

بررسی تأثیر مصالح تشکیل دهنده بر عملکرد بتن غلتکی رویه راه با استفاده از روش کاهش ابعاد و شبیه‌سازی مونت کارلو

مصطفی علی احمد، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
محمود میری*، دانشیار گروه عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان
محسن راشکی، استادیار گروه معماری، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان

Email: Mmiri@eng.usb.ac.ir

دریافت: ۹۶/۱۰/۰۴ - پذیرش: ۹۶/۱۱/۱۹

چکیده

سازه‌های مهندسی، در مراحل ساخت و بهره‌برداری، تحت تأثیر عدم قطعیت‌های ناشی از پارامترهای ابعادی، خصوصیات مواد و بارگذاری قرار دارند، که عملکرد سازه ساخته شده را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این میان، سازه‌های بتنی، به دلیل مشکلات اجرایی، شرایط محیطی و تنوع مواد تشکیل دهنده، بیش از سایر سازه‌ها تحت تأثیر اینگونه عدم قطعیت‌ها قرار دارند. در مقاله حاضر، عملکرد احتمالاتی بتن غلتکی مورد استفاده در راه‌سازی، حاوی مصالح ریزدانه لوماشل و پوزولان مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، نسبت آب به سیمان، مقدار پوزولان و مقدار مصالح ریزدانه لوماشل به عنوان متغیرهای تصادفی دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده و از ترکیب روش کاهش ابعاد و شبیه‌سازی مونت کارلو به منظور ارزیابی احتمالاتی این نوع بتن استفاده شده است. طراحی آزمایش بر مبنای روش کاهش ابعاد انجام گرفته و نمونه‌های ساخته شده تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و جذب آب قرار گرفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که احتمال خرابی ناشی از جذب آب مقدار ۰/۱۷ می‌باشد که بیشتر از احتمال خرابی ناشی از مقاومت فشاری (۰/۰۲۱) در بتن غلتکی است. همچنین، با در نظر گرفتن عملکرد بتن غلتکی به صورت سیستم، احتمال خرابی افزایش پیدا می‌کند و به مقدار ۰/۲۴ می‌رسد.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی روسازی راه، مقاومت فشاری، جذب آب، قابلیت اطمینان، احتمال خرابی

۱. مقدمه

می‌شود. این نوع بتن، کاربرد گسترده‌ای شامل پارکینگ خودرو و کامیون، بزرگراه‌ها، خیابان‌های شهری، پارکینگ‌های هوایی و انبارهای ذخیره‌سازی کالا دارد (ACI 325.10R-95، ۲۰۰۱). بتن غلتکی نیز همانند سایر سازه‌های بتنیف به دلیل اینکه کنترل خصوصیات

بتن غلتکی عبارت است از یک مخلوط نسبتاً خشک از مصالحی که به وسیله غلتک‌های ارتعاشی متراکم شده و به عنوان سطح رویه راه و یا در سد سازی به کار گرفته

بوده و لذا روش‌های عددی زیادی برای حل آن پیشنهاد شده که از آن جمله می‌توان به روش‌های شبیه‌سازی مونت کارلو، روش‌های مرتبه اول (FORM) و دوم (SORM) قابلیت اطمینان و روش کاهش ابعاد اشاره نمود.

۲-۱. مروری بر روش‌های قابلیت اطمینان

۲-۱-۱. روش شبیه‌سازی مونت کارلو

روش‌های شبیه‌سازی دقیق‌ترین جواب را برای ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌ها ارائه می‌دهند. روش شبیه‌سازی مونت کارلو متداول‌ترین روش شبیه‌سازی است که در سال ۱۹۴۹ توسط متروپولیس و یولام ارائه شده است (متروپولیس و یولام، ۱۹۴۹). اساس روش شبیه‌سازی مونت کارلو بر مبنای تولید نمونه‌های تصادفی است و احتمال خرابی در این روش از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$p_f = \int \dots \int I [g(x) \leq 0] f_x(x) dx \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n I [g(x_i) \leq 0] \approx \frac{n}{N} \quad (3)$$

در این روش، با تعریف تابع شمارنده I نمونه‌های موجود در ناحیه خرابی از نمونه‌های موجود در ناحیه سلامت جدا می‌شوند. تابع شمارنده I برای نمونه‌های در ناحیه خرابی برابر یک و برای نمونه‌های موجود در ناحیه سلامت صفر است. احتمال خرابی نیز به صورت نسبت تعداد نمونه موجود در ناحیه خرابی (n) به تعداد کل نمونه تولید شده (N) تعریف می‌شود. از جمله مزایای روش مونت کارلو محاسبه‌ی احتمال خرابی بدون نیاز به ساده‌سازی و وابسته نبودن به پیچیدگی‌های تابع شرایط حدی و ابعاد مسئله می‌باشد. اما استفاده از این روش در برآورد احتمال خرابی کم، به

دانه‌ها و رفتار بتن مشکل است، تحت تأثیر عدم قطعیت‌های مختلفی قرار دارد. این عدم قطعیت‌ها شامل نوع و درصد مواد، مشکلات ساخت و ساز و شرایط محیطی می‌شود.

هدف آیین‌نامه‌های طراحی مختلف، ارائه سطوح ایمنی و سلامت برای سازه می‌باشد و شاخص قابلیت اطمینان یکی از معیارهای ایمنی رایج در سازه‌های مهندسی است (قاسمی و نواک، ۲۰۱۷a). با استفاده از آنالیز قابلیت اطمینان می‌توان سطوح ایمنی سازه تحت تأثیر عدم قطعیت را محاسبه کرد (قاسمی و نواک، ۲۰۱۷b). بنا به تعریف، اگر در تحلیل عملکرد یک سیستم، از جمله بتن غلتکی، حالت حدی بین خرابی و سلامت با تابع شرایط حدی g(R,Q) بیان شود (که در آن R و Q به ترتیب نشان‌دهنده مقدار حد مجاز آیین‌نامه و مقدار مشاهده شده از آزمایش‌ها می‌باشند)، خرابی در سیستم زمانی اتفاق می‌افتد که رابطه g=R-Q < 0 ارضا گردد. در چنین حالتی، برای بیان احتمال خرابی خواهیم داشت (شی و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژائو و انو، ۱۹۹۹؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰):

$$p_f = p(R < Q) = p(g(R, Q) < 0) \quad (1)$$

رابطه فوق، با در نظر گرفتن تابع چگالی احتمال f(x) برای متغیرهای تصادفی، به صورت زیر نوشته می‌شود (شی و همکاران، ۲۰۱۵؛ ژائو و انو، ۱۹۹۹؛ ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰):

$$p_f = Prob [g(x) \leq 0] = \int_{g(x) \leq 0} f(x) dx \quad (2)$$

رابطه (۲) یکی از روابط اصلی ارزیابی قابلیت اطمینان است که حل تحلیلی آن بسیار دشوار بوده و مستلزم حل انتگرال چندگانه پیچیده‌ای است. لذا، روش‌های عددی متعددی به منظور حل آن به کار گرفته شده، که در ادامه، به‌طور مختصر مرور شده‌اند.

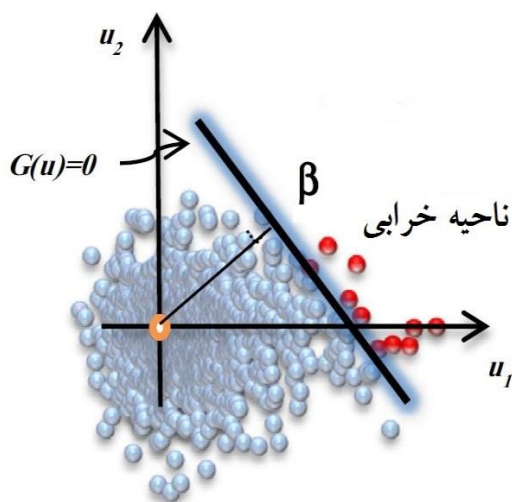
۲. قابلیت اطمینان

همانطور که گفته شد، حل تحلیلی معادله (۲) دشوار

‡ First Order Reliability Methods

‡ Second Order Reliability Methods

نقطه‌ی طراحی در این روش به نقطه‌ای روی تابع شرایط حدی که کمترین فاصله را تا مبدأ مختصات داراست، گفته می‌شود. به همین دلیل، روش‌های مرتبه اول و دوم به روش‌های مبتنی بر نقطه‌ی طراحی یا نقطه با بیشترین احتمال خرابی (MPP) مرسوم هستند. در استفاده از روش فرم ممکن است برخی مشکلات مانند عدم دقت، همگرایی و هزینه‌ی محاسباتی زیاد به وجود آید. با استفاده از روش مرتبه اول قابلیت اطمینان می‌توان تخمین دقیقی از احتمال خرابی برای مسائل با تابع شرایط حدی خطی به دست آورد. اما این روش برای مسائل با توابع حالت حدی غیرخطی یا دارای چند نقطه‌ی طراحی ناکارآمد می‌باشد (ژانگ و همکاران، ۲۰۱۰؛ لویز و همکاران، ۲۰۱۶). برای برطرف کردن این مشکل، روش‌های مرتبه دوم توسط محققین ارائه شدند. در این روش‌ها، از یک تابع مرتبه دوم برای ساده‌سازی توابع حالت حدی غیر خطی استفاده می‌شود.



شکل ۱. برآورد احتمال خرابی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و شاخص قابلیت اطمینان β با استفاده از روش FORM (راشکی و همکاران، ۲۰۱۴)

دلیل تعداد نمونه زیاد وقت‌گیر بوده و نیازمند هزینه محاسباتی زیادی است (وانگ و ما، ۲۰۱۷؛ بونستروم و کورتیس، ۲۰۱۵؛ لیو و چنگ، ۲۰۱۶). این مشکل، به خصوص برای توابع حالت حدی پیچیده، نمود بیشتری یافته و به همین دلیل باید از ترکیب آن با دیگر روش‌ها بهره گرفت، که از جمله می‌توان به ترکیب روش مونت کارلو با روش‌های متداول شامل کاهش ابعاد (RDM)، شبکه عصبی (NN)، سطح پاسخ (RSM) و کریجینگ^۱ اشاره کرد (اسکیورمنس و جمرت، ۲۰۰۵؛ یانگ و ژنگ، ۲۰۱۱؛ جانسون و نیلسون، ۲۰۰۸).

۲-۱-۲. روش‌های مرتبه اول و دوم قابلیت اطمینان

در روش مرتبه اول، قابلیت اطمینان متغیرهای تصادفی از فضای اصلی به فضای نرمال استاندارد شده به صورت زیر انتقال می‌یابد:

$$U = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (۴)$$

همچنین، تابع شرایط حدی در روش فرم با تابعی درجه‌ی یک (از بسط تیلور) تخمین زده می‌شود که کوتاه‌ترین فاصله‌ی هندسی مبدأ مختصات تا تابع تخمین زده شده (تابع شرایط حدی) را شاخص قابلیت اطمینان (β) می‌نامند. احتمال خرابی در این روش با استفاده از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود (قاسمی و نواک، ۲۰۱۷a؛ نواک و کالینز، ۲۰۰۰؛ کشته‌گر، ۲۰۱۶):

$$\beta = -\Phi^{-1}(P_f) \quad (۵)$$

در شکل ۱، نحوه برآورد احتمال خرابی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو و شاخص قابلیت اطمینان (β) روش FORM ارائه شده است.

^۱ Reduction dimension method

^۲ Neural networks

^۳ Response surface model

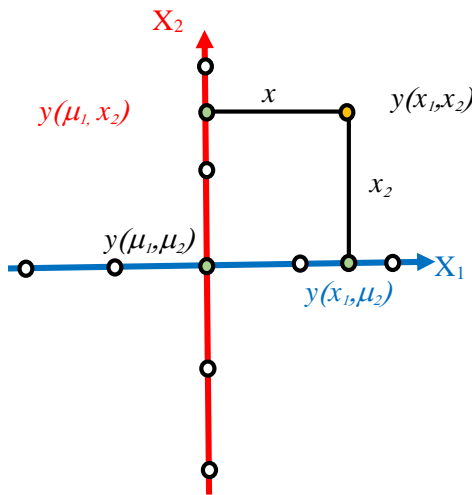
^۴ Kriging

^۵ Most probable point of failure

۱-۲-۳. روش کاهش ابعاد

با دو متغیر ($N=2$) باشد تجزیه تابع فوق به صورت زیر است (شکل ۲):

$$Y(x) \cong \hat{y}(x) = y(x_1, \mu_2) + y(\mu_1, x_2) - y(\mu_1, \mu_2) \quad (۸)$$



شکل ۲. برآورد مقدار تابع برای دو متغیر X_1 و X_2 با استفاده از روش کاهش ابعاد

حل معادله‌ی (۷) در مقایسه با حل یک انتگرال چندبعدي، ساده‌تر و کارآمدتر است. به عنوان مثال، انتگرال (۶) زمانی که دو متغیر وجود داشته باشند به شکل ساده شده‌ی زیر بیان می‌شود:

$$\begin{aligned} \mu_y = E(\hat{y}(x)) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} [y(x_1, \mu_2) + y(\mu_1, x_2) - y(\mu_1, \mu_2)] f(x) dx \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} y(x_1, \mu_2) f(x_1) dx_1 + \int_{-\infty}^{+\infty} y(\mu_1, x_2) f(x_2) dx_2 - y(\mu_1, \mu_2) \end{aligned} \quad (۹)$$

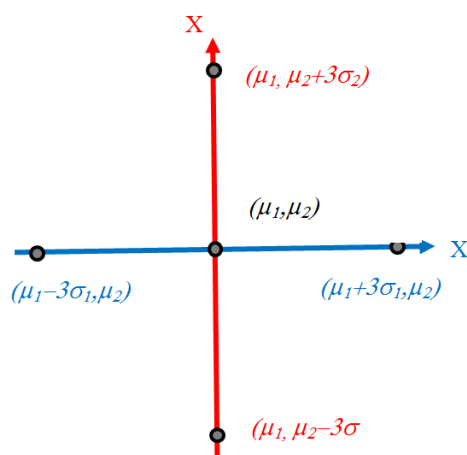
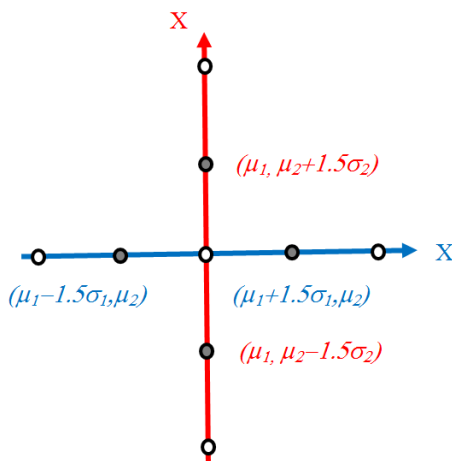
رحمان و شو (۲۰۰۴) روش کاهش ابعاد را برای حل انتگرال‌های عددی چندبعدي ارائه دادند. با توجه به اینکه حل انتگرال‌های قابلیت اطمینان، زمانی که تعداد متغیرهای تصادفی بیش از سه یا چهار باشد، نیازمند صرف وقت و هزینه‌ی محاسباتی زیاد است. لذا، با استفاده از این روش می‌توان به جای حل یک انتگرال چندبعدي، با تبدیل آن به چند انتگرال یک‌بعدي ساده‌تر به حل مسئله پرداخت. روش کاهش ابعاد برای حل انتگرال‌های چندبعدي به شکل زیر به کار می‌رود:

$$E(y(x)) = \int_{-\infty}^{+\infty} \dots \int_{-\infty}^{+\infty} y(x) f(x) dx \quad (۶)$$

که در آن E امید ریاضی، $f(x)$ نشان‌دهنده‌ی تابع چگالی احتمال و $y(x)$ تابع عملکردی حقیقی، مشتق‌پذیر و چندبعدي که به بردار متغیرهای تصادفی x ($x=[x_1, \dots, x_N]$) وابسته است. حل رابطه‌ی (۶) بسیار دشوار و گاهی غیر ممکن است. با استفاده از روش کاهش ابعاد تابع $y(x)$ را می‌توان به صورت زیر به یک تابع یک‌بعدي تجزیه کرد:

$$Y(x) \cong \hat{y}(x) = \sum_{i=1}^N y(\mu_1, \dots, \mu_{i-1}, x_i, \mu_{i+1}, \dots, \mu_N) - (N-1)y(\mu_1, \dots, \mu_N) \quad (۷)$$

که در آن μ_i مقدار میانگین متغیر x_i و N تعداد متغیرهای طراحی است. در صورتی که $y(x)=y(x_1, x_2)$



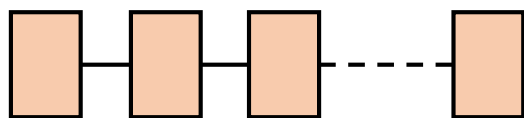
شکل ۳. نمونه برداری محوری بر مبنای روش کاهش ابعاد (لی و همکاران، ۲۰۱۲)

استفاده کردند. نتایج نشان داد که روش کاهش ابعاد در برآورد احتمال خرابی می‌تواند بسیار دقیق‌تر از روش‌های مرتبه اول قابلیت اطمینان و بسیار کارآمدتر از روش‌های مرتبه دوم قابلیت اطمینان باشد و علاوه بر این، احتمال خرابی محاسبه شده در روش کاهش ابعاد بسیار نزدیک به روش شبیه‌سازی مونت کارلو است. در پژوهشی دیگر، لی و همکاران (۲۰۱۰) به بررسی قابلیت اطمینان سیستم‌های سری با روش کاهش ابعاد پرداختند که نشان‌دهنده دقت بیشتر روش کاهش ابعاد در مقایسه با روش‌های مبتنی بر FORM در مسئله قابلیت اطمینان سیستم بود.

۲-۲. قابلیت اطمینان سیستم

معمولاً هر عضو سازه‌ای از چند قسمت تشکیل شده که خرابی هر جزء بر عملکرد سیستم سازه تأثیرگذار است. با توجه به ارتباط مدهای شکست سازه‌ها، سیستم‌های سازه‌ای را می‌توان به سه نوع سیستم‌های سری (شکل ۴)، موازی (شکل ۵) و ترکیبی تقسیم کرد. سیستم‌های سری یا زنجیره‌ای، به این دلیل که خرابی هر جزء باعث خرابی کل سیستم می‌شود، به عنوان ضعیف‌ترین نوع سیستم‌ها شناخته می‌شوند. احتمال خرابی برای یک سیستم سری به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p_f^{series} = p\left[\bigcup_{i=1}^N G_i < 0\right] \quad (10)$$



شکل ۴. نمونه‌ای از یک سیستم سازه‌ای سری

در سیستم‌های موازی، خرابی سیستم زمانی اتفاق می‌افتد که تمام اجزای سیستم دچار خرابی شوند. احتمال خرابی برای یک سیستم موازی به صورت زیر

در مقایسه با دیگر روش‌ها، تبدیل یک انتگرال چندبعدی به چند انتگرال یک‌بعدی باعث افزایش دقت می‌شود. همچنین، حل N انتگرال یک‌بعدی ساده‌تر از حل یک انتگرال N بعدی است. روش کاهش ابعاد، در مقایسه با سایر روش‌ها، نیازمند محاسبه‌ی حساسیت هر بخش پاسخ نیست (لی و ژانگ، ۲۰۱۱؛ لی و همکاران، ۲۰۰۸). با ترکیب این روش و دیگر روش‌های قابلیت اطمینان، می‌توان به برآورد احتمالاتی سازه دست یافت. برای n متغیر تصادفی، روش کاهش ابعاد به $2n+1$ یا $4n+1$ نمونه که شامل نقطه‌ی طراحی می‌شوند (شکل ۳)، نیاز دارد (لی و همکاران، ۲۰۱۲؛ یان و وانگ، ۲۰۰۸). محققین زیادی از روش کاهش ابعاد با ترکیب دیگر روش‌ها بهره گرفته‌اند. لی و همکاران (۲۰۱۲) روش نمونه برداری محوری بر اساس روش کاهش ابعاد را برای بهینه‌سازی ارائه دادند. در این روش، با تغییر هر متغیر تصادفی، سایر متغیرها روی مقدار میانگین قرار دارند. روش بر پایه‌ی تعیین خطی از مقادیر پاسخ در محدوده‌ی نمونه برداری و تغییر تعداد و موقعیت نمونه برداری‌ها استوار است. حتی اگر تابع شرایط حدی غیر خطی باشد، به دلیل نمونه برداری محوری، رفتار هر متغیر تصادفی را در محدوده‌ی نمونه برداری محوری می‌توان خطی در نظر گرفت.

ژانگ و پاندی (۲۰۱۴) به ارزیابی آنالیز حساسیت با استفاده از روش کاهش ابعاد پرداخته و نشان دادند که در روش کاهش ابعاد، به دلیل اینکه تابع پاسخ به وسیله‌ی چند تابع تک‌متغیره تقریب زده می‌شود، کاهش قابل توجهی در ارزیابی مورد نیاز برای آنالیز حساسیت صورت می‌گیرد.

لی و همکاران (۲۰۰۸) برای محاسبه احتمال خرابی از روش کاهش ابعاد در بهینه‌سازی مبتنی بر قابلیت اطمینان (RBD^o) سیستم‌های غیرخطی و چندبعدی

¹ Reliability-based design optimization

بررسی تأثیر مصالح تشکیل دهنده بر عملکرد بتن غلتکی رویه راه با استفاده از روش کاهش ابعاد و شبیه سازی مونت کارلو

مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه در مخلوط بتن غلتکی روسازی راه پرداختند و در این مطالعات اعتبار روش مورد استفاده مورد تأیید محققین قرار گرفت. همچنین، مشخص شد که رفتار بتن غلتکی در قبال استفاده از مواد آسفالتی بازیافتی مختلف و با درصدها و جنس قیر متفاوت تقریباً یکسان است.

کنگ و همکاران (۲۰۰۲) به ارزیابی قابلیت اطمینان بتن مسلح تحت تأثیر خوردگی ناشی از کلراید پرداختند. در مطالعات آنها، نسبت آب به سیمان و مدت زمان عمل‌آوری به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که روش مونت کارلو یک روش مؤثر برای بررسی خوردگی ناشی از کلراید در بتن است.

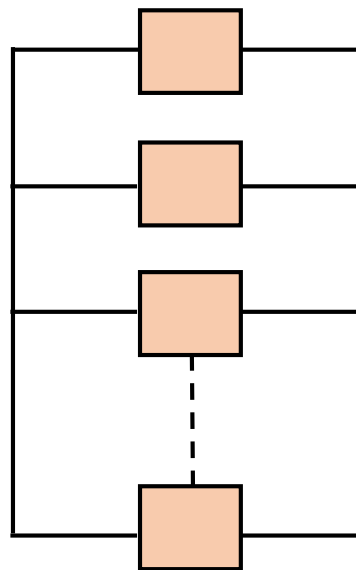
چو (۲۰۰۷) برای پیش‌بینی آسیب‌پذیری سازه‌های بتنی در برابر سیکل‌های ذوب و انجماد از روش سطح پاسخ استفاده کرد. مقایسه بین نتایج پیش‌بینی‌های روش سطح پاسخ و مطالعات تجربی نشان داد که روش سطح پاسخ روشی مناسب برای پیش‌بینی احتمال خرابی سازه در چرخه‌های ذوب و انجماد و ارزیابی عمر سازه‌های بتنی می‌باشد.

گونیشی و همکاران (۲۰۱۴) به بهینه‌سازی مخلوط بتن حاوی متاکائولین و خاکستر بادی، به عنوان مواد جایگزین سیمان، و با استفاده از روش سطح پاسخ پرداختند. در این بررسی‌ها، محققین مخلوطی که از مطالعات نظری روش سطح پاسخ بهینه‌ترین جواب‌ها را دارا بود در شرایط آزمایشگاهی ساخته و مشاهده شد که بهینه‌ترین جواب تجربی را نیز دارد.

طی مطالعه‌ای، رضایی‌فر و همکاران (۲۰۱۶) با استفاده از روش سطح پاسخ به بهینه‌سازی بتن ساخته شده با خرده لاستیک و متاکائولین پرداختند. در این مطالعات، از خرده لاستیک به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی ریزدانه و از متاکائولین به عنوان جایگزین

ارائه می‌شود (لی و همکاران، ۲۰۱۰؛ نائس و همکاران، ۲۰۰۹؛ راشکی و همکاران، ۲۰۱۴):

$$P_f^{parallel} = P\left[\bigcap_{i=1}^N G_i < 0\right] \quad (11)$$



شکل ۵. نمونه‌ای از یک سیستم سازه‌ای موازی

سیستم‌های ترکیبی نیز مخلوطی از سیستم‌های سری و موازی هستند. در این پژوهش، برای در نظر گرفتن اثر همزمان مدهای خرابی و با توجه به اینکه خرابی ناشی از هر مد خرابی در عملکرد کل سیستم سازه‌ی بتن غلتکی اثرگذار است، مسئله به صورت سیستم سری در نظر گرفته شد.

با استفاده از روش‌های فوق‌الذکر و به منظور بررسی قابلیت اعتماد در سازه‌های بتنی، مطالعات مختلفی صورت گرفته و محققین زیادی به ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌های بتنی پرداخته‌اند. عمادی و مدنی (۱۳۹۶) به مدل‌سازی مقاومت فشاری بتن غلتکی با استفاده از شبکه مصنوعی پرداختند و نتیجه گرفتند که با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی می‌توان مقاومت فشاری بتن غلتکی را در سن دلخواه و در زمان کوتاه پیش‌بینی کرد. کریمی گوغری و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از مدل رگرسیون خطی، به پیش‌بینی درصد

آن در جدول ۲ ارائه شده است (ASTM C 127، ۲۰۰۱؛ ASTM C 128، ۲۰۰۱). ضمن آنکه حداکثر اندازه سنگدانه‌های درشت ۱۹ mm بوده است. نمونه مصالح ریزدانه لوماشل (به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه‌های ریز) در شکل ۶ نشان داده شده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی سیمان پرتلند نوع ۲ مورد استفاده

مقدار موجود	خصوصیت فیزیکی
۳۱۱۰	نرمی (cm ² /gr)
۰/۰۸	غلظت نرمال انبساط اتوکلاو (%)
۱۸۳	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۲۳۸	زمان گیرش نهایی (دقیقه)
۲۶/۵	۳ روز
۳۴/۴	مقاومت فشاری ۷ روز
۴۵/۱	مقاومت فشاری (MPa) ۲۸ روز

جدول ۲. مشخصات مصالح مورد استفاده.

ماده	وزن	جذب
	مخصوص	آب
	(kg/m ³)	(%)
درشت دانه	۲۶۷۳	۰/۷۱
ریزدانه استاندارد	۲۶۴۲	۰/۷۸
ریزدانه لوماشل	۲۴۹۵	۱/۹۳۶



شکل ۶. مصالح ریزدانه لوماشل

سیمان استفاده شد. هدف از بهینه‌سازی مخلوط، دستیابی به بیشترین مقاومت فشاری همراه با کمترین جذب آب بود. مطالعات آماری تطابق خوبی بین روش تجربی و پیش‌بینی‌های روش نظری با یک میانگین خطای ۳/۳ درصد نشان داد.

با توجه به موارد فوق، به نظر می‌رسد که با بررسی عملکرد احتمالاتی انواع بتن‌ها تحت عوامل مختلف می‌توان به شناسایی و درک بهتر رفتار سازه‌های بتنی نائل شده و در جهت پیشگیری از خرابی آن‌ها اقدام نمود. به همین دلیل، در این پژوهش، عملکرد احتمالاتی بتن غلتکی دارای افزودنی جایگزین سیمان، با ترکیب روش شبیه‌سازی مونت کارلو و روش کاهش ابعاد مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور، نسبت آب به سیمان، مقدار پوزولان و مقدار مصالح ریزدانه لوماشل (به عنوان جایگزین بخشی از مصالح ریزدانه استاندارد) به عنوان متغیر تصادفی دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شده و آزمایش مقاومت فشاری و جذب آب روی نمونه‌ها انجام شده است. با توجه به اینکه خرابی هر کدام از مدهای مقاومت فشاری و جذب آب در عملکرد سیستم تأثیرگذار است، در ادامه، عملکرد سازه به صورت سیستم سری در نظر گرفته شد.

۳. برنامه آزمایشگاهی

۳-۱. مواد مصرفی

برای ساخت نمونه‌های بتن غلتکی از سیمان تیپ ۲ با وزن مخصوص ۳۰۱۵ kg/m³ (بر اساس استاندارد ASTM C 188) و مشخصات مندرج در جدول ۱، استفاده شد (ASTM C 188، ۲۰۰۳). مشخصات مصالح سنگی مورد استفاده نیز مطابق استانداردهای ASTM C 127 و ASTM C 128 تعیین شده که مقادیر

می‌شود. سپس، درصد رطوبت متناظر با بیشترین چگالی به عنوان درصد رطوبت بهینه انتخاب می‌گردد که در این پژوهش نسبت آب به سیمان ۰/۵۵ به عنوان مقدار بهینه محاسبه گردید. طراحی آزمایش به گونه‌ای انجام گرفته که فضای مناسبی را برای پیش‌بینی به وسیله روش کاهش ابعاد فراهم کند. برای این منظور، نسبت آب به سیمان بین ۰/۴۵ تا ۰/۶۵، پوزولان بین صفر تا ۴۰ درصد وزنی سیمان و مصالح ریزدانه لوماشل بین صفر تا ۶۰ درصد وزنی مصالح ریزدانه به عنوان تغییرات این متغیرهای تصادفی انتخاب شدند.

ساخت بتن غلتکی در آزمایشگاه بر اساس استاندارد ASTM C 1435 در قالب‌های استوانه‌ای انجام گرفت (ASTM C 1435، ۱۹۹۹). قالب‌ها توسط سه لایه ده سانتی‌متری از بتن تازه پر شده و هر لایه به وسیله چکش لرزه‌ای ۱۰ کیلوگرمی با قدرت ۱۵۰۰ وات و ۱۸۹۰ ضربه در دقیقه متراکم گردید. برای تراکم لایه سوم از بست‌های فلزی که در بالای قالب قرار گرفته می‌شد، استفاده شده است و پس از متراکم کردن لایه سوم، سطح نمونه‌ها به وسیله خط‌کش صاف گردید. در ۲۴ ساعت ابتدایی، برای جلوگیری از تبخیر آب، نمونه‌ها توسط روکش پلاستیک محافظت شدند و پس از خارج کردن نمونه‌ها از قالب و تا رسیدن به سن آزمایش در آب عمل‌آوری شدند (شکل ۷).

۴. آزمایش‌های انجام شده و نتایج حاصل

در این پژوهش، آزمایش مقاومت فشاری در سنین مختلف مطابق استاندارد ASTM C 39 و آزمایش جذب آب روی نمونه‌ها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری بر اساس استاندارد ASTM C 642 انجام گرفته است (ASTM C 39، ۲۰۱۴؛ ASTM C 642، ۲۰۰۶).

آب مورد استفاده برای ساخت نمونه‌ها آب شرب و خصوصیات آن در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. مشخصات آب شرب مورد استفاده

غلظت (مقدار)	پارامتر شیمیایی
۷/۰±۷۱/۲۱	pH
۲±۶۸۳/۳۱	EC (μS/cm)
۰/۰±۷/۰۱	کدورت (NTU)
۰/۰±۰۴/۰۱	Fe (mg/L)
۰/۰±۱۲	Mn (mg/L)
۴۱/۱±۲/۴	سولفات (mg/L)
۲۸/۰±۱/۱۵	Na (mg/L)
۶/۱±۳/۲	NO ₃ (mg/L)
۴۷/۰±۹/۱۸	Cl

۲-۳. طرح اختلاط و روش ساخت نمونه‌های

بتن غلتکی

همان‌طور که گفته شد، در تحلیل قابلیت اطمینان، هدف بررسی عدم قطعیت‌ها در سازه می‌باشد که شامل عدم قطعیت ناشی از مواد، خطاهای انسانی، بارگذاری و دیگر عدم قطعیت‌های موجود، می‌شود. کنترل دقیق مقدار مواد در کارهای بتنی عملاً ممکن نمی‌باشد و برای این منظور نسبت آب به سیمان، مقدار پوزولان و مقدار مصالح ریزدانه لوماشل به عنوان متغیرهای تصادفی دارای عدم قطعیت در نظر گرفته شدند.

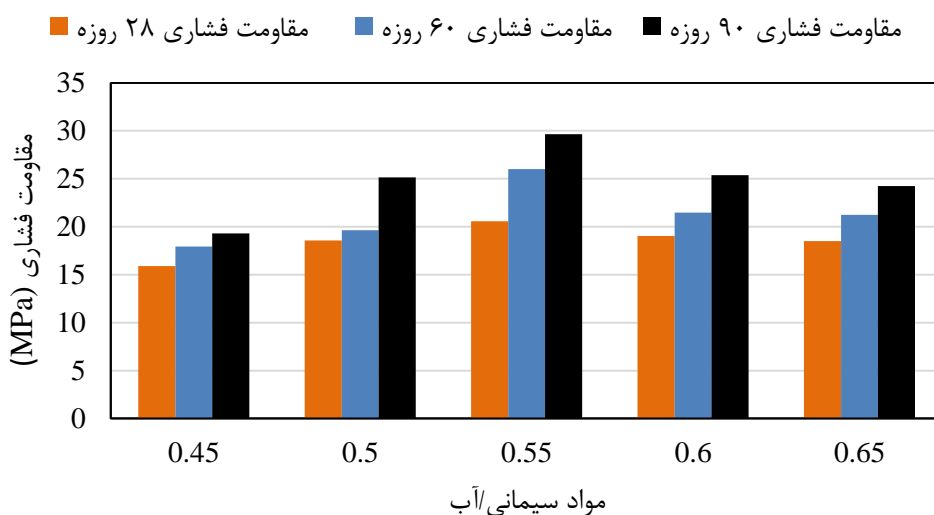
برای محاسبه طرح اختلاط بتن غلتکی در این پژوهش، از روش خاکی (روش چگالی حداکثر) ارائه شده در نشریه شماره ۳۵۴ معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور (۱۳۸۸) استفاده شده است. در این روش، نمونه‌ها با درصد‌های رطوبت مختلف متراکم شده و چگالی تر یا خشک آن‌ها محاسبه

۴-۱. نتایج مقاومت فشاری

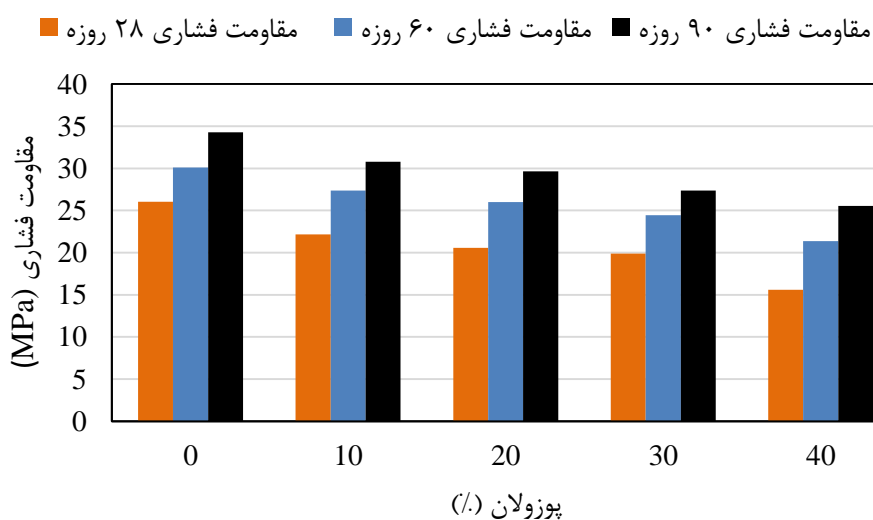
روند تغییر مقاومت فشاری برای مقادیر مختلف نسبت آب به مواد سیمانی، درصد‌های مختلف پوزولان و همچنین مقادیر مختلف لوماشل در سنین مختلف در شکل‌های ۸ تا ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۷. عمل آوری نمونه‌ها در آب

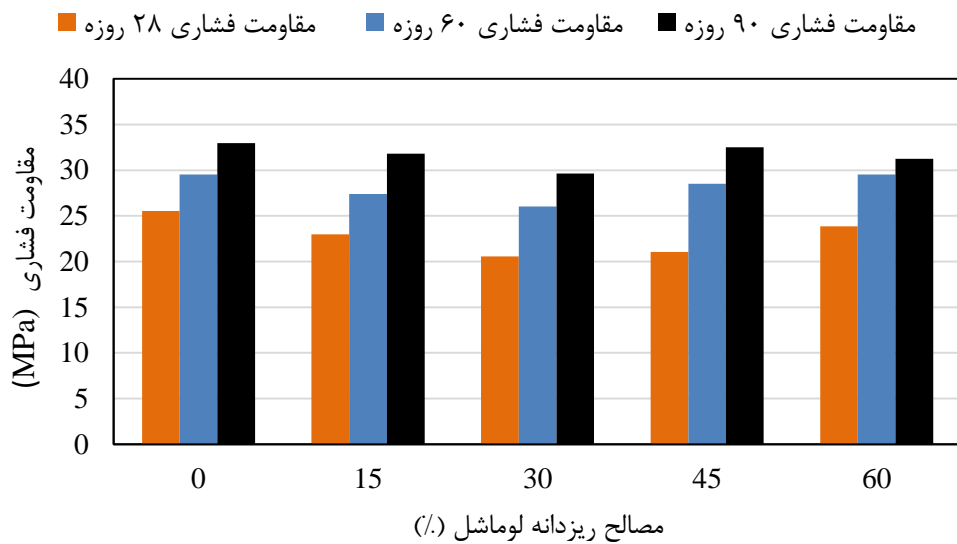


شکل ۸. روند تغییر مقاومت فشاری برای نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی



شکل ۹. روند تغییر مقاومت فشاری برای مقادیر مختلف پوزولان

بررسی تأثیر مصالح تشکیل دهنده بر عملکرد بتن غلتکی رویه راه با استفاده از روش کاهش ابعاد و شبیه سازی مونت کارلو

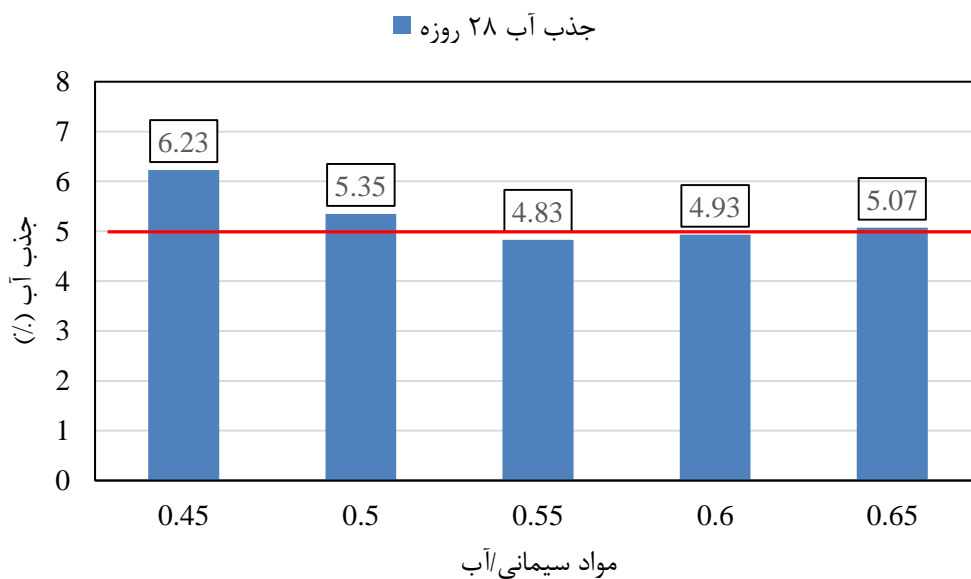


شکل ۱۰. روند تغییر مقاومت فشاری برای مقادیر مختلف مصالح ریزدانه لوماشل

به مواد سیمانی متغیری بودند، با توجه با تأثیر مستقیم درصد رطوبت مخلوط با تراکم نمونه‌ها، جذب آب به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرد. در شکل ۱۱، روند تغییر جذب آب برای نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی ارائه شده است.

۴-۲. نتایج آزمایش جذب آب

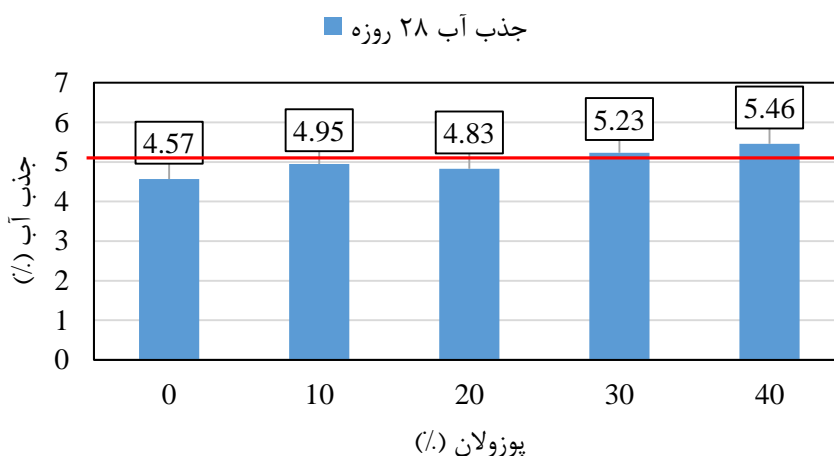
تراکم مخلوط عامل تعیین‌کننده در خواص مخلوط، به ویژه جذب آب، می‌باشد. مخلوط‌هایی که به نحو مناسب متراکم شده‌اند از جذب آب کم و مطلوب‌تری برخوردار هستند. در طرح‌هایی که دارای نسبت‌های آب



شکل ۱۱. روند تغییر جذب آب برای نسبت‌های مختلف آب به مواد سیمانی

ترتیب افزایش ۲ و ۴/۷ درصدی جذب آب مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱۲ که در آن اثر پوزولان بر جذب آب نشان داده شده، می‌توان نتیجه گرفت که افزایش میزان پوزولان به بیش از ۲۰ درصد، باعث افزایش جذب می‌گردد. این افزایش جذب آب را می‌توان به دلیل کاهش مقدار سیمان و جایگزینی پوزولان و در نتیجه کاهش چسبندگی مخلوط توجیه نمود.

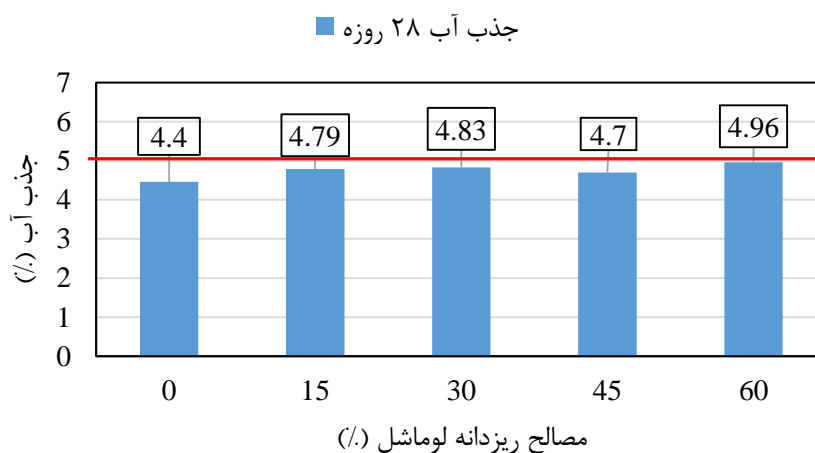
همانطور که مشاهده می‌شود، با افزایش نسبت آب به مواد سیمانی تا درصد رطوبت بهینه، جذب آب مخلوطها کاهش می‌یابد. اما هنگامی که نسبت آب به مواد سیمانی بیشتر از درصد رطوبت بهینه مخلوط می‌گردد، دوباره جذب آب افزایش می‌یابد. ولی روند افزایش جذب آب در مقایسه با مخلوطهای دارای آب کم، کندتر است. در طرحهای دارای نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۶ و ۰/۶۵، در مقایسه با مخلوط میانگین، به



شکل ۱۲. روند تغییر جذب آب برای درصدهای مختلف پوزولان

پوزولان ۱۰، ۳۰ و ۴۰ درصد به ترتیب ۲/۵، ۵/۷ و ۱۱/۵ درصد بیشتر از طرح میانگین جذب آب داشته‌اند. تغییرات آب با تغییر مقدار مصالح ریزدانه لوماشل در شکل ۱۳ نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۱۲ نشان داده شده، نمونه‌های فاقد پوزولان کمترین مقدار جذب آب را دارا بوده و میزان جذب آب طرح فاقد پوزولان ۵/۳ درصد کمتر از طرح با مقدار پوزولان میانگین است و طرحهای با



شکل ۱۳. روند تغییرات جذب آب برای درصدهای مختلف مصالح ریزدانه لوماشل

مجاز آئین نامه تشکیل گردید. به این صورت که برای هر نمونه‌ی تولید شده و برای هر آزمایش، اگر مقدار پیش‌بینی شده از نتایج آزمایشگاهی کمتر از حد آئین-نامه باشد، نمونه‌ی مورد نظر در ناحیه خرابی و اگر مقدار پیش‌بینی شده بیشتر از حد آئین‌نامه باشد، نمونه-ی مورد نظر در ناحیه سلامت قرار می‌گیرد. شاخص قابلیت اطمینان نیز برای هر مد خرابی از رابطه (۵) محاسبه گردید. سپس، مسئله به صورت سیستم در نظر گرفته شده و با توجه به اینکه خرابی هر کدام از مدهای مقاومت فشاری و جذب آب در عملکرد سیستم تأثیرگذار است، سیستم به صورت سری تحلیل شد. با توجه به نمونه‌های ساخته شده، برای نسبت آب به سیمان مقدار ۰/۵۵، برای پوزولان مقدار ۲۰٪ و برای مصالح ریزدانه لوماشل، مقدار ۳۰٪ به عنوان میانگین (μ_0) پارامترهای ورودی در نظر گرفته شدند. در جدول ۵، نتایج حاصل از تحلیل قابلیت اطمینان ارائه شده است. مشاهده می‌شود که در میان دو مد خرابی، کمترین مقدار شاخص قابلیت اطمینان و بیشترین مقدار احتمال خرابی بتن غلتکی در مد خرابی جذب آب به دست آمده است. شاخص قابلیت اطمینان برای مد خرابی مقاومت فشاری برابر ۲/۰۳۳۵ بیشترین مقدار و با مقدار ۰/۰۲۱ کمترین مقدار احتمال در میان دو مود خرابی را دارا می‌باشد.

جدول ۵. نتایج قابلیت اطمینان

مود خرابی	شاخص قابلیت اطمینان (β)	احتمال خرابی (P_f)
مقاومت فشاری	۲/۰۳۳۵	۰/۰۲۱
جذب آب	۰/۹۲	۰/۱۷
سیستم	۰/۶۸	۰/۲۴

هنگامی که مسئله به صورت سیستم حل می‌شود به دلیل اینکه تمام مدهای خرابی در نظر گرفته شده در

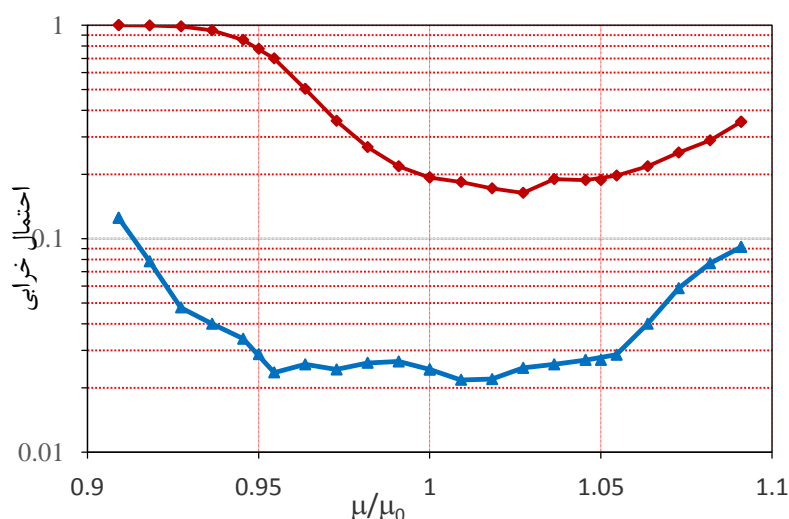
با بررسی شکل ۱۳ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار مصالح ریزدانه لوماشل، جذب آب نمونه‌ها افزایش می‌یابد. این افزایش مقدار جذب آب را می‌توان به دلیل مقدار جذب آب بیشتر مصالح ریزدانه لوماشل در مقایسه با مصالح ریزدانه استاندارد توجیه نمود. طرح بدون مصالح لوماشل دارای جذب آب ۴/۵ درصدی است. در حالی که این مقدار برای طرح میانگین ۴/۸ می‌باشد و افزایش ۷/۶ درصدی را نسبت به طرح فاقد مصالح ریزدانه لوماشل نشان می‌دهد. در مخلوط‌های با ۱۵ و ۴۵ درصد مصالح ریزدانه لوماشل، کاهش ۰/۸ و ۲/۶ درصدی جذب آب نسبت به طرح میانگین دیده می‌شود. در حالی که طرح آخر با ۶۰٪ مصالح ریزدانه لوماشل، ۲/۶ درصد کاهش جذب آب را نسبت به مخلوط میانگین از خود نشان داد. با بررسی نتایج مشاهده می‌شود که با وجود افزایش مصالح ریزدانه لوماشل، افزایش قابل ملاحظه‌ای در جذب آب نمونه‌ها ایجاد نشده و تغییرات در حد قابل قبولی است.

۵. بحث و بررسی نتایج

با توجه به آزمایش‌های انجام شده، نتایج آزمایش مقاومت فشاری و جذب آب به عنوان ورودی برای تحلیل قابلیت اطمینان به وسیله ترکیب روش شبیه سازی مونت کارلو و روش کاهش ابعاد در نظر گرفته شده و احتمال خرابی برای هر دو مد خرابی محاسبه گردید. برای محاسبه احتمال خرابی، ۵۰۰۰۰۰ نمونه تصادفی با روش شبیه‌سازی مونت کارلو تولید شده و نمونه‌ها با استفاده از روش کاهش ابعاد پیش‌بینی شدند. احتمال خرابی برای هر مود خرابی از رابطه (۳) محاسبه گردید که با استفاده از این رابطه می‌توان تعداد نمونه‌ی موجود در ناحیه خرابی و سلامت را برای هر مد خرابی محاسبه کرد. تابع شرایط حدی برای هر مد خرابی از تفاضل مقدار مشاهده شده برای هر آزمایش و مقدار

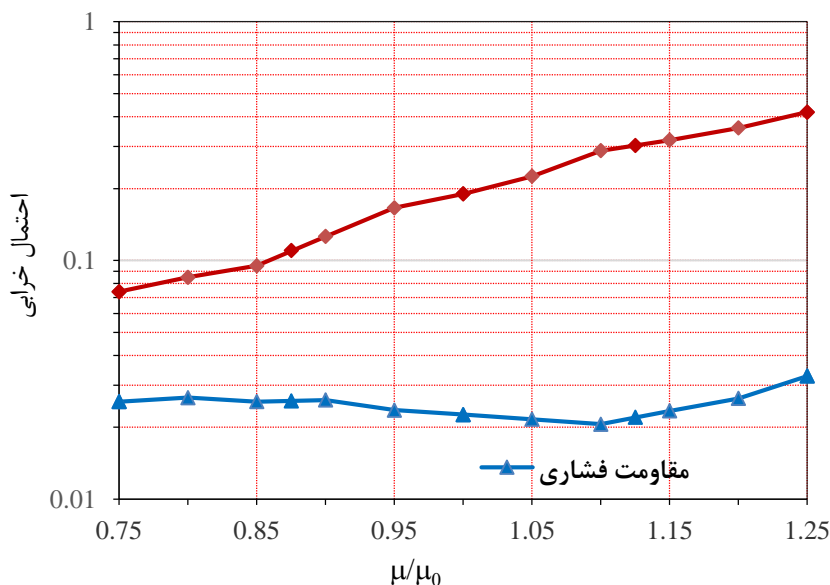
میانگین حاصل گردیده و با فاصله گرفتن از نقطه میانگین احتمال خرابی افزایش پیدا می‌کند. برای هر دو مد خرابی مقاومت فشاری و جذب آب، مقادیر احتمال خرابی قبل از نقطه میانگین بیشتر از مقادیر احتمال خرابی پس از نقطه میانگین می‌باشد. احتمال خرابی در نقطه با μ/μ_0 برابر ۱، برای مد خرابی مقاومت فشاری مقدار ۰/۰۲۴ و برای مد خرابی جذب آب ۰/۱۹۳ می‌باشد.

عملکرد سیستم بتن غلتکی اثرگذار هستند، مقدار شاخص قابلیت اطمینان افت کرده و احتمال خرابی افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۱۴، تغییرات احتمال خرابی با تغییرات نسبت آب به سیمان ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که احتمال خرابی ناشی از مد خرابی جذب آب بیشتر از احتمال خرابی ناشی از مقاومت فشاری است. کمترین مقدار احتمال خرابی برای هر دو مد خرابی بتن غلتکی در نقطه



شکل ۱۴. تغییرات احتمال خرابی با تغییر نسبت آب به سیمان

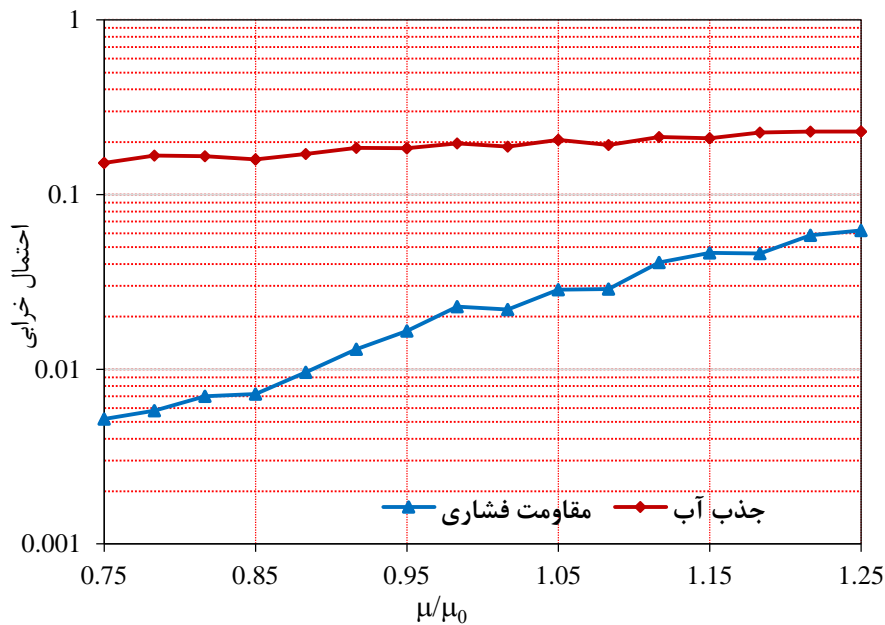
تغییرات احتمال خرابی با تغییر مقدار پوزولان نیز در شکل ۱۵ ارائه شده است.



شکل ۱۵. تغییرات احتمال خرابی با تغییر پوزولان

برای این متغیر تصادفی در مد خرابی جذب آب، احتمال خرابی تقریباً یکنواخت بوده و روند افزایشی با شیب ملایم دارد. برای این مد خرابی، در نقاط دارای μ/μ_0 برابر ۰/۷۵، ۱ و ۱/۲۵ مقدار احتمال خرابی به ترتیب ۰/۱۵۲، ۰/۱۸۸ و ۰/۲۳ می باشد. برای مد خرابی مقاومت فشاری، احتمال خرابی از مقدار کم ۰/۰۰۵ در نقطه با μ/μ_0 برابر ۰/۷۵ آغاز شده و در نقطه میانگین به مقدار ۰/۰۲۲ می رسد. مقایسه احتمال خرابی بتن غلتکی در این دو نقطه اختلاف ۷۷ درصدی را نشان می دهد اما با این وجود، مقدار احتمال خرابی برای هر دو نقطه عدد کوچکی است. در نقطه دارای بیشترین مقدار μ/μ_0 (دارای μ/μ_0 برابر ۱/۲۵) احتمال خرابی برای مد خرابی مقاومت فشاری ۰/۰۶۲ می باشد.

با توجه به شکل ۱۵ مشاهده می شود که برای متغیر تصادفی پوزولان، احتمال خرابی مدهای خرابی مقاومت فشاری و جذب آب روند افزایشی دارد. کمترین مقدار احتمال خرابی در نقطه دارای μ/μ_0 برابر ۰/۷۵ و به ترتیب برای مد خرابی مقاومت فشاری و جذب آب مقادیر ۰/۰۲۵ و ۰/۰۷۴ می باشد. در نقطه میانگین، احتمال خرابی برای مد خرابی مقاومت فشاری برابر ۰/۰۲۲ و برای مد خرابی جذب آب برابر ۰/۱۹ است. بیشترین مقدار احتمال خرابی برای هر دو مد خرابی در نقطه ای با مقدار μ/μ_0 برابر ۱/۲۵ به دست می آید. برای مقاومت فشاری مقادیر احتمال خرابی یکنواخت تر و با شیب ملایم تر تغییر می کند. اما برای جذب آب، روند افزایش احتمال خرابی تندتر است. در شکل ۱۶، تغییرات احتمال خرابی برای متغیر تصادفی سوم (مصالح ریزدانه لوماسل) ارائه شده است.



شکل ۱۶. تغییرات احتمال خرابی با تغییر مصالح ریزدانه لوماسل

روش شبیه سازی مونت کارلو و کاهش ابعاد و بر اساس متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده (نسبت آب به سیمان، مقدار پوزولان و مقدار مصالح ریزدانه لوماسل)، خلاصه نتایج زیر را می توان بیان کرد:

۶. نتیجه گیری

در این پژوهش، با توجه به ارزیابی قابلیت اطمینان انجام شده برای تعیین عملکرد بتن غلتکی با ترکیب

- در بین متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده، تغییرات احتمال خرابی برای نسبت آب به سیمان بیشتر از سایر متغیرها می باشد.

۷. تقدیر و تشکر

بخشی از این تحقیق توسط اداره کل راه و شهرسازی ایران شهر مورد حمایت قرار گرفته است. بدینوسیله از مساعدت مسئولین و کارشناسان محترم آن اداره کل تقدیر و تشکر می گردد. علاوه بر آن، آزمایش های مورد نظر در آزمایشگاه بتن دانشگاه سیستان و بلوچستان انجام شده که از زحمات کارشناسان و کارکنان مربوطه کمال تشکر و قدردانی را داریم.

- مد خرابی مقاومت فشاری کمترین احتمال خرابی را داشته و مد خرابی جذب آب بیشترین احتمال خرابی بتن غلتکی را داراست.

- در نظر گرفتن عملکرد بتن غلتکی به صورت سیستم (با توجه به تأثیر تمام مدهای خرابی)، سبب افزایش احتمال خرابی می شود.

- کمترین احتمال خرابی در نسبت آب به سیمان بهینه (نقطه میانگین) حاصل می گردد.

- با افزایش مصالح ریزدانه لوماشل و پوزولان، احتمال خرابی بتن غلتکی برای هر دو مد خرابی مقاومت فشاری و جذب آب افزایش پیدا می کند.

۸. مراجع

عمادی، م. و مدنی، س. ح. ۱۳۹۶. "مدلسازی مقاومت فشاری بتن غلتکی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی، انجیس و ماشین بردار پشتیبان". مهندسی زیرساخت های حمل و نقل، ۱۱(۳): ۷۹-۵۵.

کریمی گوغری، م.، حسنی، ا. و صفرنیا کپته، ت. ۱۳۹۴. "ارائه مدل رگرسیون خطی جهت پیش بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه در مخلوط بتن غلتکی روسازی". مهندسی حمل و نقل، ۶(۴): ۶۸۴-۶۷۱.

معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رئیس جمهور. ۱۳۸۸. "راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راه های کشور". نشریه ۳۵۴.

ACI 325.10R-95. 2001. "Report on roller-compacted concrete pavements". American Concrete Institute.

ASTM C 127. 2001. "Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of coarse aggregate". American Society for Testing and Materials.

ASTM C 128. 2001. "Standard test method for density, relative density (specific gravity), and absorption of fine aggregate". American Society for Testing and Materials.

ASTM C 1435. 1999. "Standard practice for molding roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating hammer". American Society for Testing and Materials.

ASTM C 188. 2003. "Standard test method for density of hydraulic cement". American Society for Testing and Materials.

ASTM C 39. 2014. "Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens". American Society for Testing and Materials.

ASTM C 642. 2006. "Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete". American Society for Testing and Materials.

Bonstrom, H. and Corotis, R. B. 2015. "Building portfolio seismic loss assessment using the first-order reliability method". Struct. Safety, 52: 113-120.

Cho, T. 2007. "Prediction of cyclic freeze-thaw damage in concrete structures based on response surface method". Constr. Build. Mater., 21(12): 2031-2040.

Ghasemi, S. A. and Nowak, A. S. 2017a. "Target reliability for bridges with consideration of ultimate limit state". Eng. Struct., 152: 226-237.

Ghasemi, S. A. and Nowak, A. S. 2017b. "Reliability index for non-normal distributions of limit state functions". Struct. Eng. Mech., 62(3).

- Güneyisi, E., Gesoğlu, M., Algin, Z. and Mermerdaş, K. 2014. "Optimization of concrete mixture with hybrid blends of metakaolin and fly ash using response surface method". *Compos. Part B: Eng.*, 60: 707-715.
- Jansson, T., Nilsson, L. and Moshfegh, R. 2008. "Reliability analysis of a sheet metal forming process using Monte Carlo analysis and metamodells". *J. Mater. Process. Technol.*, 202(1-3): 255-268.
- Keshtegar, B. 2016. "Chaotic conjugate stability transformation method for structural reliability analysis". *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 310: 866-885.
- Kong, J. S., Ababneh, A. N., Frangopol, D. M. and Xi, Y. 2002. "Reliability analysis of chloride penetration in saturated concrete". *Probab. Eng. Mech.*, 17(3): 305-315.
- Lee, G., Yook, S., Kang, K. and Choi, D. H. 2012. "Reliability-based design optimization using an enhanced dimension reduction method with variable sampling points". *Int. J. Precis. Eng. Man.*, 13(9): 1609-1618.
- Lee, I., Choi, K. K. and Gorsich, D. 2010. "System reliability-based design optimization using the MPP-based dimension reduction method". *Struct. Multidisc Optim.*, 41(6): 823-839.
- Lee, I., Choi, K. K., Du, L. and Gorsich, D. 2008. "Inverse analysis method using MPP-based dimension reduction for reliability-based design optimization of nonlinear and multi-dimensional systems". *Comp. Meth. Appl. Mech. Eng.*, 198(1): 14-27.
- Li, G. and Zhang, K., 2011. "A combined reliability analysis approach with dimension reduction method and maximum entropy method". *Struct. Multidisc Optim.*, 43(1): 121-134.
- Liu, L. L. and Cheng, Y. M. 2016. "Efficient system reliability analysis of soil slopes using multivariate adaptive regression splines-based Monte Carlo simulation". *Comp. Geotech.*, 79: 41-54.
- Lopez, R. H., Miguel, L. F. F., Belo, I. M. and Souza Cursi, J. E. 2014. "Advantages of employing a full characterization method over FORM in the reliability analysis of laminated composite plates". *Compos. Struct.*, 107: 635-642.
- Metropolis, N. and Ulam, S. 1949. "The Monte Carlo method". *The Am. Stat. Assoc.*, 44(247): 335-41.
- Naess, A., Leira, B. J. and Batsevych, O. 2009. "System reliability analysis by enhanced Monte Carlo simulation". *Struct. Safety*, 31(5): 349-355.
- Nowak, S. A. and Collins, K. R. 2000. "Reliability of structures". McGraw-Hill, New York.
- Rahman, S. and Xu, H. 2004. "A univariate dimension-reduction method for multi-dimensional integration in stochastic mechanics". *Probab. Eng. Mech.*, 19(4): 393-408.
- Rashki, M., Miri, M., Azhdary Moghaddam, M. 2014. "A simulation-based method for reliability based design optimization problems with highly nonlinear constraints". *Autom. Constr.*, 47: 24-36.
- Rezaifar, O., Hasanzadeh, M. and Gholhaki, M. 2016. "Concrete made with hybrid blends of crumb rubber and metakaolin: Optimization using Response Surface Method". *Constr. Build. Mater.*, 123: 59-68.
- Schueremans, L. and Van Gemert, D. 2005. "Benefit of splines and neural networks in simulation based structural reliability analysis". *Struct. Safety*, 27(3): 246-261.
- Shi, X., Teixeira, A. P., Zhang, J. and Guedes Soares, C. 2015. "Kriging response surface reliability analysis of a ship-stiffened plate with initial imperfections". *Struct. Infrastruct. Eng.*, 11(3): 1450-1465.
- Wang, G. and Ma, Z. 2017. "Hybrid particle swarm optimization for first-order reliability method". *Comp. Geotech.*, 81: 49-58.
- Yang, H. Z. and Zheng, W. 2011. "Metamodel approach for reliability-based design optimization of a steel catenary riser". *J. Mar. Sci. Technol.*, 16(2): 202-213.
- Youn, B. D. and Wang, P., 2008. "Bayesian reliability-based design optimization using eigenvector dimension reduction (EDR) method". *Struct. Multidisc Optim.*, 36(2): 107-123.
- Zhang, X. and Pandey, M. D. 2014. "An effective approximation for variance-based global sensitivity analysis". *Reliab. Eng. Sys. Safety*, 121: 164-174.
- Zhang, H., Mullen, R. L. and Muhanna, R. L. 2010. "Interval Monte Carlo methods for structural reliability". *Struct. Safety*, 32: 183-190.
- Zhao, Y. G. and Ono, T. 1999. "A general procedure for first/second-order reliability method (FORM/SORM)". *Struct. Safety*, 21(2): 95-112.