

پایش سلامت سازه‌های پل‌های فولادی بر اساس اطلاعات مودال شرایط بهره‌برداری به همراه ارزیابی عدم قطعیت

سعید جهان^{۱*}، یوسف حسین زاده^۲، علیرضا مجتهدی^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

چکیده

تشخیص عیوب سازه‌ای بر این اساس است که پاسخ دینامیکی سازه در اثر خرابی تغییر خواهد کرد. به این ترتیب امکان تعیین محل و شدت آسیب به کمک بررسی تغییر پاسخ سازه، قبل و بعد از ایجاد خرابی فراهم می‌شود. در این تحقیق سیستم ژنتیک فازی برای پایش سلامت سازه پل بکار گرفته شده است. هدف کلیدی از بکارگیری الگوریتم ژنتیک، طراحی سیستم فازی خودکار می‌باشد. از این روش برای تشخیص خرابی یک پل تک دهانه راه‌آهن با تیرهای فولادی و یک پل بتنی استفاده شده است. برای مطالعه تشخیص خرابی، مدل‌های عددی این دو پل به وسیله مشخصات دینامیکی اندازه‌گیری شده آن‌ها ساخته شده است. برای ارزیابی کارایی سیستم ژنتیک فازی در تشخیص خرابی و تأثیر شیوه مدل‌سازی، از دو مدل اجزای محدود سه بعدی و مدل دو بعدی ساده شده تیر استفاده شده است. بعد از انجام تحلیل برای کنترل عدم قطعیت‌ها، به فرکانس‌های اندازه‌گیری شده مقادیری نوین اضافه شده و اثر آن در موفقیت روش شناسایی بررسی شده است. بررسی‌های این تحقیق نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی دارای حساسیت مناسب نسبت به اعمال سناریوهای خرابی مختلف در سازه می‌باشد. علاوه بر این فرکانس طبیعی در مقایسه با سایر پارامترهای مودال، حساسیت کمتری نسبت به خطای نامطمئن دارد. افزایش تعداد مودهای اندازه‌گیری شده و بکارگیری مودهای پیچشی، موجب تشخیص دقیق خرابی حتی در سازه‌های متقارن خواهد شد.

کلمات کلیدی: تشخیص خرابی، سیستم ژنتیک فازی، پایش سلامت سازه پل، عدم قطعیت، فرکانس.

* نویسنده مسئول: سعید جهان

پست الکترونیکی: s.jahan_civil@yahoo.com

DOI: 10.22065/jsce.2017.43233

شناسه دیجیتال

<http://dx.doi.org/10.22065/jsce.2017.43233>

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۱۲، تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۵

۱- مقدمه

شرایط یک پل در بازرسی‌های چشمی دوره‌ای ارزیابی می‌شود. علاوه بر وقت‌گیر و پرهزینه بودن این نوع بازرسی‌ها، بازبینی کل سازه پل به دلیل مقاطع غیرقابل دسترس آن میسر نمی‌باشد. بنابراین بکارگیری روش‌های شناسایی غیرمخرب آسیب جهت افزایش ایمنی و اطمینان از وضعیت موجود سازه حیاتی است. کاربرد روش‌های شناسایی آسیب محلی مانند روش‌های اولتراسونیک و اشعه x مستلزم دسترسی به محل خرابی از پیش شناسایی شده می‌باشد که این امکان برای بیشتر سازه‌ها به‌ویژه پل‌ها وجود ندارد. از اینرو، روش شناسایی آسیب بر پایه ارتعاش برای ارزیابی خرابی در سطح کل سازه بکار گرفته می‌شود. در حال حاضر بسیاری از روش‌های مبتنی بر ارتعاش مورد استفاده، برای تشخیص آسیب اولیه از شناسایی سیستم مودال استفاده می‌کنند [۵-۱۱]. مبنای تئوری کاربرد آنالیز مودال در تشخیص عیوب سازه‌ای بر این اساس است که پاسخ دینامیکی سازه در اثر خرابی، تغییر خواهد کرد. به این ترتیب امکان تعیین محل و شدت آسیب به کمک بررسی تغییر پاسخ سازه، قبل و بعد از ایجاد خرابی فراهم می‌شود.

یک سیستم پایش سلامت موفق، با تشخیص زودهنگام آسیب‌ها، هزینه نگهداری را کاهش خواهد داد و از ایجاد خرابی کلی جلوگیری می‌کند [۶، ۷]. در پایش سلامت عملی سازه‌های بزرگ، به مکان‌یابی عیب با دقتی بسیار بالا، مثلاً مقادیری با دقت میلی‌متر نیاز نمی‌باشد. هزینه‌های مطرح برای مکان‌یابی خرابی با دقت بسیار بالا، موجب غیراقتصادی شدن طرح می‌گردد. از سوی دیگر عدم صحتی که در مراحل مختلف ایجاد می‌شود، نشان می‌دهد که شناسایی خرابی با دقت بسیار بالا عقیده‌ای نادرست است. بنابراین محققین بر روی روش‌هایی تمرکز می‌کنند که محل خرابی را به صورت تقریبی بر روی سازه مکان‌یابی کند و سپس از آزمایش‌های غیر مخرب محلی برای پایش دقیق‌تر ناحیه خرابی استفاده می‌شود [۸].

سیستم‌های پایش سلامت سازه^۱ (SHM) اغلب شامل حل عکس مسئله است، به این صورت که با استفاده از تغییرات قابل اندازه‌گیری مشخصات سازه به تشخیص آسیب می‌پردازد. عکس مسئله به علت اطلاعات ناقص و عدم قطعیت در مدل‌سازی، اندازه‌گیری و پردازش سیگنال پیچیده می‌شود. نگرش‌های مختلفی برای کنترل عدم قطعیت در مسائل معکوس وجود دارد. یک نگرش قدرتمند که اخیراً محبوبیت زیادی پیدا کرده است، استفاده از روش محاسبات نرم است [۹]. به این منظور جهت حل مسأله معکوس سیستم پایش سلامت از روش‌های محاسبات نرم مانند شبکه‌ی عصبی، الگوریتم ژنتیک^۲ (GA) و منطق فازی استفاده می‌شود.

در روش‌های نگهداری آنالیز، از مدل سازه جهت استخراج مشخصات ارتعاشی آن استفاده می‌شود. زو و همکاران [۱۰] و دابلینگ و همکاران [۱۱]، مروری از تحقیقات اخیر در زمینه تشخیص خرابی با استفاده از مشخصات ارتعاشی حاصل از مدل ارائه کردند. آن‌ها دریافتند که ترک موجب کاهش سختی در ناحیه آسیب‌دیده می‌شود، بنابراین در فرکانس طبیعی سازه نیز اثر می‌گذارد. سالا [۱۲] نیز مروری از کاربرد فرکانس طبیعی در تشخیص خرابی سازه‌ای ارائه کرد. اگر چه فرکانس مشخصه‌ای حساس به خرابی سازه‌ای می‌باشد، اما ممکن است تغییرات آن برای ترک‌های کوچک به حدی کم باشد که برای تشخیص خرابی مفید نباشد [۱۳]. با این حال بیشتر سازه‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که قبل از شکست مقدار قابل توجهی از خرابی را تحمل می‌کنند [۱۴]. فرکانس طبیعی در تشخیص خرابی چنین سازه‌هایی مفید می‌باشد. سارش و همکاران [۱۵] از فرکانس‌های مودال یک تیر کنسول برای آموزش شبکه‌ی عصبی به منظور تعیین موقعیت و عمق ترک استفاده کردند.

بازدید چشمی، اصطلاحات زبانی تولید می‌کند که شرایط و خرابی‌های قابل توجه را توصیف می‌کند. سیستم‌های فازی که توسط راس و همکاران [۱۶]؛ یا [۱۷] ارائه شدند، از پردازش این نوع اطلاعات توصیفی به منظور ارزیابی وضعیت سازه‌های موجود استفاده می‌کند. پیشگامان محاسبات نرم دریافتند با استفاده از روش‌های محاسباتی جدید که ابهام و عدم قطعیت را شامل می‌شوند، تعداد زیادی از مسائل جهان واقعی قابل حل است. ویژگی کلیدی منطق فازی استفاده از کلمات در محاسبات است. روش‌های دیگر محاسبات نرم مانند شبکه‌ی

1 Structural health monitoring

2 Genetic Algorithm

عصبی و الگوریتم ژنتیک معمولاً با داده‌های عددی کار می‌کنند. پاسخ‌هایی که به جای اعداد با عبارات و کلمات توضیح داده می‌شوند، اغلب برای مهندسیین نگهداری مفیدتر هستند [۱۸].

هدف اصلی از انجام این تحقیق، عیب‌یابی پل‌ها با روش‌های محاسباتی حاصل از تلفیق دینامیک سازه و هوش مصنوعی می‌باشد. به این منظور جهت حل مسئله و استفاده از داده‌های ورودی غیردقیق از ترکیب منطق فازی و الگوریتم ژنتیک به منظور رسیدن به نتایج دقیق استفاده شده است. نتیجه ترکیب منطق فازی با الگوریتم ژنتیک، سیستم ژنتیک فازی (Genetic Fuzzy System) می‌باشد. هدف کلیدی از بکارگیری الگوریتم ژنتیک، طرح خودکار سیستم فازی و دست‌یابی به حداکثر دقت در تشخیص خرابی می‌باشد. برای ارزیابی کارایی سیستم ژنتیک فازی در تشخیص خرابی و تاثیر شیوه مدل‌سازی، از دو مدل اجزای محدود سه بعدی و مدل دو بعدی ساده شده تیر استفاده شده است. مدل اجزای محدود سازه به کمک نرم افزار Sap2000 ساخته شده است.

۱-۱- مشخصات پل بنفجال

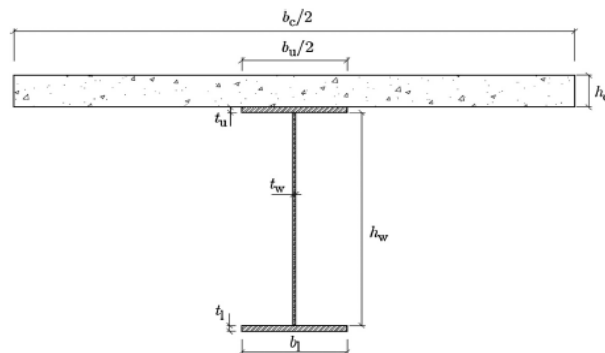
پل بنفجال در کیلومتر ۲۲+۳۹۲ از خط راه آهن بوتنیا واقع شده است. این پل روی رودخانه بنفجال ساخته شده است که به دریای بوتنی می‌ریزد. پل بنفجال، یک پل یک طرفه با طول ۴۲ متر و عرض ۷/۷ متر می‌باشد. ضخامت دال از ۲۵۰ میلی‌متر تا ۴۰۰ میلی‌متر تغییر می‌کند. پل از دو شاه‌تیر فولادی I شکل با ارتفاع ۲/۵ متر تشکیل شده است (شکل ۱). هر تیر فولادی به سه قسمت تقسیم شده است، جدول ۱ و شکل ۲ مشخصات و ابعاد تیر و دال پل را نشان می‌دهند [۱۹].



شکل ۱: پل بنفجال.

جدول ۱: ابعاد تیرهای فولادی پل بنفجال

Beam	Part	Length(mm)	t_{fl}	b_{fl}	h_w	t_w	t_f	b_f
Exterior Beam	1 (Support)	13857	45	900	2415	21	40	950
	2	14300	55	900	2395	17	50	950
	3 (Support)	13857	45	900	2415	21	40	950
Interior Beam	4 (Support)	13843	45	920	2415	21	40	970
	5	14300	55	920	2395	17	50	970
	6 (Support)	13843	45	920	2415	21	40	970



شکل ۲: مقطع عرضی تیرهای پل [۱۹].

جدول ۲: پارامترهای مدل اجزای محدود معادل پل

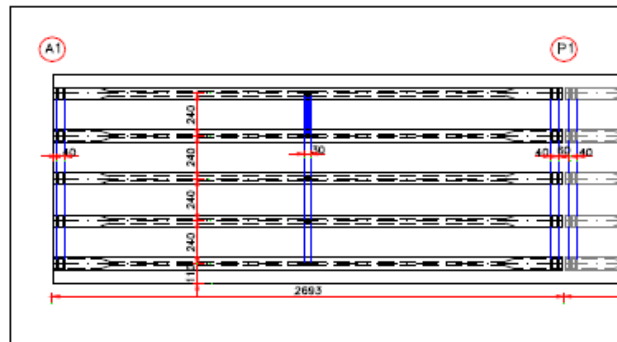
Span L(m)	Area A(m ²)	I (m ⁴)	Density $\rho(\frac{kg}{m^3})$	E (Gpa)	Poisson's ratio ν	Damping ratio ξ
42	0.57	0.62	31825	210	0.3	0.5%

در این تحقیق امکان سنجی عیب‌یابی از پاسخ دینامیکی پل مطالعه می‌شود. مدل مورد استفاده با بسیاری از فرض‌های ساده سازی همراه است. رفتار دینامیکی سازه واقعی به صورت عمیق‌تر توسط کارومی و ویبرگ [۲۰] مطالعه شده است. متغیرهای مورد استفاده مدل اجزای محدود با مقطع معادل پل در جدول ۲ آمده است. این مدل در نرم‌افزار به صورت ۲ بعدی تحلیل می‌شود [۲۱].

۱-۲- پل تیره رود

پل مورد مطالعه جهت عبور کنارگذر شهر درود در محدوده کیلومتر ۷+۸۲۶/۶ الی ۷+۹۰۷/۴ از روی رودخانه تیره رود قرار دارد. طول کل پل در آکس مسیر برابر با ۸۱ متر است که شامل ۳ دهنه‌ی ۲۷ متری و عرض ۲۵/۹ متر (دو باند رفت و برگشت) می‌باشد. عرض پل در هر باند ۱۱/۸ متر بوده و فاصله‌ی بین دو باند ۲/۳ متر است. پل در مسیر مستقیم قرار گرفته و فاقد بیه می‌باشد. عرشه پل در هر باند شامل ۵ شاه تیر بتنی پیش‌ساخته پیش‌تنیده به ارتفاع ۱/۷ متر و فواصل ۲/۴ متر است. بعد از اجرای تیرهای عرضی، دال بتنی به ضخامت ۲۰ سانتی‌متر اجرا شده است. شاه تیرها، همان طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، توسط دیافراگم‌های بتنی به عرض ۴۰ سانتی‌متر در انتها و یک دیافراگم بتنی به عرض ۳۰ سانتی‌متر در وسط دهانه با یکدیگر یکپارچه می‌شوند.

در این تحقیق برآورد فرکانس طبیعی سازه مورد نیاز است. بنابراین برای پل تیره رود نیز مدل ساده شده‌ای در نظر گرفته می‌شود، به گونه‌ای که با دقت قابل قبولی پاسخ‌های نزدیک به سازه پل داشته باشد. در جدول ۳ مشخصات مدل ساده شده‌ی پل ذکر شده است و همچنین شکل ۴ مقاطع مورد استفاده در مدل را نشان می‌دهد.

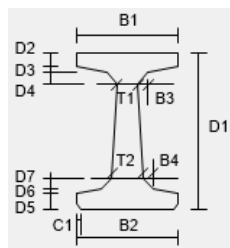


شکل ۳: نمای پلان تیرها

جدول ۳: پارامترهای مدل اجزای محدود معادل پل

Span L(m)	Section	Material	Density $\rho(\frac{kg}{m^3})$	E (kg/cm ²)	Poisson's ratio ν	f'c(kg/cm ²)
26.9	.Beam Rec	Concrete	2500	270117	0.2	320

B1	B2	B3	B4	D1	D2	D3
0.6	0.6	0	0	1.7	0.15	0.1
D4	D5	D6	D7	T1	T2	C1
0	0.2	0.15	0	0.2	0.2	0



مقطع Beam

مقطع REC

شکل ۴: ابعاد مقطع Beam و Rec

۲- روش‌های محاسباتی

در نرم افزار Sap2000 برای ساخت مدل اجزای محدود نیاز به المان‌های از پیش تعریف شده نرم‌افزار نمی‌باشد. با فرض یک‌سری ساده‌سازی‌ها، برای مدل‌سازی پل در نرم‌افزار Sap از المان مستطیلی استفاده شده است. در فرآیند عیب‌یابی نیاز به آموزش الگوریتم می‌باشد، سازه به k ناحیه تقسیم می‌شود و در هر یک از این نواحی تک به تک سطوح مختلف خرابی اعمال می‌شود. سپس فرکانس‌های سازه برداشت می‌شود و دلتاهای سنجش (تغییرات فرکانس) بدست می‌آید. بنابراین نیاز است که هر ناحیه از المان‌هایی ساخته شده باشد که بتوان با کاهش سختی در آن محدوده، خرابی شبیه‌سازی شود و تاثیر آن را در تغییر فرکانس‌های طبیعی ثبت شود.

۲-۱- تعریف عیوب در سناریوهای عیب‌یابی

پاوار و گانگولی [۲۲]، سیستم ژنتیک فازی را برای عیب‌یابی تیرها معرفی کردند. آن‌ها از مدل المان محدود بروزرسانی شده برای پیش‌بینی تغییرات خصوصیات دینامیکی تحت سناریوهای مشخص استفاده کردند، به گونه‌ای که در سناریوهای خرابی D به صورت کاهش سختی در اعضای مدل تعریف می‌شد. به این منظور پارامتر درصد خرابی D به صورت زیر لحاظ کردند.

$$D = 100 \frac{E_{undamaged} - E_{damaged}}{E_{undamaged}} \quad (1)$$

که در آن E مدول یانگ مواد می‌باشد. مشخصه‌های عیب‌یابی برای روش‌های حوزه‌ی فرکانسی به صورت تفاضل بین فرکانس سازه سالم و معیوب در شکلی بی‌بعد بدست می‌آید.

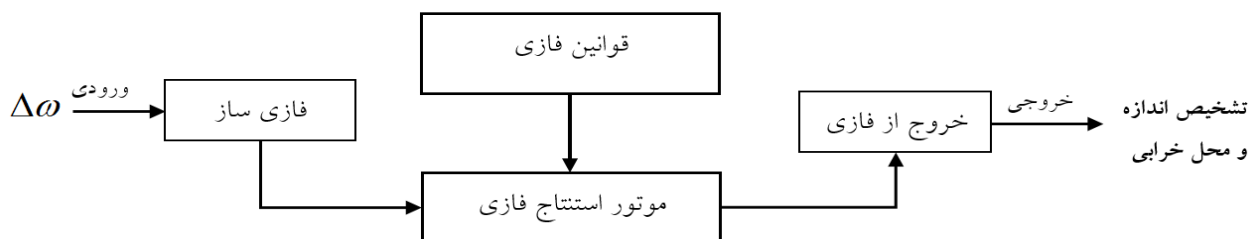
$$\Delta\omega = 100 \frac{\omega_{undamaged} - \omega_{damaged}}{\omega_{undamaged}} \quad (2)$$

مقادیر مختلف $\Delta\omega$ در هر عضو سازه‌ای، دسته‌ای از مشخصه‌های حساس به عیب بدست می‌دهد که به عنوان پایگاه داده برای استفاده در روش مورد نظر بکار گرفته می‌شود.

۲-۲- سیستم فازی

گانگولی و همکاران [۲۵-۲۲] فرکانس طبیعی و انحنا شکل مودی را به عنوان ورودی سیستم منطق فازی در نظر گرفتند و با استفاده از سیستم ژنتیک فازی به تشخیص خرابی پره‌های هلی‌کوپتر پرداختند. لیو و همکاران [۲۶] برای جلوگیری از نتایج اشتباه روش‌های تشخیص قطعی که عدم قطعیت را شامل نمی‌شود، یک روش شبه فازی برای تشخیص خرابی پل‌ها پیشنهاد کردند و از اشکال مدی به عنوان ورودی سیستم استفاده کردند. در مطالعه‌ی آن‌ها، شبیه‌سازی عددی از یک پل با تکیه‌گاه ساده و چند تیر اصلی به همراه امکان سنجی روش انجام شده است.

سیستم‌های منطق فازی به دلیل انعطاف‌پذیری که در اختیار طراحان قرار می‌دهند و توانایی آن‌ها در کنترل عدم قطعیت، به طور گسترده در کاربردهای مهندسی استفاده شده است. شکل ۵ به صورت شماتیک فلوچارت منطق فازی را نشان می‌دهد. $\Delta\omega$ داده‌های ورودی حقیقی و غیرفازی سیستم می‌باشند و اندازه و محل خرابی، خروجی غیرفازی سیستم می‌باشند.



شکل ۵: ساختار اصلی سیستم منطق فازی.

۲-۳- الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک (GA) یک روش احتمالاتی بر پایه‌ی جمعیت می‌باشد که در تعیین جواب بهینه‌ی یک مسئله از میان مجموعه‌ای از جواب‌های ممکن بکار می‌رود. GA برای یافتن حل تقریبی مسائل بهینه از نظریه‌های تکامل بیولوژیکی استفاده می‌کند. این روش بر مبنای نظریه‌ی تکاملی داروین می‌باشد [۲۷].

۲-۴- سیستم ژنتیک فازی

ورودی و خروجی

فرض کنیم ورودی سیستم فازی با z و خروجی‌ها با x نشان داده شوند. هدف پیدا کردن مسیر بین z و x است. در مسایل تشخیص خرابی، تغییرات اندازه‌گیری شده $\Delta\omega$ (تغییرات فرکانس‌ها میان مدل آسیب‌دیده و سالم) به عنوان ورودی بکار گرفته می‌شود و از ترکیب سطوح و نواحی خرابی، سیستم فازی حاصل خواهد شد [۱۸].

$$x = \{location_1, location_2, \dots, location_n\} \text{ and } z = \{\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_d\}^T \quad (3)$$

n ناحیه‌ها و d تعداد اندازه‌گیری‌های (فرکانس‌ها) تعریف شده توسط کاربر می‌باشد. هر فرکانس اندازه‌گیری شده با عدم قطعیت همراه است.

فازی‌سازی

سازه می‌تواند به ناحیه‌های مختلفی تقسیم شود. برای مثال Location1 از صفر درصد تا n_1 درصد طول در نظر گرفته می‌شود تا جایی که تمام نواحی نامگذاری شوند. هر کدام از این نواحی می‌توانند سطوح خرابی مختلفی داشته باشند و با متغیرهای زبانی مختلفی توصیف می‌شوند. برای مثال "location1" را به عنوان یک متغیر زبانی در نظر بگیرید که می‌تواند به k سطح خرابی و یک سطح بدون خرابی تجزیه شود.

$$T(location_1) = \{undamaged, level_1 Damage, level_2 Damage, \dots, level_k Damage\} \quad (4)$$

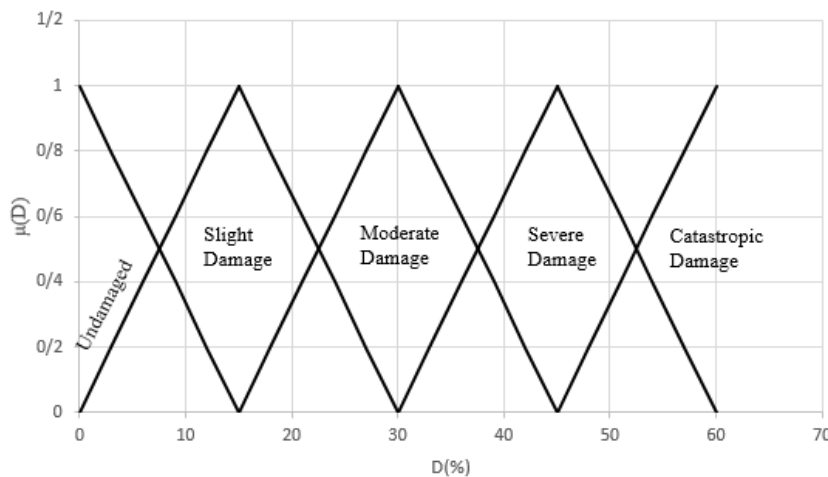
تغییرات اندازه‌گیری شده $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_d$ به عنوان متغیرهای فازی رفتار می‌کنند. توابع عضویت گوسیان برای این متغیرهای ورودی به مجموعه‌های فازی، در نظر گرفته شده است. این تابع عضویت به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\mu(x) = e^{-0.5\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2} \quad (5)$$

m میانه مجموعه‌ی فازی می‌باشد و $\Delta\omega$ ها به عنوان میانه برای مجموعه‌های فازی مربوطه استفاده می‌شوند. تغییر در فرکانس‌ها را می‌توان با استفاده از مدل المان محدود بروز رسانی شده برای ترکیبی از موقعیت‌های مختلف و ترازهای گوناگون عیب بدست آورد. مسئله عدم قطعیت با انحراف معیار کنترل می‌شود که در رابطه‌ی ۵ با σ نشان داده شده است و با استفاده از GA برای حداکثر کردن نرخ موفقیت (SR) بهینه می‌شود. مجموعه‌های فازی خروجی مربوط به سطوح مختلف خرابی برای درصد خرابی (D) صفر تا ۶۰ درصد به صورت توابع عضویت مثلثی در شکل ۶ نشان داده شده‌اند.

تولید قواعد

قواعد برای سیستم فازی با فازی کردن مقادیر عددی بدست آمده از محاسبات عددی مدل اجزای محدود بدست می‌آید. مراحل آن در زیر آورده شده است [۱۸].



شکل ۶: مجموعه‌های فازی مربوط به سطوح مختلف خرابی.

۱- برای یک ناحیه، سطح خرابی مورد نظر تعریف می‌شود و با حالت سالم سازه مقایسه خواهد شد و مجموعه‌های فازی مربوط به بدست می‌آید. با در نظر گرفتن $\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_d$ های بدست آمده از تحلیل عددی به عنوان میانه، تابع عضویت مربوط به آسیب سازه‌ای داده شده تولید می‌شود. این استراتژی برای انتخاب میانه تضمین می‌کند که بیشترین درجه‌ی عضویت ($\mu = 1$) برای هر مجموعه‌ی فازی در مقادیر $\Delta\omega$ اتفاق می‌افتد، چون توابع گوسی در میان حد اکثر می‌باشند. انحراف معیار هر مجموعه در ابتدا به صورت تصادفی در بازه‌ی تعریف شده، در نظر گرفته می‌شود.

۲- برای هر تغییر فرکانس اندازه‌گیری شده مربوط به آسیب ایجاد شده، درجه‌ی عضویت مجموعه‌ی فازی محاسبه می‌شود.

۳- هر تغییر فرکانس اندازه‌گیری شده با بیشترین درجه‌ی عضویت به مجموعه‌ی فازی اختصاص داده شده است. به وسیله‌ی تغییرات فرکانس اندازه‌گیری شده، یک قاعده برای آسیب در نظر گرفته شده بدست خواهد آمد.

۴- سپس سیستم فازی با تغییر انحراف معیار برای هر مجموعه، به خوبی تنظیم می‌شود.

معمولاً مقداری تفاوت بین مقادیر پیش‌بینی شده توسط مدل‌های ریاضی و نتایج آزمایش با توجه به مسئله عدم قطعیت وجود دارد. علاوه بر عدم قطعیت مدلسازی عددی، نویز نیز ممکن است در داده‌های اندازه‌گیری شده وجود داشته باشد. بنابراین لازم است که وجود پارامتر عدم قطعیت در داده‌های مورد استفاده در نظر گرفته شود. نویز اضافه شده به داده‌ها، عدم قطعیت موجود در اندازه‌گیری‌های تجربی و فرآیند مدلسازی را شبیه‌سازی می‌کند. داده‌های دارای نویز شبیه‌سازی شده به صورت زیر تعریف می‌شود که $\Delta\omega$ تغییرات فرکانس اندازه‌گیری شده، u عددی است که به صورت تصادفی در بازه‌ی $[-1, 1]$ انتخاب می‌شود و α پارامتر سطح نویز می‌باشد.

(۶)

$$\Delta\omega^{noisy} = \Delta\omega + u\alpha$$

پارامتر α بیشترین اختلاف بین $\Delta\omega$ محاسبه شده و مقدار شبیه‌سازی شده $\Delta\omega^{noisy}$ که در عمل ممکن است اندازه گیری شود را کنترل می‌کند. بنابراین α می‌تواند برای کنترل سطوح نویز در داده‌های شبیه‌سازی شده برای آزمایش سیستم فازی، استفاده شود. با استفاده از تغییرات فرکانس‌های دارای نویز و سیستم فازی، برای آسیب شناخته شده می‌توان یک نرخ موفقیت تعریف کرد. مسأله بهینه‌سازی در فرم کلی استاندارد به صورت زیر خواهد بود، M تعداد قواعد و d تعداد مجموعه‌های فازی می‌باشد.

Maximize S_R For design variable

(۷)

$$\sigma^{\min} \leq \sigma_{ij} \leq \sigma^{\max}$$

where $i = 1, 2, \dots, M$

نرخ موفقیت با استفاده از نتایج بدست آمده بعد از غیرفازی کردن محاسبه می‌شود. فرض می‌شود N_T نمونه از داده‌های دارای نویز آزمایش شده و سیستم N_C بار به درستی خرابی را تشخیص داده است و نرخ موفقیت به درصد به صورت زیر محاسبه می‌شود [۲۸].

$$S_R = \frac{N_C}{N_T} 100 \quad (۸)$$

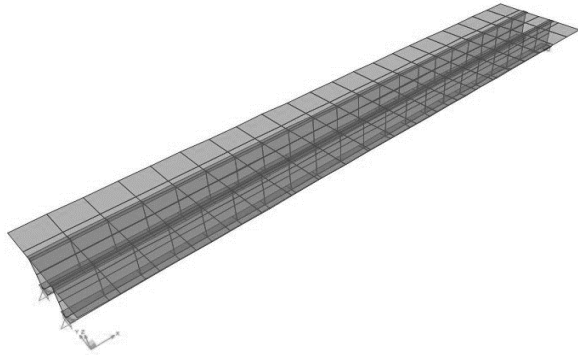
بعد از آموزش الگوریتم، تغییرات فرکانس مربوط به سازه آسیب دیده به عنوان اطلاعات ورودی به سیستم داده می‌شود. پس از محاسبه‌ی درجه‌ی عضویت در مجموعه‌های فازی، مجموعه فازی مربوط به درجه عضویت حداکثر نشان‌دهنده محل و شدت خرابی می‌باشد.

۳- نتایج عددی

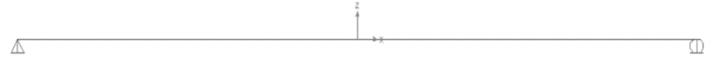
مدل اجزای محدود پل بنفجال نشان داده شده در شکل ۷ براساس مشخصات ذکر شده در نرم‌افزار Sap ساخته شد و مورد تحلیل قرار گرفت. تغییرات فرکانس با استفاده از مدل اجزای محدود برای ترکیب ۲۱ ناحیه مختلف و چهار سطح خرابی (آسیب ندیده، خرابی کم، خرابی متوسط و خرابی زیاد) محاسبه می‌شود. نواحی خرابی با توجه به عملکرد مورد انتظار سیستم پایش سلامت تعیین می‌شوند. فرکانس‌های اولین مود خمشی و پیچشی و دومین مود خمشی در حالت سازه سالم به ترتیب برابر ۳/۳۵، ۳/۶ و ۹/۶۸ می‌باشد [۲۹].

قواعد فازی و نتایج تحلیل مودال عددی

از ترکیب ۲۱ ناحیه و چهار سطح خرابی (آسیب ندیده، خرابی کم، خرابی متوسط و خرابی زیاد) ۶۴ قاعده فازی بدست آمده است. برای هر قاعده، خرابی در ناحیه‌ی مربوطه مطابق قاعده فازی ایجاد می‌شود و پس از تحلیل مودال هشت فرکانس اول آن برداشت می‌شود. جدول ۴ تغییرات هشت فرکانس اول پل برای ۴۰ قاعده از ۶۴ قاعده تولید شده را نشان می‌دهد.



شکل ۷: مدل اجزای محدود پل.



شکل ۸: مدل ساده شده‌ی پل بنفجالی.

جدول ۴: تغییرات فرکانس (نقاط میانه مجموعه‌های فازی برای قواعد مختلف)

Rule No	Rule	$\Delta\omega_{1(\sigma)}$	$\Delta\omega_{2(\sigma)}$	$\Delta\omega_{3(\sigma)}$	$\Delta\omega_{4(\sigma)}$	$\Delta\omega_{5(\sigma)}$	$\Delta\omega_{6(\sigma)}$	$\Delta\omega_{7(\sigma)}$	$\Delta\omega_{8(\sigma)}$
1	Undamaged	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000	0/000
2	SLD at 1	0/119	0/447	1/826	1/200	0/903	0/822	0/812	2/209
3	SLD at 2	0/089	0/447	1/826	1/200	0/903	0/822	0/812	2/209
4	SLD at 3	0/178	0/537	0/836	0/428	0/316	0/272	0/299	0/182
5	SLD at 4	0/237	0/621	0/592	0/400	0/308	0/318	0/334	0/078
6	SLD at 5	0/356	0/644	0/432	0/380	0/327	0/349	0/334	0/094
7	SLD at 6	0/445	0/590	0/349	0/360	0/353	0/338	0/341	0/162
8	SLD at 7	0/593	0/528	0/327	0/340	0/390	0/349	0/376	0/248
9	SLD at 8	0/652	0/394	0/343	0/400	0/398	0/431	0/459	0/359
10	SLD at 9	0/682	0/277	0/332	0/440	0/387	0/504	0/388	0/465
11	SLD at 10	0/711	0/206	0/304	0/472	0/443	0/413	0/436	0/560
12	SLD at 11	0/711	0/197	0/266	0/488	0/485	0/327	0/520	0/626
13	SLD at 12	0/711	0/233	0/221	0/480	0/452	0/402	0/437	0/659
14	SLD at 13	0/652	0/313	0/194	0/456	0/381	0/495	0/393	0/654
15	SLD at 14	0/622	0/420	0/183	0/416	0/370	0/426	0/474	0/619
16	SLD at 15	0/563	0/510	0/194	0/328	0/367	0/340	0/384	0/533
17	SLD at 16	0/415	0/510	0/216	0/340	0/347	0/332	0/345	0/429
18	SLD at 17	0/326	0/483	0/232	0/380	0/342	0/351	0/330	0/318
19	SLD at 18	0/207	0/403	0/224	0/400	0/342	0/334	0/325	0/205
20	SLD at 19	0/148	0/295	0/188	0/384	0/344	0/289	0/290	0/109
21	SLD at 20	0/089	0/197	0/149	0/340	0/361	0/305	0/297	0/045
22	SLD at 21	0/089	0/224	0/188	0/464	0/669	0/720	0/843	0/879
23	MOD at 1	0/237	1/064	4/311	2/740	2/173	2/012	2/406	5/747
24	MOD at 2	0/237	1/064	2/756	1/340	0/931	0/733	0/701	1/126
25	MOD at 3	0/415	1/333	1/937	0/956	0/731	0/645	0/729	0/601
26	MOD at 4	0/622	1/494	1/400	0/868	0/723	0/775	0/816	0/388

Rule No	Rule	$\Delta\omega1(\sigma)$	$\Delta\omega2(\sigma)$	$\Delta\omega3(\sigma)$	$\Delta\omega4(\sigma)$	$\Delta\omega5(\sigma)$	$\Delta\omega6(\sigma)$	$\Delta\omega7(\sigma)$	$\Delta\omega8(\sigma)$
27	MOD at 5	0/860	1/530	1/018	0/840	0/776	0/846	0/797	0/411
28	MOD at 6	1/097	1/422	0/825	0/800	0/844	0/806	0/814	0/460
29	MOD at 7	1/423	1/261	0/769	0/756	0/920	0/822	0/912	0/614
30	MOD at 8	1/571	0/948	0/808	0/904	0/929	1/036	1/107	0/878
31	MOD at 9	1/630	0/671	0/786	0/992	0/903	1/215	0/912	1/153
32	MOD at 10	1/689	0/510	0/725	1/056	1/050	0/990	1/041	1/380
33	MOD at 11	1/719	0/474	2/623	1/088	1/157	0/771	1/255	1/534
34	MOD at 12	1/689	0/572	0/531	1/080	1/073	0/963	1/044	1/611
35	MOD at 13	1/571	0/760	0/459	1/024	0/895	1/197	0/928	1/598
36	MOD at 14	1/512	1/002	0/432	0/936	0/858	1/027	1/140	1/510
37	MOD at 15	1/334	1/225	0/448	0/724	0/864	0/802	0/932	1/308
38	MOD at 16	1/037	1/234	0/498	0/748	0/830	0/791	0/823	1/058
39	MOD at 17	0/771	1/163	0/542	0/836	0/813	0/853	0/790	0/790
40	MOD at 18	0/533	0/975	0/526	0/892	0/804	0/815	0/794	0/518

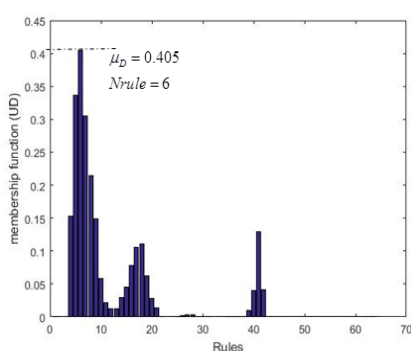
SLD = Slight Damage MOD = Moderate Damage SVD = Severe Damage $\alpha = 0.1$

سناریوهای خرابی پل بنفجال

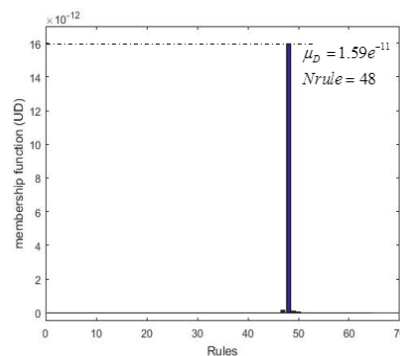
سه نمونه خرابی D1، D2 و D3 برای سازه پل در نظر گرفته شده است. نمونه D1 شامل ۲۰٪ خرابی در ناحیه ۱۰، نمونه D2 شامل ۵۵٪ خرابی در ناحیه ۵ و نمونه D3 شامل ۲۰٪ خرابی در ناحیه ۵ می باشد. GFS برای برآورد شدت و مکان خرابی براساس سناریوهای فوق ارزیابی می شود. حداکثر درجه عضویت مربوط به هر قاعده، نشان دهنده شدت و محل خرابی مربوط به همان قاعده خواهد بود.

GFS در خرابی D1 حداکثر درجه عضویت را برای قاعده ۱۳ و برابر ۰/۲۷۸ تخمین زده است. همان طور که در شکل ۹ نشان داده شده است درجه عضویت نیز برای قاعده های ۱۱ و ۱۲ اعدادی نزدیک به ماکسیمم تخمین زده شده است. در جدول ۴ قاعده ۱۱، ۱۲ و ۱۳ به ترتیب عبارتند از "خرابی با شدت کم" در ناحیه ۱۰، ۱۱ و ۱۲. در خرابی D1 شدت خرابی کم است و علاوه بر آن نواحی خرابی کوچک می باشند، بنابراین خرابی تفاوت چشمگیری در فرکانس های سازه ایجاد نمی کند. به همین دلیل در مدل ۳ بعدی GFS دقیقاً نمی تواند قاعده ۱۱ را تشخیص دهد.

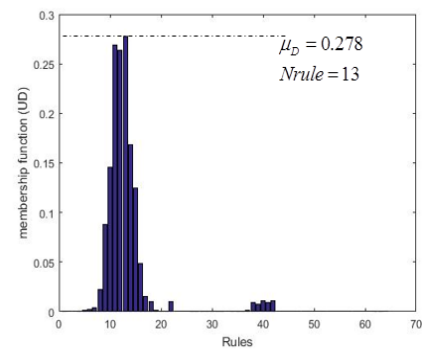
شکل ۱۰ نشان می دهد که در خرابی D2 حداکثر درجه عضویت را برای قاعده ۴۸ (خرابی با شدت زیاد در ناحیه ۵) محاسبه شده است و دقیقاً با خرابی در نظر گرفته شده در مدل مطابقت دارد. شکل ۱۱ نشان می دهد که در خرابی D3 حداکثر درجه عضویت برای قاعده ۶ (خرابی با شدت کم در ناحیه ۵) محاسبه شده است.



شکل ۱۱: درجه عضویت برای خرابی D3.



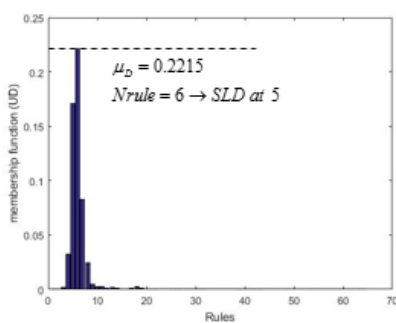
شکل ۱۰: درجه عضویت برای خرابی D2.



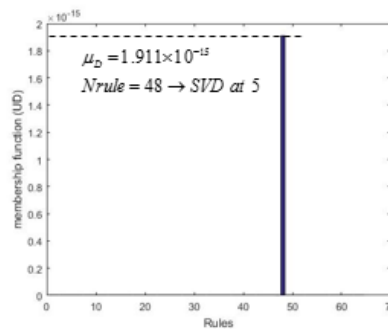
شکل ۹: درجه عضویت برای خرابی D1.

مدل ساده شده ی پل بنفجال

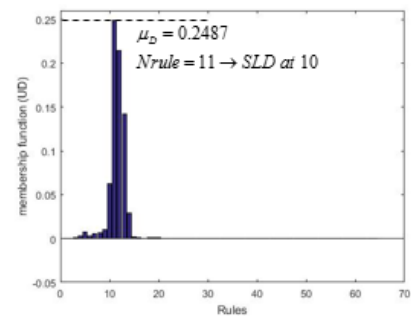
مدل ساده شده ی پل در شکل ۸ نشان داده شده است که براساس مشخصات ذکر شده در نرم افزار Sap ساخته شد و مورد تحلیل قرار گرفت. چهار فرکانس طبیعی اول مدل به ترتیب برابر ۲/۲۸، ۹/۱۲، ۱۵/۳۹ و ۲۰/۴۵ می باشد [۲۰]. این مدل نیز همانند مدل ۳ بعدی اجزای محدود به ۲۱ ناحیه خرابی تقسیم می شود. سطوح خرابی نیز همانند مدل ۳ بعدی اجزای محدود در نظر گرفته می شود. شکل ۶ مجموعه های فازی برای سطوح مختلف خرابی را نشان می دهد. از ترکیب ۲۱ ناحیه و چهار سطح خرابی (آسیب ندیده، خرابی کم، خرابی متوسط و خرابی زیاد) ۶۴ قاعده فازی بدست آمده است. سیستم فازی برای $\alpha = 0.1$ که حد مثبت و منفی سطح نوین است بهینه سازی شده است. پاسخ GFS در تشخیص خرابی های D1، D2 و D3 به ترتیب در شکل های ۱۲، ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. در مدل ساده شده پل بر خلاف مدل ۳ بعدی اجزای محدود، در هر سه مورد خرابی را به درستی تشخیص داده شده است.



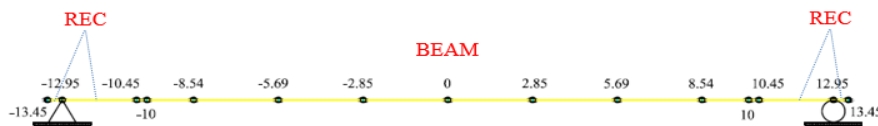
شکل ۱۴: درجه ی عضویت برای خرابی D3.



شکل ۱۳: درجه ی عضویت برای خرابی D2.



شکل ۱۲: درجه ی عضویت برای خرابی D1.



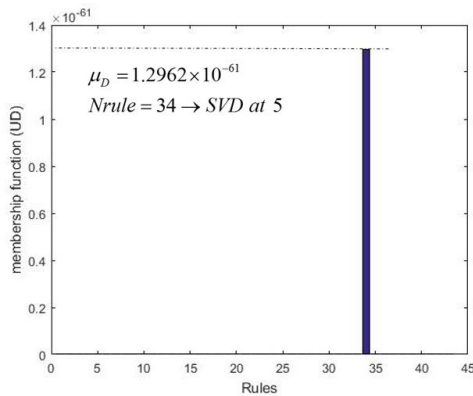
شکل ۱۵: نمای شماتیک از المان های مدل و مقاطع مورد استفاده.

پل تیره رود

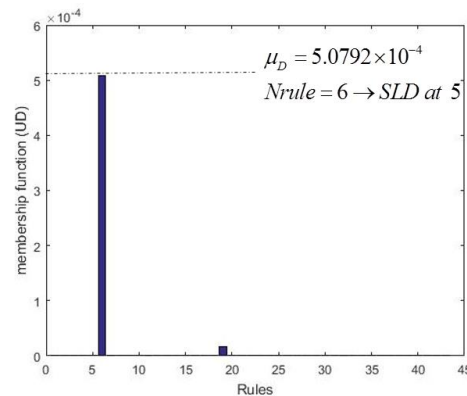
پل تیره رود از ۳ دهانه مشابه با تیرهای مجزا تشکیل شده است. هر دهانه رفتاری مستقل دارد و به تنهایی مورد بررسی قرار می گیرد. با توجه به عملکرد بهتر مدل ساده شده در موارد پیشین، برای تحلیل مودال و تشکیل سیستم فازی پل تیره رود نیز از مدل ساده شده آن استفاده می شود. مدل اجزای محدود پل بر اساس مشخصات ذکر شده ساخته می شود به گونه ای که تا حد امکان بیانگر رفتار واقعی پل باشد. تغییرات فرکانس با استفاده از مدل اجزای محدود برای ترکیب ۱۴ ناحیه مختلف و چهار سطح خرابی (آسیب ندیده، خرابی کم، خرابی متوسط و خرابی زیاد) محاسبه می شود. نواحی مختلف خرابی به همراه طول المان ها در شکل ۱۵ نشان داده شده است. فازی مربوط به سطوح مختلف خرابی در شکل ۶ نشان داده شده است.

سناریوهای خرابی پل تیره رود

دو نمونه خرابی S1 و S2 برای سازه پل در نظر گرفته شده است. نمونه S1 شامل ۲۰٪ خرابی در ناحیه ۵ و نمونه S2 شامل ۵۵٪ خرابی در ناحیه ۵ می باشد. پاسخ GFS در تشخیص خرابی های ذکر شده در شکل های ۱۶ و ۱۷ آورده شده است.



شکل ۱۷: درجه‌ی عضویت برای خرابی S2.



شکل ۱۶: درجه‌ی عضویت برای خرابی S1.

۴- نتیجه‌گیری

عدم قطعیت موجود در اندازه‌گیری‌های تجربی و فرآیند مدل‌سازی از طریق ۱۰ درصد نویز اضافه شده به داده‌ها، شبیه‌سازی شده است. نتایج نشان می‌دهد در صورت وجود نویز در اطلاعات ورودی، سیستم ژنتیک فازی با دقت قابل قبولی می‌تواند حدود خرابی را مشخص کند.

خرابی المان‌های متقارن موجب اثرات یکسان در فرکانس‌های طبیعی می‌شود. به همین دلیل تشخیص محل آسیب‌دیدگی با استفاده از تغییرات فرکانس در سازه‌های متقارن مشکل است. نتایج این تحقیق نیز نشان می‌دهد افزایش تعداد مدهای اندازه‌گیری و بکارگیری مدهای پیچشی، موجب تشخیص خرابی دقیق حتی در سازه‌های متقارن خواهد شد.

نتایج GFS در تشخیص خرابی‌های D1، D2 و D3 نشان می‌دهد که مدل ساده شده پل، در هر سه مورد خرابی، خرابی را به درستی تشخیص داده است. بنابراین با مدل ساده شده‌ی پل می‌توان با حجم محاسبات و پیچیدگی کمتر به دقت قابل قبولی جهت شناسایی عیب دست یافت. استفاده از مدل‌های ساده شده در مطالعه‌ی رفتار پل‌ها به دلیل سادگی و دقت قابل قبولی که دارند بسیار مرسوم است. پل تیره رود از آن دسته پل‌های مرسوم در کشور است که مشخصات مودال آن با استفاده از مدل ساده شده پل تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که با استفاده از روش GFS با دقت خوبی می‌توان به تشخیص ناحیه آسیب‌دیده پل پرداخت.

مراجع

- [1] Kullaa, J. (2003). Damage Detection of the Z24 Bridge Using Control Charts. *Mechanical Systems and Signal Processing* 17, no. 1, 163-170.
- [2] Magalhães, F. and Cunha, Á. and Caetano, E. (2008). Dynamic monitoring of a long span arch bridge. *Engineering Structures* 30, no. 11, 3034-3044.
- [3] Ramos, L.F. and Marques, L. and Lourenço, P.B. and De Roeck, G. and Campos-Costa, A. and Roque, J. (2010). Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies. *Mechanical Systems and Signal Processing* 24, no. 5, 1291-1305.
- [4] Rainieri, C. and Fabbrocino, G. and Manfredi, G. and Dolce, M. (2012). Robust output-only modal identification and monitoring of buildings in the presence of dynamic interactions for rapid post-earthquake emergency management. *Engineering Structures* 34, 436-446.
- [5] Magalhães, F. and Cunha, A. and Caetano, E. (2012). Vibration based structural health monitoring of an arch bridge: From automated OMA to damage detection. *Mechanical Systems and Signal Processing* 28, 212-228.
- [6] Orcési, A.D. and Frangopol, D.M. (2011). Optimization of assessment strategies for aging bridges. *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, CRC Press, 581-586.
- [7] Modares, M. and Waksanski, N. (2013). Overview of Structural Health Monitoring for Steel Bridges. *Practice Periodical on Structural Design and Construction* 18, no. 3, 187-191.

- [8] Boller, C. (2000). Next generation structural health monitoring and its integration into aircraft design. *International Journal of Systems Science* 31, no. 11, 1333-1349.
- [9] Worden, K. and Staszewski, W.J. and Hensman, J.J. (2011). Natural computing for mechanical systems research: A tutorial overview. *Mechanical Systems and Signal Processing* 25, no. 1, 4-111.
- [10] Zou, Y. and Tong, L. and Steven, G. (2000). Vibration-based model-dependent damage (delamination) identification and health monitoring for composite structures—a review. *Journal of Sound and vibration* 230, no. 2, 357-378.
- [11] Doebling, S.W. and Farrar, C.R. and Prime, M.B. (1998). A summary review of vibration-based damage identification methods. *Shock and vibration digest* 30, no. 2, 91-105.
- [12] Salawu, O. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering structures* 19, no. 9, 718-723.
- [13] Pawar, P.M. and Ganguli, R. (2003). Genetic fuzzy system for damage detection in beams and helicopter rotor blades. *Computer methods in applied mechanics and engineering* 192, no. 16, 2031-2057.
- [14] Cattarius, J. and Inman, D. (2000). Experimental verification of intelligent fault detection in rotor blades. *International Journal of Systems Science* 31, no. 11, 1375-1379.
- [15] Suresh, S. and Omkar, S. and Ganguli, R. and Mani, V. (2004). Identification of crack location and depth in a cantilever beam using a modular neural network approach. *Smart Materials and Structures* 13, no. 4, 907.
- [16] Ross, T. and Sorensen, H. and Savage, S. and Carson, J. (1990). DAPS: expert system for structural damage assessment. *Journal of Computing in Civil Engineering* 4, no. 4, 327-348.
- [17] Yao, J.T. (1985). *Safety and reliability of existing structures*, Pitman Advanced Publishing Program.
- [18] Pawar, P.M. and Ganguli, R. (2011). *Structural health monitoring using genetic fuzzy systems*, Springer Science & Business Media.
- [19] Gillet, G. (2010). Simply supported composite railway bridge: a comparison of ballasted and ballastless alternatives. Case of the Banafjäl Bridge, KTH, School of Architecture and the Built Environment (ABE), Civil and Architectural Engineering, Structural Design and Bridges. KTH, School of Engineering Sciences (SCI), Centres, The KTH Railway Group.(Järnväggruppen-Infrastruktur), KTH - Royal Institute of Technology.
- [20] Karoumi, R. and Wiberg, J. (2006). Kontroll av dynamiska effekter av passerande tåg på Botniabanans broar: sammanfattning, KTH - Royal Institute of Technology, Structural Design and Bridges, Stockholm.
- [21] Shu, J. and Zhang, Z. and Gonzalez, I. and Karoumi, R. (2013). The application of a damage detection method using Artificial Neural Network and train-induced vibrations on a simplified railway bridge model. *Engineering Structures* 52, 408-421.
- [22] Pawar, P.M. and Ganguli, R. (2007). Genetic fuzzy system for online structural health monitoring of composite helicopter rotor blades. *Mechanical Systems and Signal Processing* 21, no. 5, 2212-2236.
- [23] Ganguli, R. (2001). A fuzzy logic system for ground based structural health monitoring of a helicopter rotor using modal data. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 12, no. 6, 397-407.
- [24] Beena, P. and Ganguli, R. (2011). Structural damage detection using fuzzy cognitive maps and Hebbian learning. *Applied Soft Computing* 11, no. 1, 1014-1020.
- [25] Chandrashekhar, M. and Ganguli, R. (2009). Uncertainty handling in structural damage detection using fuzzy logic and probabilistic simulation. *Mechanical Systems and Signal Processing* 23, no. 2, 384-404.
- [26] Liu, H. and Jiao, Y. and Cheng, Y. and Gong, Y. (2012). Reduction of uncertainties for damage identification of bridge based on fuzzy nearness and modal data. *Journal of Applied Mathematics*.
- [27] Marwala, T. (2010). *Finite element model updating using computational intelligence techniques: applications to structural dynamics*, Springer Science & Business Media.
- [28] Abe, S. (2012). *Pattern classification: neuro-fuzzy methods and their comparison*, Springer Science & Business Media.
- [29] Beygi, H. (2015). Vibration Control of a High-Speed Railway Bridge Using Multiple Tuned Mass Dampers, KTH, School of Architecture and the Built Environment (ABE), Civil and Architectural Engineering, Structural Engineering and Bridges, KTH - Royal Institute of Technology.