

# روش جدید تانسوری سه بعدی جهت تشخیص آسیب لرزه‌ای در پایه بتنی پلها با استفاده از سیگنالهای پاسخ

فرهاد دانشجو(نویسنده مسئول)، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران  
حمیدرضا احمدی، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

E-mail: danesh\_f@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۰/۰۶/۲۳ تاریخ پذیرش: ۹۰/۱۰/۱۰

## چکیده

تاکنون برای تشخیص آسیب و محل آن به صورت گسترده از روشهای حوزه زمان و حوزه فرکانس استفاده شده است. با توجه به قابلیت توابع زمان-فرکانس مربعی، در این تحقیق برای اولین بار الگوریتم جدیدی بر پایه این توابع برای شناسایی سیستم و تشخیص آسیب لرزه‌ای در پایه پلها پیشنهاد شده است. برای انجام مطالعات از مدل پل PEER-W180 استفاده شده است. به این منظور پیش از رویداد زلزله، حسگرهایی در بالای هر یک از پایه‌های پل نصب شده و نیروی محرک به پل اعمال شده و سیگنالهای پاسخ پل ثبت می‌شود. پس از رویداد زلزله و ایجاد آسیب در پایه پل، مجدداً سیگنالهای پاسخ پل تحت اثر نیروی محرک ثبت می‌شوند. سیگنالها با استفاده از توزیع تداخلی کاهش یافته که یک تابع در حوزه زمان-فرکانس است پردازش شده و مشخصات دینامیکی آنها استخراج می‌شوند. پس از آن با استفاده از روش پیشنهادی تانسوری سه بعدی، آسیب شناسایی شده و محل آن مشخص می‌شود. نتایج نشان دهنده توانایی الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی سیستم و تشخیص آسیب لرزه‌ای ایجاد شده در پایه پل هستند. الگوریتم پیشنهادی تنها بر مبنای پاسخ پل، سیستم را شناسایی و آسیب را تشخیص می‌دهد. علاوه بر آن لازم نیست مدل تحلیلی و بهنگام شده پل ساخته شود. بر اساس نتایج به دست آمده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی، پایه آسیب‌دیده به درستی شناسایی شده است. علاوه بر آن بیشترین مقدار خطا در محاسبه احتمال وجود آسیب در پایه‌ها با استفاده از الگوریتم پیشنهادی ۱/۶٪ محاسبه شده که نشان دهنده توانایی الگوریتم در شناسایی آسیب و تعیین محل آن است.

واژه‌های کلیدی: تشخیص آسیب، روش تانسوری سه بعدی، تابع زمان-فرکانس، توزیع تداخلی کاهش یافته، پایه‌های بتنی پلها

## ۱. مقدمه

[2003]. این تکنیک بیش از ۳۰ سال پیش در مهندسی مکانیک مطرح شد و سپس به صورت گسترده در مهندسی عمران بکار گرفته شد، به طوری که در ۲۰ سال گذشته روشهای مختلفی در این خصوص پیشنهاد شده است [Mikami, Beskhyroun, and Oshimay, 2011]. ایده این روشها بر این اساس است که تغییرات به وجود آمده در مشخصه‌های سازه، بر اثر ایجاد آسیب، پارامترهای مودی سازه را تحت تاثیر قرار می‌دهد. یکی از مزایای روشهای مودی این است که یک دید جامع نسبت به آسیب به دست می‌دهد. با این حال توانایی شناسایی آسیبهای کوچک و تشخیص محل آن، چالشی در این روشها محسوب می‌شود. علاوه بر آن روشهای مودی معمولاً برای سلامت‌سنجی سازه‌ها و پلها به صورت درون خطی<sup>۱</sup>، چندان قابل استفاده نیستند. وابستگی زیاد این روشها به اطلاعات صحرایی مخصوصاً اندازه‌گیری شکل مودی و میرایی و مشکل بودن تعیین یک متدولوژی جامع برای انواع مختلف سازه‌ها از دیگر معایب روشهای مودی است.

[Beskhyroun, Oshimay and Mikami, 2010]

در روشهای سیگنالی تغییرات در مشخصه سازه مستقیماً از تاریخچه‌های زمانی اندازه‌گیری شده به دست می‌آیند. روشهای سیگنالی به سه دسته روشهای حوزه زمان، روشهای حوزه فرکانس و روشهای حوزه زمان-فرکانس تقسیم‌بندی می‌شوند [Qiao, 2009]. روشهای حوزه زمان و حوزه فرکانس معمولاً بر اساس پردازش سیگنالهای مانا و خطی بنا شده‌اند. این در حالی است که در بسیاری مواقع، پلها دارای پاسخهای غیرمانا و غیرخطی هستند. با توجه به این محدودیتها در چند سال اخیر، استفاده از توابع زمان-فرکانس برای پردازش سیگنالها و استخراج مشخصه پیشنهاد شده است [Qiao, 2009 and Zhang et. al, 2003].

بوناتو و همکاران [Bonato, 2000] برای شناسایی سیستم از سیگنالهای پاسخ غیرمانا، روشی را با استفاده از توابع زمان - فرکانس کلاس کوهن<sup>۳</sup> پیشنهاد کردند. برای ارزیابی این روش از یک مدل دو بعدی قاب سه طبقه تحت اثر تحریکات مختلف از جمله رکورد زلزله لوما پریتا استفاده شده است. این پژوهشگران پیش‌بینی کرده‌اند که در شرایط واقعی و با وجود پارازیت و

روشهای قدیمی برای تشخیص آسیب وارده به سازه شامل روشهای مشاهده‌ای یا آزمایشهای غیرمخرب محلی<sup>۱</sup> هستند. در این روشها لازمست تمامی اعضاء سازه به صورت محلی مورد بررسی قرار گیرد و بنابراین کاری بسیار زمان‌بر و پرهزینه است. [احمدی و دانشجو، ۱۳۸۹ و Balageas et. al, 2006]. با این وجود روشهای دیگری برای سلامت‌سنجی و تشخیص آسیب در سازه‌ها و پلها مطرح شد که از جمله آنها روشهای تشخیص آسیب بر اساس اندازه‌گیری پاسخهای سازه است که به دو دسته استاتیکی و دینامیکی تقسیم می‌شوند. [Yan et. al., 2007].

با استفاده از روشهای استاتیکی-پایه و دینامیکی ارتعاش-پایه، امکان شناسایی و ارزیابی آسیب در سازه‌ها فراهم می‌شود. روشهای استاتیکی-پایه بر اساس اندازه‌گیریهای کرنش یا جابجایی سازه پل تحت اثر بارهای استاتیکی مشخص اند که برای تعیین تغییرات در خیز، سختی و ظرفیت باربری سازه از مدل بهنگام شده اجزاء محدود استفاده می‌شود. این روشها به صورت گسترده در سلامت‌سنجی پلها مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در این روشها نیاز به حجم گسترده‌ای از اطلاعات اندازه‌گیری شده است. همچنین ضمن نیاز به مدل اجزاء محدود، آزمایشهای استاتیکی بایستی انجام شود که موجب اختلال در سرویس‌دهی سازه می‌گردد. این موضوعها موجب شده که استفاده از روشهای استاتیکی-پایه برای سلامت‌سنجی درون خطی<sup>۲</sup> با مشکلاتی همراه باشد. [Yan et. al., 2007 and Beskhyroun, Oshimay, and Mikami, 2010]

روشهای ارتعاش- پایه را می‌توان به روشهای مودی و سیگنالی تقسیم‌بندی کرد. در روشهای مودی از تغییرات به وجود آمده در پارامترهای مودی اندازه‌گیری شده مانند فرکانسهای طبیعی، شکل‌های مودی و میرایی برای شناسایی آسیب استفاده می‌شود. [Kim et. al., 2003] روشهای تشخیص آسیب مودی به خوبی برای تعیین خواص دینامیکی سیستمهای سازه‌ای بکار برده شده‌اند و تاکنون تحقیقات فراوانی در این خصوص انجام گردیده است. [Doebbling et. al., 1996 and Sohn et. al., 2003].

ضروری دانستند. کیاو [Qiao, 2009] در رساله دکتری خود آسیب ایجاد شده در یک قاب فلزی سه طبقه را به کمک روشهای تبدیل فوریه سریع، تبدیل موجک پیوسته و تبدیل بسته موجک<sup>۶</sup> و با استفاده از مدل‌های تطابقی مورد بررسی قرار داده است. در نهایت این پژوهشگر، ادامه تحقیقات در این خصوص را در سایر سازه‌ها و از جمله پلها پیشنهاد کرده است. دانشجو، احمدی و مبتکر [Daneshjou, Ahmadi and Mobtaker, 1390] شش تابع زمان-فرکانس مربعی را با استفاده از مدل تحلیلی پل قطور مورد مطالعه قرار داده و تابع بهینه برای پردازش سیگنالهای پاسخ لرزه‌ای پایه‌های بتنی پلها را شناسایی کرده‌اند. علاوه بر آن، بر اساس مطالعات انجام شده توسط اداره خط و سازه‌های فنی راه‌آهن جمهوری اسلامی ایران، پایه شماره ۳ پل قطور، تحت اثر زلزله، آسیب‌پذیر تشخیص داده شده بود. با این وجود در این مرجع و با استفاده از مطالعات مذکور جهت ایجاد آسیب، سختی در قسمت میانی پایه ۳ به مقدار ۳۰٪ کاهش داده شده و به عنوان مدل آسیب‌دیده مورد استفاده قرار گرفته است. سپس رکورد چند زلزله بر اساس نوع خاک محل پل قطور انتخاب و به مدل سالم و آسیب‌دیده پل قطور اعمال و با تحلیل تاریخچه زمانی خطی، پاسخ‌ها در پایه‌ها ثبت شده‌اند. پس از آن با استفاده از تابع زمان-فرکانس تداخلی کاهش یافته، پاسخهای لرزه‌ای پردازش شده و پلانهای زمان-فرکانس محاسبه شده‌اند. در نهایت به کمک روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده، پایه آسیب‌دیده تعیین شده است. اصول اولیه توابع زمان-فرکانس<sup>۷</sup> سالها پیش بنیان نهاده شده، اما تاکنون استفاده از توابع زمان-فرکانس مربعی در استخراج مشخصه و شناسایی سیستم پلها و بویژه مشخص کردن آسیب در آنها گزارش نشده است. در این تحقیق استفاده از توابع نمایش زمان-فرکانس مربعی برای استخراج مشخصه‌های دینامیکی سازه پلها پیشنهاد می‌شود. معمولا سازه‌ها در مهندسی عمران دارای پاسخهای غیرمانا بوده و پاسخهای لرزه‌ای، متأثر از رفتار غیرخطی سازه‌ها هستند [De Lautour and Omenzetter, 2009, Zhou, Wegner, and Sparling, 2010 and Wang and Chen, 2011]. مزیت تحلیلیهای زمان-فرکانس این است

رفتارهای غیرخطی، این روش بتواند سیستمهای سازه‌ای پلها و ساختمانها را به خوبی تشخیص دهد و بنابراین تحقیقات بیشتری در خصوص استفاده از توابع زمان-فرکانس را پیشنهاد کرده‌اند. دی‌استفانو، سراولو و سایا [De Stefano, Ceravolo, and Sabia, 2001] با استفاده از سه روش در حوزه زمان و یک روش در حوزه زمان-فرکانس، شناسایی سیستم یک قاب برشی ۵ درجه آزادی را از روی پاسخ مورد بررسی قرار داده‌اند. بر اساس نتایج به دست آمده، به منظور شناسایی سیستم از روی پاسخ، روشهای زمان-فرکانس به دلیل آنکه تخمینی از فرکانس مودی مستقیم و شکل مودی نسبت به زمان فراهم می‌آورند، کارآمدترند. در سال ۲۰۰۳ ملهم و کیم [Melhem and Kim, 2003] روشهای ارتعاش-پایه شامل تبدیل فوریه سریع<sup>۴</sup> و تبدیل موجک پیوسته<sup>۵</sup> را برای سلامت‌سنجی و تشخیص آسیب در یک دال و یک تیر بتنی بکار بردند. بر اساس نتایج به دست آمده، با هر دو تبدیل می‌توان مؤلفه‌های فرکانسی موجود در سیستم را به دست آورد، اما تنها با تبدیل موجک پیوسته<sup>۵</sup> می‌توان زمان رویداد فرکانس خاصی را تشخیص داد. این موضوع نشان می‌دهد که تبدیل فوریه سریع<sup>۴</sup> برای سیگنالهای مانا مناسب است؛ اما تبدیل موجک پیوسته<sup>۵</sup> برای سیگنالهای مانا و غیرمانا کاربرد دارد. این پژوهشگران نتیجه گرفتند که تبدیل موجک برای سلامت‌سنجی و تشخیص آسیب در نمونه‌های کوچک یا آزمایشگاهی دارای قابلیت بسیار بالا بوده و احتمالا برای سلامت‌سنجی سازه‌های واقعی و سازه‌های با شرایط مرزی پیچیده نیز مناسب باشد. بردفورد [Bradford, 2006] در رساله دکتری خود تحقیقات گسترده‌ای را پیرامون استفاده از تحلیلیهای زمان-فرکانس برای شناسایی سیستم سازه‌ای انجام داد. این پژوهشگر، عملکرد برخی توابع زمان-فرکانس را برای تحلیل سه ساختمان ایزر بندی شده در کالیفرنیا که تحت اثر زلزله قرار گرفته بودند، به صورت کیفی با یکدیگر مقایسه کرد. یان و همکاران [Yan et. al., 2007] در سال ۲۰۰۷ آخرین وضعیت تحقیقات در تکنیکهای تعیین آسیب ارتعاش-پایه را مورد بررسی قرار داده و لزوم انجام تحقیقات و بررسیهای گسترده و جامع پیرامون این روشها را

## ۲. توابع زمان-فرکانس

توابع زمان-فرکانس یک جمله زمانی را به صورت سه بعدی که شامل محتوای فرکانسی با توجه به زمان است، بیان می‌دارند. بنابراین یک تابع زمان-فرکانس با بیان محتوای فرکانسی با توجه به تغییرات زمان، امکان تحلیل بهینه سیگنالها را فراهم می‌آورد. علاوه بر آن با استفاده از توابع زمان-فرکانس این امکان فراهم می‌آید که انرژی سیگنال در حوزه زمان و در حوزه فرکانس به صورت همزمان قابل رویت باشد. اصول توابع زمان-فرکانس، سالها پیش بنیان نهاده شده، اما تا چند سال اخیر دارای کاربرد محدود بوده‌است. در سالهای اخیر به دلیل پیشرفت رایانه‌ها کاربرد این توابع گسترش یافته است. توابع زمان-فرکانس در رشته‌های مختلفی از جمله رادار، تصویربرداری، مهندسی پزشکی، ژئوفیزیک، مکانیک کوآتوم، پردازش سیگنال، مکانیک و الکترونیک مورد استفاده قرار می‌گیرند. [Boashash, 2003]

با وجود مدت زمان نسبتاً کوتاه استفاده از توابع زمان-فرکانس برای پردازش سیگنالها، با توجه به قابلیت این روشها، روابط گسترده‌ای در ادبیات فنی در این خصوص دیده می‌شود. به عنوان مثال خانواده‌های موجک مختلفی پیشنهاد شده که هر یک دارای خصوصیات ریاضی خاص هستند. در سال ۱۹۸۹ کوهن معادله کلی زیر را برای توزیع ویگنر پیشنهاد کرد: [Mertin, 1999]

$$P(t, \omega) = \frac{1}{4\pi^2} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-j\theta t - j\tau\omega + j\theta u} \quad (1)$$

$$\phi(\theta, \tau) x^*(u - 0.5\tau) x(u + 0.5\tau) du d\tau d\theta$$

که در معادله بالا  $t$ ،  $\omega$  و  $x(t)$  به ترتیب زمان، فرکانس زاویه‌ای و سیگنال تحلیلی هستند. علامت \* نشان دهنده مزدوج مختلط بوده و  $\phi(\theta, \tau)$  تابع، هسته توزیع کلاس کوهن است. از آنجا که توزیع کلاس کوهن به صورت تئوری است، تعریف تعداد نامتناهی توزیع زمان-فرکانس مربعی امکان پذیر است. با توجه به گستردگی توابع زمان-فرکانس مربعی، بایستی تابع مناسب برای پردازش سیگنال پایه پل شناسایی شود. تابع زمان-فرکانس مطلوب بایستی ضمن تفکیک پذیری بالا، برای استخراج مشخصه‌های دینامیکی و شناسایی سیستم از سیگنالهای پایه پل، قابلیت مناسبی

که این تحلیلها می‌توانند تمام سیگنالهای مانا، غیرمانا و غیرخطی را پردازش کنند. [De Lautour and Omenzetter, 2009, Zhou, Wegner, and Sparling, 2010, Bonato et. al, 2000, Melhem and Kim, 2003, Bonato et. al, 1998, Qiao, Esmaeily, and Melhem, 2009, Peng, Tse, and Chu, 2005]

غالباً شناسایی مشخصه‌های سیگنال با مشاهده نمودار حوزه زمان مشکل است، ولی با استفاده از تحلیلهای زمان-فرکانس به نمودار نمایش سیگنال بعد دیگری افزوده می‌شود و محتوای فرکانسی نسبت به زمان (یا برعکس) رسم می‌گردد.

در این تحقیق برای کاربردی شدن الگوریتم پیشنهادی برای شناسایی آسیب لرزه‌ای در پایه‌های بتنی پلها، نسبت به تحقیقات انجام شده توسط نویسندگان در مرجع [Daneshjou, A - madi and Mobtaker, 1390] تغییراتی صورت پذیرفته است. مطالعات بر روی مدل پل PEER-W180 انجام شده است. جهت شناسایی پایه آسیب‌پذیر در برابر زلزله، سه رکورد ممین لرزه مطابق با [Aviram, Mackie, and Stojad - novic, 2008]، با مقیاس به مدل پل PEER-W180 اعمال شد تا در پایه‌ها آسیب لرزه‌ای ایجاد شود. در این مرحله تحلیلها به صورت تاریخچه زمانی غیرخطی انجام شده است. پس از تعیین آسیب‌پذیرترین پایه در برابر زلزله، متناسب با آسیب ایجاد شده، سختی پایه مورد نظر کاهش یافته است. بنابراین، مدل آسیب‌دیده پل PEER-W180 به دست آمده است. جهت ثبت پاسخهای ارتعاشی پل در حالت سالم و آسیب‌دیده، یک بار سینوسی به مدل‌های سالم و آسیب‌دیده پل PEER-W180 اعمال گردیده و پس از انجام تحلیل تاریخچه زمانی خطی، سیگنالهای پاسخها در بالای پایه‌ها ثبت شده‌اند. در نهایت پس از پردازش سیگنالها و محاسبه پلانهای زمان-فرکانس، با استفاده از روش تانسوری سه بعدی، پایه آسیب‌دیده شناسایی شده است. روش تانسوری سه بعدی قادر است با دقت بالاتری، پایه آسیب‌دیده را در مقایسه با روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده شناسایی کند.

در رابطه بالا PV نشان دهنده مقدار اصل کوشی<sup>۱۶</sup> است. توزیع تداخلی کاهش یافته و توزیع ویگنر-ویل هر دو در کلاس کوهن قرار دارند، اما روشهای تداخلی کاهش یافته برای سیگنالهای گذرا و غیرمانا مناسب تر اند، زیرا تداخل مربعی که بیان توزیع ویگنر-ویل را پیچیده می‌کند، در توزیع تداخلی کاهش یافته کاهش می‌یابد. توزیع تداخلی کاهش یافته با هسته، برای سیگنال تحلیلی به صورت رابطه ۵ تعریف می‌شود: [Bra -]

[ford, 2006 and Boashash, 2003

$$RID(t, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(\tau) R_x(t, \tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (5)$$

$$R_x(t, \tau) = \int_{\frac{-t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{g(v)}{|v|} \left(1 + \cos \frac{2\pi v}{\tau}\right) x\left(t + v + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t + v - \frac{\tau}{2}\right) dv \quad (6)$$

در این روابط،  $h(t)$  یک پنجره زمان-هموار کننده و  $g(v)$  یک پنجره فرکانس هموار کننده است.

در این تحقیق از پنجره هنینگ<sup>۱۷</sup> برای تخمین طیفی در توابع زمان-فرکانس استفاده شده است. رابطه تابع پنجره هنینگ به صورت زیر است:

$$Hann(v) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2\pi v}{\tau}\right) \quad (7)$$

### ۳. روش تانسوری سه بعدی (روش پیشنهادی)

به کمک تحلیلهای زمان-فرکانس می‌توان انرژی سیگنال را در حوزه فرکانس و حوزه زمان به طور همزمان مشاهده کرد. آسیب رابطه مستقیم با توازن انرژی در سازه دارد. بنابراین چنانچه توزیع انرژی یک سیگنال در حوزه فرکانس و حوزه زمان به صورت همزمان مقدور باشد می‌توان این توزیع را با شدت، محل و زمان رویداد آسیب همبسته کرد.

برای توزیع انرژی زمان-فرکانس  $RID(t, \omega)$ ، انرژی لحظه‌ای  $|x(t)|^2$  و طیف چگالی انرژی  $|S(\omega)|^2$  استفاده از روابط ۸ و ۹

$$|x(t)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} RID(t, \omega) d\omega \quad (8)$$

$$|S(\omega)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} RID(t, \omega) dt \quad (9)$$

داشته باشند. به این منظور و جهت شناسایی تابع زمان-فرکانس مطلوب برای پردازش سیگنالهای پاسخ پلها، تحقیقات گسترده‌ای توسط نویسندگان انجام شد که نتایج این تحقیقات در مرجع [Daneshjou, Ahmadi and Mobtaker, 1390] ارائه شده است. بر اساس این تحقیقات، تابع زمان-فرکانس توزیع تداخلی کاهش یافته<sup>۱۸</sup> برای پردازش سیگنالهای پاسخ پلها در مقایسه با توابع زمان-فرکانس طیف تبدیل فوریه زمان کوتاه<sup>۱۹</sup>، طیف تبدیل موجک<sup>۲۰</sup>، توزیع ویگنر-ویل<sup>۲۱</sup>، توزیع چوی-ویلیامز<sup>۲۲</sup> و توزیع شبه ویگنر-ویل هموار شده<sup>۲۳</sup> مناسب تر است. بنابراین در این تحقیق تابع زمان-فرکانس توزیع تداخلی کاهش یافته برای پردازش سیگنالهای پاسخ پل مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۱-۲ توزیع تداخلی کاهش یافته

بر اساس تحقیقات به عمل آمده در مرجع [Daneshjou, Ahmadi and Mobtaker, 1390]، توزیع تداخلی کاهش یافته برای پردازش سیگنالهای پاسخ پل در مقایسه با دیگر توابع زمان-فرکانس مربعی در نظر گرفته شده دارای عملکرد مطلوب تری است. توزیع ویگنر-ویل پایه‌ای‌ترین تابع در توابع زمان-فرکانس مربعی محسوب می‌شود. توابع زمان-فرکانس دیگر را می‌توان از توزیع ویگنر-ویل با انتخاب مناسب فاکتورهای هموارسازی به دست آورد. توزیع ویگنر-ویل برای یک سیگنال تحلیلی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$WVD_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t + \tau/2) x^*(t - \tau/2) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

که در معادله بالا  $t$  و  $\omega$  به ترتیب زمان و فرکانس زاویه‌ای هستند.  $x(t)$  سیگنال تحلیلی و علامت \* نشاندهنده مزدوج مختلط است.

سیگنال تحلیلی  $x(t)$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$x(t) = s(t) + jH[s(t)] \quad (3)$$

در رابطه بالا  $s(t)$  سیگنال حقیقی<sup>۲۴</sup> بوده و  $H(t)$  نشاندهنده تبدیل هیلبرت<sup>۲۵</sup> است. تبدیل هیلبرت به صورت زیر تعریف می‌شود: [Boashash, 2003, Zhou, Auger et. al, 2005 and]

$$H[s(t)] = \frac{1}{\pi} PV \int_{-\infty}^{\infty} \frac{s(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4)$$

فرکانسی مختلف را می توان با جمع درایه های ماتریس  $\Delta$  تخمین زد. به عبارت دیگر برای تشخیص آسیب، در هر یک از پایه ها درایه های ماتریس  $\Delta$  به صورت  $\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\Delta(i, j))$  جمع شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می شوند. عدد بزرگ تر نشان دهنده پایه آسیب دیده است. به منظور افزایش دقت و قابلیت روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده، تحقیقات در این زمینه ادامه یافت و از این نکته استفاده شد که پس از ایجاد آسیب، سیگنالهای پاسخ پل تغییر می کند و از طرفی این تغییر در نقاط نزدیک آسیب، حداکثر اند. بنابراین به نظر می رسد در هر زمان- فرکانس بایستی مقدار  $\Delta(i, j)$  مربوط به نقطه مجاور به محل آسیب دیده در مقایسه با ماتریسهای  $\Delta$  مربوط به سایر نقاط، بیشتر باشد. بنابراین می توان یک ماتریس  $\Delta$  سه بعدی تشکیل داد که بعد سوم مربوط به محل اندازه گیری باشد. این ماتریس سه بعدی را  $\Delta$  می نامیم.

$$\Theta(i, j, k) = \begin{pmatrix} \Delta_k(t_1, f_1) & \Delta_k(t_1, f_2) & \dots & \Delta_k(t_1, f_n) \\ \Delta_2(t_1, f_1) & \Delta_2(t_1, f_2) & \dots & \Delta_2(t_1, f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_1(t_1, f_1) & \Delta_1(t_1, f_2) & \dots & \Delta_1(t_1, f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_1(t_2, f_1) & \Delta_1(t_2, f_2) & \dots & \Delta_1(t_2, f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta_1(t_m, f_1) & \Delta_1(t_m, f_2) & \dots & \Delta_1(t_m, f_n) \end{pmatrix} \quad (14)$$

در هر زمان- فرکانس، درایه های ماتریس  $\Theta$ ، در بعد  $k$  با یکدیگر مقایسه می شوند. در واقع در زمان  $i$  و فرکانس  $j$ ، ماتریس دارای  $k$  مؤلفه (در اینجا سه مؤلفه) است و این  $k$  مؤلفه با یکدیگر مقایسه شده و بیشینه آنها شناسایی می شود. سپس عدد بزرگ تر بدون تغییر باقی مانده، اما سایر درایه ها برابر صفر قرار داده می شوند. حال مطابق با رابطه ۱۵ درایه های ماتریس  $\Theta$  در هر  $k$  با یکدیگر جمع می شوند.

$$Difference(k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |\Theta(i, j, k)| \quad (15)$$

عدد  $Difference$  بزرگ تر نشان دهنده محل آسیب است. چنان که پایه سالم باشد، بایستی مقدار  $Difference$  صفر و یا نزدیک به صفر باشد. مقدار  $Difference$  ها در هر پایه محاسبه شده و نتایج بر حسب عدد بزرگ تر نرمال می شوند. سپس با مقایسه نتایج، پایه آسیب دیده شناسایی می شود.

چنان که شرایط مرزی ارضا شود انرژی کل سیگنال به صورت رابطه ۱۰ به دست می آید:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} RID(t, \omega) d\omega dt \quad (10)$$

وویسندگان در مرجع [Daneshjou, Ahmadi and Mo-taker, 1390] روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده را پیشنهاد کردند. با این وجود و جهت افزایش قابلیت روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده، تحقیقات در این خصوص دنبال شد و در نهایت در این تحقیق روش جدیدی بنام تانسوری سه بعدی پیشنهاد گردیده است. تانسوری سه بعدی در مقایسه با روش پیشین، قادر است با دقت بیشتری محل آسیب را شناسایی کند. روش پیشنهادی بر اساس اختلاف ایجاد شده در پلانهای زمان- فرکانس در حالت قبل و بعد از ایجاد آسیب، آسیب را تشخیص می دهد. بر این اساس ماتریس پلان زمان- فرکانس هنگامی که سازه سالم است به صورت  $TF_S$  و پس از ایجاد آسیب به صورت  $TF_D$  در نظر گرفته می شوند. این ماتریسها به صورت روابط ۱۱ و ۱۲ هستند:

$$TF_S = \begin{bmatrix} RID_S(t_1, f_1) & RID_S(t_1, f_2) & \dots & RID_S(t_1, f_n) \\ RID_S(t_2, f_1) & RID_S(t_2, f_2) & \dots & RID_S(t_2, f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ RID_S(t_m, f_1) & RID_S(t_m, f_2) & \dots & RID_S(t_m, f_n) \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$TF_D = \begin{bmatrix} RID_D(t_1, f_1) & RID_D(t_1, f_2) & \dots & RID_D(t_1, f_n) \\ RID_D(t_2, f_1) & RID_D(t_2, f_2) & \dots & RID_D(t_2, f_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ RID_D(t_m, f_1) & RID_D(t_m, f_2) & \dots & RID_D(t_m, f_n) \end{bmatrix} \quad (12)$$

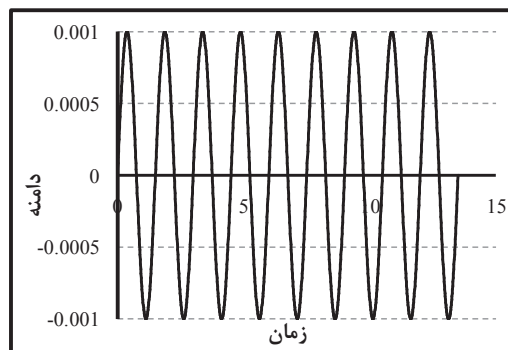
در این روابط  $m$  تعداد گامهای زمانی و  $n$  تعداد مخازن فرکانسی در نظر گرفته شده اند. یادآوری می شود ابعاد ماتریسهای زمان- فرکانس متناسب با گامهای زمانی ثبت سیگنالهای پاسخ هستند. در این تحقیق برای افزایش رزولوشن پلانهای زمان- فرکانس و افزایش دقت در تشخیص آسیب، تعداد سطرهای ماتریسهای زمان-فرکانس برابر با تعداد ستونها در نظر گرفته شده است.

$$\Delta(i, j) = |TF_S(f_i, t_j) - TF_D(f_i, t_j)| \quad (13)$$

در ماتریس  $\Delta$  هر درایه نشان دهنده اختلاف بین ماتریسهای زمان- فرکانس  $TF_D$  و  $TF_S$  است. بر اساس روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده تغییر کلی به وجود آمده در گامهای زمانی و مخازن

#### ۴. روش تحقیق (الگوریتم پیشنهادی)

ارزیابی آسیبهای لرزه‌ای ایجاد شده و بررسی توانایی خدمت‌دهی در سازه‌های با اهمیت و شریانهای حیاتی، پس از رویداد زلزله دارای اهمیت بسیار فراوانی است. با توجه به اهمیت موضوع در این تحقیق رویکرد جدیدی برای تشخیص آسیبهای لرزه‌ای ایجاد شده در پایه‌های پلها پیشنهاد شده است. رویکرد پیشنهادی به گونه ای طراحی شده که به راحتی برای پلها قابل استفاده بوده و در زمان کوتاه و به صورت بسیار ساده، آسیبهای لرزه‌ای به وجود آمده در پایه‌های پل شناسایی شوند. در این روش بار محرک (در این تحقیق از بار سینوسی با فرکانس زاویه‌ای  $\frac{4\pi}{3}$  که در شکل ۱ نشان داده شده استفاده شده است) به پل اعمال می‌شود و سیگنالهای پاسخ پل در نقاط بالای ستونهای بتنی ثبت می‌شوند. به عبارت دیگر فرض می‌شود در نقاط بالای ستونها، حسگر<sup>۱۸</sup> شتاب‌سنج نصب شده و ارتعاشات پل را ثبت می‌کند. پس از رویداد زلزله مجدداً بار محرک به پل اعمال می‌شود و ارتعاشات مشابه با حالت پیش از رخداد زلزله ثبت می‌شوند. در اثر رویداد زلزله و چنان که آسیب در پایه‌های پل ایجاد شده باشد وضعیت ارتعاش پایه‌ها تغییر می‌کند. سپس سیگنالهای ثبت شده با استفاده از الگوریتم پیشنهادی پردازش شده و آسیب احتمالی شناسایی می‌شود. الگوریتم پیشنهادی شامل استفاده از توزیع تداخلی کاهش یافته برای شناسایی سیستم و روش تانسوری سه بعدی برای تشخیص آسیب در پایه پل است.



شکل ۱. بار محرک سینوسی

#### ۵. صحت‌سنجی و تأیید الگوریتم پیشنهادی و روش

##### تانسوری سه بعدی

به منظور ارزیابی و صحت‌سنجی الگوریتم پیشنهادی و روش تانسوری سه بعدی، از مدل پل بتنی PEER-W180 استفاده شده است. به این ترتیب که به مدل پل PEER-W180، سه رکورد زلزله اعمال شده و پایه آسیب‌پذیر شناسایی شده است. سپس متناسب با آسیب به وجود آمده، سختی پایه مورد نظر کاهش یافته و مدل آسیب‌دیده پل حاصل شده است. بار محرک سینوسی به مدل‌های سالم و آسیب‌دیده اعمال و سیگنالهای پاسخ پایه‌ها ثبت شده‌اند. سیگنالهای پاسخ با تابع زمان-فرکانس توزیع تداخلی کاهش‌یافته پردازش و پلانهای زمان-فرکانس محاسبه شده‌اند. در نهایت با استفاده از روش تانسوری سه بعدی، پایه آسیب‌دیده شناسایی شده است. بنابراین صحت عملکرد و تأیید الگوریتم پیشنهادی و روش تانسوری سه بعدی، منوط به تشخیص صحیح پایه آسیب‌دیده است.

##### ۵-۱ پل PEER-W180

مدل تحلیلی پل PEER-W180 دارای چهار دهانه بوده و بتنی است. این مدل توسط پژوهشگران دانشگاه برکلی کالیفرنیا<sup>۱۹</sup> و دانشگاه مرکزی فلوریدا<sup>۲۰</sup> برای انجام تحقیقات پیرامون تحلیل‌های غیرخطی پلها، تهیه شده و توسط مرکز تحقیقات مهندسی زلزله پاسیفیک<sup>۲۱</sup> در مرجع [Aviram, Mackie, and Stojadinovic, 2008] منتشر شده است. با توجه به مرجع پیش‌گفته در مدلسازی پل PEER-W180 نهایت دقت به عمل آمده و نتایج تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی آن به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین به منظور تحقیق در خصوص توانایی الگوریتم پیشنهادی از این مدل استفاده شده است. در شکل‌های ۲ و ۳ به ترتیب نمایی از مدل مورد نظر و ابعاد آن دیده می‌شود.



جدول ۱. رکوردهای اعمال شده به مدل پل PEER-W180

ردیف	نام رکورد	زمان رویداد	ایستگاه ثبت	$M_w$
۱	امپریال ولی	۱۹۷۹	Brawley Airport	۶/۹
۲	لوما پریتا	1989	APEEL 2 - Redwood City	۶/۵
۳	کوکالی	۱۹۹۹	Mecidiyekoy	۵/۵



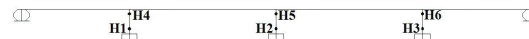
شکل ۲. مدل تحلیلی پل PEER-W180



شکل ۳. ابعاد مدل پل PEER-W180

در مدل تحلیلی پل PEER-W180 از مدل رفتاری ماندنر<sup>۲۲</sup> برای محاسبه رابطه تنش- کرنش بتن استفاده شده است. ستونها و عرشه پل با المان قاب مدلسازی شده‌اند. مدل این پل دارای ۳۶ گره و ۴۵ المان قاب است. مدل مورد نظر با در نظر گرفتن بارهای ثقلی و رکوردهای زلزله تحلیل شده است.

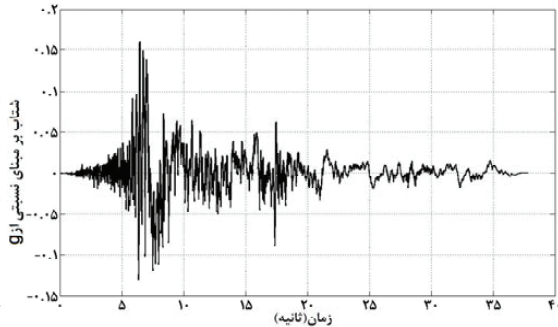
برای در نظر گرفتن رفتار غیرخطی در مدل تحلیلی از مفصلهای پلاستیک فیبری<sup>۲۳</sup> استفاده شده است. مفصلها به بالا و پایین هر یک از پایه‌ها اختصاص داده شده‌اند. مفصلهای پلاستیک رابطه ممان- چرخش را در طول مفصل به دست می‌دهند. با مفصل پلاستیک فیبری یک مدل پلاستیک متمرکز با طول  $L_p$  به عضو الاستیک اختصاص می‌یابد. با استفاده از مفصل پلاستیک فیبری می‌توان کاهش سختی ناشی از ترک خوردگی بتن، جاری شدن آرماتورها، سخت‌شدگی کرنشی و نرم‌شدگی پس از جاری شدن را در نظر گرفت. در شکل ۴ محل مفصلهای پلاستیک تعریف شده در مدل تحلیلی نشان داده شده‌اند.



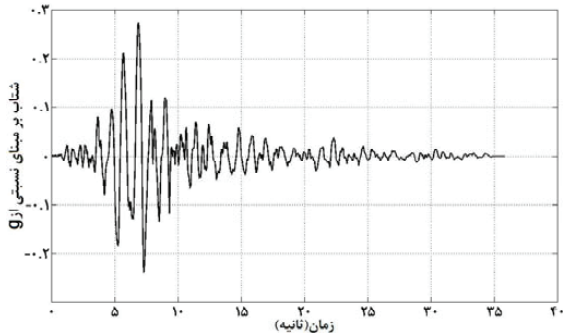
شکل ۴. موقعیت مفصلهای تعریف شده

## ۲-۵ اعمال رکوردهای زمین‌لرزه به مدل پل

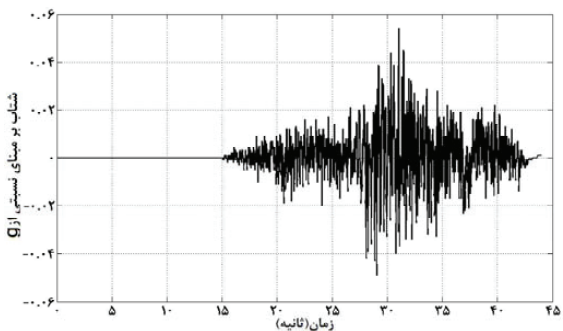
به منظور ایجاد آسیب لرزهای، چند رکورد زمین‌لرزه مطابق با مرجع [Aviram, Mackie, and Stojadinovic, 2008] به مدل پل PEER-W180 اعمال شد تا در پل آسیب ایجاد گردد. رکوردهای مورد استفاده شامل زمین‌لرزه امپریال ولی<sup>۲۴</sup>، زمین‌لرزه لوما پریتا<sup>۲۵</sup> و زمین‌لرزه کوکالی<sup>۲۶</sup> هستند. در جدول ۱ مشخصات رکوردها و در شکل‌های ۵ تا ۷ تاریخچه زمانی رکوردها نشان داده شده‌اند.



شکل ۵. رکورد شتاب زمین در زلزله امپریال ولی



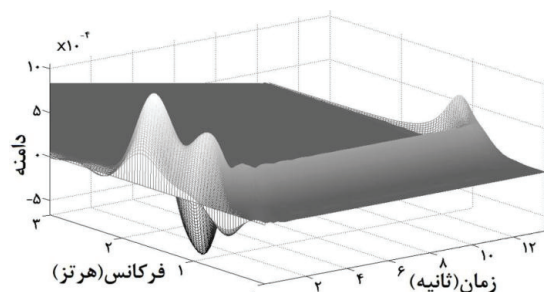
شکل ۶. رکورد شتاب زمین در زلزله لوما پریتا



شکل ۷. رکورد شتاب زمین در زلزله کوکالی

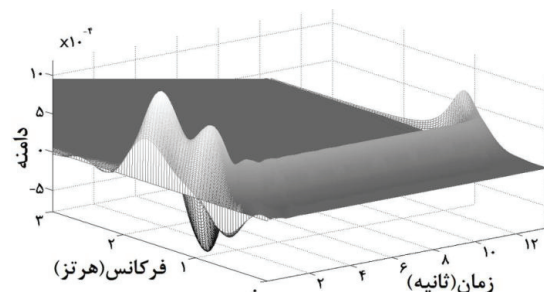
مطابق با مرجع [Aviram, Mackie, and Stojadinovic, 2008] رکوردها با مقیاس به مدل پل PEER-W180 اعمال شده تا در پایه‌ها آسیب لرزهای ایجاد گردد. در اثر اعمال رکوردها به مدل پل، در مفصلهای پلاستیک تعریف شده در قسمت پایین





شکل ۹. پلان زمان-فرکانس پاسخ پل PEER-W180 با استفاده

سیگنالهای ثبت شده در شتاب‌نگاشت A2 در حالت سالم



شکل ۱۰. پلان زمان-فرکانس پاسخ پل PEER-W180 با استفاده

سیگنالهای ثبت شده در شتاب‌نگاشت A2 در حالت آسیب‌دیده

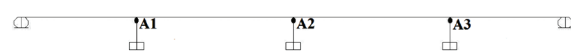
### ۵-۵ تشخیص آسیب

در این مرحله با استفاده از پلانهای زمان-فرکانس به دست آمده و به کمک تانسوری سه بعدی، محل آسیب مشخص شده است. همان طور که پیش تر گفته شد ابعاد ماتریسهای زمان-فرکانس ۱۱ و ۱۲، متناسب با گامهای زمانی ثبت سیگنالهای پاسخ اند که در این تحقیق بر اساس تحلیلهای تاریخیچه زمانی انجام شده و بار محرک سینوسی اعمال شده، طول گامهای زمانی ثبت سیگنالهای پاسخ، ۰/۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده‌اند. بنابراین تعداد ستونهای ماتریسهای زمان-فرکانس برابر با مدت زمان آغاز اعمال نیروی محرک تا اتمام ارتعاشات پل، تقسیم بر ۰/۰۱ است. علاوه بر آن به منظور افزایش رزولوشن پلانهای زمان-فرکانس، تعداد مخازن فرکانسی برابر با تعداد گامهای زمانی در نظر گرفته شده است. با این حال ابعاد ماتریسهای زمان-فرکانس در این تحقیق برابر با ۱۵۰۰ در ۱۵۰۰ هستند. یادآوری می شود با توجه به اینکه پل PEER-W180 دارای سه پایه است بنابراین عدد  $k$  در ماتریس سه بعدی برابر با ۳ است. با این وجود حاصل

پایه‌ها رفتار غیرخطی ایجاد شده است. بر اساس نتایج به دست آمده بیشترین آسیب در اثر زلزله امپریال‌ولی به وجود آمده است. تحت اثر زلزله امپریال‌ولی در مفصل ۲، سختی حدود ۷۰٪ و در مفصلهای ۱ و ۳ حدود ۵۰٪ کاهش یافته است. با این وجود بیشترین مقدار آسیب در پایه ۲ به وجود آمده است. بنابراین در مدل تحلیلی و در محل مفصل شماره ۲ مقدار سختی ۵۰٪ کاهش داده شده و این مدل به عنوان مدل آسیب‌دیده پل در نظر گرفته می‌شود. حال به مدل پل PEER-W180 در حالت سالم و در حالت آسیب‌دیده، بار محرک سینوسی و پس از تحلیل تاریخیچه زمانی خطی، ارتعاشات پایه‌ها ثبت شده‌اند.

### ۵-۳ اعمال بار محرک

مطابق با الگوریتم پیشنهادی پیش از ایجاد آسیب، به مدل پل PEER-W180 بار سینوسی اعمال شده و سیگنالهای پاسخ پل در نقاط بالای پایه‌ها ثبت شده‌اند. محل نصب حسگرها در شکل ۸ نشان داده شده است. پس از ایجاد آسیب مجدداً بار محرک به مدل مورد نظر اعمال و ارتعاشات مشابه با حالت پیش ثبت شده‌اند. پس از اتمام این مرحله، بایستی سیگنالهای ثبت شده با تابع زمان-فرکانس توزیع تداخلی کاهش یافته پردازش شده و پلانهای زمان-فرکانس محاسبه شوند.



شکل ۸- محل‌های ثبت پاسخ پل

### ۵-۴ پردازش سیگنالهای پاسخ پل تحت اثر نیروی هارمونیک

همان طور که بیان شد سیگنالهای پاسخ پل PEER-W180 تحت اثر بار محرک سینوسی پیش از آسیب لرزه‌ای و پس از ایجاد آسیب ثبت شده‌اند. برای پردازش سیگنالها از توزیع تداخلی کاهش یافته استفاده شده است. پردازش سیگنالها در نرم‌افزار [Matlab, Mathworks, 2008] صورت پذیرفته است. پلانهای زمان-فرکانس سه بعدی مربوط به سیگنالهای ثبت شده در شتاب‌نگاشت A2 در حالت سالم و آسیب دیده به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان داده شده‌اند.

تنها ۶/۱٪ است. بنابراین وجود آسیب در پایه ۲ به خوبی قابل تشخیص است. بنابراین با توجه به نتایج به دست آمده کاملاً قابل مشاهده است که الگوریتم پیشنهادی، عملکرد بسیار مطلوبی در تشخیص آسیب و شناسایی محل آن ارائه کرده است.

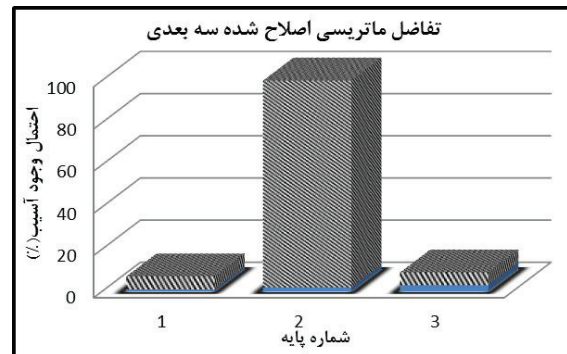
## ۶. نتیجه گیری

در این تحقیق یک الگوریتم جدید و کاربردی برای تشخیص آسیب لرزه‌ای در پایه پلها پیشنهاد شده است. در الگوریتم پیشنهادی به منظور شناسایی سیستم و تشخیص آسیب لرزه‌ای در پایه پلها، برای اولین بار از توابع زمان-فرکانس مربعی استفاده شده است. بر اساس این الگوریتم پیش از رویداد زلزله، حسگرهایی در بالای هر یک از پایه‌های پل نصب شده و نیروی هارمونیک به پل اعمال شده و سیگنالهای پاسخ پل ثبت می‌شوند. پس از رویداد زلزله و ایجاد آسیب در پایه پل، مجدداً سیگنالهای پاسخ پل تحت اثر نیروی هارمونیک ثبت می‌شوند. با استفاده از تابع توزیع تداخلی کاهش یافته که یک تابع در حوزه زمان-فرکانس است، سیگنالها پردازش شده و مشخصات دینامیکی آنها استخراج شده و پلانهای زمان-فرکانس محاسبه می‌شوند. در نهایت با استفاده از روش پیشنهادی تانسوری سه بعدی، آسیب شناسایی شده و محل آن مشخص می‌گردد. این روش بر اساس اختلاف ایجاد شده در پلانهای زمان-فرکانس در حالت قبل و بعد از ایجاد آسیب و همچنین بیشینه این تغییرات که در نقاط نزدیک به محل آسیب روی می‌دهند، محل آسیب را با دقت بسیار مطلوب شناسایی می‌کند.

برای یک پل ساخته شده و در حال استفاده، با نصب حسگرها در بالای هر ستون و اعمال نیروی محرک می‌توان سیگنالهای خروجی پاسخ سازه را در نقاطی که حسگر نصب شده است به صورت تاریخیچه زمانی ثبت کرد و سپس با استفاده از توزیع تداخلی کاهش یافته و روش تانسوری سه بعدی، این سیگنالهای پاسخ را پردازش نموده و محل آسیب را شناسایی کرد. بنابراین با توجه به اینکه روش پیشنهادی صرفاً بر اساس پردازش سیگنالهای خروجی است، در عمل به تعریف مدل تحلیل نیازی نیست. بنابراین از جمله مزایای الگوریتم پیشنهادی بی‌نیازی به ساخت مدل تحلیلی بهنگام

رابطه ۱۵، سه عدد به صورت (1) Difference، (2) Difference و (3) Difference محاسبه می‌گردد که عدد بزرگتر نشان‌دهنده محل آسیب می‌باشد. چنانچه پایه سالم باشد بایستی مقدار Difference صفر و یا نزدیک به صفر باشد. مقدار Differenceها در هر پایه محاسبه شده و نتایج بر حسب عدد بزرگ تر نرمال می‌شوند. سپس با مقایسه نتایج، پایه آسیب دیده شناسایی می‌شود.

نتایج محاسبات انجام شده بر اساس الگوریتم پیشنهادی در نمودار شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود، با استفاده از روش تانسوری سه بعدی و تحت تاثیر نیروی هارمونیک اعمالی، احتمال وجود آسیب در پایه ۲ برابر با ۱۰۰٪ به دست آمده است. این در حالی است که احتمال وجود آسیب در پایه ۱ مقدار ۶/۱٪ و در پایه ۳ مقدار ۵/۹٪ محاسبه شده است.



شکل ۱۱. نمودار تشخیص احتمال وجود آسیب با استفاده از روش تفاضل

## ماتریسی اصلاح شده سه بعدی

همان طور که در قسمت ۵ این تحقیق ملاحظه شد با توجه به رکورد های زمین لرزه اعمالی به مدل پل PEER-W180 بیشترین مقدار آسیب در پایه ۲ به وجود آمد. متناسب با آسیب ایجاد شده، در مدل تحلیلی و در محل مفصل شماره ۲ مقدار سختی کاهش یافت. بر اساس نتایج به دست آمده که در شکل ۱۱ نشان داده شده، الگوریتم پیشنهادی و روش تانسوری سه بعدی به درستی پایه ۲ را به عنوان پایه آسیب دیده شناسایی کرده‌اند. به عبارت دیگر با احتمال ۱۰۰٪ پایه ۱ آسیب دیده شناسایی شده است. علاوه بر آن احتمال وجود آسیب در پایه ۱ برابر با ۶/۱٪ و در پایه ۳ معادل با ۵/۹٪ تشخیص داده شده است. با این وجود بیشترین مقدار خطا در تعیین محل آسیب با استفاده از الگوریتم پیشنهادی

- 9- Spectrogram distribution
- 10- Scalogram distribution
- 11- Wigner-Ville distribution
- 12- Choi-Williams distribution
- 13- Smoothed pseudo Wigner-Ville distribution
- 14- Real signal
- 15- Hilbert Transform
- 16- Cauchy Principal Value
- 17- Hanning Window
- 18- Sensor
- 19- University of California, Berkeley
- 20- University of Central Florida
- 21- Pacific Earthquake Engineering Research Center
- 22- Mander model
- 23- Fiber Plastic Hinge
- 24- Imperial Valley Earthquake
- 25- Loma Prieta Earthquake
- 26- Kocaeli Earthquake

#### ۸. مراجع

احمدی، حمیدرضا و دانشجو، فرهاد (۱۳۸۹) "استخراج مشخصات دینامیکی عرشه خرابایی پل راه‌آهن فیروزه با استفاده از توابع زمان-فرکانس"، تهران: اولین کنفرانس ملی سازه و فولاد و دومین کنفرانس کاربرد فولادهای پر استحکام در صنعت سازه.

دانشجو، فرهاد، احمدی، حمیدرضا و مبتکر، قادر (۱۳۹۰) "شناسایی مشخصه و تشخیص آسیب در پایه‌های بتنی پل‌ها با استفاده از توابع زمان-فرکانس و روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده"، پذیرفته شده در مجله علمی-پژوهشی عمران شریف.

Auger, François, Flandrin, Patrick, Goncalve, Paulo and Lemoine, Olivier (2005) "Time-frequency tool-box for use with MATLAB", England: ISIS.

Aviram, Ady, Mackie, Kevin R. and Stojadinovic, Božidar (2008) "Guidelines for nonlinear analysis of bridge structures in California", USA: Berkeley, PEER Report 2008/03.

Balageas, Daniel, Fritzen, Claus-Peter and Güemes, Alfredo (2006) "Structural health monitoring", London: ISTE Ltd.

Beskyroun, S., Oshimay, T. and Mikami, S. (2010) "Wavelet-based technique for structural damage de-

شده از پل است. در بسیاری از روشهای رایج برای تشخیص آسیب، مدل تحلیلی بهنگام شده از پل تهیه شده و آسیبهای محتمل از مقایسه پاسخهای پل واقعی با مدل به هنگام شده شناسایی می‌شوند. ساخت مدل بهنگام شده، بویژه برای پلهای پیچیده و با ابعاد بزرگ کار بسیار دشواری است. با این وجود الگوریتم پیشنهادی به گونه‌ای بنا شده که در آن به ساخت مدل تحلیلی از پل نیازی نیست. لازم به ذکر است که به دلیل عدم امکان ایجاد آسیب در پایه و ارتعاش یک پل موجود، در این تحقیق از مدل تحلیلی پل PEER-W180 استفاده شده است. علاوه بر آن، از آنجا که اساس این روش برپایه پردازش سیگنال‌های پاسخ است، در روش پیشنهادی برخلاف بسیاری از روشهای دیگر (مانند روشهای پارامتریک از قبیل مدل فضای حالت، آرما و...)، نیازی به اندازه‌گیری نیروی ورودی نیز نیست. در واقع الگوریتم پیشنهادی تنها با پردازش سیگنالهای خروجی، سیستم را شناسایی و آسیب را تشخیص می‌دهد، بنابراین در روش پیشنهادی برخلاف بسیاری از روشهای دیگر، نیازی نیست که نیروهای ورودی به پل اندازه‌گیری شوند. از دیگر مزیت‌های الگوریتم پیشنهادی، کمینه کردن تعداد حسگر مورد نیاز است. در این الگوریتم برای تشخیص آسیب در پایه‌ها تنها از یک حسگر استفاده شده است که در مقایسه با بسیاری از الگوریتمهای دیگر، بسیار قابل توجه است.

همان طور که نشان داده شد الگوریتم پیشنهادی با دقت مطلوب، آسیب را در پایه پل PEER-W180 شناسایی کرده است. بر اساس محاسبات انجام شده، الگوریتم پیشنهادی وجود آسیب لرزه‌ای ایجاد شده در پایه ۲ را به خوبی شناسایی کرده است. بیشترین مقدار خطا در تعیین پایه آسیب‌دیده ۶/۱٪ محاسبه شده که نشان دهنده توانایی الگوریتم در شناسایی آسیب و تعیین محل آن است.

#### ۷. پی‌نوشتها

- 1- Non destructive Evaluation
- 2- On-line
- 3- Cohen's Class
- 4- Fast Fourier Transform
- 5- Continuous Wavelet Transform
- 6- Wavelet Packet Transform
- 7- Time-frequency representation
- 8- Reduced Interference Distribution

- Engineering Mechanics, Vol. 129, No. 5, pp. 571-577.
- Mertin, Alfred (1999) "Signal analysis (Wavelets, filter bank, time-frequency transforms and applications)", England: John Wiley & Sons Ltd.
- Mikami, S., Beskhyroun, S. and Oshimay, T. (2011) "Wavelet packet based damage detection in beam-like structures without baseline modal parameters", Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 7, pp.211-227.
- Peng, Z.K., Tse, P.W. and Chu, F.L. (2005) "An improved Hilbert–Huang transform and its application in vibration signal analysis", Journal of Sound and Vibration, Vol.286, pp. 187-205.
- Qiao, Long (2009) "Structural damage detection using signal-based pattern recognition", USA: Kansas State University, Ph.D thesis.
- Qiao, L., Esmaily, A. and Melhem, H.G. (2009) "Structural damage detection using signal pattern-recognition", Key Engineering Materials, Vol. 400-402, pp. 465-470.
- Sohn, Hoon, Farrar, Charles R., Hemez, Francois M., Shunk, Devin D., Stinemas, Daniel W. and Nadler, Brett R. (2003) "A review of structural health monitoring literature", USA: Los Alamos National Laboratory, LA--MS.
- Wang, H. and Chen, P. (2011) "Fuzzy diagnosis method for rotating machinery in variable rotating speed", IEEE Sensors Journal, Vol. 1, No.1, pp.23-34.
- Yan, Y., Cheng, L., Wu, Z. and Yam, L. (2007) "Development in vibration-based structural damage detection technique", Mechanical Systems and Signal Processing, Vol.21, pp. 2198-2211.
- Zhang, Z., Hua, H., Xu, X. and Huang, Z. (2003) "Modal parameter identification through Gabor Expansion of response signals", Journal of Sound and Vibration, Vol. 266, pp. 943-955.
- Zhou, Z., Wegner, L.D. and Sparling, B.F. (2010) "Structural health monitoring of precast concrete box girders using selected vibration-based damage detection methods", Advances in Civil Engineering, Special issue on Structural Health Monitoring of Civil Structures, Vol. 2010, article ID 280685.
- tection", Structural Control and Health Monitoring, Vol. 17, pp. 473-494.
- Boashash, Boualem (2003) "Time frequency signal analysis and processing", UK: Elsevier Publications of Related Interest.
- Bonato, P., Ceravolo, R., De Stefano, A. and Molinari, F. (1998) "Time-frequency and cross-time-frequency based techniques for structural identification of systems", USA: Pennsylvania, Proceedings of the IEEE International Symposium on Time-Frequency and Time-Scale Analysis.
- Bonato, P., Ceravolo, R., De Stefano, A. and Molinari, F. (2000) "Use of cross-time-frequency estimators for structural identification in non-stationary conditions and under unknown excitation", Journal of Sound and Vibration, Vol. 237, No. 5, pp. 779-791.
- Bradford, Samuel Case (2006) "Time-frequency analysis of systems with changing dynamic properties", USA: California Institute of Technology, Ph.D thesis.
- De Lautour, O.R. and Omenzetter, P. (2009) "Prediction of seismic-induced structural damage using artificial neural networks", Engineering Structures, Vol. 31, pp. 600-606.
- De Stefano, A., Ceravolo, R. and Sabia, D. (2001) "Output only dynamic identification in time-frequency domain", USA: Arlington, proceedings of the American Control Conference, pp. 447-449.
- Doebbling, Scott W., Farrar, Charles R., Prime, Michael B. and Shevitz, Daniel W. (1996) "Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: A Literature Review", USA: Los Alamos National Laboratory, LA-13070-MS.
- Kim, J.T., Ryu, Y.S., Cho, H.M. and Stubbs, N. (2003)., "Damage identification in beam-type structures: frequency-based method vs mode-shape-based method", Engineering Structures, Vol. 25, pp. 57-67.
- Matlab (2008)., Version 7.6, The MathWorks.
- Melhem, H. and Kim, H. (2003) "Damage detection in concrete by Fourier and Wavelets analysis", Journal of