

پایش سلامت ارزان قیمت پل‌ها به روش زمان-فرکانس با لحاظ کردن

اثر تغییرات بار ترافیک

مقاله پژوهشی

احسان درویشان*، استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن، ایران

*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: darvishan@riau.ac.ir

دریافت: ۹۸/۱۱/۰۸ - پذیرش: ۹۸/۰۴/۰۵

صفحه ۱۰۳-۸۹

چکیده

اگرچه تاکنون سیستم‌های پایش سلامت سازه پیشرفت‌های قابل توجهی کرده‌اند، با این حال بسیاری از این سیستم‌ها گران قیمت می‌باشند. سیستم‌های ارزان‌تر معرفی شده نیز دارای تعداد زیادی سنسور می‌باشند که به علت قیمت بالای سخت افزار، در کشور ما هنوز رایج نشده‌اند. لذا کاهش تعداد سنسورها می‌تواند گامی رو به جلو جهت کاربردی شدن این سیستم‌ها در کشور باشد. در این مقاله یک روش شناسایی خسارت ارزان قیمت بر مبنای پردازش سیگنال معرفی شده است. جهت شناسایی خسارت تنها از یک سنسور استفاده شده است. لذا از آنجا که کاهش تعداد سنسورها ممکن است از دقت روشهای شناسایی خسارت بکاهد، در ابتدا چند روش پردازش سیگنال سنتی و نوین مورد مطالعه قرار گرفته‌اند تا مناسب‌ترین روش یافت شود. سپس دو شاخص خسارت جدید بر مبنای پراکندگی فرکانسها ارائه شده‌اند. نوسانات شاخص خسارت تحت تغییرات بار عبوری با استفاده از تحلیل سری زمانی کاهش پیدا کرده است. در نهایت نیز یک معیار برای تفکیک حالت سالم و آسیب ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر فرکانس پارامتر مناسبی برای شناسایی خسارت نیست و به جای آن پراکندگی فرکانسها می‌تواند به عنوان جایگزین به کار رود.

واژه‌های کلیدی: شناسایی خسارت، بار ترافیک، پل یونگ، پردازش سیگنال، تحلیل سری زمانی

۱- مقدمه

جهت افزایش دقت از سیستمهایی استفاده می‌شود که دارای سنسورهای گران قیمت می‌باشند. به علاوه هزینه‌های کابل کشی این سیستمها نیز قابل توجه است. از طرف دیگر روشهای ارزان قیمت نیز عمدتاً بر دو دسته‌اند. روشهای مبتنی بر شبکه سنسورهای بیسیم و روشهای مبتنی بر سنسورهای ارزان قیمت. با این حال به علت گران بودن قیمت سخت افزار در ایران استفاده از این روشها در ایران بسیار محدود بوده است. چان و همکاران (Chan et al., 2001) با استفاده از داده‌های ثبت شده بر روی پل سینگما تغییرات پاسخ سازه را تحت اثر تغییرات سرعت، جهت و اغتشاش باد مورد بررسی قرار دادند. چن و همکاران

پل‌ها از جمله شریان‌های حیاتی می‌باشند که هزینه‌های بازرسی دوره‌ای و تعمیر و نگهداری آنها گاهاً حتی از هزینه ساخت آنها تجاوز می‌کند. لذا استفاده از روشهای پایش سلامت بر روی این سازه‌ها می‌تواند به نحو موثری از وقوع خسارت در سازه‌ها و به تبع آن هزینه‌های مربوطه بکاهد (Farrar and Doebling, 2001) در سالهای اخیر روشهای متعددی جهت پایش سلامت پلها ارائه شده‌اند. از آنجا که سازه‌های بزرگ دارای رفتار پیچیده‌ای هستند و عوامل محیطی مانند نویز، درجه حرارت، باد و بارگذاری می‌تواند به شدت بر روی خصوصیات ارتعاشی سازه اثر بگذارد و کار شناسایی خسارت را مشکل‌تر کند، عمدتاً

استفاده کردند. آنها آرایه‌ای از سنسورها را به کار بردند و از پایش داده های ثبت شده توانستند خسارت را شناسایی و محل آن را تشخیص دهند. میاشیتا و ناگای (Miyashita and Nagai., 2008) از سنسور از راه دور برای پل‌ها استفاده کردند. آنها از دو دسته سنسور جهت پایش سلامت یک پل کابلی استفاده کردند، دسته اول ارتعاش سنج‌های لیزری و دسته دوم سنسورهای ممز. آنها یک مدل جدید از سنسورهای ممز را معرفی کرده و صحت کارکرد آنها را بر روی پل مفروض مورد بررسی قرار دادند. ساباتو و همکاران (Sabato et al., 2017) یک مرور ادبیات بر سنسورهای ممز ساخته شده از سال ۲۰۰۶ انجام دادند. تمرکز آنها بر سنسورهایی بود که دارای فرکانس پایین هستند و برای سنجش ارتعاش سازه مناسب هستند. هدف از این پژوهش شناسایی خسارت ارزان قیمت پل‌های کابلی با در نظر گرفتن اثرات ناشی از تغییرات بار ترافیک است. برای این کار از روشهای پردازش سیگنال استفاده شده است. از آنجا که در این تحقیق تنها از خروجی‌های یک سنسور استفاده شده است، برای جلوگیری از کاهش دقت روش پیشنهادی، در ابتدا چند روش پردازش سیگنال دامنه زمان و زمان-فرکانس مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد آنها مقایسه شده است. سپس شاخص‌های خسارت جدیدی بر اساس پراکندگی فرکانس سازه معرفی شده‌اند. در مرحله بعد تغییرات شاخص خسارت تحت اثر تغییرات بار ترافیک با استفاده از روشهای تحلیل سری زمانی کاهش پیدا کرده‌اند. در نهایت نیز یک معیار برای تفکیک حالت سالم و خسارت سازه تعریف شده است.

۲- پردازش سیگنال

در این پژوهش کارایی سه روش پردازش سیگنال متفاوت با یکدیگر مقایسه شده است (یک روش سنتی و دو روش مدرن). ابتدا از روش تبدیل فوریه استفاده شده است. این روش یک روش سنتی پردازش سیگنال است و در بسیاری از مطالعات گذشته به کار رفته است. روش دوم روش تبدیل موجک فشرده است که به تازگی معرفی شده است و بسیاری از معایب تبدل موجک سنتی را رفع کرده است. روش سوم تبدیل هیلبرت هانگ است که یک روش آنی است. از میان این روشها روش اول دامنه فرکانس و دو

(Chen et al., 2014) یک سیستم پایش سلامت بر روی پل ژیبجیانگ نصب کردند. برنامه پایش سلامت آنها شامل پایش تغییرات باد و درجه حرارت بود. ژو همکاران (Xu et al., 2010) از تبدیل هیلبرت-هانگ برای شناسایی خسارت یک پل معلق در هنگ کنگ استفاده کردند. آنها یک سیستم پایش سلامت بر روی پل سینگما نصب کرده و با استفاده از سنسورهای جابجایی سنج و GPS سیستم را تحت بارهای ترافیک و باد پایش کردند. بانرجی و همکاران (Banerjee et al., 2015) اثر درجه حرارت و بارگذاری را بر روی یک سازه بتنی بررسی کردند. آنها با نصب سنسورهای پیزوالکتریک و سنجش امپدانس سنسورها دریافتند که طیف امپدانس سنسورها همبستگی خوبی با مقدار بار وارده نشان می‌دهد. اوبرتینی و همکاران (Ubertini et al., 2015) از تحلیل آماری چند متغیره جهت شناسایی خسارت در سازه تحت اثر تغییرات باد و بارگذاری استفاده کردند. آنها با در نظر گرفتن فرکانس طبیعی سازه به عنوان خصوصیت ارتعاشی سازه و بکارگیری آنالیز مولفه‌های اصلی توانستند خسارت را در سازه پیش بینی کنند. وانگ و همکاران (Wang et al., 2013) شبکه‌های سنسور بیسیم را بر روی یک پل نصب کردند. آنها از یک توپولوژی تقریباً خطی استفاده کردند تا تغییرات ارتعاش دینامیکی پل را رصد کنند. سیستم آنها قادر به پایش شتاب، جابجایی و کرنش در پل بود. ماکریس و همکاران (Makris et al., 2014) یک روش پایش سلامت سازه ارزان قیمت بر مبنای سنسورهای بیسیم ارائه کردند. آنها از اینترنت رایج خانگی برای انتقال داده‌های سنسورها به یک مرکز پایش سلامت استفاده کردند. بدین ترتیب امکان پایش تعداد زیادی سازه به این روش فراهم شد. نوئل و همکاران (Noel et al., 2017) یک مرور جامع بر روشهای مبتنی بر شبکه سنسور بیسیم انجام دادند. مرور آنها شامل الگوریتمهای شناسایی خسارت و محل آن، چالش‌های طراحی شبکه، و روند تحقیقات آتی بود. کیم و همکاران (Kim et al., 2013) یک سنسور ارزان قیمت جدید بر مبنای تکنولوژی ممز ساختند. آنها کارای سنسور خود را با یک سنسور رایج مقایسه کردند. لاندانو و همکاران (Londono et al., 2010) از سنسورهای دارای تکنولوژی ممز برای شناسایی خسارت یک سازه بنایی

$R(t, w)$ با بازتخصیص مقدار آن به یک مقدار دیگر در صفحه زمان-فرکانس است که با رفتار محلی (t', w') حول $R(t, w)$ تعیین می‌شود (Daubechies et al., 2011). برای فشرده سازی ابتدا از تعریف تبدیل موجک پیوسته W_s سیگنال S استفاده می‌کنیم.

روش دیگر دامنه زمان-فرکانس است. بدین ترتیب سه روش با مکانیزم‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته اند. در ادامه این روشها شرح داده شده‌اند. جهت اختصار از توضیح روش تبدیل فوریه صرف نظر شده است.

۱-۲- تبدیل موجک فشرده

فشرده سازی اولین بار برای پردازش سیگنالهای صوتی ارایه شد که هدف آن واضح‌تر کردن شکل زمان-فرکانس

$$= \int s(t) a^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt$$

که ψ شکل موجک مادر بوده و $W_s(a, b)$ را بازتخصیص می‌دهد تا شکل زمان-فرکانس ایجاد شود و از روی آن خطوط فرکانس استخراج شوند. در ابتدا از یک تابع هارمونیک خالص شروع می‌کنیم.

$$s(t) = A \cos(\omega t)$$

با اعمال تبدیل موجک ψ که بر محور مثبت فرکانس متمرکز شده است: برای $\xi < 0$ $\hat{\psi}(\xi) = 0$. طبق قضیه پلانچرل، می‌توان $W_s(a, b)$ به شکل زیر بازنویسی کرد.

$$\begin{aligned} W_s(a, b) &= \frac{1}{2\pi} \int \hat{s}(\xi) a^{1/2} \hat{\psi}(a\xi) e^{ib\xi} d\xi \\ &= \frac{A}{4\pi} \int [\delta(\xi - \omega) + \delta(\xi + \omega)] a^{1/2} \hat{\psi}(a\xi) e^{ib\xi} d\xi \\ &= \frac{A}{4\pi} a^{1/2} \hat{\psi}(a\omega) e^{ib\omega} \end{aligned} \quad (3)$$

اگر $\hat{\psi}(\xi) = \omega_0$ حول $W_s(a, b)$ متمرکز شده باشد آن گاه $a = \omega_0 / \omega$ متمرکز خواهد شد. با این حال تبدیل موجک $W_s(a, b)$ در یک محدوده حول خط افقی $a = \omega_0 / \omega$ در صفحه زمان-مقیاس گسترده خواهد شد. اگرچه $W_s(a, b)$ در a گسترده می‌شود رفتار نوسانی آن در نقاط b در فرکانس اصلی ω (فارغ از مقدار a) خواهد بود. لذا می‌توان برای هر (a, b) که در آن $W_s(a, b) \neq 0$ است یک فرکانس $\omega_s(a, b)$ به عنوان کاندید برای سیگنال S انتخاب کرد.

$$\omega_s(a, b) = -i(W_s(a, b))^{-1} \frac{\partial}{\partial b} W_s(a, b) \quad (4)$$

برای یک سیگنال کاملاً هارمونیک $s(t) = A \cos(\omega t)$ مقدار $\omega_s(a, b) = \omega$ بدست می‌آید. برای سادگی وقتی انتظار می‌رود هیچ اعوجاجی رخ ندهد وابستگی به S از بین می‌رود. لذا $\omega(a, b) = \omega_s(a, b)$.

۲-۲- روش تجزیه تجربی مودی

۲- از مقادیر ماکزیمم داده‌ها یک منحنی spline عبور داده می‌شود. این کار بار دیگر برای مقادیر مینیمم محلی تکرار می‌شود تا منحنی‌های پوش بالا و پوش پایین داده بدست آیند.

۳- میانگین این دو منحنی، m_1 محاسبه شده و از سیگنال اصلی کسر گردد تا مؤلفه اول، h_1 ، بدست آید.

روش تجزیه تجربی مودی یک روش تجربی برای استخراج مؤلفه‌های یک سیگنال است. این روش قادر است یک سیگنال اختیاری را به ترکیبی از توابع مودی ذاتی تجزیه کند. عملیات تجزیه سیگنال در این روش با استفاده از پروسه الگ کردن صورت می‌گیرد که شامل مراحل زیر است (Huang et al., 1998)

۱- اولین مرحله شامل پیدا کردن اکسترمم‌های محلی داده است.

$$h_1 = x(t) - m_1 \quad (5)$$

۴- برای ارضای دو شرط بالا پروسه فوق مجدداً به تعداد k بار تکرار می شود.

$$h_k = h_{(k-1)} - m_k \quad (6)$$

۵- در هر تکرار یک معیار توقف کنترل می شود. در صورت ارضای این معیار عملیات فوق متوقف می شود.

$$SD = \sum_{t=0}^T \left[\frac{h_{(k-1)}(t) - h_k(t)}{h_{(k-1)}(t)} \right]^2 \quad (7)$$

۶- آخرین مؤلفه ای که از پروسه فوق بدست می آید به عنوان اولین IMF در نظر گرفته می شود. به این پروسه اصطلاحاً الگ کردن می گویند.

$$h_k = c_1 \quad (8)$$

۷- باقیمانده از کسر IMF اول از سیگنال اصلی بدست می آید.

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (9)$$

۳- تحلیل سری های زمانی

برای داده‌های سری زمانی به صورت x_t مدل آرما ابزاری برای پیش بینی مقادیر آتی چنین سری‌هایی است. این مدل شامل دو بخش خود همبسته به اختصار (AR) و میانگین متحرک به اختصار (MA) است. فرم کلی این مدل‌ها بر اساس داده های قبلی به شکل زیر است (Box et al., 1994)

۸- مجدداً باقی مانده به عنوان سیگنال اصلی در نظر گرفته شده و عملیات مراحل ۱ الی ۷ تکرار می شود تا IMF های بعدی به همین ترتیب محاسبه شوند. این عملیات تا زمانی ادامه می یابد که عملیات الگ کردن دیگر مقدور نباشد و یا باقیمانده از یک حد از پیش تعیین شده کمتر شود. این روش با تلفیق روش تبدیل هیلبرت قادر به محاسبه فرکانس آنی یک سیگنال می باشد.

$$x_t = \alpha_1 x_{t-1} + \dots + \alpha_p x_{t-p} + z_t \quad (10)$$

$$x_t = \sum_{i=1}^p \alpha_i x_{t-i} + z_t$$

که در آن β_i مقادیر وزن متغیرها و z_t مقدار خطای باقیمانده می باشد. در یک مدل درجه ۱، $p=1$ مقادیر x در زمان t تنها با مقدار قبلی آن تعیین می شود

$$x_t = \alpha x_{t-1} + z_t \quad (11)$$

$$x_{t-1} = \alpha x_{t-2} + z_{t-1}$$

...

اگر رابطه (۵) در رابطه (۶) جایگزین شود خواهیم داشت:

$$x_t = \alpha (\alpha x_{t-2} + z_{t-1}) + z_t \quad (12)$$

$$x_t = \alpha^2 x_{t-2} + \alpha z_{t-1} + z_t$$

و با تکرار این جایگزاری:

$$x_t = \alpha^k x_{t-k} + \alpha^{k-1} x_{t-k+1} + \dots + \alpha z_{t-1} + z_t \quad (13)$$

$$x_t = \sum_{i=1}^k \alpha^i x_{t-i} + z_t$$

اگر ترکیب رابطه فوق با ترتیب برعکس نوشته شود، روند این عبارت به صورت نزولی خواهد بود. لذا عبارت فوق به سرعت کاهش می یابد. لذا می توان نوشت.

$$x_t = z_t + \alpha z_{t-1} + \dots + \alpha^{k-1} x_{t-k+1} z + \alpha^k x_{t-k} \quad (14)$$

$$x_t = \sum_{i=0}^{\infty} \alpha^i z_{t-i}$$

لین عبوری وسایل نقلیه و ۲ در ۱ متر پیاده رو). برج بتنی پل شامل دو تیر عمودی به ارتفاع ۶۰٫۵ متر است. پس از گذشت ۱۹ سال از عمر پل، ترک هایی به عرض ۲۵ سانتیمتر در دهانه مرکزی و در زیر شاهتیر اصلی مشاهده شد. پس از آسیب به عنوان بخشی از سیستم پایش سلامت، بیش از ۱۵۰ سنسور بر روی کابل ها، برج و شاهتیرها نصب شد. در اتاق کنترل نیز یک سیستم جمع آوری داده برقرار شد. ۱۴ سنسور تک محوره بر روی عرشه نصب شد و یک سنسور دو محوره بر روی برج جنوبی نصب شد تا ارتفاعات افقی را ثبت کند (Li et al., 2014). شکل های (۱) و (۲) نمایی از پل و سیستم پایش سلامت آن را نشان می دهد. شکل (۳) مقطع هندسه پل را نشان می دهد.

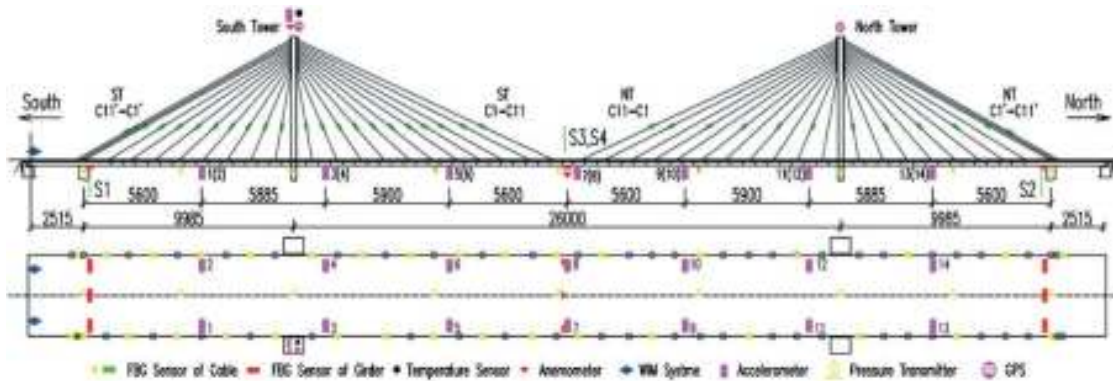
عبارت فوق را می توان به درجات بالاتر نیز تعمیم داد. برای برازش یک مدل به داده واقعی می توان خطای مجموع مربعات را مینیمم کرد. با این حال ممکن است برای یک برازش مناسب نیاز به عبارات زیادی باشد. لذا معمولاً این مدل را به صورت ترکیبی با مدل های میانگین متحرک ترکیب می کنند تا مدل های ترکیبی حاصل شود.

۴- سازه مورد مطالعه

در این پژوهش از سازه پل یونگ برای شناسایی آسیب استفاده شده است. این پل جزو اولین پل های کابلی است که در مرکز کشور چین ساخته شده است و دارای دهانه مرکزی به طول ۲۵٫۱۵+۹۹٫۸۵ متر و دهانه های کناری به طول ۲۵٫۱۵+۹۹٫۸۵ متر است. طول پل ۵۱۰ متر و عرض آن ۱۱ متر است (۹ متر



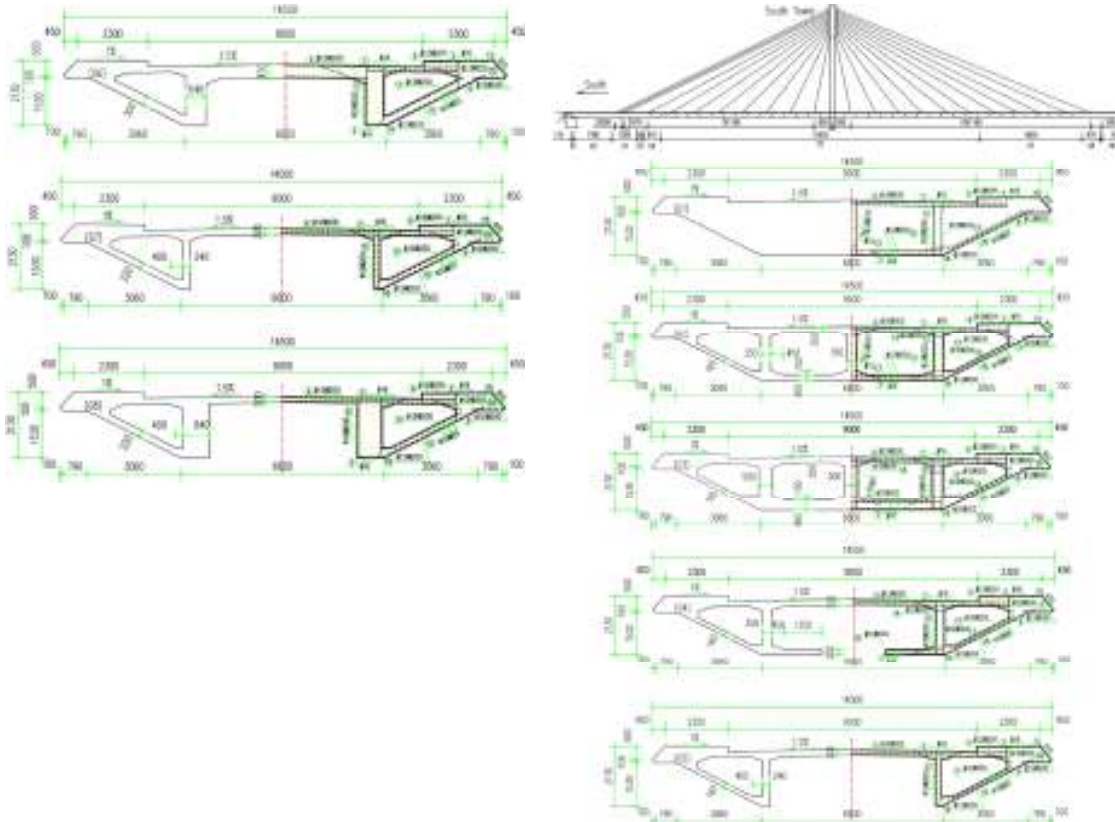
شکل ۱. نمایی از پل یونگ (Li et al., 2014)



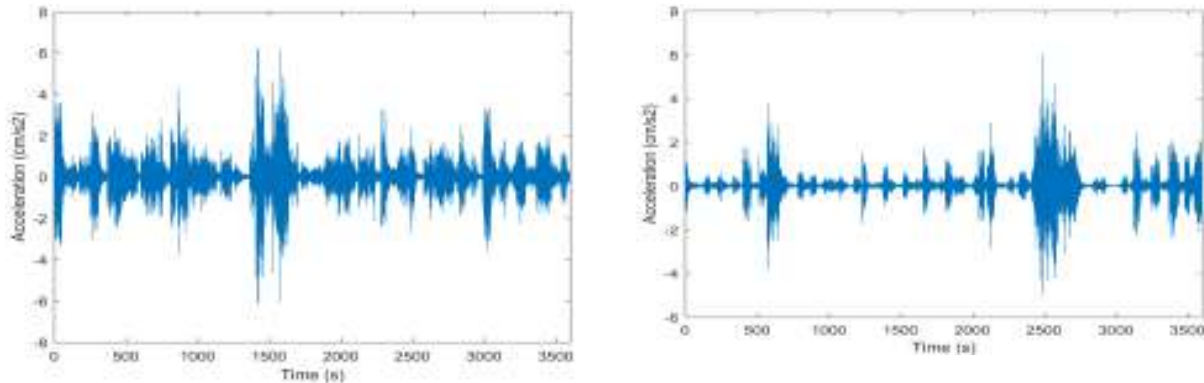
شکل ۲. پیکربندی سنسورها (Kaloop and Hu, 2015)

رفتار پل در این دو حالت استفاده کرد. از طرفی در این تحقیق هدف کاهش قیمت پایش سلامت سازه است. لذا به جای استفاده از هر ۱۴ سنسور موجود بر روی عرشه تنها یک سنسور مورد استفاده قرار گرفته است (سنسور شماره ۷). انتخاب این سنسور بر این مبنای است که در محل این سنسور عرشه پل دارای بیشتری تغییر مکان مودال در مود اول است. شکل (۳) نمونه‌ای از رکوردهای ثبت شده را نشان می‌دهد.

داده‌های شتاب ارتعاش سازه که توسط سنسورها ثبت می‌شود در هر ساعت ذخیره شده است. لذا در کل طول شبانه روز ۲۴ داده یک ساعته موجود است. نرخ نمونه برداری سنسورها ۱۰۰ هرتز است. برای استفاده در آنالیزهای بعدی داده موجود، داده ژانویه ۲۰۰۸ به عنوان حالت سالم و داده ۳۱ جولای ۲۰۰۸ به عنوان حالت آسیب دیده پل در نظر گرفته شده است. بر این اساس حالت سالم و آسیب دیده پل از قبل مشخص بوده و می‌توان از این داده‌ها جهت مقایسه



شکل ۳. مشخصات مقطع عرضی پل (Khaloo and Hu, 2015)



الف) حالت سالم

ب) حالت آسیب

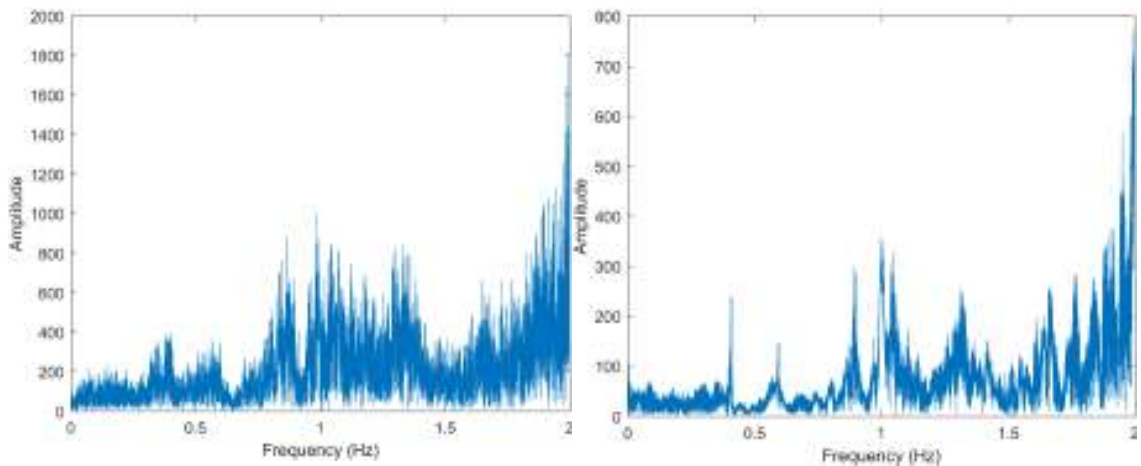
شکل ۴. شتاب پاسخ سازه در حالت های سالم و آسیب

۵- تحلیل فرکانسی

۵-۱- تبدیل فوریه

سازه به ترتیب برابر ۰٫۴۱، ۰٫۸۹ و ۱٫۴۷ هرتز به دست می‌آیند. در ساعت ۳:۴ فرکانس مود اول سازه به خوبی مشخص نمی‌باشد. در محدوده این مود، سه قله با فرکانس‌های ۰٫۳۳، ۰٫۳۷ و ۰٫۴۰ موجود است. در ضمن یک مود ارتعاش با فرکانس ۱٫۰۲ به طیف فوریه اضافه شده است. در ساعت ۲۳:۲۴ مود اول و دوم سازه به خوبی قابل تشخیص نیست.

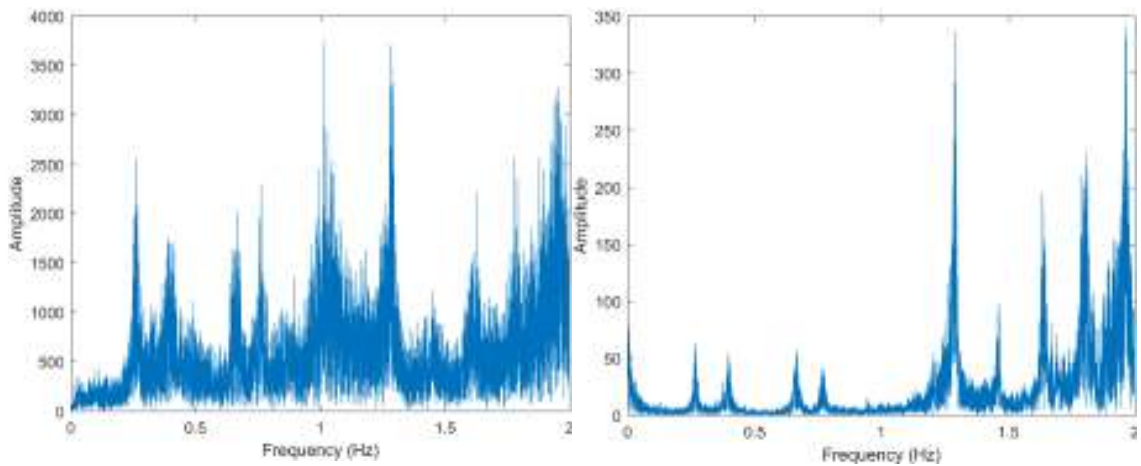
از آنجا که تبدیل فوریه یکی از پرکاربردترین روشهای پردازش سیگنال است و بسیاری از روشهای دیگر بر اساس آن ساخته شده‌اند، در ابتدا طیف‌های فوریه شتاب ثبت شده توسط سنسور ۷ برای ساعت‌های مختلف بدست آمده است. به عنوان نمونه، شکل (۵) نمودار طیف فوریه سنسورها را برای ساعات ۱:۲ و ۲۳:۲۴ در حالت سالم نشان می‌دهد. قابل مشاهده است که تغییرات فرکانسها در ساعات مختلف قابل ملاحظه است. به طور مثال در ساعت ۱:۲ سه فرکانس اول



ب) ساعت ۲۳:۲۴

الف) ساعت ۱:۲

شکل ۵. طیف فوریه حالت سالم در ساعات مختلف



ب) ساعت ۲۳:۲۴

الف) ساعت ۱:۲

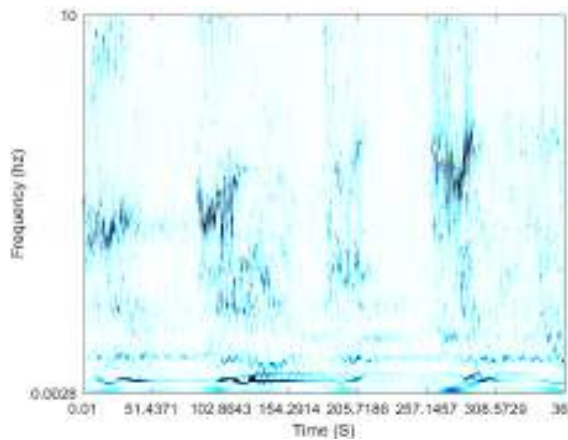
شکل ۶. طیف فوریه حالت آسیب در ساعات مختلف

رصد کند در این بخش از روش SWT استفاده شده است که یک تبدیل دامنه-زمان-فرکانس است. مزیت استفاده از SWT نسبت به تبدیل موجک پیوسته سنتی وضوح بسیار بالاتر آن است که باعث می شود دقت شناسایی تغییرات فرکانس بالاتر رود. با توجه به زمان بر بودن آنالیز، سیگنال به قطعات ۳۶۰ ثانیه‌ای تقسیم شده است. شکل (۷) نمودار زمان فرکانس سنسور ۷ را در حالت سالم نشان می دهد. سه فرکانس ۰,۳۶، ۰,۴۷ و ۰,۹۹ هرترز در شکل قابل مشاهده است. شکل (۸) نمودار زمان فرکانس را در حالت آسیب نشان می دهد. مطابق شکل سه فرکانس در محدوده تقریبی ۰,۲۶، ۰,۵۷ و ۰,۹۸ قابل مشاهده است. با این حال اگرچه روش SWT نسبت به روش تبدیل موجک سنتی دارای وضوح بالاتری است، ولی به طور دقیق نمی توان فرکانسها را مشخص کرد (به همین دلیل در بخش بعد از تبدیل HHT استفاده شده است). از طرف دیگر از آنجا که مقادیر فرکانسها دارای نوساناتی است و فرکانسها در حالت سالم و آسیب بسیار به یکدیگر نزدیک اند. امکان تفکیک حالت سالم و آسیب با اطمینان بالا میسر نیست. لذا به این روش نیز مقادیر فرکانس پارامترهای مطمئنی برای شناسایی آسیب نمی باشند.

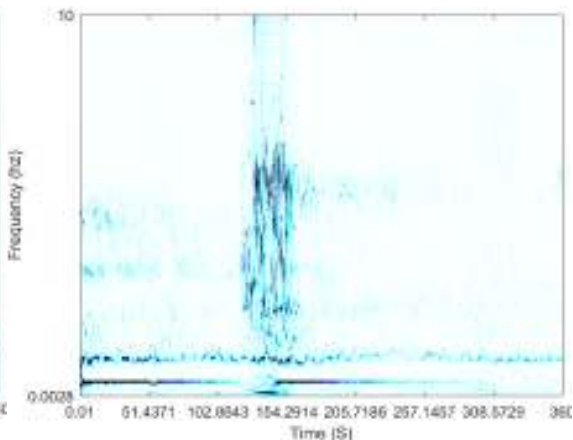
شکل (۶) طیف فوریه را در حالت آسیب نشان می دهد. مطابق شکل به علت ایجاد خسارت در سازه فرکانسها جابجا شده اند به طوری که فرکانسهای مود اول تا سوم به ترتیب در ۰,۲۶، ۰,۳۹ و ۰,۶۶ رخ می دهند. با این حال مقایسه ساعت ۱:۲ و ۲۳:۲۴ نشان می دهد که در بارگذاریهای مختلف فرکانس کاری سازه تغییر می کند. به طور مثال در ساعت ۲۳:۲۴ یک مود ارتعاش در ۱,۰۱ هرترز وجود دارد که در ساعت ۱:۲ قابل مشاهده نیست. مقایسه فوق نشان می دهد که تغییرات شدت بار ترافیک عبوری باعث می شود مودهای ارتعاش مختلفی از سازه فعال شوند. به طور مثال در ساعت ۲۳:۲۴ که شدت بار عبوری از ساعت ۱:۲ بیشتر است شاهد ارتعاش قابل توجه سازه در محدوده فرکانس ۰,۲ تا ۰,۶ و ۰,۹ تا ۱,۳ هستیم. نتایج فوق نشان می دهد که روش فوریه برای بار ترافیک سبک دارای دقت قابل قبولی است ولی در بارگذاریهای سنگین شناسایی دقیق فرکانسها مشکل تر می شود. به طور کلی می توان گفت که به علت پیچیدگی رفتار سازه و ارتعاش آن در مودهای نزدیک به یکدیگر، استفاده از فرکانس طیف فوریه با مشکلاتی همراه است. برای حل این مشکل در مرحله بعد از روشهای زمان فرکانس استفاده شده است.

۵-۲- تبدیل موجک فشرده

با توجه به این که تبدیل فوریه فرکانس را تنها در دامنه زمان ارائه می دهد و نمی تواند تغییرات سیگنال را در طول زمان

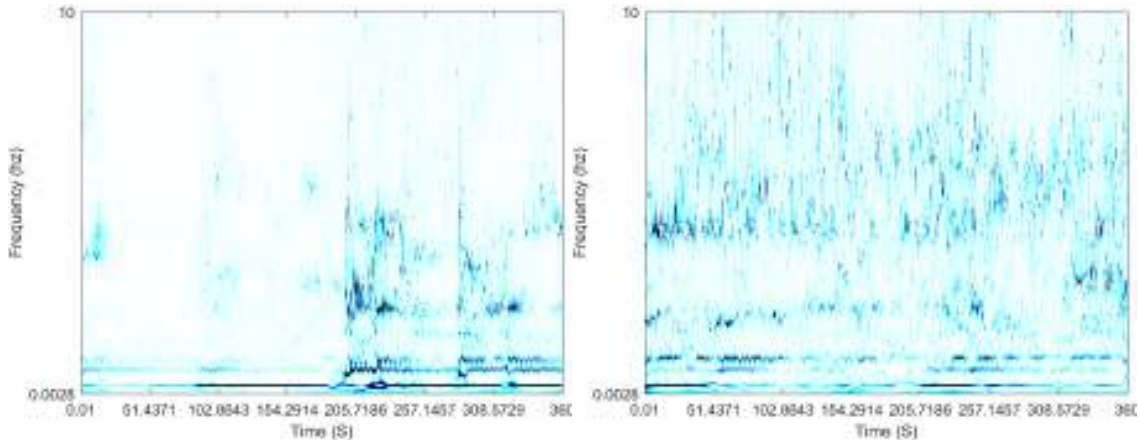


ب) قطعه ۱۰۰



الف) قطعه ۱

شکل ۷. نمودار زمان-فرکانس به روش SWT در حالت سالم

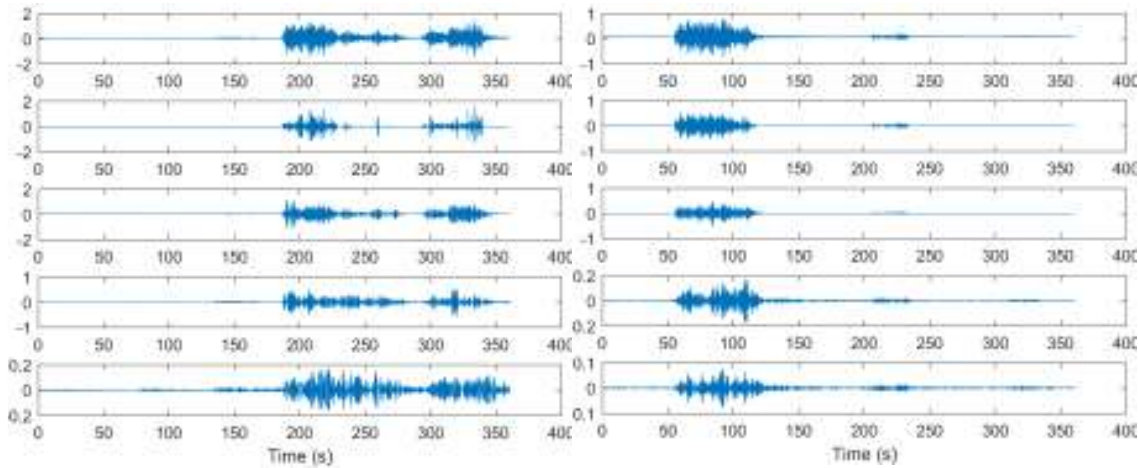


الف) قطعہ ۱
ب) قطعہ ۱۰۰
شکل ۸. نمودار زمان-فرکانس به روش SWT در حالت آسیب

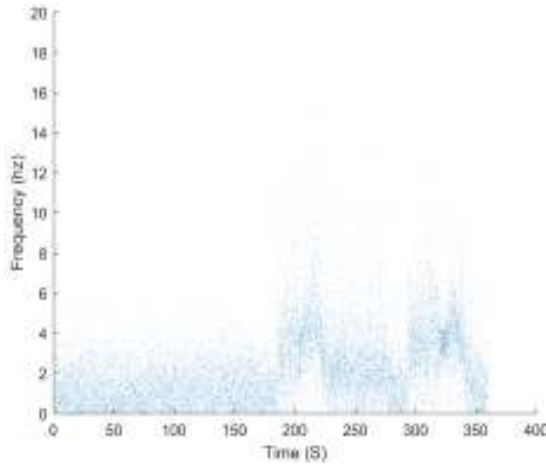
۵-۳- تبدیل هیلبرت هانگ

تبدیل هیلبرت هانگ فرکانسها استخراج شده‌اند. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) فرکانس ارتعاش سازه را نشان می‌دهند. بر خلاف انتظار روش HHT نمی‌تواند فرکانسهای ارتعاش را با وضوح بالا نشان دهد. فرکانس‌ها در بازه ۲ الی ۴ هرتز پراکنده‌اند و فرکانس مشخصی از ارتعاش قابل تشخیص نمی‌باشد. لذا عملاً با این روش نیز نمی‌توان تغییرات فرکانس را به عنوان شاخص خسارت تلقی کرد.

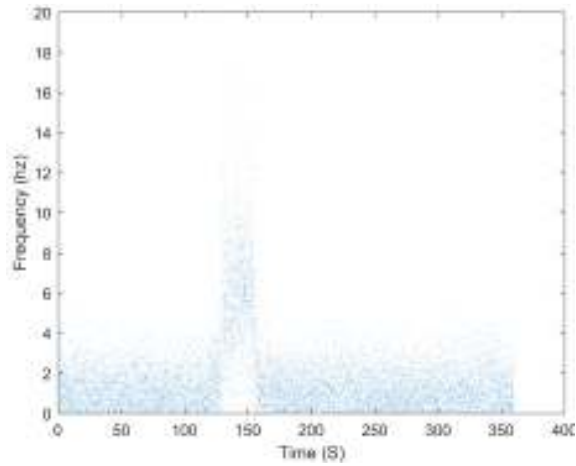
یکی از نقاط ضعف روش تبدیل موجک شکل ثابت تابع موجک است که باعث می‌شود این روش نتواند به صورت لحظه‌ای سیگنال را رصد کند و وضوح فرکانس‌ها پایین باشد. لذا در این بخش از تبدیل HHT استفاده شده است که یک روش زمان فرکانس آنی است. ابتدا به روش EMD سیگنال تجزیه شده است. شکل (۹)، ۵ مود اول تجزیه شده را در حالت سالم نشان می‌دهد. در مرحله بعد با استفاده از



الف) قطعہ ۱
ب) قطعہ ۱۰۰
شکل ۹. تجزیه مودها توسط روش EMD

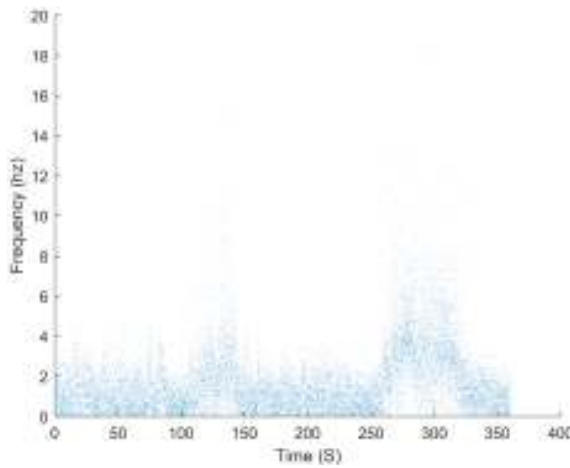


ب) قطعه ۱۰۰

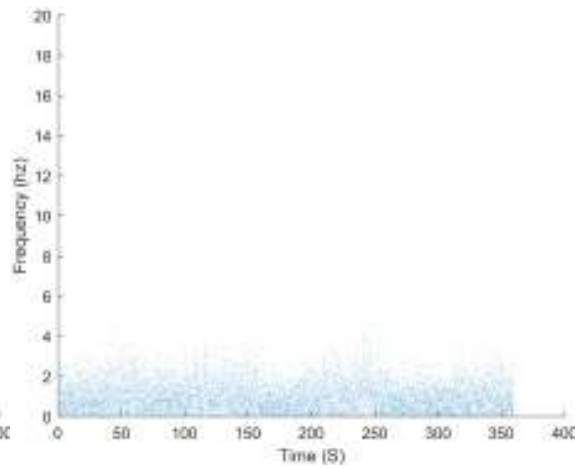


الف) قطعه ۱

شکل ۱۰. نمودار زمان فرکانس به روش HHT در حالت سالم



ب) قطعه ۱۰۰



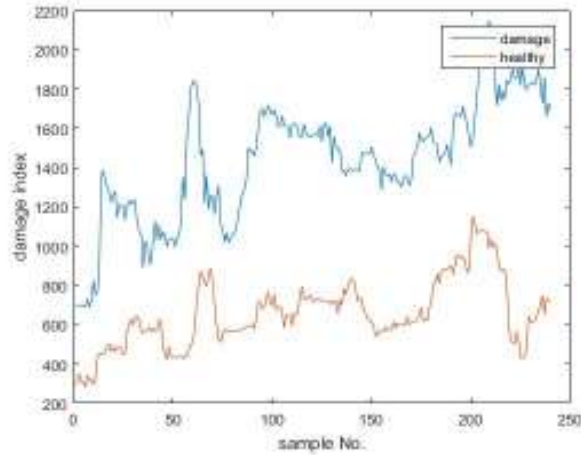
الف) قطعه ۱

شکل ۱۱. نمودار زمان فرکانس به روش HHT در حالت آسیب

۶- شاخص خسارت

(۸) به نظر می‌رسد که در حالت آسیب پراکندگی فرکانس‌ها بالاتر است. در ادامه یک شاخص خسارت به صورت مجموع فرکانس‌های دور از مرکز به صورت مجموع ضرایب موجک که از میانگین به علاوه یک انحراف معیار بزرگترند تعریف شده است. شکل (۱۲) شاخص خسارت را در دو حالت سالم و آسیب برای قطعات مختلف سیگنال نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست حالت آسیب به خوبی قابل مشاهده است. با این حال نوسانات شاخص قابل ملاحظه است که تفکیک دو حالت را مشکل می‌کند.

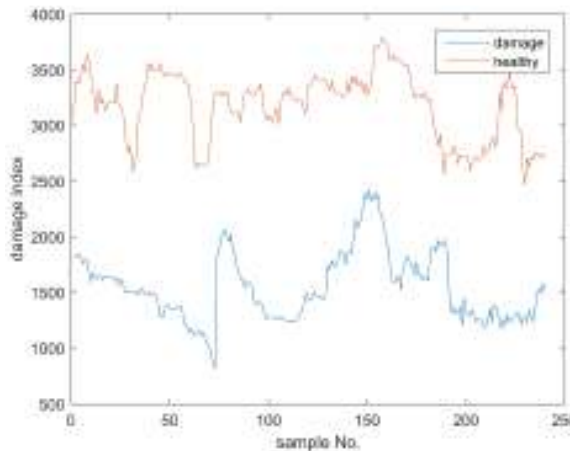
در بخش قبل مشخص شد که اگرچه با به کارگیری روشهای با وضوح فرکانسی بالاتر دقت استخراج فرکانسها بالاتر می‌رود. ولی خصوصیات آنی این روشها باعث می‌شود پراکندگی نتایج نیز بالا رود. به خصوص در مورد روش HHT که یک روش پردازش آنی است این پدیده مشهودتر است. با این حال از نتایج می‌توان دریافت که این پراکندگی در حالت‌های سالم و آسیب متفاوت است. لذا در ادامه دو شاخص خسارت جدید بر اساس پراکندگی فرکانسها ارایه شده است. برای روش SWT با توجه به شکل‌های (۷) و



شکل ۱۳. شاخص خسارت بر مبنای تبدیل موجک فشرده

فرکانسها برای شناسایی آسیب دشوار است ولی پراکندگی فرکانسها معیار مناسبی جهت تفکیک دو حالت سالم و آسیب است. با این حال قابل مشاهده است که شاخصهای آسیب نیز دارای نوساناتی هستند. لذا جهت پایش این نوسانات نیاز به پردازشهای ثانویه می باشد.

برای روش HHT شاخص خسارت به صورت تعداد فرکانسهای دور از مرکز به صورت فرکانسهایی که از میانگین به علاوه یک انحراف معیار بزرگترند تعریف شده است. در این حالت نیز شاخص خسارت می تواند به خوبی آسیب را از حالت سالم تشخیص دهد (شکل ۱۳). بر این اساس می توان مشاهده کرد که اگرچه استفاده از خود



شکل ۱۳. شاخص خسارت با روش هیلبرت هانگ

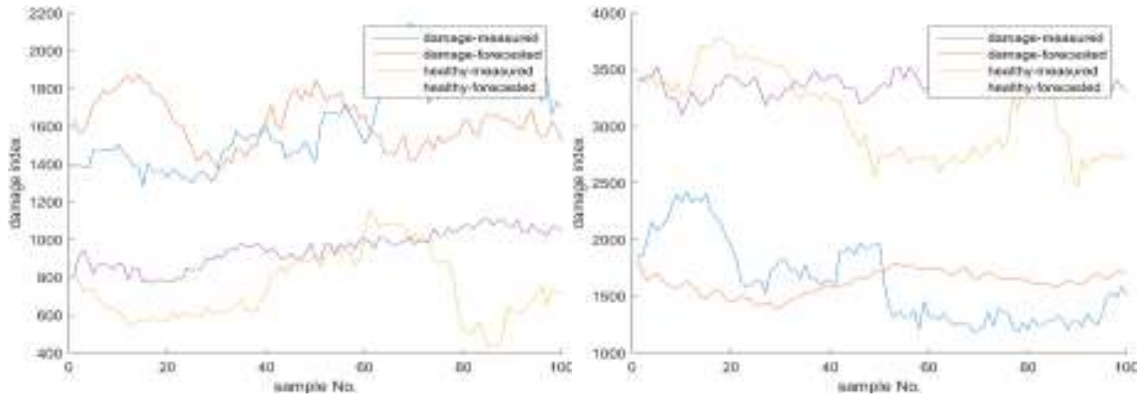
پایش تغییرات شاخص خسارت

استفاده کرد. از طرفی به علت رفتار غیرخطی داده ها استفاده از پارامترهای رایج آماری با تقریب همراه خواهد بود. برای رفع مشکلات فوق از تحلیل سری های زمانی به روش مدل های خود همبسته استفاده شده است. در ادامه از یک مدل خود همبسته میانگین متحرک (آرما) استفاده شده است. در اینجا از این مدل جهت کاهش نوسانات مقادیر شاخص ها استفاده شده است. ۱۴۰ داده برای تمرین مدل و

شاخص های خسارت بدست آمده اگرچه به خوبی می توانند حالت سالم و آسیب را از هم تفکیک کنند، ولی دارای نوسانات بسیاری هستند که ممکن است باعث شود تغییرات این شاخص ها تحت حالت سالم به اشتباه به عنوان آسیب تلقی شود و یا حالت آسیب شناسایی نشود. ضمناً وجود یک روند افزایشی یا کاهش در داده ها باعث می شود که نتوان با دقت قابل قبول از میانگین داده ها به عنوان شاخص نهایی

بینی شده با استفاده از یک فیلتر میانگین متحرک هموار شده‌اند تا نوسانات باز هم کاهش پیدا کند. از فیلترهای میانگین متحرک جهت کم رنگ کردن نوسانات کوتاه مدت سری زمانی و نمایان کردن رفتار بلند مدت تر آن استفاده می شود. از ۵ داده برای هموار کردن داده‌ها استفاده شده است. در شکل (۱۵) مقادیر هموار شده شاخص خسارت نشان داده شده‌اند.

۱۰۰ داده برای صحت سنجی استفاده شده است. شکل (۱۴) نمودار شاخص خسارت را برای دو حالت مقادیر واقعی و مقادیر پیش بینی شده برای ۱۰۰ داده نشان می‌دهد. همان طور که از شکل پیدا است مقادیر پیش بینی شده دارای نوسان کمتری است و روند داده‌ها کاهش پیدا کرده است. لذا بدین ترتیب امکان تفکیک دو حالت سالم و آسیب با اطمینان بیشتری انجام خواهد شد. در مرحله بعد مقادیر پیش



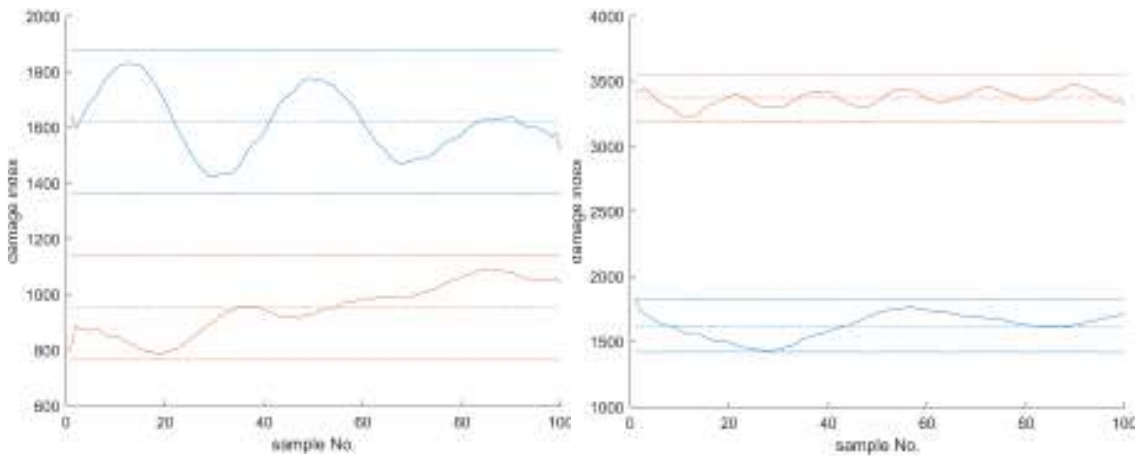
ب) شاخص تبدیل موجک فشرده

الف) شاخص تبدیل هیلبرت هانگ

شکل ۱۴. تغییرات مقادیر شاخص خسارت واقعی و پیش بینی شده

تعریف شده است. شکل (۱۵) بازه شاخص خسارت را نشان می‌دهد. مطابق شکل هر دو روش توانسته‌اند به درستی حالت سالم و آسیب را از هم تفکیک کنند. با این حال روش مبتنی بر HHT دارای حاشیه اطمینان بیشتری برای تفکیک این دو حالت است.

اگرچه نوسانات مقادیر شاخص خسارت با روشهای فوق بسیار کاهش پیدا کرده است، این مقادیر کماکان دارای نوساناتی است. جهت تعیین یک مقدار کمی برای شاخص خسارت، مقادیر میانگین و انحراف معیار داده‌ها محاسبه شده اند. لذا برای هر حالت یک بازه در محدوده میانگین منهای دو انحراف معیار و میانگین به علاوه دو انحراف معیار



ب) شاخص تبدیل موجک فشرده

الف) شاخص تبدیل هیلبرت هانگ

شکل ۱۵. مقایسه محدوده سالم و آسیب

۵- نتیجه گیری

Applied and computational harmonic analysis. 1; 30(2), pp.243-261.

-Farrar C.R., Doebling S.W., Nix D.A., (2001), "Vibration-based structural damage identification, Philosophical Transaction of the Royal Society London A", 359(1778), pp.131-149.

-Ha, D. W., Park, H. S., Choi, S. W., & Kim, Y., (2013), "A wireless MEMS-based inclinometer sensor node for structural health monitoring. Sensors", 13(12), pp.16090-16104.

-Hu, X., Wang, B., & Ji, H., (2013), "A wireless sensor network based structural health monitoring system for highway bridges. Computer Aided Civil and Infrastructure Engineering", 28(3), pp.193-209.

-Huang N.E., Shen Z., Long S.R., Wu M.C., Shih H.H., Zheng Q., Yen N.C., Tung C.C. and Liu H.H., (1998), "The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Nonstationary Time Series Analysis", Proceeding of the Royal Society London, A: 454, pp.903-995.

-Kaloop, M. R., & Hu, J. W., (2015), "Stayed-cable bridge damage detection and localization based on accelerometer health monitoring measurements", Shock and Vibration, Article ID 102680.

-Li S, Li H, Liu Y, Lan C, Zhou W, Ou J., (2014), "SMC structural health monitoring benchmark problem using monitored data from an actual cable stayed bridge. Structural Control and Health Monitoring, 1; 21(2), pp.156-72.

-Londoño J. M., Serino G., Amura E., Autiero M., (2010), "Use of MEMS-based sensors for local damage detection and monitoring", 5th European Workshop on Structural Health Monitoring Naples, Italy.

-Miyashita, T., & Nagai, M., (2008), "Vibration-based structural health monitoring for bridges using laser Doppler vibrometers

در این مقاله یک روش برای پایش سلامت پل‌های کابلی بر اساس ادغام دو روش پردازش سیگنال و تحلیل سری‌های زمانی ارائه شد. ابتدا سه روش پردازش سیگنال در دامنه زمان و دامنه فرکانس مورد بررسی قرار گرفتند. سپس شاخص‌های خسارت جدیدی بر اساس پراکندگی فرکانس‌ها تعریف شدند. در نهایت نیز یک بازه شاخص خسارت به صورت کمی تعریف شد. نکته حائز اهمیت آن است که با استفاده از تنها یک سنسور خسارت در سازه به درستی تشخیص داده شد. به طور خلاصه نتایج حاصل از تحلیل نشان می‌دهد.

۱- روش تبدیل فوریه تحت بارگذاری‌های با شدت بالا نمی‌تواند به خوبی مدهای ارتعاش را از یکدیگر تفکیک کند. لذا روشهای زمان فرکانس در شناسایی فرکانس‌ها دارای مزیت نسبی هستند.

۲- تغییرات فرکانس ارتعاش سازه معیار مناسبی برای شناسایی خسارت نیست. مقادیر فرکانس تحت اثر بارگذاری‌های مختلف تغییر کرده و شناسایی خسارت را دشوار می‌کند. به جای فرکانس پراکندگی فرکانس‌ها معیار مناسب تری جهت شناسایی خسارت است.

۳- شاخص خسارت مبتنی بر HHT دارای حاشیه اطمینان بیشتری جهت تفکیک دو حالت سالم و خسارت است. لذا این روش دارای قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به روش مبتنی SWT است.

۶- مراجع

-Box G. E., Jenkins G. M., and Reinsel G. C., (1994), "Time Series Analysis: Forecasting and Control, third edition", Prentice-Hall.

-Chen, B., Wang, X., Sun, D., & Xie, X., (2014), "Integrated system of structural health monitoring and intelligent management for a cable-stayed bridge", The Scientific World Journal, Article ID 689471.

-Comanducci, G., Ubertini, F., & Materazzi, A. L., (2015), "Structural health monitoring of suspension bridges with features affected by changing wind speed", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 141, pp.12-26.

-Daubechies I, Lu J, Wu HT., (2011), "Synchrosqueezed wavelet transforms: An empirical mode decomposition-like tool,

-Wong, K. Y., Chan, W. Y. K., Man, K. L., (2001), "Monitoring of wind load and response for cable-supported bridges in Hong Kong", Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering.

-Xu, D., Banerjee, S., Wang, Y., Huang, S., & Cheng, X. (2015). Temperature and loading effects of embedded smart piezoelectric sensor for health monitoring of concrete structures. *Construction and Building Materials*, 76, pp.187-193.

-Xu, Y. L., Chen, B., Ng, C. L., Wong, K. Y., & Chan, W. Y., (2010), "Monitoring temperature effect on a long suspension bridge", *Structural Control and Health Monitoring*, 17(6), pp.632-653.

and MEMS-based technologies", *International Journal of Steel Structure* 8(4), pp.325-331.

-Noel, A., Abdaoui, A., Badawy, A., Elfouly, T., Ahmed, M., & Shehata, M. (2017). Structural Health Monitoring using Wireless Sensor Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorial*, 19(3), pp.1403-1423.

-Pentaris, F. P., Stonham, J., & Makris, J. P., (2014), "A cost effective wireless structural health monitoring network for buildings in earthquake zones", *Smart Materials and Structures*, 23(10), 105010.

-Sabato, A., Niezrecki, C., & Fortino, G., (2017), "Wireless MEMS-based accelerometer sensor boards for structural vibration monitoring: a review", *IEEE Sensors Journal*, 17(2), pp.226-235.

Low-Cost Health Monitoring of Bridges Using Considering Traffic Load Variations

*Ehsan Darvishan, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Roudehen
Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran.*

E-mail: darvishan@riau.ac.ir

Received: February 2020 -Accepted: June 2020

ABSTRACT

Although structural health monitoring systems have considerably advanced during the last decades, they are still expensive. Moreover, the existing low-cost systems use numerous sensors. Therefore, due high price of sensor hardware they are uncommon in our country. Owing to this, reduction of sensor numbers can be a step forward toward naturalization of such systems. In this paper, a health monitoring algorithm is proposed base on signal processing. Only one sensor is employed to detect damage. Since reduction of sensor numbers can affect the accuracy of damage detection, in the first step of the paper, several signal processing techniques are compared and the best one for this case is selected. Next, two damage indices are introduced based on frequency dispersions. Time-series analysis is utilized to tackle fluctuation of damage indices. Finally, a damage threshold is defined to distinguish damaged and healthy states. Results show that frequency itself is not an appropriate damage measure. Instead, frequency dispersion can be used as alternative damage criteria.

Keywords: Damage Detection, Traffic Load, Yonghe Bridge, Signal Processing, Time-Series Analysis