه شده توسط ونکارمن پرداختهاند که مروری جامع بر آنها توسط شبهلی ارائه گردیده است[7]. در سال 1991، میلو مسئله ورود به آب کرههای صلب را بررسی کرد. او یک حل تحلیلی برای تعیین نیروهای برخورد در حین ورود زاویهدار کره به آب توسعه داد[9،8]. در همین سال هویسون نتایج تحلیلی گذشته در مورد برخورد اجسام دو بعدى با سطح آب را خلاصه كرد و گسترش داد[10]. آريستوف و همکاران در سال 2009، مطالعاتی تحلیلی و آزمایشگاهی در مورد ورود به

ذره⁵ تحلیل کردهاند[15]. در سال 2003، اینگل و لوئیس نتایج فشارهای هیدرودینامیک حاصل از برخورد عمودی با سطح آب را که با استفاده از چندین روش مختلف (کد پنل سهبعدی، روش المان مرزی دوبعدی و مدل سازی المان محدود) محاسبه شده بود[16]، با نتایج آزمایشگاهی و نتایج تحلیلی واکنر [17] و چوآنگ [18] مقایسه و تطابق مناسبی مشاهده نمودند. یانگ و همکاران در سال 2007 ورود به آب تیغههای متقارن و غیرمتقارن را با زوایای ورود خیلی کم (کمتر از 3 و 4 درجه) مورد بررسی قرار دادند[19]. یانگ و کیو در سال 2012، نیروهای وارد بر پرتابه را در حین ورود به آب بهصورت عددی تحلیل کردهاند[20]. آنها با حل معادلات ناویراستوکس به شیوه المان مرزی مسئله را در دستگاه مختصات کارتزین ثابت مورد بررسی قرار دادند.

در همه پژوهشهایی که مورد بررسی قرار گرفت، شبیهسازی عددی برای اجسام دوبعدی و سهبعدی ساده انجام شده است. اما برای مسایل پیچیده که در آنها نرخهای زیاد تغییر شکل و یا هندسههای پیچیده پرتابه وجود دارد، کارایی روشهای بالا به دلیل هزینه زیاد محاسباتی یا دشواریهای همگرا شدن حل، کاهش پیدا میکند. تحلیلهای اویلری– لاگرانژی رویکرد مناسبی برای حل این مسائل است. در کار حاضر، مسئله ورود به آب یک پرتابه سهبعدی به صورت عددی و آزمایشگاهی مدل شده است. برای حل عددی از یک روش اویلری– لاگرانژی که در نرمافزار آباکوس⁶ موجود است و نیاز به شبکهبندی مجدد⁷ ندارد، استفاده شده است. این مدل به صورت مؤثر و آسان تری نسبت به روشهای رایج دینامیک سیالات محاسباتی، برهمکنش میان پرتابه و آب را مدل میکند. روش عددی استفاده

¹⁻ Water splash 2- Added mass

اسماعیلی و تریگویسون [12] و هو [13] ارائه شده است. در این قسمت از مقاله، پژوهشهای انجام شده توسط روشهای شبیهسازی مستقیم مرور شدهاند. کلیفسمن و همکاران در سال 2005 مسئله ورود به آب را برای اجسام گوهای و استوانهای شکل با حل معادلات ناویر استوکس و با استفاده از روش نسبت حجمی سیال و گسسته سازی معادلات روی شبکه کارتزین ثابت

³⁻ Hydrophobic

⁴⁻ Pinch-off 5- SPH

⁵⁻ SPH 6- Abagus

⁷⁻ Remeshing

شده هم با نتایج آزمایشگاهی معتبر مربوط به سقوط کره و هم با دادههای تجربی در پژوهش حاضر برای پرتابه اعتبارسازی شده است. در انجام آزمایش، از یک پرتابه با دماغه نیم کروی که به کمک یک سیستم پرتاب به داخل تانک آب شلیک می شود، استفاده شده است. شکل حباب و مسیر حرکت پرتابه به کمک عکسبرداری های انجام شده توسط دوربین با سرعت بالا به دست آمده است

2- معادلات حاكم و روش حل عددي

در روشهای آنالیز لاگرانژی، گرهها نسبت به ماده در جای خود ثابت هستند و المان همان طور که ماده تغییر شکل پیدا می کند دچار تغییر شکل می شوند. المانهای لاگرانژین همواره صددرصد از یک ماده تشکیل شدهاند؛ بنابراین شرايط مرزى ماده، منطبق بر محدوده المان است.

در روش آنالیز اویلری، برخلاف روشهای لاگرانژی، گرهها در جای خود ثابت هستند و ماده در آنها حرکت کرده یا تغییر شکل میدهد. المانهای اویلری ممکن است که صددرصد از یک ماده تشکیل نشده باشند و ممکن است که از چندین ماده و یا کاملاً از فضای خالی¹ تشکیل شده باشند. بنابراین شرایط مرزی هر ماده اوپلری باید در هر بازه زمانی حل، محاسبه شود و مزر هر ماده مشخص شود [21]. شبکهبندی اویلری معمولاً به شکل المانهای مکعب مستطیل منظم هستند که باعث می شود درصد هر ماده و مرز آن در یک المان آسان تر مشخص گردد. اگر هر ماده اویلری از محیط شبکهبندی اویلری خارج شود از دامنه محاسباتی نیز خارج می گردد. ماده اویلری می تواند با ماده لاگرانژی در تماس باشد که به تماس اویلری-لاگرانژی معروف است. شبیهسازیهایی که از این نوع تماس استفاده می-کنند، آنالیزهای کوپل اویلری- لاگرانژی²نامیده میشوند. این ابزار قدرتمند این امکان را ایجاد میکند که بتوان بسیاری از مسائل چند فازی از جمله تماس سازه با سیال را حل کرد. برای آگاهی از جزئیات روش حل عددی در روش اویلری - لاگرانژی به [23،22] مراجعه شود.

چندین معادله حالت متفاوت برای بیان رفتار هیدرودینامیکی مواد در نرمافزار آباکوس وجود دارد. معادله حالت یک معادله پایه است که فشار را بصورت تابعی از چگالی و انرژی داخلی تعریف میکند[21]. معادله بقای انرژی برابر افزایش در انرژی داخلی بر واحد جرم به نرخ کار ایجاد شده با تنشها و نرخ افزایش دما، قرار می گیرد. در غیاب هدایت گرمای رسانایی معادله انرژی را می توان به شکل رابطه (1) نوشت:

$$\rho \frac{\partial E_m}{\partial t} = (p - p_{bv}) \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial t} + s \cdot \dot{e} + \rho \dot{Q}$$
(1)

که p تنش فشاری است که در جهت تراکم، مثبت تعریف می شود. Em انرژی بر واحد جرم، ρ چگالی، p_{bv} تنش فشاری مربوط به لزجت حجمی، \dot{Q} نرخ گرما بر واحد حجم و s تانسور تنش میباشد که بهصورت عددی در تانسور نرخ کرنش (é) ضرب شده است. فرض می شود که معادله حالت برای فشار به عنوان تابعی از چگالی و انرژی داخلی بر واحد جرم باشد:

مىندىسى مكانىك مدرس، اردىبېشت 1394، دورە 15، شمارە 2

(2)

در پشت یک شوک میباشد. فشار هوگونیوت³، تنها تابعی از چگالی میباشد و عموماً از ترسیم دادههای تجربی حاصل میشود.

همان طور که پیشتر گفته شد برای بیان رفتار ماده اویلری از یک معادله حالت استفاده شده است. معادله حالت می- گرانزین برای انرژی خطی و شکل معمول آن به شکل رابطه (3) است:

$$\Gamma = \Gamma_0 \frac{\rho_0}{\rho} \tag{4}$$

که ρ_0 ثابت ماده و ho_0 دانسیته مرجع میباشد. انرژی هوگونیوت با فشار از Γ_0 طريق رابطه (5) به هم وابستهاند:

$$E_H = \frac{pH\eta}{2\rho_0} \tag{5}$$

در رابطه بالا، η کرنش تراکمی حجمی است و بهصورت رابطه (6) تعریف می-شەد:

$$\eta = \mathbf{1} - \frac{\rho_0}{\rho} \tag{6}$$

با حذف *Γ* و *Ε*Η از رابطه بالا، رابطه (7) حاصل می شود؛

$$p = p_H \left(\mathbf{1} - \frac{\Gamma_0 \eta}{\mathbf{2}} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m \tag{7}$$

معادله حالت و معادله انرژی معادلات کوپل شدهای برای فشار و انرژی داخلی ارائه میدهند. نرمافزار اباکوس به طور همزمان هریک از این معادلات را در هر نقطه از جسم با روش صريح حل مى كند. رابطه معمول براى دادههای هوگونیوت به صورت (رابطه 8) است:

$$p_{H} = \frac{\rho_{0} C_{0}^{2} \eta}{(1 - s \eta)^{2}}$$
(8)

که *co* و s رابطه خطی بین سرعت خطی شوک، *U*s، و سرعت مخصوص، *U*l، را با رابطه (9) تعريف مي كنند:

$$p = \frac{\rho_0 C_0^2 \eta}{(1 - s\eta)^2} \left(1 - \frac{\Gamma_0 \eta}{2} \right) + \Gamma_0 \rho_0 E_m$$
(10)

معادله حالت خطى مىتواند براى مدلسازى جريان هاى آرام غيرقابل تراكم لزج و غيرلزج با معادلات حركت ناوير - استوكس استفاده شود [21].

3- بستر آزمایشگاهی و پردازش دادهها

برای انجام تست های برخورد پرتابه با سطح آب، یک محفظه آب در طراحی و راهاندازی شده است. ابعاد سطح مقطع آزمایش تانک 1/2×1/2 متر و طول آن 9 متر طراحی شده است. ابعاد محفظه به گونهای انتخاب شدهاند که اثرات دیواره بر نتایج ناچیز باشد. تجهیزات آزمایش شامل سیستم پرتاب مدل، یک دوربین با سرعت بالا، یک رایانه برای پردازش نتایج تست و یک سیستم نورپردازی است. آزمایش برخورد با آب از طریق سیستم پرتاب (با قابلیت تنظیم زاویه برخورد با سطح آزاد آب) که در شکل 1 نشان داده شده است،

55

انجام می گیرد. جهت عکسبرداری مناسب، جدار محفظه آزمایش، شیشهای انتخاب شده است و تمامی محفظه با چسب مخصوص آببندی شده است. به منظور پردازش نتایج آزمایش، از تصاویر عکسبرداری شده توسط دوربین با سرعت بالا (5000 فریم در ثانیه) استفاده شده است. با پردازش اطلاعات حاصل از حرکت جسم در هر لحظه از زمان، میتوان موقعیت مکانی و زاویهای جسم، سرعت، شتاب و نیروی کلی وارد بر جسم را تعیین نمود. در شکل 2 بستر آزمایش نشان داده شده است.

4- نتايج

در این مقاله مسئله ورود به آب یک پرتابه با سطح آزاد آب با استفاده از حل عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. برای حل عددی از روش کوپل اویلری- لاگرانژی استفاده شده است و دقت مدل عددی در مقایسه با دادههای تجربی آریستوف برای یک کره [5] و نتایج آزمایشگاهی در این پژوهش که برای یک پرتابه انجام شده است، آشکار گردیده است. در شکل 3 نمایی از میدان محاسباتی، شرایط مرزی و شبکهبندی محیط حل مربوط به ورود به آب کره نشان داده شده است. در زمان صفر، ناحیه اویلری به دو قسمت بالا و پایین تقسیم شده است. قسمت بالایی به عنوان فضای خالی و قسمت پایین بهعنوان آب ساکن در نظر گرفته شده است. قطر کره 2/54 سانتیمتر و محیط اویلری (ابعاد تانک) به صورت مکعب مستطیلی با ابعاد25×25×75 سانتىمتر مىباشد. تعداد نقاط شبكه براساس تحليل هاى مختلفی که در موارد مشابه مورد استفاده قرار گرفته، تعیین گشته است بهطوری که نتایج حل عددی با افزایش تعداد نقاط شبکه در ناحیه محاسباتی تغییری نکرده است. همچنین ابعاد دامنه محاسباتی نیز به قدر کافی بزرگ انتخاب شدهاند که با افزایش آنها نتایج عددی تغییر چندانی نداشتهاند. سرعت اولیه کره 2/17 متر بر ثانیه و در جهت عمود بر سطح آب و عدد رینولدز در حدود 55000 میباشد. خواص فیزیکی آب که در حل عددی مورد استفاده قرار گرفتهاند، در جدول 1 ارائه شده است. لازم به ذکر است که جنس کره از نایلون بوده و چگالی نسبی آن 1140 kg/m³ میباشد.



شکل 1 مدل آزمایشگاهی پرتابه



شکل 2 بستر آزمایش در شکل 4، مقایسه بین نتایج عددی و آزمایشگاهی متعلق به آریستوف و

همکاران [5] در شکل گیری و جدایش حباب نشان داده شده است. نتایج عددی برای کسر حجمی 0/5 نشان داده شده است. وقتی کره با سطح آزاد آب برخورد می کند، حبابی از هوا پشت کره تشکیل می گردد. شکل گیری حباب شامل چند مرحله است: گسترش و تشکیل حباب، انقباض حباب یشت کره و در نهایت فروپاشی و نابودی حباب. با ورود کره به آب در پشت آن و در زیر سطح آزاد آب، یک حباب متقارن محوری شکل می گیرد. این حباب به کره متصل بوده و با آن حرکت میکند. همچنان که کره پایین می ود، به سیال پیرامون خود در جهت شعاعی نیرود وارد کرده و مومنتوم خود را به آن منتقل می کند در نتیجه سیال انبساط یافته و حباب هوا تا زمان 24/5 میلی ثانیه پس از لحظه ورود کره به آب رشد می کند. اما این انبساط با مقاومت فشار هيدرواستاتيكي سيال روبرو مي شود. سپس جهت جريان شعاعي معکوس شده و سبب انقباض و در نهایت فروپاشی ' حباب می گردد. فروپاشی تا لحظه جدایش حباب شتاب می گیرد و سرانجام در این لحظه حباب به دو قسمت مجزا تقسیم می شود. حباب جدا شده بالایی همچنان منقبض شده و به سمت سطح آزاد آب پیش میرود و حباب پایینی به چسبیده و با آن حرکت میکند.

با استفاده از نتایج حل عددی عمق جدایش حباب در حدود 5/9 سانتیمتر و در زمان 63 میلی ثانیه اتفاق افتاده است.

دوکلاکس و همکاران با مطالعه حباب حاصل از برخورد کره با آب، رابطه-ای تحلیلی برای محاسبه عمق و زمان جدایش حباب ارائه دادند[24]. در این



شکل 3 محیط حل عددی، شرایط مرزی و شبکهبندی دامنه محاسباتی

جدول 1 خواص فیزیکی آب				
Го	S	Co	η _w (Ns/m²)	ρ _w (kg/m³)
0	0	1450	0/001	999

www.SID.ir

مهندسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1394، دوره 15، شماره 2

1- Collapse



شکل4 مقایسه شکل گیری حباب بین نتایج عددی (ستون سمت راست) و نتایج آزمایشگاهی آریستوف و همکاران [5] (ستون سمت چپ)

رابطه تحلیلی عمق جدایش حباب بهصورت تابعی از عدد فرود ارائه شده است. همچنین در رابطه تحلیلی مربوط به زمان جدایش حباب، این زمان وابسته به عدد فرود نبوده و تنها با تغییر قطر کره تغییر می کند. با استفاده از رابطه تحلیلی ارائه شده توسط دوکلاکس و همکاران، عمق جدایش در حدود 6/5 سانتیمتر و زمان آن در حدود 58 میلی ثانیه محاسبه بهدست میآید که اختلاف کمی با نتایج عددی کار حاضر دارد. البته در نتایج آزمایشگاهی نوعی ناپایداری و پاشش قطرات در سطح آب پس از برخورد مشاهده میشود که ناشی از جریانهای چرخشی در آن ناحیه است. با توجه به آنکه در روش حل عددی از معادلات اویلر استفاده شده است، امکان مشاهده آنها در حل عددی وجود ندارد.

در شکل 5، نتایج شبیه سازی عددی مربوط به تغییرات عمق کره بر حسب زمان با نتایج تحلیلی و تجربی آریستوف و همکاران مقایسه گردیده است. همان طور که در این شکل و شکل 4 مشاهده می شود، نتایج حل عددی

میددسی مکانیک مدرس، اردیبهشت 1394، دوره 15، شماره 2

همخوانی مناسبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

هندسه پرتابه که در این پژوهش استفاده شده است، در شکل 6 ارائه گردیده است. این پرتابه شامل دماغه نیمکروی و بدنه استوانهای شکل است که بر روی بدنه آن چهار بالک مشابه بهصورت صلیبی قرار گرفتهاند. جرم پرتابه 232 گرم، طول کلی آن 480 میلیمتر و قطر آن در قسمت استوانهای 26 میلیمتر میباشد. همچنین فاصله مرکز جرم پرتابه از نوک آن 220 میلیمتر است.

دامنه محاسباتی، شرایط مرزی و شبکهبندی محیط حل عددی برای مسئله ورود به آب پرتابه در شکل 7 ارائه گردیده است. مشابه با حالت سقوط کره، دامنه اویلری در زمان اولیه به دو قسمت بالا (فضای خالی) و پایین (آب ساکن) تقسیم شده است. پرتابه با سرعت اولیه 6 متر بر ثانیه و با زاویه 30 درجه نسبت به سطح آزاد آب پرتاب می شود. شتاب جاذبه زمین برابر 18/9-متر بر مجذور ثانیه و در جهت عمود بر سطح آب به پرتابه و محیط اویلری اعمال می گردد. همچنین صفحات جانبی و کف محیط اویلری به عنوان شرط مرزی دیوار در نظر گرفته شدهاند. پرتابه می تواند آزادانه و در تمامی جهات به صورت شش درجه آزادی حرکت کند.

برای شبکهبندی محیط حل از سلولهای محاسباتی کاملاً منتظم و سازمان یافته مربعی استفاده شده است. تعداد نقاط شبکه براساس تحلیلهای مختلفی که در موارد مشابه مورد استفاده قرار گرفته، تعیین گشته است همان طور که در شکل 8 مشاهده می شود با ریزتر کردن اندازه شبکه به کمتر از 0/6 سانتی متر نتایج عددی تغییر بسیار ناچیزی داشتهاند. تعداد نقاط شبکه محاسباتی در این حالت در حدود 4 میلیون می باشد. همچنین ابعاد دامنه محاسباتی نیز به قدر کافی بزرگ انتخاب شدهاند که با افزایش آنها نتایج عددی تغییر چندانی نداشتهاند. در نتیجه دامنه محاسباتی به صورت یک مکعب با ابعاد 80×80×120 سانتی متر انتخاب شده است.





شکل 6 مدل پرتابه سهبعدی با دماغه نیم کروی



شکل 7 دامنه محاسباتی، شرایط مرزی و توزیع شبکه برای مسئله ورود به آب پرتابه

شكل 9 مقايسه بين نتايج عددى را در شكل گيرى حباب هوا با نتايج حاصل از كار آزمايشگاهى نشان مىدهد. نتايج عددى براى كسر حجمى 5/0 نشان داده شده است. زمان صفر لحظهاى است كه دماغه پرتابه سطح آزاد آب را حس مىكند و همان طور كه پيشتر گفته شد، در اين لحظه داراى سرعت 6 متر بر ثانيه است. همان طور كه در اين شكل ديده مىشود، با نفوذ پرتابه به آب حباب هوا پيرامون پرتابه شكل مىگيرد. سپس مشابه با آنچه در مورد ورود كره به آب گفته شد، تا زمان 40 ميلى ثانيه از لحظه ورود پرتابه به آب، حباب هواى تشكيل شده منبسط شده و رشد مىكند و سپس به دليل مقاومت نيروهاى فشارى هيدرواستاتيكى منتقبض گرديده و به سمت جدايش و دو تكه شدن پيش رفته و در نهايت متلاشى مىگردد. همچنين لحظه وقوع جدايش حباب در زمان 54 ميلى ثانيه به خوبى توسط حل عددى پيش بينى شده است.

تطابق خوب نتایج حل عددی با نتایج تجربی، قابلیت و توانایی روش حل به کار گرفته شده را در حل مسائل ورود یک جسم خارجی به آب، نفوذ در آن و تشکیل حباب هوای ناشی از آن آشکار میکند.



شکل 8 مقایسه شبکههای با اندازه مختلف



شكل 9 مقايسه نتايج حل عددي و أزمايشگاهي در مسئله ورود به آب پرتابه

در شکل 10 منحنی جابجایی افقی و عمودی پرتابه برحسب زمان با استفاده از حل عددی و دادههای تجربی ارائه و با یکدیگر مقایسه شده است. همان طور که در این شکل نیز دیده می شود، نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارند.

خطای اندازه گیری در نتایج آزمایشگاهی برای محاسبه موقعیت پرتابه در هر لحظه از زمان در جهات افقی و عمودی (عمق پرتابه) عمدتاً ناشی از کیفیت تصویر و سرعت عکسبرداری دوربین میباشد. در این پژوهش سعی شده است با انتخاب یک دوربین پرسرعت با وضوح و تعداد پیکسل مناسب، تصاویری با وضوح بالا ارائه گردد و خطای مربوط به عکسبرداری ناچیز باشد. با انجام مطالعات مربوط به محاسبه انحراف معیار استاندارد مربوط به ابزار اندازه گیری موقعیت پرتابه و تکرار، خطایی در حدود 4 تا 7 درصد برای محاسبه موقعیت مکانی پرتابه در زمان مشخص تخمین زده شده است.

انحراف نتایج عددی از دادههای تجربی پس از زمان t=80 میلی ثانیه، به

دلیل اثرات ناشی از نزدیک شدن پرتابه به انتهای دامنه محاسباتی در حل عددی است. البته لازم به یادآوری است که حل عددی تا لحظه وقوع جدایش حباب (14=4 میلیثانیه) مورد نظر بوده است. در صورتی که مسیر حرکت پرتابه تا زمان بیشتری موردنظر باشد، میتوان با افزایش دامنه محاسباتی اختلاف میان نتایج عددی با آزمایشگاهی را کاهش داد.

به منظور بررسی اثر سرعت اولیه بر عمق و لحظه وقوع جدایش حباب، حل عددی پرتابه با سرعتهای اولیه گوناگون و با حفظ تمامی شرایط قبلی انجام گرفته است. در شکل 11 منحنی تغییرات لحظه وقوع جدایش برحسب متغیر سرعت اولیه پرتابه نشان داده شده است. همان گونه که دیده می شود، زمان جدایش حباب تقریباً ثابت بوده و تابع ضعیفی از سرعت برخورد می باشد و با افزایش سرعت برخورد به مقدار کمی کاهش یافته است. همین رفتار در نتایج تحلیلی و عددی لی و همکارانش [25] مشاهده گردیده است.

در شکل 12 نتایج مربوط به عمق پرتابه در لحظه وقوع جدایش برحسب سرعت برخورد پرتابه نمایش داده شده است. مشاهده شده است که عمق در لحظه جدایش حباب تابع خطی از سرعت برخورد پرتابه است. روابط تحلیلی لی و همکارانش [25] این نتیجه را تأیید میکند.



شكل 11 تغييرات لحظه وقوع جدايش حباب برحسب سرعت برخورد پرتابه



شكل 12 تغييرات عمق پرتابه در لحظه وقوع جدايش حباب برحسب سرعت پرتابه

5- نتيجه گيرى

در این پژوهش، از روش کوپل اویلری – لاگرانژی برای شبیهسازی عددی مسئله برخورد یک پرتابه سهبعدی با سطح آب در شرایط شش درجه آزادی استفاده شده است. برای اعتبارسازی حل عددی، یک بستر آزمایشگاهی شامل یک تانک آب، پرتابه، سیستم پرتابگر و یک دوربین پرسرعت تهیه گردید. نتایج عددی شامل شکل گیری حباب هوا، لحظه جدایش حباب و جابجایی پرتابه با دادههای آزمایشگاهی مقایسه گردید و دقت بالا و توانایی روش عددی به کار گرفته شده در شبیهسازی رایانهای مسائل ورود به آب اجسام خارجی آشکار گردید. همچنین مشاهده شد که لحظه وقوع جدایش حباب تابع ضعیفی از سرعت برخورد پرتابه با سطح آب میباشد. هر چند که عمق پرتابه در لحظه جدایش حباب یک تابع خطی از سرعت برخورد است.

6- فهرست علائم

- Co ضریب ثابت در معادله سرعت شوک EH انرژی مخصوص بر واحد جرم (J/kg) Em انرژی بر واحد حجم (J/m³) Em تنش فشاری (kgm⁻¹S⁻²) (kgm⁻¹S⁻²) فشار هوگونیوت (kgm⁻¹S⁻²) PH فشار هوگونیوت (kgm⁻¹S⁻²) (J/kg) s تانسور تنش S ضریب ثابت در معادله سرعت شوک
 - ے سرعت مخصوص (m/s)
 - *U*s سرعت شوک (m/s)

علايم يونانى

- Γ نسبت گرانزین
 Γ₀ ثابت ماده در معادله حالت گرانزین
 - η کرنش تراکمی حجمی
 - (kgm⁻¹s⁻¹) لزجت دینامیکی μ
 - م چگالی (kgm⁻³)
 - (kgm⁻³) چگالی مرجع ρ_0

7- تقدير وتشكر

از همکاری صمیمانه مهندس رحیمی و دکتر ربیعی در انجام آزمایشها نهایت تشکر به عمل میآید.

- [13] H.H. Hu, Direct simulation of flows of solid-liquid mixtures, International
- Journal of Multiphase Flow, Vol. 22, pp. 335-352, 1996. [14] K.M.T Kleefsman, G. Fekken, A.E.P. Veldmen, B. Lwanowski, B. Buchner, A volume-of-fluid based simulation method for wave impact problems, Journal of Computational Physics, Vol. 206, pp. 363-393, 2005.
- [15] Y.W. Kim, Y. Kim, Y.M. Liu, D. Yue, On the water-entry impact problem of asymmetric bodies, Proceedings of Ninth International Conference on Numerical Ship Hydrodynamics, USA, 2007.
- [16]A. Engle, R. Lewis, A comparison of hydrodynamic impacts prediction methods with two dimensional drop test data, Marine Structures, Vol. 16, pp. 175-182, 2003.
- [17] H. Wagner, Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces, Journal of Applied Mathematics and Mechanics, Vol. 12, pp. 193-215.1932
- [18] S. Chaung, Slamming of rigid wedge shaped bodies with various deadrise angles, Structural Mechanics Laboratory Research and development, report n. 2268, 1966.
- [19] Q. Yang, W. Qiu, Numerical solution of 2D slamming problem with a CIP method, International Conference on Violent Flows, Research Institute for Applied Mechanics, Kyushu University, Japan, 2007.
- [20] Q. Yang, W. Qiu, Numerical simulation of water impact for 2D and 3D bodies, *Ocean Engineering*, Vol. 43, pp. 82-89, 2012.
- [21] Abagus 6.11 Documentation, Volume II, Eulerian Analysis, 2011.
- [22] D.J. Benson, Contact in a multi-material Eulerian finite element formulation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 193, pp. 4277-4298, 2004.
- [23] D.J. Benson, Computational methods in Lagrangian and Eulerian hydrocodes, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 99, pp. 235-394, 1992.
- [24] V. Duclaux, F. Caille, C. Duez, C. Ybert, L. Bucquet, C. Clanet, Dynamics of transient cavities, J. Fluid Mech., Vol. 591, pp. 1-19, 2007.
- [25] M. Lee, R.G. Longoria, D.E. Wilson, Cavity dynamics in high-speed water entry, Physics of Fluids, Vol. 9, No. 3, pp. 541-550, 1997.

[1] S. Watanabe, Resistance of impact on water surface, part I-cone, Institute of Physical and Chemical Research, Tokyo 12, pp. 251-267, 1930.

8- مراجع

- S. Watanabe, Resistance of impact on water surface, part II-cone (continued), Institute of Physical and Chemical Research, Tokyo 14, pp. 153-168, 1930.
- [3] J.K. Cole, C.E. Hailey, W.T. Gutierrez, M.T. Ferraio, An experimental investigation of high-speed water entry for full size and scale model pointed nose vehicles, Cavitation and Multiphase Flow Forum, Los Angeles, USA, pp. 171-187, 1992.
- [4] A.P. New, T.S. Lee, H.T. Low, Impact loading and water entrance characteristics of prismatic bodies, Proceedings of the third international offshore and polar engineering conference, National University of Singapore, Singapore, pp.282-287, 1993.
- [5] J.M. Aristoff, T.T. Truscott, A.H. Techet, J.W.M. Bush, The water entry of decelerating spheres, Physics of Fluids, Vol. 22, pp. 1-8, 2010.
- T. Von Karman, The impact of seaplane floats during landing, National [6] Advisory Committee for Aeronautics, NACA TN 321, USA, 1929.
- [7] V.G. Szebehely, Hydrodynamic impact, Journal of Applied Mechanics, Vol. 12, pp. 297-300, 1959.
- [8] T. Miloh, On the initial stage slamming of a rigid sphere in a vertical water entry, Applied Ocean Research, Vol. 8, pp. 13-43, 1991.
- T. Miloh, On the oblique water entry problem of a rigid sphere, Journal of Engineering Mathematics, Vol. 25, pp. 77-92, 1991.
- [10] S.D. Howison, J.R. Ockendon, S.K. Wilson, Incompressible water-entry problems at small deadrise angles, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 222, pp. 215-230, 1991.
- [11] J.M. Aristoff, J.W.M. Bush, Water entry of small hydrophobic spheres, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 619, pp. 45-78, 2009.
- [12] A. Esmaeeli, G.R. Tryggvason, Direct numerical simulations of bubbly flows, part 1, low Reynolds number arrays, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 377, pp. 313-345, 1998.