

سیستم هوشمند تشخیص آسیب ناشی از زلزله در پایه‌های پل با استفاده از تکنیک آشکارسازی اختلاف فاز

سامان شورابی ثانی، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار، ایران

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: S1SANI91@gmail.com

دریافت: 1395/08/12 – پذیرش: 1396/02/15

چکیده

در این پژوهش یک تکنیک برای نظارت بر سلامت ساختار پایه‌های یک پل نمونه که مدل کوچک شده از پل‌های رایج امروزی است با استفاده از تکنیک آشکارسازی اختلاف فاز بین دو گره گیرنده‌ی سنکرون در غالب شبکه‌های حس گر بی سیم مطرح شده و مورد شبیه‌سازی و ارزیابی قرار می‌گیرد. اساس این روش در قرار دادن آرایه‌ای از مدارات اسیلاتور با فرکانس بالا (4 گیگا هرتز) وارزان قیمت به صورت فرستنده بی سیم در محل‌های مورد نظر و با اهمیت ساختار پایه‌های پل مقیاس شده‌ی نمونه و دریافت و آنالیز سیگنال‌های ارسالی از آرایه‌ی فرستنده‌های مذکور توسط دو گره گیرنده‌ی سنکرون استوار است. در واقع سیستم مانتورینگ پیشنهادی برای نظارت بر سلامت ساختار پایه‌های پل تغییرات اختلاف فاز بین دو گره گیرنده‌ی سنکرون را در قبل و بعد از وارد آمدن آسیب (تغییر شکل یا جابجایی) ناشی از عوامل مختلف به عنوان مثال زلزله را اندازه گرفته و دقتی در رنج یک دهم میلی متر از خود در شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد. همچنین دارای قابلیت اعتماد بالایی به خاطر اعلام لحظه به لحظه‌ی وضعیت هر فرستنده شامل فعال، غیر فعال و آسیب دیده، برای اهداف نظارت بر سلامت ساختار پل‌ها می‌باشد. تکنیک و سیستم پیشنهادی دارای قیمت پایین تجهیزات نسبت به سایر متد SHM بوده و همچنین حجم داده پردازشی و پیچیدگی بسیار کمتری در مقایسه با موارد مشابه خود دارد. در این مقاله پیاده‌سازی میدانی انجام نگرفته است اما شبیه‌سازی کاملی با استفاده از آرایه‌ای از شش فرستنده (T_x) و دو گیرنده (R_x) برای پل مقیاس شده نمونه با شش پایه صورت گرفته و مبنای ریاضی، هندسی و پردازش سیگنال و جزییات شبیه‌سازی انجام شده به تفصیل مورد ارزیابی قرار گرفته است.

واژه‌های کلیدی: نظارت بر سلامت سازه، تکنیک آشکارسازی اختلاف فاز، مانتورینگ وضعیت پایه‌های پل، شبکه‌های حس گر بی سیم

1- مقدمه

شده است. تکنولوژی جدیدی به نام مانتورینگ سلامت سازه¹ با استفاده از شبکه‌های حس گر بی سیم اخیراً توجه بسیاری را در زمینه اندازه‌گیری و تحلیل در رابطه با مورد فوق جلب کرده است. سیستم‌های SHM متنوعی وجود دارند که آسیب‌های وارد بر سازه پل را از طریق مشخصات دینامیکی پل مانند شیفت در فرکانس‌های پایه و تغییر در حالات لرزش و بررسی شاخص دمپینگ سازه و یا بررسی شاخص MAC^2 و غیره تشخیص می‌دهند. از آنجا که مشخصات حالات لرزش پایه با فرکانس‌های کم، زیاد به آسیب‌های کوچک و تغییرات اندک سازه حساس نیستند، سیستم نظارت مجبور است فرکانس‌های

نگهداری شرایط ایمن و قابلیت سرویس‌دهی یک پل بزرگ در طول عمر نسبتاً زیاد آن مسلماً نیاز به اندازه‌گیری‌های مداوم و قابل اعتماد از شرایط ساختار پل دارد، که شامل تشخیص و اندازه‌گیری آسیب‌های ناشی از گرادیان دما و ترک خوردگی و فرسودگی در درازمدت، خوردگی‌های سازه و کاهش ظرفیت بار قابل عبور از روی پل و بویژه آسیب‌های وارد بر ساختار پل بر اثر وقوع زلزله در مناطق زلزله خیز همچون کشور ما ایران است که باید بطور دقیقی ارزیابی شود. اندازه‌گیری‌های متداول مانند بازرسی‌های بصری دوره‌ای و آزمایشات بار کنترل شده، به وفور انجام می‌شود و محدودیت‌ها و نواقص آنها بررسی

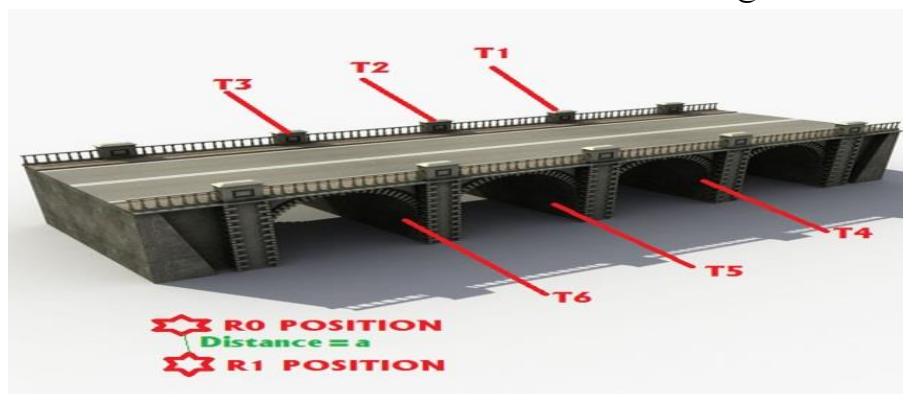
بازرسی و مانیتورینگ پایه‌های پل از لحاظ تنش و کرنش وارده بر آن‌ها و یا صدمات دیگر از جمله ترک خوردگی‌های ناشی از گردان دما، خوردگی، آسیب فیزیکی و ضربه، زلزله و غیره، یک ایده مبتکرانه به شرح ذیل بر پایه شبیه‌سازی با نرم افزار مطلب و با کمک برنامه نویسی C# برای تشخیص و مانیتورینگ جابه‌جایی‌های بسیار کوچک ناشی از تنش و کرنش و آسیب‌های وارده بر پایه‌های پل محاسبه و شبیه سازی می‌شود. همچنین یک واسط گرافیکی برای راحتی کاربر در ورود اطلاعات و وضوح نتایج طراحی و پیاده‌سازی گردید که جزئیات آن در بخش بررسی و نتایج ذکر می‌گردد. جزئیات ایده‌ی فوق و مبانی نظری و ریاضیاتی و هندسی و تجزیه و تحلیل بحث پردازش سیگنال آن بصورت ذیل است.

تکنیک تشخیص آسیب و تغییر شکل ناشی از تنش و کرنش وارد بر پایه‌های پل که آرایه ای از فرستنده‌ها (T_x) را در پایه‌های پل مورد نظر نصب می‌کند و سیگنال‌ها را به دو گیرنده می‌فرستد. در واقع این سیستم تغییرات اختلاف فاز را که ناشی از جا به جایی (T_x) ها است، در سیستم شامل دو گره گیرنده اندازه گرفته و ضمن نمایش لحظه به لحظه، وضعیت پایه‌های پل را با دقت در محدوده‌ی یک دهم میلی‌متر تخمین می‌زند. سیستم هم چنین شامل دو گره گیرنده سنکرون است که در فاصله ای اندکی دور از پل نصب شده و سیگنال‌های دریافتی را مستقلاً اما با لحاظ کردن هم بستگی آشکار (دمدوله^۲) می‌کند. مسیر گنگ^۵ (مبهم) این ایده که در واقع ظهور رانش بدون تغییر اختلاف فاز قابل تشخیص در گیرنده باشد نیز تعریف و بررسی می‌شود و باید از آن اجتناب شود. این ایده بدون عملیات پیاده‌سازی میدانی تنها با ارائه مثال‌های شبیه‌سازی مطرح می‌شود.

بالتری را برای تشخیص چنین تغییراتی پوشش دهد که این الزاماً نیاز به تعداد قابل توجهی از حسگرها و مبدل‌های با حساسیت بالا و همچنین سیستم تحصیل داده با نرخ بالای نمونه برداری دارد. همچنین یک روند پردازش داده پیچیده برای تشخیص تغییر در مشخصات دینامیکی سازه مورد نیاز است. علاوه بر آن تغییر در فرکانس‌های پایه (طبیعی) که ناشی از آسیب‌های سازه‌ای اند به راحتی می‌تواند تحت تاثیر آثار محیطی علی‌الخصوص تغییرات دما و رطوبت در نظر گرفته نشوند. وجود این سختی‌ها و محدودیت‌ها [20-26]، انگیزه اصلی برای تحقیق و بررسی در مورد سایر روش‌های SHM برای پل‌ها می‌باشد [27-31]. در این پژوهش قابلیت یک سیستم SHM با بهره‌گیری از WSN^۶ و بر پایه تشخیص جابه‌جایی (با تغییر شکل) پایه‌های پل برای یک نمونه پل فرضی طراحی شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. ادعای پژوهندگان بر این است که این روش قادر به عبور از مشکلات و محدودیت‌های ذکر شده در بالا است. در بخش دوم این مقاله به بیان مبانی ریاضی، هندسی و پردازش سیگنال و شبیه‌سازی انجام گرفته پرداخته و در بخش سوم مقاله نیز به بررسی نتایج شبیه سازی و میزان دقت آن‌ها و ارزیابی قابلیت سیستم SHM پیشنهادی برای اهداف مانیتورینگ سلامت ساختار پایه‌های پل و مزایا و معایب این تکنیک پرداخته و در بخش پایانی به جمع بندی مباحث مطرح شده در این مقاله می‌پردازیم.

2- مبانی ریاضی، هندسی و پردازش سیگنال و شبیه‌سازی

با توجه به محدودیت‌های مالی و فنی و تکنیکی یک ایده نو آورانه مبتنی بر شبیه سازی برای مانیتورینگ جابه‌جایی و تغییر شکل پایه‌های پل مورد نظر طرح و شبیه سازی شد. برای



شکل 1. چیدمان آرایه‌ی فرستنده‌ها و محل قرار گیری گیرنده‌های سنکرون در پل مقیاس شده‌ی نمونه

همانطور که در بخش مقدمه اشاره گردید تلاش‌های زیادی برای مانی‌تورینگ صحت و سلامت سازه‌های پل صورت گرفته است. در این پژوهش یک روش ارزان که در مقابل آثار نویز و اعوجاج محیطی مقاومت بالایی دارد-به علت این که اطلاعات وضعیتی هر فرستنده (و به طبع آن هر پایه) در موج حامل مدولاسیون با فرکانس 4 گیگا هرتز نهفته است و در این رنج از فرکانس هیچ گونه تداخل یا اعوجاج یا نویز محیطی یا الکترومغناطیسی مخل صحت ارسال و دریافت اطلاعات نمی شود، برای تشخیص جا به جایی یا تغییر شکل (آسیب‌های وارده بر ساختار پایه‌های پل) که بر پایه‌ی اندازه گیری اختلاف فاز بین دو گره گیرنده استوار است، ارائه می شود. در واقع اختلاف فاز مربوط به فرستنده (هدف) در⁶ AOI و دو گره گیرنده سنکرون شده را اندازه می‌گیرد. AOI به فضای قرار گیری پایه‌های پل گفته می‌شود که در واقع سطح منطقه ای است که برای عملیات مانی‌تورینگ سلامت سازه (SHM) مد نظر ما است و دو گره گیرنده در فاصله‌ی کمی دور تر از سازه پل قرار می‌گیرد. آرایه‌ی (T_x) برای ارسال داده‌ها در یک ترتیب هماهنگ شده برنامه ریزی شده است و رشته‌ی کد بندی شده اطلاعات - (11111111) که در واقع شامل هشت پالس با سطح ولتاژ پنج ولت بوده که با یک لبه‌ی بالا رونده از حالت Low به High شروع شده و با یک لبه‌ی پایین رونده و گذار از سطح High به Low خاتمه می‌یابد و این نحوه فریم (قالب) بندی اطلاعات جهت بهینه کردن ارتباطات آسنکرون (غیر همزمان) بین هر یک از شش فرستنده و مجموعه‌ی گیرنده‌های دابل مورد استفاده قرار می‌گیرد- را با فرکانس حامل⁷ مشخص (4GHz)، بطور پیوسته با فواصل زمانی قابل کنترل و تعریف شده، ارسال می‌کند. دو گره گیرنده دور از پل ولی در فاصله‌ی نزدیکی نسبت به هم قرار گرفتند و سیگنال‌ها را به طور مستقل ولی با اسپلاتور سنکرون مشترک دمدوله (آشکار)-عملیات جدا سازی سیگنال اطلاعات خیر از موج حامل فرکانس بالای مورد استفاده که خود جهت افزایش انرژی و امکان ارسال به فواصل دور بکار می‌رود- می‌کنند. این سیستم می‌تواند جابجایی و تغییر شکل را در لحظات اولیه برای محدوده‌هایی به وسعت 2.5 کیلومتر مربع با استفاده از پروتکل

شبکه‌ی IEEE 802.11n و تجهیزات این خانواده تشخیص دهد. داده‌های دریافتی برای پردازش‌های بیشتر می‌تواند به مراکز کنترل ثانویه ارسال شوند. این تکنیک از منظر اقتصادی مقرون به صرفه است چرا که مدارات ارسال سیگنال موجود در فرستنده‌ها می‌توانند یک مدار اسپلاتور ساده و مدارات دریافت اطلاعات در گیرنده‌های می‌توانند چند مدار دمدلاتور (آشکار ساز) ساده‌ی باند میانی و باند پایه با حداقل هزینه طراحی و پیاده سازی اولیه باشند از طرف دیگر چند آرایه از فرستنده‌ها و آنتن‌ها می‌توانند یک مدار ارسال داده را با هم شریک شوند. در ابتدا یک سیستم با T_x یگانه بررسی می‌شود و این که چگونه تغییر فاز را باید به میزان جا به جایی تفسیر کرد و پس از آن سیستمی با آرایه ای از T_x مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت یک مسیر گنگ (مبهم) شرح داده می‌شود و روابط ریاضی آن اثبات می‌گردد. همچنین بلوک دیاگرام دو گره گیرنده ترسیم می‌شود و سیگنال‌های فرستنده و گیرنده پله به پله از مراحل ارسال تا آشکار سازی در گیرنده بیان و توضیح داده می‌شوند. همچنین شبیه سازی‌های سه بعدی برای تفسیر اندازه جا به جایی و تغییر شکل پایه‌های پل از روی تغییرات اختلاف فاز انجام می‌شود.

2-1- توصیف مدل بی‌سیم فرستنده - گیرنده

شکل یک نمایی کلی از سیستم نمایش وضعیت پایه‌های پل را نشان می‌دهد. AOI ما در واقع فضای سازه‌ی پل و سطح زیر عرشه پل می‌باشد و آرایه ای از T_x ها در آن -در روی هر پایه پل یک T_x - نصب شده است. هر T_x از T_1 تا T_6 نامگذاری شد و طوری تنظیم و برنامه ریزی شد تا دنباله‌ی داده‌ی از پیش تعیین شده‌ای را به دو گره گیرنده ارسال کند. (فاز آموزش سیستم⁸). دور از AOI و سازه پل، دو گره گیرنده سنکرون به نام R_0 و R_1 قرار داده شده است (در فاصله کمی با هم به اندازه‌ی مقدار a). در رابطه با محل دقیق نصب فرستنده‌ها باید اشاره کرد که محدودیت خاصی از این منظر وجود نداشته و مکان نصب فرستنده‌ها می‌تواند با مشورت مهندسان محاسب سازه و پرسنل نگه داری تعمیرات پل مذکور- در نقاط حساس و در معرض آسیب یا با اهمیت بالا در راستای حفظ استحکام و

برآورده شدن میزان مقاومت لازم برای حداکثر بار عبوری پیش بینی شده از روی آن پل- تعیین گردد. برای جزییات بیشتر در جهت تعیین نقاط نصب فرستنده‌ها به [27] می‌توان مراجعه کرد.

2-2- محاسبه‌ی جابه‌جایی براساس سیستم یک

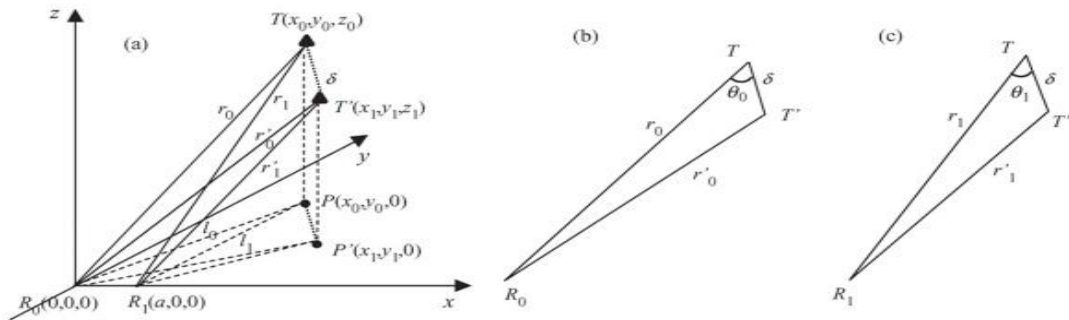
T_x

شکل دو نمای سه بعدی برای سیستم تشخیص و مانیتورینگ آسیب و تغییر شکل ناشی از تنش و کرنش وارد بر پایه‌های پل را نشان می‌دهد. $T(x_0, y_0, z_0)$ یکی از مجموعه‌ی T_x ها در AOI است و گره گیرنده اول به نام R_0 در $(0, 0, 0)$ و گره گیرنده

دوم در $(a, 0, 0)$ واقع شده است و T' نقطه‌ی جا به جا شده‌ی T ، پس از وقوع جابه‌جایی یا تغییر شکل در ساختار پایه‌ی پل است. δ برابر میزان جابه‌جایی یا تغییر شکل است و نقاط $p(x_0, y_0, 0)$ و $p'(x_1, y_1, 0)$ نگاشت- (تصویر)- نقاط T و T' به صفحه‌ی $x-y$ است. خطوط انحراف (r_0, r_1) و (r'_0, r'_1) فواصل R_1, R_0 از T و T' هستند. داریم:

$$r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$$

$$r_1 = \sqrt{(x_0 - a)^2 + y_0^2 + z_0^2}$$



شکل 2. نمایش وضعیت گره T و حالت بعد از وقوع آسیب (جابه‌جایی یا تغییر شکل پایه‌ی پل) به نام T'

زاویه‌ی θ_1, θ_0 با خطوط $T - T', T - R_0, T - R_1$ و $T - T'$ ساخته می‌شوند. در خلال نصب اولیه‌ی سیستم باید مکان T_x ها و R_0, R_1 را اندازه گرفت تا X_0, Y_0, Z_0, a تعیین شوند. بردار شیب پایه پل در نقطه‌ی T به صورت زیر تخمین زده می‌شود- با استفاده از تکنیک‌های محاسبات عددی:

$$\vec{r}_0^2 + \vec{\delta}^2 - 2r_0 \cdot \vec{\delta} \cdot \cos \theta_0 = \vec{r}'_0^2 \quad (3)$$

$$\vec{r}_1^2 + \vec{\delta}^2 - 2r_1 \cdot \vec{\delta} \cdot \cos \theta_1 = \vec{r}'_1^2$$

بنابراین داریم:

$$r'_0 \approx r_0 - \vec{\delta} \cdot \cos \theta_0 \quad (4)$$

$$r'_1 \approx r_1 - \vec{\delta} \cdot \cos \theta_1$$

مقدار اسکالر شیب پایه پل m_{TH} برابر است با:

$$\vec{M} = (x_1 - x_0)\hat{x} + (y_1 - y_0)\hat{y} + (z_1 - z_0)\hat{z} \quad (2)$$

بدون اطلاع از $T'(x_1, y_1, z_1)$ و برای تعیین مقدار θ_1, θ_0 ، به ناچار باید اختلاف فاز φ_D بر اساس اختلاف فاصله‌ی

$$m_{Th} = (z_1 - z_0) / \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$$

سیستم مذکور با یک T_x به راحتی می‌تواند به یک سیستم دو بعدی، از آرایه‌های T_x برای پوشش محدوده‌ی وسیعی جهت مایناتور کردن و تشخیص آسیب و تغییر شکل ناشی از تنش و کرنش وارد بر پایه‌های پل با ابعاد وسیع در حدود 2.5 کیلو متر مربع گسترش یابد. یک مثال T_x برای پل با شش پایه در شکل 1 نشان داده شده است.

هر T_x از آرایه برنامه ریزی می‌شود تا طبق توالی منظم سیگنال خود را ارسال کند. برای پایه‌های پل غیر یکسان (عوارض سطح نهایی یا سطح تمام شده یا رو کار هر پایه‌ی پل) هر T_x می‌تواند شیب (mTH) مخصوص به خودش را داشته باشد. همچنین آرایه‌ی T_x می‌تواند یک مدار ارسال را از طریق یک مالتی پلکسر⁹ شریک شوند تا هزینه پیاده سازی سخت افزاری کاهش یابد. دو گره گیرنده سنکرون شده سیگنال‌های دریافتی را دمدوله (آشکار) می‌کنند، T_x ای که دچار تغییر وضعیت شده است را شناسایی و میزان آسیب و تغییر شکل پایه‌ی پل را بر مبنای جابجایی رخ داده، مشخص و محاسبه می‌کنند.

2-4- مسیر گنگ (مبهم)

یک مسیر مبهم به صورت جابجایی و تغییر شکل پایه پل به طوری که میزان اختلاف فاز بین دو گیرنده ناشی از جا به جایی $T_x T_x'$ ثابت بماند، تعریف می‌شود. تفاوت فاصله‌ای قبل $(r_0 - r_1)$ و بعد از جابه جایی یا تغییر شکل $(r_0' - r_1')$ اگر مساوی باشند یک مسیر مبهم رخ داده است. روش تشخیصی در بخش قبل مطرح شد در صورتی که $T'(x_1, y_1, z_1)$ بر روی مسیر مبهم جا به جا شده باشد در تشخیص جابجایی و تغییر شکل پایه پل با شکست مواجه می‌شود.

همانطور که در شکل شماره 3 دیده می‌شود، با در نظر گرفتن خطوط انحنای r_1, r_0 ، نقطه‌ی T می‌تواند بر روی دایره‌ی حاصل از تقاطع محوری دو کره با شعاع r_1, r_0 قرار داشته باشد.

بنابراین:

$$(x_0 - a)^2 + y_0^2 + z_0^2 = r_1^2, x_0^2 + y_0^2 + z_0^2 = r_0^2$$

صدق می‌کند. دایره ناشی از تقاطع دو کره بر روی صفحه‌ی $y-z$ قرار دارد و با فرض $x = x_0$ می‌تواند به صورت زیر معرفی شود.

که در آن پارامترهای معلوم در حین نصب و فاز آموزش سیستم می‌باشند. با داشتن $D = r_0 - r_1$ و $D' = r_0' - r_1'$ داریم:

$$\delta = \frac{D - D'}{\cos \theta_0 - \cos \theta_1} \quad (5)$$

در رابطه‌ی 3، D' نامعلوم است ولی از طریق فاز ϕ_D' اندازه گیری شده، قابل محاسبه است.

$$D' = \lambda \cdot \phi_D' / 360 \quad (6)$$

که در آن λ طول موج حامل فرکانس است. توجه شود که ϕ_D' یک مقدار مرکب است و محدوده‌ی $0 < \phi_D' < 360$ است. بنا براین رابطه (6) تنها بخش کسری D' را می‌دهد. برای $\delta \langle \lambda \rangle$ مقدار $D - D'$ بخش کسری از λ می‌باشد. از آنجا که بخش صحیح D' می‌تواند از D به دست آید. با داشتن $D = r_0 - r_1 = N_D \cdot \lambda + \Delta D$ ، r_1, r_0 مقدار صحیح $\Delta D = D - N_D \cdot \lambda$ ، $N_D = \text{mod}[D, \lambda]$ می‌تواند از طریق $D' = N_D \cdot \lambda + \Delta D'$ محاسبه شود. از آنجا که $D - D'$ کسری از λ بوده و داریم $D - D' = \Delta D - \Delta D'$ می‌توان نوشت:

$$\delta = \frac{\Delta D - \Delta D'}{\cos \theta_0 - \cos \theta_1} \quad (7)$$

همانطور که در رابطه‌ی (7) مشخص است عامل اصلی بروز خطا در اندازه گیری θ_0, θ_1 هستند که به جهت جابجایی و تغییر شکل وابسته‌اند. فرض کنیم $\theta_0' = \theta_0 + \varepsilon$ ، $\theta_1' = \theta_1 + \varepsilon$ که ε خطای کوچک (انحراف) باشد δ' (ناشی از ε) به دست می‌آید:

$$\delta' = \frac{\Delta D - \Delta D'}{\cos(\theta_0 + \varepsilon) - \cos(\theta_1 + \varepsilon)} \quad (8)$$

$$\approx \frac{\Delta D - \Delta D'}{\cos \theta_0 - \cos \theta_1 - \varepsilon \cdot (\sin \theta_0 - \sin \theta_1)}$$

خطای جا به جایی ناشی از ε برابر است با:

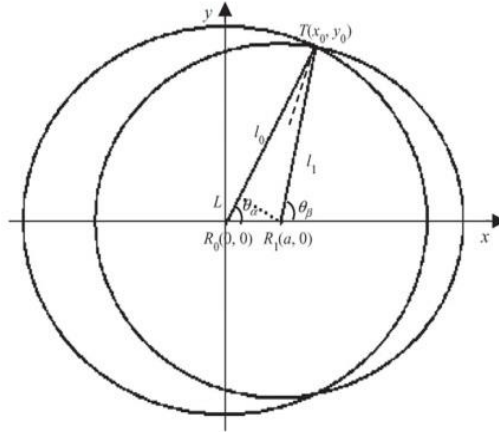
$$\Delta \delta = \delta' - \delta$$

$$\approx \varepsilon \cdot (\Delta D - \Delta D') \cdot \frac{\sin \theta_0 - \sin \theta_1}{(\cos \theta_0 - \cos \theta_1)^2} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta \delta}{\delta} \approx \varepsilon \cdot \frac{\sin \theta_0 - \sin \theta_1}{\cos \theta_0 - \cos \theta_1}$$

2-3- سیستم با آرایه‌هایی از T_x ها

$$\begin{aligned}
 x_0 &= (a^2 + r_0^2 - r_1^2) / 2a = c / 2a \\
 c &= a^2 + r_0^2 - r_1^2 \\
 y_0^2 + z_0^2 &= r_0^2 - c^2 / (4a^2)
 \end{aligned}
 \tag{10}$$



شکل 3. بررسی هندسی مسیر مبهم

است. مسیر مبهم در دستگاه مختصات سه بعدی در مکان هندسی T' با تغییرات مقدار r_1', r_0' واقع است. اثبات معادله‌ی سه بعدی مسیر مبهم کاملاً پیچیده است.

لذا این معادله باید در دو بعد - در صفحه‌ی $x-y$ - حل شود و مقدار پارامتر محور Z با استفاده از مقدار شیب مسیر گنگ محاسبه $m_{gh} = (z_1 - z_0) / \sqrt{(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2}$ شود. در صفحه‌ی $x-y$ ، T می‌تواند حاصل از تقاطع دو دایره‌ی ناشی از تقاطع دو کره با $z_0 = 0$ و شعاع L_1, L_0 باشد

داریم:

$$\begin{aligned}
 L_0 &= r_0 \cos \theta_\alpha \\
 L_1 &= r_1 \cos \theta_\beta \\
 \theta_\alpha &= \text{tg}^{-1}(y_0 / x_0) \\
 \theta_\beta &= \text{tg}^{-1}[(y_0 / (x_0 - a))]
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

که $\theta_\alpha, \theta_\beta$ زوایای خطی R_1, R_0 تا نقطه T هستند. $[L = L_0 - L_1]$ اختلاف میزان انحراف است.

این دو دایره می‌توانند تصویری از فضای سه بعدی به یک صفحه‌ی دو بعدی در شکل 3 باشد.

مرکز دایره در $(c/2a, 0, 0)$ بوده و شعاع آن $\sqrt{r_0^2 - c^2 / (4a^2)}$ می‌باشد.

مسیر گنگ وقتی رخ می‌دهد که جابجایی و تغییر شکل پایه پل، یا به عبارتی T طوری حرکت کند که r_1, r_0 هر دو با δ یکسانی تغییر کنند. بنابراین $r_1' = r_1 - \delta, r_0' = r_0 - \delta$ (بخاطر جاذبه‌ی زمین)، با فرض $C' = C - 2(r_0 - r_1)\delta$ از تقاطع دو کره جدید با شعاع‌های r_1', r_0' یک دایره جدید با $x = x'$ و شعاع جدید شکل می‌گیرد:

$$\begin{aligned}
 x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 &= r_0'^2 \\
 (x_1 - a)^2 + y_1^2 + z_1^2 &= r_1'^2 \\
 \Rightarrow x_1 &= [c - 2(r_0 - r_1)\delta] / 2a \\
 &= c' / 2a
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

$$y_1^2 + z_1^2 = (r_0 - \delta)^2 - \frac{c'^2}{4a^2}$$

T' حاصل تقاطع سطح پایه پل با این دایره جدید است. مرکز این دایره در $(c' / 2a, 0, 0)$ و شعاع آن $\sqrt{(r_0 - \delta)^2 - (c'^2 / 4a^2)}$ که تقریباً برابر $r_0 - (c^2 / 8a^2 r_0) - [1 - c(r_0 - r_1) / (2a^2 r_0)] \delta$

با فرض $z = 0$ رابطه‌ی (11) در صفحه‌ی x-y به صورت زیر ساده می‌شود:

$$x = \frac{c - 2(l_0 - l_1)\delta}{2a}$$

$$y^2 = (l_0 - \delta)^2 - \left[\frac{c}{2a} - \frac{(l_0 - l_1)\delta}{a} \right]^2 \quad (13)$$

$$y \approx l_0 - \frac{c^2}{8a^2 l_0} - \left[1 - \frac{c(l_0 - l_1)}{2a^2 l_0} \right] \delta$$

$$\approx l_0 - \frac{c^2}{8a^2 l_0} - \delta$$

با حذف δ از x, y در معادله‌ی فوق به دست می‌آید:

$$y = l_0 - \frac{(a^2 + l_0^2 - l_1^2)^2}{8a^2 l_0} - \frac{a^2 + l_0^2 - l_1^2}{2(l_0 - l_1)} + \frac{a}{(l_0 - l_1)} x$$

$$= m_a x + K \quad (14)$$

که در آن $m_{ah} = a / (L_0 - L_1)$ شیب مسیر مبهم و

$$K = l_0 - \frac{(a^2 + l_0^2 - l_1^2)^2}{8a^2 l_0} - \frac{(a^2 + l_0^2 - l_1^2)}{2(l_0 - l_1)} \quad (15)$$

معادله‌ی (14) معادله‌ی مسیر گنگ در صفحه‌ی x-y است. با داشتن T و m_{ah} ، ارتفاع در امتداد مسیر گنگ در نقطه‌ی T' از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$z = z_0 - m_{ah} \cdot \sqrt{(x_0 - x)^2 + (y_0 - y)^2} \quad (16)$$

شکل 4 مسیر گنگ را در صفحه‌ی x-y نشان می‌دهد. که T_x و گیرنده‌ها در $T(40m, 200m)$ و $R_0(0,0)$ و $R_1(a,0)$ با $\alpha = 1$ تا $\alpha = 5$ قرار گرفته‌اند. شکل 4-a نشان دهنده‌ی حالتی است که L_1, L_0 با میزان یکسانی از δ کاهش یافته‌اند در حالی که شکل 4-b مسیر را بر پایه‌ی رابطه‌ی (14) نشان می‌دهد.

در هر دو صورت مسیر گنگ به عنوان تابعی از α (فاصله بین R_1, R_0 دو گیرنده) بیان می‌شود. برای هر مولفه‌ی x اختلاف مولفه‌ی y بین مسیرهای نشان داده شده در دو شکل 4-a و 4-b در شکل 4-c نشان داده شده است.

به خاطر جاذبه‌ی زمین، مولفه‌ی Z نقطه‌ی T_x در حین جابجایی و تغییر شکل کم می‌شود. بنابراین برای اجتناب از مسیر مبهم و تشخیص نادرست آسیب از سوی سیستم SHM پیشنهادی کافی خواهد بود بررسی شود آیا شیب m_{Th} -شیب مسیر جابه‌جایی رخ داده برای هر فرستنده-با شیب m_{ah}

- شیب مسیر مبهم) حالتی که در بخش 2-4 به تفصیل معرفی و مورد بررسی قرار گرفت) - در صفحه‌ی x-y هم خوانی دارد یا خیر.

اگر $m_a = m_T$ وقتی $m_T = (x_1 - x_0) / (y_1 - y_0)$ تکنیک تشخیص بر اساس اختلاف فاز شکست می‌خورد در غیر این صورت صحیح و دقیق کار خواهد کرد. معادله‌ی (7) برای محاسبه میزان انحراف پایه‌ی پل در یک سیستم با T_x منفرد به کار می‌رود. وقتی که آرایه‌ای از T_x ها استفاده شود هر T_x ، شیب سطح پایه پل و مسیر مبهم خودش را خواهد داشت. مکان دو گره گیرنده باید طوری طراحی شود که هیچکدام از مسیرهای گنگ بر روی مسیر جابه‌جایی یا تغییر شکل قرار نگیرد.

2-5- بلوک دیاگرام و آنالیز سیگنال سیستم

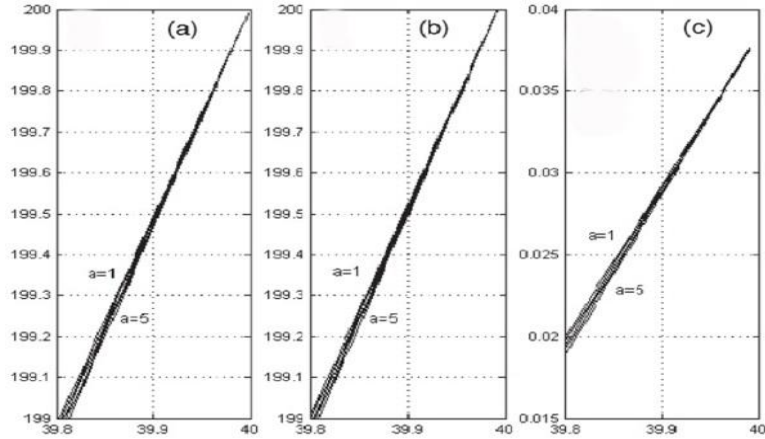
فرستنده - گیرنده

عملکرد کلی سیستم گیرنده - فرستنده در بلوک دیاگرام به صورت یک T_x و دو گیرنده نشان داده شده است. یک T_x معمولی یک سیگنال با فرکانس حامل ثابت می‌فرستد. فرکانس حامل F_c با فرکانس گیرنده‌ها فرق دارد.

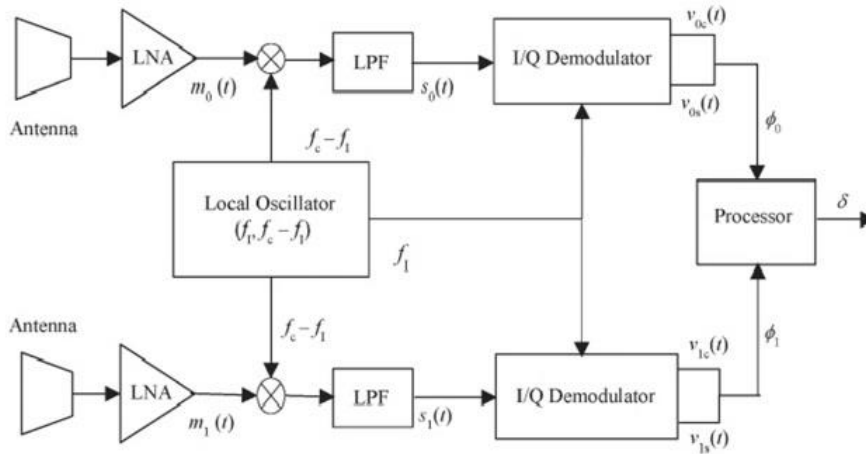
راندمان معمولی مورد نیاز 10^{25ppm} تا 25^{ppm} (در محدوده‌ی فرکانسی که سیستم پایدار می‌ماند) است. بنا بر این حداکثر خطای F_c بین فرستنده و گیرنده 50^{ppm} خواهد بود. با فرض فرکانس حامل برای T_x مقدار $f_c + \Delta f_c$ باشد، فرکانس حامل گیرنده نیز F_c با حداکثر اختلاف فرکانس $\Delta f_c = 0.5 \times f_c / 10^4$ خواهد بود.

در شکل 5 دو گره گیرنده یک اسپلاتور محلی را به شراکت می‌گذارند که دو فرکانس $F_1, F_2 - F_1$ را تولید می‌کند که F_1 فرکانس باند میانی است. سیگنال‌های تقویت شده دریافتی $m_1(t), m_0(t)$ به صورت مستقل با فرکانس $F_c - F_1$ دمدوله می‌شوند. سپس این دو سیگنال از فیلتر پایین گذر عبور داده شده تا $S_1(t), S_0(t)$ به وجود آیند.

از دو دمودلاتور (I-Q) هم فاز مربعی برای تولید سیگنال‌های باند پایه‌ی $v_1(t), v_0(t)$ -که بعداً برای تولید اطلاعات فاز دو گره گیرنده بکار خواهد آمد- استفاده می‌شود.



شکل 4. مسیر گنگ در صفحه‌ی x-y (خطای مولفهی \bar{Y} به عنوان تابعی از a)



شکل 5. بلوک دیاگرام سیستم گیرنده

این دو فرکانس میانی به یک I-Q دمدولاتور ارسال و سیگنال‌های باند پایه $v_{0c}(t)$ ، $v_{0s}(t)$ ، $v_{1c}(t)$ ، $v_{1s}(t)$ به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} v_{0c}(t) &= \frac{1}{4} \cos[\Delta w_c t - (w_c + \Delta w_c) \tau_0] \\ v_{0s}(t) &= -\frac{1}{4} \sin[\Delta w_c t - (w_c + \Delta w_c) \tau_0] \\ v_{1c}(t) &= \frac{1}{4} \cos[\Delta w_c t - (w_c + \Delta w_c) \tau_1] \\ v_{1s}(t) &= -\frac{1}{4} \sin[\Delta w_c t - (w_c + \Delta w_c) \tau_1] \end{aligned} \quad (19)$$

اختلاف فاز حاصل برابر است با:

اگر سیگنال $p(t)$ ارسال شده از T_x باشد به صورت $p(t) = \cos[(w_c + \Delta w_c)t]$ ، $0 \leq t \leq T_p$ و دوره تناوب T_p پالس باشد در این صورت سیگنال‌های دریافتی $m_0(t)$ ، $m_1(t)$ به صورت زیر می‌شوند:

$$\begin{aligned} m_0(t) &= \cos[(w_c + \Delta w_c)(t - \tau_0)] \\ m_1(t) &= \cos[(w_c + \Delta w_c)(t - \tau_1)] \end{aligned} \quad (17)$$

که τ_1 ، τ_0 به ترتیب تاخیر ارسال از T_x به گیرنده‌های R_1 ، R_0 است. با ضرب $m_1(t)$ و $m_0(t)$ در فرکانس $f_c - f_i$ و عبور از فیلتر پایین گذر داریم:

$$\begin{aligned} s_0(t) &= \frac{1}{2} \cos[(\Delta w_c + w_i)t - (w_c + \Delta w_c) \tau_0] \\ s_1(t) &= \frac{1}{2} \cos[(\Delta w_c + w_i)t - (w_c - \Delta w_c) \tau_1] \end{aligned} \quad (18)$$

واضح است تا وقتی $D - D' < \lambda$ و $\Delta D - \Delta D' = D - D'$ فاز φ_D بسیار مهم تر از طول مطلق (r_0, r_1) است. در هر صورت تخمین دقیق بردار شیب سطح پایه پل بر دقت محاسبه θ_1, θ_0 و طبیعتاً بر δ اثر دارند.

علاوه بر آن افزایش فاصله ای دو گره گیرنده بر روی δ اثر گذار نیست اما دقت محاسبه $\Delta D - \Delta D'$ ، $\cos \theta_0 - \cos \theta_1$ را افزایش می دهد. خطای اندازه گیری برای θ_1, θ_0 بسته به میزان تخمین شیب سطح پایه پل، منجر به درصد تغییرات کمتری (در حدود 6 درصد) برای δ می شود. همانطور که در روابط بالا نشان داده شده است فاصله α بین دو گره گیرنده بر روی مسیر مبهم برای یک T_x معین تاثیر دارد، همچنین بر روی اختلاف زاویه های θ_1, θ_0 و $\Delta D - \Delta D'$ تاثیر می گذارد. بسته به طول موج حامل سیگنال و مکان T_x ، مقدار α باید به اندازه ای کافی بزرگ باشد تا مقادیر $(\Delta D - \Delta D')$ و $(\cos \theta_0 - \cos \theta_1)$ خیلی کوچک نشوند و دقت محاسبات از بین نرود و در طرف مقابل α نباید خیلی زیاد باشد تا بر روی کلاک سنکرون سازی (همگام سازی) - دو گره گیرنده اثر منفی بگذارد. در پایان میزان جابجایی و تغییر شکل پایه پل از طریق این روش محاسبه شد و با فاصله ای واقع بین T', T حاصل از فرمول فاصله هندسی دو نقطه در فضا مقایسه شد:

$$T_x(x_0, y_0, z_0), T_x'(x_1, y_1, z_1) \quad \delta_{\text{Real}} = \sqrt{(x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2} \quad (21)$$

همچنین یک واسط گرافیکی¹² برای وارد کردن مختصات و نمایش محاسبات خروجی و رسم نتایج شبیه سازی در نرم افزار مطلب انجام پذیرفت. جزئیات و نتایج شبیه سازی در قسمت بررسی و نتایج برنامه به همراه ذکر مثال آورده شده است.

3- نتایج و تحلیل داده ها

همانطور که در قسمت قبل اشاره شد یک ایده نوآورانه مبتنی بر آشکارسازی اختلاف فاز سیگنال گره فرستنده در دو گره گیرنده سنکرون برای تشخیص آسیب های وارد بر ساختار پایه های پل (تغییر شکل و جابه جایی) پایه های پل مبتنی بر شبیه سازی مطرح و معرفی گردید که اصول و روش کار و مبانی نظری و هندسی و پردازش سیگنال های آن در قسمت قبل به تفصیل مطرح شده است.

$$\begin{aligned} \varphi_D(t) &= \varphi_0 - \varphi_1 \\ &= \tan^{-1} \left[\frac{v_{0s}(t)}{v_{0c}(t)} \right] - \tan^{-1} \left[\frac{v_{1s}(t)}{v_{1c}(t)} \right] \\ &= (w_c + \Delta w_c)(\tau_0 - \tau_1) \end{aligned} \quad (20)$$

فاز φ_D از خلال پروسه نصب اولیه بدست می آید. بعد از نصب اولیه، فاز φ_D' اندازه گیری شده و برای محاسبه $\Delta D' = r_0' - r_1'$ به کار می رود. اگر $\Delta D = r_0 - r_1$ و جا به جایی یا تغییر شکل پایه (δ) از معادله (7) بدست خواهد آمد. از آنجا که $\Delta f_c / f_c = 0.5 \times 10^{-4}$ خطای محاسباتی در تخمین δ به خاطر $(\Delta w_c \text{ (or } \Delta \varphi_D))$ برابر $0.5 \times \delta / 10^4$ خواهد شد که قابل صرف نظر است.

شبیه سازی کامپیوتری سه بعدی با استفاده از نرم افزار مطلب برای سیستم تشخیص و مانیتورینگ آسیب و تغییر شکل ناشی از تنش و کرنش وارد بر پایه های پل با استفاده از شبکه های حس گر بی سیم بر اساس شش T_x که بر روی پایه های یک پل شش پایه فرضی نصب شده اند انجام شد. در شبیه سازی مکان T_x, R_1, R_0 ها ورودی های برنامه مطلب هستند. مکان T' به عنوان مرجع داده شد تا موارد زیر محاسبه شود:

- اختلاف فاز بین φ_D', φ_D .
- زوایایی تخمین زده شده θ_0, θ_1 .
- بردار \vec{M} (ماتریس) بردار 3 بعدی شیب سطح پایه ی پل در نقطه T .

در رابطه با نوع و سیستم سازه پل مورد ارزیابی قرار گرفته در این پژوهش، باید اشاره کرد که ملاک ما مدل مقیاس بندی شده و کوچک شده اکثر پل های با اسکلت فلزی و بتن پیش تنیده شده ی رایج که برای عبور وسایل نقلیه سواری و نیمه سنگین و سنگین و هم چنین عبور خطوط راه آهن و قطارهای مسافری و باربری امروزه بر روی رود خانه ها و یا دره های واقع در مسیر آن ها احداث شده و ممکن است از زمان احداث آن ها بین 20 تا 30 سال گذشته باشد و همچنین از سرویس های نگهداری و تعمیرات مدون و اصولی بر خوردار نباشند. ابعاد مدل اسکلت شده مورد بررسی عبارت است از: عرض 3 متر و طول 50 متر و ارتفاع 25 متر - برای جزئیات بیشتر در مورد پل نمونه و مقیاس شده به [17] مراجعه شود.

با کمک ایده‌ی نوآورانه‌ی فوق می‌توان با دقت دهم میلی‌متر جابجایی هرکدام از فرستنده‌های نصب شده بر روی شش پایه‌ی پل فرضی را محاسبه کرد و از داده‌های محاسبه‌شده در کاربردهای SHM برای پل‌ها و یا سایر سازه‌ها مثل خطوط انتقال نفت و گاز با فشار بالا، استفاده‌های متنوعی انجام داد. از جمله مزیت‌های عمده این ایده نمایش تصویری حرفه‌ای از شرایط فعلی و بعد از آسیب پایه‌های پل است. در این جا یک نمونه مثال از یک پل فرضی با 6 پایه‌ی مشابه برای بررسی و اعتبارسنجی و دقت و قابلیت اطمینان سیستم پیشنهادی، مطرح و بررسی و تحلیل می‌گردد.

- فرکانس کریپر 5.8GHz (fc)

- مختصات گره گیرنده‌ی اول (R_0) : $(0,0,0)$

- مختصات گره گیرنده‌ی دوم (R_1) : $(1,0,0)$

- مختصات گره فرستنده‌ی اول (T_1) :

$T_1(10,10,10) \rightarrow T'_1(10.5,10,10)$

- مختصات گره فرستنده‌ی دوم (T_2) :

$T_2(10,11,10) \rightarrow T'_2(10,11,10.001)$

- مختصات گره فرستنده‌ی سوم (T_3) :

$T_3(11,10,10) \rightarrow T'_3(11,10,10.001)$

- مختصات گره فرستنده‌ی چهارم (T_4) :

$T_4(11,11,10) \rightarrow T'_4(11,11,10.5)$

- مختصات گره فرستنده‌ی پنجم (T_5) :

$T_5(12,10,10) \rightarrow T'_5(12,10.1,10)$

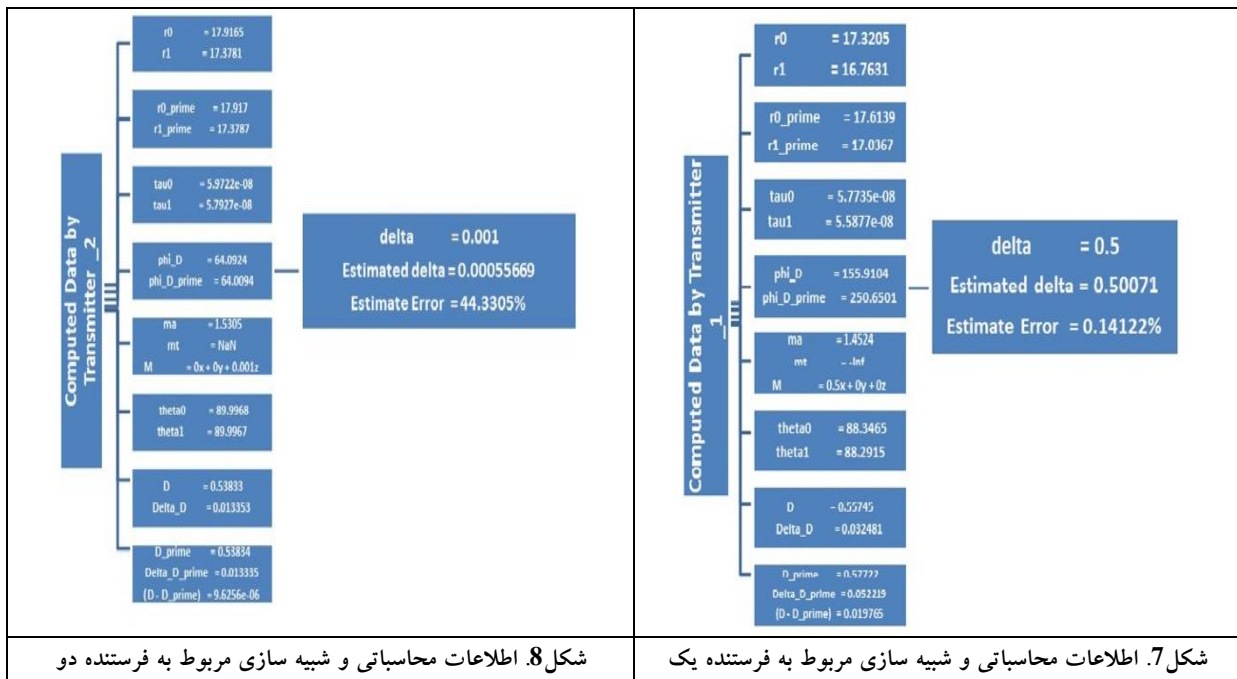
- مختصات گره فرستنده‌ی ششم (T_6) :

$T_6(12,11,10) \rightarrow T'_6(12,11.5,10)$

نکته: مختصات گره‌های T_x (که به آن آرایه‌ی T_x) گفته می‌شود تعمداً نزدیک به هم (دور از حقیقت واقعی برای میزان فواصل پایه‌های پل مورد نظر) در نظر گرفته شد تا دقت محاسبات و کیفیت نمایش خروجی‌ها ارزیابی بهتری شود.

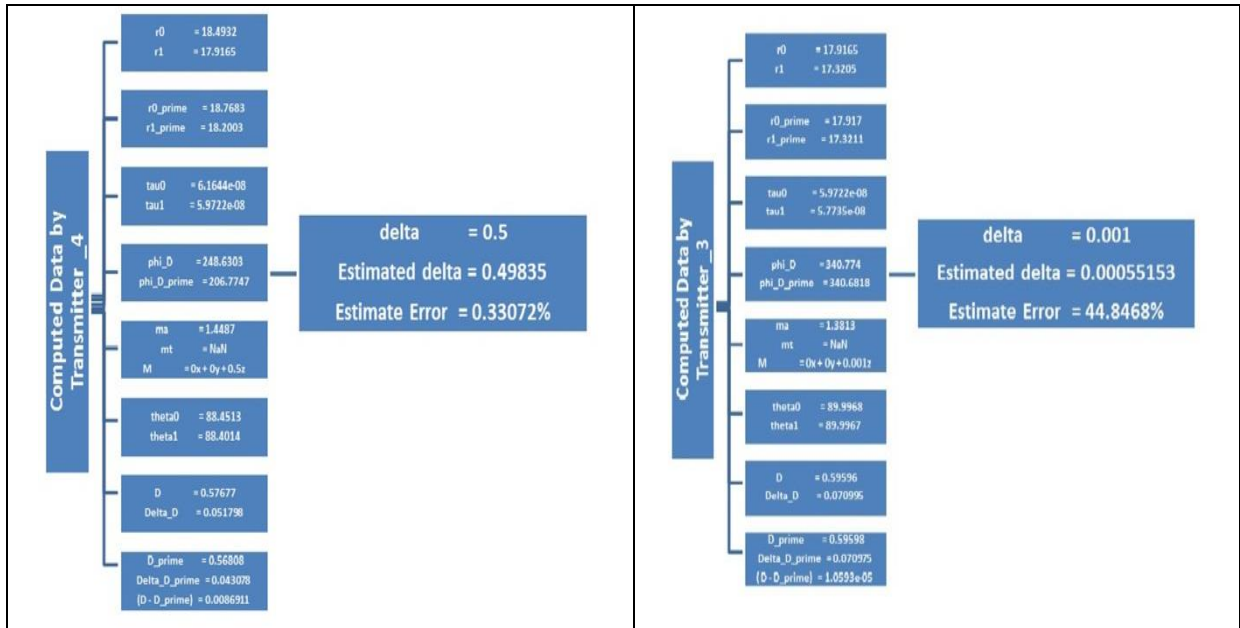
پس از اجرای شبیه‌سازی نتایج به صورت زیر است: (به ترتیب شکل‌های 7 و 8 و 9 و 10 و 11 و 12 برای فرستنده‌های یک و دو و سه و چهار و پنج و شش) همچنین به صورت مدون در جداول 1 و 2 و 3 ذکر شده‌اند.

با توجه به موارد محاسباتی و هندسی، ایده مبتنی بر شبیه‌سازی فوق برای کاربرد در سیستم‌های SHM پل‌های متوسط و بزرگ کارآمد تلقی می‌شود. همچنین خطای محاسباتی برای مقدار δ نیز در هر بار اجرای برنامه محاسبه می‌شود. (از طریق مقایسه با نتیجه‌ی فرمول فاصله‌ی دو نقطه‌ی T_x و T'_x در فضا به صورت رابطه‌ی رابط‌ی (21) که اغلب مقدار قابل قبول و کوچکی است). جداول 1 و 2 و 3 جمع بندی بحث محاسبات و دقت نتایج و خطای تخمین میزان آسیب δ (جابه جایی یا تغییر شکل) در ساختار پایه‌ی پل می‌باشند.



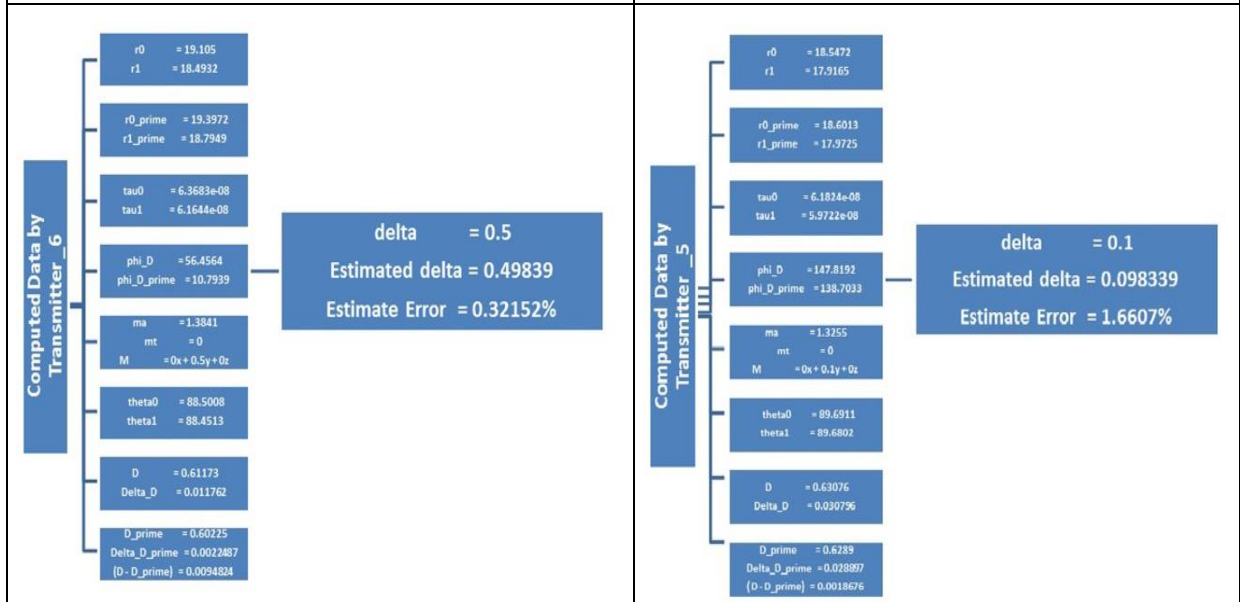
شکل 8. اطلاعات محاسباتی و شبیه سازی مربوط به فرستنده دو

شکل 7. اطلاعات محاسباتی و شبیه سازی مربوط به فرستنده یک



شکل 10. اطلاعات محاسباتی و شبیه سازی مربوط به فرستنده چهار

شکل 9. اطلاعات محاسباتی و شبیه سازی مربوط به فرستنده سه



شکل 12. اطلاعات محاسباتی و شبیه سازی مربوط به فرستنده شش

شکل 11. اطلاعات محاسباتی و شبیه سازی مربوط به فرستنده پنج

جدول 1. نتایج شبیه سازی برای 6 فرستنده (بخش اول)

φ'_D	φ_D	τ_1	τ_0	r'_1	r'_0	r_1	r_0	T_x
250.6501	155.9104	5.5877e-08	5.7735e-08	17.0367	17.6139	16.7631	17.3205	T1
64.0094	64.0924	5.7927e-08	5.9722e-08	17.3787	17.917	17.3781	17.9165	T2
340.6818	340.774	5.7735e-08	5.9722e-08	17.3211	17.917	17.3205	17.9165	T3
206.7747	248.6303	5.9722e-08	6.1644e-08	18.2003	18.7683	17.9165	18.4932	T4
138.7033	147.8192	5.9722e-08	6.1824e-08	17.9725	18.6013	17.9165	18.5472	T5
10.7939	56.4564	6.1644e-08	6.3683e-08	18.7949	19.3972	18.4932	19.105	T6

جدول 2. نتایج شبیه سازی برای 6 فرستنده (بخش دوم)

D'	Δ_D	D	θ_1	θ_0	M	m_t	m_a	T_x
0.57722	0.032481	0.55745	88.2915	88.3465	$0.5x + 0y + 0z$	-Inf	1.4524	T1
0.53834	0.013353	0.53833	89.9967	89.9968	$0x + 0y + 0.001z$	NaN	1.5305	T2
0.59598	0.070995	0.59596	89.9967	89.9968	$0x + 0y + 0.001z$	NaN	1.3813	T3
0.56808	0.051798	0.57677	88.4014	88.4513	$0x + 0y + 0.5z$	NaN	1.4487	T4
0.6289	0.030796	0.63076	89.6802	89.6911	$0x + 0.1y + 0z$	0	1.3255	T5
0.60225	0.011762	0.61173	88.4513	88.5008	$0x + 0.5y + 0z$	0	1.3841	T6

جدول 3. نتایج شبیه سازی برای 6 فرستنده (بخش سوم)

Estimation error	$\delta_{estimated}$	δ_{real}	$D - D'$	$\Delta_{D'}$	T_x
0.14122%	0.50071	0.5	0.019765	0.052219	T1
4.3305%	0.00055669	0.001	9.6256e-06	0.013335	T2
4.8468%	0.00055153	0.001	1.0593e-05	0.070975	T3
0.33072%	0.49835	0.5	0.0086911	0.043078	T4
1.6607%	0.098339	0.1	0.0018676	0.028897	T5
0.32152%	0.49839	0.5	0.0094824	0.0022487	T6

وارد آمدن آسیب (تغییر شکل یا جابجایی) اندازه گرفته و دقت در رنج یک دهم میلی متر از خود در شبیه سازی‌ها نشان داد و همچنین دارای قابلیت اعتماد بالایی به خاطر اعلام لحظه به لحظه‌ی وضعیت هر فرستنده شامل فعال، غیر فعال و آسیب دیده، برای اهداف نظارت بر سلامت ساختار پل‌ها بود. در رابطه با بحث تحقق قابلیت اطمینان سیستم، سیستم SHM پیشنهادی با خراب شدن هر کدام از فرستنده‌ها ضمن اعلام شرایط به کار خود ادامه خواهد داد و سیستم SHM با از کار افتادن یک یا چند فرستنده مختل نخواهد شد. تکنیک و سیستم پیشنهادی دارای قیمت بسیار پایین تر تجهیزات نسبت به سایر متد SHM بوده - مدارات ارسال و دریافت شامل مدارات اسپلاتور فرکانس بالا و دمودلاتورهای باتد میانی و باند پایه هستند که جز رایج ترین مدارات الکترونیکی با قیمت بسیار پایین تر نسبت به سایر تجهیزات مشابه می‌باشند- و همچنین این سیستم حجم داده پردازی و پیچیدگی بسیار کمتری در مقایسه با سایر سیستم‌های SHM رایج دارد. در این مقاله آزمایشات میدانی انجام نگرفته اما شبیه سازی کاملی با استفاده از آرایه ای از شش فرستنده (T_x) و دو گیرنده (R_x) برای پل مقیاس شده نمونه با شش پایه صورت گرفت و مبانی ریاضی، هندسی و پردازش سیگنال و جزئیات شبیه سازی انجام شده به تفصیل مورد ارزیابی قرار گرفت.

یک نمونه مثال از چگونگی وارد آمدن آسیب فرضی به پایه‌های پل به همراه نتایج و محاسبات شبیه سازی انجام شده

در رابطه با نحوه‌ی تحلیل داده‌ها، برای هر فرستنده بطور مجزا از طریق سیستم SHM پیشنهادی کلیه‌ی کمیت‌های مطرح شده در بخش دوم مقاله به ترتیب برای هر فرستنده محاسبه شده و نهایتاً یک مقدار جابجایی بر اساس تکنیک آشکار سازی اختلاف فاز به دست می‌آید ($\delta_{estimated}$) - که نحوه‌ی محاسبه‌ی آن در بخش 2-2 و 5-2 و فرمول‌های 5 و 6 و 7 و 17 و 18 و 19 و 20 به تفصیل شرح داده شد- و این مقدار با میزان واقعی جابجایی رخ داده (δ_{real}) مقایسه شده و داده‌ها مورد تحلیل قرار می‌گیرند.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش یک تکنیک برای نظارت بر سلامت ساختار پایه‌های یک پل نمونه که مدل کوچک شده از پل‌های رایج امروزی است با استفاده از تکنیک آشکار سازی اختلاف فاز بین دو گره گیرنده‌ی سنکرون در غالب شبکه‌های حس گر بی سیم مطرح شد و مورد شبیه سازی و ارزیابی قرار گرفت. اساس این روش در قرار دادن آرایه ای از مدارات اسپلاتور با فرکانس بالا (4GHz) و ارزان قیمت بصورت فرستنده بی سیم در محل‌های مورد نظر و با اهمیت ساختار پایه‌های پل نمونه و دریافت و آنالیز سیگنال‌های ارسالی از آرایه‌ی فرستنده مذکور، توسط دو گره گیرنده‌ی سنکرون استوار بود. در واقع سیستم مانیتورینگ پیشنهادی برای نظارت بر سلامت ساختار پایه‌های پل، تغییرات اختلاف فاز بین دو گره گیرنده‌ی سنکرون را در قبل و بعد از

wireless sensor networks: A survey', *Computer Networks*, 58, pp. 254-283.

- Ammari, H.M. (2013), 'The Art of Wireless Sensor Networks: Volume 2, Advanced Topics and Applications' (Springer Science & Business Media).
- Nadeem, A., Hussain, M.A., Owais, O., Salam, A., Iqbal, S., and Ahsan, K. (2012), 'Application specific study, analysis and classification of body area wireless sensor network applications', *Computer Networks*.
- Hammoudeh, M., and Newman, R. (2015), 'Adaptive routing in wireless sensor networks: QoS optimisation for enhanced application performance', *Information Fusion*, 22, pp. 3-15.
- Moyo, P., Brownjohn, J., Suresh, R., and Tjin, S. (2005), 'Development of fiber Bragg grating sensors for monitoring civil infrastructure', *Engineering structures*, 27, (12), pp. 1828-1834.
- Trifunac, M., and Ebrahimian, M. (2014), 'Detection thresholds in structural health monitoring', *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 66, pp. 319-338.
- Mokhtar, M., Owens, K., Kwasny, J., Taylor, S., Basheer, P., Cleland, D., Bai, Y., Sonebi, M., Davis, G., and Gupta, A.: 'Fiber-optic strain sensor system with temperature compensation for arch bridge condition monitoring', *Sensors Journal, IEEE*, 12, (5), pp. 1470-1476.
- Ko, J., and Ni, Y. 'Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges', *Engineering structures*, 2005, 27, (12), pp. 1715-1725.
- Branco, F.A., and Mendes, P.A. 'Thermal actions for concrete bridge design', *Journal of Structural Engineering*, 1993, 119, (8), pp. 2313-2331.
- Farrar, C.R., and Doebling, S.W. (1999), 'Structural health monitoring at los alamos national laboratory'.
- Cooke, N., Priestly, M., and Thurston, S. 'Analysis and design of partially prestressed concrete bridges under thermal loading: Prestressed Concr. Inst. J. Vol 29 No 3 (1984), pp. 94-115', *Computer-Aided Design*, 16, (6), pp. 338-339.
- Thurston, S., Priestley, M., and Cooke, (1984), N.: 'Influence of Cracking for Thermal Response of Reinforced Concrete Bridges', *Concrete International*, 6, (8), pp. 36-48.

توسط نرم افزار مطلب آورده شد تا دقت نتایج و قابلیت اعتماد سیستم SHM پیشنهادی مورد ارزیابی قرار گیرد. سیستم برای هر فرستنده واقع در هر پایه‌ی پل بطور مجزا محاسبات را انجام داده و ضمن هر بار اجرای شبیه سازی خطای تخمین میزان آسیب را از طریق مقایسه با فرمول فاصله‌ی فضایی دو نقطه در فضا اعلان می‌دارد. بر اساس نتایج به دست آمده، ادعای پژوهندگان از طریق مباحث مطرح شده برای قابلیت این سیستم در راستای نظارت بلادرنگ بر سلامت ساختار پایه‌های پل در راستای جای‌گزینی روش‌های پیچیده و گران قیمت فعلی اثبات می‌گردد.

7- پی‌نوشت‌ها

1. Structural Health Monitoring (SHM)
2. Modal Assurance Criterion
3. Wireless Sensor Networks
4. Demodulation
5. Ambiguity Route
6. Area of Interest
7. Carrier Frequency
8. Training Phase
9. Multiplexer
10. Pulse per Minute
11. Low Pass Filter
12. Graphical User Interface

8- مراجع

- Sohraby, K., Minoli, D., and Znati, T. (2007), 'Wireless sensor networks: technology, protocols, and applications' (John Wiley & Sons).
- Abdelzaher, T., Pereira, N., and Tovar, E. (2015), 'Wireless Sensor Networks: 12th European Conference, EWSN 2015, Porto, Portugal, February 9-11, 2015, Proceedings.
- Krishnamachari, B., Murphy, A.L., and Trigoni, N. (2014), 'Wireless Sensor Networks: 11th European Conference, EWSN 2014, Oxford, UK, February 17-19, Proceedings.
- Picco, G.P., and Heinzelman, W. (2012), 'Wireless Sensor Networks: 9th European Conference, EWSN, Trento, Italy, February 15-17, Proceedings' (Springer Science & Business Media).
- Younis, M., Senturk, I.F., Akkaya, K., Lee, S., and Senel, F. (2014), 'Topology management techniques for tolerating node failures in

- thermal responses', *Engineering Structures*, 40, pp. 20-38.
- Priestley, M., and Buckle, I. (1979), 'Ambient thermal response of concrete bridges', in Editor 'Book Ambient thermal response of concrete bridges'.
 - Nishikata, A., Ichihara, Y., and Tsuru, T.: (1995), 'An application of electrochemical impedance spectroscopy to atmospheric corrosion study', *Corrosion Science*, 37, (6), pp. 897-911.
 - Wenzel, H., Furtner, P., and Clifton, R. (2015), 'The Role of Structural Health Monitoring in the Life-Cycle-Management of Bridges', in Editor 'Book The Role of Structural Health Monitoring in the Life-Cycle-Management of Bridges'.
 - Chen, W.-F., and Duan, L.: (2014), 'Bridge Engineering Handbook: Construction and Maintenance'.
 - S. Shoorabi Sani, M. Baghaei-Nejad, and M. Kalate Arabi, (2015), "Study on Health Monitoring of Concrete Structures Using Wireless Sensor Networks," *Journal of Electrical Systems and Signals*, vol. 3, pp. 37-46.
 - S. Shoorabi Sani, (2016), "A case study for application of fuzzy inference and data mining in structural health monitoring," *Journal of AI and Data Mining*.
 - S. Shoorabi Sani, M. Baghaei-Nejad, and M. Kalate Arabi, (2015), "Using a phase difference detection technique for monitoring the structural health of bridge piers," *Structural Control and Health Monitoring*.
 - Rodrigues, C., Félix, C., Lage, A., and Figueiras, J. (2010), 'Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges', *Engineering Structures*, (8), pp. 1993-2002.
 - Li, H.-N., Li, D.-S., and Song, G.-B.: 'Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering', *Engineering structures*, 2004, 26, (11), pp. 1647-1657.
 - Usmani, A., Rotter, J., Lamont, S., Sanad, A., and Gillie, M.: 'Fundamental principles of structural behaviour under thermal effects', *Fire Safety Journal*, 2001, 36, (8), pp. 721-744.
 - Xia, Y., Hao, H., Zanardo, G., and Deeks, A.: (2006), 'Long term vibration monitoring of an RC slab: temperature and humidity effect', *Engineering Structures*, 28, (3), pp. 441-452.
 - Koh, B., and Dyke, S.: (2007), 'Structural health monitoring for flexible bridge structures using correlation and sensitivity of modal data', *Computers & structures*, 85, (3), pp. 117-130.
 - Roberts-Wollman, C.L., Breen, J.E., and Cawrse, J.: (2002), 'Measurements of thermal gradients and their effects on segmental concrete bridge', *Journal of Bridge Engineering*, 7, (3), pp. 166-174.
 - Kang, D., Kim, H.-Y., and Kim, D.-H.: (2014), 'Enhancing thermal reliability of fiber-optic sensors for bio-inspired applications at ultra-high temperatures', *Smart Materials and Structures*, 23, (7), pp. 740-741.
 - Kulprapha, N., and Warnitchai, P. :(2012), 'Structural health monitoring of continuous prestressed concrete bridges using ambient

-
- ¹ Structural Health Monitoring(SHM)
 - ² MODAL ASSURANCE CRITERION
 - ³ Wireless Sensor Networks
 - ⁴ Demodulation
 - ⁵ Ambiguity Route
 - ⁶ Area Of Interest
 - ⁷ Carrier Frequency
 - ⁸ Training Phase
 - ⁹ Multiplexer
 - ¹⁰ PULSE PER MINUTE
 - ¹¹ LOW PASS FILTER
 - ¹² Graphical User Interface