

## بررسی آزمایشگاهی و آماری مقاومت فشاری و کششی بتن پودری (RPC) در سنین مختلف

محمد علی دشتی رحمت آبادی<sup>۱</sup>، فرزاد شهابیان<sup>۲\*</sup>، حسن حاجی کاظمی<sup>۳</sup>

۱- استادیار گروه عمران، واحد یزد، دانشگاه آزاد اسلامی، یزد، ایران

۲- استاد گروه عمران، گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

۳- استادیار گروه عمران، گرایش سازه، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

### چکیده

در حال حاضر، انواع خاصی از بتن نظیر بتن فوق توانمند<sup>۱</sup> (UHPC)، دست یابی به برخی از ویژگی‌های بتن از جمله مقاومت بالا را میسر می‌سازد. بتن پودری<sup>۲</sup> (RPC) از جمله بتن‌های فوق توانمند با ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی برتر است. بتن پودری با بهره‌گیری از سیمان و مصالح پودری بسیار ریزدانه شامل ماسه سیلیسی، میکرو سیلیس و مقادیر کم نسبت آب به سیمان با استفاده از فوق روان کننده تولید می‌گردد. در این پژوهش، ابتدا طرح اختلاط RPC که در آن نسبت آب به مواد پودری (W/B) برابر ۰/۱۵ و نسبت فوق روان کننده به سیمان (SP/C) برابر با ۳ درصد می‌باشد، با بهره‌جویی از مصالح بومی و با استفاده از مطالعات قبلی انتخاب و تعیین گردید. در ادامه، با انجام آزمایش‌های متعدد، مقاومت فشاری، مدول گسیختگی و مقاومت کششی در سنین مختلف اندازه‌گیری گردید. به منظور تعیین مقاومت RPC در سنین مختلف، نمونه‌هایی با W/B و SP/C برابر با طرح اختلاط ساخته شد و پس از عمل‌آوری معمولی در سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روزه مورد آزمایش قرار گرفت. هر گروه شامل شش نمونه بود و مقدار میانگین، انحراف معیار و ضریب پراکندگی نمونه‌ها تعیین شد. در این مقاله، با استفاده از نتایج آزمایش‌های انجام شده، رابطه‌هایی برای تعیین مقاومت فشاری و کششی بتن پودری در سنین مختلف پیشنهاد شده است که از دقت مناسبی برخوردار بوده و می‌تواند در عمل مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی: بتن پودری، بتن فوق توانمند، فوق روان کننده، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، مدول گسیختگی.

\*نویسنده مسئول: فرزاد شهابیان

پست الکترونیکی: shahabf@um.ac.ir

تاریخ دریافت مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰، تاریخ پذیرش مقاله: ۰۰۰۰/۰۰/۰۰

<sup>۱</sup> - Ultra High Performance Concrete

<sup>۲</sup> - Reactive Powder Concrete

بتن یکی از پرمصرف‌ترین ماده‌های ساختمانی است. پژوهش‌های انجام شده در چند دهه اخیر منجر به دستیابی به ویژگی‌های فوق‌العاده در بتن‌های نسل جدید گردیده که با نام بتن فوق‌توانمند بسیاری از محدودیت‌های بتن معمولی را مرتفع ساخته است. بتن پودری (RPC) از جمله بتن‌های فوق‌توانمند نوین است، که به دلیل عملکرد بسیار مناسب آن مورد توجه قرار گرفته است.

بتن پودری (RPC) یک عنوان کلی برای مصالح مرکبی است که به دلیل ویژگی‌های مناسب مقاومت و شکل‌پذیری مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از دانه‌های بسیار ریز و پودری، نسبت آب به سیمان بسیار کم و به‌کارگیری روش‌های ویژه عمل‌آوری، امکان دستیابی به مقاومت، کارایی و دوام مناسب این نوع بتن را ممکن ساخته است. حذف دانه‌های درشت و استفاده از دانه‌های بسیار ریز و بهره‌گیری مناسب از عملکرد پوزولان‌های مرغوب نظیر میکروسیلیس در این نوع بتن سبب می‌گردد تا از ایجاد و گسترش ریز ترک‌ها در ناحیه اتصال دانه‌ها و خمیر سیمان جلوگیری شود و مقاومت بتن به نحو چشم‌گیری افزایش یابد.

انتخاب نوع سیمان به‌عنوان یک عامل تاثیرگذار در خواص RPC، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. Lee و Chisholm [۱] نشان دادند که بهتر است در ساخت RPC از سیمان‌های نوع دو و پنج که کمترین مقدار  $C_3A$  را دارند، استفاده شود. Yazici و همکاران [۲] نشان دادند که بهترین روش برای دستیابی به مقاومت بیشتر، افزایش مقدار سیمان مصرفی نیست و جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی با مواد ریز و پودری می‌تواند سبب بهبود ویژگی‌های RPC گردد.

پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که استفاده از میکروسیلیس به ارتقای ویژگی‌های مکانیکی و دوام بتن به دلیل بهبود ریزساختارهای خمیر سیمان و اصلاح واکنش‌های پوزولانی می‌انجامد. علاوه بر آن میکروسیلیس مصرفی در RPC فضاهای خالی بسیار ریز موجود را پر نموده و به کمک ذرات بسیار ریز کروی خود روانی بتن حاصله را نیز بهبود می‌بخشد [۳، ۴]. Flaga [۵] نشان داد که هیدرات‌های سیلیکات کلسیم حاصل از واکنش پوزولانی میکروسیلیس، اجزای ملات را مقاوم‌تر و متراکم‌تر می‌نماید. Matte و Moranville [۶] ویژگی‌های گروه خاصی از RPC با مقادیر زیاد میکروسیلیس (۲۵ درصد از وزن مواد پودری) و مقادیر بسیار کم نسبت آب به سیمان (۰/۲) را مطالعه نمودند. Papadakis [۷] نشان داد که میزان بهینه مصرف میکروسیلیس حدود ۳۰ درصد وزن سیمان است.

Richard و Cheyrezy [۸] نشان دادند که وجود ماسه سیلیسی در بتن تازه سبب بهبود روانی و کارایی می‌گردد. علاوه بر آن، میزان آب انداختن و جداسدگی را که عاملی برای عدم همگنی ملات حاصل است، را کاهش می‌دهد. در پژوهش Cwizen و همکاران [۹] از دو محدوده دانه‌بندی برای ماسه سیلیسی استفاده شد. ۸۰ درصد کل مصالح دانه‌ای شامل ماسه سیلیسی در محدوده ۰/۱۶ تا ۰/۶ میلی‌متر دانه‌بندی شدند و برای مابقی از فیلر (پرکننده) کوارتز استفاده شد.

استفاده از فوق‌روان‌کننده<sup>۳</sup> (SP) در فن‌آوری نوین بتن جایگاه ویژه‌ای دارد. ایده اصلی در استفاده از فوق‌روان‌کننده توانایی آن در کاهش نسبت آب به سیمان و بالطبع افزایش مقاومت بتن سخت شده بدون کاهش کارایی آن می‌باشد. ساخت RPC با نسبت آب به سیمان (W/C) یا آب به مصالح پودری (W/B) (منظور از مصالح پودری مجموع مقدار سیمان و میکروسیلیس است) بسیار کم، فقط با استفاده از مقدار قابل توجه فوق‌روان‌کننده امکان پذیر است. Richard و Cheyrezy [۸] نشان دادند که موثرترین فوق‌روان‌کننده‌ها، روان‌کننده‌های با پایه پلی‌کربوکسیلات هستند.

علیرغم ویژگی‌های ارزشمند RPC، این نوع بتن هنوز در ایران آن‌چنان که باید رایج نیست و برای پژوهش در این زمینه هنوز جای کار زیادی وجود دارد. از این رو در پژوهش حاضر، ابتدا یک طرح اختلاط مناسب با توجه به مطالعات پیشین بررسی و انتخاب گردیده است. در ادامه، با انجام آزمایش‌های متعددی، مقاومت فشاری و مقاومت کششی با انجام آزمایش‌های مدول گسیختگی و شکافت نمونه‌های RPC در سنین مختلف تعیین و مورد بررسی قرار گرفته است. در پایان، رابطه‌هایی برای تخمین مقاومت فشاری و کششی بتن پودری که جنبه کاربردی دارد پیشنهاد گردیده است.

<sup>۳</sup> Super Plastisizer

## ۲ - مصالح مصرفی

نوع و کیفیت مصالح مصرفی در ساخت RPC، تاثیر زیادی بر ویژگی‌های آن دارد. انتخاب نوع و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی مصالح، نیازمند دقت و توجه کافی است. محدودیت‌های موجود در تهیه مصالح به‌خصوص بخشی از آن‌ها که وارداتی است، استفاده از مصالح تولید داخل و بومی را توجیه‌پذیر می‌سازد.

از ویژگی‌های اساسی بتن پودری عیار زیاد سیمان مصرفی است. لازم به ذکر است که سیمان مصرفی در بتن معمولی حدود ۳۰۰ تا ۴۰۰ کیلوگرم در متر مکعب است، اما این مقدار در RPC حدود ۱۰۰۰ کیلوگرم در متر مکعب است. مصرف زیاد سیمان، ناشی از سطح جانبی زیاد مصالح پودری بسیار ریز و نیاز به دوغاب سیمان جهت پوشش آن است [۱۰]. برای دستیابی به نتایج مطلوب، با بررسی‌هایی که به عمل آمد، سیمان تیپ دو تولیدی کارخانه سیمان آباده انتخاب گردید [۱۱].

میکروسیلیس<sup>۴</sup> (SF) محصول جانبی کارخانه تولید آلیاژهای سیلیسیم به‌ویژه فروسیلیس است. این ماده با واکنش پوزولانی خود علاوه بر وظیفه پرکنندگی فضاهای بسیار ریز، سبب بهبود ویژگی‌های مقاومتی و دوام RPC می‌گردد. میکروسیلیس مصرفی در RPC فضاهای خالی بسیار ریز موجود را پر نموده و به کمک ذرات بسیار ریز کروی خود روانی بتن حاصل را نیز بهبود می‌بخشد [۱۲]. در این پژوهش با توجه به مطالعات پیشین [۱۳]، از میکروسیلیس ازنا محصول شرکت فروآلیاژ ایران، به دلیل کیفیت برتر آن استفاده شده است [۱۴].

ماسه سیلیسی با خلوص بالا دارای سختی زیاد است و کیفیت سطح ذرات آن چسبندگی خوبی با خمیر سیمان ایجاد می‌کند. ماسه‌های سیلیسی موجود در بازار در بسته‌بندی‌های متفاوت و با نام‌های تجاری مختلف عرضه می‌شوند. در این پژوهش با توجه به مطالعات پیشین [۱۳]، از دو نوع ماسه سیلیسی موجود با نام‌های تجاری M50 با محدوده دانه‌بندی ۰/۲ تا ۰/۵ میلی‌متر و M15 با محدوده دانه‌بندی ۰/۵ تا ۱/۴ میلی‌متر استفاده شد.

استفاده از نسبت‌های بسیار کم آب به مواد پودری (W/B)، تنها با استفاده از فوق‌روان‌کننده (SP) امکان‌پذیر است. در این پژوهش با توجه به مطالعات پیشین [۱۳]، از Glenium-55p که در داخل کشور قابل تهیه است، استفاده گردید.

## ۳ - طرح اختلاط

در انتخاب یک طرح اختلاط مناسب برای RPC، لازم است که علاوه بر توجه به ویژگی‌های مقاومتی، در دسترس بودن مصالح نیز مدنظر قرار گیرد. از این رو در پژوهش حاضر، ویژگی‌های مصالح بومی، خصوصاً میکروسیلیس و سیمان مصرفی مورد توجه قرار گرفت و با بهره‌گیری از نتایج مطالعات پیشین [۱۳] و انجام بررسی‌های لازم، نمونه‌های آزمایشگاهی ساخته شد و مقاومت فشاری آن‌ها اندازه‌گیری گردید. با بررسی نتایج، یک طرح اختلاط که دارای بیشترین مقاومت بود، انتخاب گردید. مشخصات طرح اختلاط در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱: مشخصات طرح اختلاط برای RPC [۱۳].

مصالح	سیمان	میکروسیلیس	پودر سیلیس 0- 0.1 mm	پودر سیلیس 0.1- 0.3mm	پودر سیلیس 0.3- 0.6 mm	آب	فوق‌روان‌کننده
مقدار مصالح در طرح اختلاط (kg/m <sup>3</sup> )	936	280	374	268	268	234	28

-Silica Fume<sup>۴</sup>

## ۴- مقاومت فشاری RPC

پس از انتخاب، توزین و اختلاط مصالح، از RPC حاصل برای ساخت نمونه‌ها استفاده شد. با توجه به بالا بودن مقاومت نمونه‌ها از یک سو و محدود بودن توانایی دستگاه اعمال فشار از سوی دیگر، نمونه‌ها در قالب‌های مکعبی ۵ سانتی‌متری ریخته شد و با تراکم دستی و یا به وسیله میز ویبره متراکم گردید. مقاومت فشاری RPC با عمل‌آوری معمولی بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ مگاپاسکال است. البته، مقاومت فشاری تا ۸۰۰ مگاپاسکال نیز گزارش شده است [۱۵]. برای سنجش میزان تاثیر نسبت آب به سیمان بر مقاومت فشاری RPC، با توجه به مطالعات پیشین [۱۳]، نسبت آب به سیمان (W/C) برابر با ۰/۲۷، ۰/۲۵، ۰/۲۲، ۰/۲۰، ۰/۱۷ و ۰/۱۵ انتخاب گردید. بدین ترتیب، نسبت آب به مواد پودری (W/B) به ترتیب ۰/۲۱، ۰/۱۹، ۰/۱۷، ۰/۱۵ و ۰/۱۱ گردید. در کلیه مراحل فرایند فوق، نسبت فوق‌روان‌کننده به سیمان (SP/C) ثابت و برابر با ۳ درصد انتخاب گردید. برای هر نسبت آب به سیمان، شش نمونه مکعبی ۵ سانتی‌متری تهیه و پس از عمل‌آوری در آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد، در سن ۲۸ روزه آزمایش گردید. متوسط نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها ( $f_{cu}$ ) در جدول ۲ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول ۲ مشاهده می‌گردد، با افزایش W/B تا ۰/۱۵ مقاومت فشاری افزایش و پس از آن کاهش می‌یابد. بدین ترتیب در سایر مراحل آزمایشگاهی، نسبت W/B بهینه که متناظر با حداکثر مقاومت فشاری است برابر با ۰/۱۵ انتخاب گردید.

جدول ۲: مقاومت فشاری ۲۸ روزه RPC با W/B متفاوت [۱۳].

W/C	0.27	0.25	0.22	0.20	0.17	0.15
W/B	0.21	0.19	0.17	0.15	0.13	0.11
$f_{cu}$ (MPa)	106	123	142	156	115	94

درصد مصرف فوق‌روان‌کننده در RPC نسبت به بتن معمولی بیشتر است. این حقیقت ناشی از وجود ذرات بسیار ریز و بالطبع سطح جانبی زیاد این اجزا بوده که نیاز به مقدار بیشتر فوق‌روان‌کننده را توجیه می‌کند. استفاده از فوق‌روان‌کننده به مقدار بهینه، به پخش مناسب ذرات کمک و از گلوله‌ای شدن اجزا و ایجاد حفرات در مخلوط جلوگیری می‌نماید. در این پژوهش با توجه به مطالعات پیشین [۱۳]، برای بررسی میزان تاثیر نسبت فوق‌روان‌کننده بر مقاومت فشاری RPC، نسبت فوق‌روان‌کننده به سیمان (SP/C) برابر با ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ درصد انتخاب گردید. در کلیه مراحل فرایند فوق، نسبت آب به مصالح پودری (W/B) ثابت و برابر با ۰/۱۵ در نظر گرفته شد. برای هر نسبت آب به مصالح پودری، شش نمونه مکعبی ۵ سانتی‌متری تهیه و پس از عمل‌آوری در آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد، در سن ۲۸ روزه آزمایش گردید. متوسط نتایج مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها ( $f_{cu}$ ) در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳: مقاومت فشاری ۲۸ روزه RPC با SP/C متفاوت [۱۳].

SP/C	2	2.5	3	3.5	4	4.5
$f_{cu}$ (MPa)	125	132	156	115	91	63

جدول ۳ بیانگر آن است که بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط با ۳ درصد فوق‌روان‌کننده است. در درصد‌های کمتر فوق‌روان‌کننده، کاهش مقاومت ملاحظه می‌گردد که به دلیل عدم کفایت فوق‌روان‌کننده در تأمین روانی لازم برای حصول تراکم بهینه است. بدین ترتیب در سایر مراحل آزمایشگاهی، نسبت SP/C بهینه که متناظر با حداکثر مقاومت فشاری است برابر با ۳ درصد انتخاب گردید.

## ۴-۱- مقاومت فشاری RPC در سنین مختلف

به منظور سنجش اثر زمان (سن نمونه) بر مقاومت فشاری RPC نمونه‌هایی با W/B برابر ۰/۱۵ و SP/C برابر ۳ درصد ساخته شد و پس از عمل‌آوری معمولی (آب ۲۰ درجه سانتی‌گراد) در سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روزه مورد آزمایش قرار گرفت. هر گروه شامل شش نمونه بود و مقدار میانگین ( $\bar{x}$ )، انحراف معیار ( $s$ ) و ضریب پراکندگی ( $v$ ) نمونه‌ها به ترتیب با استفاده از رابطه‌های (۱) تا (۳) تعیین شد.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (1)$$

که در آن  $x_i$ ،  $i$  امین متغیر به دست آمده و  $n$  تعداد نمونه‌هاست.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

$$v = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad (3)$$

مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روزه در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴: مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف.

سن نمونه‌ها (روز)	میانگین مقاومت فشاری (MPa)	انحراف معیار (MPa)	ضریب پراکندگی (%)
3	68.81	7.01	10.18
7	125.07	12.01	9.60
14	146.63	16.86	11.50
28	155.81	17.24	11.07
56	168.41	20.18	11.98

از جدول ۴ می‌توان دریافت که میانگین مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه معادل ۱۵۶ مگاپاسگال است. مقدار انحراف معیار مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین مختلف متفاوت است. این مقدار در سنین بالاتر بیشتر است، اما، اختلاف ضریب پراکندگی مقاومت نمونه‌ها در تمام سنین چندان زیاد نیست.

## ۴-۲- رابطه پیشنهادی برای مقاومت فشاری RPC بر حسب سن نمونه‌ها

صدر کریمی با استفاده از پیشنهاد انجمن بتن ایالات متحده (ACI) [۱۶] تغییرات مقاومت فشاری بتن با سن آن را به صورت رابطه (۴) پیشنهاد می‌کند.

$$f_{c,t} = f_{c,28} \left( \frac{t}{\alpha + \beta t} \right) \quad (4)$$

که در آن  $\alpha = 4$ ،  $\beta = 0.85$ ،  $f_{c,28}$  مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها و  $f_{c,t}$  مقاومت فشاری نمونه‌ها در سن  $t$  است. مقایسه نسبت‌های  $f_{c,t}/f_{c,28}$  حاصل از آزمایش با مقدار مشابه حاصل از رابطه ACI در جدول ۵ ارایه شده است.

جدول ۵:  $f_{c,t}/f_{c,28}$  حاصل از آزمایش و رابطه ACI.

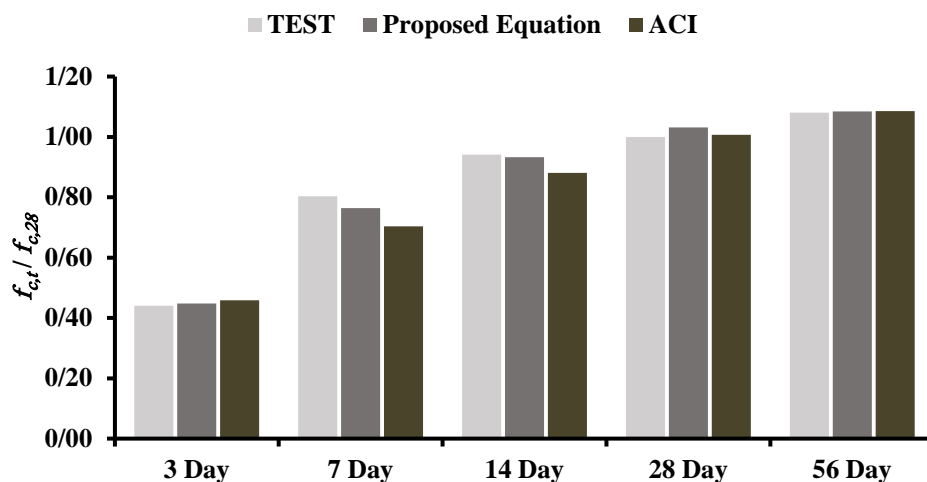
سن نمونه‌ها (روز)	$f_{c,t}/f_{c,28}$	
	نتایج آزمایش	رابطه ACI
3	0.44	0.46
7	0.80	0.70
14	0.94	0.88
28	1.00	1.01
56	1.08	1.09

با توجه به جدول ۵ می‌توان دریافت که مقاومت فشاری نمونه‌های RPC در ۷ روز ابتدایی به سرعت رشد یافته و حتی به میزان ۸۰ درصد مقاومت فشاری ۲۸ روزه نیز رسیده است. این واقعیت می‌تواند ناشی از مقدار زیاد سیمان و میکروسیلیس مورد استفاده همراه با مقدار کم W/C باشد. رشد مقاومت فشاری نمونه‌های RPC در سن ۱۴ روزه به ۹۴ درصد بالغ می‌گردد که رشدی بیشتر از بتن‌های معمولی دارد.

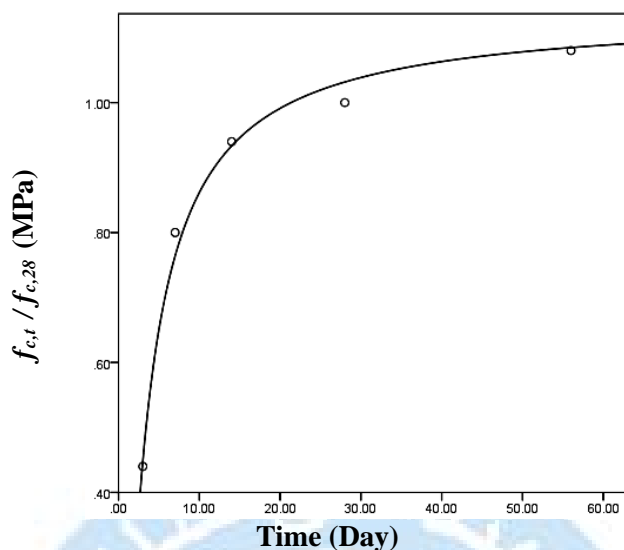
با بهره‌گیری از روش رگرسیون، معادله (۵) برای داده‌های ارایه شده در جدول ۵ حاصل گردید.

$$f_{c,t} = f_{c,28} \left[ \exp \left( 0.131 - \frac{2.804}{t} \right) \right] \quad (5)$$

در رابطه فوق  $t$  سن RPC به روز،  $f_{c,28}$  مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها و  $f_{c,t}$  مقاومت فشاری نمونه‌ها به مگاپاسکال در سن  $t$  است. مقدار نسبت‌های  $f_{c,t}/f_{c,28}$  حاصل از آزمایش با مقدار مشابه حاصل از رابطه پیشنهادی در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان دریافت که رابطه پیشنهادی به نحو مناسبی مقاومت فشاری RPC را در سنین مختلف پیش‌بینی می‌کند.



شکل ۱: مقایسه نسبت‌های  $f_{c,t}/f_{c,28}$  حاصل از آزمایش با مقدار مشابه حاصل از رابطه ACI و رابطه پیشنهادی.



شکل ۲: همپوشانی رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایش برای مقاومت فشاری RPC در سنین مختلف.

### ۳-۴- رابطه پیشنهادی برای مقاومت فشاری RPC بر حسب چگالی نمونه‌ها

جدول ۶ مقدار مقاومت فشاری و چگالی RPC را در سن ۲۸ روزه نشان می‌دهند.

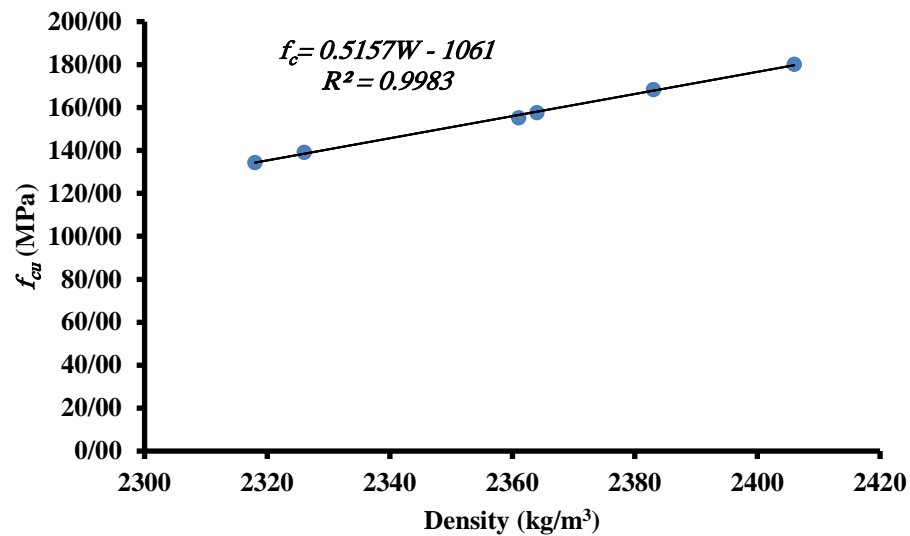
جدول ۶: مقاومت فشاری و چگالی RPC در سن ۲۸ روزه.

شماره نمونه	1	2	3	4	5	6
$f_{cu}$ (MPa)	155.26	157.67	134.38	168.36	180.06	139.13
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	2361	2364	2318	2383	2406	2326

با بررسی جدول ۶ و با بهره‌گیری از روش رگرسیون برای انطباق یک معادله بر روی داده‌های ارایه شده، می‌توان رابطه مقاومت فشاری و چگالی RPC را به صورت زیر بیان کرد:

$$f_{cu} = 0.5157W - 1061 \quad (6)$$

که در آن  $f_c$  مقاومت فشاری RPC برحسب مگاپاسگال و  $W$  چگالی آن برحسب کیلوگرم بر مترمکعب است. همپوشانی مناسب رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایش در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۳: همپوشانی رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایش برای مقاومت فشاری نمونه‌های RPC برحسب چگالی آن.

### ۵- مقاومت کششی RPC

سنجش مقاومت کششی به روش غیرمستقیم با آزمایش‌های شکافت و تعیین مدول گسیختگی انجام شد. در تمام نمونه‌ها نسبت W/B برابر ۰/۱۵ و نسبت SP/C برابر ۳ درصد انتخاب گردید. عمل‌آوری در آب معمولی انجام شد و مقاومت کششی در سنین مختلف اندازه‌گیری گردید.

### ۵-۱- مدول گسیختگی RPC

مقاومت کششی (مدول گسیختگی،  $f_{rp}$ ) با آزمایش خمشی نمونه‌های منشوری، مطابق دستورالعمل آیین نامه ASTM C-1018 با بارگذاری چهار نقطه‌ای نمونه‌های  $100 \times 100 \times 500$  میلی‌متر تعیین شدند. چیدمان دستگاه آزمایش در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: آزمایش تعیین مدول گسیختگی.



جدول ۷ مقدار میانگین، انحراف معیار و ضریب پراکندگی مدول گسیختگی RPC ( $f_{rp}$ ) را در سنین مختلف نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۷ می‌توان دریافت که مدول گسیختگی نمونه‌های RPC در ۷ و ۱۴ روز به ترتیب ۷۶ و ۸۷ درصد مقاومت آن در ۲۸ روز بالغ می‌گردد.

جدول ۷: مدول گسیختگی RPC ( $f_{rp}$ ) در سنین مختلف.

سن نمونه‌ها (روز)	تعداد نمونه	میانگین مدول گسیختگی (MPa)	انحراف معیار (MPa)	ضریب پراکندگی (%)
3	3	6.42	0.44	3.28
7	3	13.35	0.67	4.99
14	3	15.43	0.83	5.35
28	6	17.68	1.06	5.99

## ۲-۵- رابطه پیشنهادی برای مدول گسیختگی RPC بر حسب سن نمونه‌ها

نسبت‌های مدول گسیختگی نمونه‌های RPC در سن  $t$  به مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها ( $f_{rp,28}$ ) در جدول ۸ نشان داده شده است.

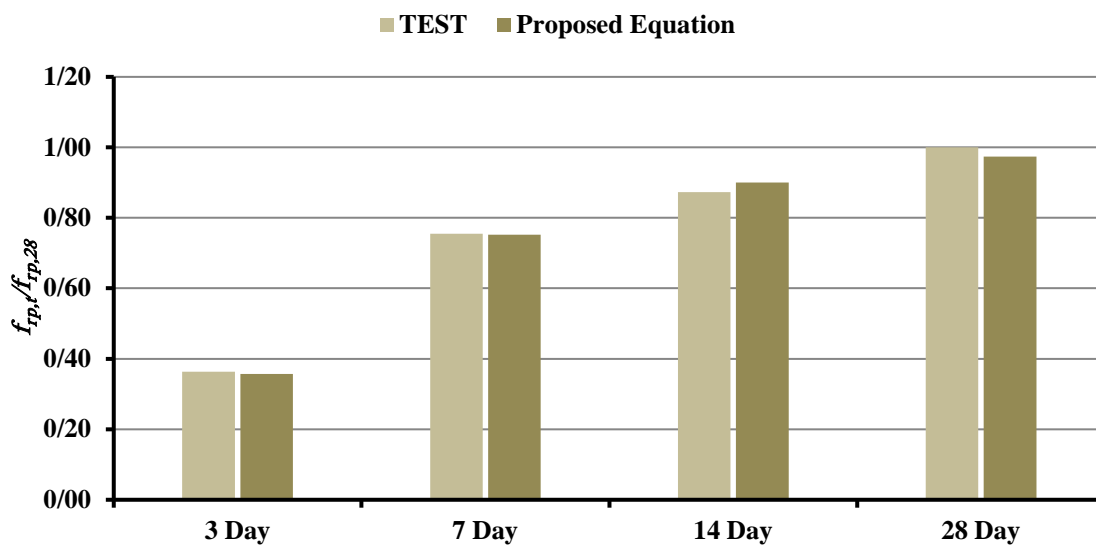
جدول ۸: نسبت  $f_{rp,t} / f_{rp,28}$  حاصل از آزمایش در سنین مختلف.

سن نمونه‌ها (روز)	$f_{rp,t} / f_{rp,28}$
3	0.36
7	0.75
14	0.87
28	1.00

روش رگرسیون برای انطباق مدول گسیختگی حاصل از نتایج آزمایش با سن نمونه‌ها به رابطه (۷) می‌انجامد.

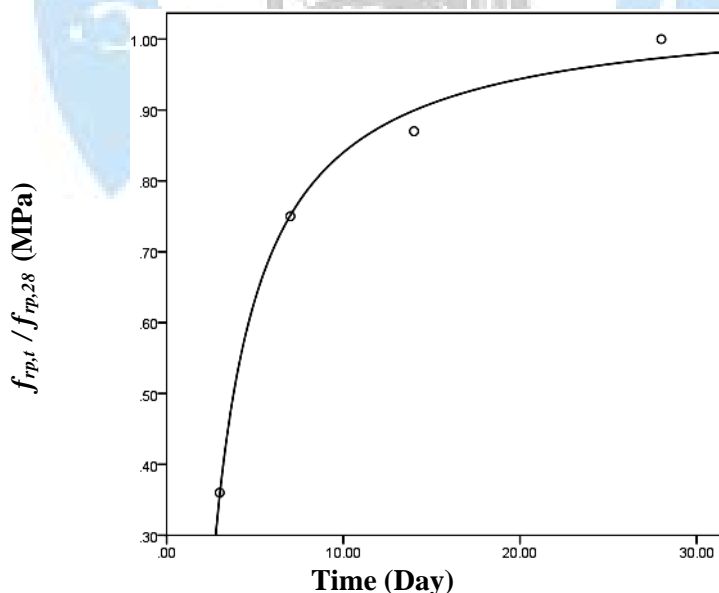
$$f_{rp,t} = f_{rp,28} \left[ 1.048 - \frac{2.074}{t} \right] \quad (7)$$

که در آن  $t$  سن نمونه‌های RPC به روز،  $f_{rp,t}$  مدول گسیختگی نمونه‌های RPC در سن  $t$  و  $f_{rp,28}$  مدول گسیختگی نمونه‌های RPC در سن ۲۸ روزه است. نسبت‌های  $f_{rp,t} / f_{rp,28}$  حاصل از آزمایش با مقدار مشابه حاصل از رابطه پیشنهادی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵: مقایسه  $f_{rp,t} / f_{rp,28}$  حاصل از آزمایش با رابطه پیشنهادی.

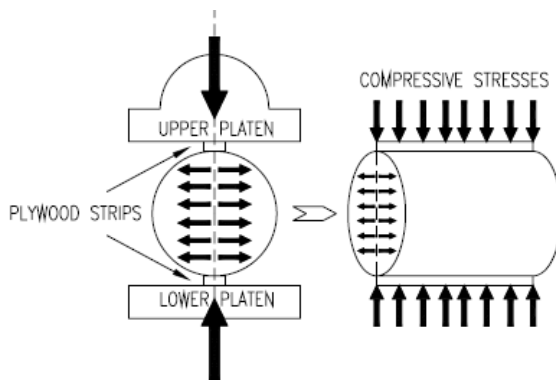
با توجه به شکل ۵ می‌توان دریافت که رابطه پیشنهادی به نحو مناسبی مدول گسیختگی RPC را در سنین مختلف پیش‌بینی می‌کند. همپوشانی مناسب رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایش در شکل ۶ نیز نشان داده شده است.



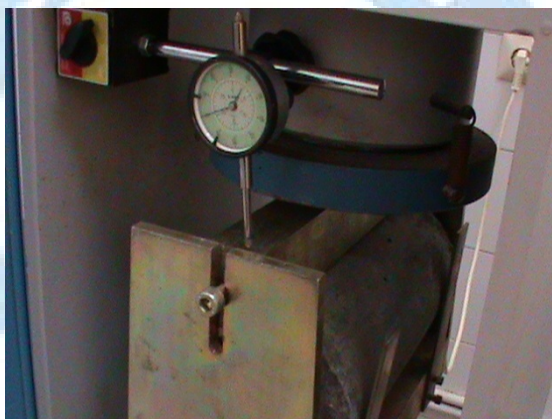
شکل ۶: همپوشانی رابطه پیشنهادی برای مدول گسیختگی با نتایج آزمایش.

۳-۵- مقاومت کششی حاصل از آزمایش شکافت نمونه‌های RPC

آزمایش مقاومت کششی به روش شکافت ( $f_{sp}$ )، مطابق استاندارد ASTM C496 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای RPC با قطر ۱۰۰ میلی متر و ارتفاع ۲۰۰ میلی متر مطابق شکل‌های ۷ تا ۹ انجام گرفت.



شکل ۷: نحوه اعمال بار در آزمایش شکافت.



شکل ۸: دستگاه آزمایش شکافت.



شکل ۹: شکست نمونه‌ها در آزمایش شکافت.

جدول ۹ نتایج آزمایش شکافت نمونه‌ها را در سنین مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۹: مقاومت کششی حاصل از آزمایش شکافت نمونه‌های RPC در سنین مختلف.

سن نمونه‌ها (روز)	تعداد نمونه	میانگین مقاومت کششی (MPa)	انحراف معیار	ضریب پراکندگی (%)
3	3	5.12	0.61	6.49
7	3	9.43	0.47	5.02
14	3	10.65	0.70	7.42
28	6	12.56	0.82	6.52

#### ۴-۵- رابطه پیشنهادی مقاومت کششی شکافت RPC با سن نمونه‌ها

مقایسه نسبت‌های مقاومت کششی شکافت نمونه‌های RPC در سن  $t$  ( $f_{sp,t}$ )، به مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن‌ها، ( $f_{sp,28}$ ) در جدول

۱۰ ارزیابی شده است.

جدول ۱۰: نسبت  $f_{sp,t}/f_{sp,28}$  حاصل از آزمایش در سنین مختلف.

سن نمونه‌ها (روز)	$f_{sp,t}/f_{sp,28}$
3	0.41
7	0.75
14	0.85
28	1.00

با توجه به جدول ۱۰ می‌توان دریافت که مقاومت کششی شکافت نمونه‌های RPC در ۷ و ۱۴ روز به ترتیب بالغ بر ۷۵ و ۸۵ درصد

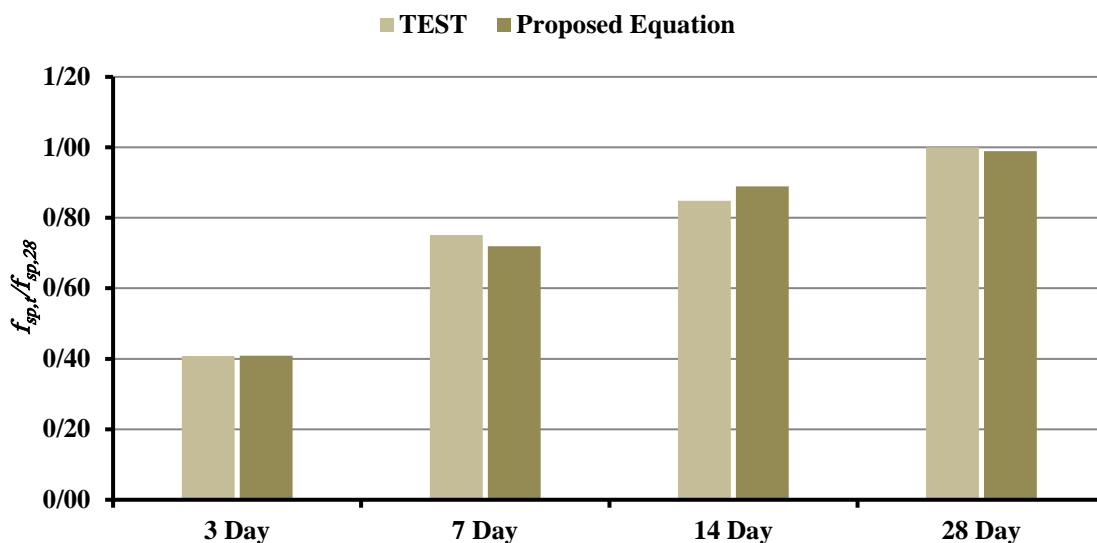
مقاومت آن در ۲۸ روز است. روش رگرسیون برای انطباق معادله‌ای برای مقاومت کششی شکافت به رابطه (۸) می‌انجامد.

$$f_{sp,t} = f_{sp,28} \left[ \exp\left(0.090 - \frac{2.919}{t}\right) \right] \quad (8)$$

که در آن  $t$  سن نمونه‌های RPC به روز،  $f_{sp,t}$  مقاومت کششی شکافت نمونه‌های RPC در سن  $t$  و  $f_{sp,28}$  مقاومت کششی شکافت

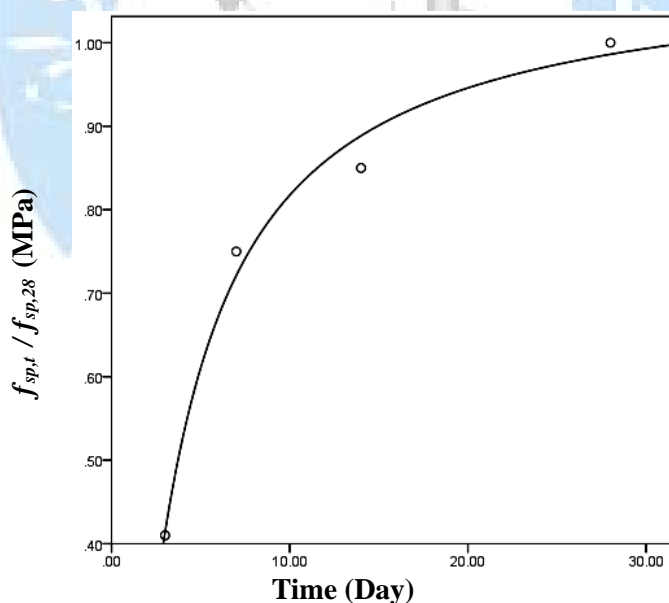
نمونه‌های RPC در سن ۲۸ روزه است. مقدار نسبت‌های  $f_{sp,t}/f_{sp,28}$  حاصل از آزمایش با مقدار مشابه حاصل از رابطه پیشنهادی در شکل

۱۰ مقایسه شده است.



شکل ۱۰: مقایسه  $f_{sp,t}/f_{sp,28}$  حاصل از آزمایش شکافت با رابطه پیشنهادی.

با توجه به شکل ۱۰ می‌توان دریافت که رابطه پیشنهادی به نحو مناسبی مقاومت کششی شکافت RPC را در سنین مختلف پیش‌بینی می‌کند. همپوشانی مناسب رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایش در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱: همپوشانی رابطه پیشنهادی برای مقاومت کششی شکافت با نتایج آزمایش.

### ۶- رابطه بین مدول گسیختگی و مقاومت کششی شکافت با مقاومت فشاری RPC

مقاومت فشاری از ویژگی‌های اصلی مصالح است. رابطه مدول گسیختگی ( $f_{rp}$ ) و مقاومت کششی شکافت ( $f_{sp}$ ) با مقاومت فشاری RPC از موضوعات مورد توجه پژوهشگران است. برخی روابط ارائه شده در این زمینه عبارتند از:

رابطه بین مدول گسیختگی ( $f_{rp}$ ) و مقاومت کششی شکافت ( $f_{sp}$ ) با مقاومت فشاری ( $f_c$ ) برای بتن با مقاومت معمولی، توسط کمیته (2002) ACI 318 [17] به صورت رابطه‌های (9) و (10) بیان شده است:

$$f_{rp1} = 0.7\sqrt{f_c} \quad (9)$$

$$f_{sp1} = \frac{\sqrt{f_c}}{1.8} \quad (10)$$

Shah و Ahmad [18] نشان دادند که رابطه بین مدول گسیختگی ( $f_{rp}$ ) و مقاومت کششی شکافت ( $f_{sp}$ ) با مقاومت فشاری ( $f_c$ ) برای بتن‌های با مقاومت تا 70 مگاپاسکال به صورت رابطه‌های (11) و (12) است:

$$f_{rp2} = 0.438f_c^{2/3} \quad (11)$$

$$f_{sp2} = 0.305f_c^{0.55} \quad (12)$$

کمیته ACI 363R-92 [19] رابطه بین مدول گسیختگی ( $f_{rp}$ ) و مقاومت کششی شکافت ( $f_{sp}$ ) با مقاومت فشاری ( $f_c$ ) را برای بتن‌های با مقاومت 41 تا 70 مگاپاسکال به صورت رابطه‌های (11) و (12) ارائه کرده است:

$$f_{rp3} = 0.94\sqrt{f_c} \quad (13)$$

$$f_{sp3} = 0.59\sqrt{f_c} \quad (14)$$

### ۱-۶- رابطه پیشنهادی مدول گسیختگی با مقاومت فشاری RPC

نتایج حاصل از آزمایش مدول گسیختگی ( $f_{rp}$ ) نمونه‌های RPC در پژوهش حاضر، با رابطه‌های (9)، (11) و (13) در جدول 11 با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول 11: مقایسه نتایج حاصل از آزمایش مدول گسیختگی ( $f_{rp}$ ) با روابط سه گانه در سنین مختلف.

$f_{rp3}$ (MPa)	$f_{rp2}$ (MPa)	$f_{rp1}$ (MPa)	$f_{rp}$ (MPa) (حاصل از آزمایش)	$f_c$ (MPa)	سن نمونه (روز)
6.97	6.34	5.19	6.43	55.05	3
9.40	9.44	7.00	13.35	100.05	7
10.18	10.50	7.58	15.43	117.31	14
10.49	10.93	7.82	17.68	124.65	28

جدول 11 نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری، مدول گسیختگی ( $f_{rp}$ ) نیز افزایش می‌یابد، همچنین، نتایج حاصل از آزمایش RPC بیشتر از مقدار حاصل توسط روابط موجود می‌باشد. به عبارت دیگر روابط سه گانه نمی‌توانند مقدار مدول گسیختگی برای RPC را به خوبی پیش بینی کنند.

نسبت مدول گسیختگی حاصل از نتایج آزمایش به روابط سه گانه در سن 28 روزه ( $f_{rp,i}/f_{rp,test}$ ) در جدول 12 ارائه شده است.

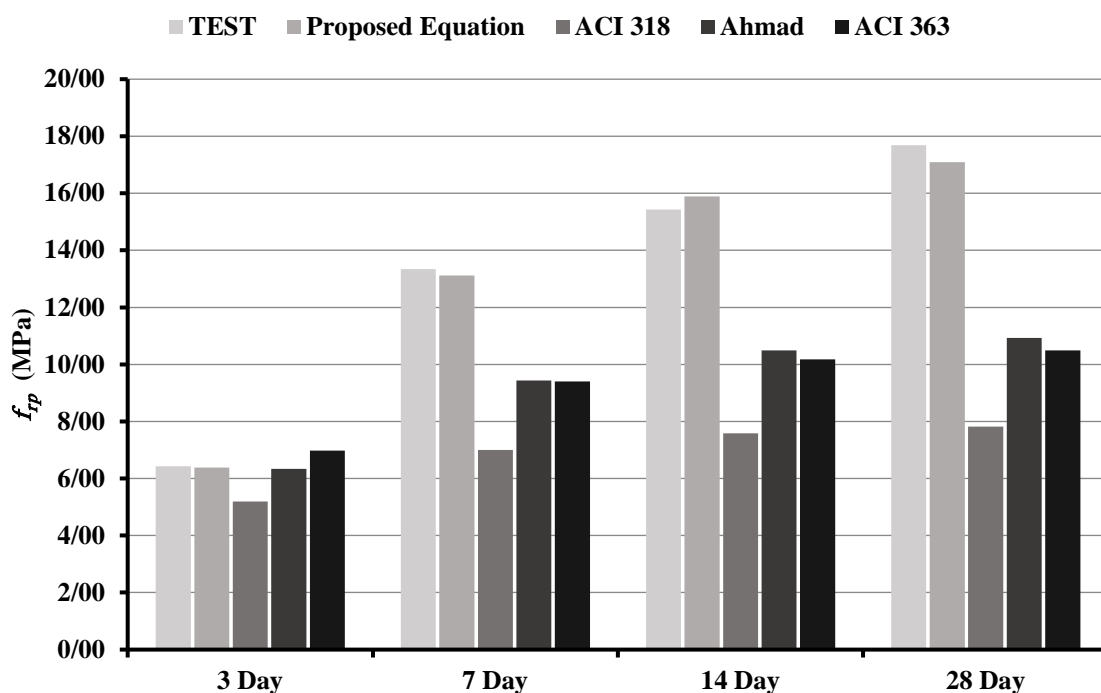
جدول ۱۲: نسبت ( $f_{rp}/f_{rp,test}$ ) در سن ۲۸ روزه.

$f_{rp,i}/f_{rp,test}$	$f_{rp}$ (MPa)	نتایج آزمایش
1	17.68	$(f_{rp,test})$
0.44	7.82	$(f_{rp1})$
0.62	10.93	$(f_{rp2})$
0.59	10.49	$(f_{rp3})$

با توجه به جدول ۱۲ می‌توان دریافت که نتایج محاسبه شده از رابطه Shah و Ahmad، ۵۶ درصد کمتر از نتایج آزمایش است، در حالی که این اختلاف در روابط کمیته ACI 318 (2002) و کمیته ACI 363R-92 به ترتیب ۴۸ و ۴۱ درصد است. با استفاده از روش رگرسیون بر روی نتایج حاصل از آزمایش‌ها که در جدول‌های ۱۱ و ۱۲ ارائه گردید، رابطه (۱۵) برای محاسبه مقدار  $f_{rp}$  پیشنهاد می‌شود:

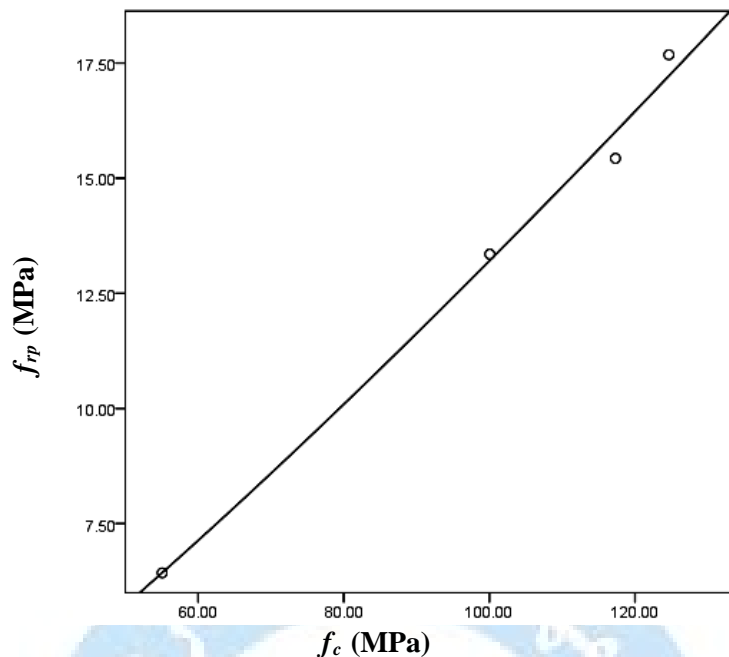
$$f_{rp} = 0.051f_c^{1.205} \quad (15)$$

که در آن،  $f_{rp}$  مدول گسیختگی نمونه‌های RPC و  $f_c$  مقاومت فشاری نمونه‌های RPC در سن ۲۸ روزه است. مقدار مدول گسیختگی حاصل از آزمایش با مقدار مشابه حاصل از روابط سه‌گانه و رابطه پیشنهادی در شکل ۱۲ مقایسه شده است.



شکل ۱۲: نتایج مدول گسیختگی ( $f_{rp}$ )، روابط سه‌گانه و رابطه پیشنهادی در سنین مختلف.

هم‌پوشانی رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایش در شکل ۱۳ نشان داده شده است.



شکل ۱۳: همپوشانی رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایش.

### ۲-۶- رابطه پیشنهادی مقاومت کششی شکافت با مقاومت فشاری RPC

نتایج حاصل از آزمایش آزمایش شکافت ( $f_{sp}$ ) نمونه‌های RPC در پژوهش حاضر، با رابطه‌های (۱۰)، (۱۲) و (۱۴) در جدول ۱۳ با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول ۱۳: نتایج حاصل از آزمایش شکافت ( $f_{sp}$ ) و روابط سه گانه در سنین مختلف.

$f_{sp3}$ (MPa)	$f_{sp2}$ (MPa)	$f_{sp1}$ (MPa)	$f_{sp}$ (MPa) (حاصل از آزمایش)		سن نمونه (روز)
4.38	2.77	4.12	5.13	55.05	3
5.90	3.84	5.56	9.43	100.05	7
6.39	4.19	6.02	10.65	117.31	14
6.59	4.33	6.20	12.56	124.65	28

جدول ۱۳ نشان می‌دهد که با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی شکافت ( $f_{sp}$ ) نیز افزایش می‌یابد، همچنین، نتایج حاصل از آزمایش RPC بیشتر از مقدار حاصل توسط روابط موجود می‌باشد. به عبارت دیگر روابط سه گانه نمی‌توانند مقدار مقاومت کششی شکافت برای RPC را به خوبی پیش بینی کنند.

نسبت  $f_{sp}$  حاصل از نتایج آزمایش به نتایج حاصل از روابط سه گانه در سن ۲۸ روزه در جدول ۱۴ ارایه شده است.



جدول ۱۴: نسبت  $(f_{sp}/f_{sp,test})$  در سن ۲۸ روزه.

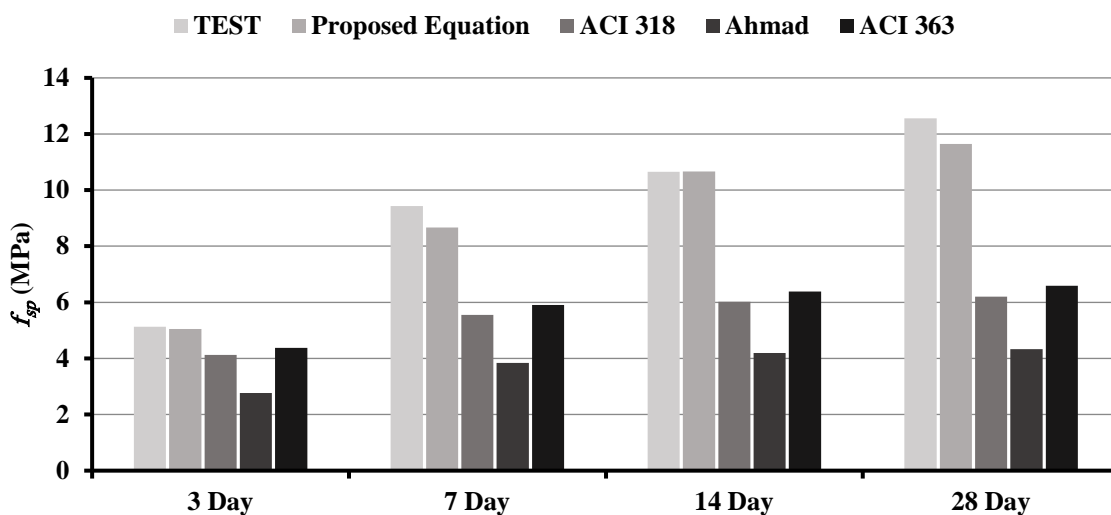
$f_{sp,test}/f_{sp}$	$f_{sp}$ (MPa)	نتایج آزمایش
1	12.56	$(f_{sp,test})$
0.49	12.56	$(f_{sp1})$
0.35	6.20	$(f_{sp2})$
0.52	4.33	$(f_{sp3})$

با توجه به جدول ۱۴ می توان دریافت که نتایج محاسبه شده از رابطه Shah و Ahmed ۶۵ درصد کمتر از نتایج آزمایش است، در حالی که این اختلاف در رابطه های کمیته های ACI 318 (2002) و ACI 363R-92 به ترتیب ۵۱ و ۴۸ درصد است.

با تحلیل رگرسیون بر روی نتایج حاصل از آزمایش ها که در جدول های ۱۳ و ۱۴ ارائه گردید، رابطه (۱۶) برای محاسبه مقدار  $f_{sp}$  پیشنهاد می شود:

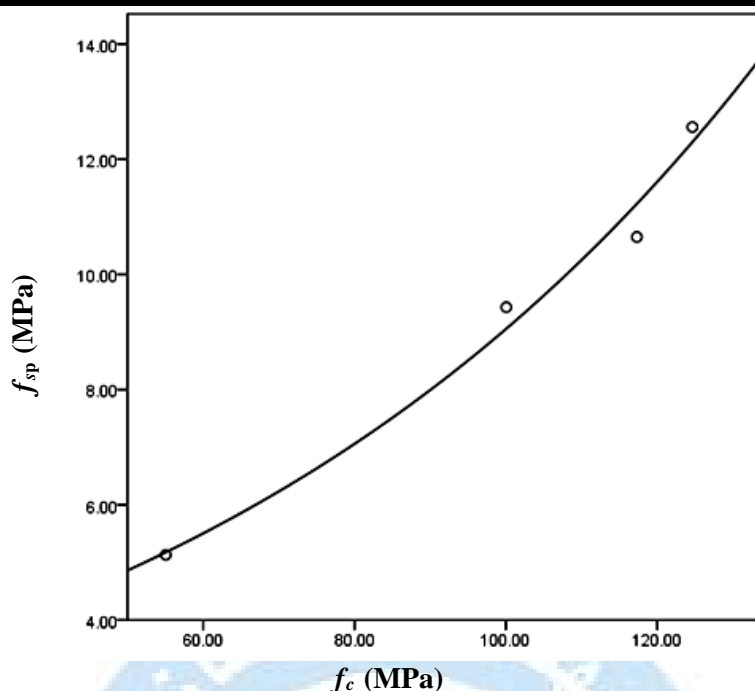
$$f_{sp} = \exp(0.959 + 0.012f_c) \quad (16)$$

که در آن،  $f_{sp}$  مقاومت کششی شکافت نمونه های RPC و  $f_c$  مقاومت فشاری نمونه های RPC در سن ۲۸ روزه است. مقدار مقاومت کششی شکافت حاصل از آزمایش با مقدار مشابه حاصل از روابط سه گانه و رابطه پیشنهادی در شکل ۱۴ با یکدیگر مقایسه شده است.



شکل ۱۴: مقایسه نتایج آزمایش شکافت ( $f_{sp}$ ) و روابط سه گانه در سنین مختلف.

هم پوشانی رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایش در شکل ۱۵ نشان داده شده است.



شکل ۱۵: همپوشانی رابطه پیشنهادی با نتایج آزمایش.

## ۷- نتیجه گیری

الف- نتایج بررسی ها و آزمایش های انجام شده نشان می دهد که نسبت W/B بهینه که متناظر با حداکثر مقاومت فشاری است برابر با ۰/۱۵ بوده است. کاهش مقاومت در مقدار کم W/B ناشی از عدم تامین آب لازم جهت واکنش های هیدراسیون سیمان است. از سوی دیگر، روانی مخلوط های حاوی W/B بیشتر از مقدار بهینه، بیش از حد مورد نیاز بوده و مخلوط حاصل، مستعد ایجاد حباب های هوا می باشد. علاوه بر آن، وجود آب بلااستفاده در مخلوط، افت مقاومت را به همراه دارد. همچنین بیشترین مقاومت فشاری مربوط به طرح اختلاط با SP/C برابر با ۳ درصد است. در درصد های کمتر فوق روان کننده، کاهش مقاومت ملاحظه می گردد که به دلیل عدم کفایت فوق روان کننده در تامین روانی لازم برای حصول به تراکم بهینه است.

ب- به منظور سنجش اثر زمان (سن نمونه) بر مقاومت فشاری RPC و ارایه رابطه پیشنهادی برای سنجش مقاومت فشاری RPC در سنین مختلف، نمونه هایی با W/B برابر ۰/۱۵ و SP/C برابر با ۳ درصد ساخته شد و پس از عمل آوری معمولی (آب ۲۰ درجه سانتی گراد) در سنین ۳، ۷، ۱۴، ۲۸ و ۵۶ روزه مورد آزمایش قرار گرفت و مقدار میانگین، انحراف معیار و ضریب پراکندگی مقاومت فشاری تعیین شد. در ادامه، با بهره گیری از تحلیل رگرسیون، یک رابطه پیشنهاد گردید. بررسی های انجام شده نشان می دهد که رابطه پیشنهادی به نحو مناسبی مقاومت فشاری RPC را در سنین مختلف پیش بینی می کند. همچنین، با بهره گیری از تحلیل رگرسیون رابطه ای نیز برای نشان دادن تغییرات مقاومت فشاری نمونه های RPC بر حسب چگالی آن ارایه شد که با نتایج حاصل از آزمایش سازگاری بسیار مناسبی دارد.

پ- سنجش مقاومت کششی به روش غیرمستقیم با انجام آزمایش های مدول گسیختگی و شکافت انجام گرفت. در تمام نمونه ها نسبت W/B برابر ۰/۱۵ و نسبت SP/C برابر ۳ درصد انتخاب گردید. عمل آوری نمونه ها در شرایط معمولی آزمایشگاهی انجام و مقاومت کششی در سنین مختلف اندازه گیری شد. با استفاده از تحلیل رگرسیون رابطه هایی پیشنهاد شدند که به نحو مناسبی مدول گسیختگی و مقاومت کششی شکافت RPC را در سنین مختلف پیش بینی می کند.

ت- رابطه بین مدول گسیختگی و مقاومت کششی شکافت با مقاومت فشاری RPC همیشه مورد توجه پژوهشگران بوده است. بر اساس تحلیل رگرسیون بر روی نتایج حاصل از آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، رابطه‌هایی به دست آمدند که به خوبی مقدار مدول گسیختگی و مقاومت کششی شکافت نمونه‌های RPC را برحسب مقاومت فشاری آن برآورد می‌کنند.

## مراجع

- [1] Lee, N. P. and Chisholm, D. H. (2005). Study Report Reactive Powder Concrete. *BRANZ*, Vol. 146, pp. 1-29.
- [2] Yazici, H., Yardimci, M. Y., Aydin, S. and Karabulut, A. S. (2009). Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Containing Mineral Admixtures under Different Curing Regimes. *Construction and Building Materials*, Vol. 23, pp. 1223-1231.
- [3] Saad, M., Abo-El-Enein, S. A., Hanna, G. B. and Kotkata, M. F. (1996), Effect of Silica Fume on the Phase Composition and Microstructure of Thermally Treated Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 26, pp. 1479-84.
- [4] Wild, S., Sabir, B. B. and Khatib, J. M. (1995). Factors Influencing Strength Development of Concrete Containing Silica Fume. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, pp. 1567-1580.
- [5] Flaga, K. (2000). Advances in Materials Applied in Civil Engineering. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 106, pp. 173-183.
- [6] Matte, V., and Moranville, M. (1999). Durability of Reactive Powder Composites: Influence of Silica Fume on the Leaching Properties of Very Low Water/Binder Pastes. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 21, pp.1-9.
- [7] Papadakis, V. (1999). Experimental Investigation and Theoretical Modelling of Silica Fume Activity in Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 79-86.
- [8] Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995). Composition of Reactive Powder Concretes. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511.
- [9] Cwirzen, A., Penttala, V. and Vornanen, C. (2008), Reactive Powder Based Concretes: Mechanical Properties, Durability and Hybrid Use with OPC. *Cement and Concrete Research*, Vol. 38, pp. 1217-1226.
- [10] Zhang, M. H., Tam, C. T. and Leow, M. P. (2003). Effect of Water to Cementitious Materials Ratio and Silica Fume on the Autogenous Shrinkage of Concrete. *Cement and Concrete Research*, Vol. 33, pp. 1687-1694.
- [11] Abadeh Cement Company. <http://www.abadehcement.com>.
- [12] Monosi, S. and Collepardi, M. (1987). Low Porosity and Early Durability of Concrete. *Proceedings of the 1st International Congress held by RILEM, in Pore Structure and Construction Materials Properties*, Vol. 1, pp. 1-8.
- [13] Dashti Rahmat Abadi, M.A., Haji Kazemi, H. and Shahabian, F. (2014). Effects of Different Water and Super Plasticizer Amount, Pre-Setting and Curing Regimes on the Behaviour of Reactive Powder Concrete. *Civil Engineering Infrastructures Journal*, Vol. 47, No. 2, pp. 291-304.
- [14] Iran Ferro Alloy Industries Company. <http://www.ferroazna.com>.
- [15] Semoli, W. J. (2001). The New Concrete Technology. *Concrete International*, Vol. 23, No. 11, pp. 75-79.
- [16] Sadrekarimi, A. (2004). Development of a Light Weight Reactive Powder Concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 2, No. 3, pp. 409-417.
- [17] ACI Committee 318 (ACI 318R-02). Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. *ACI Manual of Concrete Practice, part 3*, 2003.
- [18] Ahmad, S. H. and Shah, S. P. (1985). Structural Properties of High Strength Concrete and its Implications for Precasting Prestressed Concrete. *PCI Journal*, Nov-Dec, pp. 91- 119.
- [19] ACI Committee 363 (ACI 363R-92). State of the Art Report on High Strength Concrete. *ACI Manual of Concrete Practice, part 5*, 2003.