



طراحی سطح مقطع تانکرهای حمل سیال جهت کاهش تلاطم تانکر با استفاده از تابع بی‌اسپیلاین بر مبنای روش اعمال ضریب جریمه

محمد حسن شجاعی فرد^۱، روح‌اله طالبی توتی^{۲*} و صادق یارمحمدی سطری^۳

^۱ استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲ استادیار مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده

در این مقاله یک تئوری بر مبنای فرضیه‌ی تکامل ژنتیک جهت بهینه‌سازی سطح مقطع تانکر ارائه شده که تلاطم موجود در تانکر را کنترل کرده و پایداری تانکر را در برابر پدیده‌ی واژگونش تانکر افزایش می‌دهد. این برنامه جهت افزایش آستانه‌ی واژگونش تانکر، سطح مقطعی بادامی شکل بر مبنای تابع بی‌اسپیلاین پیشنهاد داده و سپس به بهینه‌سازی آن بر مبنای روش اعمال ضریب جریمه می‌پردازد. دیاگرام ارائه شده بر مبنای تابع درجه ۴ و با ۱۰ نقطه کنترلی می‌باشد که با توسعه‌ی تابع بی‌اسپیلاین از حالت درجه ۳ با ۸ نقطه کنترلی به دست آمده است. در این الگوریتم با بیش از ۱۰۰ مورد نمونه‌گیری، باندها و نقاط کنترلی اصلاح شده و سپس پارامترهای مؤثر در همگرایی بهینه‌سازی مانند نرخ جهش و تعداد جمعیت تحلیل می‌شود. نرخ جهش ایده‌آل، ۴ تا ۶ درصد و حداقل جمعیت ۴۰ نفر جهت بهینه‌سازی تعریف می‌شود. نتایج به دست آمده از بهینه‌سازی با نتایج تحلیل عددی مقایسه شده که بیانگر این است که تئوری ارائه شده بر مبنای روش‌های بهینه‌سازی، تلاطم موجود در تانکر را کاهش داده و سطح مقطع بهینه‌ای ارائه می‌کند که پایداری تانکر را بهبود می‌بخشد.

کلمات کلیدی: آستانه‌واژگونش؛ الگوریتم ژنتیک؛ بهینه‌سازی؛ تلاطم؛ تانکرهای سوخت‌رسان.

۱- مقدمه

حامل سوخت شامل تغییر مرکز جرم و ممان‌های اینرسی خودرو بر اثر حرکات متناوب سطح آزاد مایع می‌باشد که می‌تواند منجر به واژگونش خودرو یا انحراف از مسیر آن شود [۱-۴]. کارایی عملکرد پایداری از مهم‌ترین نکات در طراحی وسایل نقلیه‌ی حامل مواد مایع و مخازن نگهداری و ذخیره مایعات محسوب می‌شود. اگر بسامد تلاطم به اندازه

هرگونه حرکت سطح آزاد مایع در مخزن حاوی آن را تلاطم گویند. تلاطم در اثر هر نوع اغتشاشی به یک مخزن حاوی سیال ایجاد می‌شود و به دنبال آن به دلیل جابجاشدن مرکز جرم مایع، نیروها و گشتاورهای هیدرودینامیکی به مخزن وارد می‌شود. مهم‌ترین تأثیر پدیده‌ی تلاطم بر روی تانکرهای

در مقاله حاضر سطح مقطعی بادامی شکل با استفاده از تابع بی‌اسپلاین^۱ توسعه داده شده تا هردو پارامتر گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم را کمینه کند. از مشکلات استفاده از تابع‌های بی‌اسپلاین پیچیدگی این توابع می‌باشد به گونه‌ای که استفاده از آن‌ها را در صنعت با مشکل روبرو می‌کند. هدف ما در این مقاله معرفی الگوریتمی است که با حفظ پیچیدگی‌های این تابع، کاربری ساده‌ای را در صنعت داشته باشد، به گونه‌ای که تنها یک ورودی در الگوریتم تعریف شده باشد. این ورودی ظرفیت تانکر می‌باشد و الگوریتم ارائه شده بر مبنای ثابت بودن این ظرفیت شکل گرفته است. بهینه‌سازی سطح مقطع تانکر معرفی شده بر مبنای دو تابع هدف گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم سیال در پرشدگی‌های متفاوت انجام می‌شود و سپس سطح مقطع مزبور با تابع بی‌اسپلاین به گونه‌ای مدل می‌شود که پایداری بیشتری داشته باشد. به عبارت دیگر هدف ما در این مقاله بهینه‌سازی تمامی سطوح مقاطع موجود با استفاده از الگوریتم ارائه شده است. به گونه‌ای که ما هر سطح مقطعی را در این الگوریتم قرار دهیم، سطح مقطعی با پایداری بیشتر در برابر تلاطم ارائه خواهد داد.

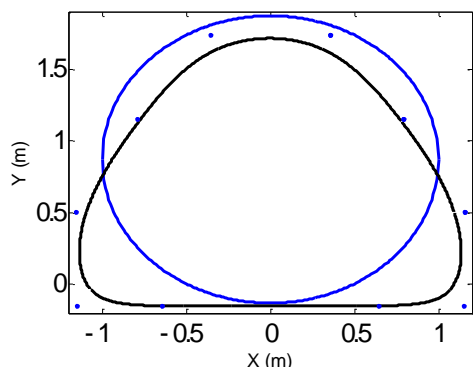
۲- تابع بی‌اسپلاین

توابع بی‌اسپلاین باندهای انعطاف‌پذیری هستند که به آسانی در عبور از تعدادی نقاط که نقاط کنترلی نامیده می‌شوند، انحنا پیدا کرده و منحنی‌های نرمی را تولید می‌کنند. این توابع امکان ایجاد و کنترل اشکال و سطوح مقاطع پیچیده با استفاده از انتخاب تعدادی نقاط را فراهم می‌کنند. منحنی‌های به وجود آمده از نزدیکی نقاط کنترلی و نه لزوماً روی آن‌ها عبور می‌کنند. توابع بی‌اسپلاین در حقیقت توسعه یافته توابع بزیر^۲ می‌باشند. در توابع بزیر منحنی به صورت محدب و در میان نقاط کنترلی رسم می‌شود و درجه این تابع بر حسب نقاط کنترلی تعیین می‌شود. توابع بی‌اسپلاین تعدادی منحنی بزیر با درجات پایین را به گونه‌ای به یکدیگر متصل می‌کنند که پیوستگی منحنی حفظ شود و درجه‌ی منحنی مستقل از انتخاب تعداد

کافی به بسامد طبیعی سازه نزدیک باشد، پدیده‌ی تشدید سبب ناپایداری و کنترل‌ناپذیری سیستم می‌شود [۵]. تانکرهای با سطح مقطع دایروی که به صورت کلی در جابجایی سیال بکار می‌روند، دارای مرکز جرم بالا اما جابجایی بار جانبی کم تحت شتاب عرضی ثابت می‌باشند و در پرشدگی‌های پایین پایداری بیشتری نسبت به تانکرهای بیضوی و بیضوی اصلاح شده دارند. تانکرهای با سطح مقطع بیضوی اصلاح شده مرکز جرم پایین و جابجایی بار جانبی بالایی را در پرشدگی‌های پایین نسبت به تانکر استوانه‌ای دارا می‌باشند. در پرشدگی‌های بالا تانکرهای با سطح مقطع بیضوی اصلاح شده پایداری در برابر واژگونش بیشتری نسبت به تانکرهای دایروی از خود نشان می‌دهند که این امر ناشی از مرکز جرم پایین‌تر در تانکرهای بیضوی اصلاح شده می‌باشد [۱]. پایداری در برابر واژگونش تانکرها تحت تأثیر دو پارامتر ارتفاع مرکز جرم و بزرگی جابجایی جانبی بار می‌باشد. تحقیقات بسیاری جهت کاهش ارتفاع مرکز جرم صورت گرفته، به عنوان مثال می‌توان به تانکرهای شبه مستطیلی اشاره کرد که با تغییر در شعاع انحنای گوشه‌های بالا و پایین تانکر به دست می‌آید و کاهش در ارتفاع مرکز جرم را سبب شده است [۲]. تانکرهای با سطح مقطع مستطیلی اصلاح شده، کاهش در ارتفاع مرکز جرم سیال را با افزایش پهنا و کاهش ارتفاع کلی سطح مقطع تانکر ایجاد می‌کنند، اگرچه افزایش انتقال بار جانبی سیال را به وجود می‌آورند [۳]. در تانکرهای با سطوح مقاطع مستطیلی و بیضوی اصلاح شده، با کمینه‌سازی گشتاور واژگونش ناشی از سیال، بهینه‌سازی انجام می‌شود [۴ و ۶]. با توسعه سطح مقطع بادامی جهت ایجاد تانکری که در آن هر دو پارامتر ارتفاع مرکز جرم و جابجایی جانبی بار سیال کمینه شود، سطح مقطعی متشکل از ترکیبی از دوایر با شعاع‌های متفاوت به دست می‌آید که پهنا‌ی زیادی در پایین و نوک باریکی در بالای تانکر دارند [۱]. الگوریتم‌های گوناگونی جهت طراحی تانکرها ارائه شده، از آن دسته می‌توان به MDO/PSO اشاره کرد که با استفاده از روش بهینه‌سازی PSO، روشی جهت طراحی کشتی‌ها بر مبنای تلاطم موجود در آن‌ها ارائه می‌کند [۷]. بهینه‌سازی با استفاده از تکنیک کاهش تلاطم و با بکارگیری روش‌های بازگشتی مانند شبکه عصبی و الگوریتم ژنتیک نیز در طراحی تانکرهای مستطیلی بکار گرفته می‌شود [۸].

^۱ B-Spline

^۲ Bezier



شکل ۲- سطح مقطع بهینه نانکر در حالت ۵۰ درصد
پرشدهی برای تابع بی‌اسپیلاین درجه ۳ و ۱۰ نقطه کنترل

پس از بررسی نتایج به دست آمده با توجه به نزدیکی آن‌ها به شکل بیضوی اصلاح شده و محدود بودن ارتفاع و پهنا با توجه به نقاط کنترلی، این تابع در بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از بهینه‌سازی در این مقاله به دست آوردن شکلی است که در پرشدهی‌های گوناگون مناسب باشد که تبدیل معادله بی‌اسپیلاین از حالت درجه ۳ به حالت درجه ۴ و استفاده از ۱۰ نقطه کنترلی با این هدف انجام می‌شود و در نهایت با انجام بیش از ۱۰۰ نمونه بهینه‌سازی و با میانگین‌گیری در میان نقاط کنترلی الگوریتمی مناسب به دست می‌آید که بیانگر نقاط کنترلی و باند آن‌هاست. باند مربوط به هر نقطه با برابر $0.6R$ شعاع استوارته بهینه شده) خواهد بود. نحوه انتخاب نقاط کنترلی و باند مربوط به هر متغیر در جدول ۱ معرفی شده است.

جدول ۱- نقاط کنترلی و باند مربوط به هر متغیر

نقاط کنترلی	متغیرهای تابع	قیود نقاط کنترلی
$P_1(x_1, y_1)$	$X(1) = x_1 = 0.45R$	$0.3R \leq X(1) \leq 0.6R$
$P_2(x_2, y_2)$	$X(2) = x_2 = 0.8R$	$0.65R \leq X(2) \leq 0.95R$
$P_3(x_3, y_3)$	$X(3) = x_3 = 1.3R$	$1.15R \leq X(3) \leq 1.45R$
$P_4(x_4, y_4)$	$X(4) = x_4 = R$	$0.85R \leq X(4) \leq 1.15R$
$P_5(x_5, y_5)$	$X(5) = x_5 = 0.5R$	$0.35R \leq X(5) \leq 0.65R$
	$X(6) = y_1 = 1.7R$	$1.55R \leq X(6) \leq 1.85R$
	$X(7) = y_2 = 1.3R$	$1.5R \leq X(7) \leq 1.45R$
	$X(8) = y_3 = 0.65R$	$0.5R \leq X(8) \leq 0.8R$
	$X(9) = y_4 = 0$	$-0.15R \leq X(9) \leq 0.15R$
	$X(10) = y_5 = 0$	$-0.15 \leq X(10) \leq 0.15$

نقاط کنترلی باشد. محاسبه تابع بی‌اسپیلاین در حالت کلی به صورت معادله (۱) می‌باشد.

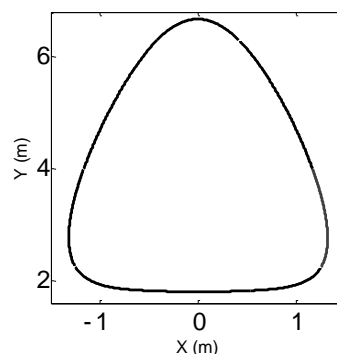
$$B(u) = \sum_{i=0}^n P_i N_i^k(u) \quad (1)$$

P_i نقطه کنترلی نام، k درجه‌ی تابع چند جمله‌ای منحنی بی‌اسپیلاین، $N_i^k(u)$ تابع سازنده‌ی بی‌اسپیلاین می‌باشد. تابع بی‌اسپیلاین، یک تابع برگشت‌پذیر است به این معنا که مرتبه‌ها بالاتر تابع با استفاده از مرتبه‌های پایین آن ساخته می‌شود [۹-۱۱]:

$$N_i^k(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+k} - u_i} N_i^{k-1}(u) + \frac{u_{i+k} - u}{u_{i+k} - u_{i+1}} N_{i+1}^{k-1}(u) \quad (2)$$

در این مقاله بهینه‌سازی در ابتدا برای تابع درجه ۳ و با ۸ نقطه کنترلی انجام و الگوریتم ارائه شده برای به دست آوردن شکل مطلوب که نوعی شکل بادامی و نزدیک به تابع بیضوی است، بهینه شده است. شکل بهینه به دست آمده برای پرشدهی‌های متفاوت نوعی شکل مثلثی اصلاح شده با تعدادی انحنای در گوشه‌ها می‌باشد که در شکل ۱ نشان داده شده است.

تعداد نقاط کنترلی تابع جهت افزایش کنترل‌پذیری و نزدیک کردن شکل از حالت مثلثی به بیضوی، ۱۰ عدد انتخاب می‌شود که ۱۰ تکه منحنی را به وجود می‌آورد. پس از رسم منحنی در پرشدهی‌های متفاوت همچنان شکل از حالت بیضوی اصلاح شده فاصله دارد که در شکل ۲ بیان شده است. پس از رسم منحنی در پرشدهی‌های متفاوت و مناسب نبودن منحنی‌های به دست آمده، درجه منحنی از حالت درجه ۳ به درجه ۴ تغییر پیدا می‌کند.



شکل ۱- سطح مقطع بهینه شده در پرشدهی ۷۰ درصد برای
تابع بی‌اسپیلاین درجه ۳ با ۸ نقطه کنترلی

$$\left\{ \begin{aligned}
 X_i(u) &= \frac{1}{24} [(u^4 - 4u^3 + 6u^2 - 4u + 1)P_{x(i-1)}(u) \\
 &\quad + (-4u^4 + 12u^3 - 6u^2 - 12u + 11)P_{x(i)}(u) \\
 &\quad + (6u^4 - 12u^3 - 6u^2 + 12u + 11)P_{x(i+1)}(u) \\
 &\quad + (-4u^4 + 4u^3 + 6u^2 + 4u + 1)P_{x(i+2)}(u) \\
 &\quad + u^4 P_{x(i+3)}(u)] \\
 Y_i(u) &= \frac{1}{24} [(u^4 - 4u^3 + 6u^2 - 4u + 1)P_{y(i-1)}(u) \\
 &\quad + (-4u^4 + 12u^3 - 6u^2 - 12u + 11)P_{y(i)}(u) \\
 &\quad + (6u^4 - 12u^3 - 6u^2 + 12u + 11)P_{y(i+1)}(u) \\
 &\quad + (-4u^4 + 4u^3 + 6u^2 + 4u + 1)P_{y(i+2)}(u) \\
 &\quad + u^4 P_{y(i+3)}(u)] \quad (۴) \\
 i &= 1, \dots, 10
 \end{aligned} \right.$$

معادله (۴)، بیان‌گر این کمان‌ها می‌باشد و درحالی‌که u بین صفر و یک انتخاب شود، این کمان‌ها با یکدیگر هم‌پوشانی خواهند داشت. $P_{x(i)}$ مؤلفه افقی نقطه کنترلی و $P_{y(i)}$ مؤلفه عمودی نقطه کنترلی می‌باشد. معادله جزء نام سطح آزاد سیال بدون وجود شیب عرضی جاده و شتاب عرضی، برابر $h_0^{(i)}$ به صورت زیر می‌باشد:

$$y = -h_0^{(i)}, \quad i = 1, \dots, 10 \quad (۵)$$

الگوریتم مورد استفاده دو کمان a و b را معرفی می‌کند که با سطح آزاد سیال تقاطع دارد که این امر به وسیله مقایسه $h_0^{(i)}$ با مقادیر ماکزیمم و مینیمم کمان‌های محدودکننده‌ی سطح مقطع و نقاط (x_a, y_a) و (x_b, y_b) با حل معادله (۴) و (۵) به دست می‌آید. از آنجا که نقطه (x_a, y_a) قرینه نقطه (x_b, y_b) نسبت به محور y در غیاب شیب و شتاب عرضی می‌باشد، بنابراین $y_b = -y_a$ و حجم سیال در واحد طول جزء نام تانکر (A_0^i) با محاسبه‌ی انتگرال سطح به شکل زیر به دست می‌آید:

$$A_0^{(i)} = 2 \int_0^{y_a} \int_{f_1(y)}^{f_2(y)} dz dy \quad (۶)$$

$f_1(y)$ بیان‌کننده‌ی معادله‌ی کمان‌های هندسه‌ی تانکر می‌باشد. معادله سطوح آزاد و شیب دار ناشی از دوران پایدار خودرو، در جمله شیب به شکل زیر به دست می‌آید:

$$y = -\left(\frac{\theta_{s3} - a_y}{1 + \theta_{s3} a_y} \right) x + \alpha^{(i)} \quad (۷)$$

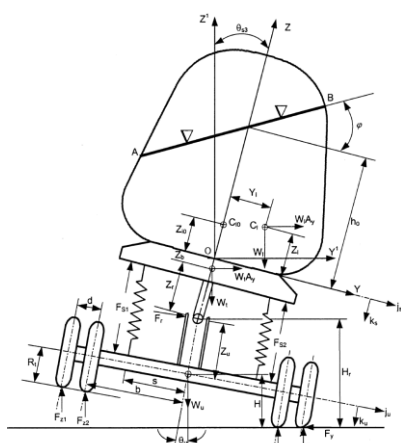
الگوریتم ارائه شده، سطوح مقاطع بهینه با پیچیدگی‌های گسترده مانند توابع بی‌اسپیلاین را با تنها یک ورودی که شعاع دایره‌ی اولیه است، ایجاد می‌کند. در مواردی که شکل استوانه‌ای نیست ابتدا سطح مقطع محاسبه شده و دایره‌ای هم مساحت با آن مدل شده و شعاع معادل به دست می‌آید. تابع بی‌اسپیلاین درجه ۴ با ۱۰ نقطه کنترلی به صورت بازگشتی با استفاده از معادله (۳) به دست می‌آید. P_i بیانگر نقطه کنترلی نام در معادله است.

$$N_i^5(u) = \frac{1}{24} \begin{bmatrix} u^4 & u^3 & u^2 & u & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ -4 & 12 & -12 & 4 & 0 \\ 6 & -6 & -3 & 6 & 0 \\ -4 & -12 & 9 & 4 & 0 \\ 1 & 11 & 11 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{i-1} \\ P_i \\ P_{i+1} \\ P_{i+2} \\ P_{i+3} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

$i = 1, \dots, 10, \quad 0 \leq u \leq 1$

۳- محاسبه‌ی مرکز جرم سیال در تانکر با سطح مقطع بی‌اسپیلاین

مختصات مرکز جرم منحنی بسته، با استفاده از ممان انتگرال‌های سطح به دست می‌آید. در این تحلیل از مدل چرخش سطح با فرض تلاطم شبه استاتیکی سیال و تانکری با مشخصات موجود در جدول ۲ استفاده شده است (شکل ۳). شتاب عرضی و چرخش تانکر سبب می‌شود تا مرکز جرم سیال از نقطه C_1 جابجا شده و به نقطه X_1 منتقل شود، در این تحلیل فرض ما بر این بوده است که زوایای چرخش سیال کوچک باشد. در این مقاله هندسه‌ی تانکر با استفاده از تابع بی‌اسپیلاین ساخته شده و ترکیبی است از ۱۰ کمان منحنی شکل که نسبت به محور y متقارن می‌باشد. معادله کمان‌های سطح مقطع تانکر با استفاده از الگوریتمی عددی بیان می‌شود. معادله (۳) بر حسب دو مختصات x و y نوشته می‌شود تا محاسبه‌ی مؤلفه‌ی افقی و عمودی مرکز جرم سیال بر مبنای آن صورت گیرد.



شکل ۳- مدل چرخش سطح، تانکر [۱]
شکل ۳- مدل چرخش سطح، تانکر چهار درجه آزادی [۱]

۶- الگوریتم بهینه‌سازی

امروزه استفاده از روش‌های تکامل تدریجی برای حل مسائل بهینه‌سازی روندی رو به رشد است. الگوریتم‌های تکامل بر اساس شبیه‌سازی تکامل طبیعی شکل گرفته است. الگوریتم ژنتیک به عنوان محبوب‌ترین الگوریتم تکامل تدریجی در فضاهای جستجوی نامعین کاربرد وسیعی پیدا کرده است [۱۳ و ۱۴]. جمعیت‌های اولیه با اعمال عملگرهای ژنتیکی نظیر انتخاب^۱ جهش^۲، تقاطع^۳ به سمت جمعیت بهینه سوق پیدا می‌کند و تابع هدف یا تابع برازندگی^۴ نقش انتخاب‌کننده را در بین جمعیت‌ها بازی می‌کند. در انتخاب جمعیت جهت اعمال عملگر ژنتیکی در این مقاله از مکانیزم چرخ گردان^۵ استفاده شده و برای اعضای بد جمعیت نیز شانس برای انتخاب شدن در نظر گرفته شده است. احتمال انتخاب هر عضو متناسب با برازندگی‌اش می‌باشد و اعضای که برازندگی آنها از یک معیار بهتر نباشد از شرکت در انتخاب محروم می‌شوند. قید مساحت و قیود اعمالی به متغیرهای موجود در معادله (۴)، این کمینه‌سازی را جهت‌دهی می‌کند. در این بهینه‌سازی ۱۰ متغیر بکار گرفته شده که بیانگر شکل به

زاویه جرم فربندی شده، a_y شتاب عرضی در واحد شتاب گرانش و $\alpha^{(i)}$ محل تقاطع محور x با سطح آزاد سیال می‌باشد. حجم کل در واحد طول سیال با حجم اولیه در حالتی که $a_y=0$ و $\theta_{s3}=0$ باشد، مقایسه شده و مقدار خطا از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\varepsilon = |A^{(i)} - A_0^{(i)}| \quad (۸)$$

در این فرایند معادله (۸)، امرتبه تکرار می‌شود تا میزان خطا برابر مقدار مشخصی شود. مختصات مرکز جرم از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲].

$$\begin{cases} \bar{Y}_l^{(i)} = \frac{1}{A^{(i)}} \int_{y_p}^{y_q} \int_{f_1^{(i)}}^{f_2^{(i)}} y dy dx; i=1,2,\dots,10 \\ \bar{X}_l^{(i)} = \frac{1}{A^{(i)}} \int_{y_p}^{y_q} \int_{f_1^{(i)}}^{f_2^{(i)}} x dy dx; i=1,2,\dots,10 \end{cases} \quad (۹)$$

۵- ممان‌های اعمالی به سیال

در پایداری دورانی تانکر، دو پارامتر ارتفاع مرکز جرم و گشتاور واژگونش با یکدیگر رقابت می‌کنند که سبب می‌شود تانکر استوانه‌ای در پرشدگی‌های کم و تانکر استوانه‌ای در پرشدگی‌های زیاد پایدارتر باشند [۴ و ۶]. پایداری تانکر وابسته به اندازه‌ی جابجایی عرضی و عمودی سیال در حالتی است که تانکر کاملاً پر نشده می‌باشد. کاهش این جابجایی و ارتفاع مرکز جرم سبب افزایش پایداری تانکر می‌شود. در فرایند بهینه‌سازی ما دو تابع هدف گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم را در نظر می‌گیریم که با هم بعد سازی آن‌ها و سپس با در نظر گرفتن ضرایب وزنی که اثر هر دو عامل را در نظر می‌گیرد تابع هدفی به صورت زیر تعریف می‌شود که در بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$U(X) = \text{Minimize } [w_1 M_0 + w_2 Y_l], \quad (۱۰)$$

$$w_1 = w_2 = 0.5$$

$$M_0 = W[(Y_l \cos \theta_{s3} - X_l \sin \theta_{s3}) a_y + Y_l \sin \theta_{s3} + X_l \cos \theta_{s3}] \quad (۱۱)$$

θ_{s3} زاویه جرم فربندی نشده و a_y شتاب عرضی وارد بر تانکر می‌باشد.

¹ selection

² mutation

³ cross over

⁴ fitness

⁵ Roulette

جهش در همگرایی پاسخ مؤثر است که در این مقاله اثر آن در تعیین میزان تابع برازندگی و تعیین سطح مقطع بهینه بررسی می‌شود.

والد	۱.۱	۲.۳	۴.۲	۵	۱.۳	۷	۲.۶	۷.۳	۶	۱.۸	۴	۵.۱	۳	۴.۶	۲.۴	۵
فرزند	۲.۱	۲.۳	۴.۲	۴	۱.۳	۶	۲.۶	۵.۳	۶	۱.۸	۳	۵.۱	۳	۴.۶	۲.۴	۵

جهش

شکل ۴- عملگرهای تقاطع و جهش

۶-۲- ارتقاء الگوریتم بهینه‌سازی سطح مقطع

برای یافتن بهترین سطح مقطعی که کمترین گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم را داشته باشد، یک کد متلب^۲ متناسب با الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده است. پارامترهای نقاط کنترلی شامل مختصات افقی و عمودی نقاط در صفحه مختصات به گونه‌ای که حول محور y متقارن باشند به عنوان ورودی تابع بی‌اسپیلاین تعریف گردید. قیدهای اعمالی، شامل قید مساحت (مساحت سطح مقطع بهینه شده که معرف ظرفیت تانکر است)، قید حداکثر ارتفاع و حداکثر عرض می‌باشد. از آنجا که شکل سطح مقطع توسط نقاط کنترلی تعیین می‌شود، نحوه انتخاب این نقاط به گونه‌ای است که این دو قید ارضا شود و تنها از قید مساحت در بهینه‌سازی استفاده می‌شود. کم کردن تعداد قیود منجر به افزایش سرعت بهینه‌سازی می‌شود. دیاگرام نشان‌دهنده شده در شکل ۵ به صورت خلاصه بیانگر نحوه عملکرد یک تابع الگوریتم ژنتیک در فرآیند بهینه‌سازی سطح مقطع می‌باشد. برای اشکال غیر دایروی ابتدا دایره معادل و سپس شعاع معادل بر مبنای معادله (۱۲) محاسبه و در الگوریتم قرار می‌گیرد.

$$R_{eq} = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (12)$$

۶-۳- قیود

۶-۳-۱- مدیریت قیدها

مدیریت قیدها در الگوریتم‌های تکاملی از جمله الگوریتم ژنتیک، الگوریتم پرندگان، زنبور عسل و الگوریتم رقابت استعماری، مستقل از نوع الگوریتم هستند. اولین و مهم‌ترین

وجود آمده از منحنی‌های بی‌اسپیلاین می‌باشد و کمینه سازی ما به انتخاب این نقاط و رسم شکل با هدف بهینه کردن گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم منتهی می‌شود. بهینه‌سازی ما بر مبنای استفاده از روش جمع وزنی خواص شکل می‌گیرد. وزن‌ها بر اساس اهمیت خواص نسبت به یکدیگر انتخاب می‌شوند که در این مقاله ضرایب وزنی برابر ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. الگوریتم ژنتیک با تعدادی حل جمعیت نامیده می‌شود، آغاز می‌گردد. با این دیدگاه که جمعیت جدید بهتر از جمعیت اصلی است. تعداد افراد جمعیت در این بهینه‌سازی مورد بررسی قرار می‌گیرد تا تأثیر انتخاب تعداد افراد در دقت پاسخ تعیین شود. یکی از مهم‌ترین مفاهیم الگوریتم ژنتیک تابع برازندگی می‌باشد. تابع برازندگی گونه‌ای خاص از تابع هدف می‌باشد که کیفیت بهینه‌سازی پاسخ را تعیین می‌کند. (عبارتست از یک کروموزوم و یا یک فرد خاص از جمعیت) و در نتیجه یک کروموزوم بخصوص در برابر کروموزوم‌های دیگر رتبه‌بندی می‌شود. می‌توان تابع برازندگی را میزان مناسب بودن در نظر گرفت که هدف ما افزایش حداکثری آن می‌باشد. در طول فرآیند تبدیل از یک نسل به نسل دیگر برازندگی کلی جمعیت افزایش یافته و پاسخ بهتری به دست می‌آید [۷]. در حالت کلی رشته‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شوند که رشته‌های با برازندگی بالاتر شانس بیشتری برای انتخاب شدن دارند. در این تحقیق انتخاب بر مبنای روش رتبه‌بندی^۱ برای برنامه انتخاب در نظر گرفته می‌شوند. انتخاب رتبه‌بندی احتمال انتخاب را به صورت مستقیم از روی مقدار برازندگی به دست نمی‌آورد، بلکه در ابتدا تمامی افراد متناسب با میزان برازندگی دسته‌بندی شده و سپس به محاسبه‌ی احتمال انتخاب بر مبنای رتبه‌ی آن‌ها و نه میزان برازندگی‌شان می‌پردازد [۸]. عملگر جهش عدد صحیح اجزای رشته را تغییر داده و متناسب با نرخ جهش، یک عدد تصادفی برای هر جزء رشته به وسیله‌ی یک تولید کننده‌ی تصادفی تولید می‌کند (شکل ۴). این عملگر می‌تواند راه حلی ارائه کند که در جمعیت موجود نباشد و از دست رفتن اطلاعات ارزشمند ناشی از تقاطع نامناسب را جبران کند. نرخ جهش معمولاً کم انتخاب می‌شود تا تداخل میان عملگرها را کم کند [۳]. نرخ

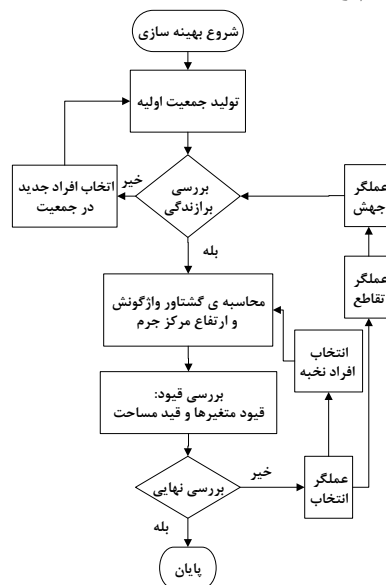
² MATLAB

¹ Ranked-based

$$F(x) = f(x) + \sum_{j=1}^m R_j \max[0, g_j(x)]^\beta \quad (14)$$

در بیشتر مواقع، جریمه به صورت یک صورت تابع درجه ۲ بیان می‌شود که متناسب با متغیر β و برابر با ۲ می‌باشد. قیود تساوی مثل $h_k(x) = 0$ به صورت $|h_k(x)| - e \leq 0$ ، فرمول‌بندی می‌شود، به شکلی که ε مقدار کوچکی باشد. لازم به ذکر است که بهینه‌سازی کلی در مرزهای فضای ممکن قرار می‌گیرد. با اعمال ضریب جریمه، قیود اعمالی به هر فرد در فضای ممکن و مناسب بهینه‌سازی بسیار زیاد می‌شود و سبب می‌شود تا از تکرار بیشتر جلوگیری به عمل آید. علاوه بر این در فضاهای غیر متصل، ضریب جریمه‌ی زیاد سبب محدود شدن جمعیت به یک ناحیه ممکن و مناسب شده و مانع از عبور افراد جمعیت از این ناحیه به نواحی مناسب اما جدای دیگر می‌شود. در نقطه‌ی مقابل ضریب جریمه‌ی اندک سبب یک جستجوی خسته کننده در نواحی غیرممکن و نامناسب می‌شود و تابع هدف در نواحی‌ای که مقدار اندکی دارد، جستجو را صورت می‌دهد.

قدم در بهینه‌سازی محدود کردن قیود در همان تولید کروموزم در الگوریتم ژنتیک است.



شکل ۵- دیاگرام الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی

جدول ۲- مشخصات تانکر مدل چرخش صفحه‌ای [۲۰]

مقدار مشخصه	مشخصات تانکر
kg ۵۰۰۰	جرم فنربندی شده تانکر، m_s
kg ۱۰۰۰	فنربندی نشده تانکر، m_n
m ۱.۵	ارتفاع جرم فنربندی شده تانکر، h_{cs}
m ۰/۶	ارتفاع جرم فنربندی نشده تانکر، h_{cn}
kg/m ³ ۱۰۰۰	چگالی سیال تانکر (آب)

۴-۶- تحلیل پارامترهای مؤثر در الگوریتم ژنتیک

در این بخش، نرخ جهش یا احتمال جهش در الگوریتم ژنتیک بررسی می‌شود. این برنامه تعداد معادلات و متغیرهای زیادی را شامل می‌شود. در نتیجه به دست آوردن کمترین تکرار در رسیدن به پاسخ مطلوب اهمیت خواهد داشت. یک مقدار نامناسب برای نرخ جهش سبب همگرایی زود هنگام شده و در نتیجه بهترین پاسخ بهینه‌سازی به دست نمی‌آید. برای بررسی تأثیر نرخ جهش، مقدار مساحت ۳/۲۵۶ مترمربع و شعاع استوانه برابر با ۱/۰۱۵ متر [۱] در نظر گرفته شده و باند تغییر متغیرهای داده‌های ارائه شده در جدول ۱ بیان می‌شود. نرخ جهش برابر ۰ و ۱ و ۴ و ۶ و ۱۵ انتخاب می‌شود

همیشه امکان‌پذیر نیست که جواب‌ها قابلیت محدود شدن داشته باشند و این امکان وجود داشته باشد که جواب بد تولید نشود. در این گونه موارد از روش‌های پیشگیرانه استفاده می‌شود. در روش‌های پیشگیری تلاش می‌شود تا آن پاسخی که مجرم نامیده می‌شود، در جامعه متولد نشود. اگر مجرم متولد شد پانیش (تنبیه) اعمال می‌شود.

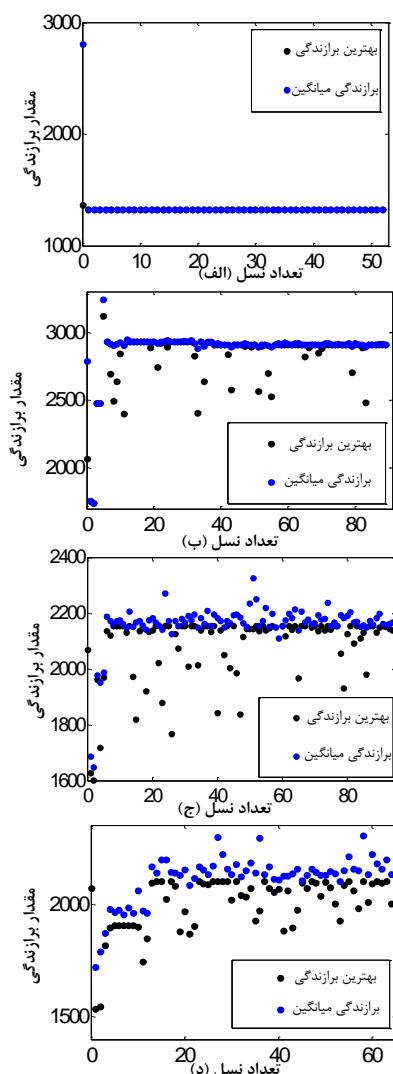
۳-۳-۲- تابع جریمه

این روش معروف‌ترین تکنیک در بهینه‌سازی می‌باشد. در این روش، مسئله مقید تبدیل به یک مسئله نامقید می‌شود که این امر با تبدیل قیود به تابع هدف و تعریف تابع جریمه می‌باشد. لازم به ذکر است که ایجاد جریمه متناسب با پراکندگی ممکن خواهد بود. در این روش، ابتدا از روش کلاسیک فرمول‌نویسی بهینه‌سازی استفاده می‌شود:

$$\text{Min } f(x) \quad \text{s.t. } g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, m \quad (13)$$

سپس با فرمول مقید شده که شامل جمله جریمه می‌باشد، مقیاس جدید کمینه‌سازی F که شامل کمینه کردن مطابق رابطه‌ی (۱۴) می‌باشد، به وجود می‌آید:

درصد، خروجی‌ها بهترین انتخاب را دارا نمی‌باشند. در نتیجه توصیه می‌شود که تعداد افراد باید حداقل ۴۰ نفر باشد. بررسی‌های بیشتر جهت بررسی تأثیر الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به وسیله مقایسه نتایج با روش عددی انجام شده است. گشتاور واژگونش ناشی از نقاط کنترلی جداول ۱ و ۲ بر مبنای معادله (۱۱) محاسبه شده و در شکل ۸ نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل نشان داده شده، تابع بی‌اسپیلاین، درجه ۴ با ۱۰ نقطه کنترلی گشتاور واژگونش کمتر و پایداری بیشتری در مقایسه با تابع ۳ درجه آزادی و ۸ و ۱۰ نقطه کنترلی و نیز تانکر استوانه‌ای خواهد داشت.



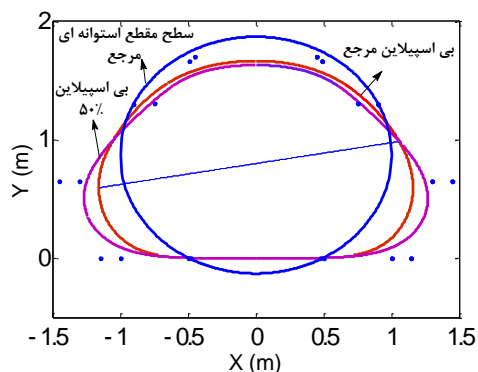
شکل ۶- نمودار گشتاور واژگونش برای (الف) جهش صفر درصد، (ب) یک درصد، (ج) شش درصد، (د) پانزده درصد

که در شکل ۶ نمایش داده شده است. بدون در نظر گرفتن جهش، همگرایی زودرس رخ خواهد داد و الگوریتم ژنتیک قابلیت بررسی همه‌ی نقاط مطلوب در باند تغییر متغیرها را نخواهد داشت. زیرا میانگین میزان برازندگی حالت پایداری را ندارد که این ناپایداری ناشی از همگرایی زود هنگام است. به عبارت دیگر جمعیت در ناحیه محدودی از باند متغیرها همگرا شده و تعداد نقاط کمی در این ناحیه شانس ارزیابی در برنامه را دارند (شکل ۶- الف). در این بهینه‌سازی سه نوع تابع بی‌اسپیلاین در پرشدگی‌های گوناگون با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

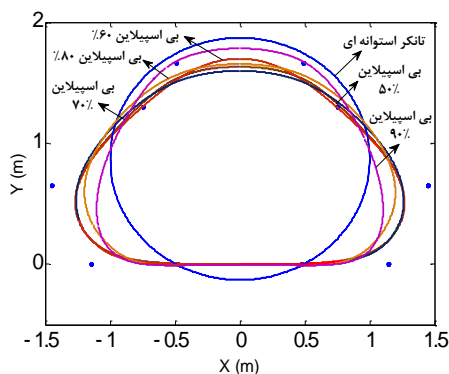
به عنوان مثال در حالت تانکر با سطح مقطع بی‌اسپیلاین درجه ۴ با ۱۰ نقطه کنترلی، گشتاور کمینه ناشی از بهترین حالت (جهش ۴ درصد با جمعیت ۴۰) ۸۶۶ نیوتن‌متر و ارتفاع مرکز جرم سیال ۰/۳۷۱ متر می‌باشد. این داده‌ها بهترین انتخاب به دست آمده پس از ۹۲ تکرار می‌باشد. در نرخ جهش یک درصد بهترین پاسخ در نرخ تولید ۱۰۰ با ماکزیمم گشتاور واژگونش ۴۱۲/۶ نیوتن‌متر می‌باشد (شکل ۶- ب). ماکزیمم گشتاور واژگونش در نرخ جهش ۱۵ درصد، ۴۸۴/۷ نیوتن‌متر می‌باشد که در ۸۰ تکرار به دست می‌آید (شکل ۶- د). همانگونه که در شکل ۶ نمایش داده شده است تغییرات تابع برازندگی با افزایش نرخ جهش افزایش می‌یابد که این امر به دلیل تصادفی‌تر بودن انتخاب افراد می‌باشد. در این تحلیل با افزایش نرخ جهش تا ۶ درصد (شکل ۶- ج) تابع برازندگی، همگرایی مناسب‌تری خواهد داشت. اما با انتخاب نرخ جهش بیشتر از ۶ درصد تابع همگرا نمی‌شود. بهترین نرخ جهش در این الگوریتم بین ۴ و ۶ درصد می‌باشد.

۶-۵- تأثیر جمعیت بهینه‌سازی در گشتاور واژگونش

انتخاب تعداد جمعیت مناسب در هر تکرار بر روی خروجی الگوریتم ژنتیک تأثیر می‌گذارد. این محاسبات بر مبنای پرشدگی ۵۰ درصد انجام شده و تأثیر تعداد افراد جامعه و نرخ جهش در تابع برازندگی مورد بررسی قرار گرفته است. همانگونه که در شکل ۷ نمایش داده شده، بجز در حالت نرخ جهش صفر (که حالت ناپایدار دارد)، نتایج تغییر مهمی با تغییر نرخ جهش ندارد. اگرچه، همانگونه که مشاهده شد برای اندازه جمعیت کمتر از ۴۰ نفر با نرخ جهش کمتر از ۴



شکل ۹- سطح مقطع بهینه تانکر در حالت ۵۰ درصد پرشدگی و حالت قبل از بهینه‌سازی

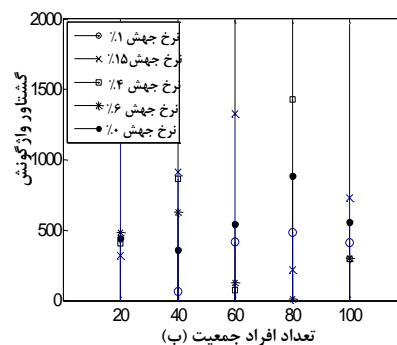
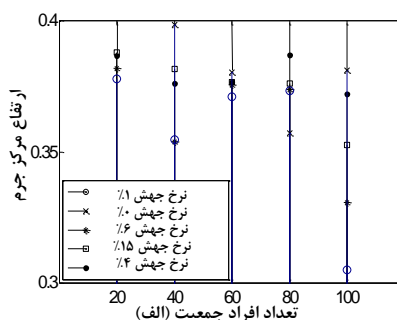


شکل ۱۰- سطح مقطع بهینه تانکر در پرشدگی‌های متفاوت

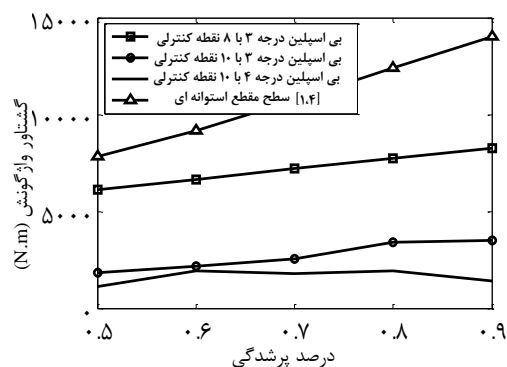
۷- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، نوعی سطح مقطع براساس تابع بی‌اسپیلاین ارائه شد که گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم کمتر و در نتیجه آستانه واژگونش بیشتر و پایدارتری نسبت به تانکرهای دایروی و بیضوی که در آن‌ها دو پارامتر گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم در پرشدگی‌های مختلف با یکدیگر رقابت می‌کنند، دارا می‌باشد. جهت بهینه‌سازی سطح مقطع تانکر ارائه شده، ظرفیت تانکر (در این مقاله دایره فرض شده و برای مقاطع دیگر تعمیم داده شده است.) به عنوان پارامتری از شعاع دریافت و تابعی بی‌اسپیلاین تولید می‌شود. سپس با بهینه‌سازی این سطح مقطع بر مبنای کمینه‌سازی گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم، سطوح مقاطع بهینه تانکر در پرشدگی‌های مختلف ارائه می‌شود. انتخاب مکان و تعداد نقاط کنترلی و درجه‌ی تابع بی-

در پایان با تعیین نقطه کنترلی متناسب با پارامترهای مربوط ارائه شده در جداول ۱ و ۲ ناشی از کمینه کردن تابع هدف در الگوریتم ارائه شده، سطح مقطع بهینه با استفاده از کد متلب محاسبه شده که در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. تأثیر الگوریتم ارائه شده در تبدیل شکل دایروی به سطح مقطعی تابع بی‌اسپیلاین و سپس بهینه‌سازی آن، در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۷- تأثیر تعداد افراد جمعیت و نرخ جهش بر روی گشتاور واژگونش و ارتفاع مرکز جرم سطح مقطع بهینه



شکل ۸- گشتاور واژگونش تانکر با سطح مقطع دایروی و توابع بی‌اسپیلاین درجه ۳ و ۴ با ۸ و ۱۰ نقطه کنترلی

- horizontal elliptical tanks with vertical baffles. *Appl Mathematical Mod* 36(1): 57–71.
- [6] Popov G, Sankar S, Sankar TS (1993) Optimal shape of a rectangular road container. *J of Flu and Str* 7(1): 75–86.
- [7] Christopher G, Hart Nickolas Vlahopoulos (2010) An integrated multidisciplinary particle swarm optimization approach to conceptual ship design. *Indust Appl* 41(3): 481–494.
- [8] Hyun-Soo Kim (2008) Optimization design technique for reduction of sloshing by evolutionary methods. *J of Mech Sci and Tech* 22(1): 25–33.
- [9] Manni Carla, Pelosi Francesca, Sampoli M Lucia (2011) Generalized B-spline as a tool in isogeometric analysis. *Comp Meth in App Mech and Eng* 200(5): 867–881.
- [10] Prautzsch H, Boehm W, Paluszny M (2000) *Bezier and B-spline Techniques*. Springer. Germany. chapter 2: 11–21.
- [11] Klause Hollig (2003) *Finite Element Methods with B-Splines* chapter 3. SIAM. USA: 23–35.
- [12] Ranganathan R, Rakheja S (1989) Steady Turning Stability of Partially Filled Tank Vehicles With Arbitrary Tank Geometry. *J of Dyn Sys, Measurement and Control* 3(3): 481–489.
- [13] Deb K, Tiwari S (2005) Multi objective optimization of a leg mechanism using genetic algorithms. *ENG OPTIMIZ* 37(4): 325–350.
- [14] Gunawan S (2005) Multi-objective robust optimization using a sensitivity region concept. *Strand Multi Opt* 29(1): 50–60.
- [15] Romero J A, Lozano A, Ortiz W (2007) Modelling of liquid cargo vehicle interaction during turning manoeuvres. 12th IFToMM World Congress, Besançon, France, No. 20327009.
- اسپیلاین و همچنین باند مربوط به بهینه‌سازی هر متغیر تابع هدف با انجام بیش از ۱۰۰ مورد بهینه‌سازی و با میانگین-گیری به دست می‌آید. بهینه‌سازی در این الگوریتم با استفاده از تابع بی‌اسپیلاین درجه ۴ با ۱۰ نقطه کنترلی و بر مبنای الگوریتم ژنتیک انجام می‌شود و تأثیر انتخاب تعداد افراد جمعیت و نرخ جهش در درستی پاسخ مورد بررسی قرار می‌گیرد. سطوح بهینه در جمعیت بالای ۴۰ نفر و نرخ جهش بین ۴ تا ۶ بهترین برازندگی را دارا می‌باشد. در این تحقیق الگوریتمی جهت به دست آوردن سطح مقطع بهینه ارائه شده که با دقت و سرعتی بیشتر از حالت عددی، پایداری بیشتری به تانکر می‌بخشد.

مراجع

- [1] Dai L, Xue L (2005) A numerical approach of assessing fluid oscillatory motions in 3D partially filled horizontal cylindrical tanks. *ASME. Orlando. Florida. USA, No. IMECE2005-81301*: 5–11.
- [2] Kang X, Rakheja S, Stiharu I (2002) Cargo load shift and its influence on tank vehicle dynamics under braking and turning. *Heavy Vehicle Sys* 9(3): 173–203.
- [3] Klingenberg B, Rossow G, Jacobsen R (1989) Fact the Freightliner/Heil advanced concept truck. *SAE, No. 892462*.
- [4] Popov G (1996) Shape optimization of elliptical road containers due to liquid load in steady-state turning. *Vehicle Sys Dynamics*. 25(3): 203–221.
- [5] Hasheminejad Seyyed M, Aghabeigi Mostafa (2012) Sloshing characteristics in half-full