

بررسی تأثیر پودر سنگ آهک بر مقاومت فشاری بتن حاوی میکروسیلیس و بهینه‌سازی طرح اختلاط با استفاده از منحنیهای هم پاسخ

داود مستوفی نژاد* و محمد رئیسی**
دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

(دریافت مقاله: ۸۲/۵/۱۹ - دریافت نسخه نهایی: ۸۳/۱۰/۲۹)

چکیده - امروزه استفاده از میکروسیلیس در بتن به دلیل بهبود خواص سیمان از نظر مقاومت و دوام کاملاً متداول شده است. از طرفی استفاده از پودر سنگ آهک به جای بخشی از سیمان در بتن نیز به دلیل فراوانی و ارزان بودن، توجه محققان در تکنولوژی بتن را در سالهای اخیر به خود جلب کرده است. هدف از تحقیق حاضر بررسی نقش توام میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بر مقاومت فشاری و بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن بوده است. بدین منظور در این مطالعه، ۲۷ طرح اختلاط بر اساس سه نسبت آب به مواد سیمانی ($W/CM = ۰/۲۵$ و $۰/۳$ و $۰/۴$)، سه نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی (۱۰% و ۵% و ۰%) ($SF/CM = ۰\%$) و سه نسبت پودر سنگ آهک به سیمان (۳۰% و ۱۵% و ۰%) ($LP/C = ۰\%$) ساخته و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آنها اندازه‌گیری شد. سپس با رسم منحنیهای هم پاسخ برای مقاومت فشاری و محاسبه پارامتری به نام «ضریب تأثیر قیمت» که با تقسیم مقاومت فشاری بر قیمت بتن به دست می‌آید، نقش میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بر مقاومت فشاری مورد بررسی قرار گرفت و بهینه‌سازی برای طرح اختلاط بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک انجام گرفت.

واژگان کلیدی: بتن، پودر سنگ آهک، میکروسیلیس، مقاومت فشاری، منحنی رویه پاسخ.

Effect of Limestone Powder on Compressive Strength of Concrete Containing Silica Fume and Optimization of Mix Design Using Response Surface Method

D. Mostofinejad and M. Reisi
Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology

Abstract: Silica fume has been largely used in concrete in recent decades due to its effect on improvement of strength and

** - کارشناسی ارشد

* - دانشیار

durability of concrete. On the other hand, attention has been recently paid to the use of limestone powder as a substitute for part of cement in concrete, basically because of its low price and its positive effect on the durability of concrete. The aim of the current study is the investigation of the interactive effect of silica fume and limestone powder on the compressive strength of concrete and the optimization of the mix design. To do so, 27 mix designs including 3 water-to-cementitious materials ratios ($W/CM=0.25, 0.3$ and 0.4); 3 silica fume-to-cementitious materials ratios ($SF/CM=0\%, 5\%$ and 10%); and 3 limestone powder-to-cement ratios ($LP/C=0\%, 15\%$ and 30%) were used and 28-day compressive strength of the cubic concrete specimens were determined. Then, the interactive effect of silica fume and limestone powder on compressive strength of concrete was investigated using isoresponse curves. Furthermore, the optimization of the mix design for concretes containing silica fume and limestone powder was carried out using "cost effective factor" (CEF) which is defined compressive strength divided by cost of concrete.

Keywords: Concrete, Limestone powder, Silica fume, Compressive strength, Response surface method.

۱- مقدمه

گران بودن قیمت سیمان در جهان که به حدود ۱۰۰ دلار در هر تن می‌رسد، باعث افزایش قیمت تمام شده بتن می‌شود؛ از این‌رو استفاده از موادی که ارزانتر از سیمان باشند و در صورت جایگزینی به جای سیمان خواص مناسبی داشته باشند، رونق زیادی پیدا کرده است [۱]. یکی از این مواد افزودنی که تحقیقات بر روی آن تقریباً از ۱۵ سال قبل شروع شده است، پودر سنگ آهک^۱ است. استفاده از این مصالح به دلیل در دسترس بودن زیاد، هر روز بیشتر می‌شود؛ به‌طوری‌که استاندارد EN 197-1 اروپا در سال ۲۰۰۰ دو نوع سیمان پرتلند سنگ آهکی که یکی شامل ۶-۲۰٪ سنگ آهک (type II/A-L) و دیگری حاوی ۲۱-۳۵٪ سنگ آهک (type II/B-L) است را وارد استاندارد سیمان اروپا کرده است [۲]. در ایران نیز به‌خاطر وجود سنگ‌ریزهای فراوان و با توجه به اینکه پودر سنگ آهک جزو ضایعات سنگ‌ریزه‌هاست، استفاده از این مصالح در ساخت بتن بسیار مفید به نظر می‌رسد؛ زیرا در صورت استفاده مناسب از آن، علاوه بر کاهش آلودگی محیط زیست می‌توان قیمت تمام شده بتن را نیز کاهش داد.

تحقیقات زیادی بر روی خواص بتن حاوی پودر سنگ آهک مثل مقاومت فشاری، زمان گیرش، اسلامپ و ویسکوزیته انجام شده است [۲ و ۳]. تحقیقاتی نیز بر روی ساخت بتن با مقاومت بالا با استفاده از پودر سنگ آهک انجام گرفته است [۳ و ۴]. همچنین تحقیقاتی بر روی بهینه‌سازی طرح اختلاط ملات با مقاومت بالای ساخته شده با پودر سنگ آهک انجام گرفته است [۱]. هدف از تحقیق حاضر، بررسی تأثیر پودر سنگ آهک بر

مقاومت فشاری بتن حاوی میکروسیلیس، و همچنین بهینه‌سازی^۲ طرح اختلاط بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بر اساس توازن بین مقاومت فشاری و قیمت است. برای بهینه‌سازی از روش رویه‌های هم پاسخ^۳ که یکی از تکنیکهای آماری و ریاضی بسیار سودمند است، استفاده شده است.

۲- رویه‌های هم پاسخ

روش رویه‌ی پاسخ^۴ (RSM) برای مدل کردن و تحلیل مسائلی که هدف از آن، بهینه‌سازی پاسخ یک تابع است، به‌کار می‌رود. این روش شامل مجموعه‌ای از تکنیکهای ریاضی و آماری است. فرض کنید تابع Z وابسته به دو متغیر X و Y باشد؛ در این صورت می‌توان نوشت: $Z=f(X,Y)$ در این حالت به X و Y متغیرهای مستقل و به Z پاسخ تابع گفته می‌شود. رویه‌ی پاسخ عبارت است از سطحی که با رسم $Z=f(X,Y)$ به‌وجود می‌آید. برای اینکه بتوان رویه‌ی پاسخ را بهتر تصور کرد و از آن در مسائل کاربردی استفاده کرد، معمولاً کانتورهای رویه‌ی پاسخ به جای رویه‌ی پاسخ رسم می‌شود. کانتورها یا منحنیهای هم پاسخ، خطوطی اند که دارای پاسخ یکسان‌اند. هر خط کانتور مشخص‌کننده یک ارتفاع خاص از رویه‌ی پاسخ است [۵]. شکل (۱) نمونه‌ای از منحنیهای هم پاسخ را نشان می‌دهد.

روش رویه‌ی پاسخ که اولین بار در تحقیقات کشاورزی مورد استفاده قرار گرفت و سپس در شیمی و مهندسی شیمی به‌طور وسیع مورد استفاده قرار گرفت، می‌تواند به عنوان ابزار بسیار مفیدی در تکنولوژی بتن و به‌خصوص تصمیم‌گیری در مورد طرح اختلاط بتن مورد استفاده قرار گیرد [۶]. استفاده از این

به صورت معادلات (۱) و (۲) خواهد بود.

$$z=a_0+a_1x+a_2y \quad (1)$$

$$z=a_0+a_1x+a_2y+a_3x^2+a_4y^2+a_5xy \quad (2)$$

ضرایب a_i به ضرایب رگرسیون معروف اند و از روش حداقل مربعات خطا به دست می آیند. بعد از تعیین این ضرایب باید کنترل کرد که آیا مدل به دست آمده مناسب است یا نه؛ این کار از طریق یک سری آزمونهای آماری انجام می گیرد. اکثر نرم افزارهای آماری ضرایب رگرسیون را تعیین می کنند و همچنین کنترلهای لازم را از طریق آزمونهای آماری انجام می دهند تا مناسب بودن یا نبودن مدل رگرسیون مورد نظر مشخص شود. بعد از تعیین مدل رگرسیون، منحنیهای هم پاسخ رسم می شود و سپس از روی این نمودارها می توان در مورد نقش پارامترهای مورد نظر در پاسخ تابع بحث کرد.

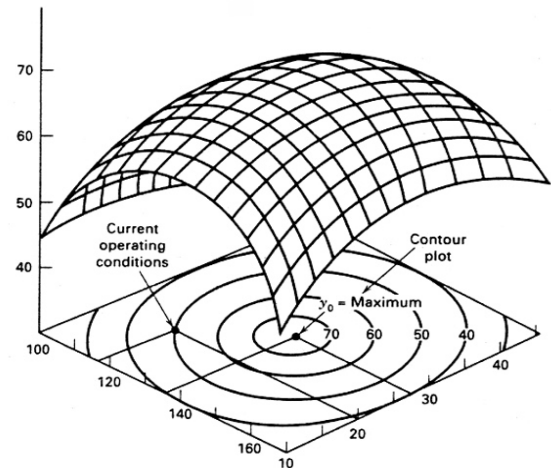
۳- روش مناسب برای جمع آوری داده ها

همان طور که قبلاً گفته شد، اولین گام در حل مسائل RSM، انتخاب داده ها است. هر چه روش انتخاب شده برای جمع آوری داده ها علمی تر باشد، در این صورت می توانیم پارامترهای مدل رگرسیون را به صورت مطلوبتری تخمین بزنیم. در همین ارتباط چنانچه از روشهای مناسب برای جمع آوری داده ها استفاده شود، می توان تعداد داده های مورد استفاده برای تخمین مدل را به حداقل رساند. در ادامه این قسمت، روشهای مناسب برای جمع آوری داده ها توضیح داده می شود.

۳-۱- روش مناسب برای جمع آوری داده ها برای برازش

مدل مرتبه اول [۵]

به طور کلی اگر بتوان روشی یافت که واریانس ضرایب رگرسیون حداقل شود، در این صورت این روش (طرح) برای انتخاب داده ها مناسب است. در مدل مرتبه اول، گروهی از طرحها وجود دارند که در آنها، ضرایب رگرسیون حداقل می شود. این گروه از طرحها به نام «طرحهای متعامد مرتبه اول»^۹ شناخته می شوند. یک دسته از این طرحها که معمولاً



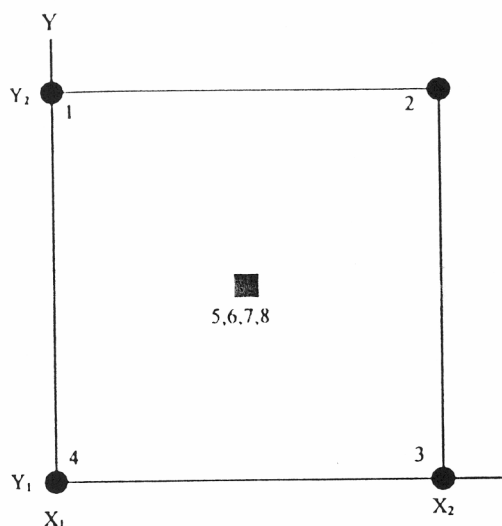
شکل ۱- نمونه ای از کانتورهای (منحنیهای هم پاسخ) مربوط به رویه پاسخ

روش مفید در طرح اختلاط بتن تقریباً از سال ۱۹۹۴ به بعد رواج یافت. همان طور که در مرجع [۶] آمده است، روگرون^۵ و ایتسین^۶ برای مقایسه سه نوع میکروسیلیس با قیمتهای مختلف از نظر اقتصادی از روش رویه (کانتور) پاسخ استفاده کردند. آنها منحنیهای هم پاسخ را برای قیمت یک متر مکعب بتن نسبت به دو متغیر نسبت آب به مواد سیمانی و میزان آب رسم کردند.

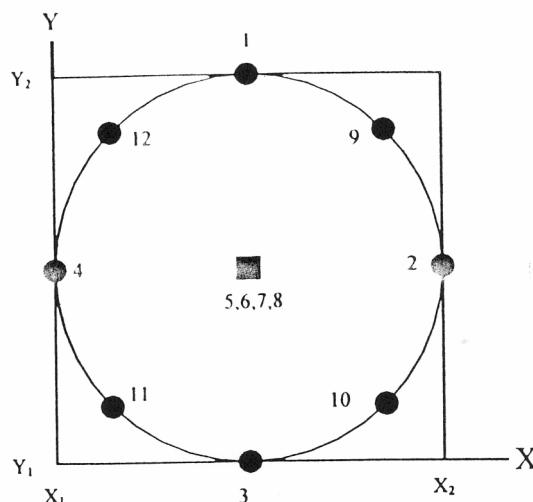
نهدی^۷ و میندس^۸ نیز برای بررسی تأثیر پودر سنگ آهک بر مقاومت فشاری ملات و همچنین بهینه سازی طرح اختلاط ملات از نظر مقاومت و قیمت از روش رسم کانتور استفاده کردند و نتایج خود را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند [۱].

لازم به ذکر است که اولین گام در حل مسائل RSM، انتخاب داده ها و سپس به دست آوردن نتایج آزمایشگاهی مربوط به آن داده ها است. گام بعدی در این نوع مسائل، یافتن تقریبی خوب برای ارتباط دادن پاسخ سیستم به متغیرهای مستقل است؛ به عبارت دیگر باید بر روی داده های به دست آمده، مدلی ریاضی که به مدل رگرسیون معروف است، برازش داد. تقریباً در همه مسائل RSM از یکی از مدل های چند جمله ای مرتبه اول یا دوم استفاده می شود.

اگر Z پاسخ سیستمی که وابسته به دو متغیر X و Y است، باشد؛ در این صورت مدل رگرسیون مرتبه اول و دوم به ترتیب



(الف)



(ب)

شکل ۲- نحوه انتخاب داده‌ها برای مدل: (الف) مرتبه اول بر اساس طرح عاملی 2^k ; (ب) مرتبه دوم بر اساس طرح مرکب مرکزی [۶]

خاصیت تعامد دارند؛ یعنی واریانس ضرایب رگرسیون در آنها مینیمم است. در مورد مدل‌های مرتبه دوم نیز طرح‌هایی وجود دارند که خاصیت تعامد دارند و در علم آمار به عنوان «طرح‌های مرکب مرکزی»^{۱۱} شناخته می‌شوند. در این نوع طرح، همان‌طور که در شکل (۲-ب) دیده می‌شود، انتخاب داده‌ها طوری صورت می‌گیرد که فاصله همه آنها از مرکز ناحیه مورد بررسی به یک فاصله باشد و یا به عبارتی داده‌های انتخابی بر روی دایره قرار گرفته باشند (به داده‌های ۱ تا ۴ و ۹ تا ۱۳ در شکل (۲-ب) توجه شود). همچنین برای اینکه بتوان کنترل مدل برازش داده شده را از جهت مناسب بودن در مورد این نوع طرح انجام داد، در نقطه مرکزی ناحیه مورد بررسی ۴ تکرار صورت می‌گیرد (به داده‌های ۵ تا ۸ در شکل ۲-ب توجه شود).

۴- انجام فاز آزمایشگاهی این تحقیق

در تحقیق حاضر، برای بررسی تأثیر میکروسیلیس و پودر سنگ آهک بر مقاومت فشاری و ارائه طرح اختلاط بهینه از روش منحنی‌های هم پاسخ استفاده شده است. منحنی‌های هم پاسخ، برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه و فاکتور تأثیر قیمت^{۱۲} (CEF) که به صورت معادله (۳) تعریف می‌شود، ترسیم شده و سپس با

مورد استفاده قرار می‌گیرند، به طرح‌های عاملی 2^k موسوم‌اند؛ به طوری که k تعداد متغیرهای مستقل شرکت کننده در پاسخ سیستم است. در این طرح، مشاهده داده‌ها فقط در نقاط مربوط به محدوده بالایی و پایینی صورت می‌گیرد. مثلاً اگر پاسخ سیستم وابسته به دو متغیر مستقل X و Y بود و هدف، بررسی پاسخ سیستم وقتی X در محدوده X_1 و X_2 و Y در محدوده Y_1 و Y_2 تغییر می‌کند، باشد؛ در این صورت بر اساس طرح عاملی 2^k و همان‌طور که در شکل (۲-الف) مشاهده می‌شود، انتخاب داده‌ها باید در نقاطی که با شماره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ مشخص شده‌اند و به عبارتی در روی مرزها قرار دارند، انجام گیرد. برای اینکه مناسب بودن مدل کنترل شود، لازم است بر روی تعدادی از داده‌ها آزمایشات تکرار شود؛ از این‌رو در طرح عاملی 2^k ، در نقطه مرکز محدوده مورد بررسی ۴ تکرار صورت می‌گیرد. این مطلب در شکل (۲-الف) به وضوح نشان داده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در نقطه وسط مرز، ۴ تکرار صورت گرفته است که با شماره‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ مشخص است.

۳-۲- طرح‌های برازش مدل مرتبه دوم [۵]

در مورد مدل مرتبه اول به گروهی از طرح‌ها اشاره شد که

جدول ۱- مصالح مورد استفاده برای ساخت یک متر مکعب بتن برای طرحهای اختلاط بر حسب kg/m^3

شماره طرح اختلاط	C	SF	LP	CA	FA	W	SP	وزن مخصوص بتن
D ₁₁₁	۶۰۰	۰	۰	۱۰۷۹/۶	۵۵۱/۱	۱۳۷/۳	۳۳/۰	2401 ± 20
D ₁₁₂	۵۱۰	۰	۹۰/۰	۱۰۸۰/۴	۵۳۵/۴	۱۳۹/۰	۳۰/۰	2385 ± 20
D ₁₁₃	۴۲۰/۰	۰	۱۸۰/۰	۱۰۸۱/۲	۵۱۹/۸	۱۴۰/۷	۲۷/۰	2370 ± 20
D ₁₂₁	۵۷۰/۰	۳۰/۰	۰	۱۰۷۹/۶	۵۴۰/۶	۱۳۷/۲	۳۳/۰	2390 ± 20
D ₁₂₂	۴۸۴/۵	۳۰/۰	۸۵/۵	۱۰۸۰/۰	۵۲۵/۳	۱۳۸/۰	۳۱/۵	2375 ± 20
D ₁₂₃	۳۹۹/۰	۳۰/۰	۱۷۱/۰	۱۰۸۰/۴	۵۱۰/۱	۱۳۸/۹	۳۰/۰	2360 ± 20
D ₁₃₁	۵۴۰/۰	۶۰/۰	۰	۱۰۷۹/۳	۵۲۹/۶	۱۳۶/۳	۳۴/۵	2380 ± 20
D ₁₃₂	۴۵۹/۰	۶۰/۰	۸۱/۰	۱۰۸۰/۰	۵۱۵/۶	۱۳۸/۰	۳۱/۵	2365 ± 20
D ₁₃₃	۳۷۸/۰	۶۰/۰	۱۶۲/۰	۱۰۸۰/۴	۵۰۱/۲	۱۳۸/۸	۳۰/۰	2350 ± 20
D ₂₁₁	۵۳۰/۰	۰	۰	۱۰۷۲/۷	۶۰۲/۳	۱۵۷/۵	۱۴/۶	2380 ± 20
D ₂₁₂	۴۵۰/۵	۰	۷۹/۵	۱۰۷۳/۴	۵۸۸/۴	۱۵۹/۱	۱۱/۹	2360 ± 20
D ₂₁₃	۳۷۱/۰	۰	۱۵۹/۰	۱۰۷۳/۶	۵۷۴/۱	۱۵۹/۴	۱۱/۳	2350 ± 20
D ₂₂₁	۵۰۳/۵	۲۶/۵	۰	۱۰۷۲/۴	۵۹۲/۶	۱۵۶/۷	۱۵/۹	2370 ± 20
D ₂₂₂	۴۲۸/۰	۲۶/۵	۷۵/۵	۱۰۷۲/۷	۵۷۹/۲	۱۵۷/۴	۱۴/۶	2355 ± 20
D ₂₂₃	۳۵۲/۵	۲۶/۵	۱۵۱/۱	۱۰۷۳/۱	۵۶۵/۷	۱۵۸/۲	۱۳/۲	2340 ± 20
D ₂₃₁	۴۷۷/۰	۵۳/۰	۰	۱۰۷۲/۷	۵۸۳/۶	۱۵۷/۵	۱۴/۶	2360 ± 20
D ₂₃₂	۴۰۵/۵	۵۳/۰	۷۱/۶	۱۰۷۳/۱	۵۷۰/۹	۱۵۸/۲	۱۳/۲	2345 ± 20
D ₂₃₃	۳۳۳/۹	۵۳/۰	۱۴۳/۱	۱۰۷۳/۴	۵۵۸/۲	۱۵۸/۹	۱۱/۹	2330 ± 20
D ₃₁₁	۴۰۰/۰	۰	۰	۱۰۷۲/۶	۷۰۹/۷	۱۶۱/۸	۱۰/۰	2355 ± 20
D ₃₁₂	۳۴۰/۰	۰	۶۰/۰	۱۰۷۲/۹	۶۹۹/۰	۱۶۲/۴	۹/۰	2345 ± 20
D ₃₁₃	۲۸۰/۰	۰	۱۲۰/۰	۱۰۷۳/۲	۶۸۸/۳	۱۶۲/۹	۸/۰	2330 ± 20
D ₃₂₁	۳۸۰/۰	۲۰/۰	۰	۱۰۷۲/۶	۷۰۲/۷	۱۶۱/۸	۱۰/۰	2350 ± 20
D ₃₂₂	۳۲۳/۰	۲۰/۰	۵۷/۰	۱۰۷۲/۸	۶۹۲/۴	۱۶۲/۰	۹/۵	2335 ± 20
D ₃₂₃	۲۶۶/۰	۲۰/۰	۱۱۴/۰	۱۰۷۲/۹	۶۸۲/۱	۱۶۲/۳	۹/۰	2325 ± 20
D ₃₃₁	۳۶۰/۰	۴۰/۰	۰	۱۰۷۲/۵	۶۹۵/۵	۱۶۱/۵	۱۰/۵	2340 ± 20
D ₃₃₂	۳۰۶/۰	۴۰/۰	۵۴/۰	۱۰۷۲/۶	۶۸۵/۸	۱۶۱/۷	۱۰/۰	2330 ± 20
D ₃₃₃	۲۵۲/۰	۴۰/۰	۱۰۸/۰	۱۰۷۲/۹	۶۷۶/۲	۱۶۲/۳	۹/۰	2320 ± 20

C=سیمان، SF=میکروسیلیس، LP=پودر سنگ آهک، SP=فوق روان کننده محلول، CA=درشت دانه، FA=ریزدانه، W=آب

بحث بر روی نمودارهای فوق، طرح اختلاط مناسب تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که در معادله (۳)، f'_c مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن و C قیمت یک متر مکعب بتن است.

$$CEF = \frac{f'_c}{C} \quad (3)$$

در فاز آزمایشگاهی این تحقیق، ۲۷ طرح اختلاط با ۳ نسبت آب به مواد سیمانی ($\frac{W}{CM}$) برابر با ۰/۲۵، ۰/۳ و ۰/۴؛ ۳ نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی ($\frac{SF}{CM}$) برابر با ۰ درصد، ۵ درصد و ۱۰ درصد؛ و ۳ نسبت پودر سنگ آهک به سیمان ($\frac{LP}{C}$) برابر با ۰ درصد، ۱۵ درصد و ۳۰ درصد ساخته شد. مشخصات و قیمت مصالح مورد استفاده در ساخت نمونه‌های بتنی به قرار زیر است:

۱- سیمان تپ I با چگالی ۳/۱۵ و سطح مخصوص $\frac{m^2}{kg}$

۳۰۰ و قیمت واحد (۱).

۲- میکروسیلیس با چگالی ۲/۱۲ و با سطح مخصوص $\frac{m^2}{kg}$

۱۴۰۰ و قیمت ۲/۵.

۳- پودر سنگ آهک با چگالی ۲/۸۵ و سطح

مخصوص $\frac{m^2}{kg}$ ۶۰۰ و با دو قیمت ۰/۵ و ۰/۲.

۴- پودر فوق روان‌کننده ملمنت با چگالی ۱/۶۱۸ و قیمت ۱۱۶.

۵- درشت دانه آهکی ۵-۱۰ mm با چگالی ۲/۶۲، رطوبت طبیعی ۰/۱٪، رطوبت اشباع ۰/۵٪ و قیمت ۰/۰۵.

۶- ریز دانه آهکی با چگالی ۲/۶۰، رطوبت طبیعی ۰/۲٪، رطوبت اشباع ۰/۷٪ و قیمت ۰/۰۷.

لازم به ذکر است که در محاسبه قیمت‌ها، قیمت سیمان برابر واحد فرض شد و قیمت بقیه مصالح بر اساس قیمت آنها در بازار ایران نسبت به قیمت سیمان در نظر گرفته شد؛ همچنین برای پودر سنگ آهک دو قیمت ارائه شد؛ قیمت نسبی ۰/۵ مربوط به قیمت فعلی پودر سنگ آهک است، ولی پیش‌بینی می‌شود در صورتی که پودر سنگ آهک به تولید انبوه برسد،

قیمت آن تا ۲۰٪ قیمت سیمان کاهش یابد؛ از این‌رو قیمت نسبی ۰/۲ نیز برای پودر سنگ آهک در نظر گرفته شد.

طرح‌های اختلاط این تحقیق، با الهام از ACI 211.1 (طرح اختلاط بتن معمولی) [۷]، استفاده از رهنمودهای ACI 211.4R-93 [۸] و ACI 363R [۹] و همچنین بهره‌گیری از کار دیگر محققان [۱۰] انجام گرفت. در جدول (۱) میزان مصالح مورد استفاده برای ساخت یک متر مکعب بتن برای هر کدام از طرح‌های اختلاط ارائه شده است.

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری از هر طرح اختلاط ۳ نمونه مکعبی با بعد ۷۰ mm ساخته شد و مقاومت فشاری هر طرح اختلاط با متوسط‌گیری از مقاومت فشاری ۳ نمونه تعیین شد. مقاومت فشاری ۲۸ روزه طرح‌های اختلاط توسط دستگاه اعمال فشار با ظرفیت ۲۵۰ تن اندازه‌گیری شد. در جدول (۲)، میزان مقاومت فشاری و CEF (که طبق معادله (۳) تعریف می‌شود)، ارائه شده است. لازم به ذکر است که در جدول (۲) دو ستون مربوط به CEF وجود دارد؛ یک ستون که با CEF_1 نشان داده شده است، مربوط به بتنی است که قیمت ۰/۵ برای پودر سنگ آهک منظور شده است و ستونی که با CEF_2 نشان داده شده است، مربوط به بتنی است که قیمت ۰/۲ برای پودر سنگ آهک در نظر گرفته شده است. همچنین توجه شود که در جدول (۲) به جای ۲۷ طرح اختلاط، پارامترهای مربوط به ۳۶ طرح اختلاط بیان شده است. این مسئله با توجه به ضرورت وجود ۴ سری داده در نقاط میانی برای انجام یک برآزش قابل قبول، بوده است. برای رسیدن به ۴ داده مناسب در نقاط میانی، در هر نقطه میانی ۳ طرح اختلاط مشابه اضافه شد.

۵- بررسی نتایج

بر اساس نتایج به‌دست آمده از آزمایشات و همچنین بهره‌گیری از نرم‌افزار آماری SAS، منحنیهای هم پاسخ برای مقاومت فشاری، و فاکتورهای تأثیر قیمت CEF_1 و CEF_2 برای کلیه طرح‌های اختلاط رسم شد؛ در ادامه به این منحنیها و نتایج به‌دست آمده از این منحنیها اشاره می‌شود.

جدول ۲- مقاومت فشاری و مقادیر CEF برای طرحهای اختلاط

شماره طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)	CEF ₁	CEF ₂	شماره طرح اختلاط	مقاومت فشاری (MPa)	CEF ₁	CEF ₂
D ₁₁₁	۸۲/۸۱	۳/۷۱۲	۳/۷۱۲	D ₂₂₂	۶۷/۸۹	۵/۲۹۷	۵/۲۰۵
D ₁₁₂	۷۹/۸۲	۳/۹۵۶	۳/۹۰۴		۶۷/۹۴	۵/۳۰۱	۵/۲۰۹
D ₁₁₃	۷۶/۱۵	۴/۲۲	۴/۰۹۷	D ₂₂₃	۶۲/۵۴	۵/۳۹۸	۵/۱۹۵
D ₁₂₁	۸۱/۹۳	۳/۶۰۱	۳/۶۰۱	D ₂₃₁	۷۴/۷۸	۵/۴۱۱	۵/۴۱۱
D ₁₂₂	۸۰/۴۵	۳/۷۶۷	۳/۷۲۳	D ₂₃₂	۷۰/۹۶	۵/۶۲۲	۵/۵۲۸
	۸۰/۶۹	۳/۷۷۹	۳/۷۳۴	D ₂₃₃	۶۴/۵۹	۵/۶۵۵	۵/۴۵۰
	۸۰/۳۳	۳/۷۶۲	۳/۷۱۷	D ₃₁₁	۵۲/۵۸	۵/۴۳۵	۵/۴۳۵
	۸۰/۵۷	۳/۷۷۳	۳/۷۲۸	D ₃₁₂	۵۰/۸۷	۵/۸۳۳	۵/۷۱۵
D ₁₂₃	۷۷/۷۵	۳/۸۹۵	۳/۷۹۷	D ₃₁₃	۴۷/۹۵	۶/۱۷۴	۵/۹۰۰
D ₁₃₁	۸۷/۱۷	۳/۶۴۹	۳/۶۴۹	D ₃₂₁	۵۵/۷۳	۵/۵۹	۵/۵۹۰
D ₁₃₂	۸۳/۹۴	۳/۸۴۴	۳/۸۰۲	D ₃₂₂	۵۴/۱۶	۵/۸۴	۵/۷۳۴
D ₁₃₃	۷۸/۹۸	۳/۸۵۷	۳/۷۶۸		۵۴/۳۱	۵/۸۵۶	۵/۷۵۰
D ₂₁₁	۶۷/۲۵	۵/۱۵۸	۵/۱۵۸		۵۴/۴۵	۵/۸۷۱	۵/۷۶۵
D ₂₁₂	۶۵/۱۵	۵/۸۳۹	۵/۷۱۷		۵۴/۰۰	۵/۸۲۳	۵/۷۱۷
D ₂₁₃	۶۳/۳۴	۶/۲۰۹	۵/۹۳۱	D ₃₂₃	۵۲/۰۰	۶/۰۶۲	۵/۸۳۰
D ₂₂₁	۷۰/۳۹	۵/۰۱۱	۵/۰۱۱	D ₃₃₁	۶۰/۹۹	۵/۸۱	۵/۸۱۰
D ₂₂₂	۶۷/۷۴	۵/۲۸۵	۵/۱۹۴	D ₃₃₂	۵۵/۵۷	۶/۰۷۲	۵/۹۷۴
	۶۷/۵۹	۵/۲۷۴	۵/۱۸۲	D ₃₃₃	۵۵/۶۷	۶/۲۴	۶/۰۲۱

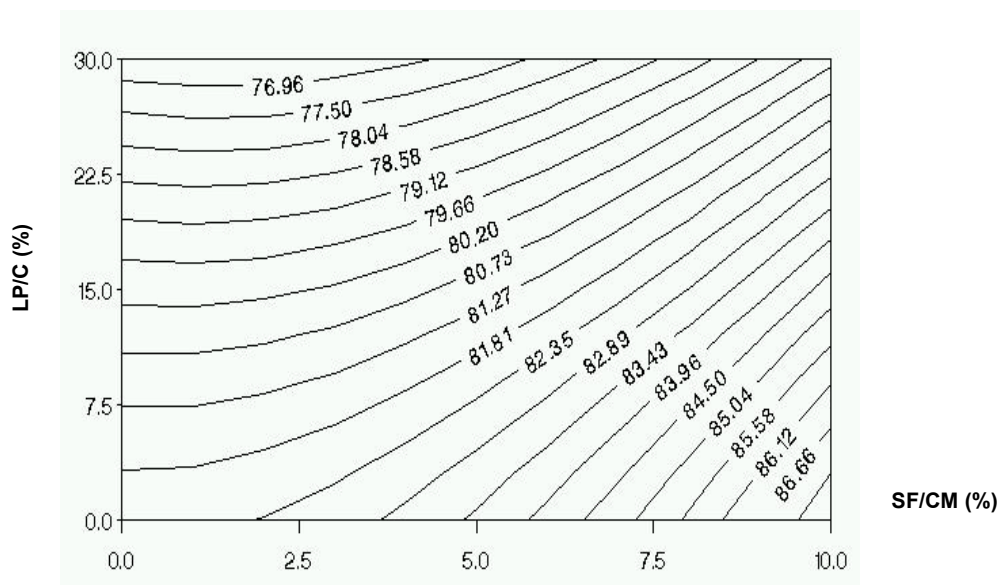
۵-۱- منحنیهای هم پاسخ برای مقاومت فشاری

در شکل‌های (۳) تا (۵) منحنیهای هم پاسخ برای مقاومت فشاری برای سه نسبت آب به مواد سیمانی رسم شده است. با دقت در این شکلها نتایج زیر قابل برداشت است:

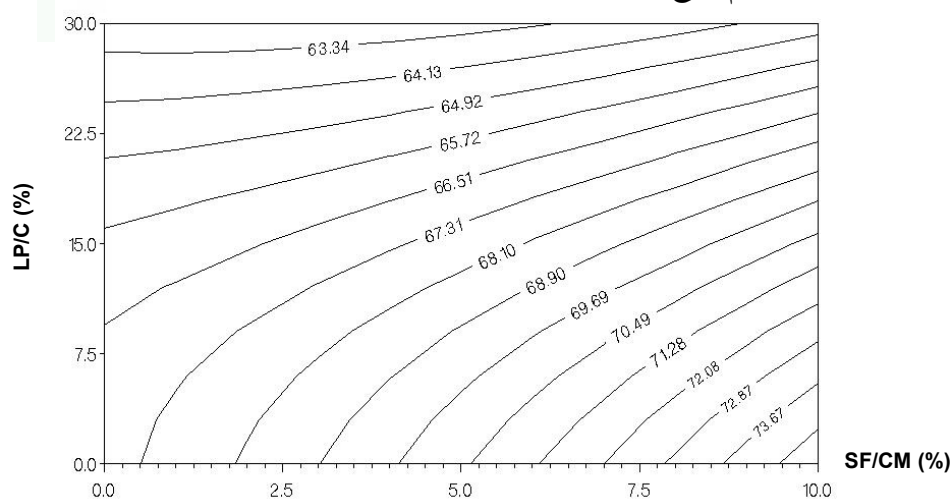
۱- در هر ۳ نسبت آب به مواد سیمانی، با افزایش نسبت پودر سنگ آهک به سیمان ($\frac{LP}{C}$)، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. همچنین در هر ۳ نسبت آب به مواد سیمانی، با توجه به

نزدیکتر شدن منحنیهای هم پاسخ با افزایش $\frac{SF}{CM}$ ، می‌توان نتیجه گرفت که اثر پودر سنگ آهک در کاهش مقاومت فشاری بتن با افزایش میکروسیلیس به مواد سیمانی بیشتر می‌شود.

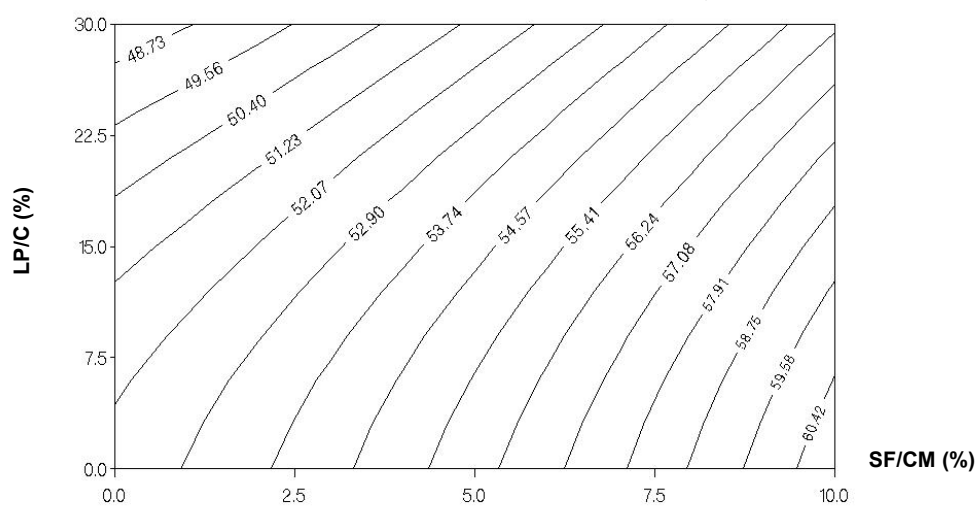
۲- در هر سه نسبت آب به مواد سیمانی با توجه به نزدیکتر شدن منحنیهای هم پاسخ با افزایش $\frac{LP}{C}$ ، می‌توان نتیجه گرفت که میزان کاهش مقاومت فشاری در صورت استفاده از پودر سنگ آهک در نسبت‌های بالاتر پودر سنگ آهک به سیمان،



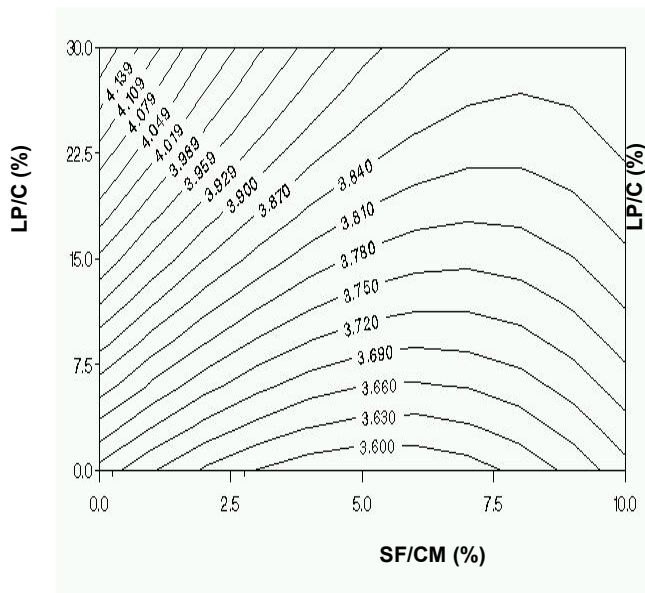
شکل ۳- منحنیهای هم پاسخ برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۵



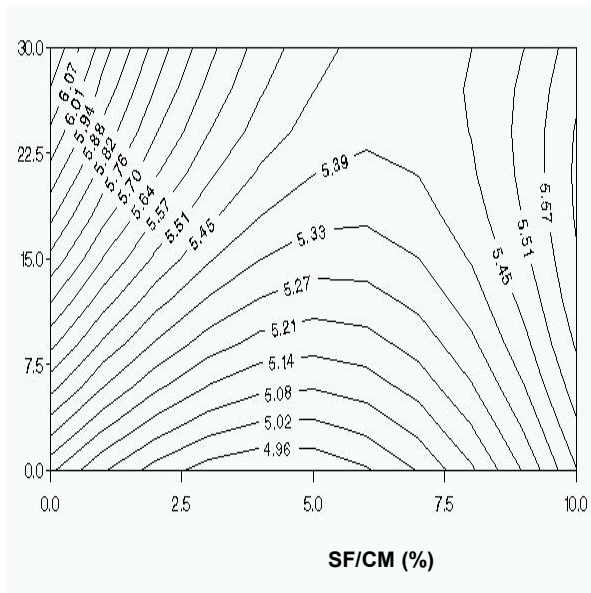
شکل ۴- منحنیهای هم پاسخ برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳



شکل ۵- منحنیهای هم پاسخ برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴

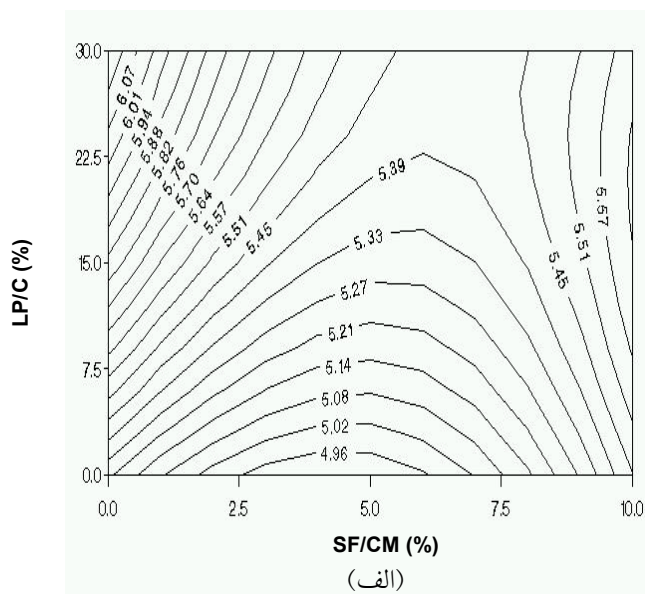


(الف)

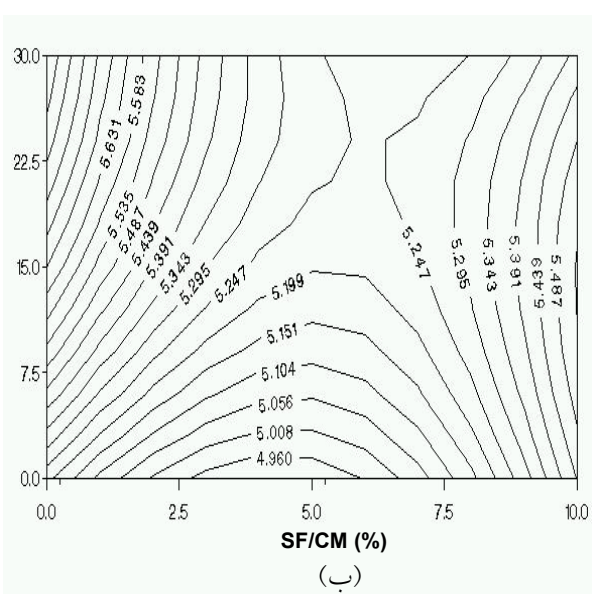


(ب)

شکل ۶- منحنیهای هم پاسخ مربوط به CEF برای بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۲۵؛
(الف) قیمت پودر سنگ آهک: ۰/۵۰٪ قیمت سیمان؛ (ب) قیمت پودر سنگ آهک ۰/۲۰٪ قیمت سیمان



(الف)



(ب)

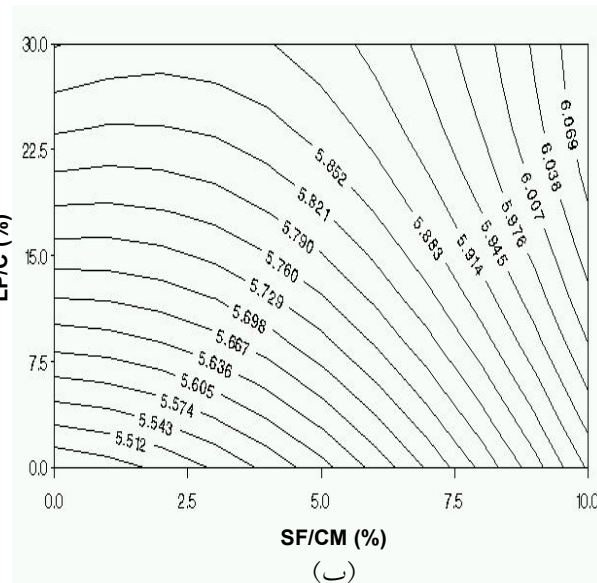
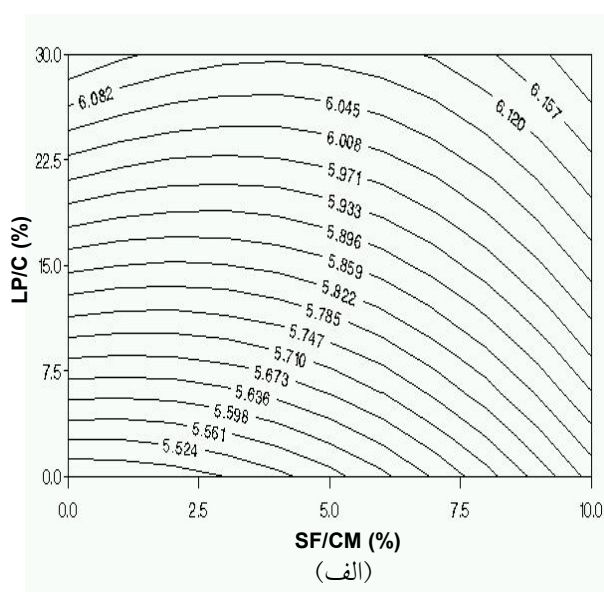
شکل ۷- منحنیهای هم پاسخ مربوط به CEF برای بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۳؛
(الف) قیمت پودر سنگ آهک: ۰/۵۰٪ قیمت سیمان؛ (ب) قیمت پودر سنگ آهک ۰/۲۰٪ قیمت سیمان

تا ۲ درصد، مقاومت فشاری تقریباً ثابت می ماند و با افزایش بیشتر میکروسیلیس به مواد سیمانی، مقاومت فشاری افزایش می یابد.

۴- با توجه به نزدیکتر شدن خطوط کانتورها (منحنیهای هم پاسخ) در جهت افقی در هر ۳ نسبت آب به مواد سیمانی، می توان نتیجه گرفت که تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری

بیشتر است.

۳- در بتن های حاوی پودر سنگ آهک در نسبت های آب به مواد سیمانی $(\frac{W}{CM})$ برابر ۰/۳ و ۰/۴، با افزایش نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی $(\frac{SF}{CM})$ ، مقاومت فشاری افزایش می یابد؛ ولی در $(\frac{W}{CM})$ برابر ۰/۲۵، با افزایش $\frac{SF}{CM}$ تا حدود ۱



شکل ۸- منحنی‌های هم پاسخ مربوط به CEF برای بتن با نسبت آب به مواد سیمانی ۰/۴؛
(الف) قیمت پودر سنگ آهک: ۰/۵۰ قیمت سیمان؛ (ب) قیمت پودر سنگ آهک ۰/۲۰ قیمت سیمان

با افزایش میکروسیلیس به مواد سیمانی بیشتر می‌شود.

۵-۲- منحنیهای هم پاسخ برای CEF

در شکلها (۶) تا (۸)، منحنیهای هم پاسخ برای CEF رسم شده است. با دقت در این شکلها نتایج زیر حاصل می‌شود:

۱- شکل کلی کانتورهای مربوط به حالتی که قیمت پودر سنگ آهک ۰/۵۰ قیمت سیمان در نظر گرفته شده است (حالت الف) و حالتی که قیمت پودر سنگ آهک برابر ۰/۲۰ قیمت سیمان در نظر گرفته شده است (حالت ب) در نسبتهای آب به مواد سیمانی برابر ۰/۳ و ۰/۴ مشابه یکدیگراند؛ اگر چه نمودارهای مربوط به نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۲۵ در حالت (الف) و (ب) با هم تفاوت دارند که در ادامه به آنها اشاره می‌شود.

۲- در نمودارهای مربوط به نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۲۵ در حالت (الف)، و در نمودارهای مربوط به نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۳ در هر دو حالت (الف) و (ب)، به ازای هر مقدار CEF می‌توان دو نقطه روی نمودار کانتور پیدا کرد؛ یک مقدار مربوط به $\frac{SF}{CM}$ پائین و مقدار دیگر مربوط به

$\frac{SF}{CM}$ بالاتر است (البته در بقیه نمودارها نیز اگر در محدوده وسیعتری مطالعه انجام شود، چنین مطلبی صادق خواهد بود)؛ با این وجود در هنگام ساخت بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک، استفاده از طرح اختلاطی که دارای نسبت $\frac{SF}{CM}$ بالاتر است، به دلیل حصول مقاومت فشاری بیشتر، ارجحیت دارد.

۳- برای نسبت آب به مواد سیمانی برابر ۰/۴ در هر دو حالت (الف) و (ب)، با افزایش $\frac{SF}{CM}$ ، مقدار CEF افزایش می‌یابد.

۴- برای هر سه نسبت آب به مواد سیمانی مورد استفاده در این تحقیق و در هر دو حالت (الف) و (ب) با افزایش $\frac{LP}{C}$ مقدار CEF افزایش می‌یابد. از طرفی هر چه نسبت میکروسیلیس به مواد سیمانی بیشتر باشد، این میزان افزایش کمتر خواهد بود.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

علاوه بر نتیجه‌گیریهایی که بر روی منحنیهای هم پاسخ ارائه شد، آنچه به‌طور کلی در رابطه با استفاده از پودر سنگ آهک با توجه به نتایج آزمایشات مقاومت فشاری قابل برداشت است،

سنگ آهک، تأثیر مسئله دوام در تعیین ضریب تأثیر قیمت در نظر گرفته شود.

قدردانی

بدین وسیله از حمایت‌های "قطب علمی علوم و تکنولوژی زیر دریا (بخش تحقیقات بتن)، CEOST،" در جهت تکمیل این تحقیق تشکر و قدردانی می‌گردد.

این است که استفاده از ۱۵٪ پودر سنگ آهک در بتن به جای سیمان، مقاومت فشاری را حداکثر تا ۴٪ کاهش می‌دهد؛ از این رو با توجه به ارزان بودن پودر سنگ آهک نسبت به سیمان، استفاده از پودر سنگ آهک در بتن توصیه می‌شود. این مطلب وقتی جلب نظر بیشتری می‌کند که بدانیم بر اساس تحقیقات انجام شده، استفاده از ۱۵٪ پودر سنگ آهک در بتن، دوام بتن در برابر حمله شیمیایی یون سولفات که از جمله عوامل مخرب جسم بتن است را افزایش می‌دهد [۱۱]. در همین ارتباط منطقی به نظر می‌رسد که با توجه به بهبود دوام بتن حاوی پودر

واژه‌نامه

1- limestone powder	2-optimization	3- isoresponse curve
4- response surface method	5- Rougeron	6- Aitcin
7- Nehdi	8- Mindess	9- fist order orthogonal designs
10- factorial designs	11- central composite designs	12- cost effective factor

مراجع

- Nehdi, M., and Mindess, S., "Optimization of High Strength Limestone Filler Cement Mortars," *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, No. 6, pp. 883-893, 1996
- Tsivilis, S., Chaniotakis, E., Kakali, G., and Batis, G., "An Analysis of the Properties of Portland Limestone Cements and Concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24, pp. 371-378, 2002
- Vuk, T., Gabrovsek, R., and Kaucic, V., "The Influence of Mineral Admixtures on Sulfate Resistance of Limestone Cement Pastes Aged in Cold $MgSO_4$ Solution," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 943-948, 2002
- Shi, Y., Matsui, I., and Feng, N., "Effect of Compound Mineral Powder on Workability and Rheological Property of HPC," *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No.1, pp. 71-78, 2002
- Montgomery, D. C., *Design and Analysis of Experiments*, John Wiley and Sons, New York, 2000.
- Aitcin, P. C., *High-Performance Concrete*, E & FN SPON, Canada, 1998.
- ACI Committee 211, "Proportions for Normal, Havyweight, and Mass Concrete," *ACI-211-1*, American Concrete Institute, Michigan, 1998.
- ACI Committee 211, "Guide for Selecting Proportion for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash," *ACI 211.4R.93*, American Concrete Institute, 13 pp., Michigan, 1998.
- ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete," (*ACI 363R-92*), American Concrete Institute, 48 pp., Michigan, 1998.
- نزهتی، م.، ارائه مدل‌های ریاضی-تجربی برای تبیین خواص مکانیکی بتن با مقاومت بالا با توجه به نقش ملات و درشت دانه، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۷۹.
- رئسی، م.، بررسی تأثیر عوامل شیمیایی آب دریا (سولفات و کلرور) بر بتن حاوی میکروسیلیس و پودر سنگ آهک، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۲.