

ارائه روش جدیدی برای تشخیص خسارت‌های جزئی در پایه پل‌های مستقیم با استفاده از منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک

محمد محمدی^۱، فرهاد دانشجو^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران (زلزله)، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استاد گروه سازه، دانشکده عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس

Email: danesh_fa@modares.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۱۴۰۲/۱۲/۹]

تاریخ دریافت: [۱۴۰۲/۸/۱۴]

چکیده

با توجه به افزایش سن پل‌ها، تبیین و استفاده از روش‌های مؤثر شناسایی خسارت جزئی به کمک سیستم‌های پایش سلامت از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشند چراکه امکان بازسازی آسیب‌ها را قبل از افزایش خسارت مهیا می‌کنند از اهداف اصلی این مقاله، ارائه روشی مؤثر و کارآمد جهت پایش سلامت و تشخیص خسارت جزئی در پایه پل مستقیم با استفاده از منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک و ارائه معیاری جهت نمایش همبستگی منحنی‌های شکنندگی در حالت‌های سالم و آسیب‌دیده می‌باشد و برای دستیابی به این اهداف یک مدل کامل پل مستقیم در نرم‌افزار تخصصی طراحی پل، CSI Bridge مدل‌سازی شده و در ادامه صحت سنجی شده است. جهت ترسیم منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک ابتدا نیروهای هارمونیک به بالای ستون منتخب اعمال شدند و سپس چرخش‌های ایجاد شده که در پایین ستون اندازه‌گیری شدند و با توجه به داده‌های به‌دست‌آمده و با استفاده از روابط مربوطه، منحنی‌های شکنندگی رسم شدند و شاخص شدت پیشینه‌ی نیرو و شاخص خسارت چرخش رخ داده در پایین ستون و سطح عملکرد تعریف‌شده‌ی فراگذشت از حالت خطی از مشخصات این منحنی‌های شکنندگی می‌باشند و برای رسم منحنی شکنندگی در حالت آسیب‌دیده نیز ابتدا نیروی زلزله موردنظر به پل اعمال شد و سپس نیروهای هارمونیک به بالای ستون موردنظر اعمال شدند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهند که منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک با توجه به مشخصات تعریف‌شده، در حالت‌های سالم و آسیب‌دیده جزئی به‌خوبی رسم شده‌اند و آسیب‌های جزئی با شدت‌های مختلف، به‌درستی تشخیص داده‌شده‌اند. جهت بررسی همبستگی منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک در دو حالت آسیب‌دیده و سالم نیز دو معیار جدید PCOMAC و PDI معرفی شدند و عملکرد این دو معیار جدید ارائه‌شده بررسی شدند.

واژگان کلیدی: پایش سلامت، تشخیص خسارت، پایه‌های پل، منحنی‌های شکنندگی.

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

امروزه زیرساخت بخش حمل‌ونقل مستقیماً به پیشرفت اقتصادی یک کشور مرتبط می‌باشد و پل‌ها به خاطر عملکردشان بسیار موردتوجه قرار گرفته‌اند. پل‌ها به علت افزایش سن و حوادثی مانند زلزله دچار آسیب و کاهش ایمنی می‌شوند و هدف سلامت سنجی پل‌ها تعیین شرایط موجود پل و پیدا کردن آسیب‌های موجود در پل‌ها می‌باشد [1].

طبق گزارش منتشرشده مربوط به سازمان حمل‌ونقل آمریکا در سال ۲۰۱۳ حدود ۱۱ درصد پل‌های آمریکا دچار نقص‌های سازه‌ای هستند و پل‌های دارای نقص‌های سازه‌ای شدیداً نیاز به بازسازی دارند [2]. در ضمن طبق گزارش‌های منتشرشده از زلزله‌های شدید اخیر مانند زلزله ۱۹۹۴ نورتریج^۱، زلزله ۱۹۹۹ چی چی^۲، زلزله ۲۰۰۸ ونچوان^۳ و زلزله ۲۰۱۰ شیلی^۴، بسیاری از پل‌ها پس از زلزله دچار انواع آسیب سازه‌ای شده بودند [3].

آسیب‌های لرزه‌ای در پل‌ها به شرح زیر می‌باشد:

۱- زلزله ۱۹۹۴ نورتریج در کالیفرنیا رخ داد باعث خرابی هفت پل بزرگراه و آسیب دیدن ۱۷۰ پل دیگر شد.

۲- در زلزله سال ۱۹۹۱ چی چی، خسارات ایجادشده در پل‌های بزرگراه، بسیار برجسته بودند. تقریباً ۱۰٪ از موجودی پل در منطقه لرزه‌ای، آسیب‌های متوسط تا بزرگی را تجربه کردند. بیشتر پل‌های آسیب‌دیده در شعاع ۱۰ کیلومتری گسل زلزله، واقع شده بودند [3].

۳- طی زلزله سال ۲۰۰۸ ونچوان، زیرساخت‌های حمل‌ونقل در این منطقه به شدت آسیب‌دیده و جاده‌ها و پل‌های متعددی آسیب دیدند. از آنجاکه منطقه موردنظر یک منطقه کوهستانی بوده است. پل‌های بزرگراهی نقش بسیار مهمی در بحث حمل‌ونقل منطقه ایفا می‌کردند. گزارش شده است که ۶۱۴۰ پل در ۲۴ مسیر ضروری به درجات مختلف آسیب‌دیده‌اند که در میان آن‌ها نزدیک به ۱۶۰۰ پل متحمل خسارات گسترده‌ای شده‌اند.

۴- بیش از ۳۰۰ پل بزرگراه در منطقه زلزله‌خیز شیلی در زلزله سال ۲۰۱۰ دچار آسیب شدیدی شدند [3].

با توجه به خسارت‌های لرزه‌ای پل‌ها، بحث پایش سلامت و تشخیص خسارت بسیار ضروری می‌باشد تا شرایط بهره‌برداری پل‌ها مشخص گردد. از طرف دیگر تشخیص آسیب جزئی به بازسازی سازه قبل از افزایش خسارت کمک می‌کند و این مسئله‌ی مهمی می‌باشد که در این مقاله به آن پرداخته شده است.

پایش سلامت سازه‌ای به معنی پیاده‌سازی راهبرد شناسایی خسارت در مورد سازه‌ها می‌باشد [4].

به‌طورکلی فرایند تشخیص خسارت به چهار سطح زیر دسته‌بندی شده است [5]:

سطح ۱: تعیین وجود و یا عدم وجود آسیب در سازه

سطح ۲: تعیین محل هندسی آسیب

سطح ۳: تعیین کمیت شدت آسیب

سطح ۴: پیش‌بینی طول عمر باقیمانده سازه

۱-۱- روش‌های تشخیص خسارت دینامیکی

اخیراً پژوهش در مورد تشخیص خسارت با استفاده از نیروهای دینامیکی با توجه به کاربرد آن، بیشتر موردتوجه پژوهشگران قرار گرفته است لذا این پژوهش زیرمجموعه‌ای از روش‌های تشخیص خسارت دینامیکی می‌باشد.

وقتی در سازه خسارت ایجاد می‌شود خصوصیات فیزیکی سازه دچار تغییر می‌شوند. در روش‌های تشخیص خسارت دینامیکی با توجه به بررسی تغییرات شاخص‌های مودال سازه و سیگنال‌های دریافتی از سازه قادر به تشخیص این تغییرات فیزیکی در سازه می‌شوند، البته مسئله‌ی دارای اهمیت شناسایی و تفسیر دقیق ارتعاشات و سیگنال‌ها می‌باشد. روش‌های تشخیص خسارت دینامیکی به دو گروه به‌صورت کلی تقسیم می‌شوند: روش‌های مبتنی بر بررسی شاخص‌های مودال و روش‌های مبتنی بر سیگنال [6].

- 1 Northridge
- 2 Chi chi
- 3 Wenchuan
- 4 Chile

۱-۱-۱- روش‌های تشخیص خسارت مبتنی بر

پارامترهای مودال

۱-۱-۱-۱- فرکانس طبیعی

تحقیقات زیادی در زمینه‌ی پایش سلامت با استفاده از فرکانس طبیعی انجام شده است که ثابت می‌کند آسیب در سازه موجب کاهش در فرکانس‌های طبیعی آن می‌شود و از مزیت‌های این روش این می‌باشد که سنجش و اندازه‌گیری فرکانس طبیعی آسان می‌باشد [7].

از ایرادات این روش این می‌باشد که این روش بیشتر مناسب تشخیص آسیب سازه‌های کوچک در شرایط آزمایشگاهی می‌باشد و برای تشخیص آسیب‌های متعدد سازه‌های پیچیده این روش قابل اعتماد نمی‌باشد [8].

آقای کیم^۱ و همکاران برای پایش سلامت پل صفحه از شاخصی استفاده کرده‌اند که در این شاخص جهت تشخیص آسیب از تغییرات فرکانس طبیعی استفاده شده است که در این روش در یکی از سناریوها، شاخص در تشخیص آسیب کوچک دچار خطا شد و آسیب جزئی تشخیص داده نشد [9].

در تحقیق مربوط به آقای ژو^۲ و همکاران در مورد استفاده از روش فرکانس طبیعی، در مواردی حتی آسیب‌های گسترده به‌خوبی تشخیص داده نشد زیرا فرکانس‌های پل در مواردی نسبت به آسیب‌ها غیر حساس بودند [10].

۱-۱-۲- روش‌های مبتنی بر شکل مودی

در این روش‌ها، تشخیص مکان آسیب بسیار بهتر انجام می‌شود اما این روش‌ها به تعداد مودهای در نظر گرفته شده وابسته می‌باشند. در این روش‌ها در مودهای پایین دقت تشخیص آسیب کاهش پیدا می‌کند و به شدت تحت تأثیر شرایط محیطی و عملیاتی قرار می‌گیرد و در مودهای بالاتر هم برای اطمینان از دقت پایش سلامت نیاز به یک شبکه مترامی از حس‌گرها می‌باشد [11].

برای اولین بار آقای وست^۳ از معیار MAC^4 برای تشخیص آسیب در بال یک سفینه‌ی آسیب دیده استفاده کرد، شکل مودها از آزمایش بارگذاری آکوستیک به دست آمده بودند. شکل مودها بخش‌بندی می‌شوند و تغییر ایجاد شده در ضریب اطمینان مودی در طول استفاده از روش‌های تفکیک‌کننده متفاوت، برای مکان‌یابی آسیب و تشخیص آن استفاده می‌شوند [12].

روش DI به وسیله‌ی استابس و همکاران پیشنهاد شد که بر اساس تغییرات انرژی کرنشی ذخیره شده در یک پل فلزی، زمانی که در یک شکل مود خاص تغییر فرم می‌دهد را محاسبه می‌کند در این روش با توجه به تغییرات انرژی کرنشی مودال در سازه‌ی سالم و آسیب دیده تشخیص آسیب صورت می‌گیرد [13].

آقای شه^۵ و همکاران در پژوهشی عمده‌ی روش‌های شناسایی آسیب به وسیله خصوصیات مودال سازه (فرکانس طبیعی و شکل مد و میرایی) مورد مقایسه قرار دادند آن‌ها در این پژوهش از یک مدل ساده‌ی تیر استفاده کردند نتایج این تحقیق بدین صورت می‌باشند:

روش تغییر فرکانس طبیعی و روش معیار اطمینان مودی (Mac) و روش معیار اطمینان مودی مختصاتی (COMAC) حضور آسیب را تشخیص داده‌اند اما در شناسایی محل آسیب ناموفق بودند. روش شاخص خسارت (DI) در شناسایی محل خسارت به صورت منفرد و چندگانه به خوبی عمل کرده است [14].

همچنین آقای دیکسیت^۶ و همکاران با توجه به بررسی روش‌های شناسایی آسیب برای تشخیص آسیب در یک تیر به این نتیجه رسیدند که استفاده از روش‌های مربوط به تغییرات انرژی کرنشی مودال در مقایسه با فرکانس طبیعی سازه و شکل مود و شکل انحنا، نتایج دقیق‌تری در مورد آسیب ایجاد شده در سازه ارائه می‌کنند [15].

3 West
4 Modal Assurance Criterion
5 Shah
6 Dixit

1 Kim
2 Zhou

میرایی یکی از پارامترهای مودال سازه می‌باشد که به‌عنوان شاخص آسیب به کار می‌رود، مبانی این روش بر اساس این می‌باشد که وقتی سازه دچار آسیب می‌شود میرایی افزایش پیدا می‌کند. از ایرادهای این روش، پیچیدگی تعیین ضریب میرایی برای سازه‌های بزرگ و نامنظم می‌باشد و از مزیت‌های این روش این می‌باشد که می‌تواند اثرات غیرخطی مربوط به آسیب را تشخیص دهد [6].

آقای کیوردلی^۱ و همکاران با استفاده از تبدیل موجک روشی برای استخراج فرکانس و میرایی از ارتعاش آزاد سازه ارائه کردند و در ادامه با توجه به تغییرات فرکانس و میرایی به تشخیص آسیب در مدل عددی و آزمایشگاهی پرداختند و نتایج این پژوهش نشان داد که میرایی در مقایسه با فرکانس طبیعی از حساسیت بالاتری در مقابل آسیب برخوردار می‌باشد [16].

۱-۱-۳- روش‌های مبتنی بر توابع پاسخ فرکانس

در روش‌های مبتنی بر توابع پاسخ فرکانس، محل آسیب تشخیص داده می‌شود و این روش‌ها می‌توانند اطلاعات بیشتری در مورد آسیب فراهم کنند چراکه درکل محدوده، فرکانس محاسبه می‌شود و از مشکلات این روش انتخاب محدوده فرکانس بهینه می‌باشد و این‌که نیاز به اندازه‌گیری نیروی تحریک می‌باشد [17].

از مزیت‌های این روش این می‌باشد که نیاز به توسعه یک مدل عددی از سیستم ارتعاشی ندارد، زیرا به‌طور مستقیم با داده‌های تجربی کار می‌کند [18].

۱-۱-۲- مروری بر روش‌های تشخیص خسارت مبتنی بر پردازش سیگنال

در این روش‌ها پردازش سیگنال صورت می‌گیرد. در این روش‌ها از نقاط مختلف سازه داده‌هایی ثبت می‌شوند و ویژگی‌های مرتبط با آسیب از داده انتخاب می‌شود که با توجه به این‌که در این روش‌ها با حجم زیادی از داده و اطلاعات روبرو هستیم، متراکم‌سازی و تفسیر این داده‌ها از اهمیت بسیار بالایی برخوردار می‌باشد [6].

در پژوهشی آقای سان^۲ و همکاران از یک مدل AR^3 متناسب با تاریخچه شتاب به یک ستون بتنی پل آسیب‌دیده و سالم اختصاص داده است و ضرایب مدل AR به‌عنوان ویژگی حساس به آسیب در نظر گرفته‌شده است، سپس با مقایسه ضرایب، تشخیص آسیب انجام‌شده است [19].

در مقاله‌ای آقای بیات و همکاران از روش پردازش سیگنال در حوزه‌ی فرکانس استفاده کرده‌اند، در این پژوهش، از روشی مبتنی بر یک الگوریتم جدید بر اساس تابع چگالی طیفی توان و روش فاصله مربع حداقل به تشخیص آسیب در ستون‌های یک پل با دهانه‌های ساده پرداخته‌شده است و در این روش آسیب در ۵ سناریو در نظر گرفته‌شده است و در هر ۵ سناریو آسیب به‌خوبی تشخیص داده‌شده است [20].

در رساله‌ای که توسط آقای احمدی و همکاران ارائه‌شده است به بررسی آسیب‌های لرزه‌ای در پایه‌های پل‌ها پرداخته‌شده است در این پژوهش ابتدا ۶ تابع زمان فرکانس بررسی شده‌اند و تابع توزیع تداخلی کاهش‌یافته به‌عنوان بهترین تابع برای تحلیل و بررسی سیگنال‌های دریافتی از پایه پل موردنظر انتخاب‌شده است و سپس با اعمال نیروی‌های زلزله‌های انتخابی بر روی مدل‌های طراحی‌شده در نرم‌افزار SAP2000، آسیب‌پذیرترین پایه پل جهت مدل‌سازی آسیب برای اعمال نیروی هارمونیک انتخاب‌شده است [1].

آقای اوانسو^۴ و همکاران عملیات پایش سلامت در یک تیر و یک قاب را با استفاده از روش تبدیل موجک پیوسته و گسسته انجام دادند، این روش به‌گونه‌ای می‌باشد که آسیب به‌صورت یک اغتشاش در پاسخ سازه خودش را نشان می‌دهد که البته این بی‌نظمی و آشفتگی در پاسخ استخراج‌شده از سازه قابل تشخیص نمی‌باشد و با توجه به ضرایب تبدیل موجک پیوسته و یا سیگنال جزئی موجک گسسته این آشفتگی را می‌توان تشخیص داد. در این روش موقعیت آسیب با دقت بالایی قابل تشخیص می‌باشد [21].

2 Sohn
3 Auto-Regressive
4 Ovanosova

1 Curadelli

۱-۳-۱- مروری بر روش‌های مبتنی بر هوش مصنوعی در تشخیص خسارت

در این روش‌ها اغلب حس‌گرهایی بر روی سازه موردنظر نصب می‌شوند و اطلاعات و داده‌های مربوط به آن سازه در حافظه دستگاه ذخیره می‌شود. ازجمله مزیت‌های استفاده از روش‌های هوش مصنوعی در پایش سلامت پل می‌توان به تجزیه و تحلیل داده‌های فراوان اشاره کرد و این روش برای پایش سلامت پل‌های بزرگ بسیار کاربردی می‌باشد و این‌که از معایب این روش این می‌باشد که پس از استخراج داده‌های خام از سازه موردنظر، نیاز به یک غربالگری و بهینه‌سازی از داده‌های به‌دست‌آمده از پل می‌باشد و که کار بسیار مشکلی می‌باشد که در روش CNNs^۱ این عملیات به‌صورت مستقیم انجام می‌شود و داده‌های موردنظر دیگر نیاز به غربالگری ندارند اما زمان آموزش و استفاده از این روش بسیار بالا می‌باشد [22].

آقای دان^۲ و همکاران، روشی بر مبنای الگوریتم سری زمانی چند متغیره را ارائه کردند که یادگیری و کار با آن بسیار آسان می‌باشد و در این روش نیاز به غربالگری دستی بر روی داده‌های به‌دست‌آمده نمی‌باشد، همچنین در این روش دقت عملکرد اندازه‌گیری حس‌گرها بسیار بالا می‌باشد و اگر حس‌گر به تعداد کافی نیز موجود نباشند می‌توان با کاهش تعداد حس‌گر و با استفاده از روش PSO - FESNs^۳ داده‌های به‌دست‌آمده را بهینه کرد [22].

طی مقاله‌ای آقای اسوندسن^۴ و همکاران کارایی الگوریتم یادگیری ماشین بدون نظارت را برای پایش سلامت پل فلزی واقعی بررسی می‌کنند و کارایی این روش را با چهار الگوریتم یادگیری ماشین نظارت‌شده مقایسه می‌کنند و نتایج نشان می‌دهد که از این الگوریتم می‌تواند همانند الگوریتم‌های نظارت‌شده، کارآمد باشد و آسیب را به‌خوبی تشخیص دهد و این پژوهشگر ثابت می‌کند که آسیب‌های سازه‌ای پل‌های فلزی که عمدتاً ناشی از خستگی می‌باشد به‌خوبی با این روش

تشخیص داده می‌شوند. از مزیت‌های الگوریتم یادگیری ماشین نظارت‌شده این می‌باشد که می‌تواند آسیب را بدون اطلاعات دریافتی از پل سالم و تنها با داشتن اطلاعات حاصل از پل آسیب‌دیده تشخیص دهد [23].

۱-۲-۲- منحنی شکنندگی

از نوآوری‌های این مقاله این می‌باشد که کاربرد منحنی‌های شکنندگی در بحث پایش سلامت سازه‌ها بررسی شده است. جهت آشنایی بیشتر با این منحنی‌ها و کاربرد این منحنی‌ها، چند پژوهش در این بخش بررسی شده است.

از نمونه تحقیقات معتبر سال‌های اخیر، پژوهش آقای بیات و همکاران می‌باشد، در این پژوهش شرح داده‌شده است که در اکثر مطالعات مربوط به بررسی عملکرد لرزه‌ای سازه‌ها با منحنی شکنندگی، از معیارهای شدت PGA^۵ (شتاب بیشینه شدت لرزه‌ای) و Sa^۶ (شتاب طیفی مود اول سازه) برای رسم منحنی‌های IDA استفاده می‌شود، در این پژوهش این دو معیار از نظر کارایی و کاربردی بودن و کفایت موردبررسی قرار می‌گیرد، این پژوهش بر روی دو مدل پل مستقیم و مورب انجام‌شده است و معیاری بهینه‌تر نسبت به دو معیار قبلی برای پل، در حالت مورب پیشنهاد می‌شود و ثابت می‌شود که معیار جدید ASA^۷ (متوسط شتاب طیفی) باعث کاهش پراکندگی و افزایش کارایی در نتایج منحنی‌های IDA می‌شود [24].

آقای رن^۸ و همکاران طی تحقیقی با توجه به مدل‌سازی یک پل شاه‌تیر سه دهانه در نرم‌افزار، معیار حدی مربوط به رسم منحنی‌های شکنندگی را طبق منطق فازی ریاضیات اصلاح‌کرده‌اند که طبق این معیار، منحنی‌های شکنندگی بسیار دقیق‌تر رسم می‌شوند و بدون در نظر گرفتن معیارهای اصلاح‌شده فازی، شکنندگی بالقوه لرزه‌ای اجزا و سیستم پل دست‌کم گرفته می‌شود [25].

در تحقیقی که آقای آلم و همکاران انجام داده‌اند با استفاده از منحنی‌های شکنندگی، به ارزیابی خطر لرزه‌ای یک برج آب

5 Peak ground Acceleration
6 Spectral Acceleration
7 Average Spectral Acceleration
8 Ren

1 Convolutional neural networks
2 Dan
3 particle swarm optimization-functional echo state networks
4 Svendsen

۲-انتخاب ضریب مقیاس

۳-انتخاب معیار مناسب برای شدت IM و محاسبه‌ی آن برای ضریب مقیاس‌های مختلف

۴-انتخاب معیار مناسب برای نیاز مهندسی EDP

۵-انجام تحلیل دینامیکی تاریخچه زمانی برای هر سطح مقیاس شدت

۶-پردازش اطلاعات به‌دست‌آمده و رسم منحنی‌های IDA [28]

۲-۳- انتخاب یک و یا مجموعه‌ای از نیروهای ارتعاشی برای تحلیل IDA

در این پژوهش برای تشخیص آسیب در پایه پل از نیروهای هارمونیک استفاده‌شده و از بین نیروی هارمونیک توابع سینوسی استفاده‌شده است، منحنی‌های هارمونیک سینوسی در قسمت پایین نمایش داده‌شده‌اند که معادله‌ی این دو نمودار در اشکال ۱ و ۲ این بخش نمایش داده‌شده‌اند و فرض شده است که نیروهای هارمونیک توسط موتور محرک به قسمت بالای ستون پل اعمال‌شده‌اند و برای جلوگیری از پدیده‌ی تشدید فرکانس نیروی هارمونیک اعمالی با فرکانس طبیعی پل متفاوت می‌باشد.

شکل ۱- منحنی نیروی هارمونیک شماره ۱

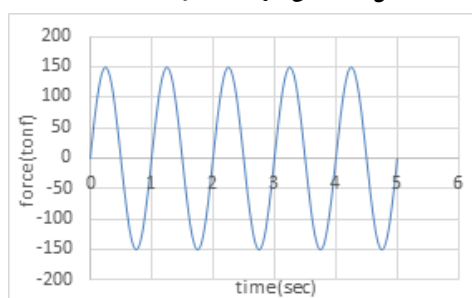


Fig. 1. Harmonic force curve number 1

شکل ۲- منحنی نیروی هارمونیک شماره ۲

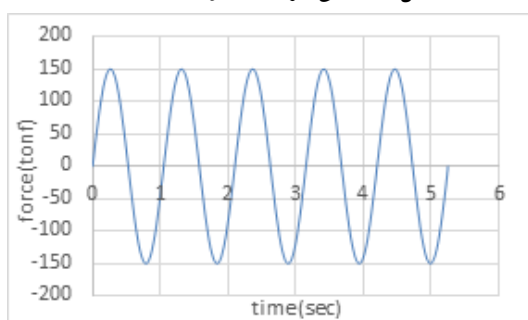


Fig. 2. Harmonic force curve number 2

گیر از بزرگ‌ترین مخازن موجود در منطقه پرداخته است؛ که ارزیابی خطر لرزه‌ای این برج آبگیر، نقش بسیار مهمی در مدیریت خطر مخزن در شرایط بحرانی دارد. در این تحقیق خطر لرزه‌ای با به‌روزرسانی توابع شکنندگی با استفاده از استنتاج بیزی^۱ و شبیه‌سازی MCMC^۲ ارزیابی می‌شود. با به‌روزرسانی منحنی شکنندگی به‌دست‌آمده از ترکیب نتایج تحلیل، کاهش قابل‌توجه عدم قطعیت در ناحیه باند اطمینان ۹۵ درصدی نشان داده می‌شود.

[26].

۲- مبانی نظری

در این بخش در مورد مبانی و مفاهیم مورد‌استفاده که در بخش‌های بعدی مقاله، مباحثی نگارش شده است، این پژوهش در مورد کاربرد منحنی‌های شکنندگی در بحث پایش سلامت می‌باشد لذا ابتدا روش تحلیل دینامیکی فزاینده معرفی‌شده است و در مورد تعاریف و مراحل این روش و معیارهای شدت و معیار نیاز و منحنی شکنندگی و سطوح عملکرد مباحثی عنوان‌شده است.

همچنین در قسمت آخر این بخش مبانی نظری روش معیار اطمینان مودی مختصاتی (COMAC) و معیار نشانه آسیب (DI) شرح داده‌شده است و سپس با ارتقاء معیارهای ذکر‌شده، دو معیار جدید نشانه آسیب ارتقاء‌یافته (PDI) و معیار اطمینان مودی مختصاتی ارتقاء‌یافته (PCOMAC) جهت نمایش همبستگی منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک ارائه‌شده‌اند.

۲-۱- روش تحلیل دینامیکی فزاینده (IDA^۳)

در روش تحلیلی دینامیکی فزاینده رفتار سازه و اجزای آن در برابر شدت‌های مختلف سنجیده می‌شود و استفاده از این منحنی‌ها روشی برای محاسبه‌ی تقاضا و ظرفیت سازه می‌باشد [28].

۲-۲- مراحل روش IDA

۱-انتخاب یک یا مجموعه‌ای از نیروها برای تحلیل IDA

- 1 Bayesian
- 2 Markov Chain Monte Car
- 3 Incremental Dynamic Analysis

۴-۲- معیار شدت IM^1

با توجه به این که موضوع این تحقیق در رابطه با نیروهای هارمونیک می باشد و کاربرد این نیروها در بحث پایش سلامت، در این پژوهش از شاخص شدت پیشینه ی نیروی هارمونیک برای رسم منحنی های شکنندگی نیروهای هارمونیک استفاده شده است.

۵-۲- پارامتر نیاز EDP^2

شاخص نیاز مهندسی که در این پژوهش به کاررفته است شاخص چرخش رخ داده در پایین ستون می باشد و منحنی های شکنندگی های نیروهای هارمونیک با توجه به این شاخص رسم شده اند.

۶-۲- منحنی های شکنندگی

این منحنی ها احتمال عبور پارامتر نیاز مهندسی از سطوح عملکردی به ازای مقدار مشخصی از نیرو بیان می کنند که با استفاده از این منحنی ها به خوبی می توان اثر عدم قطعیت مشخصات زمین لرزه ها و سایر عدم قطعیت های مربوط به پارامترهای طراحی بر روی رفتار سازه و مقدار خسارت وارده شده به خوبی بررسی می شود [27].

تابع توزیع در نظر گرفته شده برای رسم منحنی های شکنندگی تابع توزیع لوگ نرمال می باشد که منحنی ها با استفاده از این تابع، احتمال تجاوز از مقدار تعیین شده ی به ازای مقدار مشخصی از شدت را محاسبه می کنند.

رابطه ی تولید منحنی های شکنندگی در قسمت زیر نمایش داده شده است [27]:

$$P[\text{collapse}|IM] = \varphi \left[\frac{\ln(IM) - \ln(\mu)}{\sigma} \right] \quad (3)$$

در رابطه ی بالا IM معیار شدت و μ میانگین نیاز مهندسی σ انحراف معیار نیاز مهندسی

۷-۲- تعیین سطح عملکرد برای منحنی های شکنندگی

نیروهای هارمونیک

جهت تعیین سطوح عملکرد سازه و این که بتوان اطلاعات مربوط به منحنی های شکنندگی را به درستی تحلیل و ارزیابی نمود. نیاز می باشد که محدوده و یا ملاحظات خاصی در نظر گرفته شود که با رسیدن منحنی ها به این محدوده ها بتوان عملکرد سازه را تعیین نمود [27].

شکل ۳- منحنی ممان-چرخش مربوط به مفصل پایین ستون منتخب

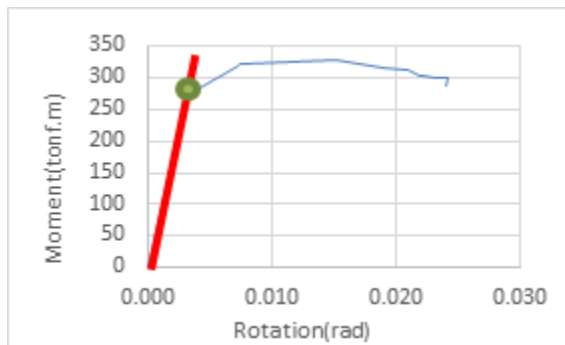


Fig. 3. The moment-rotation curve corresponding to the bottom joint of the selected column

سطح عملکرد موردنظر برای پایه پل با توجه به موضوع تحقیقاتی این پژوهش، نقطه ی فراگذشت از حالت خطی می باشد، این نقطه برابر چرخش ایجاد شده در مفصل یعنی 0.003 رادیان در نظر گرفته شده است که مطابق با منحنی ممان-چرخش ارائه شده در شکل ۳ این نقطه به صورت دقیق نمایش داده شده است و با در نظر گرفتن این سطح عملکرد، منحنی های شکنندگی پایه سالم و آسیب دیده رسم شده اند. این روند تعریف نقطه ی عملکردی در مرجع [29] نیز انجام شده است.

۸-۲- ارائه معیارهایی جهت کمی سازی همبستگی

منحنی های شکنندگی نیروهای هارمونیک در حالت های سالم و آسیب دیده

برای کمی سازی همبستگی منحنی های شکنندگی نیروهای هارمونیک در حالت های سالم و آسیب دیده از روش های مربوط به تشخیص آسیب مبتنی بر خصوصیات مودال سازه استفاده شده است. در این روش ها به جای مشخصات مودال

1 Intensity Measure

2 Engineering Demand Parameter

سازه از شاخص احتمال فراگذشت مربوط به منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک استفاده شده است.

۲-۸-۱- بررسی روش نشانه آسیب (DI^۱) و ارائه روش نشانه آسیب ارتقاء یافته (PDI^۲)

در روش نشانه آسیب، تغییرات انرژی کرنشی ذخیره شده در سازه را وقتی که در یک شکل مود خاص تغییر فرم می‌دهد محاسبه می‌شود [12].

در روش نشانه آسیب عبارت‌های ϕ_i^{**} و ϕ_i^{**} نشان‌دهنده‌ی توابع انحنای شکل مودی برای مود i ام در فاصله‌ی x در طول تیر برای حالت سالم و برای حالت آسیب‌دیده می‌باشد که در این بخش می‌بایست برای بررسی تفاوت‌ها، از داده‌هایی که با آن‌ها منحنی شکنندگی رسم می‌شوند استفاده شود، برای همین به جای توابع انحنای شکل مودی از اعداد مربوط به احتمال فراگذشت از حالت حدی استفاده شده است و در این بخش به جای عبارت‌های ϕ_i^{**} و ϕ_i^{**} عبارت‌های FR_{ji}^* و FR_{ji}^* استفاده شده است و j میزان آسیب‌دیدگی می‌باشد و i شماره شدت مقیاس شده به کاررفته می‌باشد که با توجه به تغییرات صورت گرفته نیز نام روش نشانه آسیب DI^3 به روش PDI^4 تغییر یافته است و هر مقدار PDI عدد بزرگ‌تری را نشان دهد این به معنی این می‌باشد که سازه دچار آسیب شدیدتری شده است البته کارآمدی روش ارائه شده در قسمت‌های بعدی بررسی شده است.

$$\beta_{ji} = \frac{(\phi_{ji}^{**})^2 + \sum_{k=1}^m (\phi_{ki}^{**})^2}{(\phi_{ji}^{**})^2 + \sum_{k=1}^m (\phi_{ki}^{**})^2} \times \frac{\sum_{k=1}^m (\phi_{ki}^{**})^2}{\sum_{k=1}^m (\phi_{ki}^{**})^2} = \frac{NMU_{ji}}{DEN_{ji}} \quad (4)$$

$$\beta_{ji} = \frac{\sum_{i=1}^n NMU_{ji}}{\sum_{i=1}^n DEN_{ji}} \quad (5)$$

$$Z_j = (\beta_j - \mu_\beta) / \sigma_\beta \quad (6)$$

$$\beta_{ji} = \frac{(FR_{ji}^*)^2 + \sum_{k=1}^m (FR_{ki}^*)^2}{(FR_{ji}^*)^2 + \sum_{k=1}^m (FR_{ki}^*)^2} \times \frac{\sum_{k=1}^m (FR_{ki}^*)^2}{\sum_{k=1}^m (FR_{ki}^*)^2} = \frac{NMU_{ji}}{DEN_{ji}} \quad (v)$$

$$\beta_{ji} = \frac{\sum_{i=1}^n NMU_{ji}}{\sum_{i=1}^n DEN_{ji}} \quad (8)$$

$$Z_j = (\beta_j - \mu_\beta) / \sigma_\beta \quad (9)$$

۲-۸-۲- بررسی روش معیار اطمینان مودی مختصاتی (COMAC^۵) و ارائه روش معیار اطمینان مودی مختصاتی ارتقاء یافته (PCOMAC^۶)

روش معیار اطمینان مودی مختصاتی و روش معیار اطمینان مودی با استفاده از شکل مودهای سازه موردنظر آسیب را تشخیص می‌دهند و این دو معیار بیانگر همبستگی بین دو شکل مود سازه می‌باشند. مقدار معیار اطمینان مودال بین ۰ و ۱ محدود می‌شود، ۱ نشان‌دهنده شکل حالت کاملاً سازگار و شبیه به هم می‌باشند و مقدار نزدیک به ۰ نشان‌دهنده‌ی حالتی می‌باشد که از همبستگی دور شده است و دو نمودار با یکدیگر متفاوت می‌باشند [30].

روش PCOMAC برای نمایش تفاوت بین منحنی‌های شکنندگی سالم و آسیب‌دیده بررسی شده است. در این بخش به جای مشخصات مربوط به شکل مود سازه، از عبارت‌های FR_{ir}^B و FR_{ir}^A که بیانگر احتمال فراگذشت از حالت حدی در i میزان آسیب‌دیدگی و در شماره شدت مقیاس شده r برای منحنی شکنندگی سالم و آسیب‌دیده می‌باشد که شاخص PCOMAC عددی بین صفر و یک می‌باشد که هرچه قدر شاخص به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده‌ی حالتی می‌باشد که نمودارهای حالت سالم و آسیب‌دیده به یکدیگر نزدیک‌تر می‌باشند که در این حالت دچار آسیب کمتری شده است و عدد ۰ نشان‌دهنده‌ی این می‌باشد که منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک فاصله‌ی آن‌ها از هم بیشتر می‌باشد و این به معنی این می‌باشد که سازه دچار آسیب شدیدتر شده است.

1 Damage Index

2 Progressive Damage Index

3 Damage Index

4 Progressive Damage Index

5 Coordinate Modal Assurance Criterion

6 Progressive Coordinate Modal Assurance Criterion

شکل ۴- جزئیات عرشه پل

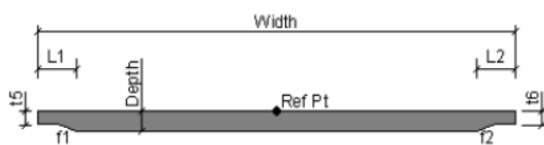
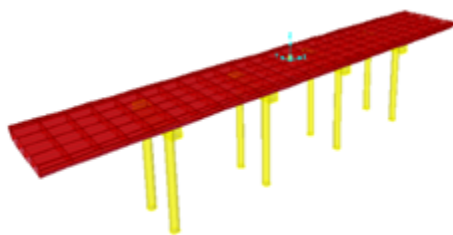


Fig. 4. Bridge deck detail

نمونه‌ی کاملی از مدلی که در نرم‌افزار CSIBridge (۳) طراحی شده در شکل ۵ نمایش داده شده است. شکل ۵- نمایش سه‌بعدی کامل پل مدل‌سازی شده



ig. 5. Full 3D view of modeled bridge

برای صحت سنجی اعتبار مدل طراحی با مدل مرجع [31]، زمان تناوب این مدل استفاده شده با زمان تناوب مدل مرجع مقایسه شده است که در جدول ۲ نتایج این صحت سنجی ارائه شده است.

جدول ۲- مقایسه زمان تناوب مدل مرجع با مدل استفاده شده

Row	Record name	Event time	PGA(g)	Mw	Fault mechanism	Vs30(m/s)
1	Northern Calif	1975	0.115	5.2	sliding	576
2	Kocaeli	1999	0.26	7.51	sliding	796
3	Varzaqan	2012	0.43	6.2	sliding	475

Table 2. Comparing the period of the reference model with the used model

همان‌طور که از نتایج به دست آمده از جدول ۲ مشخص می‌باشد که درصد تفاوت مربوط به زمان تناوب در مدل استفاده شده و مدل مرجع حداکثر ۳ درصد می‌باشد که قابل قبول می‌باشد که خود نشان‌دهنده‌ی صحت و دقت بالای مدل‌سازی می‌باشد.

۴- مشخص کردن آسیب‌پذیرترین ستون پل

برای پیدا کردن ستونی که بیشتر از همه مستعد آسیب می‌باشد و درصد آسیب‌دیدگی در پایه پل می‌بایست که رکورد

$$COMAC(i) = \frac{(\sum_{r=1}^m \phi_{ir}^A \phi_{ir}^B)^2}{(\sum_{r=1}^m \phi_{ir}^A \phi_{ir}^A)(\sum_{r=1}^m \phi_{ir}^B \phi_{ir}^B)} \quad (10)$$

ϕ_{ir}^A : شکل‌های مودی در مختصات i و در مود r برای سازه

سالم

ϕ_{ir}^B : شکل‌های مودی در مختصات i و در شدت مقیاس شده‌ی

Γ برای سازه آسیب‌دیده

$$COMAC(i) = \frac{(\sum_{r=1}^m \phi_{ir}^A \phi_{ir}^B)^2}{(\sum_{r=1}^m \phi_{ir}^A \phi_{ir}^A)(\sum_{r=1}^m \phi_{ir}^B \phi_{ir}^B)} \quad (3)$$

FR_{ir}^A : شاخص احتمال فراگذشت از حالت حدی i و در شدت

مقیاس شده Γ برای سازه سالم

FR_{ir}^B : شاخص احتمال فراگذشت از حالت حدی i و در شدت

مقیاس شده Γ برای سازه آسیب‌دیده

۳- مدل‌سازی

در این تحقیق از پل با مقطع بتنی استفاده شده است این پل دارای ۸ پایه می‌باشد عرض کلی عرشه ۱۱/۸ متر می‌باشد و عرشه به شکل دال درجا مدل‌سازی شده است و عرض عرشه دارای ۱۱ متر سواره‌رو می‌باشد و تعداد دهانه‌های این عرشه ۵ عدد می‌باشد که برای مدل‌سازی کامل عرشه از ۲۰۰ المان Shell استفاده شده است. پایه‌های میانی این مدل پل از دو قسمت ستون و سرستون تشکیل شده است که هر سرستون از دو ستون دایره‌ای شکل به قطر ۱.۲ متر تشکیل شده است. سرستون موردنظر از جنس بتن می‌باشد که طول آن ۹.۸ متر و عرض آن ۱.۵ متر و ضخامت آن ۱ متر می‌باشد و ارتفاع آن تا ۱۰ متر زیر سرستون است و ستون‌ها و سرستون‌ها توسط المان frame مدل‌سازی شده است. در این مدل‌سازی برای اتصال بین ستون و سرستون و اتصال عرشه به سرستون از المان‌های link استفاده شده است که اتصال این اعضا در کلیه درجات آزادی صلب در نظر گرفته شده است. در ادامه در جدول ۱ جزئیات عرشه پل مدل نگارش شده است که در شکل ۴ جزئیات عرشه به پل به صورت جزئی نمایش داده شده است.

جدول ۱- مشخصات عرشه پل [31]

$$L_1 L_2 = 1m \quad t_5 t_6 = 0.3m \quad f_1 f_2 = 0.6m \quad \text{Depth} = 0.85m$$

Table 1. Characteristics of the bridge deck [31]

جدول ۳- مشخصات زلزله‌های اعمال شده به پل

Percentage difference	period in the used model	period in the reference model	number of mode
1	0.78	0.79	1
2	0.38	0.39	2
0	0.192	0.192	3
1.3	0.188	0.1906	4
3	0.169	0.175	5

Table 3. Characteristics of earthquakes applied to the bridge

شکل ۶- نمایش نام‌گذاری پایه‌های پل

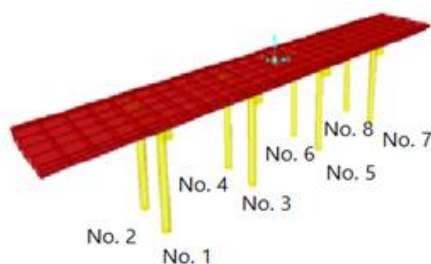


Fig. 6. Showing the naming of bridge piers

در شکل ۶ تمامی پایه‌های مدل شده در نرم‌افزار برای بررسی دقیق‌تر، نام‌گذاری شده‌اند که در ادامه در جدول ۴ میزان آسیب‌های ایجادشده در پایه پل‌ها در اثر زلزله نمایش داده شده است.

همان‌طور که از داده‌های نمایش داده شده در جدول ۴ مشاهده می‌شود، بیشترین آسیب ناشی از زلزله در قسمت ستون‌های میانی یعنی ستون‌های شماره ۳ و ۴ و ۵ و ۶ اتفاق افتاده است و آسیب کمتر در ستون‌های ابتدایی و انتهایی یعنی ستون‌های شماره ۱ و ۲ و ۷ و ۸ ایجادشده است و نتایج به‌دست آمده در این بخش برای هر سه زلزله به‌صورت کلی نزدیک به هم هستند، در نتیجه ستون‌های میانی برای مدل‌سازی آسیب و بحث پایش سلامت در اولویت می‌باشند و یکی از این پایه‌ها در قسمت‌های بعدی این پژوهش بررسی شده است.

زمین‌لرزه به مدل پل اعمال شود و تحلیل تاریخیچه زمانی غیرخطی انجام شود با توجه به نمودارهای ممان-چرخش که از تحلیل به دست می‌آیند مشخص شود که آسیب در کدام یک از ستون‌ها ایجادشده است و با استفاده از این روند می‌توان میزان آسیب ایجادشده در ستون‌ها را نیز تشخیص داد و در این پژوهش فرض شده است که آسیب بحرانی در پایین ستون‌ها ایجاد می‌شود.

در این بخش تعدادی رکورد زلزله جهت تحلیل تاریخیچه زمانی انتخاب می‌شود، مشخصات رکوردهای زلزله‌های منتخب در جدول ۳ نگارش شده است و رکوردها دور از گسل می‌باشند و فرض شده است که خاک محل ثبت رکوردها با خاک محل مدل پژوهش یکسان می‌باشند و طبق مرجع [1] خاک محل ثبت هر سه رکورد متناسب با یکدیگر می‌باشند.

رکوردهای زلزله منتخب مطابق با الزامات مربوط به نشریه ۴۶۳ [32] طرح پل‌های راه و راه‌آهن در برابر زلزله، مقیاس شده است. در این پژوهش برای بررسی میزان آسیب ایجادشده در پایه پل و کاهش سختی اتفاق افتاده در سازه، شیب منحنی ممان-چرخش در ابتدای پاسخ به‌دست آمده در هر بار اعمال رکورد زلزله بررسی شده‌اند و ذکر این مسئله حائز اهمیت می‌باشد که چون در مورد آسیب واردشده به پل‌ها با اعمال یک شتاب‌نگاشت اطلاعات دقیقی نداریم، می‌بایست برای بررسی آسیب ایجادشده، دو شتاب‌نگاشت به‌صورت متوالی به پل اعمال شوند و با بررسی شیب قسمت ابتدایی دو نمودار (درواقع با بررسی افت و کاهشی که در شیب قسمت دوم نمودار در مقایسه با قسمت اول رخ داده است) به میزان کاهش سختی و آسیب واردشده به ستون پل پی ببریم. مشخصات زلزله‌های منتخب در جدول ۳ نمایش داده شده است و همان‌طور که در بخش‌های قبل ذکر شده است خاک محل ثبت شتاب‌نگاشت‌های انتخابی متناسب می‌باشند.

جدول ۴- میزان آسیب ایجادشده در پایه پل ناشی از اثر زلزله

Pier 8	Pier 7	Pier 6	Pier 5	Pier 4	Pier 3	Pier 2	Pier 1	applied record	Row
4%	4%	10%	10%	10%	10%	4%	4%	Northern Calif	1
30%	30%	41%	41%	41%	41%	30%	30%	Kocaeli	2
32%	32%	44%	44%	44%	44%	32%	32%	Varzaqan	3

Table 4. The amount of damage caused to the pier of the bridge caused by the earthquake

۵- تشخیص آسیب در ستون پل با استفاده از منحنی‌های شکنندگی نیروی هارمونیک

برای بحث تشخیص آسیب در پل‌ها، یکی از روش‌هایی که نیاز می‌باشد مورد بررسی قرار گیرد استفاده از منحنی‌های شکنندگی می‌باشد تا کاربرد این منحنی‌ها در بحث تشخیص آسیب در پایه پل‌ها مشخص گردد.

برای تشخیص آسیب فرض می‌شود که قبل از برخورد زلزله با سازهی مورد نظر، ستون منتخب پل با نیروی هارمونیک مرتعش شده است و چرخش‌های رخ داده در پایین ستون پل با استفاده از حسگرهایی در پایین ستون پل ثبت شده‌اند و بعد از زلزله و آسیب به سازه، دوباره ستون پل توسط نیروی هارمونیک مرتعش شده است و چرخش‌های رخ داده در پایین ستون اندازه‌گیری شده‌اند و پس از پردازش و بررسی داده‌های به دست آمده از پل‌های سالم و آسیب دیده، با استفاده از منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک در حالت‌های سالم و آسیب دیده به پایش سلامت پایه پل پرداخته می‌شود. فرض شده است که این نیروی‌های ارتعاشی را موتور محرکی به پایه‌های پل اعمال می‌کنند.

در این پژوهش به جای مدل‌سازی آسیب از خود نیروی زلزله برای کاهش سختی در ستون پل استفاده شده است به گونه‌ای که ابتدا نیروی هارمونیک به ستون پل وارد می‌شود و سپس ارتعاشات ستون ثبت می‌شود و سپس نیروی زلزله به پل وارد می‌شود و در ستون آسیب ایجاد می‌کند و پس از آن نیروی هارمونیک دوباره به ستونی وارد می‌شود که دچار آسیب لرزه‌ای شده است، سپس ارتعاشات ستون ثبت می‌شود این عملیات باعث می‌شود که آسیب بسیار دقیق در مدل تعریف شود.

شدت در نظر گرفته برای این منحنی شکنندگی برای ضریب مقیاس‌های مختلف محاسبه شده است و هر کدام از ضریب مقیاس‌ها به صورت پلکانی با گام‌های ثابت ۰/۰۲ افزایش پیدا کرده‌اند و هر کدام در شدت مورد نظر ضرب شده و محاسبه شده است و این اعداد به صورت مشخص در عدد ۱۵۰ تن نیرو ضرب شده است و این عدد، با توجه به بررسی مقدار عددی نیروهای مختلف دیگر به دست آمده است و با مقیاس

نمودن مقدار عددی نیروی دیگر، بعضاً آسیب دقیق تشخیص داده نمی‌شود و یا این که بعضاً احتمال فراگذشت از حالت حدی صفر یا صد درصد هستند که این مسئله باعث می‌شود که منحنی شکنندگی دارای مفهوم مورد نظر این پژوهش نباشد و در کل ۳۰ شدت مقیاس شده برای رسم این منحنی‌های شکنندگی در حالت‌های سالم و آسیب دیده در نظر گرفته شده است که در بعضی از منحنی‌های شکنندگی به علت نمایش بهتر، بعضی از این نقاط ابتدایی و پایانی رسم نشده‌اند که البته مشخص می‌باشند که این نقاط ابتدایی عمدتاً بیانگر احتمال فراگذشت نزدیک به صفر و یا صفر هستند و نقاط انتهایی احتمال فراگذشت صد و یا نزدیک به صد را بیان می‌کنند که شامل مفهوم کاربردی برای هدف این پژوهش نمی‌باشند.

۵-۱- رسم منحنی شکنندگی نیروهای هارمونیک برای حالت سالم

طریقه‌ی رسم منحنی شکنندگی در حالت سالم بدین صورت می‌باشد که فرض شده است که موتور ارتعاشی این نیروی هارمونیک را وارده می‌کند و حسگرهایی در پایین ستون این ارتعاشات حاصل از اعمال نیروهای هارمونیک را ثبت می‌کنند و در این بخش دینرویی هارمونیک با فرکانس‌های متفاوت به بالای ستون اعمال می‌شوند و در پایین ستون چرخش ایجاد شده توسط حسگرها ثبت می‌شوند، البته توجه شود که برای جلوگیری از پدیده‌ی تشدید^{۳۴} و پدیده‌ی ضربان^{۳۵} بایستی که فرکانس‌های وارده به پل با فرکانس‌های طبیعی سیستم متفاوت باشند که این مسئله در این بخش در نظر گرفته شده است.

لازم به ذکر است که همان‌طور که در بخش‌های قبل توضیح داده شده است شاخص شدت در نظر گرفته شده برای رسم منحنی شکنندگی بیشینه‌ی نیروی هارمونیک وارده به بالای ستون می‌باشد و شاخص نیاز در نظر گرفته شده چرخشی می‌باشد که در پایین ستون ایجاد می‌شود و سطح عملکرد در نظر گرفته شده، فراگذشت از حالت خطی می‌باشد که در

34 resonance

35 beating

در این بخش چون هدف رسم منحنی شکنندگی در حالت آسیب‌دیده می‌باشد بایستی که آسیب در ستون در نظر گرفته شود که برای در نظر گرفتن دقیق‌تر آسیب، خود نیروی زلزله به پل مورد نظر اعمال شده است و سپس نیروهای هارمونیک در حالتی که سازه دچار آسیب لرزه‌ای شده است، وارد شده‌اند.

مشخصات منحنی شکنندگی در حالت آسیب‌دیده نیز به این صورت می‌باشد که شاخص شدت در نظر گرفته شده بیشینه‌ی نیروی هارمونیک وارده به بالای ستون می‌باشد و شاخص نیاز مهندسی در نظر گرفته شده چرخشی می‌باشد که در پایین ستون رخ می‌دهد. در شکل ۸ منحنی شکنندگی نیروی هارمونیک در حالت آسیب‌دیده جزئی ۱۵ درصد، ۱۱ درصد، ۵ درصد و ۲ درصد نمایش داده شده‌اند.

نتایج این بخش نیز نشان‌دهنده‌ی این می‌باشد که منحنی شکنندگی نیروهای هارمونیک بسیار دقیق رفتار سازه در آسیب‌های جزئی ایجاد شده ناشی از زلزله را نمایش می‌دهند و نتایج نشان می‌دهند که حتی اگر شدت آسیب‌های ایجاد شده ۵ درصد و ۲ درصد باشند نیز منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک به‌خوبی ترسیم می‌شوند و این روش برای شدت‌های آسیب در نظر گرفته نیز کارآمد می‌باشد و علاوه بر آن این مسئله نیز اثبات شده است که شاخص‌های شدت و نیاز مهندسی تعریف شده یعنی بیشینه‌ی نیروی هارمونیک و چرخش ایجاد شده در ستون برای رسم این منحنی‌های پیشنهاد شده مناسب می‌باشند.

۵-۳- تشخیص آسیب با استفاده از منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک

با توجه به موضوع این مقاله که پایش سلامت پایه پل می‌باشد و لازم می‌باشد کارایی و کارآمدی منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک جهت پایش سلامت پایه پل بررسی شود، به همین دلیل لازم می‌باشد که منحنی‌های شکنندگی حالت‌های سالم و آسیب‌دیده کنار هم قرار گیرند و مورد مقایسه واقع شوند.

قسمت قبل به صورت دقیق این نقطه تعریف شده بود و برای رسم منحنی شکنندگی از تابع لوگ نرمال استفاده شده است که یکی از متداول‌ترین توابعی می‌باشد که در اکثر پژوهش‌های مرتبط با منحنی شکنندگی از آن استفاده شده است و برای استفاده از رابطه‌ی مربوط به منحنی شکنندگی میانگین و انحراف معیار شاخص‌های نیاز محاسبه شده است و منحنی شکنندگی که بیانگر احتمال فراگذشت از حالت حدی با توجه به شدت‌های در نظر گرفته شده، رسم شده است که در شکل ۷ نمایش داده شده است.

شکل ۷- منحنی شکنندگی وضعیت سالم ستون شماره ۶ پل

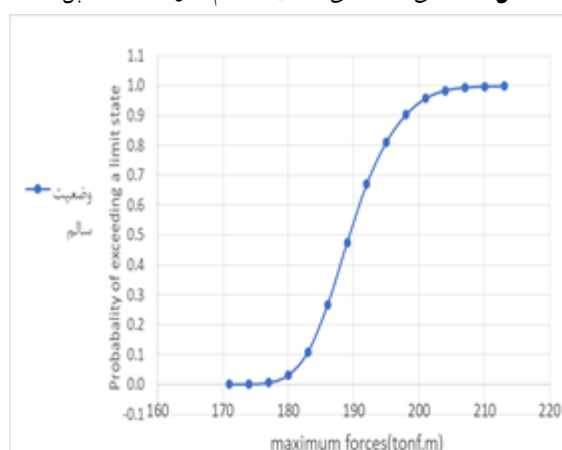


Fig. 7. The fragility curve of the healthy state of bridge column No. 6

منحنی شکنندگی بیانگر احتمال فراگذشت شاخص نیاز چرخش رخ داده در پایین ستون از حالت حدی تعریف شده در شدت‌های مختلف می‌باشد و منحنی شکنندگی رسم شده در حالت سالم کارایی و قابلیت این مورد انتظار برای بیان رفتار سازه در حالت سالم را اثبات کرد و نشان داده شد که منحنی شکنندگی نیروهای هارمونیک می‌تواند بیانگر رفتار سازه در شدت‌های مختلف سازه باشد.

۵-۲- رسم منحنی شکنندگی در حالت آسیب‌دیده

با توجه به هدف این پژوهش که پایش سلامت و تشخیص آسیب است لازم می‌باشد که قابلیت منحنی‌های شکنندگی که بیان‌کننده‌ی رفتار سازه در حالت‌های آسیب‌دیده می‌باشد نیز بررسی شود.

۶-۱- بررسی روش نشانه آسیب ارتقاء یافته (PDI³⁶)

در این بخش قابلیت روش PDI برای نمایش تفاوت بین منحنی‌های شکنندگی سالم و آسیب‌دیده بررسی شده است. در شکل ۸ منحنی‌های شکنندگی نیروی هارمونیک برای حالت‌های مختلف آسیب جهت مشاهده تفاوت‌ها نمایش داده شده است و سپس در شکل ۹ همبستگی منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک با استفاده از شاخص PDI نمایش داده شده است.

شکل ۹- استفاده از شاخص PDI جهت نمایش تفاوت منحنی‌های شکنندگی

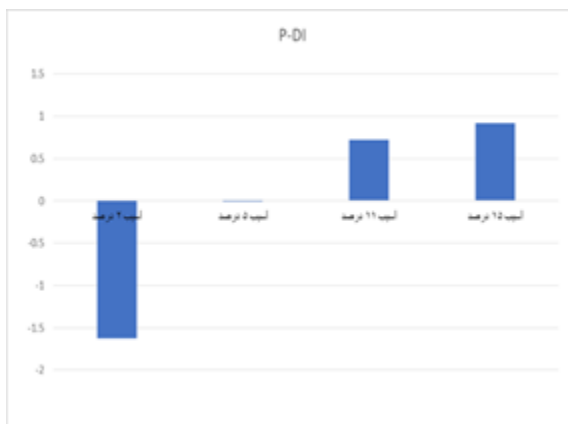


Fig. 9. Using the PDI index to show the difference in fragility curves

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، این شاخص در نظر گرفته شده، تفاوت بین آسیب‌های ۱۵ درصد و همچنین آسیب‌های ۱۱ درصد و ۵ درصد را به خوبی تشخیص می‌دهد و مقدار عددی این شاخص برای آسیب ۱۵ درصد بیشتر از آسیب ۱۱ درصد و همچنین برای آسیب ۱۱ درصد هم بیشتر از آسیب ۵ درصد می‌باشد اما این شاخص برای آسیب ۲ درصد نمایش دقیقی از تفاوت منحنی‌ها ارائه نکرده است، در کل این روش قابلیت نمایش مناسبی از تفاوت منحنی‌ها برای آسیب‌های ۵ درصد تا ۱۵ درصد را دارا بوده است.

در ادامه معیار PCOMAC جهت ارائه شاخصی دقیق‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این قسمت در شکل ۸ مقایسه‌ای بین منحنی شکنندگی در حالت سالم و آسیب‌دیده ۱۵ درصد و ۱۱ درصد و ۵ درصد و ۲ درصد انجام شده است.

شکل ۸- منحنی شکنندگی وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده مختلف ستون شماره ۶

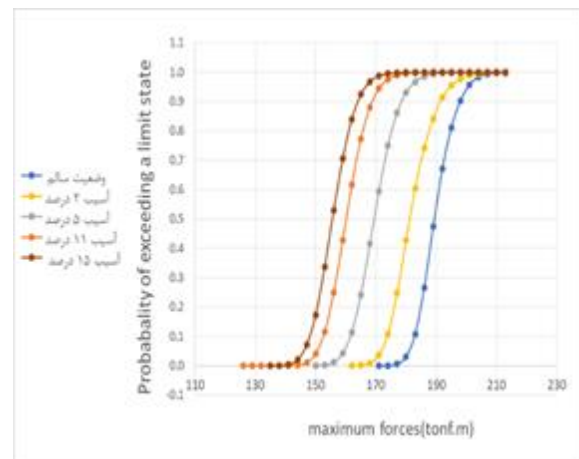


Fig. 8. The fragility curve of healthy states and different damaged states bridge column No. 6

منحنی‌های شکنندگی در حالت سالم و آسیب‌دیده ۲۵ درصد بسیار دقیق و مناسب در کنار هم تعریف شده‌اند و تفاوت بین منحنی‌های شکنندگی در حالت سالم و آسیب کاملاً مشخص می‌باشد. تفسیر شکل ۸ بدین صورت می‌باشد که با توجه به شکل ترسیم شده، احتمال فراگذشت از حالت حدی تعریف شده در منحنی شکنندگی در نظر گرفته شده برای وضعیت آسیب‌دیده، بیشتر از وضعیت سالم می‌باشد و این درصد احتمال فراگذشت از حالت حدی در شدت‌های مختلف نیروهای هارمونیک قابل مشاهده و قیاس می‌باشد که این مسئله بیانگر این می‌باشد که این منحنی‌ها آسیب را تشخیص داده‌اند.

۶-نمایش همبستگی منحنی‌های شکنندگی ستون سالم و آسیب‌دیده

برای این که تفاوت‌های منحنی‌های شکنندگی دقیق‌تر مشخص شود و بتوان این مسئله را به صورت کمی نیز بیان کرد، نیاز می‌باشد که معیارهایی در نظر گرفته شود که به واسطه‌ی این معیارها این همبستگی‌ها نشان داده شوند.

نزدیک‌تر می‌باشد که شاخص PCOMAC عددی نزدیک به ۱ را نشان می‌دهد که خود نشان‌دهنده تطابق شاخص در نظر گرفته‌شده با نتایج منحنی‌های شکنندگی می‌باشد.

در مجموع می‌توان بیان کرد که در این بخش دو معیار مناسب برای نمایش تفاوت منحنی‌های شکنندگی نیروی هارمونیک در حالت‌های سالم و آسیب‌دیده ارائه شد که عملکرد معیار PCOMAC نسبت به معیار PDI نسبتاً بهتر بود.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله جهت تشخیص آسیب جزئی در پایه پل مستقیم از منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک استفاده شده است این منحنی‌ها از اعمال نیروی هارمونیک به بالای ستون منتخب پل و سنجش چرخش رخ داده در پایین ستون به دست آمده‌اند و در تمامی منحنی‌های رسم شده چه برای وضعیت سالم ستون و چه برای وضعیت آسیب‌دیده ستون پل، شاخص شدت در نظر گرفته‌شده بیشینه‌ی نیرو و شاخص نیاز مهندسی تعریف‌شده چرخش رخ داده در پایین ستون و سطح عملکرد تعریف‌شده نیز احتمال فراگذشت از حالت خطی در نظر گرفته شده است. یافته‌های این مقاله به صورت مختصر به صورت زیر شرح داده شده است:

- نتایج این تحقیق ثابت کرده است که منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک می‌توانند ابزار بسیار مناسبی برای پایش سلامت پایه پل‌ها باشند و با استفاده از این روش در این پژوهش آسیب‌های ۱۵ درصد و ۱۱ درصد با دقت بسیار بالایی تشخیص داده شده‌اند در ضمن در این تحقیق آسیب‌های بسیار جزئی ۵ درصد و حتی ۲ درصد با دقت بسیار بالایی تشخیص داده شدند که نشان‌دهنده کاربرد منحنی شکنندگی نیروهای هارمونیک در بحث تشخیص آسیب‌های جزئی می‌باشد.

- در این تحقیق برای اولین بار برای رسم منحنی‌های شکنندگی از نیروهای هارمونیک استفاده شده است که در تحقیقات قبلی با موضوع بررسی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سازه با استفاده از منحنی شکنندگی از نیروی زلزله برای رسم این منحنی‌ها استفاده شده بود که در این تحقیق با توجه به کاربرد

۶-۲- بررسی روش معیار اطمینان مودی مختصاتی ارتقاء یافته (PCOMAC^{۳۷})

در این بخش همانند بخش قبل قابلیت روش PCOMAC برای نمایش تفاوت بین منحنی‌های شکنندگی سالم و آسیب‌دیده بررسی شده است و در این بخش برای درک دقیق‌تر عملکرد شاخص ارائه‌شده در شکل ۸ منحنی شکنندگی وضعیت‌های سالم و آسیب‌دیده در حالت‌های مختلف را نمایش داده است سپس در شکل ۱۰ همبستگی منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک با استفاده از شاخص PCOMAC نمایش داده شده است.

شکل ۱۰- استفاده از شاخص PCOMAC جهت نمایش تفاوت منحنی‌های شکنندگی

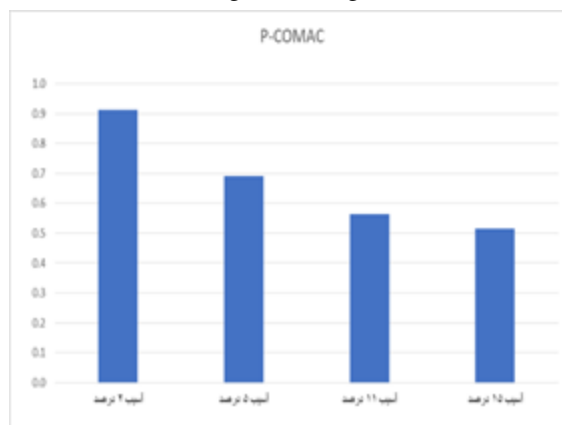


Fig. 10. Using the PCOMAC index to show the difference in fragility curves

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص می‌باشد معیار PCOMAC بسیار بهتر از معیار PDI میزان تفاوت بین منحنی شکنندگی سالم و منحنی شکنندگی آسیب‌دیده را مشخص کرده است و اگر معیار به عدد ۱ نزدیک شود به معنی همبستگی و هرچه قدر به عدد صفر نزدیک شود این عدد بیانگر حالتی می‌باشد که از همبستگی دور شده است، در شکل ۱۰ معیار PCOMAC در مورد آسیب‌هایی با شدت پایین‌تر، نتایج به عدد به ۱ نزدیک شده است و برای آسیب‌های شدیدتر این شاخص به عدد ۰ نزدیک شده است که همین مسئله را در نمودارها مشاهده می‌شود برای مثال منحنی آسیب ۲ درصد به منحنی حالت سالم

۷- مراجع

- [1] Ahmadi, H., Daneshjoo, F., Khaji, N., 2012. detection of seismic damage of concrete piers of railway bridges using time-frequency analysis. Dissertation for Civil Engineering- Earthquake Doctoral Course, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University.
- [2] Davis, S.L., Goldberg, D., DeGood, K., Donohue, N., Corless, J., & America, T.f., 2013. The Fix We're In For: The State of Our Nation's Bridges 2013. Retrieved from Transportation for America, 1707 L Street NW, Suite 250, Washington, DC 20036
- [3] Xiang, N., et al. 2019. Passive seismic unseating prevention strategies implemented in highway bridges: A state-of-the-art review. *Journal of Engineering Structures*, vol. 194 (9), pp. 77-93.
- [4] Wenzel H. Health monitoring of bridges. John Wiley & Sons; 2008 Nov 20, ISBN: 978-0-470-03173-5.
- [5] Doebling, S., et al. 1996. Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review. Los Alamos National Laboratory is operated by the University of California.
- [6] Asadi Zeidabadi, A., Bakshi, A., Ghotra Amiri, G., 2016. Structural health monitoring based on experimental wavelet transform method and fuzzy logic. Dissertation of Master's Degree in Civil-Structural Engineering, Faculty of Civil Engineering, Sharif University of Technology.
- [7] Karbhari, V., Lee, L.S., 2009. Vibration-based damage detection techniques for structural health monitoring of civil infrastructure systems. *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure Systems; A volume in Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, pp. 177-212.
- [8] Fan, W., & Qiao, P., 2011. Vibration-based damage identification methods: a review and comparative study. *Journal of Structural health monitoring*, vol. 10(1), pp. 83-111.
- [9] Kim, J., Stubbs, N., 2003. Nondestructive Crack Detection Algorithm for Full-Scale Bridges. *Journal of structural engineering*, vol. 129, pp. 1358-1366.
- [10] Zhou, H.F., Ni, Y.Q., KO, J.M., 2011. Eliminating Temperature Effect in Vibration-Based Structural Damage Detection. *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 137, pp. 758-796.
- [11] An, Y., et al, 2019. Recent progress and future trends on damage identification methods bridge structures. *Journal of Structural Control and Health Monitoring*, vol. 26(1).
- [12] Tabaei, A., Daneshjoo, F., 2014. Development of COMAC and damage index methods to detect damage on the side of bridge supports. *The scientific-research journal of Omran Modares*, vol. 15, no. 4, pp. 260-245.
- [13] Stubbs, N., Kim, j., Farrar, C., 1995. Field verification of a nondestructive damage localization and severity estimation algorithm. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*.

این نیروها در موضوع پایش سلامت، از این نیروها برای رسم منحنی‌های شکنندگی و پایش سلامت پایه پل استفاده شده است و نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با استفاده از نیروهای هارمونیک نیز می‌توان منحنی شکنندگی‌های مناسبی رسم کرد.

• شاخص شدت در نظر گرفته شده برای رسم منحنی‌های شکنندگی در پژوهش‌های قبلی عمدتاً PGA و Sa بوده‌اند که در این پژوهش شاخص شدت دیگری متناسب با نیاز پژوهش ارائه شده است و نتایج به دست آمده نشان داده است که استفاده از شاخص شدت پیشینه‌ی نیرو برای رسم منحنی‌های شکنندگی نیروهای هارمونیک بسیار کاربردی و مناسب می‌باشد.

• در تحقیقات پیشین از دو معیار COMAC و DI برای بررسی تفاوت بین شاخص‌های مودال سازه جهت تشخیص آسیب استفاده می‌شد اما در این تحقیق با ارتقاء دو معیار COMAC و DI دو معیار جدید PCOMAC و PDI ارائه شدند که در این دو معیار به جای استفاده از داده‌های مربوط به مشخصه‌های مودال سازه آسیب دیده و سالم، از نتایج مربوط به منحنی شکنندگی، یعنی مؤلفه‌ی احتمال فراگذشت (FR) در حالت‌های سالم و آسیب دیده ستون منتخب، استفاده شد و هر مقدار معیار PDI عدد بزرگ‌تری را نشان دهد نشان‌دهنده‌ی آسیب بیشتر است و در مورد معیار PCOMAC نیز هر مقدار نتایج این معیار به عدد ۱ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده نزدیکی دو نمودار سالم و آسیب دیده و آسیب کمتر می‌باشد و هر مقدار به صفر نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده فاصله‌ی کمتر دو نمودار سالم و آسیب دیده و آسیب بیشتر است و در نهایت معیار PCOMAC در کنار معیار PDI معیارهای مناسبی جهت نمایش تفاوت بین منحنی‌های شکنندگی ستون‌های سالم و آسیب دیده تشخیص داده شدند، هرچند که معیار PCOMAC نسبت به معیار PDI معیار دقیق‌تری می‌باشد و با استفاده از این معیارهای ارائه شده با دقت مناسبی می‌توان نتایج مربوط به منحنی‌های شکنندگی در حالت‌های سالم و آسیب دیده را کمی سازی کرد و مورد تحلیل و بررسی قرارداد.

- [24] Bayat, M., Daneshjoo, F., Nisticò, N., 2015. A novel proficient and sufficient intensity measure for probabilistic analysis of skewed highway bridges. *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, vol. 55, no 6, pp. 1177-1202.
- [25] Ren, L., et al., 2019. Seismic Fragility Analysis of Bridge System Based on Fuzzy Failure. *Journal of Advances in Civil Engineering*, Article ID 3592972, vol. 55.
- [26] Alam, J., Kim, D., Chio, B., 2019. Seismic risk assessment of intake tower in Korea using updated fragility by Bayesian inference. *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, vol. 69, no 3, pp. 317-326.
- [27] Soltanimohammadi, M., Rahimi, S., 2019. Book of probabilistic methods in seismic evaluation of structures. ISBN: 9786227034042.
- [28] Daneshjoo, F., 2015, Earthquake Engineering Lecture – 21: Nonlinear dynamic analysis Single and multiple increments, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran, Researchgate.net Publication, Technica Report.
- [29] Cheng, Y., Zhang, J., Jiajia, W., 2019. Fragility Analysis of a Self-Anchored Suspension Bridge Based on Structural Health Monitoring Data. *Journal of Advances in Civil Engineering*, vol. 2019, Article ID 7467920.
- [30] Ndambi, J.M., Vantomme, K., 2002. Damage assessment in reinforced concrete beams using eigenfrequencies and mode shape derivatives. *Journal of Engineering Structures*, vol. 24, no 3, pp. 501-515.
- [31] Joladarian, H., Naderi, M., 2015. Seismic modal analysis of bridges located in horizontal arch. Master's thesis in Civil-Structural Engineering, Technical and Engineering Faculty, Imam Khomeini International University.
- [32] Code 463, Regulations for designing road and railway bridges against earthquakes, 1387, Vice President of Planning and Strategic Supervision, Tehran.
- [14] Shah, A.J., Jayprakash, V., Vesmawala, G.R., 2020. A Comparative Study on Vibration-Based Damage Identification and Localization Methods. In: IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.
- [15] Dixit, A., & Hanagud, S., 2011. Single beam analysis of damaged beams verified using a strain energy based damage measure. *International Journal of Solids and Structures*, 48(3), 592-602.
- [16] Curadelli, R.O., Riera, J.D., Ambrosini, D., & Amani, M.G., 2008. Damage detection by means of structural damping identification. *Journal of Engineering Structures*, vol. 30(12), pp. 3497-3504.
- [17] Hou, R., Xia, Y., 2021. Review on the new development of vibration-based damage identification for civil engineering structures: 2010-2019. *Journal of Sound and Vibration*, vol. 491, no 9.
- [18] Dilena, M., Limongelli, M.P., Morassi, A., 2014. Damage localization in bridges via the FRF interpolation method. *Journal of Mechanical Systems and Signal Processing*.
- [19] Sohn, H., Czarnecki, J.A., Farrar, C., 2000. Statistical process control and projection techniques for structural health monitoring. In: European COST F3 Conference on System Identification & Structural Health Monitoring, Madrid, Spain.
- [20] Bayat, M., Ahmadi, H.R., Mahdavi, N., 2019. Application of power spectral density function for damage diagnosis of bridge piers *Journal of Structural Engineering and Mechanics*, vol. 71, no 1, pp. 57-63.
- [21] Ovanosova, A., & Suarez, L., 2004. Applications of wavelet transforms to damage detection in frame structures. *Journal of Engineering Structures*, vol. 26(1), pp. 39-49.
- [22] Dan, J., et al., 2020. Global bridge damage detection using multi-sensor data based on optimized functional echo state networks. *Journal of Structural Health Monitoring*. vol. 20, no 4, pp. 1924-1937.
- [23] Björn T., et al., 2022. A data-based structural health monitoring approach for damage detection in steel bridges using experimental data. *Journal of Civil Structural Health Monitoring* vol. 12, pp. 101-115.

A new method for damage detection minor damages in the piers of straight bridges using fragility curves of harmonic forces

Mohammad Mohammadi¹, Farhad Daneshjoo^{*2}

1-MS.c Student, Department of Environmental & Civil engineering, Tarbiat Modares University

2- Full Professor in structural Engineering, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

Email: danesh_fa@modares.ac.ir

Abstract

Due to the increase in the age of bridges, the explanation and use of effective methods for detecting minor damage with the help of health monitoring systems are crucial since they provide the conditions for repairing the damage before the damage increases. One of the primary goals of this article is to provide an effective and efficient method for health monitoring and detect minor damage in the pier of a straight bridge using fragility curves of harmonic forces, and provide a criterion to show the correlation of fragility curves in healthy and damaged states. To achieve these goals, a complete model of a straight bridge that includes 8 piers, each 10 meters high and its deck includes 5 openings, the length of each is 15 meters, and the total length of the deck of 75 meters was modeled in the CSI Bridge software, and then, was validated. To detect the most vulnerable column for damage modeling for health monitoring operations, three earthquake records corresponding to the soil of the construction site were successively applied to the model. By examining the decrease in the slope of the moment-rotation graphs, the level of damage that occurred at the bottom of the column was detected. Finally, it was found that the middle piers were more prone to seismic damage and health monitoring operations were performed on one of the middle columns. To draw the fragility curves of harmonic forces, harmonic forces were first applied to the top of the column. Then, the rotations created at the bottom of the column were measured. Based on the obtained data and using the relevant relations, the fragility curves were drawn.

The index of the maximum intensity of force, the index of rotation damage that occurred at the bottom of the column, and the defined performance level of exceedance from the linear state are the characteristics of these fragility curves. The specified characteristics are appropriate to the fragility curves of the harmonic force. To draw the fragility curve in the damaged state, the desired earthquake (seismic) forces were first applied to the bridge. Then, harmonic forces were applied to the top of the desired column, and the rotations at the bottom of the column were measured. Also, based on the previous characteristics of the fragility curves of harmonic forces, these curves in healthy and partially damaged states were defined at 15 % and 11 % and 5 % and 2 %, respectively, given the main purpose of this article. To detect damage, curves were placed next to each other in healthy and partially damaged states. These results indicate that the fragility curves of harmonic forces have been drawn well in healthy and partially damaged states according to the defined characteristics, and partial damages with different intensities have been correctly detected. To examine the correlation of the fragility curves of harmonic forces in both damaged and healthy states, two new criteria PCOMAC and PDI were introduced. Also, the efficiency of these two new criteria was investigated.

Keywords: Health monitoring, Damage detection, bridge piers, fragility curves