

# طرح اختلاط بتن غلتکی روسازی راه با استفاده از روشهای آماری

سید حسام مدنی<sup>۱</sup>، علیرضا نیکخواه<sup>۲</sup>

۱- استادیار دانشکده عمران- دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فن آوری پیشرفته کرمان

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه- دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فن آوری پیشرفته

h.madani@kgut.ac.ir

Alireza\_nikkhaah@yahoo.com

چکیده:

بهینه سازی نسبت های اختلاط باتوجه به اینکه بتن شامل اجزای اصلی متعددی بوده و اغلب دارای چندین قیدهستند کارمشکل و وقت گیری می باشد. طراحی آماری و روش های تحلیلی به منظور بهینه سازی طرح اختلاط محصولات ماندبتن که خواص نهایی مقاومتی و دوام آنهاستگی به مقدارنسبی اجزای آنها داردمی تواند بسیارروش مناسب و کارایی باشد. دراین مقاله یک روش طرح مخلوط براساس طراحی چندطرح اختلاط خاص توسط روش آماری رویه پاسخ ارائه شده است. پس ازتحلیل نتایج آزمایشگاهی بوسیله روش رویه پاسخ مدل هایی بدست می آید که بااستفاده از آنها می توان دوجز اصلی طرح اختلاط بتن غلتکی روسازی یعنی مقدارسیمان ونسبت آب به سیمان را برای رسیدن به مقداربیشینه دومعیارمقاومت فشاری ۲۸ روزه وجرم حجمی خشک بتن بدست آورد. دراین روش تعدادمخلوط های آزمایشی به ۹مخلوط محدودمی شود که درمقایسه باتعدادمخلوط های روش متداول طرح اختلاط بتن غلتکی روسازی یعنی روش تراکم ژئوتکنیکی (حدود ۲۵مخلوط) بسیار کاررا تسهیل وازنظرزمانی بهبود می بخشد. درعین حال روش ازدقت خوبی برخوردار است.

واژگان کلیدی: بتن غلتکی روسازی، طرح اختلاط بتن، روش رویه پاسخ، روش تراکم ژئوتکنیکی، مدل پیش بینی

## Roller compacted concrete pavement design using statistical methods

Abstract:

There are several methods for designing RCCP mix design. Among these methods, the most utilized one is proportioning by the soil compaction method. However, this method is time consuming and needs considerable research effort to reach the ultimate mix design. In this method, a lot of mix designs (about 25 or more) should be examined and several moisture-density curves must be evaluated. In this paper, in order to minimize the number of experiments, the statistical model of response surface method (RSM) has been utilized. The models derived from the RSM method were fitted well with the results and seems to have suitable predictions for 28 days compressive strength and dry density.

Keywords: Roller Compacted concrete (RCCP), Mix design, Response surface method, Soil compaction method, Prediction model

## ۱ مقدمه

روسازی های بتن غلتکی (RCCP) یکی از اقتصادی ترین و بادوام ترین نوع روسازی ها است که در سطح گسترده ای در جهان مورد استفاده قرار می گیرد [۱-۳]. از موارد استفاده روسازی بتن غلتکی میتوان به اجرای مسیرهای شهری، جاده های بین شهری، سالن های صنعتی، پایانه های حمل و نقل چندمنظوره، شانه ها و توقفگاه های بزرگراهی، پارکینگ ها و روسازی باند فرودگاه اشاره نمود. در مقایسه با بتن معمولی بتن غلتکی دارای حجم خمیر کمتر و ریزدانه بیشتر است [۲]. به دلیل حجم خمیر کمتر روسازی های بتن غلتکی روانی بسیار اندک داشته و در گروه بتن های بدون اسلامپ قرار می گیرد [۱]. جایدهی این بتن معمولاً توسط فینیشرهای آسفالت (با کمی تغییرات) صورت گرفته و تراکم آن با غلتکهای سنگین فلزی یا چرخ لاستیکی صورت می گیرد. همچنین بر خلاف روسازی های بتن معمولی امکان داول گذاری در روسازی بتن غلتکی وجود ندارد و نیاز به قالب بندی نمی باشد [۲].

برای تعیین طرح مخلوط روسازی بتن غلتکی روش های متعددی پایه گذاری شده است. گروهی از این روش ها متکی بر ساخت طرح های متعدد مخلوط بتن در آزمایشگاه بوده و به صورت تجربی طرح اختلاط مناسب را برای اجرا تعیین می کنند. گروهی دیگر نیز پایه تئوریک و نیمه تجربی دارند و امکان پیش بینی طرح نهایی را با تعداد آزمایش های اندک میسر می سازند [۱ و ۳]. در حال حاضر استفاده از روش های تئوریک و نیمه تجربی متداول نبوده و اغلب روسازی های اجرا شده بر اساس روش های تجربی ساخته شده اند. مطالعه حاضر نیز با توجه به اهمیت روش های تجربی و لزوم ساخت تعداد زیاد مخلوط در این روش ها که کاری زمان بر و دشوار است سعی در ارائه روشی برای تعیین پارامترهای طرح اختلاط مناسب با حداقل تعداد آزمایش ها دارد.

یک از روش های اصلی که در دستورالعمل اجرایی و کنترل کیفی روسازی بتن غلتکی برای تعیین طرح اختلاط بتن ارائه شده است مبتنی بر اصول تراکم ژئوتکنیکی می باشد [۴]. این روش پایه طرح اختلاط بسیاری از روسازی های بتن غلتکی در سطح جهان بوده و در ACI 325.10R [۱] و بسیاری مراجع دیگر [۲-۴] نیز به عنوان یکی از روش های اصلی طرح اختلاط شناخته شده است. در روش مبتنی بر تراکم ژئوتکنیکی [۵] بایستی در یک مقدار سیمان مشخص با تغییر مقدار رطوبت (حدوداً ۵ رده رطوبت) به منحنی چگالی - رطوبت دست یافت. با استفاده از این منحنی نسبت بهینه آب برای دستیابی به حداکثر چگالی در یک عیار سیمان مشخص تعیین می گردد. در مرحله بعد لازم است در عیارهای مختلف سیمان (۳ تا ۵ عیار) منحنی های چگالی - رطوبت رسم گردد. سپس از مخلوط های با مقدار مختلف سیمان مقاومت فشاری ۲۸ روزه گرفته می شود. با مقایسه مقدار مقاومت های فشاری می توان حداقل مقدار سیمانی که مقاومت مذکور را تامین می کند تعیین نمود. در این روش برای دستیابی

به مخلوط مناسب نیاز به ساخت تعداد زیادی مخلوط آزمایشی (حدوداً ۲۵ طرح یا بیشتر) است که استفاده از روش را دشوار می‌سازد [۵].

با توجه به تعداد زیاد مخلوط‌ها در روش تراکم ژئوتکنیکی لازم است روش‌هایی برای حداقل کردن تعداد مخلوط‌ها ارائه شود که کاربرد این روش را تسهیل نماید. مطالعه حاضر بدین منظور با استفاده از روش رویه پاسخ که یکی از روش‌های شناخته شده آماری برای طراحی آزمایش‌ها است [۶]، روشی برای پیش‌بینی مشخصه‌های طرح اختلاط روسازی بتن غلتکی ارائه کرده است.

روش رویه پاسخ در مطالعات متعدد در زمینه تکنولوژی بتن استفاده شده است. در مطالعه [۷] با استفاده از روش رویه پاسخ تاثیر فاکتورهای مقدار سیمان، مقدار خاکستر بادی، مقدار فوق روانساز و نسبت آب به موادسیمانی را بر مشخصات رئولوژیک و مقاومتی بتن خودمتراکم شونده را با ساخت تنها ۲۱ مخلوط موردبررسی قرار داده است. این مطالعه مدل‌های استخراج شده از روش رویه پاسخ را دارای قدرت پیش‌بینی مناسب و خطای اندک دانسته و آن را برای استفاده در مطالعات آتی پیشنهاد شده است.

در مطالعه ای دیگر بر روی پارامترهای تاثیرگذار بر روی چگالی خشک و مقاومت فشاری فوم بتن بر اساس روش سطح پاسخ پرداخته شده است [۸]. این مطالعه به تخمین توابعی که اشاره شد بر حسب پارامترهای مشخصی پرداختند و مخلوط‌های مختلف فوم بتنی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نیز این نتیجه را گرفتند که این روش برای پیش‌بینی توابع روش مناسبی است.

مطالعه [۹] نیز از روش آماری رویه پاسخ برای پیش‌بینی طرح اختلاط بتن‌های خودمتراکم استفاده کرده است. در تحقیق انجام شده هفت فاکتور را برای مخلوط به صورت متغییر مستقل در نظر گرفتند و ۵ پارامتر را به عنوان پاسخ تعیین کردند و با استفاده از روش رویه پاسخ به پیش‌بینی تابع پرداختند. توابع هدف بدست آمده در پایان مورد آزمون قرار گرفتند و نتایج نزدیکی نسبت به واقعیت بدست آمد. در نتیجه گیری این تحقیق روش سطح پاسخ به عنوان روش قدرتمند و کم خطایی معرفی شد.

مطالعات متعدد نشان داده‌اند که روش‌های آماری ابزاری قدرتمند در پیش‌بینی رفتار بتن به علت تغییر فاکتورهای مختلف هستند. در این روش‌ها از ابتدا آزمایش‌ها بگونه‌ای طراحی می‌شوند که حداقل تعداد آزمایش‌ها منتج به دقیق‌ترین و کاراترین نتایج گردد. با توجه به آنکه یکی از چالش‌های اصلی در زمینه طرح مخلوط بتن غلتکی لزوم انجام تعداد زیاد ساخت‌ها است مطالعه حاضر با استفاده از روش آماری رویه پاسخ سعی نموده که روشی برای طراحی مخلوط بتن غلتکی ارائه دهد. همچنین از مدل‌های استخراج شده از این مطالعه می‌توان برای پیش‌بینی عملکرد روسازه بتن غلتکی استفاده نمود. فاکتورهای مورد مطالعه در این تحقیق مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان بوده و تاثیر آنها بر دو پارامتر مهم طرح مخلوط بتن غلتکی، مقاومت فشاری ۲۸ روزه و چگالی خشک بتن، بررسی شده است.

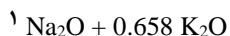
## ۲ مطالعات آزمایشگاهی

### ۲-۱ مشخصات مصالح

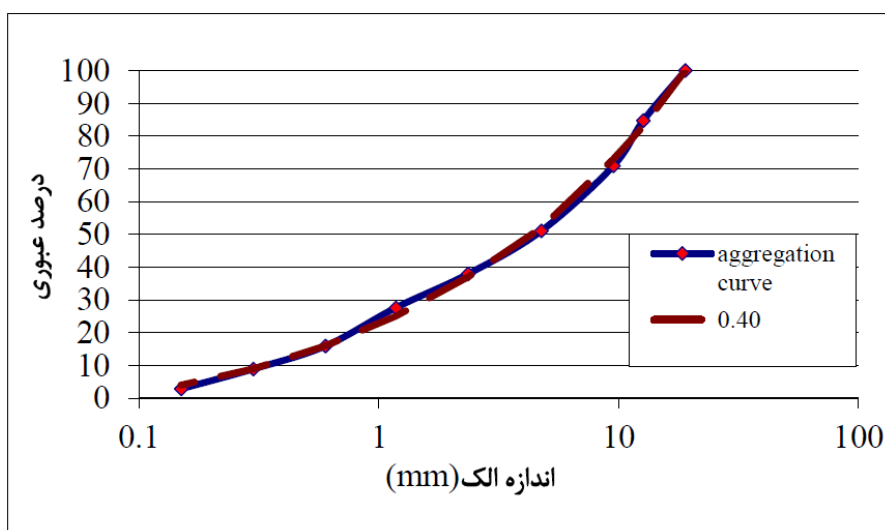
سیمان مورد استفاده در طرح مخلوط‌ها از نوع تیپ ۲ می‌باشد. سیمان دارای چگالی ۳/۱۴ و سطح ویژه ۳۱۵۰ سانتی‌متر مربع بر کیلوگرم بوده است. آنالیز شیمیایی سیمان در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱ آنالیز شیمیایی سیمان

ترکیب شیمیایی	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	'Alkali	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
سیمان تیپ ۲	۶۲	۲۰/۲	۵/۶	۵/۵	۲/۵	۲/۹	۱/۳	۵۰	۲۴	۷	۱۵



سنگدانه های استفاده شده در این مطالعه شامل ماسه سیلیسی رودخانه‌ای با حداکثر بعد ۴/۷۵ میلی‌متر و جذب آب ۰/۹ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک  $2590 \text{ kg/m}^3$ ، سنگدانه نخودی سیلیسی با حداکثر بعد ۹/۵ میلی‌متر و جذب آب ۱/۵ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک  $2630 \text{ kg/m}^3$  و سنگدانه بادامی با حداکثر بعد ۱۹ میلی‌متر و جذب آب ۰/۸ درصد و چگالی اشباع با سطح خشک  $2650 \text{ kg/m}^3$  بوده‌اند. در مطالعات متعدد منحنی‌های دانه بندی ترکیبی برای سنگدانه روسازی بتن غلتکی پیشنهاد شده است [۱، ۲، ۳، ۴، ۱۰]. اغلب این منحنی‌ها نیاز به درصد ریزدانه (زیر الک ۲۰۰) بالا و در حدود ۲-۸ درصد را دارند. با توجه به اینکه ماسه های موجود در ایران مقدار فیلر کمی دارند و نمی‌توانند در محدوده منحنی های دانه‌بندی مذکور قرار گیرند، لذا استفاده از این منحنی‌ها امکان پذیر نیست. در برخی از این مطالعات تطابق بر منحنی فولر-تامپسون با توان ۰/۴۵ توصیه شده است. لیکن در مطالعه حاضر پس از بررسی منحنی‌های دانه‌بندی مختلف از منحنی فولر-تامپسون اصلاح شده با توان ۰/۴ و حداکثر بعد ۱۹ میلی‌متر استفاده شد. منحنی دانه بندی ترکیبی استفاده شده در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی استفاده شده (در مقایسه با منحنی فولر تامپسون اصلاح شده با توان ۰/۴)

در تمام مخلوط‌ها اختلاف رطوبت سنگدانه با حالت اشباع با سطح خشک از طریق خشک کردن نمونه های سنگدانه در اون ۱۰۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت قبل از اختلاط تعیین شده است. آب موجود در سنگدانه فراتر از حالت اشباع با سطح خشک به عنوان بخشی از آب مخلوط در نظر گرفته شده است.

## ۲-۲ طراحی آزمایش

روش رویه پاسخ<sup>۱</sup> مجموعه ای از تکنیک های آماری و ریاضی است که برای مدلسازی و تحلیل مسائلی که در آنها پاسخ تحت تاثیر چندین متغیر قرار دارد، مورد استفاده قرار می گیرد [۶]. در اغلب 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 مجموعه ای از متغیرهای مستقل میباشد.

<sup>۱</sup> Response Surface Method (RSM)

مدلی که در روش رویه پاسخ برای پاسخ در نظر گرفته شده است سطح پاسخ را بصورت تابعی از ترم های درجه اول، دوم، تعامل اثر ترم های درجه اول و و تعامل اثر ترم های درجه اول و دوم لحاظ می نماید 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 سوم مینامند و بصورت ذیل میباشد:

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

برای تشخیص میزان انحنای در سطوح پاسخ برخی نقاط با فاصله بیشتر از حدود تعیین شده برای سطوح بیشینه و حداقل فاکتورها در نظر گرفته میشود. برای تعیین نقاط محوری<sup>۲</sup> راه های متنوعی وجود دارد که در این مطالعه از روش طراحی مرکب مرکزی<sup>۳</sup> استفاده شده است در این روش فاصله نقاط محوری حدوداً برابر جذر تعداد فاکتورها لحاظ میگردد. مثلاً برای ۲ فاکتور از مقدار ۱/۴۱ استفاده میگردد [۶].

در مطالعه حاضر فاکتورهای مقدار سیمان و نسبت آب به سیمان در سطوح  $\alpha, -1, 0, +1, +\alpha$  ( $\alpha=1/41$ ) بررسی شده اند. در جدول ۲ طرح آماری رویه پاسخ به صورت کد شده ارائه شده است. مدل طراحی شده در این مقاله برای متغیرهای انتخابی دارای محدوده تغییرات مقدار سیمان از ۳۰۷ تا ۳۹۲ و میزان آب به سیمان از ۰/۳۴۲ تا ۰/۳۹۸ است. لازم به ذکر است که طرح های آزمایشی دو مرتبه در بازه های زمانی متفاوت برای دقت بالاتر ساخته شده است.

برای تبدیل مقادیر کد بندی شده متغیرها به مقادیر مطلق هر یک از آنها در طرح های اختلاط واقعی می توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$a = a_0 + x \times \Delta a \quad (1)$$

در این رابطه X مقدار عددگذاری شده در جدول شماره ۱ است. a مقدار واقعی فاکتور در نقطه مرکزی (در این تحقیق ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای سیمان و ۰/۳۷ برای نسبت آب به سیمان) و  $\Delta a$  تغییرات واقعی فاکتور برای یک واحد تغییر در سطح گذشته (در این تحقیق برای مقدار سیمان برابر ۳۰ و برای آب به سیمان برابر ۰/۰۲) منظور می شود. برای مثال در سطح گذشته آب به سیمان برابر ۰/۸ مقدار واقعی نسبت آب به سیمان در مخلوط برابر مقدار تعیین می گردد.

$$+ 0/02 \times 0/8 = 0/386 \quad (2)$$

جدول ۲. مقادیر کد شده سیمان و آب به سیمان

شماره مرجع	نوع نقطه	سیمان	آب به سیمان
Ci	Central	.	.
F1	Factorial	-۱	-۱
F2	Factorial	۱	-۱

<sup>۲</sup> Axial points

<sup>۳</sup> Central Composite Design

F3	Factorial	-۱	۱
F4	Factorial	۱	۱
CC1	Axial	-۱/۴۱۴	۰
CC2	Axial	۱/۴۱۴	۰
CC3	Axial	۰	-۱/۴۱۴
CC4	Axial	۰	۱/۴۱۴

## ۳-۲ روش آزمون، ساخت مخلوط ها و نمونه سازی

با استفاده از رابطه ۱ می‌توان با تبدیل مقادیر گذشته مقدار واقعی سیمان و آب به سیمان را برای ساخت مخلوط های آزمایشی بدست آورد. در جدول ۳ طرح اختلاط برای تمام مخلوطها نشان داده شده است. برای اختلاط بتن‌های غلتکی در این مطالعه از یک پن میکسر 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 استفاده شده است. در این روش بلافاصله پس از اتمام اختلاط بتن تازه در ۵ لایه و هر لایه ۵۶ ضربه توسط چکش پراکتور متراکم شده است. سپس وزن نمونه ها اندازه گیری شده است و با تعیین درصد رطوبت چگالی خشک آنها تعیین شده است.

برای نمونه سازی قالبهای استوانه‌ای مخلوهای بتن غلتکی از روش ASTM C1435 [۱۱] استفاده 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 حداکثر در مدت زمان ۲۰ ثانیه متراکم شده است. در شکل ۲ پن میکسر، نحوه تراکم با چکش پراکتور و نحوه آماده‌سازی نمونه‌های استوانه‌ای نشان داده شده است.

پس از آماده سازی، نمونه‌ها با پوشش مرطوب به مدت ۱۸ ساعت پوشیده شده اند تا از تبخیر سطحی آنها جلوگیری شود، سپس در حوضچه بتن حاوی آب آهک اشباع شده تا زمان انجام آزمایش ها نگهداری شده‌اند. آزمون مقاومت فشاری در سن ۲۸ روز روی نمونه های بتنی مطابق با استاندارد ASTM C39 [۱۲] انجام گرفته است.



شکل ۲. ساخت مخلوطها و آماده‌سازی نمونه‌ها (تصاویر از چپ پن میکسر استفاده شده، تعیین جرم حجمی با چکش پراکتور، نمونه‌سازی با چکش ۱۰ کیلوگرمی و قالب استوانه‌ای و کوبه تراکم)

جدول ۳. طرح مخلوط بتن

مخلوط آزمایشی	سیمان ( $\text{Kg/m}^3$ )	آب ( $\text{Kg/m}^3$ )	ماسه ( $\text{Kg/m}^3$ )	نخودی ( $\text{Kg/m}^3$ )	بادامی ( $\text{Kg/m}^3$ )
C1	۳۵۰	۱۲۹/۵	۱۱۷۵/۵	۴۸۸/۴	۲۷۶/۸
F1	۳۲۰	۱۱۲	۱۲۱۸/۲	۵۰۶/۲	۲۸۶/۹
F2	۳۸۰	۱۳۳	۱۱۵۴/۹	۴۷۹/۸	۲۷۲
F3	۳۲۰	۱۲۴/۸	۱۱۹۸	۴۹۷/۸	۲۸۲/۲
F4	۳۸۰	۱۴۸/۲	۱۱۳۰/۹	۴۶۹/۹	۲۶۶/۳
CC1	۳۰۷/۷	۱۴۵/۱	۱۱۲۹/۵	۴۶۹/۳	۲۶۶
CC2	۳۹۲/۳	۱۱۳/۸	۱۲۲۱/۵	۵۰۷/۵	۲۸۷/۷
CC3	۳۵۰	۱۳۹/۳	۱۱۶۰/۱	۴۸۲	۲۷۳/۲
CC4	۳۵۰	۱۱۹/۳	۱۱۹۱/۵	۴۹۵/۱	۲۸۰/۶

### ۳. نتایج

نتایج مقاومت فشاری و جرم حجمی خشک مخلوط‌های بتن غلتکی در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴. نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری ۲۸ روزه و جرم حجمی خشک

شماره طرح	کد طرح	مقدار سیمان ( $\text{kg/m}^3$ )	نسبت آب به سیمان	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (MPa)	جرم حجمی خشک ( $\text{kg/m}^3$ )
-----------	--------	---------------------------------	------------------	----------------------------	----------------------------------

۱	C2	۳۵۰	۰/۳۷	۴۱	۲۳۶۲
۲	F1	۳۲۰	۰/۳۵	۴۳/۳۵	۲۳۰۷
۳	F2	۳۸۰	۰/۳۵	۴۷/۲۵	۲۳۵۷
۴	F3	۳۲۰	۰/۳۹	۴۱/۳۵	۲۲۷۲
۵	F4	۳۸۰	۰/۳۹	۳۵	۲۲۴۴
۶	CC1	۳۰۷/۷	۰/۳۷	۴۳/۱	۲۲۵
۷	CC2	۳۹۲/۳	۰/۳۷	۳۹/۸	۲۲۸۹
۸	CC3	۳۵۰	۰/۳۴۲	۴۴/۸	۲۲۷۶
۹	CC4	۳۵۰	۰/۳۹۸	۳۵/۹۵	۲۲۵۲

### ۳-۱ جرم حجمی خشک

در جدول ۴ مقادیر جرم حجمی خشک مخلوط‌های مختلف ارائه شده است. با استفاده از روش رویه پاسخ تاثیر فاکتورهای نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان بر جرم حجمی خشک در جدول ۵ تحلیل شده است. همانطور که مشاهده میشود فاکتور نسبت آب به سیمان یک فاکتور موثر است. فاکتور مقدار سیمان نیز با توجه به آنکه ترم تعامل اثر آب به سیمان و مقدار سیمان و همچنین ترم مرتبه دوم مقدار سیمان موثر شناخته شده‌اند یک فاکتور موثر خواهد بود. ترم های مرتبه سوم تعامل اثر سیمان و مرتبه دوم آب به سیمان و بالعکس نیز جهت بالا بردن دقت تخمین جواب ها و برآزش داده ها در مدل وارد شده است. با توجه به موثر بودن تمام ترم‌های معرفی شده، یک مدل پیش بینی مناسب جرم حجمی خشک استخراج شده است. با توجه به نتایج آنالیزهای آماری و مقدار بسیار کوچک p-value این مدل توانایی پیش‌بینی مناسب جرم حجمی خشک را دارد. مدل پیش‌بینی جرم حجمی خشک بر حسب ترم‌های آب به سیمان و مقدار سیمان در رابطه زیر ارائه شده است. در این مدل مقادیر در حالت گذشته استفاده می‌شوند. برای تبدیل مقادیر گذشته به حالت واقعی می‌توان از رابطه ۱ استفاده نمود. مدل بدست آمده برای جرم حجمی خشک در رابطه ۳ نشان داده شده است.

$$C - 29 * C^2 * w/c - 22 C * w/c - 8/132 w/c - 15 * C + 2360/1 = \text{جرم حجمی خشک} \quad (3)$$

$$9/672 * (w/c)^2 * C + 39/041 * w/c * w/c + 36/166 * C * C$$

### جدول ۵. نتایج آنالیز آماری (جدول ANOVA) جرم حجمی خشک

ضریب رگرسیون (در حالت کد شده)	p-value	موثر بودن	آنالیز مدل (ترم مدل)
	۰/۰۰۱	موثر	مدل



۲۳۶۰/۱	۰/۰۰۰	موثر	ثابت معادله
۱۵	۰/۱۲۴	موثر	مقدار سیمان
-۸/۱۳۲	۰/۰۰۳	موثر	نسبت آب به سیمان
-۲۲	۰/۰۲۳	موثر	تعامل اثر سیمان و آب به سیمان
-۳۶/۱۶۶	۰/۰۰۱	موثر	ترم مرتبه دوم سیمان
-۲۹	۰/۰۰۵۵	موثر	تعامل اثر ترم مرتبه دوم سیمان ونسبت آب به سیمان
-۳۹/۰۴۱	۰/۰۰۱	موثر	ترم مرتبه دوم آب به سیمان
-۹/۶۷۲	۰/۲۷۳	غیر موثر	تعامل اثر ترم مرتبه دوم نسبت آب به سیمان و سیمان

### ۳-۲ مقاومت فشاری ۲۸ روزه

در جدول ۴ نتایج مربوط به مقاومت فشاری ۲۸ روزه نشان داده شده است. در این نتایج نیز روش رویه پاسخ و میزان تاثیر فاکتورهای نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان بر مقاومت فشاری ۲۸ روز مورد بررسی قرار گرفته است. همانطور که در جدول ۶ مشاهده میشود فاکتور نسبت آب به سیمان و مقدار سیمان فاکتورهای موثر هستند. فاکتور تعامل اثر مقدار سیمان ونسبت آب به سیمان نیز با توجه به مقدار p-value مناسب ترم تاثیر گذاری شناخته شده است. اما ترم مرتبه دوم مقدار نسبت آب به سیمان به دلیل داشتن مقدار p-value نامناسب ترم موثری در مدل شناخته نشده است و میزان تاثیر آن هادرمدل بسیار کم است. مدل استخراج شده برای پیش بینی مقاومت فشاری ۲۸ روز بتن در رابطه ۴ ارائه شده است. در این مدل بدلیل مناسب بودن مدل درجه ۲ دربرازش داده ها از این مرتبه استفاده شده است که ضابطه آن در رابطه ۴ ارائه شده است.

$$f_c = 40.467 - 1.57C - 3.78 w/c - 3.5 C*w/c - 0.1708C^2 + 0.235*w/c*w/c \quad (4)$$

### جدول ۶. نتایج آنالیز آماری (جدول ANOVA) مقاومت فشاری

آنالیز مدل	موثر بودن فاکتور	p-value	ضریب رگرسیون (در حالت کد شده)
مدل	موثر	۰/۰۰۰	

ثابت معادله	موثر	۰/۰۰۰	۴۰/۴۷
مقدار سیمان	موثر	۰/۰۰۳	-۱/۵۷
نسبت آب به سیمان	موثر	۰/۰۰۰	-۳/۷۸
تعامل اثر سیمان و آب به سیمان	موثر	۰/۰۰۰	-۳/۵۰
ترم مرتبه دوم سیمان	موثر	۰/۰۲۷۷	۰/۷۰۸
ترم مرتبه دوم آب به سیمان	موثر	۰/۷۱۲	۰/۲۳۵

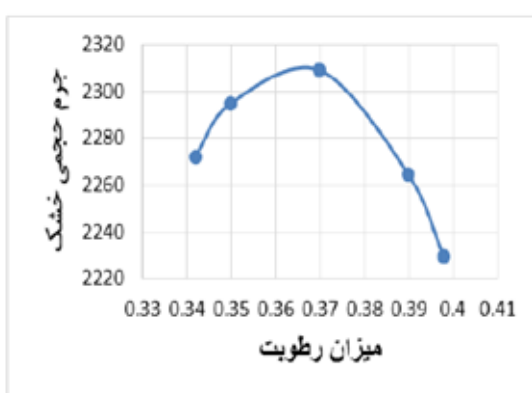
### ۳-۳ ارائه طرح اختلاط روسازی بتن غلتکی در روش تراکم ژئوتکنیکی با استفاده از مدل‌های استخراج-

#### شده در روش رویه پاسخ

همانطور که قبل ذکر شد روش تراکم ژئوتکنیکی نیاز به ساخت تعداد زیاد مخلوط (معمولا بیش از ۲۵ مخلوط) دارد. در این مطالعه با استفاده از مدل‌های استخراج شده از روش رویه پاسخ منحنی‌های جرم حجمی خشک-رطوبت در نسبت‌های مختلف سیمان در شکل‌های ۳ و ۴ رسم شده است. همانطور که در شکل‌ها مشخص است نسبت بهینه رطوبت در مقادیر سیمان ۳۲۰، ۳۵۰، و ۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب به ترتیب برابر حدودا ۰/۳۶۷، ۰/۳۷ و ۰/۳۶ تعیین می‌شوند. شایان ذکر است که روش رویه پاسخ تنها با ۹ آزمایش می‌تواند مدل‌های پیش‌بینی را برای تعیین طرح اختلاط روسازی مشخص کند که این تعداد به مراتب کمتر از تعداد لازم ساخت مخلوط در روش متداول تراکم ژئوتکنیکی خاک است. در مقادیر رطوبت بهینه با استفاده از مدل مقاومت فشاری منحنی مقاومت فشاری بر حسب عیار سیمان در شکل ۴ رسم شده است. همانطور که در منحنی مشخص است تغییر مقدار سیمان از ۳۲۰ تا ۳۸۰ که حدود بالا و پایین مدل هستند تاثیر چندانی بر تغییر مقاومت فشاری نداشته است و تمام نتایج در محدوده ۴۲ تا ۴۵ مگاپاسکال قرار گرفته‌اند. نتایج این تحقیق نشان‌دهنده آن است که افزایش مقدار سیمان صرفا سبب افزایش قابل توجه مقاومت در روسازی‌های بتن غلتکی در درصد‌های بهینه رطوبت نخواهد شد.

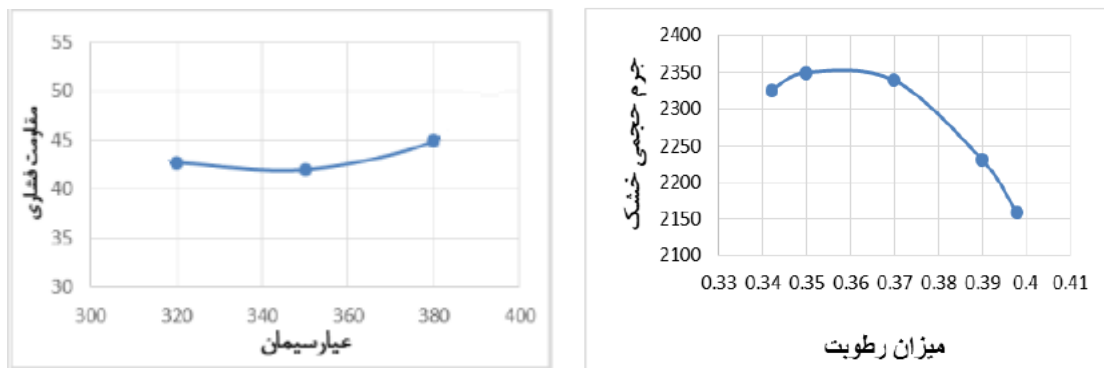


ب) مقدار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب



الف) مقدار سیمان ۳۲۰ کیلوگرم بر مترمکعب

شکل ۳. منحنی‌های جرم حجمی خشک- رطوبت (نسبت آب به سیمان)



شکل ۴. منحنی جرم حجمی خشک- رطوبت (نسبت آب به سیمان) برای مقدار سیمان ۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و نمودار مقاومت فشاری (MPa) بر حسب عیار سیمان

#### ۴ نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش رویه پاسخ برای تعیین مدل‌های پیش‌بینی مقاومت فشاری و جرم حجمی خشک استفاده شد. نتایج نشان‌دهنده آن هستند که:

مدل‌های استخراج شده دارای قدرت پیش‌بینی مناسبی برای تعیین مقاومت فشاری و جرم حجمی خشک مخلوط‌های بتن غلتکی هستند.

در روش کلاسیک طرح مخلوط بتن غلتکی بر اساس روش تراکم ژئوتکنیکی نیاز به تعداد زیاد ساخت مخلوط است (حدود ۲۵ یا بیشتر). لذا با طراحی مناسب آزمایش‌ها به کمک روش‌های آماری همچون روش رویه پاسخ می‌توان با دقت بالا و حداقل تعداد ساخت مخلوط (۹ مخلوط) طرح اختلاط مناسب را ارائه و رفتار آن را پیش‌بینی نمود.

در تحقیق حاضر تغییر مقدار سیمان از ۳۲۰ به ۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب در درصد‌های بهینه رطوبت تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه نداشت. این بدان معناست که می‌توان از مقدار سیمان کمتر که از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌تر است در ساخت بتن استفاده نمود.

فاکتورهای سیمان و آب به سیمان باتوجه به مدل آماری فاکتورهای موثری بر مقاومت فشاری و جرم حجمی خشک شناخته شده‌اند.

#### ۵ مراجع

1. ACI American Concrete Institute Committee 325., State of the Art Report on Roller Compacted Concrete Pavements. ACI 325.10R,2001.
2. PCA, Portland Cement Association, Guide For Roller Compacted Concrete for Pavements,2010.
3. Pigeon M, Marchand J. Design and Construction of Roller Compacted Concrete Pavements in Quebec, research report GCS-93-06, Department of Civil Engineering, University Laval, Quebec, Canada,1995.
۴. مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، دستورالعمل اجرایی و کنترل کیفی روسازی‌های بتن غلتکی، انتشارات مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ویرایش اول، ۱۳۹۲.

5. ASTM D 1557., Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort, Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA, American Society of Testing Materials; 2000.
6. Montgomery D.C., Design and analysis of experiments. 5th ed., New York Wiley, 2001.
7. Sonebi, Mohammed, Factorial design modelling of mix proportion parameters of underwater Composite cement grouts, Cement and Concrete Research, vol 31, 2001.
8. Nambiar e.k, Ramamurthy k, Models relating mixture composition to the density and strength of foam concrete using response surface methodology, Cement & Concrete Composites, vol 28, 2006.
9. Nunes s., Oliveira P.M, Coutinho J.S, Interaction diagrams to assess SCC mortars for different cement types, Construction and Building Materials, vol 23, 2009.
10. U.S. Army corps of engineers, Guide for Roller Compacted Concrete for Pavements, unificed facilities criteria, including Change 2009.
11. ASTM C 1435., Standard Practice for Molding Roller Compacted Concrete in Cylinder Molds Using a Vibrating Hammer, Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA, American Society of Testing Materials; 2008.
12. ASTM C 39., Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, Annual Book of ASTM Standards. Philadelphia, USA, American Society of Testing Materials; 2008.