

دقت بخشی مدل دینامیکی پل بتنی راه آهن توسط الگوریتم برنامه- نویسی ژنتیک

امین شفائی زاده^۱، احمد رضا جعفریان مقدم^{۲*} و علیرضا قاری قرآن^۳

۱. کارشناس ارشد، مهندسی راه آهن، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

۲. استادیار، مهندسی راه آهن، دانشکده عمران و حمل و نقل، دانشگاه اصفهان

۳. استادیار، مهندسی عمران، دانشگاه اصفهان

* ar.jafarian@trn.ui.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۹

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۹

چکیده

از جمله راهکارهای موثر در بهبود ظرفیت خطوط ریلی، افزایش در مولفه های ترافیکی از جمله ارتقای سرعت و بارمحموری است، که این امر، شدت آثار دینامیکی در سازه را به دنبال خواهد داشت. بنابراین کنترل آثار دینامیکی ناشی از بارهای وارد به سازه در سلامت و ایمنی سازه ها بسیار با اهمیت است. بررسی رفتار دینامیکی سازه ها توسط تحلیل عددی از طریق مدل سازی و آزمایشگاهی صورت می گیرد. با این حال، در سازه های پیچیده، نتایج حاصل از داده های تحلیل عددی دارای اختلاف نسبت به داده های آزمایش میدانی است. استفاده از الگوریتم های محاسبات هوشمند^۱ از مهمترین روش های متداول به منظور کاهش خطای مدل عددی می باشد. در نتیجه، پژوهش حاضر سعی دارد با استفاده از الگوریتم برنامه نویسی ژنتیک^۲ (GP)، اختلاف نتایج دینامیکی حاصل از داده های مدل عددی و میدانی پل دو خطه راه آهن آریور بارسا در مسیر مادرید-سویا و تحت بار ترافیکی پرسرعت را به حداقل برساند. الگوریتم پیشنهادی GP قادر است که روابط ریاضی مناسب و ضرائب اصلاحی را معرفی نماید تا بتوان نتایج به دست آمده را برای سازه های مشابه نیز تعمیم داد. پل مورد مطالعه در نرم افزار SAP2000 مدل سازی و نتایج به دست آمده با استفاده از GP، دقت بخشی شد. نتایج نشان داد که الگوریتم پیشنهادی، مقادیر به دست آمده از تحلیل مودال و نیز تاریخچه زمانی را با دقت بیش تری نسبت به مدل اولیه، ارائه می کند. اجرای الگوریتم منجر به کاهش خطا در تحلیل های مودال تا ۱/۸٪ برای مود سوم سازه ای، کاهش ۲۰/۳۱٪ برای مقادیر شتاب و کاهش ۲/۶۸٪ برای تغییر مکان قسمتی از عرشه سازه شد.

واژگان کلیدی: مدل دینامیکی؛ پل بتنی راه آهن؛ پل آریو بارسا؛ دقت بخشی؛ الگوریتم GP.

۱- مقدمه

راه آهن یکی از انواع سیستم‌های حمل و نقل ایمن بار و مسافر به شمار می‌آید [1]. در مسیر توسعه این صنعت، موضوع ارتقای ظرفیت بار و مسافر یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های مدیران بوده است. بدین لحاظ در سال‌های اخیر، افزایش بار محوری و سرعت قطارها در دستور کار بسیاری از دولت‌ها قرار گرفته است [2]. جایگاه و ضرورت موضوع افزایش ظرفیت بار و مسافر تا حدی است که طبق برنامه اتحادیه اروپا، در ۳۰٪ از خطوط ریلی این قاره تا سال ۲۰۳۰ و ۵۰٪ خطوط تا سال ۲۰۵۰، سرعت بهره‌برداری از آن‌ها به 300 km/h افزایش خواهد یافت [3]. دولت سوئیس قصد دارد سرعت سه خط ریلی طولانی خود را از 200 km/h به 250 km/h را افزایش دهد [4]. امروزه کشورهای زیادی، برنامه‌ریزی برای افزایش بار محوری خطوط باری را ضروری می‌دانند؛ کشور هند که در حال حاضر با بارمحوری بیشتر از $22/8 \text{ ton}$ خطوط باری خود بهره‌برداری می‌کند، در نظر دارد تا در آینده آن را تا $32/5 \text{ ton}$ افزایش دهد [5]؛ این درحالیست که آمریکا برای خطوط حمل ذغال‌سنگ خود، بارمحوری را تا 39 ton افزایش داده است [6]. در این زمینه سوئیس از سال ۱۹۶۰ تا کنون بارمحوری خطوط خود را به طور کلی از $22/5 \text{ ton}$ و به 25 ton ارتقا داده و قصد دارد در بعضی خطوط آن را به $32/5 \text{ ton}$ برساند [3].

با این وجود، ارتقای ترافیکی خطوط موجب افزایش آثار دینامیکی بار عبوری به سازه‌های مرتبط با آن از جمله پل‌ها می‌شود. به منظور اندازه‌گیری میزان افزایش آثار و بررسی این که وضعیت سازه پل از نظر پایداری چگونه خواهد بود، لازم است بر اساس روش‌های دقیق، وضعیت سازه مدل‌سازی و تحلیل شود. روچا^۱ و همکاران برای رسیدن به یک روش احتمالاتی برای تحلیل پاسخ دینامیکی یک پل با دهانه کوتاه، از مدل‌سازی عددی المان دو بعدی تیر در محیط یک نرم‌افزار اجزای محدود استفاده کردند و سپس با الگوریتم احتمالاتی مونت‌کارلو^۲ مقادیر و سهم تاثیر متغیرهای تصادفی را در پاسخ پل تعیین نمودند [7].

کانترو و کارومی^۳ با فرض این که بیشترین اثر بار قطار در وسط دهانه پل رخ می‌دهد، به بررسی وضعیت پل به صورت تحلیل اندرکنشی با روش اجرای محدود^۴ (FE) پرداختند. نتایج تحقیق نشان داد که خطای مقادیر شتاب در ارتعاش‌های بالا، افزایش می‌یابد [8].

استفاده از روش‌های عددی، نمی‌تواند تنها ملاکی دقیق برای تصمیم‌گیری باشند. بلکه لازم است در مقیاس‌های امکان پذیر برای سازه‌ها، اندازه‌گیری‌های میدانی نیز صورت پذیرد تا میزان درستی تحلیل عددی، مورد بررسی قرار گیرد. ژانگ^۵ و همکاران به وسیله داده‌های میدانی، آنالیز دینامیکی اندرکنش بین پل و قطار را مورد بررسی قرار دادند. نتایج این پژوهش به افزایش نیروهای طولی و قائم و همچنین پاسخ‌های دینامیکی پل و قطار به ازای ارتقای سرعت اشاره دارد [9].

لازم به ذکر است که استفاده از روش‌های عددی مستلزم ارائه داده‌های دقیق و لحاظ شرایط واقعی در مدل است. ولی با این حال، مقداری خطا در نتایج نسبت به داده‌های میدانی، به ویژه برای سازه‌های پیچیده، وجود خواهد داشت. در واقع دقت مدل-های عددی، با داده‌های میدانی مورد سنجش قرار می‌گیرد [10,9]. زنگنه و همکاران به بررسی اثر وضعیت خاک پیرامون یک پل روی پاسخ‌های دینامیکی قابی شکل آن، پرداخته است. نتایج نشان داد که ضمن هماهنگی خوب داده‌های عددی با میدانی، در محدوده فرکانس بالای 60 Hz ، انحراف نتایج از آزمون‌های میدانی بیشتر می‌شود [11].

میزان دقت مدل‌های عددی در شرایط ارتقای ترافیکی از اهمیت بالاتری برخوردار است. بدین جهت از روش‌های دقت‌بخشی برای به حداقل رساندن خطای نتایج ناشی از تحلیل-های عددی، استفاده می‌شود [12]. در راستای دقت‌بخشی بیش تر به مدل عددی، استفاده از الگوریتم‌های محاسباتی هوشمند یکی از متداول‌ترین روش‌ها برای رسیدن به این مقصود است [12,13]. کوستا^۶ و همکاران براساس پارامترهای مودال و داده-های میدانی، مدل عددی معرفی شده برای یک پل با مصالح

4. Finite Elements
5. Zhang
6. Costa

1. Rocha
2. Monte Carlo method
3. Cantero & Karoumi

سنگی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک، اصلاح نمودند و بدین وسیله پارامترهای مدل عددی نیز به روزرسانی شد. خروجی این مقاله به کاهش خطای داده‌های عددی با مقادیر میدانی به عنوان داده‌های واقعی منجر شد [12]. نتایج کالیبراسیون مدل در این مطالعه هماهنگی بسیار خوبی بین پاسخ عددی و اندازه‌گیری‌های تجربی نشان داد. به عبارتی در مقایسه با نتایج مدل عددی قبل از کالیبراسیون، آنها نشان دادند که مدل کالیبره شده، پیشرفت‌های قابل توجهی در شبیه‌سازی پارامترهای مدال داشته است. به شکلی که با انحرافات کوچکتر فرکانس‌های عددی به دست آمده نسبت به فرکانس‌های تجربی، و با افزایش ضرایب شاخص اطمینان مودال (MAC) عددی و تنظیمات مودال تجربی، نتایج بهینه‌سازی تمایل به کاهش سختی عناصر سازه‌ای پل را نشان داد، که این امر مطابق با نتایج بازرسی چشمی نیز می‌باشد. لازم به ذکر است که فرآیند دقت‌بخشی در مقاله حاضر بسیار مشابه فرآیند انجام شده در این مقاله است. با این وجود، فرآیند معرفی شده در مطالعه کوستا و همکاران [12]، میزان و چگونگی بهینه‌سازی فاکتورها و پارامترهای موثر را نشان نمی‌دهد. در مقاله حاضر با استفاده از الگوریتم پیشنهادی GP، ضرایب و میزان بهبود و اصلاح پارامترها به خوبی نشان داده می‌شود.

مالویرو^۲ و همکاران نیز توسط الگوریتم ژنتیک، مدل دینامیکی پل‌هایی با عرشه پیش ساخته را با استفاده از اندازه‌گیری‌های میدانی، بروزرسانی کردند، تا مدل ایجاد شده حداقل اختلاف ممکن را با واقعیت داشته باشد. در این راستا با اجرای الگوریتم، مقادیر مربوط به مشخصات پل از جمله مدول الاستیسیته و سختی اصلاح شد. نتایج حاصل ایجاد همگرایی بیشتر بین داده‌های میدانی و مدل عددی است [13].

با توجه به اهمیت موضوع دقت‌بخشی در تحلیل‌های عددی برای برنامه‌ریزی به منظور ارتقای شرایط ترافیکی، پژوهش حاضر نیز با استفاده از الگوریتم برنامه‌نویسی ژنتیک (GP)، نتایج مدل عددی، مقادیر مدول الاستیسیته، مقادیر ابعادی و وزنی سازه را تعدیل می‌کند. برای این منظور از داده‌های تحلیلی و میدانی

پژوهش گالوین^۳ و همکاران، به عنوان مطالعه موردی استفاده شده است [14]. پژوهش گالوین و همکاران، پل دو خطه ریلی آریو براسا^۴ که در محور ریلی بین دو شهر سویا و مادرید قرار دارد را با استفاده از دو روش عددی اجزا محدود و نیز برداشت-های میدانی، مقادیر پارامترهای دینامیکی را مقایسه کرده است. الگوریتم پیشنهادی در پژوهش حاضر علاوه بر پوشش خطای ابزارهای اندازه‌گیری در روش آزمایش میدانی، تاثیر خطاهای فرآیند اجرا نسبت به نقشه‌های طراحی شده را نیز مد نظر قرار می‌دهد.

لین^۵ و همکاران یک مدل عددی اجزا محدود را با استفاده از نرم‌افزار ANSYS و روش بهینه‌سازی متامدل عمومی و مبتنی بر پاسخ تحلیل تازیکه زمانی نقاط مشخص و مرزی، به هنگام عبور ترافیک از روی پل معلق با دهانه بزرگ به روزرسانی کردند. نتایج مدل با دقت مناسب همراه بود. عدم ارائه یک رابطه ریاضی مناسب و بیان ارتباط بین فاکتورهای تاثیرگذار از مهمترین کاستی‌های این پژوهش است [15]. شی^۶ و همکاران نیز با استفاده از روش حداقل مربعات برای کاهش خطای شرایط مرزی و یک مدل شبیه‌سازی شده عددی و آزمایشگاهی، مدل عددی را پیشنهاد داده‌اند. با توجه به عدم پیاده‌سازی مدل روی یک سازه واقعی، بنابراین مدل عددی پیشنهادی به دلیل اختلاف در شرایط واقعی، منجر به خطا خواهد شد. همچنین عدم اصلاح روابط عددی و ارائه یک رابطه ریاضی دقیق، از دیگر نقایص پژوهش است [16]. گائو^۷ و همکاران بر ایجاد یک مدل اندرکنشی مسیر اسلب ترک (دالخط) حرکت قطار و اصلاح مدل براساس داده‌های مودال با استفاده از GA تمرکز داشته‌اند. در مقایسه با این پژوهش، مقاله حاضر به بررسی رفتار سازه پل به جای تاثیر اندرکنشی خط و قطار با استفاده از GP می‌پردازد [17]. مالویرو^۸ و همکاران به تحلیل و دقت‌بخشی داده‌های دینامیکی یک پل بتنی و فلزی (کامپوزیتی) براساس داده‌های میدانی با استفاده از GA پرداخته‌اند [18].

5. Lin
6. Shi
7. Gao
8. Malveiro

1. Modal Assurance Criterion
2. Malveiro
3. Galvín
4. Arroyo Bracea

پل در مدل معرفی شد. قطار S103 با سرعت عبوری حداکثر 279 km/h ، در میان انواع ترافیک‌های عبوری از روی پل، دارای بیشترین سرعت است، و بدین منظور در این تحلیل برای بررسی بحرانی‌ترین شرایط بارگذاری، این قطار مد نظر قرار گرفته است. با این حال عبور هم زمان دو قطار از روی پل، با توجه به احتمال بسیار ضعیف آن، مد نظر قرار نگرفت. در ادامه برای بررسی نتایج رفتار دینامیکی سازه، مدل ایجاد شده از پل در دو حالت مودال و تاریخچه‌ی زمانی تحلیل و بررسی شدند. نتایج حاصل از اجرای مدل، در جداول (۲) و (۳) ارائه شده است [14].

۲-۲- برداشت داده‌های میدانی

با هدف کنترل رفتار سازه‌ای به دست آمده از مدل عددی، رفتار سازه در شرایط تحلیل مودال و نیز در شرایط ناشی از عبور بار ترافیکی قطار S103، به صورت میدانی نیز اندازه گیری شده است. لازم به توضیح است که در اندازه‌گیری، با توجه به سختی بالای به دست آمده ناشی از مشخصات دینامیکی سازه‌های خاکی پیرامون پل در پژوهش گالوین و همکاران [14]، اثر آن‌ها در تحلیل‌ها صرف نظر شده است. برای اندازه‌گیری میدانی رفتار سازه، در ۱۱ نقطه از عرشه پل و یک نقطه روی تکیه‌گاه تیر میانی، شتاب‌سنج‌های پیزوالکتریک^۵ نصب شده‌اند.

بنابراین در مقایسه با مطالعات پیشین، در مقاله حاضر به منظور دقت بخشی داده‌های دینامیکی از الگوریتم GP استفاده شده است که دارای دقت بیشتر است و امکان اصلاح ضرایب فاکتورهای تاثیرگذار در تحلیل سازه‌های را فراهم می‌کند. بر این اساس، این پژوهش سعی در پاسخ به سوالات ذیل دارد: استفاده از الگوریتم برنامه‌نویسی ژنتیک (GP)، چه میزان در دقت بخشی نتایج موثر خواهد بود؟ بر اساس ضرائب ارائه شده توسط الگوریتم برای داده‌های ورودی، چه پارامترهایی بیشترین تاثیر را در افزایش دقت مدل دارند؟

۲- مطالعه موردی: پل آریور براسا

سازه مورد مطالعه، یک پل دوخطه راه آهن است که از دو دهانه یکسان و به طول $15/25 \text{ m}$ با تکیه‌گاه ساده^۱ در مسیر ریلی مادرید-سویا^۲ قرار داد. این خط ریلی از جمله خطوط پر سرعت راه آهن اسپانیا به شمار می‌آید. سازه پل دارای بیه ای^۳ به زاویه 45° درجه است. تیرهای بکار رفته از نوع I شکل بوده و به صورت پیش تنیده ساخته شده است که در محل تکیه‌گاه‌ها روی لایه‌های ارتجاعی (نئوپرن^۴) قرار گرفته‌اند. دو خط بالاستی به فاصله $2/15 \text{ m}$ از هم قرار دارند و در دو طرف پل، پیاده‌رو و نرده فلزی تعبیه شده است [14]. شکل (۱) نمایی از مقطع عرضی پل و به همراه ابعاد اجزای آن نشان داده است. مقادیر مربوط به مولفه‌های سازه‌ای این پل براساس داده‌های پژوهش گالوین و همکاران، در جدول (۱) ارائه شده است.

۲-۱- مدل سازی عددی

رفتار دینامیکی سازه پل آریو براسا، براساس مشخصات سازه-ای و هندسی موجود، به روش تحلیل عددی و در نرم‌افزار SAP2000 مدل سازی شده است. سپس شرایط بارگذاری ناشی از ترافیک قطار پرسرعت تحت عنوان S103 نیز به همراه بار مرده ناشی از وزن روسازی بالاستی واقع در روی

4. Neoperan
5. Piezoelectric Accelerometers

1. Simply supported
2. Madrid-Sevilla
3. Oblique

شکل ۱. مقطع عرضی عرشه‌ی پل مورد مطالعه (واحد مقادیر متر است) [۱۴]

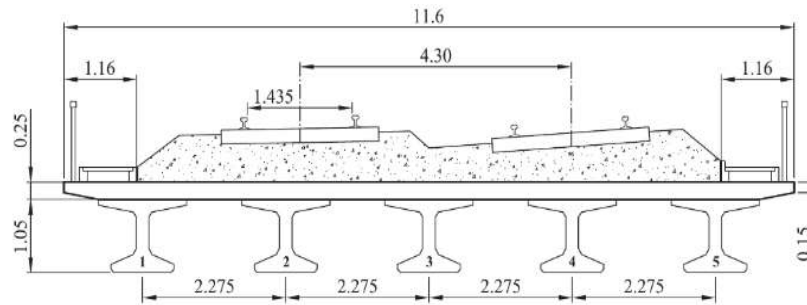


Fig. 1. The deck cross section of the bridge under study (The unit of values is meter) [۱۴]

جدول ۱. مشخصات سازه‌ای پل آریو براسا [۱۴]

E_{plate} (pa)	μ_{plate}	ρ_{plate} (kg/m^3)	m_{ad1} (kg/m^3)	m_{ad2} (kg/m^3)	$K_{v,dyn}$ (N/m^2)	$K_{v,st}$ (N/m^2)	$I_{x,h}$ (m^4)	$I_{x,v}$ (m^4)	J_x (m^4)	A_x (m^2)	E_x (pa)	ρ_x (kg/m^3)
3.99E10	0.2	2500	232	1015	7 E8	1.4E9	0.088	0.0428	8.467 E-3	0.5355	4.6E10	2500

Table 1. Specifications of structures Arroyo Bracea Bridge [14]

شکل ۲. موقعیت قرارگیری شتاب‌سنج‌ها روی عرشه پل [۱۴]

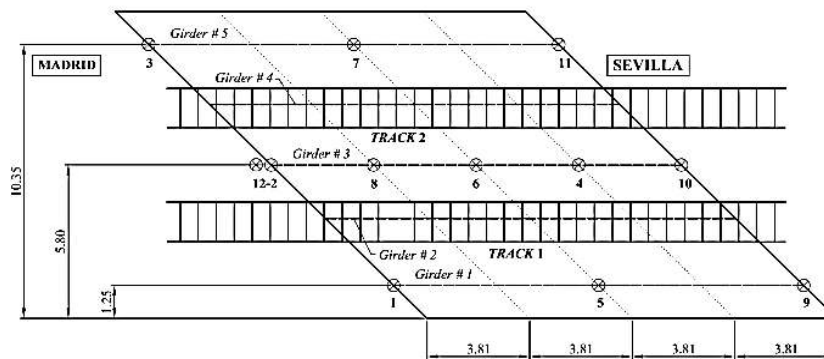


Fig. 2. Location of accelerometers on the bridge deck [14]

جدول ۲. مقادیر فرکانس به دست آمده ناشی از تحلیل مودال سازه‌ی پل به دو روش مدل عددی و برداشت میدانی

Modal No.		Analysis	
3	2	1	
13.11	10.80	9.30	Numerical f_{num} (Hz)
12.75	10.63	9.25	Field test f_{exp} (Hz)

Table 2. Frequency values obtained from modal analysis of bridge structure by two methods of numerical model and field test

جدول ۳. نتایج پارامترهای دینامیکی پل حاصل از تحلیل سازه‌ی پل به دو روش مدل عددی و برداشت میدانی ناشی از عبور قطار S103

Dynamic parameters					Analysis
d_{10} (* $10^{-4}m$)	a_{10} (m/s^2)	a_6 (m/s^2)	a_5 (m/s^2)	a_4 (m/s^2)	
1.08	0.42	1.19	1.77	1.62	Numerical
1.12	0.29	1.02	1.04	0.889	Field test

Table 3. Results of bridge dynamic parameters obtained from structural analysis of the bridge by two methods: numerical model and field perception due to S103 train crossing

به صورت یک رابطه ریاضی ارائه می‌کند [21]. این موضوع می‌تواند به عنوان رابطه‌ای کاربردی برای سایر پل‌ها با شرایط مشابه پل تحلیل شده در این مقاله، مورد استفاده قرار گیرد. در الگوریتم GP پیشنهادی، گام‌های زیر به ترتیب طی می‌شود تا بهینه‌سازی صورت گیرد:

۳-۱- ایجاد جمعیت اولیه

ابتدا از بین داده‌های ورودی، جمعیت^۳ اولیه‌ای که مجموعه‌ای از جواب‌هاست، ایجاد می‌شود. این جمعیت به طور تصادفی^۴ و به صورت درختی با توجه به عملگرهایی^۵ که در برنامه تعیین می‌شود، شکل می‌گیرد. در الگوریتم پیشنهادی، اندازه جمعیت^۶ ایجاد شده متناسب با مسئله، ۷۰ در نظر گرفته شده است (جدول ۴).

۳-۲- ارزش‌گذاری متناسب با تابع هدف^۷

این مرحله به ازای هر یک از اعضای جمعیت اولیه، شاخصی برای ارزیابی تعیین می‌کند تا معرف آن عضو از جمعیت باشد؛ مجموعه‌ای از این شاخص‌ها به صورت یک بردار تهیه می‌شود. ملاک ارزش‌گذاری، تابع هدف الگوریتم است. به عبارت دیگر تمامی تحلیل‌ها و تولید نسل‌ها همانگ با تابع هدف مسئله انجام می‌شود. تابع هدف در واقع یک رابطه ریاضی برای ارزیابی و سنجش رابطه ریاضی بین متغیرهای مستقل و وابسته با عملگرهای مدنظر در الگوریتم است. در فرآیند اجرای الگوریتم، سعی می‌شود بهترین مقدار ضرائب برای هر یک از آرایه‌های این رابطه تعیین شود. از میان جمعیت، عضوایی که به آرایه‌های تابع هدف نزدیک‌تر هستند، دارای ارزش بیش‌تری خواهند بود. همچنین در صورت عدم وزن یکسان اعضای جمعیت، برداری برای وزن‌دهی به اعضا قابل تعریف است. محاسبات روی بخشی از جمعیت، انجام می‌شود؛ بدین منظور از ضرائب جریمه^۸ نیز در محاسبات، استفاده می‌شود. در الگوریتم پیشنهادی، هدف رسیدن به جوابی با کمترین میزان میانگین مربعات خطا

موقعیت شتاب‌سنج‌ها روی عرشه پل، در شکل (۲) قابل مشاهده است. نتایج برداشت شده برای ۳ مود اول سازه در حالت مودال در جدول (۲)، و نتایج حاصل از عبور قطار S103 در جدول (۳) به همراه نتایج حاصل از مدل عددی، ارائه شده است. لازم به ذکر است که در این پژوهش، درستی‌آزمایی در سه مود اول صورت می‌گیرد. زیرا از منظر آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله (استاندارد ۲۸۰۰ ایران) [19]، سهم مشارکت مودهای بالاتر در رفتار سازه بسیار جزئی است و از این رو، آنها را مودهای هرز فرض می‌کند. همچنین به منظور کاهش حجم محاسبات تحلیل‌ها، مودهای بالاتر را در نظر نمی‌گیرد. آندرسون و کارومی^۱ نیز، سه مود اول را تاثیرگذار دانسته و ملاک بررسی قرار داده‌اند [3].

همچنین شکل مود و میرایی در مطالعه موردی با استفاده از شاخص اطمینان مودال (MAC) توسط گالوین و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است. MAC هماهنگی مودهای مورد نظر را نسب به مودهای حاصل از نتایج میدانی (داده‌های واقعی) ارزیابی می‌کند. این شاخص، مقادیری بین ۰ تا ۱ دارد که هر چه هماهنگی بیشتر باشد، به ۱ نزدیک‌تر خواهد بود. براساس مطالعات گالوین و همکاران حداقل شاخص MAC، ۰/۹۳ است که هماهنگی بسیار خوبی را نشان می‌دهد [14].

۳-۳- الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر GP

هدف این پژوهش در بهینه‌سازی مدل، کاهش اختلاف مقادیر داده‌های مدل عددی با نتایج میدانی است و الگوریتم ژنتیک (GA^۲)، از پرکاربردترین روش‌ها برای دستیابی به این هدف است [20]. در این تحقیق، الگوریتم GP، مورد استفاده قرار گرفته است که بسیار مشابه فرآیند و عملکرد الگوریتم ژنتیک است و مبتنی بر تئوری تکاملی بیولوژیک است. با این تفاوت که خروجی الگوریتم، به جای ارائه مقادیر اصلاح شده از داده‌های اولیه، بهترین وجه ارتباط بین متغیرهای مستقل و وابسته را

5. Symbols
6. Population size
7. Fitness Function
8. Penalty parameters

1. Andersson and Karoumi
2. Genetic Algorithm
3. Population
4. Random

متعدد الگوریتم روی داده‌های فرضی، میزان احتمال بروز ترکیب یا جهش برای ایجاد فرزند در الگوریتم پیشنهادی به ترتیب ۰/۷ و ۰/۳ تنظیم شد.

شکل ۳. نمایش فرآیند ترکیب و جهش در ایجاد ژنوم فرزندان از والدین

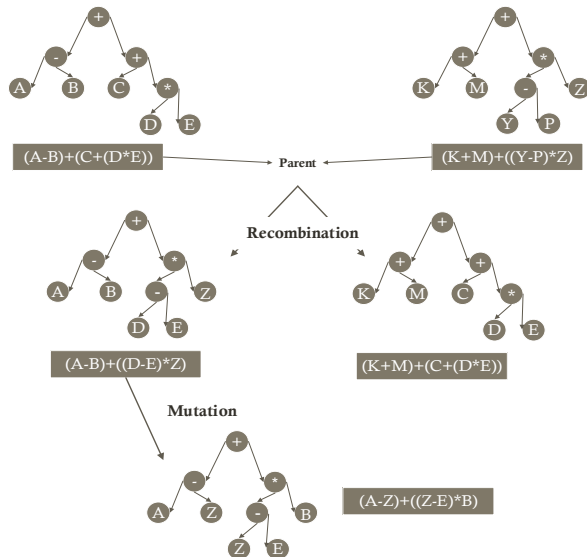


Fig. 3. Show the process of crossover and mutation in the creation of the offspring genome of the parent

۳-۵- تولید پاسخ و تکرار فرآیند

این مرحله بهترین پاسخ که متشکل از جمعیت با بهترین شاخص ارزش‌گذاری است را به صورت یک عبارت ریاضی به همراه مقدار تابع هدف، ارائه می‌کند. پاسخ ارائه شده البته بهترین پاسخ ممکن برای مسئله مدنظر نخواهد بود، بلکه بهترین پاسخ از میان بخشی از جمعیتی است که انتخاب شده است. با توجه به پیچیدگی مسئله و میزان دقت مدنظر برای مسئله، این فرآیند محاسبه و تولید نسل برای رسیدن به پاسخ بهتر به طور حلقوی تکرار می‌شود. در مرحله پاسخ، بعد از اجرای هر حلقه، بهترین پاسخ^{۱۱} از میان جمعیت ایجاد شده توسط حلقه، ارائه می‌شود.

(MSE) می‌باشد؛ این مفهوم بیانگر متوسط اختلاف میان مقادیر بدست آمده برای متغیر وابسته از طریق الگوریتم با مقدار دقیق آن است و از طریق رابطه ۱ به دست می‌آید:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \quad (1)$$

۳-۳- انتخاب والدین برای ایجاد نسل بعدی

برای ایجاد نسل بعدی از میان جمعیت موجود، افرادی به عنوان والدین انتخاب می‌شوند که در واقع جواب‌های انتخاب شده خواهند بود. فرآیند انتخاب به یکی از سه روش تورنمنت^۲، چرخ رولت^۴ و یا تصادفی امکان‌پذیر است. پارامتری تحت عنوان فاصله نسلی^۵ وجود دارد که تعیین می‌کند چه نسبت از جمعیت اولیه، با جمعیت بعدی که نسل جدید را شکل می‌دهند، جایگزین شود [22]. این شاخص مقداری بین ۰ تا ۱ را دارد. در الگوریتم پیشنهادی از روش چرخ رولت و میزان شاخص ۰/۸ استفاده شده است.

۳-۴- ایجاد نسل جدید (فرزندان)

برای ایجاد نسل جدید، از عملگرهای ترکیب^۷ و یا جهش^۸ در ژن‌های والدین در جمعیت اولیه، استفاده می‌شود. در ترکیب، با جایگزینی قسمتی از ژن پدر با قسمتی از ژن مادر، ژن فرزند را که عضوی از جمعیت نسل جدید به حساب می‌آید، ایجاد می‌کند. در الگوریتم پیشنهادی، ترکیب می‌تواند به صورت یک نقطه‌ای صورت گیرد، که محل قرارگیری نقاط نیز به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در حالت جهش نیز، بخشی از ژن‌های والدین به صورت جهش یافته ژنتیکی، ترکیب شده و ژن فرزند را تشکیل می‌دهد. در واقع ترکیب به شدت بخشی^۹ حول محدوده انتخابی والدین و جهش به تنوع بخشی^{۱۰} در محدوده جمعیت که مجموعه جواب‌های ما هستند، می‌پردازد. شکل (۳) چگونگی اجرای این دو عملگر را نمایش می‌دهد. پس از اجرا

7. Crossover
8. Mutation
9. Intensify
10. Diversify
11. Best Solution

1. Mean Squared Error
2. Generation
3. Tournament selection
4. Roulette wheel selection
5. Generation gap
6. Offspring

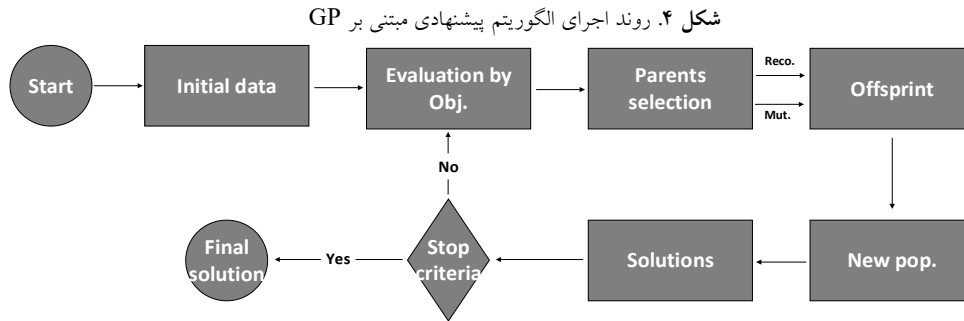


Fig 4. The process of GP algorithm proposed

جدول ۴. مشخصات الگوریتم GP متناسب با مدل عددی

Run time (s)	Iteration	Tree length	Pop. size	Variables No.
49	100	9	70	8

Table 4. The specifications of the GP algorithm fit the numerical model

جدول ۵. مقادیر متغیرهای مستقل روش عددی برای الگوریتم پیشنهادی

Ref.	Error percent	Range of value	SD	Avg.	Quantity	Var.
[23]	2.67	3921-4059	39.07	3988.95	$* 10^7 Pa$	E_{plate}
[24]	2.2	2445-2555	33.29	2498.19	kg/m^3	ρ_{plate}
[24]	2.2	226-238	3.65	231.97	kg/m^2	m_{ad1}
[24]	2.2	992-1038	13.41	1015.09	kg/m^2	m_{ad2}
[25]	1	8717-8888	49.86	8799.98	$* 10^{-5} m^4$	$I_{x,h}$
[25]	1	42372-43228	244.58	42805.92	$* 10^{-6} m^4$	$I_{x,v}$
[23]	2.67	4520-4680	46.1	4598.08	$* 10^7 m^4$	E_x
[25]	1	5301-5409	31.16	5354.92	$* 10^{-4} m^4$	A_x

Table 5. Values of independent variables of numerical method for the proposed algorithm

جدول ۶. مقادیر متغیرهای وابسته تعیین شده برای الگوریتم پیشنهادی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی و خطای تجهیزاتی

Ref.	Error percent	Range of value	SD	Avg.	Quantity	Var.
[26]	± 0.01	924-926	0.817	924.944	$* 10^2 Hz$	f_1
[26]	± 0.01	1062-1064	0.814	1062.98	$* 10^2 Hz$	f_2
[26]	± 0.01	1274-1276	0.813	1275.004	$* 10^2 Hz$	f_3
[26]	± 0.01	1791-1793	0.816	1792.025	$* 10^2 Hz$	f_4
[26]	± 0.01	2456-2458	0.817	2456.95	$* 10^2 Hz$	f_5
[27]	0.56 %	8885-8895	3.0999	8890.03	$* 10^4 m/s^2$	a_4
[27]	0.56 %	10370-10429	17.548	10400.282	$* 10^4 m/s^2$	a_5
[27]	0.56 %	10171-10228	16.444	10199.48	$* 10^4 m/s^2$	a_6
[27]	0.56 %	289-1902	1.404	2899.94	$* 10^4 m/s^2$	a_{10}
[28]	0.56 %	111720-112280	16.654	111996.90	$* 10^{-9} m$	d_{10}

Table 6. Values of dependent variables determined for the proposed algorithm based on laboratory data and equipment error

۳-۶- شرط توقف الگوریتم

این الگوریتم با تامین شرط توقف، چرخه تولید جمعیت و ارائه پاسخ را متوقف می کند. شرط توقف در الگوریتم پیشنهادی، رسیدن به یک تعداد تکرار مشخص (۱۰۰) و دستیابی به خطای (MSE) کمتر از ۰/۰۵ است. لازم به ذکر است که به منظور تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی، ابتدا الگوریتم در چند مرحله روی داده های موجود اجرای شد، و در نهایت تنظیم پارامترهایی که منجر به خطایی کمتر از ۰/۰۵ ($MSE < 0.05$) شد، برای ادامه فرآیند دقت بخشی مورد توجه قرار گرفت. بنابراین در الگوریتم پیشنهادی، میزان هماهنگی رابطه معرفی شده با داده های واقعی، دارای خطایی کمتر از ۰/۰۵ خواهد بود، که این امر نشان از دقت بسیار مناسب الگوریتم دارد. جدول (۴) چگونگی تنظیم پارامترهای الگوریتم پیشنهادی GP را ارائه کرده است. شکل (۴) روند فلوجارت اجرای الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر GP را نشان می دهد.

۴- مدل سازی مسئله**۴-۱- تعیین متغیرهای مستقل و وابسته**

الگوریتم پیشنهادی GP رابطه ریاضی منطقی بین متغیرهای وابسته و مستقل با کم ترین خطا را معرفی می کند. بدین منظور، ابتدا لازم است که متغیرهای وابسته و مستقل و محدوده خطای هر یک تعیین شود. از آن جا که پارامترهای مدول الاستیسیته، جرم و ابعاد سازه در رفتار دینامیکی آن نقش اساسی دارد و سایر پارامترها از آن ها حاصل می شود، در مدل سازی مسئله، از این پارامترها به عنوان متغیرهای مستقل مسئله، استفاده شده است. با توجه به این که مقادیر متغیرهای مستقل پیش فرض برای عددی، دارای خطا یا اختلاف با مقادیر واقعی هستند، برای هر یک از متغیرها، بازه خطا در نظر گرفته شده است. این اختلاف می تواند ناشی از خطاهای اجرایی در زمان ساخت پل نسبت به نقشه های طراحی، اجرای عملیات مقاوم سازی یا ناشی از استهلاک حاصل از بهره برداری باشد. با تعیین دامنه عددی خطا، داده های مورد استفاده و نیز واقعی، در بازه خطای تعیین شده

خواهند بود و الگوریتم می تواند در این دامنه مقادیر، جواب مناسب را ارائه نماید. لازم به ذکر است که به منظور هم سطح نمودن داده ها، از توزیع نرمال استفاده شده است.

مقادیر مورد نظر جداول (۵ و ۶) در دو مدل عددی را نشان می دهند. میزان خطای فرض شده برای هر متغیر، از پژوهش های مرتبط اخذ شده است که در جداول (۵ و ۶) قابل مشاهده است. فرکانس شکل های مودی اولیه، شتاب و تغییر مکان حاصل از برداشت های میدانی متغیرهای وابسته مسئله هستند. جدول (۶)، میزان خطای دستگاه های مورد استفاده را نشان می دهد. مشابه متغیرهای مستقل، داده های مرتبط با متغیرهای وابسته نیز در قالب توزیع نرمال، در الگوریتم مورد استفاده قرار می گیرند. به منظور بررسی و تضمین استقلال متغیرهای ورودی جدول (۵) به الگوریتم پیشنهادی، از آزمون فرض کای دو استفاده شد که در نرم افزار تحلیل آماری SPSS پیاده سازی شد. بعد از اجرای آزمون، مقدار pvalue برابر با ۰/۲۳۷ شد. از آنجا که این مقدار از ۵ درصد بیشتر است، با اطمینان ۹۵ درصد می توان گفت که متغیرهای ورودی، مستقل هستند [29].

لازم به ذکر است که، داده های اولیه سازه، شامل ابعاد و مشخصات اعضای سازه می باشد، و داده های خروجی شامل فرکانس ۳ شکل مودی اول سازه در تحلیل مودال و تغییر مکان و شتاب روی عرشه پل در تحلیل تاریخچه زمانی نتایج و خروجی های مدل عددی خواهند بود. بنابراین به منظور مدل سازی، ابتدا مشخصات مصالح، به همراه ابعاد و چگونگی اتصالات آن ها، اعمال می شود، و سپس بارهای اعمالی به سازه (بارهای مرده و زنده) به مدل معرفی می شوند. در پایان با اجرای الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصل از مدل با نتایج برداشت شده از اندازه گیری میدانی، مورد بررسی و مقایسه قرار می گیرد.

۴-۲- اجرای الگوریتم پیشنهادی

الگوریتم پیشنهادی مبتنی بر GP، در ابتدا مقادیر واقعی متغیرهای مستقل که بیش از ۱۰۰۰ رکورد است را دریافت می کند و به ایجاد یک جمعیت تصادفی با فرآیند درختی با طول مشخص^۲ می پردازد (جدول ۴). در این الگوریتم، از عملگر

برداشت‌های میدانی است و ستون‌های خاکستری پررنگ و کم-رنگ به ترتیب مربوط به نتایج قبل و بعد از اجرای الگوریتم برای مدل عددی است.

نتایج حاصل از اجرای الگوریتم GP نشان می‌دهد که روش پیشنهادی، در اصلاح مقادیر شتاب‌ها و تغییر مکان حاصل از مدل، تاثیر بیش‌تری داشته است. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، مقدار اختلاف فرکانس‌های سازه حاصل از تحلیل مودال برای ۳ مود اول سازه به ترتیب از ۰/۵٪ خطا به ۰/۴۳٪، از ۱/۶٪ به ۰/۷٪ و از ۲/۸۲٪ به ۱/۸۸٪ کاهش یافته است. در شکل (۶)، بررسی نتایج حاصل از مدل قبل و بعد از استفاده از الگوریتم GP در مقایسه با داده‌های میدانی نشان می‌دهد که همه داده‌ها بهبود یافته و تا حداکثر ۲۰/۳۱٪، اختلاف را کاهش داده است. این موضوع برای مقادیر تغییر مکان به دست آمده از سنسور شماره ۱۰ نیز صادق است؛ به طوری که در خطای داده‌های مربوط به تغییر مکان ایجاد شده در عرشه، مقدار خطا از ۶/۲۵٪ خطا به ۳/۵۷٪ کاهش یافته است (شکل ۷).

«جمع» برای وجه ارتباط متغیرهای مستقل برای ایجاد یک رابطه ریاضی، استفاده شده است. فرآیند انتخاب از میان جمعیت با روش تورنمنت انجام می‌شود. فاصله بین نسلی برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده است. دو ضریب پنالٹی با مقادیر ۰/۲ و ۳۰ در محاسبات تنظیم شده‌اند.

سایر پارامترهای جدول (۴) الگوریتم پیشنهادی را ارائه کرده است. جدول (۷) مقادیر مربوط به متغیرهای مستقل و وابسته حاصل از بهترین پاسخ‌های مدل عددی را به همراه روابط ریاضی به دست آمده از الگوریتم پیشنهادی، نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول (۷) مشاهده می‌شود با توجه به خروجی‌های الگوریتم پیشنهادی، روابط ریاضی تحلیل، در واقع روابط خطی هستند. به عبارت براساس نتایج الگوریتم GP، روابط ریاضی خطی، بهترین برازش و کمترین خطا را دارند.

داده‌های اولیه سازه شامل ابعاد و مشخصات اعضای سازه بوده و داده‌های خروجی شامل فرکانس ۳ شکل مودی اول سازه در تحلیل مودال و تغییر مکان و شتاب روی عرشه پل در تحلیل تاریخیچه زمانی نتایج و خروجی‌های مدل عددی هستند. در مدل‌سازی ابتدا مشخصات مصالح را به همراه ابعاد و چگونگی اتصالات آن‌ها وارد شد و سپس بارهای اعمالی به سازه (بارهای مرده و زنده) به مدل معرفی می‌شوند. سپس با اجرای مدل، نتایج حاصل از مدل با نتایج برداشت شده از اندازه‌گیری میدانی مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

لازم به توضیح است که مقادیر معرفی شده برای متغیرهای مستقل از ضرب مقدار ضریب معرفی شده حاصل از اجرای الگوریتم برای آن متغیر وابسته در مقدار مفروض آن متغیر در مدل عددی است. هم‌چنین ضرائب ارائه شده مربوط به مقادیر متغیرها در قالب توزیع نرمال می‌باشد. در روابطی که متغیری حذف شده است، مقدار معرفی شده برای آن متغیر برابر میانگین آن متغیر در بازه تعیین شده، لحاظ شده است.

میزان اصلاح نتایج حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی برای مدل عددی نسبت به مقادیر میدانی را شکل‌های (۵ تا ۷) نشان می‌دهند. در این شکل‌ها، ستون‌های مشکی مربوط به نتایج

جدول ۴. مقادیر و روابط حاصل از اجرای الگوریتم پیشنهادی برای دقت بخشی مدل عددی

E_x (* $10^7 Pa$)	A_x (* $10^{-4} m^2$)	$I_{x,h}$ (* $10^{-5} m^4$)	$I_{x,v}$ (* $10^{-6} m^4$)	m_{ad2} (kg/m^2)	m_{ad1} (kg/m^2)	ρ_{plate} (kg/m^3)	E_{plate} (* $10^9 Pa$)	Independent Var.	Dependent Var.
4598.08	4598.08	42805.92	8799.98	1015.08	231.97	2498.21	3988.98	$f_1 = 9.2499$	$f(x) = (0/03178)E_{plate} + (0/01143)\rho_{plate} + (0/02735)m_{ad1} + (0/00904)m_{ad2} + (0/01615)I_{xh} + (-0/00353)A_x$
4598.08	4598.06	42806.15	8799.98	1015.08	231.97	2498.22	3988.98	$f_2 = 10.6299$	$f(x) = (0/01614)\rho_{plate} + (-0/02949)m_{ad2} + (0/03033)I_{xh} + (-0/03877)I_{xv} + (-0/00951)E_x + (-0/00848)A_x$
4598.08	4598.007	42805.70	8799.98	1015.08	231.97	2498.29	3988.98	$f_3 = 12.75005$	$f(x) = (0/01982)E_{plate} + (0/05617)\rho_{plate} + (0/02454)m_{ad1} + (0/01185)m_{ad2} + (0/03645)I_{xv} + (-0/03988)E_x$
4598.08	4597.95	42805.92	8799.98	1015.08	231.97	2498.22	3988.98	$f_4 = 17.92025$	$f(x) = (0/05602)E_{plate} + (0/01884)\rho_{plate} + (0/05697)m_{ad1} + (0/01635)m_{ad2} + (-0/06718)E_x + (-0/01882)A_x$
4598.08	4598.06	42805.79	8799.98	1015.09	231.97	2498.11	3988.98	$f_5 = 24.5695$	$f(x) = (-0/038)E_{plate} + (-0/02098)\rho_{plate} + (-0/01539)m_{ad1} + (-0/03906)I_{xh} + (0/02144)I_{xv} + (-0/00894)E_x + (0/00772)A_x$
4598.08	4598.08	42806.007	8799.98	1015.09	231.97	2498.19	3988.98	$a_4 = 0.889003$	$f(x) = (-0/05945)E_{plate} + (0/054)m_{ad1} + (-0/01323)m_{ad2} + (0/01786)I_{xh} + (-0/01446)I_{xv} + (-0/02751)A_x$
4598.08	4598.10	42806.17	8799.98	1015.09	231.97	2498.15	3988.98	$a_5 = 1.040028$	$f(x) = (-0/02807)E_{plate} + (-0/01852)\rho_{plate} + (-0/01852)I_{xh} + (-0/04271)I_{xv} + (0/01216)E_x$
4598.08	4598.18	42805.88	8799.98	1015.09	231.97	2498.19	3988.98	$a_6 = 1.019952$	$f(x) = (-0/02417)E_{plate} + (0/01569)m_{ad1} + (-0/02343)m_{ad2} + (-0/0168)I_{xh} + (0/00586)I_{xv} + (0/05418)E_x$
4598.08	4597.99	42805.92	8799.98	1015.09	231.97	2498.22	3988.98	$a_{10} = 0.28999$	$f(x) = (0/04062)E_{plate} + (0/01724)\rho_{plate} + (0/02156)m_{ad1} + (-0/0423)m_{ad2} + (0/00772)I_{xh} + (-0/0475)E_x$
4598.08	4598.17	۴۲۸۰۵/۹۲۲	8799.98	1015.08	231.97	2498.19	3988.98	$d_{10} = 1.11997$	$f(x) = (0/01537)E_{plate} + (0/03605)m_{ad1} + (0/03039)m_{ad2} + (-0/05184)I_{xh} + (0/04706)E_x$

Table 7. Values and relationships obtained from the proposed algorithm for the accuracy of the numerical model

شکل ۵. مقایسه مقادیر فرکانس ۳ مود اول سازه حاصل از مدل عددی با مقادیر میدانی

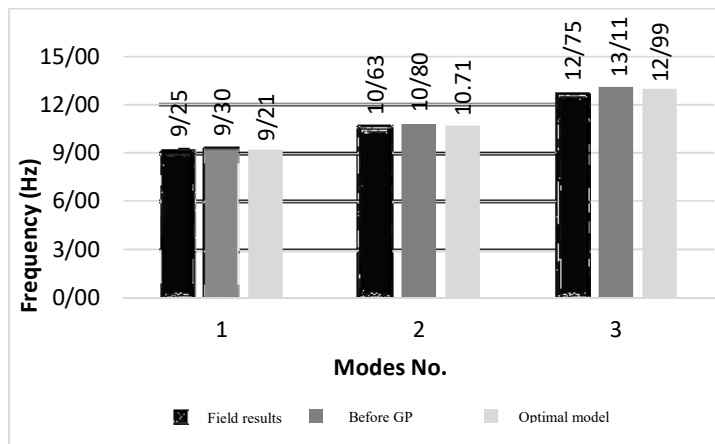


Fig. 5. Comparison of frequency values of 3 elementary modes of the structure obtained from the numerical model with field values

شکل ۶. مقایسه مقادیر شتاب های حاصل از مدل عددی با مقادیر میدانی

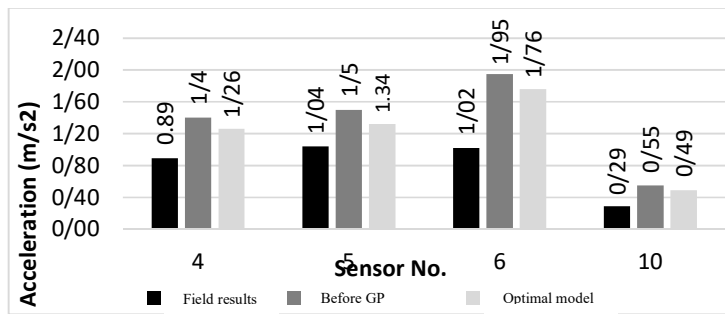


Fig. 6. Comparison of acceleration values obtained from numerical model with field values

شکل ۷. مقایسه مقادیر تغییر مکان های حاصل از عددی با مقادیر میدانی در موقعیت سنسور ۱۰

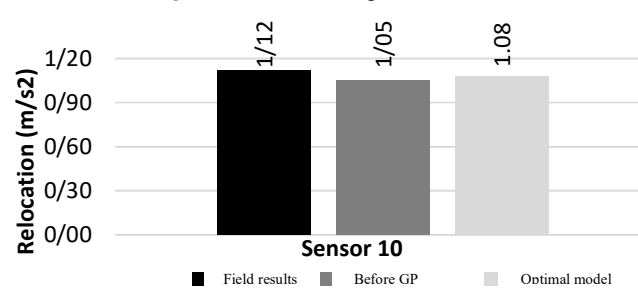


Fig. 7. Comparison of numerical displacement values obtained with field values at sensor position 10

استفاده از الگوریتم برنامه نویسی ژنتیک (GP) برای دقت بخشی به تحلیل عددی رفتار دینامیکی پل، بسیار محدود است و امکان توسعه و بهبود آن هم چنان وجود دارد. بنابراین، مقاله حاضر با استفاده از الگوریتم پیشنهادی بر پایه الگوریتم GP، داده ها و نتایج مربوط به مدل عددی برای یک پل راه آهنی واقعی را دقت بخشی نمود. در این الگوریتم از مدول الاستیسیته، پارامترهای مربوط به جرم سازه و ابعاد آن استفاده شد. نتایج بدست آمده از اجرای الگوریتم پیشنهادی حاکی از تاثیر بالای اجرای الگوریتم در افزایش دقت نتایج مدل عددی دارد. از جمله مهم ترین دستاوردهای پژوهش، می توان به موارد زیر اشاره نمود:

- یکی از مزایای مهم الگوریتم GP نسبت به سایر الگوریتم های تکاملی و ژنتیک، ارائه رابطه بهینه ریاضی بین متغیرهای وابسته و مستقل و امکان تعمیم روابط به سایر مسائل مشابه است. با اجرای الگوریتم GP معرفی شده در این پژوهش، برای هر یک از فرکانس شکل های مودی، شتاب در نقاط مختلفی از عرشه ی پل و نیز تغییر مکان یک نقطه از پل، روابط ریاضی مبتنی بر پارامترهای دینامیکی موثر سازه در تحلیل های عددی ارائه شده است. این روابط موجب افزایش دقت نتایج مدل

با توجه به نتایج شکل های (۵ تا ۷)، لازم به ذکر است که در آغاز مدلسازی، ابتدا باید سعی نمود تا حد امکان شرایط مدلسازی با وضعیت واقعی بیشترین همخوانی و تطابق را داشته باشد. موفقیت در ایجاد یک مدل اولیه با شرایط نزدیک به واقعیت، دلیل اختلاف اندک بین نتایج حاصل از مدل و مقادیر میدانی در پژوهش حاضر است. با این حال، از آنجا که در صورت بررسی مدل در شرایط بارگذاری ارتقا یافته (از جمله افزایش بار محوری و یا سرعت ناوگان)، امکان افزایش در این مقدار اختلاف وجود دارد، به منظور به حداقل رساندن این اختلاف، مدل از طریق الگوریتم پیشنهادی GP بروزرسانی شده است.

۵- جمع بندی و پیشنهادات

با توجه به اهمیت رفتار دینامیکی پل ها در خطوط پرسرعت و یا دارای بار محوری سنگین، دقت بالای نتایج تحلیل های مرتبط با این رفتار، بسیار حائز اهمیت است. پژوهش های بسیار خوبی در استفاده از الگوریتم ژنتیک به منظور افزایش دقت تحلیل های عددی بر اساس مقادیر میدانی انجام شده است. با این وجود

۷- مراجع

- [1] 1 .EKSLER V. 2013 Intermediate report on the development of railway safety in the 4 European Union. *European Railway Agency Safety Unit 5*,
- [2] 2 .Oldknow K. D., Eadie D. T. Top of rail friction control as a means to mitigate damaging lateral loads due to overbalanced operation of heavy axle load freight traffic in shared high speed rail corridors. In: *2010 Joint Rail Conference*, 2010. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, pp 27-35
- [3] 3 .Andersson A., Karoumi R. Dynamics of railway bridges, analysis and verification by field tests. In: *6th International Conference on Experimental Vibration Analysis for Civil Engineering Structures, EVACES 2015; Dubendorf, Zurich; Switzerland; 19 October 2015 through 21 October 2015*, 2015. EDP Sciences ,
- [4] 4 .Johansson C., Nualláin N. N., Pacoste C., Andersson A. 2014 A methodology for the preliminary assessment of existing railway bridges for high-speed traffic. *Engineering Structures*, 58, 25-35
- [5] 5 .Chopra R. (2009) Guidelines and Specifications for Design of Formation for Heavy Axle Load. Government of India ,
- [6] 6 .Casavant K., Tolliver D. D. (2001) Impacts of heavy axle loads on light density lines in the state of Washington. Washington State Department of Transportation Olympia ,
- [7] 7 .Rocha J., Henriques A ., Calçada R. 2012 Safety assessment of a short span railway bridge for high-speed traffic using simulation techniques. *Engineering Structures*, 40, 141-154
- [8] 8 .Cantero D., Karoumi R. 2016 Numerical evaluation of the mid-span assumption in the calculation of total load effects in railway bridges. *Engineering Structures*, 107, 1-8
- [9] 9 .Zhang N., Tian Y., Xia H. 2016 A train-bridge dynamic interaction analysis method and its experimental validation. *Engineering*, 2 (4), 528-536
- [10] 10 .Vega J., Fraile A., Alarcon E ., Hermanns L. 2012 Dynamic response of underpasses for high-speed train lines. *Journal of sound and vibration*, 331 (23), 5125-5140

عددی سازه شد. مبنای این دقت بخشی نتایج حاصل از برداشت میدانی است. هر یک از رابطه‌های به دست آمده شامل پارامترهایی از جرم، ابعاد فیزیکی و مدول الاستیسیته پل می-باشد. با تکمیل پارامترهای موثر در رفتار سازه و نیز بررسی قابلیت گسترش این معادلات و برای پلهایی با مشخصات مشابه در تحقیقات آتی، می‌توان ضمن حفظ دقت تحلیل‌ها، امکان دسته بندی (تیپ‌بندی) و تحلیل سریع‌تر مسائل با کاهش محاسبات را فراهم نمود.

- روابط بهینه ریاضی حاصل از الگوریتم پیشنهادی متشکل از ضرایبی برای پارامترهای مستقل است که با ضرب هر ضریب در پارامتر مربوطه، مقادیر مربوط به هر کدام از داده‌های اولیه دو مدل اصلاح می‌شود و به این صورت موجب بروزرسانی نتایج مدل‌های عددی خواهد شد.
- الگوریتم پیشنهادی موجب کاهش خطا در تحلیل‌های مودال تا ۱/۸۸٪ برای مود سوم سازه‌ای، کاهش ۲۰/۳۱٪ برای مقادیر شتاب و کاهش ۲/۶۸٪ برای تغییر مکان قسمتی از عرشه سازه شد. بنابراین این نتایج، بیانگر عملکرد مناسب الگوریتم GP در کاهش خطاها و دقت بخشی داده‌ها می‌باشد.

باید توجه داشت که میزان دقت بخشی الگوریتم‌ها، به میزان دقت دستگاه‌های اندازه‌گیری میدانی و هم‌چنین به میزان نزدیکی مقادیر مفروض در مدل‌های عددی با مقادیر واقعی آن‌ها وابسته است. از سوی دیگر در حوزه تحلیل مودال، علاوه بر این که میزان اختلاف فرکانس‌ها حائز اهمیت است، میزان تهمانگی بردارهای ویژه اشکال مودی نیز در میزان دقت مدل نقش به‌سزایی دارد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود که در تحقیقات آتی، شاخص MAC به عنوان تابع هدف در الگوریتم پیشنهادی مد نظر قرار گیرد و نتایج آن با عملکرد الگوریتم در این مقاله، مقایسه شود. تعیین مقادیر بهینه پارامترهای الگوریتم پیشنهادی با استفاده از سایر روش‌ها و تحلیل حساسیت الگوریتم GP نسبت به تغییرات پارامترها از دیگر پیشنهادات مناسب برای پژوهش‌های آتی است.

- nitrophenols by activated carbon using genetic programming. *Journal of Cleaner Production*, 161, 860-870
- [22] 22 .Cervantes L., Castillo O., Hidalgo D., Martinez-Soto R. 2018 Fuzzy dynamic adaptation of gap generation and mutation in genetic optimization of type 2 fuzzy controllers. *Advances in Operations Research*, 2018 ,
- [23] 23 .Lezgy-Nazargah M., Emamian S., Aghasizadeh E., Khani M. 2018 Predicting the mechanical properties of ordinary concrete and nano-silica concrete using micromechanical methods. *Sādhanā*, 43 (12), 196
- [24] 27 .Montes F., Valavala S., Haselbach L. M. 2005 A new test method for porosity measurements of Portland cement pervious concrete. *Journal of ASTM international*, 2 (1), 1-13
- [25] 25 .du Bois J. L., Lieven N. A., Adhikari S. 2009 Error analysis in trifilar inertia measurements. *Experimental Mechanics* 49 (4), 533-540
- [26] 26 .ENDEVCO (2004) Piezoelectric accelerometer Model 86 .
- [27] 27 .Ren Z., Jia Z., Zhang J., Shang Y., Gao S. 2013 Research on the dynamic error and acceleration compensation for the piezoelectric sensor. *Sens Transducers J*, 153, 118-123
- [28] 28 .Mansour S. Z., Seethaler R. 2017 Simultaneous displacement and force estimation of piezoelectric stack actuators using charge and voltage measurements. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 22 (6), 2619-2624
- [29] 29 .George D., Mallery P. 2019 IBM SPSS statistics 26 step by step: A simple guide and reference. Routledge.
- [11] 11 .Zangeneh A., Svedholm C., Andersson A., Pacoste C., Karoumi R. 2018 Identification of soil-structure interaction effect in a portal frame railway bridge through full-scale dynamic testing. *Engineering Structures*, 159, 299-309
- [12] 12 .Costa C., Ribeiro D., Jorge P., Silva R., Arêde A., Calçada R. 2016 Calibration of the numerical model of a stone masonry railway bridge based on experimentally identified modal parameters. *Engineering Structures*, 123, 354-371
- [13] 13 .Malveiro J., Ribeiro D., Calçada R., Delgado R. 2014 Updating and validation of the dynamic model of a railway viaduct with precast deck. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10 (11), 1484-1509
- [14] 14 .Galvín P., Romero A., Moliner E., Martínez-Rodrigo M. D. 2018 Two FE models to analyse the dynamic response of short span simply-supported oblique high-speed railway bridges: Comparison and experimental validation. *Engineering Structures*, 167, 48-64
- [15] 15 .Lin S.-W., Du Y.-L., Yi T.-H., Yang D.-H. 2022 Model Updating Using Bridge Influence Lines Based on an Adaptive Metamodel Global Optimization Method. *Journal of Bridge Engineering*, 27 (3), 04022003
- [16] 16 .Shi Z., Hong Y., Yang S. 2019 Updating boundary conditions for bridge structures using modal parameters. *Engineering Structures*, 196, 109346
- [17] 17 .Gao L., An B., Xin T., Wang J., Wang P. 2020 Measurement, analysis, and model updating based on the modal parameters of high-speed railway ballastless track. *Measurement*, 161, 107891
- [18] 18 .Malveiro J., Ribeiro D., Sousa C., Calçada R. 2018 Model updating of a dynamic model of a composite steel-concrete railway viaduct based on experimental tests. *Engineering Structures*, 164, 40-52
- [19] 19 .Center R. H. U. D. R. 2015 Earthquake Design Regulations (Standard 2800 Iran). Ministry of Roads & Urban Development (In Persian) ,
- [20] 20 .Ribeiro D., Calçada R., Delgado R., Brehm M., Zabel V. 2012 Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters. *Engineering Structures*, 40, 413-435
- [21] 21 .Emigdio Z., Abatal M., Bassam A., Trujillo L., Juarez-Smith P., El Hamzaoui Y. 2017 Modeling the adsorption of phenols and

۸- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A_x	مساحت سطح مقطع تیرها، m^2
a_i	مقادیر شتاب بیشینه‌ی بدست آمده از سنسور i ام، m/s^2
d_{10}	مقدار تغییر مکان بدسه آمده از سنسور شماره ۱۰، m
E_{plate}	مدول الاستیسیته صفحه دال عرشه، Pa
E_x	مدول الاستیسیته تیرها، Pa
f_{exp}	فرکانس سازه به دست آمده از روش آزمایش میدانی، Hz
f_i	فرکانس سازه در مود i ام، Hz
f_{num}	فرکانس سازه به دست آمده از روش آزمایش میدانی، Hz
$I_{x,h}$	ممان اینرسی تیرهای طولی تیرها، m^4
$I_{x,v}$	ممان اینرسی تیرهای عرضی تیرها، m^4
J_x	ممان برشی تیرها، Pa
$K_{v,dyn}$	سختی قائم برای بارهای دینامیکی، N/m^2
$K_{v,st}$	سختی قائم برای بارهای استاتیکی، N/m^2
m_{ad1}	جرم بخش مرکزی صفحه، kg/m^2
m_{ad2}	جرم بخش‌های کناری صفحه، kg/m^2
Y_i	مقادیر محاسبه شده توسط الگوریتم
\hat{Y}_i	مقادیر واقعی

علائم یونانی

ρ_{plate}	چگالی جرمی صفحه دال عرشه، kg/m^3
ρ_x	چگالی جرمی تیرها، kg/m^3
μ_{plate}	ضریب پواسون صفحه دال عرشه

Calibration of the Dynamic Model of the Concrete Bridge Railway by Genetic Programming Algorithm

Amin Shafaei-Zadeh¹, Ahmad Reza Jafarian-Moghaddam^{2*}, Alireza Gharighoran³

1. MSc, Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran
2. Assistant Professor, Railway Engineering, Faculty of Civil Engineering and Transportation, University of Isfahan, Isfahan, Iran
3. Assistant Professor, Civil Engineering, University of Isfahan, Isfahan, Iran

* ar.jafarian@trn.ui.ac.ir

Abstract

In the present study, the results of two numerical finite element models prepared for the dynamic behavior of a concrete bridge in the rail transport network have been modified using the GP algorithm compared to the field data. In this research, taking into account the logical error for the data obtained from the two numerical models and field survey, in addition to modifying the results of models in the field of frequency, acceleration and displacement, the assumed values in the analyses in the error range should be corrected. The results of the GP algorithm showed the success of the algorithm in reducing errors between numerical and field results; so that the errors are limited in the range of $10^{-3}\%$. The bridge studied in this paper is the Arroyo Bracea Bridge in Spain that is made of concrete beams and slabs. This is a bridge with two 15.25 m spans and a 45-degree angle with I-shaped beams crossing two railways. This bridge is modeled with two finite element methods and then is measured via a field survey to evaluate the results of the both models. Then, the difference between the results of the two numerical models and field survey is reduced by proposing the GP algorithm. This bridge is modeled by SAP2000 using orthotropic plate, isotropic plate and beams model. In both models, 6 degrees of freedom are considered for each point, and the interaction between the train and the bridge is neglected. The values of mass, modulus of elasticity, cross-sectional specifications, and degree of stiffness of the support are determined for each model. Accuracy of dynamic parameters was obtained from the studied bridge and experimental samplings are conducted from two finite element models. In addition to surveying the dynamic specifications of the soil around the bridge, in this study, the natural frequency of the bridge is obtained with analysis of modals and values of acceleration and displacement in traffic load conditions by installing the piezoelectric accelerometers at 11 points of the bridge. In this study, the soil characteristics around the bridge were also examined. First, by explaining the basics of the GP algorithm, the algorithm prepared in this article was introduced. The data on cross-sectional values, modulus of elasticity, and mass were selected as effective parameters from the initial data of the models and were randomly recorded along with field data in the error range of 1000. For having data with the same level, the values of parameters were normally distributed. Then, by implementing the algorithm proposed for the initial data of each model, a mathematical equation was presented per field data. These equations, in addition to reducing the error of the results of the model, also modify the initial data by providing correction coefficients. The proposed algorithm reduces the error data by 20.31% for acceleration on the part of the bridge deck. Given the importance of dynamic behavior of the bridges in high-speed or heavy-load lines, the high accuracy of the results of the analyses related to this behavior is very important. However, the use of GP algorithm for calibration in analysis of bridge dynamic behavior is very restricted and there is still a possibility of development and improvement. One of the achievements of this paper is that it can be used in similar issues by providing mathematical equations, modifying initial parameters with correction coefficients, and significant reduction in error values. For further research, it is also suggested to investigate the matching factor in specific vectors in the modal analysis via this method. Determining the optimal values of the proposed algorithm parameters using the other methods and sensitivity analysis of GP algorithm compared to the changes in parameters are among the other proper suggestions for subsequent research.

KEYWORDS: Dynamic model, Concrete Railway Bridge, Arroyo Bracea Bridge, Calibration, Genetic Programming Algorithm.