

## ارائه روش جدید سلامت‌سنجی پایه‌های بتنی پل‌ها با استفاده از همبستگی بین داده سنسورها

رضا زمانیان<sup>۱</sup>، فرهاد دانشجو\*<sup>۲</sup> و مسعود سلطانی محمدی<sup>۲</sup>

۱ دانشجوی دکتری، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲ استاد، دانشکده عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

Email: danesh\_fa@modares.ac.ir\*

پذیرش: [۱۴۰۳/۰۴/۱۳]

دریافت: [۱۴۰۳/۰۱/۰۵]

### چکیده

پایه‌ها، المان‌های طراحی حیاتی برای پل تحت بارگذاری زلزله هستند، اطمینان از پایداری و سلامت آن‌ها برای ایمنی کلی پل بسیار مهم است. روش‌هایی که تاکنون در بحث سلامت‌سنجی پایه پل‌ها ارائه شده، بیشتر به اطلاعات پایه سالم نیازمند هستند و روش‌هایی که بدون داشتن اطلاعات پایه سالم به شناسایی آسیب پرداختند، نیازمند محاسبه پارامترهایی هستند که در عمل امکان‌پذیر نیست. در این پژوهش با ارائه روشی جدید که شامل بارگذاری محوری دینامیکی پیشنهادی، استفاده از سنسورهای سرعت در ارتفاع پایه و ارائه اندیس خرابی پیشنهادی با استفاده از مفهوم همبستگی، سعی شده با حداقل خطا و بدون داشتن اطلاعات پایه سالم، وجود آسیب و محل آن تشخیص داده شود. بدین منظور، بلندترین پایه از رمپ A مجموعه پل‌های شهید باکری تهران به عنوان پایه مورد مطالعه انتخاب و با استفاده از نقشه‌های چون-ساخت مدل غیرخطی دقیق در نرم‌افزار opensees ساخته شد. آسیب ایجاد شده در مدل، به صورت کاهش سختی در مصالح بتنی و کاهش سطح مقطع در مصالح فولادی مقطع بوده است. محل اعمال آسیب نیز در ارتفاع پایه در سه ناحیه ۱۵، ۲۵ و ۳۵ درصد ارتفاع به صورت جداگانه اعمال شده است. داده‌ها با استفاده از سنسورهای سرعت‌سنج در ارتفاع پایه جمع‌آوری شد و در انتها با استفاده از مفهوم همبستگی و ارائه اندیس خرابی جدید مبتنی بر این مفهوم، توانایی اندیس ارائه شده در یافتن وجود آسیب و محل آن در سناریوهای مختلف آسیب ارزیابی شد. نتایج بدست آمده، نشان دهنده عملکرد مناسب این اندیس در تشخیص خرابی در سناریوهای مختلف و شدت آسیب بین ۱۰ تا ۳۰ درصد می‌باشد.

**کلیدواژه‌ها:** سلامت سنجی؛ پایه پل؛ آسیب؛ سرعت‌سنج؛ ضریب همبستگی

### ۱- مقدمه

طراحی حیاتی برای پل تحت بارگذاری زلزله هستند [1]. با این حال، مطالعات بسیار کمی در بحث سلامت‌سنجی پایه‌ها انجام شده است. بیشتر مطالعات صورت گرفته، مربوط به عرشه می‌باشند [2-4]. اندیس‌های خرابی ارائه شده در پیشینه

مندر در رساله دکتری خود اینطور اظهار نظر کرده که؛ به طور کلی، شتاب ناشی از زلزله تنها، نیروهای قابل توجهی را بر پایه‌ها و فونداسیون تحمیل می‌نماید و پایه‌ها، المان‌های

پژوهش‌ها را می‌توان در یک دسته‌بندی به دو گروه تقسیم‌بندی نمود؛ گروه اول که با داشتن اطلاعات پایه سالم و مقایسه اطلاعات حال حاضر با اطلاعات اولیه به حضور یا عدم حضور آسیب پی می‌برند و گروه دوم که با تحلیل پاسخ‌های بدست آمده از پایه موجود به تنهایی و مقایسه با آستان‌هایی که از فلسفه‌های متفاوت فهمیده می‌شود به شناسایی آسیب می‌پردازند. در مقاله حاضر در بخش دوم ابتدا روش‌هایی که تاکنون بدون استفاده از اطلاعات پایه سالم برای شناسایی آسیب در پایه پل‌ها ارائه شده اند معرفی و ایرادات هریک بیان شده است. سپس با توجه به شباهت سازه‌ای بین شمع و پایه پل‌ها، در بخش سوم روش‌های مورد استفاده در پایش شمع‌ها بررسی شده و بعد از شناسایی نواقص این روش‌ها، برای رفع این نواقص، در بخش چهارم مباحث آماری که در شناسایی آسیب می‌تواند استفاده شود بررسی شده است. روش مدل‌سازی پایه مورد مطالعه در بخش پنجم شرح داده شده و با توجه به نوع مدل‌سازی فابری، در بخش ششم سناریوهای آسیب با درصد ۱۰ تا ۳۰ درصد در مصالح فولادی و بتنی معرفی شده است. در جهت کاربردی نمودن روش پیشنهادی و عدم استفاده از سنسور ماندگار، در بخش هفتم، بارگذاری دینامیکی مشابه با بارگذاری ضربه در شمع‌ها پیشنهاد شده است. در بخش هشتم دلیل استفاده از سنسور سرعت و همچنین جانمایی سنسورها برای دریافت داده مورد نیاز شرح داده شده است. در بخش نهم، اندیس خرابی پیشنهادی که از روابط همبستگی استفاده می‌نماید به طور کامل شرح داده شده و در بخش انتهایی با پردازش داده‌های بدست آمده از پایه در سناریوهای مختلف آسیب، عملکرد اندیس پیشنهادی بررسی شده است.

## ۲- نقد برخی از روش‌های شناسایی آسیب در پایه پل‌ها

برخی اندیس‌های خرابی پیشنهاد شده مانند اندیس خرابی ارائه شده توسط پاول و الله‌آبادی [5] و همچنین وثوقی و سعیدی [6] بر مبنای بیشترین جابه‌جایی تحمیل شده به سازه هستند. این اندیس‌ها بر پایه مشاهدات از سازه‌های بسیاری هستند که در هنگام زلزله یا در میز لرزه دچار آسیب شده‌اند. در نتیجه،

دقت آن‌ها به بزرگی دامنه اطلاعات موجود بستگی دارد و همچنین می‌توان این‌طور در نظر گرفت که می‌توان به عنوان تخمین اولیه از آن‌ها استفاده نمود و برای بررسی دقیق‌تر باید از روش‌هایی همچون بازرسی چشمی و آزمایش غیرمخرب استفاده نمود تا میزان دقیق آسیب شناسایی شود. در این مورد، بسام و همکاران در مقاله خود [7]، زمانی که بحث انرژی مستهلک شده در چرخه‌های هیسترتیک را مطرح نمودند از ضعف روش‌های برپایه جابه‌جایی صحبت نمودند که جابه‌جایی تحت نیروهای سیکلیک تابع رفتار در سیکل‌هایی هست که تاکنون تجربه نموده است. بدین صورت ثابت نمودند که جابه‌جایی به تنهایی نمی‌تواند معیار مناسبی برای بررسی خرابی در پایه‌ها باشد.

در ادامه پیشنهادات بسام و همکاران [7]، محبوی و شیراوند [8] در مطالعه‌ای روی پایه‌های بتن مسلح، یک اندیس خرابی بر پایه انرژی ارائه دادند. اندیس ارائه شده توسط این پژوهشگران، نسبت انرژی هیسترتیک در داخل سازه به انرژی ورودی زلزله تعریف شده است. اندیس خرابی معرفی شده توسط این پژوهشگران در رابطه ۱ آورده شده است:

$$DI = \frac{E_h}{E_i} = 1 - \frac{E_k + E_d + E_s}{E_i} \quad (1)$$

که در آن،  $E_i$  انرژی زلزله ورودی به سازه،  $E_k$  انرژی کینتیک،  $E_d$  انرژی جذب شده توسط میرایی ذاتی،  $E_s$  انرژی کرنشی و  $E_h$  انرژی جذب شده در چرخه‌های هیسترتیز مصالح می‌باشد. ارزیابی میزان آسیب نیز با اندازه‌گیری کرنش ایجاد شده در مصالح مختلف فولاد و بتن انجام شده است. فرض اصلی در تحقیق آن‌ها را می‌توان این‌طور عنوان نمود که سنسور ماندگار در سازه وجود دارد و در حین زلزله، داده‌ها جمع‌آوری خواهد شد. این مورد، خود به تنهایی دامنه کاربرد این روش را محدود به پل‌هایی می‌نماید که سنسور ماندگار روی آن‌ها نصب شده باشد. مورد دیگری که باید در اینجا به آن اشاره نمود، اندازه‌گیری هریک از پارامترهای ذکر شده در بالا است که در عمل امکان‌پذیر نیست و یا در صورت محاسبه باید با فرض‌هایی همراه باشد که خطای زیادی را به همراه خواهد داشت.

آینده می‌توان از این روش با داشتن تنها یک پاسخ از بالای پایه به وجود آسیب و میزان آن پی برده شود.

احمدی و دانشجو در مطالعه‌ای [11] یک الگوریتم مبتنی بر سیگنال برای تشخیص آسیب در پل‌های پیچیده پیشنهاد دادند. در ابتدا با توجه به عنوان مقاله اینطور بنظر می‌رسد از آنجایی که تنها بر مبنای پاسخ خروجی کار می‌کند می‌تواند بدون داشتن اطلاعات پایه سالم به شناسایی آسیب بپردازد ولیکن بر اساس الگوریتم پیشنهادی آنها لازم بود پل قبل و بعد از آسیب با نیروی هارمونیک مرتعش شود و پاسخ‌های شتاب در وسط و بالای پایه‌ها ثبت شود. تعداد نقاط برای برداشت داده در روش پیشنهادی آنها در کمترین حالت ممکن بوده و همچنین روش آنها تنها متکی بر داده‌های خروجی بود و نیاز به دانستن نوع و شدت بارگذاری نبود. مشکل اساسی این روش همچون روش‌های دیگر، نیاز به اطلاعات پایه پیش از وقوع آسیب می‌باشد.

### ۳- نقد روش‌های شناسایی آسیب در شمع‌های بتنی که از

#### لحاظ سازه‌ای مشابه با پایه پل هستند

در مقاله حاضر، با توجه به شباهت پایه پل‌ها و شمع‌های بتنی از نظر ابعادی، روشی که در شمع‌ها به شناسایی ناهمگنی پرداخته می‌شود مورد نقد قرار گرفته تا روشی برای شناسایی آسیب در پایه‌های بتنی پل‌ها ارائه شود. هرتلین و داویس در کتابی [12] بررسی آزمایش‌های غیرمخرب در پی‌های عمیق را انجام دادند. آن‌ها در این کتاب از روشی به نام *impulse echo* اسم بردند که به نام‌های دیگری همچون *Pile Integrity Test* (PIT) نیز معروف می‌باشد. این روش که در اصل، آزمایش سرعت پالس اولتراسونیک بوده و پیش از آن در ارزیابی یکپارچگی قطعات فلزی به کار برده می‌شده، در سال ۱۹۶۸ برای شناسایی عدم یکپارچگی در اجرای شمع‌های عمیق پیشنهاد شده است. از جمله می‌توان به مطالعه جای و فون [13] اشاره کرد که در مطالعه آن‌ها از نام *integrity test* استفاده شده است. در تحقیقات اخیر می‌توان به مطالعه فنگ و همکاران [14] اشاره نمود. آن‌ها در مقاله خود چهار نوع آسیب را مشخص کردند و ادعا کردند که با روشی جدید می‌توانند

مطالعه محبوبی و شیراوند بر اساس مطالعه هیندی و سکسمیت [9] بوده با این تفاوت که اندیس خرابی مورد استفاده هیندی و سکسمیت اگرچه هر دو اثر انرژی و شکل‌پذیری را در نظر می‌گیرد، ولی اندیس آن‌ها از انرژی هیسترتیک سازه تا زمان شکست استفاده می‌کند که چنین محاسبه‌ای اگر بر پایه رفتار واقعی سازه تحت زلزله نباشد، باید از روابط تقریبی محاسبه شود. در نتیجه، این‌طور بنظر می‌رسد که دامنه کاربرد این اندیس بسیار کم باشد.

روش دیگری که می‌توان در بحث پایه پل‌ها به آن اشاره نمود، مطالعه نادرپور و همکاران [10] می‌باشد که استفاده از پردازش سیگنال توسط تبدیل موجک را پیشنهاد دادند. آن‌ها در مقاله خود از پاسخ شتاب بالای پایه تحت بارگذاری متوالی زلزله‌های با شدت متفاوت استفاده نمودند و از ناهمگونی به وجود آمده در پاسخ تحلیل شده توسط تبدیل موجک، به وجود آسیب پی بردند. اندیس پیشنهادی نادرپور و همکاران در رابطه ۲ آورده شده است.

$$z_i = \frac{D_i - \mu_D}{\sigma_D} \quad (2)$$

که در آن،  $\mu_D$  میانگین،  $\sigma_D$  انحراف معیار و  $D_i$  داده شتاب پردازش شده توسط تبدیل موجک در هر ثانیه از زمان است.

مطالعه این پژوهشگران اگرچه در ابتدا این‌طور بنظر می‌رسد که بدون داشتن اطلاعات پایه سالم به وجود آسیب پی برده ولیکن با نگاهی دقیق‌تر می‌توان دید که اولاً چنین تحلیلی شبیه به آنالیز دینامیکی افزایشی است و چنین بارگذاری در عمل امکان‌پذیر نیست چرا که نمی‌توان در پایه آسیب دیده، پایه را تا حد غیرخطی بارگذاری نمود و دوم، چون آنالیزها متوالی هستند و ناهمگونی نسبت به آنالیز قبل دیده می‌شود، پس در این حالت نیز با پاسخ پایه سالم مقایسه شده است. سوم اینکه حد معرفی شده برای دیدن ناهمگونی پاسخ‌ها بر مبنای یک مدل که در مقاله ارائه شده می‌باشد و نمی‌توان آن را به همه پایه‌ها نسبت داد. چهارم اینکه این روش فقط وجود آسیب را تشخیص داده و محل و شدت آن شناخته نشده است. چنین مطالعه‌ای می‌تواند گام اول باشد و چنانچه پایگاه داده بزرگتری مورد بررسی قرار گیرد و حدود مورد نیاز استخراج شود، در

این چهار نوع آسیب را به تفکیک شناسایی نمایند. چهار نوع آسیب شامل شکست‌ها، ترک‌ها، نفوذ گل و لای و درز اجرایی بتن می‌باشند که منجر به شکست در شمع‌ها می‌شوند. در این مطالعه که از نوع آزمایشگاهی بوده پنج نمونه ساخته شده که شامل یک نمونه سالم و چهار مدل آسیب دیده با آسیب‌های ذکر شده می‌باشند (شکل ۱). آن‌ها از پیزوسرامیک‌های هوشمند مدفون در دو انتهای نمونه استفاده نمودند؛ یکی به عنوان تولیدکننده امواج و دیگری به عنوان سنسور یا دریافت کننده امواج. فرض اولیه این پژوهشگران اینطور عنوان شده که تمامی این آسیب‌ها یک ناپیوستگی ایجاد می‌کنند و انتشار موج را کاهش می‌دهند. امواج دریافت شده در دامنه زمان با تبدیل موجک پردازش شده تا میزان انرژی دریافت شده در نمونه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه شود. روش پیشنهادی این پژوهشگران اگرچه مزیت‌هایی دارد ولی چند مشکل دارد؛ اول اینکه سنسور ماندگار و از نوع مدفون نیاز دارد. دوم اینکه فواصل عملکرد موثر این سنسورها کوتاه است و باید در ارتفاع پایه یا فونداسیون، در چندین محل کار گذاشته شود. سوم اینکه در این مطالعه با مقایسه انرژی جذب شده سازه آسیب دیده و سالم به وجود آسیب و سناریوی آن پی برده شده است.

فنگ و همکاران در تحقیقی دیگر [15] یک رویکرد سنجش غیرفعال مبتنی بر پیزوسرامیک برای تشخیص انواع آسیب‌های معمول شمع‌های بتنی، از جمله نفوذ ناقص گل و لای، درز اجرایی بتن، ترک‌ها و نفوذ کامل گل و لای پیشنهاد دادند. در این رویکرد سنجش غیرفعال، امواج تنش توسط چکش در بالای شمع تولید می‌شود و یک سنسور هوشمند در پایین هر شمع برای دریافت سیگنال‌های موج منتشر شده استفاده می‌شود. این سنسورها قبل از اجرای بتن تعبیه می‌شوند. عیوب سازه‌ای بر فرکانس طبیعی شمع تأثیر می‌گذارد. طیف توان شمع‌ها با انواع آسیب با رسم سیگنال‌های حسگر در حوزه فرکانس مقایسه شده است. فرکانس طبیعی با افزایش شدت آسیب کاهش می‌یابد. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی می‌تواند هر چهار نوع آسیب را در شمع‌های بتنی تشخیص دهد. این پژوهش نیز علیرغم مزیت‌ها و همچنین با وجود رفع

مشکل شدت پایین ارتعاش ایجاد شده، مشکلات گفته شده در تحقیق قبل را دارد.

#### ۴- شناسایی آسیب با استفاده از روابط آماری بین داده‌ها

در مقاله حاضر برای رفع مشکلات گفته شده که مهم‌ترین آن، نداشتن اطلاعات پایه سالم می‌باشد، سعی بر این شده تا با مقایسه داده‌های سنسور در ارتفاع پایه بدون داشتن اطلاعات پایه سالم، رابطه‌ای بین سیگنال‌های دریافتی در نقاط مختلف پیدا کرد که بتوان آن را به وجود آسیب مرتبط دانست. در این راستا، تحقیقاتی که از رابطه‌های آماری استفاده نموده مطالعه شد و بهترین گزینه بین روابطی که پیشنهاد شده، ضریب همبستگی می‌باشد. به عنوان نمونه دیواکار و همکاران [16] یک روش برای تشخیص محل آسیب و میزان آسیب در حالت وجود چندین آسیب پیشنهاد دادند. آن‌ها از داده‌های شتاب در طول المان استفاده نمودند و ضرایب همبستگی بین داده‌های شتاب در طول المان را محاسبه نمودند. با مقایسه ضرایب بدست آمده از سازه سالم و سازه آسیب دیده، محل آسیب مشخص شد. همچنین با اندیس تعریف شده توسط آن‌ها و استفاده از شبکه عصبی مصنوعی در تعریف آستانه، دقت تشخیص محل آسیب و میزان آن را افزایش دادند.

ژو و همکاران در مطالعه‌ای [17] با ترکیب انتقال‌پذیری و همبستگی، به بررسی وجود آسیب پرداختند. آن‌ها این‌طور عنوان کردند که انتقال‌پذیری تنها بر پاسخ سازه مبتنی بوده و به ارتعاش ورودی به سازه نیازی ندارد. بنابراین با ترکیب آن با فرمولاسیون همبستگی، اندیسی با عنوان اندیس آسیب مبتنی بر همبستگی (CDI) تعریف نمودند. که در رابطه ۳ می‌توان آن را دید.

$$CDI(T^d, T^u) = abs \left( \frac{cov(T^d, T^u)}{\sigma_{T^d} \sigma_{T^u}} \right) \quad (3)$$

$$= abs \left( \frac{\sum_{t=1}^n (T_t^d - \bar{T}_t^d)(T_t^u - \bar{T}_t^u)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (T_t^d - \bar{T}_t^d)^2} \sqrt{\sum_{t=1}^n (T_t^u - \bar{T}_t^u)^2}} \right)$$

شکل ۱. انواع آسیب‌های معرفی شده در مطالعه فنگ و همکاران [۱۴]

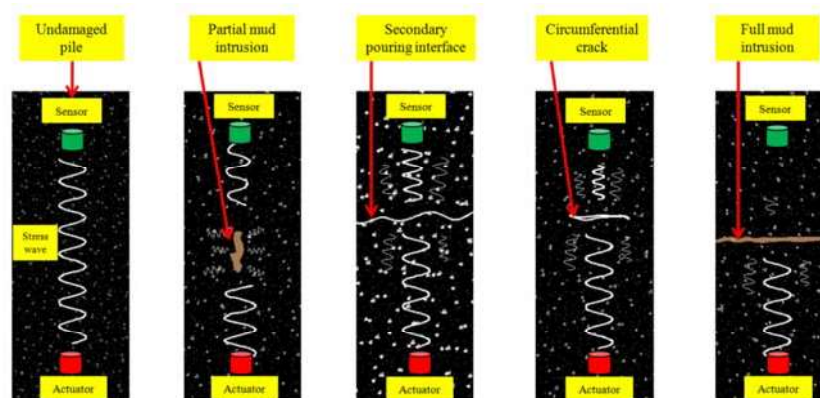


Fig. 1. Damages in the study of Feng et al. [14]

به هر یک به طور خلاصه آورده شده است. بارگذاری مورد استفاده آن‌ها، بار ناشی از عبور خودروها بوده و از پاسخ جابه‌جایی در حالت سالم و آسیب دیده استفاده نمودند. چگونگی اعمال سناریوهای آسیب در این مطالعه به صورت قرار دادن یک فنر در محل آسیب با سختی کاهش یافته است. از مزایای این پژوهش، بررسی شدت‌های آسیب بسیار پایین در حد ۵ درصد است. اندیس تعریف شده توسط این پژوهشگران با کسر نمودن همبستگی محاسبه شده در سازه سالم و آسیب دیده بدست آمده است. آن‌ها نتیجه گرفتند که ضریب همبستگی پیرسون بین تمامی موارد گفته شده بهترین عملکرد را داشته است. حتی در سناریوی وجود دو آسیب نزدیک به هم در طول عرشه، بازهم بهترین عملکرد مربوط به این ضریب همبستگی بوده است. این ضریب که در رابطه ۴ آورده شده، به صورت ساده کوواریانس دو بردار  $X$  و  $Y$  تقسیم بر انحراف معیار آن‌ها تعریف می‌شود و میزان شباهت آن‌ها را نشان می‌دهد. مقدار این ضریب بین -۱ تا ۱ تغییر می‌کند که: «۱» به معنای همبستگی مثبت کامل، «۰» به معنی نبود همبستگی و «-۱» به معنی همبستگی منفی کامل است.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (4)$$

در این پژوهش، اثر ناهمواری سطح پل در حرکت کامیون نیز در نظر گرفته شده بود و نتیجه جالب باز این بود که با وجود

این پژوهشگران در پژوهش خود، یک تیر کانتیلور را مورد آزمایش قرار دادند. نیروی وارد شده در انتهای آزاد تیر به صورت برشی بر تیر اعمال شد و در دو حالت وجود نویز و بدون نویز با اندیس پیشنهادی، محل آسیب را بررسی نمودند. نتایج آن‌ها نشان داد در هر دو حالت، اندیس ارائه شده توانایی شناسایی وجود آسیب را دارد. از مزایای این روش، شناسایی آسیب در حدود ۲٪ تا ۲۰٪ کاهش سختی در مقطع است و حتی در صورت وجود آسیب در دو نقطه نیز بازهم این اندیس به خوبی عمل نموده است. مشکل اساسی این روش در شناسایی محل، میزان و نوع آسیب است که با توجه به مقایسه‌ای که با اندیس TAC مربوط به روش‌های MAC انجام شده، می‌توان فهمید که مشکلات این روش همچون مشکلات آن روش‌ها باشد. برخی از این مشکلات در مطالعه دانشجو و طباطبایی [4] ذکر شده است. دو نکته نیز در مورد این روش شناسایی آسیب وجود دارد. اول اینکه برای یافتن تابع انتقال‌پذیری نیاز هست در تمامی المان‌های سازه سنسور کار گذاشته شود و دوم اینکه این روش نیز همچون روش‌های پایه مودال و بر پایه فرکانس، به اطلاعات سازه سالم نیازمند است. ژانگ و ژو [18] در مطالعه خود ضرایب همبستگی پیرسون، اسپیرمن و کندال و همچنین بردار دامنه تابع همبستگی را به عنوان توابع مختلف همبستگی در بررسی آسیب مورد استفاده قرار دادند. در مطالعه آن‌ها تعاریف مربوط

شکل ۲. نمای پایه انتخاب شده از پل شهید باکری

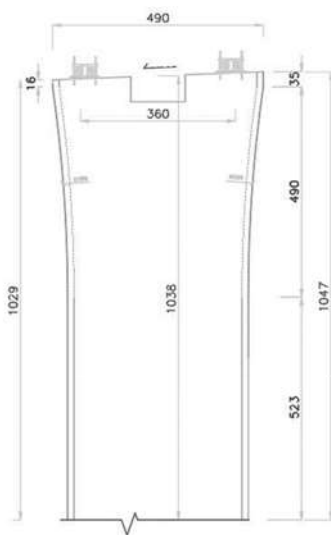


Fig. 2. View of selected pier of Shahid Bakri Bridge

شکل ۳. ابعاد و میلگردگذاری مقطع پایه پل شهید باکری در ۴ متر ابتدایی (ناحیه مفصل پلاستیک)

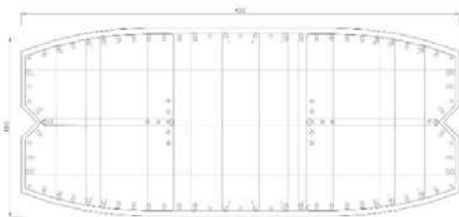


Fig. 3. Dimensions and Rebars of the pier section of Shahid Bakri bridge in the first 4 meters (plastic hinge area)

در این تحقیق با هدف ساده‌سازی، مقطع مستطیلی به ابعاد ۴۲۰ در ۱۸۰ سانتی متر در نظر گرفته شده، تعداد میلگردهای طولی دست نخورده و تنها با اندکی تغییر در محل قرارگیری، و میلگردهای عرضی به صورت تاثیر بر مقاومت فشاری بتن هسته در نظر گرفته شده است. سطح مقطع شماتیک در شکل (۴) نشان داده شده است.

روش مدل‌سازی با توجه به مطالعه کاشانی و همکاران [20]، انتخاب شده و در ابتدا، مدل A2 مربوط به مطالعه کونات و همکاران [21] درستی‌آزمایی شد. مدل‌سازی در نرم‌افزار اپنسیس [22] انجام شده است. به دلیل وجود نئوپرن‌ها، مدل‌سازی

پراکنندگی ایجاد شده در اندیس خرابی، ضریب همبستگی پیرسون باهم توانسته محل آسیب در دو ناحیه نزدیک به هم را تشخیص دهد. ژانگ و ژو همچنین یک سری تست آزمایشگاهی برای بررسی اندیس خرابی پیشنهادی انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که در عمل، این اندیس به خوبی مدل‌سازی عددی نتیجه نمی‌دهد. علیرغم اینکه در محل آسیب، اندیس دارای پیک بود، با این حال در برخی نقاط دیگر نیز پیک‌هایی را نشان می‌داد که پیشنهاد این پژوهشگران در بررسی بیشتر نقاط اضافه به عنوان نقاط مشکوک به آسیب بوده است.

محمدی و دانشجو [19] در پژوهشی جدید در پایه پل‌های مستقیم، از منحنی‌های شکنندگی استفاده نمودند و با اندیس جدیدی که تعریف نمودند به نوعی همبستگی بین منحنی شکنندگی پایه سالم و پایه آسیب دیده را مشخص نمودند. این مطالعه اولاً نیاز به بارگذاری هارمونیک دارد که پایه پل را به حالت غیرخطی برساند که در عمل امکان‌پذیر نیست و ثانیاً نیاز به اطلاعات پایه سالم برای مقایسه دارد. اندیس تعریف شده در مطالعه آنها به صورت رابطه ۵ بیان شده است.

$$PCOMAC(i) = \frac{(\sum_{r=1}^m FR_{ir}^A FR_{ir}^B)^2}{(\sum_{r=1}^m FR_{ir}^A FR_{ir}^A)(\sum_{r=1}^m FR_{ir}^B FR_{ir}^B)} \quad (5)$$

که در آن،  $FR_{ir}^A$  شاخص احتمال فراگذشت از حالت حدی  $i$  و در شدت مقیاس شده  $r$  برای سازه سالم و  $FR_{ir}^B$  شاخص احتمال فراگذشت از حالت حدی  $i$  و در شدت مقیاس شده  $r$  برای سازه آسیب‌دیده می‌باشد.

## ۵- انتخاب و مدل‌سازی پایه پل

پایه انتخاب شده در این تحقیق بلندترین پایه رمپ A از مجموعه پل‌های شهید باکری تهران است. مطابق شکل (۲) ارتفاع این پایه از سطح زمین حدود ۱۰ متر و مطابق شکل (۳) دارای سطح مقطع ۴۲۰ سانتی‌متر در ۱۸۰ سانتی‌متر می‌باشد. مطابق شکل (۳) که مربوط به ناحیه مفصل پلاستیک در ستون است، میلگردهای طولی  $\phi 32$  و میلگردهای عرضی  $\phi 16@9$  هستند.

بتن محصور و غیرمحصور توسط مصالح بتنی concrete04 و میلگردها توسط مصالح hysteretic با ضرایب پینچ و آسیب مطابق با مطالعه کاشانی و همکاران [20] مدل‌سازی شده است. اثر خاموت‌های عرضی نیز توسط روابط ارائه شده در مطالعه کاشانی و همکاران به صورت افزایش مقاومت بتن محصور شده اعمال شده است.

شکل ۷. تقسیم‌بندی میلگردهای طولی در مقطع پایه پل شهید باکری

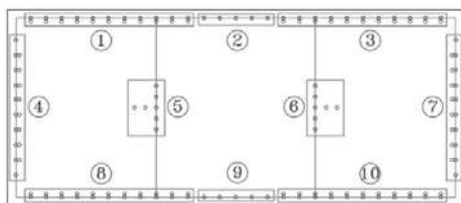


Fig. 7. Distribution of rebars in the pier section of Shahid Bakri Bridge

برای ایجاد تغییرات در نواحی مختلف مقطع سعی شده تا حد امکان مقطع به قسمت‌های بیشتری تقسیم شود. همانطور که مشاهده می‌شود؛ بتن پوششی به ۸ قسمت، بتن هسته به ۳ قسمت و میلگردها به ۱۰ قسمت تقسیم شده است. با این تقسیم‌بندی به راحتی می‌توان آسیب مورد نظر را به هر قطعه مورد نظر اعمال کرد که در بخش‌های دیگر این تحقیق مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۶- مدل‌سازی آسیب در پایه پل انتخاب شده

۱-۶- سناریوهای آسیب

در این مقاله ۱۳ سناریو برای اعمال آسیب در مقطع پایه در نظر گرفته شده که در جدول (۱) خلاصه شده است. به عنوان نمونه، در شکل (۸)، سناریوی آسیب دوازدهم به صورت شماتیک نشان داده شده است.

شکل ۸. محل اعمال آسیب در سناریوی دوازدهم

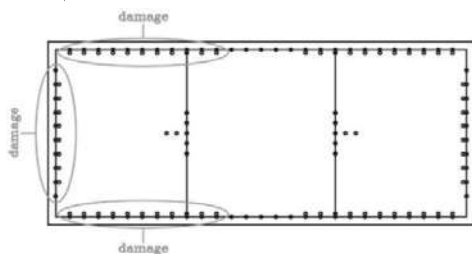


Fig. 8. Location of damage in the twelfth scenario

عرشه حذف شد و تنها بار ثقلی ناشی از عرشه که حدود ۳۰۰ تن است روی این پایه اعمال شد.

شکل ۴. مقطع معادل در نظر گرفته شده برای پایه

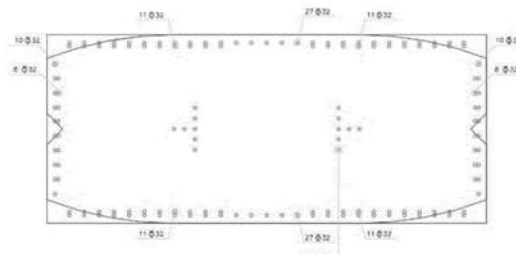


Fig. 4. The equivalent section considered for the pier

در مدل‌سازی پایه، از المان nonlinearBeamColumn که یک المان مبتنی بر نیرو است استفاده شده است. این المان مبتنی بر فیبر است و مقطع پایه را می‌توان با جزئیات بیشتری مدل نمود. پایه از نظر مصالح به سه قسمت بتن پوششی، میلگردهای طولی و بتن هسته تقسیم شده است. تقسیم نواحی به صورت مجزا در شکل‌های (۵ تا ۷) دیده می‌شود.

شکل ۵. تقسیم بندی بتن پوششی در مقطع پایه پل شهید باکری

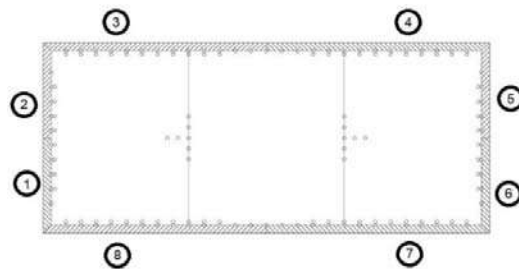


Fig. 5. Division of cover concrete in the pier section of Shahid Bakri Bridge

شکل ۶. تقسیم‌بندی بتن هسته در مقطع پایه پل شهید باکری

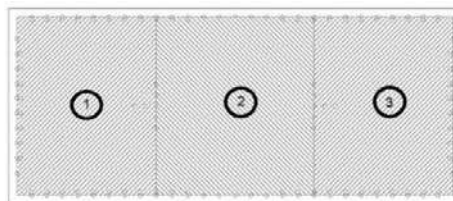


Fig. 6. Core concrete division in the pier section of Shahid Bakri Bridge

جدول ۱. سناریوهای آسیب

Scenario	Description
1	damage in zone 1 of the concrete core
2	damage in zone 2 of the concrete core
3	damage in the 1st and 2nd zones of the concrete core (two thirds of the concrete core)
4	damage in the 1st and 2nd concrete cover zones
5	damage in the 3rd and 4th concrete cover zones
6	damage in zones 1, 2, 3 and 8 of the concrete cover (half of the section about the strong axis of the section)
7	damage in zones 2, 3, 4 and 5 of the concrete cover (half of the section about the weak axis of the section)
8	damage to the rebars in zone 4
9	damage to the rebars in zone 1
10	damage to the rebars in zones 1,2 and 3
11	damage to the rebars in zones 1 and 4
12	damage to the rebars in zones 1,4 and 8
13	damage to the rebars and concrete cover in the combination of the 6th and 12th scenarios

Table 1. Damage scenarios

که با در نظر گرفتن شماره‌گذاری از پایین به بالا، آسیب در قسمت‌های ۱۵، ۲۵ و ۳۵ ایجاد شده است. محل آسیب به صورت شماتیک در شکل (۹) نشان داده شده است.

شکل ۹. شکل شماتیک تقسیم‌بندی پایه در ارتفاع و نواحی ایجاد

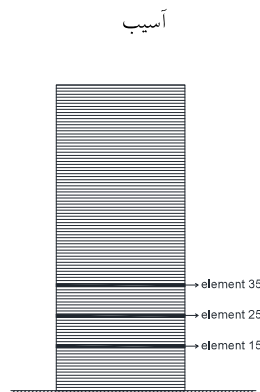


Fig. 9. Schematic figure of pier division in height and location of damage

۷- بارگذاری دینامیکی پیشنهادی محوری برای شناسایی آسیب

روش پیشنهادی برای بارگذاری، اعمال بار فشاری بر روی عرشه در بالای پایه مورد نظر است. فرض بر این است که اعمال بار به شکل فشار خالص با صرف‌نظر نمودن از اثر خمش باشد. بار به میزان ۱۰ کیلونیوتن به صورت بار رمپ پله‌ای [23] اعمال می‌شود (شکل ۱۰). این بارگذاری همچون بارگذاری ثقلی است و در ده گام وارد می‌شود. زمان اعمال بار باید به قدری کوچک باشد که مانند بار ضربه اعمال شود و با توجه به سرعت انتشار موج فشاری در بتن، بتوان اثر آن را در

۶-۲- درصد و محل آسیب

برای اعمال آسیب در مقطع باید در نظر گرفت که مقطع شامل چه مصالحی است. مصالح بتنی طی بارگذاری فشاری و کششی دچار کاهش سختی می‌شوند در حالی که مصالح فولادی از این نظر بدون تغییر خواهند ماند و تنها آسیب در این مصالح در مقادیر کم را می‌توان به صورت کاهش سطح مقطع ناشی از عواملی همچون خوردگی دانست. در اینجا با توجه به سناریوهای ذکر شده بهترین گزینه برای مصالح بتنی کاهش مدول الاستیسیته مصالح و برای مصالح فولادی، کاهش سطح مقطع است که در هر سناریو با توجه به مصالح مورد نظر، به میزان مورد نظر کاهش می‌یابد. دقت شود که سختی خمشی که در رابطه ۶ نشان داده شده به سه پارامتر مدول الاستیسیته  $E$ ، ممان اینرسی  $I$  و طول المان  $L$  بستگی دارد و سختی محوری (رابطه ۷) به جای ممان اینرسی به سطح مقطع  $A$  وابسته است. در نتیجه کاهش مدول الاستیسیته و سطح مقطع، مستقیماً در کاهش سختی مقطع تاثیر می‌گذارند.

$$K_{bending} = EI/L \quad (6)$$

$$K_{compression} = EA/L \quad (7)$$

در هر سناریو ۳ مورد کاهش به میزان ۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد در نظر گرفته شده است. برای نمونه در سناریوی دوازدهم فرض بر این است که میلگردها آسیب دیده‌اند. سطح مقطع فولاد به ۹۰٪، ۸۰٪ و ۷۰٪ مقادیر اولیه کاهش یافته است.

در مدل ساخته شده، سه محل در پایین پایه برای آسیب در نظر گرفته شده است. تقسیم‌بندی پایه در ارتفاع ۱۰۰ قسمت بوده



نسبت سازه سالم خواهد شد. این افزایش و کاهش تنها می‌تواند با جهت حرکت توسط سرعت نشان داده شود.

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_1 - k_2 x_2 &= f \end{aligned} \quad (10)$$

برای یافتن رابطه مناسبی که در یک سیستم  $n$  درجه آزادی بتوان با سرعت بدست آمده محل آسیب را شناسایی نمود در مرحله پردازش داده‌ها به روابط همبستگی پرداخته خواهد شد.

#### ۹- پردازش داده‌های سنسورها و شناسایی آسیب

مراحل پیدا کردن آسیب شامل سه مرحله اصلی می‌شود که اولین قدم، یافتن وجود آسیب است. قدم دوم یافتن محل آسیب و قدم سوم، یافتن میزان آسیب است. در این پژوهش، از ضریب همبستگی بین تاریخچه سرعت‌های ثبت شده در نقاط مختلف استفاده شده است. بدین صورت که بین هر دو رکورد سرعت ثبت شده در دو نقطه متوالی، ضریب همبستگی محاسبه می‌شود. از پیشینه تحقیقات این نتیجه دریافت می‌شود که ضریب همبستگی پیرسون بهترین گزینه خواهد بود و با توجه به این مفهوم در ادامه، اندیس خرابی پیشنهادی در این پژوهش تعریف شده است.

#### ۹-۲- اندیس خرابی و روش پیشنهادی جدید

با توجه به آنالیزهای انجام شده، چنانچه بین دو نقطه، آسیب وجود داشته باشد و بین تاریخچه سرعت‌های ثبت شده در دو طرف آسیب طبق رابطه ۴ ضریب همبستگی محاسبه شود، تغییر فاز در تاریخچه سرعت‌ها اتفاق خواهد افتاد و این ضریب از عدد ۱ فاصله خواهد گرفت و به سمت عدد منفی ۱ متمایل خواهد شد. می‌توان این بازه را به صورت زوایای بین ۰ تا ۱۸۰ در نظر گرفت که ۰ درجه به معنای همسو بودن و همبستگی دو سیگنال و ۱۸۰ درجه به منزله خلاف جهت بودن دوسیگنال تعریف شود. با این دید، چنانچه از ضریب همبستگی بدست آمده از رابطه ۴،  $\cos^{-1}$  گرفته شود، می‌توان اختلاف فاز دو سیگنال متوالی را به صورت زاویه نشان داد. از این رو اندیس خرابی پیشنهادی به صورت رابطه ۱۱ در ادامه تعریف شده است.

$$CCor = \cos^{-1}(r) \quad (11)$$

ارتفاع پایه مشاهده نمود. زمان  $t_1$  که در شکل (۱۰) نشان داده شده، به میزان ۰.۰۰۰۰۱ ثانیه در نظر گرفته شده است.

شکل ۱۰. بار رمپ [18]

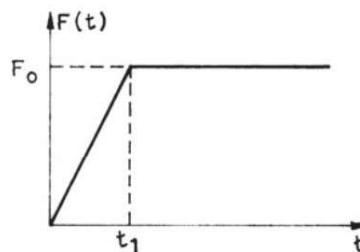


Fig. 10. Ramp loading

#### ۸- سنسورگذاری پیشنهادی و ثبت داده‌های سرعت

بعد از اتمام بارگذاری در زمان  $t_1$ ، زمان آنالیز صفر شده و در مدت زمان ۰.۰۰۱ ثانیه تاریخچه سرعت قائم در تمامی نقاط ارتفاع پایه اندازه‌گیری خواهد شد. مدت زمان اندازه‌گیری به میزان ۱۰۰ برابر زمان اعمال بار و با نرخ ۰.۰۰۰۰۱ ثانیه یعنی به اندازه زمان بارگذاری انجام پذیرفته است. همانطور که در معادلات حرکت (رابطه ۸) می‌توان دید؛ سه پارامتر جرم، سختی و میرایی در میزان جابه‌جایی تاثیرگذار هستند. با فرض میرایی ثابت و تغییر جرم اندک ناشی از کاهش سطح مقطع می‌توان به راحتی نشان داد که کاهش سختی، افزایش جابه‌جایی را در پی خواهد داشت.

$$M\ddot{X} + C\dot{X} + KX = F \quad (8)$$

دلیل استفاده از سرعت در اینجا به دلیل نشان دادن جهت حرکت است. همانطور که در رابطه ۹ نشان داده شده اگرچه این رابطه به صورت ریاضی شیب نمودار جابه‌جایی بین دو لحظه را نشان می‌دهد اما جهت حرکت نقطه را نیز مشخص می‌نماید.

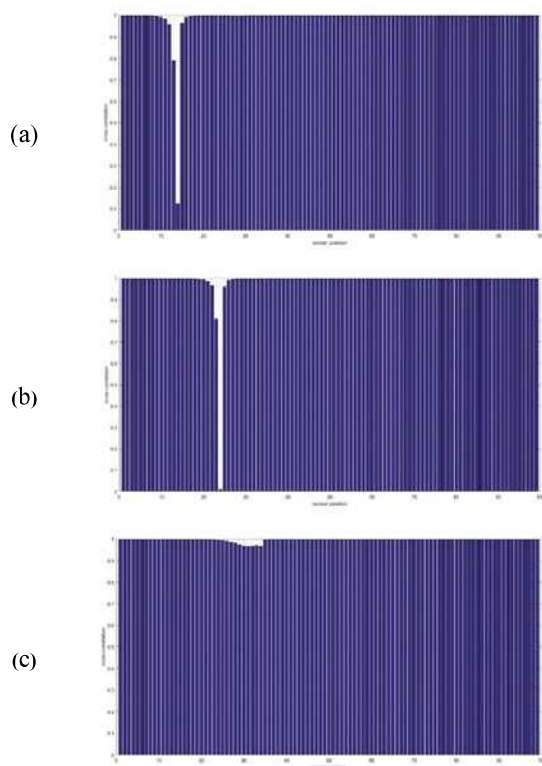
$$\dot{x} = \frac{x_{t_2} - x_{t_1}}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

به صورت ساده با فرض میرایی صفر می‌توان نشان داد اگر معادله ۸ برای یک سیستم ۲ درجه آزادی به شکل رابطه ۱۰ نوشته شود و در دو حالت بدون آسیب و با کاهش سختی  $k_2$  حل شود و مقادیر  $x_1$  و  $x_2$  در دو حالت با یکدیگر مقایسه شوند، این تغییر منجر به افزایش جابه‌جایی  $x_2$  و کاهش  $x_1$  به

در شکل (۱۳) نتیجه اندیس خرابی پیشنهادی ارائه شده در پایه آسیب دیده طبق سناریوی چهارم، درصد آسیب ۱۰ درصد و در آسیب در سه ناحیه گفته شده، نشان داده شده است.

شکل ۱۲. ضریب همبستگی تاریخیچه سرعت سنسورهای متوالی در حالت فاصله ۱۰ سانتیمتری برای سناریوی چهارم و میزان آسیب ۱۰ درصد در

(a) المان ۱۵ (b) المان ۲۵ (c) المان ۳۵



**Fig. 12.** Correlation coefficient of the velocity history of successive sensors in the case of a distance of 10 cm for the fourth scenario and a damage rate of 10% in (a) element 15 (b) element 25 (c) element 35

نکته‌ای که در نمودار شکل (۱۳) می‌توان مشاهده نمود این است که در سناریوی گفته شده و سناریوهای پنجم تا سیزدهم و زمانی که محل آسیب در المان ۳۵ باشد، پی بردن به محل آسیب کمی دشوار است و ناحیه‌ای از المان بایستی بررسی مجدد گردد. در این‌گونه موارد پیشنهاد می‌گردد ابتدا محل حدودی آسیب شناسایی شود و از آنجا که روش پیشنهادی دارای بارگذاری ساده و قابل تکرار مجدد است، محل دقیق‌تر با سنسورگذاری مجدد در ناحیه مشکوک به آسیب شناسایی

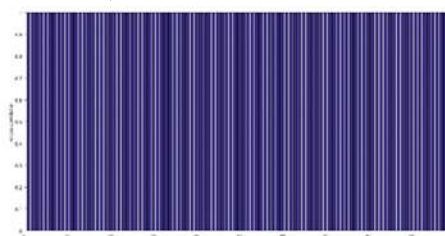
که در آن،  $r$  ضریب همبستگی پیرسون و  $CCOR$  اندیس خرابی پیشنهادی بر اساس زاویه اختلاف فاز دو سیگنال داده تعریف می‌شود. آستانه تعریف آسیب نیز زاویه ۴۵ درجه تعریف می‌شود که چنانچه از این مقدار بیشتر باشد، مبنای حضور آسیب است.

## ۱۰- تحلیل نتایج و نتیجه‌گیری

### ۱۰-۱- تحلیل نتایج

ابتدا فرض شده که امکان سنسورگذاری در تمام نقاط ارتفاع پایه وجود دارد. در شکل (۱۱) نتیجه ضریب همبستگی بین هر دو سنسور متوالی در پایه سالم در حالتی که در تمام نقاط سنسور نصب شده باشد و در شکل (۱۲) در پایه آسیب‌دیده در حالتی که آسیب طبق سناریوی چهارم به میزان ۱۰ درصد در نقاط ۱۵، ۲۵ و ۳۵ باشد نشان داده شده است.

شکل ۱۱. ضریب همبستگی تاریخیچه سرعت سنسورهای متوالی در حالت فاصله ۱۰ سانتیمتری در پایه سالم



**Fig. 11.** Correlation coefficient of the velocity history of successive sensors in the case of a distance of 10 cm for the intact pier

با مقایسه نمودارهای شکل (۱۱ و ۱۲)، همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده، ضریب همبستگی موفق به کشف آسیب و یافتن محل آن در نقاط ۱۵ و ۲۵ شده و در مورد آسیب در نقطه ۳۵ عملکرد ضعیفی از خود نشان داده است. نتایج کل سناریوها نیز نشان داد که در مورد یافتن آسیب با میزان ۱۰ درصد و در نقطه ۳۵ تنها در سه سناریوی اول که میزان گستردگی آسیب در بخش بزرگی از مقطع وجود دارد، این روش می‌تواند محل دقیق آسیب را شناسایی نماید. سایر سناریوها در حالت آسیب در نقطه ۳۵ تنها در میزان آسیب ۲۰ و ۳۰ درصد موفق به شناسایی دقیق محل آسیب شده‌اند.

شکل ۱۴. اندیس ارائه شده در این مقاله برای تاریخچه سرعت سنسورهای متوالی در حالت فاصله ۱۰ سانتی متری در پایه سالم

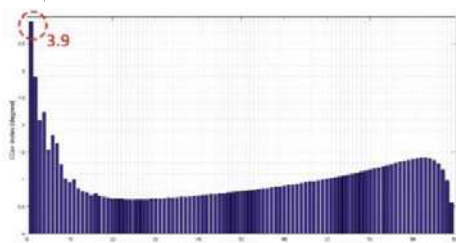


Fig. 14. The index presented in this article for the velocity history of successive sensors in intact pier

شکل ۱۵. اندیس ارائه شده در این مقاله برای تاریخچه سرعت سنسورهای متوالی در حالت فاصله ۱۰۰ سانتیمتری برای سناریوی چهارم و میزان آسیب ۱۰ درصد در (a) المان ۱۵ (b) المان ۳۵

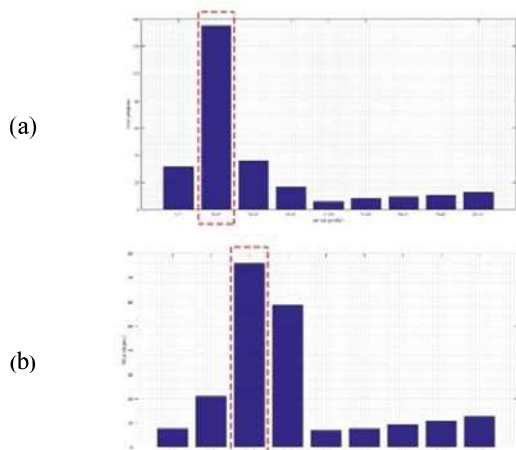


Fig. 15. The index presented in this article for velocity history of successive sensors in the state of 100 cm distance for the 4th scenario and damage rate of 10% in element (a) 15 (b) 35

نکته دیگری که در اینجا می‌توان به آن اشاره نمود این است که موضوع اولیه کشف وجود آسیب در پایه است. در این راه می‌توان تعداد سنسورها را کاهش داد. برای بررسی این موضوع، در ابتدا تعداد سنسورها به جای ۱۰۰ عدد به ۱۰ عدد کاهش داده شده و در فواصل ۱ متری قرار داده شد. در شکل (۱۵) اندیس ارائه شده در پایه آسیب دیده برای تعداد سنسورها در فواصل ۱ متری در سناریوی چهارم و میزان آسیب ۱۰ درصد در المان ۱۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱۵) مشخص است، باز هم این اندیس، وجود آسیب را به خوبی نشان داده و تنها در حالت وجود آسیب در

شود و یا با استفاده از تست‌های غیرمخرب محل و نوع آسیب با دقت بالا شناسایی گردد.

شکل ۱۳. اندیس ارائه شده در این مقاله برای تاریخچه سرعت سنسورهای متوالی در فاصله ۱۰ سانتیمتری برای سناریوی چهارم و میزان آسیب ۱۰ درصد در (a) المان ۱۵ (b) المان ۲۵ (c) المان ۳۵

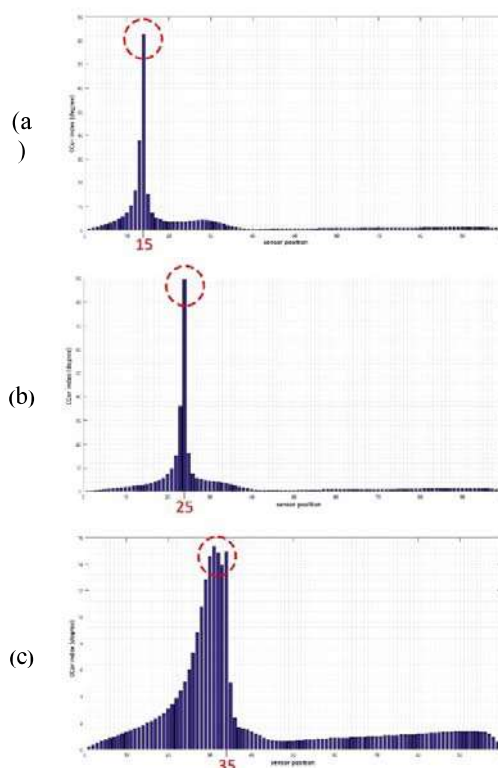


Fig. 13. The index presented in this article for the velocity history of successive sensors in the case of 10 cm distance for the fourth scenario and a damage rate of 10% in (a) element 15 (b) element 25 (c) element 35

در نمودار نشان داده شده در شکل (۱۴) نتایج بدست آمده از اندیس پیشنهادی در سازه سالم نشان داده شده است. همان‌طور که از نمودار شکل (۱۴) پیداست، بیشترین اختلاف فاز بین دو سنسور متوالی بیشتر از ۴ درجه نیست و در ابتدا و انتهای پایه افزایش و کاهش مقادیر ناشی از شرایط مرزی در دو انتهای المان می‌باشد. در نمودار شکل (۱۱) نیز افزایش و کاهش مقادیر در دو انتها وجود دارد ولیکن با توجه به درصد تغییرات بسیار پایین، در نمودار قابل مشاهده نیست.

## ۱۲- مراجع

- [1] Mander, J.B., 1983. Seismic design of bridge piers.
- [2] Roustazadeh, S., & Daneshjoo, F. 2023. Damage Identification of Multi-Span Bridges Using a Novel Damage Index Based on a New Algorithm for Prediction of Healthy State Displacement. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 23(19), 2350189.
- [3] Arabha Najafabadi, A., Daneshjoo, F., & Ahmadi, H. R. 2020. Multiple damage detection in complex bridges based on strain energy extracted from single point measurement. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(3), 722-730.
- [4] Daneshjoo, F., & Tabatabaei S. A., 2015, Development of COMAC and Damage Index Methods for Damage Detection in the Near of Abutments of Bridges. *MCEJ*, 15 (4) :55-62. [in Persian]
- [5] Powell, G.H. and R. Allahabadi, 1988. Seismic damage prediction by deterministic methods: concepts and procedures. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 16(5): p. 719-734.
- [6] Vosooghi, A. and M.S. Saiidi, 2012. Experimental fragility curves for seismic response of reinforced concrete bridge columns. *ACI Structural Journal*, 109(6): p. 825.
- [7] Bassam, A., A. Iranmanesh, and F. Ansari, 2011. A simple quantitative approach for post earthquake damage assessment of flexure dominant reinforced concrete bridges. *Engineering Structures*, 33(12): p. 3218-3225.
- [8] Mahboubi, S. and M.R. Shiravand, 2019. Proposed input energy-based damage index for RC bridge piers. *Journal of Bridge Engineering*, 24(1): p. 04018103.
- [9] Hindi, R.A. and R.G. Sexsmith, 2004. Inelastic damage analysis of reinforced concrete bridge columns based on degraded monotonic energy. *Journal of Bridge Engineering*, 9(4): p. 326-332.
- [10] Naderpour, H., A. Ezzodin, A. Kheyroddin, and G. Ghodrati Amiri, 2017. Signal processing based damage detection of concrete bridge piers subjected to consequent excitations. *Journal of Vibroengineering*, 19(3): p. 2080-2089.
- [11] 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.
- [12] Hertlein, B. and A. Davis, 2007. *Nondestructive testing of deep foundations*. John Wiley & Sons.
- [13] Chai, H.-Y. and K.-K. Phoon, 2013. Detection of shallow anomalies in pile integrity testing. *International Journal of Geomechanics*, 13(5): p. 672-677.

المان ۳۵ دو ناحیه محتمل را نشان داده که باید با سنسورگذاری مجدد و در فواصل کمتر به محل دقیق آسیب پی برده شود.

نتایج یک بار دیگر برای سناریوهای مختلف بدست آمد و نشان داد که در حالت آسیب در المان ۳۵ و میزان آسیب ۱۰ درصد این اندیس در سناریوهای ۴ تا ۱۳ عملکرد ضعیفی نشان می‌دهد. این درحالی است که در آسیب‌های ۲۰ و ۳۰ درصد عملکرد بهتری داشته و محل آسیب به خوبی شناسایی شده است. سناریوهای مطرح شده سناریوهایی هستند که نواحی کوچکی از بتن پوششی و یا تعداد کمتری از میلگردها دارای آسیب بوده‌اند. بدین صورت، چنانچه نواحی آسیب بیشتر باشد و یا میزان آسیب بیشتر از ۲۰ درصد باشد، با بیشترین دقت می‌توان محل آسیب را شناسایی نمود.

## ۱۱- نتیجه‌گیری

در این مطالعه با ارائه روشی جدید، بدون داشتن اطلاعات پایه سالم، به شناسایی آسیب در پایه پل‌ها پرداخته شده است. روش پیشنهادی، با توجه به روش بارگذاری محوری شمع‌ها، از بار محوری دینامیکی در بالای پایه استفاده نموده است. با توجه به فلسفه توضیح داده شده، از سنسورهای سرعت در ارتفاع پایه استفاده شده و در نهایت برای رفع مشکل نداشتن اطلاعات پایه سالم با پیشنهاد اندیس خرابی جدید مبتنی بر ضریب همبستگی، با مقایسه داده سنسورهای متوالی به شناسایی آسیب در ارتفاع پایه پرداخته شده است. مدل‌سازی آسیب در این تحقیق به صورت کاهش مدول الاستیسیته مصالح بتنی و کاهش سطح مقطع در مصالح فولادی تعریف شده و ۱۳ سناریوی متفاوت از آسیب در بتن هسته، بتن پوششی و میلگردها ارائه شده است. میزان آسیب در نظر گرفته شده حداقل ۱۰ درصد و حداکثر ۳۰ درصد تعریف شده است. اندیس تعریف شده در تمامی سناریوها به خوبی توانست وجود آسیب را در تمامی شدت‌ها نشان دهد و در یافتن محل آسیب تنها در سناریوهای ۴، ۸ و ۹ که کمترین نواحی آسیب‌دیدگی در بتن پوششی و میلگردها را داشتند برای یافتن محل دقیق آسیب دچار خطا شد.

- [14] Feng, Q., Q. Kong, and G. Song, 2016. Damage detection of concrete piles subject to typical damage types based on stress wave measurement using embedded smart aggregates transducers. *Measurement*, 88: p. 345-352.
- [15] Feng, Q., et al., 2016. Damage detection of concrete piles subject to typical damages using piezoceramic based passive sensing approach. *Journal of Vibroengineering*, 18(2): p. 801-812.
- [16] Diwakar, C., N. Patil, and M.R. Sunny, 2018. Structural damage detection using vibration response through cross-correlation analysis: Experimental study. *AIAA Journal*, 56(6): p. 2455-2465.
- [17] Zhou, Y.-L., H. Cao, Q. Liu, and M.A. Wahab, 2017. Output-based structural damage detection by using correlation analysis together with transmissibility. *Materials*, 10(8): p. 866.
- [18] Zhang, Y. and J. Zhu., 2021. Damage identification for bridge structures based on correlation of the bridge dynamic responses under vehicle load. *Structures*.
- [19] Mohammadi, M., & Daneshjoo, F., 2015, A new method for damage detection minor damages in the piers of straight bridges using fragility curves of harmonic forces. *MCEJ*, 24 (2) :185-201. [in Persian]
- [20] Kashani, M.M., L.N. Lowes, A.J. Crewe, and N.A. Alexander, 2016. Nonlinear fibre element modelling of RC bridge piers considering inelastic buckling of reinforcement. *Engineering Structures*, 116: p. 163-177.
- [21] Kunnath, S.K., A. El-Bahy, A.W. Taylor, and W.C. Stone, 1997. Cumulative seismic damage of reinforced concrete bridge piers, Technical Report NCEER, 97-0006. p. 120.
- [22] Mazzoni, S., F. McKenna, M.H. Scott, and G.L. Fenves, 2006. OpenSees command language manual. Pacific earthquake engineering research (PEER) center, 264(1): p. 137-158.
- [23] Mukhopadhyay, M., 2021. Forced Vibration of Single Degree of Freedom System. *Structural Dynamics: Vibrations and Systems*, p. 59-128.

Reza Zamanian<sup>1</sup>, Farhad Danshjo<sup>2\*</sup>, Masoud Soltani Mohammadi<sup>2</sup>

1 PhD Student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

2 Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University

Email: danesh\_fa@modares.ac.ir\*

**Abstract**

Piers are vital design elements for a bridge under seismic loading; ensuring their stability and health is crucial for the overall safety of the bridge. The methods that have been presented so far in the discussion of bridge pier health monitoring generally require intact pier information, and the methods that identify damage without having intact pier information require the calculation of parameters that are not possible in practice. In this research, by presenting a new method that includes the proposed dynamic axial loading, the use of velocity sensors at the height of the pier, and the presentation of the proposed damage index using the concept of correlation, it has been tried to detect the presence of damage and its location with minimal error and without having intact pier information. To this end, the tallest pier of Ramp A of the Shahid Bakri Bridge complex in Tehran was selected as the case study. Before modeling, the accuracy of the modeling method was validated, and then a precise nonlinear model was built in the OpenSees software using as-built sheets. For the first time in this article, damage in the model was created in different scenarios: reduction of stiffness in concrete cover materials, reduction of cross-sectional area of rebars at various points of the section. The location of the damage was also separately applied at three heights of the pier: 15, 25, and 35 percent of the height. To generate data on the pier, it was considered to load it with an impact load on the top of the pier. This load was applied as an impact on the deck of the pier for a very short time, and the data was collected using accelerometers at the pier height, and the correlation between each pair of consecutive sensors was calculated. Due to the high velocity of the compressive wave in concrete and the overlap that occurs in the return of the wave at both ends of the pier, data collection was performed only for about 0.001 seconds. Finally, due to the weakness of the correlation coefficient in magnifying the location of damage, using the concept of correlation, a damage index based on this concept was presented, and the capability of the presented index in detecting the presence and location of damage in various damage scenarios was evaluated. The results obtained indicate the proper performance of this index in detecting damage in various scenarios and damage intensities between 10 and 30 percent. The presented index only made an error in detecting the location of damage in cases where damage occurred in the concrete cover and rebars in small areas, but even in these cases, the presence of damage was well demonstrated. Due to limitations in sensor placement at the pier height, increasing the distance between sensors and reducing their number was also investigated, and it was observed that even with greater distances between sensors, the presented index has the capability to detect the presence and location of damage, and after finding the approximate location of damage, it is possible to identify the exact location of damage by re-sensing in probable areas.

**Keywords:** health monitoring, bridge pier, damage, accelerometer, correlation coefficient.