

B. Haseli*

Researcher Shahid Rajaie
Technical Group.

e-mail: std_haseli@knu.ac.ir

O. Kheiri

Researcher Shahid Rajaie
Technical Group.

e-mail: o.kheiri@gmail.com

Seismic Damage Detection in Reinforced Concrete Piers of Kordestan- Mullasadra Bridges (Numerical Study) Using RID Functions and Tensor Method

The purpose of this study is to identify the most vulnerable pier in a real bridge sample using the tensor method. Therefore, after modeling the Kordestan-Mullasadra Bridge as one of the most vital arteries of transportation system in Tehran in OpenSees software, the signals recorded by displacement sensor at the control points of the bridge, before and after the earthquake event were subjected to the action of a sine wave load of 5π angular frequency, using RID functions in Matlab software were processed. Then, the 2d matrix of time-frequency and 3d plan of time-amplitude-frequency have been studied for all piers of the bridge. By calculating the difference of time- frequency matrix before and after damage and normalizing the responses, the most vulnerable pier is identified. In order to ensure the accuracy of the output results, by creating the damage pattern at the pier1 of FHW04 bridge, the damaged pier is detected by acceptable accuracy according to the method used in this study. The results of this study indicate that the most vulnerable pier of Kordestan-Mullasadra Bridge is based on signals recorded by the displacement sensor, the pier number 8 with the failure index 1. Respectively the pier number 7 with the 0.548 failure index, the pier number 2 with the 0.433 failure index and the pier number 6 with the 0.255 failure index are ranked next to the most vulnerable middle pier of Kordestan-Mullasadra street bridge.

Keywords: Seismic damage, Kordestan-Mullasadra Bridge, Reduced Interference Distribution Functions, Displacement Sensor, Tensor Method.

* Corresponding author

Received 09 June 2019, Revised 01 November 2019, Accepted 02 November 2019.
DOI: 10.22091/cer.2019.4500.1156

تشخیص آسیب لرزه‌ای در پایه بتُنی پل بزرگراه کردستان- خیابان ملاصدرا تهران به صورت عددی به کمک توابع توزیع تداخلی کاهش‌یافته (RID) و روش تانسوری

* بهزاد حاصلی

پژوهشگر همکار گروه تخصصی
شهید رجایی، تهران، ایران.
پست الکترونیک:
std_haseli@knu.ac.ir

امید خیری نمین

پژوهشگر همکار گروه تخصصی
شهید رجایی، تهران، ایران.
پست الکترونیک:
o.kheiri@gmail.com

هدف از این مطالعه، شناسایی آسیب‌پذیرترین پایه میانی در یک نمونه پل واقعی، با استفاده از روش تانسوری می‌باشد. به همین منظور، پس از مدل‌سازی پل کردستان- ملاصدرا به عنوان یکی از حیاتی‌ترین شریان‌های سیستم حمل و نقل شهر تهران، در نرم‌افزار اینسیس، سیگنال‌های ثبت‌شده توسط حسگر فرضی جابه‌جایی در نقاط کنترلی پل، قبل و پس از رویداد زلزله، تحت اثر اعمال بار محرك سینوسی با فرکانس زاویه‌ای $\pi/5$ ، با استفاده از توابع زمان- فرکانس توزیع تداخلی کاهش‌یافته (RID)، در محیط نرم‌افزار متلب پردازش شده است. در ادامه، ماتریس‌های دوبعدی زمان- فرکانس و پلان‌های سه‌بعدی زمان- دامنه- فرکانس برای تمامی پایه‌های میانی بررسی و با محاسبه اختلاف ماتریس‌های زمان- فرکانس قبیل و بعد از وقوع آسیب و نرمالیزه کردن پاسخ‌ها، آسیب‌پذیرترین پایه میانی شناسایی شده است. به منظور حصول اطمینان از صحت نتایج خروجی، با ایجاد الگوی آسیب در پایه شماره ۱ پل بزرگراهی FHW04، پایه آسیب‌دیده براساس روش به کاررفته در این پژوهش، با دقت قابل قبولی، شناسایی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد، آسیب‌پذیرترین پایه میانی پل کردستان- ملاصدرا براساس سیگنال‌های ثبت‌شده توسط حسگر فرضی جابه‌جایی، پایه میانی شماره ۸ با شاخص خرابی ۱ می‌باشد. پایه‌های میانی شماره ۷، ۶ و ۲ به ترتیب با شاخص خرابی $0.433/0.548$ و $0.255/0.255$ در رده‌های بعدی آسیب‌پذیرترین پایه میانی پل کردستان- ملاصدرا قرار دارند.

واژگان کلیدی: آسیب لرزه‌ای، پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا، توابع توزیع تداخلی کاهش‌یافته، حسگر فرضی جابه‌جایی، روش تانسوری.

۱- مقدمه

اقتصاد منطقه گردد [۱]. معمولاً سازه‌ها پس از گذر زمان و در اثر نوع کاربری و اعمال بارگذاری بیش از مقادیر منظور شده در زمان طراحی و همچنین در اثر وقوع زلزله‌های شدید، ممکن است دچار آسیب شوند. آسیب‌های ایجادشده بهشت، کارایی سیستم را تحت تأثیر قرار می‌دهد. در صورت عدم اصلاح این آسیب‌ها، عملکرد سازه به‌طور کلی مختل شده و خرابی در سازه گسترش می‌یابد [۲]. بنابراین، تشخیص آسیب لرزه‌ای در

پل‌ها جزو شریان‌های حیاتی شبکه حمل و نقل هر کشور محسوب می‌شوند که تخریب آن‌ها ناشی از یک زلزله قوی، می‌تواند باعث بروز خسارات جبران‌ناپذیری در

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۸/۰۳/۱۹، بازنگری ۱۳۹۸/۰۸/۱۰، پذیرش ۱۳۹۸/۰۸/۱۱.

DOI: 10.22091/cer.2019.4500.1156 شناسه دیجیتال

شناسایی یک سیستم قاب برشی ۵ درجه آزادی را با استفاده از سیگنال‌های پاسخ، مورد بررسی قرار دادند. براساس نتایج بدست آمد، بهمنظور شناسایی سیستم از روی پاسخ، روش‌های زمان- فرکانس به دلیل آنکه تخمینی از شکل و فرکانس مودی نسبت به زمان فراهم می‌آورند، در مقایسه با سایر روش‌ها، کارآمدترند [۷]. پژوهشگران در مطالعات خود که پیرامون مقایسه روش‌های ارتعاش- پایه جهت تشخیص آسیب لرزاگی در یک دال و یک تیر بتنی انجام شد، نتیجه گرفتند که تبدیل موجک برای تشخیص آسیب در نمونه‌های کوچک یا آزمایشگاهی دارای قابلیت بسیار بالایی بوده و برای سازه‌های با شرایط مرزی پیچیده مناسب می‌باشد [۸]. با توجه به مشکلات عدم همگرایی، استفاده از روش تبدیل موجک در مورد سازه‌هایی مانند پل‌های طویل ممکن نیست. در سال ۲۰۰۹، یک قاب فلزی سه طبقه را به کمک روش‌های تبدیل فوریه سریع، تبدیل موجک پیوسته و تبدیل بسته موجک و با استفاده از مدل‌های تطبیقی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت این پژوهشگران، ادامه تحقیقات در این خصوص را در سایر سازه‌ها از جمله پل‌ها پیشنهاد داد [۹]. دانشجو و طبایی در مطالعه‌ای برای تشخیص آسیب در کنار پایه بتنی پل‌ها به توسعه روش‌های^{۱۰} COMAC و نشانه‌های آسیب^{۱۱} پرداختند. نتایج مطالعه نشان داد که با در نظر گرفتن شکل مودهای یک مقطع طولی، این روش‌ها قادر به شناسایی مکان آسیب‌دیده نمی‌باشند و باید از شکل‌های مودی چندین مقطع طولی استفاده شود [۳]. گلهبان و مرادی در مطالعه‌ای به تشخیص ترک در تیرها با استفاده از تبدیل هیلبرت- هوانگ پرداختند و نتیجه گرفتند این تبدیل، ترک در عمق کم را با دقت بهتری نسبت به تبدیل فوریه سریع پیش‌بینی می‌نماید، اما با افزایش عمق ترک، دقت تبدیل هیلبرت نیز کاهش چشمگیری دارد.

¹⁰- Co Ordinated Modal Assurance Criteria¹¹- Damage Index

سازه پل، بهمنظور تعمیر و ترمیم آن برای حفظ کارایی مطلوب سازه و کاهش هزینه، امری ضروری است.

تشخیص آسیب لرزاگی در سازه‌ای پیچیده مانند پل، می‌تواند نقاط ضعف سازه، پیش از وقوع زلزله احتمالی را مشخص کند و با تقویت این نقاط مستعد خرابی، خسارات ناشی از وقوع زلزله واقعی را به صورت چشمگیری کاهش دهد. بهمنظور تشخیص آسیب لرزاگی در پل، روش‌های چشمی (سنتی) تنها خسارات ایجادشده در سطح را تشخیص می‌دهند، این در حالی است که با استفاده از روش‌های جدید و توابع زمان- فرکانس می‌توان محل دقیق آسیب لرزاگی را در انواع سازه‌های پیچیده شناسایی کرد [۳]. از جمله توابع مورد استفاده در زمینه تشخیص آسیب لرزاگی می‌توان به تحلیل فوریه زمان کوتاه (STFT)، توزیع وینگر- ویل (WVD^۱)، توزیع چوی- ویلیامز (CWD^۲)، توزیع شبه وینگر- ویل هموار شده (SPWVD^۴) و توزیع تداخلی کاهش یافته (RID^۵) اشاره کرد [۴ و ۵]. بوناتو^۶ و همکاران با استفاده از توابع سیگنال‌های پاسخ غیرمانا، روشی را با استفاده از توابع زمان- فرکانس کلاس کوهن^۷، جهت شناسایی آسیب سیستم پیشنهاد کردند. مدل مورد مطالعه توسط این پژوهشگران، یک قاب سه طبقه دوبعدی تحت اثر تحریکات مختلف از جمله رکورد لوماپریتا^۸ بوده است [۶]. با توجه به دقت پایین روش ارائه شده توسط بوناتو، در صورت وجود پارازیت و در هنگام رفتار غیرخطی پل‌ها، محققان به دنبال روش مناسب‌تری جهت شناسایی آسیب بودند. بنابراین، دی استفانو^۹ و همکاران با استفاده از روش‌های متعدد در حوزه زمان و حوزه زمان- فرکانس،

¹-Short Time Fourier Transform²- Wigner-Ville Distribution³- Choi-Williams Distribution⁴- Smoothed Pseudo Wigner-Ville Distribution⁵- Reduced Interference Distribution with Hanning kernel⁶- Bonato⁷- Cohens Class⁸- Loma Prieta Record⁹- De Stefano

در سال ۲۰۱۲، محققان در پژوهشی دیگر، به مقایسه دقت حسگرهای فرضی ثبت‌کننده پاسخ جهت تشخیص آسیب لزهای پرداختند. در این مطالعه، دقت سه حسگر فرضی ثبت‌کننده شتاب، سرعت و جابه‌جایی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج، بیانگر مطلوب بودن سیگنال‌های ثبت‌شده توسط حسگر فرضی جابه‌جایی می‌باشد [۱۷]. با توجه به مزایای روش توزیع تداخلی کاوش‌یافته نسبت به سایر روش‌های توزیع یادشده و با توجه به سازگاری مطلوب این روش توزیع برای سیگنال‌های گذرا و غیرمانا (پل‌ها عمدتاً پاسخ‌های غیرمانا دارند [۱۷]), در پژوهش حاضر، جهت پردازش سیگنال‌های پاسخ از روش توزیع تداخلی کاوش‌یافته استفاده شده است. همچنین به منظور تشخیص آسیب در این پژوهش، با توجه به قابلیت روش تانسوری در نمایش همزمان انرژی سیگنال در سه حوزه زمان، فرکانس و مکان و دقت بالا، از روش تانسوری استفاده شده است. مهم‌ترین عامل ایجاد آسیب لزهای در این پژوهش، زلزله‌های حوزه نزدیک گسل حاوی اثرات جهت‌پذیری می‌باشد. با توجه به نزدیکی سیاری از گسل‌های فعال به پل بزرگراه کردستان- خیابان ملاصدرا از جمله گسل مشاء فشم، گسل شمال تهران، گسل جنوب ری، گسل آهار، گسل ملاصدرا و گسل کهریزک، رکوردهای زلزله انتخابی در این پژوهش، جهت ایجاد آسیب لزهای، متناسب با مکانیزم گسل‌های یادشده می‌باشد. لازم به ذکر است اثرات پدیده جهت‌داری، شامل فرایند شکست پیش‌رونده^{۱۳} و پس‌رونده^{۱۴} در رکوردهای انتخابی پژوهش حاضر، وجود دارند [۱۸]. بنابراین در این مطالعه، با استفاده از توابع زمان- فرکانس توزیع تداخلی کاوش‌یافته و سیگنال‌های پاسخ ثبت‌شده توسط حسگر فرضی جابه‌جایی، اقدام به شناسایی آسیب‌پذیرترین پایه میانی پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا خواهیم نمود. لازم به ذکر است بهدلیل مشکلات عدم همگرایی

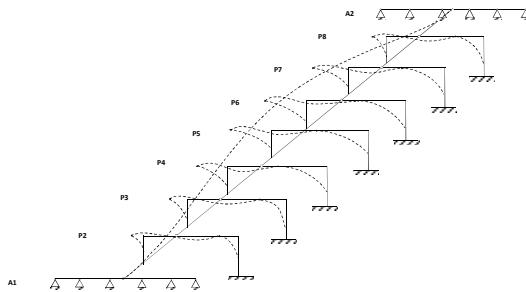
[۱۰]. در سال ۲۰۱۵، نیو^{۱۲} و همکاران در پژوهشی به شناسایی آسیب ایجادشده در پل براساس روش المان محدود و انرژی کرنشی مodal پرداختند. نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد در صورتی که آسیب شدید باشد، روش انرژی کرنشی قابلیت شناسایی محل آسیب را دارد [۱۱]. تابش‌پور و بخشی در مطالعات خود با استفاده از تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی غیرخطی به بررسی آسیب‌پذیری سازه‌های بتی با استفاده از شاخص خرابی پرداختند [۱۲]. تبریزیان و همکاران در مطالعه‌ای در سال ۱۳۹۴، آسیب ایجادشده در سازه‌های فلزی با استفاده از الگوریتم ژنتیک را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد این الگوریتم حتی در حضور نوافه‌های تصادفی، مکان و مقدار آسیب احتمالی را به درستی تعیین می‌کند [۱۳]. اما دقت این روش در تشخیص آسیب ایجاد شده در پل‌های طویل بسیار پایین است. در پژوهشی مشابه، عزالدین و همکاران با استفاده از تبدیل موجک به شناسایی ترک در تیرها پرداخته و نشان دادند، استفاده از تبدیل موجک جهت تشخیص آسیب، کارایی مناسبی را داراست [۱۴]. محققان دیگری نیز در مطالعه‌ای به مقایسه دقت توابع زمان- فرکانس جهت تشخیص آسیب لزهای در یک نمونه پل پرداختند. براساس نتایج حاصل از این مطالعه، تابع زمان- فرکانس توزیع تداخلی کاوش‌یافته به منزله تابع مطلوب برای پردازش سیگنال‌های پاسخ لزهای پل‌ها شناسایی شده است [۱۵]. در پژوهشی دیگر، جهت تشخیص آسیب لزهای در پایه‌ی بتی پل‌ها با استفاده از سیگنال‌های پاسخ، روش جدیدی به نام روش تانسور سه‌بعدی پیشنهاد شد [۱۶]. دقت این روش در شناسایی آسیب، در مقایسه با روش‌های قبلی بسیار مطلوب بوده و در این روش می‌توان انرژی سیگنال را علاوه‌بر حوزه فرکانس و حوزه زمان، در حوزه مکان نیز به صورت همزمان مشاهده کرد.

¹³- Forward Directivity

¹⁴- Backward Directivity

¹²- Niu

زمان-فرکانس برای تمامی پایه‌ها حاصل شده است و در نهایت، مطابق با روش تانسور سه‌بعدی آسیب‌پذیرترین پایه میانی در پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا شناسایی شده است.



شکل ۱- شکل مودی مربوط به مود اول پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا

شکل بار محرك سينوسی در حالت خطی و غيرخطی، به ترتیب در شکل ۲ نمایش داده شده است. به منظور جلوگیری از وقوع پدیده تشید فرکانس زاویه‌ای بار محرك سینوسی، برابر با 5π انتخاب شده است. در این شرایط با توجه به رابطه (۱)، پریود اصلی بارهای محرك $4/0$ ثانیه می‌باشد.

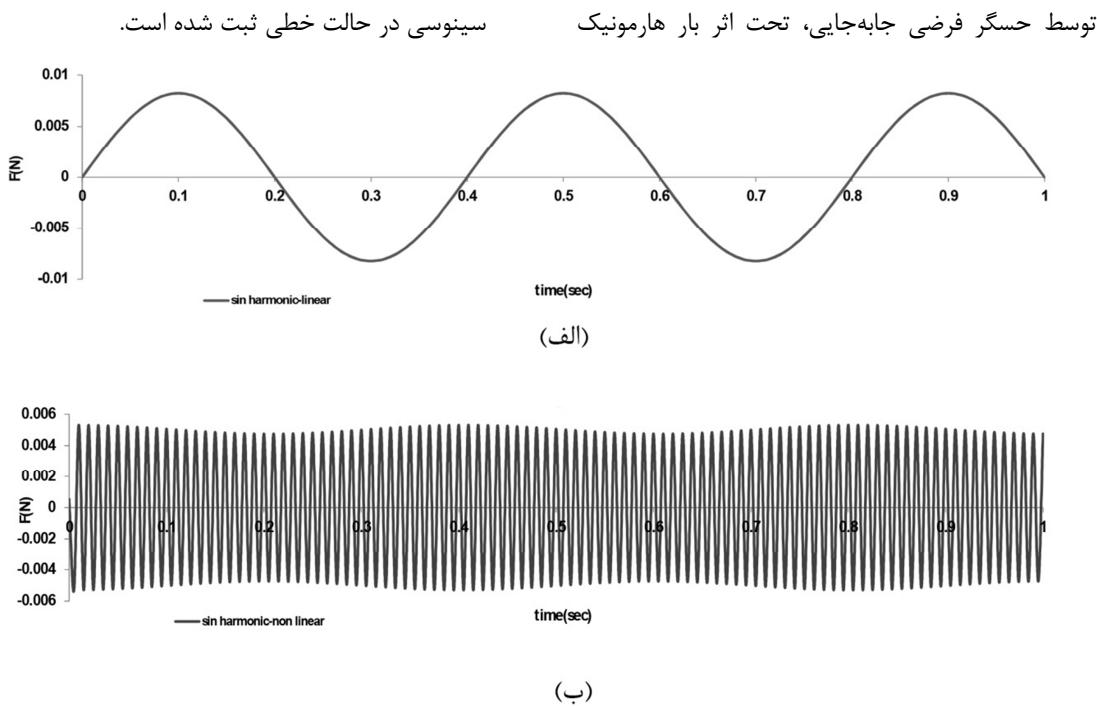
$$\frac{2\pi}{5\pi} = 0.4 \text{ sec} > T_{\text{بر}} = 0.1433 \quad (1)$$

به منظور ایجاد ارتعاش اولیه در سازه، جهت ایجاد پلان سه‌بعدی قبل از آسیب و مقایسه پلان‌های سالم و آسیب‌دیده مطابق با روش تانسوری، لازم است از بار محرك سینوسی یا کسینوسی استفاده شود. براساس نتایج مطالعات محققان [۲۱] در این پژوهش، از بار محرك سینوسی جهت ارتعاش سازه استفاده شده است. همچنین بهمنظور اطمینان از صحت روش به کار گرفته جهت تشخیص آسیب لرزه‌ای در این مطالعه، یک الگوی آسیب در پایه میانی شماره ۱ پل بزرگراهی شماره ۴ ایالت متحده آمریکا (FHWA04) در نظر گرفته شده است. آسیب به صورت کاهش صد برابری سختی جانبی پایه مدنظر، ایجاد شده است. در این حالت، سیگنال‌های پاسخ

به خاطر استفاده از تعدادی گره در مدل‌سازی این پل، تنها روش مناسب از میان توابع زمان- فرکانس، روش RID و با توجه به حجم بالای داده‌ها مناسب‌ترین روش همگرا به پاسخ، (روش تانسور سه بعدی) در این مطالعه به کار گرفته شده است.

۲- روش تحقیق

هدف اصلی در پژوهش حاضر، تشخیص آسیب لرزه‌ای در پایه‌های بتنی پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا واقع در شهر تهران با استفاده از توابع زمان- فرکانس توزیع تداخلی کاهش‌یافته و به کمک روش تانسور سه‌بعدی از طریق ثبت سیگنال‌های جابه‌جایی در نقاط کنترلی می‌باشد. در این تحقیق، پس از مدل‌سازی پل مدنظر مطابق با نقشه‌های اجرایی در محیط نرم‌افزار OpenSees [۱۹] به منظور ایجاد ارتعاش در پل، پیش از رویداد زلزله بار هارمونیک سینوسی با فرکانس زاویه‌ای 5π ، در حالت غیرخطی به پل اعمال و نتایج توسط حسگر فرضی جابه‌جایی در قسمت فوقانی هریک از پایه‌های میانی ثبت شده است. در این حالت، سیگنال‌های ثبت شده، بیانگر پاسخ سازه در حالت سالم می‌باشد. در ادامه با استفاده از سه رکورد زلزله با مکانیزم‌های مشابه با گسل‌های فعال واقع در شهر تهران، تحلیل تاریخچه زمانی غیرخطی بر روی پل مدل شده انجام گرفته و مجدداً بار هارمونیک سینوسی به سازه اعمال و نتایج توسط حسگر فرضی جابه‌جایی ثبت شده است. در این شرایط، سیگنال‌های ثبت شده، پاسخ سازه در حالت آسیب‌دیده را نشان می‌دهد. به منظور جلوگیری از وقوع پدیده تشید، پریود بار هارمونیک اعمالی با پریود اصلی سازه متفاوت است. در شکل ۱، مود شکل مربوط به مود اول سازه نمایش داده شده است. در ادامه با پردازش سیگنال‌های پاسخ ثبت شده در محیط نرم‌افزار متلب [۲۰] با استفاده از توزیع تداخلی کاهش‌یافته، پلان‌های سه‌بعدی زمان- دامنه- فرکانس و ماتریس‌های دوبعدی



شکل ۲- بار هارمونیک سینوسی با فرکانس زاویه‌ای 5π در حالت (الف) خطی و (ب) غیرخطی

یکسان و با ارتفاع $1/4$ متر و وزن $591/708$ کیلونیوتن می‌باشد.

شکل ۴، جزئیات کوله شماره ۱ را نشان می‌دهد. هر دو کوله ۱ و ۲ برای هر دو مسیر رفت و بروگشت دارای سازه‌ای واحد و یکپارچه می‌باشد که جلوی آن، محل خاکریزی قرار گیری شاهتیرهای عرشه و پشت آن، محل خاکریزی رمپ پل می‌باشد. به دلیل قوس قائم پل در مقطع طولی، ارتفاع اغلب پایه‌ها با یکدیگر متفاوت و در محدوده $13/5$ تا $45/7$ متر قرار دارد. مقاومت بتن محصور نشده ستون و سرستون پایه‌ها 24 مگاپاسکال و مقاومت بتن محصور شده آن‌ها (مقاومت هسته بتن)، جهت تعریف مصالح بتنی، $1/25$ برابر مقاومت بتن محصور نشده معادل با 30 مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. همچنین تنش تسليیم میلگرد‌های فولادی برای مقاطع بتن‌آرمه معادل با 300 مگاپاسکال لحاظ شده است. روش ایجاد پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا واقع در شهر تهران مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. در این پل، بهدلیل قوس قائم در مقطع طولی، ارتفاع پایه‌های میانی با یکدیگر متفاوت است (شکل ۳- الف). طول کل پل با احتساب رمپ‌ها $485/6$ متر است که 229 متر از طول آن برای سازه پل و $256/6$ متر دیگر آن برای رمپ‌ها می‌باشد. این پل دارای 8 دهانه که طول دو دهانه ابتدایی و انتهایی آن $24/5$ متر و تمام دهانه‌های میانی آن دارای طولی برابر 30 متر هستند. طول رمپ جنوبی این پل $120/1$ متر و طول رمپ شمالی آن برابر $136/5$ متر است. این پل روگذر، دارای 7 پایه تکیه‌گاهی بتن مسلح بوده و هر پایه دارای 2 ستون در هر مسیر رفت و بروگشت می‌باشد. فاصله ستون‌های هر پایه 6 متر بوده و ستون‌های میانی دایروی شکل هستند. قطر ستون‌ها $1/2$ متر و ضخامت پوشش آرماتور $7/5$ سانتی‌متر است. جزئیات سرستون برای تمامی پایه‌ها

۳- معرفی مدل‌های تحلیل

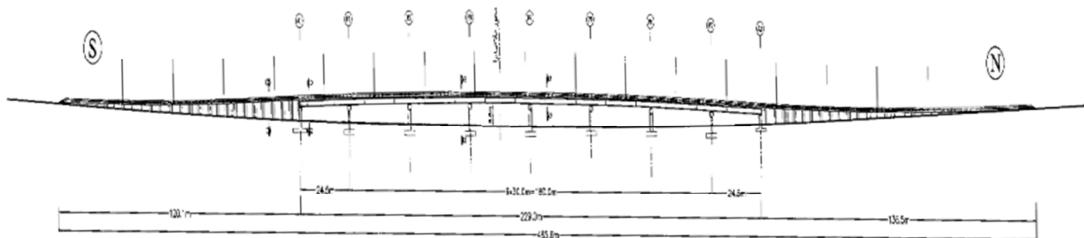
در پژوهش حاضر، پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا واقع در شهر تهران مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. در این پل، بهدلیل قوس قائم در مقطع طولی، ارتفاع پایه‌های میانی با یکدیگر متفاوت است (شکل ۳- الف). طول کل پل با احتساب رمپ‌ها $485/6$ متر است که 229 متر از طول آن برای سازه پل و $256/6$ متر دیگر آن برای رمپ‌ها می‌باشد. این پل دارای 8 دهانه که طول دو دهانه ابتدایی و انتهایی آن $24/5$ متر و تمام دهانه‌های میانی آن دارای طولی برابر 30 متر هستند. طول رمپ جنوبی این پل $120/1$ متر و طول رمپ شمالی آن برابر $136/5$ متر است. این پل روگذر، دارای 7 پایه تکیه‌گاهی بتن مسلح بوده و هر پایه دارای 2 ستون در هر مسیر رفت و بروگشت می‌باشد. فاصله ستون‌های هر پایه 6 متر بوده و ستون‌های میانی دایروی شکل هستند. قطر ستون‌ها $1/2$ متر و ضخامت پوشش آرماتور $7/5$ سانتی‌متر است. جزئیات سرستون برای تمامی پایه‌ها

بهره‌برداری پل بزرگراه کردستان- خیابان ملاصدرا مطابق با دستورالعمل آینینامه آشتو [۲۳] انجام شده است. با توجه به اینکه مدل‌سازی پل به صورت دوبعدی، منجر به خطاهای زیادی در محاسبه پاسخ مؤلفه‌های مدنظر می‌گردد، بنابراین در پژوهش حاضر، مدل‌سازی و آنالیز پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا به صورت سه‌بعدی و با شش درجه آزادی (سه درجه آزادی انتقالی و سه درجه آزادی دورانی)، مطابق با پیشنهاد مختصات سیستم ارائه شده توسط محققان در مرجع [۲۴] در نرم‌افزار OpenSees انجام شده است.

مدل‌سازی مصالح بتن محصورشده با استفاده از ماده بتن یک بعدی کنترل اسکات- پارت با مقاومت کششی صفر (Concrete01) که سختی آن در باربرداری و بارگذاری به صورت خطی افت می‌کند، انجام شده است.

۲۰ سانتی‌متر تشکیل شده است. بر روی این دال بتنی ۱ سانتی‌متر قیر و ۷ سانتی‌متر آسفالت اجرا شده است. برای مهار شاهتیرها در طول سازه و ایجاد دیافراگم، از مهاربندهای خرپایی در جان شاهتیرها، در جهت عرضی و به فاصله‌های ۶ متری از یکدیگر استفاده شده است (شکل ۳-ب).

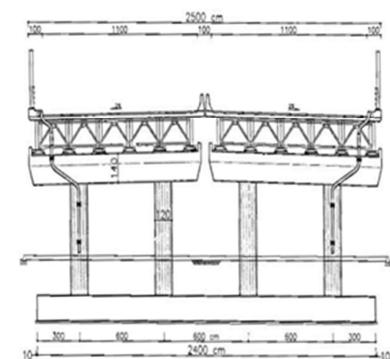
وزن هریک از اجزای تشکیل‌دهنده روسازه محاسبه و با جمع‌کردن آن‌ها، وزن کل روسازه حاصل شده، که به این ترتیب، وزن کل روسازه برای دو مسیر، برابر با ۲۵۵۰۰ کیلونیوتون و برای یک مسیر، برابر با ۵۱۰۰۰ کیلونیوتون برآورد شده است. جدول ۱، جزئیات محاسبه وزن هریک از اجزای تشکیل‌دهنده روسازه پل را ارائه می‌دهد. بهمنظور محاسبه نیروی افقی زلزله برای پل‌های شهری، اعم از راه و راه‌آهن باید حداقل نصف بار زنده و عادی منظور شود [۲۲]. بنابراین محاسبه بارهای زنده و



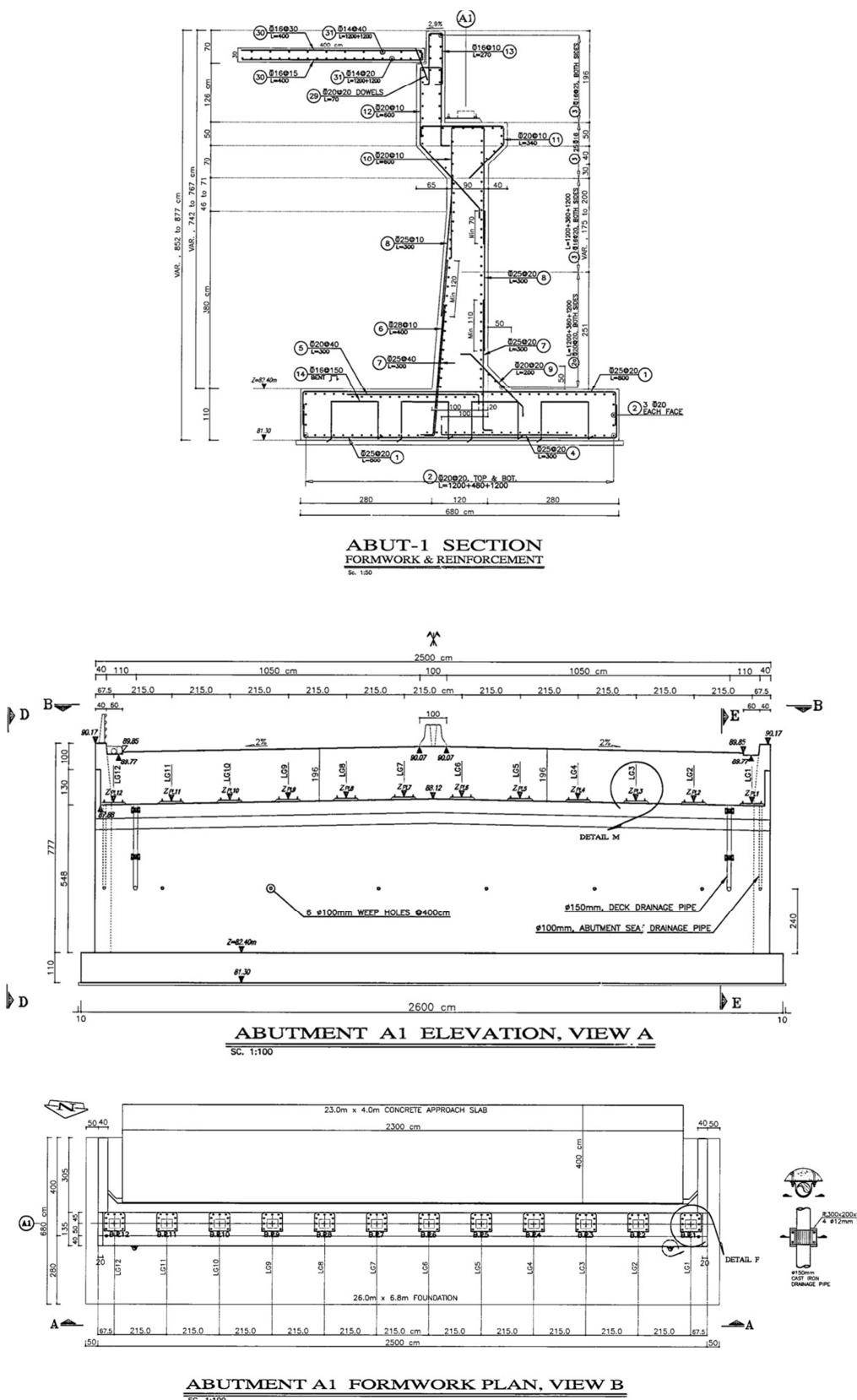
(الف) نمای طولی شمال به جنوب



(ب) نمای عرضی



شکل ۳- جزئیات پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا [نقشه اجرایی پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا]



شکل ۴- نمایهای مختلف از جزئیات کوله ۱ پل کردستان- خیابان ملاصدرا [نقشه اجرایی پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا]

جدول ۱- جزئیات وزن اجزای تشکیل دهنده پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا

وزن برای یک مسیر (KN)	وزن برای دو مسیر (KN)	وزن کل شاهتیرها
۴۳۰۹/۲	۸۶۱۸/۴	وزن کل بیس پلیت ها
۶۸/۱۵	۱۳۶/۳	وزن کل پادیندهای افقی
۲۹۴/۱۵۵	۵۸۸/۳۱	وزن کل آرماتورهای دال عرشه
۱۰۰۳/۱	۲۰۰۶/۲	وزن کل بتن عرشه
۱۳۴۶۶/۰۶	۲۶۹۳۲/۱۲	وزن کل آسفالت رویه عرشه
۳۸۰۵/۵۵۵	۷۶۱۱/۱۱	وزن کل قیر مصرفی در رویه عرشه
۲۹۶/۵۳۶۵	۵۹۳/۰۷۳	وزن کل جانپناههای بتنی عرشه
۲۲۰۰/۸۱	۴۴۰۱/۶۲	وزن کل گارد ریل ها
۳۷/۵۰۵	۷۵/۰۱	وزن کل رو سازه پل
۲۵۵۰۰	۵۱۰۰۰	

ستون الاستیک در موقعیت قرارگیری مربوط به هر مقطع (وسط دهانه‌ها و یا بر روی پایه‌ها) در جهت طولی پل در نرم‌افزار OpenSees استفاده شده است.

۲-۳- مدل کردن سرستون‌های پل

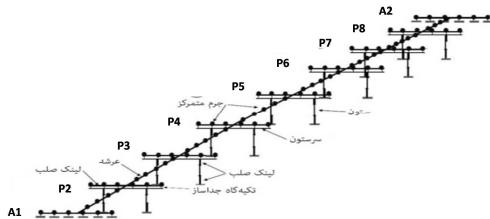
در مدل‌سازی ستون و سرستون پایه‌های پل از المان‌های تیر- ستون غیرخطی با استفاده از مقاطع فایبر بهمنظور کنترل استقرار ستون‌های پل در محدوده خطی، استفاده شده است (آینین‌نامه آشتو، الزام دارد که پاسخ لرزه‌ای رو سازه و زیرسازه پل به صورت کاملاً الاستیک باقی بماند [۲۳]). در این مقاطع فایبر از مصالح یکبعدی غیرخطی تعریف شده برای مدل‌سازی رفتار بتن محصورشده و محصورنشده و همچنین میلگردهای محصورشده و نثوپرن‌ها و سرستون‌ها استفاده شده است. لازم به ذکر است سرستون‌ها به صورت لینک صلب مدل‌سازی شده‌اند. بهمنظور مدل‌سازی تکیه‌گاه‌های نثوپرن در مدل پل از المان سه‌بعدی تکیه‌گاه الاستومر استفاده شده است. نثوپرن‌های کوله و پایه‌های میانی شامل ۱۰ ورق فولادی با ضخامت ۴، ۹ لایه الاستومر با ضخامت ۱۱ و ۲ لایه الاستومر با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر می‌باشند. قطر معادل برای تکیه‌گاه‌های نثوپرن مستقر بر روی کوله و پایه‌های

برای مصالح بتن محصورشده نیز از ماده بتن یک بعدی (Concrete03) با مقاومت فشاری بتن محصورشده، مقاومت کششی و نرم‌شوندگی کششی غیرخطی و برای مدل‌سازی رفتار میلگردهای فولادی مصالح بتن‌آرمه از ماده فولادی یکبعدی دوخطی (Steel01) با سخت‌شوندگی سینماتیک و سخت‌شوندگی ایزوتروپیک اختیاری استفاده شده است.

۱-۳- مدل کردن عرشه پل

برای مدل‌سازی شاهتیرهای سرتاسری طولی و دال بتن‌آرمه قرار گرفته بر روی شاهتیرها، بهمنظور جلوگیری از بروز مشکلات عدم همگرایی در حین انجام آنالیز تاریخچه زمانی، از یک المان تیر- ستون الاستیک استفاده شده است. روش انجام این کار به این ترتیب است که در مرحله اول ابتدا دو تیپ متفاوت از مقطع عرضی عرشه که یکی در وسط دهانه‌های پل (عرضه میانی) و دیگری بر روی پایه‌های پل (عرضه انتهایی) قرار گرفته، شامل ۶ عدد شاهتیر فولادی با فاصله‌های عرضی معین به علاوه ۲۰ سانتی‌متر دال بتن‌آرمه، در نرم‌افزار SAP2000 به صورت مجزا مدل‌سازی شده و به این ترتیب خصوصیات این دو تیپ از مقطع عرضی عرشه به دست آمده است. در مرحله دوم، از خصوصیات مقاطع به دست آمده در یک المان تیر-

صلب، مدل سازی شده است. در شکل ۵ مشاهده می شود، تکيه گاه های موجود در محل کوله و پایه های ميانى به صورت گيردار مدل شده و تمامي درجات آزادى مربوط به تکيه گاه ها، كاملاً مقيد شده اند.



شکل ۵- مدل تحلیلی پل بزرگراهی کردستان - خیابان ملاصدرا.

در جدول ۲، مقادیر ویژه، فرکانس زاویه ای و پریود مربوط به سه مود اول پل بزرگراهی کردستان - خیابان ملاصدرا به دست آمده براساس تحلیل دینامیکی مشخص شده است. با توجه به صلبيت بالاي سازه، دوره های تناوب به دست آمده، کوچک است. همان طور که مشاهده می شود، اثر مودهای بالاتر در مورد سازه قابل توجه است. لذا اثر مشارکت مودهای بالاتر، باعث توزیع نسبتاً يکواخت ضریب مشارکت جرمی بین سه مود اول سازه شده و پریودهای زمانی سه مود اول نزدیک به هم به دست آمده است. ضمناً عدم تقارن هندسی پل، سبب شده است که ضریب مشارکت جرمی تنها به مود اول اختصاص پیدا نکرده و بین سه مود اول توزیع شود.

جدول ۲- مقادیر پریود، فرکانس زاویه ای و بردار ویژه مربوط به سه مود اول پل بزرگراهی کردستان - خیابان ملاصدرا

شماره مود	مقدار ویژه	فرکانس زاویه ای (ω)	$(T = \frac{2\pi}{\omega})$
۱	۱۹۲۲/۱۸۹	۴۳/۸۴۲۷	۰/۱۴۳۳
۲	۲۱۴۱/۱۸۷	۴۶/۲۷۲۹	۰/۱۳۵۷
۳	۲۲۴۵/۸۳۴	۴۷/۳۹۰۲	۰/۱۳۲۵

مطابق با مشخصات ارائه شده در گزارش فوق در نرم افزار OpenSees مدل سازی و مقدار پریود اصلی آن با مقدار متناظر به دست آمده توسط محققان مطابق با جدول ۳، مقایسه شده است. شکل (۶-الف) پل سازمان بزرگراهی ایالت متحده آمریکا شماره ۴ را نشان می دهد.

میانی به ترتیب ۴۴۷/۸ و ۵۸۶/۴ میلی متر در نظر گرفته شده است.

۳-۳- مدل کردن کوله های پل

در طرح اغلب پل ها، نسبت سختی کوله به سختی هریک از پایه ها، مقداری بسیار بزرگ است که با افزایش خاک کوبیده شده پشت کوله، اجرای دیوارهای حائل خاکریز پشت کوله و رمپ و افزایش ارتفاع پایه ها این نسبت بزرگ تر نیز خواهد شد. بنابراین در مدل سازی اکثر پل ها، کوله ها را با صلبيت بی نهايیت فرض می کنند. البته نتایج مطالعات مختلف نشان می دهد، فرض صلبيت بی نهايیت کوله ها، پشتوانه علمی دارد [۲۵].

۴-۳- مدل کردن پایه های ميانی پل

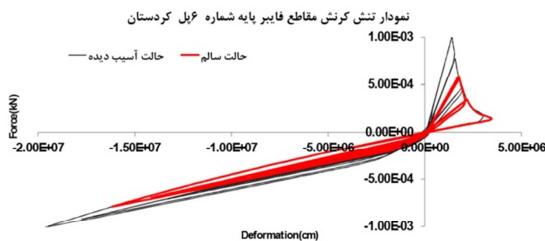
در اين مطالعه، كل جرم سرستون به علاوه نصف جرم سرستون های هر پایه به منظور انجام آنالیز غيرخطی و تاریخچه زمانی غيرخطی، به عنوان جرم زیر سازه در مدل سازی پایه ای پل لحاظ شده است. لازم به ذكر است در مرحله اول مدل سازی (انجام تحلیل خطی و مدل سازی اولیه) از المان های تیر- سرستون خطی استفاده شده است، چراکه دستیابی به مشخصات دینامیکی سازه، مستقل از تعریف المان های غیرخطی می باشد. نواحی ابتدایی و انتهایی هریک از پایه های ميانی از طریق تعریف لینک

جدول ۲

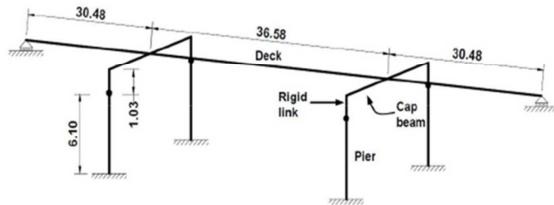
به منظور اطمینان از صحت سنجی پل مدل سازی شده در این مطالعه، يك نمونه پل ارائه شده توسط سازمان بزرگراهی ایالت متحده آمریکا شماره ۴ (FHWA04-1996) در مراجع [۲۶، ۲۷ و ۲۸] مدل سازی و مقدار پریود اصلی آن محاسبه شد. پل

است. تطابق نمودارهای هیسترزیس قبل و بعد از ایجاد آسیب، بیانگر صحت مدل سازی پل مورد مطالعه در این پژوهش می باشد.

در شکل (۶- ب) منحنی هیسترزیس مربوط به پایه شماره ۶ پل کردستان قبل و پس از ایجاد آسیب نمایش داده شده است. ملاحظه می شود محدوده تنش و کرنش و دامنه اعوجاج در اثر آسیب ایجاد شده در پایه افزایش یافته



(ب) منحنی هیسترزیس پایه شماره ۶ پل کردستان در دو حالت آسیب دیده و سالم.



(الف) مدل تحلیلی پل FHW04

شکل ۶- مدل تحلیلی پل FHW04 به منظور راستی آزمایی پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا به همراه منحنی هیسترزیس

جدول ۳- مقدار پریود به دست آمده از OpenSees و مقدار محاسبه شده توسط محققان در مراجع [۲۶ و ۲۷]

پریود اصلی (T) در این مطالعه	پریود اصلی (T) توسط محققان
۰/۳۵۱۷	۰/۳۵۱۵

گسل های فعال شهر تهران و براساس پالس های موجود در مؤلفه های سرعت و جابه جایی رکوردهای زلزله به صورت چشمی با یکدیگر مقایسه شدند و رکوردهایی که تعداد پالس های بیشتر و قوی تری داشتند (به دلیل وجود اثرات جهت پذیری پیش رونده و پس رونده)، انتخاب گردیدند. این نگاشتهای زلزله از پایگاه اطلاعات زلزله PEER دریافت شد [۲۹]. مشخصات سه رکورد زلزله انتخابی در جدول ۴ ارائه شده است.

۵-۳- انتخاب رکوردهای زلزله

خاک ساختگاه پل مورد مطالعه در این تحقیق، خاک نوع ۲ آیین نامه ۲۸۰۰ ایران فرض شده است. به این منظور، سعی شد شتاب نگاشتهای انتخابی تا حدامکان نمایانگر حرکت واقعی زمین در محل فرضی احداث پل مورد مطالعه باشد. برای نیل به این هدف، سه زوج شتاب نگاشت متعلق به مؤلفه های سه رکورد زلزله ثبت شده با ویژگی های مشابه، با توجه به مکانیزم

جدول ۴- مشخصات رکوردهای مقیاس شده انتخابی زلزله [۲۹]

S _{FV} (ضریب مقیاس مؤلفه قائم)	S _{FL&T} (ضریب مقیاس مؤلفه افقی)	PGA _V $\frac{m}{s^2}$	PGA _{L&T} $\frac{m}{s^2}$	وضعیت جهت پذیری [۱۸]	نام ایستگاه ثبت زلزله	Earthquake
۱/۱۰۳g	۰/۷۰۱۶g	۰/۷۶۴g	۰/۹۹۵g	پیش رونده	JFPG	Northridge
۱/۷۷۱g	۰/۸۱۸۴g	۰/۴۷۶g	۰/۸۵۳g	پیش رونده	SYL	Northridge
۲/۱۲۸g	۱/۳۵۸۲g	۰/۳۹۶g	۰/۵۱۴g	پس رونده	LOMA	Loma prieta

توزيع تداخلی کاهش يافته با هسته $Rx(t)$ برای سیگنال تحلیلی به صورت رابطه (۲) و (۳) تعریف می‌شود [۳۱ و ۳۲].

$$RID(t,\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) Rx(t,\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

$$Rx(t,\tau) = \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} \left(\frac{g(v)}{\tau} \left(1 + \cos \frac{2\pi v}{\tau} \right) \times \right. \\ \left. x\left(t+v+\frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t+v-\frac{\tau}{2}\right) \right) dv \quad (3)$$

در روابط فوق، t زمان، ω فرکانس زاویه‌ای، x^* مزدوج مختلط، $h(\tau)$ یک پنجره زمان هموارکننده و (v) یک پنجره فرکانس هموارکننده می‌باشد. برای تخمین طیفی در توابع زمان-فرکانس از پنجره Hanning مطابق رابطه (۴) استفاده شده است.

$$Hann(v) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos \left(\frac{2\pi v}{\tau} \right) \quad (4)$$

تشخیص آسیب لرزه‌ای در پایه‌های بتنی پل کردستان در این مطالعه، براساس روش تانسور سه بعدی که الهام‌گرفته از روش تفاضل ماتریسی اصلاح شده می‌باشد، انجام شده است.

ایده اولیه این روش در بعد فرکانس، توسط بسخیران^{۱۷} و همکاران در سال ۲۰۰۵، مطرح شد [۳۳]. اما با توجه به توابع زمان-فرکانس، دانشجو و همکاران، تغییراتی را در آن ایجاد کردند [۱۶]. در واقع با توجه به قابلیت توابع زمان-فرکانس، علاوه بر بعد فرکانس، بعد زمان به روش تفاضل ماتریسی اضافه شد. در روش تانسوری به کمک تحلیل‌های زمان-فرکانس می‌توان انرژی سیگنال را در حوزه فرکانس و زمان به طور همزمان مشاهده کرد. آسیب با توازن انرژی در سازه، رابطه مستقیمی دارد. بنابراین با فرض توزیع انرژی سیگنال به صورت همزمان در حوزه زمان و فرکانس، می‌توان این

لازم به ذکر است تمامی زوج شتاب‌نگاشتها براساس روش مقیاس‌سازی ارائه شده توسط نشریه ۴۶۳ [۲۲]، مقیاس‌سازی شدند. بهنحوی که ابتدا تمام زوج شتاب‌نگاشتها به مقدار حداقل شتاب خود مقیاس شده، با منظور کردن میرایی ۵٪ طیف پاسخ تهیه و با استفاده از روش جذر مجموع مربعات طیف ترکیبی واحد برای هر زوج شتاب‌نگاشت حاصل شد. سپس با مقایسه متوسط طیف‌های پاسخ ترکیبی در محدوده ۰/۲ تا ۱/۵ برابر پریود اصلی سازه با طیف استاندارد ۲۸۰۰، ضریب مقیاس به گونه‌ای تعیین شد که در محدوده یادشده مقادیر متوسط در هیچ حالت، کمتر از ۱/۴ برابر مقادیر نظری در طیف استاندارد ۲۸۰۰ نباشد. هر دو رکورد زلزله نوثریج (JFPG^{۱۵}) و (SYL^{۱۶}) حاوی اثرات جهت‌پذیری پیش‌روندۀ و رکورد لوماپریتا دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌روندۀ می‌باشد.

۴- توابع زمان-فرکانس و روش تشخیص آسیب به کار رفته در این پژوهش

یک تابع زمان-فرکانس با بیان محتوای فرکانسی با توجه به تغییرات زمان، امکان تحلیل بهینه سیگنال‌ها را فراهم می‌سازد. توابع زمان-فرکانس به سه دسته خطی، مربعي و غیرخطی طبقه‌بندی می‌شوند. با استفاده از تحلیل‌های زمان-فرکانس این امکان فراهم می‌شود که انرژی سیگنال در حوزه زمان و در حوزه فرکانس به صورت همزمان قابل رویت باشد [۳۰]. براساس مطالعات پیشین انجام شده، در این پژوهش به منظور پردازش سیگنال‌های پاسخ از توابع مربعي زمان-فرکانس توزیع تداخلی کاهش‌يافته استفاده شده است. توزیع تداخلی کاهش‌يافته و توزیع وینگر-ویل هر دو در کلاس کوهن قرار دارند. اما روش تداخلی کاهش‌يافته برای سیگنال‌های گذرا و غیرمانا، به دلیل کاهش تداخل مربعي، مناسب‌تر می‌باشد.

¹⁵- Jensen Filter Plant

¹⁶- Sylma

آسیب لرزه‌ای در پایه بتنی از روش تانسور سه‌بعدی استفاده شده است. تمامی درایه‌های ماتریس‌های زمان-فرکانس براساس پردازش سیگنال‌های جابه‌جایی-زمان توسطتابع توزیع تداخلی کاهش‌یافته حاصل می‌شود.

$$T_{fs} = \begin{bmatrix} RIDs(t1,f1) & RIDs(t1,f2) & \dots & RIDs(t1,fn) \\ RIDs(t2,f1) & RIDs(t2,f2) & \dots & RIDs(t2,fn) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ RIDs(tm,f1) & RIDs(tm,f2) & \dots & RIDs(tm,fn) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T_{fd} = \begin{bmatrix} RIDd(t1,f1) & RIDd(t1,f2) & \dots & RIDd(t1,fn) \\ RIDd(t2,f1) & RIDd(t2,f2) & \dots & RIDd(t2,fn) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ RIDd(tm,f1) & RIDd(tm,f2) & \dots & RIDd(tm,fn) \end{bmatrix} \quad (9)$$

با تفاضل درایه به درایه این دو ماتریس و نهایتاً با جمع کردن درایه‌های ماتریس حاصل و نرمال‌سازی اعداد خروجی، مطابق با رابطه (۱۰) شاخص خرابی حاصل شده و آسیب‌پذیرترین پایه قابل‌شناسایی خواهد بود.

$$Difference(k) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n |T_{fs}(fi, tj) - T_{fd}(fi, ij)| \quad (10)$$

در رابطه (۱۰)، m تعداد مخازن فرکانسی و n تعداد گام‌های زمانی است. جهت افزایش دقیقت تشخیص آسیب ماتریس‌ها به صورت مربعی در نظر گرفته شده‌اند.

۵- تحلیل و محاسبات

همان‌گونه که بیان شد، پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا تحت اثر سه رکورد زلزله در معرض آسیب لرزه‌ای قرار گرفته و سیگنال‌های پاسخ جابه‌جایی در اثر اعمال بار محرك سینوسی قبل و بعد از آسیب لرزه‌ای ثبت شده‌اند. برای پردازش سیگنال‌ها از توزیع تداخلی کاهش‌یافته استفاده شده است. در ادامه، پلان‌های زمان-فرکانس-دامنه مربوط به سیگنال‌های ثبت شده تحت اثر سه شتاب‌نگاشت در حالت آسیب‌دیده برای

توزیع را با شدت، محل و زمان وقوع آسیب همبسته کرد. به منظور توزیع انرژی در روش تانسوری، انرژی لحظه‌ای و طیف چگالی انرژی به ترتیب مطابق با روابط (۵) و (۶) تعریف می‌شوند [۱۶]:

$$|x(t)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} RID(t, \omega) d\omega \quad (5)$$

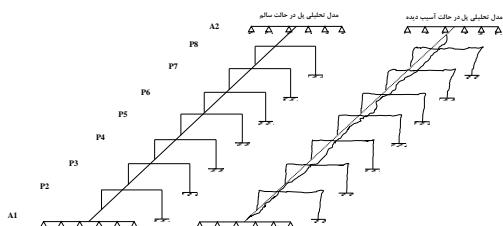
$$|S(\omega)|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} RID(t, \omega) dt \quad (6)$$

در این روابط، RID(t, ω) انرژی زمان-فرکانس، |x(t)|² انرژی لحظه‌ای و |S(ω)|² طیف چگالی انرژی می‌باشد. در صورتی که شرایط مرزی ارضاء شود، انرژی کل سیگنال به شکل رابطه (۷) قابل بیان است:

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} RID(t, \omega) d\omega dt \quad (7)$$

در این روش، پلان‌های زمان-فرکانس قبل و بعد از ایجاد آسیب با یکدیگر تفاوت داشته و می‌توان با مقایسه بین پلان‌های زمان-فرکانس در دو حالت یادشده، آسیب را تشخیص داد. برای دستیابی به این هدف، ماتریس پلان-فرکانس هنگامی که سازه پل سالم است، به صورت زمان-فرکانس مربوط به این هدف، ماتریس پلان RID و پس از ایجاد آسیب به صورت T_{fd} در نظر گرفته می‌شود. روابط (۸) و (۹)، به ترتیب بیانگر ماتریس پلان زمان-فرکانس مربوط به دو حالت پل سالم و پل آسیب‌دیده می‌باشد [۳۳]. برای تشخیص آسیب، در هریک از پایه‌ها، تمام درایه‌های ماتریس حاصل از تفاضل ماتریس‌های حالت آسیب‌دیده و سالم، با یکدیگر جمع شده و عدد حاصل با عنوان Difference(k) در پایه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه می‌شوند. مقدار Difference(k) محاسبه شده در هر پایه بحسب عدد بزرگ‌تر نرمال شده و با مقایسه نتایج، پایه آسیب‌دیده شناسایی می‌شود. عدد Difference(k) بزرگ‌تر بیانگر محل آسیب خواهد بود. اگر پایه سالم باشد، مقدار عددی پارامتر مذکور صفر یا نزدیک به صفر می‌باشد. با توجه به دقیقت بالای این روش، در پژوهش حاضر، جهت تشخیص

در این حالت، ماتریسی با ابعاد 5600×5600 توزیع فرکانس را برای ۷ پایه میانی پل در دو حالت آسیب‌دیده و سالم معرفی می‌کند. در شکل ۸ پلان‌های سه‌بعدی مربوط به پایه‌های میانی شماره ۵ و ۶ پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا مشاهده می‌شود.

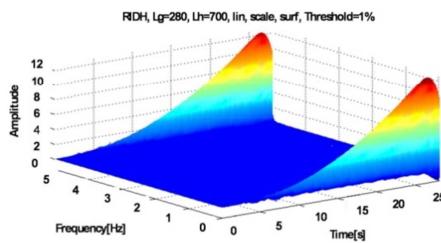


شکل ۷- مقایسه مدل تحلیلی پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا قبل و بعد از آسیب

پایه‌های میانی منتخب در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نمایش داده شده است. ابعاد ماتریس‌های زمان- فرکانس، متناسب با گام‌های زمانی ثبت سیگنال‌های پاسخ انتخاب شده‌اند، به‌نحوی که در این تحقیق براساس تحلیل‌های تاریخچه زمانی انجام شده، طول گام زمانی ثبت سیگنال‌ها، 0.05 ثانیه در نظر گرفته شده است. بنابراین تعداد ستون‌های ماتریس‌های زمان- فرکانس برابر با مدت زمان رکوردهای زلزله اعمالی بر پل، تقسیم بر 0.05 می‌باشد. در شکل ۷، مدل تحلیلی پل بزرگراهی کردستان در حالت سالم و آسیب‌دیده نمایش داده شده است. تغییرشکل پایه‌های میانی در اثر آسیب در این شکل مشاهده می‌شود.

۱-۵- پلان‌های سه‌بعدی ثبت‌شده تحت اثر رکورد

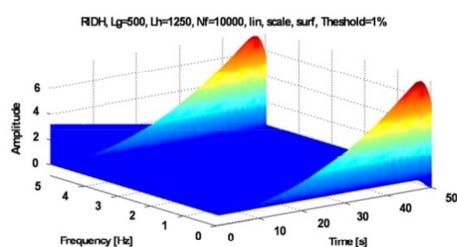
نورث‌ریج، ایستگاه JFPG



(ب)

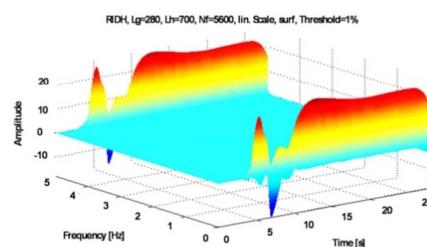
شکل ۸- پلان سه‌بعدی آسیب‌دیده زمان- دامنه- فرکانس تحت اثر رکورد JFPG- حسگر جابه‌جایی (الف) پایه ۵ و (ب) پایه ۶

توزیع فرکانس را برای ۷ پایه میانی پل در دو حالت آسیب‌دیده و سالم را نشان م دهد. شکل ۹، پلان‌های سه‌بعدی مربوط به پایه‌های میانی شماره ۵ و ۶ پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا را معرفی می‌کند.



(ب)

شکل ۸- پلان سه‌بعدی آسیب‌دیده زمان- دامنه- فرکانس تحت اثر رکورد JFPG- حسگر جابه‌جایی (الف) پایه ۵ و (ب) پایه ۶



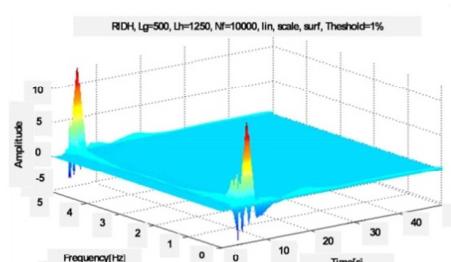
(الف)

شکل ۸- پلان سه‌بعدی آسیب‌دیده زمان- دامنه- فرکانس تحت اثر رکورد

۲-۵- پلان‌های سه‌بعدی ثبت‌شده تحت اثر رکورد

نورث‌ریج، ایستگاه SYL

با توجه بازه زمانی رکورد SYL در این حالت ماتریس‌های زمان- فرکانس با ابعاد 10000×10000



(الف)

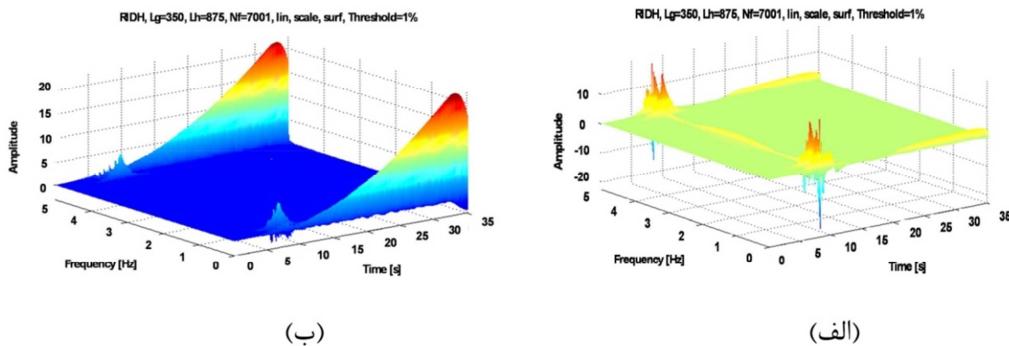
شکل ۹- پلان سه‌بعدی آسیب‌دیده زمان- دامنه- فرکانس تحت اثر رکورد SYL- حسگر جابه‌جایی (الف) پایه ۵ و (ب) پایه ۶

نتایج به دست آمده در جداول ۵، ۶ و ۷ براساس رابطه (۷) محاسبه شده است. شاخص خرابی از قدر مطلق تفاضل ماتریس زمان- فرکانس در دو حالت آسیب دیده و سالم حاصل می‌شود. هرچه این شاخص، عدد بزرگتری را برای یک پایه نشان دهد، آسیب لرزاگ در آن پایه محتمل‌تر خواهد بود. مقادیر عددی پارامتر شاخص تشخیص آسیب در جداول ۵، ۶ و ۷ پس از مقیاس شدن نسبت به بزرگ‌ترین عدد شاخص آسیب تحت اثر هر رکورد (نرمالیزاسیون نسبی)، به شکل مقادیر ارائه شده در شکل ۱۱ تبدیل می‌شوند.

شکل ۱۱ تبدیل می‌شوند.

۳-۵- پلان‌های سه‌بعدی ثبت شده تحت اثر رکورد LOMA

بعاد ماتریس‌های زمان- فرکانس در این حالت برابر با $1 \times 700 \times 700$ می‌باشد (شکل ۱۰). لازم به ذکر است پردازش سیگنال‌های ثبت شده در محیط نرم‌افزار متلب انجام شده است. براساس رابطه (۷)، پلان‌های سه‌بعدی به شکل ماتریس‌های مربعی حاصل می‌شود. تمام درایه‌های این ماتریس براساس روش توزیع تداخلی کاوش یافته و براساس رابطه (۲) و (۳) محاسبه شده است. در ادامه،

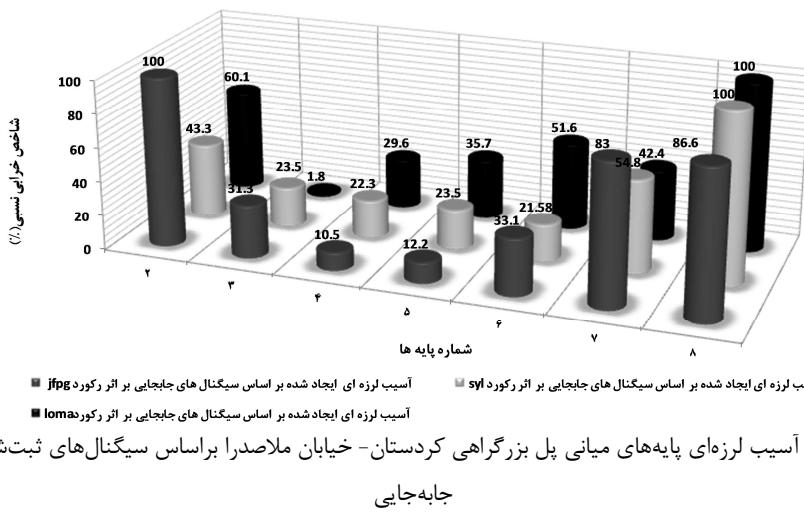


شکل ۱۰- پلان سه‌بعدی آسیب دیده زمان- دامنه- فرکانس تحت اثر رکورد LOMA- حسگر جابه‌جایی (الف) پایه ۵ و (ب) پایه ۶

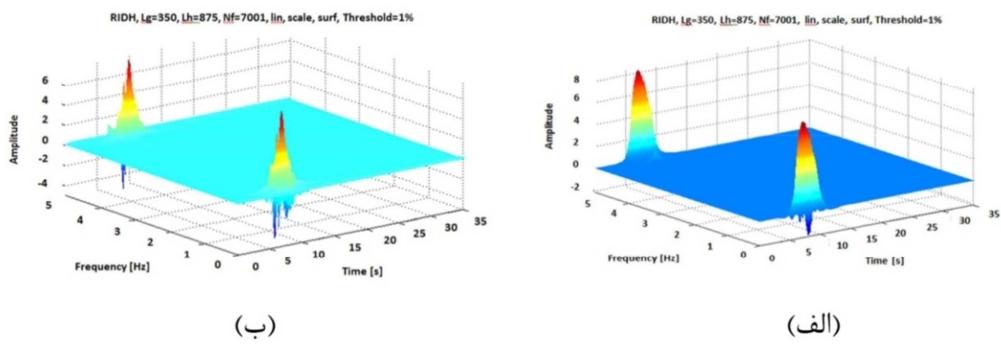
بزرگ‌ترین عدد، در شکل ۱۳، آسیب‌پذیرترین پایه‌های میانی پل کردستان- خیابان ملاصدرا نمایش داده شده است. مشاهده می‌شود پایه میانی شماره ۸ آسیب‌پذیرترین پایه با شاخص خرابی ۱ می‌باشد. پایه‌های میانی شماره ۷، ۲، ۶، ۵، ۳ و ۴ به ترتیب با شاخص‌های خرابی 0.548 ، 0.433 ، 0.255 ، 0.236 ، 0.235 و 0.223 در ردیفهای بعدی آسیب‌پذیرترین پایه‌های میانی پل بزرگ‌راهی کردستان- خیابان ملاصدرا قرار گرفته‌اند. با توجه به وجود قوس قائم در طول پل بزرگ‌راهی کردستان- خیابان ملاصدرا و همچنین غیرمسطح بودن سطح زمین (شکل ۳- الف)، مشاهده می‌شود، ارتفاع پایه‌های میانی با یکدیگر برابر نیست. به نحوی که پایه میانی شماره ۸، کوتاه‌ترین پایه میانی پل است.

در شکل ۱۲، پلان‌های زمان- فرکانس- دامنه مربوط به پایه‌های میانی منتخب در حالت سالم نمایش داده شده است. همچنین مقایسه عددی پلان‌های سالم و آسیب دیده نیز به طور کامل در جداول ۵، ۶ و ۷ انجام شده است.

نتایج محاسبات انجام شده به روش تانسور سه‌بعدی، در شکل ۱۱ به صورت نسبی نشان داده شده است. به صورتی که نتایج تحلیل برای هر رکورد به صورت جداگانه برحسب عدد بزرگتر در آن رکورد، نرمالیزه شده است. با توجه به اینکه بازتاب نهایی سازه برابر با حداقل بازتاب‌های به دست آمده از تحلیل با سه زوج ستانکاشت می‌باشد [۳۴]. لذا براساس مقایسه پارامتر شاخص خرابی در جداول ۵، ۶ و ۷ و نرمالیزاسیون مقادیر عددی برحسب



شکل ۱۱- تشخیص آسیب لرزه ای پایه های میانی پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا براساس سیگنال های ثبت شده توسط حسگر جابه جایی



شکل ۱۲- پلان سه بعدی سالم زمان- دامنه- فرکانس براساس حسگر جابه جایی (الف) پایه ۵ و (ب) پایه ۶

$$K_{axial} = AE / L \quad (11)$$

$$K_{flex} = 12EI / L^3 \quad (12)$$

با توجه به تفاوت طول پایه های میانی، سختی محوری و خمی (روابط (۱۱) و (۱۲)) پایه های میانی پل با یکدیگر متفاوت بوده و سازه به لحاظ هندسی نامتقارن است.

جدول ۵- تشخیص آسیب لرزه ای پایه میانی پل تحت اثر رکورد JFPG براساس حسگر جابه جایی

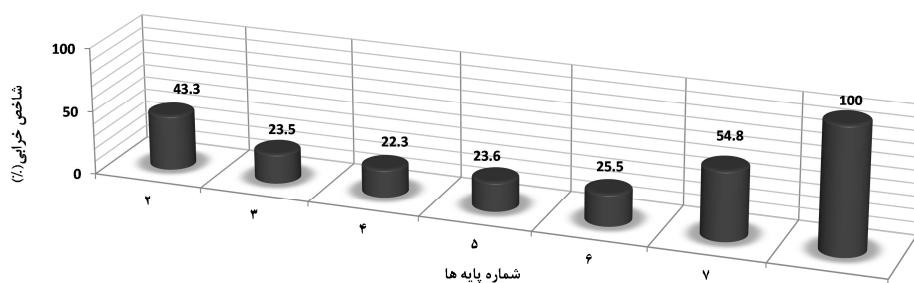
پایه میانی (K)	مجموع درایه های ماتریس زمان- فرکانس حالات سالم	مجموع درایه های ماتریس زمان- فرکانس حالات سالم	شاخص تشخیص	مجموع درایه های ماتریس زمان- فرکانس حالات آسیب دیده
۲	۲۰/۵۲۷	۲۰/۵۲۷		۲۲/۱۶۲
۳	۲۱/۶۸۳	۲۱/۶۸۳		۲۲/۱۹۶
۴	۲۲/۰۳۸	۲۲/۰۳۸		۲۲/۲۱۰
۵	۲۲/۰۲۳	۲۲/۰۲۳		۲۲/۲۲۴
۶	۲۱/۷۰۰	۲۱/۷۰۰		۲۲/۲۴۲
۷	۲۰/۸۵۷	۲۰/۸۵۷		۲۲/۲۱۴
۸	۲۲/۶۰۳	۲۲/۶۰۳		۲۴/۰۲۰
			آسیب	۱/۶۳۴

جدول ۶- تشخیص آسیب لرزاگ در پایه میانی پل تحت اثر رکورد SYL براساس حسگر جابه جایی.

شناخت تشخیص آسیب	مجموع درایه‌های ماتریس زمان-فرکانس حالت آسیب دیده	مجموع درایه‌های ماتریس زمان-فرکانس حالت سالم	پایه میانی (K)
۸/۰۲۱	۲۲۷/۱۲۲	۲۱۹/۱۰۰	۲
۴/۳۶۴	۲۲۷/۱۶۶	۲۲۲/۸۰۲	۳
۴/۱۴۶	۲۲۷/۰۶۱	۲۲۲/۹۱۴	۴
۴/۳۶۷	۲۲۷/۰۴۰	۲۲۲/۶۷۳	۵
۳/۹۹۲	۲۲۷/۲۶۲	۲۲۳/۲۶۹	۶
۱۰/۱۵۷	۲۲۶/۹۱۰	۲۱۶/۷۵۲	۷
۱۸/۵۱۳	۲۲۶/۴۵۲	۲۰۷/۹۳۹	۸

جدول ۷- تشخیص آسیب لرزاگ در پایه میانی پل تحت اثر رکورد LOMA براساس حسگر جابه جایی.

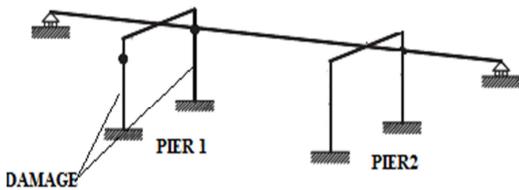
شناخت تشخیص آسیب	مجموع درایه‌های ماتریس زمان-فرکانس حالت آسیب دیده	مجموع درایه‌های ماتریس زمان-فرکانس حالت سالم	پایه میانی (K)
۵/۵۰۰	۵۳/۱۸۳	۴۷/۶۸۲	۲
۰/۱۶۶	۵۳/۱۴۸	۵۲/۹۸۲	۳
۲/۷۱۶	۵۶/۰۰۸	۵۳/۲۹۲	۴
۳/۲۷۳	۵۶/۶۸۳	۵۳/۴۰۹	۵
۴/۷۲۸	۵۸/۴۱۹	۵۳/۶۹۰	۶
۳/۸۷۸	۵۳/۴۵۴	۴۹/۵۷۵	۷
۹/۱۴۷	۶۴/۸۳۸	۵۵/۶۹۱	۸



شکل ۱۳- شناسایی آسیب‌پذیرترین پایه‌های میانی پل بزرگراهی کردستان- خیابان ملاصدرا

منظور، پل بزرگراهی شماره ۴ ایالت متحده آمریکا (FWH04)، در محیط نرمافزار اپنسیس مدل‌سازی شده و عملاً با کاهش قابل توجه سطح مقطع و ممان اینرسی ستون‌های ردیف ۱ پل مذکور، سازه را دچار آسیب کرده‌ایم. آسیب ایجادشده در پایه شماره ۱ از طریق ۰/۰۱ برابر نمودن سطح مقطع ستون‌ها و ممان اینرسی در دو راستای y و z حاصل شده است. محل آسیب ایجادشده در شکل ۱۴ نمایش داده شده است. در این سناریو، بار سینوسی هارمونیک در حالت خطی قبل و بعد از ایجاد

بنابراین پایه شماره ۸ به عنوان کوتاه‌ترین پایه، دارای بیشترین سختی محوری و خمشی بوده و بیشترین احتمال آسیب‌دیدگی در اثر ارتعاش را دارد. بنابراین نتایج روش تحلیل در این مطالعه، به منظور شناسایی آسیب‌پذیرترین پایه میانی پل توجیه‌پذیر است. به منظور اطمینان از صحت تشخیص آسیب‌پذیرترین پایه بتونی پل کردستان- خیابان ملاصدرا، اقدام به شناسایی آسیب ایجادشده براساس یک الگوی مشخص در سازه‌ای معین، خواهیم پرداخت. به این



شکل ۱۴- الگوی آسیب ایجادشده در پایه شماره ۱ پل بزرگراهی ایالات متحده آمریکا (FHW04)

همچنین ملاحظه می‌شود، خطای روش به کار رفته جهت تشخیص آسیب لرزه‌ای در پایه بتونی پل بسیار انداک است. بنابراین نتایج بدست آمده در مورد پل بزرگراهی کردنستان- خیابان ملاصدرا از دقت قابل قبولی برخوردار است.

آسیب، به پل FHW04 اعمال شده و براساس روش به کار رفته در این پژوهش، سیگنال‌های پاسخ جابه‌جایی ثبت شده است. بازه زمانی بار هارمونیک اعمال شده، ۱۵ ثانیه می‌باشد. بنابراین، ماتریس‌های مرتعی زمان- فرکانس در این حالت، دارای ۱۵۰۰ درایه می‌باشد. در جدول ۸ محاسبات انجامشده جهت تشخیص آسیب در پل FHW04 ارائه شده است.

آسیب‌پذیرترین پایه میانی پل بزرگراهی ایالت متحده آمریکا در شکل ۱۵ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود براساس روش به کار رفته در این پژوهش آسیب ایجادشده مطابق با الگوی آسیب معرفی شده در پایه شماره ۱ با شاخص خرابی ۰/۹۹ بهدرستی تشخیص داده شده است.

جدول ۸- تشخیص آسیب لرزه‌ای براساس سیگنال‌های ثبت شده حسگر جابه‌جایی پل FHW04

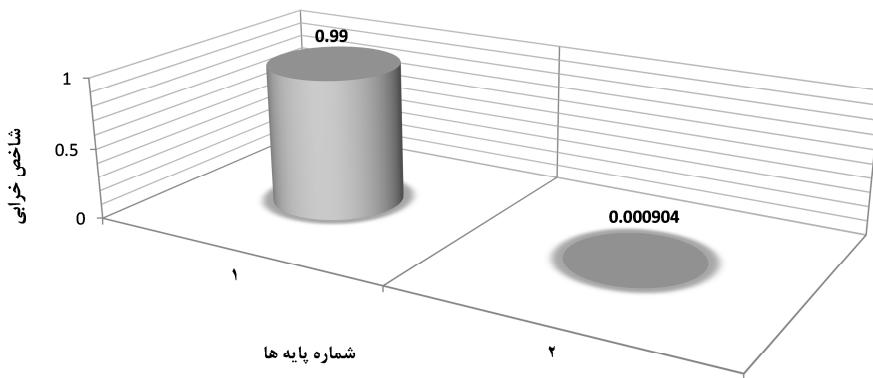
پایه میانی (K)	مجموع درایه‌های ماتریس زمان- فرکانس حالت سالم	مجموع درایه‌های ماتریس زمان- فرکانس حالت آسیب‌دیده	شاخص تشخیص آسیب
۱	۱۳۱/۰۹	۱۱۴۳۱۵/۲	۱۱۴۱۸۴/۰۹
۲	۱۱۸/۶۵	۲۲۱/۸۸	۱۰۳/۲۲

بهمنظور کاربردی شدن این پژوهش، پل بزرگراهی کردنستان- خیابان ملاصدرا مورد مطالعه و ارزیابی قرار گرفته است. بنابراین شناسایی نقاط ضعف لرزه‌ای این پل، می‌تواند تا حد زیادی از وقوع خسارات جانی و مالی در هنگام زلزله و پس از آن جلوگیری نماید.

براساس نتایج بدست آمده از این پژوهش، پایه میانی شماره ۸ پل (کوتاه‌ترین پایه میانی که بیشترین سختی محوری و خمشی را دارد)، آسیب‌پذیرترین پایه با شاخص خرابی ۱۰۰٪ می‌باشد. پایه‌های میانی شماره ۷، ۵/۴، ۲، ۶، ۵ و ۴ به ترتیب با شاخص‌های خرابی ۵/۴، ۳/۲، ۵/۲، ۶/۲، ۵/۲ و ۳/۲ در ردیفهای بعدی آسیب‌پذیرترین پایه‌های میانی پل بزرگراهی کردنستان- خیابان ملاصدرا قرار گرفته‌اند.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق بهمنظور تشخیص آسیب لرزه‌ای در یک نمونه پل واقعی، حسگرهایی فرضی در بالای پایه‌های میانی پل مدنظر نصب شده و قبل و بعد از رویداد زلزله، بار هارمونیک سینوسی به پل اعمال و سیگنال‌های پاسخ پل ثبت شده‌اند. رکوردهای انتخابی جهت ایجاد آسیب در این پژوهش، دارای اثرات جهت‌پذیری پیش‌رونده و پس‌رونده می‌باشند. با استفاده ازتابع زمان- فرکانس مرتعی توزیع تداخلی کاهش‌یافته پاسخ‌ها در نرم‌افزار مطلب پردازش شده و پلان‌های سه‌بعدی قبل و بعد از آسیب برای تمامی پایه‌ها ترسیم شده‌اند. در نهایت، با استفاده از روش تانسور سه‌بعدی و براساس اختلاف حاصل‌شده در پلان‌های زمان- فرکانس حالت سالم و آسیب‌دیده، آسیب‌پذیرترین پایه پل شناسایی شده است.



■ آسیب لرزه‌ای ایجاد شده بر اساس سیگنال‌های جابجایی
شکل ۱۵- شناسایی آسیب‌پذیرترین پایه‌های میانی پل بزرگراهی ایالت متحده آمریکا (FHWA04)

قدرتانی

در انتهای، از گروه تخصصی شهید رجایی و قرارگاه سازندگی خاتم الانبیاء به عنوان حامی مقاله حاضر، تشکر و قدردانی می‌شود

مراجع

- [1] Haseli, B., & Nouri, G.H. (2016). "Effect Cross Strike Slip Fault with Bridge on Seismic Response", *Second International Conference on Architecture Civil and Urban development at the beginning of the third millennium*, Tehran, Iran.
- [2] Tabarsi, A., & Salgagheh, E. (2015). *Comparison of Sensitivity Analysis Techniques in the Diagnosis of Structures*. M.Sc Shahid Bahonar University, Kerman, Iran.
- [3] Tabaei, A., & Daneshju, F. (2016). "Development of COMAC and Damage Index Methods for Damage Detection in the Near of Abutments of Bridges", *Modares Civil Engineering Journal*, 15(4), 55-62.
- [4] Boashash, B. (2015). *Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference*. Academic Press.
- [5] Bradford, S.C. (2006). *Time-Frequency Analysis of Systems with Changing Dynamic Properties*. California Institute of Technology Pasadena, California.
- [6] Bonato, P., Ceravolo, R., De Stefano, A., & 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*, 237(5), 775-791.
- [7] De Stefano, A., Ceravolo, R., & Sabia, D. (2001). "Output only dynamic identification in time-frequency domain", In *Proceedings of the 2001 American Control Conference*. 1, 447-452.
- [8] Melhem, H., & Kim, H. (2003). "Damage detection in concrete by Fourier and wavelet analyses", *Journal of Engineering Mechanics*, 129(5), 571-577.
- [9] Qiao, L. (2009). *Structural damage detection using signal-based pattern recognition*. Doctoral dissertation, Kansas State University.
- [10] Galeban, M., & Moradi, Sh. (2012). "Fraction Detection in Beam by Hilbert-Huang transform", *Second International Conference of Acoustic and Vibrations*, Sharif University, Tehran, Iran.
- [11] Niu, J., Zong, Z., & Chu, F. (2015). "Damage identification method of girder bridges based on finite element model updating and modal strain energy", *Science China Technological Sciences*, 58(4), 701-711.
- [12] Tabeshpour, M., & Bakhshi, A. (2008). "Fracture mode and Failure index of concrete structures in earthquake", *Journal of Modelling in Engineering*, 6(15), 59-70.
- [13] Tabrizian, Z., Beigi, M & Ghodrati Amiri, G. H. (2015). "Detection of damage in metal structures using static deflection data and genetic algorithm", *Journal of Modelling in Engineering*, 13(41), 147-158.
- [14] Ezoddin, A., Naderpour, H., Kheyroddin, A., & Ghodrati Amiri, G. H. (2014). "Detection of location and the amount of crack in beams using transform", *Journal of Modelling in Engineering*, 12(39), 1-11.

- [15] Daneshjoo, F., & Ahmadi, H. (2011). "System Identification and Damage Detection of Bridge Concrete piers, using Time-Frequency representation and a new Modified Matrix subtraction Method", *Sharif University of Technology*, 29(2), 37-48.
- [16] Daneshjoo, F., & Ahmadi, H. (2010). "The new method 3D tensor to detect seismic damage at the concrete piers of bridges using response signals", *Journal Transformation Engineering*, 2(2), 115-126.
- [17] Ahmadi, H. R., & Daneshjoo, F. (2012). "A harmonic vibration, output only and time-frequency representation based method for damage detection in Concrete piers of complex bridges", *International Journal of Civil & Structural Engineering*, 2(3), 987-1002.
- [18] Alhan, C., & Sürmeli, M. (2015). "Necessity and adequacy of near-source factors for not-so-tall fixed-base buildings", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 14(1), 13-26.
- [19] Hosseini, M., & Konarangi, H. (2017). *Application of OpenSees Software in modeling and analysis of structures*. 4th Edition, Publisher Azadeh, Iran.
- [20] MATLAB. (2014). Version 7.6. The MathWorks.
- [21] Daneshjoo, F., & Ahmadi, H. (2014). "Suitable Sensor Identification for detection of damage on concrete piers of bridges using modified improve matrix and tensor methods", *Journal Transformation Engineering*, 6(1), 1-20.
- [22] Road and Railway Bridges Seismic Resistant Design Code, NO:463. (2008). *Office of Deputy for Strategic Supervision Bureau of Technical Execution System, Iran*.
- [23] AASHTO. (2012). *AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS*. American Association or State Highway and Transportation Officials.
- [24] Ghodrati Amiri, G. H., Zomorodian, S. M. M., Tajik, A. R. (2011). "Assessment of the Effect of Near-Field Grond Motions on Vulnerability of Highway Bridges", *Transporation Research Journal*, 8(3), 241-257.
- [25] Haseli, B., Nouri, G.H., & Homami, P. (2016). *Effect of Type of Abutment Modeling on the Seismic Response of Bridges*. M.Sc Kharazmi University, Tehran, Iran.
- [26] Kim, S. J., & Elnashai, A. S. (2008). "Seismic assessment of RC structures considering vertical ground motion", *Mid-America Earthquake Center CD Release 08-03*.
- [27] Kim, S. J., Holub, C. J., & Elnashai, A. S. (2011). "Analytical assessment of the effect of vertical earthquake motion on RC bridge piers", *Journal of Structural Engineering*, 137(2), 252-260.
- [28] Abdel-Mohti, A., & Pekcan, G. (2008). "Seismic response of skewed RC box-girder bridges", *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 7(4), 415-426.
- [29] <http://peer.berkeley.edu/ngawest2/database>.
- [30] Hlawatsch, F., & Boudreax-Bartels, G. F. (1992). "Linear and quadratic time-frequency signal representations", *IEEE signal processing magazine*, 9(2), 21-67.
- [31] Bradford, S. C. (2007). *Time-frequency analysis of systems with changing dynamic properties*. Doctoral dissertation, California Institute of Technology.
- [32] Auger, F., Flandrin, P., Goncalves, P., & Lemoine, O. (2005). "Time-Frequency Toolbox Reference Guide", *Hewston: Rice University*, 180.
- [33] Beskhyroun, S., Oshima, T., Mikami, S., & Tsubota, Y. (2005). "Structural damage identification algorithm based on changes in power spectral density", *Journal of applied mechanics*, 8, 73-84.
- [34] Standard No. 2800 (2014). *Iranian code of practice for seismic resistant design of building*, 4th Edition, Tehran, Iran.