

تعیین درصد بهینه سنگدانه های درشت بتن بازیافتی مورد استفاده در محیط های خورنده براساس مدل کریجینگ

عبدالقیوم دهواری، محمود میری*، محمدرضا سهرابی
گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۰
بازنگری: ۱۳۹۸/۰۸/۲۱
پذیرش: ۱۳۹۸/۰۹/۱۰
ارائه آنلاین: ۱۳۹۸/۰۹/۱۸

کلمات کلیدی:

سنگدانه درشت بازیافتی
بهینه سازی
مقاومت الکتریکی
مدل کریجینگ
الگوریتم حرکت مولکول های گاز
ایده آل

خلاصه: در این مقاله، سنگدانه های درشت بتن پسماند پس از بازیافت بصورت سنگدانه های بازیافتی در مخلوط بتن برای بررسی تأثیر استفاده از آنها روی خصوصیات دوام و مکانیکی بتن در یک محیط خورنده استفاده شده اند. به این منظور پارامترهایی مانند جذب آب، تخلخل، مقاومت الکتریکی و مقاومت فشاری برای نمونه های ساخته شده در آزمایشگاه، اندازه گیری شده اند. در این تحقیق مدل های تخمین پارامترهای دوام و مکانیکی بتن با استفاده از روش مدل سازی کریجینگ بدست آمده اند و سپس این مدل ها با استفاده از الگوریتم بهینه سازی حرکت مولکول های گاز ایده آل به عنوان قیود مسأله بهینه سازی مورد ارزیابی قرار گرفته اند، و مقادیر بهینه تابع هدف یعنی میزان حداکثر استفاده از سنگدانه های درشت بازیافتی و حداقل میزان سیمان مصرفی برای دستیابی به یک بتن دوست دار محیط زیست بدست آمده اند. نتایج بهینه سازی نشان داده است در یک محیط با رطوبت ۷۰ درصد، غلظت یون کلرید ۳ درصد و دمای 23°C و در دامنه سطح خوردگی بالا با بهینه سازی تک هدفه نقطه بهینه دارای $20/33$ درصد سنگدانه درشت بازیافتی در نسبت آب به سیمان $0/40$ است. همچنین در فرآیند بهینه سازی چند هدفه و در دامنه سطح خوردگی بالا برای یک محیط با رطوبت ۷۰ درصد، غلظت یون کلرید ۵ درصد و دما 23°C نقطه طراحی با $18/34$ درصد سنگدانه درشت بازیافتی در نسبت آب به سیمان $0/40$ بدست آمده، که نتایج مشابه آن در بهینه سازی تک هدفه مشاهده نشده است.

۱- مقدمه

برای سنگدانه های طبیعی در تولید بتن استفاده شوند [۱-۳]. مشخصه اصلی سنگدانه های بازیافتی چسپندگی ملات به سطح آنها می باشد، که پاسخ گو برای تغییر رفتار مکانیکی همراه با کاهش مقاومت بتن سنگدانه های بازیافتی در مقایسه با بتن سنگدانه های طبیعی است [۴-۷]. اخیراً، روش مقاومت الکتریکی بتن برای ارزیابی خطر خوردگی میلگردهای فولادی در بتن بکارگیری شده است. در روش مقاومت الکتریکی، ارزیابی خوردگی میلگردهای فولادی در بتن براساس رابطه معکوس بین مقاومت الکتریکی بتن و میزان خوردگی بیان شده است. یو و همکاران^۱ [۹و۸] مشاهده کردند که فرآیند

محدود بودن منابع و حفظ کیفیت محیط زیست لزوم بازیافت پسماند مواد و مصالح غیر قابل مصرف را اجتناب ناپذیر ساخته است. امروزه با توجه به رشد جمعیت و مشکل زمین در شهرهای بزرگ برای ساخت و ساز لازم است ساختمان های قدیمی تخریب و ساختمان های بلند جدید جایگزین آنها شوند. به همین منظور، استفاده از مصالح تجدید ناپذیر، مانند سنگدانه های طبیعی نیاز دارد کاهش داده شود. سنگدانه های بازیافتی از شکستن بتن حاصل از تخریب ساختمان های غیر قابل بهره برداری بدست آمده اند و میتوانند بصورت یک جایگزین

* نویسنده عهده دار مکاتبات: mmiri@eng.usb.ac.ir



تحقیق ابتدا پارامترهای دوام و مکانیکی بتن سنگدانه‌های بازیافتی در بخش ۲، کار آزمایشگاهی، بدست آمده‌اند. سپس از روش مدل‌سازی کریجینگ، بخش ۳، برای بدست آوردن توابع حالت حدی مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن از داده‌های آزمایشگاهی بخش ۲ تحقیق که براساس نیازمندی مدل‌سازی به روش کریجینگ بدست آمده‌اند، استفاده شده است. در پایان از این مدل‌ها در بخش ۴ تحقیق به عنوان قیود مسأله بهینه‌سازی استفاده شده است.

۱-۲- روش مدل تخمین کریجینگ

استفاده از روش کریجینگ برای درون‌یابی آماری در حوزه‌های مختلف علوم و مهندسی در حال گسترش است. کریجینگ یک الگوریتم تخمین کمترین مربعات است که برای درون‌یابی استفاده می‌شود. میانگین‌هایی که کریجینگ درون‌یابی می‌نماید مشاهداتی با واریانس مساوی صفر هستند (پیش‌بینی قطعی).

روش کریجینگ یک پاسخ قطعی برای یک فرآیند تصادفی فرض نموده و یک عملکرد پیش‌بینی نمودن عالی از خود نمایش می‌دهد، و همچنین می‌تواند خطای مربع میانگین را بدست بیاورد، از اینرو مورد توجه محققین قرار گرفته است. تخمینگر کریجینگ بصورت ذیل تعریف شده است [۱۶]:

$$\hat{f}(x^*) = \sum_{i=1}^n \beta_i f(x^{(i)}) \quad (1)$$

زمانی که n تعداد مشاهدات است $f(x^{(i)})$ در اینجا بصورت $f(x^{(i)}) = f^i$ $i = 1, \dots, n$ تعریف شده است. $x^{(i)}$ یک بردار مرکب از d مقدار $(x_1^{(i)}, x_d^{(i)})$ از عوامل در نقاط i ، و B_i وزن متناظر با مشاهده $f(x^{(i)})$ هستند. وزن‌ها به منظور تعریف یک تخمین‌گر بدون خطا با کمترین واریانس تخمین زده شده‌اند. پاسخ سیستم بصورت یک تابع تصادفی $f(x)$ رفتار نموده، که بصورت ذیل نوشته شده است:

$$f(x) = g(x) + \varepsilon(x) \quad (2)$$

تابع معین $g(x)$ میانگین $f(x)$ را بدست می‌دهد و $\varepsilon(x)$ بخش تصادفی مدل است که برخی فرضیات وابسته به نوع مدل

خوردگی فولاد مسلح کننده در بتن تحت کنترل مقاومت الکتریکی است و میزان خوردگی اگر چگالی جریان بالا باشد با افزایش مقاومت الکتریکی، کاهش پیدا می‌نماید. مدل‌های تجربی توسط یو و همکاران [۹ و ۸] برای مقاومت الکتریکی بتن بر حسب هر دو پارامترهای محیطی و مصالح بر پایه تحلیل رگرسیون غیرخطی داده‌های آزمایشگاهی ارائه شده است. مقاومت الکتریکی بتن در سال ۲۰۱۲ بوسیله ASTM C1۷۶۰ برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی حجمی استاندارد سازی شده است. در روش مقاومت الکتریکی حجمی (یا روش تک محوری) دو الکتروود روی سطح بتن (اغلب دو صفحه فلزی موازی) به همراه اسفنج مرطوب بین سطح بتن و فلز در دو طرف نمونه آزمایشی قرار داده می‌شوند. بطور کلی تنها نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای، منشوری یا هسته‌های گرفته شده از سازه‌های موجود در این روش استفاده شده است. علاوه بر این سرعت، توانایی آزمایش نمونه‌های مشابه در طی زمان بدون آسیب به سازه از قابلیت‌های منحصر به فرد این روش بیان شده‌اند [۱۱ و ۱۰]. هدف اصلی این تحقیق بدست آوردن مدل‌های کاربردی برای مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن با پارامترهای مهندسی که به آسانی قابلیت کمی سازی دارند تعریف شده است. تأثیر پارامترهای مهندسی مهم مانند رطوبت نسبی، دما، مقدار کلرید، مقدار سیمان و مقدار سنگدانه‌های درشت بتن بازیافتی در مقاومت الکتریکی بتن به عنوان شاخص ارزیابی میزان خطر خوردگی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. در این تحقیق، ابتدا مدل‌های پیش‌بینی برای مقاومت فشاری و مقاومت الکتریکی بتن براساس داده‌های آزمایشگاهی با دو پارامتر معین نسبت آب به سیمان و مقدار سنگدانه‌های درشت بتن بازیافتی براساس تئوری کریجینگ تعریف شده‌اند [۱۲-۱۷]، سپس این مدل‌ها با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی حرکت مولکول‌های گاز ایده‌آل در دو حالت تک هدفه و چند هدفه [۱۸-۲۲] برای بدست آوردن مقدار بهینه سنگدانه‌های درشت بتن بازیافتی و سیمان مصرفی در یک بتن دوستدار محیط زیست مورد ارزیابی قرار گرفته شده‌اند. نتایج تحلیل نشان‌دهنده دامنه استفاده متفاوت از سنگدانه‌های درشت بازیافتی و مقدار سیمان برای شرایط محیطی با سطح خطر خوردگی متوسط است. بطور خلاصه، هدف از این تحقیق حل یک مسأله بهینه‌سازی برای بدست آوردن مقدار استفاده حداکثر سنگدانه‌های درشت بازیافتی در مخلوط بتن مورد استفاده در یک محیط خورنده تعریف شده است. در این

چون این تحقیق روی بیشینه نمودن هدف تمرکز دارد، براساس اصول بیان شده برای این الگوریتم، به هر راه حل مطابق با مقدار تابع هزینه اش با استفاده از رابطه ذیل یک جرم اختصاص داده شده است: اینجا جرم مولکول i ام و $fit(i)$ مقدار تابع هزینه هر

$$m_i = \frac{1}{\sqrt{\sum (fit^2(i))}} \quad (5)$$

مولکول برای مسأله است. بهترین مولکول از طریق مقایسه جرم مولکولها پیدا شده است.

۱-۳-۳- محاسبه احتمال برخورد مولکولها

$$MCP = 1 - \exp(-0.63 \times iter) \quad (6)$$

۱-۳-۴- بدست آوردن سرعت و موقعیت جدید مولکولها

هر دو مولکول با احتمال برخورد مختص خودشان با همدیگر

$$(v_1^d)' = \frac{(m_1 - Em_2)}{(m_1 + m_2)} \times v_1^d \quad (7)$$

$$(v_2^d)' = \frac{(1 + E)m_1}{(m_1 + m_2)} \times v_2^d \quad (8)$$

برخورد می‌کنند یا بدون برخورد براساس رابطه سرعت در حال حرکت حفظ شده‌اند. مطابق با این پدیده، مراحل ذیل برای محاسبه سرعت و موقعیت جدید مولکولها انجام شده است.

۱-۳-۵- محاسبه سرعت مولکولها در حالت رخ دادن

برخورد

اینجا v_1^d نشان دهنده سرعت آغازین اولین مولکول قبل از

برخورد است، اگر چه فرض می‌شود $v_2^d = 0$ ، و متناظرا، $(v_1^d)'$ و

$(v_2^d)'$ نشان دهنده سرعت نهایی بعد از برخورد هستند، به ترتیب، d

بعد مسأله بهینه‌سازی تعریف شده است. در رخداد برخورد الاستیک، پارامتر E مساوی یک در نظر شده است، اما در معادله فوق، این پارامتر بصورت یک متغیر برای تضمین همگرایی در الگوریتم تعریف

کریجینگ انتخابی را پذیرفته است. در این روش وزنها چنان تعیین شده‌اند که واریانس کریجینگ ذیل

$$\text{var}(f(x^*) - f(x^*)) \quad (3)$$

تحت قید (بدون خطا بودن) ذیل کمینه شود.

$$\sum_{i=1}^n \beta_i = 1 \quad (4)$$

این یک مسأله بهینه‌سازی کلاسیک با قید مساوی است. تئوری ضرایب لاگرانژ به منظور انجام این کار در این مسأله بکارگیری شده، که منجر به حل یک سیستم معادله خطی شده است [۱۲-۱۷].

۱-۳-۳- الگوریتم بهینه‌سازی حرکت مولکولهای گاز ایده‌آل

مولکولهای گاز دارای سرعت مؤثری هستند که مرتبط با دما و جرم آنها است. برای استفاده از معادله سرعت در الگوریتم حرکت مولکولهای گاز، یک دمای اولیه تعریف و به هر مولکول اختصاص داده شده است. علاوه براین، جرم هر مولکول در ارتباط با مقدار تابع هدف تعیین شده است. در مراحل اولیه فرآیند بهینه‌سازی، یک جستجوی سریع گسترده ای در دامنه مسأله با قراردادن یک مقدار بزرگ برای دما انجام می‌پذیرد. به تدریج، زمانی که محاسبات بیشتری انجام و نواحی بهینه کشف شود، سرعت مولکولها با کاهش در دمای آنها افت می‌نماید. علاوه براین، مولکولهای گاز در حال حرکت با یکدیگر با یک احتمال مشخص برخورد می‌نمایند. برخوردها باعث توزیع انرژی موجود در مولکولها و بصورت یک نتیجه باعث تغییر سرعت و موقعیت آنها می‌شوند. احتمال برخورد با ادامه فرآیند بهینه‌سازی افزایش پیدا می‌نماید، مولکولها اطراف نقاط بهینه کلی انباشته و در پایان منجر به پیدا نمودن نقطه بهینه کلی می‌گردند [۱۹].

۱-۳-۱- مراحل انجام الگوریتم بهینه‌سازی تک هدفه حرکت

مولکولهای گاز ایده‌آل

۱-۳-۱- آماده سازی

استفاده از توزیع یکنواخت برای تولید جمعیت اولیه و انتخاب دمای اولیه ۲۷۳ درجه کلوین.

۱-۳-۲- محاسبه جرم مولکولها

بعد از تعیین نمودن سرعت جدید هر مولکول، موقعیت جدید با استفاده از معادله ذیل بدست آمده است:

$$(x_i^d)' = x_i^d + rand \times (v_i^d)' \quad (15)$$

۱-۳-۱-۷- معیار همگرایی

معیار خیلی معمول توقف فرآیند بهینه‌سازی در الگوریتم های فرا ابتکاری تعداد ماکزیمم تکرار ها با و یا بدون رخ داد همگرایی است.

۱-۳-۲- فرآیند انجام الگوریتم بهینه‌سازی چند هدفه حرکت

مولکول‌های گاز ایده‌آل

۱-۳-۲-۱- تعریف پارامترهای اولیه شامل بیشینه تعداد تکرارها، اندازه جمعیت، اندازه بایگانی، تعداد تقسیم بندی فضای جستجو و دمای اولیه، دمای اولیه مساوی ۱۰۰۰ در تکرار اول از فرآیند بهینه‌سازی قرار داده شده است.

۱-۳-۲-۲- جمعیت اولیه از مولکول‌ها با یک توزیع یکنواخت تصادفی در دامنه مسأله تولید شده است.

۱-۳-۲-۳- تابع هزینه برای هر مولکول ارزیابی شده و به هر مولکول با توجه به مقدار متناظر تابع هزینه آن جرم اختصاص داده شده است.

۱-۳-۲-۴- راه‌حل‌های نامغلوب بدست آورده می‌شوند.

۱-۳-۲-۵- بایگانی با راه‌حل‌های نامغلوب بدست آمده بروز رسانی می‌شود. در این مرحله اگر بایگانی پر شده باشد، برای ورود هر راه حل نامغلوب به داخل بایگانی، یک مولکول از ناحیه پر جمعیت بایگانی حذف خواهد شد.

۱-۳-۲-۶- دامنه راه‌حل‌های بدست آورده شده و یک شبکه مکعبی تقسیم بندی شده تعریف می‌شود.

۱-۳-۲-۷- محاسبه مقادیر CP و E. احتمال برخورد در این مسأله با استفاده از فرمول های ذیل تعیین شده است.

$$CP = \frac{iter}{MaxIt} \quad (16)$$

$$E = 1 - CP \quad (17)$$

۱-۳-۲-۸- بروزرسانی سرعت و موقعیت هر مولکول

۱-۳-۲-۹- اگر $rand \leq CP$ مولکول در حال حرکت با مولکول

شده است. به همین منظور، در چند مرحله اول فرآیند بهینه‌سازی، این متغیر دارای یک مقدار نزدیک به یک است اما با افزایش در تعداد چرخه‌های بهینه‌سازی بصورت دینامیکی براساس معادله خطی ذیل کاهش پیدا نموده است:

اینجا $iter$ و $maxIt$ نشان دهنده شماره تکرار فعلی و بیشینه

$$E = 1 - \left(\frac{iter}{maxit} \right) \quad (9)$$

تکرارهای فرآیند بهینه‌سازی به ترتیب هستند. با داشتن سرعت جدید محاسبه شده موقعیت جدید هر مولکول با استفاده از معادلات ذیل محاسبه شده است:

اینجا x_2^d نشان دهنده موقعیت تعادل مولکول قبل از برخورد،

$$(x_1^d)' = x_2^d + rand \times (v_1^d)' \quad (10)$$

$$(x_2^d)' = x_2^d + rand \times (v_2^d)' \quad (11)$$

و متناظرًا، $(x_1^d)'$ و $(x_2^d)'$ نشان دهنده موقعیت جدید بعد از برخورد هستند، به ترتیب. $rand$ نشان دهنده مقدار یک توزیع نرمال تصادفی در محدوده [۰, ۱] است.

۱-۳-۱-۶- محاسبه نمودن سرعت بدون برخورد مولکول

در حالت گاز ایده‌آل، اگر فرض شود مولکول‌ها با هم دیگر برخوردی نداشته اند، سرعت جدید مولکول i ام با استفاده از معادله ذیل بدست می‌آید:

$$(v_i^d)' = 1.7 \sqrt{\frac{kT_i}{m_i}} \quad (12)$$

$$k = \frac{1}{nVar} \quad (13)$$

اینجا $nVar$ تعداد مولکول‌ها در فرآیند بهینه‌سازی است، سرعت هر مولکول متناسب با جرم و دمای آن مولکول است. بنابراین، در این فاز محاسبه دمای جدید هر مولکول ضروری است، برای انجام این، معادله کسری بصورت ذیل تعریف شده است:

$$T_i' = T_i - T_i \frac{m_i}{\sum_{i=1}^{nVar} m_i} \quad (14)$$

اینجا x_n موقعیت مولکول هم جوار و x'_i موقعیت مولکول جدید در تکرار فعلی است. مولکول جدید بوسیله مولکول مجاور اگر مغلوب شود جایگزین می‌شود.

۱-۳-۲-۱۲- راه‌حل‌های نامغلوب بدست آمده و بروز رسانی بایگانی و شبکه مکعبی انجام می‌پذیرد.

۱-۳-۲-۱۳- کنترل معیار همگرایی، اگر الگوریتم همگرا نشود فرآیند بهینه‌سازی از مراحل ۷ تا ۱۳ این بخش تکرار خواهد شد [۲۲].

۲- مصالح و آزمایش‌ها

۲-۱- مصالح

در بررسی اثر جایگزینی سنگدانه‌های درشت بتن بازیافتی بصورت یک جایگزین سنگدانه‌های درشت طبیعی، چگالی سنگدانه‌های ریز و درشت و جذب آب هر دو سنگدانه ای طبیعی و بازیافتی مطابق با استانداردهای [۲۳] ASTM C۲۹، [۲۴] ASTM C۱۲۷ و [۲۵] ASTM C۱۲۸ اندازه‌گیری شده‌اند، که به ترتیب در جدول ۱ ارائه شده‌اند. خصوصیات سیمان مصرفی پرتلند نوع دو در جدول ۲ آورده شده است.

۲-۲- نسبت‌های مخلوط و آماده سازی نمونه‌ها

طراحی مخلوط مطابق با نیازمندی روش کریجینگ انجام شده است. نسبت آب به سیمان و مقدار سنگدانه‌های درشت بازیافتی

متعادل انتخاب شده از بایگانی برخوردار خواهد کرد. بنابراین، سرعت و موقعیت جدید با استفاده از معادلات ذیل محاسبه شده است:

$$v'_m = \frac{m_m + E \times m_s}{m_m + m_s} \times v_m \quad (18)$$

$$x'_m = x_s + 2 \times (0.5 - rand(1, nVar)) \times v'_m \quad (19)$$

۱-۳-۲-۱۰- اگر $rand > CP$ ، اینجا برخوردی رخ نداده است و سرعت و موقعیت جدید مولکول براساس سرعت مؤثر مولکول‌های گاز بدست آمده است:

$$v'_i = \sqrt{\frac{(3 \times k \times T)}{m_i}} \quad (20)$$

$$x'_i = x_i + 2 \times (0.5 - rand(1, nVar)) \times v'_i \quad (21)$$

k و T با استفاده از معادلات ذیل محاسبه شده است:

$$k = \frac{1}{nPop} \quad (22)$$

$$T' = T - unifrnd(-1, 1, 1, 1) \times T \quad (23)$$

اینجا $nPop$ اندازه جمعیت و $unifrnd(\cdot)$ یک توزیع یکنواخت از اعداد بین $[-1, 1]$ تولید می‌کند.

۱-۳-۲-۱۱- برای اجتناب از قرار گرفتن در نقطه بهینه محلی، یک راه حل جدید بصورت ذیل در این مرحله محاسبه شده است:

$$x'_n = x'_i + 0.1 \times unifrnd(-1, 1, varsize) \times E \quad (24)$$

جدول ۱. خصوصیات سنگدانه‌های معمولی و بازیافتی

Table 1. Properties of normal and recycled aggregates

آزمایشات مکانیکی			
مصالح	وزن مخصوص	چگالی حجمی (مترمکعب/کیلوگرم)	جذب آب (درصد)
سنگدانه درشت طبیعی	۲/۷۳	۱۵۶۱	۰/۷۳
سنگدانه ریز طبیعی	۲/۶۵	۱۶۲۲	۰/۷۹
سنگدانه درشت بازیافتی	۲/۷۱	۱۳۵۶	۶/۳۳
سنگدانه ریز بازیافتی	۲/۳۶	۱۲۷۸	۹/۷۷
آزمایش شیمایی			
مصالح			C_{CI} - (درصد)
سنگدانه‌های طبیعی			۰/۰۵
سنگدانه‌های بازیافتی			۰/۰۵

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان پرتلند نوع ۲
Table 2. Portland cement type II chemical and physical properties

نتیجه	آزمایش شیمیایی
۲۱/۰۵	Silicon dioxide (SiO ₂):%
۴/۷۶	Aluminum oxide (Al ₂ O ₃):%
۳/۴۳	Iron oxide (Fe ₂ O ₃): %
۶۲/۸۶	Calcium oxide (CaO): %
۳/۴۶	Magnesium oxide (MgO): %
نتیجه	آزمایش فیزیکی
۱/۲	Loss on ignition: %
۳/۱۱	Specific gravity
۳۱۲	Blaine finess: m ² / kg

در قالب های استوانه‌ای با ابعاد (میلی‌متر) ۳۰۰×۱۵۰، ۲۰۰×۱۰۰، مکعبی با ابعاد (میلی‌متر) ۱۵۰×۱۵۰، ۱۰۰×۱۰۰ ریخته شده‌اند، (شکل ۱). نمونه‌های بتن استوانه‌ای و مکعبی با ۰، ۲۰، ۵۰، ۷۰ و ۱۰۰ (درصد) جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه درشت بازیافتی و نسبت‌های آب به سیمان ۰/۴۰، ۰/۴۵، ۰/۵۰، ۰/۵۵ و ۰/۶۰ در این مطالعه برای ساخت مدل و انجام آزمایش مقاومت فشاری، الکتریکی، تخلخل، جذب آب ساخته شده‌اند. علاوه بر این، نمونه‌های بتن استوانه‌ای و مکعبی با ۱۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۹۰ (درصد) جایگزینی سنگدانه طبیعی با سنگدانه درشت بازیافتی و نسبت های آب به سیمان ۰/۴۳، ۰/۴۸، ۰/۵۳ و ۰/۵۸ در این مطالعه برای ارزیابی مدل و انجام آزمایش مقاومت فشاری و الکتریکی ساخته شده‌اند (جدول ۳).

متغیرهای مدل تعریف شده‌اند.

۲-۳-آزمایشها

۲-۳-۱-جذب آب و تخلخل

بعد از ۹۰ روز عملآوری نمونه‌ها آزمایش جذب آب و تخلخل مطابق با استاندارد [۲۷] ASTM C۶۴۲ انجام شده است. مطابق با این استاندارد نمونه‌های استوانه‌ای برش خورده به قطر ۱۰۰ میلی‌متر

۲-۲-۱-نمونه‌های بتن

سنگدانه‌های درشت و ریز طبیعی و بازیافتی وزن شده و مطابق با استاندارد [۲۶] ASTM C۳۳، با سیمان و آب با هم مخلوط و

جدول ۳. نسبت های مخلوط و پارامترهای اصلی داده‌های آزمایشگاهی

Table 3. Mix proportion, Basic parameters of Experimental data

شماره	نمونه		سیمان	نسبت آب به سیمان	سنگدانه ریز طبیعی (مترمکعب/کیلوگرم)	سنگدانه درشت طبیعی (مترمکعب/کیلوگرم)	سنگدانه درشت بازیافتی (مترمکعب/کیلوگرم)	سنگدانه درشت بازیافتی (مترمکعب/کیلوگرم)	آب (مترمکعب/کیلوگرم)
	نوع	اندازه (میلی‌متر)							
۱	استوانه	۳۰۰×۱۵۰	پرتلند	۰/۴۰	۷۱۵/۷	۹۳۶/۶	۰	۰	۱۹۷
۲	استوانه	۲۰۰×۱۰۰	معمولی		۷۳۸/۴	۷۴۹/۲	۱۶۲/۷	۲۰	۱۹۷
۳	مکعبی	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰			۷۷۲/۵	۴۶۸/۳	۴۰۶/۸	۵۰	۱۹۷
					۷۹۵/۲	۲۸۱/۰	۵۶۹/۵	۷۰	۱۹۷
					۸۲۹/۳	۰	۸۱۳/۸	۱۰۰	۱۹۷
۴	استوانه	۳۰۰×۱۵۰	پرتلند	۰/۵۰	۸۰۵/۸	۹۳۶/۶	۰	۰	۱۹۷
۵	استوانه	۲۰۰×۱۰۰	معمولی		۸۲۸/۵	۷۴۹/۳	۱۶۲/۷	۲۰	۱۹۷
					۸۶۲/۵	۴۶۸/۳	۴۰۶/۸	۵۰	۱۹۷
					۸۸۵/۳	۲۸۱/۰	۵۶۹/۵	۷۰	۱۹۷
۶	مکعبی	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰			۹۱۹/۳	۰	۸۱۳/۸	۱۰۰	۱۹۷
					۸۶۵/۸	۹۳۶/۶	۰	۰	۱۹۷
					۸۸۸/۵	۷۴۹/۳	۱۶۲/۷	۲۰	۱۹۷
۷	استوانه	۳۰۰×۱۵۰	پرتلند	۰/۶۰	۸۶۵/۸	۹۳۶/۶	۰	۰	۱۹۷
۸	استوانه	۲۰۰×۱۰۰	معمولی		۸۸۸/۵	۷۴۹/۳	۱۶۲/۷	۲۰	۱۹۷
					۹۲۲/۵	۴۶۸/۳	۴۰۶/۸	۵۰	۱۹۷
					۹۴۵/۳	۲۸۱/۰	۵۶۹/۵	۷۰	۱۹۷
۹	مکعبی	۱۰۰×۱۰۰×۱۰۰			۹۷۹/۳	۰	۸۱۳/۸	۱۰۰	۱۹۷

مقاومت فشاری نمونه‌ها در دو سن (۲۸ و ۹۰ روزه) براساس [۲۸] ASTM C۳۹ بدست آمده است.

۲-۳-۳- مقاومت الکتریکی

این آزمایش مطابق با استاندارد [۲۹] ASTM C۱۷۶۰-۱۲ پس از ۲۸ و ۹۰ روز عملآوری در شرایط اشباع با سطح خشک انجام شده است (شکل ۱).

۲-۴-۲- نتایج آزمایشگاهی

۲-۴-۲-۱- جذب آب سنگدانه‌ها

مطابق با جدول ۱ میزان جذب آب سنگدانه‌های بتن پسماند در مقابل سنگدانه‌های طبیعی نشان داده شده است. به دلیل احاطه بودن سنگدانه‌های بازیافتی با ملات بتن اولیه که به عنوان اصلی‌ترین مشخصه این نوع سنگدانه شناخته شده است، جذب آب سنگدانه‌های درشت بازیافتی حدود ۸/۶۷ برابر بیشتر از سنگدانه‌های درشت طبیعی بدست آمده است. علاوه بر این جذب آب سنگدانه‌های ریز بازیافتی حدود ۱۲/۳۷ برابر سنگدانه‌های ریز طبیعی است. مطابق تحقیق ما کانگ و همکاران^۱ [۳۰]، این می‌تواند بیان شود که سنگدانه‌های ریز طبیعی حجم ملات بیشتری از مخلوط بتن قدیمی به خود جذب نموده‌اند.

۲-۴-۲-۲- وزن مخصوص و چگالی حجمی سنگدانه‌ها

و ارتفاع ۵۰ میلی‌متر از نمونه استوانه‌ای ۱۰۰*۲۰۰ میلی‌متر تهیه شده‌اند. سپس نمونه‌ها در گرمکن (دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۲۴ ساعت قرار داده و سپس بیرون آورده و اجازه سرد شدن (دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد) داده شده‌اند. این فرآیند تا رسیدن اختلاف دو اندازه‌گیری متوالی وزن به کمتر از ۰/۵ درصد تکرار شده است (w_a). در ادامه نمونه‌ها به مدت ۴۸ ساعت در آب قرار داده و سپس بیرون آورده و پس از خشک نمودن سطح، وزن آنها اندازه‌گیری شده است و این فرآیند تا رسیدن اختلاف دو اندازه‌گیری متوالی وزن به کمتر از ۰/۵ درصد تکرار شده است (w_b). از معادله زیر مقدار جذب آب محاسبه شده است:

$$w = \left[\frac{(w_b - w_a)}{w_a} \right] \times 100 \quad (25)$$

سپس این نمونه‌ها در دیگ برای ۵ ساعت جوشانده و اجازه داده شده است تا ۱۴ ساعت سرد و پس از حذف رطوبت سطحی وزن نمونه‌ها تعیین شده است (w_c). سپس نمونه‌ها در ظرف آب که روی یک ترازو قرار داده شده است به یک سیم آویزان و وزن نشان داده شده در ترازو اندازه‌گیری شده است (w_d). از معادله زیر مقدار تخلخل نمونه‌ها محاسبه شده است:

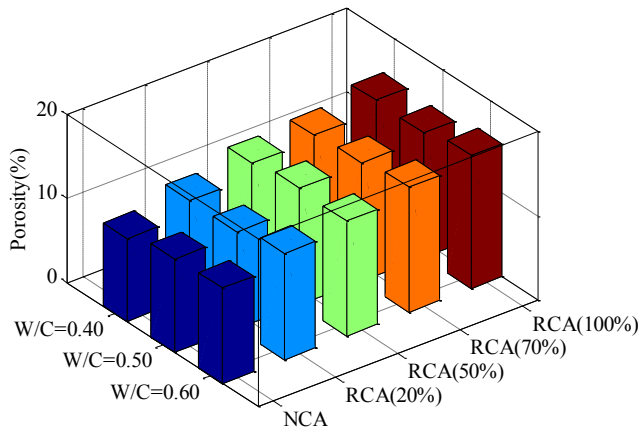
$$n = \left[\frac{(w_c - w_a)}{(w_c - w_d)} \right] \times 100 \quad (26)$$

۲-۳-۲- مقاومت فشاری

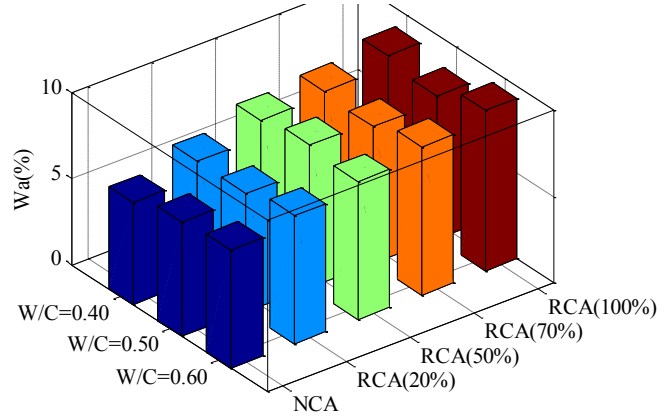
شکل ۱. ساخت و آزمایش مقاومت الکتریکی نمونه‌ها

Fig. 1. Construction and testing electrical resistance of specimens





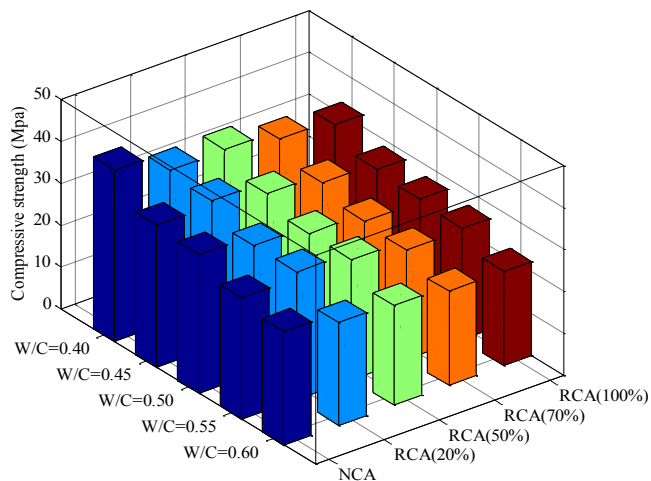
شکل ۳. رابطه تخلخل و درصد سنگدانه درشت بازیافتی و نسبت آب به سیمان (۹۰ روزه)
Fig. 3. Water absorption RCA (%) - W/C relationship (90 days).



شکل ۲. رابطه جذب آب و نسبت آب به سیمان و درصد سنگدانه درشت بازیافتی (۹۰ روزه)
Fig. 2. Porosity RCA (%) - W/C relationship (90 days)

۲-۴-۵- مقاومت فشاری

مطابق با شکل ۴ میزان مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با افزایش نسبت آب به سیمان (۰/۴۰-۰/۶۰) تقریباً ۳۳/۷۲ درصد کاهش پیدا کرده است، که دلیل آن می‌تواند به تأثیر جذب آب بالای این نوع سنگدانه و ایجاد ناحیه ضعیف انتقال بین دانه‌ای مرتبط گردد، پون و همکاران^۱، یو و همکاران^۲ [۳۱ و ۳۲]. در شکل ۴ میزان مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی با افزایش درصد استفاده از سنگدانه‌های درشت بازیافتی (۰-۱۰۰ درصد) تقریباً ۱۹/۹۷ درصد کاهش پیدا نموده است.



شکل ۴. رابطه مقاومت فشاری و درصد سنگدانه درشت بازیافتی و نسبت آب به سیمان
Fig. 4. Compressive strength RCA (%) - W/C relationship

مطابق با جدول ۱، کاهش ۱ درصد وزن مخصوص سنگدانه‌های درشت بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی مشاهده شده است. وزن مخصوص سنگدانه‌های ریز بازیافتی نسبت به سنگدانه‌های طبیعی ۱۱ درصد کاهش نشان داده است. آزمایش چگالی حجمی سنگدانه‌های درشت بازیافتی ۱۳/۱۳ درصد کاهش نسبت به سنگدانه‌های طبیعی از خود نشان داده است.

۲-۴-۳- جذب آب بتن

مطابق با شکل ۲ به دلیل افزایش تخلخل مخلوط بتن، افزایش جذب آب با افزایش نسبت آب به سیمان مشاهده شده است. میزان جذب آب نمونه‌های بتنی با افزایش نسبت آب به سیمان (۰/۴۰-۰/۶۰) تقریباً ۱۶ درصد افزایش پیدا نموده است. در شکل ۲ میزان جذب آب نمونه‌های بتنی با افزایش درصد استفاده از سنگدانه‌های درشت بازیافتی (۰-۱۰۰ درصد) تقریباً ۴۸/۸۲ درصد افزایش پیدا نموده است.

۲-۴-۲- تخلخل بتن

مطابق با شکل ۳ افزایش در مقدار تخلخل با افزایش نسبت آب به سیمان مشاهده شده است. میزان تخلخل نمونه‌های بتنی با افزایش نسبت آب به سیمان (۰/۴۰-۰/۶۰) تقریباً ۱۵/۴۸ درصد افزایش پیدا نموده است. در شکل ۳ میزان تخلخل نمونه‌های بتنی با افزایش درصد استفاده از سنگدانه‌های درشت بازیافتی (۰-۱۰۰ درصد) تقریباً ۵۲/۰۲ درصد افزایش پیدا نموده است.

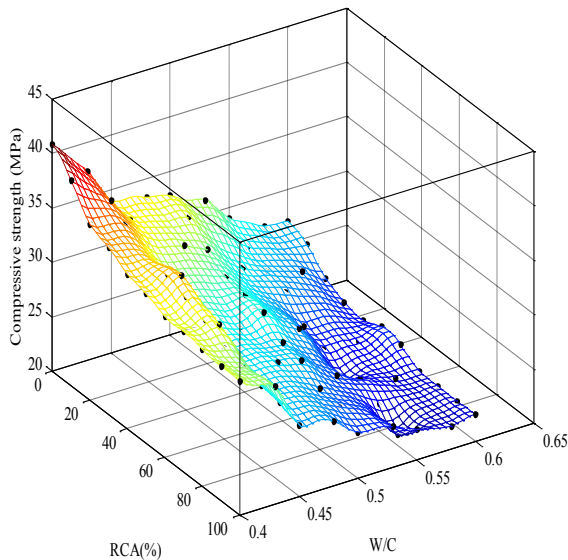
1 C.S. Poon
 2 Gongbing Yue

۳-۱-۱- مدل تخمین پیشنهادی مقاومت فشاری

مقاومت فشار بتن در سن ۲۸ روز در آزمایشگاه اندازه‌گیری و سپس با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده معادله (۲۷) به روش کریجینگ بین متغیرهای آن تعریف شده است (شکل‌های ۶ و ۷):

اینجا (f_{c28}) مقاومت فشاری آزمون استاندارد بر

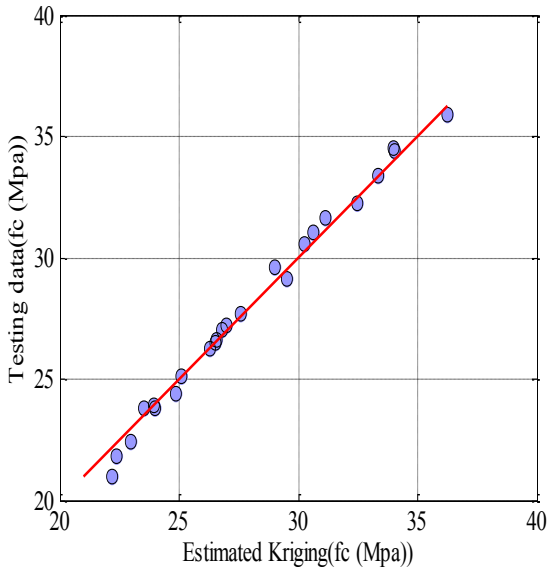
$$f_c = f_{c28} (RCA(\%), R_{w/c}) \quad (27)$$



شکل ۶. پاسخ مدل کریجینگ مقاومت فشاری

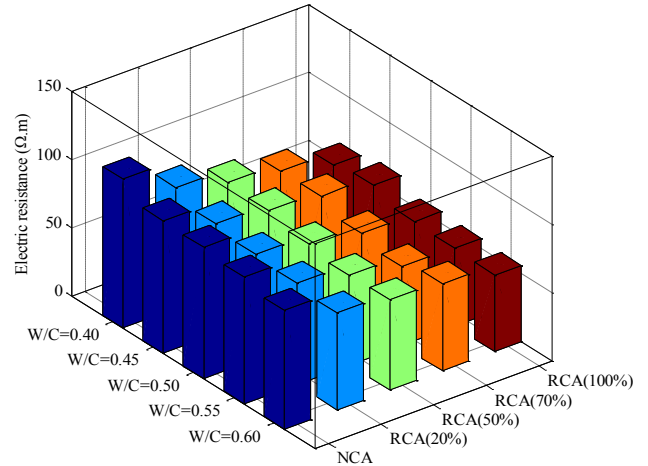
Fig. 6. Compressive strength – RCA (%) - W/C Kriging Response

$$R^2 = 0.9888; RMSE = 0.4234$$



شکل ۷. خطای تخمین پاسخ مدل کریجینگ مقاومت فشاری

Fig.7. Kriging Compressive strength Response Error Estimate



شکل ۵. رابطه مقاومت الکتریکی و نسبت آب به سیمان و درصد سنگدانه درشت بازیافتی (۹۰ روزه)

Fig. 5. Electric Resistance RCA (%) - W/C relationship (90days)

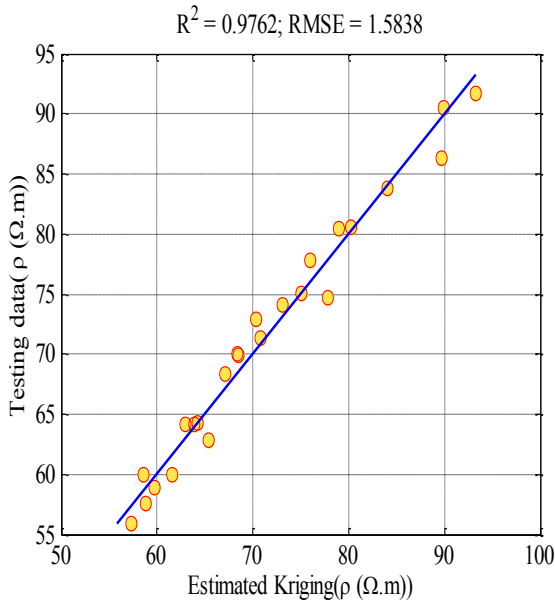
۲-۴-۶- مقاومت الکتریکی

مطابق با شکل ۵ میزان مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی با افزایش درصد استفاده از سنگدانه‌های درشت بازیافتی (۰-۱۰۰ درصد) تقریباً ۴۰/۲۰ درصد کاهش پیدا نموده است. مطابق با شکل ۵ میزان مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی با افزایش نسبت آب به سیمان (۰/۴۰-۰/۶۰) تقریباً ۷۹/۴۲ درصد کاهش پیدا نموده است، دلیل آن می‌تواند افزایش تخلخل مویی داخلی بیان گردد [۹]. برای نمونه‌های آزمایش شده در سن ۹۰ روز میانگین افزایش ۸۴/۳۷ درصد مقاومت الکتریکی بدست آمده است.

۳-مدل سازی

در این تحقیق به عنوان یکی از نیازمندی‌های اعتبار سنجی مدل‌های بدست آمده به روش کریجینگ، داده‌های آزمایشگاهی به دو بخش داده‌های مورد استفاده برای ساخت مدل و داده‌های مورد استفاده برای ارزیابی مدل تقسیم شده‌اند. این تقسیم بندی می‌تواند به طور معین و یا بصورت تصادفی به روش نمونه برداری بدون جایگزینی اندیس مختصات داده‌ها پس از روی هم ریزی داده‌ها انجام پذیرد. نهایتاً مدل با کمترین میزان خطا به عنوان مدل پیشنهادی انتخاب شده است.

۳-۱- نتایج مدل سازی

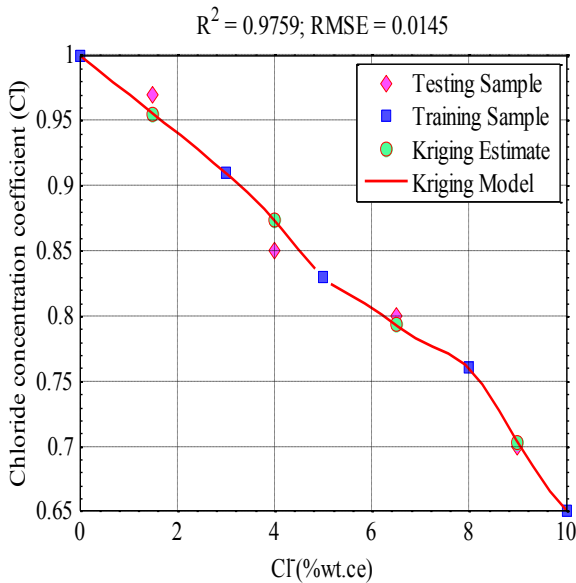


شکل ۹. خطای تخمین پاسخ مدل کریجینگ مقاومت الکتریکی

Fig. 9. Kriging Electric Resistance Response Error Estimate

در بیشترین مقدار کلرید (۱۰ درصد وزن سیمان مصرفی) حدود ۳۵ درصد کاهش برای مقاومت الکتریکی بتن حاصل شده است. مدل مشابه در مراجع [۹و۸] ارائه شده است.

۲-۲-۱-۳-دمای محیط



شکل ۱۰. ضریب تأثیر کلرید در رابطه مقاومت الکتریکی

Fig. 10. Chloride Influence Factor on Electric Resistance relationship

حسب تعریف شده است.

۳-۱-۲-مدل تخمین پیشنهادی مقاومت الکتریکی

مقاومت الکتریکی بتن در سن ۲۸ و ۹۰ روز در حالت اشباع با سطح خشک اندازه‌گیری (ρ_0) و پس از محاسبه ضرایب مصالح و محیط با استفاده از معادله (۲۸) به روش کریجینگ محاسبه شده است [۹و۸]:

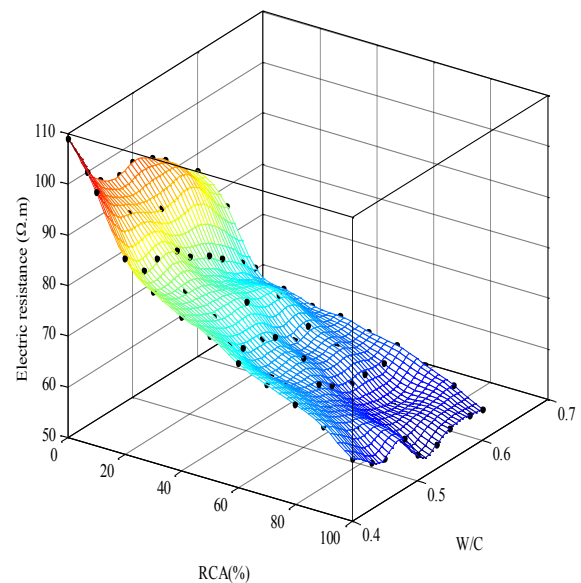
اینجا ρ مقاومت الکتریکی بتن (شکل ۸ و ۹)، با توجه به شرایط

$$\rho = K_{RH} \cdot K_{CI} \cdot K_T \cdot \rho_0 (RCA(\%), R_{w/c}) \quad (28)$$

محیطی و مصالح K_{RH} ، ضریب تأثیر مقدار رطوبت (شکل ۱۰)، ضریب تأثیر مقدار کلرید (شکل ۱۱)، و K_{CI} ضریب تأثیر دمای محیط (شکل ۱۲) تعریف شده است.

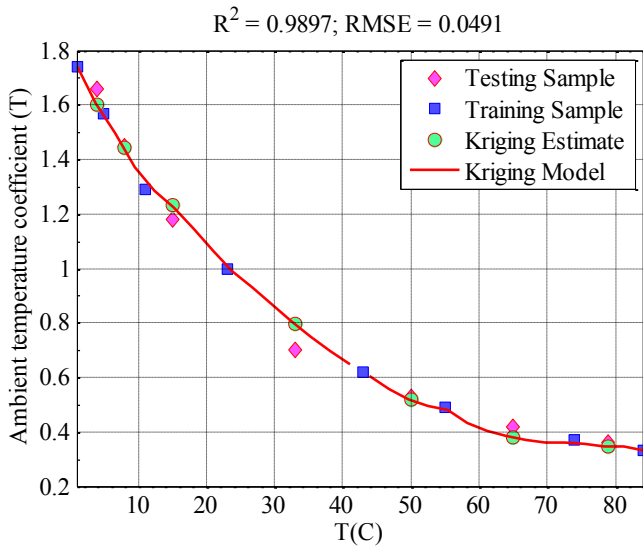
۳-۱-۲-۱-مقدار غلظت کلرید

در شکل ۱۰ مشاهده شده است که با بالا رفتن غلظت یون کلرید در بتن به دلیل جذب از رطوبت محیط خارجی یا وجود بصورت پیش آلودگی در سنگدانه‌های بازافزایی، به دلیل افزایش رسانایی یونی و قوی شدن کانال یونی [۹]، رسانایی بتن افزایش پیدا نموده است.



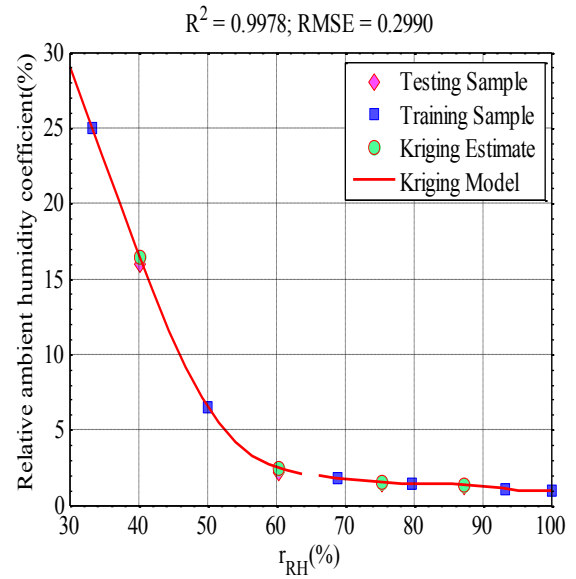
شکل ۸. پاسخ مدل کریجینگ مقاومت الکتریکی

Fig. 8. Electric Resistance RCA (%) - W/C Kriging Response



شکل ۱۲. ضریب تأثیر دمای محیط در رابطه مقاومت الکتریکی

Fig. 12. Temperature Influence Factor on Electric Resistance relationship



شکل ۱۱. ضریب تأثیر رطوبت محیط در رابطه مقاومت الکتریکی

Fig. 11. Humidity Influence Factor on Electric Resistance relationship

فرا ابتکاری در کاربردهای مهندسی به دلیل یادگیری و اجرای ساده، عدم نیاز به اطلاعات گرادپانی (مشتق)، قابلیت عبور از نقاط بهینه محلی و بکارگیری در یک محدوده وسیع از علوم بسیار مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۸-۲۱]. الگوریتم بهینه‌سازی حرکت مولکول‌های گاز ایده‌آل الهام گرفته شده از طبیعت، براساس حرکت و برخورد بین مولکول‌های گاز که توسط ورعی و همکاران ارائه شده [۱۹ و ۲۲]، برای بهینه‌سازی در این بخش استفاده شده است. تابع هدف برای انجام بهینه‌سازی مقید، در این تحقیق بدست آوردن مخلوط بتن با حداکثر میزان استفاده از سنگدانه‌های درشت بازیافتی و حداقل استفاده از سیمان تعریف شده است، علاوه بر این از توابع حدی بدست آمده در بخش مدل‌سازی به عنوان قیود مسأله بهینه‌سازی استفاده شده‌اند. در حالت تک هدفه مسأله بهینه‌سازی به شکل زیر:

$$\begin{aligned} \text{Maximize: } & f(X) = RCA(\%) \\ \text{Subject to: } & \begin{cases} f_{c28}(X_1, X_2) \geq f_{cthr} \\ \rho(X_1, X_2) \geq \rho_{thr} \end{cases} \end{aligned} \quad (29)$$

$$X_1^L \leq X_1 \leq X_1^U$$

$$X_2^L \leq X_2 \leq X_2^U$$

و در حالت چند هدفه بصورت زیر تعریف شده است:

در شکل ۱۱ نشان داده شده است که با بالا رفتن دما رسانایی بتن به دلیل افزایش فعالیت یونی [۹]، افزایش و مقاومت الکتریکی کاهش پیدا نموده است و برعکس. این کاهش با بیشترین دمای آزمایش شده در این تحقیق (تا ۸۴ درجه سانتی‌گراد) حدود ۶۳ درصد و برای حداقل کاهش دما (تا یک درجه سانتی‌گراد) حدود ۷۴ درصد افزایش برای مقاومت الکتریکی بتن بدست آمده است. مدل مشابه در مرجع [۹] ارائه شده است.

۳-۲-۱-۳- رطوبت نسبی محیط

مطابق شکل ۱۲ مشاهده شده است با کاهش میزان رطوبت (۷۰ درصد) به دلیل ضعیف شدن کانال رسانایی یونی [۹]، مقاومت الکتریکی بتن حدود ۸۱ درصد افزایش داشته است. در میزان کاهش رطوبت (۵۰ درصد) مقاومت الکتریکی بطور نمایی حدود ۶۴۸ درصد افزایش پیدا نموده است. مدل مشابه در مراجع [۸ و ۹] ارائه شده است.

۴- بهینه‌سازی مقید تک هدفه و چند هدفه

استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی فرا ابتکاری بر مبنای جستجوی تصادفی در فضای مسأله به عنوان یکی از روش‌های بهینه‌سازی ساده، سریع و قابل اعتماد شناخته شده است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی

جدول ۴. متغیرهای طراحی
Table 4. Design variables

متغیر	نماد	مقدار
RCA	X_1	$0 \leq X_1 \leq 100$
$R_{w/c}$	X_2	$0.40 \leq X_2 \leq 0.60$

جدول ۵. طبقه‌بندی براساس سطح خطر موردنیاز محیط

Table 5. Classification Based on Environment Risk Level

مقاومت الکتریکی حجمی مورد نیاز (Ωm)	سطح خطر موردنیاز محیط
کمتر از ۵۰	پایین
۱۰۰-۵۰	متوسط
۲۰۰-۱۰۰	بالا
۲۰۰۰-۲۰۰	خیلی بالا
بیشتر از ۲۰۰۰	ناچیز

$$\begin{aligned} \text{Maximize: } & \begin{cases} f_1(X) = RCA(\%) \\ f_2(X) = R_{w/c} \end{cases} \\ \text{Subject to: } & \begin{cases} f_{c28}(X_1, X_2) \geq f_{cthr} \\ \rho(X_1, X_2) \geq \rho_{thr} \end{cases} \quad (30) \\ & X_1^L \leq X_1 \leq X_1^U \\ & X_2^L \leq X_2 \leq X_2^U \end{aligned}$$

در اینجا $f_1(X)$ و $f_2(X)$ توابع هدف، f_{cthr} مقدار حداقل مقاومت فشاری مورد نیاز، مساوی 25 MPa و ρ_{thr} مقدار حداقل مقاومت الکتریکی مورد نیاز تعریف شده است، که مقادیر آن به توجه به سطح خوردگی محیط از جدول ۵ انتخاب شده‌اند. X_1 و X_2 متغیرهای طراحی مسأله بهینه‌سازی، مطابق جدول ۴ تعریف شده‌اند.

۴-۱- نتایج بهینه‌سازی

در این تحقیق تابع هدف شامل متغیرهای طراحی ارائه شده در جدول ۴ است، که برای بدست آوردن مقدار حداکثر استفاده از سنگدانه‌های درشت بتن پسماند در مخلوط بتن برای شرایط محیطی خورنده تعریف شده است. طبقه بندی شرایط محیطی خورنده در این تحقیق مطابق با جدول ۵ در نظر گرفته شده است [۳۳ و ۳۴]. ابتدا با توجه به رویکرد اصلی این تحقیق برای استفاده حداکثری از مقدار سنگدانه‌های بازیافتی به منظور کاهش اثرات مخرب زیست محیطی استفاده بیش از اندازه سنگدانه‌های طبیعی و کاهش حجم زیاد پسماندهای ساخت و ساز، این به شکل یک مسأله بهینه‌سازی تک هدفه بررسی و مشاهده شده است که، جدول ۶، مطابق با نیاز سطح خطر خوردگی متوسط و شرایط محیطی با رطوبت ۷۰ درصد، دما ۲۳°C و میزان غلظت کلر ۳ درصد نقطه طراحی با ۱۰۰ درصد سنگدانه درشت بازیافتی در نسبت آب به سیمان ۰/۴۱ بدست آمده است. همچنین در سطح خوردگی بالا و در شرایط محیطی مشابه قبل نقطه طراحی به استفاده ۲۰/۳۳ درصدی سنگدانه درشت بازیافتی در نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ محدود شده است. در ادامه بطور همزمان با در نظر گرفتن سیمان به عنوان یکی دیگر از آلاینده‌های محیط‌زیست مرتبط با صنعت ساخت و ساز اقدام به کاهش این جز دیگر سازنده مخلوط بتن شده است که در این حالت اقدام به حل یک مسأله بهینه‌سازی متشکل از دو هدف شده است. نتایج، جدول ۶، مطابق شرایط محیطی و سطوح خطر خوردگی حالت قبل میزان

نقطه طراحی به استفاده ۱۰۰ درصدی سنگدانه درشت بازیافتی در نسبت آب به سیمان ۰/۴۸ محدود شده است. همچنین در سطح خوردگی بالا و در شرایط محیطی مشابه نقطه طراحی به استفاده ۲۱/۶۴ درصدی سنگدانه درشت بازیافتی در نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ محدود شده است. علاوه بر این مشاهده می‌کنیم در شرایطی که نقطه طراحی برای حالت تک هدفه مشاهده نشده است. در حالت چند هدفه نقطه طراحی بدست آمده است؛ نقطه طراحی ۱۲/۷۶ درصد سنگدانه درشت بازیافتی در نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ در سطح خطر خوردگی متوسط و شرایط محیطی رطوبت ۸۰ درصد، دما ۲۳°C و میزان غلظت کلر ۱۰ درصد تنها در فرآیند بهینه‌سازی چند هدفه حاصل شده است. علاوه بر این نقطه طراحی ۱۸/۳۴ درصد سنگدانه درشت بازیافتی در نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ و در سطح خطر خوردگی بالا و شرایط محیطی رطوبت ۷۰ درصد، دما ۲۳°C و میزان غلظت کلر ۵ درصد تنها در حالت طراحی بهینه چند هدفه مشاهده شده است. فرآیند بهینه‌سازی تک هدفه و چند هدفه به ترتیب در شکل‌های ۲۱ (الف) و (ب) ارائه شده است.

۵- نتیجه‌گیری

مطابق با نتایج آزمایش سنگدانه‌ها، بتن سخت شده، مدل‌سازی و بهینه‌سازی موارد ذیل استخراج شده است:

۱- ملات چسپیده به سنگدانه طبیعی از بتن اولیه عامل افزایش

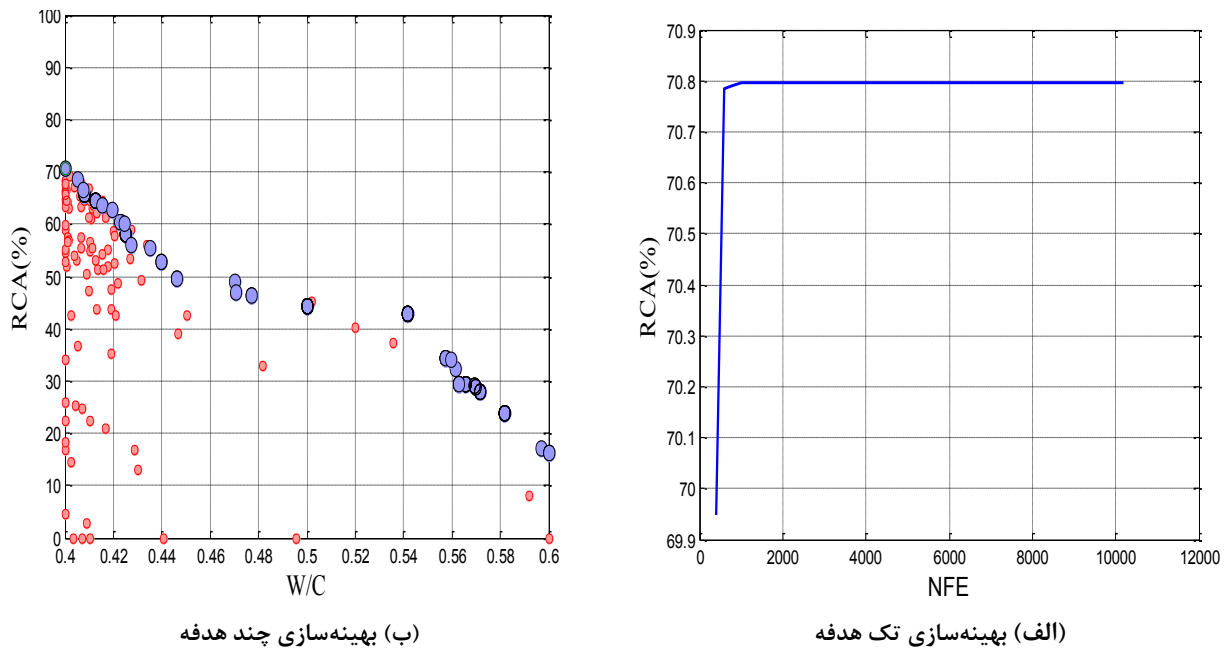
جدول ۶. نتایج مشاهده شده از فرآیند بهینه‌سازی

Table 6. Observed results of the optimization process

شماره	پارامترهای اصلی			سطح خطر خوردگی محیط	مقاومت فشاری مورد نیاز (مگا پاسکال)	بهینه‌سازی تک هدفه	
	غلظت کلر (درصد)	دما (درجه سانتی‌گراد)	رطوبت (درصد)			نقطه طراحی بهینه (سنگدانه بازیافتی (درصد))، نسبت آب به سیمان)	نقطه طراحی بهینه (سنگدانه بازیافتی (درصد))، نسبت آب به سیمان)
۱	۰	۲۳	۹۰	متوسط	۲۵	(۰/۴۰, ۳۲/۱۲)	(۰/۴۰, ۲۳/۵۸)
۲	۳	۲۳	۹۰	متوسط	۲۵	(۰/۴۰, ۱۶/۱۹)	(۰/۴۰, ۱۶/۸۱)
۳	۵	۲۳	۹۰	متوسط	۲۵	-	(۰/۴۰, ۱۵/۹۴)
۴	۱۰	۲۳	۹۰	متوسط	۲۵	-	-
۵	۰	۲۳	۸۰	متوسط	۲۵	(۰/۴۰, ۷۰/۴۴)	(۰/۴۰, ۷۰/۶۷)
۶	۳	۲۳	۸۰	متوسط	۲۵	(۰/۴۰, ۴۸/۲۰)	(۰/۴۰, ۴۸/۳۱)
۷	۵	۲۳	۸۰	متوسط	۲۵	(۰/۴۰, ۳۰/۴۹)	(۰/۴۰, ۳۰/۱۸)
۸	۱۰	۲۳	۸۰	متوسط	۲۵	-	(۰/۴۰, ۱۲/۷۶)
۹	۰	۲۳	۷۰	متوسط	۲۵	(۰/۴۶, ۱۰۰)	(۰/۴۸, ۱۰۰)
۱۰	۳	۲۳	۷۰	متوسط	۲۵	(۰/۴۱, ۱۰۰)	(۰/۴۸, ۱۰۰)
۱۱	۵	۲۳	۷۰	متوسط	۲۵	(۰/۴۰, ۷۸/۸۵)	(۰/۴۸, ۸۰/۰۹)
۱۲	۱۰	۲۳	۷۰	متوسط	۲۵	(۰/۴۰, ۳۲/۸۳)	(۰/۴۰, ۳۳/۶۵)
۱۳	۰	۲۳	۷۰	بالا	۲۵	(۰/۴۰, ۳۷/۷۱)	(۰/۴۰, ۲۹/۳۳)
۱۴	۳	۲۳	۷۰	بالا	۲۵	(۰/۴۰, ۲۰/۳۳)	(۰/۴۰, ۲۱/۶۴)
۱۵	۵	۲۳	۷۰	بالا	۲۵	-	(۰/۴۰, ۱۸/۳۴)

شکل ۱۳. بهینه‌سازی در سطح خطر خوردگی متوسط و محیط با رطوبت ۸۰٪، دما ۲۳ °C و میزان غلظت کلر ۰٪.

Fig. 13. Optimization at medium corrosion risk level with 80% humidity, temperature 23°C and 0% chlorine concentration: (a) Single-objective optimization, (b) Multi-objective optimization



خطای کمتر در مقایسه با سایر روش معمول مدل سازی می گردد.
 ۸- استفاده از الگوریتم های بهینه سازی فرا ابتکاری در مسائل بهینه سازی مهندسی به همراه مدل های تخمین مناسب مانند کریجینگ درک بهتری از رسیدن به طرح های بهینه می دهند و این ها روش های ارزان و آسان در بکارگیری هستند. علاوه بر این بهینه سازی چند هدفه برای مسائل مهندسی که دارای چند معیار برای تصمیم گیری هستند بسیار مناسب است. کاهش همزمان میزان سیمان مصرفی و افزایش میزان استفاده از سنگدانه های بازیافتی برای ساخت بتن دوست دار محیط زیست با استفاده از این الگوریتم ها فراهم شده است.

۹- نشان داده شده است که استفاده از سنگدانه های درشت بازیافتی بیشتر برای شرایط با سطح خوردگی متوسط برای سازه های بتنی محقق شده است. امکان استفاده از این نوع سنگدانه در سطوح خوردگی بالاتر می تواند با مواد افزودنی مانند میکروسیلیس، متاکائولین و فلی اش که تأثیر قابل ملاحظه ای روی مقاومت الکتریکی بتن دارند امکان پذیر گردد.

فهرست علائم

w	درصد جذب آب
n	درصد تخلخل
$^{\circ}C$	درجه سانتی گراد
w_a	جذب آب، درصد
$RCA(\%)$	درصد سنگدانه درشت بازیافتی، درصد
$R_{w/c}$	نسبت آب به سیمان
ρ	مقاومت الکتریکی، ($\dot{U}.m$)
f_c	مقاومت فشاری نمونه استوانه ای، Mpa
NFE	تعداد ارزیابی تابع هدف در فرآیند بهینه سازی

مراجع

- [1] N. Kisku, H. Joshi, M. Ansari, S.K. Panda, Sanket Nayak, Sekhar Chandra Dutta. A critical review and assessment for usage of recycled aggregate as sustainable construction material, Construction and Building Materials, (2016).
- [2] Upal Mohammad Towfiqul Quadir, Kamrul

میزان جذب آب سنگدانه شناخته شده است. میزان جذب آب سنگدانه های بازیافتی متأثر از حجم ملات احاطه شده از بتن اولیه شناخته شده است. میزان جذب آب بالای سنگدانه های ریز (۹/۷۷ درصد) نسب به سنگدانه های درشت (۶/۳۳ درصد) نشان دهنده حجم ملات احاطه شده بیشتر در سطح این نوع سنگدانه است.

۲- میزان تخلخل موجود در ملات احاطه شده اطراف سنگدانه های بازیافتی منجر به افزایش جذب آب و تخلخل بتن حاوی این نوع سنگدانه شده است. بطوری که با افزایش میزان تخلخل، چگالی بتن کاهش و این باعث کاهش مقاومت فشاری بتن حدود ۱۹/۹۷ درصد در استفاده حداکثری از این نوع سنگدانه شده است.

۳- میزان تخلخل موجود در ملات احاطه شده اطراف سنگدانه های بازیافتی منجر به افزایش جذب آب و تخلخل بتن حاوی این نوع سنگدانه شده است. بطوری که با افزایش میزان تخلخل کانال رسانایی یونی قوی تری در بتن ایجاد شده است. با این افزایش رسانایی مقاومت الکتریکی بتن حاوی این نوع سنگدانه دارای میانگین کاهش حدود ۲۰/۴۰ درصد در استفاده حداکثری از این نوع سنگدانه است.

۴- میزان تخلخل موجود در بتن با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش پیدا نموده است. بطوری که با افزایش میزان تخلخل کانال رسانایی یونی قوی تری در بتن ایجاد شده است. با این افزایش رسانایی مقاومت الکتریکی بتن دارای میانگین کاهش حدود ۴۲/۷۹ درصد در حداکثر میزان نسبت آب به سیمان است.

۵- میزان تخلخل موجود در بتن با افزایش نسبت آب به سیمان افزایش پیدا می کند. بطوری که با افزایش میزان تخلخل و چگالی بتن به دلیل کاهش میزان سیمان، مقاومت فشاری بتن دارای میانگین کاهش حدود ۳۳/۷۲ درصد در حداکثر میزان نسبت آب به سیمان است.

۶- میزان رطوبت نسبی، میزان دمای محیط، مقدار کلرید، مقدار سنگدانه های بازیافتی و نسبت آب به سیمان بیانگر شرایط در معرض یک سازه بتنی در محیط های خورنده هستند. به دلیل تأثیری که آنها در میزان جذب آب و تخلخل بتن و در نتیجه آن تغییر در حجم رسانایی بتن دارند، می توان مقادیر آنها را به نحو مناسبی برای سازه های مهندسی کنترل و بهینه سازی نمود.

۷- فراهم نمودن دانش کافی از متغیرهای مسأله در روش مدل سازی مبتنی بر کریجینگ منجر به مدل های پیش بینی با میزان

- [11] Hamed Layssi, Pouria Ghods, Aali R. Alizadeh, and Mustafa Salehi. Electrical Resistivity of Concrete, (2015).
- [12] Jafar Vahedi, Mohammad Reza Ghasemi, Mahmoud Miri, An adaptive divergence-based method for structural reliability analysis via multiple Kriging models. *Applied Mathematical Modelling*, (2018).
- [13] Buyu Jia, XiaoLin Yu, QuanSheng Yan. A new sampling strategy for Kriging based response surface method and its application in structural reliability, *Advances in Structural Engineering*, (2016) 1–18.
- [14] Neela Deshpande, Shreenivas Londhe, Sushma Kulkarni. Modeling compressive strength of recycled aggregate concrete by Artificial Neural Network, Model Tree and Non-linear Regression, *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(2014) 187–198.
- [15] S.N. Lophaven, J. Søndergaard, H.B. Nielsen, DACE A Matlab Kriging Toolbox, *IMM Informatiocs Math. Model.* (2002).
- [16] S. Castric, L. Denis-Vidal, Z. Cherfi, G. Joly Blanchard, N. Boudaoud. Modeling Pollutant Emissions of Diesel Engine based on Kriging Models: a Comparison between Geostatistic and Gaussian Process Approach, *Proceedings of the 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing Bucharest, Romania*, (2012)23-25.
- [17] Alexander I. J. Forrester, András Sóbester and Andy J. Keane. *Engineering Design via Surrogate Modelling: A Practical Guide*, University of Southampton, UK, John Wiley & Sons Ltd, (2008).
- [18] Singiresu S. Rao. *Engineering Optimization Theory and Practice*, Fourth Edition, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, (2009).
- [19] Hesam Varae, Mohammad Reza Ghasemi. Engineering optimization based on ideal gas molecular movement algorithm, *Engineering with Computers*, (2016).
- [20] Yaser Moodi, Seyed Roohollah Mousavi, Alireza Ghavidel, Mohammad Reza Sohrabi, Mohsen Islam, A.H.M. Muntasir Billah, M. Shahria Alam. Mechanical and durability properties of concrete using recycled granulated steel, *Construction and Building Materials*, 123(2016)174–183.
- [3] Sumaiya Binte Huda, M. Shahria Alam. Mechanical behavior of three generations of 100% repeated recycled coarse aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 65 (2014) 574–582.
- [4] Wil V. Srubar III. Stochastic service-life modeling of chloride-induced corrosion in recycled-aggregate concrete, *Cement & Concrete Composites*, 55 (2015) 103–111.
- [5] Marco Pepe, Romildo Dias Toledo Filho, Eduardus A.B. Koenders, Enzo Martinelli. A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete, *Construction and Building Materials*, 122(2016) 362–372.
- [6] S. Boudali, D.E. Kerdal, K. Ayed, B. Abdulsalam, A.M. Soliman. Performance of self-compacting concrete incorporating recycled concrete fines and aggregate exposed to sulphate attack, *Construction and Building Materials*, 124(2016)705–713.
- [7] Yimmy Fernando Silva, Rafael Andres Robayo, Pedro Enrique Mattey, Silvio Delvasto. Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete, *Construction and Building Materials*, 124 (2016) 639–644.
- [8] Bo Yu, LuFeng Yang, Ming Wu, Bing Li. Practical model for predicting corrosion rate of steel reinforcement in concrete structures, *Construction and Building Materials*, 54 (2014) 385–401.
- [9] Bo Yu, Jianbo Liu, Zheng Chen. Probabilistic evaluation method for corrosion risk of steel reinforcement based on concrete resistivity, *Construction and Building Materials*, 138 (2017) 101–113.
- [10] Michelle R. Nokken and R. Doug Hooton. *Electrical Conductivity Testing*, American Concrete International, (2006).

- [28] ASTM C 39/C 39M-05. Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
- [29] ASTM C 1760-12. Standard Test Method for Bulk Electrical Conductivity of Hardened Concrete.
- [30] Ma Kang and Li Weibin, Effect of the Aggregate Size on Strength Properties of Recycled Aggregate Concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2018) <https://doi.org/10.1155/2018/2428576>
- [31] C.S. Poon, Z.H. Shui, L. Lam, Effect of microstructure of ITZ on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates, *Construction and Building Materials*, 18 (2004) 461–468.
- [32] Gongbing Yue, Peng Zhang , Qiuyi Li , and Qianqian Li, Performance Analysis of a Recycled Concrete Interfacial Transition Zone in a Rapid Carbonization Environment, *Advances in Materials Science and Engineering*, (2018) <https://doi.org/10.1155/2018/1962457>
- [33] Rob B. Polder. Test methods for onsite measurement of resistivity of Concrete a RILEM TC-154 technical recommendation, *Construction and Building Materials*, 15 (2001) 125-131.
- [34] Thomas, R. J., Properties and Performance of Alkali-Activated Concrete, PhD Thesis, Clarkson University, Department of Civil Engineering, Potsdam NY, 2016.
- Rashki. Using Response Surface Methodology and providing a modified model using whale algorithm for estimating the compressive strength of columns confined with FRP sheets, *Construction and Building Materials*, 183 (2018) 163–170.
- [21] Nikola Tosic, Snezana Marinkovic, Tina Dasic, Milos Stani. Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use, *Journal of Cleaner Production*, 87 (2015) 766–776.
- [22] Mohammad Reza Ghasemi, Hesam Varvae. A fast multi-objective optimization using an efficient ideal gas molecular movement algorithm, *Engineering with Computers*, (2016).
- [23] ASTM C 29/C 29M-97. Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate.
- [24] ASTM C 127-04. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate.
- [25] ASTM C 128-04a. Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine Aggregate.
- [26] ASTM C 33- 01. Standard Specification for Concrete Aggregates.
- [27] ASTM C 642/C 642M-06. Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

A. Gh. dehvari, M. Miri, M. R. Sohrabi, *Determining Optimum Percent of Recycled Coarse Aggregates used in Corrosive Environment Based on Kriging Model. Amirkabir J. Civil Eng.*, 53(3) (2021) 863-878.

DOI: [10.22060/ceej.2019.16560.6299](https://doi.org/10.22060/ceej.2019.16560.6299)

