



## بررسی عملکرد دینامیکی وسیله نقلیه تانکر دار متأثر از تلاطم سیال درون مخزن با استفاده از روش شبیه‌سازی چند فیزیکی

بهمن قاسمی<sup>۱</sup>، محمدحسین مرعشی<sup>۱</sup>، عبدالمجید خوشنود<sup>۲\*</sup> و مانی فتحعلی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

<sup>۲</sup> استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۰۹/۱۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۷/۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۴

### چکیده

در این پژوهش اثرات تلاطم مایع درون یک مخزن حمل شونده توسط وسیله نقلیه همزمان با عملکرد دینامیکی وسیله بررسی می‌شود. بدین منظور حلگر غیرخطی سه‌بعدی دینامیک سیال با حلگر دینامیک وسیله نقلیه با سه درجه آزادی در یک فضای شبیه‌سازی همکار تحت مدیریت نرم‌افزار واسط مورد استفاده قرار گرفته است. برای اعمال اثرات حرکت شتاب‌دار مخزن از روش نیروهای وزنی استفاده و به همین سبب اصلاحاتی بر معادلات ناویر-استوکس انجام شده است. روش مذکور در شبیه‌سازی مخازن دو بعدی که با شتاب در راستای افق حرکت می‌کنند مورد استفاده قرار گرفته که نتایج با داده‌های تجربی مراجع مقایسه شده‌اند تا از صحت روش و پیاده‌سازی آن اطمینان حاصل شود. برخورد مخزن با یک مانع در پایان مسیر حرکت شتاب‌دار و نیز حرکت شتاب‌دار تناوبی یک مخزن دو بعدی مورد بررسی قرار گرفته و نتایج بدست آمده با داده‌های آزمایشگاهی مقایسه شده که مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. همچنین حرکت وسیله نقلیه حامل مخزن همزمان با دینامیک سیال درون آن حین عبور از دست‌اندازهای متقارن برای ارزیابی اثر تلاطم سیال درون مخزن بر دینامیک وسیله و عملکرد آن در تحریک عمودی شبیه‌سازی شد.

**کلمات کلیدی:** شبیه‌سازی چند موضوعی؛ شبیه‌سازی همکار؛ تلاطم سیال؛ روش حجم محدود؛ دینامیک سامانه چندجسمی

## Investigation on the Tank Vehicle Dynamic Performance Influenced by Fluid Sloshing Using Multidisciplinary Simulation Technique

B. Ghasemi, M. H. Marashi, A. Khoshnood\*, M. Fathali  
Aerospace Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

### Abstract

In the current study impacts of fluid sloshing on the dynamic performance of a partially filled tank vehicle have been investigated. A nonlinear three-dimensional solver of fluid flow is coupled with dynamic equations of three degrees of freedom moving vehicle. An intermediate software has been utilized to synchronize the simulation of the fluid sloshing inside the tank and the vehicle dynamics influenced by sloshing. The fluid sloshing solver is based on corrected Navier-Stokes equations. The "body weighted method" is used to consider the effects of accelerating motions of the tank on fluid. The mentioned method has been used to simulate the partially filled container during accelerating horizontal motion which crashed an obstacle after a while from the start point. Moreover, the two-dimensional rectangular container subjected to periodic external excitation has been considered. The pressure history on the tank wall has been compared to the measured impact pressure. One is observed that there is a good agreement between the computed and measured results. Furthermore, the coupled tank vehicle-fluid simulation has been done during vertical excitations through passing symmetric bumps.

**Keywords:** Multidisciplinary Simulation (MDS); Coupled Simulation; Fluid Sloshing; Volume of Fluid Method Multi-body Dynamics

\* نویسنده مسئول؛ تلفن: ۱۶۷۶۵۳۳۸۱

آدرس پست الکترونیک: [khoshnood@kntu.ac.ir](mailto:khoshnood@kntu.ac.ir)

## ۱- مقدمه

در بررسی و تحلیل مدل‌هایی از سامانه‌های مهندسی که در آنها حضور چند فازی محیط و زیرسامانه‌های مختلف دینامیکی، سیالاتی و سازه‌ای مشهود است، دیدگاه‌های فعلی شبیه‌سازی که تنها به یک جنبه از موضوع می‌پردازند قابل پیاده‌سازی نیست و یا با خطاهای قابل توجه همراه خواهد بود. از طرفی امروزه شبیه‌سازی‌هایی در سامانه‌های مهندسی با رویکرد افزایش دقت زیرسامانه‌ها اجرا می‌گردد که مواجه با هزینه‌های زیادی هستند. به عبارت دیگر، هدف این است که بتوان به ماهیت واقعی‌تری از مدل‌های عملکرد فیزیکی‌های مختلف دخیل در مسئله دست یافت و هزینه را کاهش داد.

برای هر سامانه مهندسی که بتوان بیش از یک محیط فازی و یا نرم‌افزار تخصصی را برای مدل‌سازی به خدمت گرفت می‌توان گفت شبیه‌سازی، رویکرد همکار پیدا کرده است. خواستگاه این دیدگاه به عملکرد چند محیطی سامانه اصلی باز می‌گردد. به عبارتی دیگر از آنجا که شبیه‌سازی با محیط یا فیزیک منفرد دارای جامعیت و در نتیجه دقت کافی نیست، شبیه‌سازی همکار به ترکیب کردن چند محیط که ویژگی‌های علمی و تئوریک خاص خود را دارند می‌پردازد. با اتصال محیط‌های فوق به یکدیگر چه به صورت روی خط ۱ و خارج خط ۲ با به اشتراک گذاشتن داده‌های هر فیزیک در اختیار سایر فیزیک‌ها و اعمال در شبیه‌سازی آن بخش، یک شبیه‌سازی جامع‌تر اجرا می‌شود.

برای راه‌اندازی و سپس آزمودن ابزار شبیه‌سازی همکار، بررسی اثر تلاطم مایع موجود در یک مخزن حمل شونده توسط یک وسیله نقلیه بستر مناسبی برای اجرای یک شبیه‌سازی همکار بین دو فیزیک سیال و دینامیک است. در واقع هدف اصلی از انتخاب این موضوع در حال حاضر بررسی صحت فرایند شبیه‌سازی همکار است و در کارهای بعدی میزان دقت و زمان حل روش در مقایسه با روش‌های حل دیگر ارزیابی خواهد شد. البته موضوع برهمکنش سیال و دینامیک وسیله حامل به خودی خود بسیار مهم است. وضعیت حمل و نقل سوخت توسط تانکرها نشان دهنده بروز حوادث متعددی از جمله واژگونی برای این وسایل است که از تلاطم مایع در مخزن آنها ناشی می‌شود. داده‌های آماری

سازمان حمل و نقل ایالات متحده<sup>۳</sup> گزارش می‌دهد که هر ساله در حدود یک هزار و سیصد کامیون حمل مایع (تانکر مایع) دچار حادثه واژگونی می‌شود که ۵۶ درصد آن‌ها در جاده‌های مستقیم و باقی در خروج از جاده‌ها اتفاق می‌افتد. همچنین ۹۸ درصد از این واژگونی‌ها در مسیرهای خشک است که تنها ۲۸ درصد آن‌ها مرتبط به سرعت غیر مجاز راننده است. علاوه بر این ۳۱ درصد از تلفات مرگ و میر در حادثه‌های واژگونی وسایل نقلیه تجاری مربوط به کامیون‌های تانکر دار (حمل مایع) است [۱]. در تانکی که بخشی از آن پر شده است، تلاطم مایع داخل آن سبب افزایش بارهای (نیروهای) انتقالی و نیز افزایش نیروهای تلاطم می‌شود بنابراین وسایل تانکر دار فاصله‌ی ترمزی بیشتر و محدودیت پایداری دورانی کمتری نسبت به وسایل نقلیه سنگین که بار جامد حمل می‌کنند و یا از تانکرهایی که به صورت کامل پر شده‌اند دارند [۲]. در حقیقت اگر پرشدگی ناکامل تانکر سبب کاهش ارتفاع مرکز جرم شود ضربه مایع (حرکت نوسانی ناگهانی)، در شرایط بار بین ۴۰ تا ۸۰ درصد می‌تواند موجب افزایش نیروهای ناشی از تلاطم شود که به شدت سبب افت پایداری دورانی وسیله می‌شود؛ در حین تغییر مسیر عبور ناگهانی ضربه مایع می‌تواند به طور جدی پایداری جهتی وسیله نقلیه را دست‌خوش تغییر قرار دهد. در حالی که تأثیر ارتفاع مرکز جرم بر پایداری وسیله کشنده بار جامد به طور وسیعی با استفاده از مدل‌های مکانیکی کلاسیک بررسی شده است، تأثیر ضربه سیال ناشی از تلاطم بر پایداری کامیون‌های تانکر دار به شکل کامل بررسی نشده است، چرا که نیل به این هدف نیاز به مدل‌های پیچیده‌تر و کامل‌تری دارد که باید مورد استفاده قرار گیرند [۳ و ۴]. آن چیزی که سبب دشواری مدل‌سازی دینامیک وسایل تانکر دار می‌شود برهم‌کنش دینامیکی بین وسیله حامل و محموله‌ی مایع است. از این حیث که دینامیک وسیله نقلیه به شدت متأثر از نیروهای تلاطم سیال و تغییر مکان مرکز جرم و بالعکس است. وسیله نقلیه و بار مایع از طریق دیواره‌های خیس شده و انتقال شتاب‌های متقابل فعل و انفعال دارند که سبب می‌شود مدل‌سازی دینامیک کامل بدون مدل‌سازی اینگونه برهم‌کنش‌ها قابل انجام نباشد. بنابراین دو دسته از معادلات که هر کدام به طور جداگانه توصیف کننده دینامیک وسیله

<sup>1</sup> On-Line<sup>2</sup> Off-Line<sup>3</sup> US DOT

مجموعه است که امکان شبیه‌سازی هر زیرسامانه در یک محیط محاسباتی مناسب را فراهم می‌آورد و سپس به وسیله انتقال اطلاعات دو زیرسامانه، دو دینامیک وابسته (دینامیک وسیله نقلیه و دینامیک سیال حمل‌شونده) به هم متصل می‌شوند.

از نرم‌افزارهای تجاری بسیار مطرح مورد استفاده در دنیا برای تحلیل سیال، نرم‌افزار فلوئنت<sup>۵</sup> و فلوتری.دی<sup>۶</sup> است. آقای توماسی و همکارانش در مؤسسه تحقیقاتی سوخت و روانکارهای تاردک<sup>۷</sup> در زمینه‌های شبیه‌سازی چندفیزیکی تلاطم سیال در مخزن متحرک تحقیقاتی انجام داده‌اند که بخشی از آن مربوط به شبیه‌سازی با استفاده از ترکیب فلوتری.دی و نرم‌افزار ادمز<sup>۸</sup>، و نیز فلوئنت و ادمز است [۹]. طبیعتاً اجرای شبیه‌سازی همکار برای بررسی یک پدیده به صورت چند فیزیکی محدود به بحث تلاطم نیست. جعفری و همکاران [۱۰] جریان ناپایای آیرودینامیکی در هنگام جدایش بوسترهای جانبی از ماهواره‌بر در جو غلیظ را با لحاظ کردن کامل مکانیزم‌های جدایش و حرکت دینامیکی بوستر با استفاده از نرم‌افزارهای فلوئنت و ادمز با رویکرد شبیه‌سازی همکار تحلیل کرده‌اند.

باید توجه داشت که در پژوهش حاضر جنبه پیچیده دینامیک وسایل نقلیه و اجزای آن‌ها در نظر گرفته شده است که با معادلات متداول حاکم بر فیزیک سازه قابل بررسی نیستند. مطالعات بسیاری در زمینه شبیه‌سازی سیال و سازه صورت پذیرفته است. در این مطالعات به طور اهم و وسیع به بررسی اثرات حرکت سیال بر تغییر شکل سازه و مسائل مربوط به استحکام و خستگی آن پرداخته می‌شود. در این دسته از مطالعات ترکیبی، معادلات سیال و سازه به طور همزمان حل می‌شوند. ولی این روش قادر به بررسی مکانیزم‌های حرکت دینامیکی موجود در سامانه نیست و در نتیجه آن امکان ارتقاء سامانه و مطالعه الگوی جریان و نیز حرکت اجزاء وجود ندارد. بنا بر این، روش ارائه شده در این پژوهش جهت بررسی چنین مسائلی چندفیزیکی اهمیت می‌یابد. تفاوت پژوهش حاضر در بررسی چندفیزیکی سیال و

نقلیه و حرکت سیال هستند باید در نظر گرفته شوند که در دو روش متفاوت حل می‌شوند، چنین حلگر محاسباتی تجاری که امکان مدل‌سازی چنین مدل پیچیده‌ای را به سادگی فراهم آورد تا به امروز در دسترس نیست. در طی سالیان، مدل‌های ساده شده پیشنهاد شده است، از قبیل مدل شبه ایستایی<sup>۱</sup>، که ویژگی اساسی آن محاسبه بر مبنای یک تقریب مناسب از انتقال مرکز جرم بر حسب تابعی از شتاب‌های خارجی وارده بر سامانه است. تعداد زیادی مدل جهت توصیف دینامیک طولی و جانبی وسیله پیشنهاد شده‌اند. در موارد معدودی نیز دینامیک سه بعدی وسیله مدل شده است. تمامی مدل‌های ارائه شده دارای مزیت قابلیت اعمال به صورت ساده بر معادلات حرکت وسیله نقلیه هستند. با این وجود، نیروهای ناشی از تلاطم غیر خطی به شکل کامل کنار گذاشته شده‌اند. به علاوه، تنها مدل ساده شده مخزن قابل بررسی است [۵]. روش دیگر بر پایه‌ی قیاس مکانیکی است که در آن از جرم موجی یک درجه آزادی<sup>۲</sup> استفاده شده و نتایج هم‌خوانی بسیار خوبی با رفتار سیال دارند. علاوه بر این، مدل آونگی<sup>۳</sup> امکان توصیف خوب از تموج سیال تحت شتاب‌های محدود را فراهم می‌آورد. ولی مشکل اساسی مدل ارائه شده ناتوانی در مدل‌سازی تلاطم غیرخطی سیال است که به شدت پایداری وسیله نقلیه در حین تغییر حرکت ناگهانی را تحت تأثیر قرار می‌دهد [۶]. اخیراً با پیشرفت‌های حاصله در زمینه شبیه‌سازی عددی دینامیک سیال، مدل‌های تلاطم سیال جهت مطالعه اثرات تیغه‌های آرام‌کننده<sup>۴</sup> و بدون در نظر گرفتن دینامیک وسیله نقلیه بررسی شده‌اند. این مطالعات درک و بینشی جهت چگونگی طراحی این تیغه‌ها را فراهم آورده است [۷]. کیانژاد و همکاران [۸] اثر وجود دیواره بر تلاطم سوخت درون مخزن سوخت یک شناور تندرو را با استفاده از شبیه‌سازی عددی نسبت به حالت عدم استفاده از دیواره مقایسه کرده‌اند.

صرفاً در سال‌های اخیر روش شبیه‌سازی همکار یا چند فیزیکی جهت شبیه‌سازی کامیون تانکر دار وابسته به تلاطم سیال پیشنهاد شده است. روش مذکور معطوف به تقسیم‌بندی سامانه کلی دینامیک وسیله نقلیه به دو زیر

<sup>5</sup> Fluent

<sup>6</sup> FLOW-3D

<sup>7</sup> TARDEC

<sup>8</sup> MSC. ADAMS

<sup>9</sup> Fluid and Solid Interaction

<sup>1</sup> Quasi Static Model

<sup>2</sup> One Degree of Freedom Waving Mass

<sup>3</sup> Pendulum Model

<sup>4</sup> Baffle

حاصل از تحلیل دینامیک سه‌بعدی تلاطم سیال بررسی کرد. روابط مدل سه درجه آزادی صفحه-دوران یک حامل مخزن به جهت بررسی پاسخ به تحریک دورانی وسیله ارائه می‌شود که به جهت ساده‌سازی از چرخ‌ها و لاستیک‌ها و در نتیجه از روابط مدل‌سازی آن‌ها صرف‌نظر شده است. مدل شکل ۱ حرکات طولی، عمودی و دورانی جسم صلب را در بر می‌گیرد. سیال درون مخزن نیز بر مبنای نیروهای مقاوم گذرا در راستای محورهای طولی و عمودی و گشتاور دورانی در مدل دینامیکی وسیله توصیف می‌شود که این نیروها و گشتاورها از مدل تلاطم سیال درون مخزن حاصل می‌شوند که فرض بر وارد آمدن این نیروها و گشتاورها بر مرکز جرم جسم صلب،  $O_S$  است. معادلات حرکت بیان کننده حرکت طولی  $(x_S)$ ، عمودی  $(z_S)$  و دوران  $(\gamma_S)$  جسم صلب بدین صورت می‌توانند نوشته شوند:

$$(m_s + m_l)\ddot{x}_S = \bar{F}_{xl} \quad (1)$$

$$(m_s + m_l)\ddot{z}_S = \bar{F}_{zl} - (F_{zsf} + F_{zsr}) + (m_s + m_l)g \quad (2)$$

$$(I_{yys} + I_{yyL})\dot{\gamma}_S = \bar{M}_{yl} + F_{zsf}L_f - F_{zsr}L_r \quad (3)$$

که  $\bar{F}_{xl}$ ،  $\bar{F}_{zl}$  و  $\bar{M}_{yl}$  به ترتیب نیروهای طولی و عمودی مقاوم و گشتاور دورانی ناشی از تلاطم مایع درون مخزن هستند که در دستگاه مختصات مرتبط به مدل تلاطم سیال محاسبه شده و سپس به دستگاه مختصات لخت منتقل می‌شوند. جسم صلب  $m_s$  شامل سازه شاسی و مخزن است و جرم مایع نیز با  $m_l$  بیان می‌شود.  $I_{yys}$  و  $I_{yyL}$  نیز به ترتیب ممان اینرسی دورانی جسم صلب و مایع شناور هستند.  $L_f$  و  $L_r$  به ترتیب موقعیت محور جلو و عقب از مرکز جرم جسم صلب هستند، همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.  $F_{zsf}$  نیروی محوری سامانه تعلیق محور جلو و  $F_{zsr}$  نیروی محوری ناشی از سامانه تعلیق محور عقب است. با فرض ضریب سفتی و میرایی خطی سامانه تعلیق، نیروهای آن از معادلات (۴) محاسبه می‌شوند.

$$F_{zsf} = k_{sf}(z_S + L_f \sin \gamma_S) + c_{sf}(\dot{z}_S + L_f \dot{\gamma}_S)$$

$$F_{zsr} = k_{sr}(z_S - L_r \sin \gamma_S) + c_{sr}(\dot{z}_S - L_r \dot{\gamma}_S) \quad (4)$$

که  $k_{si}$  و  $c_{si}$  ضرایب سفتی و میرایی سامانه تعلیق در محور  $i$  ( $i = f, r$ ) بوده و  $f$  و  $r$  به ترتیب بیانگر محور جلو و عقب هستند.

دینامیک است که تا کنون کار چندانی روی آن صورت نپذیرفته است. با استفاده از روش ذکر شده امکان بررسی اجزاء متحرک، اجزای سامانه تعلیق از جمله فنر و غیره و بررسی کارایی آنان و نیز اعمال کنترل و فرمان‌پذیری سامانه به همراه بررسی رفتار زیرسامانه سیال فراهم می‌شود. در نتیجه پس از بررسی چگونگی عملکرد سامانه به کلی و نیز اجزای آن به طور جداگانه می‌توان گامی مؤثر جهت ارتقای آن و نیز کاستن از نقاط ضعف آن برداشت. از این حیث این پژوهش گامی نو و بدیع در سیستم‌های چندفیزیکی و نیز کاربردهای آن از جمله صنایع هوایی، دریایی و اتومبیل‌سازی و غیره است. بنا بر این، مزیت عمده روش حاضر، به کارگیری حد نهایی قابلیت‌ها و امکانات موجود در اجزاء و زیرسامانه‌های دینامیکی یک نرم‌افزار تخصصی در برهمکنش با اثر سیال است. با سنجش اعتبار روش حاضر با مسئله تلاطم، می‌توان ابزار شبیه‌سازی همکار را در مسائلی به مراتب پیچیده‌تر مانند فرایند فرود یک وسیله پرنده دارای ارباب فرود بررسی کرد. عیب احتمالی روش حاضر را می‌توان افزایش زمان مراحل پیش از شبیه‌سازی و در واقع راه‌اندازی مسئله بیان کرد که البته برای به دست آوردن مزیت فوق‌امری ناگزیر است.

در پژوهش حاضر دینامیک سیال و وسیله نقلیه حامل مخزن سوخت به صورت وابسته به هم شبیه‌سازی شده‌اند. وابسته‌سازی بین مدل‌ها از طریق انتقال نیروها و ممان‌های برآمده از تلاطم سیال در مخزن تا بخشی پر، که به دیواره‌های مخزن وارد می‌شوند انجام می‌شود. برای این منظور پس از مدل‌سازی فیزیک مسئله توسط معادلات، اعتبارسنجی مدل محاسباتی تلاطم سیال با مقایسه نیروها و گشتاورهای تلاطم به دست آمده در شبیه‌سازی عددی و تجربی مقایسه می‌شوند. پس از اعتبارسنجی روش، شبیه‌سازی تلاطم مایع وابسته به دینامیک وسیله نقلیه انجام یافته و نتایج آن ارائه می‌شود.

## ۲- معادلات حاکم

پایداری دورانی یک وسیله حامل مایع که بخشی از مخزن آن با سیال پر شده است را می‌توان با استفاده از مدل صفحه-دوران<sup>۱</sup> وسیله نقلیه وابسته شده به نیروها و گشتاورهای

<sup>۱</sup> Pitch-Plane

دهنده‌ی تهی بودن سلول مورد نظر از مایع است و به طور کامل از گاز انباشته شده است.  $\lambda$  سلول‌هایی که بخشی از آن‌ها مایع و بخش دیگر شامل گاز است مقادیری میان صفر و واحد را اختیار می‌کند که به جهت به دست آوردن فصل مشترک میان مایع-گاز استفاده می‌شود.

میدان‌های سرعت و فشار جریان سیال با استفاده از مجموعه معادلات تراکم‌ناپذیر و ناپایای ناویر-استوکس و معادله پیوستگی طبق روابط (۶-۷) استخراج می‌شوند [۱۱-۱۴].

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (۶)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f} + \mathbf{F} \quad (۷)$$

که  $\nabla$  عمگر گرادیان،  $\nabla^2$  عمگر لاپلاس،  $p$  فشار سیال و  $\mu$  و  $\rho$  نیز به ترتیب چگالی و لزجت سیال هستند.  $\mathbf{f}$  بردار نیروهای وزنی ناشی از شتاب گرانش و اختلالات خارجی نظیر حرکت وسیله است که به روش نیروهای وزنی<sup>۳</sup> [۱، ۹، ۱۵، ۱۶] به معادلات ناویر-استوکس افزوده شده است.

اگرچه جریان درون مخزن دو فازی است، تنها یک دسته از معادلات حاکم بر دینامیک جریان، معادلات (۶) و (۷) حل می‌شوند. در این حالت ویژگی‌های سیال نظیر چگالی و لزجت برای فازهای مختلف با استفاده از تابع کسر حجمی و با رابطه (۸) و (۹) تعریف می‌شوند [۱۷].

$$\rho = \lambda \rho_l + (1 - \lambda) \rho_g \quad (۸)$$

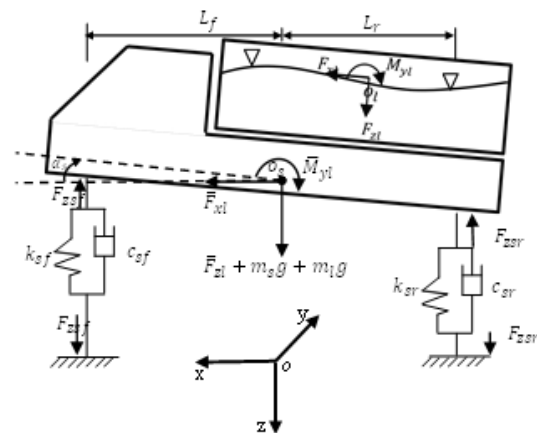
$$\mu = \lambda \mu_l + (1 - \lambda) \mu_g \quad (۹)$$

که  $\rho_l$  و  $\rho_g$  به ترتیب چگالی مایع و هوا و  $\mu_l$  و  $\mu_g$  نیز به ترتیب لزجت مایع و هوا را نشان می‌دهند و  $\lambda$  بیانگر کسر حجمی فاز مایع در هر سلول است.  $F$  نیز بیانگر اثرات کشش سطحی یا برهم‌کنش دو فاز است که در سمت راست معادله اندازه حرکت در نظر گرفته شده است که در معادله (۱۰) آورده شده است. لازم به ذکر است که اثرات کشش سطحی در حالتی که عدد وبر بسیار بزرگتر از واحد است،  $We \gg 1$ ، نادیده انگاشته می‌شوند [۱۷ و ۱۸].

$$\mathbf{F} = \sigma k \frac{2\rho}{\rho_l + \rho_g} \nabla \lambda \quad (۱۰)$$

که  $\rho$  چگالی است که در معادله (۸) تعریف شده است. در این پژوهش ضریب کشش سطحی،  $\sigma$ ، ثابت در نظر گرفته شده

لازم به ذکر است که در این پژوهش مدل دینامیکی وسیله نقلیه با استفاده از نرم‌افزار تحلیل دینامیکی چندپیکره‌ای<sup>۱</sup> ادمس شبیه‌سازی شده است.



شکل ۱- مدل صفحه-دوران از وسیله حامل مخزن مایع

## ۱-۲- مدل تلاطم سیال درون مخزن

دامنه سیال درون یک مخزن که بخشی از آن پر است را می‌توان جریانی دوفازی (گاز-مایع) با گونه‌های سیال متفاوت در نظر گرفت. هرگونه اختلال مخزن سبب می‌شود که سطح مشترک دو سیال با سرعت جریان حرکت کند. اینگونه جریان‌های دارای سطح آزاد با بهره‌گیری از روش مدل‌سازی حجم سیال<sup>۲</sup> جهت رهگیری و محاسبه الگوی سطح مشترک میان دو فاز شبیه‌سازی می‌شوند، در حالی که مشخصه‌های میدان جریان با حل معادلات بقای جرم و اندازه حرکت به دست می‌آیند [۱۱-۱۴]. جابجایی سطح آزاد مایع را می‌توان با حل یک معادله وابسته به زمان برای کسر حجمی مایع،  $\lambda$ ، همبسته شده به میدان سرعت جریان محاسبه کرد [۱۱]:

$$\frac{\partial \lambda}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{u} \lambda) = 0 \quad (۵)$$

که  $\nabla \cdot$  عمگر دیورژانس است. در دامنه محاسباتی، در ابتدا تابع کسر حجمی  $\lambda$  هر سلول شبکه برابر صفر یا واحد در نظر گرفته می‌شود. مقدار واحد بیانگر این حقیقت است که آن سلول محاسباتی به طور کامل با مایع پر شده است، در حالی که مقدار صفر نشان

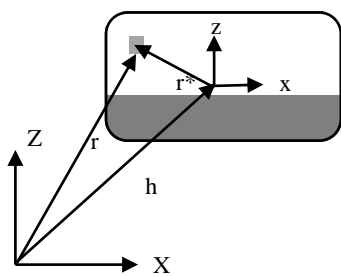
<sup>3</sup> Body Forces Method

<sup>1</sup> Multibody System Dynamics

<sup>2</sup> Volume of Fluid (VOF)

$$\frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{d^2 \mathbf{r}^*}{dt^2} + \boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}^*) + 2\boldsymbol{\omega} \times \frac{d\mathbf{r}^*}{dt} + \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r}^* + \frac{d^2 \mathbf{h}}{dt^2} \quad (16)$$

که در روابط فوق متغیرهای ستاره دار نسبت به مرجع غیرلخت متصل به مخزن و متغیرهای بدون علامت نسبت به دستگاه مختصات لخت هستند. برای مثال  $\mathbf{r}^*$  نسبت به مرجع متحرک با مخزن و  $\mathbf{r}$  موقعیت نسبت به مرجع اینرسی است (شکل ۲).



شکل ۲- نمایی دوبعدی از انتقال مختصات

در صورتی که مخزن ثابت باشد و یا با سرعت ثابت حرکت کند، مرجع متصل به مخزن لخت باشد، معادله (۱۶) تنها یک جمله در طرف راست خواهد داشت و در نتیجه هیچ تفاوتی میان شتاب نسبت به مرجع متصل به مخزن و دیگر مرجع لخت نخواهد بود. به هر حال، در صورت حرکت شتاب دار مرجع غیر لخت متصل به مخزن، شتاب های دیگری در سمت راست معادله (۱۶) پدیدار می شوند که به ترتیب متناظر با شتاب های گریز از مرکز<sup>۱</sup>، کریولیس<sup>۲</sup>، زاویه ای<sup>۳</sup> و شتاب خطی هستند. لازم به ذکر است که در مسئله شبیه سازی همکار بین دینامیک وسیله نقلیه و دینامیک سیال مقادیر این شتاب ها با استفاده از نتایج حل معادلات حرکت وسیله و استفاده از رابطه (۱۶) قابل محاسبه هستند. داده های مورد نیاز جهت محاسبه شتاب ها به شرح زیر هستند که باید به حلگر دینامیک سیال منتقل شوند:

- سه مؤلفه شتاب های خطی حرکت مخزن ( $a_x$ ،  $a_y$  و  $a_z$ )،
- سه مؤلفه سرعت زاویه ای مخزن ( $\omega_x$ ،  $\omega_y$  و  $\omega_z$ )،
- سه مؤلفه شتاب زاویه ای مخزن ( $\dot{\omega}_x$ ،  $\dot{\omega}_y$  و  $\dot{\omega}_z$ ).

است. مقدار پیچش،  $k$  نیز بر اساس دیورژانس بردار  $\mathbf{n}$  یکه  $n$  معادله (۱۱) و (۱۲) تعریف می شود:

$$k = -(\nabla \cdot \hat{\mathbf{n}}) = -\left[ \nabla \cdot \left( \frac{1}{|\nabla \lambda|} \nabla \lambda \right) \right] \quad (11)$$

که در معادله (۱۱) داریم:

$$\hat{\mathbf{n}} = \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} \quad (12)$$

با جایگذاری معادله (۱۱) در (۱۰) نتیجه می دهد:

$$\mathbf{F} = 2\sigma\rho \frac{\nabla \lambda}{\rho_l + \rho_g} \frac{1}{|\nabla \lambda|} \cdot \left[ \left( \frac{\nabla \lambda}{|\nabla \lambda|} \cdot \nabla \right) |\nabla \lambda| - (\nabla^2 \lambda) \right] \quad (13)$$

شبیه سازی مستقیم مخزن متحرک نیازمند حرکت تمامی نقاط شبکه محاسباتی در هر گام زمانی خواهد بود. همچنین در صورت شبیه سازی مستقیم، نیازمند محاسبات اضافه بسیاری جهت اثرات هدایتی انتقال و دوران شبکه خواهیم بود. به علاوه، قابلیت کلاسیک فلونت در شبیه سازی توربو ماشین ها منحصر به دوران با محور ثابت و مقدار ثابت است و روش جدیدی با شبکه به کلی قابل حرکت مورد نیاز خواهد بود. تمامی این مسائل سبب اجتناب از روش شبکه متحرک جهت حل جسم متحرک می شود. در این پژوهش روش بسیار کارآمدتری به کار رفته است. در این روش، شبکه محاسباتی نسبت به مخزن بدون حرکت است و مسئله در یک مرجع مختصات متصل به مخزن شبیه سازی می شود. در مواردی که مخزن با شتاب در حرکت است، مرجع مختصات متصل به مخزن دیگر لخت نیست و اثرات حرکت شتاب دار مخزن نیز باید در محاسبات لحاظ شود. بنابراین مرجع مختصات متصل به مرکز جرم مخزن به مرجع غیرلخت متصل به زمین منتقل می شود که در این حین نیروهای (شبه-نیرو) بر اجسام در میدان متحرک وارد می شود که ناشی از حرکت شتاب دار مخزن است.

اگر جابجایی مخزن با بردار  $\mathbf{h}$  و دوران آن با بردار  $\boldsymbol{\omega}$  بیان شوند، تغییر مکان هر جزء از مخزن نسبت به دستگاه مختصات لخت با رابطه (۱۴) تعیین می شود که با استفاده از این معادله می توان سرعت و شتاب آن جزء را نیز نسبت به مرجع لخت محاسبه کرد [۹]:

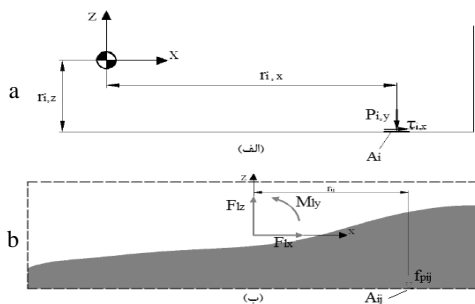
$$\mathbf{r} = \mathbf{r}^* + \mathbf{h} \quad (14)$$

$$\frac{d\mathbf{r}}{dt} = \frac{d\mathbf{r}^*}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}^* + \frac{d\mathbf{h}}{dt} \quad (15)$$

<sup>1</sup> Centrifugal

<sup>2</sup> Coriolis

<sup>3</sup> Angular



شکل ۳- نمایش شماتیک از فشار و تنش برشی (الف)، که انتگرال آنها بر روی جداره‌های خیس شده نیروها و گشتاور ناشی از تلاطم سیال را نتیجه می‌دهد (ب).

### ۳- اعتبار سنجی

همانطور که در مقدمه اشاره شد پس از مدلسازی فیزیکی مسئله توسط معادلات، اعتبارسنجی مدل محاسباتی تلاطم سیال با مقایسه نتایج تجربی و محاسبه شده صورت پذیرفت. استفاده از مخزن در مقیاس واقعی در جاده، جهت اعتبارسنجی مدل تلاطم کافی نیست، چرا که با وجود فراهم آوردن اطلاعات دقیق در خصوص عملکرد وسیله نقلیه دارای سیال متلاطم، این دسته از آزمایش‌ها بسیار هزینه‌بر هستند، ضمن اینکه این آزمایش‌ها درکی از رفتار تلاطم سیال فراهم نمی‌کنند. به سبب این مسائل آزمایش‌های تحت کنترل در آزمایشگاه جهت اعتبارسنجی مدل محاسباتی تلاطم با دینامیک سیالات محاسباتی انجام می‌شوند.

اغلب کارهای تجربی جهت اعتبارسنجی مدل تلاطم بر پایه مخازن در ابعاد کوچک هستند، به عنوان مثال، آبرامسون و همکارانش [۱۹] از یک مدل استوانه‌ای در ابعاد کوچک با مقطع عرضی در حدود 0.03 مترمربع استفاده کردند. همچنین بیشتر مطالعات پیشین در زمینه فرکانس تلاطم، صرف نظر از روش‌های استفاده شده، جهت تحلیل رفتار تلاطم دو بعدی انجام گرفتند. ولی در مواردی که با تحریک نزدیک به محدوده فرکانس‌های تشدید روبرو هستیم، حرکت گردشی<sup>۳</sup> نیز ممکن است القا شود و بر حرکت متلاطم عادی سیال افزوده شود. به علاوه، پدیده تپش<sup>۴</sup> می‌تواند سبب پیچیده‌تر شدن تلاطم سیال شود. در این حالت، تلاطم سیال

مؤلفه‌های فوق مستقیماً در توابع زبان برنامه‌نویسی سی<sup>۵</sup> جهت محاسبه شتاب‌های ذکر شده در معادله (۱۶) به کار می‌روند. واحد شتاب‌های خطی متر بر مجذور ثانیه ( $m/s^2$ )، سرعت زاویه‌ای رادیان بر ثانیه ( $rad/s$ ) و شتاب زاویه‌ای رادیان بر مجذور ثانیه ( $rad/s^2$ ) است.

در نهایت نیروی وارد بر هر جزء سیال بر واحد جرم سیال با استفاده از رابطه (۱۷) قابل محاسبه است:

$$f = g - \omega \times (\omega \times r^*) - 2\omega \times \frac{dr^*}{dt} - \frac{d\omega}{dt} \times r^* - \frac{d^2h}{dt^2} \quad (17)$$

قابل توجه است که در روابط فوق  $\frac{dr^*}{dt} = u$  و  $g$  بردار شتاب گرانش است.

مدل بیان شده، در نرم‌افزار تجاری فلوئنت<sup>۱</sup> پیاده‌سازی شد که نیروهای ناشی از شتاب گرانش و حرکت وسیله و در نتیجه مخزن با استفاده از قابلیت برنامه‌نویسی<sup>۲</sup> این نرم‌افزار به معادلات سیال اعمال شدند.

نیروهای گذرای ناشی از تلاطم سیال درون مخزن با انتگرال‌گیری از توزیع فشار و تنش‌های برشی روی جداره‌های خیس شده و گشتاور ناشی از این نیروها نسبت به مرکز جرم سیال درون مخزن با جمع مقادیر حاصلضرب خارجی بردار نیرو و بردار مکان نقاط جداره مخزن محاسبه شدند (معادله (۱۸)).

$$F_{li} = \sum (f_{c,i}^p + f_{c,i}^t) \quad (18)$$

که  $i = x, y, z$  و  $c$  بیانگر آملین سلول در دامنه است که فشار  $p$  و تنش لزوج  $\tau$  در آن محاسبه می‌شوند. گشتاور ناشی از تلاطم سیال نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$M_l = \sum_c (r_c^* \times f_c) \quad (19)$$

در رابطه (۱۹)،  $M_l = \{M_{lx}, M_{ly}, M_{lz}\}$  مجموع مؤلفه‌های گشتاورهای ناشی از تلاطم است،  $r_c^* = \{r_{cx}, r_{cy}, r_{cz}\}$  و  $f_c = \{f_{cx}, f_{cy}, f_{cz}\}$  نیز به ترتیب مؤلفه‌های موقعیت سلول  $c$ ام و مؤلفه‌های نیروهای فشاری و لزوج وارد بر سلول  $c$ ام هستند. در شکل ۳ نمایش شماتیک از تنش‌های فشاری و لزوج استفاده شده در محاسبه نیروها و گشتاورهای وارد بر سلول  $c$ ام آورده شده‌اند.

<sup>3</sup> Swirling Motion

<sup>4</sup> Beating Phenomenon

<sup>1</sup> FLUENT

<sup>2</sup> UDF

## ۳-۱- حرکت شتاب‌دار در راستای افق

برای اعتبارسنجی مدل‌سازی تلاطم سیال از نتایج مدل آزمایشگاهی به دست آمده توسط خزار و همکاران [۲۰] و دیگری کار انجام‌گرفته توسط گودریچ و همکاران [۹] استفاده شد. در آزمایش خزار مخزن پیش از برخورد به مانع در حدود 1.98 ثانیه حرکت می‌کرد. در این آزمایش نیمی از مخزن مکعبی با آب پر شده بود و مخزن پیش از برخورد به مانع و توقف کامل با شتاب کندشونده  $a(t) = 0.68t^{-0.11}$  در راستای طول مخزن در حرکت بود. در تمامی زمان‌های حرکت سیال، جریان ناپایا و تراکم‌ناپذیر در نظر گرفته شد. مخزن مکعبی به ابعاد  $560 \times 160 \times 185$  میلی‌متر بود. نظر به اینکه نسبت منطری طول مخزن به عرض آن کوچک است، حرکت سیال با استفاده از شبکه دکارتی دوبعدی با 13500 سلول محاسباتی مدل شد. پیش از برخورد مخزن به مانع، سیال درون مخزن به مثابه یک جسم صلب رفتار می‌کند، اما پس از آن تلاطم سیال شدت می‌یابد. با این وجود، رژیم جریان در تمامی طول شبیه‌سازی لایه‌ای در نظر گرفته شد. از آنجا که در این قبیل از جریان‌ها پدیده‌های حاکم غالباً غیرلزج هستند، این فرض دور از انتظار و نامعقولی نیست، اگرچه برخی اثرات محلی جریان مغشوش در حین تلاطم سیال در وجه مشترک دو سیال قابل مشاهده بود که بر برهم‌کنش بین سیال-دیواره و رفتار کلی سیال تأثیری ندارد. به علاوه این فرض زمان شبیه‌سازی را کاهش داد که تقابل خوبی میان دقت و زمان محاسبه را نشان می‌دهد. بنابراین جریان سیال تراکم‌ناپذیر، لایه‌ای و ناپایا در نظر گرفته شد. تأثیر حرکت مخزن و تحریک‌های خارجی با روش نیروهای وزنی اعمال شد. در این مورد خاص دو نیروی وزنی باید محسوب شود؛ نیروی گرانش در راستای عمودی و یک شتاب افقی به سبب حرکت مخزن. نیروی وزنی افقی در لحظه‌ی برخورد به مانع و پس از آن برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. به علاوه، سرعت مطلق سیال درون مخزن در لحظه برخورد به شکل زیر اصلاح می‌شود:

$$U = u + \dot{r} \quad (20)$$

که  $u$  میدان سرعت سیال نسبت به مرجع غیرلخت متصل به مخزن اندازه‌گیری شده پیش از ضربه،  $\dot{r}$  سرعت مخزن در لحظه برخورد و  $U$  نیز سرعت مطلق سیال نسبت به مرجع لخت است. این تغییر در سرعت سبب یک جهش در میدان

سه بعدی شده و تحلیل دو بعدی دیگر مناسب نیست، که این محدودیت در بسیاری از مطالعات تجربی گزارش شده وجود دارد.

اعتبارسنجی پروژه حاضر با استفاده از کار تجربی انجام شده توسط لیس خزار و همکاران [۲۰] در دانشکده مکانیک مؤسسه نفت در ابوظبی امارات متحده عربی انجام شد. ایشان جهت بررسی تلاطم سیال درون مخزنی شتاب‌دار به شکل مکعب که ناگهان بر اثر ضربه متوقف می‌شود این آزمایش را طراحی و اجرا کردند. همچنین از دوربین‌های بسیار سریع جهت تصویربرداری از سطح آزاد آب درون مخزن در هر لحظه استفاده شد که نتایج حاکی از وجود یک موج منتقل‌شونده پیش از ضربه است که بر خلاف مطالعات انجام یافته پیشین بود.

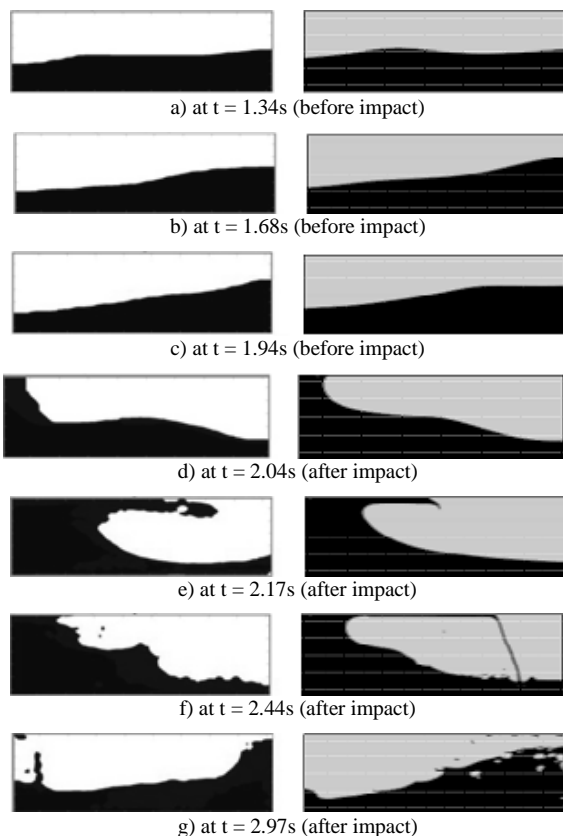
همچنین در مورد دوم از مدل آزمایشگاهی دو بعدی مخزن مکعبی بررسی شده توسط برنارد گوردیچ و همکاران [۲۱] استفاده شد که در [۲۲] توسط لینگ هو و همکاران نیز نتایج آن مورد استفاده قرار گرفت. مدل مطالعه شده تحت تحریک متناوب با فرکانس‌های برابر با فرکانس تشدید و نیز متفاوت از تشدید قرار گرفت و تغییرات سطح آزاد آب و مقادیر فشار وارد بر دیواره‌های مخزن در مدل آزمایشگاهی و عددی مورد ارزیابی قرار گرفتند.

مدل محاسباتی تحلیل تلاطم سیال با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی توسعه یافته در این پژوهش یک مدل غیر خطی است که با بهره‌گیری از نرم‌افزار تجاری فلوئنت توسعه یافته است. نرم‌افزار فلوئنت از روش حجم محدود جهت انتگرال‌گیری از معادلات ناویر-استوکس استفاده می‌کند و حرکت سطح آزاد مایع نیز با استفاده از روش حجم سیال که بر پایه‌ی عدم آمیزش سیال (مخلوط نشدن فازها) است محاسبه شد. در این کار از روش نیروی وزنی [۹] جهت تأثیر دادن تحریک خارجی در دامنه‌ی سیال استفاده شد که پیش‌تر تشریح شد. سایر پارامترهای مورد نیاز از قبیل چگالی شبکه محاسباتی، استفاده کردن و یا صرف نظر کردن از مدل اغتشاشی (برای مثال مدل کی-پسیلون<sup>۱</sup>) و حداقل گام زمانی نیز با مقایسه نتایج تجربی و عددی تنظیم شدند.

<sup>۱</sup>  $k - \epsilon$



می‌گردد. نتایج محاسباتی ناهمخوانی‌هایی نیز با تصاویر گرفته شده حین مدل‌سازی تجربی دارند که می‌تواند به سبب دو بعدی و لایه‌ای در نظر گرفتن جریان سیال حین شبیه‌سازی عددی و همچنین جهش مخزن پس از برخورد باشد. علاوه بر این، نتایج عددی در برخی زمان‌ها تشکل حباب‌های هوا که در بین توده سیال گرفتار شده‌اند را نشان می‌دهند، در حالی که نتایج تجربی اشاره‌ای به این مطلب ندارند که ممکن است به سبب سرعت پایین دوربین‌های مورد استفاده باشد. روی هم رفته استفاده از مدل عددی توانسته است فرکانس نوسان سطح آزاد و همچنین فرکانس تلاطم سیال درون مخزن پیش و پس از برخورد را به خوبی و با دقت نسبتاً خوبی در مقایسه با نتایج تجربی محاسبه کند که دستاورد قابل قبولی است. همچنین در شکل ۵ جابجایی سطح آب در جداره سمت چپ با زمان برای هر دو مدل‌سازی تجربی و عددی آورده شده که مطابقت خوبی میان نتایج تجربی و عددی مشهود است.



شکل ۴- مقایسه بین نتایج تجربی و عددی برای حجم آب  
50 درصد

سرعت می‌شود که سبب بوجود آمدن ویژگی‌های غیرخطی شدیدی در سیال پس از ضربه خواهد شد. سرعت مخزن از داده‌های اندازه‌گیری شده حرکت مخزن محاسبه شده و زمان انتگرال‌گیری معادلات تا شش ثانیه است و گام زمانی ثابت و برابر 0.005 ثانیه در نظر گرفته شدند [۲۰].

حلگر انتخاب شده از روش ضمنی<sup>۱</sup> و وابسته<sup>۲</sup> با انتگرال‌گیری زمانی ضمنی مرتبه اول استفاده می‌کند. الگوریتم پیزو<sup>۳</sup> جهت حل هم‌بسته سرعت و فشار و روش حجم سیال نیز جهت حل معادلات در یک شبکه ثابت در نظر گرفته شده است. روش گسسته‌سازی مرتبه یک رو به باد<sup>۴</sup> برای حل معادله اندازه حرکت و روش ژئو-ریکانستراکت<sup>۵</sup> برای حل معادله کسر حجمی انتخاب شدند. در لحظه اولیه،  $t = 0$ ، تمامی سیال آرام و ثابت است.

در شکل ۴ تصاویر سمت راست مربوط به شبیه‌سازی عددی حاضر و تصاویر چپ مربوط به آزمایش تجربی خزار است. در حین حرکت مخزن، توده سیال به سمت جداره راستی، مخالف جهت حرکت مخزن، حرکت می‌کند تا به ارتفاع بیشینه در لحظه  $t = 0.67s$  برسد. سپس به سمت مخالف حرکت می‌کند تا لحظه  $t = 1.14s$  که جهت حرکت عکس می‌شود. مشاهده شد که سطح آزاد دو بار پیش از برخورد مسیر حرکت خود را تغییر می‌دهد. متعاقباً، سیال در ابتدا در سمت جداره راستی گسترده شده تا درست پیش از برخورد به ارتفاع بیشینه برسد که مطابق مشاهدات خزار و همکارانش [۲۰] است. نتایج تجربی و محاسباتی مطابقت خوبی با یکدیگر دارند. هر دو افزایش سطح آب در سمت راست، چپ و سپس جداره راست را تأیید می‌کنند. در لحظه برخورد سیال حرکت ناگهانی و شدیدی به سمت دیواره مخالف (جداره سمت چپ که به مانع برخورد می‌کند) وجود دارد که در نتیجه سیال در گوشه سمت چپ بالا و در امتداد سقف مخزن در لحظه  $t = 2.17s$  تجمع می‌کند. در لحظه  $t = 2.44s$  سیال در نیمه سمت چپ مخزن انباشته شده و مرکز جرم سیال درون مخزن را تغییر می‌دهد و دوباره به سبب حرکت نوسانی سیال به سمت جداره راستی باز

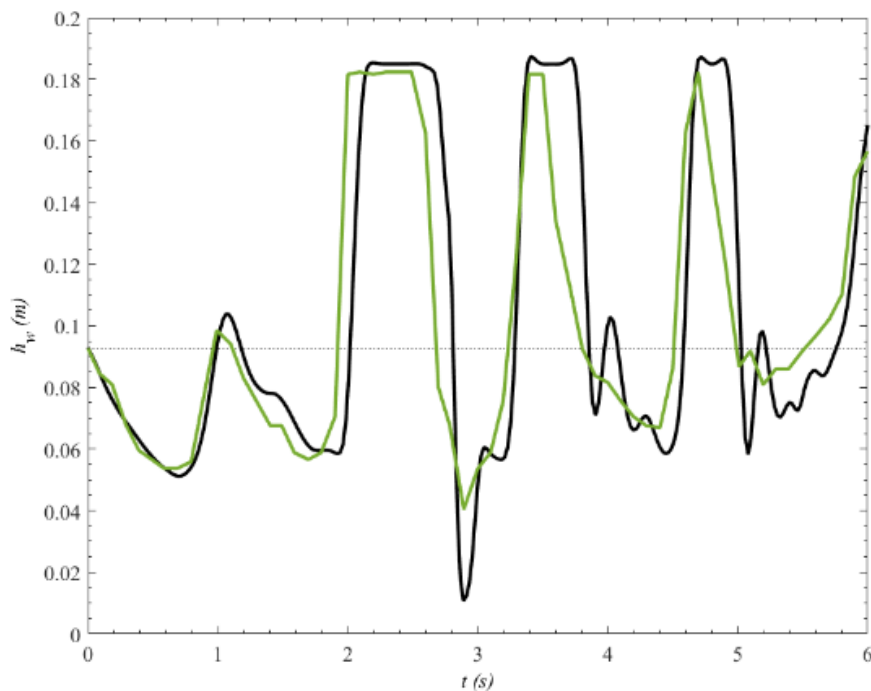
<sup>1</sup> Implicit

<sup>2</sup> Coupled

<sup>3</sup> PISO: Pressure-Implicit-Splitting Operator

<sup>4</sup> Upwind

<sup>5</sup> Geo-Reconstruct



شکل ۵- سطح آب اندازه‌گیری شده و محاسبه شده در دیواره سمت چپی در آزمایش با حجم آب 50 درصد؛  
— محاسبه شده؛ — نتایج تجربی [۱۹]؛ ... سطح آب اولیه

$$\dot{x} = \omega x_0 \cos(\omega t) \quad (22)$$

که  $\dot{x}$  سرعت انتقالی افقی،  $x_0$  دامنه جابجایی افقی و  $\omega = 2\pi f_n$  فرکانس زاویه‌ای هستند. فرکانس طبیعی مرتبه اول مربوط به تلاطم مایع درون مخزن طبق معادله (۲۱) برابر 0.692 هرتز ( $f_1 = 0.692 \text{ Hz}$ ) محاسبه می‌شود. فرکانس تحریک نیز 1.03 برابر فرکانس طبیعی محاسبه شده است ( $\omega = 1.03 \cdot 2\pi \cdot f_1 \text{ rad/s}$ ). لازم به ذکر است که دوره تناوب حرکت ( $T = 2 \cdot \pi / \omega$ ) برابر 1.404 است.

دامنه محاسباتی استفاده شده در این پژوهش در شکل ۶ نشان داده شده است [۲۱]. مخزن مستطیلی دو بعدی به طول 1.2 متر و ارتفاع 0.6 متر است که تا سطح 60 درصد از ارتفاع آن با آب پر شده است. همچنین باقی مخزن نیز شامل گاز ایده‌آل هوا است. در این آزمایش، فشار در چهار نقطه از دیواره‌ها مشاهده شد تا بارهای ناشی از تلاطم بر دیواره‌ها ارزیابی شوند. لازم به ذکر است که در این پژوهش تنها فشار نقطه  $P_2$  به جهت داشتن مقادیر تجربی در نظر گرفته شد.

### ۳-۲- تلاطم با تحریک متناوب

مطابق تئوری خطی تلاطم مایع، مدهای تلاطم مایع درون مخزن متناسب با مقادیر مختلف پخش‌دهی یا نرخ غوطه‌وری<sup>۱</sup> است که به صورت نسبت ارتفاع مخزن به عمق آب تعریف می‌شود. در یک مخزن دو بعدی مستطیلی، کوچکترین فرکانس طبیعی تلاطم مایع را می‌توان با رابطه (۲۱) محاسبه کرد.

$$f_n = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{n \cdot g \cdot \tanh(n\pi a/b)}{\pi b}} \quad (21)$$

که  $f$  فرکانس،  $a$  عمق مایع،  $b$  عرض مخزن،  $g$  شتاب گرانش زمین و  $n$  نیز مرتبه است. معمولاً فرکانس مرتبه اول ( $n = 1$ ) برای شبیه‌سازی کافی است.

تحریک خارجی مخزن تاب‌خوردن<sup>۲</sup> افقی با دامنه و فرکانس تحریک ثابت است که به شکل معادله (۲۲) نشان داده شده است.

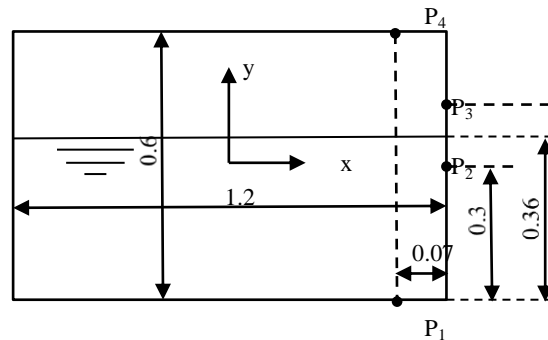
<sup>1</sup> Immersion Rate

<sup>2</sup> Sway Excitation

در جدول ۱ مقادیر حداکثر خطا در محاسبه بیشینه فشار آورده شده‌اند. لازم به ذکر است که مقادیر خطا در محاسبه فشار به طور متوسط بسیار کمتر از این مقادیر است. برای مثال خطای درشت‌ترین شبکه بین ۸ الی ۱۱ درصد، شبکه ریزتر بین ۳ الی ۵ درصد و ریزترین شبکه بین ۱ الی ۴ درصد ارزیابی شدند. همچنین تغییرات گام زمانی نیز مورد بررسی قرار گرفت که پس از ارزیابی‌های به عمل آمده گام زمانی طوری انتخاب شد که هم زمان محاسبات را بیش از اندازه افزایش ندهد و همچنین مقادیر خطا در محدوده قابل قبول باشند. در این پژوهش ریزترین شبکه که حداکثر خطای محاسبه فشار بیشینه با آن تقریباً ۹ درصد است به همراه گام زمانی برابر ۰.۰۰۱ استفاده شدند. این مقدار خطا به سبب گسسته‌سازی مکانی و زمانی قابل قبول است، هرچند همانطور که پیش‌تر بحث شد در تمامی زمان‌ها خطای محاسبه مقادیر فشار بیشینه بسیار کمتر است که در شکل ۷ مشهود است. شکل ۷ نمودار فشار اندازه‌گیری شده در نقطه  $p_2$  و محاسبه شده را بر حسب عدد نوسان نمایش می‌دهد. از طرفی در این پژوهش، هدف حداقل‌سازی مقادیر خطا در این مسئله نیست و تنها ارزیابی روش حجم سیال جهت شبیه‌سازی مسائل دو فازی و روش نیروهای وزنی جهت اعمال اثرات حرکت شتاب‌دار مخزن مد نظر بوده است که نتایج مطابقت خوبی با نتایج تجربی در محاسبه فشار و در نتیجه نیروهای وارد بر دیواره‌ها دارند.

#### ۴- همگام‌سازی تلاطم سیال و مدل وسیله نقلیه

مدل وسیله نقلیه (معادلات (۱) تا (۴)) در دستگاه مختصات لخت  $(x, y, z)$  به مرکز  $O_s$  واقع در مرکز جرم جسم صلب بیان می‌شود، همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است. مدل تلاطم سیال نیز (معادلات (۵-۱۳)) در دستگاه مختصات  $(x, y, z)^L$  به مرکز  $O_t$  واقع در مرکز هندسی مخزن بررسی می‌شوند. همبسته‌سازی میان دو مدل هم به واسطه انتقال مختصات، انتقال مقادیر بین مراجع مختصات حاصل می‌شود. مدل وابسته مخزن-وسیله در ابتدا برای سیال در شرایط ایستا و با سرعت اولیه داده شده حل می‌شود. پاسخ محاسبه شده وسیله نقلیه در دستگاه مرجع لخت در هر گام زمانی به عنوان شتاب‌های وارد بر سیال به مرجع غیرلخت متصل به مخزن منتقل می‌شوند. سپس مدل تلاطم سیال به طور متوالی



شکل ۶- نمایشی از مسئله تلاطم دو بعدی (ابعاد بر حسب متر هستند) (۲۱ و ۲۲).

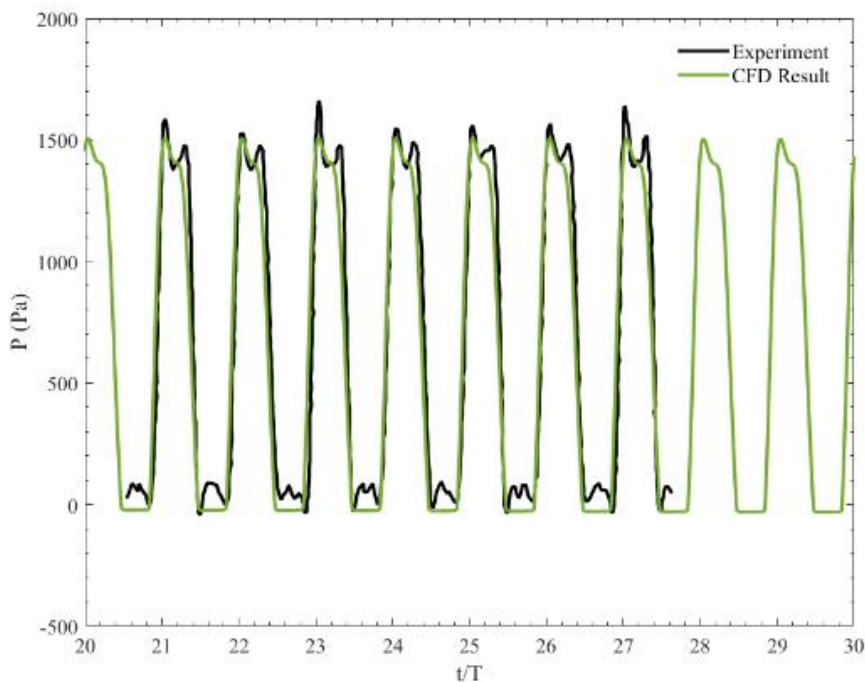
نرم‌افزار تجاری انسیس-فلوئنت جهت شبیه‌سازی مورد استفاده قرار گرفت. معادلات فشار-سرعت با بهره‌گیری از الگوریتم پرستو<sup>۳</sup> حل شدند. معادله انتقال حجم کسری سیال با روش صریح پیمایش زمانی حل شد و سطح مشترک نیز با روش ژئو-کنستراکت به دست آمد. معیار همگرایی تمام معادلات رسیدن مقادیر باقیمانده‌ها به پایین‌تر از  $1.E-5$  است. گام زمانی نیز پس از شبیه‌سازی با شبکه‌های مختلف و مقایسه نتایج با مقادیر تجربی در نظر گرفته شد که مطابق جدول ۱ است. شرایط مرزی نیز دیواره‌های غیر-لغزشی در نظر گرفته شد و مخزن نیز در شرایط اولیه ساکن بود. لازم به ذکر است که از روش گسسته‌سازی مرتبه اول صریح در هر دو میدان زمانی و مکانی استفاده شد. به منظور اعمال اثرات حرکت شتاب‌دار مخزن نیز از روش نیروهای وزنی استفاده شد که جهت پیاده‌سازی آن چندین تابع نوشته و به نرم‌افزار فلوئنت افزوده شد. عدد رینولدز جریان بررسی شده نیز بیشتر از  $3.5E5$  است که به معنی آشفته بودن جریان است. جهت حل جریان آشفته نیز از روش استاندارد کی-اِپسیلون بهره برده شد زیرا این روش برای مسائلی که اثرات نزدیک به دیواره چندان اهمیت ندارند دارای دقت کافی است.

چندین شبکه محاسباتی با ابعاد گوناگون مورد نظر قرار گرفت و نتایج آن‌ها با نتایج تجربی مقایسه شدند (جدول ۱) تا شرط استقلال از شبکه بودن نتایج ارضا شود. لازم به ذکر است که تمام شبکه‌ها یکنواخت و سازمان‌یافته هستند.

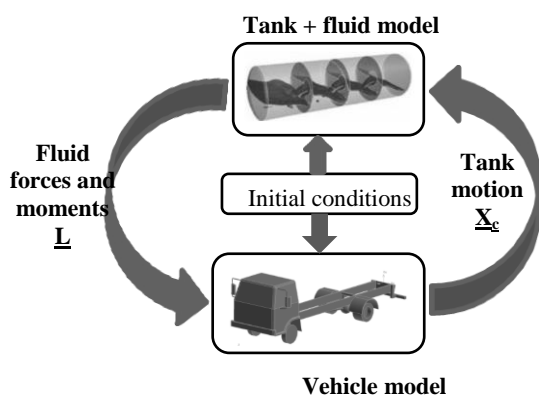
<sup>3</sup> PRESTO

جدول ۱- مشخصات شبکه محاسباتی و مقادیر بیشینه خطا در محاسبه مقدار بیشینه فشار در نقطه P2

خطا %	$\Delta x / \Delta t$	$\Delta t$	$\Delta x$	تعداد سلول	نقاط شبکه
16.19	10.170	0.002	0.02034	1711	30 × 60
16.31	5.085	0.004	0.02034	1711	30 × 60
11.19	5.040	0.002	0.01008	7021	60 × 120
15.41	2.510	0.002	0.00502	28441	120 × 240
9.15	5.020	0.001	0.00502	28441	120 × 240

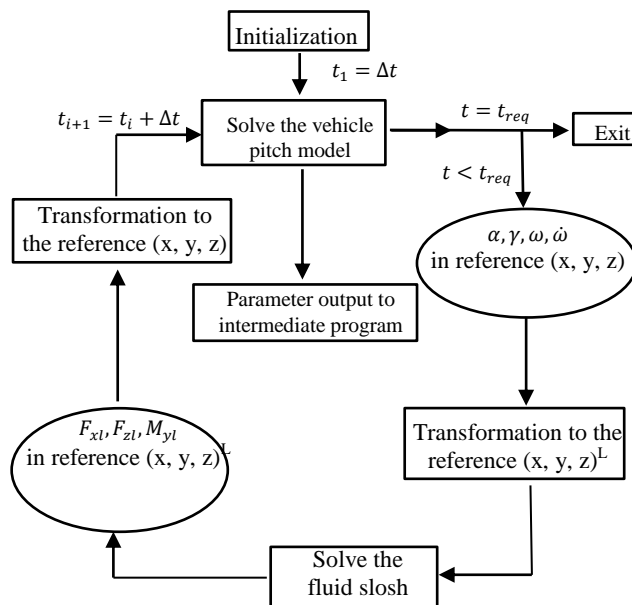


شکل ۷- روند تغییرات فشار در نقطه p<sub>2</sub> بین عدد نوسان 20 تا 30 — نتایج گودیچ و همکاران [۲۱] و — پژوهش حاضر



شکل ۸- نمایی که برهم کنش زیرسامانه‌ها را نشان می‌دهد

شبیه‌سازی می‌شود تا نیروهای تلاطم و گشتاور دورانی و اینرسی دورانی سیال تغییر شکل داده در دستگاه مرجع غیر لخت محاسبه شوند. در گام بعدی این پاسخ‌های آنی تلاطم سیال به مرجع لخت وسیله نقلیه منتقل و بر مدل وسیله حامل وارد می‌شود تا پاسخ سامانه دینامیکی در گام زمانی پسین محاسبه شود. این فرآیند تا لحظه مورد نظر یا تا زمانی که وسیله واژگون شود ادامه می‌یابد. در شکل ۸ نمایی شماتیک از متغیرهای منتقل شونده بین دو زیرسامانه جهت مدل‌سازی برهم‌کنش بین آنان نمایش داده شده است، در حالی که شکل ۹ بیان‌کننده رویه شبیه‌سازی چندفیزیکی انجام‌یافته در این پژوهش است.



شکل ۹- روند شبیه‌سازی همکار دینامیک وسیله نقلیه و دینامیک تلاطم سیال درون مخزن

سهمی به معادله  $z(t) = 0.03t^2 - 0.15t$  است. نیمی از حجم مخزن نیز با آب به چگالی 998 کیلوگرم بر متر مکعب پر شده بود و باقی مخزن نیز هوا با فشار اتمسفر و چگالی 1.225 کیلوگرم بر متر مکعب بود که در ابتدا در شرایط ایستایی کامل بودند.

باید توجه داشت که در شکل ۹،  $a = \{a_x, a_z\}$  شتاب‌های خطی،  $\gamma$  دوران مخزن،  $\omega = \omega_y$  سرعت زاویه‌ای مخزن و  $\dot{\omega} = \dot{\omega}_y$  نیز شتاب زاویه‌ای مخزن هستند.

### ۵- روش تحلیل و متغیرهای شبیه‌سازی

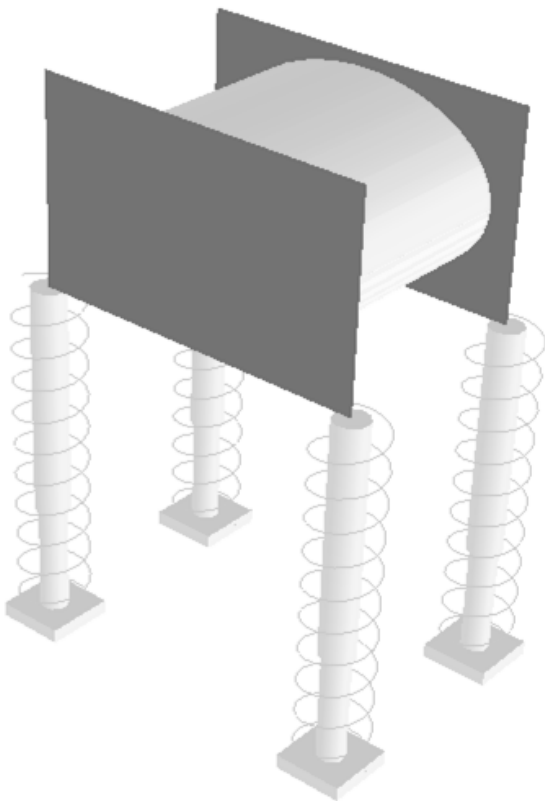
شبیه‌سازی چندفیزیکی حرکت وسیله نقلیه و تلاطم سیال درون مخزن آن برای مخزن افقی با مقطع بیضوی و به معادله  $22.9845x^2 + 57.2785z^2 = 1$  و طول 0.324 متر بررسی شد. وسیله نقلیه که مخزن بر آن سوار است جداره‌ای نازک با وزن پایین در حدود 0.341 کیلوگرم بود که از دو طرف به صفحاتی محصور شده و این صفحات به سامانه‌های تعلیق محورهای جلو و عقب متصل بودند، همانگونه که در شکل ۱۰ نشان داده شده است. به جهت ساده‌سازی از بخش‌های چرخ و لاستیک و کابین وسیله نقلیه و حتی شاسی آن صرفنظر شد. در جدول ۲ متغیرهای شبیه‌سازی بیان شده‌اند.

جدول ۲- متغیرهای شبیه‌سازی چندفیزیکی

مقادیر	کمیت‌ها
0.34	$m_s$ (kg)
14.02	$m_l$ (kg)
0.162	$L_f$ (m)
0.162	$L_r$ (m)
5000	$k_{sf}$ (N/m)
5000	$k_{sr}$ (N/m)
160	$c_{sf}$ (Ns/m)
160	$c_{sr}$ (Ns/m)

لازم به ذکر است که در شبیه‌سازی عبور وسیله نقلیه از موانع، وسیله نقلیه ساکن است و فقط سیستم تعلیق (چرخ‌های جلو) با تابعی از زمان حرکت می‌کند که تداعی کننده عبور وسیله نقلیه از روی دست‌انداز با سرعت بسیار پایین است که فرض نامعقولی هم نیست، چرا که غالب

در این پژوهش تنها یک حجم پرشوندگی با مایع در عبور از دو دست‌انداز سهموی متقارن با ارتفاع بیشینه متفاوت در نظر گرفته شد؛ دست‌انداز ابتدایی که ارتفاع بیشینه آن کمتر است سهمی به معادله  $z(t) = 0.005t^2 - 0.025t$  و دست‌انداز حالت دوم مربوط به



شکل ۱۰- مدل وسیله و مخزن در محیط نرم افزار ادمس

خود ثابت است. در حالت دوم بر خلاف حالت پیشین وسیله نقلیه حامل بار مایع با وزن معادل بار جامد است که در ابتدا ساکن است و مرکز جرمی معادل بار جامد دارد. اما با گذر زمان و عبور وسیله نقلیه از روی موانع، سیال درون مخزن جریان یافته و متلاطم می‌شود که سبب تغییر مرکز جرم و نیز وارد آمدن نیرو و گشتاور تلاطم سیال به جداره‌های مخزن می‌شود. با بیشتر شدن تلاطم سیال درون مخزن و متعاقبا افزایش نیرو و گشتاور وارده بر مخزن، بار دینامیکی به محور عقب وارد شده و طبق رابطه (۳) زاویه دوران مخزن نسبت به مرکز جرم افزایش می‌یابد. در حالی که در بار جامد تلاطم سیال و گشتاور ناشی از آن وجود ندارد.

شکل ۱۱(الف) تغییرات نیروی طولی و گشتاور دورانی ناشی از تلاطم سیال درون مخزن را نمایش می‌دهد. همچنین شتاب مرکز جرم مخزن در راستای طول آن به همراه زاویه دوران مخزن برای دو حالت بار صلب معادل

خودروها، به خصوص خودروهای سنگین و حامل سوخت، در عبور از چنین موانعی با حداقل سرعت ممکن حرکت می‌کنند. در این پژوهش از شیوه تحلیل مرجع [۹] بهره گرفته شده است. در این آزمایش و شبیه‌سازی صورت گرفته در مرجع [۹] سیستم تعلیق جلو توسط جک‌های هیدرولیکی قابل کنترل است که می‌توان تحریک‌های گوناگونی از قبیل عبور از موانع با انحنای مختلف، تغییر مسیر و غیره را از طریق این سیستم هیدرولیکی اعمال کرد. به طور کلی هیچ گونه محدودیتی در مقدار سرعت وسیله نقلیه در این روش نیست و وسیله با هر سرعتی و با هر مانور حرکتی قابل شبیه‌سازی است که در نتایج مانور حرکتی ترمز در مسیر مستقیم در قسمت بعدی مشهود است.

روند شبیه‌سازی چندفیزیکی به صورت موازی نظیر آنچه در شکل ۹ نمایش داده شد انجام شد. گام زمانی هر دو زیرسامانه برابر 0.01 ثانیه در نظر گرفته شد که منجر به همگرایی در هر دو زیرسامانه شد. مدل دینامیکی وسیله نقلیه به روش رانگ-کوتا<sup>۱</sup> مرتبه هشتم شبیه‌سازی شد، در حالی که معادلات تلاطم سیال درون مخزن با بهره‌گیری از روش گسسته‌سازی زمانی ضمنی مرتبه اول به همراه روش گسسته‌سازی مکانی مرتبه اول با خطای مجاز باقیمانده<sup>۲</sup> از مرتبه 0.001 حل شدند.

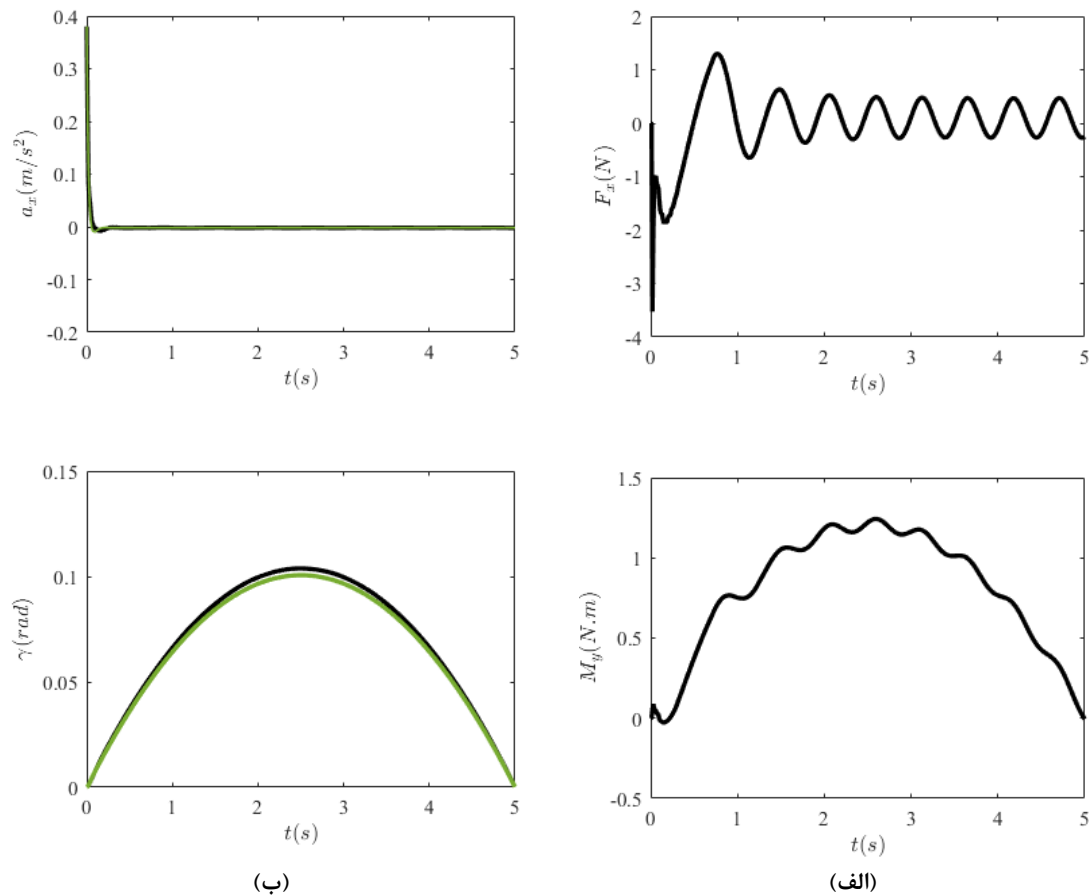
## ۶- نتایج

به طور کلی در بررسی پایداری دورانی وسیله نقلیه، زاویه دوران نسبت به مرکز جرم بسیار مهم است. در نتیجه هدف اصلی پژوهش حاضر معطوف به بررسی زاویه دوران ( $\alpha$ )، معرفی شده در شکل ۱ مقاله است. با بررسی این زاویه، تصویر روشنی از پایداری وسیله نقلیه و به طور ضمنی حرکت عمودی وسیله نقلیه حاصل می‌شود که در عبور از هر دو مانع، مقادیر این زاویه بر حسب رادیان در شکل‌های ۱۱(ب) و ۱۲(ب) با عنوان ۷ نشان داده شده است.

در این نمودارها وسیله نقلیه در دو حالت در نظر گرفته شده است. در حالت اول وسیله نقلیه حامل بار جامد است که خاصیت تلاطم و تغییر مرکز جرم ندارد و در مکان اولیه

<sup>1</sup> Runge-Kutta

<sup>2</sup> Residuals



شکل ۱۱- پاسخ‌های گذرای دینامیک وسیله نقلیه و تلاطم سیال درون مخزن حمل‌شونده با آن در عبور از دست‌انداز ابتدایی به ارتفاع بیشینه 0.03125 متر؛ — بار مایع؛ — بار صلب معادل

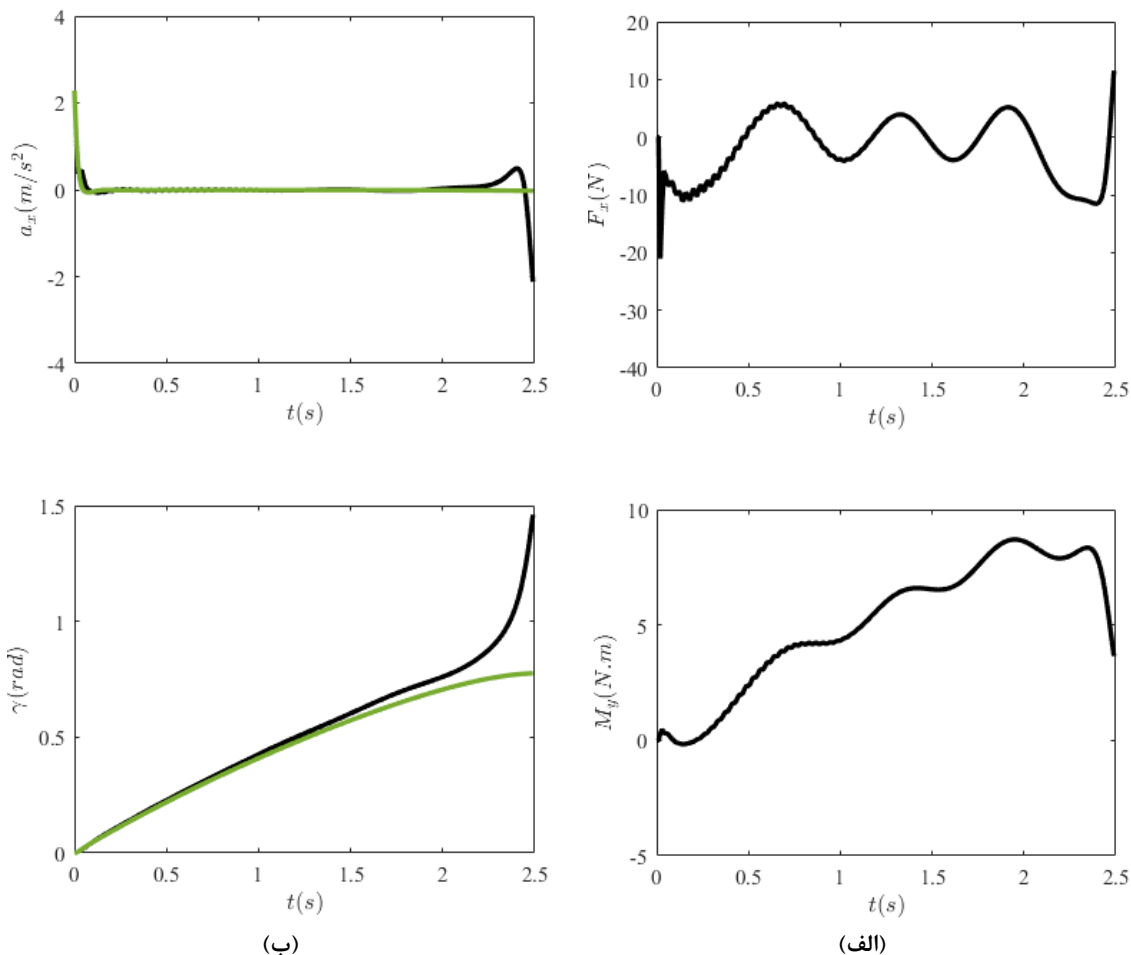
تقریبی برابر 1.88 هرتز محاسبه می‌شود. در راستای محور طولی نیز در شرایط حمل بار مایع تغییر در شتاب حرکت مشاهده می‌شود، به نحوی که شتاب مخزن به شکل تابعی نوسانی با دامنه‌های بسیار کوچک حول نمودار حالت بار صلب معادل نوسان دارد. به طور کلی از آنجا که ارتفاع دست‌انداز ابتدایی بسیار کم است، اثر تلاطم سیال در آن ناچیز است و تنها موج کوچکی ایجاد می‌کند که در نتیجه آن، جابجایی و تغییر زاویه دوران مخزن نسبت به حالت بار صلب بسیار کم است (که سبب نزدیکی نمودار خط پر (بار صلب) و نمودار خط چین (بار مایع) در نمودارهای شکل ۱۱ می‌شود).

شکل ۱۲(الف) نیز نیروی طولی و گشتاور حول محور دوران ناشی از تلاطم مایع درون مخزن که بر وسیله نقلیه

مایع در شکل ۱۱(ب) نشان داده شده‌اند. نتایج حاکی از زاویه دوران مثبت (با فرض حرکت بر خلاف عقربه‌های ساعت) برای هر دو حالت بار مایع و بار صلب معادل است که بیانگر انتقال بار دینامیکی به محور عقب است. علاوه بر این، زاویه دوران مخزن در شرایط حمل بار مایع بیشتر از مقدار آن برای بار معادل صلب است که ناشی از نیروی طولی منتج از تلاطم سیال و همچنین گشتاور دورانی ایجاد شده نظیر شکل ۱۱(الف) است. به علاوه در عبور از دست‌انداز اولی با وجود افزایش میزان دوران مخزن به مقداری در حدود 0.1833 درجه در حالتی که بار مایع وجود دارد نسبت به بار صلب معادل، وسیله نقلیه واژگون نشده و به مسیر حرکت ادامه می‌دهد. فرکانس طبیعی تلاطم سیال نیز در راستای طولی به طور

افزایش شدید میزان زاویه دوران در این حالت نسبت به مانع ابتدایی است که همانگونه که از شکل ۱۲ (ب) مشخص است، این زاویه در شرایط حمل بار مایع مدام افزایش یافته و در نهایت سبب واژگونی وسیله شده است، در حالی که در حمل بار صلب معادل این زاویه افزایش یافته و به محض عبور از نقطه ای از مانع با ارتفاع بیشینه شروع به کم شدن می‌کند. لازم به ذکر است که شبیه‌سازی و نتایج آن تنها تا لحظه‌ی واژگونی وسیله، زمانی که زاویه دوران به محدوده‌ی نزدیک 90 درجه نزدیک می‌شود مورد توجه قرار گرفته است. فرکانس طبیعی تلاطم مایع درون مخزن نیز در راستای طول مخزن در این حالت در حدود 1.66 هرتز برآورد می‌شود. لازم به ذکر است که وسیله نقلیه واژگون

وارد می‌شود را در شرایط عبور از دست‌انداز دومی با ارتفاع بیشینه 0.1875 متر نشان داده است. به وضوح مشخص است که در این حالت نسبت به عبور از دست‌انداز پیشین مقادیر نیرو و گشتاور به طور قابل توجهی افزایش یافته است. همینطور مقادیر شتاب طولی و زاویه دوران مخزن در شکل ۱۲ (ب) نشان داده شده است که حاکی از افزایش میزان دوران برای هر دو حالت بار مایع و بار صلب معادل در مقایسه با مقدار آن در شکل ۱۱ (ب) برای عبور از دست‌انداز با ارتفاع بیشینه کمتر، مانع ابتدایی است. مشابه عبور از دست‌انداز با ارتفاع بیشینه کمتر، در این حالت نیز زاویه دوران همواره مثبت است که بیانگر انتقال بار دینامیکی به محور عقب است. با این حال نکته قابل توجه



شکل ۱۲- پاسخ‌های گذرای دینامیک وسیله نقلیه و تلاطم سیال درون مخزن حمل‌شونده با آن در عبور از دست‌انداز ابتدایی به ارتفاع بیشینه 0.1875 متر؛ — بار مایع؛ - - - بار صلب معادل

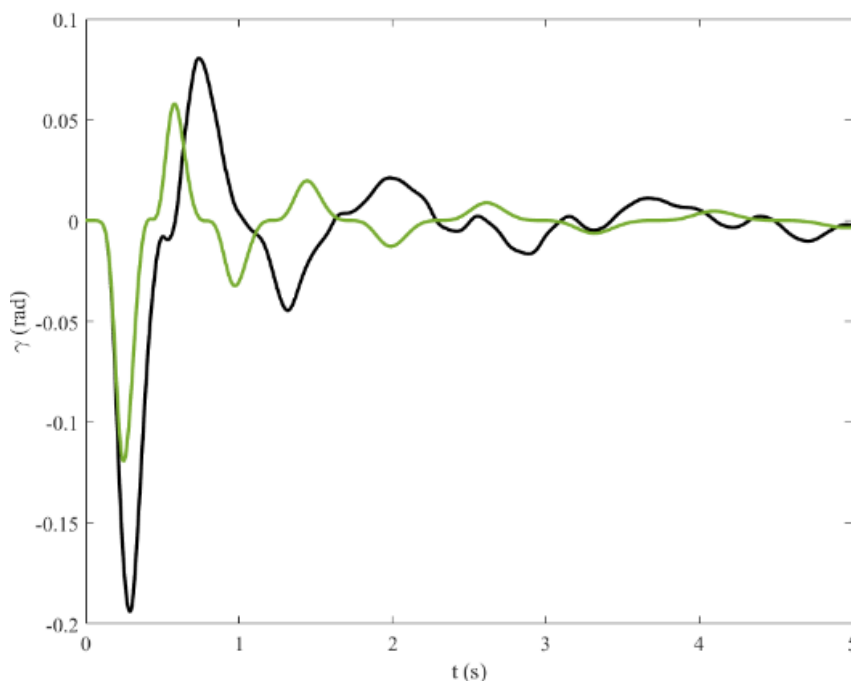


همانگونه که در شکل ۱۳ نشان داده شده است، زاویه دوران مخزن پس از ترمز مقدار منفی یافته که نشان‌دهنده دوران ساعتگرد مخزن نسبت به محور  $y$  است. مخزن در ابتدا در راستای محور  $x$  با سرعت ثابت در حال حرکت است که ناگهان سیستم ترمز فعال می‌شود. اینرسی وسیله نقلیه و مخزن پس از اعمال ترمز سبب انتقال بار دینامیکی به محور جلو و به دنبال آن، دوران ساعتگرد مخزن نسبت به محور پیچش است. در این لحظه سیستم تعلیق محور جلو به مخزن نیرو وارد کرده و سبب انتقال بار دینامیکی به محور عقب و متعاقباً پیچش بر خلاف گردش عقربه‌های سرعت می‌شود و این روند به طور تناوبی تا لحظه میرایی کامل ادامه می‌یابد. فرآیند بیان‌شده برای هر دو بار مایع و بار صلب معادل رخ می‌دهد با این تفاوت که در حالت بار مایع میزان گشتاور اعمال شده و نیز بار دینامیکی منتقل شده به محورهای جلو و عقب بیشتر است که سبب افزایش میزان زاویه پیچش نسبت به بار صلب معادل می‌شود. در شکل ۱۴ نیز نیروی طولی و گشتاور پیچشی، حول محور  $y$  ناشی از تلاطم سیال درون مخزن نشان داده شده است.

شده و پس از لحظه واژگونی دیگر شبیه‌سازی انجام نشده است، چرا که مفهوم فیزیکی نخواهد داشت و این به معنی واگرا شدن حل نیست. هر چند معادلات سیال و وضعیت قرارگیری مایع درون مخزن به خوبی واژگونی وسیله را تأیید می‌کنند که در اینجا نشان داده نشده‌اند.

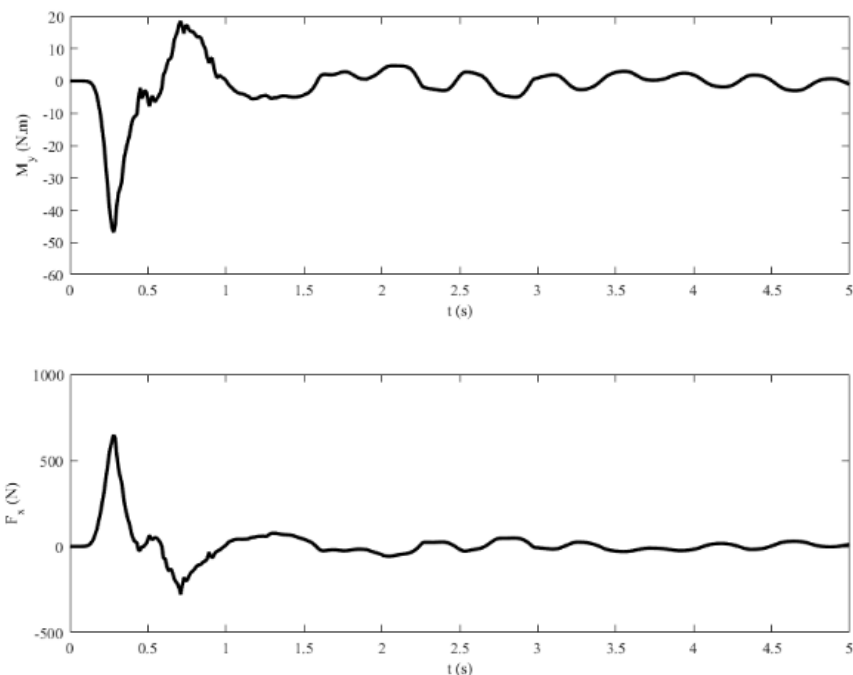
علاوه بر شبیه‌سازی عبور وسیله نقلیه از روی دست‌اندازهایی با ارتفاع بیشینه مختلف و بررسی اثرات متقابل تلاطم مایع درون مخزن و عملکرد دینامیکی وسیله نقلیه، وسیله نقلیه در مانور ترمز در مسیر مستقیم نیز بررسی شده است. در این شبیه‌سازی وسیله نقلیه با سرعت ثابت 5 متر بر ثانیه در مسیری مستقیم در حرکت است. پس از مدت زمان کوتاهی سیستم ترمز وسیله فعال شده به نحوی که سرعت وسیله پس از 0.3 ثانیه به صفر برسد و وسیله نقلیه توقف کند. در این شبیه‌سازی نیز دو حالت حمل بار مایع و بار صلب معادل در نظر گرفته شده است.

نتایج شبیه‌سازی حرکت ترمز معطوف به نیروهای طولی و گشتاور پیچشی (حول محور  $y$ ) ناشی از تلاطم مایع درون مخزن و نیز زاویه دوران مخزن حول محور  $y$  در دو حالت بار مایع و بار صلب معادل است.



شکل ۱۳- پاسخ گذرای دینامیک وسیله نقلیه و تلاطم سیال درون آن در حرکت ترمزی ناگهانی:

— بار مایع؛ — بار صلب معادل



شکل ۱۴- نیروی طولی و گشتاور پیچشی وارد بر جداره‌های مخزن ناشی از تلاطم سیال درون مخزن

از تلاطم مایع در عبور از مانع با ارتفاع بیشینه بزرگتر بیشتر است که منجر به زوایه دوران بزرگتر مخزن و حتی واژگونی وسیله شد. علاوه بر این فرکانس‌های تلاطم مایع درون مخزن در راستای طول آن برای دو مانع به معادلات  $z(t) = 0.03t^2 - 0.15t$  و  $z(t) = 0.005t^2 - 0.025t$  به ترتیب 1.66 و 1.88 هرتز محاسبه شدند.

همچنین در این پژوهش مانور حرکتی ترمز ناگهانی وسیله نقلیه در مسیر مستقیم شبیه‌سازی شد. در این شبیه‌سازی نیز وسیله نقلیه حامل دو بار مایع و بار صلب معادل در نظر گرفته شد که در پایان شبیه‌سازی، مطابق انتظار میزان دوران وسیله نقلیه حول محور پیچش در حالت حمل بار مایع بیشتر از مقادیر حاصل شده در حمل بار صلب معادل است. همچنین به سبب اعمال نیروی طولی ناشی از تلاطم سیال درون مخزن، اختلاف فاز میان تناوب دوران مخزن حول محور پیچش در دو حالت بار مایع و بار صلب معادل مشهود است. زمان میرایی کامل حرکت تناوبی مخزن حول محور پیچش نیز در حالت بار مایع نسبت به بار صلب معادل افزایش می‌یابد که ناشی از گشتاور وارد شده بر جداره‌های مخزن ناشی از تلاطم مایع درون آن است.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل وابسته دینامیک وسیله نقلیه و تلاطم سیال درون مخزن آن که بخشی از آن با آب پر شده بود، در عبور از دست‌اندازهای متقارن سهموی مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفت تا درکی جامع از عملکرد دینامیکی وسیله تحت تأثیر تلاطم سیال حمل‌شونده با آن حاصل شود. در نتیجه شبیه‌سازی چندفیزیکی با استفاده از برنامه نگارش شده برای اتصال دو نرم‌افزار تجاری تخصصی انجام شد و پایداری دورانی وسیله متأثر از نیروها، گشتاور و ممان‌اینرسی سیال درون مخزن حین حرکت وسیله و تلاطم مایع مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که به جهت شبیه‌سازی تلاطم سیال درون مخزن از مدل دینامیک سیالات محاسباتی به همراه روش حجمی از سیال برای رهگیری سطح آزاد مایع بهره برده شد. نتایج شبیه‌سازی حاکی از تأثیر شدید تلاطم مایع درون مخزن بر عملکرد دینامیکی وسیله است. به علاوه مشخص شد که پاسخ دورانی وسیله در عبور از موانع متناسب با گشتاور دورانی ناشی از تلاطم مایع درون مخزن است. همچنین مقایسه دو مانع با ارتفاع بیشینه متفاوت و سرعت عبوری متناظر مشخص کرد که میزان گشتاور ناشی

۹- مراجع	۸- فهرست علائم
[1] Alessandro VD (2011) Modeling of tank vehicle dynamics by fluid sloshing coupled simulation. Ph. D. Thesis, Politecnico Di Milano, Italy, 45-50.	$a_x$ شتاب خطی در راستای طول ( $ms^{-2}$ )
[2] de Pont JJ, Bass PH, Mueller TH (1999) Heavy vehicle stability versus crash rates. Technical report, TERNZ, 23-30.	$C_{sf}$ ضریب میرایی سامانه تعلیق محور جلو ( $kgs^{-1}$ )
[3] Stiaharu G, Richard M, Rakheja S (2003) Evaluation de la problematique reliee a l instabilite en roulement des vehicules routiers de type citerne, transport des produits liquids. Technical report, Le Ministere des Transport du Quebec, Aout, 12-15.	$C_{sr}$ ضریب میرایی سامانه تعلیق محور عقب ( $kgs^{-1}$ )
[4] Siddiqui K, Rakheja S, Yan G, Modaressi K (2005) Transient fluid slosh and its effect on the rollover-threshold analysis of partially filled conical and circular tank trucks. Int J Heavy Vehicle Sys 12(4): 8-15.	$f$ نیروی وزنی ناشی از شتاب وسیله بر سیال ( $kgms^{-2}$ )
[5] Rakheja S, Sankar S, Ranganathan R (1989) Kineto-static roll plane analysis of articulated tank vehicles with arbitrary tank geometry. Int J Vehicle Des 10(14): 89-111.	$F_{xl}$ نیروی طولی تلاطم سیال نسبت به مرجع متصل به مخزن ( $kgms^{-2}$ )
[6] Bauer HF (1972) On the destabilizing effect of liquids in various vehicles (part 1). IAVSD 2(3): 227-260.	$F_{zl}$ نیروی عمودی تلاطم سیال نسبت به مرجع متصل به مخزن ( $kgms^{-2}$ )
[7] Rakheja S, Modaressi-Tehrani K, Sedaghati R (2006) Analysis of the overturning moment caused by transient liquid slosh inside a partly filled moving tank. Proceeding of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: J Automobile Eng 220(3): 289-301.	$\bar{F}_{xl}$ نیروی طولی تلاطم سیال نسبت به مرجع متصل به وسیله نقلیه ( $kgms^{-2}$ )
[8] kianejad SS, Bagherzade M, Ansarifard N (2013) The effect of baffles on sloshing in high speed craft fuel tank. 15th Marin Industries Conference, Kish, Iran. [In Persian]	$\bar{F}_{zl}$ نیروی طولی تلاطم سیال نسبت به مرجع لخت ( $kgms^{-2}$ )
[9] Thomassy FA, Wendel GR, Green ST, Jank AC (2003) Coupled simulation of vehicle dynamics and tank slosh: phase 2 interim report. No. 368. Technical report, U.S. Army TARDEC Fuels and Lubricants Research Facility, Southwest Research Institute (SwRI), San Antonio, TX, pp. 26-30.	$g$ شتاب گرانش ( $ms^{-2}$ )
[10] Jafari M, Toloei A, Ghasemlu S, Parhizkar H (2015) Simulation of strap-on boosters separation in the dense atmosphere. Aerosp Sci Technol J 3(1): 49-60. [In Persian]	$h_w$ سطح آب (m)
[11] Yan GR (2008) Liquid slosh and its influence on braking and roll responses of partly filled tank vehicles. PhD Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, 36-50.	$k_{sf}$ ضریب سفتی سامانه تعلیق محور جلو ( $kgs^{-2}$ )
[12] Sayar BA, Baumgarten JR (1981) Pendulum analogy for nonlinear fluid oscillations in spherical containers. J Appl Mech 48(4): 769-772.	$k_{sr}$ ضریب سفتی سامانه تعلیق محور عقب ( $kgs^{-2}$ )
[13] Hirt CW, Nichols BD, Pomeroy NC (1975) SOLA - a numerical solution algorithm for transient fluid flows. Report LA-5852, Los Alamos	$L_f$ فاصله محور جلو از مرکز جرم وسیله ( $m$ )
	$L_s$ فاصله محور عقب از مرکز جرم وسیله ( $m$ )
	$m_s$ جرم وسیله نقلیه و سازه مخزن (kg)
	$m_l$ جرم مایع درون مخزن (kg)
	$M_{yl}$ گشتاور دورانی تلاطم سیال نسبت به مرجع متصل به مخزن ( $kgms^{-2}$ )
	$\bar{M}_{yl}$ گشتاور دورانی تلاطم سیال نسبت به مرجع متصل لخت ( $kgms^{-2}$ )
	$p$ فشار ( $kgm^{-1}s^{-2}$ )
	$t$ زمان (s)
	$u$ سرعت ( $ms^{-1}$ )
	<b>علائم یونانی</b>
	$\rho$ چگالی ( $kgm^{-3}$ )
	$\mu$ لزجت دینامیکی ( $kgm^{-1}s^{-1}$ )
	$\gamma$ زاویه دوران مخزن (rad)
	$\omega$ سرعت زاویه‌ای مخزن ( $rads^{-1}$ )
	$\lambda$ کسر حجمی سیال
	<b>زیرنویس‌ها</b>
	l
	s

- flow in a vapor-venting microchannel. FHMT 1(1): 26-34.
- [19] Abramson NH (1966) Dynamic behaviour of liquids in moving containers. Washington, Scientific and Technical Information Division, National Aeronautics and Space Administration 28-35.
- [20] Khezzar L, Seibi A, Ghoharzadeh A (2011) Water sloshing in Rectangular Tanks-An experimental investigation and numerical simulation. Int J Eng 3(2): 174-184.
- [21] Godderidge B, Turnock S, Tan M, Earl C (2009) An investigation of multiphase CFD modelling of a lateral sloshing tank. Comput Fluids 38(2): 183-193.
- [22] Hou L, Li F, Wu C (2012) A numerical study of liquid sloshing in a two-dimensional tank under external excitations. J Marine Sci App 11(3): 305-310.
- Scientific Laboratory, Los Alamos, New Mexico, USA.
- [14] Kim Y (2001) Numerical simulation of sloshing flows with impact load. Appl Ocean Results 23(1): 53-62.
- [15] Godderidge B, Tan M, Turnock S, Earl C (2006) A verification and validation study of the application of computational fluid dynamics to the modeling of lateral sloshing. Fluid Structure Interaction Research Group, University of Southampton, Ship Sci Report No 140, August.
- [16] Kassions AC, Prusa J (1990) A numerical model for 3D viscous sloshing in moving containers. ASME-Publication FED 103: 15-86.
- [17] Sjostrand M (2008) CFD simulation of two-phase flows passing through a distributor. M. Sc. Thesis, Chalmers University of Technology, Goteborg, Sweden, 60-70.
- [18] Fang C, David M, Rogacs A, Goodson K (2010) Volume of fluid simulation of boiling two-phase