

بهینه‌سازی مدل پاندول ترامل جهت شبیه‌سازی تلاطم سیال در مخزن خودروهای حامل سوخت

در این مقاله مدل مکانیکی پاندول ترامل جهت شبیه‌سازی تلاطم سیال در مخزن خودروهای حامل سوخت معرفی می‌شود. سپس گشتاور واژگونش ناشی از این مدل مکانیکی با نتایج بدست آمده از تحلیل عددی در پرشدگی‌های ۶۰٪، ۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ مقایسه شده و روابط پاندول ترامل تصحیح و ضرایب آن بهینه می‌شود. سپس الگوریتمی جهت بهینه‌سازی سطح مقطع تانکر بیضوی بر مبنای کمینه کردن همزمان دو تابع گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم سیال پیشنهاد می‌شود به‌گونه‌ای که آستانه واژگونش تانکر بهبود پیدا کند. عملگرهای مؤثر در دقت و سرعت همگرایی الگوریتم ژنتیک مانند نرخ جهش تعداد افراد جمعیت بررسی شده و نرخ جهش ۴ تا ۶ درصد و حداقل جمعیت ۶۰ نفر به عنوان مناسب‌ترین مقادیر این عملگرها انتخاب می‌شوند.

محمدحسن شجاعی فرد^۱

استاد

روح‌اله طالبی توتی^۲

استادیار

صادق یارمحمدی سطری^۳

دانشجوی دکترا

واژه‌های راهنما: پاندول ترامل، گشتاور واژگونش، بهینه‌سازی، سطح مقطع بیضوی

۱- مقدمه

خودروهای سنگین در بسیاری از سوانح و تصادفات جاده‌ای چه در ایران و چه در دیگر کشورها تلفات بسیار شدیدی را از لحاظ جانی و مالی منجر شده‌اند. در این بین، تانکرهای حمل سوخت در بین خودروهای سنگین همواره مورد توجه بوده‌اند [۱]. یک تانکر حمل سیال در معرض نیروها و گشتاورهای اضافی است که ناشی از نیروی اینرسی سیال در مانورهای دور زدن، شتاب‌گیری یا ترمزگیری و یا ترکیبی از این موارد می‌باشد. میزان این نیروها و گشتاورهای اینرسی در فرکانسی نزدیک به فرکانس طبیعی تلاطم سیال، می‌تواند بسیار تشدید گردیده و بر دینامیک عرضی و کنترل‌پذیری تانکر تأثیر گذار باشد. این تأثیر می‌تواند به صورت سوانحی مانند چپ‌شدگی که خود وسیله در آن درگیر است و یا انحراف از مسیر که می‌تواند باعث بروز تصادف با دیگر خودروها گردد، بروز کند [۲]. متداول‌ترین روش‌های مورد استفاده در شبیه‌سازی حرکت سیال استفاده از معادلات ناویر-استوکس و معادلات پیوستگی با تعریف مناسب شرایط مرزی است. با این حال روش فوق غیرخطی و مقداری پیچیده است، به خصوص هنگامی که با حرکت خودرو مدنظر قرار داده می‌شود. مدل‌های مکانیکی معادل به‌عنوان یک رویکرد جایگزین برای مطالعه تلاطم محض سیال توسعه داده

^۱ استاد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ نویسنده مسئول، استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران rtalebi@iust.ac.ir

^۳ دانشجوی دکترا مهندسی خودرو، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران yarmohammadi@auto.iust.ac.ir

شده‌اند [۳]. سیستم‌های جرم - فنر - دمپر و سیستم‌های پاندولی به این شکل تعیین می‌شوند که مرکز ثقل، نیرو و گشتاور، فرکانس‌های نوسانی و مشخصات جرمی و اینرسی سیستم مکانیکی با مشخصات سیستم سیالاتی معادل باشد. رانگانتان و همکارانش [۴] یک مدل تشابهی پاندولی^۱ ارائه کردند با این فرض که تنها بخشی از کل جرم سیال اثر تلاطم را به وجود می‌آورد. مابقی توده سیال چسبیده به تانکر در نظر گرفته می‌شود. پارامترهای مدل به وسیله یکسان قرار دادن فرکانس اصلی و نیروهای حاصل از سیستم مکانیکی با موارد استخراج شده از معادلات دینامیکی سیال بدست می‌آید [۵]. سپس، مدل مکانیکی دو بعدی که رفتار سیال در راستای عرضی را توصیف می‌نماید، به منظور مطالعه زاویه دوران و شتاب‌های عرضی تانکرها، به یک مدل تریپل سه بعدی ۵ محوره اضافه می‌شود. مدل پاندولی یک مدل ساده اما در عین حال دقیق برای نمایش تلاطم سیال در داخل خودروهای تانکر دار نیمه پر می‌باشد. معادلات حاکم بر کل سیستم به وسیله روش لاگرانژ بدست آمده و به وسیله روش رانج - کوتا حل می‌شوند [۶]. با در نظر گرفتن ناهمزمانی حرکت سیال در راستای عرضی در مقاطع مختلف تانکر، مانتریوتا [۷] یک مدل پاندولی ابتدایی برای توصیف دینامیک خودروهای تانکر دار در راستای پیچش توسعه داده است. حرکت سیال به وسیله پاندول‌های بی‌نهایت کوچک با پارامترهای یکسان در راستای عرضی شبیه‌سازی می‌شود. در این مدل، فرض شده که می‌توان از حرکت طولی صرف نظر کرد. حرکات سیال در صفحات پیچ^۲ و رول^۳ ناچیز و دامنه حرکت کوچک در نظر گرفته شده است [۸]. بدیهی است که دقت نتایج بدست آمده بستگی به اعتبار مدل پاندولی یا مدل جرم- فنر- دمپری است که به جای سیال مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های مکانیکی معادل دارای این مزیت هستند که برای مطالعه دینامیک سیستم‌های کوپل سیال- سازه، بدون نیاز به حل معادلات مکانیک سیالات، قابل استفاده هستند.

در این مقاله در ابتدا مدلی مکانیکی بر مبنای پاندول ترامل جهت شبیه‌سازی رفتار سیال در داخل تانکر معرفی می‌شود و روابط مربوط به محاسبه‌ی گشتاور واژگونش به عنوان پارامتر تعیین کننده‌ی پایداری تانکر در مدل پاندول ترامل توسعه داده می‌شود. با مقایسه مدل مکانیکی پاندول ترامل با روش تحلیل عددی، ضرایب مربوط به معادلات پاندول ترامل تصحیح می‌شود تا بیشترین انطباق را با حالت تحلیل عددی داشته باشد و بر پایه‌ی این ضرایب تصحیح شده رابطه‌ی جدیدی برای پاندول ترامل تعریف می‌شود. سپس به بهینه‌سازی سطح مقطع تانکر بیضوی بر مبنای مدل مکانیکی پاندول ترامل پرداخته می‌شود و سطوح مقاطع بهینه در پرشدگی‌های متفاوت ارائه می‌شود، به گونه‌ای گشتاور واژگونش کمتر و پایداری بیشتری نسبت به تانکرهای بیضوی که عموماً در حمل و نقل سیال بکار می‌رود داشته باشد.

۲- مکان هندسی سیال در تانکر

مکان هندسی مرکز جرم حجمی از مایع که تحت حرکت نوسانی در یک تانکر بیضوی قرار دارد از یک مسیر بیضوی پیروی می‌کند، یکی از روش‌هایی که از آن برای شبیه‌سازی حرکت حجم سیال استفاده می‌شود پاندول ترامل می‌باشد که در آن اثرات دینامیک جانبی مایع بررسی می‌شود. معادله‌ی حرکت پاندول برای

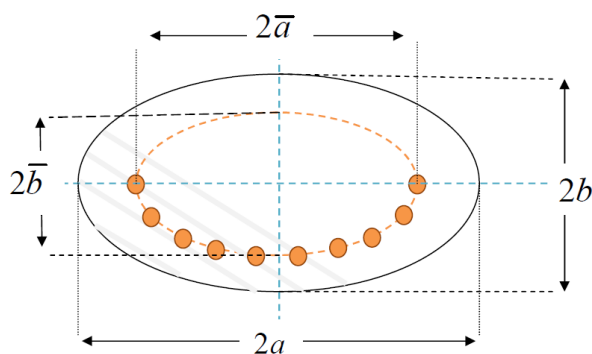
¹ Pendulum Analogy Model

² pitch

³ roll

مطالعه‌ی عملکرد دینامیکی، دیاگرام‌های فرکانس طبیعی، جابجایی زاویه‌ای، سرعت و شتاب در نقاط مختلف استفاده می‌شود. مهم‌ترین مود^۱ مورد مطالعه در تلاطم یک سیال جزئی پرشده، اولین مود آن می‌باشد. این مود برای توصیف حرکات نوسانی سطح سیال تقریباً صاف استفاده می‌شود. مرکز جرم حجم سیال متناسب با کانتوری که موازی دیواره‌ی تانکر است، تغییر می‌کند (شکل ۱).

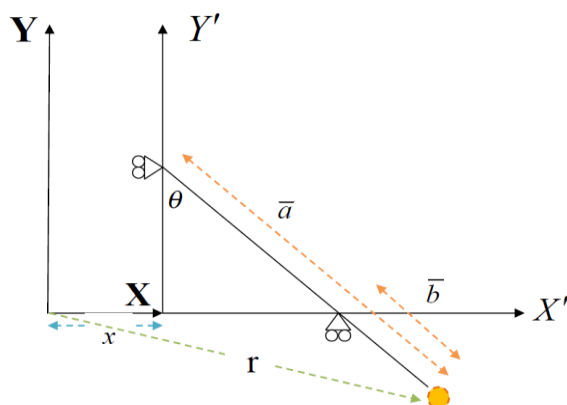
$$\frac{\bar{a}_{cg}}{\bar{b}_{cg}} = \frac{\bar{a}}{\bar{b}} = \frac{a}{b} \quad (1)$$



شکل ۱- چگونگی جابجایی مرکز جرم یک سطح مقطع بیضوی

۳-۱- معادله‌ی حرکت پاندول ترامل^۲

مکانیزم ترامل (که یک مسیر بیضوی را رسم می‌کند) برای شبیه‌سازی یک پاندول بیضوی شکل (۲) استفاده می‌شود. شکل (۲) پارامترهای مهم بکار رفته در معادلات حرکت پاندول را نمایش می‌دهد. از آنجا که بازوی پاندول، عمود بر سطح می‌باشد، زاویه θ برای بررسی معادلات حرکت پاندول استفاده می‌شود. معادله‌ی حرکت پاندول بیضوی ناشی از شتاب افقی خارجی \ddot{x} یک معادله‌ی غیر خطی درجه‌ی ۲ است. معادله حرکت پاندول ترامل با استفاده از روش انرژی بدست می‌آید. جابجایی پاندول نسبت به محور اصلی (x', y') و محور نهایی (x, y) در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲- نمایش حرکت پاندول ترامل

¹ mode

² trammel

معادله‌ی بردار r به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\begin{aligned}\bar{r} &= (\bar{a} \sin \theta + x)\bar{i} - \bar{b} \cos \theta \bar{j} \\ \dot{\bar{r}} &= (\bar{a}\dot{\theta} \cos \theta + \dot{x})\bar{i} + \dot{\theta}\bar{b} \sin \theta \bar{j} \\ \ddot{\bar{r}} &= [\bar{a}(-\dot{\theta}^2 \sin \theta + \ddot{\theta} \cos \theta) + \ddot{x}]\bar{i} + \bar{b}(\dot{\theta}^2 \cos \theta + \ddot{\theta} \sin \theta)\bar{j}\end{aligned}\quad (2)$$

سپس انرژی جنبشی به شکل زیر محاسبه می‌شود:

$$T = \frac{1}{2}m\dot{\bar{r}}^2 = \frac{1}{2}m(\bar{a}^2\dot{\theta}^2 \cos^2 \theta + 2\bar{a}\dot{\theta} \cos \theta \dot{x} + \dot{x}^2 + \bar{b}^2\dot{\theta}^2 \sin^2 \theta)\quad (3)$$

و در ادامه انرژی پتانسیل عبارت خواهد بود از:

$$Q = mgb(1 - \cos \theta)\quad (4)$$

در نهایت معادله‌ی لاگرانژ به صورت زیر ارائه می‌گردد:

$$L = T - Q = \frac{1}{2}m(\bar{a}^2\dot{\theta}^2 \cos^2 \theta + 2\bar{a}\dot{\theta} \cos \theta \dot{x} + \dot{x}^2 + \bar{b}^2\dot{\theta}^2 \sin^2 \theta) - mgb(1 - \cos \theta)\quad (5)$$

تنها درجه آزادی پاندول θ بوده و معادله حرکت پاندول با استفاده از رابطه (۵) بدست خواهد آمد.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0\quad (6)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = \frac{1}{2}m(-2\bar{a}^2\dot{\theta}^2 \cos \theta \sin \theta + 2\bar{a}\dot{\theta} \sin \theta \dot{x} + 2\bar{b}^2\dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta) - mgb \sin \theta\quad (7)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} = m(\bar{a}^2\dot{\theta} \cos^2 \theta + \bar{a} \cos \theta \dot{x} + \bar{b}^2\dot{\theta} \sin^2 \theta)\quad (8)$$

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) &= m(\bar{a}^2\ddot{\theta} \cos^2 \theta - 2\bar{a}^2\dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta + \bar{b}^2\ddot{\theta} \sin^2 \theta + 2\bar{b}^2\dot{\theta} \sin \theta \cos \theta \\ &\quad + \bar{a} \cos \theta \ddot{x} + \bar{a}\dot{x}\dot{\theta} \sin \theta)\end{aligned}\quad (9)$$

با جایگذاری (۷-۹) در معادله‌ی (۶) خواهیم داشت:

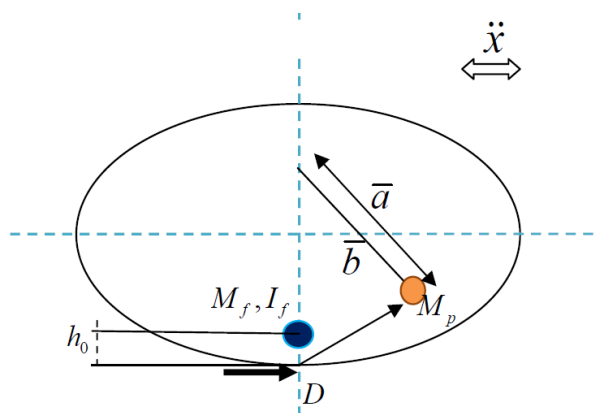
$$(\bar{a}^2 \cos^2 \theta + \bar{b}^2 \sin^2 \theta)\ddot{\theta} + 0.5(\bar{b}^2 - \bar{a}^2)\dot{\theta}^2 \sin 2\theta + g\bar{b} \sin \theta + \bar{a} \cos \theta \ddot{x} = 0\quad (10)$$

۳-۲- معادلات دینامیکی معادل‌سازی سیال با پاندول

معادل‌سازی پاندول بر مبنای تأثیرات دینامیکی تلاطم سیال در تانکرهایی که کاملاً پر نشده باشد بر پایه‌ی معادلات خطی‌سازی شده‌ی حرکت برای سیستم‌های مکانیکی استوار است.

شکل (۳) پارامترهای پاندول جهت شبیه‌سازی تأثیرات دینامیکی تلاطم عرضی مایع در تانکرهای بیضوی را نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی ۵ پارامتر بکار گرفته شده عبارتند از: بازوهای \bar{a} ، \bar{b} ، جرم پاندول M_p ،

جرم ثابت M_f ، ارتفاع جرم ثابت. تأثیر ممان اینرسی قطبی سیال هنگامی که تانکر شروع به چرخش حول نقطه‌ی ثابت خود می‌کند تأثیر خود را ظاهر می‌کند [۱ و ۹].

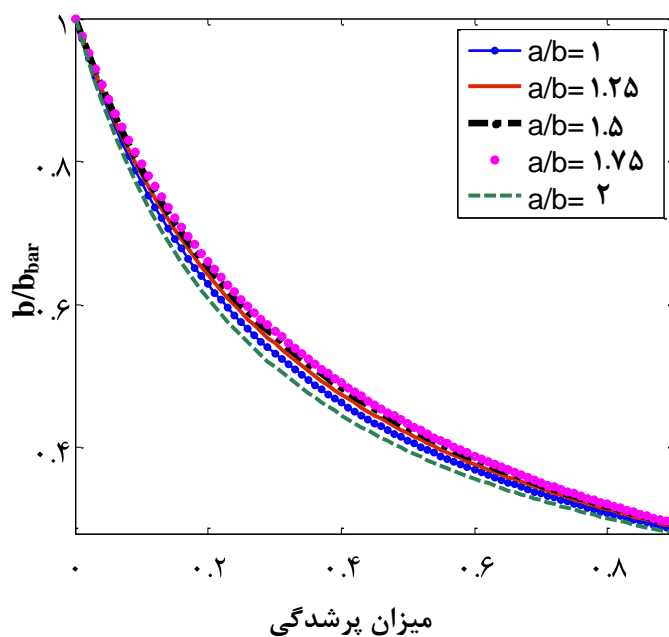


شکل ۳ - پارامترهای سیال جهت شبیه‌سازی شتاب عرضی سیال

با استفاده از معادله ۱۰ نمودار $\frac{b}{b}$ رسم می‌شود که به صورت معادله ۱۱ خواهد بود

$$\frac{b}{b} = 1 + (1.780996 + \frac{1.542048}{(\frac{a}{b})})(\frac{h}{2b}) + (0.7726259 - \frac{1.304727}{(\frac{a}{b})})(\frac{h}{2b})^2 = \Lambda \quad (11)$$

از حل معادله (۱) و (۱۱) \bar{a} و \bar{b} بدست خواهد آمد (شکل (۴)).



شکل ۴ - مقادیر $\frac{b}{b}$ در پرشدگی‌های متفاوت

۳-۳- اجزای افقی نیروی پاندول سیال

دومین قدم در معادل‌سازی دینامیک تلاطم پاندول سیال، منطبق کردن معادله‌ی نیروی عرضی برای بدست آوردن جرم پاندول M_p می‌باشد. نیروی کلی جانبی تلاطم سیال در یک تانکر بیضوی جزئی پرشده در معادله بون^۱ [۱۰] به صورت زیر است:

$$F_x = \frac{WTF_2}{\bar{V}} \quad (12)$$

$WT = m_l g$ ، g شتاب گرانش و F_2 ارتفاع تلاطم سیال می‌باشد. با استفاده از معادلات دینامیکی خودرو تانکر خواهیم داشت:

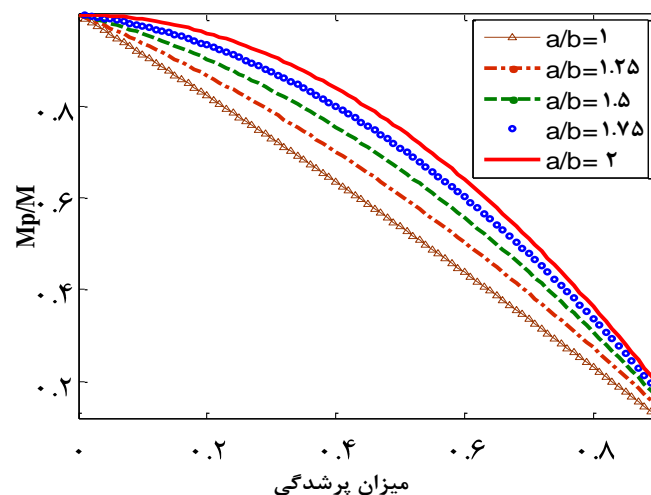
$$\ddot{F}_2 + \frac{2gl\bar{V}}{3C_2^2(Vol)} F_2 = -\frac{\ddot{X}}{C_2} \quad (13)$$

l طول تانکر، $C_2 = \frac{2l\bar{V}}{3(Vol)}$ در تانکر استوانه‌ای بودانسکی خواهیم داشت: $F_2 = \xi_1$ که نمایشگر پرامترهای تلاطم سیال می‌باشد و $\bar{V} = aR$.

با فرض تانکر استوانه‌ای و با استفاده از عبارات بودانسکی [۵]، معادله (۱۳) تبدیل به معادله (۱۴) خواهد شد. مقدار جرم M_p پاندول توسط انطباق نیروی افقی ناشی از مدل‌های المان محدود تلاطم سیال و ماکزیمم نیروی افقی ناشی از حرکت پاندول بدست می‌آید.

$$F_x = -\left(m_l \ddot{X} + \frac{2}{3} \rho_1 (aR)^2 \ddot{\xi}_1\right) \quad (14)$$

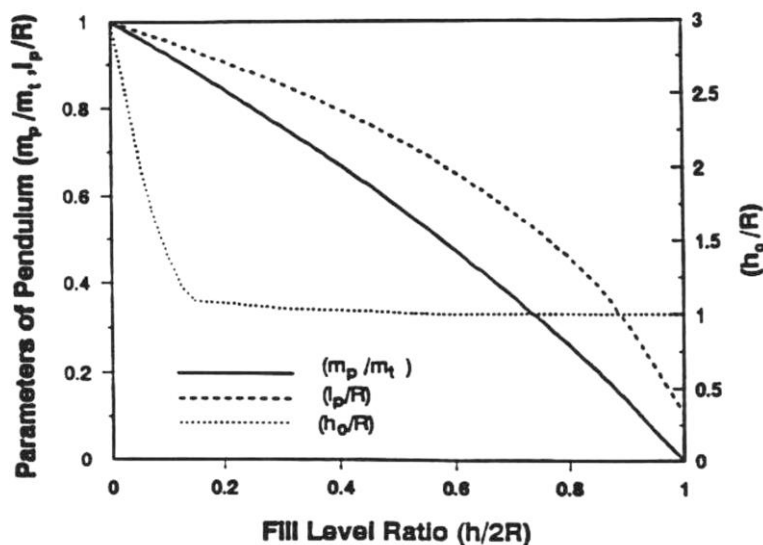
$$\frac{M_p}{M_t} = 1 + \left[-0.863 + 1.237 \ln\left(\frac{a}{b}\right)\right] \left(\frac{h}{2b}\right) - \left[0.1226 + 1.2489 \ln\left(\frac{a}{b}\right)\right] \left(\frac{h}{2b}\right)^2 = \Phi \quad (15)$$



شکل ۵- مقادیر $\frac{M_p}{M_t}$ در پرشدگی‌های متفاوت

¹ Bohn

نمودار شکل (۵) $\frac{M_p}{M}$ را در پرشدگی‌های متفاوت نشان می‌دهد. مقدار $\frac{a}{b}$ بین ۱ و ۲ متغیر است و منحنی برای مقدار $\frac{a}{b}=1$ ، بهترین نتیجه را برای $\frac{M_p}{M_t}$ دارا می‌باشد که منطبق بر منحنی رانگانتان شکل (۶) می‌باشد [۴].



شکل ۶- پارامترهای تحلیلی پاندول رانگانتان [۴]

برای یافتن ارتفاع h_0 جرم ثابت، گشتاور استاتیکی تحت زاویه‌ی کوچک دوران محاسبه می‌شود [۳]. به بیان دیگر مرکز جرم سیال ثابت شده به تانکر و مرکز جرم متحرک پاندول در حالت استاتیکی هم‌مرکز با مرکز جرم سیال باشد. گشتاور حول نقطه D (شکل (۳)) عبارت خواهد بود از:

$$M_f h_0 + M_p (b - \bar{b}) = M_t Y_{CG} \quad (16)$$

با جایگزینی $M_p = M_t \Phi$ ، $M_f = M_t - M_p$ ، $\bar{b} = b / \Lambda$ در معادله‌ی (۱۶)، معادله به شکل زیر تبدیل خواهد شد:

$$\frac{h_0}{b} = \frac{Y_{CG} - \Phi(1 - \Lambda)}{b(1 - \Phi)} \quad (17)$$

۳-۴- گشتاور واژگوش روش شبیه‌سازی پاندول ترامل

در این بخش مدلی جهت شبیه‌سازی پدیده‌ی تلاطم تانکر بکار می‌رود. گشتاور دورانی با اعمال شتاب عرضی حول نقطه‌ی D تانکر بدست می‌آید. ممان حول نقطه‌ی D ناشی از اعمال شتاب جانبی دارای دو جزء می‌باشد.

$$1. \text{ ممان ناشی از جرم ثابت در مدل مکانیکی تلاطم سیال، } -M_f \ddot{x} h_0$$

$$2. \text{ ممان متغیر ناشی از پاندول، } M_V = -M_p (\ddot{r} + g) \times \bar{P}$$

که در آن $\ddot{\theta}$ بردار شتاب جرم پاندول، \bar{P} بردار مکان جرم پاندول است، گشتاور واژگونش ناشی از جرم ثابت و پاندول عبارت خواهد بود از:

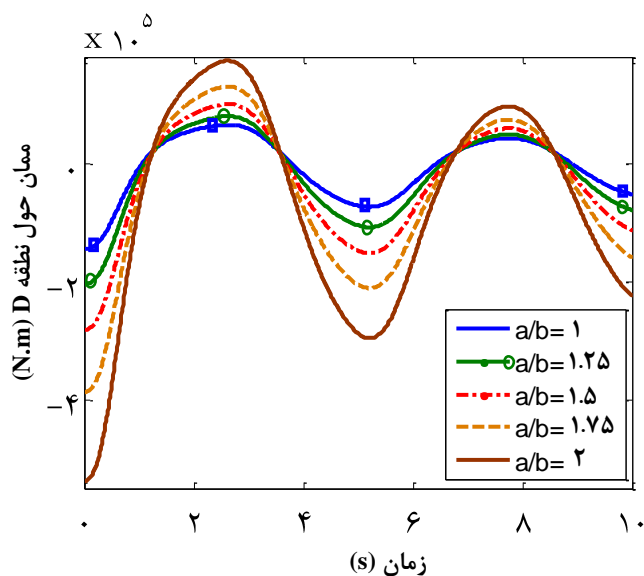
$$\bar{P} = \bar{r} - x\bar{i} + b\bar{j} = (a \sin \theta)\bar{i} + (b - \bar{b} \cos \theta)\bar{j} \quad (18)$$

$$M_V = -M_p \begin{bmatrix} i & j & k \\ \bar{a}(-\dot{\theta}^2 \sin \theta + \ddot{\theta} \cos \theta) + \ddot{x} & \bar{b}(\dot{\theta}^2 \cos \theta + \ddot{\theta} \sin \theta) + g & 0 \\ a \sin \theta & b - \bar{b} \cos \theta & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$M_V = M_p \left\{ \left[\bar{a}(\dot{\theta}^2 \sin \theta - \ddot{\theta} \cos \theta) - \ddot{x} \right] (b - \bar{b} \cos \theta) + \bar{a} \sin \theta \left[\bar{b}(\dot{\theta}^2 \cos \theta + \ddot{\theta} \sin \theta) + g \right] \right\} \quad (20)$$

$$M_{\max} = \text{Max}(M_V - M_f \ddot{x} h_0) \quad (21)$$

شکل (۷) ممان دورانی حول نقطه D را بر مبنای مشخصات تانکر جدول (۱) نمایش می‌دهد.



شکل ۷- نمودار گشتاور کل حول پایین تانکر در حالت ۷۰ درصد پرشدگی

۴- الگوریتم ژنتیک

بهینه‌سازی انجام شده در این مقاله بر مبنای الگوریتم ژنتیک [۱۲-۱۳] می‌باشد. در بهینه‌سازی انجام شده، ابتدا رابطه مربوط به گشتاور واژگونش پاندول ترامل بهینه می‌شود و بر مبنای تحلیل عددی بهینه‌سازی [۱۴] رابطه (۱۱ و ۱۵) بهینه شده و رابطه جدیدی برای گشتاور واژگونش پاندول ترامل معرفی می‌شود که با این تحلیل عددی مطابقت کامل داشته باشد. در ادامه تانکر معرفی شده در جدول (۱) بر مبنای کمینه کردن گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم به صورت همزمان بهینه می‌شود به گونه‌ای که پایداری بیشتری در پرشدگی‌های مختلف داشته باشد. قید مساحت و قیود اعمالی به متغیرهای موجود در معادله (۲۱) کمینه سازی را جهت‌دهی می‌کند و کمینه‌سازی ما به انتخاب این متغیرها و رسم شکل بیضوی منتهی می‌شود.

بهینه‌سازی بر مبنای استفاده از روش جمع وزنی خواص شکل می‌گیرد. وزن‌ها براساس اهمیت خواص نسبت به یکدیگر انتخاب می‌شوند. در این مقاله ضرایب وزنی برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۱ - مشخصات تانکر [۱۱]

مقدار متغیر	متغیر
۱۲۸۳۷ (kg)	وزن فنربندی نشده خودرو
۲۹۵۰۲۱ (kg)	وزن فنربندی شده خودرو
۹,۹۰۶ (m)	طول تانکر خودرو
۱,۵ (m)	طول هر بخش تانکر با توجه به مانع طولی
۱,۲۱۹ (m)	ارتفاع تانکر
۲,۴ (m)	عرض تانکر
۱۰۰۰ (kg/m ³)	چگالی سیال

۴-۱- بهینه‌سازی ضرایب معادله گشتاور واژگونش مدل پاندول ترامل

در بررسی معادله (۲۱) گشتاور واژگونش پاندول ترامل مورد محاسبه قرار می‌گیرد، در ادامه تحلیل عددی گشتاور واژگونش بدست آمده بر مبنای تحقیقات پوپو [۱۴] مبنای بهینه‌سازی قرار می‌گیرد. در این تحلیل عددی مرکز جرم سیال بر اثر شتاب جانبی حرکت کرده و گشتاور واژگونش ناشی از آن با محاسبه ممان نسبت مرکز بیضی بدست می‌آید. معادلات مربوط به گشتاور واژگونش و مقادیر مربوط به این دو روش با یکدیگر مقایسه می‌گیرد و سپس به اصلاح معادله (۲۱) پرداخته می‌شود تا این اختلاف کمینه گردد. بدین منظور مقدار گشتاور واژگونش در پرشدگی‌های ۶۰٪، ۷۰٪، ۸۰٪ و ۹۰٪ در تحلیل عددی مبنای بهینه‌سازی قرار می‌گیرد و ضرایب موجود در معادله (۲۱) به عنوان متغیر در نظر گرفته می‌شود و در معادلات (۲۲) و (۲۳) بیان شده است. تابع هدفی به صورت معادله (۲۴) و به منظور کمینه کردن اختلاف مقادیر این دو روش تعریف می‌شود و پس از بهینه‌سازی بر مبنای روش مقدار واقعی الگوریتم ژنتیک و با نرخ جهش ۴ درصد و تعداد جمعیت ۶۰ ضرایب این معادله اصلاح شده در جدول (۲) ارائه می‌شود.

$$\frac{b}{b} = m + \left(n + \frac{c}{\left(\frac{a}{b}\right)}\right) \left(\frac{h}{2b}\right) + \left(d - \frac{e}{\left(\frac{a}{b}\right)}\right) \left(\frac{h}{2b}\right)^2 = \Lambda \quad (22)$$

$$\frac{M_p}{M_t} = f + \left[g + p \ln\left(\frac{a}{b}\right) \right] \left(\frac{h}{2b}\right) - \left[k + l \ln\left(\frac{a}{b}\right) \right] \left(\frac{h}{2b}\right)^2 = \Phi \quad (23)$$

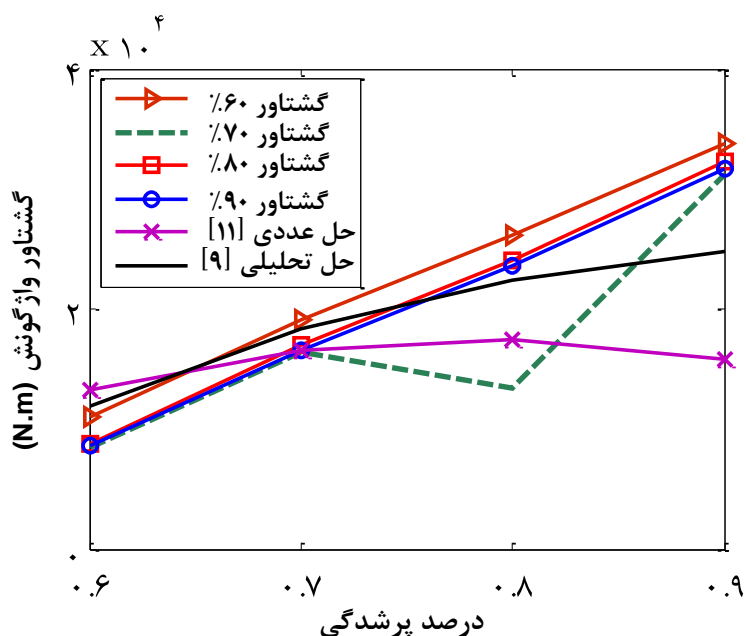
a عرض تانکر، b ارتفاع تانکر، h ارتفاع سیال در داخل تانکر، e, f, g, p, k, l, m و ضرایب مجهول معادله (۲۳ و ۲۴) می‌باشد.

$$U(X) = \text{Minimize} [M_{0(\text{equation21})} - M_{\text{Numerical analyses}}] \quad (24)$$

جدول ۲- اصلاح ضرایب معادله (۴)

ضرایب معادله	مقدار ضرایب معادله پاندول	ضرایب اصلاح شده حالت ۶۰ درصد	ضرایب اصلاح شده حالت ۷۰ درصد	ضرایب اصلاح شده حالت ۸۰ درصد	ضرایب اصلاح شده حالت ۹۰ درصد
گشتاور واژگونش					
m	۱	۱/۲	۰/۹۸۹	۰/۹۹۶	۰/۹۷۵
n	۱/۷۸۰۹۹۶	۱/۹۵۵	۱/۹۵	۱/۹۵۸	۱/۹۷۳
c	۱/۵۴۲۰۴۸	۱/۷۹۳	۱/۷۲۸	۱/۷۷۴	۱/۷۸۳
d	۰/۷۷۲۶۲۵۹	۰/۹۹۷	۰/۹۹۱	۰/۹۵۳	۰/۹۶
e	۱/۳۰۴۷۲۷	۱/۱۰۷	۱/۱۵	۱/۱۲۴	۱/۱۳۴
f	۱	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۸	۰/۹۹۱
g	-۰/۸۶۳	-۰/۶	-۰/۶۱۸	-۰/۶۰۸	-۰/۶۱۶
p	۱/۲۳۷	۱/۳۸۶	۱/۳۸۶	۱/۳۸۸	۱/۳۹۲
k	۰/۱۲۲۶	۰/۰۲۳	۰/۰۱۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳
l	۱/۲۴۸۹	۱/۰۱۵	۱	۱/۰۰۱	۱/۰۰۳

گشتاور واژگونش ناشی از این بهینه‌سازی‌ها با گشتاور واژگونش ناشی از معادلات (۱۱ و ۱۵) و گشتاور واژگونش تحلیل عددی مقایسه شده که در شکل (۸) نمایش داده شده است. پس از بررسی مقادیر این تابع، مقدار گشتاور ناشی از بهینه‌سازی در حالت ۸۰٪ بیشترین انطباق را با حالت تحلیل عددی دارا می‌باشد و معادلات (۱۱ و ۱۵) بر اساس این ضرایب بازنویسی می‌شود.



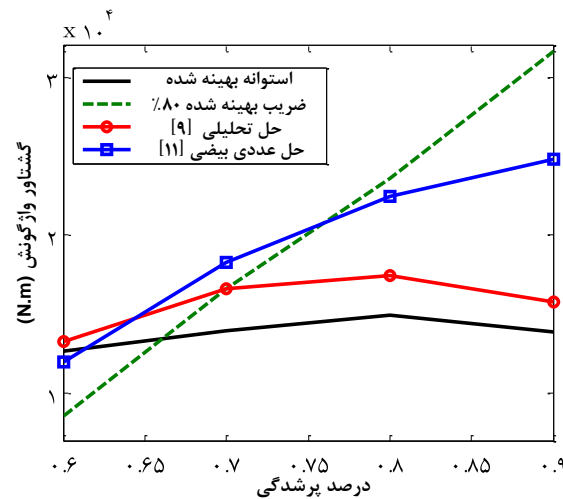
شکل ۸- گشتاور واژگونش ناشی از ضرایب اصلاحی

۳-۴- بهینه‌سازی سطح مقطع تانکر بیضوی

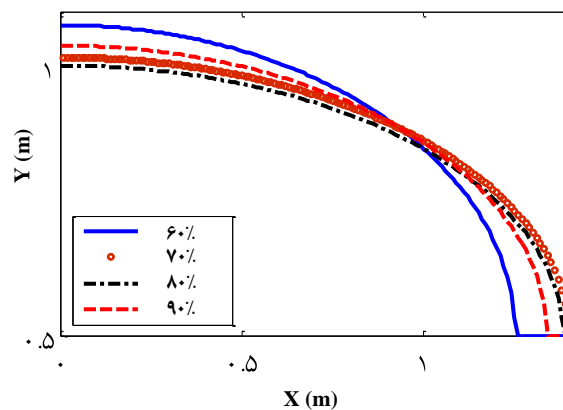
در بررسی پایداری تانکر بیضوی، دو پارامتر ارتفاع مرکز جرم و گشتاور واژگونش با یکدیگر رقابت می‌کنند. تانکر با سطح مقطع دایروی در پرشدگی‌های پایین پایداری بیشتری از خود نشان دهد زیرا گشتاور واژگونش کمتری نسبت به تانکر بیضوی دارد و در پرشدگی‌های زیاد اثر ارتفاع مرکز جرم غلبه دارد و تانکر بیضوی که مرکز جرم پایین‌تری دارد، پایداری بیشتری از خود نشان می‌دهد. پایداری دورانی تانکر وابسته به اندازه جابجایی عرضی و عمودی بار تحت شرایط پرشدگی می‌باشد و کاهش این جابجایی سبب افزایش پایداری دورانی استاتیکی تانکر می‌شود. این امر با کمینه کردن گشتاور واژگونش ناشی از بار مایع حول مرکز جرم مایع و نیز ارتفاع مرکز جرم سیال با استفاده از روش ضرایب وزنی و با ضریب ۰/۵ انجام می‌شود.

$$U(X) = \text{Minimize} [w_1 M_0 + w_2 Y_{CG}] \quad (25)$$

با مقایسه مقدار گشتاور ناشی از تانکر با سطح مقطع بیضوی بهینه با تانکر جدول (۱) و تحلیل عددی ارائه شده در شکل (۹) مشاهده می‌کنیم که تانکرهای با سطح مقطع بهینه (شکل (۱۰)) در پرشدگی‌های متفاوت، گشتاور واژگونش کمتر و پایداری بیشتری را تحت شتاب جانبی یکسان دارا می‌باشد.



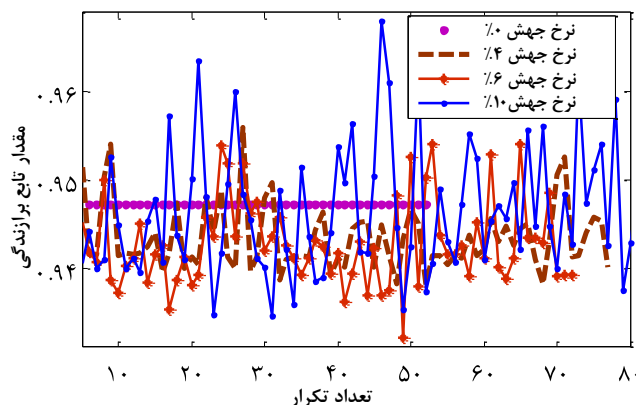
شکل ۹- گشتاور تانکر بیضوی بهینه



شکل ۱۰- سطح مقطع بیضوی بهینه تانکر در پرشدگی‌های متفاوت

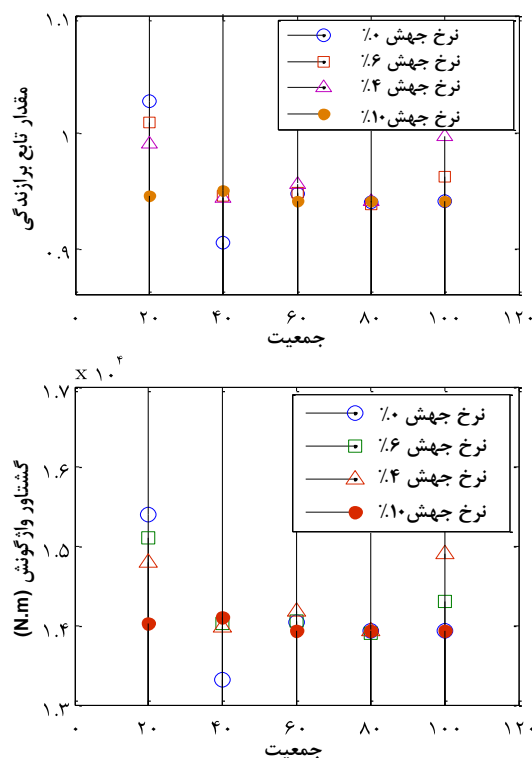
۴-۴- بررسی پارامترهای مؤثر در دقت بهینه‌سازی

این برنامه تعداد معادلات زیادی را که شامل پارامترهای بهینه‌سازی متفاوتی مانند تعداد تکرار، ماکزیمم مقدار تابع، پارامترهای خاتمه‌دهنده بهینه‌سازی، تعداد بیت، تعداد افراد جمعیت شامل می‌شود. در نتیجه بدست آوردن کمترین تکرار در رسیدن به پاسخ مطلوب اهمیت خواهد داشت. یک مقدار نامناسب برای نرخ جهش سبب همگرایی زود هنگام می‌شود که سبب می‌شود بهترین پاسخ بهینه‌سازی بدست نیاید. برای بررسی تأثیر نرخ جهش، مقدار مساحت ۲/۲۶۲ مترمربع و مشخصات تانکر براساس داده‌های موجود در جدول (۱) ارائه شده است. نرخ جهش برابر ۰، ۴، ۶، ۱۰ انتخاب می‌شود که در شکل (۱۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱۱- تأثیر نرخ جهش بر مقدار تابع برازندگی

بدون در نظر گرفتن جهش، همگرایی زودرس رخ خواهد داد و الگوریتم ژنتیک قابلیت بررسی همه‌ی نقاط مطلوب در باند متغیرها و قیود بهینه‌سازی را نخواهد داشت. برای حالت چهار درصد جهش، با تغییر بیت‌ها و ایجاد افراد جدید، انتخاب تابع برازندگی بهتر افزایش می‌یابد. برای نرخ جهش برابر صفر، در این مقاله، بهترین پاسخ در تعداد تکرار ۵۴ و ماکزیمم گشتاور واژگونش ۱۴۰۴۲ نیوتن‌متر بدست می‌آید. با نرخ جهش چهار درصد بهترین پاسخ در تعداد تکرار ۷۵ با ماکزیمم گشتاور واژگونش ۱۴۱۸۲ نیوتن‌متر می‌باشد. در پایان برای نرخ جهش ۱۰ درصد، ماکزیمم گشتاور واژگونش ۱۳۹۳۷ نیوتن‌متر می‌باشد که در تعداد تکرار ۸۰ بدست می‌آید. همان‌گونه که در شکل (۱۰) نمایش داده شده است تغییرات در تابع برازندگی در این حالت بیش از حالت نرخ جهش صفر و چهار و شش درصد است. این امر بدلیل تصادفی‌تر بودن انتخاب افراد در هر تولید در حالت نرخ جهش ۱۰ درصد می‌باشد. با افزایش نرخ جهش همگرایی مناسب‌تری ایجاد خواهد شد اما با انتخاب نرخ جهش بالاتر از ۶ درصد تابع همگرا نمی‌شود و پاسخ مطلوب بدست نمی‌آید. بر مبنای توضیحات بالا و نتایج آن‌ها بهترین نرخ جهش در برنامه‌ی الگوریتم ژنتیک بین ۴ و ۶ می‌باشد. انتخاب تعداد جمعیت مناسب در هر تولید بر روی خروجی الگوریتم ژنتیک تأثیر می‌گذارد. همان‌گونه که در شکل (۱۲) نمایش داده شده است، نتایج در تعداد جمعیت کمتر از ۶۰ پاسخ مطلوب ایجاد نمی‌کند. در نتیجه توصیه می‌شود که تعداد افراد جمعیت بهینه‌سازی بین ۶۰ تا ۸۰ نفر انتخاب شود.



شکل ۱۲- تأثیر تعداد افراد جمعیت بر تابع برازندگی

۵- نتیجه گیری

در این مقاله مدل مکانیکی پاندول ترامل جهت شبیه سازی تلاطم سیال بهینه شده و روابط مربوط به آن تصحیح می شود. مدل ارائه شده دقت بالاتری نسبت به روابط معمول پاندول ترامل دارا می باشد. جهت بهینه سازی روابط پاندول ترامل به بررسی گشتاور واژگونش ناشی از مدل پاندول ترامل پرداخته و نتایج بدست آمده ناشی از آن با حالت تحلیل عددی مقایسه می شود. تابع هدف بکار رفته در این بهینه سازی، اختلاف مقدار نتایج بدست آمده از روش پاندول ترامل و روش تحلیل عددی است و هدف ما بازنویسی معادله پاندول ترامل جهت کمینه سازی اختلاف این دو مقدار می باشد. بدین منظور الگوریتمی ژنتیک بر مبنای روش مقدار واقعی تعریف می شود و ضرایب معادلات پاندول ترامل به عنوان متغیر در نظر گرفته می شود. این ضرایب در پرشدگی های ۰٪، ۶٪، ۷۰٪، ۸۰٪، ۹۰٪ اصلاح می شود و رابطه جدیدی برای پاندول ترامل معرفی می شود. با مقایسه گشتاور واژگونش ناشی از این حالات با نتایج تحلیل عددی ضرایب حالت ۸۰٪ پرشدگی بیشترین انطباق را با حالت عددی دارا بوده و به عنوان ضرایب مؤثر انتخاب می شوند. در ادامه روشی جدید برای طراحی تانکرهای بیضوی معرفی می شود و سطوح مقطعی با پایداری بیشتر در پرشدگی های متفاوت ارائه می شود. این روش بر مبنای استفاده از تئوری مقدار واقعی الگوریتم ژنتیک و با هدف کمینه سازی همزمان دو تابع گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم به صورت همزمان و با استفاده از روش ضرایب وزنی می باشد. پارامترهای مؤثر در بهینه سازی مانند نرخ جهش و تعداد افراد جمعیت مورد بررسی قرار گرفته تا الگوریتمی با دقت بالا و سرعت همگرایی مناسب بدست آید. نرخ جهش پیشنهادی بین ۴٪ تا ۶٪ و حداقل تعداد افراد جامعه ۶۰ نفر انتخاب می شود.

مراجع

- [1] Yan, G. R., "Liquid Sloshing and its Influence on Braking and Roll Response of Partly Filled Tank Vehicles", PhD Thesis, University of Concordia, Canada, (2008).
- [2] Bauer, H.F., "On the Destabilizing Effect of Liquids in Various Vehicles", J. Vehicle System Dynamics, pp. 229-242, (1972).
- [3] Abramson, H.N., and Silverman, S., "The Dynamic Behaviour of Liquids in Moving Containers", NASA SP-106, Washington D.C., USA, (1966).
- [4] Ranganathan, R., Ying, Y., and Miles, J. B., "Analysis of Fluid Slosh in Partially Filled Tanks and Their Impact on the Directional Response of Tank Vehicles", SAE, pp. 932-942, (1993).
- [5] Budiansky, B., "Sloshing of Liquids in Circular Canals and Spherical Tanks", Journal of the Aero/Space Sciences, Vol. 27, No. 3, pp. 61-73, (1960).
- [6] Ibrahim, R. A., and Barr, A. D. S., "Autoparametric Resonance in a Structure Containing a Liquid, Part II: Three Mode Interaction", Journal of Sound and Vibration, Vol. 42, No. 2, pp. 181-200, (1975).
- [7] Mantriota, G., "Directional Stability of Articulated Tank Vehicles: a Simplified Model", International Journal of Heavy Vehicle Systems, Vol. 10, pp. 144-165, (2003).
- [8] Xu, L., Dai, I., Dong, M., and Setiawan, B., "Influence of Liquid Slosh on Ride Quality of Liquid Cargo Tank Vehicles", Proc. I Mech. E Part D: Journal Engineering, Vol. 218, pp. 675-684, (2004).
- [9] Mohamed, I., Salem, M.I., "Rollover Stability of Partially Filled Heavy-duty Elliptical Tankers using Trammel Pendulums to Simulate Fluid Sloshing", PhD Thesis, University of Concordia, Canada, (2000).
- [10] Bohn, P., Butler, M. C., Dunkle, H. D., and Eshleman, R. L., "Simulation of the Effect of Cargo Shifting on Articulated Vehicles Performing Braking and Cornering Maneuvers", Technical Report, The John Hopkins University, (1981).
- [11] Romero, J., Lozano, A., and Ortiz, A. W., "Modelling of Liquid Cargo – vehicle Interaction during Turning Manoeuvres", 12th IFToMM World Congress, Besançon, France, (2007).
- [12] Gunawan, S., and Azarm, S., "Multi-objective Robust Optimization using a Sensitivity Regionconcept", Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 29, pp. 50-60, (2005).
- [13] Mosalman Yazdi, H.A., and Ramli Sulong, N.H., "Optimization of Off-centre Bracing System using Genetic Algorithm", Journal of Constructional Steel Research, pp.1435-1441, (2011).

[14] Popov, G., "Shape Optimization of Elliptical Road Containers Due to Liquid Load in Steady-state Turning", Vehicle System Dynamics, Vol. 25, pp. 203-221, (1996).

فهرست نمادهای انگلیسی

نصف عرض تانکر	a
نصف ارتفاع تانکر	b
مؤلفه افقی مرکز جرم پاندول	x
شتاب افقی تانکر	\ddot{x}
مؤلفه عمودی تانکر	y
زاویه مرکز جرم پاندول	θ
سرعت زاویه‌ای تانکر	$\dot{\theta}$
شتاب زاویه‌ای تانکر	$\ddot{\theta}$
فاصله مبدا از مرکز جرم پاندول	r
واحد طول (متر)	m
انرژی جنبشی	T
انرژی پتانسیل	Q
ارتفاع پرشدگی تانکر	h
شتاب گرانش	g
جرم کل سیال	WT
چگالی سیال	ρ
حجم سیال	vol
طول تانکر	l
جرم ثابت در مدل تلاطم	M_f
جرم سیال در حال تلاطم	M_p
ارتفاع جرم ثابت در مدل پاندول ترامل	h_0
ارتفاع مرکز جرم متحرک در مدل پاندول ترامل	Y_{CG}
جرم کل سیال	M_t
ممان جرم متحرک	M_V
مؤلفه افقی محور مختصات	\vec{i}
مؤلفه عمودی محور مختصات	\vec{j}

Abstract

In this paper, a mechanical model is used for simulating fluid sloshing. This method is based on trammel pendulum theory. Then result of overturning moment in the mechanical model compared to numerical analyses in different filling level such as 60%, 70%, 80% and 90% and trammel pendulum equations are corrected and its coefficients are optimized. Then an algorithm for optimizing elliptical tank cross-section based on minimizing overturning moment and fluid c.g. is proposed in the case that its rollover threshold is improved. Operators such as mutation rate and population number affect the accuracy and convergence speed of genetic algorithms. Mutation rate between 4% and 6% and minimum individual of 60 is proposed as the proper operators which lead to a suitable response.