

## بهینه‌سازی اصطکاکی دستگاه شبیه‌ساز ارتعاشی آنالیز مودال تحت نوسان‌های آزاد و اجباری با استفاده از الگوریتم ژنتیک

محمد رضا الهامی<sup>۱</sup>، سیدرضا رضویان<sup>۲\*</sup>، حسن تیموری جروکانی<sup>۳</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
<p><b>واژگان کلیدی:</b> الگوریتم ژنتیک، آنالیز مودال، بهینه‌سازی، شبیه‌ساز ارتعاشی، نوسان آزاد و اجباری.</p>	<p>دستگاه "شبیه‌ساز ارتعاشی آنالیز مودال" به کمک یک دستگاه ارتعاش‌دهنده، فرکانس‌ها و شکل مودهای طبیعی یک یا چند قطعه ارتعاشی تحت نوسان‌های آزاد و اجباری را اندازه‌گیری و مشاهده‌پذیر می‌سازد. در این مقاله، طراحی جدیدی به منظور کاهش خطاهای اندازه‌گیری و حفظ حرکت خطی مجموعه، با در نظر گرفتن لایه یکنواخت‌تر هوا و کاهش بهینه اصطکاک توسط بالش‌تک هوا انجام گرفته است. در این طراحی، بهینه‌سازی اصطکاکی دستگاه به روش الگوریتم ژنتیک انجام شده است. در روش ارائه شده، حرکت خطی جرم با عامل اصطکاکی ویسکوز مدل شده و مقدار بهینه‌ی ضریب اصطکاک ویسکوز C با توجه به تغییر در شش فاکتور طراحی بدست آمده است. با توجه به قیود تعریف شده برای هر فاکتور طراحی و با در نظر گرفتن عوامل دیگر از قبیل در دسترس بودن مواد اولیه، قابلیت ساخت و نیز صرفه‌ی اقتصادی، نتایج به دست آمده، مناسب‌تر و کاربردی‌تر از نمونه‌ی اولیه بوده و کاهش ۷۰ درصدی ضریب اصطکاک را نشان می‌دهد.</p>

### ۱- مقدمه

ساخته شد که سیلندری شکل بوده و حجم بسیار کمتری دارد. یکی از جامع‌ترین تحقیقات روی نتایج شبیه‌سازی ارتعاشی را رومان و کلیمانز [۴] انجام داده‌اند که شامل بررسی ارتعاشات با دامنه‌های بالا است. لیو [۵] یک الگوریتم عددی بر پایه‌ی سه معادله‌ی غیرخطی برای تحلیل شبیه‌ساز هاستنس ارائه کرد. تحقیقات بیشتر در این مورد منجر به ارائه روابط جدید براساس قوانین لاگرانژ توسط لبرت [۶]، نیوتن-ویلر توسط دسگوپتا [۷] و کارمجازی توسط ژانگ [۸] گردید.

دستگاه "شبیه‌ساز ارتعاشی آنالیز مودال، تحت نوسان‌های آزاد و اجباری" توسط تعدادی از همکاران در دانشگاه یزد، طراحی و ساخته شد و هم اکنون با تعریف چند آزمایش متفاوت، در حال بهره‌برداری در آزمایشگاه کنترل و ارتعاشات آن دانشگاه است. در این دستگاه یک سیستم

دستگاه شبیه‌ساز ارتعاشی وسیله‌ای ضروری جهت مطالعه رفتار دینامیکی دستگاه‌های صنعتی امروز، در شرایط آزمایشگاهی است که قابلیت انجام آزمایشات تحت کنترل و قابل تکرار را می‌دهد [۱]. یکی از اولین دستگاه‌های شبیه‌ساز ارتعاشی، توسط هاستنس [۲] ساخته شد که دستگاهی با شش محرک بوده و قابلیت حرکت در شش درجه آزادی را می‌دهد. به علت محدودیت‌های مکانی، نمونه‌ای توسط استوارت [۳]

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: srr.yazd@gmail.com

۱. دانشیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۲. کارشناس ارشد شرکت I.C.G

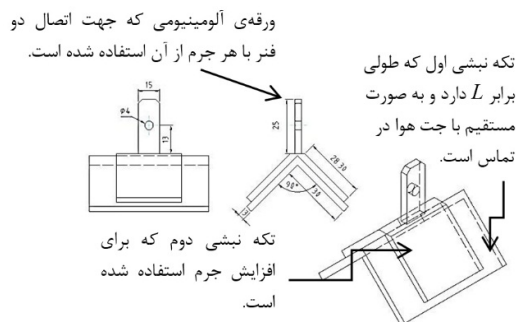
۳. کارشناس ارشد هسا

ارتعاشی طراحی و ساخته شده تا به کمک یک دستگاه ارتعاش‌دهنده به توان تمامی فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها در آن را اندازه‌گیری و مشاهده کرد. سیستم مذکور مجموعه‌ای از جرم و فنرهای هستند که به‌طریقی اصطکاک در مسیر حرکت جرم‌های آن به کمترین مقدار رسیده تا قابلیت مقایسه با تئوری‌های ارتعاشی در تست مودال آن وجود داشته باشد. اصطکاک خشک بین دو سطح تماس با کم کردن سطوح تماس از طریق تولید لایه‌ای از هوا بین دو سطح به حداقل رسیده است. هوا از سوراخ‌های ریزی که در ریل طراحی شده با سرعت و فشار کافی بر وزن اجرام در سیستم جرم و فنر موجود غلبه کرده و در نتیجه جرم‌ها از روی سطح بلند شده و روی بالشتکی از هوا حرکت می‌کنند [۹]. در این مقاله پس از شبیه‌سازی و مدل‌سازی حرکت جرم‌ها، با تعریف متغیرهای مناسب، کمترین مقدار ضریب اصطکاک بهینه بین ریل و جسم به روش الگوریتم ژنتیک محاسبه می‌شود تا در نهایت بتوان ضمن بررسی اقتصادی و نیز امکان ساخت نمونه‌ی بهینه، به هدف کاهش مقدار اصطکاک دستگاه جهت رسیدن به نتایج واقعی‌تر نزدیک شد.

در صنعت طیف گسترده‌ای از الگوریتم‌ها برای بهینه‌سازی استفاده می‌شوند. این الگوریتم‌ها را می‌توان براساس عملکرد به دو دسته کلی تقسیم کرد: روش‌های مشتق محور و روش‌های جستجوگر. روش‌های مشتق محور هنگامی که گرادینان تابع هدف نسبت به متغیرها موجود باشد، قابلیت‌های زیادی داشته و دارای سرعت بالای همگرایی هستند. با این حال عمل مشتق‌گیری به ویژه زمانی که تعداد متغیرها زیاد باشد و یا در نقاط ناپیوسته بعضی از توابع، مشکل و یا غیر ممکن می‌شود. همچنین قرار گرفتن در نقاط بهینه محلی به جای نقاط بهینه‌ی مطلق، از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی این روش‌هاست. در مقابل روش‌های مشتق محور، روش‌های جستجوگر قرار دارند. اصول این روش‌ها محاسبه مقدار تابع به‌ازای مقدار عددی متغیرهاست. در این روش‌ها، ارزیابی با مقایسه مقدار عددی تابع هدف و جستجو در راستای یافتن مقدار بهینه صورت می‌گیرد. در بین روش‌های جستجوگر، روش الگوریتم ژنتیک به دلیل سرعت همگرایی و حجم محاسبات نسبت به روش‌های مشابه [۱۰] انتخاب گردید. الگوریتم ژنتیک به‌عنوان یک روش عمومی با قابلیت

بهینه‌یابی مناسب در سال ۱۹۷۵ توسط هالند [۱۱] پیشنهاد شد و در سال ۱۹۸۹ به‌وسیله گلدبرگ [۱۲] توسعه یافت و از آن پس با تحقیقات دیگر محققین به روشی توانمند در زمینه بهینه‌سازی تبدیل شد. امروزه این روش در حل مسایل غیرخطی و پیچیده از موفقیت اجرای قابل قبولی برخوردار است [۱۳]. راهبرد بهینه‌سازی این الگوریتم بدین صورت است که با تعدادی کروموزوم که به‌صورت تصادفی تولید شده‌اند (نسل اولیه)، آغاز شده و سپس با استفاده از اصل بقای اصلح داروین، کروموزوم‌های با برازندگی کمتر به‌تدریج از بین رفته و کروموزوم‌های با برازندگی بیشتر باقی می‌مانند. این روند تولید نسل تا جایی ادامه می‌یابد که در نهایت پاسخ‌های مناسب به‌دست آیند [۱۴].

سیستم جرم و فنر این دستگاه به‌صورت افقی بر روی یک سطح یا ریلی پروفیلی شکل سوار شده است. سیستم جرم و فنر بر روی ریلی حرکت می‌کنند که با توجه به نحوه عملکرد وسیله، بر روی آن سوراخ‌هایی برای خروج هوا تعبیه شده است. بنابراین به‌خاطر متعادل بودن و هم راستا شدن جرم و فنرها در حین ارتعاش، باید سطح دارای هندسه خاصی باشد که جریان هوای خروجی باعث حرکت‌های نامنظم جرم‌ها در وسیله نشده و هم راستایی سیستم جرم و فنر حفظ شود. در نمونه‌های خارجی مشاهده شده از این دستگاه، مقطع ریل‌ها به‌صورت مدور و متقارن می‌باشد؛ هندسه ریل انتخاب شده در این نمونه به شکل مقطعی مثلثی است که در مقایسه با مقطع دایره‌ای هم دارای حساسیت کمتر به وجود تقارن سوراخ‌ها بوده و هم این که فرآیند ساخت آسان‌تر و کم هزینه‌تری دارد. جرم‌های ساخته شده مطابق شکل ۱ از سه تکه تشکیل شده‌اند.



شکل ۱- نماهای متفاوت جرم‌ها (۴۵ گرمی)

مشخصات نمونه‌ی اولیه‌ی دستگاه، مطابق جدول ۱ است.

۱mm	قطر سوراخ های هوا	۳
۱۰mm	فاصله سوراخ ها	
۱۰cm	۲۵gr	
۱۳cm	۴۵gr	
۱۷cm	۶۵gr	۴
۱۰۸L/min	دبی کمپرسور	
۹۰	زاویه نبشی	
۲mm	ضخامت بالشتک هوا	

## ۲- مدل سازی:

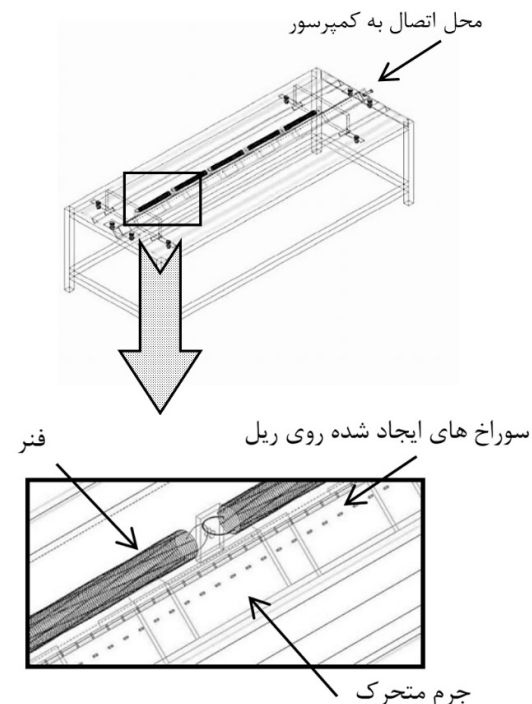
سوراخ‌های عبور هوا بایستی به صورت متقارن در هر دو طرف ریل تعبیه شود. ساده‌ترین نوع چینش سوراخ‌ها به قسمی است که سوراخ‌ها روی خط مستقیم افقی با فواصل مساوی و معین قرار گیرند. ابعاد هر جسم متفاوت است و در طول حرکت، تعداد سوراخ‌های متفاوتی در زیر آن‌ها قرار می‌گیرد. تعادل بین دو متغیر فاصله سوراخ‌ها و قطر سوراخ‌ها به ایجاد فاصله‌ی مناسب بالشتک هوای بین دو جسم و در نتیجه مقدار کمینه‌ی ضریب اصطکاک منجر می‌شود که این موضوع، مبنای بهینه‌سازی انجام شده در این مقاله است. بهینه‌سازی در مورد جرم ۲۵ گرمی که کوچکترین طول تماس با جت هوا را داراست، اجرا می‌شود. با تعمیم روابط، می‌توان در سایر جرم‌ها نیز مقادیر بهینه را بررسی کرد.

### ۲-۱- معادله بقای جرم:

فرضیات در نظر گرفته جهت اعمال قوانین بقای جرم و تکانه شامل حالت یکنواخت جریان سیال، یکنواختی خواص سیال در تمامی مقاطع ورودی و خروجی که از مرزهای حجم معیار عبور می‌کند، جریان پایا و به علت سرعت‌های کم، جریان تراکم ناپذیر است. همچنین برای سهولت در تحلیل از مقاومت هوای خروجی در کلیه خروجی‌ها صرف نظر می‌گردد. شکل ۳ نشان دهنده‌ی حجم کنترل و ورودی ۱ و خروجی ۲ است. خروجی‌های ۳ و ۴، در جهت‌های  $X$  و  $-X$  عمود بر صفحه هستند. در

تکه‌های اول و دوم، نبشی آلومینیومی است که متناسب با سطح زیرین آن بوده و تکه‌ی سوم ورق آلومینیومی با ضخامت مشخص است که فنرها از دو سمت به آن متصل شده و روی نبشی دوم جوش داده شده‌اند. این دستگاه برای آزمایش‌های حداکثر تا چهار درجه آزادی و برای سه نوع جرم مختلف طراحی شده است. جرم‌ها در سه نوع ۲۵، ۴۵ و ۶۵ گرمی ساخته شده‌اند. با توجه به سبک بودن نبشی آلومینیومی برای وزنه‌های ۴۵ و ۶۵ گرمی دو تکه نبشی بر روی هم قرار گرفته تا ابعاد طولی جرم‌ها دچار تغییر بسیار زیاد نشود. در واقع نبشی دوم فقط جهت افزایش وزن جرم استفاده شده است.

یکی از مهم‌ترین بخش‌های این دستگاه، ایجاد بالشتک هوا جهت به حداقل رساندن اصطکاک است. همان‌گونه که اشاره شد، این عمل با ایجاد سوراخ‌های ریزی در مسیر حرکت جرم‌ها بر روی ریل انجام شده که با استفاده از یک منبع تولید هوا مانند یک کمپرسور می‌توان هوا را با سرعت و فشار کافی به زیر سطح جرم‌ها رسانده و تماس سطوح در حین حرکت را از بین برد. شکل ۲ چگونگی حرکت چند جرم بر روی ریل (پروفیل سوراخ‌دار) و نحوه‌ی قرار گرفتن فنرها را نشان می‌دهد.



شکل ۲- چگونگی قرار گرفتن جرم‌ها و فنرها بر روی ریل.

$F_b$  نیروهای حجمی وارد بر حجم معیار و  $F_s$  نیروهای سطحی وارد بر حجم معیار است. برای ورودی ۱، جمله‌ی دوم سمت راست رابطه‌ی (۴) چنین ساده خواهد شد:

$$\int_{C.S} V \rho V . dA = V_1^2 \rho A_1 \cos \theta \quad (۵)$$

در این رابطه  $\theta$  نیم‌زاویه نبشی ریل (و همچنین نیم‌زاویه نبشی جرم متحرک) و  $\rho$  چگالی سیال است. برای خروجی ۲، جمله‌ی دوم سمت راست رابطه‌ی (۵) چنین خواهد شد:

$$\int_{C.S} V \rho V . dA = -V_2^2 \rho A_2 \cos \theta \quad (۶)$$

دبی کمپرسور با  $Q$  نشان داده و در پایان بهینه‌سازی مقدار آن محاسبه خواهد شد. رابطه دبی کمپرسور با سرعت ورودی ۱ چنین است:

$$V_1 = \frac{Q}{2nA_1} \quad (۷)$$

با جای‌گذاری روابط (۵) و (۶) در رابطه‌ی (۴)، معادله بقای تکانه چنین می‌شود:

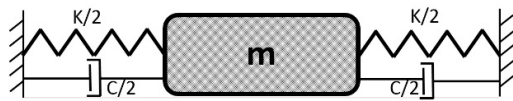
$$-mg = n\rho A_1 V_1^2 \cos \theta - V_2^2 \rho A_2 \cos \theta \quad (۸)$$

### ۲-۳- تحلیل حرکت در راستای ریل (محور X):

با در نظر گرفتن سیستم ارتعاشی آزاد با میرایی ویسکوز، مطابق با شکل ۴، رابطه‌ی زیر به دست می‌آید [۱۶]:

$$m \ddot{x} + c \dot{x} + kx = 0 \quad (۹)$$

در این رابطه  $K$  ثابت فنر،  $C$  ثابت دمپر و  $m$  جرم مورد استفاده در سیستم ارتعاشی است.

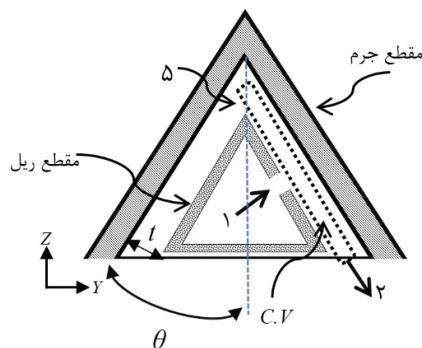


شکل ۴- نمای شماتیک سیستم ارتعاشی یک درجه آزادی با میرایی ویسکوز

برای حل این معادله سه حالت زیرمیرا، میرایی بحرانی و فرامیرا وجود دارد. حالت زیرمیرا، تنها حالتی است که در آن حرکت به صورت نوسانی است. لذا برای حالت زیرمیرا چنین است:

$$\dot{x}(T) = -\zeta \omega_n e^{-\zeta \omega_n T} \left[ c_1 \cos(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n T) + c_2 \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n T) \right] + e^{-\zeta \omega_n T} \left[ -c_1 \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n T) + c_2 \sqrt{1-\zeta^2} \omega_n \cos(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n T) \right] \quad (۱۰)$$

مقطع ۵ به علت تقارن حرکت سیال در عمل ورودی و خروجی سیال وجود نداشته و مسدود فرض می‌شود.



شکل ۳- حجم کنترل مشخص شده در محدوده‌ی بالشتک هوا در مقطع X-Z

برای جسم  $m$  گرمی معادله بقای جرم اعمال می‌شود. پارامتر  $n$  تعداد سوراخ زیر جسم،  $d$  قطر هر سوراخ،  $t$  فاصله بین جرم و ریل (ضخامت بالشتک هوا) و  $L$  طول نبشی است که مستقیماً با جت هوا در تماس است. معادله بقای جرم [۱۵]، رابطه‌ی زیر است:

$$0 = \frac{\partial}{\partial t} \int_{C.V} \rho dV + \int_{C.S} \rho V . dA \quad (۱)$$

به علت برابر بودن سرعت در دو خروجی ۳ و ۴، هر دو سرعت با  $V_3$  نشان داده شده است. با توجه به فرضیات مطرح شده و مطابق با شکل ۴، معادله بقای جرم به دلیل تقارن شکل هندسی به صورت زیر ساده می‌شود:

$$nV_1 A_1 = V_2 A_2 + 2V_3 A_3 \quad (۲)$$

مساحت‌های موجود در رابطه‌ی (۲) به ترتیب، مساحت‌های ورودی ۱، خروجی‌های ۲ و ۳ هستند و از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$\begin{cases} A_1 = \pi \frac{d^2}{4} \\ A_2 = t \times L \\ A_3 = t \times (2.9 \times 10^{-2}) \end{cases} \quad (۳)$$

### ۲-۲- معادله بقای تکانه حجم کنترل اینرسی:

مطابق با شکل ۳، معادله تکانه [۱۵] در جهت  $Z$  نوشته می‌شود.

$$F = F_s + F_b = \frac{\partial}{\partial t} \int_{C.V} V \rho dV + \int_{C.S} V \rho V . dA \quad (۴)$$

$$2V_3 = f(T, \zeta) = \frac{Q}{2} - \sqrt{Lt} \cdot \sqrt{\frac{\rho Q^2 \cos \theta + mg}{n p d^2 \pi \cos \theta}} \quad (16)$$

در پایان با احتساب رابطه‌ی (۱۴)، تابع هدف به دست می‌آید.

$$F = \frac{Q}{2} - \sqrt{Lt} \cdot \sqrt{\frac{\rho Q^2 \cos \theta + mg}{n p d^2 \pi \cos \theta}} \quad (17)$$

$$F = f(T, \zeta) \quad (18)$$

### ۳- روش تحقیق:

بهینه‌سازی با حل طرف دوم رابطه‌ی (۱۷)، یعنی معادله‌ی F آغاز می‌شود. متغیرهای بهینه‌سازی (همان متغیرهای طرف دوم معادله (۱۷))، مقادیر n، t، Q، L، d و θ هستند. تا این مرحله در عمل کلیه شرایطی که لازم است تا به کمترین ضریب اصطکاک دست یافت، حاصل شده‌است. برای یافتن مقدار ضریب اصطکاک متناظر با متغیرهای به دست آمده، آن‌ها را در F جای‌گزین کرده و با استفاده از داده‌های تجربی حاصل از دستگاه و رابطه‌ی (۱۸)، مقدار ζ یا همان C کمینه به دست می‌آید.

با جای‌گذاری مقادیر جرم و چگالی سیال هوا، تابع هدف و فریود مورد نظر به شرح زیر است:

Minimize

$$F = \frac{Q}{2} - \sqrt{Lt} \cdot \sqrt{\frac{1.2Q^2 \cos \theta + 0.245}{1.2nd^2 \pi \cos \theta}} \quad (19)$$

Subject to:

$$1 \leq n \leq 5$$

$$0.002 \leq L - (n \times d)$$

$$0.001m \leq d \leq 0.0283m$$

$$0.03m \leq L \leq 0.2m$$

$$0.00116 \frac{m^3}{s} \leq Q \leq 0.003 \frac{m^3}{s}$$

$$0.001m \leq t \leq 0.003m$$

$$20^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$$

اولین قید این است محدوده n با توجه به حرکت مناسب و متقارن جرم تعیین شده است. وجود یک سوراخ هوا در زیر جرم در حین حرکت، بحرانی‌ترین حالت ممکن و وجود ۵ سوراخ ورودی هوا در زیر جسم مطلوب بوده و تقارن حرکت را تضمین می‌کند. فاصله دو سوراخ بایستی حداقل ۲mm باشد تا پارگی یا چروکیدگی در فضای مابین دو سوراخ ایجاد نشود و سوراخ‌کاری مناسبی را نتیجه دهد. کمینه‌ی محدوده‌ی d با توجه به مته دریل

در این رابطه T زمان نوسانات، ζ نسبت میرایی ویسکوز، ω<sub>n</sub> فرکانس طبیعی و C<sub>1</sub> و C<sub>2</sub> ثابت‌های معادله هستند که از شرایط اولیه به دست می‌آیند [۱۷]. با شرایط اولیه‌ی زیر و پس از چند مرحله ساده‌سازی، معادله ۱۱ چنین خواهد شد:

$$\begin{aligned} \dot{x}_0 &= 0 \\ x(0) &= x_0 \\ x(T) &= \frac{-x_0 \omega_n e^{-\zeta \omega_n T}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n T) \end{aligned} \quad (11)$$

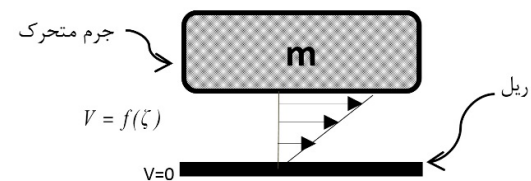
با جای‌گذاری مقدار ω<sub>n</sub> در رابطه‌ی (۱۱)، معادله‌ی (۱۳) به دست می‌آید که ضریبی از معادله نهایی سرعت در جهت X است. در نمونه‌ی اولیه ساخته شده از پنج نوع فنر استفاده شده است که در این مقاله یکی از فنرها با ثابت فنریت K= ۱/۱۱ N/m انتخاب شده است.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{m}} = 4.96 (\text{Rad} / \text{s}) \quad (12)$$

$$\zeta = \frac{c}{2m\omega_n} \quad (13)$$

$$f(T, \zeta) = \frac{-x_0 \omega_n e^{-\zeta \omega_n T}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \sin(\sqrt{1-\zeta^2} \omega_n T)$$

از طرفی برای سیال ویسکوز مطابق با شکل ۵ برای محاسبه سرعت (یکنواخت) سیال با توجه به سرعت جرم متحرک، فرض میانگین سرعت‌های دو طرف سیال، قابل قبول است. پس سرعت سیال در جهت X مطابق رابطه‌ی (۱۴) خواهد شد.



شکل ۵- عبور سیال ویسکوز مابین ریل و جرم متحرک در جهت X

$$V_3 = \frac{f(T, \zeta)}{2} \quad (14)$$

اکنون با جای‌گذاری روابط (۳) و (۷) در رابطه‌ی (۸)، معادله‌ی V<sub>2</sub> بدست می‌آید.

$$V_2 = \sqrt{\frac{\rho Q^2 \cos \theta + mg}{n L t p d^2 \pi \cos \theta}} \quad (15)$$

حال با جای‌گذاری رابطه (۱۵) در رابطه‌ی (۲) و به کمک رابطه‌ی (۳)، سرعت در جهت X چنین می‌شود:

Q(m <sup>3</sup> /s)	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳۰
t(m)	۰/۰۰۲	۰/۰۰۳۰
θ (Degree)	۹۰	۲۰
ζ	۰/۰۳۸	۰/۰۱۱۳

با مراجعه به داده‌های موجود از آزمایشات دستگاه اولیه و رابطه‌ی (۱۸)، مقدار نسبت میرایی ویسکوز ۰/۰۱۱۳ و مقدار ضریب اصطکاک بهینه ۰/۰۲۸ (N.S/m) خواهد شد.

#### ۴- نتیجه گیری:

در این مقاله دستگاه شبیه‌ساز ارتعاشی خطی مدل‌سازی شد و سپس به بهینه‌سازی اصطکاکی دستگاه به روش الگوریتم ژنتیک پرداخته شد. مقدار نسبت میرایی ویسکوز نمونه‌ی اولیه ۰/۰۳۸ است که علاوه بر این که عدد بسیار کوچکی برای دستگاهی با چنین سازه‌ی ساده‌ای است، این ضریب را ۷۰٪ کاهش داده است.

تاثیرات بهینه‌سازی در فرآیند ساخت چنین است:

- قطر سوراخ بهینه از مقدار محدودی d به مقدار قابل توجهی بیشتر بوده و عملیات سوراخ‌کاری راحت‌تری را نتیجه می‌دهد.
- دبی به‌دست آمده در محدوده کاری کمپرسور نمونه اولیه واقع شد و احتیاجی به تعویض کمپرسور اولیه نیست.
- نبشی‌های معمول بازار داخلی دارای زاویه‌ی خاص ۹۰ درجه هستند که با توجه به عدد به‌دست آمده، در عمل بایستی نبشی بهینه به‌صورت سفارشی ساخته شود که باعث افزایش هزینه‌ی ساخت است.

موجود در بازار داخلی و بیشینه‌ی آن مربوط به ضلع مقطع نبشی است که قطر سوراخ نباید از آن بیشتر باشد (به شکل ۱ توجه شود). محدوده‌ی L با توجه به طول ریل دستگاه ساخته شده و نیز تعداد جرم مورد استفاده برای آزمایشات تا پنج درجه آزادی به‌صورت فوق مقید شده است. دبی کمپرسور با توجه به مدل کمپرسور موجود بر روی دستگاه و با فشارهای کارکرد متفاوت، مقید شده است. مقدار ضخامت بالشتک هوا با توجه به ارتفاع گیره‌ی فنر در جرم‌های متحرک و محل اتصال فنرها با تکیه‌گاه، و با حفظ حرکت خطی جرم‌ها، بین دو عدد ۱mm و ۳mm قرار گرفته است. آخرین قید مربوط به زاویه‌ی نبشی مورد استفاده در ریل و جرم‌های متحرک است. نبشی‌های معمول بازار داخلی دارای زاویه‌ی خاص ۹۰ درجه هستند که در صورت به‌دست آمدن جواب دیگری از عملیات بهینه‌سازی، بایستی نبشی بهینه به‌صورت سفارشی ساخته شود.

با در نظر گرفتن موارد زیر توسط الگوریتم ژنتیک و با استفاده از نرم‌افزار MATLAB نتایج جدول ۲ حاصل می‌شود.

- ❖ جمعیت اولیه (Population size): ۱۲۰
- ❖ تعداد فرزندان نخبه (Elite): ۲
- ❖ کسر تلفیق (Crossover fraction): ۰/۸
- ❖ تعداد نسل (Generation): ۱۰۰
- ❖ بازه اولیه (Initial range): {-۸ و ۱۲}

جدول ۲- مقایسه نتایج حاصل از بهینه‌سازی با مقادیر نمونه اولیه‌ی دستگاه ساخته شده

خواص	نمونه‌ی اولیه	نمونه‌ی با اعمال بهینه‌سازی
L(m)	۰/۱۰۰	۰/۱۳۰۰
n	۱۰	۴/۵
d(m)	۰/۰۰۱	۰/۰۲۸

#### مراجع

- [1] Hostens, I., Anthonis, J., Ramon, H. (2005). "New design for a 6 DOF vibration simulator with improved reliability and performance". Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 19, pp. 105–122.
- [2] Hostens, I., Anthonis, J., Kennes, P., Ramon, H. (2000). "Six degrees of freedom test rig design for simulation of mobile agricultural machinery vibrations". Journal of agricultural Engineering Research, Vol. 77, No. 2, pp. 155–169.

- [3] Stewart, D. (1965). "A platform with six degrees of freedom". *Proceedings of the institute of Mechanical Engineering*, Vol. 180, No. 1, pp. 371–386.
- [4] Clijmans, L., Ramon, H., (1997). "The experimental modal analysis technique to study the dynamic behaviour of sprayers". *Optimising pesticide applications*, Vol. 48, pp. 9-16.
- [5] Liu, K., Fitzgerald J., Lewis, F.L. (1993). "Kinematic analysis of a Stewart platform manipulator". *Industrial Electronics, IEEE Transactions*, Vol. 40, No. 2, pp. 282-293.
- [6] Lebet, G., Liu, K., Lewis, F.L. (2007). "Dynamic analysis and control of a Stewart platform manipulator". *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 629-655.
- [7] Dasgupta, B., Mruthyunjaya, T.S. (1998). "Closed-form dynamic equations of the general Stewart platform through the Newton–Euler approach". *Mechanism and Machine Theory*, Vol. 33, No. 7, pp. 993–1012.
- [8] Zhang, C., Song, S. (1993). "An efficient method for inverse dynamics of manipulators based on the virtual work principle". *Journal of Robotic Systems*, Vol. 10, No. 5, pp. 27-605.
- [۹] تیموری جروکانی، ح.، رادمرد، س.، بزرگ، م. (۱۳۸۵). "دستگاه شبیه‌ساز ارتعاشی آنالیز مودال تحت نوسان‌های آزاد و اجباری". پایان‌نامه کارشناسی، دانشگاه یزد، ص. ۳۵–۷۴.
- [۱۰] اورنگی، م. (۱۳۸۹). "استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی سرعت تزریق آب در یکی از مخازن شکاف دار جنوب غربی ایران". مجله اکتشاف و تولید، نشریه فنی- تخصصی شرکت نفت ایران، شماره ۷۴، ص. ۴۸–۴۴.
- [11] Holland, J. (1992). "Adaption in natural and artificial systems". 2<sup>nd</sup> edition, MIT Press Cambridge.
- [12] Goldberg, D.E. (1989). "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning". 1<sup>st</sup> edition, Wesley Longman Publishing.
- [۱۳] مشین‌چی اصل، م.، رئیس، ب. (۱۳۸۷). "بررسی کاربرد الگوریتم ژنتیک در مسایل معکوس مقاومت ویژه الکتریکی"، سیزدهمین کنفرانس ژئوفیزیک ایران، ۱۷ تا ۱۹ اردیبهشت.
- [۱۴] قاری پور، ا.، یوسفیان، ع.، پیراسته، ف. (۱۳۸۷). "بهبود مدل‌های شبکه عصبی با استفاده از الگوریتم ژنتیک موازی سازگارپذیر". دومین کنگره مشترک سیستم‌های فازی و هوشمند ایران، ۷ تا ۹ آبان.
- [15] Robert, W.F., Mcdonald, A. (1985). "Introduction to Fluid Mechanics". 1<sup>st</sup> edition, John Wiley & Sons Inc.
- [16] Peter, J. (2001). "The significance and use of the friction coefficient". *Tribology International*, Vol. 34, pp. 585–591.
- [17] Singiresu, S. (2010), "Mechanical Vibrations". 5<sup>st</sup> edition, Pearson Education Centre.