



تحلیل قابلیت اطمینان نشت آب در تونل با بتن ترک خورده و ترک نخورده با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو

سیروس محمدزاده، افشین فیروزی*، ملیکا فیضی

دانشکده فنی، دانشگاه آزاد اسلامی علوم و تحقیقات، تهران، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۲۸ دی ۱۳۹۵
بازنگری: ۲ اسفند ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۶ خرداد ۱۳۹۶
ارائه آنلاین: ۲۳ خرداد ۱۳۹۶

کلمات کلیدی:

تحلیل قابلیت اطمینان
نشت آب
بتن ترک خورده
بتن ترک نخورده
تونل

چکیده: نشت آب از سازه‌های تونل بتنی یکی از پدیده‌هایی است که می‌تواند قابلیت بهره‌برداری از آن‌ها را با مشکلاتی مواجه سازد. در این مقاله نشت آب از قطعات بتن ترک خورده و ترک نخورده با استفاده از تئوری‌های مربوطه به صورت حالات حدی بهره‌برداری معرفی شده و عدم قطعیت پارامترهای موثر بر آن به صورت اعداد تصادفی مدلسازی شده‌اند. با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو احتمال خرابی و شاخص قابلیت اطمینان مقاطع تونل با بتن ترک خورده در سه حالت عرض ترک ایستا، خود ترمیم و گسترش یابنده محاسبه شده است. نتایج این تحلیل نشان می‌دهد که خود ترمیمی بتن نقش چندانی در کاهش احتمال نشت ندارد. از سوی دیگر به دلیل اینکه اغلب عرض ترک در طول عمر سازه گسترش می‌یابد، جهت تعیین طول عمر بهره‌برداری از تونل‌ها تدقیق مدل افزایش عرض ترک با زمان ضروری است. همچنین برای مقاطع ترک نخورده، و مقاطعی که ضرورتاً باید آب بند باشند، نیز احتمال شروع نشت در طول عمر بهره‌برداری محاسبه شده است. برای این قبیل از سازه‌ها با تعیین ریسک قابل پذیرش در طول عمر سازه، روش تحلیل قابلیت اطمینان ارائه شده در این مقاله می‌تواند در طراحی حداقل ضخامت مورد نیاز قطعه و تعیین مشخصات طرح اختلاط و نفوذپذیری بتن به کار رود.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر با توجه به رشد جمعیت و پیشرفت‌های صنعتی، بحث استفاده بهینه از فضاهای شهری مورد توجه ویژه‌ای قرار گرفته است. از جمله این فضاها، فضاهای زیر زمینی هستند که باعث تسریع در دسترسی به مکان‌های مورد نظر، انتقال آب و تامین کارکردهای شهری دیگر می‌شوند. از سوی دیگر توسعه شبکه حمل و نقل درون شهری از الزامات توسعه شهرهای بزرگ به شمار می‌رود و در این بین، بخشی از این توسعه مرهون ساخت و ساز تونل‌های مترو و راه‌اندازی شبکه قطار شهری می‌باشد. سازه‌های تونلی از مهمترین زیر ساخت‌های حمل و نقل ریلی محسوب می‌گردند. با توجه به اینکه این سازه‌ها تحت تاثیر بارگذاری‌های مختلف می‌باشند و از سوی دیگر در معرض زوال ناشی از عوامل خارجی و حوادث طبیعی می‌باشند بحث نگهداری از آنها اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. امروزه با استفاده از سامانه‌های نگهداری به صورت سیستماتیک به مساله نگهداری از این سازه‌ها پرداخته می‌شود [۱]. در سامانه‌های تعمیر و نگهداری بحث مدل‌های زوال از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است. با استفاده از مدل‌های زوال می‌توان بسیاری از خرابی‌ها را پیش‌بینی کرد و از به وجود آمدن آنها جلوگیری نمود یا مانع گسترش آن شد. از آنجاکه بسیاری از تونل‌ها در عمق زمین و معمولاً در زیر

سفره‌های آب زیرزمینی احداث می‌شوند کنترل نشت آب در آنها از مهم‌ترین موارد می‌باشند. اصولاً نشت آب علت اصلی بیشتر خرابی‌ها در سازه تونل و اجزای آن است. کشورهای مختلف سالانه هزینه‌های زیادی جهت تعمیر و نگهداری تونل در اثر نشت آب متحمل می‌گردند. به عنوان نمونه در امارات متحده عربی مبلغ ۱۱ میلیون پوند جهت تعمیر و جلوگیری از نشت شدید آب در تونل راه انجام پذیرفته است. همچنین در ژاپن جهت تعمیر و نگهداری تونل راه‌آهن شین کان مون^۱ از سال ۱۹۷۳ تا ۱۹۸۳ مبلغی بالغ بر ۱۱۰ میلیون یمن هزینه گردیده است [۲]. ایران نیز به علت دارا بودن تونل‌های راه، راه‌آهن و مترو از این امر مستثنی نمی‌باشد. نشت آب ممکن است در بعضی موارد به خودی خود باعث خرابی سازه‌های نگردد ولی منجر به بروز عدم آرامش و آسایش استفاده کنندگان از آن می‌گردد. برای مثال نشت آب در داخل تونل‌های ماشین رو باعث تغییر جهت ناگهانی وسایل نقلیه می‌گردد و در محل تونل‌های مترو باعث آسیب رساندن به تاسیسات برقی و مکانیکی داخل تونل می‌گردد و همچنین در تونل‌های عابر پیاده باعث عدم عبور مرور افراد از محدوده نشت آب می‌گردد. شایان ذکر است نشت آب در همه انواع تونل، به دلایلی مانند ناکافی بودن طرح درز و اتصالات، ساخت غیر استاندارد و خرابی لایه‌های ضد آب به دلیل عوامل بیولوژیکی یا شیمیایی موجود در آب روی می‌دهد [۱]. تجربه و سوابق نشان داده است که دربخشی

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: firouzi@srbiau.ac.ir

۲- تحلیل قابلیت اطمینان^۸

تابع حالت حدی نشت آب در داخل تونل را می‌توان بر مبنای دو پارامتر میزان مجاز نشت آب و میزان دبی نشت آب به صورت زیر تعریف نمود [۸]:

$$G(SP_{lim}, Q, t) = SP_{lim}(t) - Q(t) \quad (1)$$

که در آن $G(SP_{lim}, Q, t)$ تابع حالت حدی وابسته به زمان می‌باشد. در معادله فوق هر یک از دو تابع $SP_{lim}(t)$ (حد مجاز نشت آب وابسته به زمان) و Q (دبی نشت آب وابسته به زمان) خود متشکل و متأثر از چندین متغیر تصادفی با توابع توزیع احتمال متفاوت هستند که به نوع مصالح و بارهای وارده بر قطعه مورد نظر بستگی دارند. حالات خرابی و احتمال متناظر با وقوع آن حالات ($G \leq 0$) به صورت زیر تعریف می‌شود [۹]:

$$p_f(t) = p_r(G \leq 0) = \iint_{G \leq 0} f_{SP_{lim}, Q}(s, q) dsdq \quad (2)$$

$f_{SP_{lim}, Q}$ تابع توزیع احتمال مشترک دو متغیر تصادفی $SP_{lim}(t)$ و Q می‌باشد. همچنین Q میزان دبی نشت آب و S متغیر تصادفی حد مجاز نشت آب می‌باشد که در این مطالعه به صورت تعینی در نظر گرفته شده است. با حل انتگرال معادله ۲ احتمال خرابی^۹ متغیر با زمان $p_f(t)$ محاسبه می‌شود. ضمناً مطابق با تعریف، شاخص قابلیت اطمینان را نیز می‌توان با استفاده از رابطه ۳ محاسبه کرد [۱۰].

$$\beta = -\Phi^{-1}(p_f(t)) \quad (3)$$

در رابطه فوق β شاخص قابلیت اطمینان^{۱۰} و Φ^{-1} تابع معکوس توزیع احتمال نرمال استاندارد می‌باشد.

حل تحلیلی توابع حالات حدی خطی و غیر خطی با استفاده از روش‌های تقریبی قابلیت اطمینان یا روش‌های عددی امکان‌پذیر است. در استفاده از روش‌های تقریبی باید توجه داشت، در صورتیکه متغیرهای تصادفی دارای توزیع غیر نرمال باشند و یا توابع حالات حدی غیر خطی باشند پاسخ به دست آمده همراه با درجات مختلفی از تقریب خواهد بود. به عنوان مثال در روش قابلیت اطمینان درجه اول (FORM^{۱۱}) با استفاده از بسط سری تیلور و استفاده از جملات درجه اول تابع حالت حدی در هر گام با یک معادله خطی تخمین زده می‌شود که میزان خطای محاسبات به میزان غیرخطی بودن آن تابع و غیر نرمال بودن متغیرهای تصادفی بستگی دارد. شبیه سازی مونت کارلو به عنوان یکی از روش‌های عددی بر اساس تولید مقادیر متغیرها با استفاده از توابع چگالی احتمالاتی به تعیین مقدار تابع حالات حدی خطی و

از قطعات تونل عرض ترک ثابت بوده و در بعضی دیگر بر اساس پدیده خود ترمیمی عرض ترک در بتن کاهش می‌یابد [۳] و در بیشتر موارد عرض ترک با گذشت زمان افزایش می‌یابد [۴]. لذا با مشخص نمودن احتمال خرابی تونل تحت تاثیر نشت آب می‌توان با بکار بردن روش‌های صحیح تعمیر و نگهداری در افزایش طول عمر مفید تونل اقدام نمود. همچنین بعضی از تونل‌ها به علت ماهیت کاربری آنها باید آب‌بند باشند لذا احتمال شروع رخداد نشت در اینگونه سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است تا به واسطه آن بتوان با تمهیداتی از قبیل افزایش ضخامت بتن یا تغییر در طرح اختلاط بتن نسبت به آب‌بند نمودن بتن و متعاقب آن سازه تونل اقدام نمود. از سوی دیگر بسیاری از متغیرهایی که جهت مدل‌سازی میزان نشت آب استفاده می‌شود احتمالاتی بوده و عدم قطعیت دارند لذا باید از روش‌های تحلیل اطمینان سازه‌ای در ایجاد مدل‌های احتمالاتی ریسک نشت آب استفاده نمود. در این راستا چانگ زیانگ کیان و همکاران^۱ در سال ۲۰۱۲ [۵] توانستند مدل میزان نشت آب در بتن ترک خورده و ترک نخورده را بدون وابستگی به زمان تشریح نمایند و سانگ سون پارک و همکاران^۲ در سال ۲۰۱۲ [۶] به مدل سازی عددی نفوذپذیری آب در بتن ترک خورده پرداخته و تاثیر میزان تخلخل و اشباع را در سنین اولیه بتن مورد بررسی قرار دادند. جیرو موراتا و همکاران^۳ در سال ۲۰۰۴ [۷] به صورت عملی و نظری نشان دادند در بتن ترک خورده در فشار آب پایین تقریباً ۰/۱۵ مگا پاسکال یا کمتر، جریان تراوش داری حاکم است در حالیکه در فشار آب زیاد، جریان تراوش به صورت پراکنده به همراه تغییر شکل داخلی بتن است. در همین راستا کارولا ادواردسن و همکاران^۴ در سال ۱۹۹۹ [۳] توانستند مدل کاهش میزان نشت آب با گذشت زمان را ناشی از خود ترمیمی در بتن ترک خورده تشریح نمایند. شایان ذکر است بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که اغلب مطالعات مرتبط با نشت آب در تونل‌ها، مبتنی بر نتایج آزمایشگاهی بوده که در آنها به تحلیل احتمالاتی قابلیت اطمینان پرداخته نشده است. لذا در این مقاله برای محاسبه قابلیت اطمینان و ریسک خرابی سازه تونل، ابتدا تئوری قابلیت اطمینان توضیح داده می‌شود سپس مکانیزم خرابی تونل تحت تاثیر ترک خوردگی در سه حالت تاثیر ترک‌های موجود در شرایط خود ترمیمی^۵، ایستاء و گسترش یابنده^۶ تشریح می‌گردد. سپس عدم قطعیت‌های مدل نشت آب در بتن ترک خورده [۵] به صورت متغیرهای تصادفی مدل‌سازی شده و احتمال خرابی متناظر با توابع مورد اشاره در طول زمان محاسبه شده است. در ادامه این مقاله نیز معادلات جریان آب حاکم در بتن ترک نخورده [۷] مورد استفاده قرار گرفته و احتمال رخداد شروع نشت در قسمت‌های با بتن ترک نخورده در طول عمر تونل محاسبه شده است.

1 Chunxiang Qian , et al.

2 Sang SoonPark, et al.

3 Jiro Murata, et al.

4 Carola Edvardsen, et al.

5 Healing

6 Static

7 Expanding

8 Reliability Analysis

9 Probability of failure

10 Reliability index

11 First Order Reliability Method

$$F_{X_i}(x_i) = r_i \Rightarrow x_i = F_{X_i}^{-1}(r_i) \quad (۸)$$

شبیه‌سازی مونت کارلو مبتنی بر تکرار انجام می‌پذیرد. در هر تکرار شبیه‌سازی با جایگذاری هر یک از مقادیر متغیرهای تصادفی در معادلات حالات حدی می‌توان وقوع حالت خرابی، که متناظر با محاسبه مقداری کوچکتر از صفر برای تابع حالات حدی مورد نظر است، در هر تکرار شبیه‌سازی به نحو زیر محاسبه نمود [۸]:

$$p_f(t) = j(t) = \int \dots \int I[G(x, t) \leq 0] f_X(x) dx \quad (۹)$$

که در آن $I[\]$ یک تابع نشانگر می‌باشد که مقدار آن ۱ است اگر \square صحیح و صفر است اگر \square غلط باشد. در اینجا نشانگر نقش شناسایی دامنه انتگرال‌گیری را به خود گرفته است. حال اگر X_j عبارت باشد از Z امین بردار مشاهداتی تصادفی اخذ شده از $f_X()$ ، آنگاه با استفاده از مبحث آمارگیری نمونه مستقیماً نتیجه‌گیری می‌شود که [۸]:

$$p_f(t) \approx j_1(t) = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[G(x_j \leq 0)] \quad (۱۰)$$

شایان ذکر است که در رابطه فوق N تعداد کل تکرارهای شبیه‌سازی و $G(x_j, t)$ مقدار تابع حدی مورد نظر در تکرار j ام و در زمان t است. تعداد لازم شبیه‌سازی برای یک تراز مشخصی از اطمینان از اهمیت برخوردار می‌باشد. لذا اولین تخمین از عدد N شبیه‌سازی‌ها برای تراز اطمینان داده شده C و با احتمال خرابی P_f می‌تواند از رابطه زیر بدست آید [۸]:

$$N > \frac{-\ln(1-C)}{P_f} \quad (۱۱)$$

در ادامه مکانیزم نشت در بتن ترک خورده و ترک نخورده به ترتیب ارائه می‌شود.

۳- مدل نشت آب در بتن ترک خورده تونل در حالت مستقل از زمان (ایستا)

سازه بتنی تونل‌ها در طول عمر خود در معرض انواع و اقسام آسیب‌ها قرار می‌گیرد (مکانیکی، حرارتی، شیمیایی). معمولاً اکثر این آسیب‌ها و خسارات بهره‌برداری به حدی نیستند که باعث تخریب کلی بتن و ایجاد مشکلات ایمنی در سازه گردند. با این حال، با گذشت زمان فرسایش جمع شده و منجر به ریزترک و در نهایت تغییرات نفوذپذیری می‌گردد. مدلی که برای تحلیل جریان اولیه آب از طریق ترک در بتن تونل مورد استفاده قرار می‌گیرد (جریان قبل از ترمیم خودبخودی) از تئوری صفحات موازی مشتق شده است [۵]. این مدل حالتی را توصیف می‌کند که در آن یک مایع تراکم

غیر خطی می‌پردازد. این روش نیازمند تکرار کافی شبیه‌سازی است و لذا ایراد اصلی آن در حل مسائل با تعداد بسیار زیاد متغیرهای تصادفی است به خصوص زمانی که هر تکرار شبیه‌سازی همراه با حل دستگاه معادلات غیرخطی باشد. لذا با توجه به اینکه در مساله حاضر تعداد متغیرهای تصادفی دارای توزیع نرمال زیاد نمی‌باشند با استفاده از نرم‌افزار متلب^۱ می‌توان با تعداد شبیه‌سازی‌های کافی به روش مونت کارلو به حل تابع حالات حدی فوق اقدام نمود [۸].

اگر یک رویداد نتیجه دو (و یا بیشتر) متغیر تصادفی پیوسته مثل X_1, X_2 باشد، احتمال آنکه آن رویداد برای مقادیر معلوم X_1, X_2 اتفاق افتد توسط تابع توزیع تجمعی مشترک زیر توضیح داده می‌شود [۸]:

$$F_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = P[(X_1 \leq x_1) \cap (X_2 \leq x_2)] \\ = \int_{-\infty}^{x_1} \int_{-\infty}^{x_2} f_{X_1, X_2}(u, v) du dv \quad (۴)$$

که در آن $F_{X_1, X_2}(x_1, x_2) \geq 0$ تابع چگالی احتمال مشترک می‌باشد. پر واضح است که اگر مشتقات جزئی وجود داشته باشند داریم [۸]:

$$f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) = \lim \left\{ P \left[\begin{array}{l} (x_1 < X_1 \leq x_1 + \delta x_1) \cap \\ (x_2 < X_2 \leq x_2 + \delta x_2) \end{array} \right] \right\} \\ = \frac{\partial^2 F_{X_1, X_2}(x_1, x_2)}{\partial x_1 \partial x_2} \quad (۵)$$

و مقدار تابع همبستگی (کوواریانس) این دو متغیر برابر است با [۸]:

$$\text{cov}(X_1, X_2) = E[(X_1 - \mu_{X_1})(X_2 - \mu_{X_2})] \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (x_1 - \mu_{X_1})(x_2 - \mu_{X_2}) f_{X_1, X_2}(x_1, x_2) dx_1 dx_2 \quad (۶)$$

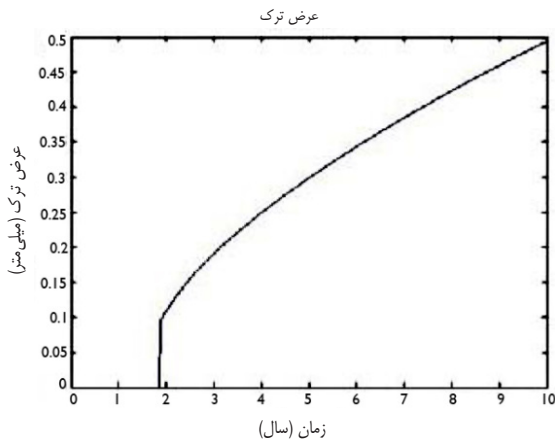
در حالتیکه تعداد متغیرهای تصادفی بیش از دو باشد با تعریف ماتریس همبستگی Σ و بردار میانگین μ برای متغیرهای تصادفی که همگی نرمال باشند، تابع چگالی احتمال مشترک این متغیرهای تصادفی به نحو زیر تعریف می‌شود [۸]:

$$f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{p/2} |\Sigma|^{1/2}} \exp \left\{ -\frac{1}{2} (x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu) \right\} \quad (۷)$$

در روش شبیه‌سازی مونت کارلو به منظور تولید متغیرهای تصادفی از تکنیک انتقال معکوس استفاده گردیده است اگر $F_{X_i}(x_i)$ در بازه (0,1) جای گیرد تکنیک انتقال معکوس از تولید یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت r_i ($0 \leq r_i \leq 1$) و معادل قراردادن آن با $F_{X_i}(x_i)$ استفاده می‌کند [۸].

افزایش عرض ترک با گذشت زمان در سازه هایی که ترک می خورند مطابق شکل ۱ می باشد [۴]. لذا در مطالعه حاضر به این روند رابطه لگاریتمی مطابق معادله ۱۴ برازش داده شده است. که در آن w عرض اولیه ترک بر حسب (میلیمتر)، t زمان بر حسب (سال) و α ضریب تصحیح می باشند.

$$w(t) = w_0 + \alpha * \ln(t) \quad (14)$$



شکل ۱: نمودار افزایش عرض ترک با گذشت زمان [۴]

Fig. 1. Crack width increasing over time

با برازش داده های موجود در شکل ۱ به رابطه ۱۴ مقادیر این پارامترها تعیین شده و در رابطه ۱۵ ارائه گردیده اند. لازم به ذکر است که در این مقاله رابطه ۱۵ در شبیه سازی مونت کارلو و تعیین احتمال خرابی با استفاده از رابطه ۱۲ مورد استفاده قرار گرفته است. با اینحال مقدار پارامتر α در رابطه ۱۴ مورد تحلیل حساسیت قرار گرفته اند که نتایج آن در شکل ۲ و شکل ۳ نمایش داده شده است.

$$w(t) = 0.01 + 0.2 * \ln(t) \quad (15)$$

۶- بتن ترک نخورده در تونلها

کاربرد مدل تراوش آب در بتن ترک نخورده مربوط به زمانی است که جریان تراوش تحت فشار شروع به عبور از مقطع عضو بتنی می کند. فرض می شود که این مقطع فاقد هر گونه ترکی بوده و به اصطلاح آب بند است. جیرو موراتا و همکاران در سال ۲۰۰۴ [۷] به صورت آزمایشگاهی و نظری نشان دادند زمانی که فشار آب برابر یا کمتر از ۰/۱۵ مگاپاسکال است، جریان تراوش به شکل جریان دارسی عمل می کند و زمانی که از ۰/۱۵ مگاپاسکال بیشتر می شود، جریان تراوش ترکیبی از جریان تراوش انتشاری و جریان تراوش دارسی می شود.

ناپذیر بین صفحات موازی که در آن جریان آرام به طور کامل توسعه یافته است، جریان دارد. معادله ای که به منظور برآورد جریان آب از طریق یک شکاف موازی (ترک های راست و هموار) بدست می آید برای کاربرد در مورد بتن به نحو زیر ارائه می شود که به قانون مکعب مشهور است [۵]:

$$q = \frac{w^3 * 10^{-6} * L * \rho * g}{12 * \mu * \tau * m} * I \quad (12)$$

پارامترهای معادله فوق شامل w عرض ترک بر حسب (میلیمتر)، L طول ترک قابل مشاهده در سطح ساختار بر حسب (متر)، ρ چگالی آب بر حسب (کیلوگرم بر متر مکعب)، g شتاب گرانش بر حسب (متر بر مجذور ثانیه)، τ انحنای ترک، m چقرمگی ترک، μ ویسکوزیته آب بر حسب (کیلوگرم بر متر ثانیه)، q جریان آب در ترک های واقعی بر حسب (لیتر بر ثانیه)، I گرادیان هیدرولیکی (متر بر متر) می باشند.

باید توجه نمود که خصوصیت اصلی اختلاف بین ترک های واقعی و ترک های هموار (صاف)، انحنای و زبری بیشتر برای ترک های واقعی می باشد. بنابراین برای تغییر و اصلاح قانون مکعب، دو پارامتر انحنای ترک و m چقرمگی ترک، به صورت نشان داده شده در معادله ۱۲ وارد شده اند [۵].

۴- مدل نشست آب در بتن ترک خورده تونلها در حالت خود ترمیم

فرآیندهای شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی از قبیل تورم و هیدراسیون سیمان، رطوبت بلورهای کربنات کلسیم، مسدود شدن مسیر جریان ناخالصی آب و مسدود شدن مسیر جریان توسط ذرات شکسته شده بتن از سطح ترک به دلیل ترک خوردگی دلیلی بر ترمیم خودبخودی بتن می باشند. با اینحال مهمترین عاملی که ترمیم خودبخودی را تحت تاثیر قرار می دهد، میزان رطوبت کربنات کلسیم است. اثر کلسیم سفید در سطح ساختار بتن نشان دهنده تشکیل کربنات کلسیم در ترکها می باشد [۳].

با توجه به موارد فوق مقدار نشست آب در بتن خود ترمیم $q_1(t)$ با گذشت زمان با اصلاح معادله ۱۲ از رابطه زیر بدست می آید [۳]:

$$\frac{q_1(t)}{q} = 65 * w^{-1.05} * t^{(-1.30+4*w)} - 10^5 * w^{5.80} \quad (13)$$

در معادله فوق t زمان بر حسب (ساعت) می باشد.

۵- مدل نشست آب در بتن ترک خورده تونل در حالت گسترش یابنده

هنگامیکه ترک در بتن ایجاد می گردد عرض آن در سال های اولیه کم بوده ولی بعضاً با گذشت زمان و تحت تاثیر عوامل خارجی از قبیل بارهای وارده بر تونل، خوردگی و دیگر عوامل محیطی و بارگذاری افزایش می یابد.

$$\left(\gamma_i \cdot \frac{D_{md} + d_{md} (p_d = 0.15 \text{ mpa})}{d}\right) \leq 1 \Rightarrow$$

$$\left(\frac{\gamma_i}{d} \cdot (2 \cdot \xi \cdot \sqrt{\frac{t_d \cdot \gamma_c \cdot \gamma_p \cdot \beta_0^2}{t_d^{\frac{3}{7}}}})\right) +$$

$$\left(\sqrt{\frac{2 \cdot 0.15 \cdot 10^6 \cdot t_d \cdot \gamma_c \cdot \gamma_p \cdot k}{\rho}}\right) \leq 1 \quad (17)$$

پارامترهای معادلات فوق شامل ضریب سازه، d_{md} عمق نفوذ طراحی برای جریان تراوش دارسی بر حسب (متر)، D_{md} عمق نفوذ طراحی برای جریان تراوش انتشاری بر حسب (متر)، P_d فشار آب طراحی بر حسب (پاسکال)، t_d زمان کارکرد طراحی بر حسب (ثانیه)، ξ ضریب برای فشار آب، γ_f ضریب ایمنی، p_k مقدار مشخصه آب بر حسب (پاسکال)، γ_c ضریب مصالح بتن برای آب‌بندی برای ضریب تراوش، γ_p ضریب ایمنی، k ضریب نفوذ آزمایشگاهی (متر بر ثانیه)، β_0^2 ضریب انتشار آزمایشگاهی بر حسب (متر مربع بر ثانیه) می‌باشند.

۷- کاربرد مدل در تحلیل قابلیت اطمینان میزان نشت آب در یک سازه تونلی و تحلیل نتایج آن

تونل مترو با شعاع داخلی ۴/۴۲۵ متر و ضخامت بتن ۰/۶۰ متر در نظر گرفته شده است. هدف مشخص نمودن احتمال خرابی تونل در اثر نشت آب در مدت زمان ۵۰ سال می‌باشد. با تلفیق معادلات ۱۲ و ۱۳، تابع حالت حدی میزان نشت آب در بتن ترک‌خورده در تونل‌ها در حالت وجود ترک‌های خود ترمیم به صورت معادله ۱۸ نوشته می‌شود:

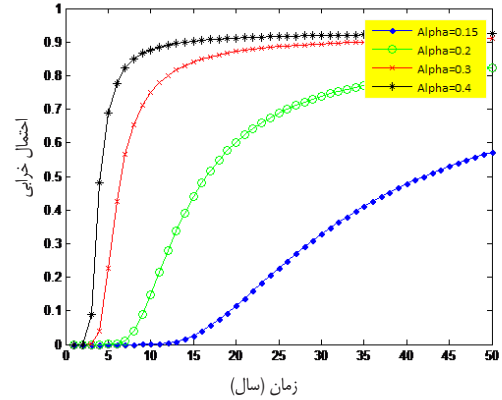
$$G_1(t) = SP_{lim} - ((65 \cdot w^{-1.05} \cdot t^{(-1.30+4 \cdot w)} - 10^5 \cdot w^{5.80}) \cdot \frac{w^3 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot I}{12 \cdot \mu \cdot \tau \cdot m}) \quad (18)$$

در حالتی که فرض شود عرض و طول ترک‌های موجود در بتن طی زمان مطالعه ثابت باقی می‌مانند، با استفاده از معادله ۱۲، تابع حالت حدی میزان نشت آب در بتن ترک‌خورده در تونل‌ها در ترک مستقل از زمان (ایستا) به صورت معادله ۱۹ نوشته می‌شود:

$$G_1(t) = SP_{lim} - \frac{w^3 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot I}{12 \cdot \mu \cdot \tau \cdot m} \quad (19)$$

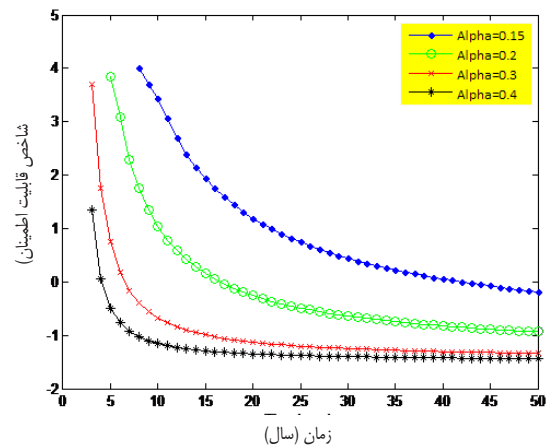
نهایتاً با تلفیق معادلات ۱۲ و ۱۵، تابع حالت حدی میزان نشت آب در بتن ترک‌خورده در تونل‌ها در حالت عرض ترک گسترش‌یابنده به صورت معادله ۲۰ خواهد بود:

$$G_1(t) = SP_{lim} - \frac{(0.01 + 0.2 \cdot \ln(t))^3 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot \rho \cdot g \cdot I}{12 \cdot \mu \cdot \tau \cdot m} \quad (20)$$



شکل ۲: نمودارهای احتمال خرابی مدل نشت آب با مقادیر مختلف α در بتن ترک‌خورده در حالت گسترش‌یابنده

Fig. 2. Probability of failure of the water leakage with different amounts of α in cracked concrete



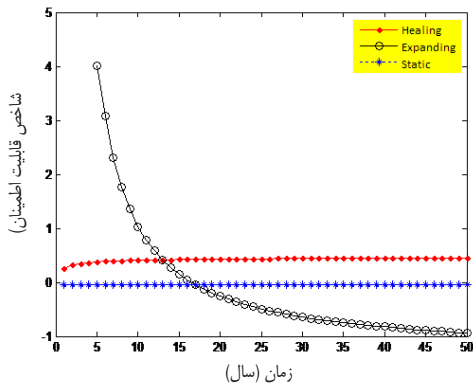
شکل ۳: نمودارهای شاخص قابلیت اطمینان مدل نشت آب با مقادیر مختلف α در بتن ترک‌خورده در حالت گسترش‌یابنده

Fig. 3. Reliability index of water leakage with different amounts of α in cracked concrete

یک عضو بتنی در تونل، در فشار آب کمتر از ۰/۱۵ مگاپاسکال زمانی آب‌بند محسوب می‌شود که رابطه زیر برقرار باشد [۷]:

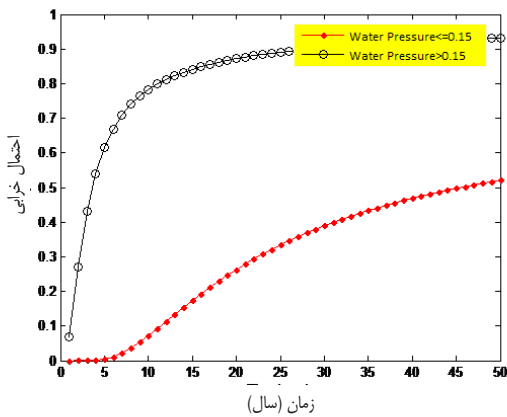
$$\left(\gamma_i \cdot \frac{d_{md}}{d}\right) \leq 1 \Rightarrow \left(\frac{\gamma_i}{d} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \gamma_f \cdot p_k \cdot t_d \cdot \gamma_c \cdot \gamma_p \cdot k}{\rho}}\right) \leq 1 \quad (16)$$

در حالیکه شرط آب‌بندی اعضاء بتنی تونل برای مقادیر فشار آب بیشتر از ۰/۱۵ مگا پاسکال عبارت است با [۷]:



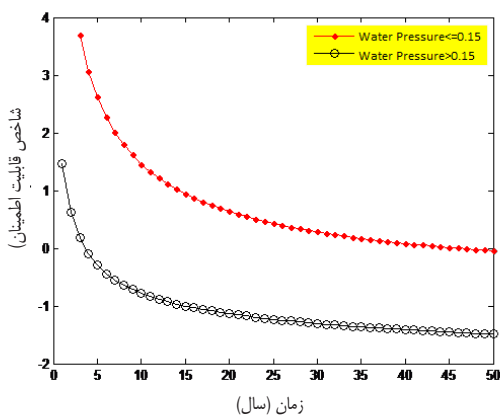
شکل ۵: نمودار شاخص قابلیت اطمینان در بتن ترک خورده در سه حالت ترک خود ترمیم، گسترش یابنده و ایستا

Fig. 5. Reliability index in cracked concrete with three conditions of self-healing crack, increasing and constant



شکل ۶: نمودار احتمال خرابی سازه در بتن ترک نخورده

Fig. 6. Probability of failure in un-cracked concrete



شکل ۷: نمودار شاخص قابلیت اطمینان سازه در بتن ترک نخورده

Fig. 7. Reliability index in un-cracked concrete

با توجه به معادلات ۱۶ و ۱۷، تابع احتمال رخداد شروع نشست در بتن ترک نخورده، در حالتیکه فشار آب اطراف سازه تونلی کمتر از ۰/۱۵ مگاپاسکال باشد برابر است با:

$$G_{um \leq 0.15} = R - \left(\frac{\gamma_i}{d} * \sqrt{\frac{2 * \gamma_f * p_k * t_d * \gamma_c * \gamma_p * k}{\rho}} \right) \quad (21)$$

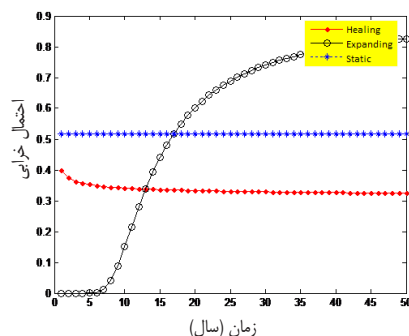
و برای فشار آب بیشتر از ۰/۱۵ مگا پاسکال برابر است با:

$$G_{um > 0.15} = R - \left(\frac{\gamma_i}{d} * (2 * \xi * \sqrt{\frac{t_d * \gamma_c * \gamma_p * \beta_0^2}{t_d^{\frac{3}{7}}}}) + \left(\sqrt{\frac{2 * 0.15 * 10^6 * t_d * \gamma_c * \gamma_p * k}{\rho}} \right) \right) \quad (22)$$

مقادیر میانگین و انحراف معیار متغیرهای تصادفی مورد استفاده در مدل‌های فوق در جدول ۱ آورده شده‌اند. شایان ذکر است در این

مدل‌ها پارامترهای $\gamma_f, p_k, k, \beta_0^2, \xi, w, L, m, \tau, I$ متغیرهای تصادفی نرمال بوده و دارای توزیع مشترک نرمال می‌باشند که مقادیر آنها بر اساس داده‌های آزمایشگاهی در جدول ۲ تا جدول ۷ تخمین زده شده‌اند. بدیهی است با در دست داشتن داده‌هایی بیشتر، می‌توان با استفاده از روش‌های آماری از قبیل تخمین حداکثر درست‌نمایی (MLE^۱) و سپس آزمون نیکویی برازش (GoF^۲) توزیع مناسبی برای متغیرهای تصادفی برازش داد.

با استفاده از رابطه ۱۲ احتمال خرابی و شاخص قابلیت اطمینان متناظر با آن برای توابع حالات حدی ارائه شده در روابط ۱۸ تا ۲۲ در طول عمر سازه تونل محاسبه شده‌اند و نتایج این تحلیل به صورت منحنی‌های احتمال خرابی و شاخص قابلیت اطمینان متغیر با زمان در شکل ۴ الی شکل ۷ ارائه گردیده‌اند.



شکل ۴: نمودار احتمال خرابی سازه در بتن ترک خورده در سه حالت ترک خود ترمیم، گسترش یابنده و ایستا

Fig. 4. Probability of failure in cracked concrete with three conditions of self-healing crack, increasing and constant

1 Maximum Likelihood Estimation

2 Goodness of Fit Test

جدول ۱: مقادیر پارامترهای توابع حالات حدی در بتن ترک خورده و ترک نخورده [۱۱,۷,۵]

Table 1. Limit state function parameters in cracked and un-cracked concrete

پارامتر	شرح	واحد	مقدار	میانگین	انحراف معیار
d	ضخامت سازه بتنی	m	۰/۶		
g	شتاب گرانش	m/s ²	۹/۸۱		
I	گرادیان هیدرولیکی	m/m		۱/۷۸۱	۱/۱۷۶
k	ضریب نفوذ آزمایشگاهی	m/s		۵/۳۷×۱۰ ^{-۱۲}	۶/۶۱×۱۰ ^{-۱۲}
L	طول ترک (طول ترک قابل مشاهده در سطح ساختار)	m		۱	۰/۲۰
m	زبری ترک	بدون بعد		۱/۱۱۸	۰/۰۱۳
P _k	مقدار مشخصه آب	pa		۰/۰۸۶×۱۰ ^۶	۰/۰۴۶×۱۰ ^۶
R	مقدار مجاز	بدون بعد		۱	
SP _{lim}	میزان مجاز نشت آب	lit/s		۱/۱۵×۱۰ ^{-۷}	
w	عرض ترک	mm		۰/۲۸۲	۰/۰۵۸۵
ρ	چگالی آب برای حالت بتن ترک خورده	kg/m ³		۱۰۰۰	
ρ	چگالی آب برای حالت بتن ترک نخورده	N/m ³		۹/۸۱×۱۰ ^۳	
μ	ویسکوزیته آب	kg/m.s		۹/۸۱×۱۰ ^{-۳}	
τ	انحنای ترک	بدون بعد		۱/۰۵۲	۰/۰۱۹۲
γ _i	ضریب سازه	بدون بعد		۱/۱	
ξ	ضریب برای فشار آب	بدون بعد		۰/۸۴۷	۰/۳۰۵
γ _f	ضریب ایمنی	بدون بعد		۱/۱۵	۰/۲۱۲
γ _c	ضریب مصالح بتن برای آببندی برای ضریب تراوش	بدون بعد		۲-۴	
γ _p	ضریب ایمنی	بدون بعد		۱/۳۰	
β ₀ ²	ضریب انتشار آزمایشگاهی	m ² /s		۲/۶۷×۱۰ ^{-۷}	۱/۲۶×۱۰ ^{-۷}

جدول ۳: مقادیر گرادیان هیدرولیکی [۵]

Table 3. Value of hydraulic gradient

پارامتر تصادفی	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۵	نمونه ۶	نمونه ۷
I	۰/۲۵	۰/۵	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳	۳/۵

جدول ۲: مقادیر عرض ترک در بتن ترک خورده [۵]

Table 2. Value of crack width in cracked concrete

پارامتر تصادفی	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵
w (mm)	۰/۲۴	۰/۳۰	۰/۲۱	۰/۳۶	۰/۳۰

جدول ۴: مقادیر ضریب انحنا و زبری ترک در بتن ترک خورده [۵]

Table 4. Value of tortuosity and toughness coefficients in cracked concrete

پارامتر تصادفی	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵
τ	۱/۰۵	۱/۰۸	۱/۰۳	۱/۰۴	۱/۰۶
m	۱/۱۱	۱/۱۰	۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۱۲

جدول ۵: مقادیر مشخصه فشار آب [۷]

Table 5. Characteristic value of water pressure

فشار آب	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵	نمونه ۶
p_k (mpa)	۰/۰۲۵	۰/۰۴۹	۰/۰۷۴	۰/۰۹۸	۰/۱۲۲	۰/۱۵

جدول ۶: ضریب برای مقادیر مختلف فشار آب [۷]

Table 6. Value of ξ For different amounts of water pressure

فشار آب p (mpa)	۰/۳۵	۰/۵۰	۱/۰۰	۱/۵۰
ξ	۰/۴۷۷	۰/۷۳۳	۱/۰۱۸	۱/۱۶۳

جدول ۷: مقادیر ضریب نفوذپذیری و ضریب انتشار بتن [۷]

Table 7. Value of diffusion coefficient and seepage coefficient in concrete

عیار سیمان kg/m^3	۲۲۰	۲۶۰	۳۰۰	۳۴۰
k (m/s)	$۱۴/۲۰ \times ۱۰^{-۱۲}$	$۵/۸۰ \times ۱۰^{-۱۲}$	$۰/۷۶ \times ۱۰^{-۱۲}$	$۰/۷۱ \times ۱۰^{-۱۲}$
β_0^2	$۴۳/۳ \times ۱۰^{-۸}$	$۲۹/۳۰ \times ۱۰^{-۸}$	$۱۹/۱۰ \times ۱۰^{-۸}$	۱۵×۱۰^{-۸}

۸- تحلیل حساسیت نتایج و بحث:

با فرض ترک خوردگی، سه حالت خود ترمیمی، ایستا و گسترش یابنده برای این ترک‌ها می‌توان فرض نمود. نتایج تحلیل قابلیت اطمینان سازه بتنی تونل مورد بررسی مبتنی بر روش مونت کارلو با ۱۰۰۰۰۰ تکرار شبیه سازی در مقابل نشست آب به شرح زیر می‌باشد:

در حالت خود ترمیم مطابق با منحنی‌های تابع احتمال و شاخص قابلیت اطمینان که به ترتیب در شکل ۴ و شکل ۵ ترسیم شده‌اند، احتمال خرابی از مقدار حدود ۴۰ درصد در سال اول به ۳۰ درصد در سال پنجاهم تقلیل پیدا می‌کند. این نمودار نشان دهنده آن است که با گذشت زمان به دلیل کاهش عرض ترک ناشی از خود ترمیمی احتمال خرابی سازه تونلی تحت تاثیر نشست در سال‌های آینده نسبت به سال‌های اولیه کاهش می‌یابد، با این حال

این کاهش احتمال و متناسب با آن افزایش شاخص قابلیت اطمینان چندان قابل توجه نیست.

در حالت ایستا احتمال خرابی در مدت پنجاه سال ثابت و برابر حدود ۵۰ درصد می‌باشد. این حالت در برخی از مقاطع تونل قابل مشاهده است و با استفاده از روش‌های تعمیراتی مناسب، نظیر تزریق در محل ترک‌ها می‌توان نسبت به متوقف نمودن و یا کاهش نشست اقدام نمود.

در حالت عرض ترک گسترش یابنده با زمان ابتدا مدل افزایش عرض ترک با گذشت زمان مطابق رابطه ۱۵ فرض گردید سپس با فرض مقادیر مختلف α از رابطه ۱۴، نتایج مورد تحلیل حساسیت قرار گرفت که شکل ۲ و شکل ۳ ارائه شده‌اند. مطابق با رابطه ۱۵ احتمال خرابی در ۵ سال اول عمر تونل نزدیک به صفر بوده و سپس با یک شیب افزایش تند، در ۴۵ سال آینده به مقادیر بسیار بالایی نظیر ۸۰٪ می‌رسد. هم‌چنین همانطوریکه در شکل ۲ و شکل ۳ نمایش داده شده است، تعیین و تدقیق مقدار α نقش بسزایی در برآورد دقیقتر احتمال خرابی و قابلیت اطمینان سازه تونل در برابر نشست آب در طول عمر آن دارد. با توجه به اهمیت نشست در تونل‌ها و نتایج این تحلیل، این مساله نیازمند بررسی‌های بیشتر مبتنی بر مدل سازی و آزمایش است.

در طراحی سازه‌های جدید آیین‌نامه‌ها با تعیین حدود شاخص‌های قابلیت اطمینان هدف برای هر گروه کاربری سازه و مودهای خرابی آن بر اساس ملاحظات ایمنی، اقتصادی، اجتماعی ضرایب کاهش ظرفیت و افزایش اثرات محیطی بارهای وارده را کالیبره می‌کنند. بدیهی است که شاخص قابلیت اطمینان نهایی همواره بزرگتر از شاخص قابلیت بهره‌برداری خواهد بود. به عنوان مثال در یک طبقه‌بندی کلی شاخص قابلیت اطمینان برای حالت حد بهره‌برداری بر اساس آیین‌نامه اروپا ۱/۵۰ و بر اساس آیین‌نامه هلند ۱/۸۰ می‌باشد [۱۲].

همانگونه که مشخص است شاخص قابلیت اطمینان برای حالت بهره‌برداری عدد بزرگی نیست و از طرفی این شاخص یک متغیر فنی و اقتصادی می‌باشد که اغلب توسط کارفرما بر اساس بودجه در دسترس و با رعایت الزامات قانونی و مقررات ایمنی در نظر گرفته می‌شود. لذا اگر برای شاخص قابلیت اطمینان هدف، مقدار بزرگی منظور شود به این معنی است که تواتر بازرسی‌ها و تعمیرات بیشتر می‌گردد و در نتیجه بودجه بیشتری مورد نیاز می‌باشد. به همین منظور در این مقاله شاخص قابلیت اطمینان برابر با صفر، معادل احتمال شکست ۵۰ درصد فرض شده است. در شکل ۳ تاثیر افزایش عرض ترک با گذشت زمان بر روی شاخص قابلیت اطمینان نمایش داده شده است. مطابق این شکل، برای افزایش عرض ترک چهار حالت در نظر گرفته شده است. در صورتیکه شاخص قابلیت اطمینان هدف، برابر صفر فرض گردد، در حالت $\alpha = 0.15$ در سال چهارم و یکم، در حالت $\alpha = 0.20$ در سال شانزدهم، در حالت $\alpha = 0.30$ در سال هفتم و در حالت $\alpha = 0.40$ در سال پنجم میزان احتمال نشست بیشتر از ۵۰ درصد می‌گردد. شایان ذکر است اگر شاخص قابلیت اطمینان هدف را ۱/۵۰ در نظر گرفته شود در این صورت شکست در حالت $\alpha = 0.15$ در سال هجدهم، در حالت $\alpha = 0.20$ در سال

برای تدقیق این مدل مورد نیاز است. همچنین در مورد سازه‌های مدفون در اعماق زیاد خاک اشباع نیز با وجود فرض عدم وجود ترک احتمال نشت در بتن به دلیل فشار بالای آن قابل توجه است، در خصوص این سازه‌ها نیز با تعیین ریسک مورد نظر روش تحلیل قابلیت اطمینان ارائه شده در این مقاله می‌تواند در طراحی ضخامت و تعیین مشخصات طرح اختلاط بتن به کار رود.

مراجع

- [1] M.o.R.U. Development, Railways technical maintenance and maintenance guide, Ministry of Roads, Department of Transportation, Tehran, 2012. [In Persian]
- [2] T.D.T.W. Life, Report on the Damaging Effects of Water on Tunnels During Their Working Life, (1999) 11-76.
- [3] C. Edvardsen, Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete, *Materials Journal*, 96(4) (1999) 448-454.
- [4] C.-Q. Li, S. Yang, Prediction of concrete crack width under combined reinforcement corrosion and applied load, *Journal of engineering mechanics*, 137(11) (2011) 722-731.
- [5] C. Qian, B. Huang, Y. Wang, M. Wu, Water seepage flow in concrete, *Construction and building materials*, 35 (2012) 491-496
- [6] S.-S. Park, S.-J. Kwon, S.H. Jung, S.-W. Lee, Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore structure, *Construction and Building Materials*, 27(1) (2012) 597-604.
- [7] J. Murata, Y. Ogihara, S. Koshikawa, Y. Itoh, Study on watertightness of concrete, *Materials Journal*, 101(2) (2004) 107-116.
- [8] R.E. Melchers, A.T. Beck, *Structural reliability analysis and prediction*, John Wiley & Sons, 2018.
- [9] A.S. Nowak, K.R. Collins, *Reliability of structures*, CRC Press, 2012.
- [10] S.H. Ghasemi, *Target reliability analysis for structures*, 2015. [In Persian]
- [11] A. Haack, Water leakages in subsurface facilities: Required watertightness, contractual matters, and methods of redevelopment, *Tunnelling and underground space technology*, 6(3) (1991) 273-282.
- [12] R. Breitenbücher, C. Gehlen, P. Schiessl, J. Van Den Hoonaard, T. Siemes, Service life design for the Western Scheldt Tunnel, in: Proc. 8th CANMET/ACI Intl. Conf. Durability of Building Materials and Components, CANMET Vancouver, 1999, pp. 3-15.
- [13] J.-H. Shin, S.-H. Kim, Y.-S. Shin, Long-term mechanical and hydraulic interaction and leakage evaluation of segmented tunnels, *Soils and Foundations*, 52(1) (2012)

نهم، در حالت $\alpha = 0.30$ در سال پنجم و در حالت $\alpha = 0.40$ در سال سوم رخ می‌دهد. لذا شکست، بین سال‌های شانزدهم تا بیستم محتمل تر به نظر می‌رسد و بر این اساس می‌توان زمان مناسب بازرسی و تعمیرات را مشخص نمود و این امر در نگهداری پیشگیرانه بسیار ضروری است.

در صورت فرض عدم وجود ترک، مطابق با شکل ۶ و شکل ۷ مشخص گردید به شرط اینکه فشار آب اطراف تونل کمتر از 0.15 مگاپاسکال باشد، احتمال شروع نشت تا سال سوم بهره‌برداری قابل صرفنظر بوده و پس از آن این احتمال در سال یازدهم به حدود 10% می‌رسد و در ادامه در سال پنجاهم به بیش از 50% می‌رسد. در صورتیکه فشار آب اطراف تونل بیش از 0.15 مگاپاسکال باشد با احتمال 7% شروع نشت از همان سال اول آغاز می‌گردد و در پایان سال پنجاهم به 93% می‌رسد. این حالت برای تونل‌های مدفون در اعماق زیاد با خاک اشباع رخ می‌دهد. نتایج تحلیل فوق نشان می‌دهد که در مورد این تونل‌ها حتی در صورت فرض عدم ترک خوردگی بتن، احتمال نشت آب بسیار بالاست. در صورتیکه آب‌بند بودن تونل جزو الزامات بهره‌برداری باشد باید با استفاده از مصالح مناسب و طراحی ضخامت مناسب قطعات بتنی طول عمر آب‌بندی را افزایش داد. شایان ذکر است در تمام مدل‌های فوق فرض شده است که متغیرهای تصادفی از تابع توزیع نرمال پیروی می‌کنند. بدیهی است که تغییر در نوع توزیع، میانگین و انحراف معیار هر یک از متغیرها موجب تغییر در نتایج تحلیل قابلیت اطمینان متناظر با مدل‌های فوق خواهد گردید. در پروژه‌های عمرانی با طراحی و اجرای آزمایش‌های محلی و آزمایشگاهی مناسب می‌توان این پارامترها را تعیین و تدقیق نمود.

۹- نتیجه‌گیری

نشت آب از سازه‌های بتنی و به ویژه تونل‌ها از دیدگاه قابلیت بهره‌برداری موضوعی در خور توجه است. در این مقاله ضمن ارائه مروری بر تئوری‌های موجود در خصوص نشت آب در بتن ترک خورده و ترک نخورده، به دلیل عدم قطعیت در اکثر پارامترهای موجود و جهت تخمین احتمال نشت آب از تونل‌ها، این مساله به صورت یک مساله تحلیل قابلیت اطمینان سازه‌ای مدل‌سازی شده و توابع حالت حدی معرفی شدند. برای ترک‌های موجود سه حالت خود ترمیم، ایستا، و گسترش یابنده فرض شده و احتمالات خرابی در طول 50 سال عمر بهره‌برداری از تونل با فرض حد آستانه مشخص و قابل قبول از نشت با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو محاسبه شدند. نتایج نشان می‌دهد که خود ترمیمی بتن نقش چندانی در کاهش احتمال نشت ندارد و از سوی دیگر تحلیل حساسیت مدل عرض ترک گسترش یابنده نشان داد معمولاً شاخص قابلیت اطمینان در تونل‌ها تحت تاثیر نشت آب بین سال‌های شانزدهم تا بیستم از شاخص قابلیت اطمینان هدف، که صفر در نظر گرفته شده است بیشتر می‌شود لذا باید برنامه‌ریزی جهت بازرسی منظم و تعمیرات، اتخاذ نمود. شایان ذکر است در سازه‌های با اهمیت بالا که نیاز به اطمینان بالا از آب‌بند بودن سازه تونل است، به آزمایش‌های بیشتری

- [18] J. Shin, D. Potts, L. Zdravkovic, The effect of pore-water pressure on NATM tunnel linings in decomposed granite soil, *Canadian geotechnical journal*, 42(6) (2005) 1585-1599.
- [19] E. Basler, *Untersuchungen über den Sicherheitsbegriff von Bauwerken*, ETH Zurich, 1960.
- [20] C.A. Cornell, A probability-based structural code, in: *Journal Proceedings*, 1969, pp. 974-985.
- [21] X. Chun-lei, G. Bo, S. Chuan-yi, Z. Yu, Analysis of External Water Pressure on the Support and Lining of Deep Mountain Tunnels below High Water Tables, *公路交通科技*, 8(1) (2013) 61-66.
- [22] Q. Pan, D. Dias, The effect of pore water pressure on tunnel face stability, *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 40(15) (2016) 2123-2136.
- 38-48.
- [14] B.A. Olumide, Numerical coupling of stress and seepage in the design of pressure tunnel under to high internal water pressure, *International Journal of Engineering and Technology*, 3(3) (2013) 235-244.
- [15] R.P. Chapuis, Numerical modeling of reservoirs or pipes in groundwater seepage, *Computers and Geotechnics*, 36(5) (2009) 895-901.
- [16] C.-M. Aldea, S.P. Shah, A. Karr, Permeability of cracked concrete, *Materials and structures*, 32(5) (1999) 370-376.
- [17] H.-S. Lee, Y.-J. Lee, S.-W. Seo, Y.-C. Hwang, A study on the treatment of external water pressure for the water pressure tunnel at the structural analysis of concrete lining, *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, 17(6) (2015) 653-664.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

C. Mohammadzadeh, A. Firouzi, M. Feyzi, Reliability Analysis of Water Leakage Tunnels with Cracked and Uncracked Concrete Using Monte Carlo Simulation, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(2) (2018) 409-418.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12415.5210

