



بررسی تأثیر جرم حجمی خشک بر پارامترهای دوام و مقاومت روسازی بتن غلتکی با استفاده از روش رویه پاسخ

علیرضا نیکخواه^۱، سید حسام مدنی^{۲*}، جواد سلاجقه^۲

^۱دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته کرمان، کرمان، ایران
^۲بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۳ اردیبهشت ۱۳۹۴
بازنگری: ۱۳ خرداد ۱۳۹۵
پذیرش: ۱۳ شهریور ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۴ آذر ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

بتن غلتکی روسازی راه
جرم حجمی خشک بتن
دوام بتن
روش رویه پاسخ

چکیده: روسازی بتن غلتکی یکی از انواع متداول روسازی‌های صلب است که در سطح گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد. پیش‌بینی عملکرد دوام و مقاومت رویه‌های بتن غلتکی با توجه به پارامترهای اولیه طرح مخلوط به ارتقاء عمر مفید این روسازی‌ها کمک شایانی خواهد نمود. هدف از مطالعه آزمایشگاهی حاضر بررسی تأثیر شاخص جرم حجمی خشک بر مقاومت فشاری و برخی پارامترهای دوام می‌باشد. در این راستا بر اساس روش آماری رویه پاسخ، ۹ طرح اختلاط با احتساب دو تکرار برای هر مخلوط (در مجموع ۱۸ مخلوط) طراحی و ساخته شد. با توجه به تحلیل نتایج آزمایشگاهی، مدل‌ها و کانتورهای جرم حجمی خشک، مقاومت فشاری و معیارهای دوام تا سن ۱۸۰ روز ارائه گردیده است. نتایج نشان می‌دهد که برخلاف بتن معمولی صرفاً کاهش آب به سیمان در یک مقدار سیمان مشخص سبب ارتقاء خواص دوام نخواهد شد و یک تعامل مؤثر بین مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان که سبب حصول چگالی بیشینه گردد به بهبود خواص دوام منجر می‌شود. لیکن مقدار مقاومت فشاری همبستگی مناسبی با چگالی بیشینه نداشته است.

۱- مقدمه

روسازی بتن غلتکی یکی از انواع روسازی‌های صلب است که به واسطه افزایش سرعت ساخت رویه و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری به عنوان یک گزینه مناسب مطرح می‌باشد [۲ و ۱]. از جمله کاربردهای روسازی بتن غلتکی می‌توان به مسیرهای شهری، جاده‌های بین‌شهری، سالن‌های صنعتی، شانه جاده‌ها و توقفگاه‌های بزرگراهی، پارکینگ‌ها و روسازی باند فرودگاه‌ها اشاره نمود. بتن غلتکی در مقایسه با بتن معمولی، دارای حجم خمیر کمتر و ریزدانه بیشتری می‌باشد [۳] که به دلیل حجم خمیر کمتر، روسازی‌های بتن غلتکی، از روانی بسیار اندک برخوردار بوده و در گروه بتن‌های بدون اسلامپ قرار می‌گیرد [۱]. به منظور جای‌دهی و تراکم این نوع بتن به ترتیب از ماشین‌های پخش آسفالت (با کمی تغییرات) و غلتک‌های سنگین چرخ فولادی و یا چرخ لاستیکی استفاده می‌شود [۳].

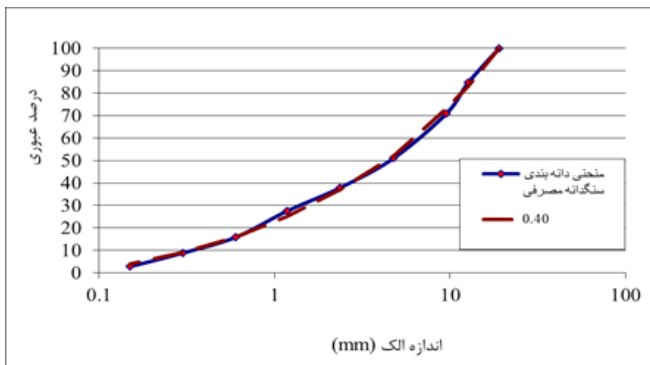
روسازی‌های بتن غلتکی بایستی از عملکرد مناسبی در برابر شرایط آسیب‌رسان محیطی برخوردار باشد تا بدین ترتیب عمر مفید آن‌ها افزایش یافته و در نتیجه هزینه تعمیر و نگهداری آن‌ها به حداقل برسد. به منظور تعیین و پیش‌بینی مشخصه‌های دوام از یکسری آزمایشات ساده‌ای استفاده می‌شود که خود کمک شایانی به کاهش هزینه‌های کنترل کیفی می‌کند.

یکی از معیارهای اساسی مورد استفاده در برخی روش‌ها، روش تراکم

مصالح خاکی می‌باشد که در حال حاضر به صورت وسیعی برای طراحی مخلوط روسازی‌های بتن غلتکی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴]. در این روش (مبتنی بر تراکم ژئوتکنیکی) [۵] بایستی، در یک مقدار سیمان مشخص با تغییر رطوبت (حدوداً ۵ رده رطوبت)، به منحنی چگالی-رطوبت دست‌یافت. با استفاده از این منحنی نسبت بهینه آب، برای دستیابی به حداکثر چگالی در یک عیار سیمان مشخص تعیین می‌گردد. در مرحله بعد لازم است در عیارهای مختلف سیمان (۳ تا ۵ عیار) منحنی‌های چگالی-رطوبت رسم گردد. سپس مقاومت فشاری ۲۸ روزه در درصد‌های رطوبت بهینه، از مخلوط‌های با مقادیر مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. با مقایسه مقدار مقاومت‌های فشاری به دست‌آمده می‌توان حداقل مقدار سیمانی که مقاومت مذکور را تأمین می‌کند، تعیین نمود [۵].

همان‌طور که در روش تراکم ژئوتکنیکی مشاهده می‌شود جرم حجمی خشک و مقاومت فشاری از عوامل تعیین‌کننده در تعیین طرح مخلوط بهینه رویه‌های بتن غلتکی می‌باشند. لذا لازم است ارتباط جرم حجمی خشک با مشخصه‌های دوام و خواص مکانیکی به‌طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد. بدین منظور در مطالعه حاضر از روش آماری رویه پاسخ استفاده شد تا مدل‌هایی جهت تحلیل و بررسی مشخصه‌های عملکردی بیان‌شده استخراج گردد. این روش (روش رویه پاسخ) در مطالعات متعدد همچون بررسی مشخصات بتن‌های خودتراکم‌شونده [۷ و ۶] و توانمند [۸] و همچنین پیش‌بینی خرابی بتن در برابر سیکل‌های یخبندان [۹] و یا بررسی اثر برخی

*نویسنده عهده‌دار مکاتبات: h.madani@kgut.ac.ir



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی استفاده‌شده (در مقایسه با منحنی فولر-تامپسون اصلاح‌شده با توان ۰/۴)

Fig 1. The utilized gradation curve (in comparison with the modified 0.45 Fuller-Thompson curve)

در تمام مخلوط‌ها اختلاف رطوبت سنگ‌دانه با حالت اشباع با سطح خشک از طریق خشک‌کردن نمونه‌های سنگ‌دانه در اون ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت قبل از اختلاط تعیین شده است. آب موجود در سنگ‌دانه فراتر یا کمتر از حالت اشباع با سطح خشک در اصلاح آب آزاد مخلوط در نظر گرفته شده است.

۲-۲ طراحی آزمایش‌ها

روش رویه پاسخ مجموعه‌ای از روش‌های آماری و ریاضی است که برای مدل‌سازی و تحلیل مسائلی که در آن‌ها پاسخ تحت تأثیر چندین متغیر قرار دارد، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱۳]. در مسائل رویه پاسخ رابطه بین پاسخ و متغیرهای مستقل ناشناخته است، بنابراین اولین گام در رویه پاسخ یافتن تقریبی از رابطه صحیح بین پاسخ و مجموعه‌ای از متغیرهای مستقل می‌باشد.

مدلی که در روش رویه پاسخ برای پاسخ در نظر گرفته شده است سطح پاسخ را به صورت تابعی از ترم‌های درجه اول، دوم و تعامل اثر ترم‌های درجه اول لحاظ می‌نماید. بدین ترتیب این مدل توانایی آن را خواهد داشت که انحنای احتمالی در سطوح پاسخ را در نظر بگیرد. اصطلاحاً این مدل را مدل درجه دوم می‌نامند و در رابطه ۱ نشان داده شده است [۱۳].

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i x_i + \sum_{i=1}^n \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (1)$$

برای تشخیص میزان انحنای در سطوح پاسخ برخی نقاط با فاصله بیشتر از حدود تعیین شده برای سطوح پیشینه و حداقل فاکتورها در نظر گرفته می‌شود. برای تعیین نقاط محوری روش‌های متعددی وجود دارد که در این مطالعه از روش طراحی مرکب مرکزی استفاده شده است. در این روش فاصله نقاط محوری برابر جذر تعداد فاکتورها لحاظ می‌گردد. مثلاً برای ۲ فاکتور از مقدار ۱/۴۱ استفاده می‌گردد [۱۳].

پارامترهای مؤثر بر مشخصات مخلوط‌های بتنی [۱۲-۱۰] مورد استفاده قرار گرفته است و عملکرد مناسب آن در پیش‌بینی رفتار بتن تأیید شده است. در این مطالعه نیز با در نظر گرفتن روش تراکم ژئوتکنیکی [۱] فاکتورهای نظیر مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان به عنوان عوامل متغیر در نظر گرفته شدند. سپس با استفاده از روش رویه پاسخ برای لحاظ کردن اثر فاکتورهای مذکور، ۹ طرح مخلوط طراحی گردید. برای افزایش دقت برازش مدل‌ها، طرح‌های مخلوط با فاصله یک ماهه هر کدام یک بار تکرار و نمونه‌ها برای انجام آزمایش‌ها ساخته شدند که در مجموع ۱۸ مخلوط مورد بررسی قرار گرفت. سپس از هر طرح اختلاط، آزمایش‌های جرم حجمی خشک، جذب حجمی آب، جذب موئینه و مقاومت فشاری گرفته شد. با تحلیل نتایج آزمایشگاهی از روش رویه پاسخ برای هر یک از مشخصه‌ها، مدلی برحسب فاکتورهای سیمان و آب به سیمان به دست آمده و کانتورهای پاسخ رسم و بحث روی نتایج انجام گرفته است و در نهایت تأثیر جرم حجمی اولیه بتن بر مشخصات مقاومتی و دوام بتن بررسی شده است.

۲- مطالعات آزمایشگاهی

۲-۱- مشخصات مصالح

سیمان مورد استفاده در این مطالعه از نوع تیپ ۲ بوده و آنالیز شیمیایی آن در جدول ۱ ارائه شده است. سنگ‌دانه‌ها نیز شامل ماسه سیلیسی رودخانه‌ای با حداکثر بعد ۴/۷۵ میلی‌متر، جذب آب ۰/۹ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک 2590 kg/m^3 ، سنگ‌دانه نخودی سیلیسی با حداکثر بعد ۱۲/۵ میلی‌متر، جذب آب ۱/۵ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک 2630 kg/m^3 و سنگ‌دانه بادامی با حداکثر بعد ۱۹ میلی‌متر، جذب آب ۰/۸ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک 2650 kg/m^3 بوده‌اند. اختلاف رطوبت طبیعی مصالح از مقدار جذب آب هر یک محاسبه و در تعیین آب آزاد مخلوط لحاظ شده است.

بررسی‌های صورت گرفته بر روی مطالعات مختلف نشان می‌دهد، در اکثر آن‌ها منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه روسازی‌های بتن غلتکی به صورت ترکیبی پیشنهاد شده است [۱-۴، ۱۳]. شایان ذکر است که اغلب این منحنی‌ها نیاز به درصد ریزدانه (زیر الک ۲۰۰) بالای حدود ۸-۲ درصد دارند. در برخی از این مطالعات تطابق بر منحنی فولر-تامپسون با توان ۰/۴ یا ۰/۵ توصیه شده است [۱]. با توجه به اینکه ماسه‌ی مورد استفاده در این تحقیق مقدار زیر الک ۲۰۰ کمی داشت و نمی‌توانست در محدوده منحنی‌های دانه‌بندی مذکور قرار گیرد، لذا پس از بررسی منحنی‌های دانه‌بندی مختلف از منحنی فولر-تامپسون اصلاح‌شده با توان ۰/۴ و حداکثر بعد ۱۹ میلی‌متر استفاده شد. منحنی دانه‌بندی ترکیبی استفاده‌شده در شکل ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: آنالیز شیمیایی سیمان مصرفی (درصد وزنی)

Table 1. The chemical analysis of cement (%)

Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	MgO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO
۰/۲۸	۰/۵۹	۲/۴۵	۳/۵۷	۳/۸	۴/۶	۲۱/۲	۶۲/۲

جدول ۲: مقادیر کد شده سیمان و آب به سیمان

Table 2. The coded values for cement and w/c

کد	نوع نقطه	سیمان	آب به سیمان
Ci	Central	۰(۳۵۰)	۰(۳۷/۰)
F1	Factorial	-۱(۳۲۰)	-۱(۳۵/۰)
F2	Factorial	۱(۳۸۰)	-۱(۳۵/۰)
F3	Factorial	-۱(۳۲۰)	۱(۳۹/۰)
F4	Factorial	۱(۳۸۰)	۱(۳۹/۰)
CC1	Axial	-۱/۴۱۴(۳۰۷)	۰(۳۷/۰)
CC2	Axial	۱/۴۱۴(۳۹۲)	۰(۳۷/۰)
CC3	Axial	۰(۳۵۰)	-۱/۴۱۴(۳۴۱/۰)
CC4	Axial	۰(۳۵۰)	۱/۴۱۴(۳۹۸/۰)

۲-۳- روش آزمون، ساخت مخلوطها و نمونه سازی

با استفاده از رابطه ۲ می توان با تبدیل مقادیر کد شده مقدار واقعی سیمان و آب به سیمان را برای ساخت مخلوطهای آزمایشی به دست آورد. برای اختلاط بتن های غلتکی در این مطالعه از یک مخلوط کن تغاری ۱۰۰ لیتری استفاده شده است. نحوه اختلاط شامل دو دقیقه اختلاط خشک مصالح، افزودن آب به مخلوط در حال اختلاط در یک بازه زمانی ۳۰ ثانیه و ادامه اختلاط به مدت ۳ دقیقه بوده است.

در این مطالعه روش تراکم ژئوتکنیکی مطابق با روش D استاندارد ASTM D1557 [۵] برای تعیین جرم حجمی خشک مخلوطها بوده است. در این روش بلافاصله پس از اتمام اختلاط، بتن تازه در ۵ لایه و هر لایه ۵۶ ضربه توسط چکش پراکتور^۱ متراکم شده است. سپس وزن نمونه ها اندازه گیری شده و با تعیین درصد رطوبت، جرم حجمی خشک آن ها تعیین شده است.

ساخت نمونه های استوانه ای مخلوطهای بتن غلتکی مطابق با روش استاندارد ASTM C1435 [۱۵] انجام شده است. در این روش از یک چکش ۹/۷ کیلوگرمی با تعداد ضربه ۲۰۰۰ در دقیقه برای تراکم بتن در چهار لایه استفاده شده است. هر لایه طبق توصیه استاندارد حداکثر در مدت زمان ۲۰ ثانیه متراکم شده است. در شکل ۲ مخلوط کن استفاده شده، نحوه تراکم با چکش پراکتور و نحوه آماده سازی نمونه های استوانه ای نشان داده شده است. پس از آماده سازی، نمونه ها با پوشش مرطوب به مدت ۱۸ ساعت پوشیده شده اند تا از تبخیر سطحی آن ها جلوگیری گردد، سپس در حوضچه بتن حاوی آب آهک اشباع تا زمان انجام آزمایش ها عمل آوری شده اند. آزمون مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روز روی نمونه های بتنی مطابق با استاندارد ASTM C39 [۱۶] انجام گرفته است.

به منظور بررسی وضعیت دوام بتن سخت شده در سن ۱۸۰ روز آزمون

در مطالعه حاضر فاکتورهای مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان در سطوح $-\alpha$ ، -1 ، 0 ، $+1$ ، $+\alpha$ ($\alpha=1/41$) بررسی شده است. در جدول ۲ طرح های آماری رویه پاسخ به صورت کد شده ارائه گردیده است. مدل طراحی شده در این مقاله برای متغیرهای انتخابی دارای محدوده تغییرات مقدار سیمان از ۳۰۷ تا ۳۹۲ کیلوگرم بر مترمکعب و میزان آب به سیمان از ۰/۳۴۲ تا ۰/۳۹۸ است. لازم به ذکر است کلیه طرحها دو مرتبه در بازه های زمانی متفاوت برای محاسبه پارامتر فقدان برازش مدل ها ساخته شده است. برای تبدیل مقادیر کد بندی شده متغیرها به مقادیر مطلق هر یک از آن ها در طرح های اختلاط واقعی می توان از رابطه ۲ استفاده کرد.

$$a = a_0 + x \times \Delta a \quad (2)$$

در این رابطه X مقدار عدد کد گذاری شده در جدول شماره ۲ است و a_0 مقدار واقعی فاکتور در نقطه مرکزی (در این تحقیق ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای سیمان و ۰/۳۷ برای نسبت آب به سیمان). مقادیر ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نسبت آب به سیمان ۰/۳۷ بر اساس تجربیات قبلی در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی تعیین گردیدند. شایان ذکر است که در این مطالعه مقدار توان منحنی اصلاح شده دانه بندی در حد ۰/۴ لحاظ گردید که نسبت به توان معمول منحنی (۰/۴۵ تا ۰/۵) کوچکتر است لذا این منحنی دانه بندی مقداری نیاز آبی را بالا می برد و به همین دلیل مقدار آب به سیمان در نقطه مرکزی بیش از ۰/۳۵ و در حد ۰/۳۷ در نظر گرفته شد. هم چنین در مطالعه انجام شده در مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی برای عبارهای سیمان کمتر از ۳۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و آب به سیمان های کمتر از ۰/۳۳ کارپذیری (تراکم پذیری) پایین بتن مشاهده گردید. از طرفی استفاده از سیمان در مقادیر بیش از ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب چه از لحاظ اقتصادی و چه از نظر مسائل فنی همچون جمع شدگی و ترک خوردگی های ناشی از آن مناسب نمی باشد. از این رو مقدار سیمان در بازه ۳۰۷ تا ۳۹۲ کیلوگرم بر مترمکعب تعیین گردید. نسبت آب به سیمان نیز در بازه ۰/۳۴۱ تا ۰/۳۹۸ لحاظ شده است. اگرچه حد بالای آن به نظر زیاد و اجرایی می باشد، اما در این مطالعه هدف تعیین تأثیر این نسبت روی برخی از مشخصات بتن است، لذا استفاده از نسبت های بالا جهت مشاهده تأثیر مخرب آن نیاز بوده است. تغییرات واقعی فاکتور برای یک واحد تغییر در سطح کد شده (Δa)، ۳۰ کیلوگرم و به طور مشابه برای آب به سیمان برابر ۰/۰۲ منظور شده است. برای مثال در سطح کد شده آب به سیمان برابر ۰/۸ مقدار واقعی نسبت آب به سیمان در مخلوط از رابطه ذیل تعیین می گردد.

$$0/37 + 0/02 \times 0/8 = 0/386 \quad (3)$$

به سیمان طرح اختلاط‌های مطالعه حاضر و همچنین نتایج آزمون‌های انجام‌شده برای هر طرح نشان داده‌شده است.

جذب حجمی آب و منافذ قابل نفوذ، بر اساس استاندارد ASTM C 642 [۱۷] و جذب مؤئینه آب بر روی نمونه‌ها بر اساس استاندارد ASTM C 1585 [۱۸] انجام شده است. در جدول ۳ مقادیر سیمان و نسبت آب



شکل ۲: مخلوط کن استفاده‌شده، نحوه تراکم با چکش تراکتور و نحوه آماده‌سازی نمونه‌های استوانه‌ای

Fig 2. The concrete mixer, Compaction method with the proctor hammer and preparation of cylindrical specimens

جدول ۳: طرح اختلاط و نتایج آزمایش‌ها

(C: طرح مخلوط در نقطه مرکزی طراحی، F: طرح مخلوط در نقاط میانی، CC: طرح مخلوط در نقاط محوری)

Table 3. Mixture proportions and test results (C: mix design in the central point, F: mix design in the middle points, and CC: mix design in the axial points)

مقاومت فشاری ۲۸ روز (تکرار) (MPa)	مقاومت فشاری ۲۸ روز (MPa)	مقاومت فشاری ۷ روز (تکرار) (MPa)	مقاومت فشاری ۷ روز (MPa)	جذب مؤئینه	منافذ قابل نفوذ (%)	جذب حجمی آب (%)	چگالی خشک (کیلوگرم بر مترمکعب)	آب به سیمان	سیمان (کیلوگرم بر مترمکعب)	شماره مرجع	شماره مخلوط
۴۱	۴۲/۴	۳۱/۸۱	۳۰/۵۵	۱/۷۶۶	۱۰/۹۸۳	۴/۵۳	۲۳۶۲	۰/۳۷	۳۵۰	C ₁	۱
۴۳/۷	۴۳/۳۵	۳۰/۲۴	۳۲/۸۵	۲/۵۹۰	۱۲/۳۴	۵/۲۶	۲۳۰۷	۰/۳۵	۳۲۰	F ₁	۲
۴۷/۲۵	۴۸	۳۶/۶۲	۳۴/۱۰	۱/۸۸۳	۱۱/۶۸	۴/۸۶	۲۳۵۷	۰/۳۵	۳۸۰	F ₂	۳
۴۱/۳۵	۴۲/۷	۳۳/۱۴	۳۶/۴۵	۲/۳۰۶	۱۲/۲۰	۵/۲۴	۲۲۷۲	۰/۳۹	۳۲۰	F ₃	۴
۳۵	۲۹/۲۳	۲۶/۳۲	۲۴/۲	۲/۱۱۹	۱۳/۷۱۹	۵/۷۸	۲۲۴۴	۰/۳۹	۳۸۰	F ₄	۵
۴۳/۱۰	۴۴/۷	۳۰/۵۰	۲۸/۰	۲/۵۳۱	۱۲/۵۰۲	۵/۳۳	۲۲۵۰	۰/۳۷	۳۰۷/۷	CC ₁	۶
۴۰/۳۸	۳۹/۸	۳۱/۸۴	۳۳/۲	۲/۰۰۱	۱۲/۷۶	۵/۳۴	۲۲۸۹	۰/۳۷	۳۹۲/۳	CC ₂	۷
۴۳/۸۰	۴۴/۸	۳۷/۱۵	۳۶/۷	۲/۴۴۳	۱۱/۳۱۴	۴/۶۹	۲۲۷۶	۰/۳۴۱	۳۵۰	CC ₃	۸
۳۳/۹۰	۳۵/۹۵	۲۵/۷۶	۲۸/۴	۲/۱۷۸	۱۳/۲۸	۵/۵۷	۲۲۵۲	۰/۳۹۸	۳۵۰	CC ₄	۹

۳-۱- مدل جرم حجمی خشک

جذب حجمی آب و میزان منافذ قابل نفوذ نشان‌دهنده تخلخل قابل نفوذ بتن بوده و معیاری از پیوسته بودن و ریزساختار به دست نمی‌دهد، در واقع تنها حجم کلی منافذ قابل نفوذ را محاسبه می‌کند [۲۱]. در مسئله دوام بتن در برابر سیکل‌های یخبندان توصیه می‌شود بتن از حالت اشباع خارج شود

۳-۲ مدل‌های پاسخ

در این مطالعه نرم‌افزارهای تحلیل آماری mini tab [۱۹] و Design expert [۲۰] به کار گرفته شده است. از این نرم‌افزارها جهت آنالیز نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی پاسخ، به‌وسیله برازش کردن یک مدل به کمک آنالیز آماری سطح پاسخ استفاده شده است.

و نتایج این آزمون در جدول ۳ ارائه شده‌اند. بر اساس این نتایج یک مدل آماری مطابق رابطه ۴ با استفاده از روش رویه پاسخ استخراج گردید. نتایج آنالیز آماری مدل جذب حجمی آب در سن ۱۸۰ روز در جدول ۵ نشان داده شده است. این نتایج نشان می‌دهد در سنین بالا تمامی فاکتورهای آب به سیمان و تعامل اثر آب به سیمان و عیار سیمان در جذب حجمی آب بتن مؤثر بوده‌اند. با توجه به مؤثر بودن تعامل اثر و همچنین ترم مرتبه دوم عیار سیمان از لحاظ آماری [۱۳] عیار سیمان نیز فاکتوری مؤثر خواهد بود.

$$w/c + 38/63 \times w/c \times w/c + 0/430 \times C \times C \quad (5)$$

۳-۳- منافذ قابل نفوذ

یکی دیگر از مشخصه‌های دوام بتن حجم منافذ قابل نفوذ است. این آزمون بر اساس استاندارد ASTM C 642 [۱۷] روی نمونه‌های برش داده شده از استوانه‌های عمل‌آوری شده در حوضچه آب‌آهک اشباع در سن ۱۸۰ روز انجام شده است و نتایج در جدول ۳ ارائه گردیده‌اند. بر اساس این نتایج یک مدل آماری با استفاده از روش رویه پاسخ استخراج و در رابطه ۵ و جدول ۶ ارائه شده است. در مدل منافذ قابل نفوذ نیز همانند جذب حجمی آب، تمامی فاکتورها بر اساس معیار قابلیت احتمال ۹۵ درصد، مؤثر تشخیص داده شده‌اند. مدل ارائه شده در این بخش همچون جذب حجمی آب مناسب بوده است. شایان ذکر است که ملاک خوب بودن مدل شاخص احتمال مدل است. زمانی که مقدار احتمال بیشتر از ۰/۹۵ (p-value کمتر از ۰/۰۵) باشد مدل را مدلی مناسب تشخیص می‌دهیم.

$$10/983 + 0/152C + 0/585w/c + 0/544C \times w/c + 0/662w/c \times w/c + 0/829 + C \times C \quad (6)$$

جدول ۵: نتایج آنالیز آماری جذب حجمی آب

Table 5. The water absorption test results

ضریب رگرسیون (در حالت کد شده)	p-value	مؤثر بودن	آنالیز مدل
-	۰/۰۰۶	مؤثر	مدل
۴/۵۰۳	۰/۰۰۰	مؤثر	ثابت معادله
۰/۰۱۹	۰/۵۲۶	مؤثر	مقدار سیمان
۰/۲۷۰	۰/۰۰۳	مؤثر	نسبت آب به سیمان
۰/۲۳۴	۰/۰۱۱	مؤثر	تعامل اثر سیمان و آب به سیمان
۰/۴۳۰	۰/۰۰۳	مؤثر	ترم مرتبه دوم سیمان
۰/۳۲۸	۰/۰۰۷	مؤثر	ترم مرتبه دوم آب به سیمان

تا عملکرد مناسبی در پدیده آب شدن و یخ‌بندان داشته باشد. می‌توان انتظار داشت در صورتی که بتن از حالت اشباع خارج شود، کمتر بودن حجم منافذ قابل نفوذ به دیرتر اشباع شدن منافذ بتن منجر گردد، در نتیجه بتن آسیب کمتری در سیکل‌های یخ‌بندان ببیند. نرخ نفوذ رطوبت به داخل بتن نیز می‌تواند با معیار جذب موئینه سنجیده شود که در بخش بعدی به آن اشاره خواهد شد [۲۲ و ۲۳].

جدول ۴: نتایج آنالیز آماری جرم حجمی خشک

Table 4. The dry density test results

ضریب رگرسیون (در حالت کد شده)	p-value	مؤثر بودن	آنالیز مدل
-	۰/۰۰۱	مؤثر	مدل
۲۳۵۶/۳۴	۰/۰۰۰	مؤثر	ثابت معادله
۹/۳۶	۰/۱۲۴	مؤثر*	مقدار سیمان
-۲۲/۵۷	۰/۰۰۳	مؤثر	نسبت آب به سیمان
-۲۲	۰/۰۲۳	مؤثر	تعامل اثر سیمان و آب به سیمان
-۳۵/۷۶	۰/۰۰۱	مؤثر	ترم مرتبه دوم سیمان
-۳۸/۶۳	۰/۰۰۱	مؤثر	ترم مرتبه دوم آب به سیمان

در جدول ۳ مقادیر جرم حجمی خشک مخلوط‌های مختلف ارائه شده است. با استفاده از روش رویه پاسخ مدل رگرسیون تعیین و نتایج آنالیز مدل در جدول ۴ نشان داده شده است. مقدار احتمال یا p-value شاخصی برای تعیین میزان تأثیر هر فاکتور در مدل است. اگر مقدار این شاخص کمتر از ۰/۰۵ باشد فاکتور مؤثر است [۱۳]. همان‌طور که مشاهده می‌شود نسبت آب به سیمان یک فاکتور مؤثر است. فاکتور مقدار سیمان نیز با توجه به آن که ترم تعامل اثر آب به سیمان و مقدار سیمان و همچنین ترم مرتبه دوم مقدار سیمان مؤثر شناخته شده‌اند یک فاکتور مؤثر خواهد بود. با توجه به مؤثر بودن تمام ترم‌های معرفی شده، یک مدل پیش‌بینی مناسب جرم حجمی خشک استخراج شده است. مدل پیش‌بینی جرم حجمی خشک بر حسب ترم‌های آب به سیمان و مقدار سیمان در رابطه ۳ ارائه شده است. در این مدل مقادیر در حالت کد شده استفاده می‌شوند. برای تبدیل مقادیر کد شده به حالت واقعی می‌توان از رابطه ۲ استفاده نمود.

$$2356/34 + 9/36C - 22/56w/c - 22C \times w/c - 38/63w/c \times w/c - 35/76C \times C \quad (4)$$

۳-۲- جذب حجمی آب

آزمون جذب حجمی آب در سن ۱۸۰ روز بر روی نمونه‌های برش داده شده از نمونه‌های استوانه‌ای، بر اساس استاندارد ASTM C 642 [۱۷] انجام گردیده است. تعدادی از نمونه‌های برش داده شده در شکل ۳

۳-۵- مدل مقاومت فشاری ۲۸ روزه

آزمون مقاومت فشاری ۲۸ روی نمونه‌های استوانه‌ای انجام شده است. نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روز در جدول ۳ و آنالیز آماری در جدول ۸ نشان داده شده است. با استفاده از روش آماری رویه پاسخ فاکتورهای نسبت آب به سیمان، عیار سیمان و تعامل این دو فاکتور بر مقاومت فشاری ۲۸ روز مؤثر تشخیص داده شدند. لیکن ترم‌های مرتبه دوم نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان به دلیل داشتن مقدار احتمال پایین، ترم مؤثری در مدل شناخته نشدند. مدل مقاومت فشاری ۲۸ روز بتن در رابطه ۷ و کنتور استخراجی از مدل در شکل ۴ ارائه شده است.

همان‌طور که در کانتور مقاومت فشاری مشهود است فاکتور مقدار آب به سیمان بر مقاومت فشاری بسیار اثرگذار بوده و با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری افزایش قابل توجهی داشته است. لیکن در آب به سیمان‌های بالا تغییرات مقدار سیمان تأثیر زیادی بر مقاومت فشاری نداشته است.

$$40/467 - 1/57C - 3/78w/c = \text{مقاومت فشاری } 28 \text{ روزه} \quad (8)$$

$$-3/5C \times wc - 0/708C \times C + 0/235w/c \times w/c$$

جدول ۸: نتایج آنالیز آماری مقاومت فشاری ۲۸ روز

Table 8. The 28days compressive strengths

ضریب رگرسیون (در حالت کد شده)	p-value	مؤثر بودن فاکتور	آنالیز مدل
	۰/۰۰۰	مؤثر	مدل
۴۰/۴۶۶۷	۰/۰۰۰	مؤثر	ثابت معادله
-۱/۵۷۴۸	۰/۰۰۳	مؤثر	مقدار سیمان
-۳/۷۸۳۵	۰/۰۰۰	مؤثر	نسبت آب به سیمان
-۳/۵۰۲۵	۰/۰۰۰	مؤثر	تعامل اثر سیمان و آب به سیمان
۰/۷۰۸۲	۰/۰۲۷۷	مؤثر	ترم مرتبه دوم سیمان
-۰/۲۳۵۵	۰/۷۱۲	غیر مؤثر	ترم مرتبه دوم آب به سیمان

جدول ۶: نتایج آنالیز آماری منافذ قابل نفوذ

Table 6. The permeable voids test results

ضریب رگرسیون (در حالت کد شده)	p-value	مؤثر بودن	آنالیز مدل
	۰/۰۰۱	مؤثر	مدل
۱۰/۹۸۳	۰/۰۰۰	مؤثر	ثابت معادله
-۰/۱۵۲	۰/۰۱۲	مؤثر	مقدار سیمان
-۰/۵۸۵	۰/۰۰۴	مؤثر	نسبت آب به سیمان
-۰/۵۴۴	۰/۰۱۳	مؤثر	تعامل اثر سیمان و آب به سیمان
-۰/۸۲۹	۰/۰۰۶	مؤثر	ترم مرتبه دوم سیمان
-۰/۶۶۲	۰/۰۱۲	مؤثر	ترم مرتبه دوم آب به سیمان

۳-۴- جذب موئینه آب

یکی دیگر از آزمون‌های دوام بتن که برای بررسی ریزساختار آن در سنین بالا بر روی نمونه‌های بتنی انجام می‌شود، آزمون جذب موئینه آب است. برای این کار ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای در سن ۱۸۰ روز برش داده شده و جذب موئینه هر طرح بر اساس استاندارد ASTM C 1585 [۱۸] محاسبه و در جدول ۳ نتایج ارائه شده است. در شکل ۳ نحوه انجام آزمایش جذب موئینه آب روی نمونه‌های استوانه‌ای نشان داده شده است. در مرحله بعد برای بررسی جذب موئینه مدل ارائه شده در رابطه ۶ استخراج گردید که تحلیل آماری آن در جدول ۷ شده است.

$$10^{-2} \times 1/7660 - 0/1716C - 0/0865w/c + 0/19C \times w/c + 0/2395w/c \times w/c + 0/2174C \times C = \text{جذب موئینه} \quad (7)$$

جدول ۷: نتایج آنالیز آماری جذب موئینه

Table 7. The capillary water absorption test results

ضریب رگرسیون (در حالت کد شده)	p-value	مؤثر بودن	آنالیز مدل
	۰/۰۴۱	مؤثر	مدل
$1/7660 \times 10^{-2}$	۰/۰۰۱	مؤثر	ثابت معادله
$-0/1716 \times 10^{-2}$	۰/۰۲۲	مؤثر	مقدار سیمان
$-0/0865 \times 10^{-2}$	۰/۱۱۴	مؤثر	نسبت آب به سیمان
$-0/1972 \times 10^{-2}$	۰/۰۳۸	مؤثر	تعامل اثر سیمان و آب به سیمان
$-0/2174 \times 10^{-2}$	۰/۰۴۴	مؤثر	ترم مرتبه دوم سیمان
$-0/2395 \times 10^{-2}$	۰/۰۳۴	مؤثر	ترم مرتبه دوم آب به سیمان

۳-۶- ارتباط جرم حجمی خشک با جذب حجمی آب، منافذ قابل نفوذ و مقاومت فشاری ۲۸ روزه

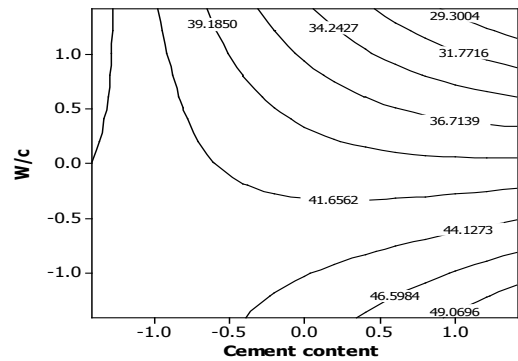
در شکل ۵ منحنی‌های کانتورهای جرم حجمی خشک و جذب حجمی آب، در شکل ۶ نمودار همبستگی جذب حجمی با جرم حجمی خشک و مقاومت فشاری ۲۸ روزه، در شکل ۷ منحنی‌های کانتورهای جرم حجمی خشک و منافذ قابل نفوذ و در شکل ۸ نمودار همبستگی منافذ قابل نفوذ با جرم حجمی خشک، مقاومت فشاری ۲۸ روزه و جذب حجمی همگی برحسب مدل‌های استخراجی از روش رویه پاسخ، روند یکسانی در رسیدن به مخلوط بهینه مشاهده می‌شود. بر این اساس می‌توان به این نتیجه رسید که همبستگی خوبی بین جذب حجمی آب و چگالی خشک وجود دارد لیکن این همبستگی بین مقاومت فشاری و جذب حجمی آب مشاهده نمی‌شود. همچنین در مقایسه با جرم حجمی خشک، منافذ قابل نفوذ همبستگی بهتری با مقاومت فشاری دارند.

۳-۷- ارتباط جرم حجمی خشک و جذب موئینه

جذب موئینه معیاری برای سنجش میزان پیوستگی ریزساختار است. هراندازه نرخ جذب موئینه کندتر باشد مخلوط دارای ریزساختار منسجم‌تر و غیر پیوسته خواهد بود [۲۴ و ۲۵]. در شکل ۹ منحنی‌های کانتورهای جرم حجمی خشک و ضریب جذب موئینه و در شکل ۱۰ نمودار همبستگی ضریب جذب موئینه با جرم حجمی خشک، مقاومت فشاری ۲۸ روزه و منافذ قابل نفوذ بر اساس مدل‌های استخراجی ارائه شده‌اند. هر چند با مشاهده کانتورها به صورت کیفی برخی روندهای مشابه برای ضریب جذب موئینه با جرم حجمی خشک یا منافذ قابل نفوذ مشاهده می‌شود، لیکن همبستگی مناسبی بین معیارهای ضریب جذب موئینه با مقاومت فشاری، جذب حجمی آب و جرم حجمی خشک وجود ندارد. به عبارتی با تعیین جرم حجمی خشک مقدار ضریب نفوذ موئینه به صورت مناسب پیش‌بینی نمی‌گردد.



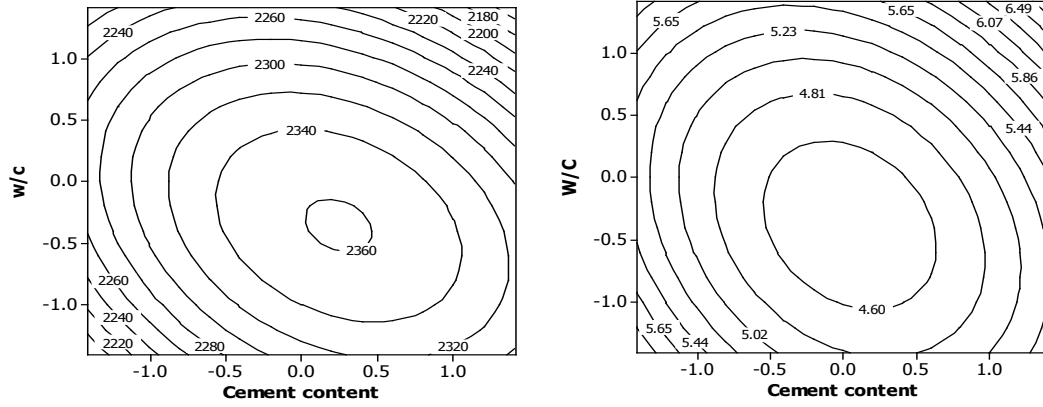
شکل ۳: نمونه‌های آزمون جذب حجمی و موئینه
Fig 3. The specimens utilized in the water absorption and sorptivity tests



شکل ۴: منحنی کانتور مقاومت فشاری ۲۸ روز (MPa)

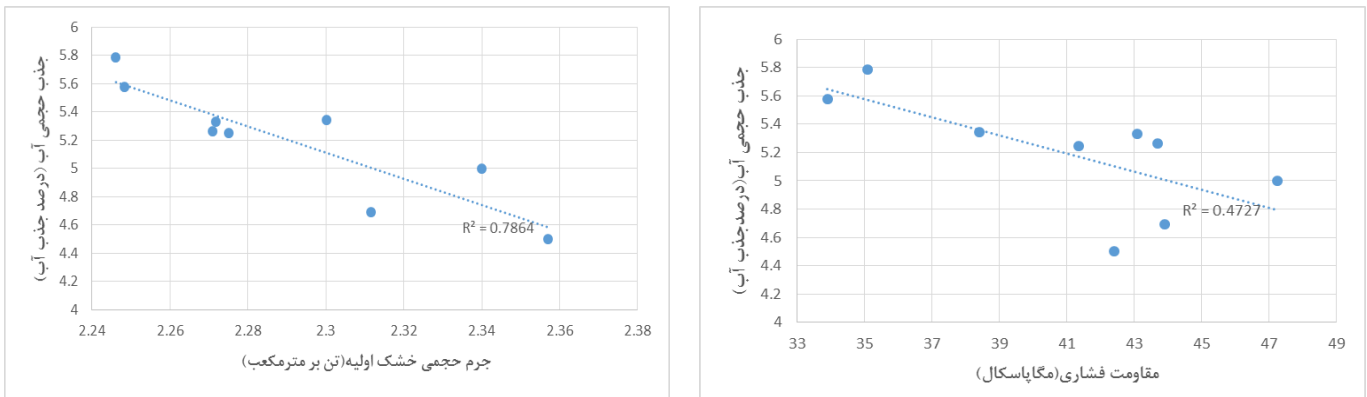
Fig 4. The contour curve of 28 days compressive strength (MPa)

نقاط بهینه کانتورهای جرم حجمی خشک، منافذ قابل نفوذ و جذب حجمی آب در یک محدوده قرار گرفته است و شمای کلی کانتورها بسیار به هم شبیه است. می‌توان این‌طور نتیجه‌گیری کرد اگر در ابتدا جرم حجمی خشک حداکثری برای بتن به دست آید در نهایت جذب حجمی آب و منافذ قابل نفوذ آن که نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود دوام بتن دارند در مقدار حداقلی و بهینه قرار می‌گیرد. شایان ذکر است که برخلاف بتن معمولی صرفاً کاهش آب به سیمان در یک مقدار سیمان مشخص سبب ارتقاء خواص دوام نخواهد شد و یک تعامل مؤثر بین مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان که سبب حصول چگالی بیشینه گردد به بهبود خواص دوام منجر می‌گردد. همبستگی مناسب (حدود ۸۰ درصد) جرم حجمی خشک با جذب حجمی آب و منافذ قابل نفوذ در اشکال ۶ و ۸ نیز مؤید این مطلب است.



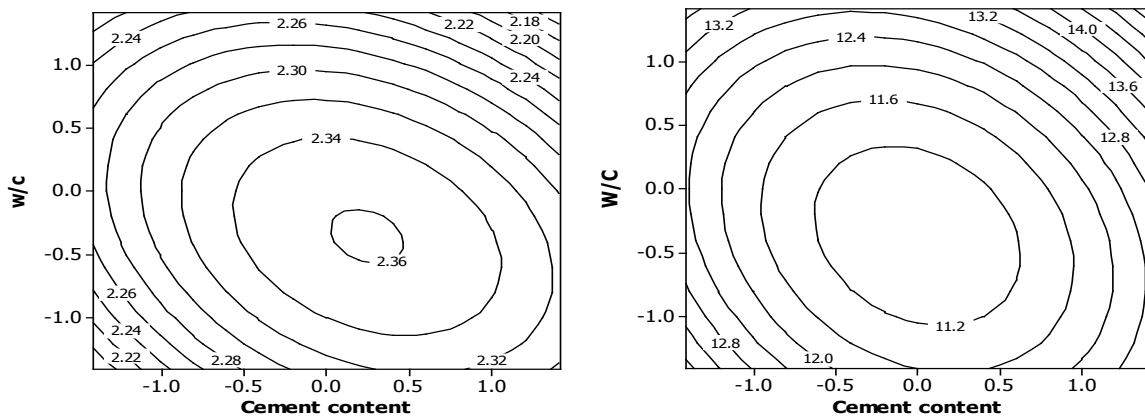
شکل ۵: منحنی کانتور از راست به چپ جذب حجمی آب (%) و جرم حجمی خشک (kg/m^3)

Fig 5. The contour curves, right) water absorption (%) and, left) dry density (kg/m^3)



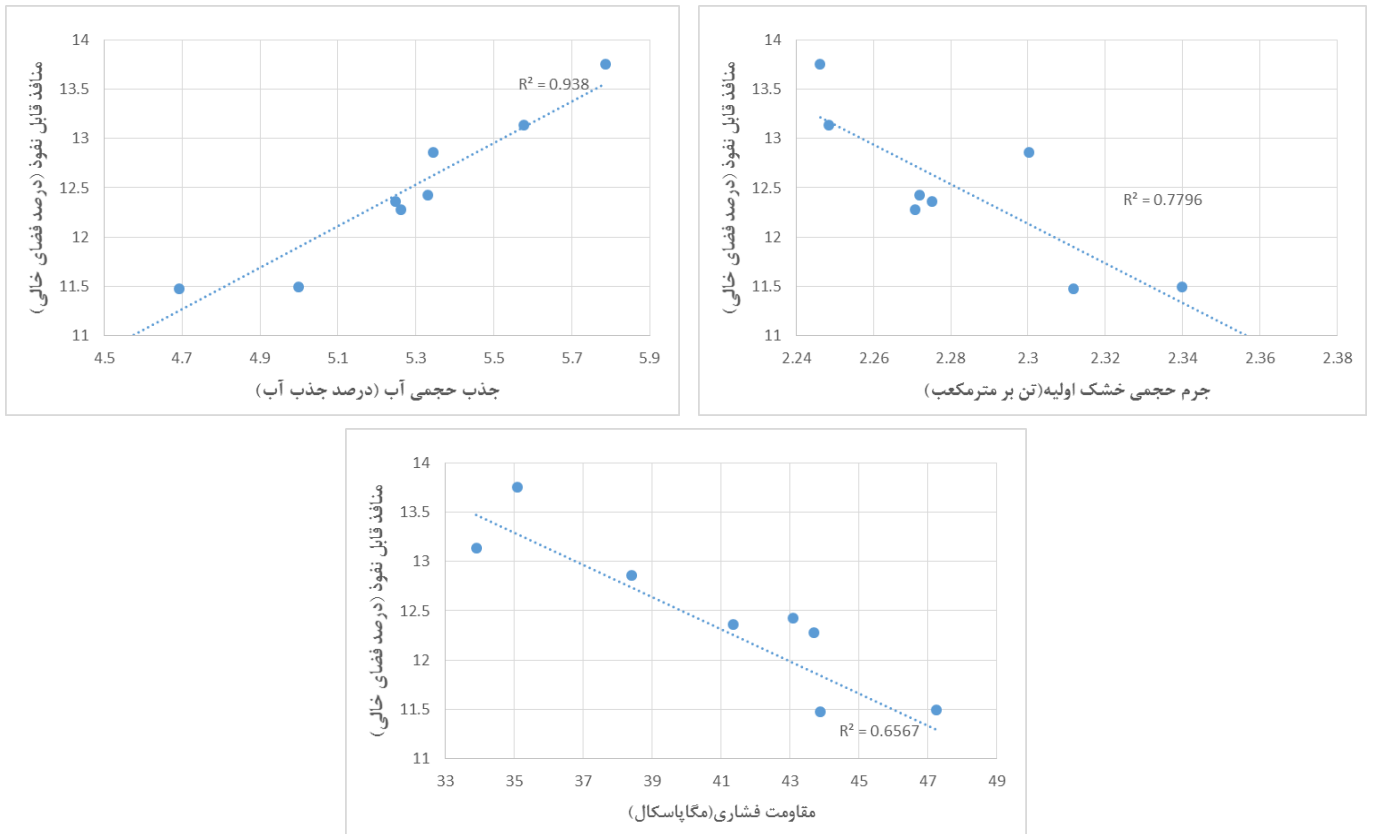
شکل ۶: نمودار همبستگی مقادیر مطابقت شده مدل‌های جذب حجمی آب با جرم حجمی خشک (Ton/m^3) و مقاومت فشاری (MPa)

Fig 6. The correlation between the contents of water absorption and those attributed to the dry density (T/m^3) and compressive strength (MPa)



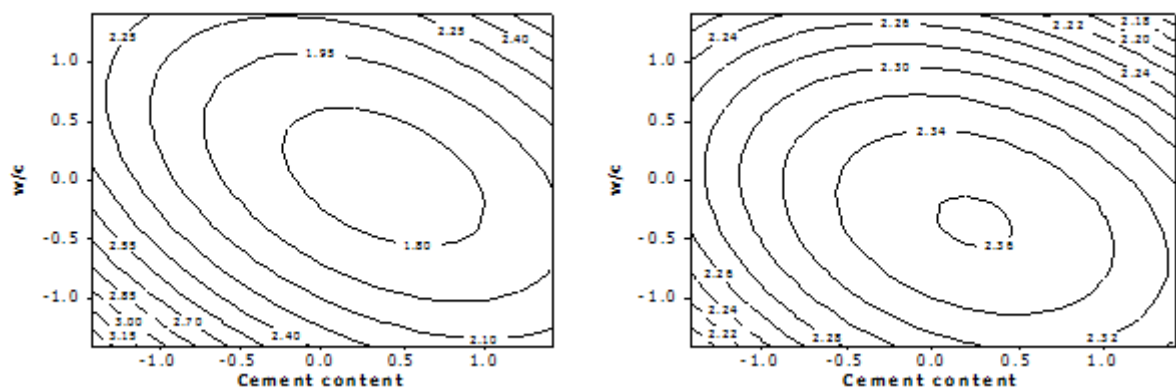
شکل ۷: منحنی کانتور از راست به چپ منافذ قابل نفوذ (%) و جرم حجمی خشک (Ton/m^3)

Fig 7. The contour curves, right) permeable voids, and left) dry density (T/m^3)



شکل ۸: نمودار همبستگی مقادیر مطابق شده مدل‌های منافذ قابل نفوذ (%) با جرم حجمی خشک (Ton/m^3)، مقاومت فشاری (MPa) و جذب حجمی آب (%)

Fig 8. The correlation between the permeable voids contents and those attributed to the dry density (T/m^3), compressive strength (MPa), and water absorption (%)



شکل ۹: منحنی کنتور از چپ به راست چرم حجمی خشک (Ton/m^3)، ضریب جذب موئینه ($\text{mm}/\sqrt{s} \times 10^2$)

Fig 9. The contour curves, right) dry density, and left) capillary water absorption (T/m^3)

می‌دهد.

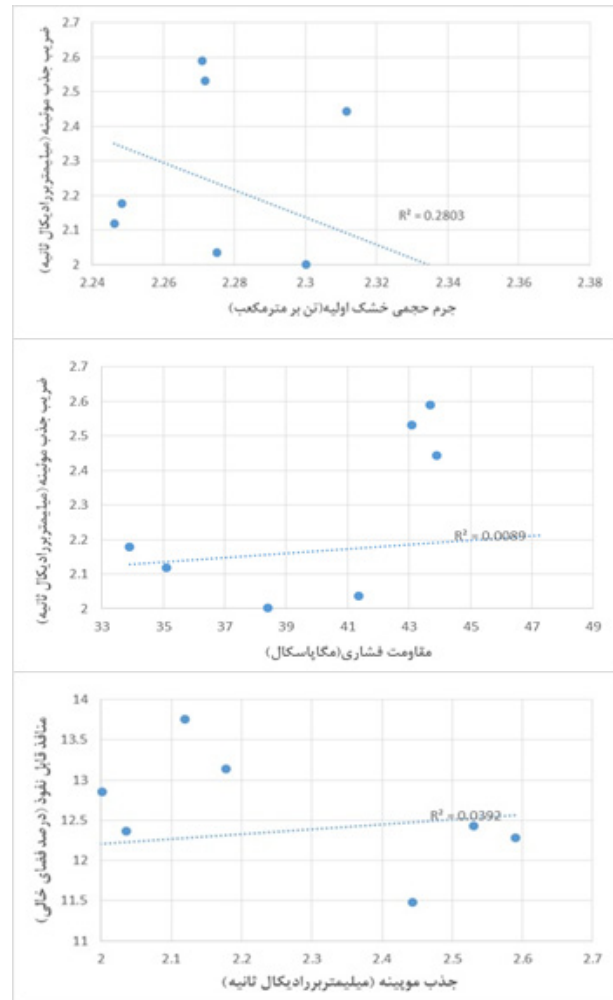
روش رویه پاسخ با ارائه نمودار و کانتورهای تفسیری و تعیین میزان تأثیر کم یا زیاد کردن هر کدام، به ما کمک می‌کند تا با تحلیلی دقیق، میزان مصالح مصرفی را در بهینه‌ترین حالت از نظر فنی و اقتصادی انتخاب کنیم. مدل‌هایی برای پیش‌بینی مشخصه‌های جرم حجمی خشک، منافذ قابل نفوذ، جذب حجمی آب و ضریب جذب موئینه با توجه به مصالح موجود ارائه گردید که می‌توانند برای مصالح مشابه مورد بررسی و استفاده قرار گیرند. فاکتورهای مقدار سیمان، نسبت آب به سیمان و تعامل این دو از نظر آماری فاکتورهای مؤثر بر جرم حجمی خشک، منافذ قابل نفوذ و جذب حجمی آب بوده‌اند و با انتخاب مقادیر مناسب عیار سیمان و نسبت آب به سیمان مقادیر پارامترهای مذکور در حد بهینه قرار می‌گیرند.

جرم حجمی خشک همبستگی مناسبی با منافذ قابل نفوذ و جذب حجمی آب داشته است، لیکن با ضریب جذب موئینه که معیاری برای پیوستگی منافذ است همبستگی ضعیفی دارد. به عبارتی با افزایش جرم حجمی خشک می‌توان انتظار داشت که حجم تخلخل قابل نفوذ کاهش یابد ولی علیرغم شباهت کانتورها از نظر آماری بررسی پیوستگی منافذ چندان قابل پیش‌بینی نخواهد بود.

مقاومت فشاری همبستگی مناسبی با جرم حجمی خشک، منافذ قابل نفوذ و ضریب جذب موئینه نداشته است، به عبارتی مقاومت فشاری به‌تنهایی نمی‌تواند از نظر مشخصه‌های دوام نتایج قابل‌اعتمادی را فراهم آورد. لذا روش تراکم ژئوتکنیکی که حداکثر جرم حجمی خشک را برای دستیابی به طرح اختلاط مخلوط لازم می‌داند از کارایی مناسب برخوردار خواهد بود، لیکن لازم است مطالعات بیشتری روی روش‌های مبتنی بر کارایی صورت گیرد.

مراجع

- [1] ACI 325, State of the Art Report on Roller Compacted Concrete Pavements, Manual of concrete practice, American Concrete Institute, 2001.
- [2] P.Gauthier, J.March, Design and Construction of Roller Compacted Concrete Pavements in Quebec, Association des constructeurs routes et grands travaux Québec, 2005.
- [3] D.A.F.Harrington, Guide for Roller compacted Concrete Pavements. Iowa State University, National Concrete Pavement Technology Center, 2005.
- [4] T.Parhizkar, J.Sobhani, A.M.Raisghasemi, A.Pourkhorshidi, H.Madani, A.Bagheri, A Practical Guideline and Quality Control for Roller Compacted Concrete Pavements, Road, Housing and Urban development Research Center, 2016.
- [5] ASTM D 1557, Standard Test Methods Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort, Annual book of ASTM standards, 2007.



شکل ۱۰: نمودار همبستگی ضریب جذب موئینه با جرم حجمی خشک (Ton/m^3)، مقاومت فشاری (MPa) و منافذ قابل نفوذ (%)

Fig 10. The correlation between the capillary water absorption coefficients and those attributed to the dry density (T/m^3), compressive strength (MPa), and permeable voids

۴- نتیجه‌گیری

مطالعه حاضر با به کارگیری روش آماری رویه پاسخ به بررسی تأثیر جرم حجمی خشک بر پارامترهای مقاومتی و دوام پرداخته است. نتایج نشانگر آن هستند که: از مزایای روش رویه پاسخ این است که با طراحی حداقل تعداد آزمایش، می‌توان تأثیر فاکتورهای مدنظر را در معیارهای مکانیکی و دوام بتن نشان داد.

در روش رویه پاسخ، علاوه بر تعیین مؤثر بودن مقدار عیار سیمان و نسبت آب به سیمان، تأثیر تعامل اثر این دو فاکتور را نیز به خوبی نشان

- [16] ASTM C 39, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual book of ASTM standards, 2007.
- [17] ASTM C 642, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete, Annual book of ASTM standards, 2007.
- [18] ASTM D 1585, Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes, Annual book of ASTM standards, 2007.
- [19] Minitab, MINITAB statistical software, Minitab Release, 2015.
- [20] N.Vaughn, Design-Expert® software. Minneapolis, Stat-Ease, Inc, 2007.
- [21] A.Mardani-Aghabaglou, O.Andiç-Çakir, K.Ramyar, Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume fly ash roller compacted concrete designed by maximum density method, *Cement and Concrete Composites* 37 (2013) 259-266.
- [22] N.Delatte, *Concrete Pavement Design, Construction and Performance*, Taylor & Francis, 2008.
- [23] Service d'Expertise en Matériaux Inc., *Frost Durability of Roller-compacted Concrete Pavements*, Portland Cement Association, 2006.
- [24] J.Castro, D.Benta, J.Weiss, Effect of sample conditioning on the water absorption of concrete, *Cement and Concrete Composites* 33(8) (2011) 805-813.
- [25] G.Ransinchung, B. Kumar, V. Kumar, Assessment of water absorption and chloride ion penetration of pavement quality concrete admixed with wollastonite and microsilica, *Construction and Building Materials* 23(3) (2009)1168-117.
- [26] S.Kolias, C. Georgiou, The effect of paste volume and of water content on the strength and water absorption of concrete, *Cement and Concrete Composites* 27(2) (2005) 211-216.
- [6] M.Sonebi, Medium strength self-compacting concrete containing fly ash: Modelling using factorial experimental plans, *Cement and Concrete Research* 34(7) (2007) 1199-1208.
- [7] S.Nunes, P.Oliveria, J.S. Coutinho, J. Figueiras, Interaction diagrams to assess SCC mortars for different cement types, *Construction and Building Materials* 23(3) (2009) 1401-1412.
- [8] E.K.K.Nambiar, K. Ramamurthy, Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology, *Cement and Concrete Composites* 28(9) (2006) 752-760.
- [9] T.Cho, Prediction of cyclic freeze-thaw damage in concrete structures based on response surface method, *Construction and Building Materials* 21(12) (2007) 2031-2040.
- [10] F.Bektas, B. A. Bektas, Analyzing mix parameters in ASR concrete using response surface methodology, *Construction and Building Materials* 66 (2014) 299-305.
- [11] M.A.A. Aldahdooh, Evaluation of ultra-high-performance-fiber reinforced concrete binder content using the response surface method, *Materials & Design*, 52 (2013) 957-965.
- [12] F.Bayramov et al. Optimisation of steel fibre reinforced concretes by means of statistical response surface method, *Cement and Concrete Composites* 26(6) (2004) 665-675.
- [13] D.Montgomery, *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley & Sons, 2008.
- [14] United States. Dept. of the Army, *Standard Practice for Concrete Pavements*, Departments of the Army and the Air Force, 2004.
- [15] ASTM C 1435, *Standard Practice for Molding Roller Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer*, Annual book of ASTM standards, 2007.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

AR. Nikkhah, H. Madani, J. Salajeghe, "The influence of the dry density on the mechanical and durability properties of roller compacted concrete pavement using the response surface method", *Amirkabir J. Civil Eng.*, 49(3) (2017) 535-546.

DOI: 10.22060/ceej.2016.688



