Journal of Structural and Construction Engineering, 11(12), 2025, pp. 145-163

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

Prediction of remaining service life of bridges exposed to carbonate corrosion using Bayesian network

Abbas Mehdizadeh Lima[1], Mussa Mahmoudi [2]*, Amir Zayeri Baghlani Nejad[3]

1- Ph.D. Candidate, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Shahid Rajaee Teacher Training University, Tehran, Iran
3- Assistant Professor, Faculty of Civil Engineering, Jundi-Shapur University of Technology, Dezful, Iran

ABSTRACT

The durability of reinforced concrete bridges can be compromised by environmental factors, with carbonation being a pivotal contributor to their degradation. Carbonation-induced corrosion, particularly in severe weather conditions, critically undermines the structural integrity of bridges. This phenomenon, characterized by the reaction of atmospheric CO_2 with the alkaline components of concrete, precipitates a reduction in pH from above 13 to below 9, thereby compromising the protective layer encasing the steel reinforcement. Assessing the residual service life of such structures is essential for timely maintenance, reinforcement, or reconstruction. This study explores a hybrid approach to estimate the remaining useful life of reinforced concrete bridges affected by carbonation corrosion. We propose a novel predictive model utilizing Bayesian networks, informed by the principles of failure physics and structural reliability. An algorithm was developed to generate a database for Bayesian network application, which also facilitated the establishment of a correlation to ascertain the bridge's lifespan. The efficacy of the proposed model was validated through a case study on an existing bridge, demonstrating congruence with prior research and underscoring its potential as a reliable predictive tool for infrastructure longevity.

ARTICLE INFO

Receive Date: 05 April 2024
Revise Date: 30 June 2024
Accept Date: 24 July 2024

Keywords:
Concrete bridge
Carbonation
Remaining useful life
Data-oriented method
Bayesian network

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2024.450160.3379

*Corresponding author: Mussa Mahmoudi
Email address: m.mahmoudi@sru.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی – پژوهشی)
www.jsce.ir

پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده پل های بتنی مسلح تحت خوردگی کربناته با استفاده از شبکه بیزین

عباس مهدی زاده لیما[1]، موسی محمودی صاحبی[2*]، امیر زایری بغلانی نژاد[3]

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

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

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

چکیده

عمرمفید پل های بتن مسلح تحت شرایط محیطی کاهش می یابد. از جمله عوامل تخریب بتن مسلح کربناسیون است. با توجه به اینکه در پل ها پتانسیل بیشتری برای خوردگی وجود دارد خوردگی کربناته برای این زیر ساخت های مهم در شرایط سخت جوی می تواند پایداری سازه را به خطر بیندارد. کربناته شدن بتن به عنوان نمونه واکنش قلیایی در منافذ موئینه با co_2 موجود در هوا منجر به کاهش مقدار ph از بیش از 13 به مقدار کمتر از 9 می شود و این امر باعث شکسته شدن لایه تاثیر پذیر در اطراف میلگرد می شود. اطلاع از میزان عمر مفید باقیمانده سازه‌ها باعث می‌شود تا در زمان مناسب نسبت به بهسازی، مقاوم سازی و یا بازسازی آنها اقدام گردد. 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 پیش بینی عمر مفید باقیمانده سازه پل بتن مسلح تحت خوردگی ناشی از کربناته شدن با استفاده از شبکه بیزین است. در این راستا با استفاده از فرمول های روش فیزیک خرابی بر مبنای قابلیت اعتماد سازه الگوریتمی ارائه شد که با استفاده از آن می توان یک پایگاه داده جهت آموزش شبکه بیزین تولید نمود. همچنین با استفاده از شبکه بیزین آموزش یافته، رابطه ای برای تعیین عمر مفید سازه پل‌های در معرض خوردگی کربناته ارائه گردید. برای راستی آزمایی رابطه پیشنهادی، مطالعه موردی در خصوص یک سازه پل واقعی انجام شد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که روش پیشنهادی انطباق خوبی با نتایج بدست آمده از پژوهش‌های پیشین دارد. نرخ کربناسیون بیشترین تاثیر را در عمر مفید باقیمانده دارد زمانی که این نرخ به کمتر از $2\,mm/\sqrt{year}$ می رسد بیشترین عمر بدست می آید. برای دست یابی به عمر بالای 65 سال، نرخ زیر $4mm/\sqrt{year}$ مورد نیاز می باشد. عمر مفید با شاخص قابلیت اطمینان 1، 1/5 و 2 مورد بررسی قرار گرفت. با تغییر شاخص از یک به یک و نیم، عمر مفید باقیمانده به طور متوسط 33٪ کاهش می یابد. در بررسی عدی پل مورد مطالعه در این پژوهش، عمر مفید ناشی از کربناسیون در ناحیه سالم 153 سال محاسبه گردید و این در حالی است که در شرایط یکسان محیطی، این عمر در ناحیه ترک خورده به 48 سال کاهش را نشان میدهد.

کلمات کلیدی: پل بتنی،کربناسیون، عمر مفید باقیمانده، روش داده محور، شبکه بیزین

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/jsce.2024.450160.3379
1403/01/17	1403/04/10	1403/05/03	1403/12/30	1403/12/30	doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2024.450160.3379

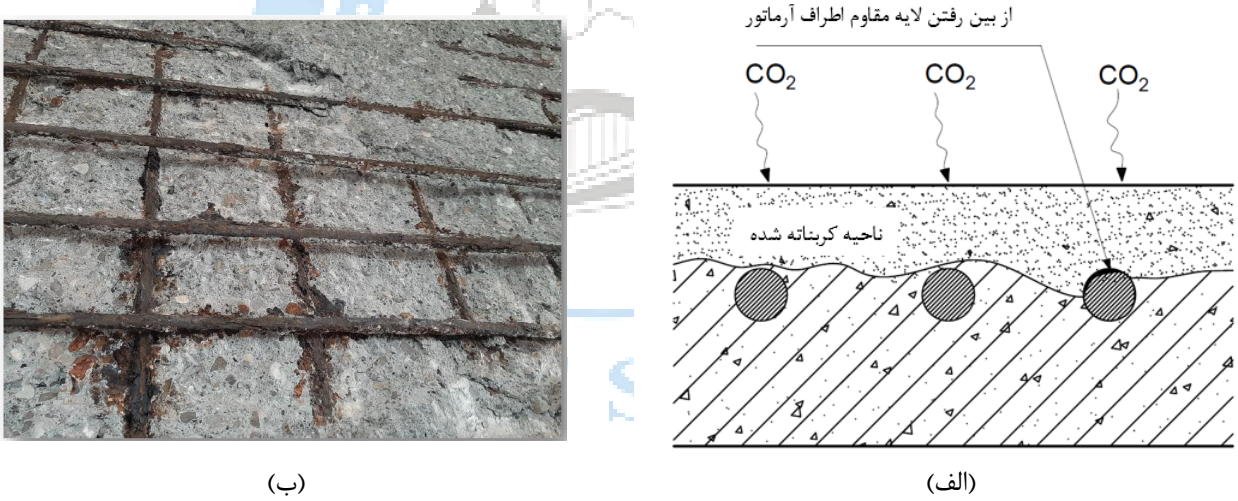
*نویسنده مسئول: موسی محمودی صاحبی

پست الکترونیکی: m.mahmoudi@sru.ac.ir

1- مقدمه

یکی از رویکردهای مدیریت سلامت سازه‌ها، امکان تعیین وضعیت زوال سیستم و تخمین عمر مفید باقیماندی 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 ویا بازسازی را فراهم آورند. یکی از معضلات پلها، خوردگی و زوال ناشی ازکربناسیون در آنها می‌باشد.

وضعیت فعلی دانش در مورد کربناسیون بتن ثابت کرده است که این پدیده یکی از عوامل کلیدی موثر بر کاهش دوام بتن مسلح در طول دوره بهره برداری است [6]. افزایش غلظت دی اکسید کربن اتمسفر (CO_2) در اثر گرم شدن کره زمین تأثیر مستقیمی بر کربناته شدن سازه های بتنی دارد[7]. کربناته شدن می تواند قلیایی بودن بتن را کاهش دهد و در نتیجه باعث از بین رفتن بتن محافظ میلگرد شود [8]. فرایند کربناسیون از دی اکسید کربن موجود در هوا ناشی می شود که مقدار ph را به کمتر از 9 می رساند که باعث از بین رفتن لایه محافظ مطابق شکل (1-الف) می‌شود. این فرایند در نهایت میتواند باعث زایل شدن لایه محافظ در همه جا شود. تصویر (1-ب) خوردگی کربناته شدن در یک پروژه واقعی را نشان می‌دهد. کربناته شدن بتن یک موضوع بسیار نگران کننده در زمینه دوام سازه های بتن مسلح بوده است[9]. با توجه به این تهدید، اطلاع از عمر مفید باقیمانده سازه حائز اهمیت می باشد. لذا در این مقاله مساله تعیین عمر مفید باقیمانده پلهای بتنی تحت کربناسیون بتن مورد توجه قرار گرفته است.



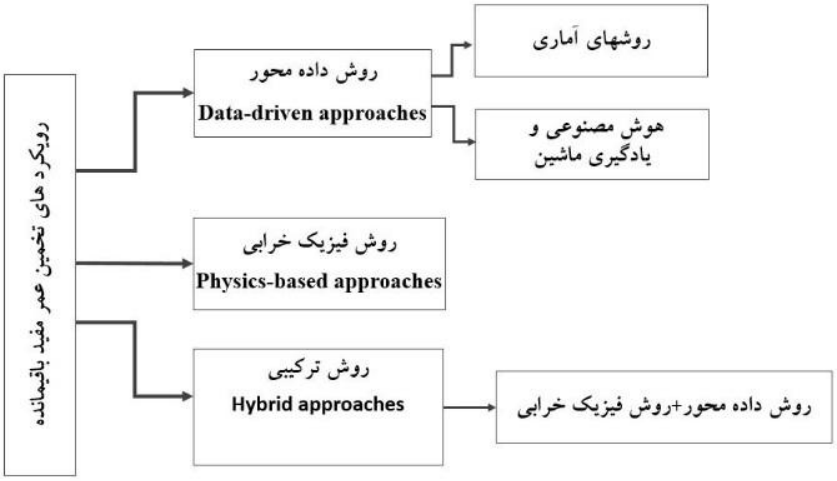
(ب) (الف)

شکل 1: الف) نمایی از ساز و کار خوردگی کربناته، ب) نمونه‌ای واقعی از خوردگی کربناسیون

مرور ادبیات فنی نشان می‌دهد که رویکردهای تخمین عمر مفید باقیمانده (RUL)[1] به سه روش داده محور، فیزیک خرابی و روش ترکیبی تقسیم بندی می‌شوند [10-11]. روش فیزیک خرابی با استفاده از یک رابطه یا فرمول و با در نظرگیری معیار حدی، مبنای تخمین عمر مفید باقیمانده 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 جهت محاسبه و تخمین عمر مفید باقیمانده وجود دارد: 1- تعیین یک شاخص سلامت که نمایانگر وضعیت زوال سیستم باشد. 2- 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[12-13]. به بیان دیگر، در روش ترکیبی از تکنیکهای آماری و یا هوش مصنوعی مورد استفاده در روش داده محور بهره گرفته

[1] Remaining Useful Life

می‌شود و پایگاه داده مورد استفاده در این تکنیکها به کمک روش فیزیک خرابی تامین می‌گردد. شکل2 رویکردهای مختلف تخمین عمرمفید باقیمانده سازه‌ها را نشان می‌دهد[14].



شکل2: رویکردهای تخمین عمر مفید باقیمانده[14]

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 ویا ترکیبی) نیز مورد توجه محققین قرار گرفته است. چون و همکاران روند زوال پل با استفاده از مدل مبتنی بر زنجیره مارکوف را مورد مطالعه قرار دادند [15]. مارکوس و همکاران سیستم یکپارچه‌ای را برای مدیریت پل با استفاده از مدلهای خرابی احتمالی برای عرشه پل ارائه کردند[16]. رنجیت و همکاران با استفاده از داده‌های به دست آمده از شرکت Roads Corporation در استرالیا، مدل مبتنی برزنجیره مارکوف تصادفی را برای پیشبینی وضعیت عناصر پل چوبی ارائه نمودند[17]. کاسگوداگان[18]، و همچنین توره و همکاران [19] در پژوهش‌های جداگانه روشهایی را برای پیشبینی مدل زوال پل‌ها با استفاده از شبکه بیزین پیشنهاد کردند. اخیرا ایشواریا سریکانت و همکاران روشی داده محور برای تخمین عمر باقیمانده پل‌های آمریکا براساس معیارهای پذیرش پل معرفی کردند [20]. در روش این محققین، مدل زوال پل مبتنی بر شبکه عصبی مصنوعی[۲] 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 تعمیم برای پیشبینی عمر مفید باقیمانده پل‌های دیگر کشورها نیست. به بیان دیگر، علیرغم اینکه روش پیشنهادی توسط محققین مذکور از مزایای روش داده محور بهره می‌گیرد، ولی عدم وجود یک پایگاه داده کمی برای آموزش شبکه عصبی جهت تعیین عمر مفید پل‌ها در کشورهای مختلف، یک نقطه ضعف مهم این روش به شمار می‌رود. این پژوهش با هدف برداشتن گامی در جهت رفع برخی کاستی‌های موجود در زمینه تعیین عمر مفید سازه‌های بتنی تحت خوردگی ناشی از کربناسیون انجام شده است. در این راستا یک روش ترکیبی مبتنی بر شبکه‌های بیزین جهت تعیین عمر مفید باقیمانده عرشه پل‌ها پیشنهاد می‌شود. همچنین به منظور ایجاد پایگاه داده مناسب جهت آموزش شبکه، راهکار مناسبی ارائه خواهد شد. در روش پیشنهادی تخمین عمر باقیمانده سازه‌ها به کمک شبکه بیزین، پایگاه داده مورد نیاز بر مبنای روش فیزیک خرابی استخراج می گردد، به همین دلیل روش پیشنهادی در دسته روش‌های ترکیبی قرار می‌گیرد.

روش تهیه پایگاه داده مناسب جهت آموزش شبکه بیزین به عنوان نو آوری این پژوهش می باشد. روش های داده محور در قبال مزایای فراوان نیازمند به یک پایگاه داده مناسب می باشند. به عبارتی نقص مدل های یادگیری ماشین این است که به داده های زیادی به

[2] ANN

عنوان نمونه های آموزشی نیاز دارد. در پژوهش حاضر، راه کار پیشنهادی تهیه پایگاه داده به صورت الگوریتم جهت آموزش شبکه بیزین ارایه شده است. ابتدا رابطه خرابی ازبسط روابط فیزیک خرابی استخراج شده است که در آن مقدار شاخص قابلیت اطمینان از نشریه 511 بدست می آید. و الگوریتم حل آن مطابق با فلوچارتی که در ادامه ارایه می گردد جهت تهیه پایگاه داده ارائه شده و با استفاده از برنامه متلب پایگاه داده بدست آمده است. حسن این برنامه این است که داده های زیادی میتوان از طریق تنظیمات ورودی برنامه بدست آورد. این الگوریتم از روش ترکیبی استفاده کرده و مزایای روش فیزیک خرابی و روش داده محور را به طور همزمان اغنا می کند. همچنین برای اولین بار با تکیه بر تئوری شبکه‌های عصبی بیزین فرمولی برای تعیین عمر باقیمانده ناشی از کربناسیون بر اساس پارامترهای تاثیرگذار بر آن ارائه شده است.

در ادامه مقاله ابتدا مرور سریعی بر تئوری خوردگی اجزای بتن مسلح تحت حمله کربناسیون و محاسبه عمر مفید باقیمانده در این سازه‌ها انجام خواهد شد. سپس مدل پیشنهادی معرفی و نتایج بدست آمده از آن صحت‌سنجی می‌گردند. در انتها به جمع‌بندی یافته‌های تحقیق پرداخته می‌شود.

2- مدل ریاضی خوردگی ناشی از کربناسیون

از آنجایی که موضوع مقاله حاضر برآورد عمر مفید باقیمانده سازه پل بتنی تحت خوردگی حاصل کربناسیون است، در این بخش به مرور مدل ریاضی مربوطه پرداخته می‌شود. میزان عمق بتن کربناته شده در زمان t از رابطه زیر محاسبه می شود [21-22]:

$$x_{co}(t) = k_{co}\sqrt{t} \quad (1)$$

در این رابطه، $x_{co}(t)$ عمق کربناته شده بر حسب میلی متر، k_{co} نرخ کربناسیون بر حسب $mm/\sqrt{year}$ و t زمان برحسب سال است. عمق کربناته شده می‌تواند به روش‌های گوناگونی از قبیل آزمون شناساگر فنل فتالئین، آزمون پراش پرتو x، پرتو سنجی فروسرخ، بازبینی تشخیص گرماسنجی، تجزیه و تحلیل شیمیایی تعیین شود [23]. k_{co} ضریب تاثیر انتشار co_2 در بتن بوده که به دما و رطوبت نیز وابسته است و این وابستگی را می توان به عنوان پیشنهاد پژوهشی مجزا بررسی کرد. در یک سازه بتنی با عمر t و بدست آوردن عمق کربناسیون طبق روشهای فوق در زمان t، k_{co} بر اساس فرمول شماره 1 قابل محاسبه است.

3- تعیین عمر مفید باقیمانده بر مبنای تئوری قابلیت اطمینان

قابلیت اعتماد یک سازه، بصورت یک منهای احتمال شکست سازه (P_f) تعریف می‌شود [24]:

$$\mathrm{Re}liability = 1 - p_f \quad (2)$$

شکست سازه زمانی رخ می‌دهد که تقاضای سازه (S) بیشتر از ظرفیت آن (R) باشد. در تئوری قابلیت اعتماد، S و R بصورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. با فرض استقلال S و R و درنظر گرفتن توزیع نرمال برای هر دو متغیر، احتمال شکست P_f از رابطه زیر قابل محاسبه خواهد بود [24]:

$$P_f = 1 - \Phi(\beta) \quad (3)$$

در این رابطه، $\Phi(\cdot)$ تابع توزیع تجمعی استاندارد گاوس[3] و β شاخص قابلیت اطمینان می‌باشد که از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$\beta = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R{}^2 + \sigma_S{}^2}} \quad (4)$$

[3] standard Gaussian cumulative distribution function

در رابطه اخیر، μ_R و μ_S میانگین و σ_R و σ_S انحراف از معیار پارامترهای R و S هستند. برای استفاده از تئوری قابلیت اطمینان جهت برآورد عمر مفید سازه ناشی از خوردگی کربناته، می‌توان ظرفیت و تقاضای سازه (R و S) در برابر پدیده کربناسیون را به ترتیب، مقاومت در برابر کربناته شدن ناشی از ضخامت کاور بتنی و عمق بتن کربناته شده با گذشت زمان تعریف نمود. در این صورت اگر میانگین کاور بتنی و میانگین عمق بتن کربناته شده به ترتیب با μ_c و μ_{co} و انحراف معیار آنها با σ_c و σ_{co} نمایش داده شود، می‌توان نوشت :

$$\beta = \frac{\mu_c - \mu_{co}}{\sqrt{{\sigma_c}^2 + {\sigma_{co}}^2}} \quad (5)$$

در این رابطه β نشان دهنده قابلیت اطمینان سازه در برابر خوردگی کربناتی در طول عمر مفید برای حالت حدی بهره برداری مورد نظر می‌باشد. نشریه 511 مقدار شاخص β را برای سه حالت حدی خرابی ناشی از خوردگی کربناتی به شرح جدول (1) پیشنهاد می‌کند [25].

جدول1: شاخص قابلیت اطمینان در برابر خرابی ناشی از خوردگی کربناته بر اساس حالات حدی مختلف خرابی [25]

	شرح وضعیت	β
حالت حدی خرابی I	حذف لایه محافظ خوردگی فولاد مدفون در بتن	2
حالت حدی خرابی II:	تشکیل ترک	1/5
حالت حدی خرابی III:	ور آمدن و فرو ریزش بتن	1

با پارامتری کردن معادله (5) به شرح زیر و حل پارامتر t معادله بدست آمده، می‌توان زمان مربوط به عمر مفید سازه را برای یک حالت حدی مشخص بدست آورد:

$$\beta = \frac{C}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (6)$$

در این رابطه پارامترهای مختلف به شرح زیر تعریف می‌شوند:

$$A = \sigma_c, B = -S_k\sqrt{t}, C = \mu_c - K_{co}\sqrt{t}, CV_{co} = \frac{\sigma_{co}}{\mu_{co}}, K_{co} = \frac{\mu_{co}}{\sqrt{t}}, S_k = CV_{co} \times K_{co} \quad (7)$$

در پژوهش حاضر از روابط (6) و (7) به منظور ایجاد پایگاه داده جهت آموزش شبکه بیزین پیشبینی عمر مفید سازه استفاده خواهد شد.

4- استفاده از شبکه بیزین برای تخمین عمر مفید باقیمانده

اطلاع از زمان دقیقتر عمر مفید باقیمانده، می‌تواند به شکل موثری مدیران را در تصمیم‌گیری در خصوص انجام اقدامات پیشگیرانه از قبیل مقاوم‌سازی ویا بازسازی بخش‌های آسیب‌دیده یاری نماید. 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 عصبی بیزین روابطی برای تخمین مقدار t ارائه شده است که در بخش بعدی به آنها پرداخته می‌شود. مزیت چنین روابطی 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. شبکه‌های بیزین به عنوان یک نمودار غیرمدور جهت‌دار توصیف می‌شوند که برای پیش‌بینی وقوع اتفاقاتی که ممکن است در آینده رخ دهد ابزاری ایده آل هستند. به کمک یک شبکه بیزین می‌توان احتمال وقوع یک اتفاق را بصورت شرطی پیش‌بینی نمود. یک مساله مهم جهت تولید شبکه‌های عصبی، وجود یک پایگاه داده مناسب جهت آموزش شبکه است. در این پژوهش برای تهیه پایگاه داده مناسب جهت آموزش

شبکه های بیزین نیز روش مناسبی پیشنهاد شده است. در ادامه ابتدا مختصرا به معرفی اصول کار با شبکه‌های بیزین پرداخته شده و پس از آن شبکه پیشنهادی جهت پیشبینی عمر باقیمانده سازه و نحوه ایجاد پایگاه داده برای آموزش آن و نیز رابطه پیشبینی مستخرج از آن معرفی خواهد شد.

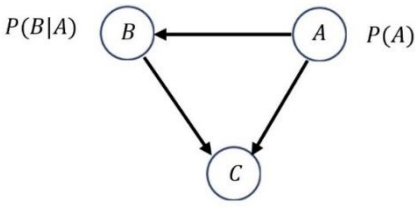
4-1-مبانی شبکه‌های بیزین

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. شبکه های بیزین مدل های گرافیکی احتمالاتی هستند که به عنوان برخی از متقاعد کننده ترین مدل های نظری در زمینه نمایش استدلال تحت عدم قطعیت در نظر گرفته می شوند [26]. بطور خلاصه یک شبکه 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، گره‌ی علت والد یا پدر و گره معلول فرزند نامیده می‌شود. وابستگی گره‌های فرزند به والدین خود به صورت احتمالات شرطی بیان می‌شود[27].

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 می‌گردد. 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 می‌گردد و در نهایت توزیع احتمال مربوط به هریک از متغیرهای تصادفی مساله، به کمک احتمال حاشیه‌ای آنها تعیین می‌شود. در مرحله آموزش شبکه بیزین، پارامترهای توزیع احتمالاتی گره‌ها به گونه‌ای تعیین می‌گردند که نتایج بدست آمده از شبکه بیشترین تطابق را بر داده‌ها داشته باشد. این مرحله با استفاده از داده‌های موجود در یک پایگاه داده مناسب انجام می‌شود. شکل 3 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 بیزین می‌توان رابطه‌ای برای پیشبینی مقدار یک متغیرتصادفی 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 مثال شکل 3 نشان می دهد: [27].

$$C = \alpha_1 \times A + \alpha_2 \times B + \varepsilon \quad (8)$$



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

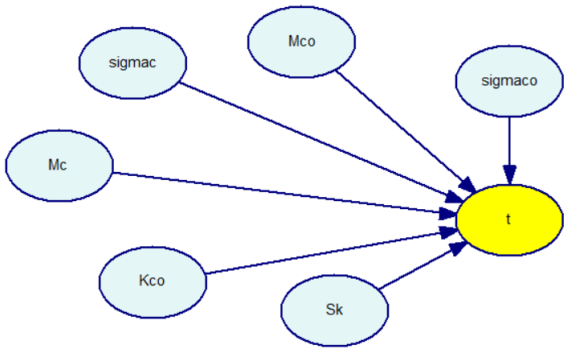
$$P(C) = \iint P(A,B,C)\ dA\ dB$$

شکل3: یک شبکه بیزین با وابستگی‌های احتمالی گره‌های آن[27]

با استفاده از شبکه بیزین آموزش داده شده، برای هر یک از ضرایب α_1 و α_2 و ε یک توزیع آماری بدست می‌آید و در نهایت از مقادیر میانگین این توزیع‌ها در رابطه 8 استفاده می‌شود. بسته‌های نرم‌افزاری مختلفی برای طراحی و آموزش شبکه‌های بیزین وجود دارند که قادر به انجام محاسبات فوق الذکر هستند. نرم افزار جنای[4] یکی از این بسته های نرم افزاری است که در تحقیق حاضر از آن برای طراحی، آموزش شبکه بیزین و استخراج رابطه پیشبینی عمر مفید باقیمانده استفاده شده است. یکی از مزایای این نرم افزار در قسمت یادگیری ماشین استفاده از بخش Generate Data File نرم افزار می‌باشد. به کمک این بخش می‌توان براساس داده‌های اولیه بدست آمده از رابطه فیزیک خرابی، تعداد داده‌های مورد نیاز برای تشکیل پایگاه داده را با درون‌یابی افزایش داد. بعد از آموزش شبکه، ارتباط بین عوامل موثر بر عمر باقیمانده را به صورت یک رابطه می‌توان استخراج نمود که نرم افزار به سادگی قابلیت انجام این کار را دارا می‌باشد. همچنین تشکیل و آموزش شبکه بیزین در این نرم افزار به سادگی امکان پذیر است. لازم به ذکر است که موضوع بسیار حیاتی جهت بدست آوردن یک شبکه بیزین قابل قبول، وجود پایگاه داده مناسب برای آموزش آن شبکه است. در این تحقیق علاوه بر طراحی شبکه بیزین، راهکاری برای ایجاد پایگاه داده مناسب جهت آموزش شبکه مربوطه نیز پیشنهاد شده است که در بخش بعدی به شرح آنها پرداخته می‌شود.

4-2- شبکه بیزین پیشنهادی

در این پژوهش برای پیش‌بینی عمر مفید باقیمانده سازه پل، یک شبکه عصبی بیزین مطابق با نمودار شکل (4) طراحی شده است. این شکل پارامتر های مربوط به ورودی‌ها و خروجی این شبکه را به صورت شماتیک نمایش می‌دهد.



شکل4: شبکه بیزین پیشنهادی جهت مربوط به عمر باقیمانده

داده‌های ورودی شبکه شامل میانگین عمق بتن کربناته شده μ_{co} ، انحراف معیار عمق کربناته شده σ_{co} ، میانگین کاور بتنی μ_c ، انحراف معیار کاور بتنی σ_c ، نرخ کربناسیون K_{co} و ضریب واریانس نرخ کربناسیون S_k می‌باشند. برای ایجاد پایگاه داده جهت آموزش شبکه در این پژوهش، استفاده از روابط مبتنی بر تئوری قابلیت اعتماد (روابط 6 و 7) پیشنهاد می‌شود که در بخش بعد نحوه آموزش شبکه و خلاصه الگوریتم پیشنهادی جهت بدست آوردن رابطه پیشبینی عمر مفید باقیمانده تشریح می‌گردد. لازم به ذکر است که شبکه بیزین نشان داده شده در شکل شماره4، در نرم افزار تخصصی جنای ترسیم شده است. با توجه به محدودیت نوشتاری در این نرم افزار، میانگین با حرف M و انحراف معیار با عبارت Sigma نشان داده شده است. با این وجود در بخش‌های مختلف مقاله میانگین با μ و انحراف معیار با σ نمایش داده می‌شود.

[4] Genie

4-3- ایجاد پایگاه داده جهت آموزش شبکه

در این بخش روند ایجاد پایگاه داده جهت آموزش شبکه بیزین پیشنهادی تشریح می‌گردد. به منظور تولید پایگاه داده مذکور، یک برنامه کامپیوتری با استفاده از نرم افزار متلب تهیه شد. جدول 2 پارامترهای ورودی به برنامه کامپیوتری را نشان می‌دهد. الگوریتم پیشنهادی برای ایجاد پایگاه داده شامل چهار بخش اصلی است که فلوچارت آن در شکل 5 نشان داده شده است. بخش اول برای تولید اعداد تصادفی متناظر با عمق بتن کربناته، میانگین و انحراف معیار آنها بکار می‌رود. در بخش دوم به تولید اعداد تصادفی درمحدوده استاندارد برای ایجاد مقادیر کاور بتنی و میانگین و انحراف معیار آنها پرداخته می‌شود.

جدول2: جدول پارامترهای مورد نیاز جهت ایجاد پایگاه داده

پارامتر	توضیح پارامتر	واحد
μ_{co}	میانگین عمق بتن کربناته شده	mm
σ_{co}	انحراف معیار عمق بتن کربناته شده	mm
μ_c	میانگین کاور بتنی	mm
σ_c	انحراف معیار کاور بتنی	mm
K_{co}	نرخ کربناته شدن	$mm/\sqrt{year}$ μ_c
S_k	ضریب واریانس نرخ کربناسیون	$mm/\sqrt{year}$
CV_{co}	ضریب تغییرات عمق کربناسیون	% μ_{co}

در بخش سوم، پارامترهای K_{co}، S_k و CV_{co} از فرمول‌های ارائه شده در رابطه (7) و اعداد تصادفی ایجاد شده در مراحل اول و دوم محاسبه می‌شوند و در بخش چهارم با فرض یک مقدار مشخص β از آیین‌نامه و رابطه (6)، مقادیر t از حل معادله زیر بر اساس هر مجموعه از پارامترهای تصادفی طبق جدول (2) محاسبه می‌شود:

$$\beta\sqrt{\sigma_c^{\,2}+(-S_k\sqrt{t})^2}-(\mu_c-K_{co}\sqrt{t})=0 \qquad (9)$$

در نهایت، خروجی برنامه بصورت یک ماتریس $n\times$۷ خواهد بود که به عنوان پایگاه داده جهت آموزش شبکه بیزین مورد استفاده قرار می‌گیرد. n نشان دهنده تعداد سطرهای ماتریس خروجی است که هر سطر از این ماتریس معرف یک مجموعه داده است. ستونهای اول تا ششم مربوط به پارامترهای ورودی شبکه طبق جدول (2) (یا شکل(4)) و ستون هفتم عمر مفید بدست آمده بر اساس مجموعه پارامترهای مذکور می باشد. فلوچارت مربوط به الگوریتم ایجاد پایگاه داده در شکل شماره 5 ارائه شده است.

4-4- آموزش شبکه و استخراج رابطه پیشبینی عمر مفید

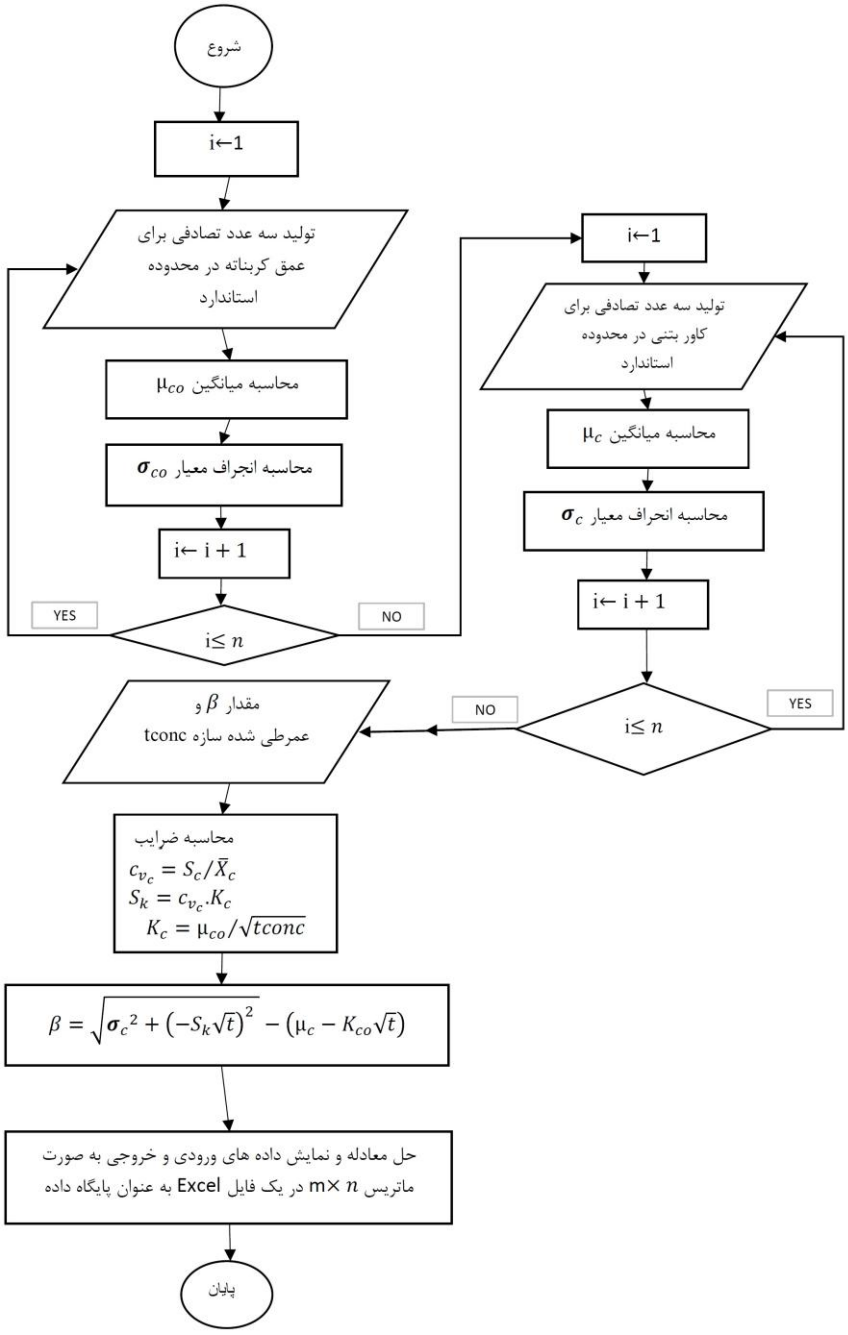
پس از طراحی شبکه و تهیه برنامه کامپیوتری جهت ایجاد پایگاه داده، نوبت به تولید داده‌ها جهت آموزش شبکه می‌رسد. برای این منظور، در این مرحله یک ماتریس ۱۰۰۰×۷ (شامل ترکیب یک ماتریس ۱۰۰۰×۶ به عنوان داده‌های ورودی و یک ماتریس ۱۰۰۰×۱ به عنوان داده هدف یا زمان مربوط به عمر مفید باقیمانده) با استفاده از برنامه کامپیوتری تولید شد و در یک فایل اکسل ذخیره و برای آموزش شبکه بیزین مورد استفاده قرار گرفت. لازم به ذکر است که داده‌های ورودی به نرم افزار برای آموزش شبکه بیزین در بازه‌های قابل قبول تعریف شده از منابع معتبر انتخاب گردیدند. جدول (3) اطلاعات مربوط به تولید داده‌های ورودی شبکه را نشان می‌دهد.

جدول3: جدول بازه داده‌های ورودی به نرم افزار برای آموزش شبکه بیزین

پارامتر	بازه مورد نظر		واحد
	min	max	
μ_{co}	1	50	mm
σ_{co}	2	4	mm
μ_c	10	105	mm
σ_c	11	15	mm
K_{co}	1	10	$mm/\sqrt{year}$
S_k	0/01	4	$mm/\sqrt{year}$

برای تشکیل شبکه بیزین نیز از نرم افزارGenie ورژن 2.0.4843.0 استفاده شد. در نهایت پس از آموزش شبکه، رابطه پیشبینی زیر برای محاسبه عمر باقیمانده t استخراج گردید:

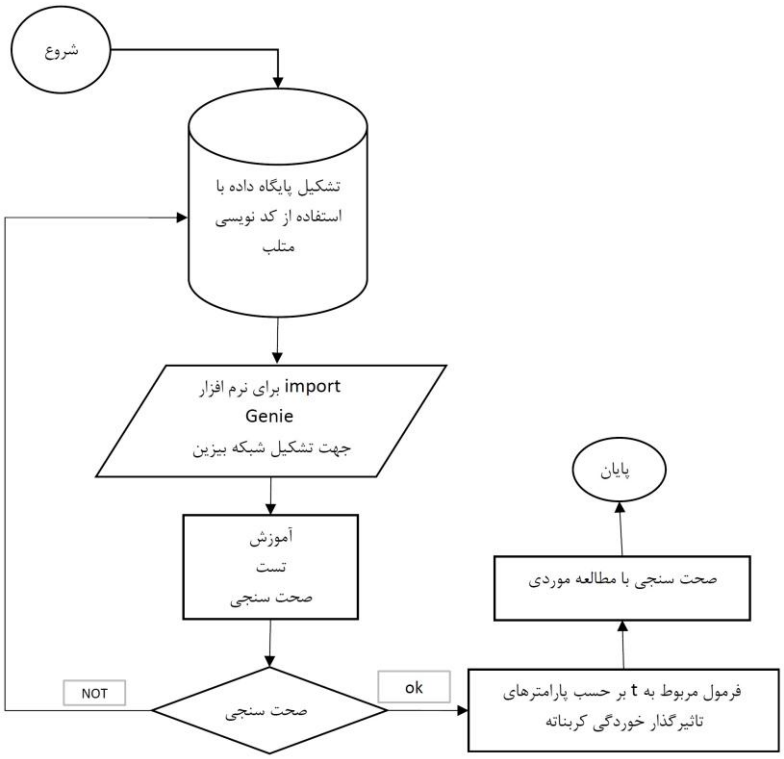
$$t = -14.1637\mu_{co} - 5.1966\sigma_{co} + 5.7025\mu_c - 4.7129\sigma_c + 8.26968S_k + 3.711K_{co} + Normal(124.915, 40.9617) \quad (10)$$



شکل5: فلوچارت الگوریتم مربوط به تشکیل پایگاه داده

4-5- خلاصه الگوریتم پیشنهادی

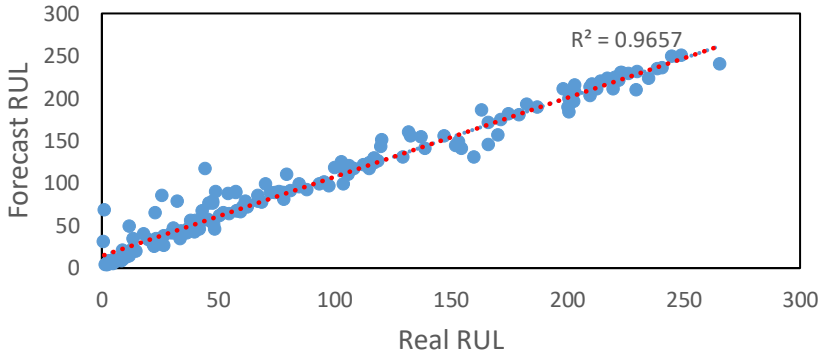
شکل (6) فلوچارت مربوط به روند کلی طراحی شبکه بیزین پیشنهادی، ایجاد پایگاه داده، آموزش شبکه و استخراج رابطه پیشبینی عمر مفید باقیمانده را نمایش می‌دهد. بر اساس این شکل، ابتدا پایگاه داده با فلوچارت شکل شماره 5 بدست می‌آید و در مرحله بعد از آن، شبکه بیزین تهیه و آموزش، تست و صحت سنجی داده ها صورت می‌گیرد. در نهایت رابطه پیشبینی عمر مفید باقیمانده استخراج می‌گردد. از رابطه بدست آمده می‌توان برای پیشبینی عمر مفید سازه بتنی تحت خوردگی کربناته استفاده نمود.



شکل6: فلوچارت روش پیشنهادی

4-6- بررسی کیفیت آموزش شبکه

قبل از استفاده از شبکه بیزین برای پیشبینی عمر مفید باقیمانده، لازم بود تا در خصوص کیفیت آموزش شبکه و دقت جوابها بررسی‌هایی صورت پذیرد. بدین منظور، در این بخش به بررسی کیفیت آموزش شبکه پرداخته شد. همانطور که در بخش پیشین نیز اشاره گردید، در این مقاله از یک پایگاه داده بصورت ماتریس 1000 در 7 جهت آموزش شبکه بیزین استفاده شد. 70٪ این داده‌ها برای آموزش و 30٪ داده ها برای تست و صحت سنجی شبکه در نظر گرفته شدند. شکل 7 وضعیت کیفیت نتایج تخمین عمر باقیمانده را برای داده های مربوط به تست شبکه نشان می‌دهد. محور افقی نشان دهنده مقادیر عمر باقیمانده مورد انتظار و محور قائم نشان دهنده مقادیر عمر باقیمانده پیشبینی شده توسط شبکه هستند. همانطور که در این شکل می‌توان ملاحظه نمود، نتایج با شاخص $R^2 = ۰/۹۶۵۷$ برخط $y = x$ منطبق شده‌اند. بنابراین، نمودار مذکور حاکی از کیفیت بالای آموزش شبکه می‌باشد.



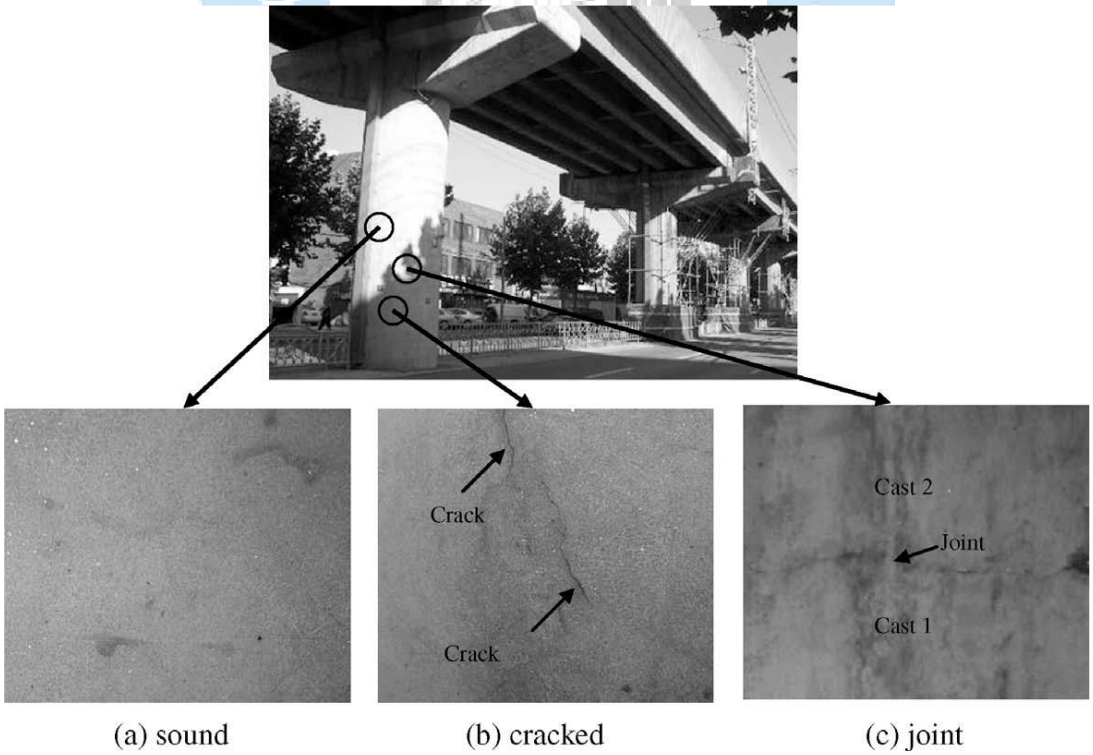
شکل7: نمودار بررسی شاخص تخمین خطا

5- مطالعه موردی

به منظور راستی‌آزمایی نتایج بدست آمده از رابطه پیشنهادی، یک مطالعه موردی در این بخش انجام شد. در این راستا یک پل بتنی تحت خوردگی کربناته که قبلا در مرجع [28] مورد مطالعه قرار گرفته بود انتخاب گردید. پارامترهای مختلفی از قبیل میانگین و انحراف معیار عمق کربناته شدن، عمق پوشش بتنی و نرخ کربناسیون به صورت عددی از این مرجع استخراج شدند و با توجه به نمودارهای این مقاله، عمر سرویس دهی بر اساس پارامترهای مذکور محاسبه گردید. همچنین عمر مفید سازه به کمک روش پیشنهادی در تحقیق حاضر تعیین شد و با نتایج مرجع [28] مقایسه گردید. در ادامه، ابتدا به شرح مشخصات سازه و داده‌های مورد استفاده پرداخته می‌شود، سپس نتایج بدست آمده در این خصوص ارائه می‌گردد.

5-1- مشخصات پل مورد مطالعه

مطالعه موردی در این تحقیق یک سازه پل بتنی است که در شکل 8 نشان داده شده است [28]. این پل به مدت 18 سال در معرض



شکل8 : عکس پل بتنی مورد مطالعه با کیفیت های مختلف پوشش بتنی در معرض شرایط جوی [28]

پدیده کربناسیون بوده است. محققین در مرجع [28]، بر اساس بازرسی‌هایی که در سه ناحیه مختلف این پل شامل ناحیه سالم، ناحیه ترک خورده و ناحیه مربوط به درز سرد انجام دادند، اطلاعات مربوط به پارامترهای مورد نیاز شامل میانگین و انحراف معیار عمق کربناته شده، عمق کاور بتنی و همچنین نرخ کربناته شدن را اندازه گیری نمودند. این اطلاعات در جدول شماره 4 نشان داده شده‌اند. در این پژوهش از اطلاعات مذکور برای پیشبینی عمر باقیمانده پل با استفاده از رابطه پیشنهادی استفاده شد.

جدول4: مقادیر پارامترهای تصادفی برای کربناته شدن پل بتنی مورد مطالعه [28]

ناحیه ها	تعداد تکرارهای اندازه گیری	عمق کربناته شده (mm)		عمق پوشش بتنی (mm)		نرخ کربناته شدن $(mm/\sqrt{year})$	
		میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار	میانگین	انحراف معیار
ناحیه سالم	56	11/62	2/45	57/87	12/61	2/73	0/56
ناحیه ترک خورده	25	24/66	3/74	53/64	11/47	5/79	0/88
درز سرد	32	17/43	2/88	61/81	14/52	4/10	0/65

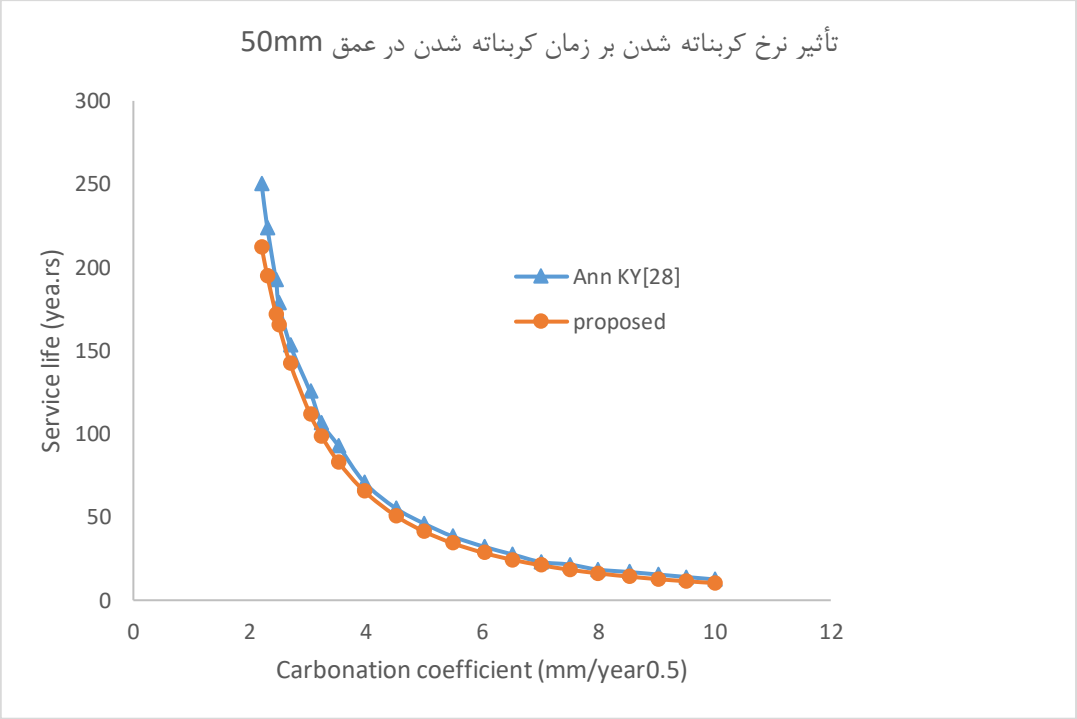
5-2- بررسی نتایج عددی

جدول شماره 5 مقایسه نتایج عمر مفید باقیمانده مربوط به پل مورد مطالعه را از روش پیشنهادی با نتایج بدست آمده در مرجع [28] نشان می‌دهد. همانطور که از اعداد این جدول ملاحظه می‌شود نتایج بدست آمده از روش پیشنهادی مطابقت خوبی با نتایج این مرجع دارند.

جدول5: مقایسه عمر مفید با قیمانده روش پیشنهادی با مرجع [28]

ناحیه ها	عمر مفید باقیمانده $(year)$	
	Ref. [28]	روش پیشنهادی
ناحیه سالم	171	153
ناحیه ترک خورده	54	48/6
درز سرد	126	117

به منظور انجام بررسی های بیشتر، نمودار تغییرات نرخ کربناسیون در برابر عمر مفید بر اساس روش ارایه شده در مرجع [28] و نیز رابطه پیشنهادی ترسیم شد. لازم به ذکر است که با توجه به اینکه در این مرجع مقدار ضریب قابلیت اطمینان $\beta = ۱/۳$ فرض شده است لذا پایگاه داده نیز با این فرض به روز رسانی گردید. این محاسبات برای عمق متوسط کاور بتنی 50 میلیمتر انجام شد. شکل 10 نمودارهای بدست آمده از دو روش را با هم مقایسه می کند. در این بررسی شاخص خطا مربوط به اختلاف دو نمودار برابر با $R^{۲} = ۰/۹۶۵۷$ بدست آمده است. نتایج شکل9 نشان دهنده انطباق مناسب روش پیشنهادی با نتایج مرجع مذکور می باشد.



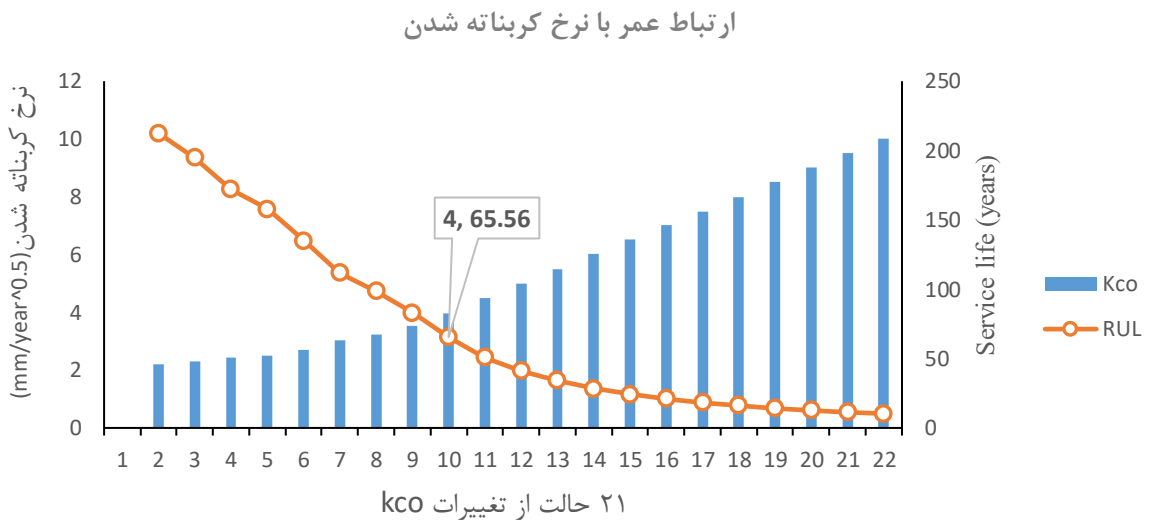
شکل9: نمودار انطباق عمر مفید باقیمانده در برابر نرخ کربناسیون

5-3- مطالعه پارامتری

به منظور مطالعه بیشتر، در این بخش به بررسی رابطه بین عمر مفید باقیمانده با پوشش بتن و نرخ کربناسیون به عنوان دو پارامتر تاثیرگذار در پدیده خوردگی کربناتی پرداخته شد. در ادامه نتایج مربوط به این مطالعه ارائه می‌گردد.

5-3- 1-بررسی ارتباط بین عمر مفید سازه و نرخ کربناته شدن

یکی از پارامترهای تاثیر گذار بر خوردگی سازه های بتنی، نرخ کربناته شدن است که به عوامل محیطی و شرایط سازه بستگی دارد. در این بخش به بررسی ارتباط بین عمر مفید سازه و نرخ کربناته شدن پرداخته شده است. در شبکه بیزین پیشنهادی فرضیات زیر صورت گرفت تا ارتباط بین عمر مفید باقیمانده و نرخ کربناسیون روشن‌تر شود. در این راستا، انحراف معیار پوشش های بتنی عدد ثابت 12 میلیمتر و عمق کربناته 11 میلیمتر و انحراف معیار آن 2/5 میلیمتر فرض شد. پس از باز تولید داده ها و تشکیل شبکه بیزین و آموزش آن، تغییرات عمر مفید باقیمانده در مقابل نرخ کربناسیون با فرض پوشش بتنی 50 میلیمتر ترسیم گردید (شکل 10). با دقت در این تصویر به وضوح دیده می‌شود که با افزایش مقدار نرخ کربناته شدن، عمر مفید به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد. این مطالعه نشان می دهد که با شرایط فرض شده برای سایر پارامترها، برای دسترسی به عمرهای بالاتر از 65 سال نرخ کربناسیون زیر 4 $mm/\sqrt{year}$ مورد نیاز می‌باشد.



شکل10: نمودار ارتباط عمر مفید باقیمانده با نرخ کربناسیون

5-3-2- بررسی ارتباط بین عمر مفید سازه و پوشش بتن

در این تحقیق، به کمک الگوریتم پیشنهادی یک مطالعه پارامتری برای بررسی اثر ضخامت پوشش بتن بر عمر باقیمانده سازه پل انجام شد. در این راستا، در برنامه کامپیوتری تهیه شده، بازه پوشش بتنی میلگردها از 10 میلیمتر تا 105 میلیمتر تغییر داده شد و مقدار سایر پارامترها مطابق با فرضیات بخش 5-3-1 ثابت فرض شد. بررسی نتایج حاصل از این مطالعه پارامتری نشان داد که برای نرخ کربناسیون $6\,mm/\sqrt{year}$ و پوشش‌های بتنی نزدیک به 50 میلیمتر، عمر مفید باقیمانده کمتر از 30 سال بدست می‌آید. برای پوشش‌های بتنی بالای 50 میلیمتر در صورتی عمر مفید باقیمانده به حداکثر مقدار می‌رسد که نرخ کربناسیون کمتر از $2\,mm/\sqrt{year}$ باشد. به عنوان مثال با افزایش پوشش بتنی به 70 میلیمتر، عمر مفید باقیمانده به مرز 70 سال رسید. این مطالعه نشان داد که عمر مفید باقیمانده پل های بتنی حساسیت زیادی به پوشش بتن و نرخ کربناسیون دارد.

6- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مساله تعیین عمر مفید باقیمانده پل‌های با عرشه بتنی تحت خوردگی کربناسیون مورد مطالعه قرار گرفت. بر اساس روش پیشنهادی، با استفاده از شبکه بیزین یک رابطه پیشبینی برای تخمین عمر مفید باقیمانده پل های تحت خوردگی کربناته بر حسب عوامل موثری مانند ضخامت کاور بتن و عمق کربناته و انحراف معیار اندازه گیری آنها ارائه شد. رابطه پیشنهادی نسبت به فرمول های پیشین پارامترهای بیشتری را در محاسبه عمر باقیمانده در نظر می گیرد. بررسی‌ها در این تحقیق نشان داد که پوشش بتنی قسمت‌های مختلف پل و نرخ کربناسیون دو عامل تاثیر گذار در پیشبینی عمر مفید باقیمانده پل های بتنی تحت خوردگی کربناتی می باشند. از دیگر مزایای روش پیشنهادی الگوریتم تشکیل پایگاه داده جهت آموزش شبکه بیزین می‌باشد. در الگوریتم مذکور از تئوری قابلیت اعتماد سازه‌ها برای ایجاد پایگاه داده استفاده شد. بنابراین عمر مفید باقیمانده سازه را بر اساس حالات حدی مختلف می‌توان تخمین زد.

روش پیشنهادی با یک مدل واقعی مورد بررسی و صحت سنجی قرار گرفت. خلاصه نتایج بدست آمده در این تحقیق را به شرح زیر می‌توان بیان نمود:

1- رابطه پیشنهادی بر مبنای شبکه بیزین، عمر مفید باقیمانده عرشه پل بتنی را با شاخص خطای R-Squared (R^2) برابر 0/97 بدست داد که نشان دهنده دقت قابل قبول روش پیشنهادی است.

2- بین عوامل مهم تاثیر گذار بر خوردگی کربناتی نرخ کربناسیون بیشترین تاثیر را درعمر مفید باقیمانده دارد به طوری که با افزایش آن عمر مفید باقیمانده به شدت کاهش می‌یابد. در مطالعه موردی انجام شده، برای اینکه عرشه به حداکثر عمر خود در برابر خوردگی ناشی از کربناته شدن برسد پوشش بتنی بیشتر از 100 میلیمتر و نرخ کربناته شدن کمتر از $2\ mm/\sqrt{year}$ مورد نیاز بود.

3- در مطالعه موردی دو ناحیه سالم و ترک خورده مورد بررسی قرار گرفت. بررسی ها نشان داد عمر مفید در ناحیه ترک خورده افت شدیدی نسبت به ناحیه سالم را نشان می‌دهد. در بررسی عددی پل مورد مطالعه عمر مفید ناشی از کربناسیون در ناحیه سالم 153 سال محاسبه گردید و این در حالی بود که در شرایط یکسان محیطی، این عمر در ناحیه ترک خورده میزان 48 سال بدست آمد.

3- داده‌ها در شبکه بیزین با شاخص های قابلیت اطمینان (β) برابر با 1و 1/5 و 2 مورد بررسی قرار گرفتند. بررسی‌ها نشان داد که برای مطالعه موردی انجام شده، در صورتیکه این شاخص از 1 به 1.5 تغییر پیدا کند، عمر مفید باقیمانده به طور متوسط 33 درصد کاهش می‌یابد و اگر این شاخص از 1/5 به 2 تغییر یابد عمر مفید باقیمانده به طور متوسط 37 درصد کاهش می‌یابد.

در این مقاله عوامل دما و رطوبت بطور غیر مستقیم در تخمین عمرباقیمانده سازه در نظر گرفته شده‌اند. به عبارت دیگر، این دو پارامتر در محاسبه نرخ کربناسیون به عنوان یکی از پارامترهای ورودی مساله بکار می‌روند اما از آنجایی که بطور مستقیم در رابطه فیزیک خرابی مورد استفاده در مقاله ظاهر نشده‌اند، لذا در طراحی شبکه امکان در نظر گرفتن آنها به عنوان ورودی‌های شبکه امکان پذیر نبود. این موضوع می‌تواند به عنوان یک محدودیت در پژوهش حاضر مطرح شود و به عنوان یک موضوع در پژوهش‌های آتی مورد توجه قرار گیرد.

مراجع

[1] Seyed Hosseini S.M., Baharshahi M., Shahanqi K. (2018). 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, J. B., Chebel-Morello, B., Saidi, L., Malinowski, S., & Fnaiech, F. (2015). Accurate bearing remaining useful life prediction based on Weibull distribution and artificial neural network. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 56, 150-172.

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

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

[5] Zhang, J., Jiang, Y., Wu, S., Li, X., Luo, H., & Yin, S. (2022). Prediction of remaining useful life based on bidirectional gated recurrent unit with temporal self-attention mechanism. Reliability Engineering & System Safety, 221, 108297.

[6] Medvedev, V., & Pustovgar, A. (2023). A Review of Concrete Carbonation and Approaches to Its Research under Irradiation. *Buildings*, 13(8), 1998.

[7] H.R. Fotso Lele, H. Beushausen, M.G. Alexander,2023, A practical carbonation model for service life design of reinforced concrete structures, Scientific African, Volume 20, e01677, ISSN 2468 -2276, https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2023.e01677.

[8] Londhe, S., Kulkarni, P., Dixit, P., Silva, A., Neves, R., & de Brito, J. (2022). Tree based approaches for predicting concrete carbonation coefficient. *Applied Sciences*, 12(8), 3874.

[9] Shen, Y., Wang, Y., Xu, X., & Ruan, F. (2023). Study on carbonation of construction joints through field tests on a 30-year-old bridge and accelerated carbonation tests. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02231.

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

[11] Baur, M., Albertelli, P., & Monno, M. (2020). A review of prognostics and health management of machine tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107, 2843-2863.

[12] Xia, T., Dong, Y., Xiao, L., Du, S., Pan, E., & Xi, L. (2018). Recent advances in prognostics and health management for advanced manufacturing paradigms. *Reliability Engineering & System Safety*, 178, 255-268.

[13] Cai, B., Shao, X., Liu, Y., Kong, X., Wang, H., Xu, H., & Ge, W. (2019). Remaining useful life estimation of structure systems under the influence of multiple causes: Subsea pipelines as a case study. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(7), 5737-5747.

[14] Lee, J., Wu, F., Zhao,W., Ghaffari, M. Liao, L.,Siegel, D. (2014).“Prognostics and health management design for rotary machinery systems-Reviews, methodology and applications,” *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1):314-334.

[15] Chun P.J., Inoue T., Seto D., Ohga M. (2012). Prediction of bridge deterioration using GIS-based Markov transition matrix, *Internet Journal of Society for Social Management Systems*, 8, 1–9.

[16] Morcous, G., Lounis, Z., & Cho, Y. (2010). An integrated system for bridge management using probabilistic and mechanistic deterioration models: Application to bridge decks. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 14, 527-537.

[17] Ranjith, S., Setunge, S., Gravina, R., & Venkatesan, S. (2013). Deterioration prediction of timber bridge elements using the Markov chain. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 27(3), 319-325.

[18] Kosgodagan, A. (2017). High-dimensional dependence modelling using Bayesian networks for the degradation of civil infrastructures and other applications (Doctoral dissertation, Ecole nationale supérieure Mines-Télécom Atlantique).

[19] Kosgodagan-Dalla Torre, A., Yeung, T. G., Morales-Nápoles, O., Castanier, B., Maljaars, J., & Courage, W. (2017). A two-dimension dynamic Bayesian network for large-scale degradation modeling with an application to a bridges network. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(8), 641-656.

[20] Srikanth, I., & Arockiasamy, M. (2020). Deterioration models for prediction of remaining useful life of timber and concrete bridges: A review. *Journal of traffic and transportation engineering*, 7(2), 152-173.

[21] von Greve-Dierfeld, S., Lothenbach, B., Vollpracht, A., Wu, B., Huet, B., Andrade, C. & De Belie, N. (2020). Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. *Materials and Structures*, 53(6), 136.

[22] Wang, Xinhao, Qiuwei Yang, Xi Peng, and Fengjiang Qin. 2024. "A Review of Concrete Carbonation Depth Evaluation Models" *Coatings* 14, no. 4: 386. https://doi.org/10.3390/coatings14040386

[23] Li, B., Tian, Y., Zhang, G., Liu, Y., Feng, H., Jin, N. & Wang, J. (2023). Comparison of detection methods for carbonation depth of concrete. *Scientific Reports*, 13(1), 19980.

[24] Melchers, R. E., & Beck, A. T. (2018). *Structural reliability analysis and prediction*. John Wiley & sons.

[25] Guide Manual for the Seismic Vulnerability Assessment and Retrofit of Bridge. (2011). Publication No. 511, Vice President of Strategic Supervision Executive technical system office. (In Persian)

[26] Fang, W., Zhang, W., Ma, L., Wu, Y., Yan, K., Lu, H. & Yuan, B. (2023). An efficient Bayesian network structure learning algorithm based on structural information. *Swarm and Evolutionary Computation*, 76, 101224.

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

[28] Ann, K. Y., Pack, S. W., Hwang, J. P., Song, H. W., & Kim, S. H. (2010). Service life prediction of a concrete bridge structure subjected to carbonation. Construction and Building Materials, 24(8), 1494-1501.