

## شبیه سازی عددی برخورد پرتابه های سرعت پایین با سطح آب

نجمه خضرائیان<sup>۱\*</sup>، ناصر دشتیان گرامی<sup>۲</sup>

\* نویسنده مسئول: [n\\_khazraiyani@iaau.ac.ir](mailto:n_khazraiyani@iaau.ac.ir)

### چکیده

در این مقاله با استفاده از روش المان محدود و فرمول بندی اولری-لاگرانژی برخورد سازه هایی با سطح آب مورد شبیه سازی عددی قرار گرفته است. برای بیان رفتار آب و هوا از مدل مادی نول و برای سازه های برخورد کننده از مدل مادی صلب استفاده شده است. معادله حالت مای گرونایزن نیز به آب و هوا نسبت داده شده است. در این مقاله، در ابتدا با استفاده از تحلیل برخورد استوانه فلزی با سطح آب، نتایج مورد اعتبار سنجی قرار گرفت و سپس برخورد یک گوه، کره و یک پرتابه خاص شبیه سازی شد. از خروجی های مهم این تحلیل استخراج نیرو و فشار وارد بر پرتابه، تغییرات سرعت و شتاب در حین ورود به آب، تغییرات تنش-کرنش و نیز تغییرات سطح آب در مراحل مختلف تحلیل هستند. نتایج حاصل از شبیه سازی برای استوانه با نتایج آزمایشگاهی موجود تطابق خوبی نشان می دهد و نتایج حاصله برای دیگر پرتابه ها دارای روند منطقی هستند.

### واژه های کلیدی

اثر متقابل سازه و سیال - برخورد با سطح آب، فرمولاسیون اولری-لاگرانژی، المان محدود،

۱- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، تهران، ایران.

۲- دانشجوی دکتری، دانشکده مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

## ۱- مقدمه

مطالعه اثر هیدرودینامیک بین یک جسم در حال حرکت و سطح آزاد آب دارای کاربردهای بسیاری از جمله حوزه‌های هوانوردی و فرود فضا پیما در دریا، برخورد پرتابه‌هایی نظیر راکت، موشک و نیز مین‌ریزی در دریا است. تحلیل این پدیده اغلب همراه با آزمایشات تجربی و در حال حاضر با شبیه سازی‌های مختلف عددی از جمله المان محدود می‌باشد. در صورت استفاده از روش المان محدود این شبیه سازی‌ها توسط کدهای خاصی باید انجام گیرد که امکان کوپلینگ سیال و سازه را با یکدیگر میسر کرده و کدهای مربوطه بر اساس برنامه‌های المان محدود اوپلری و لاگرانژی خاص سیالات ایجاد شده باشند. نقاط بحرانی در این نوع مدل سازی الگوریتم‌های تعامل (یا کوپلینگ) سیال و سازه و مدل سازی ساختاری سیال هستند.

آنچیلری و اسپیزیکا [۱] با استفاده از روش المان محدود، برخورد عمودی یک کره صلب را بر روی سطح آب بررسی کردند و آزمایشهایی برای بدست آوردن تغییرات شتاب کره حین برخورد را در جهت صحت سنجی روش عددی مورد استفاده، انجام دادند.

کوربین و اوکوسو [۲]، پژوهش جالبی بر روی کوپلینگ هیدروالاستیکی مدل المان محدود با تئوری واگنر [۳] برای مسئله برخورد به آب انجام دادند. هدف این کار امکان سنجی کوپلینگ مستقیم روش المان محدود برای قسمت سازه ای با حالتی از تئوری واگنر در مورد بارهای هیدرودینامیکی حین برخورد یک جسم الاستیکی به سطح آب بود. در این تحقیق یک روش خوب و کارا ارائه شد و درحالت دو بعدی صحت سنجی شد. کاربرد این روش برای هر جسم الاستیک با زاویه مرده کم می‌باشد.

باتیستین و افراتی [۴] بررسی عددی ورود به آب به صورت عمودی یک جسم دو بعدی متقارن و غیرمتقارن با شکل دلخواه را انجام دادند. این بررسی با در نظر گرفتن جریان پتانسیل یک سیال تراکم ناپذیر با صرف نظر از اثرات گرانش و کشش سطحی انجام شد. در این تحقیق شبیه‌سازی با استفاده از روش المان مرزی انجام شد و شرایط مرزی سطح آزاد کاملاً غیرخطی بود. تمرکز این پژوهش بر روی ارزیابی توزیع فشار و بار کلی هیدرودینامیکی وارده بر جسم برخورد کننده بوده است. آنها صحت سنجی نتایج را برای استوانه، کره و مخروط انجام دادند.

پارک و همکاران [۵] روش عددی برای محاسبه نیروهای برخورد و کمانش اجسامی که با سرعت زیاد وارد آب می‌شوند را ارائه کردند. با صرف نظر از لزجت سیال، جریان پتانسیل غیر لزج فرض شد. این فرض به مقدار بسیار زیادی از زمان محاسباتی کاست در حالیکه با در نظر گرفتن شرایط سطح آزاد غیر خطی، دقت حل محفوظ ماند. آنان مسئله را با روش پانل منبع<sup>۱</sup> حل کردند که در این روش جسم به پانل یا المانها تقسیم می‌شود و هر پانل می‌تواند کاملاً شناور، تا حدی شناور و یا کاملاً خارج از آب باشد. نتایج نیز با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شد و نتایج خوبی بدست آمد.

در سال ۲۰۰۴ رساله‌ای در دانشگاه ام آی تی در ارتباط با تحلیل عددی و تجربی برخورد با آب یک زیر دریایی بنام رموساو<sup>۲</sup> توسط راو [۶] انجام شد. در این پژوهش از روش المان محدود برای به وجود آوردن مدل ساده شده و از روش پانل منبع که توسط کیم در همان دانشگاه ارائه شده بود برای محاسبه جرم اضافه شده، استفاده کرد.

<sup>1</sup> Source Panel Method

<sup>2</sup> Remvsauv

در این تحقیق به شبیه سازی عددی برخورد انواع پرتابه‌ها با اشکال مختلف با سطح آب با استفاده از نرم افزار LS-Dyna پرداخته می‌شود و پس از تایید نتایج برای پرتابه‌هایی که نتایج آزمایشگاهی برای آنها وجود دارد به شبیه سازی برخورد پرتابه‌ای خاص با سطح آب پرداخته می‌شود. استفاده از فرمول‌بندی اوپلری-لاگرانژی اختیاری با توجه به نوع برخورد، برای شبیه سازی این پرتابه با تکیه بر تئوری این فرمول‌بندی از جنبه‌های نوآورانه طرح است، که نتایج خوبی در بر داشته است.

## ۲- روش حل

در تحلیل‌های عددی برخورد سازه با سطح آب، از روش‌های مختلفی از جمله لاگرانژی، اوپلری و یا اوپلری-لاگرانژی اختیاری<sup>۳</sup> استفاده می‌شود که در ادامه به تشریح این روش‌ها و بیان مزایا و معایب آنها پرداخته می‌شود و با توجه به نوع مسئله فرمول‌بندی مناسب انتخاب می‌شود.

### ۲-۱- فرمول‌بندی لاگرانژی

در تحلیل المان محدود، با استفاده از فرمول‌بندی لاگرانژی، حرکت تمامی ذرات جسم از موقعیت اولیه تا پیکربندی نهایی مورد ملاحظه قرار می‌گیرد. فرمول‌بندی لاگرانژی برای حرکت یک جسم در یک سیستم مختصات ثابت کارترین، بر اساس این فرض استوار است که جسم می‌تواند جابجایی‌های بزرگ، کرنش‌های بزرگ و یک پاسخ تطبیقی غیر خطی داشته باشد، پایه ریزی می‌شود [۱۱]. همچنین، وضعیت‌های تعادل کامل جسم در یک بازه زمانی مستقل  $\Delta t$  ارزیابی می‌شوند. علاوه بر این، فرض بر این است که جواب متغیرهای استاتیکی، در کل بازه‌های زمانی از ۰ تا  $t$ ، قابل محاسبه می‌باشد. فرآیندهای وضعیت تعادل بعدی مربوط به زمان  $t + \Delta t$  بوده و مکرراً تا تعیین مسیر حل

رساله‌ای نیز با حمایت اتحادیه اروپا در سال ۲۰۰۵ با عنوان مطالعه عددی بارهای برخورد به آب سازه‌های دریایی توسط کلفسمن [۷] انجام شد. در این مقاله از یک برنامه کامپیوتری به نام کام فلو<sup>۱</sup> بهره برده شد که در آن معادلات ناویر-استوکس که شرح دهنده سیال لزج تراکم ناپذیر است حل می‌شود. یکی از معروف ترین مدل‌های شبیه سازی سطح آزاد روش حجم سیال، وی-ا-اف (VOF) است که از آن روش در این تز استفاده شده است.

فایرلی کلراک و توینس [۸] پژوهشی را در خصوص برخورد مقطع‌های گوه‌ای شکل با سرعت ثابت به سطح آب انجام دادند. در مطالعه آنها از تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی<sup>۲</sup> برای تعیین اندازه حرکت جرم اضافه شده، اندازه حرکت جریان و اثرات گرانس هنگام ورود به آب اجسام گوه‌ای شکل با سرعت ثابت با زاویه مرده ۵ درجه تا ۴۵ درجه استفاده شده است. روش حل عددی که توسط نرم افزار فلوننت صورت گرفت، روش حجم محدود بوده است که معادلات بقای جرم و اندازه حرکت را برای به دست آوردن میدان جریان حل می‌کند.

وو [۹] با استفاده از روش المان مرزی به شبیه سازی پدیده برخورد گوه با سطح آب پرداخت. روش او پیوستگی پتانسیل و سرعت را در گره‌های هر المان لجاظ می‌نمود. نتایج او با نتایج آزمایشگاهی تطابق خوبی را نشان داده است.

احمدزاده و همکاران [۱۰] شبیه‌سازی عددی برخورد آزاد یک کره بر سطح آب به روش کوپل اوپلر-لاگرانژی را توسط نرم افزار ABAQUS انجام دادند. نتایج شبیه‌سازی برای چگالی-های متفاوت کره حاکی از تطابق خوب با نتایج آزمایشگاهی موجود بود.

<sup>1</sup> Comflow

<sup>2</sup> CFD

<sup>3</sup> ALE

اولیری برای بیان پایستگی جرم از یک معادله مستقل استفاده می‌شود. همچنین نیروهای اینرسی شامل جملات جابجایی<sup>۲</sup> هستند که در یک حل عددی منجر به یک ماتریس با ضرایب غیر متقارن می‌شود که بستگی به سرعت‌های محاسبه شده دارد.

فرمول‌بندی اولیری، امکان استفاده از اندازه‌های نرخ تنش و کرنش ساده را فراهم کرده و بنابراین بجای مقادیر جابجایی (در تحلیل جابجایی بی نهایت کوچک) نیاز به محاسبه سرعت‌ها است [۱۲].

### ۳-۲- فرمول‌بندی ساده شده اولیری-لاگرنژی اختیاری

یک فرمول‌بندی اولیری-لاگرنژی، شامل یک گام زمانی لاگرنژی می‌باشد که به واسطه یک گام فرا رفتی<sup>۳</sup> دنبال می‌شود. این گام زمانی یک ناحیه بندی نموی را اجرا می‌نماید که این حالت نموی به این واقعیت اشاره دارد که وضعیت گره‌ها فقط به اندازه کسر کوچکی از طول‌های مشخصه المان‌های مجاور جابجا می‌شود. برخلاف ناحیه بندی دستی، توپولوژی مش مورد محاسبه در یک فرمول‌بندی اولیری-لاگرنژی، ثابت است. محاسبه فرمول‌بندی اولیری-لاگرنژی در صورتی که یک مش کاملاً جدید برای ادامه محاسبه لازم باشد، را می‌توان اجرا کرد. هزینه اجرای گام فرا رفتی در المان، معمولاً بسیار بیشتر از هزینه گام لاگرنژی است. بخش اعظم اجرای گام فرارفتی صرف محاسبه مواد انتقال یافته بین المان‌های مجاور می‌شود و فقط بخش کوچکی از آن صرف محاسبه چگونگی و محل تنظیم مش می‌شود. از الگوریتم‌های فرا رفتی یکنواخت با دقت مرتبه دوم، برخلاف هزینه بالایشان در المان‌بندی استفاده می‌شود و بدین ترتیب امکان محاسبه دقیق در مش‌های

کامل، ادامه پیدا می‌کند. معادله تعادل جسم در زمان  $t + \Delta t$  با استفاده از اصل جابجایی مجازی به صورت زیر بیان می‌شود [۱۲].

$$\int_{(t+\Delta t)V} {}^{(t+\Delta t)}\tau_{ij}\delta t + \Delta t \varepsilon_{ij} d(t+\Delta t)_V = (t+\Delta t)_R \quad (1)$$

سمت چپ معادله نشان دهنده کار مجازی داخلی و طرف راست آن بیانگر کار مجازی خارجی است. عبارت  ${}^{(t+\Delta t)}\tau_{ij}$ ، مولفه‌های کاترین تانسور تنش کوشی است و تانسور کرنش  $(\varepsilon_{ij})$  مربوط به جابجایی مجازی به صورت زیر است [۱۲].

$$\delta_{t+\Delta t} \varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_j^{t+\Delta t}} + \frac{\partial \delta u_j}{\partial x_i^{t+\Delta t}} \right) \quad (2)$$

$\delta u_i$  بیانگر مولفه‌های بردار جابجایی مجازی<sup>۱</sup> تحمیل شده روی پیکربندی در زمان  $t + \Delta t$  است. همچنین عبارت  $x_i^{t+\Delta t}$  بیانگر مختصات کارترین یک نقطه از ماده در زمان  $t + \Delta t$  می‌باشد. و  ${}^{t+\Delta t}V$  نشان دهنده حجم در زمان  $t + \Delta t$  است [۱۲].

$$(t+\Delta t)_R = \int_{(t+\Delta t)V} {}^{(t+\Delta t)}f_i^B \delta u_i d(t+\Delta t)_V + \int_{(t+\Delta t)S_f} {}^{(t+\Delta t)}f_i^S \delta u_i^S d(t+\Delta t)_S \quad (3)$$

در معادله (۳)،  ${}^{t+\Delta t}f_i^B$  نشان دهنده مولفه‌های نیروهای اعمال شده خارجی در واحد حجم در زمان  $t + \Delta t$  و  ${}^{t+\Delta t}f_i^S$  بیانگر مولفه‌های نیروهای کشش سطحی خارجی در واحد سطح در زمان  $t + \Delta t$  هستند.  $\delta u_i^S$  نیز بیانگر بردار جابجایی مجازی روی سطح  ${}^{t+\Delta t}S_f$  است.

### ۲-۲- فرمول‌بندی اولیری

در فرمول‌بندی اولیری، توجه اصلی روی یک حجم معیار ثابت متمرکز است، که از آن برای اندازه‌گیری تعادل و پیوستگی جرم ذرات سیال استفاده می‌شود. در فرمول‌بندی

<sup>2</sup>Convective terms

<sup>3</sup>Advection

<sup>1</sup> Virtual displacement

می‌نماید. آب دارای عمق ۲۷۵ متر، عرض ۱۱۰ متر و ارتفاع ۲ متر است. هوا نیز دارای عمق ۱۱۰ متر، عرض ۱۱۰ متر و ارتفاع ۲ متر است. در مدل‌سازی برخورد سازه با سطح آب، ابعاد مدل المان محدود آب و هوا حداقل باید ۸ برابر ابعاد جسم برخورد کننده باشد. مدل‌سازی اجزای محدود در این مسئله به صورت سه بعدی و با استفاده از المان‌های سالیید ۸ گره‌ای صورت پذیرفته است. تعداد کل المان‌های بکار رفته در مدل اجزای محدود ۱۱۹۵۵۰ المان و تعداد گره‌ها نیز برابر ۱۳۴۲۳۳ عدد است. در این شبیه‌سازی المان-بندی استوانه فلزی با استفاده از المان‌های سالیید سه بعدی با ALE (Solid ALE) استفاده از المان‌های سالیید (point integration with single با ELFORM 12 material and void) مدل سازی شده‌اند. در شکل (۱) مدل اجزای محدود مربوط به استوانه، آب و هوا نشان داده شده است.

### ۳-۱-۱-۳-۱- معادلات مشخصه رفتار مواد (مدل‌های مادی)

در این قسمت برای مواد به کار رفته در شبیه‌سازی مدل‌های مادی در نظر گرفته، شرح داده می‌شود. همانگونه که ذکر شد برای اجسام برخورد کننده از مدل مادی صلب و برای هوا و آب از مدل مادی نول استفاده شده است.

#### ۳-۱-۱-۱-۱- مدل مادی صلب

مدل مادی صلب روشی ساده برای ترکیب یک یا چند قطعه شامل تیرها، پوسته‌ها یا المان‌های جامد در یک جسم صلب را ارائه می‌دهد. دو قسمت صلب منحصر بفرد گره-های مشترک ندارند مگر اینکه با استفاده از گزینه ادغام جسم صلب در هم ادغام شوند. یک جسم صلب از مش‌های المان محدود غیریوسته می‌تواند ساخته شود. اگر جسم

درشت تر نسبت به الگوریتم با دقت مرتبه اول فراهم می‌شود. ساده‌ترین استراتژی برای به حداقل رساندن هزینه محاسبات اویلری-لاگرانژی، این است که آنها را فقط در گام‌های زمانی خیلی کوچک استفاده نمود [۱۳]. بنابراین با توجه به خصوصیات مسئله برخورد با سطح آب استفاده از این فرمول‌بندی مناسب است.

### ۳-۳- شبیه‌سازی برخورد پرتابه‌های فلزی با سطح آب و اعتبار سنجی نتایج

در این بخش با استفاده از نرم افزار LS-DYNA به شبیه‌سازی فرآیند برخورد با سطح آب سه جسم استوانه‌ای، گوه‌ای و کره‌ای پرداخته می‌شود. شبیه‌سازی المان محدود در سه مرحله عمومی و با استفاده از اجزای اصلی کد LS-DYNA انجام شده است. مرحله اول ساخت مدل با استفاده از پیش پردازنده داخلی FEMB (مدل ساز المان محدود) و یا مدل‌ساز دیگر نظیر هایپر مش است. مرحله دوم تحلیل دینامیکی غیرخطی و مرحله نهایی پس پردازش نتایج تحلیل با استفاده از پردازنده Post-GL کد LS-DYNA برای تفسیر داده‌های محاسبه شده می‌باشد [۱۴]. جزئیات مربوط به تکنیک‌های خاص مدل‌سازی مورد نیاز برای ارائه یک مدل اجزاء محدود کارآمد بیشتر بر روی پارامترهایی نظیر: ۱- ارائه مدل اجزاء محدود، انواع و خواص اجزاء برای قسمت‌های مختلف مدل، ۲- ایجاد و تخصیص خواص مادی، ۳- تعریف معادلات حالت، ۴- تعریف شرایط مرزی و اولیه، ۵- تعریف نوع و فصول مشترک تماس، ۶- تعریف پارامترهای کنترل

#### ۳-۱-۱- برخورد استوانه با سطح آب

در شبیه‌سازی برخورد استوانه به سطح آب، استوانه‌ای با شعاع ۵/۵ متر از فاصله ۱۵ سانتی‌متری به سطح آب برخورد

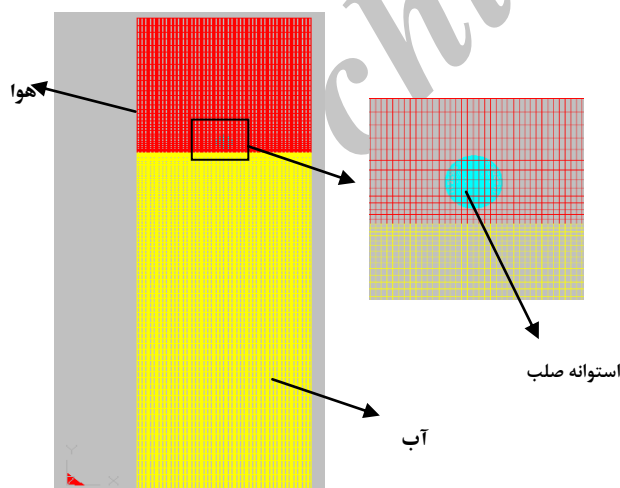
<sup>2</sup>Material Models

<sup>1</sup>Finite Element Modeling Builder

معادله حالتی برای تعیین فشار می‌باشد. از ترکیب معادله مشخصه و معادله حالت تنش‌های کلی برآورد می‌شود [۱۴]،

$$\sigma_{ij} = \sigma'_{ij} + \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} = \mu \varepsilon'_{ij} + P \delta_{ij} \quad (5)$$

از الزامات ورودی برای این معادله مشخصه در بیان رفتار سیال، ضریب لزجت سیال، فشار برش<sup>۳</sup>، حجم وابسته،  $(V/V_0)$  است که برای فرسایش در کشش، عددی بزرگتر از واحد است. حجم وابسته،  $(V/V_0)$ ، برای فرسایش در فشار عددی کوچکتر از واحد است، البته با استفاده از معادلات الاستیک نیز با اعمال شرایط و ضرایب ورودی خاص و مناسب رفتار سیال را به صورت تقریبی می‌توان مدل سازی کرد. در جدول (۲) مشخصات و ثابت های مدل مادی نول برای آب که استوانه فلزی با آن برخورد و در آن فرو می‌رود، آمده است. اطراف استوانه فلزی و قسمت بالای آب را همانطور که در شکل (۱) مشاهده می‌شود هوا فرا گرفته است، که شبیه سازی عددی هوا نیز با استفاده از مدل مادی نول انجام می‌شود. خواص مدل مادی مورد استفاده در شبیه سازی عددی برای هوا در جدول (۳) آمده است.



شکل (۱) المان بندی استوانه، آب و هوا

صلب در تعریف سطح مشترک تماس بکار رود، در این صورت مدول یانگ،  $E$ ، و ضریب پواسون،  $\nu$ ، برای تعیین پارامترهای فصل مشترک لغزنده مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این تحلیل استوانه فلزی با استفاده از مدل مادی شماره ۲۰ صلب، مدل سازی شده است، مدل مادی شماره ۲۰ برای مدل سازی اجسام صلب اعم از سالیید، پوسته، تیر و غیره بکارگیری می‌شود. خواص بکار رفته برای این مدل مادی در جدول (۱) آورده شده است.

### ۳-۱-۱-۲- مدل مادی نول<sup>۱</sup>

در تحلیل برخورد استوانه فلزی با سطح آب، آب و هوای پیرامون با استفاده از مدل مادی نول مدل سازی می‌شود. در مدل سازی رفتار سیال در مقابل جسم جامد باید این نکته را مد نظر داشت که تغییر شکل جامد با توجه به گرادیان جابجایی یا کرنش صورت می‌پذیرد ولی تغییر شکل سیال با توجه به گرادیان سرعت یا نرخ کرنش صورت می‌گیرد. به عبارتی در مکانیک جامدات جابجایی‌ها متغیرهای وابسته هستند ولی در مکانیک سیالات سرعت‌ها متغیر وابسته هستند. وقتی که تنش برشی به یک سیال اعمال می‌شود، سیال به صورت مستمر تا زمان اعمال تنش برشی تغییر شکل می‌یابد. مدل مادی نول برای بیان رفتار مادی با تغییر فرم‌های شبه سیال (هوا، آب و غیره) مورد استفاده قرار می‌گیرد. این مدل مادی تنش لزج در ماده را می‌دهد. (تنش لزج دارای همان مشخصات تنش‌های انحرافی<sup>۲</sup> است) [۱۴]،

$$\sigma'_{ij} = \mu \varepsilon'_{ij} \quad (4)$$

که  $\sigma'_{ij}$  تنش‌های انحرافی،  $\mu$  لزجت سیال و  $\varepsilon'_{ij}$  نیز نرخ کرنش انحرافی هستند. با استفاده از رابطه فوق تنش‌های انحرافی را محاسبه می‌توان کرد. این مدل مادی نیازمند

<sup>۱</sup>Null Material Model

<sup>۲</sup>deviatoric

<sup>۳</sup>pressure cutoff

$$P = \frac{\rho_0 C_0^2 \bar{\mu} \left\{ 1 + \left[ 1 - (\gamma_0/2) \right] \bar{\mu} - (a/2) \bar{\mu}^2 \right\}}{\left[ 1 - (S_1 - 1) \bar{\mu} - S_2 \frac{\bar{\mu}^2}{\bar{\mu} + 1} - S_3 \frac{\bar{\mu}^3}{(\bar{\mu} + 1)^2} \right]} + (\gamma_0 + a \bar{\mu}) E \quad (6)$$

اگر ماده منبسط شده باشد، آنگاه  $\bar{\mu} < 0$  و معادله حالت به صورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$P = \rho C_0^2 \bar{\mu} + (\gamma_0 + a \bar{\mu}) E \quad (7)$$

که در معادلات فوق  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  اولین، دومین و سومین ضرایب شیب منحنی  $U_S - U_P$  (سرعت موج شوک و  $U_P$  سرعت ذره هستند).  $E$  انرژی داخلی اولیه،  $V$  حجم وابسته،  $a$  ضریب تصحیح حجمی،  $\gamma_0$  ضریب گرونایزن و  $C_0$  سرعت صوت حجمی یا مقدار عرض از مبدا منحنی  $U_S - U_P$  است. مقدار  $\bar{\mu}$  بصورت زیر بیان می‌شود [۱۴]:

$$\bar{\mu} = \left( \frac{\rho}{\rho_0} \right) - 1 \quad (8)$$

که  $\rho$  چگالی جاری و  $\rho_0$  چگالی اولیه است. جدول (۴) نشان دهنده اطلاعات مربوط به معادله حالت مای گرونایزن مورد استفاده در این شبیه سازی است.

جدول (۴) ثابت های معادله حالت مای گرونایزن برای آب و هوا [۱۴].

نوع ماده	C(m/s)	S1	S2	S3	GAMA	A	E0
آب	۱۶۴۷	۱/۹۲	۰/۰۹۶	۰	۰/۳۵	۰	۰
هوا	۳۴۳/۷	۰	۰	۰	۱/۴	۰	۰

### ۳-۱-۳- روش حل

در تحلیل برخورد استوانه با سطح آب پایه حل بر اساس روش حل ALE است. این روش را در دو مرحله به صورت زیر می‌توان بیان نمود: در ابتدا ماده در مرحله لاگرانژی درست مانند روش لاگرانژی تغییر شکل می‌دهد، پس از آن متغیرهای السمان (المان‌های لاگرانژی) در داخل شبکه مش بندی مجدداً منتقل شده و یا توزیع می‌شوند.

### ۳-۱-۴- شرایط اولیه، مرزی و قیود

جدول (۱) خواص مدل مادی صلب [۱۴]

M	COUPLE	N	$\nu$	E (GPa)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	خصوصیت
۰	۰	۰	۰/۳	۲۰۰	۷۸۳۰	مقدار

جدول (۲) خواص مدل مادی نول برای آب [۱۴]

خصوصیت	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Pc (MPa)	$\mu$ (MPa.S)
مقدار	۹۸۲/۵	-۱۰e۱۰	۰/۸۵۸e-۹

جدول (۳) خواص مادی نول برای هوا [۱۴].

خصوصیت	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Pc (MPa)	$\mu$ (MPa.S)
مقدار	۱/۲	-۱۰e۱۰	۰/۰

### ۳-۱-۳-۲- معادلات حالت<sup>۱</sup>

علاوه بر معادلات اساسی بقاء که شامل معادلات بقای جرم، بقای اندازه حرکت خطی و زاویه‌ای و بقای انرژی هستند، برای بسته شدن سیستم معادلات به رابطه‌ای بین خصوصیات ترمودینامیکی ماده (مثل فشار، جرم حجمی و انرژی) نیاز است. این معادله، معادله حالت نامیده می‌شود. تا کنون معادلات حالت مختلفی معرفی شده‌اند که هر کدام از آنها با توجه به نوع مسئله و ماده مورد نظر کاربرد دارند. انتخاب معادله حالت مناسب به مدل کردن مسئله، شبیه سازی عددی و مقایسه با نتایج تجربی بر می‌گردد. در این شبیه سازی از معادله حالت مای-گرونایزن<sup>۲</sup> [۱۴] استفاده می‌شود. معادله حالت مای-گرونایزن یکی از مهمترین معادلات حالتی است که برای مواد مایع و جامد بسیار مناسب است. این معادله حالت نیز همانند سایر معادلات حالت ارتباط بین فشار، چگالی، و انرژی را بیان می‌کند، معادله حالت فشار برای  $\bar{\mu} > 0$  (رابطه (۸))، یعنی ماده در حال فشردگی بصورت زیر است [۱۴]:

<sup>۱</sup>Equation Of State

<sup>۲</sup>Mie-Gruneisen

پارامترهای کنترلی نظیر کنترل انرژی و ALE بصورت پیش فرض می توانند انتخاب شوند.

### ۳-۱-۶- ارائه نتایج و اعتبارسنجی

در این قسمت با توجه به نتایج شبیه سازی، خروجی ها ارائه و اعتبار سنجی می شوند.

### ۳-۱-۶-۱- تغییرات نیرو نسبت به زمان و اعتبار سنجی نتایج

در شکل (۲) تغییرات نیرویی که در اثر برخورد استوانه به سطح آب به وجود می آید نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود به محض برخورد استوانه به سطح آب مطابق انتظار، نیروی وارد شده به آن به صورت ناگهانی افزایش و به مقداری در حدود ۸۴۱۲ کیلو نیوتن می رسد. سپس با فرو رفتن به داخل آب مقدار نیرو کاهش یافته تا به مقدار ۱۰۰۰ کیلو نیوتن افت کرده و تقریباً ثابت می شود.

یکی از پارامترهای اساسی که در مسائل برخورد سازه با آب به عنوان معیاری برای ارزیابی نتایج و مقایسه های کمی می تواند مورد توجه قرار گیرد، پارامتر بی بعد ضریب اصابت<sup>۲</sup>،  $C_S$ ، است. این پارامتر به صورت زیر تعریف می شود [۱۵]،

$$C_S = \frac{F_S}{\rho R v^2} \quad (9)$$

که  $F_S$  نیروی اصابت،  $\rho$  چگالی محیط برخورد (در اینجا آب)،  $R$  شعاع استوانه صلب و  $v$  سرعت سقوط (سرعت برخورد) استوانه برخورد کننده است.

شرط اولیه حاکم بر این مسئله سرعت اولیه ۱۰ متر بر ثانیه می باشد که به تمامی نودهای استوانه فلزی در قالب PART مربوطه وارد می شود. در این تحلیل با استفاده از قید CONSTRAINED\_LAGRANGE\_IN\_SOLID ارتباط آب و هوا با استوانه فلزی محدود شده است. در این تحلیل استوانه فلزی به عنوان SLAVE و آب و هوا در یک part set به عنوان MASTER انتخاب شده اند. کوپلینگ انتخاب شده از نوع PENALTY COUPLING و جهت کوپلینگ NORMAL DIRECTION, COMPRESSION نیز ONLY می باشد. از دیگر شرایط اولیه انتخاب شده در این شبیه سازی انتخاب شرط اولیه VOID برای هواست.

### ۳-۱-۵- پارامترهای کنترلی

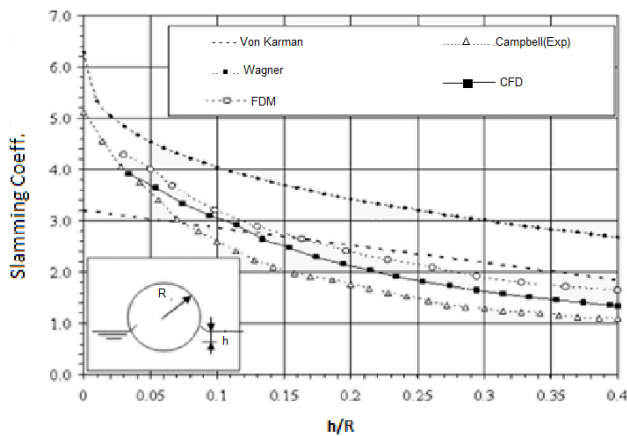
در مسائلی مثل برخورد و نفوذ پرتابه یا بارگذاری انفجاری روی سازه ها که تغییر شکل های بزرگ روی می دهد مقدار گام زمانی  $\Delta t$  در طول شبیه سازی تغییر می کند.  $\Delta t = \alpha_0 \frac{l}{v}$  بصورت  $\alpha_0$  همان ضریب مقیاس گام زمانی است که معمولاً عددی کمتر از ۰/۹ فرض می شود. در تحلیل عددی برخورد استوانه با سطح آب،  $\alpha_0$  برابر ۰/۰۱ در نظر گرفته شده است. کل بازه زمانی نیز ۱۲۰۰ میلی ثانیه است. گام زمانی برای رسم فایل های گرافیکی نیز ۲۰ میلی ثانیه فرض شده است. پارامتر کنترلی آور گلاس<sup>۱</sup> نیز به منظور جلوگیری از ایجاد مدهای تغییر شکل انرژی صفر در کل تحلیل انتخاب می شود. بنابراین ضریب لزجت آور گلاس برابر ۰/۱، نوع لزجت بالک برابر ۱ در نظر گرفته شده است. از دیگر پارامترهای کنترلی مهم در این تحلیل پارامتر کنترلی FSI است که در آن مقدار OUTPUT INTERVAL برابر  $5 \times 10^{-5}$  انتخاب شده است. سایر

<sup>2</sup>Slamming Coefficient

<sup>1</sup>Hourglass



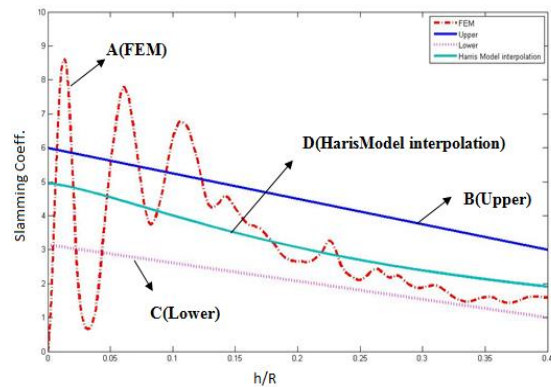
توجه به شکل (۴) و نتایج شبیه سازی انجام شده، بیشترین مقدار ضریب اصابت در آغاز برخورد حدود ۶ و کمترین مقدار آن برابر با ۳/۲ است. اما حداکثر بر اساس منحنی برازش شده با استفاده از مدل هریس (منحنی D) برابر با ۵ است با مقایسه نتایج حاصل شده از این شبیه سازی و نتایج شکل (۳) می توان دریافت که نتایج شبیه سازی عددی انجام شده دارای دقت نسبت بالایی در مقایسه با سایر روش ها هستند (در مقایسه با داده های آزمایشی).



شکل (۴) تغییرات ضریب اصابت نسبت به  $(h/R)$  [۱۵].

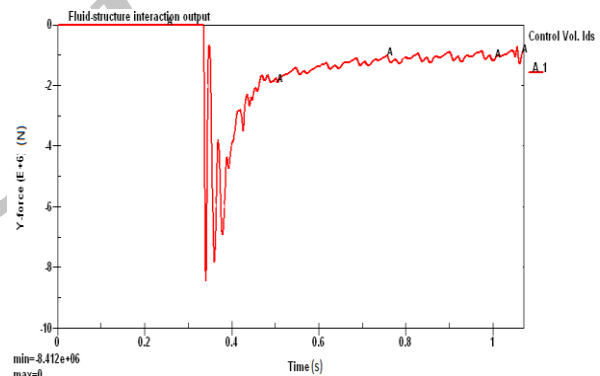
### ۳-۱-۲- تغییرات سطح آب نسبت به زمان

در این قسمت ورود استوانه به داخل آب و تغییراتی که در حین برخورد بر روی سطح آب اتفاق می افتد مورد مطالعه قرار می گیرند. تصویر برخورد استوانه با سطح آب در دو زمان متفاوت در شکل (۵) با استفاده از نتایج آزمایش گرینهاو و لین [۱۶]، نرم افزار کام فلو (کمبل و وین بر ۱۹۸۰) [۱۷] و نتایج تحلیل های المان محدود مورد مقایسه قرار گرفته است. در شکل (۶) نتایج حاصل از شبیه سازی عددی با استفاده از نتایج المان محدود نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، شکل سطح آزاد که در آزمایش بوجود آمده است بخوبی توسط روش المان محدود مدل سازی شده است. همه جزئیات پاشش قطرات



شکل (۲) تغییرات نیروی وارد بر استوانه در برخورد به سطح آب

در شکل (۳) تغییرات ضریب اصابت با استفاده از پنج روش مختلف نشان داده شده است. تئوری فون کارمن  $C_S = \pi$  را در تماس اولیه تخمین می زند، در حالیکه در تئوری واگنر این مقدار  $C_S = 2\pi$  است. در داده های تجربی ضریب اصابت بین  $C_S = 5.5$  و  $C_S = 6.5$  تغییر می کند [۱۵].



شکل (۳) تغییرات ضریب اصابت نسبت به  $(h/R)$  با استفاده از پنج روش

[۱۵]

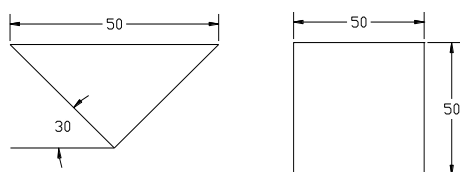
در شکل (۴) نتایج ضریب اصابت نسبت به پارامتر  $(h/R)$  در چهار نمودار مختلف ارائه شده است. هر یک از نمودارهای رسم شده در شکل (۴) به نوعی تغییرات ضریب اصابت نسبت به پارامتر  $(h/R)$  را نشان می دهند. منحنی A، نشان دهنده نتایج شبیه سازی انجام شده است. منحنی های B و C نیز مقادیر حداکثر و حداقل منحنی A را در کنار منحنی اصلی نشان می دهند. منحنی D با استفاده از مدل برازش هریس [۱۵] منحنی مناسبی را بر تغییرات، برازش نکرده است، که مقداری بین مقادیر حداقل و حداکثر را دارد. با

خوبی صورت پذیرفته است که در این قسمت نیز به عنوان یک مسئله مورد شبیه سازی قرار داده شده است.

گوه ای با هندسه نشان داده در شکل (۷) از جنس فولاد ST37 از ارتفاع ۱/۵ متری به داخل آب با سرعت اولیه ۲۰ متر بر ثانیه سقوط می کند. تعیین تغییرات نیروی برخورد، تغییرات ایجاد شده در سطح آب، منحنی تغییرات سرعت گوه مد نظر است.

### ۳-۲-۱- مشخصات هندسی و مدل اجزاء محدود

در شکل (۷) هندسه گوه فلزی نشان داده شده است. در این تحلیل گوه ای با سطح مقطع ۵۰ سانتی متر در ۵۰ سانتی متر با زاویه مرده<sup>۱</sup> ۳۰ درجه به سطح آب برخورد می کند. مدل سازی اجزای محدود در این مسئله به صورت سه بعدی و با استفاده از المان های سالید ۸ گره ای صورت پذیرفته است. تعداد کل المان های بکار رفته در مدل اجزای محدود ۱۱۶۰۳۶ المان و تعداد گره ها نیز برابر ۱۳۰۰۶۴ عدد است. در این شبیه سازی المان بندی گوه فلزی همان بندی استوانه در نظر گرفته شده است. آب و هوا نیز برای آنچه در تحلیل برخورد استوانه بود در نظر گرفته شده است (شکل (۸)).

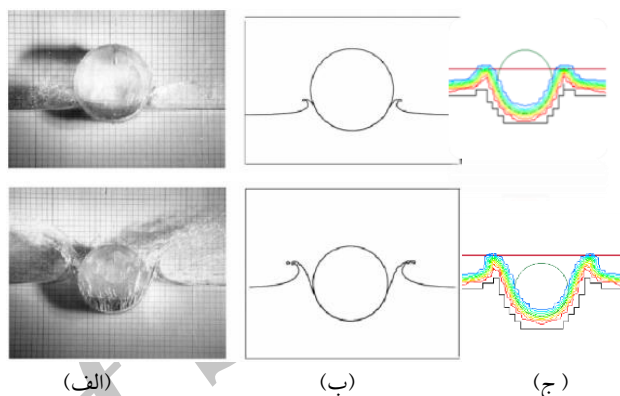


شکل (۷) هندسه گوه، سمت راست سطح مقطع

قسمت بالایی گوه است (سطح مقطع مربع و واحد سانتیمتر است).

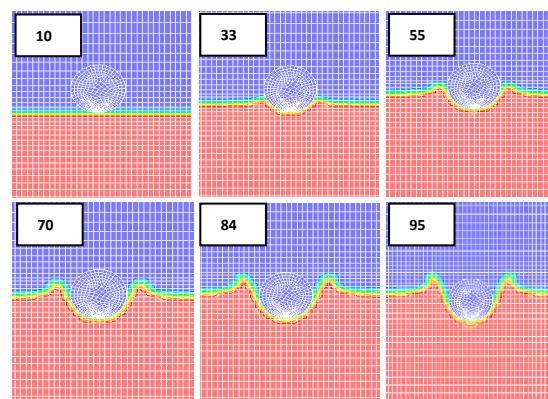
آب در شبیه سازی وجود ندارد، اما جتی که در اطراف استوانه بوجود می آید بخوبی تخمین زده شده است.

با مقایسه نتایج ارائه شده در شکل های (۵) و (۶) می توان نتیجه گرفت که مدل سازی عددی مسائل برخورد سازه به سطح آب با استفاده از روش المان محدود به لحاظ کیفی نیز دارای دقت مناسبی است.



شکل (۵) عکس های لحظه ای برای ورود به آب استوانه.

(الف) نتایج آزمایش [۱۶] (ب) نتایج نرم افزار کام فلو [۱۷] (ج) نتایج حاصل از شبیه سازی المان محدود ارائه شده.



شکل (۶) تغییرات سطح آب در برخورد استوانه در شش زمان مختلف در

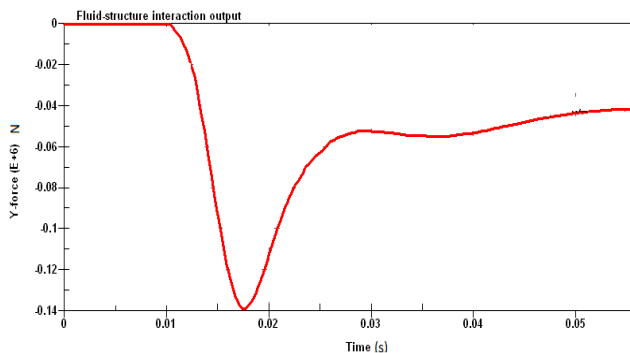
شبیه سازی انجام شده (زمان بر حسب میلی ثانیه).

### ۳-۲- شبیه سازی برخورد گوه فلزی با سطح آب

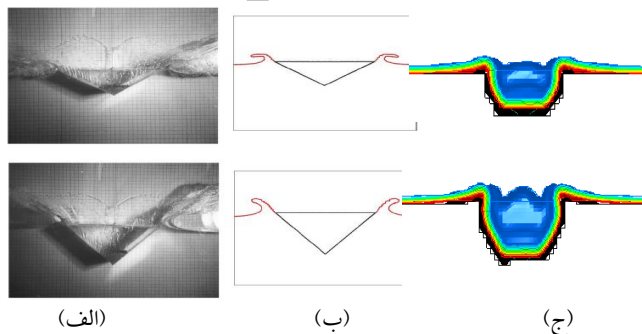
یکی از مسائل شناخته شده در حوزه برخورد سازه با سطح آب، مسئله برخورد گوه است که از ابتدای تحقیق در این حوزه مورد توجه محققین مختلف قرار گرفته است و بر روی آن به صورت تئوری، تحلیلی و تجربی تحقیقات

<sup>1</sup> deadrise

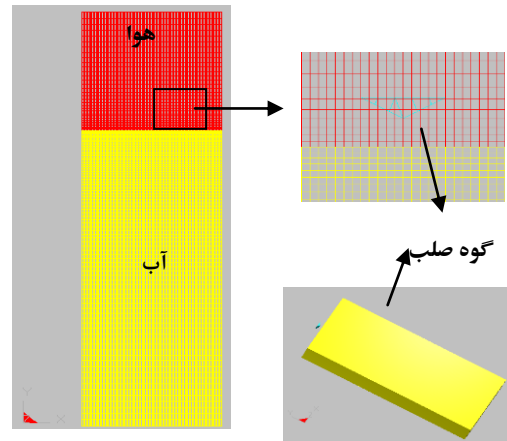
انتظار، نیروی وارد شده به آن به صورت ناگهانی افزایش، و به مقداری در حدود ۱۴۰ کیلونیوتن می‌رسد. سپس با فرو رفتن به داخل آب مقدار نیرو کاهش یافته تا به مقدار ۴۰ کیلونیوتن افت کرده و تقریباً ثابت می‌شود. تصویر برخورد گوه با سطح آب در دو زمان متفاوت در شکل (۱۰) با استفاده از نتایج آزمایش گرین هاو و لین [۱۶]، نرم افزار کام فلو [۱۷] و شبیه‌سازی عددی انجام گرفته، نشان داده شده است. در شکل (۱۱) نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با استفاده از نتایج نرم افزار LS-DYNA در چند گام زمانی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، شکل سطح آزاد که در آزمایش بوجود آمده است با تقریب نسبتاً خوبی توسط LS-DYNA مدل سازی شده است. همه جزئیات پاشش قطرات آب در شبیه‌سازی وجود ندارد، اما جتی که در اطراف گوه در این مسئله بوجود می‌آید بخوبی تخمین زده شده است.



شکل (۹) تغییرات نیرو در برخورد گوه صلب به سطح آب



شکل (۱۰) عکس‌های لحظه‌ای برای ورود به آب گوه، (الف) نتایج آزمایش [۱۶]، (ب) نتایج نرم افزار کام فلو [۱۷] و (ج) نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود.



شکل (۸) المان بندی گوه، آب و هوا.

### ۳-۲-۳- معادلات مشخصه رفتار مواد (مدل های مادی)

مدل مادی صلب، نول به ترتیب برای گوه، آب و هوا مطابق جداول (۱)، (۲) و (۳) در نظر گرفته می‌شود.

### ۳-۲-۳- معادله حالت

در تحلیل عددی برخورد گوه فلزی با آب ضرایب معادله حالت مای گرونایزن استفاده شده نیز مطابق جدول (۴) است.

### ۳-۲-۴- روش حل، شرایط هندسی و پارامترهای کنترلی

در تحلیل برخورد گوه با سطح آب همانند مسئله برخورد استوانه با سطح آب پایه حل بر اساس روش حل ALE است. شرط اولیه حاکم بر این مسئله سرعت اولیه گوه ۲۰ متر بر ثانیه است که به تمامی نودهای گوه فلزی در قالب PART مربوطه وارد می‌شود. سایر شرایط مرزی و اولیه این تحلیل همانند مسئله برخورد استوانه با سطح آب است. پارامترهای کنترلی نیز همانند آنچه برای برخورد استوانه با آب در نظر گرفته شد استفاده می‌شوند.

### ۳-۲-۵- نتایج

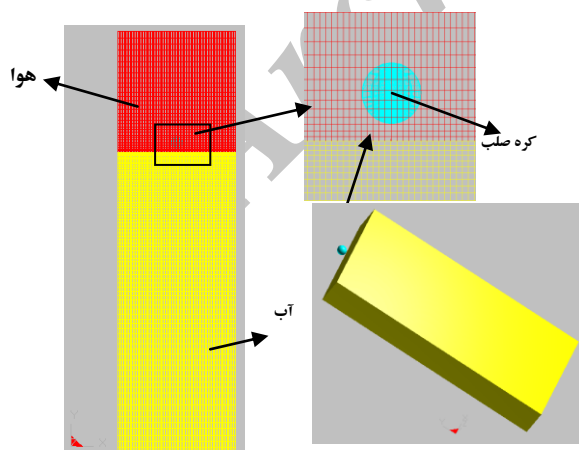
در شکل (۹) تغییرات نیرویی که در اثر برخورد گوه به سطح آب به وجود می‌آید نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود به محض برخورد گوه به سطح آب مطابق

۱۲۱۸۴۰ آلمان و تعداد گره ها نیز برابر ۱۳۵۷۶۹ عدد هستند شکل (۱۳). معادلات مادی و حالت نیز مثل دو مدل قبل لحاظ می شود. ضرایب معادله حالت مای گرونایزن استفاده شده نیز مطابق جدول (۴) می باشد.

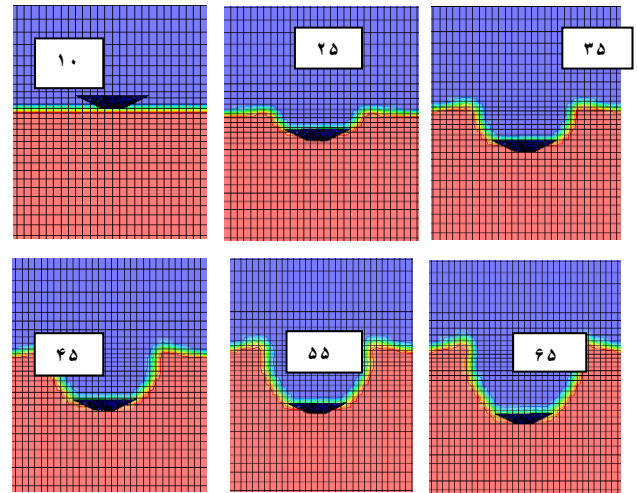
در تحلیل برخورد کره با سطح آب نیز همانند دو شبیه سازی قبل، پایه حل بر اساس روش حل ALE است. شرط اولیه حاکم بر این مسئله سرعت اولیه ۲۰ متر بر ثانیه می باشد که به تمامی نودهای کره فلزی در قالب PART مربوطه وارد می شود. سایر شرایط مرزی و قیود در شبیه سازی برخورد کره به آب همانند برخورد استوانه و گوه به سطح آب هستند.

### ۳-۳-۱- نتایج

در شکل (۱۴) تغییرات نیرویی که در اثر برخورد کره به سطح آب به وجود می آید نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود به محض برخورد کره به سطح آب مطابق انتظار، نیروی وارد شده به آن به صورت ناگهانی افزایش و به مقداری در حدود ۱۲۰ کیلو نیوتن می رسد. سپس با فرو رفتن به داخل آب مقدار نیرو کاهش یافته تا به مقدار ۳۵ کیلو نیوتن افت کرده و تقریباً ثابت می شود.

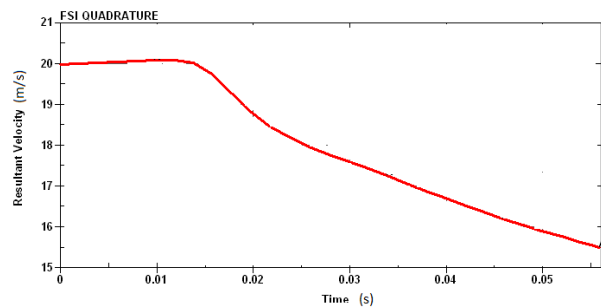


شکل (۱۳) مدل المان محدود کره، آب و هوا.



شکل (۱۱) تغییرات سطح آب در اثر برخورد گوه فلزی در شش گام زمانی (زمان بر حسب میلی ثانیه).

در شکل (۱۲) تغییرات سرعت گوه نسبت به زمان نشان داده است. در این شکل سرعت بر حسب متر بر ثانیه است. همانطور که در شکل مشاهده می شود، به محض رها شدن گوه، به علت شتاب جاذبه سرعت افزایش کمی یافته و پس از برخورد با سطح آب مطابق شکل افت سرعت دارد. که علت این افت نیز ورود به محیط چگالتر آب است.

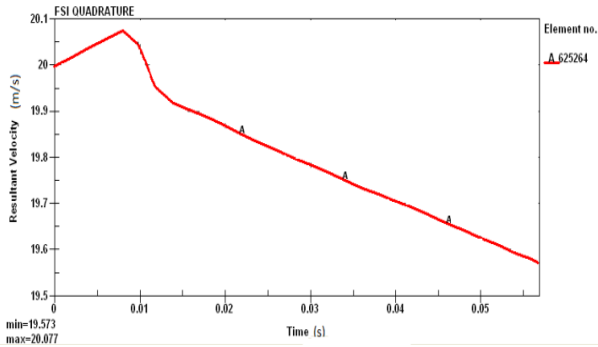


شکل (۱۲) تغییرات سرعت نسبت به زمان گوه فلزی در برخورد با آب.

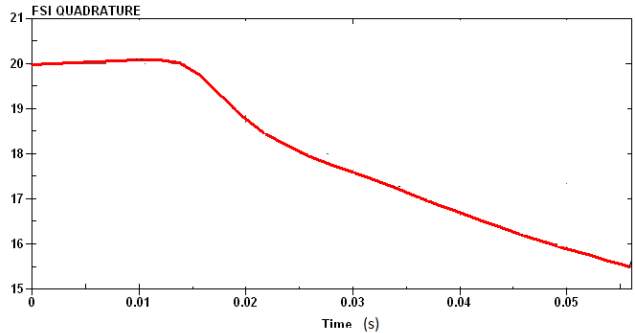
### ۳-۳-۲ شبیه سازی برخورد کره فلزی با سطح آب

در این قسمت شبیه سازی برخورد کره ای فلزی (توپ) با قطر ۵۰ سانتی متر از ارتفاع ۰/۵ متری و با سرعت ۲۰ متر بر ثانیه به داخل آب انجام می پذیرد و نتایج آن استخراج می شود.

مدل سازی اجزای محدود همانند دو مدل قبلی صورت گرفته است. کل المان های بکار رفته در مدل اجزای محدود



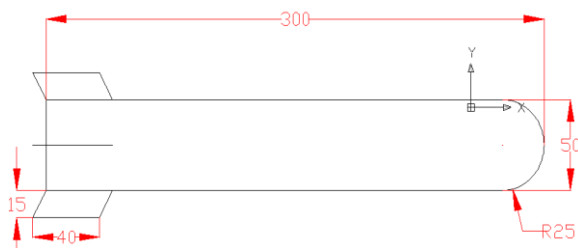
شکل (۱۷) تغییرات سرعت نسبت به زمان کره فلزی در برخورد با آب.



شکل (۱۴) تغییرات نیروی وارد بر کره صلب در برخورد به سطح آب.

### ۳-۴- شبیه سازی برخورد پرتابه سرعت پایین با سطح آب

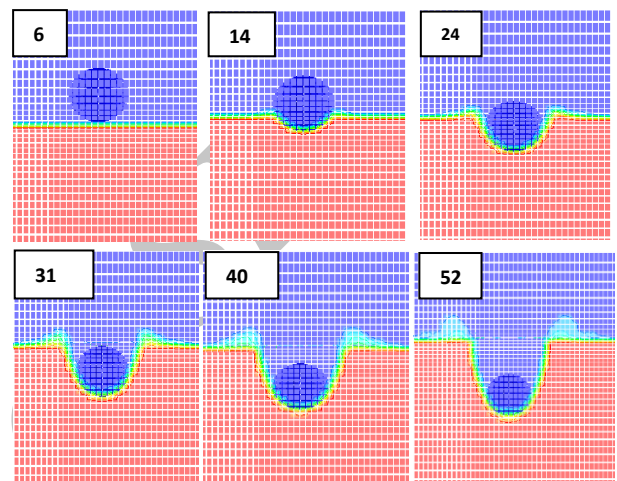
برخورد پرتابه‌ای با هندسه نشان داده شده در شکل (۱۸) و با سرعت ۱۰ متر بر ثانیه با زوایای مختلف ۴۵، ۶۰ و ۹۰ درجه با سطح آب در این قسمت مورد شبیه سازی قرار می‌گیرد. در شکل (۱۹) مدل المان محدود این شبیه سازی نشان داده شده است. در شبیه سازی برخورد پرتابه با سطح آب، همانطور که در بخش‌های قبل ارائه شد رفتار آب و هوا با استفاده از مدل مادی نول و پرتابه نیز با استفاده از مدل مادی صلب بیان می‌شود. روش حل ALE است و معادله حالت مای-گرونایزن با مشخصات ارائه شده در جدول (۴) به آب و هوا نیز نسبت داده شده است.



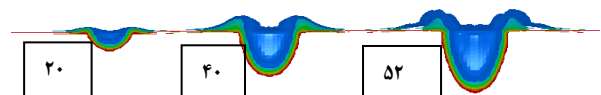
شکل (۱۸) هندسه پرتابه (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

### ۳-۴-۱- نتایج و بحث

نتایج حاصل این شبیه سازی برای تغییرات جابه‌جایی، سرعت، فشار و نیرو بر حسب زمان و تغییرات تنش و کرنش ارائه شده‌اند.



شکل (۱۵) تغییرات سطح آب در اثر برخورد کره فلزی در شش گام زمانی (زمان بر حسب میلی ثانیه).



شکل (۱۶) تغییرات سطح آب در اثر برخورد کره فلزی در سه گام زمانی (زمان بر حسب میلی ثانیه).

در شکل (۱۷) تغییرات سرعت کره نسبت به زمان نشان داده است. در این شکل سرعت بر حسب متر بر ثانیه است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، از همان ابتدای حرکت کره به سمت پایین به علت شتاب جاذبه سرعت روند افزایشی را در پیش گرفته است، اما پس از برخورد تغییراتی در منحنی ایجاد شده و منحنی در همان جهت ابتدایی ولی با مقداری افت سرعت ادامه مسیر می‌دهد. دلیل این افت نیز ورود به محیط چگالتر آب است.

**۳-۴-۲- تغییرات جابجایی نسبت به زمان**

در شکل (۲۰) تغییرات جابجایی پرتابه نسبت به زمان نشان داده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در ابتدای برخورد شیب منحنی تند و برای زوایای برخورد مختلف نیز با یکدیگر منطبق است، اما با گذشت زمان و ورود پرتابه به محیط چگالتر مطابق انتظار شیب منحنی نیز کند می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که هرچه زاویه برخورد نسبت به سطح آب بیشتر باشد میزان جابجایی نسبت به زمان نیز با اختلاف محدودی بیشتر است. با توجه به سرعت پایین برخورد، اختلاف جابجایی‌ها محدود است.

**۳-۴-۳- تغییرات سرعت نسبت به زمان**

در شکل (۲۱) تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان نشان داده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، در ابتدا و در زمان محدودی که پرتابه در داخل هوا حرکت می‌کند، سرعت ثابت و برابر سرعت اولیه (۱۰ متر بر ثانیه) است، اما پس از برخورد با گذشت زمان و ورود پرتابه به محیط چگالتر آب سرعت نیز به سرعت نمایی کاهش می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تغییر زاویه برخورد تاثیر چندانی در اختلاف سرعت در زمان‌های مشخص ندارد.

**۳-۴-۴- تغییرات فشار نسبت به زمان**

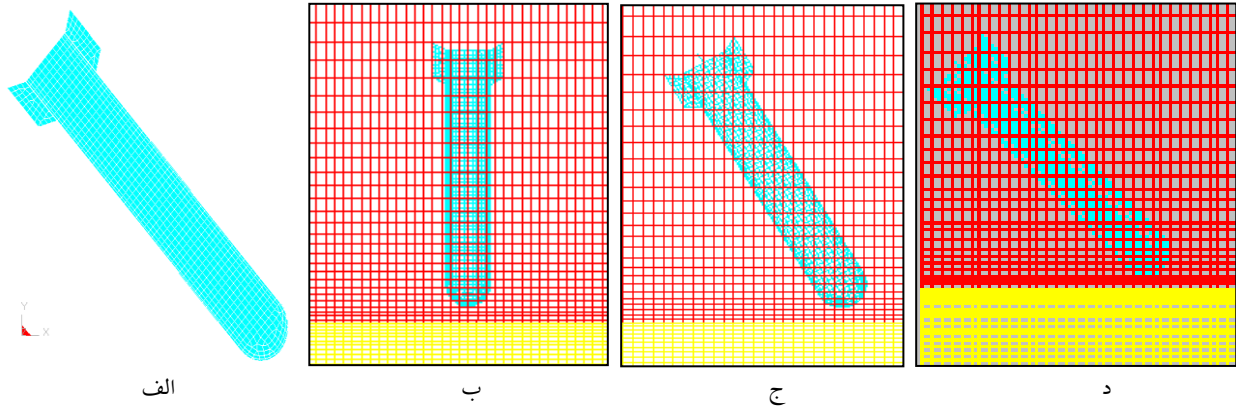
در جدول (۵) ماکزیمم فشار وارد به پرتابه در زوایای مختلف خلاصه شده است، همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات فشار وابسته به زاویه برخورد است. هرچه زاویه برخورد نسبت به افق افزایش یابد، فشار اعمالی به پرتابه کاهش می‌یابد.

**۳-۴-۵- تغییرات نیرو نسبت به زمان**

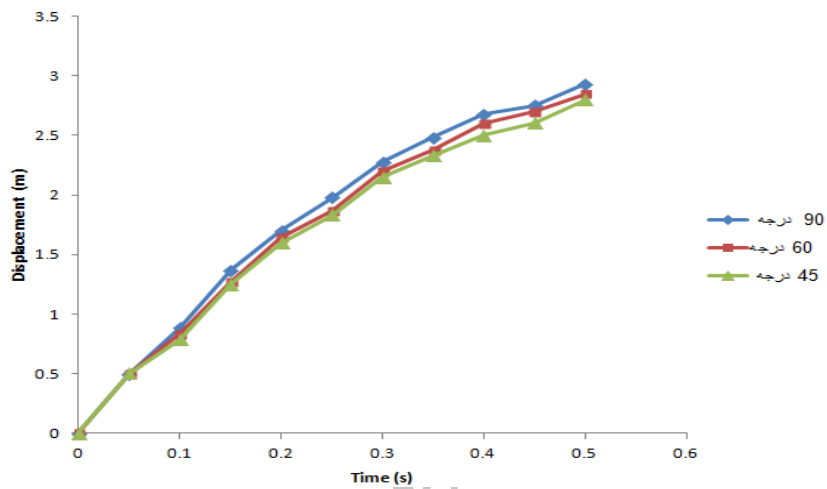
در جدول (۶) تغییرات نیرو در جهات مختلف نسبت به زمان برای سه حالت برخورد نشان داده شده است، همانطور که مشاهده می‌شود تغییرات نیرو نیز وابستگی زیادی به زاویه برخورد دارد. هرچه زاویه برخورد نسبت به افق افزایش یابد، نیروی اعمالی به پرتابه کاهش می‌یابد.

**۳-۴-۶- تغییرات تنش-کرنش**

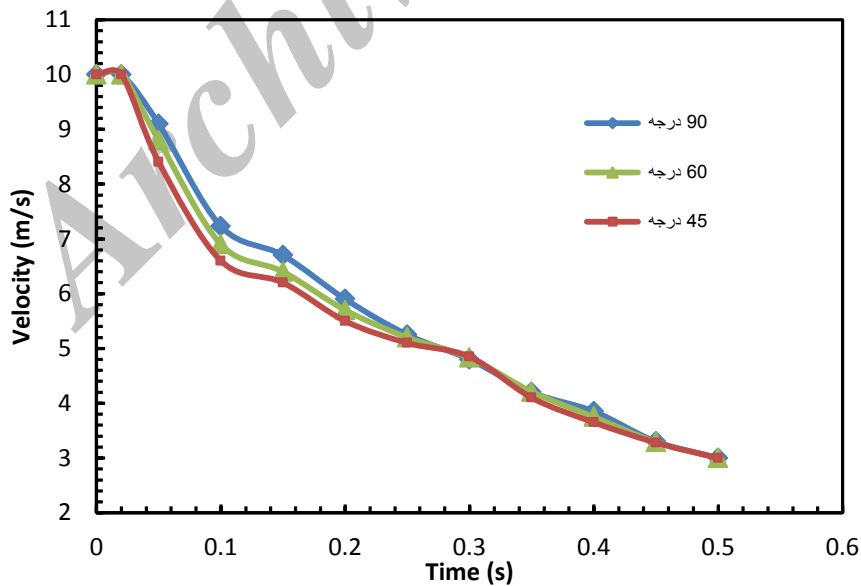
در شکل (۲۲-الف) کانتور تغییرات تنش فون مایرز برای پرتابه برخورد کننده به آب در چند گام زمانی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود در ابتدای برخورد نوک پرتابه دارای تنش ماکزیمم می‌شود، اما در ادامه مطابق انتظار قسمت میانی پرتابه دارای تنش ماکزیمم می‌شود (شکل ۲۲-ب)). احتمال وقوع کمانش و شکست نیز بیشتر از این ناحیه متصور است. در شکل (۲۳) تغییرات تنش برشی نسبت به زمان برای نوک پرتابه در لحظه برخورد پرتابه به سطح آب و در شکل (۲۴) تغییرات تنش برشی نسبت به زمان برای میانه پرتابه نشان داده شده است. همانطور که در شکل مشاهده می‌شود به محض برخورد پرتابه به سطح آب بیشترین تنش در آن وجود می‌آید و با گذشت زمان و فرو رفتن پرتابه در داخل آب تنش برشی وارد به پرتابه به مقدار زیادی کاهش می‌یابد، اگر چه به پرتابه هنوز بار فشاری وارد می‌شود. این وضعیت نشان می‌دهد که در تحلیل برخورد باید توجه ویژه به بارهای ضربه‌ای شود.



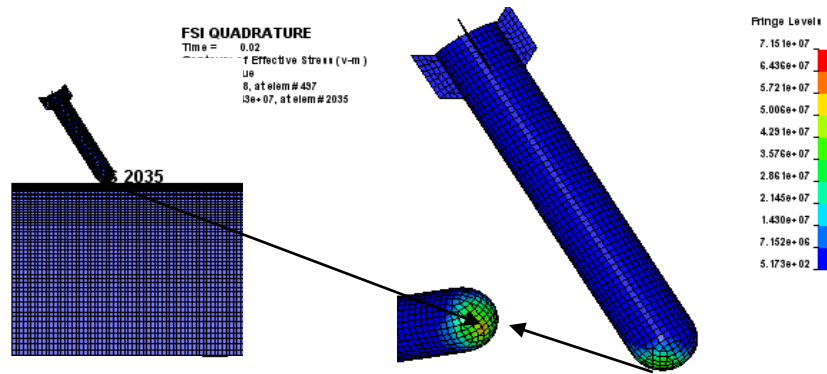
شکل (۱۹) المان بندی مین، آب و هوا. (الف) المان بندی پرتابه، (ب) زاویه برخورد ۹۰ درجه، (ج) زاویه برخورد ۶۰ درجه، (د) زاویه برخورد ۴۵ درجه.



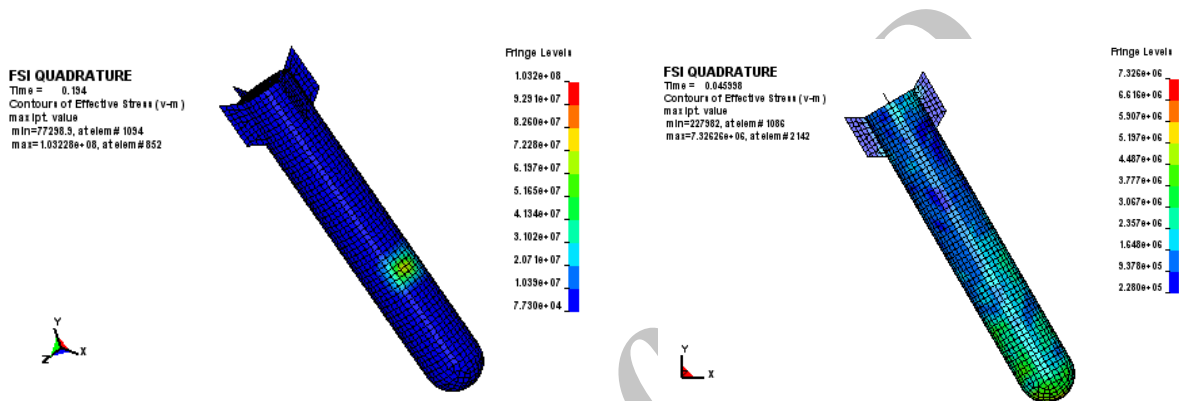
شکل (۲۰) تغییرات جابجایی پرتابه نسبت به زمان.



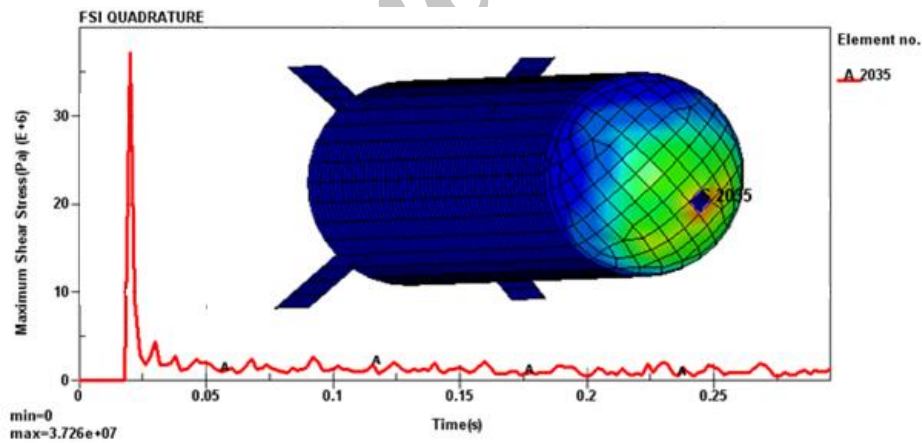
شکل (۲۱) تغییرات سرعت پرتابه نسبت به زمان



شکل (۲۲-الف) کانتور تغییرات تنش فون مایز (0.02s) - ماکزیمم تنش در لحظه برخورد (71 MPa).

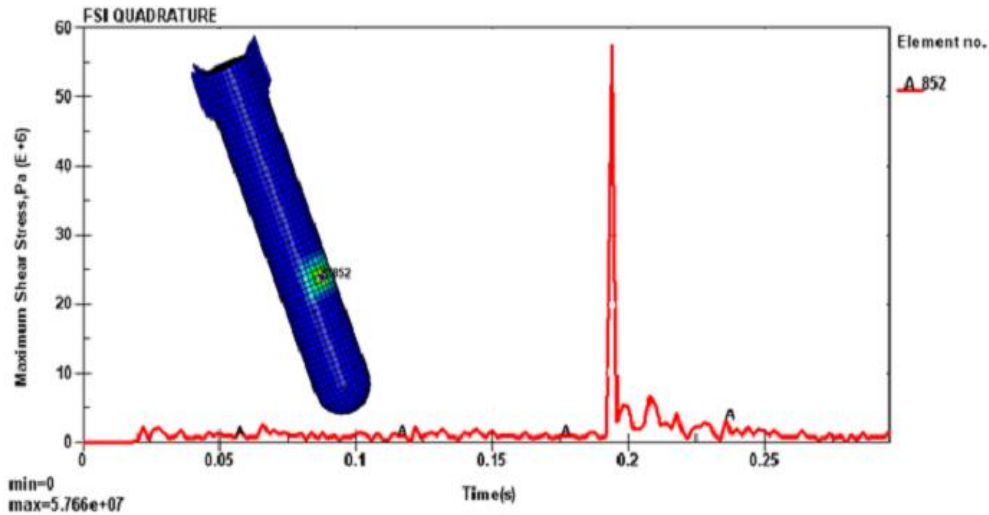


شکل (۲۲-ب) کانتور تغییرات تنش فون مایز سمت راست (0.045s) - سمت چپ (0.194s).



شکل (۲۳) تغییرات تنش برشی نسبت به زمان برای نوک پرتابه در لحظه برخورد.





شکل (۲۴) تغییرات تنش برشی نسبت به زمان برای المانی در میانه پرتابه.

جدول (۵) تغییرات فشار اعمالی به پرتابه پس از برخورد برای سه زاویه برخورد.

زمان اعمال ماکزیمم فشار (ثانیه)	ماکزیمم فشار (پاسکال)	حداقل فشار (پاسکال)	زاویه برخورد (درجه)
۰/۵۱۷	۸/۰۲۳۵۵	۰	۴۵
۰/۲۰۶	۴/۰۸۵۵۵	۰	۶۰
۰/۶۲۴	۲۴۸۷۰	۰	۹۰

جدول (۶) تغییرات نیروی اعمالی به پرتابه پس از برخورد.

زمان اعمال ماکزیمم نیرو (ثانیه)	جهت اعمال نیرو	ماکزیمم نیرو (نیوتن)	زاویه برخورد (درجه)
۰/۶۲۵	x	۵۹۷۴	۹۰
۰/۶۲۵	y	۵۹۹۲۰	۹۰
۰/۲۳۵	z	۲۳۱۵۰	۹۰
۰/۲۰۷	x	$۱/۷۵۶ * ۱۰^۶$	۶۰
۰/۲۰۷	y	$۹/۷۲ * ۱۰^۵$	۶۰
۰/۲۰۷	z	۸۰۵۳	۶۰
۰/۵۱۶۶	x	$۱/۴۳۹ * ۱۰^۶$	۴۵
۰/۵۱۶۶	y	$۱/۰۰۹ * ۱۰^۶$	۴۵
۰/۵۱۶۶	z	$۱۶۷۷ * ۱۰^۵$	۴۵

با توجه به تغییرشکل‌های زیاد در مسائل برخورد سازه با سطح آب استفاده از روش حل ALE با انتخاب کوپلینگ مناسب دارای جواب‌های مطمئنی است.

به محض برخورد سازه با سطح آب در مدت زمان بسیار کوتاهی نیروی وارد شده به سازه افزایش و سپس تا زمان فرو رفتن کامل در داخل آب این نیرو تقریباً ثابت می‌ماند، اگرچه با نوسانات محدودی همراه می‌باشد.

#### ۴- نتیجه گیری

با استفاده از روش FEM با دقت بسیار خوبی در مقایسه با روش‌های تئوری و تحلیلی می‌توان مسائل برخورد سازه با سطح آب را شبیه سازی و تحلیل کرد.

استفاده از مدل مادی نول برای مدل سازی آب و هوا در مسائل برخورد سازه با سطح آب جواب‌های مناسبی را در اختیار قرار می‌دهد.

## فهرست علائم

$a$	ضریب تصحیح حجمی
$C_0$	سرعت صوت حجمی یا مقدار عرض از مبدا
$C_S$	منحنی $U_S - U_P$ ضریب اصابت
$E$	انرژی داخلی اولیه
${}^{t+\Delta t} f_i^B$	مولفه های نیروهای اعمال شده خارجی در واحد حجم در زمان $t + \Delta t$
${}^{t+\Delta t} f_i^S$	مولفه های نیروهای کشش سطحی خارجی در واحد سطح در زمان $t + \Delta t$
$F_S$	نیروی اصابت
$P$	فشار
$R$	شعاع استوانه صلب
$S_1$	اولین ضریب شیب منحنی $U_S - U_P$
$S_2$	دومین ضریب شیب منحنی $U_S - U_P$
$S_3$	سومین ضریب شیب منحنی $U_S - U_P$
$S_f$	سطح
$U_S$	سرعت موج شوک
$U_P$	سرعت ذره
$\delta u_i$	مولفه های بردار جابجایی مجازی
$\delta u_i^s$	بردار جابجایی مجازی روی سطح ${}^{t+\Delta t} S_f$
${}^{t+\Delta t} V$	حجم در زمان $t + \Delta t$
$v$	سرعت برخورد
${}^{t+\Delta t} x_i$	مختصات کارتزین یک نقطه در زمان $t + \Delta t$
$\sigma_{ij}$	تانسور تنش
$\sigma'_{ij}$	تانسور تنش انحرافی
$\sigma_{kk}$	جمع عناصر قطر اصلی تانسور تنش
$\delta_{ij}$	دلتهای کرونکر
$\mu$	لزجت سیال
$\rho_0$	چگالی اولیه محیط برخورد
$\rho$	چگالی محیط برخورد
$\varepsilon'_{ij}$	تانسور کرنش انحرافی
$\varepsilon_{ij}$	تانسور کرنش انحرافی
$\gamma_0$	ضریب گرونایزن
${}^{(t+\Delta t)} \tau_{ij}$	مولفه های کاتزین تانسور تنش کوشی

در شبیه سازی برخورد سازه با سطح آب همه جزئیات پاشش قطرات آب در شبیه سازی وجود ندارد، اما جتی که در اطراف جسم برخورد کننده بوجود می آید بخوبی تخمین زده شده است.

با برخورد جسم به سطح آب در زمان کوتاه برخورد، شتاب جسم با توجه به اینکه جرم جسم برخورد کننده، سرعت جسم برخورد کننده و هندسه آن چگونه باشد، ممکن است شتاب کاهش یا افزایش یابد. اما پس از فرو رفتن جسم در داخل آب در هر صورت شتاب جسم برخورد کننده به شتاب جاذبه نزدیک می شود و این روند تا رسیدن جسم برخورد کننده به کف آب ادامه دارد.

با تغییر شکل و سرعت برخورد کلیه پارامترهای نیرویی، فشار، سرعت، جابجایی، شتاب و غیره تحت تاثیر قرار می گیرند و در صورتیکه سرعت پرتابه پایین باشد، زاویه برخورد تاثیر چندانی در مقدار نیرو، سرعت، جابجایی و شتاب ندارد.

در برخورد پرتابه مورد نظر در این مقاله به سطح آب، به محض برخورد، در نوک پرتابه مطابق انتظار تنش به یکباره به مقدار زیادی افزایش می یابد و پس از آن رو به کاهش می رود. نهایتاً در زمان رسیدن و برخورد میانه پرتابه به سطح آب تنش به بیشترین مقدار خود می رسد.

## تقدیر و تشکر

تحقیق فوق برگرفته از طرح پژوهشی با عنوان بررسی و تحلیل برخورد اجسام با سطح آب و ورود به آن می باشد که با حمایت مالی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر به اجرا در آمده است. بدین وسیله از آن واحد دانشگاهی، تقدیر و تشکر به عمل می آید.

Users Conference", Dearborn, Michigan, April, 2000.

مراجع

- [12] Randhawa H.S., Lankarani H. M., Finite element analysis of impacts on water and its application to helicopter water landing and occupant safety, *International Journal of Crashworthiness*, vol. 8, 2003, pp.189-200.
- [13] Halliquist J.O., Simplified Arbitrary Lagrangian-Eulerian, LS-DYNA Theoretical Manual, 1998.
- [14] LS-DYNA Theory Manual, Livermore Software Technology Corp, 2007.
- [15] Seif M., Mousaviraad S., Saddathosseini S., Numerical Modeling of 2-d Water Impact in One Degree of Freedom, *Sintesis Tecnologica*, vol. 2, 2005, pp. 79-83.
- [16] Greenhow M., Lin WM., Non linear free surface effects: experiments and theory. Report No. 83-19, Department of Ocean Engineering, MIT, Cambridge, 1983.
- [17] Campbell IMC., Weynberg PA., Measurement of parameters affecting slamming. Report No 440, Wolfson Unit of Marine Technology, Tech. Rep. Centre No. OT-R-8042, Southampton, UK, 1980.
- [1] Anghileri M., Spizzica A., *Experimental validation of finite element models for water impacts*, Proceedings of the second international crash users' seminar, Cranfield Impact Centre Ltd, England, 1995.
- [2] Korobkin A., Ohkusu M., Impact of two circular plates one of which is floating on a thin layer of liquid, *Journal of Engineering Mathematics*, vol. 50, 2004, pp.343-358.
- [3] Wagner H., Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces, NACA Library, Langley Aeronautical Laboratory, 1936. Translation of: Wagner, H., 1932. U" ber stob und gleitvorga" nge an der oberfla" che von flu".
- [4] Battistin D., Iafrati A., Hydrodynamic loads during water entry of two-dimensional and axisymmetric bodies. *Journal of Fluids and Structure*, vol. 17, 2003, pp.643-664.
- [5] Park M., Jung Y., Park W., Numerical study of the impact force and ricochet behaviour of high speed water entry bodies. *Computer Fluids*, vol. 51, 2003, pp. 932-939.
- [6] Roe SM., Numerical and experimental analysis of initial water impact of an air dropped REMUS AUV, Dissertation, MIT, 2005.
- [7] Kleefsman T., Water Impact Loading on Offshore Structures. A Numerical Study, PHD thesis, 2005.
- [8] Fairlie-Clarke AC., Tveitnes T., Momentum and gravity effects during the constant velocity water entry of wedge-shaped sections, *Ocean Engineering*, vol. 35, 2007, pp.706-716.
- [9] Wu G., Numerical simulation for water entry of a wedge at varying speed by a high order boundary element method, *Journal of Marine Science and Application*, vol. 11, 2012, pp. 143-149.
- [10] Ahmadzadeh M., Saranjam B., Hoseini Fard A., Binesh AR., Numerical simulation of sphere water entry problem using Eulerian-Lagrangian method, *Applied Mathematical Modelling*, vol. 38, 2014, pp.1673-1684.
- [11] Olovsson L., Souli M., *ALE and Fluid Structure Interaction Capabilities in LS- DYNA*, Proceedings of the 6<sup>th</sup> International LS-DYNA