نشریه علمی
پژوهش‌های تجربی در مهندسی عمران
جلد ۲، شماره ۲، پاییز و زمستان ۱۳۹٤، صص ۱۱۱ الی ۱۲۰
تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۸/۱۶
تاریخ تصویب مقاله: ۱۳۹۴/۶/۳۰
پایگاه نشریه: http://jerce.srttu.edu

# تولید بتن پر مقاومت بر مبنای بتن پودری واکنش‌پذیر اصلاح شده

**علی حیدری[1*] و داود توکلی[2]**

[1] **دانشیار**، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
[2] **دانشجوی دکتری مهندسی سازه**، گروه مهندسی سازه و زلزله، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران
heidari@eng.sku.ac.ir

**چکیده:** در سال‌های گذشته تحقیقات وسیعی جهت دستیابی به بتن با مقاومت بالا انجام گرفته است. استفاده از مصالح خاص و روش‌های نوین ساخت بتن از جمله راهکارهای استفاده شده جهت دستیابی به بتن پر مقاومت است. بتن پودری واکنش‌پذیر نوعی بتن با مقاومت بالا است که مورد توجه قرار گرفته است. ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر نیاز به مصالح خاص داشته که همواره قابل تهیه و اجرا نیست. از این روی در این مطالعه آزمایشگاهی با توجه به اصول ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر و استفاده از مصالح محلی موجود اقدام به ساخت بتن با مقاومت بالا شده است. برای این منظور طرح‌های اختلاطی با نسبت‌های مختلف آب به سیمان و ماسه به سیمان تهیه شده و طرح های اختلاطی نیز با استفاده از میکرو سیلیس و بدون آن تهیه شده‌اند. در نهایت طرح اختلاط بهینه و اجرایی مشخص شده است. با توجه به استفاده از اصول ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر و همچنین استفاده از مصالح محلی می‌توان از این بتن با نام بتن پودری واکنش‌پذیر اصلاح شده نام برد.

**کلمات کلیدی:** بتن پر مقاومت، بتن پودری واکنش‌پذیر، مقاومت فشاری، آزمایش، طرح اختلاط.

# Production of High Strength Concrete Based on Modified Reactive Powder Concrete

A. Heidari and D. Tavakoli

***Abstract:*** Recently, various researches have been undertaken on the high performance concrete (HPC). In order to obtain high strength concrete, certain materials and modern procedures are essential needs to get the result. Reactive powder concrete is a type of HPC that is under consideration of many recent works. The manufacture of HPC needs special materials that are not always accessible and applicable. However, in the present laboratory research regarding to the principles of reactive powder concrete manufacturing and using local available materials, it has been attempted to make HPC. In this view, numerous mix designs with different w/c and s/c proportions are made. The mix designs are added with and without standard amount of silica fume. Eventually, optimized and applicable mix design was obtained. According to reactive powder concrete manufacturing principles by using local materials, this type of concrete could be known as "modified reactive powder concrete".

***Keywords:*** High performance concrete, Reactive powder concrete, Compressive Strength, Experimental, Mix design.

## ۱ - مقدمه

با توجه به این‌که مقاومت فشاری بتن مهم‌ترین خصوصیت آن است، در سال‌های گذشته تحقیقات وسیعی جهت ساخت بتن با مقاومت بالا انجام شده است. اگرچه تعاریف متفاوتی برای بتن با مقاومت بالا ارائه شده، اما عموما بتن با مقاومت فشاری بیش از ۵۰ مگاپاسکال را بتن پر مقاومت می‌نامند.

از مزایای این نوع بتن می‌توان به مقاومت فشاری و مقاومت کششی بالا، مدول الاستیسیته زیاد و نفوذپذیری کم را نام برد. از عوامل موثر در رسیدن به چنین مقاومت‌های بالایی در بتن را می‌توان به استفاده از شن و ماسه با دانه‌بندی و شکل مناسب، افزایش مقدار سیمان مصرفی، محدود کردن بزرگترین دانه، استفاده از ماسه با مدول نرمی مناسب و نسبت ماسه به سیمان مناسب برای همگنی بیشتر را نام برد. همچنین استفاده از برخی مواد پوزولانی مانند میکروسیلیس نیز می‌تواند بتنی متراکم‌تر و با تخلخل کم‌تر را ایجاد کند[۱].

یکی از انواع بتن‌های پر مقاومت، بتن پودری واکنش‌پذیر است. در نوع بتن بزرگترین اندازه دانه محدود شده و از میکروسیلیس و الیاف برای رسیدن به مقاومت ۲۰۰ مگاپاسکال استفاده می‌شود. با توجه به این‌که برای ساخت این بتن نیاز به دانه‌بندی خاص و همچنین استفاده از ماسه‌های کوارتزی و الیاف می‌باشد ساخت این بتن دارای مشکلاتی در اجرا است، از این رو در این تحقیق با اصلاح طرح اختلاط این نوع بتن و با رویکرد اجرایی در کشور طرح‌های اختلاطی تهیه شده و بتن پر مقاومت از طرح‌ها استخراج شده است.

## ۲ - آشنایی با بتن پودری واکنش‌پذیر

بتن پودری واکنش‌پذیر (RPC[1])، نوعی بتن با مقاومت بالا و تخلخل کم است. به دلیل استفاده از مواد ریز و پودری در این بتن و همچنین مقدار زیاد موادی که به‌صورت هیدرولیکی در آن فعال هستند به آن بتن پودری واکنش‌پذیر می‌گویند. این بتن اولین بار در دهه‌ی ۹۰ میلادی در فرانسه معرفی شد [۲]. اولین سازه‌ی اجرا شده توسط این نوع بتن پلی در کبک بود، که به علت مقاومت بالای بتن استفاده شده، مقاطع بتنی از نظر ابعاد و وزن کاهش قابل ملاحظه‌ای داشتند (شکل ۱) [۳].

**شکل ۱: اولین سازه‌ی ساخته شده توسط RPC**

مصالحی که برای ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر استفاده می‌شوند شامل سیمان پرتلند، پودر کوارتز، میکروسیلیس، فوق‌روان‌کننده و الیاف فولادی (اختیاری است) می‌باشد [۲]. بتن پودری واکنش‌پذیر دارای خواصی همچون مقاومت فشاری، کششی و خمشی بالا، نفوذپذیری کم و مقاومت در برابر حملات مضر است. شاید تنها نقطه ضعف این نوع بتن استفاده از سیمان زیاد باشد، که مصرف بالای سیمان علاوه بر هزینه‌ی بیشتر باعث بالا رفتن گرمای هیدراتاسیون می‌گردد که می‌تواند مشکلاتی را از لحاظ مقاومت و دوام ایجاد نماید.

در طرح‌های اختلاط استفاده شده در تحقیقات از سیمان معمولی استفاده شده است. در ابتدا سیمان نوع ۱ برای ساخت در نظر گرفته شده بود ولی با توجه به حرارت‌زایی بالاتر این نوع سیمان نسبت سیمان نوع ۲، استفاده از سیمان نوع ۲ در تحقیقات مورد توجه قرار گرفت. به‌طور کلی توصیه شده از سیمانی استفاده شود که دارای مقدار الیت و بلیت بالا بوده و مقدار $A_3C$ آن ناچیز باشد. با توجه به مقدار کم $A_3C$ در سیمان تیپ ۵، استفاده از این تیپ سیمان نیز توصیه شده است.

ماسه‌ی توصیه شده جهت استفاده در این بتن، ماسه‌ی کوارتزی است. اگرچه ماسه‌ی کوارتزی دارای مقاومت بالا و قفل و بست مناسبی است، اما به جهت هزینه‌ی بالا و عدم

[1] Reactive Powder Concrete

دسترسی آسان به این نوع ماسه در مطالعات نشان داده شده است که می‌توان از ماسه طبیعی به جای ماسه‌ی کوارتزی استفاده نمود. در بتن پودری از درشت دانه استفاده نمی‌شود و اندازه ذرات استفاده شده دارای محدودیت است. اندازه ذرات ماسه طبیعی استفاده شده باید کوچکتر از الک ۸ باشد. همچنین ذرات ماسه کوارتزی باید اندازه‌ای بین ۱۵۰ تا ۶۰۰ میکرون داشته باشند [۲]. استفاده از ذرات کوچک به دلیل کاهش ناحیه انتقال در بتن و بهبود خواص مکانیکی آن می‌باشد.

استفاده از میکروسیلیس در این نوع بتن بسیار کمک کننده است. دلایل استفاده از میکروسیلیس می‌تواند به شرح زیر باشد: ۱- خواص پوزولانی بالای میکروسیلیس و کمک به انجام واکنش پوزولانی و کاهش هیدروکسید کلسیم در بتن و بهبود خواص مقاومتی و دوامی بتن ۲- ریز بودن دانه‌های میکروسیلیس منجر به توپرتر شدن بتن شده و از این طریق خلل و فرج ریز کاملا توسط این ماده پر می‌شوند و از این طریق به بهبود خواص مکانیکی بتن کمک می‌شود. ۳- کروی بودن دانه‌های میکروسیلیس منجر به کارایی بهتر بتن می‌شوند.

نسبت آب به سیمان در این نوع بتن در پایین‌ترین حد ممکن نگه داشته می‌شود این مقدار بین ۰/۱۶ تا ۰/۳ توصیه شده است.

با توجه به مقدار پایین نسبت آب به سیمان استفاده از فوق روان‌کننده اجتناب ناپذیر است. بدین منظور باید از فوق روان کننده‌های قوی در طرح‌های اختلاط استفاده شود.

با توجه به نیاز در این نوع بتن می‌توان از الیاف فولادی به میزان ۱ تا ۵.۲ درصد استفاده نمود.

اختلاط و ساخت این بتن مشابه با بتن معمولی است. برای بهبود مقاومت و عملکرد این بتن عمل‌آوری تحت دمای بالا و یا فشار و دمای بالا توصیه شده است [۴].

از سال ۱۹۹۵ که برای اولین بار ایده‌ی بتن پودری واکنش‌پذیر برای تولید بتن پر مقاومت مطرح شد [۲] تا کنون تحقیقات زیادی بر روی بتن‌های پر مقاومت با ایده‌گیری از بتن پودری واکنش‌پذیر مطرح شده است.

در سال ۲۰۰۵ یک روش جدید اجرایی برای ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر با فیبرهای فلزی مطرح شد، در این تحقیق با استفاده از مصالح پر مقاومت و ویژه بدون اعمال شرایط عمل‌آوری خاص، مقاومت‌های بالا حاصل شد [۵]. در مطالعه دیگری در سال ۲۰۰۲ به بررسی استفاده از مصالح محلی بلژیک در بتن پودری واکنش‌پذیر پرداخته شد[۶]. در تحقیق دیگری دو نمونه بتن پودری پر مقاومت با مقاومت‌های ۲۰۰ و ۸۰۰ مگاپاسکال تهیه شده که از آن‌ها برای ساخت سازه‌های مخصوص زباله‌های اتمی استفاده شد [۷]. در سال ۲۰۰۸ نوع رژیم عمل‌آوری و انتخاب مناسب اجزای تشکیل‌دهنده بتن بر مقاومت این نوع بتن بررسی شد [۸]. همچنین در تحقیق دیگری نشان داده شد که بتن پودری واکنش‌پذیر نسبت به دما و نوع رژیم عمل‌آوری حساسیت زیادی دارد [۹]. بررسی خصوصیات دوامی بتن پودری واکنش‌پذیر نیز انجام شد و نتیجه گرفته شد که این بتن دارای خواص دوامی قابل توجه‌ای نسبت به بتن معمولی است [۱۰]. سپس به بررسی بتن پودری اصلاح شده با مصالح طبیعی درشت‌تر در مقایسه با مصالح کوارتزی ریز پرداخته شد که در نهایت تفاوت زیادی در نتایج مشاهده نشده است [۱۱]. تحقیقات دیگری نیز در زمینه بررسی مشخصات مکانیکی و دوامی بتن پودری واکنش‌پذیر با توجه به مصالح مختلف و رژیم عمل‌آوری متفاوت نیز انجام شده است [۱۶-۱۲].

با توجه به مطالعات محدود انجام گرفته در ایران بر روی این نوع بتن، در این مطالعه به بررسی ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر اصلاح شده با مصالح بومی با ترکیبات آهکی پرداخته شده است. مصالح ماسه‌ای با ترکیبات آهکی، عمده مصالحی هستند که در کلیه نقاط کشور به‌وفور و با قیمت مناسب یافت می‌شوند.

## ۳- برنامه آزمایشگاهی

در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی سعی شده است تا بر مبنای مفاهیم اصلی بتن پودری واکنش‌پذیر و با استفاده از مصالح موجود به شیوه‌ای کاملا اجرایی طرح اختلاط بهینه به‌دست آید. برای این منظور طرح‌های اختلاطی تهیه شده و سپس آزمایش مقاومت فشاری در سنین عمل‌آوری ۷، ۲۸ و ۵۶ روزه بر روی نمونه‌ها انجام گرفته است.

### ۳-۱- مصالح مصرفی

مصالح مصرفی در این آزمایش شامل سیمان، آب، سنگدانه، میکروسیلیس و فوق روان‌کننده بوده است.

سیمان استفاده شده سیمان تیپ ۲ کارخانه سیمان شهرکرد است. مشخصات شیمیایی سیمان استفاده شده در جدول ۱ نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول مشاهده می‌شود مقدار $A_3C$ این سیمان کمتر از ۷,۵ درصد می‌باشد، در متون فنی توصیه شده که سیمان استفاده شده دارای مقدار کم $A_3C$ و ترجیحا کمتر از ۸ درصد باشد [۴]. یکی از ویژگی‌های سیمان مصرف شده در این مطالعه این بوده است که درصد $A_3C$ پایین داشته است.

میکروسیلیس استفاده شده در این مطالعه به صورت پودر بوده و از شرکت تجاری با نام ساشیمی تهیه شده و مشخصات شیمیایی آن در جدول ۱ نشان داده شده است.

**جدول ۱: درصد ترکیبات شیمایی سیمان و میکروسیلیس**

| متغییر | میکروسیلیس | سیمان |
|---|---|---|
| $SiO_2$ | ۹۳/۳ | ۲۱,۵ |
| $Al_2O_3$ | ۱/۱ | ۵/۰ |
| $Fe_2O_3$ | ۰/۸۵ | ۴/۱ |
| CaO | ۱/۲ | ۶۴/۷ |
| $Na_2O$ | ۰/۳ | - |
| $K_2O$ | ۰/۷ | - |
| MgO | ۱/۱ | <۱/۷ |
| $SO_3$ | ۰/۷ | ≤۲ |
| L.O.I | ۲/۵ | <۱/۳ |
| $C_3A$ | - | <۷/۵ |

با توجه به این‌که دسترسی به سنگدانه‌های کوارتزی ساده نیست و سنگدانه‌های رایج مصرفی در کشور سنگدانه‌های آهکی می‌باشند و همچنین عدم صرفه اقتصادی استفاده از سنگدانه‌های کوارتزی و با توجه به تحقیقات پیشین و عدم تاثیر زیاد این مورد بر روی خواص بتن برای این منظور در این مطالعه از سنگدانه‌های شکسته رایج استفاده شده است[۱۸].

ماسه‌ی طبیعی استفاده شده از نوع شکسته با وزن مخصوص ظاهری ۲,۶ و جذب آب ۲ درصد، دارای دانه‌بندی استاندارد بوده است. دانه‌بندی ماسه‌ی استفاده شده در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به نسبت آب به سیمان پایین و همچنین استفاده از میکروسیلیس استفاده از فوق‌روان کننده برای دستیابی به روانی مناسب اجتناب ناپذیر است [۱۷]. فوق‌روان کننده استفاده شده با نام تجاری آبادگران و بر پایه پلی‌کربکسیلات اتر بوده است. همچنین از آب شرب شهر شهرکرد به عنوان آب مصرفی استفاده شده است.

با توجه به عدم نیاز به اندازه‌گیری مقاومت کششی و همچنین در دسترس نبودن الیاف فولادی در همه‌ی پروژه‌های اجرایی، در این تحقیق از الیاف فولادی استفاده نشده است.

**جدول ۲: دانه بندی مصالح سنگی استفاده شده**

| نمره الک | درصد مانده |
|---|---|
| #۴ | ۰ |
| #۸ | ۹/۷ |
| #۱۶ | ۳۷/۶ |
| #۳۰ | ۱۹/۷ |
| #۵۰ | ۸/۷ |
| #۱۰۰ | ۸/۸ |
| #۲۰۰ | ۱۵/۵ |

## ۲-۳- طرح اختلاط

جهت انجام آزمایش‌ها دو نمونه طرح تهیه شده، یک‌سری از طرح‌ها فاقد میکروسیلیس و سری دیگر حاوی میکروسیلیس با مقادیر ۱۰ و ۱۵ درصد از وزن سیمان بوده است. ابتدا طرح اختلاط‌های فاقد میکروسیلیس ساخته شده و سپس با توجه به نتایج به دست آمده، از نسبت آب به سیمان ۰/۲۵ برای مقادیر ۱۰ و ۱۵ درصد میکروسیلیس استفاده شده است. نسبت سنگدانه به مواد سیمانی نیز در طرح‌های اختلاط برای به‌دست آوردن یک طرح بهینه متفاوت بوده است. طرح‌های اختلاط در جدول ۳ نشان داده شده است.

بدین ترتیب ۳۰ طرح اختلاط جهت ساخت نمونه‌ها تهیه شده و برای هر طرح اختلاط ۹ نمونه مکعبی ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری جهت تعیین مقاومت فشاری ۷ روزه، ۲۸ روزه و ۵۶ روزه ساخته شده است. فرآیند مخلوط کردن مصالح مشابه با بتن‌های معمولی انجام گرفته است. لازم به ذکر است به علت سطح ویژه بالای میکروسیلیس قبل از اختلاط

با مقداری از آب طرح جداگانه مخلوط شده و در نهایت به صورت دوغاب به طرح اضافه شده است. بدین ترتیب نمونه‌ها جهت آزمایش ساخته شده و قالب‌گیری شده‌اند. بعد از یک روز نمونه‌ها از قالب خارج شده و تا زمان انجام آزمایش در محلول آب آهک اشباع عمل‌آوری شدند.

**جدول ۳: طرح های اختلاط، کیلوگرم بر مترمکعب**

| نام طرح | سیمان | سنگدانه | آب | میکروسیلیس | فوق روان کننده | نسبت آب به مواد سیمانی | نسبت سنگدانه به مواد سیمان |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| S۱ | ۱۰۷۴ | ۱۰۷۴ | ۲۶۹ | ۰ | ۱۶ | ۰/۲۵ | ۱ |
| S۲ | ۷۳۳ | ۱۴۶۶ | ۲۲۰ | ۰ | ۱۱ | ۰/۳ | ۲ |
| S۳ | ۵۵۲ | ۱۶۵۶ | ۱۹۹ | ۰ | ۸ | ۰/۳۶ | ۳ |
| S۴ | ۴۴۰ | ۱۷۶۰ | ۱۸۹ | ۰ | ۷ | ۰/۴۳ | ۴ |
| S۵ | ۳۷۱ | ۱۸۵۵ | ۱۶۰ | ۰ | ۶ | ۰/۴۳ | ۵ |
| S۶ | ۳۱۶ | ۱۸۹۶ | ۱۵۸ | ۰ | ۵ | ۰/۵ | ۶ |
| S۷ | ۲۷۶ | ۱۹۳۲ | ۱۵۵ | ۰ | ۴ | ۰/۵۶ | ۷ |
| S۸ | ۲۴۵ | ۱۹۶۰ | ۱۴۷ | ۰ | ۴ | ۰/۶ | ۸ |
| S۹ | ۲۲۱ | ۱۹۸۹ | ۱۴۴ | ۰ | ۳ | ۰/۶۵ | ۹ |
| S۱۰ | ۲۰۱ | ۲۰۱۰ | ۱۴۱ | ۰ | ۳ | ۰/۷ | ۱۰ |
| S۱M۱۰* | ۱۰۴۱.۳ | ۱۱۵۷ | ۲۸۹.۲۵ | ۱۱۵.۷ | ۱۴.۴۶ | ۰/۲۵ | ۱ |
| S۲M۱۰ | ۷۰۷.۶ | ۱۵۴۲.۸ | ۱۹۶.۳۳ | ۷۷.۷۲ | ۹.۸۲ | ۰/۲۵ | ۲ |
| S۳M۱۰ | ۵۱۳ | ۱۷۱۰ | ۱۴۸.۲۰ | ۷۹.۸ | ۷.۴۱ | ۰/۲۵ | ۳ |
| S۴M۱۰ | ۴۰۹.۵ | ۱۸۲۰ | ۱۱۹.۴۴ | ۶۸.۲۵ | ۵.۹۷ | ۰/۲۵ | ۴ |
| S۵M۱۰ | ۳۱۳.۵ | ۱۷۳۴.۷ | ۹۱.۴۴ | ۵۲.۲۵ | ۴.۵۷ | ۰/۲۵ | ۵ |
| S۶M۱۰ | ۲۶۵.۵ | ۱۷۴۴.۲ | ۷۶.۵۸ | ۴۰.۸ | ۳.۸۳ | ۰/۲۵ | ۶ |
| S۷M۱۰ | ۲۵۳.۵ | ۱۹۶۰ | ۷۳.۷۴ | ۴۱.۴۴ | ۳.۶۹ | ۰/۲۵ | ۷ |
| S۸M۱۰ | ۲۱۶.۸ | ۱۹۰۱ | ۶۳.۰۱ | ۳۵.۲۴ | ۳.۱۵ | ۰/۲۵ | ۸ |
| S۹M۱۰ | ۱۹۰.۰۸ | ۱۹۰۰.۸ | ۵۵.۴۴ | ۳۱.۶۸ | ۲.۷۷ | ۰/۲۵ | ۹ |
| S۱۰M۱۰ | ۱۶۸.۷۲ | ۱۹۰۸.۶ | ۴۹.۳۰ | ۲۸.۴۷ | ۲.۴۶ | ۰/۲۵ | ۱۰ |
| S۱M۱۵* | ۹۵۷.۵۳ | ۱۱۲۶.۵۰ | ۲۸۱.۶۳ | ۱۶۸.۹۸ | ۱۴.۰۸ | ۰/۲۵ | ۱ |
| S۲M۱۵ | ۶۳۴.۲۰ | ۱۴۹۰.۲۷ | ۱۸۶.۵۶ | ۱۱۲.۰۵ | ۹.۳۳ | ۰/۲۵ | ۲ |
| S۳M۱۵ | ۴۹۰.۲۴ | ۱۷۳۰.۲۵ | ۱۴۴.۱۹ | ۸۶.۵۱ | ۷.۲۱ | ۰/۲۵ | ۳ |
| ۱۵M۴S | ۳۷۸.۲۵ | ۱۷۸۰.۰۰ | ۱۱۱.۲۵ | ۶۶.۷۵ | ۵.۵۶ | ۰/۲۵ | ۴ |
| ۱۵M۵S | ۳۲۴.۲۴ | ۱۹۲۲.۲۸ | ۹۵.۵۴ | ۵۷.۹۰ | ۴.۷۸ | ۰/۲۵ | ۵ |
| ۱۵M۶S | ۲۶۷.۶۰ | ۱۹۰۶.۶۵ | ۷۸.۶۱ | ۴۶.۸۳ | ۳.۹۳ | ۰/۲۵ | ۶ |
| ۱۵M۷S | ۲۳۴.۵۸ | ۱۹۳۶.۳۸ | ۶۸.۸۸ | ۴۰.۹۴ | ۳.۴۴ | ۰/۲۵ | ۷ |
| ۱۵M۸S | ۲۱۲.۷۱ | ۲۰۲۴.۷۵ | ۶۲.۵۶ | ۳۷.۵۴ | ۳.۱۳ | ۰/۲۵ | ۸ |
| ۱۵M۹S | ۱۸۷.۲۶ | ۱۹۸۲.۷۰ | ۵۵.۰۸ | ۳۳.۰۵ | ۲.۷۵ | ۰/۲۵ | ۹ |
| ۱۵M۱۰S | ۱۷۲.۶۳ | ۲۰۲۹.۰۱ | ۵۰.۷۳ | ۳۰.۲۷ | ۲.۵۴ | ۰/۲۵ | ۱۰ |

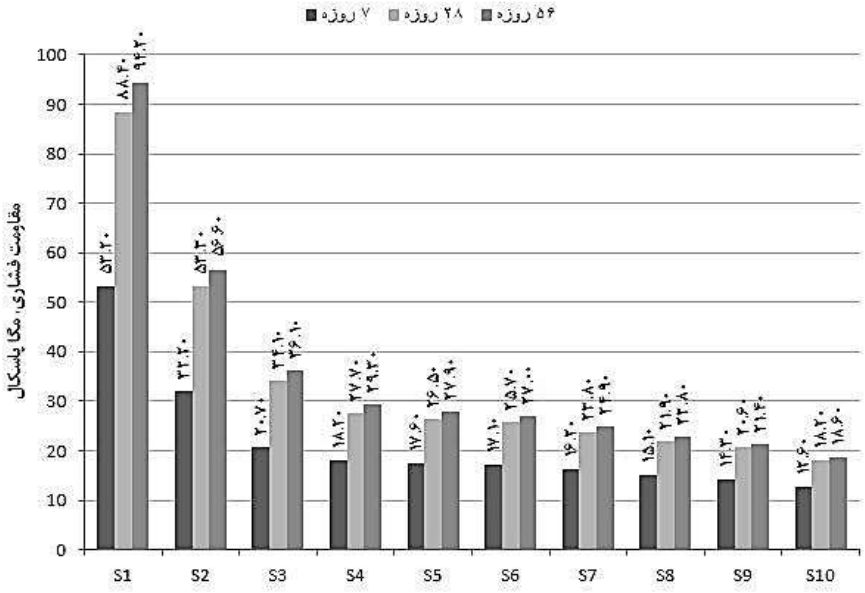
* عدد درج شده در جلوی M به معنی درصد استفاده شده از میکروسیلیس می باشد.

برای عمل‌آوری نمونه‌های بتن پودری واکنش‌پذیر روش‌های مختلفی در تحقیقات به کار برده شده است. رایج‌ترین روش‌های عبارتند از: ۱- عمل‌آوری در آب با دمای معمولی (۲۰ درجه سلسیوس) ۲- عمل‌آوری در آب با دمای بالا (۹۰ درجه سلسیوس) ۳- عمل‌آوری تحت دما و فشار بالا در اتوکلاو (بخار با دمای ۱۶۳-۱۹۰ و فشار ۵۶۰-۱۱۹۰ کیلو پاسکال). در این مطالعه با توجه به این‌که هدف اجرایی بودن بتن در پروژه‌های رایج می‌باشد، ساده‌ترین روش عمل‌آوری، یعنی عمل‌آوری در دمای معمولی انتخاب شده است.

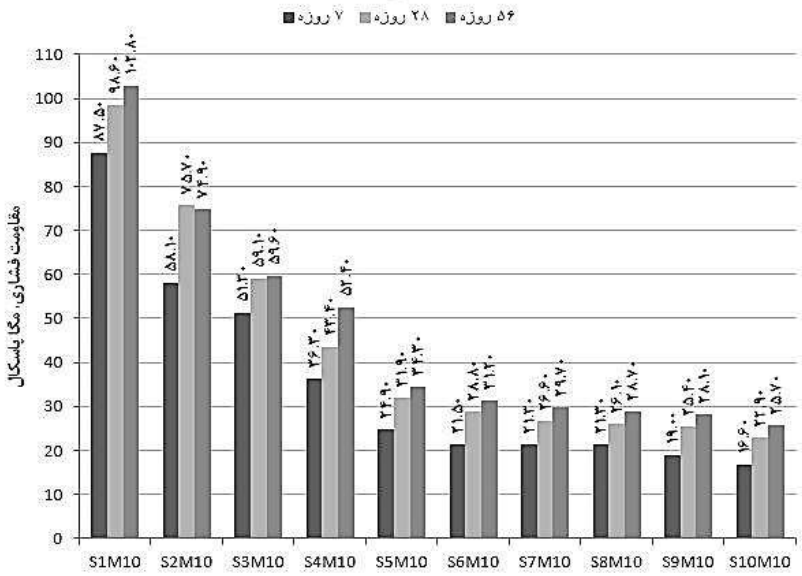
پس از رسیدن زمان آزمایش، نمونه‌ها از آب بیرون آورده شده و توسط جک استاندارد ۲۰۰۰kN مطابق با استاندارد BS۱۸۸۱ Part ۱۱۶: مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته شدند.

## ۴- نتایج و تحلیل آزمایش‌ها

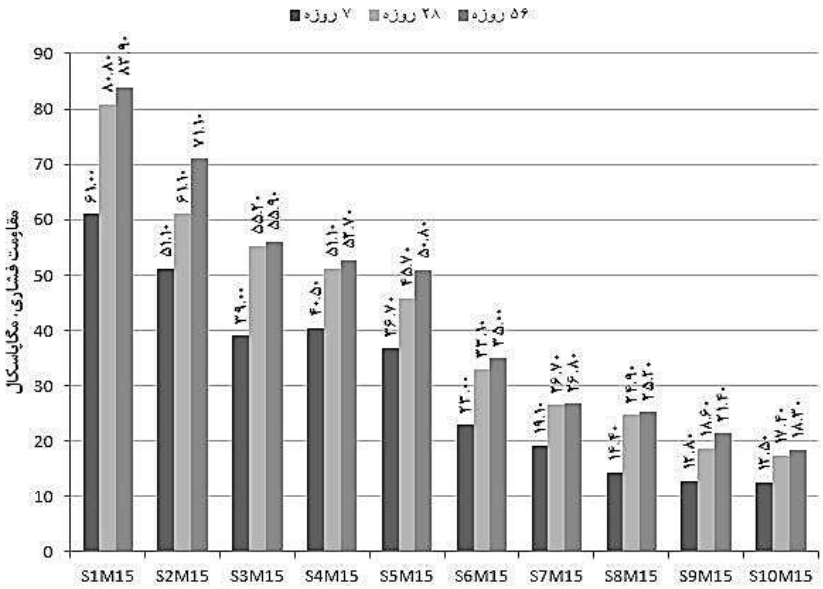
نتایج مربوط به مقاومت فشاری طرح‌ها در زمان‌های عمل‌آوری ۷ روزه، ۲۸ روزه و ۵۶ روزه برای هر سه حالت (بدون میکروسیلیس، ۱۰ درصد میکروسیلیس و ۱۵ درصد میکروسیلیس) در تصاویر ۲ تا ۵ آورده شده است. همچنین مقاومت نهایی (۵۶ روزه) نمونه‌ها در مقایسه با یکدیگر در شکل ۶ نشان داده شده است.



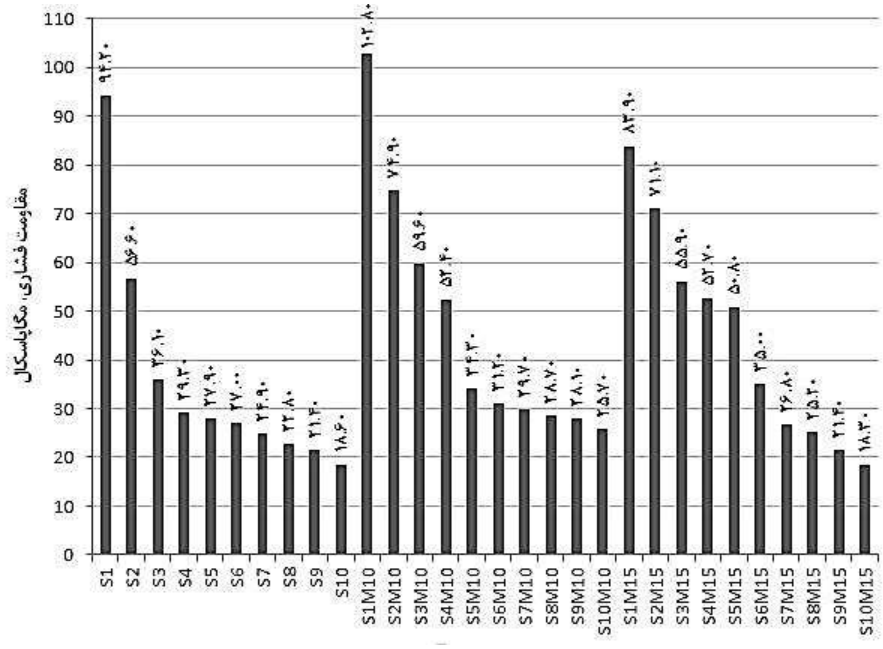

**شکل ۲: مقاومت فشاری نمونه‌های فاقد میکروسیلیس**




**شکل ۳: مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱۰ درصد میکروسیلیس**




**شکل ۴: مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس**




**شکل ۵: مقاومت فشاری ۵۶ روزه‌ی کلیه طرح‌ها در مقایسه با یکدیگر**

در صورتی که نتایج از دید مقاومت بررسی شود و جنبه‌ی اقتصادی و میزان مصرف مصالح مد نظر نباشد. مشاهده می‌شود که نمونه‌های با نسب آب به سیمان ۰,۲۵ و نسبت ماسه به سیمان ۱ دارای بیشترین مقاومت است. در بین این نمونه‌ها، طرح دارای میکروسیلیس به میزان ۱۰ درصد از مجموع مواد سیمانی دارای بالاترین مقاومت بوده که توانسته مقاومت ۱۰۳ مگاپاسکال را کسب کند. با توجه به این‌که در حالت استفاده از ۱۵ درصد میکروسیلس، درصدی از میکروسیلیس در واکنش پوزولانی مصرف نشده و به صورت غیرفعال در بتن باقی مانده، نمونه حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس نتوانسته مقاومتی بهتر از ۱۰ درصد میکروسیلیس را کسب کند. با توجه به ساده سازی‌های انجام شده جهت اجرایی کردن طرح اختلاط بتن پودری، کسب مقاومت بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال با مصالح معمولی بسیار مناسب است. همچنین مشاهده می‌شود بدون استفاده از میکروسیلیس و تنها با مصالح معمولی و محدود کردن اندازه سنگدانه در طرح S۱، مقاومتی در حدود ۹۴ مگاپاسکال کسب شده که برای یک بتن بدون استفاده از مواد کمکی خاص، مقاومت مناسبی است.

طرح‌های حاوی نسبت ماسه به سیمان بالاتر از ۵ نتوانستند مقاومت مناسبی را کسب کنند و در دامنه‌ی متوسط مقاومت قرار گرفته‌اند. دلیل این امر مقدار کم سیمان جهت پر کردن فواصل بین سنگدانه‌ها و ایجاد خلل و فرج زیاد در بتن بوده است. ولی نسبت‌های ماسه به سیمان ۱ تا ۵ مقاومت‌های قابل قبولی را از خود نشان داده‌اند.

نتایج تحقیق نشان داده که مقادیر کمی از میکروسیلیس می‌تواند مقاومت ناشی از کسر مقدار زیادی سیمان را پوشش دهد، این مطلب می‌تواند در طرح اختلاط‌ها در پروژه‌های عمرانی مورد توجه قرار گیرد. واکنش مناسب پوزولانی میکروسیلیس و خاصیت ریز پرکنندگی این ماده در بتن‌های پر مقاومت تاثیر مهمی دارد و هم از لحاظ مقاومت و هم از لحاظ دوام بتن مورد توجه است [۱۹، ۲۰].

## ۵- بررسی اقتصادی

اگر قیمت هر کیلو آب ۰,۱ تومان، هر کیلو سیمان ۱۰۰ تومان، هر کیلو میکرو سیلیس ۵۰۰ تومان، هر کیلو ماسه ۱۰ تومان و هر کیلو فوق روان‌کننده ۶۰۰۰ تومان در نظر گرفته شود هزینه تولید هر مترمکعب بتن برای طرح‌های اختلاط به صورت حدودی و با اصلاحات محاسبه شده و در جدول ۴ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که قیمت‌ها به صورت میدانی از سطح بازار تهیه شده است.

با توجه به قیمت حدودی تمام شده‌ی مخلوط‌های بتنی و همچنین بررسی مقاومت فشاری مخلوط‌ها می‌توان آنالیز اقتصادی مناسبی را برای اجرای بتن انجام داد.

همان‌طور که از قبل هم مشخص بود در طرح‌های مشابه، هزینه‌ی طرح‌های حاوی میکرو سیلیس بالاتر است و با توجه به میزان افزایش مقاومت انجام گرفته، باید در هر پروژه با توجه به نیاز، استفاده از میکروسیلیس ارزیابی شود.

در برخی طرح‌ها مشاهده می‌شود که اثر میکروسیلیس می‌تواند موثر واقع شود و هزینه را هم افزایش ندهد. همچنین از نتایج مشاهده می‌شود که در این طرح‌ها استفاده از ۱۵ درصد میکروسیلیس اقتصادی نمی‌باشد.

با توجه به دامنه وسیع قیمت و مقاومت در پروژه با توجه به نیاز باید آنالیز اقتصادی انجام گیرد.

**جدول ۴: مقایسه قیمت بتن حاصل از طرح های اختلاط**

| نام طرح | قیمت یک متر مکعب بتن (تومان) |
|---|---|
| S۱ | ۲۱۳۳۱۰ |
| S۲ | ۱۵۳۳۶۶ |
| S۳ | ۱۱۹۳۰۰ |
| S۴ | ۱۰۳۲۰۱ |
| S۵ | ۹۱۲۹۹ |
| S۶ | ۸۰۲۵۱ |
| S۷ | ۷۰۶۵۰ |
| S۸ | ۶۷۸۴۲ |
| S۹ | ۵۹۷۶۴ |
| S۱۰ | ۵۷۹۸۱ |
| S۱M۱۰ | ۲۵۹۲۹۲ |
| S۲M۱۰ | ۱۸۳۲۵۱ |
| S۳M۱۰ | ۱۵۲۱۶۰ |
| S۴M۱۰ | ۱۲۸۵۹۸ |
| S۵M۱۰ | ۱۰۱۸۴۶ |
| S۶M۱۰ | ۸۷۰۳۰ |
| S۷M۱۰ | ۸۷۴۶۶ |
| S۸M۱۰ | ۷۶۹۰۳ |
| S۹M۱۰ | ۷۰۱۹۹ |
| S۱۰M۱۰ | ۶۴۶۹۸۵ |
| S۱M۱۵ | ۲۷۴۹۱۴ |
| S۲M۱۵ | ۱۸۹۵۸۵ |
| S۳M۱۵ | ۱۵۲۲۴۴ |
| S۴M۱۵ | ۱۲۱۸۸۰ |
| S۵M۱۵ | ۱۰۸۸۴۹ |
| S۶M۱۵ | ۹۲۴۵۸ |
| S۷M۱۵ | ۸۳۶۰۴ |
| S۸M۱۵ | ۷۸۷۵۹ |
| S۹M۱۵ | ۷۱۲۹۷ |
| S۱۰M۱۵ | ۶۷۶۶۲ |

## ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه‌ی آزمایشگاهی جهت ساخت بتن پر مقاومت با توجه به اصول ساخت بتن پودری واکنش‌پذیر اقدام به ارائه طرح‌های اختلاط با مصالح محلی شد. در این رابطه با اصلاح طرح اختلاط بتن پودری واکنش‌پذیر اقدام به تهیه ۳۰ طرح اختلاط با نسبت‌های آب به سیمان و ماسه به سیمان مختلف شد، و مقاومت فشاری نمونه‌ها اندازه‌گیری شد که نتایج زیر به‌دست آمد.

- نتایج آزمایش‌ها نشان داده که با استفاده از مصالح محلی و روش عمل‌آوری معمولی و رعایت اصول صحیح طرح اختلاط می‌توان به مقاومت فشاری بیش از ۱۰۰ مگاپاسکال رسید.
- بیشینه مقاومت در طرح دارای ۱۰ درصد میکروسیلیس و نسبت ماسه به سیمان یک (۱۰S۱M) به‌دست آمد.
- طرح‌های حاوی ۱۵ درصد میکروسیلیس به علت در دسترس نبودن هیدروکسید کلسیم کافی جهت واکنش به صورت اضافی در بتن باقی مانده و تاثیر مثبت زیادی در عملکرد بتن نداشته‌اند.
- نتایج نشان دادند که تغییرات در مشخصات طرح های اختلاط بتن پودری تاثیر زیادی بر نتایج نداشته و در اصل پایین نگه داشتن نسبت آب به سیمان و کنترل بزرگترین سایز سنگدانه دلیل اصلی افزایش مقاومت در این بتن ها است.
- آنالیز اقتصادی نشان داده که می‌توان بتن پر مقاومت با هزینه قابل توجیه تهیه نمود.
- با توجه به مقاومت بالا و عدم استفاده از مصالح و یا تکنولوژی ویژه در ساخت این بتن، انتظار می‌رود از بتن پودری واکنش‌پذیر در پروژه‌های خاص استفاده شود.

## مراجع


[1] JianXin, M.; Orgass, M.; *Comparitive Investigations on Ultra-High Performance Concrete with and without Coarse Aggregates*, LACER No. 9, **2004**. Research project report.

[2] Richard, P.; Cheyrezy, M. "*Composition of Reactive Powder Concretes*,. Cement and

Concrete Research, vol. 25, NO. 7, p.p. 1501-1511, **1995**.

[3] Blais, P.Y.; Couture, M. "*Prestressed Pedestrian Bridge-World's First Reactive Powder Concrete Structure*" PCI Journal, p.p. 60-71, **1999**.

[4] Lee, N.P.; Chisholm, D.H. "*Reactive Powder Concrete*" BRANZ Study report SR 146 Judgeford,New Zealand, **2005**.

[5] Uzawa, M.; Shimoyama, Y.; Koshikawa, SH. "*Fresh and Strength Properties of New Cementitious Composite Material Using Reactive Powder*", Report of the Research Institute of Industrial Technology, Nihon University,No.75, ISSN 0386-1678, **2005.**

[6] Stephanie Staquet and Bernard Espion, Department of Civil Engineering, University of Brussels ULB, B-1050 Brussels, Belgium, Influence of Cement and Silica Fume Type on Compressive Strength of Reactive Powder Concrete, 6th International Symposium on High Strength / High Performance Concrete. pp No. 1-15, **2002**.

[7] Dili, A.S., Santhanam, M. "*Investigations on Reactive Powder Concrete, A Developing Ultra High-Strength Technology*", Department of civil engineering, IIT Chennai concrete technology, p.p. 22-27, **2005**.

[8] Harish, K.V.; Dattatreya, J.K.; Sabitha, D.; Neelamegam, M. "*Role of Ingredients and of Curing Regime in Ultra High Strength Powder Concrete*", Journal of Structural Engineering, Vol. 34, No. 6, pp. 421-428, **2008**.

[9] Dattatreya, J.K.; Harish, K.V.; Neelamegam ,M." *Testing and Evaluation of Durability Properties of Reactive Powder Concrete*" Proceeding of the Second International Conference on Resource Utilization and Intelligent Systems (INCRUIS-2008), Kongu Engineering College, Perundurai, Erode, Vol. 1, p.p. 430-439, **2008**.

[10] Roux, N; Andrade, C.; Sanjuan, M.A, "*Experimental Study of Durability of Reactive Powder Concretes*", Journal of Materials in Civil Engineering p.p.1-6, **1998**.

[11] Collepardi, S.; Coppola, L.; Troli, R.; Collepardi M "*Mechanical Properties of Modified Reactive Powder Concrete*", A Report Vol. 95, p.p. 284-292, **1998**.

[12] Tam, C. M.; Tam, V. W. Y.; Ng, K. M. "*Optimal conditions for producing reactive powder concrete*", Mag Concr Re, Vol. 62, p.p. 701-716, **2010**.

[13] Ipek, M.; Yilmaz, K.; Sumer, M.; Saribiyik, M. "*Effect of pre-setting pressure applied to mechanical behaviours of reactive powder concrete during setting phase*", Constr Build Mater, vol. 25, p.p. 61-68, **2011**.

[14] Yazıcı, H.; Yardımcı, M. Y.; Aydın, S., Karabulut, A.S. "*Mechanical properties of reactive powder concrete containing mineral admixtures under different curing regimes*", Constr Build Mater, vol. 23, p.p. 1223-1231, **2009**.

[15] Yazıc, H.; Deniz, E.; Baradan, B. "*The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete* 42, p.p. 53-63, **2013**.

[16] Zhou, W.; Hu, H. Zheng, W. "*Bearing capacity of reactive powder concrete reinforced by steel fibers*", Construction and Building Materials, vol. 48, p.p. 1179-1186, **2013**.

[۱۷] حیدری، علی؛ توکلی، داود؛ افزودنی‌های شیمیایی بتن، انتشارات نگارنده دانش، تهران، ویرایش اول، **۱۳۹۳**.

[18] Yunsheng, Z.; Wei, S.; Sifeng, L.; Chujie, J.; Jianzhong, L. "*Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static–dynamic behaviors*" Cement & Concrete Composites, vol. 30, p.p. 831-838, **2008**.

[19] Tavakoli, D.; Heidari, A. "*Properties of concrete incorporating silica fume and nano-$SiO_2$*" Indian Journal of Science and Technology, vol. 6, No.1, p.p. 3946-3950, **2013**.

[۲۰] حیدری، علی؛ توکلی، داود؛ بررسی بتن حاوی پوزولان کاشی ضایعاتی به همراه میکروسیلیس"، مجله علمی و پژوهشی شریف، ۳۰(۲)، ۱۳۳-۱۲۵، **۱۳۹۳**.