تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۱۲
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۲۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۰

DOI: 10.48303/base.2023.561401.1095

نوع مقاله: یادداشت پژوهشی

سامانه یکپارچه پایش سلامت سازه‌ای پل‌ها؛ فاز اول: بازرسی چشمی

محسن علمی
دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

لطیف دوستی
دانشجوی دکتری مهندسی زلزله، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

محسن غفوری آشتیانی (نویسنده مسئول)
استاد، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران، Mohsen.ashtiany@gmail.com

امید بهار
دانشیار، پژوهشکده مهندسی سازه، پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، تهران، ایران

چکیده

پایش سلامت سازه، برآورد وضع موجود و شناسایی سیستم سازه‌ای یکی از چالشی‌ترین مباحثی است که به‌منظور پیشگیری از وقوع هرگونه حادثه‌ی ناگوار در سازه‌های مهندسی تحت بارهای نهایی و حتی سرویس، مطرح می‌باشد. وجود پارامترهای متعدد مستقل و غیرمستقل سازه‌ای در فرآیند پایش سلامت، برآورد وضع موجود را با دشواری‌های فراوانی روبه‌رو نموده است؛ بنابراین سعی شده است با ایجاد زنجیره‌ی پیوسته بین روش‌های عملیاتی موجود، سامانه یکپارچه پایش سلامت پل (IBHMT)[1] در سه فاز مستقل تدوین شود تا توسط آن بتوان از ابتدایی‌ترین گام پایش سلامت سازه تا رسیدن به مدل واقعی و شناسایی پارامترهای فیزیکی سیستم سازه‌ای و در نهایت برآورد وضع موجود، از آن بهره برد و بدون نیاز به استفاده از ابزارهای متعدد، به این امر مهم دست یافت. در این سامانه با ترکیب روش‌های شناسایی سیستم موجود نظیر بازرسی چشمی، روش‌های استاتیکی و دینامیکی، آزمایش‌های غیر مخرب، یک سیستم منحصربه‌فرد در سه فاز شامل: بازرسی چشمی، ارزیابی سریع و به‌روزرسانی مدل ایجادشده است. همچنین یک رابط کاربر گرافیکی (GUI)[2] با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Matlab توسعه داده شده و این امکان را برای کاربر فراهم می‌کند تا به‌سادگی اطلاعات مربوط به مراحل مختلف پایش سلامت سازه‌ای را در پایگاه داده وارد نموده و پس از پردازش خودکار داده‌ها، نتایج خروجی را مشاهده کند. با توجه به نیاز موجود درزمینه مدیریت و نگهداری زیرساخت‌های عمرانی شبکه حمل‌ونقل، سامانه ارائه‌شده در این مقاله می‌تواند برای مدیریت یکپارچه و بهینه پل‌های بتنی توسط تصمیم‌گیران و مالکان پل‌ها به‌کار گرفته شود. با استفاده از بخش اول این سامانه، می‌توان به‌سادگی گام نخست پایش سلامت سازه‌ای پل‌های بتنی را برداشته و در نهایت به اطلاعاتی کمّی در مورد وضعیت فعلی آنها دست پیدا نمود.

واژگان کلیدی: پایش سلامت سازه‌ای (SHM)[3]، روش‌های استاتیکی و دینامیکی، بازرسی چشمی، رابط کاربر گرافیکی (GUI).

۱- مقدمه

سازه‌های عمرانی در معرض شرایط محیطی و بارگذاری‌های سرویس و همچنین رویدادهایی نظیر سیل، طوفان و زلزله می‌باشند که می‌توانند منجر به ایجاد آسیب در آنها شود. بازرسی دوره‌ای و ارزیابی وضعیت سازه‌های مهندسی برای تأمین ایمنی و سرویس‌دهی آنها ضروری است. تشخیص زودهنگام آسیب و موقعیت آن، در بهبود برنامه‌ریزی مؤثر و کارآمد فعالیت‌های تعمیر و نگهداری، بسیار مؤثر بوده و موجب کاهش هزینه‌های مربوطه و همچنین جلوگیری از دوره‌های طولانی‌مدت تعمیر و متعاقباً خارج از سرویس شدن این سازه‌ها می‌گردد. اساساً تشخیص آسیب و یا به عبارتی جامع‌تر، پایش سلامت سازه، دانشی است که به‌منظور مدیریت بهینه سازه‌ها مورداستفاده قرارگرفته و در تلاش برای پاسخگویی به سؤالاتی از قبیل وجود

آسیب در سازه، محل آسیب، شدت آسیب و نهایتاً تخمین عمر باقی‌مانده سازه می‌باشد. در طول سه دهه اخیر پایش سلامت سازه‌ها به‌عنوان یک ابزار حیاتی جهت بهبود ایمنی و قابلیت اعتماد سازه‌ها شناخته‌شده و مطالعات بسیار زیادی در این زمینه صورت گرفته است.

پژوهشگران روش‌های شناسایی سیستم را از دیدگاه‌های مختلف بررسی و طبقه‌بندی‌های متنوعی را ارائه داده‌اند. به‌عنوان نمونه، روش‌های غیر مخرب و مخرب، روش‌های موضعی و کلی، فعال و انفعالی و... از جمله تقسیم‌بندی‌های موجود در این حوزه می‌باشد. دوبلینگ و همکاران (Doebling et al., 1996) پایش سلامت با استفاده از روش‌های غیر مخرب را در دو گروه موضعی و کلی طبقه‌بندی نمودند. از جمله روش‌های موضعی می‌توان به بازرسی چشمی، آزمایش فراصوت، میدان مغناطیسی، رادیوگرافی، جریان گردابی و روش‌های میدان حرارت اشاره نمود. در روش‌های موضعی، باید از ابتدا محل آسیب مشخص بوده و همچنین اجزا سازه‌ای آسیب‌دیده باید در دسترس باشد که این عوامل خود بزرگ‌ترین نقطه‌ضعف این روش است. از طرفی، با استفاده از روش‌های فوق فقط می‌توان به شناسایی آسیب‌های سطحی و یا نهایتاً نزدیک سطح سازه مبادرت نمود. بالاگیاس و همکاران (Balageas et al., 2010) دیدگاه و تقسیم‌بندی جدیدی در رابطه با پایش سلامت ارائه نمودند. در این تقسیم‌بندی، پایش سلامت سازه ازنقطه‌نظر نوع تحریک، به دو دسته فعال و انفعالی طبقه‌بندی شده است، به‌طوری‌که اگر سازه توسط عوامل محیطی تحریک و پاسخ‌های آن توسط حس‌گرها ثبت گردد، پایش سلامت سازه، از نوع انفعالی و درصورتی‌که سازه توسط محرک‌های خارجی، به‌صورت اجباری، تحریک شود، پایش سلامت سازه از نوع فعال خواهد بود. فرار و همکاران (Farrar et al., 2001) طی پژوهشی، مراحل انجام پایش سلامت را از دیدگاه آماری مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش به پایش سلامت سازه به‌عنوان فرآیندی نگریسته شده است که طی آن، آسیب‌های موجود در سازه شناسایی می‌شود. این فرآیند شامل مشاهده و اندازه‌گیری پارامترهای لرزه‌ای سازه به‌صورت دوره‌ای و استخراج ویژگی‌های نهفته در داده‌های اندازه‌گیری شده است. در نهایت، خروجی این فرآیند منجر به به‌روزرسانی اطلاعات مربوط به‌سلامت سازه و تصمیم‌گیری در مورد توانایی یا عدم توانایی سازه در تحمل نیروهای طرح وارده، هم‌زمان با افزایش سن سازه و قرار گرفتن در شرایط محیطی مختلف می‌شود. این تقسیم‌بندی بدین‌صورت انجام شده است: ۱- ارزیابی عملکرد سازه؛ ۲- برداشت داده‌ها و پالایش آنها؛ ۳- انتخاب مشخصات و ویژگی‌های مورد نظر قابل‌استخراج از داده‌ها و ۴- تشکیل مدل آماری به‌منظور توصیف مشخصات سیستم.

فعالیت‌های فراوانی در زمینه‌ی ارزیابی، شناسایی و تشخیص آسیب در پل‌های موجود توسط پژوهشگران صورت پذیرفته است (Flah et al., 2021; Han et al., 2021; Obiechefu & Kromanis, 2021; Vagnoli et al., 2018; Reagan et al., 2018; Rizzo & Enshaeian, 2021).

کمیسو و همکاران (Comisu et al., 2017) به تعریف سیستم پایش سلامت یکپارچه به‌منظور کنترل پیوسته‌ی پل، پرداختند. ایشان در این پژوهش به‌صورت هم‌زمان عواملی همچون خوردگی بتن ناشی از عوامل سولفاتی، خوردگی میلگرد ناشی از حملات کلری و همچنین پاسخ‌های لرزه‌ای پل را مورد بررسی قرار دادند.

یانجی ژو و همکاران (Zhu et al., 2018) با استفاده از روش آماری تجزیه‌وتحلیل اجزای اصلی (PCA)[۴] به بررسی اثر تک‌مؤلفه‌ای حرارت بر روی پاسخ‌های دینامیکی و در نهایت شناسایی آسیب پرداختند. این روش به‌صورت عملیاتی بر روی یک پل خرپایی اعمال گردید. شایان ذکر است روش آماری تجزیه‌وتحلیل اجزای اصلی و اثر تک‌مؤلفه‌ای سایر نیروها نظیر باد و ترافیک بر روی پل نیز به‌صورت مشابه توسط سایر پژوهشگران (Wang et al., 2020; Huang et al., 2020) مورد بررسی قرار گرفت.

چن و همکاران (Chen et al., 2021) طی پژوهشی به بررسی تأثیر انواع سناریوهای بارگذاری بر روی پارامترهای

مودال شناسایی‌شده یک پل ۱۱ دهانه بزرگراهی بتنی پیش‌تنیده، مبادرت ورزیدند. ارتعاش ناشی از عبور و مرور ترافیک، بالا و پایین پریدن نیروی انسانی بر روی عرشه پل، تحریک چیپ خطی باند پهن توسط دو لرزاننده‌ی الکترودینامیک، ارتعاش اجباری جاروبی سینوسی توسط لرزاننده‌ی جرمی برون از محور، از جمله مواردی بودند که بر روی پل مورد استفاده و ارزیابی قرار گرفتند. به‌منظور استخراج پارامترهای مودی، از الگوریتم حالت-فضا استفاده شد (Chen et al., 2021).

آوندانو و همکاران (Avendano et al., 2021) یک پل فلزی را در نرم‌افزار انسیس مدل‌سازی و به تعیین محل بهینه حس‌گرها مبادرت نمودند. ایشان در این پژوهش از سه سناریوی مختلف بارگذاری در محل‌های ثابت از پیش تعیین‌شده استفاده و پل را شناسایی کردند. در بین روش‌های متعدد ارائه‌شده، بازرسی چشمی، یکی از پرکاربردترین شیوه‌های مطرح در امر پایش سلامت سازه می‌باشد به‌گونه‌ای که می‌توان از آن به‌عنوان یک روش متداول در امر بازرسی پل‌ها، یاد نمود. در این روش، انواع عیوب سطحی و مکانیسم‌های زوال و خرابی تشخیص داده می‌شود. این شیوه، معمولاً اولین گام در سیستم مدیریت پل‌ها بوده و می‌تواند عملکرد کلی پل را مورد ارزیابی قرار دهد. تاکنون پژوهش‌های فراوانی بر روی مدیریت و برنامه‌ریزی سیستم‌های سازه‌ای پل توسط بازرسی چشمی انجام شده است.

زانینی و همکاران (Zanini et al., 2017) با استفاده از اطلاعات به‌دست‌آمده از بازرسی چشمی و معرفی شاخص ارزش وضع موجود (CV)[5] که عددی بین یک تا پنج می‌باشد به پیش‌بینی وضعیت سرویس‌دهی پل پرداخته و بر اساس آن برنامه زمانی سیستم مدیریت پل را معرفی نمودند.

مودنا و همکاران (Modena et al., 2015) به ارائه برنامه زمان‌بندی بازرسی پل با استفاده از بازرسی چشمی و بررسی راهکار مقاوم‌سازی و نگهداری پل‌های قوسی بتنی و بنایی در دو بخش استاتیکی و دینامیکی پرداختند. ایشان آسیب‌های سطحی را در سه دسته‌ی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی طبقه‌بندی و علل ایجاد هر یک از آنها را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش روسازه پل‌ها مورد بررسی قرارگرفته و سایر اجزا از قبیل فونداسیون و یا شمع‌ها موضوع تحقیق ایشان نبوده است.

کوئیرک و همکاران (Quirk et al., 2018) با به‌کارگیری روش ارزیابی مقادیر (VoI)[6] و همچنین روش تحلیل پیش‌پردازش بیزی به بازرسی چشمی و نهایتاً ارزیابی پل‌ها پرداختند. لذا تعدادی از پل‌های ایرلند و پرتغال به‌عنوان نمونه‌های واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. در این پژوهش، تمام آسیب‌های ایجاد شده در سطح اعضای سازه‌ای توسط شاخصی تحت عنوان رتبه‌بندی وضعیت (CR)[7] در شش وضعیت مختلف دسته‌بندی شده‌اند به‌طوری‌که برای کم‌ترین میزان آسیب، CR = ۰ و برای بیشترین میزان آسیب که احتمال خرابی کامل اعضای سازه‌ای و تحت تأثیر قرار گرفتن ایمنی پل وجود دارد، میزان CR برابر با ۵ لحاظ می‌گردد. پس از تعیین مقدار CR، با استفاده از روابط ارزیابی مقادیر (VoI) که تابع هزینه نیز در آن وجود دارد، راهبردهای مختلف تعمیر و نگهداری برای پل ارائه می‌گردد.

امروزه، جهت سهولت انجام بازرسی چشمی و افزایش هم‌زمان دقت و ایمنی اخیراً استفاده از وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین (UAV)[8] در بازرسی‌ها افزایش چشم‌گیری داشته و فعالیت‌های تحقیقاتی و عملیاتی متنوعی در این زمینه صورت گرفته است (Saleem et al., 2021; Dorafshan et al., 2021).

به‌عنوان‌مثال، لین و همکاران (Lin et al., 2021) یک سیستم جامع رباتیک جهت بازرسی پل ارائه نموده‌اند. این سامانه از پنج ویژگی اصلی برخوردار است: ۱- توانایی ایجاد مأموریت‌های جمع‌آوری خودکار اطلاعات؛ ۲- تضمین کیفیت داده‌های جمع‌آوری‌شده؛ ۳- بازرسی سه‌بعدی سازه‌های مرتفع؛ ۴- شناسایی و تعیین موقعیت آسیب در مدل سه‌بعدی؛ ۵- تهیه گزارش متناسب با استانداردهای موجود در این زمینه. این پژوهش اعتبار و عملکرد این ربات را با بررسی دو مثال نشان داده است.

علیرغم پیشرفت‌های قابل‌توجه در روش‌ها و فناوری‌های بازرسی چشمی و همچنین توسعه راهنمای عملیات بازرسی چشمی پل‌های موجود توسط کشورهای مختلف، کمبود

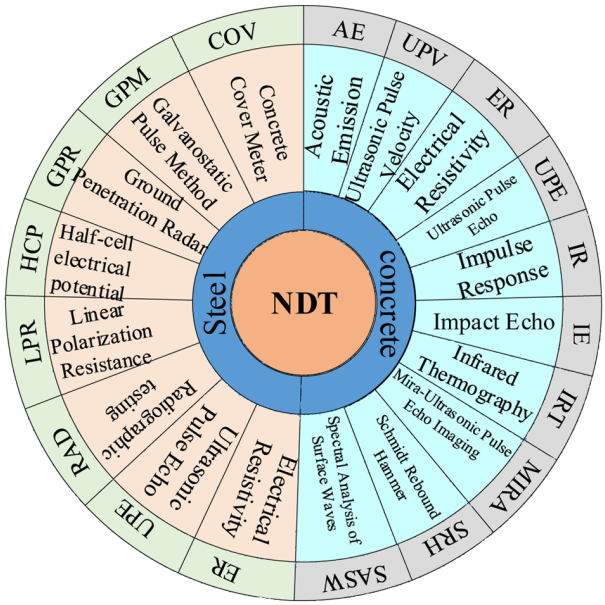
نرم‌افزارهایی که کاربر بتواند به‌سادگی اطلاعات جمع‌آوری‌شده را در آن وارد نموده و نتایج به‌صورت خودکار نمایان شوند. یکی از مسائل و چالش‌های اصلی پیش رو درزمینه‌ی پایش سلامت سازه و سیستم‌های مدیریت پل می‌باشد. از جمله مطالعاتی که به توسعه نرم‌افزار برای عملیات بازرسی چشمی پرداخته‌اند می‌توان به (Bullock & Foltz, 1995) و مودی (Moodi, 2001) اشاره نمود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، اغلب روش‌های فوق، بر روی استفاده از یک شیوه‌ی به‌خصوص متمرکز بوده و بدیهی است، استفاده از یک روش خاص، اطلاعات محدودی را در مورد وضعیت سیستم در اختیار قرار خواهد داد. لذا استفاده‌ی صحیح، از تعدادی از روش‌ها در کنار هم منجر به دستیابی به اطلاعات بسیار مفیدتری نسبت به روش‌های مجزا خواهد شد. بنابراین در سامانه یکپارچه پایش سلامت سازه (IBHMT)، روش‌های بازرسی چشمی، ارزیابی سریع توسط تحلیل‌های دینامیکی و روش به‌روزرسانی مدل با استفاده از قابلیت‌های برنامه‌نویسی شیءگرا از یک‌سو و به‌کارگیری موتورهای تحلیلی نرم‌افزارهایی چون ETABS، SAP و CSiBridge و اتصال آنها به سامانه توسط رابط برنامه‌نویسی کاربردی (API)[9]، سامانه‌ای جامع تدوین شده که در این مقاله، به معرفی بازرسی چشمی پرداخته شده است.

۲- روش‌های شناسایی سیستم به‌کاررفته در سامانه IBHMT

در تدوین سامانه IBHMT، روش‌های مختلف پایش سلامت سازه و شناسایی سیستم بر مبنای نحوه‌ی ورود و جمع‌آوری اطلاعات، در چهار دسته طبقه‌بندی شده است: ۱- بازرسی چشمی[10]؛ ۲- روش‌های دینامیکی؛ ۳- روش‌های استاتیکی؛ ۴- آزمایش‌های غیر مخرب.

در دسته‌بندی فوق، روش‌ها و ابزارهای ارائه شده در آزمایش غیر مخرب که در شکل (۱) ارائه شده است، می‌تواند در جمع‌آوری اطلاعات آسیب‌های به وجود آمده در سطح اعضای سازه‌ای به‌کار رفته و از نتایج حاصل از آن در فاز اول سامانه که به بازرسی چشمی اختصاص داده‌شده است، بهره برد. لذا به طریقی می‌توان دسته‌ی اول و بخشی از امکانات به‌کار رفته در آزمایش غیر مخرب را نیز در یک دسته‌ی واحد طبقه‌بندی نمود.



شکل (۱): شناسایی سیستم با استفاده از روش‌های غیر مخرب.

۲-۱- معماری سامانه یکپارچه پایش سلامت پل (IBHMT)

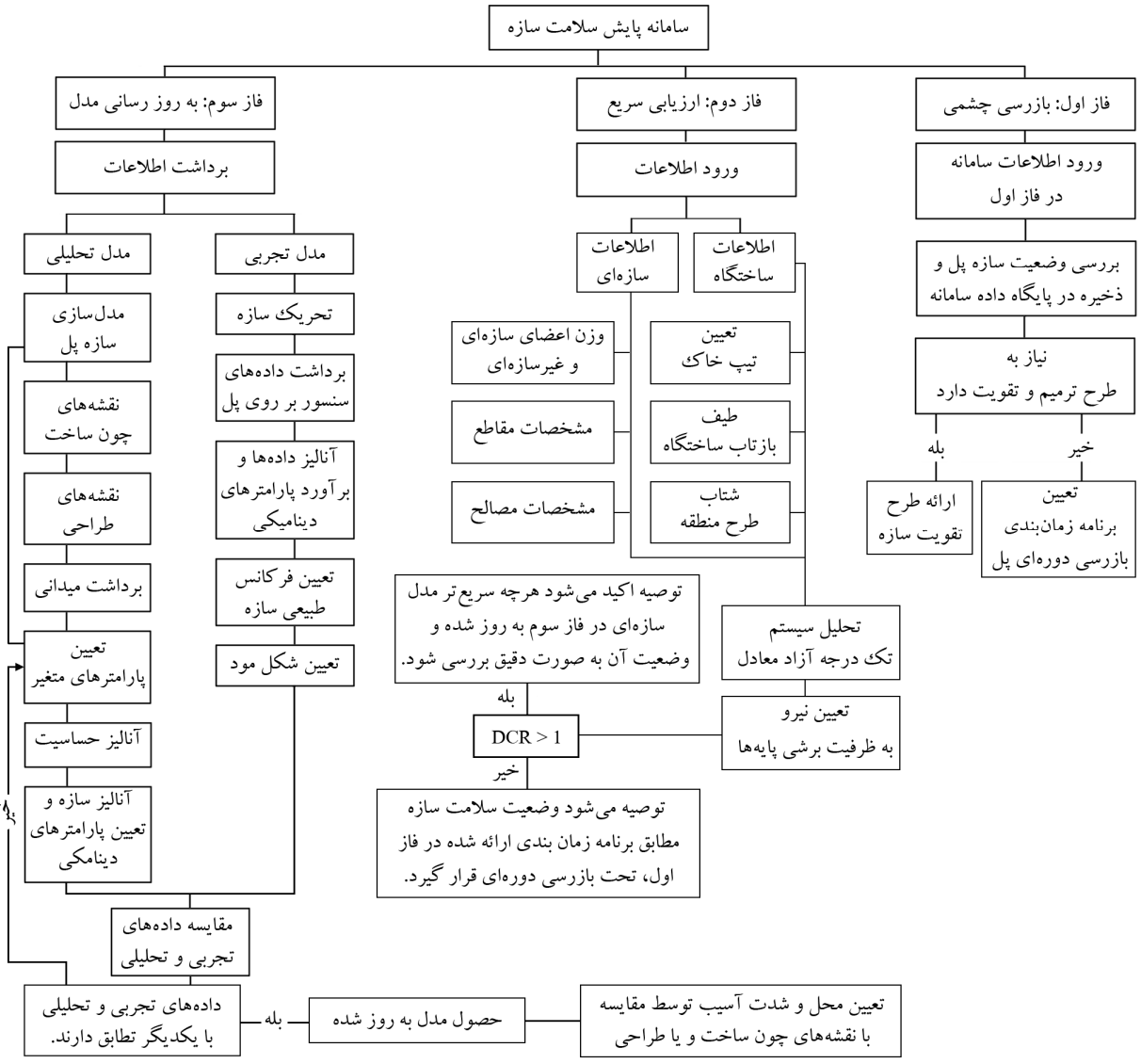
نرم‌افزارهای متعددی تحت عنوان سیستم مدیریت پل در کشورهای مختلف توسعه داده‌شده که در جدول (۱) به تعدادی از این نرم‌افزارها اشاره شده است.

به‌عنوان‌مثال سیستم مدیریت پل بانام J-BMS برای ارزیابی سرویس‌دهی پل‌های بتنی موجود توسط میاموتو ارائه گردید که به‌عنوان یک سیستم مدیریت پل در کشور ژاپن مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این سیستم علاوه بر ارزیابی عملکرد پل، با ترکیب کمینه‌سازی هزینه نگهداری و بیشینه‌سازی کیفیت، استراتژی‌های بهسازی نیز ارائه می‌شود. اغلب این نرم‌افزارها فقط به رتبه‌بندی بر اساس بازرسی چشمی و نهایتاً بررسی و پیشنهاد راهکارهای بهسازی بهینه پرداخته‌اند. در نرم‌افزارهای مدیریت پل موجود در ادبیات فنی، بررسی تحلیلی مدل سازه‌ای با استفاده از مدل‌های اجزای محدود، تحلیل‌های استاتیکی و دینامیکی سازه، شناسایی سیستم، به‌روزرسانی مدل، آزمایش‌های مخرب و غیر مخرب به‌صورت یکپارچه و جامع ارائه نشده است.

جدول (۱): نرم‌افزارهای توسعه داده شده سیستم مدیریت پل.

کشور	سیستم مدیریت پل
دانمارک	DANBRO (Danish Bridges and Roads)
فنلاند	FinnRABMS (Finish National Roads Administration Bridge Management System)
ایتالیا	SAMOA (Surveillance, Auscultation and Maintenance of Structures)
ژاپن	MICHI (Ministry of Construction Highway Information Database) J-BMS (Japan Bridge Management System)
آفریقای جنوبی	BMS.NRA (National Road Authority)
انگلیس	STEG (Structures Register) HiSMIS (Highway Structures Management Information System) BRIDGEMAN (BRIDGE Management System) COSMOS (Computerized System for the Management of Structures)
امریکا	PONTIS (Preservation, Optimization and Network information System) BRIDGIT (Bridge Information Technology) PENBMS (Pennsylvania Bridge Management System)

شایان‌ذکر است سیستم‌های مورداشاره در جدول (۱)، تنها برخی از سیستم‌های مدیریت پل مورد استفاده در کشورهای توسعه یافته می‌باشند و حتی در کشورهای درحال‌توسعه نیز ارزیابی وضعیت تمامی پل‌ها با استفاده از سیستم‌های مدیریت پل انجام می‌گیرد. بااین‌حال در کشورمان ایران تاکنون این‌گونه نرم‌افزارها جهت مدیریت بهینه پل‌ها، که بتواند با مقبولیت جامعه مهندسی و مدیران کشور روبرو شود ارائه نگردیده است. لذا سامانه IBHMT برای استفاده جامعه مهندسی و تصمیم‌گیرندگان و مالکان پل‌ها ارائه شده است تا بتواند این نیاز مهم و حیاتی را پوشش داده و به مدیریت بهینه سرمایه‌های عمرانی کشور کمک نماید. این سامانه در سه فاز تدوین و معماری آن مطابق شکل (۲) نمایش داده‌شده است.



شکل (۲): معماری سامانه پایش سلامت سازه (IBHMT).

فازهای اصلی به‌گونه‌ای تدوین‌شده‌اند که مرحله‌به‌مرحله، اطلاعات دقیق‌تری در رابطه با وضعیت کلی پل، در اختیار قرار می‌دهند.

در فاز اول سامانه که به‌نوعی گام اول در شروع فرآیند ارزیابی وضع موجود و تشخیص آسیب می‌باشد، به بازرسی چشمی پرداخته‌شده است. در این مرحله، کاربر با استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری ساده نظیر متر، کولیس و... نسبت به ثبت آسیب‌های قابل‌مشاهده، مبادرت می‌ورزد. سپس سامانه با استفاده از اطلاعات ورودی، شاخص سلامت پل را مطابق تحقیقات مودی (Moodi, 2001) تعیین و بر اساس آن اقدامات آتی را مشابه جدول (۲)، پیشنهاد می‌دهد. سپس، سامانه، بر مبنای اطلاعات ثبت‌شده در دوره‌های گذشته، نموداری را در اختیار کاربر قرار می‌دهد که توسط آن می‌توان به تدوین برنامه زمان‌بندی بازرسی پل در آینده، مطابق با روند تغییرات شاخص سلامت پل در بازرسی‌های گذشته، پرداخت. نمونه‌ای از این نمودارها به همراه توضیحات مرتبط با آن در شکل‌های (پ-۱۴) و (پ-۱۵) ارائه شده است.

در فاز دوم، سامانه به ارزیابی دقیق‌تر رفتار پل پرداخته و اطلاعات سازه‌ای نظیر ابعاد تیرهای اصلی، عرشه، پایه‌ها، جداسازها و .... را بر مبنای اندازه‌گیری‌های میدانی، نقشه‌های چون ساخت و... از کاربر دریافت نموده و بر مبنای طیف ورودی به سیستم، نسبت نیرو به تقاضای (DCR)[11] سازه را بر اساس تحلیل سیستم یک درجه آزاد معادل، محاسبه نموده و در قالب یک جدول، در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

در فاز سوم، سامانه با استفاده از رابط گرافیکی تدوین‌شده، API، موتورهای تحلیلی شرکت CSI و روش به‌روزرسانی، مدل تحلیلی منطبق با شرایط واقعی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. در این فاز امکان شناسایی آسیب در اعضای سازه‌ای تأثیرگذار بر پاسخ‌های دینامیکی نظیر شکل و انحنای مدها، فرکانس‌های طبیعی و... فراهم شده است.

۲-۲- روش سامانه یکپارچه پایش سلامت پل IBHMT

به‌طورکلی برنامه‌نویسی را می‌توان در دودسته‌ی رویه‌ای[12] و شیءگرا طبقه‌بندی نمود. جهت برنامه‌نویسی سامانه یکپارچه پایش سلامت پل‌ها از روش برنامه‌نویسی شیءگرا که به‌اختصار OOP[13] نامیده می‌شود، استفاده شده است. در این شیوه از برنامه‌نویسی، از خصوصیاتی نظیر شیء، صفت[14]، روش، کلاس، وراثت[15]، چندریختی[16]، انتزاع یا تجرید[17] و مخفی سازی[18] استفاده‌شده که قابلیت‌های فراوانی را برای سامانه ایجاد نموده است. ازجمله امکانات نرم‌افزار توسعه داده‌شده در فاز اول می‌توان به قابلیت ذخیره اطلاعات و داده‌ها، ایجاد یکپارچگی بین تصاویر و توضیحات، داشتن یک رابط کاربری گرافیکی (GUI) مناسب و سهولت استفاده برای کاربران اشاره نمود.

جدول (۲): شاخص وضعیت (CL) (Moodi, 2001).

میزان خرابی	شاخص وضعیت	توصیف وضعیت	اقدام پیشنهادی
کم	۹۵-۱۰۰	عالی: بدون نقص قابل‌ملاحظه	اقدام فوری لازم نیست، اما بازرسی دوره‌ای توصیه می‌شود. ممکن است نگهداری نیاز باشد.
	۸۵-۹۴	خیلی خوب: نقص قابل‌ملاحظه زنگ‌زدگی و گرد و خاک قابل‌رؤیت است	
متوسط	۷۰-۸۴	خوب: نقص آشکار تنها نارسایی، آسیب و خرابی اندک مشهود است	بازرسی تفصیلی و برآورد اقتصادی برای گزینه‌های تعمیرات توصیه می‌شود... در برخی حالات نگهداری و تعمیر لازم است.
	۵۰-۶۹	متوسط: نقص متوسط تعدادی نارسایی، آسیب و خرابی مشهود است اما بتن سازه‌ای قابل سرویس‌دهی است.	
عمده	۳۰-۴۹	ضعیف: نقص شدید در چندین عضو مهم اما بتن سازه‌ای قابل سرویس‌دهی است	بازرسی تفصیلی و ارزیابی مهندسی باید برای تعیین دامنه تعمیر، مقاوم‌سازی و نوسازی صورت پذیرد. ارزیابی ایمنی توصیه می‌شود.
	۰-۲۹	خیلی ضعیف: نقص خیلی شدید، وقوع گسیختگی کلی در اکثر اعضای سازه‌ای	

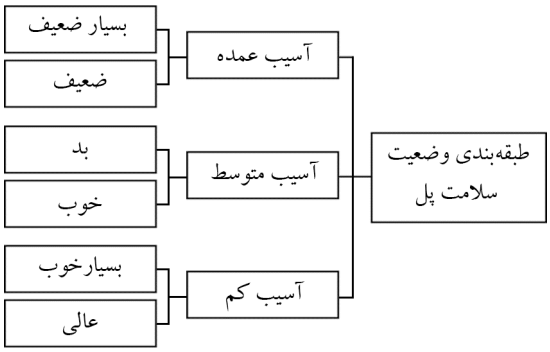
۲-۳- مبانی بازرسی چشمی در سامانه IBHMT

با اینکه روش‌های شناسایی سیستم متعددی تاکنون ارائه شده است، اما بازرسی چشمی یکی از مهم‌ترین و درعین‌حال ساده‌ترین روش‌ها جهت ارزیابی و پایش وضعیت و تضمین کیفیت و صحت عملیات نگهداری پل‌ها می‌باشد. اغلب سیستم‌های تصمیم‌گیری و مدیریت پل بر اساس ارزیابی‌های بازرسی‌های چشمی می‌باشد که توسط مهندسان آموزش‌دیده با استفاده از روش‌های مختلفی انجام می‌شود که در ادامه به آنها اشاره می‌گردد.

تکنیک‌های بازرسی چشمی بر روی بسیاری از پل‌ها تاکنون مورد استفاده قرارگرفته‌اند. در ایالات‌متحده، راهنمای فرایندهای بازرسی استانداردهای ملی بازرسی پل NBIS[۱۹]، توسط FHWA[۲۰] ارائه‌شده است (Secretary of Transportation, 2004). این استاندارد به‌عنوان یک راهنما برای فرایندهای بازرسی پل‌های فدرال و ایالتی مورد استفاده قرارگرفته به‌طوری‌که هنگام انجام بازرسی چشمی سعی می‌شود تا وضعیت هر جز سازه‌ای به‌صورت یک عدد بیان گردد و در نهایت با استفاده از این اعداد و سایر فاکتورهای مدنظر، امتیازدهی وضعیت پل صورت گیرد. در کشورهای مختلف از روش‌های بازرسی چشمی و متعاقباً مدل‌های متنوع امتیازدهی به وضع موجود اجزای پل استفاده می‌گردد. در بخش بعدی جزئیات مربوط به شاخص وضعیت پل‌های بتنی مورد استفاده در سامانه IBHMT ارائه شده است.

۲-۴- شاخص وضعیت پل‌های بتنی در سامانه IBHMT

در این پژوهش از تحقیقات انجام‌شده توسط مودی (Moodi, 2001) به‌منظور تدوین اولین فاز سامانه پایش سلامت سازه استفاده شده است. مودی از شاخص آسیب تحت عنوان سطح اطمینان اجزا (CCL)[۲۱] که عددی بین صفر (وخیم‌ترین وضع) تا ۱۰۰ (بهترین وضعیت عملکردی سیستم) می‌باشد، استفاده نموده است. ایشان در این پژوهش، روال تصمیم‌گیری بر مبنای این شاخص را که در سه سطح: کم، متوسط و عمده تقسیم‌بندی نموده (شکل ۳)، به شرح شکل (۴) ارائه داده است.



شکل (۳):تقسیم‌بندی وضعیت کلی سلامت سازه بر اساس تحقیق مودی (Moodi, 2001).

شکل (۴): دسته‌بندی آسیب‌ها در سطح اجزای سازه‌ای (Moodi, 2001).

مودی (Moodi, 2001)، تمام آسیب‌های موجود در سطح اجزای سازه‌ای را مطابق شکل (۴) در سه دسته‌ی کلی طبقه‌بندی نمود:

۱- ترک‌خوردگی[۲۲]،

۲- پوسته شدگی و جداشدگی[۲۳]،

۳- قلوه‌کن و لایه‌لایه شدگی[۲۴].

هرکدام از آسیب‌های در نظر گرفته شده، شامل زیرمجموعه‌هایی می‌شود که برای هرکدام از آنها امتیازاتی در نظر گرفته شده است. به عبارتی، مودی (Moodi, 2001) با تقسیم‌بندی تمام آسیب‌های سطحی و اختصاص امتیاز به هر یک از آنها، سعی درکمّی‌سازی بازدید چشمی کیفی، نموده است. شایان‌ذکر است جهت بررسی میزان و نحوه امتیازدهی به انواع آسیب‌ها توسط مودی، می‌توان به پیوست ب مراجعه نمود. پس‌ازآنکه آسیب‌های موجود در سازه مورد بررسی و امتیازات مربوط به هرکدام از آنها اعمال شد، تمام امتیازات به ترتیب

بزرگ‌تر به کوچک‌تر، ردیف شده و پنج امتیازی که بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند، در رابطه‌ی زیر قرارگرفته و مقدار ضریب CL محاسبه می‌شود (Bullock & Foltz, 1995):

$$CL = 100 - \left[1.0(DV_1) + 0.4(DV_2) + 0.2(DV_3) + 0.15(DV_4) + 0.1(DV_5)\right] \quad (۱)$$

در رابطه فوق، DV_1 بزرگ‌ترین امتیاز خرابی و DV_5 کوچک‌ترین مقدار آسیب در بین پنج آسیب عمده می‌باشد. پس‌ازآنکه مقدار CL تعیین شد، با استفاده از توصیه‌های ارائه شده در جدول (۲) نسبت به تعمیر یا عدم تعمیر، نگهداری و یا تعویض اجزای سازه‌ای تصمیم‌گیری می‌شود.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، با استفاده از نرم‌افزار Matlab و شیوه برنامه‌نویسی شیءگرا، یک رابط کاربری گرافیکی ایجاد شده که در آن کاربر می‌تواند به‌سادگی تمام اطلاعات مربوط به آسیب‌ها را وارد نموده و پس از تحلیل و پردازش اطلاعات به‌صورت خودکار توسط نرم‌افزار، مقدار شاخص وضعیت، محاسبه و نتیجه نهایی نمایش داده شود. همچنین در این نرم‌افزار امکان اضافه نمودن توضیحات تکمیلی، تصاویر مربوط به انواع خرابی‌ها و... وجود دارد.

۳- اعتبارسنجی بخش بازرسی چشمی نرم‌افزار IBHMT

بخش نخست سامانه IBHMT که به بازرسی چشمی اختصاص دارد کاربر را قادر می‌سازد تا با ایجاد فرایندهای ارزیابی مشخص و با استفاده از شاخص وضعیت (CL)، وضعیت فعلی پل‌های بتنی و اجزای آن را به‌صورت عددی بیان و در نهایت با استفاده از این شاخص، بهترین اقدام برای مدیریت تعمیر و نگهداری را تعیین کند. سیستم رتبه‌بندی مورد بحث که نشانگر یکپارچگی و سرویس‌دهی سازه است، این امکان را فراهم می‌سازد تا با استفاده از بازرسی چشمی و اطلاعات، توضیحات و تصاویر گرفته شده شاخص وضعیت را تعیین نمود. در این بخش، به‌منظور بررسی اعتبار و صحت عملکرد سامانه، دو مثال مورد بررسی قرارگرفته است. در ابتدا، از مثال حل‌شده توسط مودی (Moodi, 2001) استفاده و نتایج سامانه با نتایج حاصل از حل این مثال مقایسه و صحت عملکرد سامانه بررسی‌شده است. در مثال دوم نیز بازرسی چشمی بر روی یک پل اعمال و نتایج حاصل از آن به سامانه معرفی و وضعیت نهایی سرویس‌دهی آن مشخص گردید.

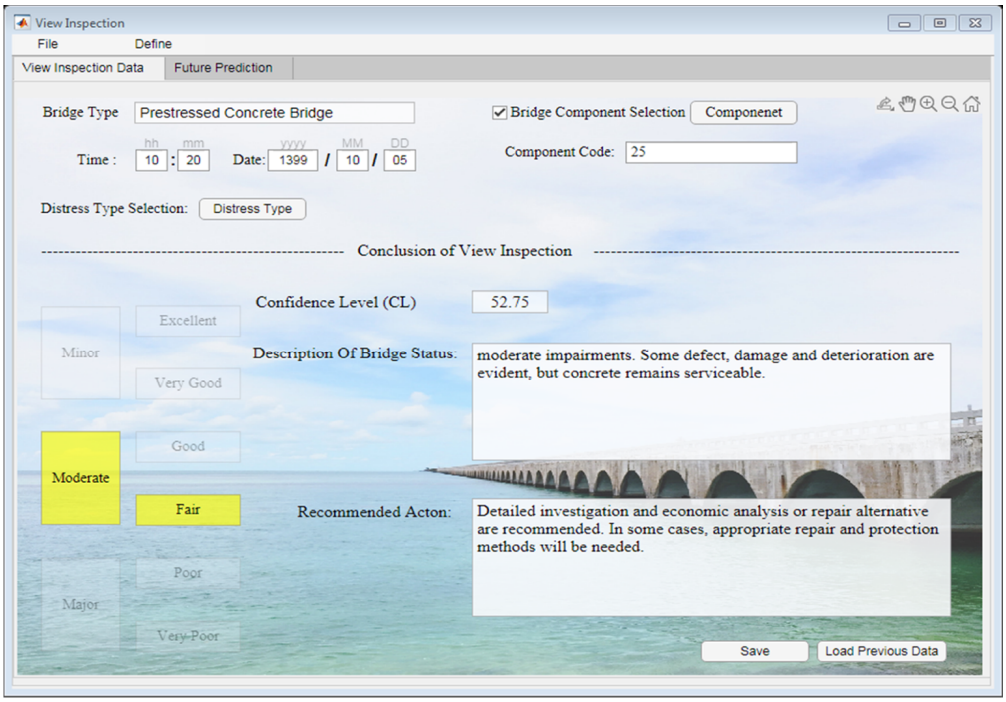
۳-۱- مثال اول

همان‌طور که در بخش قبل بدان اشاره شد، جهت بررسی صحت عملکرد سامانه، از مثال حل‌شده توسط مودی (Moodi, 2001) استفاده و خروجی سامانه با نتیجه ارائه‌شده توسط ایشان، مقایسه گردید. او در این مثال فرض نمود پس از بازرسی چشمی از یک پل، آسیب‌هایی مطابق آنچه در جدول (۳) ارائه شده، در سطح اعضای سازه‌ای پل، مشاهده شده است. سپس بر اساس امتیازات در نظر گرفته شده برای هر یک از آسیب‌ها، میزان سطح اطمینان (CL) را برابر با ۵۲/۷۵ به‌دست آورد.

در ادامه به‌منظور بررسی صحت عملکرد سامانه، این اطلاعات به نرم‌افزار معرفی و نتایجی مطابق شکل (۵) به‌دست آمد.

جدول (۳): وضعیت آسیب‌های مشاهده‌شده در فرآیند بازرسی چشمی (Moodi, 2001).

ردیف	وضع ظاهری آسیب	طبقه‌بندی	امتیاز
۱	زیرسطحی از نوع الگودار[۲۵]	ترک عمیق به عرض ۲ میلی‌متر	۳۰
۲	نشت و رسوبات سطح بتن[۲۶]	آسیب جزئی	۱۰
۳	پوسته شدگی[۲۷]	آسیب جزئی	۵
۴	لکه‌های زنگ‌زدگی	آسیب شدید	۱۵
۵	ترک‌های الگویی	ترک عمیق عرضی[۲۸]، به عرض ۲ میلی‌متر	۲۵
۶	بیرون‌زدگی و ایجاد چاله[۲۹]	متوسط	۲۰



شکل (۵) نتیجه نهایی بازرسی چشمی انجام‌شده به همراه توضیح وضعیت پل و اقدامات پیشنهادی

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، مقدار سطح اطمینان (CL) برابر با ۵۲/۷۵ به‌دست‌آمده است که با محاسبات مودی (Moodi, 2001)، تطابق کامل دارد.

لازم به ذکر است با توجه به آسیب‌های ایجاد شده در سطح اعضای بتنی، سامانه وضعیت کلی پل را متوسط توصیف نموده به‌طوری‌که تعدادی نارسایی، آسیب و خرابی را مشهود قلمداد نموده و درعین‌حال ادامه سرویس‌دهی بتن سازه‌ای را بلامانع تشخیص داده است.

لذا با توجه به شرایط موجود، پیشنهادشده است بازرسی تفصیلی و برآورد اقتصادی برای بررسی گزینه‌های مختلف تعمیرات، بررسی شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، این سامانه، مدیریت تعمیر و نگهداری پل‌ها را بسیار تسهیل نموده و می‌تواند هزینه‌های نگهداری را به‌طور چشمگیری کاهش دهد.

۳-۲- مثال دوم

در یک مثال کاربردی، پس از بازرسی چشمی از پلی، تصاویری مطابق شکل (۶) ثبت شده است. بر اساس آسیب‌های مشاهده شده و پیشنهادهای مودی (Moodi, 2001)، امتیازاتی مطابق جدول (۴) برای این آسیب‌ها در نظر گرفته شد.

جدول (۴): وضعیت آسیب‌های مشاهده‌شده در فرآیند بازرسی چشمی (Moodi, 2001).

ردیف	وضع ظاهری آسیب	طبقه‌بندی	امتیاز
۱	ترک منفرد[۳۰]	ترک ایجادشده از نوع قطری عمیق، باضخامت ۲/۵ میلی‌متر	۴۰
۲	ترک منفرد	ترک منفرد عرضی سطحی به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر	۱۰
۳	قلوه‌کن شدگی	آسیب شدید	۳۰
۴	لکه‌های زنگ	آسیب جزئی	۱۰
۵	نشت سطحی رسوبات	آسیب جزئی	۵
۶	کرمو شدگی[۳۱]	به‌طور متوسط حفره‌هایی باضخامت ۳۰ میلی‌متر	۲۰

(الف) ترک منفرد عمیق قطری به ضخامت ۲/۵ میلی‌متر

(ب) ترک منفرد عرضی سطحی به ضخامت ۰/۵ میلی‌متر

(پ) آسیب از نوع قلوه‌کن‌شدگی شدید

(ت) آسیب از نوع لکه‌های زنگ جزئی

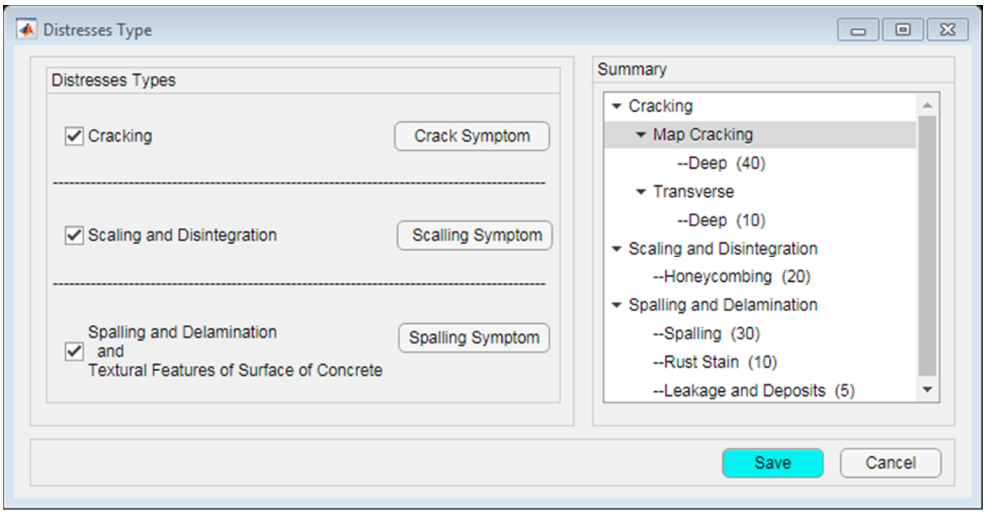
(ث) آسیب از نوع نشت رسوبات

(ج) کرموشدگی متوسط با سوراخ‌هایی با عرض متوسط ۳۰ میلی‌متر

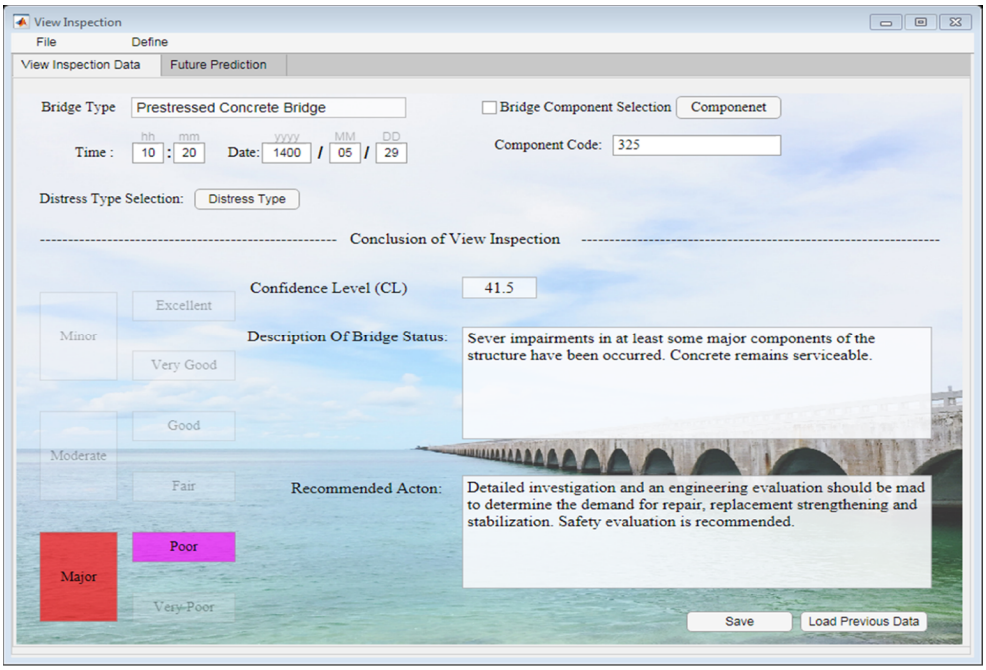
شکل (۶):آسیب‌های سطحی مشاهده‌شده.

سپس این امتیازات مطابق شکل (۷) به سامانه معرفی و پس از تحلیل داده‌ها، وضعیت نهایی پل مطابق شکل (۸) حاصل شد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مقدار سطح اطمینان (CL) برابر با ۴۱/۵ به‌دست‌آمده است که بر این اساس، وضعیت فعلی پل بدین‌صورت شرح داده شده است: (ضعیف: نقص شدید در چندین عضو مهم مشاهده‌شده، اما بتن سازه‌ای قابل سرویس‌دهی است).

ازاین‌رو پیشنهادشده است که: (بازرسی تفصیلی و ارزیابی مهندسی باید برای تعیین میزان تعمیر، مقاوم‌سازی و نوسازی صورت پذیرد. ارزیابی ایمنی توصیه می‌شود).



شکل (۷): خلاصه‌ای از اطلاعات ورودی به سامانه پایش سلامت سازه.



شکل (۸): وضعیت نهایی پل بازرسی‌شده.

۴- جمع‌بندی

در این مقاله پس از معرفی کلی سیستم پیشنهادی IBHMT، بخش اول سامانه یعنی بازرسی چشمی که با استفاده از رابط کاربر گرافیکی (GUI) توسعه داده شده، به‌صورت تفصیلی ارائه گردید. نرم‌افزار مذکور این امکان را برای کاربر فراهم می‌کند تا به‌سادگی اطلاعات مربوط به مراحل مختلف پایش سلامت سازه‌ای را در پایگاه داده وارد نموده و پس از پردازش خودکار داده‌ها، نتایج خروجی را مشاهده کند. با توجه به نیاز موجود جهت مدیریت و نگهداریِ زیرساخت‌های عمرانی شبکه حمل‌ونقل، سامانه ارائه‌شده در این مقاله می‌تواند برای مدیریت یکپارچه و بهینه پل‌ها توسط تصمیم‌گیران و مالکان پل‌ها به‌کار گرفته شود؛ به عبارتی، پرکاربردترین خروجی این بخش، تدوین برنامه مدیریت زمانی بازرسی پل به‌صورت دوره‌ای، متناسب با پیش‌بینی صورت گرفته با استفاده از اطلاعات جمع‌آوری‌شده در پایگاه داده است. تدوین برنامه زمانی بازرسی پل، می‌تواند هزینه‌های تعمیر و نگهداری سازه را به مقدار قابل‌ملاحظه‌ای کاهش داده و در بسیاری از موارد، از

وقوع حوادث غیرمترقبه، جلوگیری نماید. در کنار برنامه مدیریت زمانی پل، بایستی، برنامه مدیریت‌ترمیم سازه نیز به‌صورت موازی ارائه شده تا سطوح عملکردی سازه، از مقدار مشخصی کم‌تر نشود، چراکه با کاهش بیش‌ازحد سطح اطمینان پل، هزینه‌های مربوط به تعمیرات ثانویه به‌صورت غیرخطی و تصاعدی افزایش می‌یابد و از طرفی تعمیرات زودهنگام و متوالی نیز به علت اثربخشی ضعیف در اصلاح عملکرد پل، می‌تواند هزینه‌های نگهداری را به‌صورت قابل‌ملاحظه‌ای افزایش دهد. لذا با توجه به نوع، کاربری و شرایط بهره‌برداری از پل، برنامه تعمیر و نگهداری باید به‌گونه‌ای تدوین شود که از یک‌سو منجر به افزایش هزینه‌های نگهداری و از سوی دیگر باعث افزایش هزینه‌های تعمیرات ثانویه نشود. به‌منظور بررسی عملکرد سامانه در این بخش می‌توان به پیوست ج، مراجعه نمود.

اغلب سیستم‌های پایش سلامت سازه‌ای (SHM) موجود در ادبیات فنی بر روی یک روش خاص به‌تنهایی متمرکز هستند که اطلاعات محدودی در مورد وضعیت سیستم مورد بررسی در اختیار قرار می‌دهد، درحالی‌که استفاده مناسب از تعدادی از روش‌ها در کنار هم منجر به دستیابی به اطلاعات بسیار مفیدتری نسبت به روش‌های مجزا می‌شود. جهت تکمیل سامانه IBHMT می‌بایست نرم‌افزار را برای انواع پل‌های موجود در مواجهه با سناریوهای متنوع آسیب با استفاده از بازرسی چشمی، روش‌های استاتیکی و دینامیکی، آزمایش‌های غیر مخرب (NDT)، انواع مختلف حس‌گرها و همچنین روش‌های مختلف شناسایی توسعه داد. در سیستم نهایی، مسیرهای متنوعی برای پایش وضعیت سازه وجود دارد به‌گونه‌ای که هر مسیر می‌تواند منجر به یکی از سطوح پایش سلامت سازه‌ای از قبیل وجود آسیب، محل آسیب، شدت آسیب و تخمین عمر باقی‌مانده سازه گردد.

مراجع

Avendano, J., Otero, L., & Otero, C. (2021). Optimization of sensor placement in a bridge structural health monitoring system. *In 2021 IEEE International Systems Conference (SysCon)*, 1-5.

Balageas, D., Fritzen, C.-P., & Güemes, A. (2010). *Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons.

Bullock, R., & Foltz, S. (1995). *REMR Management Systems-Navigation and Reservoir Structures, Condition Rating Procedures for Concrete in Gravity Dams, Retaining Walls, and Spillways*. Champaign, IL: Construction Engineering Research Lab (ARMY).

Chen, G.-W., Omenzetter, P., & Beskhyroun, S. (2021). Modal systems identification of an eleven-span concrete motorway off-ramp bridge using various excitations. *Engineering Structures, 229*.

Comisu, C.-C., Taranu, N., Boaca, G., & Scutaru, M.-C. (2017). Structural health monitoring system of bridges. *Procedia Engineering, 199*, 2054-2059.

Doebling, S., Farrar, C., Prime, M., & Shevitz, D. (1996). *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review.*

Dorafshan, S., Campbell, L., Maguire, M., & Connor, R. (2021). Benchmarking unmanned aerial systems-assisted inspection of steel bridges for fatigue cracks. *Transportation Research Record, 2675*(9), 154-166.

Farrar, C., S. W., D., & Nix, D. (2001). Vibration–based structural damage identification. In *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 359*, 131-149.

Flah, M., Nunez, I., Chaabene, W., & Nehdi, M. (2021). Machine learning algorithms in civil structural health monitoring: A systematic review. *Archives of Computational Methods in Engineering, 28*(4), 2621-2643.

Han, Q., Ma, Q., Xu, J., & Liu, M. (2021). Structural health monitoring research under varying temperature condition: a review. *Journal of Civil Structural Health Monitoring, 11*(1), 149-173.

Huang, H.-B., Yi, T.-H., Li, H.-N., & Liu, H. (2020). Strain-based performance warning method for bridge main girders under variable operating conditions. *Journal of Bridge Engineering, 25*(4).

Lin, J., Ibrahim, A., Sarwade, S., & Golparva, M. (2021). Bridge inspection with aerial robots: Automating the entire pipeline of visual data capture, 3D mapping, defect detection, analysis, and reporting.

Journal of Computing in Civil Engineering, 35(2).

Modena, C., Tecchio, G., Pellegrino, C., da porto, F., Donà, M., Zampieri, P., & Zanini, M. (2015). Reinforced concrete and masonry arch bridges in seismic areas: typical deficiencies and retrofitting strategies. *Structure and Infrastructure Engineering, 11*(4), 415-442.

Moodi, F. (2001). *Development of a Knowledge-Based System for the Repair and Maintenance of Concrete Structures*. Newcastle university.

Obiechefu, C., & Kromanis, R. (2021). Damage detection techniques for structural health monitoring of bridges from computer vision derived parameters. *Structural Monitoring and Maintenance, 8*(1).

Quirk, L., Matos, J., Murphy, J., & Pakrashi, V. (2018). Visual inspection and bridge management. *Structure and Infrastructure Engineering, 14*(3), 320-332.

Reagan, D., Sabato, A., & Niezrecki, C. (2018). Feasibility of using digital image correlation for unmanned aerial vehicle structural health monitoring of bridges. *Structural Health Monitoring, 17*(5), 1056-1072.

Rizzo, P., & Enshaeian, A. (2021). Challenges in bridge health monitoring: A review. *Sensors, 21*(13).

Saleem, M., Park, J.-W., Lee, J.-H., Jung, H.-J., & Sarwar, M. (2021). Instant bridge visual inspection using an unmanned aerial vehicle by image capturing and geo-tagging system and deep convolutional neural network. *Structural Health Monitoring, 20*(4), 1760-1777.

Secretary of Transportation. (2004). *National Bridge Inspection Standards (NBIS).* Washington D.C.: FHWA.

Vagnoli, M., Remenyte-Prescott, R., & Andrews, J. (2018). Railway bridge structural health monitoring and fault detection: State-of-the-art methods and future challenges. *Structural Health Monitoring, 17*(4), 971-1007.

Wang, X., Gao, Q., & Liu, Y. (2020). Damage detection of bridges under environmental temperature changes using a hybrid method. *Sensors, 20*(14).

Zanini, M., Faleschini, F., & Pellegrino, C. (2017). Bridge residual service-life prediction through Bayesian visual inspection and data updating. *Structure and Infrastructure Engineering, 13*(7), 906-917.

Zhu, Y., Ni, Y.-Q., Jesus, A., Liu, J., & Laory, I. (2018). Thermal strain extraction methodologies for bridge structural condition assessment. *Smart Materials and Structures, 27*(10).

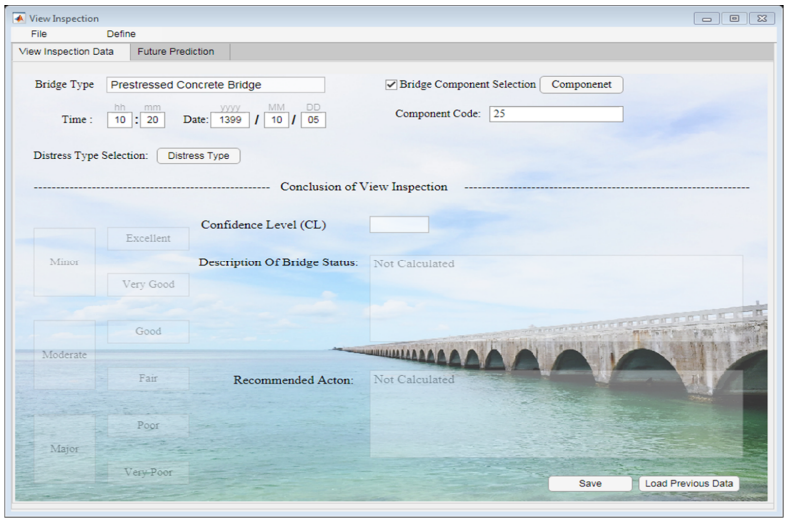
پیوست الف

در این قسمت، فرآیند ورود اطلاعات مطرح‌شده در مثال اول حل‌شده در این پژوهش که مقایسه‌ی بین پژوهش ارائه‌شده توسط مودی (Moodi, 2001) و سامانه حاضر می‌باشد، ارائه‌شده است. لذا در گام اول ابتدا باید مشخصات کلی پل مطابق شکل (پ- ۱)، به نرم‌افزار معرفی شود. سپس در پایگاه داده مربوط به نرم‌افزار، برای هر یک از قسمت‌های پل به‌صورت اختیاری در قسمت Component code، یک شماره اختصاص داده می‌شود. کاربر پس از تکمیل فرم اولیه مربوط به اطلاعات کلی پل، جهت تعیین آسیب‌های سازه‌ای واردشده، می‌بایست با انتخاب گزینه‌ی نوع آسیب (Distress Type) وارد صفحه‌ی مربوط به لیست انواع آسیب‌ها شده و اطلاعات مربوطه را به تفکیک وارد کند.

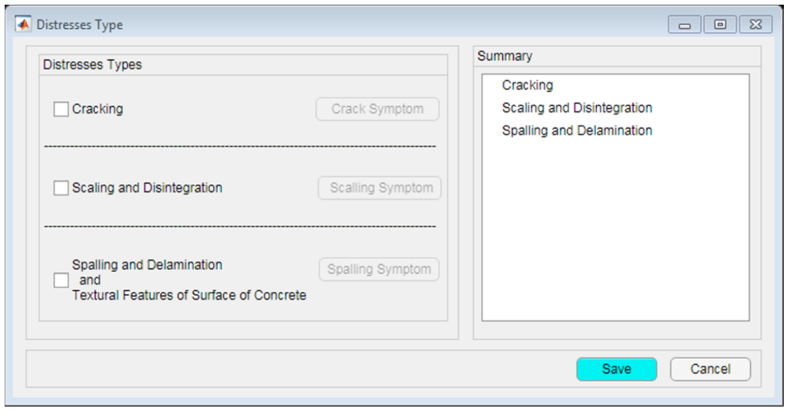
در گام دوم، مطابق شکل (پ- ۲) یکی از انواع آسیب‌ها (ترک‌خوردگی، پوسته‌پوسته‌شدگی و یا قلوه‌کن‌شدگی) انتخاب و مطابق شکل‌های (پ-۳) تا (پ-۱۳)، امتیازاتی متناسب با آنچه در تحقیقات مودی ارائه شده است، به سامانه معرفی می‌شود.

پیوست ب

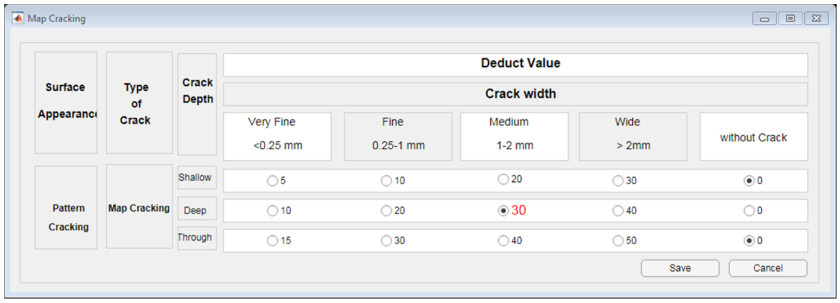
فاز اول سامانه پایش سلامت سازه‌ای به تدوین بازرسی چشمی به‌عنوان یکی از روش‌های جمع‌آوری اطلاعات از یک‌سو و اولین گام در ارزیابی وضع موجود سازه‌ای از سوی دیگر پرداخته‌شده است. این بخش از سامانه بر مبنای انواع آسیب‌های احتمالی بر روی سطح اعضای بتنی، بناشده که مقادیر هر یک از آن‌ها مطابق تحقیق مودی (Moodi, 2001)، در جداول (پ- ۱) تا (پ-۵) ارائه‌شده است.



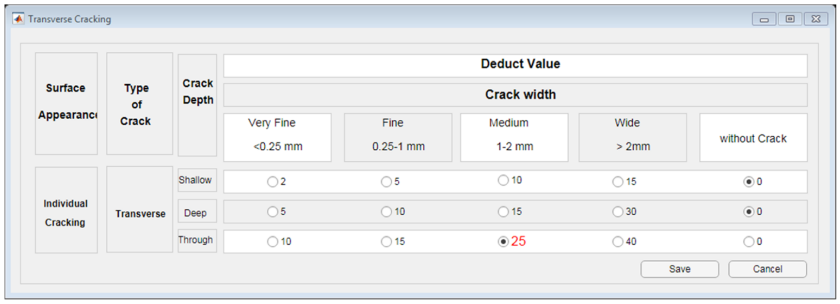
شکل (پ-۱): معرفی مشخصات کلی پل.



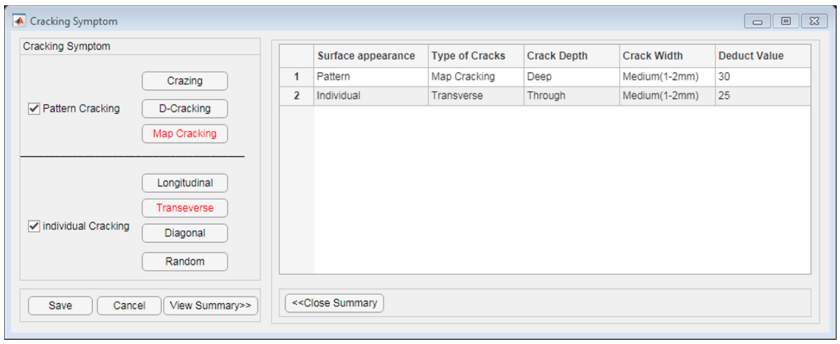
شکل (پ-۲): انتخاب نوع آسیب جهت ورود اطلاعات.



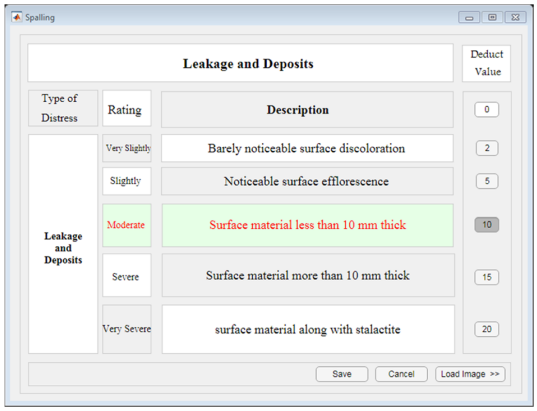
شکل (پ-۳): انتخاب نوع آسیب جهت ورود اطلاعات.



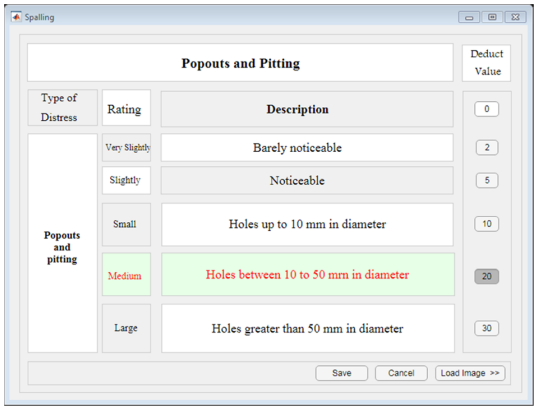
شکل (پ-۴): ترک عرضی عمیق با عرض متوسط.



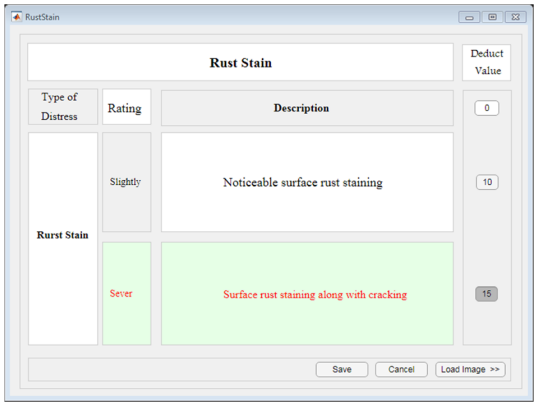
شکل (پ-۵): واردکردن اطلاعات ترک الگویی و منفرد در نرم‌افزار.



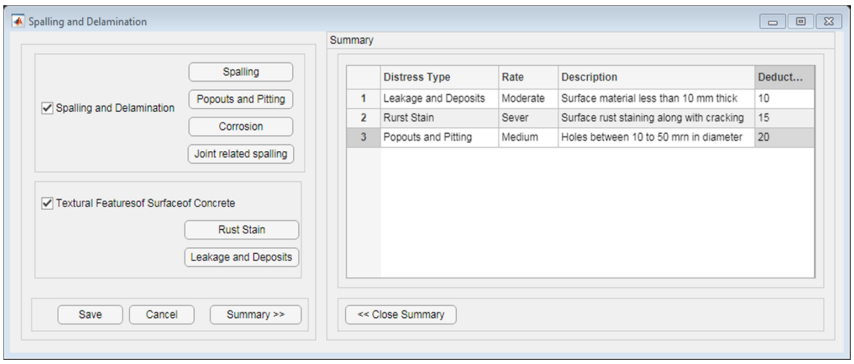
شکل (پ-۶): نشت و رسوبات سطحی بتن با شدت متوسط.



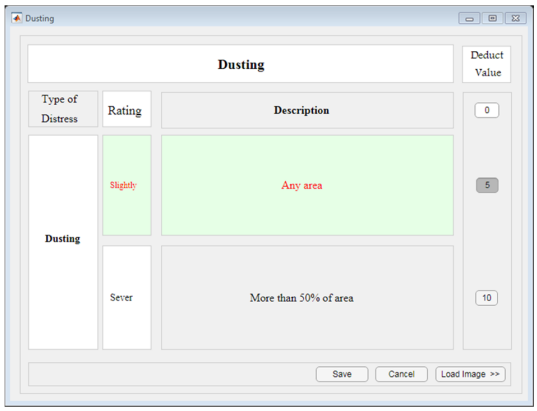
شکل (پ-۷): حفره شدگی و بیرون‌زدگی متوسط.



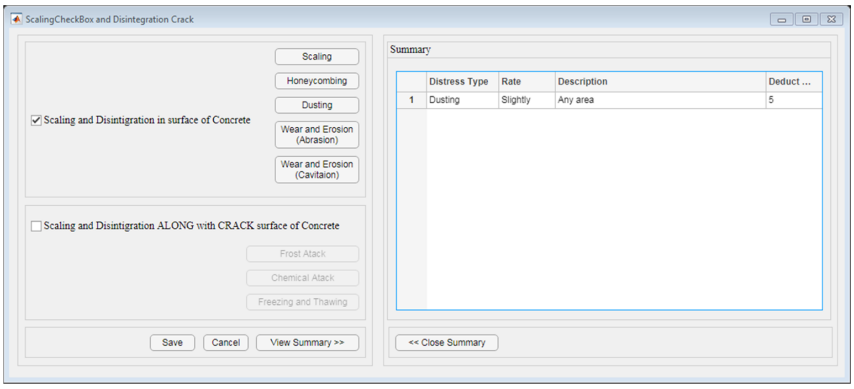
شکل (پ-۸): لکه‌های زنگ‌زدگی شدید.



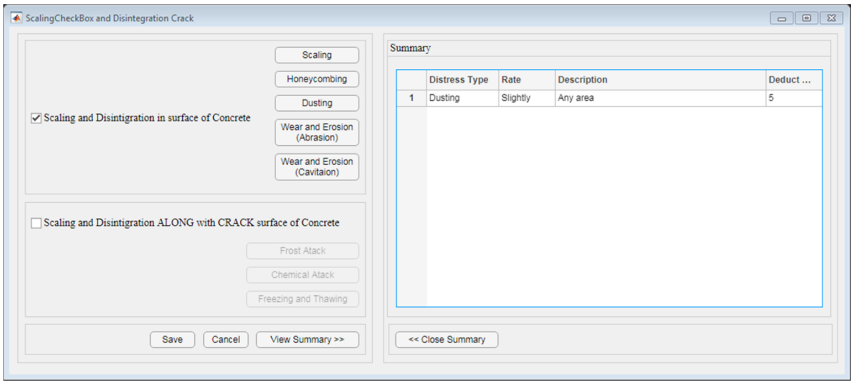
شکل (پ-۹): خلاصه‌ای از وضعیت امتیازات قلوه‌کن و لایه‌لایه شدگی.



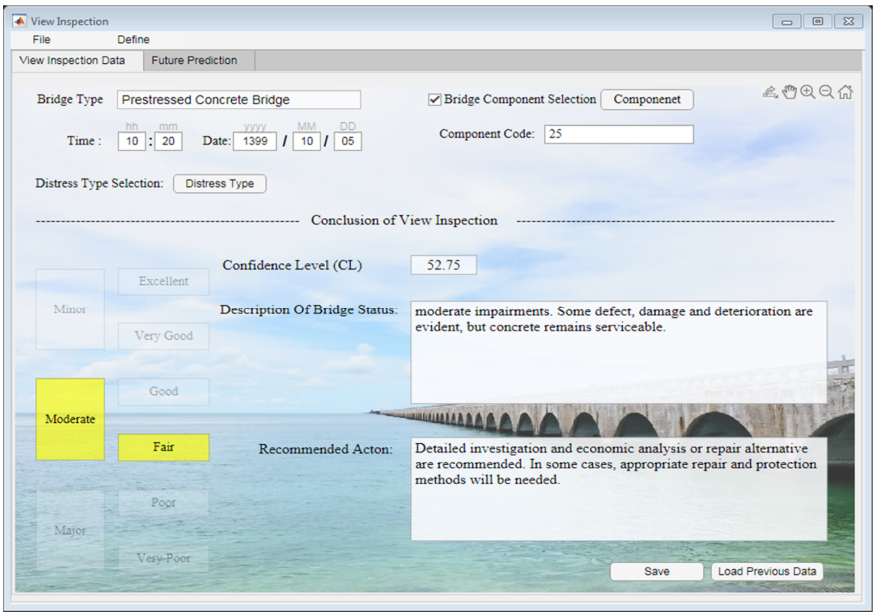
شکل (پ-۱۰): پوسته‌شدگی خفیف.



شکل (پ-۱۱): وارد کردن اطلاعات پوسته‌شدگی.



شکل (پ-۱۲): خلاصه اطلاعات مربوط به آسیب‌های وارد شده در نرم‌افزار.



شکل (پ-۱۳): صفحه نهایی نمایش شاخص وضعیت پل پس از بازرسی چشمی.

جدول (پ-۱): امتیازدهی خرابی ترک‌خوردگی‌ها (Moodi, 2001).

وضع ظاهری	نوع ترک	طبقه‌بندی	امتیاز خرابی			
			عرض ترک			
		عمق ترک	خیلی نازک (کمتر از ۰/۲۵ میلی‌متر)	نازک (بین ۰/۲۵ تا یک میلی‌متر)	متوسط (بین ۱ تا ۲ میلی‌متر)	عریض (بزرگ‌تر از ۲ میلی‌متر)
منفرد	طولی	سطحی	۵	۱۰	۲۰	۳۰
		عمیق	۱۰	۱۰	۳۵	۵۰
		سراسری	۲۰	۳۵	۵۰	۷۰
	عرضی	سطحی	۵	۱۰	۲۰	۳۰
		عمیق	۱۰	۲۵	۴۰	۶۰
		سراسری	۲۰	۴۰	۶۰	۸۰
	قطری	سطحی	۵	۱۰	۲۰	۳۰
		عمیق	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
		سراسری	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
	نامنظم	سطحی	۵۰	۱۰	۲۰	۳۰
		عمیق	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
		سراسری	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
	درزها و اتصالات	سطحی	۵۰	۱۰	۲۰	۳۰
		عمیق	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
		سراسری	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰
الگویی	ریزسطحی	سطحی	۵	۱۰	–	–
	درهم	سطحی	۵	۱۰	۲۰	۳۰
		عمیق	۱۰	۲۰	۳۰	۴۰
		سراسری	۲۰	۳۰	۴۰	۵۰

جدول (پ-۲): امتیازدهی خرابی آسیب‌های سطحی بتن (Moodi, 2001).

نوع نارسایی در سطح بتن	طبقه‌بندی	توصیف	امتیاز خرابی
قلوه‌کن‌شدگی	خیلی جزئی	به‌سختی قابل تشخیص	۵
	جزئی	به‌وضوح قابل تشخیص	۱۰
	متوسط	اندازه قطر سوراخ‌ها بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر	۲۰
	شدید	عمق کمتر از ۲۰ میلی‌متر- عرض کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر (در هر جهت)	۳۰
	خیلی شدید	عمق بیشتر از ۲۰ میلی‌متر- عرض بیشتر از ۱۵۰ میلی‌متر (در هر جهت)	۵۰
بیرون‌زدگی و ایجاد چاله	خیلی جزئی	به‌سختی قابل تشخیص	۲
	جزئی	به‌وضوح قابل تشخیص	۵
	متوسط	اندازه قطر سوراخ‌ها بزرگ‌تر از ۱۰ میلی‌متر	۱۰
	شدید	اندازه سوراخ‌ها با قطری بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر	۲۰
	خیلی شدید	اندازه سوراخ‌ها بیشتر از ۵۰ میل متر	۳۰
پوسته‌شدگی	خیلی جزئی	از بین رفتن ملات سطحی قابل تشخیص	۲
	جزئی	از بین رفتن ملات سطحی بدون ظاهر شدن دانه‌های درشت	۵
	متوسط	از بین رفتن ۵ تا ۱۰ میلی‌متر ضخامت ملات و ظاهر شدن دانه‌های درشت	۱۰
	شدید	از بین رفتن ۵ تا ۱۰ میلی‌متر ضخامت ملات سطحی به همراه ظاهر شدن دانه‌های درشت معمولاً به عمق بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر	۲۰
	خیلی شدید	از بین رفتن کامل ملات سطحی به همراه ظاهر شدن دانه‌های درشت معمولاً به عمق بیش از ۲۰ میلی‌متر	۳۰
سایش و فرسایش (حفره‌زایی)[۳۳]	خیلی جزئی	از بین رفتن ملات سطحی قابل تشخیص	۵
	جزئی	از بین رفتن ملات سطحی بدون ظاهر شدن دانه‌های درشت	۱۰
	متوسط	از بین رفتن ۵ تا ۱۰ میلی‌متر ضخامت ملات و ظاهر شدن دانه‌های درشت	۲۰
	شدید	از بین رفتن ۵ تا ۱۰ میلی‌متر ضخامت ملات سطحی به همراه ظاهر شدن دانه‌های درشت معمولاً به عمق بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر	۴۰
	خیلی شدید	از بین رفتن کامل ملات سطحی به همراه ظاهر شدن دانه‌های درشت معمولاً به عمق بیش از ۲۰ میلی‌متر	۶۰
سایش و فرسایش (ساییدگی)[۳۴]	خیلی جزئی	از بین رفتن ملات سطحی قابل تشخیص	۲
	جزئی	از بین رفتن ملات سطحی بدون ظاهر شدن دانه‌های درشت	۵
	متوسط	از بین رفتن ۵ تا ۱۰ میلی‌متر ضخامت ملات و ظاهر شدن دانه‌های درشت	۱۰
	شدید	از بین رفتن ۵ تا ۱۰ میلی‌متر ضخامت ملات سطحی به همراه ظاهر شدن دانه‌های درشت معمولاً به عمق بین ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر	۲۰
	خیلی شدید	از بین رفتن کامل ملات سطحی به همراه ظاهر شدن دانه‌های درشت معمولاً به عمق بیش از ۲۰ میلی‌متر	۳۰
قلوه‌کن شدگی مربوط به درزها	خیلی جزئی	به‌سختی قابل تشخیص	۲
	جزئی	به‌وضوح قابل تشخیص	۵
	متوسط	اندازه قطر سوراخ‌ها بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر	۱۰
	شدید	عمق کمتر از ۲۰ میلی‌متر- عرض کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر (در هر جهت)	۲۰
	خیلی شدید	عمق بیشتر از ۲۰ میلی‌متر- عرض بیشتر از ۱۵۰ میلی‌متر (در هر جهت)	۳۰

ادامه جدول (پ-۲): امتیازدهی خرابی آسیب‌های سطحی بتن (Moodi, 2001).

نوع نارسایی در سطح بتن	طبقه‌بندی	توصیف	امتیاز خرابی
کرمو شدگی	خیلی جزئی	به‌سختی قابل تشخیص	۲
	جزئی	قابل تشخیص	۵
	کم	وجود سوراخ‌هایی تا قطر ۱۰ میلی‌متر	۱۰
	متوسط	وجود سوراخ‌هایی با قطر بین ۱۰ تا ۵۰ میلی‌متر	۲۰
	زیاد	وجود سوراخ‌هایی با قطر بیشتر از ۵۰ میلی‌متر	۳۰
شوره‌زدگی و رسوب	خیلی جزئی	شوره‌زدگی به‌سختی قابل تشخیص	۲
	جزئی	شوره‌زدگی به‌وضوح قابل تشخیص	۵
	متوسط	ضخامت شوره‌زدگی کمتر از ۱۰ میلی‌متر	۱۰
	شدید	ضخامت شوره‌زدگی بیشتر از ۱۰ میلی‌متر	۱۵
	خیلی شدید	شوره‌زدگی به همراه گل شوره	۲۰
لکه زنگ آهن	جزئی	لکه در سطح قابل تشخیص	۱۰
	شدید	لکه در امتداد ترک‌خوردگی	۱۵
پودر شدگی	جزئی	کمتر از ۵۰ درصد سطح المان	۵
	شدید	بیشتر از ۵۰ درصد سطح المان	۱۰
قلوه‌کن شدگی ناشی از خوردگی	جزئی	کمتر از ۵۰ درصد سطح المان	۳۰
	شدید	بیشتر از ۵۰ درصد سطح المان	۴۰

جدول (پ- ۳): امتیازدهی خرابی نارسایی سطح بتن در امتداد ترک‌ها (Moodi, 2001).

نوع نارسایی در سطح بتن	طبقه‌بندی	توصیف	امتیاز خرابی
ناشی از حملات یخ‌بندان (ترک‌های موازی لبه‌ها و درزها)	جزئی	کمتر از ۲۵ درصد سطح با ترک‌های ریز	۵
	متوسط	بیشتر از ۲۵ درصد و کمتر از ۵۰ درصد سطح با ترک‌های متوسط	۱۰
	شدید	بیشتر از ۵۰ درصد سطح با ترک‌های عریض	۳۰
ناشی از حملات شیمیایی[۳۵] (سولفات و ...)	خیلی جزئی	قابل توجه	۵
	جزئی	از بین رفتن ملات سطح با ترک‌های خیلی ریز، بدون رؤیت شدن سنگ‌دانه‌ها	۱۵
	متوسط	از بین رفتن ملات سطح به عمق ۵ تا ۱۰ میلی‌متر با ترک‌های درهم ریز، رؤیت شدن سنگ‌دانه‌ها	۲۵
	شدید	از بین رفتن ملات سطح به عمق ۵ تا ۱۰ میلی‌متر به همراه از بین رفتن ملات اطراف سنگ‌دانه‌ها به عمق ۱۰ تا ۲۰ میلی‌متر، با ترک‌های درهم متوسط	۴۰
	خیلی شدید	از بین رفتن ذرات درشت‌دانه به همراه ملات اطراف سنگ‌دانه‌ها تا عمق بیشتر از ۲۰ میلی‌متر با ترک‌های در هم عریض	۶۰

جدول (پ- ۴): امتیازدهی خرابی نارسایی سازه‌ای (Moodi, 2001).

نارسایی سازه‌ای	طبقه‌بندی	امتیاز خرابی			
		عرض ترک			
	طول ترک	خیلی نازک (کمتر از ۰/۲۵ میلی‌متر)	نازک (بین ۰/۲۵ تا ۱ میلی‌متر)	متوسط (بین ۱ تا ۲ میلی‌متر)	عریض (بیشتر از ۲ میلی‌متر)
ترک خمشی	کوتاه	۱/۰۵	۱/۱	۱/۲	۱/۳
	متوسط	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴
	سراسری	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۵

ادامه جدول (پ-۴): امتیازدهی خرابی نارسایی سازه‌ای (Moodi, 2001).

نارسایی سازه‌ای	طبقه‌بندی	امتیاز خرابی			
		عرض ترک			
	طول ترک	خیلی نازک (کمتر از ۰/۲۵ میلی‌متر)	نازک (بین ۰/۲۵ تا ۱ میلی‌متر)	متوسط (بین ۱ تا ۲ میلی‌متر)	عریض (بیشتر از ۲ میلی‌متر)
ترک برشی	کوتاه	۱/۰۵	۱/۱	۱/۲	۱/۳
	متوسط	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴
	سراسری	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۵
ترک کششی	کوتاه	۱/۰۵	۱/۱	۱/۲	۱/۳
	متوسط	۱/۱	۱/۲	۱/۳	۱/۴
	سراسری	۱/۲	۱/۳	۱/۴	۱/۵

جدول (پ-۵): امتیازدهی خرابی نارسایی سازه‌ای (Moodi, 2001).

نوع نارسایی سازه‌ای	طبقه‌بندی	توصیف	امتیاز خرابی
خیز اضافی	خیلی جزئی	بیش از مقدار محاسبه شده در سازه	۵
	جزئی	بیش از مقدار محاسبه شده در سازه	۱۰
	متوسط	بیش از مقدار محاسبه شده در سازه	۲۰
	شدید	بیش از مقدار محاسبه شده در سازه	۳۰
	خیلی شدید	بیش از مقدار محاسبه شده در سازه	۵۰
تغییرات درجه حرارت	جزئی	۱۰ درجه	۲۰
	متوسط	۲۰ درجه	۴۰
	شدید	۳۰ درجه	۶۰
خستگی	خیلی جزئی	بر اساس متوسط ترافیک روزانه	۵
	جزئی	بر اساس متوسط ترافیک روزانه	۱۰
	متوسط	بر اساس متوسط ترافیک روزانه	۲۰
	شدید	بر اساس متوسط ترافیک روزانه	۳۰
	خیلی شدید	بر اساس متوسط ترافیک روزانه	۵۰

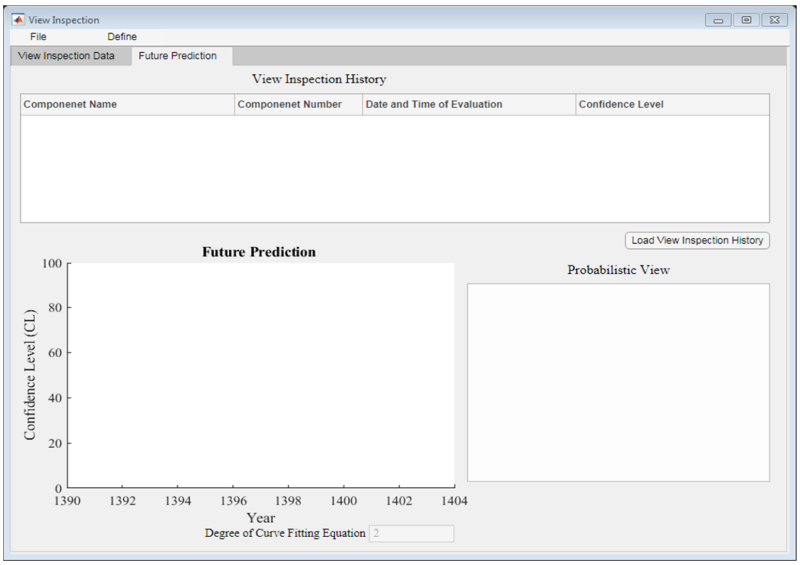
پیوست ج

در سامانه پایش سلامت سازه، تمام امتیازات، به‌صورت دسته‌بندی شده در اختیار کاربر قرار گرفته و می‌توان برای هر نوع ترک و آسیب، تصاویر آن را نیز ذخیره نمود. این امر در پایش روند آسیب طی مدت زمان معین، جهت مدیریت برنامه زمانی بازرسی پل، امکانات مناسبی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. لذا پس از پایان عملیات بازرسی چشمی، کاربر می‌تواند، با انتخاب گزینه Save، تمام اطلاعات موجود در این بخش را جهت به‌کارگیری اطلاعات آن در آینده، ذخیره نماید. در مرحله بعد بر اساس پایگاه داده ایجاد شده در دوره‌های گذشته و همچنین پیش‌بینی روند آینده، زبانه‌ای تحت عنوان پیش‌بینی آینده (Future Prediction) تدوین‌شده است. با انتخاب این گزینه، صفحه‌ای مطابق شکل (پ-۱۴) نمایش داده می‌شود.

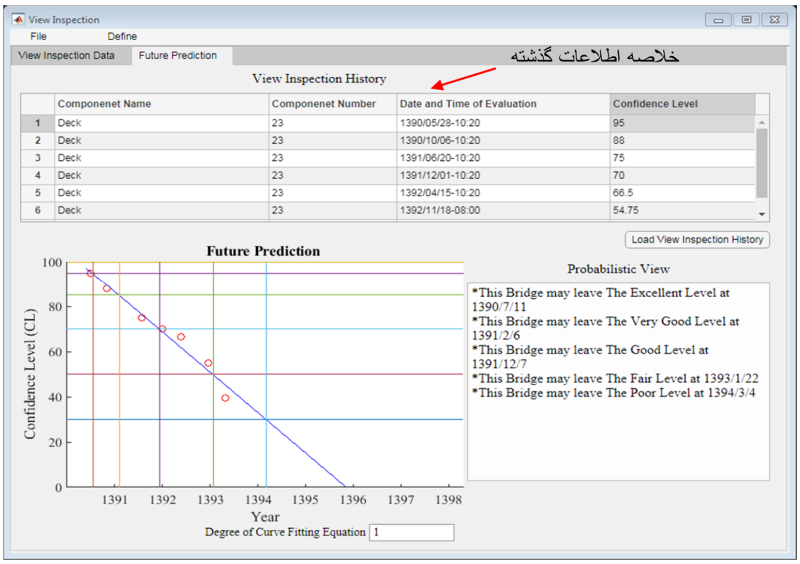
در این بخش، بایستی ابتدا توسط گزینه Load View Inspection History، اطلاعات ذخیره‌شده در ادوار گذشته را فراخوانی نمود. سپس، خلاصه‌ای از اطلاعات فراخوانی شده در جدول تعبیه شده در این بخش، شامل: نام عضو سازه‌ای، کد عضو، تاریخ و زمان برداشت داده و سطح اطمینان، نمایش داده خواهد شد (شکل پ- ۱۵). بر اساس این اطلاعات، در دو بخش (نمودار و جدول)، به بررسی روند گذشته و پیش‌بینی روند

آینده، پرداخته‌شده است.

در بخش نموداری بررسی روند گذشته و پیش‌بینی آینده، امتیازات مربوط به سطح اطمینان ادوار گذشته در نموداری که محور قائم آن، CL و محور افقی آن تاریخ جمع‌آوری اطلاعات است، ترسیم و با استفاده از رگرسیونی که درجه آن در قسمت درجه معادله به برازش منحنی (Degree of Curve Fitting Equation)، توسط کاربر مشخص می‌شود، روند آینده پیش‌بینی می‌شود. درجه منحنی برازش، توسط کاربر، بر مبنای دید مهندسی، به‌گونه‌ای انتخاب می‌شود که نمودار برازش شده، بیشترین همبستگی با داده‌های جمع‌آوری‌شده را داشته باشد. در نهایت، بر اساس روند ایجاد شده، پیش‌بینی روند آتی پل، توسط سامانه انجام و بر اساس این روند، برنامه بازرسی پل و یا ترمیم آن به‌منظور جلوگیری از عبور مقدار CL از مقدار مشخص تعیین شده توسط مدیران اجرایی، ارائه می‌گردد. در انتخاب مقدار CL به‌منظور ترمیم پل بایستی دقت کافی به عمل آید زیرا ترمیم پل در سطوح بالا منجر به بی‌اثر شدن ترمیم و یا در سطوح بسیار پایین، منجر به افزایش تصاعدی هزینه‌ها و یا وقوع حوادث ناگوار خواهد شد.



شکل (پ-۱۴): پیش‌بینی روند آسیب‌های احتمالی در آینده.



شکل (پ-۱۵): فراخوانی داده‌های ادوار گذشته.

واژه‌نامه

۱- سامانه یکپارچه پایش سلامت سازه‌ای — Integrated Bridge Health Monitoring Toolbox (IBHMT)

۲- رابط کاربر گرافیکی — Graphical User Interface (GUI)

۳- پایش سلامت سازه‌ای — Structural Health Monitoring (SHM)

۴- تجزیه‌وتحلیل اجزای اصلی — Principal Component Analysis (PCA)

۵- ارزش وضع موجود — Condition Value (CV)

۶- روش ارزیابی مقادیر اطلاعات — Value of Information (VoI)

۷- رتبه‌بندی وضعیت — Condition Rating (CR)

۸- وسیله نقلیه هوایی بدون سرنشین — Unmanned Aerial Vehicle (UAV)

۹- رابط برنامه‌نویسی کاربردی — Application Programming Interface (API)

۱۰- بازرسی چشمی — Visual Inspection

۱۱- نسبت نیرو به تقاضا — Demand Capacity Ratio (DCR)

۱۲- برنامه‌نویسی رویه‌ای — Procedural Programming

۱۳- برنامه‌نویسی شیءگرا — Object-Oriented Programming (OOP)

۱۴- صفت — Property

۱۵- وراثت — Inheritance

۱۶- چندریختی — Polymorphism

۱۷- انتزاع یا تجرید — Abstraction

۱۸- کپسوله‌سازی یا مخفی‌سازی — Encapsulation

۱۹- استانداردهای ملی بازرسی پل — National Bridge Inspection Standards (NBIS)

۲۰- سازمان بزرگراهی فدرال — Federal Highway Administration (FHWA)

۲۱- سطح اطمینان اجزا — Component Confidence Level (CCL)

۲۲- ترک‌خوردگی — Cracking

۲۳- پوسته شدگی و جداشدگی — Scaling and Disintegration

۲۴- قلوه‌کن و لایه‌لایه شدگی — Spalling and Delamination

۲۵- ترک الگودار — Pattern Cracking

۲۶- نشت و رسوبات سطحی بتن — Leakage and Deposits

۲۷- پوسته شدگی — Dusting

۲۸- ترک‌های عرضی — Transverse Crack

۲۹- حفره شدگی و بیرون‌زدگی — Pop-out and Pitting

۳۰- ترک منفرد — Individual Cracking

۳۱- کرمو شدگی — Honeycombing

۳۲- ترک‌های زیرسطحی — Map Cracking

۳۳- سایش و فرسایش (حفره شدگی) — Wear and Erosion (Cavitation)

۳۴- سایش و فرسایش (ساییدگی) — Wear and Erosion (Abrasion)

۳۵- حمله شیمیایی — Chemical Attack

Integrated Bridge Health Monitoring Toolbox (IBHMT): Phase 1: Visual Inspection

Mohsen Elmi[1], Latif Doosti[1], Mohsen Ghafory-Ashtiany[2*] and Omid Bahar[3]

1. Ph.D. Student, Structural Engineering Research Center, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology (IIEES), Tehran, Iran
2. Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IIEES), Tehran, Iran, *Corresponding Author, email: mohsen.ashtiany@gmail.com
3. Associate Professor, Structural Engineering Research Center, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IIEES) Tehran, Iran

Structural health monitoring (SHM) plays a critical role in preventing bridge failures by enabling the assessment of a bridge's current condition under various loading scenarios. However, the complex interplay of numerous dependent and independent structural parameters makes it challenging to accurately estimate a bridge's health. To address this challenge, we present the Integrated Bridge Health Monitoring Toolbox (IBHMT). The IBHMT is a user-friendly toolbox that streamlines the SHM process for concrete bridges. It leverages existing operational methods, such as visual inspection, static and dynamic testing, and non-destructive testing, in three distinct phases. Each phase builds upon the previous one, allowing users to progress from basic health assessments to a comprehensive understanding of the bridge's physical parameters. Phase 1: Initial Assessment - This phase focuses on a preliminary evaluation using visual inspection techniques. Users record observations of damage and assign severity levels to specific locations on the bridge. IBHMT utilizes this information and a structural analysis engine (e.g., CSiBridge) to perform basic calculations and assess the overall health status. The toolbox then suggests areas for further investigation based on the initial findings. Phase 2: Rapid Assessment - Building upon the initial assessment, Phase 2 incorporates data from rapid assessment methods to create a more refined analytical model. This model is then used for a more comprehensive structural analysis, providing valuable insights into the bridge's behavior under different loading conditions. Phase 3: Model Updating - The final phase utilizes data from Non-Destructive Testing (NDT) techniques to further refine the structural model. This refined model allows for advanced structural analysis, enabling engineers to assess the bridge's long-term performance and remaining service life with greater confidence. The IBHMT integrates a user-friendly Graphical User Interface (GUI) developed using MATLAB. This GUI facilitates data entry for each phase and performs automated data processing and analysis. Users can easily enter information related to visual observations, rapid assessment tests, and NDT results. The toolbox then presents clear and concise results, eliminating the need for expertise in complex software tools. This user-centric design empowers engineers and bridge inspectors to efficiently navigate the SHM process. The IBHMT offers several advantages for bridge owners, infrastructure managers, and decision-makers. It provides a structured and integrated SHM approach, streamlining the process from basic inspections to advanced model updating. This valuable information enables proactive maintenance strategies, ultimately extending the lifespan of concrete bridges and reducing the risk of costly repairs or service disruptions. The user-friendly interface allows even those new to SHM practices to get started, while subsequent phases cater to more detailed analyses. This flexibility addresses the varying needs and resource constraints within the infrastructure management domain. In conclusion, the IBHMT presents a comprehensive and user-friendly solution for bridge health monitoring. By integrating existing methods and employing sophisticated data processing techniques, the toolbox empowers engineers to gain valuable insights into the structural health of bridges. This information is crucial for ensuring the safety and functionality of bridges, ultimately contributing to a more resilient transportation infrastructure network.

Keywords: Structural Health Monitoring (SHM), Static and Dynamic Method, Visual Inspection, Graphical User Interface (GUI).