

## استفاده از شبکه بیزین برای پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده عرشه‌های بتن مسلح تحت خوردگی کلرایدی

عباس مهدی زاده لیما<sup>۱</sup>، موسی محمودی صاحبی<sup>۲\*</sup>، امیر زابری بغلانی نژاد<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه سازه دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۲-استاد گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی

۳- استادیار گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

Email: \*m.mahmoudi@sru.ac.ir

پذیرش: [۱۴۰۲/۱۲/۲۲]

دریافت: [۱۴۰۲/۰۸/۱۹]

### چکیده

سازه‌ها از جمله پل‌های بتنی، ممکن است در طول بهره‌برداری در معرض آسیب‌های تدریجی ناشی از شرایط محیطی مثل خوردگی قرار گیرند که این موضوع باعث کاهش عمر مفید آنها خواهد شد. اطلاع از میزان عمر مفید باقیمانده سازه‌ها باعث می‌شود تا در زمان مناسب نسبت به بهسازی، مقاوم سازی و یا بازسازی آنها اقدام شود. برای تعیین عمر مفید باقیمانده یک سازه، سه روش متداول تحت عناوین روش داده محور، روش فیزیک خرابی و روش ترکیبی وجود دارد. در این مقاله روش ترکیبی تعیین عمر مفید باقیمانده سازه‌ها، مورد توجه و پژوهش قرار گرفته است. هدف از این تحقیق پیشنهاد روشی مناسب برای پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده سازه پل با عرشه بتن مسلح تحت خوردگی ناشی از یون کلراید با استفاده از شبکه بیزین است. عمر مفید باقیمانده قطعات بتن مسلح تحت حمله کلرایدی، شامل دو بخش زمان مربوط به مرحله آغازین خوردگی و زمان مربوط به مرحله انتشار یون کلر می‌باشد. برای تعیین بخش عمر مفید باقیمانده مربوط به مرحله آغازین، تحقیقات متنوعی انجام شده و کمیته ACI365 آمریکا نرم‌افزاری تحت عنوان Life-365 را برای این منظور پیشنهاد کرده است. برای تعیین بخش دوم عمر باقیمانده که مربوط به مرحله انتشار است، تحقیقات جامعی وجود ندارد و در کارهای عملی معمولاً عددی ثابت و برابر با ۶ سال در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که بخش دوم عمر باقیمانده نیز به عوامل متعددی از قبیل قطر میلگردها، پوشش بتن، تغییرات دمایی محیط و موارد دیگر بستگی دارد. این موضوع ضرورت تحقیقات بیشتر در این خصوص را روشن می‌نماید. در این مقاله با استفاده از داده‌های موجود در تحقیقات گذشته و تولید مجدد داده و بکارگیری شبکه بیزین، روابطی برای تعیین عمر مفید سازه پل در هر دو مرحله آغازین و انتشار ارائه شده است. به منظور ارزیابی نتایج حاصل از روابط پیشنهادی، مساله تعیین عمر مفید باقیمانده برای یک مدل عددی پل بتنی و نیز چند سازه دریایی واقع در خلیج فارس مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که با استفاده از روابط پیشنهادی می‌توان دقت تخمین عمر مفید باقیمانده پل‌های با عرشه بتنی در معرض نفوذ یون کلراید را با تکیه بر داده‌های بدست آمده از بازرسی‌های میدانی سازه بهبود بخشید. در این پژوهش، عمر باقیمانده مربوط به مرحله انتشار کلراید در بتن، در بهترین شرایط ۹.۱۱۶ سال و در بدترین شرایط ۲.۷۳ سال تخمین زده شد.

واژگان کلیدی: عرشه پل بتنی، یون کلراید، عمر مفید باقیمانده، روش داده محور، شبکه بیزین.

## ۱- مقدمه

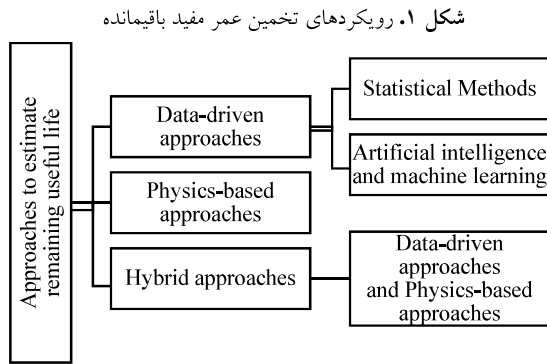


Fig. 1. Approaches to estimate remaining useful life

در دهه اخیر با پیشرفت و افزایش بکارگیری روش‌های آماری و نیز تکنیک‌های مبتنی بر هوش مصنوعی و یادگیری ماشین، موضوع تعیین عمر باقیمانده سازه‌ها به کمک این روش‌ها (روش داده محور و یا ترکیبی) نیز مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. چون و همکاران روند زوال پل با استفاده از مدل مبتنی بر زنجیره مارکوف را مطالعه کردند [11]. مارکوس و همکاران سیستم یکپارچه‌ای را برای مدیریت پل با استفاده از مدل‌های خرابی احتمالی برای عرشه پل ارائه کردند [12]. رنجیت و همکاران با استفاده از داده‌های به دست آمده از شرکت Roads Corporation در استرالیا، مدل مبتنی بر زنجیره مارکوف تصادفی را برای پیش‌بینی وضعیت عناصر پل چوبی ارائه نمودند [13]. کاسگوداگان [14] و همچنین توره و همکاران [15] در پژوهش‌های جداگانه روش‌هایی را برای پیش‌بینی مدل زوال پل‌ها با استفاده از شبکه بیزین پیشنهاد کردند. اخیراً ایشواریا سریکانت و همکاران روش داده محور برای تخمین عمر باقیمانده پل‌های آمریکا براساس معیارهای پذیرش پل معرفی کردند [16]. در روش این پژوهشگران، مدل زوال پل مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی<sup>۲</sup> و براساس داده‌های استخراج شده از فهرست پل ملی آمریکا (NBI) تعریف می‌شود. روش پیشنهادی ایشواریا سریکانت و همکاران به دلیل بهره‌گیری از داده‌های کیفی موجود در فهرست NBI، تنها برای پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده پل‌های آمریکا مناسب بوده و قابل شمول برای پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده پل‌های دیگر کشورها نیست. به بیان

یکی از رویکردهای مدیریت سلامت سازه‌ها، امکان تعیین وضعیت نابودی سیستم و تخمین عمر مفید باقیمانده آنها است. عمر مفید باقیمانده سازه، برابر فاصله زمانی بین اولین نقطه شناسایی آسیب تا خرابی کامل آن تعریف می‌شود [1-2]. آگاهی از عمر مفید باقیمانده سازه، متخصصان را از صرف هزینه و زمان غیرضروری بازمی‌دارد و قابلیت استفاده از سیستم را افزایش می‌دهد [3-5]. در مورد سیستم‌هایی مانند پل‌ها، با توجه به گران قیمت بودن سازه، پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده این امکان را برای مدیران فراهم می‌آورد که در زمان مناسب اقدامات مربوط به بهسازی، مقاوم سازی و یا بازسازی را فراهم آورند. یکی از معضلات این سازه‌ها، خوردگی و زوال ناشی از نفوذ یون کلر در عرشه بتن مسلح آنها است. در این مقاله مساله تعیین عمر مفید باقیمانده عرشه‌های بتن مسلح تحت حمله کلرایدی مورد توجه قرار گرفته است. مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که رویکردهای تخمین عمر مفید باقیمانده (RUL)<sup>۱</sup> به سه روش داده محور، فیزیک خرابی و روش ترکیبی تقسیم بندی می‌شوند [6-8]. روش فیزیک خرابی با استفاده از یک رابطه یا فرمول و با در نظرگیری معیار حدی، مبنای تولید داده‌ها قرار می‌گیرد. روش داده محور به دو دسته تکنیک‌های آماری و روش‌های هوش مصنوعی و یادگیری ماشین تقسیم می‌شود. در این روش دو گام کلی برای محاسبه و تخمین عمر مفید باقیمانده وجود دارد: ۱- تعیین یک شاخص سلامت که نمایانگر وضعیت زوال سیستم باشد. ۲- تعیین عمر مفید باقیمانده با استفاده از پیش‌بینی شاخص سلامت و تخمین مدت زمان بهره‌برداری از سیستم تا لحظه خرابی. روش سوم که تحت عنوان روش ترکیبی نامگذاری می‌شود، از مزایای دو روش داده محور و فیزیک خرابی بهره می‌گیرد [9-10]. به بیان دیگر، در روش ترکیبی از تکنیک‌های آماری و یا هوش مصنوعی مورد استفاده در روش داده محور بهره گرفته می‌شود و پایگاه داده مورد استفاده در این تکنیک‌ها به کمک روش فیزیک خرابی تامین می‌شود. شکل (۱) رویکردهای مختلف تخمین عمر مفید باقیمانده سازه‌ها را نشان می‌دهد.

## ۲- مدل ریاضی خوردگی کلرایدی

از آنجایی که موضوع مقاله حاضر برآورد عمر مفید باقیمانده دال‌های بتن مسلح تحت خوردگی کلرایدی است، در این بخش به مرور مدل ریاضی خوردگی پرداخته می‌شود. به منظور مدل سازی نفوذ کلراید به سازه، بیشتر قانون دوم نفوذ فیک<sup>۱</sup> به کار می‌رود. بر پایه این قانون، مشتق غلظت یون کلراید نفوذی نسبت به زمان، متناسب با گرادیان غلظت و ضریب انتشار کلر در بتن است. قانون دوم فیک که برای محاسبه غلظت یون کلراید در یک بعد بکار می‌رود به صورت زیر است:

$$\frac{\partial c(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_a \frac{\partial c(x,t)}{\partial x} \right) \quad (1)$$

حل معادله (۱) منجر به رابطه زیر خواهد شد:

$$C(x = a, t) = C_i + (C_{s,\Delta x} - C_i) \times \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{a - \Delta x}{\sqrt{D_{app} \times t}} \right) \right] \quad (2)$$

در این روابط  $a$  ضخامت کاور بتن،  $C_i$  غلظت اولیه یون کلراید در بتن بر حسب [wt.%/cement]،  $C_{s,\Delta x}$  غلظت یون کلراید در عمق  $\Delta x$  در زمان  $t$  [wt.%/cement]،  $D_{app}$  ضریب ظاهری انتشار کلراید بر حسب [mm<sup>2</sup>/years]،  $x$  عمق بر حسب [mm] (در سطح بتن، مقدار عمق صفر تلقی شده و به سمت داخل عضو افزایش می‌یابد)،  $t$  زمان بر حسب سال،  $c(x, t)$  مقدار کلراید موجود در بتن در عمق  $x$  و در زمان مشخص  $t$  بر حسب [wt.%/cement] و  $\operatorname{erf}(\cdot)$  تابع خطای گوسی می‌باشد.

زمانی که میزان غلظت یون کلراید در عمق کاور بتن و در اطراف میلگردها به مقدار غلظت بحرانی تعریف شده در آیین‌نامه‌ها ( $C_{crit}$ ) برسد، مرحله شروع خوردگی فرا رسیده است. از قرار دادن  $C_{crit}$  در معادله (۲) و بدست آوردن  $t$  می‌توان زمان لازم برای شروع خوردگی را تعیین نمود. در بخش‌های بعدی این مقاله از روابط مذکور برای پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده سازه‌های بتنی تحت خوردگی استفاده خواهد شد.

دیگر، با وجود اینکه روش پیشنهادی توسط پژوهشگران مذکور از مزایای روش داده محور بهره می‌گیرد، ولی عدم وجود یک پایگاه داده کمی برای آموزش شبکه عصبی برای تعیین عمر مفید پل‌ها در کشورهای مختلف، یک نقطه ضعف مهم این روش به شمار می‌رود.

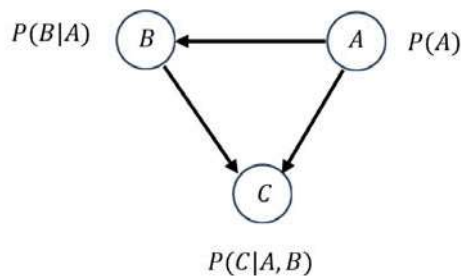
این پژوهش با هدف برداشتن گامی به منظور رفع برخی کاستی‌های موجود در زمینه تعیین عمر مفید سازه‌های بتنی تحت خوردگی کلرایدی انجام شده است. در این راستا یک روش ترکیبی مبتنی بر شبکه‌های بیزین برای تعیین عمر مفید باقیمانده عرشه بتن مسلح پل‌ها پیشنهاد می‌شود. یک ویژگی مهم برای درک مزیت شبکه‌های بیزین این است که این شبکه‌ها محتاج به داشتن اطلاعات دقیق قبلی نیستند، به عبارت دیگر هنگام استفاده از شبکه‌های بیزین وقتی که اطلاعات قبلی موجود ناقص است، این شبکه‌ها اغلب نتایج قابل قبولی را تولید می‌کنند. شبکه‌های بیزین با استفاده از منابع مختلف داده، چارچوب بسیار منعطفی برای مدل‌سازی عدم قطعیت را ایجاد می‌کنند [17]. شبکه‌های عصبی نشان داده‌اند که در مسائل مربوط به ارزیابی عملکرد از جمله قابلیت اطمینان بسیار قوی عمل نموده‌اند [18]. این مزایای شبکه‌های بیزین دلیل انتخاب آنها نسبت به سایر مدل‌های مشابه مانند برنامه ریزی ژنتیک در تحقیق حاضر هستند. ویژگی بارز روش پیشنهادی در این پژوهش، استفاده از داده‌های بدست آمده از بازرسی‌های میدانی سازه مورد مطالعه در تعیین عمر مفید آن می‌باشد.

در ادامه مقاله ابتدا مرور سریعی بر تئوری خوردگی اجزای بتن مسلح تحت حمله کلرایدی، چگونگی محاسبه عمر مفید باقیمانده این سازه‌ها و نیز تئوری شبکه‌های بیزین انجام خواهد شد. سپس مدل پیشنهادی معرفی و نتایج بدست آمده از آن مورد بررسی و درستی‌آزمایی قرار می‌گیرند. در انتها به جمع‌بندی یافته‌های پژوهش پرداخته می‌شود.

بیزین از تعدادی گره تشکیل شده که با کمان‌های پیکان‌دار به یکدیگر مربوط می‌شوند. هر گره نشان دهنده یکی از متغیرهای تصادفی مساله است و جهت پیکان‌ها رابطه علت و معلولی (وابستگی احتمالاتی) بین متغیرها را مشخص می‌کند. وقتی دو گره با یک کمان پیکان‌دار به هم وصل می‌شوند، گره علت والد یا پدر و گره معلول فرزند نامیده می‌شود. وابستگی گره‌های فرزند به والدین خود به صورت احتمالات شرطی بیان می‌شود [21].

ساخت یک شبکه بیزین شامل دو مرحله کلی طراحی و آموزش شبکه است. برای طراحی یک شبکه بیزین ابتدا توزیع احتمالاتی مربوط به هر یک از گره‌ها، بر اساس اطلاعات موجود تعیین می‌شود. سپس با استفاده از قانون بیز، توزیع احتمال شرطی هر گره نسبت به والدین خود نوشته می‌شود. در مرحله بعد توزیع احتمال مشترک همه متغیرهای شبکه از ضرب احتمالات شرطی همه گره‌ها تعیین می‌شود و در نهایت توزیع احتمال مربوط به هر یک از متغیرهای تصادفی مساله، به کمک احتمال حاشیه‌ای آنها تعیین می‌شود. در مرحله آموزش شبکه بیزین، پارامترهای توزیع احتمالاتی گره‌ها به گونه‌ای تعیین می‌شوند که نتایج بدست آمده از شبکه بیشترین هماهنگی را بر داده‌ها داشته باشد. این مرحله با استفاده از داده‌های موجود در یک پایگاه داده مناسب انجام می‌شود [21].

شکل ۲. یک شبکه بیزی با وابستگی‌های احتمالی گره‌های آن



$$P(A, B, C) = P(A) \times P(B|A) \times P(C|A, B)$$

$$P(C) = \iint P(A, B, C) \, dA \, dB$$

Fig. 2. A Bayesian network with probabilistic dependencies of its nodes

### ۳- تخمین عمر مفید باقیمانده بتن تحت زوال

خوردگی کلرایدی عضو بتنی، شامل دو مرحله شروع خوردگی ( $t_1$ ) و ادامه انتشار یون کلر ( $t_2$ ) است. عمر مفید باقیمانده (RUL) اعضای بتنی تحت حمله کلرایدی، از مجموع دو زمان مرحله شروع خوردگی و مرحله انتشار تعیین می‌شود:

$$RUL = t_1 + t_2 \quad (3)$$

عمر باقیمانده مربوط به مرحله آغازین خوردگی ( $t_1$ )، شامل مدت زمان نفوذ یون کلراید تا لحظه رسیدن غلظت آن به مقدار بحرانی در اطراف میلگرد تعریف می‌شود. به کمک رابطه (۲) می‌توان مقدار عمر باقیمانده عضو بتنی در مرحله آغازین ( $t_1$ ) را بطور تقریبی محاسبه نمود. در مرحله انتشار، ابتدا خوردگی در میلگردها رخ داده و سپس به علت انبساط و ورقه ورقه شدن میلگردها، در پوشش و هسته بتن ترک‌های عمیق ایجاد می‌شود. عمر باقیمانده مربوط به مرحله انتشار ( $t_2$ )، برابر بازه زمانی از لحظه فرا رسیدن غلظت بحرانی کلردر اطراف میلگرد تا خرابی کامل عضو تعریف می‌شود. در بیشتر موارد عمر باقیمانده مربوط به مرحله انتشار ( $t_2$ ) نسبت به مرحله آغازین ( $t_1$ ) بسیار کوتاهتر است [19]. مرور منابع نشان می‌دهد که مرحله انتشار ( $t_2$ ) عددی ثابت (معمولاً برابر با ۶ سال) در نظر گرفته می‌شود [20]. این در حالی است که در شرایط محیطی مهاجم با مقدار کلراید بالا، این زمان می‌تواند کمتر از مقدار مذکور باشد. این موضوع ضرورت تعیین دقیقتر عمر باقیمانده مربوط به مرحله انتشار را روشن می‌نماید. بدیهی است که برای حصول مقدار دقیقتر عمر باقیمانده، شرایط واقعی محیط اطراف سازه و مشخصات هندسی و فیزیکی سازه مورد نظر بایستی در محاسبات در نظر گرفته شود. در این مقاله با استفاده از شبکه‌های بیزین روابطی برای تخمین مقادیر  $t_1$  و  $t_2$  با توجه به شرایط سازه مورد مطالعه ارائه خواهد شد که در بخش بعدی به آنها پرداخته می‌شود.

### ۴- استفاده از شبکه بیزین در تخمین عمر باقیمانده

شبکه‌های بیزین، یکی از ابزارهای پیش‌بینی مطرح در دو دهه اخیر هستند. این شبکه‌ها که از اصول نظریه گراف، نظریه احتمالات، علوم کامپیوتر و آمار بهره می‌برند، یکی از روش‌های یادگیری ماشین به حساب می‌آیند. بطور خلاصه یک شبکه

یک شبکه بیزین قابل قبول، وجود پایگاه داده مناسب برای آموزش آن شبکه است. در این تحقیق برای هر یک از ترم‌های  $t_1$  و  $t_2$  از عمر مفید باقیمانده سازه، علاوه بر طراحی شبکه بیزین، راهکاری برای ایجاد پایگاه داده مناسب برای آموزش شبکه مربوطه نیز پیشنهاد شده است که در بخش بعدی به شرح آن پرداخته می‌شود.

#### ۴-۱- عمر باقیمانده مربوط به مرحله آغازین ( $t_1$ )

در این پژوهش برای پیش‌بینی بخش آغازین عمر مفید باقیمانده عرشه بتنی پل‌ها ( $t_1$ )، یک شبکه بیزین مطابق با نمودار شکل (۳) طراحی شد. این شکل ورودی‌ها و خروجی شبکه را به صورت گرافیکی نمایش می‌دهد. در این شبکه، داده‌های ورودی شبکه شامل ضخامت دال (TH)، پوشش بتنی میلگردها (C)، غلظت یون کلر موجود در سیمان (MCC)، زمان لازمی که غلظت یون کلر در سطح بتن به مقدار بحرانی می‌رسد (TM)، دمای بیشینه محیط (T.MAX)، دمای کمینه محیط (T.MIN)، نسبت آب به سیمان (W/CM) و میزان پوزولان‌های بکار رفته در بتن شامل خاکستر بادی (F.ASH)، دوده سیلیسی یا میکروسیلیس (SILICA.F) و سرباره کوره آهن گدازی (SLAG) هستند. خروجی شبکه، بخش عمر باقیمانده سازه مربوط به مرحله آغاز خوردگی، یعنی  $t_1$  را بدست می‌دهد.

شکل ۳. شبکه بیزین مربوط به عمر باقیمانده در مرحله آغازین خوردگی

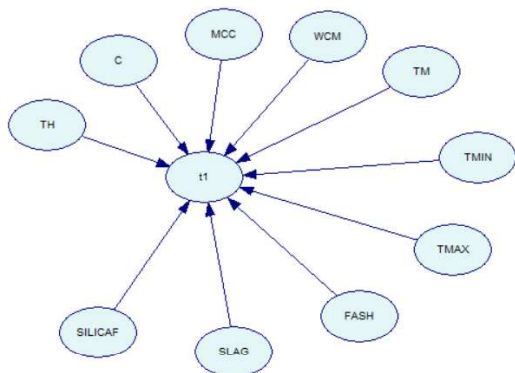


Fig. 3. Bayesian network for the remaining useful life in initial phase of corrosion

شکل (۲) یک شبکه بیزین ساده، احتمالات شرطی هریک از گره‌ها، رابطه احتمال مشترک همه متغیرها و نیز رابطه توزیع احتمال حاشیه‌ای مربوط به متغیر خروجی مساله را بطور شماتیک نشان می‌دهد.

پس از طراحی و آموزش شبکه بیزین، با استفاده از روش رگرسیون خطی بیزی می‌توان رابطه‌ای برای پیش‌بینی مقدار یک متغیر تصادفی بر حسب سایر متغیرهای دیگر استخراج نمود. برای این کار میانگین توزیع احتمالاتی پارامتر مورد نظر به صورت رابطه خطی بر حسب سایر متغیرها نوشته می‌شود. معادله زیر رابطه پیش‌بینی پارامتر C را بر اساس سایر متغیرهای شبکه بیزین نمونه شکل (۲) نشان می‌دهد:

$$C = \alpha_1 \times A + \alpha_2 \times B + \epsilon \quad (4)$$

با استفاده از شبکه بیزین آموزش داده شده، برای هر یک از ضرایب  $\alpha_1$  و  $\alpha_2$  و  $\epsilon$  یک توزیع آماری بدست می‌آید و در نهایت از مقادیر میانگین این توزیع‌ها در رابطه ۴ استفاده می‌شود. با وجود مزیت‌هایی که مدل‌های غیرخطی دارند، امکان بروز خطای *overfitting* و برخی مشکلات دیگر مانند عدم آموزش مناسب شبکه برای این مدل‌ها وجود دارد. به همین دلیل در گام نخست این پژوهش یک مدل خطی برای پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده عرشه‌های بتن مسلح تحت خوردگی کلرایدی برگزیده شد. همچنین توابع توزیع پارامترهای بکار رفته در شبکه نرمال در نظر گرفته شد. خوشبختانه پس از طراحی و آموزش شبکه و درستی‌آزمایی نتایج برای چند مدل واقعی، نتایج دلگرم‌کننده‌ای از این پژوهش بدست آمد و به همین دلیل الگوریتم پیشنهادی به صورت یک مدل خطی با توزیع نرمال برای پارامترها انتخاب شد.

بسته‌های نرم‌افزاری مختلفی برای طراحی و آموزش شبکه‌های بیزین وجود دارند که قادر به انجام این محاسبات هستند. نرم‌افزاری جنای<sup>۱</sup> یکی از این بسته‌های نرم‌افزاری است که در تحقیق حاضر از آن برای طراحی، آموزش شبکه بیزین و استخراج رابطه پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده استفاده شده است. لازم به ذکر است که موضوع بسیار حیاتی برای بدست آوردن

رسیدن به غلظت بحرانی یون کلر از مرجع [21] برداشت شد. شکل (۴) اطلاعات ورودی به نرم‌افزار Life-365 را برای ایجاد پایگاه داده نشان می‌دهد.

تولید این داده‌ها به صورت دستی کاری زمانبر و بسیار دشوار است. زیرا برای بدست آوردن تعداد کافی از داده‌ها، باید در هر مرحله مقادیر مختلفی از پارامترها در بازه قابل قبول انتخاب و به نرم‌افزار Life-365 داده شوند و به ازای آنها یک مقدار  $t_1$  بدست آید و این کار تا رسیدن به تعداد مناسب داده‌ها ادامه پیدا کند. در این پژوهش برای کاهش هزینه محاسباتی و برای دستیابی به داده‌های بیشتر، داده‌های دستی تولید شده اولیه توسط Life-365 مجدداً توسط نرم‌افزار جنای به تعداد مورد قبول افزایش داده شدند. برای بررسی کفایت تعداد داده‌ها، از شاخص RMSE استفاده شد. این شاخص به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (A_i - F_i)^2}{n}} \quad (5)$$

در این رابطه پارامتر  $A_i$  نشان دهنده عمر بدست آمده از نرم‌افزار Life-365 و  $F_i$  نشان دهنده عمر بدست آمده از شبکه بیزین است. افزایش داده‌ها تا آنجایی ادامه پیدا می‌کند که مقدار RMSE به کمتر از یک مقدار حدی (در این تحقیق ۵ درصد) برسد.

در این تحقیق برای تولید پایگاه داده برای آموزش شبکه بیزین مربوط به  $t_1$ ، استفاده از نرم‌افزار Life-365 پیشنهاد می‌شود که توسط کمیته ACI365 تهیه شده است. مدل مورد استفاده در این تحقیق نسخه Life-365(v2.2.3,2020) است. اساس مدل‌سازی این نرم‌افزار معادله دیفرانسیل انتشار فیک است که در بخش ۲ معرفی شد. در نرم‌افزار Life-365 ابتدا مشخصات هندسی مقطع بتنی و موقعیت آرماتورها مدل‌سازی می‌شود و سپس شرایط محیطی مانند (سیکل دما، موقعیت پل، غلظت اولیه یون کلراید) تنظیم می‌شود. در نهایت مشخصات مصالح مورد استفاده در پل درج شده و خروجی داده‌ها از نرم‌افزار دریافت می‌شود.

در این بخش به منظور ایجاد پایگاه داده مناسب برای آموزش شبکه بیزین  $t_1$ ، مقادیر مختلفی از ده پارامتر فوق‌الذکر به عنوان ورودی به نرم‌افزار Life-365 داده شد و مقدار  $t_1$  به ازای آنها محاسبه شد. مقادیر ورودی به نرم‌افزار، شامل ضخامت دال پل، عمق کاور بتن، نسبت آب به سیمان در بازه‌های قابل قبول تعریف شده بر اساس آیین‌نامه انتخاب شدند. پیشینه و کمینه دما براساس اطلاعات سایت سازمان هواشناسی استخراج شد و سایر پارامترها مثل میزان بازه غلظت پوزولان‌ها در بتن شامل خاکستر بادی، دوده سیلیسی یا میکروسیلیس و سرپاره کوره آهن‌گدازی بر اساس اطلاعات موجود در آیین‌نامه‌های معتبر انتخاب شد. همچنین مقادیر مربوط به غلظت یون کلر و بیشترین زمان برای

شکل ۴. پارامترهای ورودی به نرم‌افزار life-365 برای ایجاد پایگاه داده مناسب برای آموزش شبکه بیزین  $t_1$

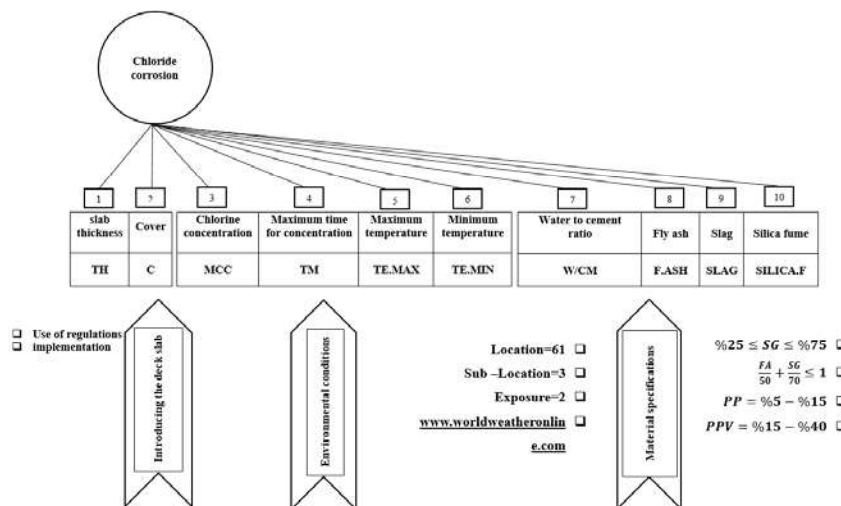


Fig. 4. Input parameters to the life-365 software to create a suitable database for Bayesian network training  $t_1$

شکل ۵. شبکه بیزین مربوط به عمر باقیمانده در مرحله انتشار

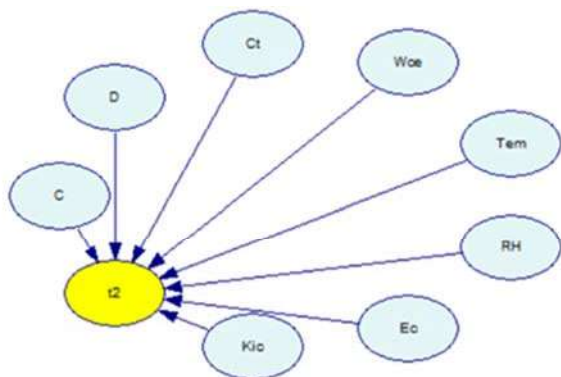


Fig. 5. Bayesian network for the remaining useful life in propagation phase

از آنجایی که مهمترین مانع در تعریف شبکه پیشنهادی، عدم وجود یک رابطه فیزیک خرابی مناسب برای ایجاد پایگاه داده و آموزش شبکه است، در این مقاله برای ایجاد پایگاه داده مناسب از نتایج موجود در مرجع [22] استفاده شد. برای این منظور، با استفاده از نرم افزار Get Data Graph، داده‌ها از نمودارهای موجود در [22] استخراج و برای هر پارامتر یک شبکه بیزین که مقدار زمان  $t$  را با پارامتر مربوطه ارتباط می‌دهد، تعریف شد. با آموزش هر یک از شبکه‌های مذکور، روابط مستقلى برای ارتباط زمان  $t$  و پارامتر مربوطه بدست آمد. جدول (۱) این روابط مستقل را برای هر یک از پارامترهای مذکور نشان می‌دهد. در ادامه به کمک روابط بدست آمده و به ازای مقادیر مختلف  $t$ ، داده‌هایی برای آموزش شبکه بیزین عمر باقیمانده مربوط به مرحله انتشار ( $t_2$ ) تولید شد. در نهایت پس از آموزش شبکه، رابطه زیر برای تخمین عمر باقیمانده  $t_2$  بدست آمد:

$$t_2 = 0.018 \times C + 0.07931 \times D - 1.29390 \times C_c - 18W_{ce} - \frac{0.066}{8} \times T_{em} - \frac{0.0907487}{8} \times E_c - 0.08696 \times K_{ic} + \frac{1}{8} \text{normal}(70.8, 43) \quad (7)$$

جدول (۱) روند تهیه پایگاه داده برای آموزش شبکه بیزین مربوط به عمر باقیمانده  $t_2$  را در شش مرحله نشان می‌دهد.

پس از ایجاد پایگاه داده با حجم مناسب، داده‌ها به سه دسته آموزشی، اعتبارسنجی و آزمایش تقسیم شد و به کمک آنها شبکه بیزین آموزش داده شد. در نهایت به کمک شبکه آموزش یافته، رابطه زیر برای پیش‌بینی عمر باقیمانده  $t_1$  استخراج شد:

$$t_1 = 0.24801 \times TH + 0.348276 \times C + 1.91456 \times MCC + 0.138064 \times TM + 27.3191 \times T.MAX - 4.42938 \times T.MIN - 153.286 \times WCM + 1.43727 \times FASH + 0.200661 \times SLAG + 5.33385 \times SILICAF + \text{normal}(-540.651, 20.6516) \quad (6)$$

به کمک این رابطه می‌توان بخشی اول عمر باقیمانده مربوط به مرحله شروع خوردگی را بر اساس داده‌های بدست آمده از شرایط ساخت و محیط اطراف سازه پیش‌بینی نمود.

#### ۴-۲- عمر باقیمانده مربوط به مرحله انتشار ( $t_2$ )

عمر باقیمانده  $t_2$  در بسیاری از مراجع مقداری ثابت و برابر با ۶ سال در نظر گرفته می‌شود. این در حالی است که در واقعیت عوامل مختلفی بر این پارامتر تاثیرگذار بوده که باید در محاسبات دیده شود. لون و همکاران اخیراً در سال ۲۰۲۱ تحقیقی انجام دادند که نشان می‌دهد مقدار  $t_2$  به پارامترهایی نظیر پوشش بتن (C)، قطر میلگردها (D)، غلظت کلراید در سیمان (Ct)، نسبت آب به سیمان (W/C)، میانگین دمای هوا (T)، رطوبت نسبی (RH)، مدول الاستیسیته بتن (Ec) و چقرمگی شکست ناحیه ترک‌خورده ( $K_{ic}$ ) بستگی دارد [21]. در مقاله منتشر شده توسط پژوهشگران مذکور، ارتباط هر عامل به طور مستقل با  $t_2$  به صورت گراف‌هایی ارائه شده است. با این وجود تاکنون رابطه‌ای که اثر همزمان این عوامل را در محاسبه بخش عمر مفید باقی مانده سازه در مرحله انتشار ( $t_2$ ) در نظر بگیرد، ارائه نشده است. در این پژوهش به منظور اعمال همزمان آثار عوامل مختلف بر محاسبه عمر باقیمانده  $t_2$ ، یک شبکه بیزین مطابق با شکل (۵) طراحی شد.

جدول ۱. مراحل ایجاد پایگاه داده برای دست یابی به رابطه تخمین عمر باقیمانده مربوط به مرحله انتشار

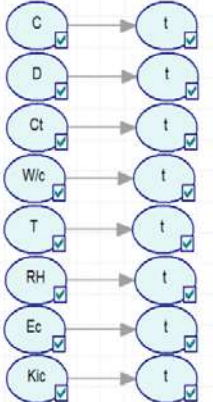

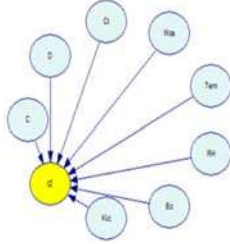
stage 1	stage 2	stage 3	stage 4	stage 5	stage 6
Get Data Graph	Bayesian network of each parameter	The obtained relationship of each parameter with time by Bayesian network	data generation	Bayesian network	Proposed equation for estimation of $t_2$
		$t=0.144C+\text{normal}(0.92,0.556)$ $t=0.634D+\text{normal}(-4.04,0.398)$ $t=0.44Ct+\text{normal}(8.164,0.198)$ $t=-18Wc+\text{normal}(14.25,0.129)$ $t=-0.066T+\text{normal}(25.57,0.118)$ $t=-8RH+\text{normal}(12.65,0.242)$ $t=-0.0907Ec+\text{normal}(8.81,0.144)$ $t=-0.696Kic+\text{normal}(8.98,0.151)$			Equation No. 7

Table 1. Steps of establishing a database to obtain the Bayesian network for the propagation stage

آمده از رابطه فیک، نرم افزار Life-365 و نیز مدل اریله شده در [19] مقایسه شد.

### ۳-۴- خلاصه الگوریتم پیشنهادی تخمین عمر باقیمانده

در این بخش برای تخمین عمر مفید باقیمانده عرشه‌های بتن مسلح تحت خوردگی ناشی از نفوذ یون کلراید روابطی با استفاده از شبکه های بیزین ارائه شد. همچنین راهکارهایی برای ایجاد پایگاه داده به منظور آموزش شبکه‌های مذکور پیشنهاد شد. شکل (۶) خلاصه روند طی شده در این تحقیق را برای بدست آوردن روابط پیشنهادی بصورت یک فلوجارت نشان می‌دهد.

شکل ۶. فلوجارت خلاصه روش پیشنهادی تعیین عمر باقیمانده

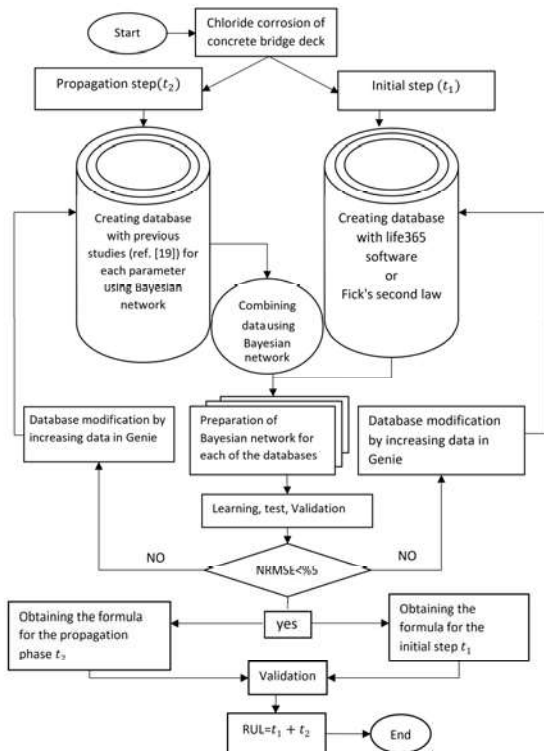


Fig. 6. Summary flowchart of the proposed method for determining the RUL

### ۵- درستی آزمایی

به منظور ارزیابی نتایج بدست آمده از روابط پیشنهادی، دو مطالعه موردی در این تحقیق انجام شد که در ادامه به شرح آنها پرداخته می‌شود.

#### ۵-۱- مطالعه موردی اول: عمر باقیمانده بخش‌های مختلف یک

مجموعه سازه دریایی در خلیج فارس

در این بخش به منظور درستی آزمایی نتایج بدست آمده از روابط پیشنهادی، عمر مفید باقیمانده مربوط یک مجموعه سازه دریایی شامل سه اسکله و دو پل محاسبه شد و با نتایج بدست



شکل ۷. سازه های دریایی مورد بررسی در مطالعه موردی اول

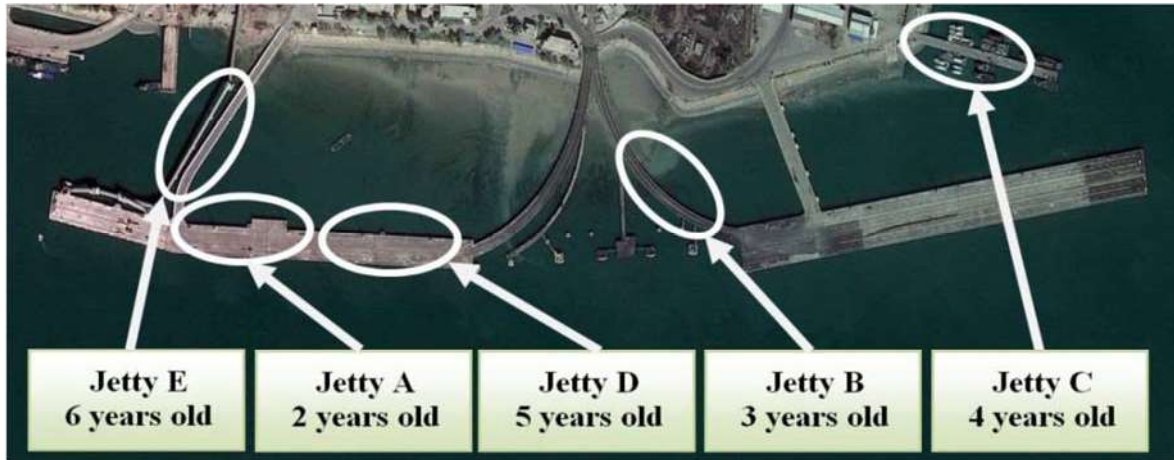


Fig. 7. The structures of the first case study

جدول ۲. داده های مورد استفاده برای تعیین  $t_1$  در مطالعه موردی اول

Jetty code	Parameters									
	TH (mm)	C (mm)	MCC	TM	T. Max (Kelvin)	T. Max (Kelvin)	W/CM	F.ASH	SLAG	SILICA.F
A	200	70.25	0.31	2	328	294	35%	0	0	7%
B	200	71.5	0.46	3	328	294	35%	0	0	7%
C	200	74.2	1.0876	4	328	294	35%	0	0	7%
D	200	59.8	0.726	5	328	294	35%	0	0	7%
E	200	38.9	1.986	6	328	294	35%	0	0	7%

Table 2. Data used to determine  $t_1$  in the first case study

و سایر اطلاعات لازم توسط این پژوهشگران در مرجع [19] ثبت شده است، پس در تحقیق حاضر از داده های موجود در مرجع مذکور برای پیش بینی عمر مفید باقیمانده این سازه ها با استفاده از روابط پیشنهادی استفاده شد. جداول (۲ و ۳) خلاصه مقادیر پارامترهای مورد استفاده برای تعیین  $t_1$  و  $t_2$  مربوط به عمر باقیمانده عرشه بتن مسلح این سازه ها با استفاده از روابط پیشنهادی را نشان می دهد. پس از تعیین عمر باقیمانده سازه های مورد بررسی با استفاده از روابط پیشنهادی و مقادیر پارامترهای جداول (۲ و ۳)، به منظور بررسی درستی نتایج بدست آمده، مقدار عمر باقیمانده این سازه ها به سه روش دیگر شامل استفاده از رابطه تجربی قانون فیک، نرم افزار Life-365 و مدل ارایه شده در مرجع [19] نیز محاسبه شد.

سازه های مورد مطالعه، یک مجموعه اسکله و پل با عرشه دال بتن مسلح در بندر امام خمینی می باشند که در شهرستان ماهشهر واقع شده اند. شکل (۷) یک تصویر ماهواره ای از مجموعه مذکور را نمایش می دهد که به کمک نرم افزار Google Earth تهیه شده است.

برای تعیین مقادیر  $t_1$  و  $t_2$  مربوط به عمر باقیمانده دال های مربوط به عرشه قسمت های مختلف با استفاده از روابط پیشنهادی (روابط ۶ و ۷) نیاز به مقادیر پارامترهای مختلفی می باشد که این پارامترها در بخش ۴ معرفی شد. از آنجایی که مساله خوردگی و تغییر عمر باقیمانده این سازه پیشتر توسط رضانی پور و همکاران مورد بررسی قرار گرفته و مشخصات طرح اختلاط بتن این سازه ها و نیز نتایج آزمایش های مختلف از قبیل تعیین عمق میلگرد، تعیین پروفیل یون کلراید در نقاط مختلف دال های بتنی

جدول ۳. داده‌های مورد استفاده برای تعیین  $t_2$  در مطالعه موردی اول

Jetty code	Parameters							
	C (mm)	D (mm)	$C_t$	$W/C$	T (Kelvin)	RH	$E_c$	$K_{1C}$
A	70.25	18	0.31	0.35	311	60%	30e4	2.07
B	71.5	18	0.46	0.35	311	60%	30e4	2.07
C	74.2	18	1.0876	0.35	311	60%	30e4	2.07
D	59.8	18	0.726	0.35	311	60%	30e4	2.07
E	38.9	18	1.986	0.35	311	60%	30e4	2.07

Table 3. Data used to determine  $t_2$  in the first case study

جدول ۴. مقایسه نتایج عمر مفید باقیمانده مجموعه سازه‌های دریایی خلیج فارس با استفاده از روش‌های مختلف

Jetty code	RUL (years) [17]	RUL (years) [Fick's law]	RUL (years) [Life-365]	RUL (years) [proposed methodology]
A	27	22.36	34.2	28.38
B	29	19.47	30.8	26.88
C	32	33.58	28.3	30.64
D	21	26.1	26.2	25.23
E	10	13.71	11.5	12.62

Table 4. Comparison of life time results of Persian Gulf marine structures obtained from different methods

می‌باشد. ضخامت دال بتنی ۲۰ سانتیمتر، تنش جاری شدن میلگردها و مقاومت فشاری بتن به ترتیب ۳۶۰۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع در نظر گرفته شده است. سایر مشخصات هندسی پل در شکل (۸) نشان داده شده است. در ادامه به شرح مطالعات پارامتریک انجام شده پرداخته می‌شود.

لازم به ذکر است که سه روش مذکور قادر به تخمین بخش  $t_2$  از عمر باقیمانده سازه نبوده و مقدار این ترم در هر سه روش برابر با مقدار ثابت ۶ سال در نظر گرفته شده است. جدول (۴) عمر مفید بدست آمده از روابط پیشنهادی را با نتایج مربوط به سه روش مختلف دیگر مقایسه می‌کند. بررسی اعداد این جدول نشان می‌دهد که نتایج هر چهار روش تقریباً به هم نزدیک است. این مطالعه درستی عملکرد روابط پیشنهادی را برای تخمین عمر مفید باقیمانده دال‌های بتنی تحت خوردگی کلرایدی تایید می‌نماید.

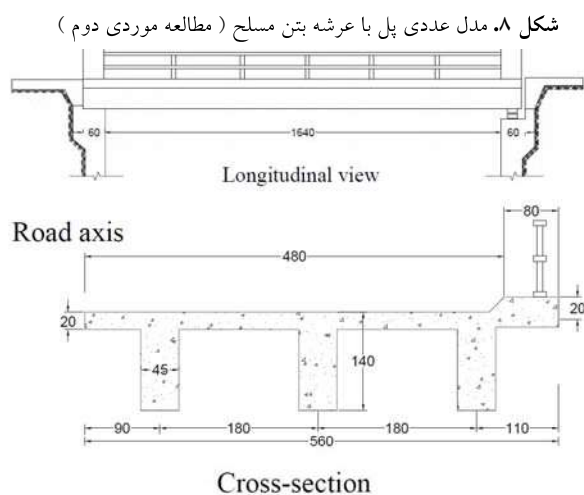


Fig. 8. Numerical model of bridge with reinforced concrete deck (second case study)

۲-۵- مطالعه دوم: بررسی عمر مفید باقیمانده یک مدل عددی هدف از مطالعه دوم، بررسی پارامتریک عمر مفید باقیمانده یک سازه تحت حمله کلرایدی با استفاده از روابط پیشنهادی می‌باشد. برای این منظور یک مدل عددی پل با دال بتن مسلح مطابق با شکل (۸) در نظر گرفته شد. پل مذکور طبق دستورالعمل شماره ۱۱ وزارت راه و ترابری بارگذاری شده و طراحی دال‌های بتنی آن بر اساس مبحث نهم مقررات ملی ساختمان انجام شده است. تعداد شاهتیرهای طولی پل ۶ عدد، فاصله آزاد بین دو پایه کناری پل ۱۶.۴ متر و پهنای آزاد بین دو پیاده روی کناری آن ۹.۶ متر

جدول ۵. عمر باقیمانده مربوط به مرحله انتشار با استفاده از شبکه بیزین در حالات مختلف

Basic Variables	Variable Name	Unit	pessimistic state state (1)	Optimistic state state (2)
Cover depth	$C$	[mm]	0.05	75
Diameter of steel bar	$D$	[mm]	8	25
Chloride content	$C_t$	[wt.%/cement]	0.65	0.204
Water-to-cement ratio	$W/C$	[-]	0.70	0.35
Temperature	$T$	[Kelvin]	333	273
Relative humidity	$RH$	[%]	98	65
Elastic Modulus	$E_c$	[MPa]	80e4	25e4
Cracking fracture toughness	$K_{IC}$	[MPa $\sqrt{m}$ ]	12	2
Time	$t_2$	[years]	$t_{PEES} = 2.73$	$t_{OPT} = 9.116$

Table 5. useful life time of propagation phase using Bayesian network in different states

کوچکتر نسبت به نتایج سایر روش‌های موجود را نشان دهد. کوچکتر بدست آمدن زمان  $t_2$  نشان دهنده بحرانی‌تر بودن وضعیت سازه است. به بیان دیگر سازه مورد مطالعه در زمان کوتاهتری نیاز به بهسازی و یا مقاوم سازی دارد و در صورت نادیده گرفتن این موضوع، امکان آسیب، تخریب و یا وقوع خسارات جبران ناپذیری را به همراه دارد.

#### ۵-۲-۲- بررسی اثر دما بر عمر مفید باقیمانده

در این پژوهش اثر تغییرات دمایی بر عمر مفید باقیمانده سازه پل با عرشه بتن مسلح تحت خوردگی کلرایدی مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۹. نمودار نقطه‌ای ارتباط بین دما و عمر مفید باقیمانده

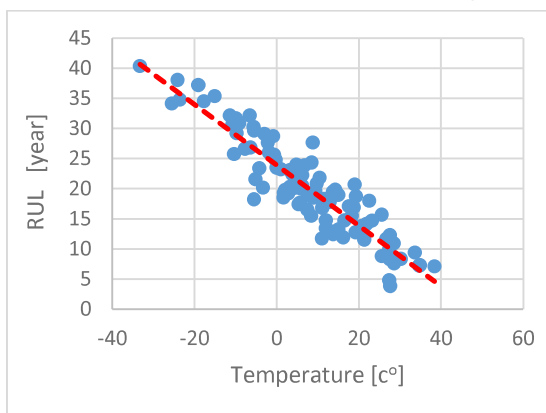


Fig. 9. The relationship between temperature and remaining useful life

#### ۵-۲-۱- محاسبه زمان $t_2$ در دو حالت شرایط خوردگی بدبینانه و خوشبینانه

یکی از مزایای الگوریتم پیشنهادی، امکان محاسبه زمان  $t_2$  با استفاده از داده‌های بدست آمده از بازرسی‌های میدانی سازه مورد مطالعه می‌باشد. این در حالی است که سایر روش‌های موجود مقدار  $t_2$  را عددی ثابت در نظر می‌گیرند. به منظور بررسی اثر مقادیر مختلف پارامترها بر زمان  $t_2$ ، در این بخش دو حالت بدبینانه (شرایط خوردگی شدید) و خوشبینانه (شرایط خوردگی خفیف) برای مدل عددی مورد مطالعه در نظر گرفته شد. به بیان ساده‌تر، مقادیر پارامترهای مربوط به محاسبه  $t_2$  در حالت اول به گونه‌ای انتخاب شد که احتمال خوردگی افزایش یابد (شرایطی مانند ضخامت کم کاور بتنی میلگردها، استفاده از میلگردهای باریکتر، مقدار زیاد کلر اولیه در سیمان و ...). در حالت دوم مقادیر پارامترهای مذکور طوری انتخاب شدند که خوردگی سازه به تاخیر بیفتد. جدول (۵) مقادیر انتخابی برای پارامترهای مربوطه و زمان  $t_2$  بدست آمده را نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود در حالت بدبینانه عمر مفید سازه مربوط به مرحله انتشار کلر ( $t_2$ ) برابر با ۲.۷۳ و در حالت خوشبینانه برابر با ۹.۱۲ سال بدست آمده است. همانطور که پیشتر نیز ذکر شد، بیشتر روش‌ها عدد ۶ سال را برای زمان  $t_2$  در نظر می‌گیرند. نتایج این بخش از تحقیق نشان داد که در نظریه‌گیری دقیق‌تر  $t_2$  باعث می‌شود که با توجه به شرایط و پارامترهای تاثیرگذار خوردگی عرشه پل، عمر مفید باقیمانده عددی بزرگتر و یا

شکل ۱۰. نمودار ارتباط عمر مفید باقیمانده با میزان درصد پوزولان‌ها

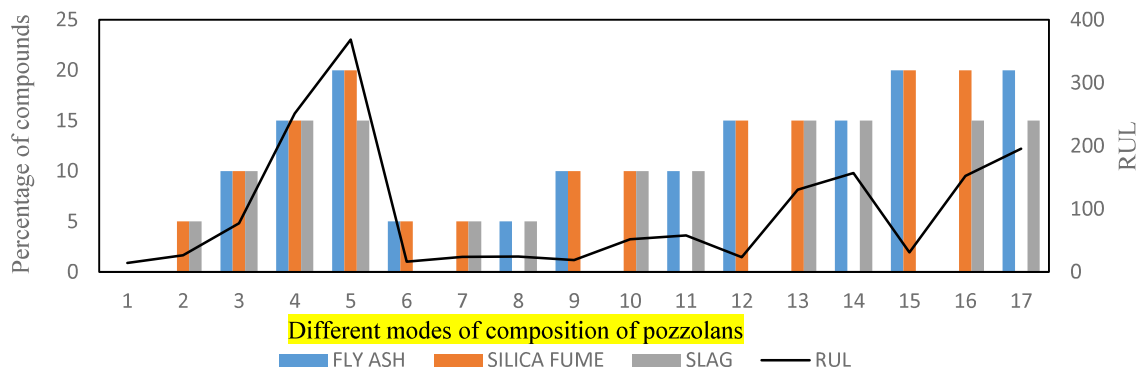


Fig. 10. Relationship diagram of the remaining useful life with the percentage of pozzolans

می‌آید. در صورتی که از ترکیب هم زمان خاکستر بادی، دوده سیلیسی یا میکروسیلیس و سر باره کوره آهن گدازی استفاده شود عمر مفید باقیمانده به طور متوسط ۳۸ درصد افزایش می‌یابد.

- سر باره کوره آهن گدازی به تنهایی بیشترین تاثیر را در افزایش عمر مفید باقیمانده نشان می‌دهد. با حذف سر باره از ترکیبات مواد سیمانی، عمر مفید باقیمانده به حدود ۵۰ سال کاهش می‌یابد و در ترکیب با خاکستر بادی شرایط بهتر می‌شود. بهترین عملکرد زمانی است که هر سه نوع از ترکیبات در بتن وجود داشته باشد. - زمانی که سر باره با خاکستر بادی در ترکیبات بتن اضافه شود نسبت به حالت ترکیب سر باره با سلیکا فوم، عمر مفید ۲۲ درصد افزایش می‌یابد.

- درصدهای بهینه ترکیب شامل، ۲۰ درصد برای هر کدام از پوزولان‌ها (خاکستر بادی، دوده سیلیسی یا میکروسیلیس) و ۱۵ درصد برای سر باره کوره آهن گدازی با رعایت سایر پارامترهای منطبق با آیین‌نامه‌ها، عمر مفید باقیمانده را در حدود ۳۰۰ سال نشان می‌دهد.

- به منظور بررسی بیشتر، عمر مفید باقیمانده در حالتی که افزودنی‌ها با درصدهای مختلف وارد فرمول شدند از عمر مفید باقیمانده در حالات مختلف میانگین‌گیری شد. میانگین عمر مفید بدست آمده نسبت به حالتی که هیچ پوزولانی در بتن استفاده نشود افزایش عمر ۳۸ درصدی را نشان داد.

بطور کلی از این بخش از تحقیق می‌توان نتیجه گرفت که وجود پوزولان‌ها در بتن عامل موثری در افزایش عمر مفید باقیمانده آن در شرایط حمله کلرایدی می‌باشد.

با استفاده از روابط پیشنهادی، با ثابت نگه داشتن پارامترها و ۱۰۰ بار تغییر میانگین دما، عمر مفید باقیمانده در حالات مختلف محاسبه شد. شکل (۹) نتیجه این بررسی را نشان می‌دهد. همانطور که از این شکل به وضوح ملاحظه می‌شود، بین دما و عمر باقیمانده رابطه عکس وجود دارد و با افزایش میانگین دما عمر باقیمانده کاهش می‌یابد.

#### ۲-۳-۵- بررسی اثر وجود ترکیبات پوزولانی در بتن

ترکیبات پوزولانی بکار رفته در ساخت بتن یکی دیگر از عوامل موثر بر طول عمر مفید سازه در شرایط زوال ناشی از حملات کلرایدی است. در این بخش به بررسی اثر غلظت پوزولان‌ها در ساخت بتن بر محاسبات عمر مفید باقیمانده پرداخته شده است. برای این منظور با ثابت در نظر گرفتن سایر پارامترها، عمر مفید باقیمانده مدل عددی به ازای ۱۷ حالت از غلظت‌های مختلف پوزولان‌ها (شامل خاکستر بادی (F.ASH)، دوده سیلیسی یا میکروسیلیس (SILICA.F) و سر باره کوره آهن گدازی (SLAG)) محاسبه شد. نتایج این بررسی در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.

در شکل ۱۰، هر نمودار ۳ ستونی، نشان دهنده میزان غلظت ترکیبات پوزولانی در یکی از حالات مختلف ساخت بتن می‌باشد. همچنین به ازای هر ترکیب پوزولانی عمر مفید باقیمانده محاسبه شد که نتیجه به صورت یک نمودار مشکی رنگ در شکل (۱۰) ترسیم شده است. با بررسی دقیق این نمودارها نتایج زیر حاصل می‌شود:

- زمانی که در ترکیبات سیمان از پوزولان‌ها و سر باره کوره آهن گدازی استفاده می‌شود، بیشترین عمر مفید باقیمانده به دست

علاوه بر این شکل‌های (۱۱ تا ۱۴) نتایج بدست آمده از آموزش شبکه بیزین به ازای تعداد داده‌های مختلف را با داده‌های بدست آمده از نرم‌افزار life-365 مقایسه می‌کنند. نمودارها (۱۱ و ۱۳) نتایج عمر مقایسه‌ای بین پایگاه داده تولید شده و عمر بدست آمده از شبکه بیزین آموزش یافته را نشان می‌دهند. هر نقطه روی محور افقی نشان دهنده یک بسته داده با ده پارامتر مختلف می‌باشد. همچنین نمودارهای (۱۲ و ۱۴) نتایج پیش‌بینی در برابر نتایج واقعی را در کنار خط  $y=x$  نشان می‌دهند. همانطور که مشاهده می‌شود، در حالت استفاده از ۳۰۰۰ داده هماهنگی بیشتری بین داده‌های موجود در پایگاه داده و نتایج شبکه بیزین پیشنهادی وجود دارد.

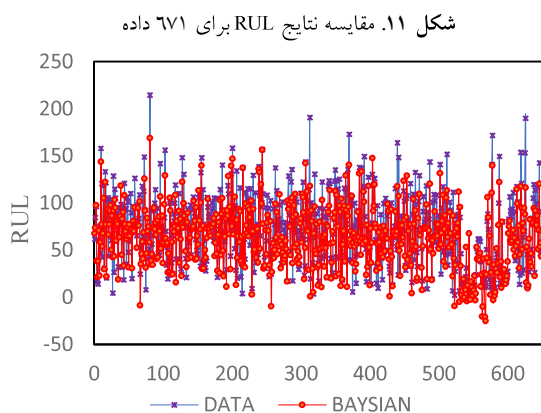


Fig. 11. Comparison of RUL results for 671 data

شکل ۱۲. نمودار پیش‌بینی در برابر نتایج واقعی برای ۶۷۱ داده

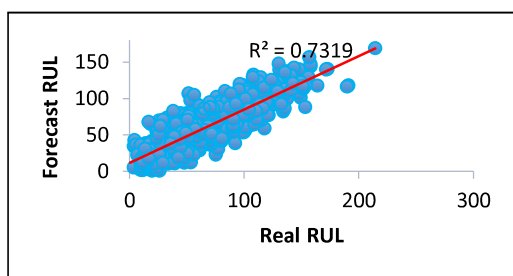


Fig. 12. Plot of predicted versus actual results for 671 data

#### ۵-۲-۴- بررسی اثر تعداد داده‌ها بر دقت محاسبات

همانطور که در بخش ۴ اشاره شد، به منظور آموزش شبکه بیزین و استخراج روابط عمر مفید باقیمانده، ابتدا تعدادی داده به صورت دستی ایجاد و سپس این داده‌ها به کمک نرم افزار جنای افزایش داده شدند. از آنجایی که تعداد داده‌های مورد استفاده در آموزش یک شبکه بیزین تاثیر زیادی بر دقت نتایج آن دارد، در این بخش به بررسی و مطالعه اثر تعداد داده‌ها بر کیفیت آموزش شبکه بیزین پرداخته شد. برای بررسی کیفیت آموزش شبکه بیزین، از شاخص‌های آماری مختلفی در این پژوهش استفاده شد که یکی از آنها شاخص خطای RMSE است. این شاخص تحت عنوان رابطه ۵ تعریف شد. بقیه شاخص‌های آماری مورد استفاده برای تخمین خطای آموزش شبکه در جدول شماره (۶) نمایش داده شده‌اند.

جدول ۶. شاخص‌های تخمین خطای آموزش به ازای تعداد مختلف داده‌های آموزشی

		n=671	n=3000
$AMAD = \frac{\sum_{t=1}^n  A_t - F_t }{n}$	MAD	16.777	6.231
$MSE = \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}$	MSE	442.790	54.158
$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{n}}$	RMSE	21.043	7.359
$MAPE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{ A_t - F_t }{A_t}}{n} \times 100$	MAPE	39.655	60.636
$corr$	R(xy)	0.86	1.00
$NS=1 - \frac{\sum_{t=1}^n (A_t - F_t)^2}{\sum_{t=1}^n (A_t - \bar{A})^2}$	NS	0.695	0.976
$MAE = \sum A_t - F_t$	MAE	7.29	6.09
$R^2$	R <sup>2</sup>	0.73	0.99
$(A_t - F_t)^2$	SSE	296669.29	162474.99

Table 6. error estimation indices values for different number of training data

پارامتر بکاررفته برای محاسبه این فرمول‌ها، بیشتر در توضیحات رابطه ۵ تشریح شده‌اند. جدول (۶) مقدار شاخص‌های خطا را برای آموزش شبکه بیزین  $t_1$  در دو حالت استفاده از تعداد ۶۷۱ و ۳۰۰۰ داده نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج موجود در جدول (۶) می‌توان ملاحظه نمود، با افزایش داده‌ها، مقدار شاخص‌های خطای ناشی از آموزش شبکه بیزین بطور چشمگیری کاهش می‌یابد.

شکل ۱۳. مقایسه نتایج RUL برای ۳۰۰۰ داده

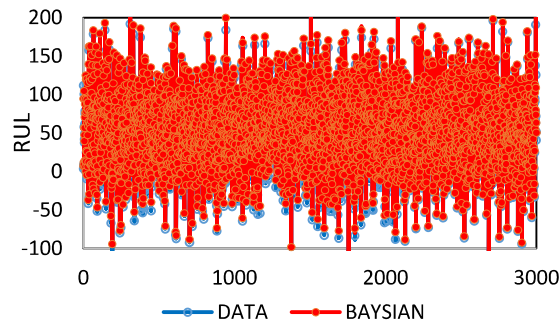


Fig. 13. Comparison of RUL results for 3000

شکل ۱۴. نمودار پیش‌بینی در برابر نتایج واقعی برای ۳۰۰۰ داده

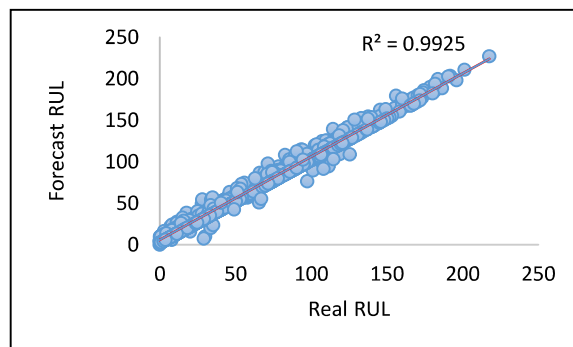


Fig. 14. Plot of predicted versus actual results for 3000 data

روابطی را بر حسب عوامل موثر بر عمر مفید باقیمانده در یک پروژه خاص به دست آورد. در این شبکه‌ها می‌توان اثر عوامل مختلف را لحاظ کرد که از مزایای روش پیشنهادی محسوب می‌شود.

۲- براساس شبکه بیزین تهیه شده و فرمول به دست آمده در این پژوهش، عمر مفید باقیمانده مربوط به مرحله انتشار کلراید در بتن، قابل محاسبه است که در بهترین شرایط ۹/۱۱۶ سال و در بدترین شرایط ۲/۷۳ سال تخمین زده شد. این در حالی است که عدد پیشنهادی کمیته ACI365، برای مرحله انتشار برابر ۶ سال است.

۳- عمر مفید باقیمانده با دما رابطه عکس دارد. زمانی که متوسط دمای محیط ۲۰ درجه افزایش یابد، عمر مفید باقیمانده به طور متوسط ۳۰ درصد کاهش می‌یابد.

۴- به کمک روابط پیشنهادی، مطالعه پارامتری برای بررسی اثر حالات مختلف استفاده از ترکیبات پوزولانی بر عمر باقیمانده سازه انجام شد. در این راستا ۱۷ حالت از ترکیبات مختلف پوزولانی با غلظت‌های مختلف در نظر گرفته شد و میانگین عمر مفید باقیمانده ناشی از حالت مختلف محاسبه شد. میانگین عمر بدست آمده نسبت به حالتی که هیچ پوزولانی در بتن استفاده نشود افزایش عمر ۳۸ درصدی را نشان داد.

۵- در ترکیبات مختلف پوزولان‌ها، سرباره کوره آهن‌گدازی به تنهایی بیشترین تاثیر را در افزایش عمر مفید باقیمانده نشان می‌دهد. با حذف سرباره از ترکیبات مواد سیمانی، عمر مفید باقیمانده به حدود ۵۰ سال کاهش می‌یابد و در ترکیب آن با خاکستر بادی شرایط بهتر می‌شود. بهترین عملکرد زمانی است که هر سه نوع از ترکیبات پوزولان (خاکستر بادی، دوده سیلیسی یا میکروسیلیس و سرباره کوره آهن‌گدازی) در بتن وجود داشته باشد.

۶- زمانی که سرباره کوره آهن‌گدازی با خاکستر بادی در ترکیبات بتن اضافه شود نسبت به حالت ترکیب سرباره با سلیکا فوم، عمر مفید ۲۲ درصد افزایش می‌یابد. درصدهای بهینه ترکیب شامل، ۲۰ درصد برای هر کدام از پوزولان‌ها (خاکستر بادی، دوده سیلیسی یا میکروسیلیس) و ۱۵ درصد برای سرباره کوره آهن‌گدازی می‌باشد.

## ۶- خلاصه و نتیجه‌گیری

در این مقاله، مساله تعیین عمر مفید باقیمانده پل‌های با عرشه بتنی تحت خوردگی کلرایدی مورد مطالعه قرار گرفت. در این راستا روابطی برای پیش‌بینی عمر باقیمانده این سازه‌ها با استفاده از شبکه بیزین ارائه شد. ویژگی روابط پیشنهادی آن است که به کمک آنها می‌توان عمر مفید باقیمانده سازه را با اتکاء بر داده‌های بدست آمده از بازرسی‌های میدانی سازه مورد نظر بدست آورد. روابط ارائه شده با یک مدل واقعی و یک مدل عددی مورد بررسی و درستی‌آزمایی قرار گرفتند. خلاصه نتایج بدست آمده در این تحقیق را به شرح زیر می‌توان بیان نمود:

۱- بر اساس روش پیشنهادی با استفاده از شبکه بیزین می‌توان برای هر یک از دو بخش عمر مفید باقیمانده سازه تحت خوردگی کلرایدی، یعنی مرحله آغاز خوردگی و مرحله انتشار کلراید،

*International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020 Mar; 107:2843-63.

[9] Xia T, Dong Y, Xiao L, Du S, Pan E, Xi L. Recent advances in prognostics and health management for advanced manufacturing paradigms. *Reliability Engineering & System Safety*. 2018 Oct 1; 178:255-68.

[10] Cai B, Shao X, Liu Y, Kong X, Wang H, Xu H, Ge W. Remaining useful life estimation of structure systems under the influence of multiple causes: Subsea pipelines as a case study. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2019 Aug 5;67(7):5737-47.

[11] Chun P.J., Inoue T., Seto D., Ohga M. Prediction of Bridge Deterioration Using GIS-Based Markov Transition Matrix, *Internet Journal of Society for Social Management Systems*. 2012; 8: 1-9.

[12] Morcoux G, Lounis Z, Cho Y. An integrated system for bridge management using probabilistic and mechanistic deterioration models: Application to bridge decks. *KSCCE Journal of Civil Engineering*. 2010 Jul; 14:527-37.

[13] Ranjith S, Setunge S, Gravina R, Venkatesan S. Deterioration prediction of timber bridge elements using the Markov chain. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. 2013 Jun 1;27(3):319-25.

[14] Kosgodagan A. High-dimensional dependence modelling using Bayesian networks for the degradation of civil infrastructures and other applications (Doctoral dissertation, University of Bretagne Loire, Bretagne). 2017.

[15] Kosgodagan-Dalla Torre A, Yeung TG, Morales-Nápoles O, Castanier B, Maljaars J, Courage W. A two-dimension dynamic Bayesian network for large-scale degradation modeling with an application to a bridges network. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*. 2017 Aug;32(8):641-56

[16] Srikanth I, Arockiasamy M. Deterioration models for prediction of remaining useful life of timber and concrete bridges: A review. *Journal of traffic and transportation engineering (English edition)*. 2020 Apr 1;7(2):152-73.

[17] Abbasnezhad, K. and Ansari, R. Bayesian networks, a new approach for modeling uncertainties in construction project management. *Journal of Engineering and Construction Management*, Volume 5, Number 1, Spring 2019.

(In Persian)

[18] Eliasi, M., Seifi, H. and Haghifam, M., Modeling and evaluation of hybrid power system reliability and reliability-based analysis using Bayesian networks, *Iranian Journal of Electrical Engineering and Computer Engineering* (series 35), fall 2013, number 2. (In Persian)

[19] Ramezani-pour A.A., Jahangiri E., Moodi F., Ahmadi B. Assessment of the Service Life Design Model Proposed by fib for the Persian Gulf Region. *Journal of Oceanography*. 2014 Apr 15;5(17):101-112.

۷- در این پژوهش از حل معادله دیفرانسیل مربوط به قانون فایک برای ایجاد پایگاه داده برای آموزش شبکه عصبی مربوط به بخش اول عمر باقیمانده استفاده شد. از آنجایی که در رابطه مذکور، رطوبت محیط در نظر گرفته نشده است امکان تهیه پایگاه داده شامل رطوبت محیط وجود نداشت. این موضوع ظرفیت پژوهشی بیشتر در این زمینه را نشان می‌دهد.

## تشکر و قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی طبق ابلاغ گرنت شماره ۴۹۴۹ مورخ ۱۴۰۲/۰۶/۰۳ انجام شده است.

## مراجع

[1] Seyed Hosseini S.M., Baharshahi M., Shahanqi K. presenting a data-driven model for estimating the remaining useful life using the combination of turbofan sensor data, *Journal of Industrial Engineering Research in Production Systems*, 2018, serial 15. (In Persian)

[2] Ali JB, Chebel-Morello B, Saidi L, Malinowski S, Fnaiech F. Accurate bearing remaining useful life prediction based on Weibull distribution and artificial neural network. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2015 May 1; 56:150-72.

[3] Kunche S, Chen C, Pecht M. A review of PHM system's architectural frameworks. In The 54th meeting of the society for machinery failure prevention technology, dayton, oh 2012.

[4] Lei Y, Li N, Guo L, Li N, Yan T, Lin J. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical systems and signal processing*. 2018 May 1; 104:799-834.

[5] Lei Y, Li N, Guo L, Li N, Yan T, Lin J. Machinery health prognostics: A systematic review from data acquisition to RUL prediction. *Mechanical systems and signal processing*. 2018 May 1; 104:799-834.

[6] Abichou B, Flórez D, Sayed-Mouchaweh M, Toubakh H, François B, Girard N. Fault diagnosis methods for wind turbines health monitoring: a review. In PHM Society European Conference 2014 (Vol. 2, No. 1).

[7] Si XS, Wang W, Hu CH, Zhou DH. Remaining useful life estimation—a review on the statistical data driven approaches. *European journal of operational research*. 2011 Aug 16;213(1):1-4.

[8] Baur M, Albertelli P, Monno M. A review of prognostics and health management of machine tools. *The*

[21] Neapolitan, R. E. (2004). *Learning Bayesian networks* (Vol. 38). Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.

[22] Lun PY, Zhang XG, Jiang C, Ma YF, Fu L. Modelling of corrosion-induced concrete cover cracking due to chloride attacking. *Materials*. 2021 Mar 16;14(6):1440.

[20] Ramzaniapour Ali Akbar, Jahangiri Ehsan, Modi Faramarz, Ahmadi Babak. Evaluation of service life estimation models for reinforced concrete structures in the marine environment of the Persian Gulf. 1389. The second national concrete conference of Iran. (In Persian)



## Using the Bayesian network to predict the remaining useful life of the reinforced concrete decks Under chloride corrosion

A. Mehdizadeh Lima<sup>1</sup>, M. Mahmoudi<sup>2\*</sup>, A. Zayeri Baghlani Nejad<sup>3</sup>

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University

2-Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University

3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology.

\*m.mahmoudi@sru.ac.ir

**Abstract:**

Structures, including concrete bridges, may be exposed to gradual damage during operation due to environmental conditions such as corrosion, which will reduce their useful life. Knowing the amount of remaining useful life of the structures makes it possible to improve, strengthen or rebuild them at the right time. To determine the remaining useful life of a structure, there are three common methods under the titles of data-driven method, failure physics method and combined method. In this article, the combined method of determining the remaining useful life of structures has been studied. The purpose of this research is to propose a suitable method for predicting the remaining useful life of a bridge structure with a reinforced concrete deck under chloride ion corrosion using a Bayesian network. The remaining useful life of reinforced concrete parts under chloride attack includes two parts of the time related to the initial stage of corrosion and the time related to the release of chlorine ions. To determine the remaining useful life part related to the initial stage, various researches have been done and the American ACI365 committee has proposed a software called Life-365 for this purpose. There is no comprehensive research to determine the second part of the remaining life, which is related to the release stage. Based on the prepared Bayesian network and the formula obtained in this research, the remaining life of the chloride diffusion stage in concrete was estimated to be 9.116 years in the best conditions and 2.73 years in the worst conditions. Meanwhile, the number suggested by the ACI365 committee, in practical work, is usually equal to 6 years for the release stage. This issue clarifies the need for more research in this regard. In this article, using the data available in past researches and reproducing the data and using the Bayesian network, relationships are presented to determine the useful life of the bridge structure in both the initial and release stages. Based on the proposed method, using the Bayesian network, relationships can be obtained for each of the two parts of the remaining useful life of the structure under chloride corrosion, i.e., the corrosion initiation stage and the chloride release stage, in terms of factors affecting the remaining useful life in a specific project. In these networks, the effect of various factors can be considered, which is one of the advantages of the proposed method. The remaining useful life has an inverse relationship with temperature. When the average temperature increases by 20 degrees, the remaining useful life decreases by an average of 30%. With the help of the proposed relationships, a parametric study was conducted to investigate the effect of different conditions of using pozzolanic compounds on the remaining life of the structure. In this regard, 17 states of different pozzolanic compounds with different concentrations were considered and the average remaining useful life due to different states was calculated. The average life obtained compared to the case where no pozzolan is used in concrete showed a 38% increase in life. In order to evaluate the results of the proposed relationships, the problem of determining the remaining useful life for a numerical model of a concrete bridge and several marine structures located in the Persian Gulf was investigated. The results of this research show that by using the proposed relationships, it is possible to improve the accuracy of estimating the remaining useful life of bridges with concrete decks exposed to chloride ion penetration, relying on the data obtained from the field inspections of the structure.

**Keywords:** Concrete bridge deck, chloride ion, residual useful life, data-driven method, Bayesian network.