سیستم خبره برای ارزیابی خرابی دال‌های بتنی در منطقه خلیج فارس

علی اکبر رمضانیانپور[۱] ، وحید شاه‌حسینی[۲] و فرامرز مودی[۳]

چکیده

به نحوی که در بسیاری از پل‌های کشور شاهد هستیم، به علت عدم اعمال سیستم مدیریت نگهداری پل‌ها، دامنه نارسایی‌ها به تدریج گسترش یافته و منجر به زوال مقاومت و افزایش آسیب‌پذیری پل‌ها شده است. به علت شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب و وجود املاح در منطقه خلیج فارس در بسیاری از دال های بتنی سازه ها و پل های منطقه، علایمی از خرابی شامل ترک های متعدد و خرابیهای موضعی دیده می‌شود. لذا ارزیابی وضعیت دال های بتنی سبب می‌شود تا از پیشرفت خرابی، از سرویس خارج شدن و تعمیر سازه جلوگیری شود.

در این مقاله سیستم خبره Bridge Slab-Expert ، برای ارزیابی خرابی دال‌های بتنی ارایه شده است. سیستم خبره، برنامه کامپیوتری هوشمندی است که دانش و روشهای استنباط و استنتاج را به کار می‌گیرد، تا مسایلی را حل کند. این سیستم شامل مفسر، روش استنباط دانش محور و پایگاه داده می‌باشد. خرابی‌های عرشه پل به علت شرایط محیطی و سازه‌ای به صورت ترک خوردگی در بتن، نارسایی‌های سطحی و نارسایی‌های سازه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته است. چندین مطالعه موردی و مقایسه بین نتیجه های بازرسی فنی و سیستم خبره، جهت کسب قابلیت اطمینان و درستی نتیجه های سیستم انجام شده است. نتیجه های سیستم شامل شناسنامه دال پل بتنی، استنتاج سیستم خبره بهمراه نارسایی ها و علل آنها، شاخص وضعیت، توصیف وضعیت، راهکار پیشنهادی جهت تعمیر و نمودار عمر مفید دال بتنی است.

کلید واژه ها: دال بتنی، ارزیابی خرابی، تشخیص خرابی، سیستم مدیریت پل، عمر خدمت‌دهی، سیستم خبره

۱– مقدمه

در میان سازه های زیربنایی پل‌ها دارای اهمیت استراتژیکی خاصی هستند؛ چرا که پل‌ها به عنوان نقاط اتصال شبکه حمل و نقل کشورها نقش بسیار مهمی در ایجاد تسهیلات و خدمات رسانی به افراد جامعه دارند. تعداد پل‌هایی که در کشورهای متفاوت نیاز به نگهداری ویژه دارند روز به روز بیشتر می شود و هزینه مستقیم کارهای مهندسی مورد نیاز بسیار زیاد است.[۱] بنابراین، نیاز به روش های منطقی‌تر در تصمیم گیری های مربوط به تخصیص بودجه های موجود با حصول اطمینان از اقتصادی بودن آن‌ها محسوس است. سیستمی که برای بهینه سازی استفاده از منابع موجود جهت بازرسی ، نگهداری، بازسازی و تعمیر پل‌ها طراحی شده است سیستم مدیریت پل نامیده می شود.

[۲ و ۳] به علت عدم اعمال سیستم مدیریت نگهداری پل‌ها در کشور، دامنه نارسایی‌ها به تدریج گسترش یافته و منجر به زوال مقاومت و افزایش احتمال گسیختگی ناگهانی و فاجعه آمیز، اضمحلال مصالح و آسیب‌پذیری پل‌ها تحت تاثیر عوامل متفاوت در حوزه بهره‌برداری و مقاومت نهایی و حالات حدی مربوط و لذا کاهش عمر مفید، عمر خستگی و دوام پل‌ها شده است. [۴ و ۵]

یک مهندس به عنوان فرد خبره در مسأله تشخیص نوع خرابی های به وجود آمده در بتن با توجه به سالیان متمادی کسب تجربه و آموزش، مهارت کافی در تشخیص عوامل خرابی سازه‌ها را پیدا کرده است. سیستم خبره، برنامه کامپیوتری هوشمندی است که همانند فرد خبره دانش و روش‌های استنباط و استنتاج را به کار می‌گیرد، تا مسایلی را حل نماید. این سیستم شامل مفسر، روش استنباط دانش محور و پایگاه اطلاعات است. این روش منطقی با یک خطای قابل قبول مهندسی نتیجه های مناسبی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد.

۱- استاد گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۲-دانشجوی دکتری مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده عمران دانشگاه صنعتی امیرکبیر
۳-استادیار گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر
aramce@aut.ac.ir shahhosseini@aut.ac.ir fmoodi@aut.ac.ir

در زمینه کاربرد سیستم های خبره در بررسی خرابی انواع سازه ها و به طور ویژه دال‌های بتنی تحقیقات متفاوت انجام گرفته است. در سال ۲۰۰۱، مودی [۶] در پایان نامه دکتری با استفاده از سیستم های خبره دانش- مبنا مدلی به نام DEMAREC-EXPERT را برای تعمیر و نگهداری سازه های بتن آرمه ارایه داد. این سیستم قابلیت تشخیص انواع خرابی‌ها و همچنین امکان ارایه راهکار مناسب برای ارایه برنامه ترمیم و تقویت عضو آسیب دیده را دارد. در سال ۲۰۰۳، وگیوتا و همکاران [۷] در کشور یونان برای رتبه بندی پل‌های بزرگراهی جهت مدلسازی تخصص انسانی از یک سیستم خبره استفاده کردند. همچنین در این تحقیق بر اساس اولویت بندی به دست آمده روش مناسب ترمیم و تقویت برای آن‌ها ارایه دادند. زین العابدین و الدین [۸] در سال ۱۹۹۹ سیستم خبره ای را برای براورد خرابی در اجزای متفاوت بتن آرمه در کشور عربستان ارایه دادند. این تحقیق مبتنی بر قاعده های اگر- آنگاه کریسپ (غیر فازی) است که با استفاده از این قاعده ها و ساختار فلوچارتی علت های خرابی به وجود آمده در سازه های ساخته شده از بتن آرمه را بدست می آورند. در سال ۲۰۰۰ دشموخ و دیگران [۹] در بحث مدیریت پل به این نکته مهم اشاره کردند که در تصمیم گیری‌های مربوط نوعی عدم قطعیت حاکم است. بنابراین، محققین مذکور به فکر استفاده از زنجیره مارکوف در مدلسازی و پیاده سازی سیستم مدیریتی پل افتاده و با استفاده از این روش نمودار عمر- سن را برای پل ارایه کردند. در سال ۲۰۰۰ میاموتو [۱۰] سیستمی به نام J-BMS ، را برای سیستم تصمیم گیری و رتبه بندی پل‌های بتنی ارایه دادند. در این سیستم با بررسی دقیق خرابی بوجود آمده در قسمت‌های متفاوت پل و همچنین با استفاده از آزمایش های غیر مخرب ساده، مدل عمر- زمان پل را برحسب خرابی های حادثه در آن به دست آوردند. در سال ۲۰۰۵، اوه و لیو [۱۱] سیستم خبره‌ای جهت ارزیابی وضعیت دال‌های بتنی پل‌ها بر اساس ارزیابی مصالح و سازه توسعه دادند. این تحقیق تنها روی مدل بار استوار نیست بلکه روی مدل مقاومت استاتیکی و خستگی برپاست.

برای برآورد کردن نیاز به سیستم مدیریت پل‌ها، در این پژوهش با یکپارچه سازی دانش ارزیابی عملکرد سازه‌ها با علوم فن‌آوری اطلاعات چون فن های برنامه نویسی دانش محور و همچنین یکپارچه سازی اثر خرابی‌های ناشی از شرایط محیطی و سازه‌ای، سیستم خبره Bridge Slab-Expert برای ارزیابی خرابی دال‌های بتنی ارایه شده است. این سیستم با تمرکز روی خرابی های دال‌های بتنی (ترک خوردگی، نارسایی‌های سطحی و نارسایی‌های سازه‌ای) و بررسی و ارزیابی خرابی‌های این جزء سازه‌ای در منطقه خلیج فارس، پیشنهاداتی درباره علل خرابی، وضعیت سازه و عمر مفید باقیمانده دال بتنی بیان می‌کند.

به دلیل توانایی‌های بالقوه نرم‌افزارهای Visual Basic و Microsoft Access در برنامه نویسی و ایجاد و گسترش مدیریت سیستم‌های اطلاعاتی، از نرم‌افزار Visual Basic برای نگارش موتور استنتاج سیستم خبره و از نرم‌افزار Microsoft Access در تهیه و نگهداری پایگاه داده اطلاعات و بازرسی و نتیجه های سیستم خبره Bridge Slab-Expert، استفاده شده است.

۲- اهداف و محدوده تحقیق

به طور کلی هدف اصلی از پژوهش، ارایه سیستمی دانش محور جهت ارزیابی وضعیت دال‌های بتنی است. هدف جنبی تحقیق، پیش بینی عمر مفید عرشه پل‌های بتنی مسلح تحت تاثیر خرابی ناشی از پدیده خوردگی می‌باشد. با توجه به مقدمات قبلی و اهمیت استراتژیک و سازه‌ای پل‌ها در شبکه حمل و نقل کشور و اینکه مهمترین مشکل خرابی در پل‌ها ناشی از خرابی عرشه پل (وسیعترین سطح در معرض پل) است، تمرکز تحقیق روی علل و عامل های خرابی عرشه پل‌های بتنی است.

در این پژوهش با استفاده از سیستم‌های خبره، سیستمی هوشمند برای ارزشیابی علل خرابی و ارزیابی وضعیت دال‌های بتنی ارایه و بر این اساس وضعیت سازه ارزیابی می‌گردد. سیستم خبره Bridge Slab-Expert قادر است عملکرد عرشه پل را در طول زمان تعیین کند. در این تحقیق به دلیل شرایط محیطی خلیج فارس، تاثیر نفوذ یون کلرید در پدیده خوردگی به عنوان عامل اصلی خوردگی در نظر گرفته شده و در محاسبه های عمر مفید و باقیمانده عمر وارد شده است.

۳- اقلیم منطقه خلیج فارس

خلیج فارس به علت دارا بودن آب و هوایی گرم و مرطوب و وجود املاح نمک، عملکرد بتن را تحت تاثیر قرار می‌دهد. دمای حداکثر غالب ۴۵ تا ۵۰ درجه و رطوبت نسبی حداکثر ۶۰٪ تا ۱۰۰٪ باعث تسریع خرابی در بتن می‌شود. شرایط اقلیمی گرم و مرطوب و وجود املاح در منطقه، علل

اصلی تسریع خرابی بتن در محیط خلیج فارس است. عامل های اصلی خرابی بتن در منطقه به ترتیب عبارت اند از: خوردگی فولاد در بتن، حمله سولفاتی، هوازدگی ناشی از نمک، جمع‌شدگی، گرادیان حرارتی و واکنش سنگدانه با خمیر سیمان که سرانجام این تاثیرهای متقابل فیزیکی – شیمیایی، ترک خوردگی و زوال بتن است.

۴– مکانیسم خرابی دال‌های بتن مسلح

خرابی عرشه پل بتنی به صورت ترک‌های عرضی، قلوه‌کن شدن، لایه لایه شدن، پوسته شدگی و پوسیدگی ظاهر می‌شوند. در دال‌های بتنی ناپیوستگی‌ها و ترک‌های ریز پیش از بارهای خارجی شروع می‌شوند. این ترک‌های اولیه و سایر نقص‌های سطحی، ناشی از تغییرهای حجمی نایکنواخت هستند که در نتیجه جمع شدگی خمیر سیمان به وقوع می‌پیوندند. اندرکنش‌های بعدی سازه در حین بهره‌برداری و شرایط محیطی فراگیرنده سازه سبب انباشت مواد حاصل از خوردگی در اطراف میلگرد، سایش سطحی، انبساط سنگدانه و حمله شیمیایی می‌شود. به طوری که ترک‌های عرضی در اثر نشست بتن تازه در اطراف میلگرد ایجاد می‌شوند و وقوع آن بستگی به عمق پوشش بتنی دارد. چنین ترک‌هایی مسیر مستقیمی را به طرف میلگرد برای یون کلرید فراهم می‌کند و خوردگی، ترک‌ها وسیع می‌شوند که نتیجه آن ایجاد ترک مایل و قلوه‌کن شدن است. (شکل ۱) اگر ضخامت پوشش بتنی روی میلگرد بیش از ۵۰ میلیمتر باشد احتمال بروز ترک عرضی بسیار کم است، به طوری که یون کلرید مجبور به انتشار در داخل بتن است و خوردگی دیرتر آغاز می‌شود. لایه‌لایه شدن در بتن زمانی اتفاق می‌افتد که لایه‌های بتن از عرشه پل در سطح یا در بالاترین ردیف میلگردها و اغلب موازی با سطح عضو بتنی جدا شوند. چنین مناطقی در برابر ضربه میله یا چکش صدای پوکی می‌دهند. علت اصلی لایه‌لایه شدن انبساط ناشی از خوردگی آرماتور است که در نتیجه نفوذ یون‌های کلرید ایجاد می‌شود[۵].

شکل۱ مکانیسم خرابی دال بتنی به واسطه خوردگی فولاد

قلوه‌کن شدن عموما در نتیجه خوردگی فولاد رخ می‌دهد. یک مورد ویژه قلوه‌کن شدن در درزها، در اثر تراکم عبور و مرور و دخول مصالح به درون درز بروز می‌کند.

پوسته‌شدگی، ورقه شدن ملات سطح است که اغلب با سست شدن سنگدانه‌های سطحی همراه است. پوسته‌شدگی در حالت کلی نتیجه خرابی در اثر یخ‌زدگی زمستانی یا قرار گرفتن در معرض دوره‌های تر و خشک شدن یا مواجه با محلول‌های غلیظ ضد یخ‌های کلریدی رخ می‌دهد. سایش عرشه پل از جمله عامل های تعیین کننده عمر بهره‌برداری از آن است. سایش در اثر چرخ کامیون بروز می‌کند و به ویژه کاربرد لاستیک‌های میخ‌دار سبب ایجاد چالاب‌های کوچک می‌شود. فرسایش به علت صیقل دادن سنگدانه باعث به مخاطره افتادن ایمنی نیز می‌شود. کلیه این عامل ها باعث تشکیل ترک‌های جدید، عریض شدن ترک‌های موجود و تشکیل عیب‌های سطحی در مناطق بحرانی می‌شود که بر ویژگی‌های کششی محدود بتن به خاطر مصالح ضعیف یا تنش زیاد غلبه می کنند.

دال بتنی در پلهای دارای چند تیر اصلی به علت بارهای وارد شده از چرخ وسایل نقلیه دچار جمع‌شدگی می‌شوند. کرنش‌های جمع‌شدگی به طور به وسیله تیرهای اصلی طولی مهار می‌شوند و سبب تنش کششی در دال بتنی می‌شود. از طرف دیگر، بار چرخها در جهت حرکت باعث به وجود آمدن تنش کششی در جهت حرکت می‌شود. در نتیجه ، ترکیب تنشهای کششی طولی روی دال به واسطه جمع‌شدگی و بارهای وارده از چرخها، سبب ایجاد ترکهای موازی روی دال می‌شود.

ترک‌های عرضی تا زمانی که به پایداری برسند افزایش می‌یابند. این ترکهای عرضی سبب می‌شود تا دال بتنی همانند یک تیر یک طرفه رفتار نماید. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، پس از ترکهای عرضی، بارگذاری چرخ سبب می‌شود تا ترکهای عرضی در زیر دال تشکیل شود و سبب از هم پاشیدگی ناگهانی شود. این فروپاشی تیر می‌تواند سبب فروپاشی برش قیچی نیز شود[۱۱].

شکل ۲ مکانیسم خرابی دال بتنی پل‌ها به واسطه بارهای وارد شده

۵– سیستم خبره Bridge Slab-Expert

سیستم‌های خبره، برنامه‌های کامپیوتری هوشمندی هستند که دانش و روش‌های استنباط و استنتاج را به کار می‌گیرند تا مسایلی را حل کنند که برای حل آن‌ها به مهارت انسانی نیاز است[۱۲].

سیستم‌های خبره کاربر را قادر به مشاوره با سیستم‌های کامپیوتری در مورد یک مسأله و یافتن دلایل بروز مسئله و راه حل‌های آن می‌کند. در این حالت ها مجموعه سخت‌افزار و نرم‌افزار تشکیل دهنده سیستم‌خبره، مانند فرد خبره اقدام به طرح پرسش های متفاوت و دریافت پاسخ‌های کاربر، مراجعه به پایگاه دانش (تجربیات قبلی) و استفاده از یک روش منطقی برای نتیجه‌گیری و در نهایت ارایه راه‌حل می‌کند. همچنین سیستم خبره قادر به شرح مراحل نتیجه‌گیری خود تا رسیدن به هدف، چگونگی نتیجه‌گیری و دلیل مطرح شدن یک پرسش اجرایی و روش حرکت تا رسیدن به هدف خواهد بود.

شکل ۳ اجزای سیستم خبره دانش محور

سیستم خبره Bridge Slab-Expert برنامه کاربردی نگارش یافته با زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک می‌باشد. اجزای این سیستم از موتور استنتاج، پایگاه دانش و پایگاه داده تشکیل شده است. نحوه ارتباط بین اجزای سیستم و ساختار داخلی برنامه در شکل ۳ نشان داده شده است. این سیستم خبره از پیمانه های دانش بر پایه قوانین تولید تشکیل شده است که بوسیله رویه نگارش یافته کنترل می‌شوند. این پیمانه ها به صورت پویا در حافظه کاری برنامه بارگذاری و باربرداری می‌شوند، که در صفحه نمایش برنامه اجرا می‌شوند. انواع دانش برای تصمیم‌گیری درباره وضعیت سازه مورد نیاز می‌باشد. پایگاه دانش سیستم خبره، دانش ارزیابی خرابی دال‌های بتنی را در سه حوزه، ترک خوردگی در دال بتنی، نارسایی‌های سطحی و نارسایی های سازه‌ای در بر دارد، که با توجه به انتخاب کاربر مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

با وجود موجود بودن فیزیکی سازه و فراهم بودن داده‌های آزمون ها و آزمایش های بتن، ارزیابی خرابی بتن به علت تفاوت بین واقعیت و طراحی، غیر یکنواختی مصالح بتن و پیچیدگی مکانیسم‌های خرابی شامل عدم قطعیت می‌شود. در نتیجه ارزیابی منطقی از سازه‌های موجود نخستین گام در تعمیر و بازسازی سازه‌های بتنی است. بازرسی چشمی نمای بتن اولین گام در آزمایش ها در محل است. ایجاد روند ارزیابی‌ای که اجازه خواهد داد تا وضعیت موجود سازه به صورت عددی بیان شود یکی از اهداف سیستم مدیریت ارزیابی است تا به وسیله آن بهترین روش تعمیر و نگهداری اداره شود.

برای نیل به این هدف، سیستم درجه بندی کمی برای ارزیابی وضعیت بتن در سازه، امکان تعیین عضو نیازمند به تعمیر را فراهم می‌آورد. سیستم درجه بندی شرح داده شده امکان تعیین سطح وضعیت دال بتنی به وسیله بازرسی چشمی و استفاده از حداقل امکاناتی چون دوربین دوچشمی، پوشش سنج و خط‌کش را فراهم می‌آورد. این درجه بندی براساس یکپارچگی و سرویس دهی و تعمیر پذیری سازه تعیین شده است.

۵–۱ روش فرایند استنباط در Bridge Slab-Expert

روال استنباط Bridge Slab-Expert به دو بخش تقسیم می‌شود: بخش اصلی پیاده‌سازی شامل سیستم ورودی و گزارش گیری، محیط سیستم خبره، سیستم مدیریت پایگاه اطلاعات و سیستم مدیریت ارزیابی می‌شود. بخش دوم واسط کاربر سیستم خبره است. Bridge Slab-Expert برنامه کاربردی انعطاف پذیری است که قابلیت ارزیابی و تشخیص خرابی و تعیین عمر مفید دال بتنی را داراست.

در شکل ۴ ساختار استنباط سیستم خبره Bridge Slab-Expert نشان داده شده است. در ادامه به توصیف فرایند استنباط و اجزای آن می‌پردازیم.

- **پیاده‌سازی سیستم ورودی و گزارش**

ورودی سیستم شامل اطلاعات جامعی از شناسنامه فنی دال پل بتنی چون شناسنامه پل، اطلاعات فنی و سازه‌ای دال و همچنین داده های بازرسی چون نارسایی ها و آزمایشات تعیین میزان خوردگی است. در این بخش گزینه کمک رسانی (Help) برای کاربر مشاوره و دستیاری در

قالب تصویر و متن فراهم می‌آورد.
سیستم گزارش دهی نتیجه های مشاوره حاصل از برنامه را در صفحه نمایش ارایه می‌کند که برای گزارش دهی در قالب پایگاه اطلاعات ذخیره می‌شود. این نتیجه ها شامل شناسنامه دال پل بتنی، استنتاج سیستم خبره بهمراه نارسایی ها و علل آنها، شاخص وضعیت، توصیف وضعیت، راهکار پیشنهادی و نمودار عمر مفید دال بتنی است.

- **محیط سیستم خبره**

کلیه پیمانه های برنامه به وسیله زبان برنامه نویسی ویژوال بیسیک پیکر بندی شده است. این برنامه در محیط رابط گرافیک کاربر طراحی شده است تا دسترسی آسانی به رویه برنامه فراهم شود. پایگاه اطلاعات به وسیله پیوند با برنامه اکسس در اختیار برنامه قرار دارد.

- **سیستم مدیریت پایگاه اطلاعات**

پایگاه اطلاعات با استفاده از نرم افزار اکسس طراحی شده است که از نوع سیستم مدیریت بانک اطلاعاتی رابطه ای است. برنامه دارای دو جدول برای نگهداری اطلاعات جزء به ویژه سازه و کل سازه است. در جدول اطلاعات جزیی، مشخصات کلی جزء ، نارسایی ها ، علل خرابی و شاخص وضعیت آن جزء بیان شده است. در جدول اطلاعات کلی، شناسنامه و مشخصات کل سازه، نارسایی ها و علل خرابی های اجزاء و شاخص وضعیت سازه بیان شده است.

- **سیستم مدیریت ارزیابی**

سیستم ارزیابی خرابی به صورت پنجره های نمایش قابل دسترس در محیط ویژوال بیسک طراحی شده است. معیار های ارزیابی دال‌های بتنی شامل ترک خوردگی، نارسایی های سطحی و نارسایی های سازه‌ای است. روند ارزیابی، کاربر را قادر می‌سازد تا وضعیت فعلی اجزای سازه را مورد بررسی و ارزشیابی قرار دهد. این رویه به صورت عددی با استفاده از شاخص وضعیت فراهم می‌شود. درنتیجه وضعیت دال مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و بهترین اقدام پیشنهادی جهت مدیریت تعمیر و نگهداری ارایه می‌شود.

- **واسط کاربر**

واسط کاربر یکی از مهم ترین اجزای برنامه های کامپیوتری می‌باشد که در تعامل با کاربر میزان تاثیر بخشی اهداف اصلی برنامه را رقم می‌زند. بنابراین، واسط کاربر با هدف ساختن برنامه‌ای انعطاف پذیر، با سهولت یادگیری و استفاده طراحی می‌شود که دقت در طراحی آن متضمن موفقیت برنامه خواهد بود. واسط کاربر برنامه Bridge Slab-Expert به صورت کاربر-پسند و سهولت در ورود اطلاعات برنامه ریزی شده است. در این برنامه همچنین امکان توصیف روند پرسش و پاسخ و کمک خواهی برای کاربر فراهم شده است. (شکل ۵)

شکل ۴ ساختار برنامه Bridge Slab-Expert

۵-۲- نمایش دانش

نحوه نمایش دانش در این سیستم خبره به صورت شئ گرا است که بر اساس ترکیب روش قانون های تولید، منطق و قاب ها بیان شده است و با استفاده از مکانیسم پرسش و پاسخ، پایگاه دانش مورد استفاده قرار خواهد گرفت.
ساختار استنتاج به کار رفته در Bridge Slab-Expert از نوع درخت تصمیم گیری دوتایی است. در این درخت هر

پرسش به یک سطح پایین‌تر می‌رود. برای هر پرسش دو پاسخ وجود دارد که باید یکی از آن‌ها تصمیم‌گیری شود. ساختارهای تصمیم‌گیری به قاعده های تولید تبدیل می‌شوند. این کار با انجام یک جستجو در سطح ساختار و ایجاد قانون های اگر... آنگاه... برای هر گره به آسانی صورت می‌گیرد[۶].

۵-۳ روش استنتاج و مکانیزم جستجو

روش استنتاج برای استخراج دانش و اطلاعات جدید بکار رفته در سیستم خبره، دانش هیورستیک یا تجربی است. که از قاعده های تجربی که مبتنی بر آزمایش هستند تشکیل شده است. مکانیسم جستجوی سیستم خبره بر اساس جستجوی در عمق طراحی شده است به طوری که جستجو ابتدا از ساختارهای سطح بالاتر که از ساختار های سطح پایین تر تشکیل می‌شوند و بالا قرار می‌گیرند شروع می‌شود و سپس در سطوح پایین‌تر ادامه می‌یابد. در صورت وجود عدم قطعیت در سطحی، پس از پایان جستجو در پایین‌ترین سطح آن شاخه، جستجو از شاخه سطح عدم قطعیت ادامه می‌یابد. بنابراین، اگر از فرضیه ها شروع به استدلال کنیم تا به واقعیت های سطح پایین که از فرضیه ها پشتیبانی می‌کنند برسیم، استدلال از بالا به پایین یا استدلال پسرو خواهیم داشت. ساختار قاعده ها تعیین می‌کند که از کدام روش جستجو برای یافتن راه حل استفاده شود. بنابراین، نحوه فعال شدن قاعده ها بستگی به الگویی دارد که قاعده ها بر اساس آن‌ها با واقعیت ها تطبیق پیدا می‌کنند. الگوی‌های موجود در سمت چپ قاعده ها تعیین می‌کند که آیا یک قاعده می‌تواند با واقعیت ها تطبیق یابد یا خیر. نوع عمل موجود در سمت راست قاعده ها تعیین می‌کند که چه واقعیت ها، تبیین شده یا حذف شوند و بنابراین، بر فعال شدن یا نشدن سایر قاعده ها تاثیر می‌گذارد.

در سیستم خبره Bridge Slab-Expert امکان ارایه توضیح ها از روش تصمیم گیری قرار داده شده است و در این سیستم بیان شده است که به دقت کدام هدف در حال ارضا شدن است که کاربر از روند جستجو و نتیجه آن کاملا آگاه خواهد شد (شکل ۶).

در این سیستم از عدم قطعیت برای امکان تصمیم گیری در شرایطی که کاربر پاسخ را به طور قطعی نمی‌داند استفاده شده است. که در این حالت با استفاده از روش عددی در نظریه ی احتمالات، فاکتور قطعیت که ضریبی بین صفر و یک است در شاخص وضعیت تاثیر می‌گذارد.

شکل ۵ صفحه اصلی سیستم خبره Bridge Slab-Expert

شکل ۶ روند استنتاج در سیستم خبره شیء گرا

۶- پیش بینی عمر مفید سازه

خرابی های ناشی از واکنش های شیمیایی- فیزیکی در سازه ها و مصالح ساختمانی تحت شرایط محیطی و در طی مدت بهره برداری روی خواهند داد. بررسی عمر مفید سازه ها، نیازمند آگاهی از موضوع های متفاوت است. دستاورد های علوم مهندسی مصالح، نتیجه های آزمایشگاهی، بازرسی سازه های موجود برای بررسی و مطالعه ضروری بوده و باید بر اساس شناخت عامل های موثر و مناسب در مدت زمان بهره برداری مورد استفاده قرار گیرد. بررسی کامل و همه جانبه باید شامل ارایه مدل ریاضی خرابی مورد توجه بوده و امکان محاسبه عامل تسریع کننده در آن فراهم باشد. پیش بینی عمر مفید نیازمند قضاوت ها و فرضیه های متعددی است که باید در نظر گرفته شده و قابل بیان و توصیف باشند.

۶-۱مدل سازی خرابی ناشی از خوردگی آرماتور

یکی از مکانیسم های اصلی عامل خرابی سازه های بتنی در منطقه خلیج فارس خوردگی آرماتورهای مدفون در بتن است و به فرایند نفوذ یونهای کلرید به عنوان یکی از عوامل اصلی خوردگی آرماتور در محیط های خورنده پرداخته شد. با توجه به شرایط آب و هوایی گرم و مرطوب، مجاورت به دریا و وجود نمک‌ها در منطقه، اصلی‌ترین علت خرابی در منطقه خلیج فارس، خرابی بتن به واسطه خوردگی میلگرد فولادی است. لذا عامل تعیین کننده در ارزیابی وضعیت خرابی دال بتنی میزان نفوذ یون کلرید در بتن و خوردگی فولاد است، که طول عمر خدمت دهی سازه را تعیین می کند[۱۳ و ۱۴].

انتشار یون های کلرید در بتن به عنوان یکی از فاز های اولیه و اساسی در مدل خوردگی است. بنابر این، با اهمیتی که مدل سازی این فرایند در ایجاد مدل خرابی و پیش بینی عمر مفید سازه‌های بتنی می‌تواند داشته باشد، مدل خوردگی بر اساس مدل انتشار یون های کلرید ارایه می‌شود.

۶-۲ قانون فیک

معمول‌ترین اصول پیشنهادی برای انتقال یونهای کلرید و دیگر واکنش‌ها از سطح بتن تا آرماتور فولادی، قانون های انتشار بوده که نخستین بار توسط آدولف فیک در سال ۱۸۵۵ بدست آمده است. مدل سازی این فرایند بر اساس تئوری جنبشی و حرکت تصادفی مولکول‌ها است. ساده ترین قوانین فیک در خصوص پدیده انتشار یون کلرید در بتن این بوده که حرکت یون ها از یک ناحیه با غلظت بالا به یک ناحیه با غلظت پایین صورت می‌گیرد [۱۱].

قانون نخست انتشار فیک بیان می‌کند که سرعت جریان مولکول ها متناسب با تغییر غلظت در واحد فاصله (که گرادیان غلظت نامیده می‌شود) بوده و از نظر ریاضی در ساده ترین حالت به صورت معادله (۱) بیان می شود.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{Cl}\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad (۱)$$

که در آن، $C=C(x,t)$ برابر غلظت کلرید در (x,t) و D_{Cl} برابر ضریب انتشار کلرید است. با وارد کردن شرایط مرزی و پیشنهاد $C=C(x,t)$ به صورت تابعی از ریشه دوم زمان برای مدل کردن نفوذ یون کلرید در سطوح بتن برای دال‌های بتنی، حل کلی معادله (۱) با شرایط $C(0,t)=C_0$ و $C(x,0)=C_i$ به صورت زیر قابل بیان است:

$$erf(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^z \exp(-\xi^2)d\xi \qquad (۲)$$

$$C(x,t) = C_i + (C_0 - C_i)\left(1 - erf\frac{x}{\sqrt{4D_{Cl}t}}\right) = C_i + (C_0 - C_i)erfc\frac{x}{\sqrt{4D_{cl}t}}$$

در مورد پیش بینی عمر مفید باقیمانده، مقادیر C_0 و D می‌توانند جهت تعیین t_0 زمان اولیه خوردگی به کار گرفته شوند. و آن هنگامی است که غلظت کلرید در عمق پوشش x به سطح بحرانی کلرید برسد.

خوردگی فولاد سبب کاهش مساحت میلگرد می‌شود. ابتدا می‌بایست زمان اولیه t_0 تعیین شود. محاسبه زمان اولیه t_0 نیازمند تعیین ضخامت پوشش بتن c، ضریب انتشار D_{Cl}، غلظت اولیه سطحی کلرید C_0، و آستانه شروع خوردگی C_{thr} است. ممان مقاومت ظاهری M_n به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$M_n = (A_s - A_s')f_y(d - \frac{a}{2}) + A_s'f_y(d - d') \qquad (۳)$$

$$a = \frac{(A_s - A_s')f_y}{0.85f_c'b} \qquad (۴)$$

که در آن، M_n برابر ممان مقاومت اسمی، A_s برابر سطح میلگرد کششی، A_s' برابر سطح میلگرد فشاری، f_y برابر مقاومت جاری شدن فولاد، f'_c برابر مقاومت فشاری بتن، d برابر عمق موثر میلگرد کششی، d' برابر عمق پوشش میلگرد فشاری است. تغییرهای ممان مقاومت بر پایه کاهش سطح میلگرد با استفاده از رابطه های (۱) تا (۴) محاسبه شده است. ممان اسمی مقاومت به سبب زوال دال با گذشت سن بتن کاهش می‌یابد و روند کاهش ممان

مقاومت در طول عمر خدمت‌دهی سریع‌تر می‌شود[۵].

۷– پایگاه دانش Bridge Slab-Expert

پایگاه دانش محل نگهداری دانش کسب شده از متخصصان در یک سیستم خبره می‌باشد. پایگاه دانش سیستم خبره Bridge Slab-Expert از سه بخش اصلی ترک خوردگی، نارسایی های سطحی و نارسایی های سازه‌ای تشکیل شده است. دانش لازم برای تشخیص نارسایی‌های بتن به وسیله قاعده های تولید (اگر... آنگاه...) و منطق در ساختار پایگاه دانش بیان شده است. قاعده ها در درخت های تصمیم گیری در طی فرایند اکتساب دانش سازماندهی شده‌اند به صورتی که امکان جریانی سریع و دقیق از اطلاعات را فراهم می‌آورد.

ساختار قاعده ها در مراحل زیر به اجرا در می‌آید:

- دانش در درخت‌های تصمیم گیری در طی فرایند اکتساب دانش بیان می‌شوند. درخت تصمیم‌گیری نشان می‌دهد که دانش چگونه با یکدیگر در ارتباط هستند و چگونه قاعده ها نوشته شده و سازمان یافته‌اند.
- شماره قاعده ها به ترتیب ایجاد به قاعده ها نسبت داده می‌شود.
- قاعده ها بر اساس نوع و نشانه‌های نارسایی مرتب می‌شوند. این متغیرها زنجیره استنتاج را کنترل می‌کنند. نشانه‌های نارسایی در قاعده ها، علت خرابی را بیان می‌کنند در این هنگام نوع نارسایی، ارزش نارسایی چون ترک طولی یا عرضی را به نارسایی تخصیص می‌دهند.
- نتیجه ها به صورت پیامی به ترتیب ظهور در درخت تصمیم گیری به کاربر ارجاع داده می‌شود.

قانون ها پایگاه دانش شامل فاکتور عدم قطعیت برای نشان دادن عدم قطعیت در هنگامی که کاربر پاسخ را به طور قطعی نمی‌داند و زمانی که تضمینی نباشدکه نتیجه یک قانون همواره درست باشد حتی اگر فرض‌ها و قضایای آن قانون همگی درست باشند، می‌باشد. فاکتور عدم قطعیت به عنوان ضریبی در شاخص وضعیت تاثیر می‌گذارد.

۷–۱ پایگاه دانش ترک خوردگی در بتن

ترک‌ها در اکثر موارد منجر به شکست سازه نمی‌شوند، اما می‌توانند با تسریع خرابی در عمل باعث غیر قابل استفاده شدن سازه شوند. ترک‌ها را می‌توان بر حسب جهت، عرض و عمق رده‌بندی کرد. از نظر مسیر ترک در سطح دو نوع ترک اصلی وجود دارد. یکی ترک انفرادی هستند که در جهت ها در اصل معینی و اغلب به موازات یکدیگر در فواصل معینی رخ می‌دهند. این اغلب نشانه ی آن هستند که در جهت عمود بر ترک‌ها محدودیت وجود دارد. ترک خوردگی اصلی دیگر، ترک خوردگی الگویی است. این ترک‌ها، ترک‌های کوتاهی با توزیع به نسبت یکنواخت در تمام جهت ها هستند که کمابیش الگویی شش گوش دارند. آنها نشانه مقید شدن لایه سطحی با بتن داخلی یا لایه قبلی هستند. پایگاه دانش ترک خوردگی شامل انواع متفاوتی از ترک‌ها می‌شود.

این پایگاه دانش برای شناسایی علت احتمالی ترک بر اساس شکل و الگو، ابعاد و محل ایجاد شده است.

تعاریف زیر، خلاصه‌ای از انواع اصلی ترک پوشش داده شده در پایگاه دانش سیستم خبره است:

ترک‌های انفرادی : ترک‌هایی که در سطح بتن ایجاد شده‌اند و به صورت جدا و ناپیوسته از یکدیگر گسترش یافته‌اند. این ترک‌ها عبارت اند از:

- ترک طولی : ترک‌هایی که موازی امتداد بلندتر جزء سازه‌ای گسترش می‌یابند.
- ترک عرضی : ترک‌هایی که عمود بر ترک‌های طولی و در امتداد کوتاه‌تر ایجاد می‌شوند.
- ترک قطری : ترک‌هایی که در امتداد ۴۵ درجه جزء سازه‌ای گسترش می‌یابند.
- ترک نامنظم : ترک‌هایی که بدون الگوی خاصی در سطح بتن ایجاد می‌شوند.
- ترک در درزها و اتصال ها: ترک‌هایی که در نزدیکی درزهای طولی و یا عرضی و اتصال های بتن ایجاد می‌شوند. انواع اصلی این ترک‌ها عبارت اند از: ترک عرضی یا قطری در نزدیکی درزهای عرضی و ترک‌های طولی در نزدیکی درزهای عرضی و ترک های طولی در نزدیکی درزهای طولی.

ترک‌های الگویی : ترک‌های بهم پیوسته در سطح بتن می‌باشند. این ترک‌ها عبارت اند از:

- ترک نقشه‌ای : ترک‌های بهم پیوسته که دارای آرایشی منظم در سطح بتن هستند و به صورت یکسری ترک‌های مستطیلی با نقش بزرگ خواهند بود.
- ترک سرامیکی : ترک هایی بهم پیوسته سطحی که دارای الگوی ریز نقشی هستند.

شکل ۷ درخت تصمیم‌گیری ترک‌های عرضی و طولی

نمونه‌ای از درخت‌های تصمیم گیری برای ارزیابی خرابی ترک خوردگی در شکل ۷ نمایش داده شده است. سپس واقعیت ها بر اساس قانون های تولید و منطق سیستم خبره بیان شده‌اند. در داخل درخت‌های تصمیم گیری چندین پرسش درباره شکل، موقعیت، محل، راستا و ظاهر ترک‌ها پرسیده شده است. موتور استنباط برای پاسخ به پرسش یک یا چند قانون در پایگاه دانش را جستجو می‌کند.

۷-۲ پایگاه دانش نارسایی‌های سطحی

دیگر نارسایی های سازه به صورت انواع متفاوت نارسایی های سطحی بتن نشان داده شده است. برای ارزیابی وضعیت سازه موجود، تعریف و تفسیر نارسایی ها به صورت علمی و بدون تناقض اهمیت دارد. برای براورده کردن این هدف، مهمترین نارسایی های سطحی دال‌های بتنی در پایگاه دانش نارسایی های سطحی در نظر گرفته شده‌اند.

نارسایی های زیر به عنوان اصلی‌ترین نشانه های خرابی سطحی مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- قلوه‌کن شدگی : روند جداشدن قسمتی از قطعه بتنی که به طور معمول به شکل پولک می‌باشد.
- بیرون پریدگی‌ها : شکستن قطعه های کوچک از سطح بتن به شکل حفره‌های مخروطی کم عمق.
- قلوه‌کن شدگی در حومه درزها : قلوه‌کن شدگی در نزدیکی درزها.
- کرموشدگی : حفره‌های داخل بتن به علت اینکه ملات فضای بین دانه‌ها را پر نکرده است.
- آبله زدن : برجستگی نامنظم ملات یا بتن در سطح یک دال.
- پوسته شدگی : پوسته شدگی فرایند جداشدن ذره های ریز از سطح بتن است.
- ورقه ورقه شدن : این پدیده جدایی بتن در امتداد یک صفحه موازی و نزدیک سطح بتن است.
- شوره‌زنی : خشک شدن رطوبتی که حاوی نمک باشد و ته‌نشین شدن نمک سفید یا رنگی.
- لکه‌ها : اکثر لکه‌های مهم به علت زنگ زدگی است و نشانگر زنگ زدگی فولاد هستند.
- سایش : آسیب رسیدگی به سطح بتن به علت سایش و اصطکاک و کاهش مستمر جرم سطح بتن.

۷-۳ پایگاه دانش نارسایی های سازه‌ای

به علت پیچیدگی بین تاثیر توام عوامل محیطی و سازه‌ای و ناشناخته بودن ترکیب آنها و نبود تاریخچه‌ای دقیق از نحوه بارگذاری سازه در حین بازرسی، نارسایی های سازه‌ای به طور مستقل از دیگر نارسایی ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس برای در نظر گرفتن تاثیر مشترک نارسایی های سازه‌ای بر دیگر نارسایی‌ها، نشانه خرابی مشترک انتخاب شده و نارسایی سازه‌ای به عنوان ضریبی افزایش دهنده در نارسایی حاصل از عوامل محیطی تاثیر می‌گذارد. علت برگزیدن این روش، همجنس بودن نشانه خرابی بین دو نارسایی است که در این صورت اثر توام عوامل محیطی و سازه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

نارسایی های زیر به عنوان اصلی‌ترین نشانه های خرابی سازه‌ای مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- ترک‌های خمشی: اینگونه ترک‌ها ممکن است نمایانگر ضعف عملکرد عرشه های دالی باشند که از ضعف مقاومت خمشی طولی نتیجه می‌شوند، برخی از ترک‌های عرضی در محل قطع بتن ریزی و یا درزهای قالب بندی پدید می‌آیند. نشانه ترک‌های عرضی ناشی از بارگذاری، ترک های موازی و در امتداد بعد کوچکتر دال می‌باشند که به طور همزمان در بالا و پایین دال پدید می‌آیند
- ترک‌های قطری: ترک‌های قطری در سطوح افقی، به طور معمول با زاویه ۴۵ درجه نسبت به امتداد خط تکیه‌گاهی، در نشیمن گاه‌های پل‌های دالی و در نواحی انتهایی عرشه پدید می‌آیند. دلیل آنها را می‌توان در اثر اعمال همزمان نیروهای برشی و پخش نیروی بارگذاری دانست. بازشدگی آنها به طور معمول کم و غیر فعال هستند و تنها در صورتی که پایداری سازه را تهدید کنند خطرناک بشمار می‌روند.
- ترک‌های کششی: ترک‌های کششی به صورت ترک‌های طولی در راستای بعد بزرگتر دال ایجاد می‌شوند که در تقاطع خطوط نیروی وارد به دال هستند. در صورتی که ترک‌ها در دهانه متمرکز باشند، به طور معمول در مرحله اجرا و در اثر تغییر شکل موضعی نوارها به وجود آمده‌اند.
- خستگی: تعداد سیکل های لازم برای آغاز و گسترش ترک خستگی بستگی به میزان عبور و مرور وسایل نقلیه دارد که به وسیله متوسط روزانه ترافیک (ADT) قابل ارزیابی است. سطوح متفاوت سرویس با استفاده از میزان ترافیک قابل بیان است.
- خیز اضافی: این مساله می‌تواند به علت ناکافی بودن ظرفیت سازه‌ای عرشه یا عبور بارهای بیش از حد باشد که به صورت میزان خیز اضافی بسته به نوع سازه‌ای دال و تکیه گاه ارزیابی شود. همچنین تنش‌های وابسته به زمان می‌توانند ایجاد چنین خرابیهایی بکنند.
- تغییرهای دما: تغییرهای دمایی غیریکنواخت (گرادیان حرارتی) و تغییرهای حجمی با توجه به تنوع شرایط محیطی در ایام روز یا فصل های متفاوت ، لازم است تغییرهای دمایی به صورت کوتاه مدت (کمتر از ۲۴ ساعت) و به صورت دراز مدت فصلی مورد ارزیابی واقع شود. تغییرهای دمایی یکنواخت به طور عمومی در سیستم های پیوسته یا قابی شکل باعث بروز تنش های مهمی می‌شود.

۸- شیوه درجه بندی عملکرد و ارزیابی وضعیت دال بتنی

دانستن علل و مکانیسم های خرابی انواع نارسایی های بتنی از اهمیت خاصی برخوردار است. اگرچه روند خرابی سازه بتنی طولانی مدت است ولی آغاز نارسایی‌ها و نرخ آن بر اثر دیگر عیوب تاثیر می‌پذیرد. یکی از هدف های سیستم مدیریت ارزیابی فراهم آوردن روند ارزیابی‌ای است تا به وسیله آن وضعیت موجود سازه را به صورت عددی بیان کند تا بر اساس آن بهترین روش تعمیر و نگهداری انتخاب شود. به دلیل تاثیر نوع خرابی‌های سازه، قضاوت مهندسی، دانش و تجربه در درجه بندی عملکرد، رابطه یکتایی برای محاسبه شاخص وضعیت کلیه سازه‌ها امکان پذیر نیست. در برنامه Bridge Slab-Expert سیستم مدیریت ارزیابی در پیوند با سیستم پایگاه دانش برای بیان شاخص وضعیت عمل می‌نماید (شکل ۸).

ارزیابی کامل و منطقی از وضعیت فعلی سازه بتنی اولین گام در فعالیت های تعمیر و تقویت است. در نتیجه، بازرسی چشمی نمای بتن نخستین مرحله آزمایش های در سایت سازه می‌باشد. هدف این آزمایش های تشخیص و تعیین نارسایی ها و خرابی ها است. بازرسی وضعیت شامل شناسایی چندین نقص و ایراد در بتن مانند ترک خوردگی، نارسایی های سطحی و خرابی های در محل درزها می‌شود. پس از بازرسی و تعیین مشخصات و بررسی وضعیت سازه، گام بعدی در فرایند مدیریت بهره‌برداری، آغاز فعالیتی برای

اصلاح شرایط نامناسب و شروع برنامه‌ریزی برای آینده بهره‌برداری و نیاز به تعمیر است. برای برآورده کردن این هدف، سیستم درجه بندی کمی برای ارزیابی وضعیت سازه، امکان انتخاب عضو آسیب دیده و تعیین علت خرابی را فراهم می کند.

شکل ۸ ارزیابی ترک خوردگی

شاخص ارزیابی وضعیت ارایه شده در برنامه Bridge Slab-Expert ، عددی بین ۰ تا ۱۰۰ است که ۰ نشان دهنده شرایط خیلی ضعیف و ۱۰۰ بیان کننده شرایط عالی می‌باشد. شاخص وضعیت به سه ناحیه کلی کم، متوسط و عمده از لحاظ میزان خرابی تقسیم شده است. در ناحیه خرابی کم (۱۰۰- ۸۵)، شرایط و عملکرد در سطحی است که تنها بازرسی دوره ای و یا حفاظت احتمالی مورد نیاز است. سازه قرارگرفته در ناحیه خرابی متوسط (۸۵-۵۰)، نشانگر وضعیت خوب و متوسط است که امکان بررسی گزینه های محافظت و تعمیر معمول لازم است. شرایط عملکرد ضعیف و خیلی ضعیف در ناحیه خرابی عمده (۵۰-۰)، نیازمند توجه ویژه و بازرسی تفصیلی و ارزیابی مهندسی برای تعیین نیاز به تعمیر، جایگزینی و مقاوم سازی است (جدول ۱).

شاخص وضعیت برای اعلام وضعیت کل سازه به کار می‌رود. سیستم درجه بندی، امکان تعیین شاخص وضعیت با استفاده از بازرسی چشمی و تجهیزات محدودی چون دوربین دوچشمی، پوشش سنج و خط کش را فراهم می‌آورد. ارزش‌هایی که در هر قسمت فرایند به نارسایی مربوطه تخصیص داده می‌شود در ارتباط با یکپارچگی و قابلیت سرویس دهی سازه است. شاخص وضعیت، جایگزین بازرسی تفصیلی و ارزیابی دقیق مهندسی نیست بلکه ارایه دهنده وضعیت کلی سازه و پیشنهاد دهنده علل خرابی است که باید به تفصیل مورد آزمایش قرار گیرد و صحت آن به تایید برسد.

جدول ۱ شاخص وضعیت

میزان خرابی	شاخص وضعیت	توصیف وضعیت	اقدام پیشنهادی
کم	۹۵-۱۰۰	**عالی :**بدون نقص قابل ملاحظه	اقدام فوری لازم نیست ولی بازرسی دوره ای توصیه می‌شود. ممکن است محافظت نیاز باشد.
	۸۵-۹۴	**خیلی خوب :**نقص قابل ملاحظه زنگ زدگی و گرد و خاک قابل رویت است.	
متوسط	۷۰-۸۴	**خوب :**نقص آشکار تنها نارسایی، آسیب و خرابی اندک مشهود است.	بازرسی تفصیلی و آنالیز اقتصادی برای گزینه های تعمیرهای توصیه می‌شود. در بعضی حالت های روش های محافظت و تعمیر لازم است.
	۵۰-۶۹	**متوسط :**نقص متوسط تعدادی نارسایی، آسیب و خرابی مشهود است ولی بتن قابل سرویس دهی است.	
عمده	۳۰-۴۹	**ضعیف :**نقص شدید در چندین عضو مهم ولی بتن قابل سرویس دهی است.	بازرسی تفصیلی و ارزیابی مهندسی باید برای تعیین دامنه تعمیر، جایگزینی، مقاوم سازی و تثبیت صورت پذیرد. ارزیابی ایمنی توصیه می‌شود.
	۰-۲۹	**خیلی ضعیف :**نقص خیلی شدید در اکثر اعضای گسیختگی عمومی یا کامل اعضاء سازه ای.	

شاخص وضعیت به وسیله ارزش خرابی انواع متفاوت نارسایی‌ها تعیین می‌شود. شدت خرابی‌ها به قصد کسب شاخص وضعیت کمتر از ۵۰ در هنگام رخدادن خرابی جدی ارزش‌گذاری شده‌اند. سیستم، مستقل از نظر بازرس طراحی شده است. به هر حال بسته به رویکرد و تجربه بازرس، تعیین شاخص وضعیت از تصمیم بازرس تاثیر می‌پذیرد. در نتیجه، تغییر ۰ ± در شاخص وضعیت قابل انتظار است.

۹- طبقه بندی نارسایی‌ها و ارزش‌های خرابی

بازرس باید به انواع نشانه‌های نارسایی قبل از انجام بازرسی برای تعیین ارزش خرابی آگاه باشد. دسته‌های نارسایی عبارت اند از ترک خوردگی، نارسایی‌های سطحی و نارسایی‌های سازه‌ای.

۹-۱ ترک خوردگی

انواع ترک‌ها مورد بررسی قرار گرفته عبارت اند از ترک‌های انفرادی چون ترک طولی، عرضی، قطری، نامنظم و ترک در درزها و اتصالات و ترک‌های الگویی چون ترک نقشه‌ای و سرامیکی. ارزش خرابی برای نمونه‌ای از ترک‌ها که جدول ۲ نشان داده شده است وابسطه به عرض ترک و عمق ترک می‌باشد. این ترک‌ها مستقل از شرایط بارگذاری در نظر گرفته شده‌اند. عرض ترک در دسته‌های خیلی نازک (mm ۰/۲۵ >)، نازک (mm ۰/۲۵ -۱/۰)، متوسط (mm ۱/۰-۲/۰) و عریض (mm ۲/۰ <) دسته بندی شده‌اند. سه دسته کلی جهت توصیف عمق ترک عبارت اند از سطحی (تا ۲۰ میلیمتر)، عمیق (۲۰-۵۰ میلیمتر)، سراسری (بزرگتر از ۵۰ میلیمتر). این طبقه بندی بر اساس پوشش متوسط روی آرماتور در دال‌ها صورت گرفته است [۴].

جدول ۲ ارزش خرابی نمونه‌ای از ترک خوردگی

طبقه: ترک خوردگی	زیر طبقه: نوع ترک	مشخصه شی	ارزش خرابی			
			عرض ترک			
		عمق ترک	خیلی نازک (کمتر از۰/۲۵ میلیمتر)	نازک (بین ۰/۲۵ تا ۱ میلیمتر)	متوسط (بین ۱ تا ۲ میلیمتر)	عریض (بیشتر از ۲ میلیمتر)
انفرادی	طولی	سطحی	۵	۱۰	۲۰	۳۰
		عمیق	۱۰	۲۰	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

۹-۲ نارسایی‌های سطحی

نارسایی‌های سطحی به انواع قلوه‌کن شدگی، بیرون پریدگی، قلوه‌کن شدگی در حومه درزها، چاله‌ها، کرموشدگی، آبله زدن، پوسته شدگی، ورقه ورقه شدن، شوره‌زنی، لکه‌ها، سایش و فرسایش دسته بندی شده‌اند. خرابی‌ها بر پایه عمق خرابی، اندازه و آشکاری سنگدانه‌ها ارزش‌گذاری شده‌اند (جدول ۳).

۹-۳ نارسایی‌های سازه‌ای

نارسایی‌های سازه ای به انواع ترک خمشی، ترک قطری، ترک کششی و خیز اضافی، خستگی و تغییرهای دما دسته بندی شده‌اند. به دلیل پیچیدگی بین تاثیر توام عامل های محیطی و سازه‌ای و ناشناخته بودن ترکیب آنها و نبود تاریخچه‌ای دقیق از نحوه بارگذاری سازه در حین بازرسی، نارسایی های سازه‌ای به طور مستقل از دیگر نارسایی ها مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و سپس برای در نظر گرفتن تاثیر مشترک نارسایی های سازه‌ای بر دیگر نارسایی‌ها، نشانه خرابی مشترک انتخاب شده و نارسایی سازه‌ای به عنوان ضریبی افزایش دهنده در نارسایی حاصل از عوامل محیطی تاثیر می‌گذارد. علت برگزیدن این روش، همجنس بودن نشانه خرابی بین دو نارسایی است که در این صورت اثر توام عامل های محیطی و سازه‌ای در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۳ ارزش خرابی نمونه‌ای از نارسایی سطحی

ارزش خرابی	توصیف	مشخصه شی	زیر طبقه: نوع نارسایی سطحی
۵	به سختی قابل تشخیص	خیلی جزئی	قلوه‌کن شدگی
۱۰	آشکارا قابل تشخیص	جزئی	
۲۰	سوراخ‌ها بزرگتر از بیرون پریدگی	متوسط	
۳۰	عمق کمتر از ۲۰ میلیمتر و کمتر از ۱۵۰ میلیمتر هر جهتی	شدید	
۵۰	عمق بیشتر از ۲۰ میلیمتر و بیشتر از ۱۵۰ میلیمتر هر جهت	خیلی شدید	

۱۰- محاسبه شاخص وضعیت

پس از ارزش‌گذاری نارسایی‌ها و تعیین علل خرابی به وسیله ی سیستم، شاخص وضعیت قابل محاسبه است. بر اساس تحقیقات انجام شده توسط مهندسین نیروی زمینی ارتش آمریکا در این زمینه، فرمول زیر برای محاسبه شاخص وضعیت پیشنهاد شده است [۶].

$$CL = 100\ [1.0(DV1) + 0.4(DV2) + 0.2(DV3) + 0.15(DV4) + 0.1(DV5)]$$

محاسبه شاخص وضعیت (CL) بر اساس پنج ارزش خرابی (DV) بزرگتر به دست آمده از فرایند ارزیابی است. در این فرمول DV_1 بیشترین ارزش خرابی و به ترتیب DV_5 پنجمین مقدار بر اساس ترتیب نزولی است.

در نهایت، سیستم خبره ارزیابی خرابی دال‌های بتنی در منطقه خلیج فارس، نتیجه های کلی خرابی سازه به همراه شاخص وضعیت اجزاء و شناسنامه کلی سازه را در پایگاه اطلاعات دیگری ذخیره می‌کند. توصیف خرابی و ارایه پیشنهادات جهت انجام اقدامات بعدی به همراه نمودار عمر

مفید دال بتنی در فرم نتیجه که در شکل ۹ نشان داده شده است، ارایه می‌شود. این سیستم خبره در محیط رابط گرافیکی کاربر طراحی شده که کاربر را قادر می‌سازد تا دسترسی آسانی به آن داشته و با وارد کردن اطلاعات حاصل از بازرسی چشمی، ارزیابی خرابی دال‌های بتنی را به سهولت انجام دهد.

شکل ۹ ارزیابی وضعیت دال

۱۱– مطالعه موردی پل حاجی آباد

پل حاجی آباد، پلی در منطقه خلیج فارس و استان هرمزگان و در مسیر بندرعباس- تهران می‌باشد. این پل متشکل از ۴ دهانه به طول ۳۱/۳۸ متر و دو دهانه به طول ۳۱/۰۶ و ۲۶/۰۶ است و در نتیجه طول کل آن ۱۸۲/۶۴ متر است. عرشه پل از نوع مرکب و متشکل از تیر و ورق‌های حمال فولادی و یک دال بتنی است. ضخامت عرشه ۱/۷۵ متر و با ۵ عدد تیر فلزی به شکل I و به فاصله ۲/۵ متر و یک دال ۲۰ سانتیمتری یکپارچه است و به وسیله عنصرها برشگیر با تیر درگیر است. تکیه‌گاه‌ها در سرستون‌ها از حرکت طولی و عرضی جلوگیری می‌کنند. جمعا ۱۲ عدد درز انبساط در پل وجود دارد.

شرایط آب و هوای منطقه تابستان در دشت گرم و مرطوب و زمستان معتدل است. متوسط بارندگی ۲۰۰ میلیمتر می‌باشد. شرایط محیطی عبارت است از: دمای حد اکثر ۳۵ درجه سانتی گراد و حداقل ۱۱ درجه سانتی گراد و متوسط ۲۳/۳ درجه سانتی گراد و همچنین رطوبت حداقل ۵۱ و حداکثر ۸۴ درصد.

سازه پل از کیفیت قابل قبولی برخوردار است. مکانیسم درزهای انبساط به شکل ابتدایی است و ترک‌های عمیق در کنار درزهای انبساط دیده می‌شود. (شکل ۱۰) قلوه‌کن شدگی نیز در برخی نواحی دیده می‌شود. سازه در معرض عبور و مرور و تغییرهای دماست. (شکل ۱۱) عمده‌ترین موارد مشکوک ترک‌های عرضی است که در گزارش بازرسی فنی که به وسیله ی پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه مورد بررسی قرار گرفته، ذکر شده است [۱۵].

شکل ۱۰ ترک‌های روی درز انبساط [۱۵]

شکل ۱۱ قلوه‌کن شدگی و خوردگی آرماتور [۱۵]

با توجه به بازدید و بازرسی دقیق کارشناسان خبره از پل و نیز بررسی نقشه‌های اجرایی آن در مجموع وضعیت عمومی عرشه مطلوب و با خرابی متوسط ارزیابی شده است [۱۵].

در شکل ۹ نتیجه های تحلیل انجام شده به وسیله سیستم خبره نشان داده شده است. نتیجه های این تحلیل در جدول ۴ بیان شده است.

همان طور که در جدول ۴ دیده می‌شود، شاخص وضعیت عرشه برابر ۶۵ به دست آمده که نشان از خرابی متوسط و وجود نقص متوسط، تعدادی نارسایی، آسیب و خرابی مشهود است ولی بتن قابل سرویس دهی است. همچنین

بازرسی تفصیلی و آنالیز اقتصادی برای گزینه های تعمیرات توصیه می‌شود. همچنین بعضی روشهای محافظت و تعمیر لازم است.

جدول۴ نتایج حاصل از سیستم خبره Bridge Slab-Expert

توصیف وضعیت	شاخص وضعیت	ارزش خرابی	علت خرابی	نارسایی‌ها
خرابی متوسط : وجود نقص متوسط، تعدادی نارسایی، آسیب و خرابی مشهود است ولی بتن قابل سرویس دهی می‌باشد	۶۵	۲۰	ضعف در اجرا	ترک در درزها
		۲۰	خوردگی آرماتور	ترک عرضی
		۲۰	گرادیان حرارتی	تغییرهای دما
		۱۰	خوردگی	قلوه‌کن شدگی
		۱۰	عبور و مرور وسائل نقلیه	خستگی

با مقایسه بین نتیجه حاصل از بازرسی فنی و سیستم خبره، اعتبار سیستم قابل بررسی است و به دلیل نزدیکی نتیجه ها می‌توان بیان کرد که سیستم دارای عملکردی مطلوب می‌باشد که با خطای قابل قبول مهندسی نتیجه های مناسبی را در اختیار کاربر قرار می‌دهد. این سیستم خبره در محیط رابط کاربر گرافیکی طراحی شده که کاربر را قادر می‌سازد تا دسترسی آسانی به آن داشته و ارزیابی خرابی دال‌های بتنی را به وسیله آن انجام دهد.

۱۲- نتیجه‌گیری

با توجه به تحقیقات ارایه شده در این مقاله، نتیجه های زیر قابل استخراج است:

۱. سیستم جهت ارزیابی صحیح در حوزه دانش فرد خبره طراحی شده است ولی این امکان را برای فرد خبره فراهم می‌کند که به طور ساختار یافته و سریع حرکت کند.
۲. دال‌های بتنی پل‌ها به دلیل قرار گیری مستقیم در معرض عبور و مرور وسایل نقلیه و بارهای وارده از شدت خرابی بیشتری نسبت به دیگر المان‌های سازه پل برخوردار هستند
۳. به علت پیچیدگی بین تاثیر توام عامل های محیطی و سازه‌ای و ناشناخته بودن ترکیب آنها و نبود تاریخچه‌ای دقیق از نحوه بارگذاری سازه در حین بازرسی، در این تحقیق نارسایی های سازه‌ای به طور مستقل از دیگر نارسایی ها مورد ارزیابی قرار گرفته و سپس برای در نظر گرفتن تاثیر مشترک نارسایی های سازه‌ای بر دیگر نارسایی‌ها، نشانه خرابی مشترک انتخاب شده و نارسایی سازه‌ای به عنوان ضریبی افزایش دهنده در نارسایی حاصل از عامل های محیطی تاثیر می‌گذارد.
۴. این سیستم با استفاده از بازرسی چشمی نمای بتن به عنوان نخستین گام در آزمایش های در محل، آزمایش های تکمیلی را جهت تعیین درستی ارزیابی معرفی می کند که موجب صرفه جویی در وقت و هزینه می‌شود.
۵. این سیستم با ایجاد روند ارزیابی‌ای که اجازه خواهد داد تا وضعیت موجود سازه به صورت عددی بیان شود، سیستم مدیریت ارزیابی را جهت انتخاب بهترین روش تعمیر و نگهداری اداره می‌کند.
۶. سیستم گزارش دهی نتیجه های مشاوره حاصل از برنامه را در صفحه نمایش ارایه می کند که برای گزارش دهی در قالب پایگاه اطلاعات ذخیره می‌شود. این نتیجه ها شامل شناسنامه دال پل بتنی، استنتاج سیستم خبره بهمراه نارسایی ها و علل آنها، شاخص وضعیت، توصیف وضعیت، راهکار پیشنهادی و نمودار عمر مفید دال بتنی است.
۷. نحوه نمایش دانش در این سیستم خبره به صورت شئ گرا است که بر اساس ترکیب روش قانون ها تولید، منطق بیان شده است و با استفاده از مکانیسم پرسش و پاسخ، پایگاه دانش مورد استفاده قرار می‌گیرد.
۸. ساختار استنتاج بکار رفته در سیستم از نوع درخت تصمیم گیری دوتایی است. ساختارهای تصمیم‌گیری به قاعده های تولید تبدیل می‌شوند. این کار با انجام یک جستجو در سطح ساختار و ایجاد قانون های اگر...آنگاه... برای هر گره به آسانی صورت می‌گیرد.
۹. در این سیستم از عدم قطعیت برای امکان تصمیم گیری در شرایطی که کاربر پاسخ را به طور قطعی نمی‌داند استفاده شده است. در این حالت با استفاده از روش عددی در نظریه ی احتمال ها، فاکتور قطعیت که ضریبی بین صفر و یک است در شاخص وضعیت تاثیر می‌گذارد.
۱۰. با انجام مقایسه نتیجه های مطالعه موردی بین بازرسی فنی و سیستم خبره، و نزدیکی این نتیجه ها،

قابلیت اطمینان و درستی نتیجه های سیستم مورد تایید قرار گرفت که البته جای انجام مطالعات بیشتر جهت کسب اطمینان بیشتر در این زمینه وجود دارد.

۱۱. این سیستم خبره در محیط رابط گرافیک کاربر طراحی شده و امکان توصیف روند پرسش و پاسخ و کمک خواهی، محیطی کاربر پسند را فراهم آورده است که کاربر را قادر می‌سازد تا دسترسی آسانی به آن داشته و ارزیابی خرابی دال‌های بتنی را به وسیله آن انجام دهد.

۱۳- مراجع

1. Raina, V. K., "*Concrete Bridges: Inspection, Repair, Strengthening, Testing and Load Capacity Evaluation,*" *Tata McGraw-Hill Pub. Co.*, India, 1994.

۲. رهایی، ع.ر. فیروزی، ا.، *بررسی عملکرد آسیب پذیری و بهسازی پل‌ها*، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، تهران، **۱۳۸۴**

۳. رهایی، ع.ر. نعمتی، س.، *ارزیابی عملکرد و روش‌های مقاوم سازی سازه‌های بتنی*، انتشارات فدک، **۱۳۸۳**

۴. رمضانیانپور، ع.ا. و قدوسی، پ. و گنجیان ا.، *ریز ساختار، خواص و اجزای بتن (تکنولوژی پیشرفته بتن)*، انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، **۱۳۸۳**

۵. رمضانیانپور، ع.ا. و پاشایی، ر.، *تعمیر و حفاظت سازه‌های بتنی*، انتشارات نورپردازان، تهران، **۱۳۸۱**

6. Moodi, F., "*Development of a Knowledge-Based System for the Repair and Maintenance of Concrete Structures,*" PhD Thesis, University of Newcastle, UK, **2001**.
7. Vagiotas, P., et al, "*Modeling Expert Decision for Highway Bridge Maintenance,*" *7th Int. Conf. on Application of Artificial Intelligence*, Egmond, Nederland, **2003**.
8. Al Abedin, H. M.Z., Eldin, A. S., "Toward An Expert System for the Evaluation of Damage in Concrete Structures in Saudi Arabis," *Dunde Congress*, **1999**, pp. 645-657.
9. Dashmukh P., et al, Quantifying Uncertainty in Bridge Condition Assessment Data," *MID Continent Transportation Symposium Proceeding*, **2000**, pp. 138-141.
10. Miyamoto, A., "*A Practical Bridge Management System for Existing Concrete Bridges,*" *fib Conf*, Japan, **2000**(5), pp. 111-120.
11. Oh, B.H. and Lew, Y. and Choi, Y. C.,
12. *"Development of Expert System for Condition Assessment of Concrete Bridge Deck Structures Based on Material and Structural Evaluation"*, Conmat ***2005*** Conf, Construction Materials, UBC, Canada, **2005**

۱۳. غضنفری، م. *اصول و مبانی سیستم‌های خبره*، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، **۱۳۸۲**

۱۴. رمضانیانپور، ع.ا.، صارمی، م.، *بررسی علل کاهش عمر مفید سازه‌های بتنی مسلح*، انتشارات مرکز تحقیقات و مطالعات راه و ترابری، **۱۳۷۵**

۱۵. رمضانیانپور، ع.ا.، مصلحی، ز.، *دوام بتن با سیمان‌های پوزولانی در شرایط آزمایشگاهی مشابه خلیج فارس*، انتشارات مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، **۱۳۸۴**

۱۶. *بازرسی پل حاجی آباد*، پژوهشکده حمل و نقل وزارت راه و ترابری، تهران، **۱۳۸۵**