



شناسایی خرابی در عرشه پل‌های بتنی با استفاده روش موجک (Wavelet)

امیر طریقت^۱، عادل محمدیگی^۲

۱-عضو هیأت علمی، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران، Tarighat@srttu.edu

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران

چکیده

شناسایی خرابی در عرشه پل‌های بتنی، با اندازه‌گیری و پایش سیگنال‌های ارتعاشی سازه مانند سیگنال‌های شتاب سازه، یکی از روش‌های اصلی، در سیستم پایش سلامت پل‌ها می‌باشد. این مقاله برای معرفی یک روش هوشمند آنالیز سیگنال در شناسایی خرابی از روش انتقال موجک (wavelet transform) در عرشه پل بتنی استفاده می‌کند. عرشه پل با روش‌های اجزای محدود مدل و تعدادی سناریو خرابی در قسمت‌های مختلف آن در نظر گرفته شده است. یک نیروی ضربه‌ای به پل اعمال شده، سپس شتاب در تعدادی نقاط مشخص از پل به صورت مجزا برداشت می‌شود. با استفاده از آنالیز موجک، شتاب در هر نقطه بررسی شده و تفاوت‌های ایجاد شده در ۲ حالت سازه کنترل و در لحظه آزمایش یا دارای آسیب محاسبه می‌شود. اطلاعات بدست آمده از این اختلاف‌ها برای شناسایی خرابی و محل آن مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به بررسی شتاب در نقاط مختلف عرشه پل، دیگر نیازی به محاسبه فرکانس و شکل مد ارتعاشات پل نمی‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که هزینه‌ها و زمان مورد استفاده در این روش نسبت به روش‌های بازرسی چشمی کمتر و در سازه‌های حقیقی کاربردی‌تر می‌باشد.

کلمات کلیدی: پایش سلامت سازه، شناسایی محل خرابی، روش اجزای محدود، انتقال موجک (wavelet)

۱- مقدمه

امروزه سازه‌های مختلف با دوره‌های بهره‌برداری طولانی دچار آسیب‌های سازه‌ای ناشی از تأثیرات محیطی می‌شوند، شناسایی این آسیب‌ها در مراحل اولیه شکل‌گیری آن‌ها، یکی از مهمترین نیازهای نگهداری سازه‌های مهندسی می‌باشد. از این رو امروزه سیستم‌های پایش سلامت سازه‌ای^۱ و روش‌های آشکار سازی آسیب^۲ اهمیت ویژه‌ای یافته‌اند [۱]. پل‌ها بخشی مهم از سیستم حمل و نقل مدرن هر کشوری هستند و نقشی اساسی در این سیستم را دارند. عواملی مانند تغییر در شرایط بارگذاری، اضمحلال ناشی از گذشت زمان، تأثیرات محیطی و غیره باعث ایجاد آسیب‌های موضعی و یا کلی در پل‌های بتنی می‌شود. انهدام و یا عملکرد ضعیف پل‌ها، سیستم حمل و نقل را دچار اختلال می‌کند. از این رو سیستم پایش سلامت سازه‌ای در سازه‌های خاص و به ویژه پل‌ها، در سیستم‌های مدیریتی کنونی، مسئله قابل بحث و مهمی می‌باشد [۲]. در پایش سازه و شناسایی خرابی، تعیین موقعیت آسیب کار بسیار دشوار است و برآورد کردن صحیح و دقیق

¹ - Structural Health Monitoring Systems

² - Damage Detection Methods

آن نیازمند فرآیندهای گوناگون همراه با تخمین زدن بعضی از داده‌ها می‌باشد [۳]. در روش شناسایی خرابی بر اساس پاسخ ارتعاش، اندازه گیری‌های انتقال معمولاً وابسته به عوامل محیطی هستند و همچنین وجود اختشاش احتمالی، باعث خطا در روند شناسایی شده اما الگوریتم موجک باعث افزایش کیفیت پردازش سیگنال می‌شود [۴].

ریتر در سال ۱۹۹۳ شناسایی خرابی را چهار مرحله تقسیم کرد: ۱- تعیین وجود خرابی ۲- تعیین موقعیت هندسی خرابی ۳- کمی کردن شدت خرابی ۴- پیش بینی عمر بهره برداری باقیمانده سازه [۵]. روش‌های آشکار سازی خرابی که بر مبنای ارتعاش می‌باشد، هنگامی که از مدل سازه ای استفاده نمی‌کند. سطوح ۱ و ۲ خرابی را بدست می‌آورد. هنگامی که این روش‌ها با مدل سازه ای همراه شود، سطح ۳ خرابی را بدست می‌آورد. پیش بینی سطح ۴ عموماً به حوزه‌های مکانیک شکست، آنالیز خستگی و یا ارزیابی طراحی سازه وابسته می‌باشد [۶]. روش‌های آشکار سازی خرابی بر اساس پارامترهای مختلف موجود در سازه و بررسی آن‌ها خرابی را شناسایی می‌کنند. این پارامترها شامل مواردی مثل فرکانس طبیعی سازه، شکل مدها و انحنای آن‌ها، میرایی، انعطاف پذیری، انرژی کرنشی و آنالیز تاریخیچه زمانی می‌باشد که بر اساس آن اطلاعات پایه برای روش‌هایی بر مبنای شبکه عصبی مصنوعی و دامنه زمان (آنالیز موجک) را می‌توان بدست آورد.

۲- آنالیز موجک (Wavelet)

آنالیز موجک یکی از روش‌های دامنه زمان می‌باشد. در سال‌های اخیر، این روش‌ها اعتبار زیادی در شناسایی خرابی و الگوهای پیش سلامت سازه ای یافته‌اند. از دلایل اصلی اعتبار این روش‌ها این می‌باشد که پارامترهای سیستم به صورت مستقیم از پاسخ‌های تاریخیچه زمانی^۳ سیستم به دست می‌آیند. و ازدامنه مودال مستقل می‌باشد. همچنین با استفاده از ابزار ساده به دست می‌آیند. تجزیه سیگنال‌ها گاهی مانند سیگنال‌ها غیرایستا^۴ به آسانی و با ابزار ساده صورت نمی‌گیرد. سیگنال غیر ایستا، سیگنالی است که مشخصات آن در طول زمان (مکان) تغییر می‌کند. ابزار کلاسیک آنالیز سیگنال، تبدیل فوریه است. این تبدیل در برابر سیگنال‌های غیر ایستا ضعیف عمل می‌کند. [۷]. تبدیل فوریه نمی‌تواند ابزار مناسبی برای تحلیل سیگنال‌های غیرایستا، که در طول زمان طیف آنها تغییر می‌کند، باشد. البته در مواقعی که رخ دادن یک جز فرکانسی خاص مهم نباشد و فقط وجود فرکانسهای مختلف مد نظر باشد، تبدیل فوریه می‌تواند مفید باشد. اما با وارد کردن زمان در فرکانس می‌توان این مشکل را کمی کاهش داد، اگر فاصله‌های زمانی کوچک کنیم، می‌توان پنجره را تنگ‌تر در نظر گرفت، آنقدر تنگ که قسمتی از سیگنال که در زیر آن واقع می‌شود، واقعاً ثابت باشد. این رویکرد محققان منجر به یک نسخه تجدید نظر شده از تبدیل فوریه با نام تبدیل فوریه با دوره کوتاه^۵ (STFT) شد. مشکلی که در STFT وجود دارد به اصل عدم قطعیت هایزنبرگ مربوط است. این اصل به اندازه حرکت و مکان ذرات در حال حرکت برمی‌گردد، یعنی کسی نمی‌داند چه اجزای فرکانسی در هر زمان از نمونه‌ی یک سیگنال وجود دارد. تبدیل موجک به عنوان یک رویکرد دیگر از STFT و برای حل مشکل تفکیک پذیری بوجود آمد. تحلیل موجک به روشی مشابه STFT صورت می‌گیرد. سیگنال در یک تابع (تابع موجک) ضرب می‌شود که مشابه تابع پنجره در STFT است و تبدیل بطور جداگانه برای قسمتهای مختلف سیگنال در بعد زمان محاسبه می‌شود. این روش‌ها سیگنال‌های در بازه زمان را تجزیه می‌کند. سپس لحظه رخداد آسیب بوسیله انفصال‌هایی در داده‌های شتاب ضبط شده، شناسایی می‌شود. از نظر تاریخی آنالیز موجک متد جدیدی می‌باشد، که اطلاعات ریاضی پایه آن به کار ژوزف فوریه در قرن ۱۹ برمی‌گردد. اولین توجه به آنالیز بر اساس مقیاس به جای آنالیز بر اساس فرکانس که اکنون به عنوان موجک (WL) شناخته می‌شود در سال ۱۹۰۹ توسط الفرد هار انجام شد. مفهوم تئوری (WL) اولین بار با پیشنهاد جین مورلت و یک تیم در مرکز فیزیک نظری مارسل در فرانسه انجام شد. متد و شیوه آنالیز (WL) به وسیله مایر و همکارانش پیشرفت کرد به طوری که آن‌ها

³ - Time History Response

⁴ - Non- Stationary

⁵ - Short-term Fourier Transform

انتشار متد در زمینه های مختلف را تضمین کردند و سپس الگوریتم کنونی و اصلی آن به کار استفان مالات در سال ۱۹۸۸ برمی گردد. ازین پس تحقیق درباره (WL) جهانی شد و کاربرد آن در زمینه های مختلف گسترش یافت. [۸]

آنالیز موجک ابزار قدرتمندی برای توصیف ویژگی های عمومی سیگنال فراهم می کند. برخلاف انتقال فوری، تابع اصلی معمولاً برای آنالیز مورد استفاده قرار می گیرد از نوع موجها سینوسی می باشد و همچنین دیگر تابع های پایه و اصلی می توانند با توجه به ویژگی های موج انتخاب شود. تابع اصلی، موجک مادر نامیده می شود که آن را با ψ نشان داده می شود که یک تابع میانگین صفر است.

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(\theta) dt = 0$$

تابع تبدیل موجک به مقیاس a ، انتقال b به صورت زیر تعریف می شود:

$$WT_x \psi(a, b) = \Psi_x \psi(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|b|}} \int x(t) \psi^* \left(\frac{t-a}{b} \right) dt$$

همانطور که در رابطه فوق دیده می شود، سیگنال تبدیل شده، تابعی است از دو متغیر a و b ، که به ترتیب پارامترهای انتقال و مقیاس هستند. $\Psi(t)$ تابع تبدیل است و که همان موجک مادر می باشد.

باتوجه به رابطه ۳-۲ فرض کنید $x(t)$ سیگنالی است که قرار است تجزیه شود. موجک مادر بعنوان یک نمونه اولیه برای تمام پنجره ها انتخاب شده است. تمام پنجره هایی که استفاده می شوند، نسخه های باز شده (فشرده شده) و انتقال داده شده موجک مادر هستند. تعدادی تابع وجود دارند که برای این منظور استفاده می شوند. بعد از اینکه موجک مادر انتخاب شد، محاسبات با $a=1$ آغاز می شود و WT برای تمام مقادیر a ، بزرگتر و کوچکتر از ۱، محاسبه می شود. لیکن، بسته به سیگنال، یک تبدیل کامل معمولاً نیاز نیست. برای تمام اهداف عملی، سیگنال محدود می شود. بنابراین، محاسبه تبدیل برای فاصله زمانی های محدود مقیاسها کافیست. برای راحتی کار، پروسه با مقیاس $a=1$ شروع شده و با افزایش مقادیر a ادامه می یابد، بدین معنا که تجزیه از فرکانس های بالا شروع شده و به سمت فرکانس های پایین ادامه می یابد. مقدار اولیه a نشان دهنده فشرده ترین موجک است. با افزایش مقدار a ، موجک بازتر خواهد شد.

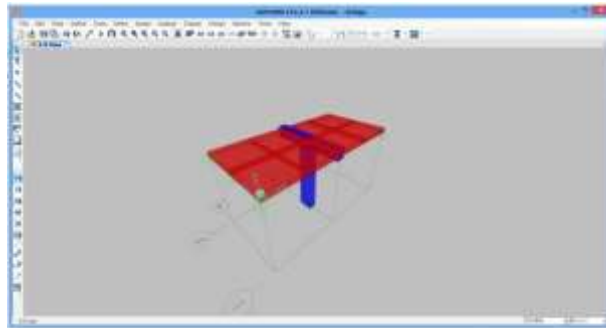
موجک در آغاز سیگنال یعنی نقطه ای که زمان برابر صفر است، قرار می گیرد. تابع موجک در مقیاس یک در سیگنال ضرب می شود و سپس بر روی تمام حاصل ضربها جمع انجام می گیرد. سپس نتیجه جمع، در عدد ثابت $\frac{1}{\sqrt{a}}$ ضرب می شود. این ضرب برای اهداف نرمال سازی انرژی است، بطوری که سیگنال تبدیل شده به ازای تمام مقیاسها انرژی یکسانی داشته باشد. نتیجه نهایی مقدار تبدیل است، یعنی، مقدار WT در زمان صفر و مقیاس $a=1$. به بیان دیگر، این مقدار است مطابق با نقطه $b=0$ و $a=1$ در مقیاس زمان. موجک در مقیاس $a=1$ سپس به اندازه b به سمت راست شیفت داده می شود، $t=b$ و رابطه فوق برای بدست آوردن مقدار تبدیل در $t=b$ و $a=1$ در فضای فرکانس محاسبه می شود.

این روند تا وقتی که موجک به انتهای سیگنال برسد، ادامه پیدا می کند. در این مرحله، یک سطر از نقاط مقیاس زمان برای $a=1$ محاسبه شده است. سپس a به اندازه کمی افزایش می یابد. توجه کنید که این تبدیل پیوسته است و b و a باید بصورت پیوسته افزایش پیدا کنند. حال اگر قرار باشد این فرآیند توسط کامپیوتر انجام شود، هر دوی این پارامترها به یک اندازه کوچک مناسب افزایش می یابند. این به معنای نمونه برداری در مقیاس زمان است. فرآیند فوق به ازای تمام مقادیر a تکرار می شود. هر بار محاسبه با یک مقدار a ، یک سطر متناظر در صفحه مقیاس زمان را پر می کند [۹].

۳- نمونه‌های عددی

۳-۱- مدل بدون آسیب

در گام نخست تحقیق یک مدل اجزای محدود از سازه پل با عرشه مسطح بتنی^۶ در نرم افزار SAP2000 مطابق شکل ۱ ایجاد گردیده است. مشخصات پل بتنی مدل شده در نرم افزار طبق جدول ۱ می‌باشد.

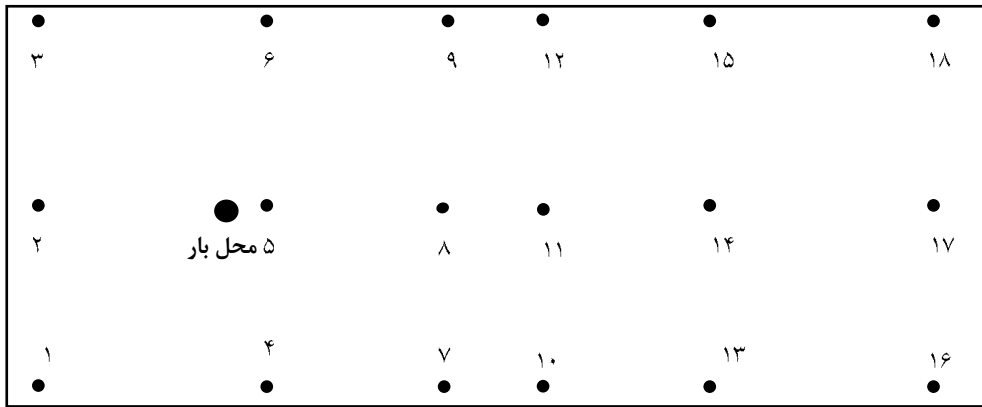


شکل ۱- مدل اجزای محدود سازه پل در نرم افزار Sap 2000

جدول ۱- مشخصات پل بتنی

| | | |
|---|--|---|
| طول عرشه = ۱۰ متر | پهنای عرشه = ۵ متر | مقاومت فشاری بتن = ۲۷ مگا پاسکال |
| طول دهانه ۱ = ۵ متر | طول ستون میانی = ۵ متر | مدول الاستیسیته = 25980.76 N/mm^2 |
| طول دهانه ۲ = ۵ متر | طول تیر میانی = ۵ متر | وزن مخصوص بتن = 24.02 N/m^3 |
| ضخامت عرشه در حالت آسیب دیده = ۰,۲۴ متر | ضخامت عرشه در حالت بدون آسیب = ۰,۳ متر | ضریب پواسون = ۰,۳ |

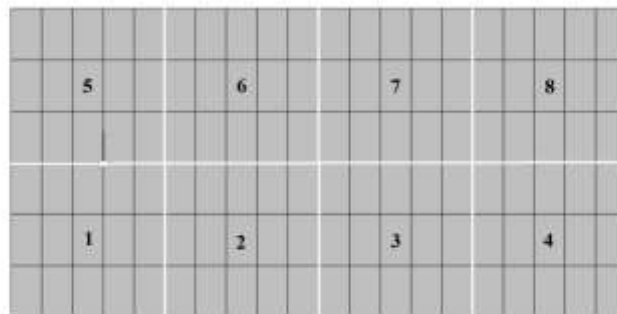
بر روی عرشه ۱۶ نقطه را محل حسگرهای فرضی در نظر می‌گیریم و تحلیل تاریخچه زمانی شتاب در راستای محور Z برای این نقاط انجام می‌دهیم. به منظور انجام تحلیل تاریخچه زمانی بار ضربه ای با بزرگی 100 N (بصورت فشرده)، در گره مشخصی از سازه مطابق شکل ۲ اعمال می‌شود. ضریب میرایی سازه در آنالیز تاریخچه زمانی ۰,۰۵ در نظر گرفته شده است



شکل ۲- محل فرضی حسگر ها بر روی عرشه و بار فشرده

۲-۳- مدل آسیب دیده

بعد از انجام تحلیل، نمودار تاریخچه زمانی شتاب برای تشخیص آسیب و مکان یابی آن استفاده شده است. همانطور که در مراحل قبلی بیان شد مدل عددی از پل دو دهانه بتنی ایجاد گردیده است. ضخامت عرشه پل ثابت و به بزرگی ۳۰ سانتی متر می باشد. در گام بعدی برای بررسی روش آشکار سازی خرابی، در عرشه پل ۸ سناریو های متفاوت برای خرابی مدل عددی شرح داده شده، در نظر گرفته شده است. این خرابی با کاهش ضخامت مقطع از ۳۰ سانتی متر به ۲۴ سانتی متر (کاهش ۲۰٪ ضخامت مقطع) در مدل های عددی منظور گردیده است. طول و عرض ناحیه آسیب دیده در همه سناریو ها ۲/۵ متر منظور شده است. آنچه در دیگر مدل ها متفاوت می باشد تغییر در مکان خرابی می باشد. ۸ سناریو مطاب شکل ۳ تعریف می شود.



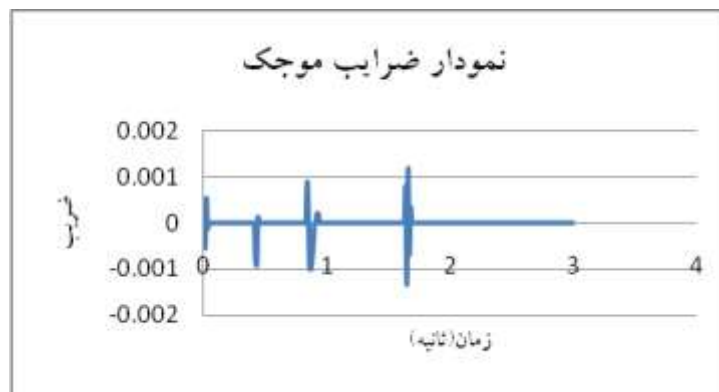
شکل ۳- ۸ سناریو خرابی در عرشه پل

۳-۳- آنالیز موجک داده‌ها

پس از تحلیل تاریخیچه زمانی نمودار تاریخیچه زمانی شتاب در راستای قائم سازه در هر نقطه از آن، با توجه به روش کاربردی در این تحقیق قابل استخراج می باشد. سپس نمودارهای تاریخیچه زمانی شتاب راستای قائم در نقاطی مشخص، که همان محل فرضی تعبیه حسگرها در عرشه پل است، در حالت مدل کنترل و همچنین سناریوها به عنوان داده های لازم برای آنالیز موجک مورد استفاده قرار می گیرند. چند نمونه از این نمودارها در فصل سوم آمده است. پس از آنالیز برای تمامی نقاط، مقایسه بین مدل کنترل و سناریوها به صورت مجزا انجام می گیرد. سپس اختلاف میان این دو حالت بدست آورده. نمونه‌ای از آنالیز یک حسگر برای سناریو اول در شکل ۴ و ۵ آمده است.



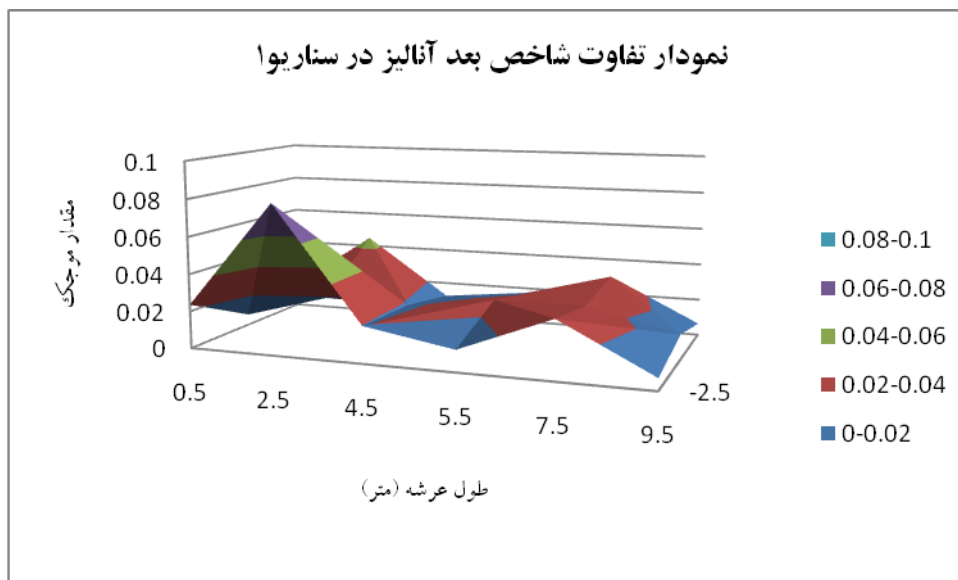
شکل ۴- نمودار آنالیز موجک شتاب در راستا Z نقطه ۲ از سناریو اول



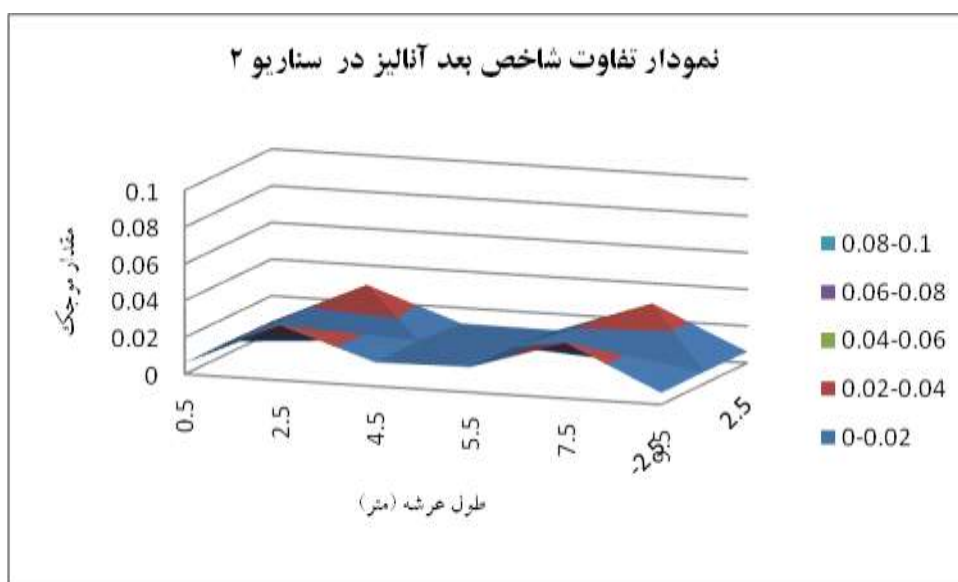
شکل ۵- نمودار ضرایب موجک برای شتاب در راستا Z نقطه ۲ از مدل کنترل

۴- بررسی نتایج

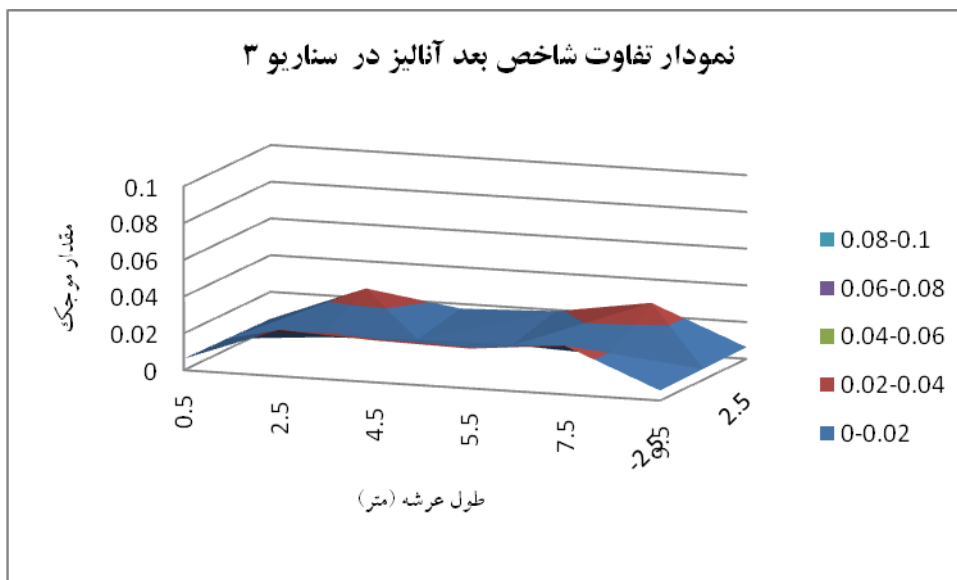
همانطور که اشاره شد برای تمام ۱۸ نقاط بر روی عرشه پل در نمونه کنترل و ۸ سناریو تعریف شده نمودار(داده‌ها) همانند شکل بالا محاسبه می شود. آنالیز موجک بر روی داده‌ها انجام می گیرد و تمامی سناریوها با مدل کنترل مقایسه شده و اختلاف‌ها آن‌ها محاسبه می شود. سپس این اختلاف به صورت زیر با نمودارهای سطح نمایش داده شده است. مختصات سطح (در جهت x, y) طول و عرض پل را نشان می دهد.



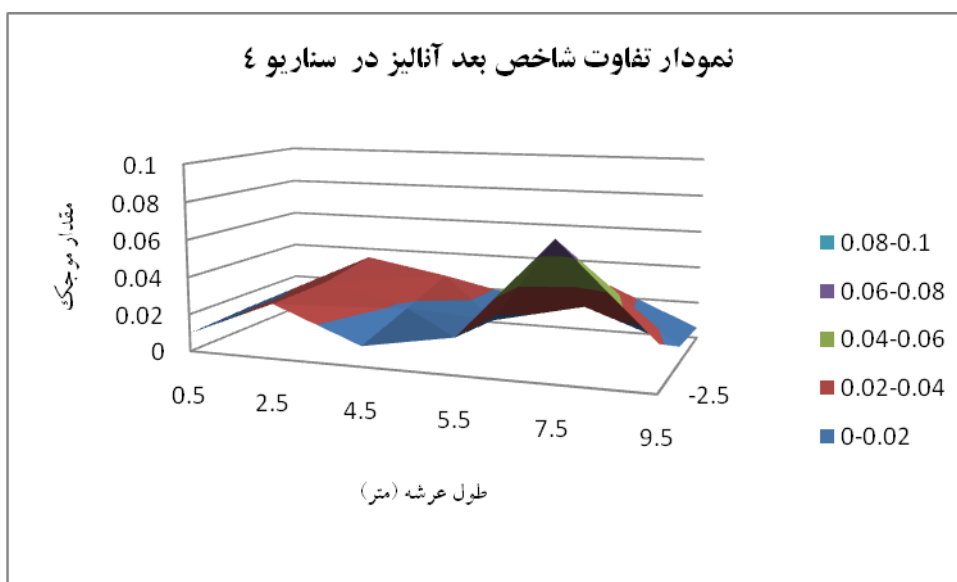
شکل ۶- نمودار تفاوت شاخص بعد آنالیز در سناریو ۱ حاصل تحریک بارگذاری



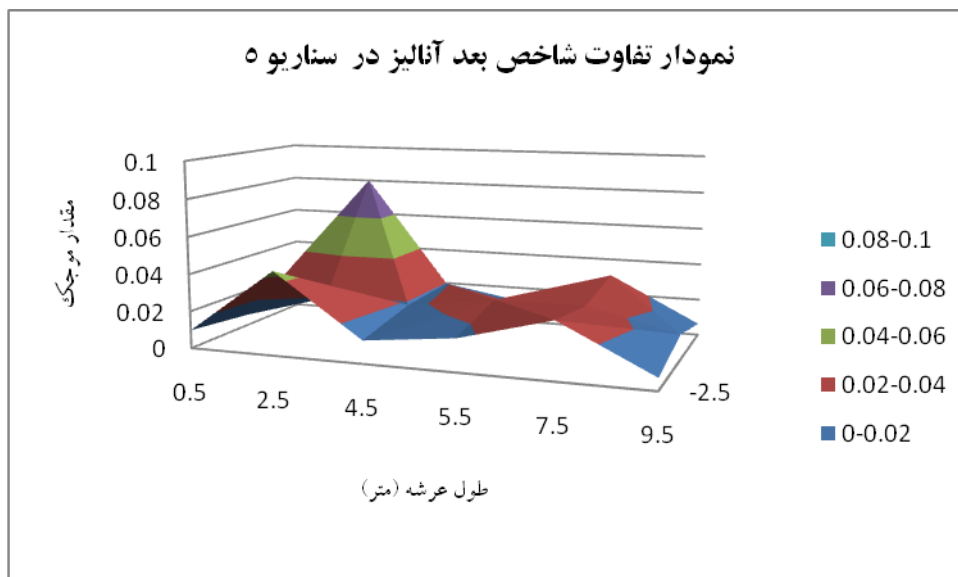
شکل ۶- نمودار تفاوت شاخص بعد آنالیز در سناریو ۲ حاصل تحریک بارگذاری



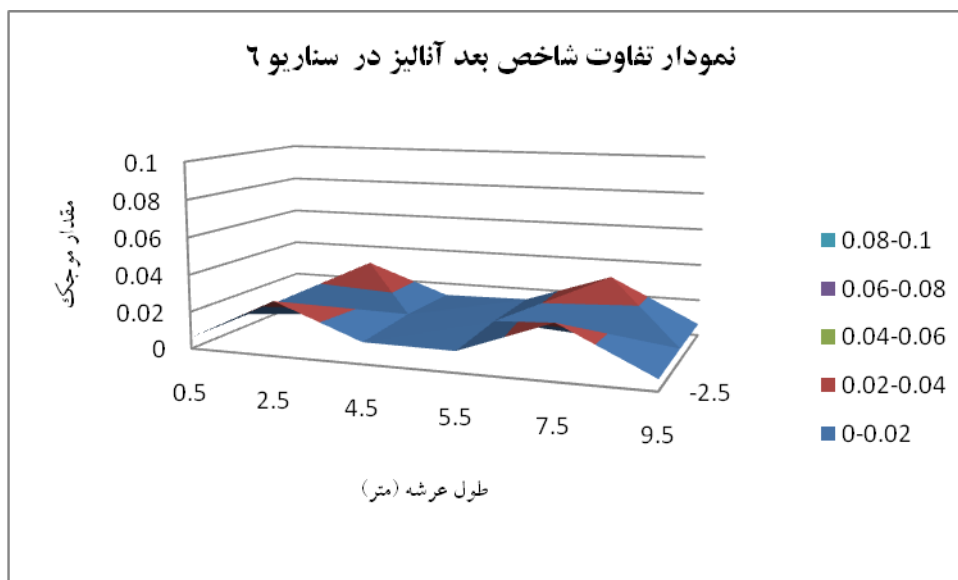
شکل ۷- نمودار تفاوت شاخص بعد آنالیز در سناریو ۳ حاصل تحریک بارگذاری



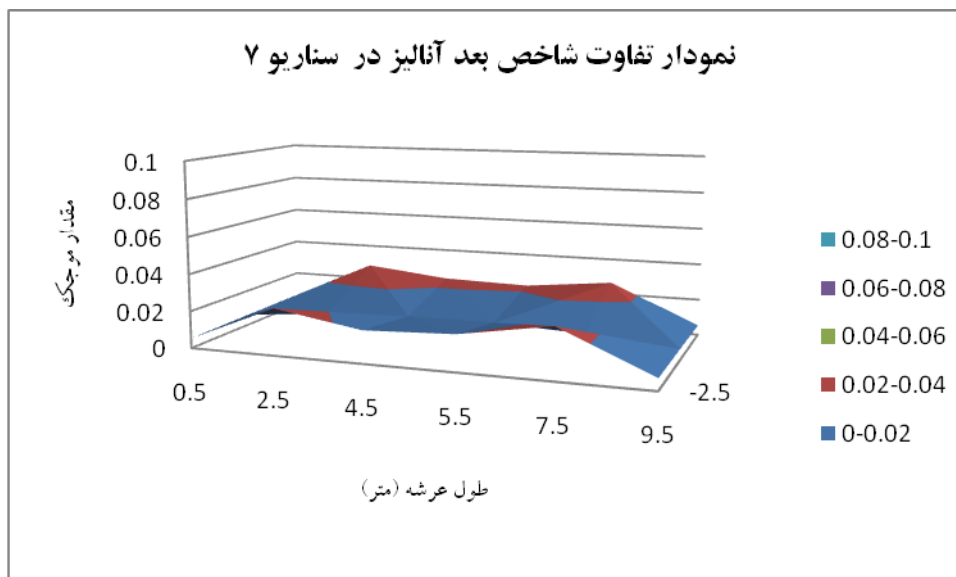
شکل ۸- نمودار تفاوت شاخص بعد آنالیز در سناریو ۴ حاصل تحریک بارگذاری



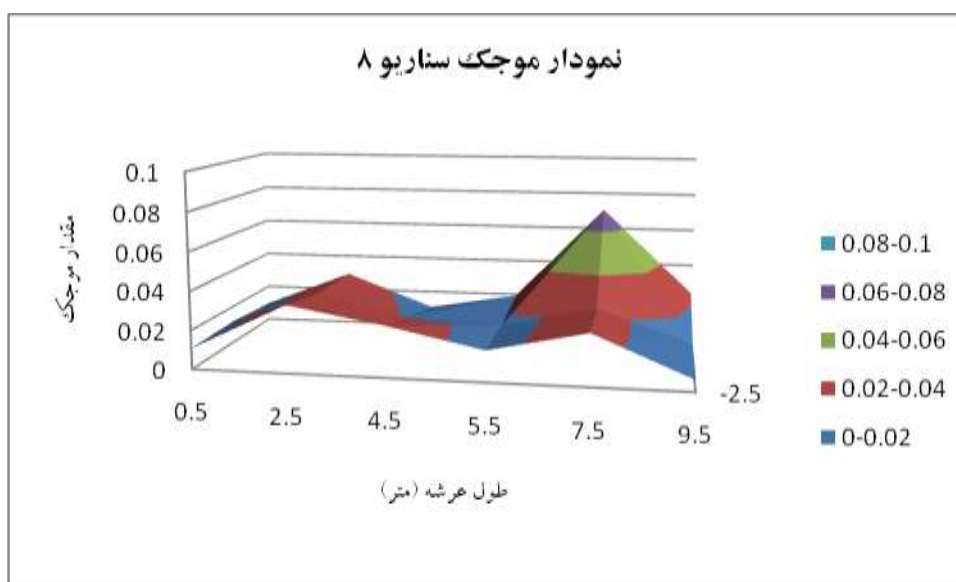
شکل ۹- نمودار تفاوت شاخص بعد آنالیز در سناریو ۵ حاصل تحریک بارگذاری



شکل ۱۰- نمودار تفاوت شاخص بعد آنالیز در سناریو ۶ حاصل تحریک بارگذاری



شکل ۱۱- نمودار تفاوت شاخص بعد آنالیز در سناریو ۷ حاصل تحریک بارگذاری



شکل ۱۲- نمودار تفاوت شاخص بعد آنالیز در سناریو ۸ حاصل تحریک بارگذاری

نمودارهای ۳ بعدی بالا در عرض و طول معادل شده با سطح عرشه پل می باشد آنالیزهای موجک حاصل از اختلاف میان سازه کنترلی و ۸ سناریو در جهت محور Z نمایش داده شده است. قله‌های ایجاد شده در نمودارها نشان دهنده خرابی در آن منطقه از پل می باشد که در گوشه ها این قله مرتفع تر می باشد. میان پل به دلیل وجود تیر میانی و افزایش سختی در وسط عرشه میزان ارتعاش پل کاهش یافته، همین امر باعث کاهش اختلاف قله‌ها و اختلال در شناسایی نقطه دقیق خرابی می شود.

شناسایی آسیب در سازه با آنالیز تاریخیچه زمانی، روش کاربردی و مناسب می باشد که با توجه به معرفی ۸ سناریو اولیه خرابی در نقاط مختلف تیر، شناسایی خرابی در سناریوهای گوشه نتایج خوبی را ارائه داد. با توجه به این که پل شامل دو دهانه می باشد و از طریق یک تیر و ستون این ۲ دهانه به هم متصل شده اند، سختی عرشه در میان آن به طور قابل ملاحظه ای افزایش یافته است. به همین دلیل سناریوهای اطراف تیر نتایج خوبی را در شناسایی محل خرابی ارائه نکرد.

در سناریوهای گوشه که شامل ۱،۴،۵،۸ می باشد در نمودار سطح دارای یک قله بزرگ نسبت به سایر نقاط می باشیم که اختلاف آن نسبت به دیگر نقاط حدود ۴۰ الی ۵۰ درصد می باشد این اختلاف یک ملاک شناسایی برای بیان خرابی در آن نقطه می باشد. همچنین این اختلاف بیان کننده وجود آسیب در سناریوهای گوشه می باشد. پس به عنوان یک اصل در شناسایی خرابی در عرشه پل های بتنی با تیر میان دهانه می توان بیان کرد که در صورت وجود اختلاف در میان نقاط مختلف، در صورتی که ماکسیمم مقدار این اختلاف با نقطه دیگر بیش از ۱۰ درصد باشد، منطقه اطراف آن نقطه را می توان به عنوان یک محل وجود آسیب بیان کرد.

روش موجک به خوبی آسیب ها را نمایش می دهد. اغلب روش های موجود که تا کنون در مقالات مختلف به آن ها پرداخته شده است، قادر به تشخیص آسیب و تا حدودی مکان آن بوده است. اما در اکثر روش های موجود، نیاز به انجام محاسبات خارج از محل است، در حالی که این روش قادر به تعیین محدوده آسیب به صورت پردازش داده ها به صورت آنلاین می باشد. از این رو می تواند جایگاه خوبی در حوزه مدیریت و سیستم پایش سلامت سازه داشته باشد.

مراجع

- [1] Lim, Hyun Woo. Experimental comparison of structural Damage Detection Methods. MSc thesis., Advanced Institute of Science and Technology, Department of civil and Environmental Engineering, Korea. 2004.
- [2] Shih, H.W. Damage assessment in structures using vibration characteristics. PhD Thesis., School Urban development Queensland University of Technology. 2009.
- [3] Li, X. Y., & Law, S. S. Damage identification of structures including system uncertainties and measurement noise. *AIAA Journal*. 2008.46: 263–276.
- [4] Wu, X., & Deng, Z. Modal parameters identification for flight vehicle based on the continuous wavelet transforms. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2008. 34: 778–781.
- [5] Rytter, A. Vibration based inspection of civil engineering structures. PhD thesis., Aalborg University, Aalborg, Denmark. 1993.
- [6] Farrar, C.R., and S.W. Doebling. Lessons learned from applications of vibration-based damage identification methods to a large bridge structure. *proceedings of the international workshop on structural Health Monitoring*. Stanford, CA, US: 1997. 351-370.
- [7] Savov, K., and H. Wenzel. System identification and damage detection using wavelet analysis: applications in frame structures. *1st International Operational Modal Analysis Conference*. Copenhagen. Denmark. 2005.
- [8] A.K. Peters. *The World According to Wavelets*. Wellesley. 1996.
- [9] Robi Polikar. August . The Wavelet Tutorial. Rowan University. <http://users.rowan.edu/~polikar/WAVELETS>. 2013. (accessed March, 2014)