

بررسی مقاومت برشی بتن پودری واکنش پذیر تحت اثر برش خالص و مقایسه‌ی آن با بتن معمولی

آیدین طوفانی میلانی*

کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

حسن افشین

دانشیار دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

یاسر علیلوکسجینی

دانشجوی دکترای مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

حمید ناصری

کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی سهند

چکیده

بتن پودری واکنش پذیر از دستاوردهای جدید تکنولوژی بتن می‌باشد. توسعه و به کارگیری این نوع بتن بستگی به شناخت بیشتر خصوصیات و مشخصات آن دارد. مقاومت برشی یکی از مشخصه‌های مهم برای طراحی اجزای بتنی می‌باشد. یکی از روش‌های موثر و مفید برای بدست آوردن مقاومت برشی بتن تخمین این مقاومت با استفاده از مقاومت فشاری می‌باشد. در این پژوهش مخلوط‌های بتن پودری واکنش پذیر و بتن معمولی با طرح اختلاط‌های متفاوت با مصالح موجود در کشور تهیه و مشخصات مکانیکی آنها مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفته است. برای سنجش مقاومت برشی از دو روش: JSCE G553 و روش ابداعی افشین - علیلو استفاده شده است. نتایج به دست آمده حاکی از اختلاف خصوصیات برشی بتن پودری واکنش پذیر و بتن معمولی می‌باشد. همچنین مقاومت برشی بدست آمده از دو روش فوق نزدیک به یکدیگر هستند. با استفاده از نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، رابطه‌ای تجربی برای تخمین مقاومت برشی بتن پودری واکنش پذیر با استفاده از مقاومت فشاری آن پیشنهاد گردیده است.

واژه‌های کلیدی: بتن پودری واکنش پذیر (RPC)، مشخصات مکانیکی، مقاومت برشی، مقاومت فشاری.

* نویسنده مسئول: aydin.toofani@gmail.com

۱- مقدمه

نگریده است. علت این امر آن است که در آزمایشات سنجش مقاومت برشی:

- نیروهای دوگانه برش با فاصله می‌باشند. لذا لنگر ایجاد می‌شود.
- تنش فشاری در محل اعمال نیرو به نمونه بتنی ایجاد می‌گردد [۴].
- به لحاظ تئوری نیز برش ناشی از تغییرات خمش است. لذا نمی‌توان برش بدون خمش ایجاد کرد.

روش‌های آزمایش برش مستقیم عبارتند از:

۱- روش hofbeck یا نمونه‌ی Z شکل: هافبک (۱۹۶۹) از آزمون‌هایی که به نمونه‌ی Z شکل مشهور است استفاده نموده است. شکل (۲) تصویر نمونه بتنی و نحوه بارگذاری آن را نشان می‌دهد [۵].

۲- تیر Iosipescu: این روش در اصل توسط ایزوپسکو ارائه شده است و توسط Bazant & Pffier جهت بررسی مقاومت برشی بتن مورد استفاده قرار گرفت. شکل (۳) تصویر شماتیک این تیر را نشان می‌دهد [۶].

۳- برش دوگانه: این مدل مطابق شکل (۴) دارای دو صفحه‌ی شکست بر اساس استاندارد JSCE G553 [۷] می‌باشد. همانطور که در تصویر مشاهده می‌شود بار برشی توسط بلوک دارای دو لبه نواری^۵ (با عرض $h/10$) بر منشور اعمال می‌گردد. بلوک صلب^۶ دوم زیر نمونه منشوری قرار می‌گیرد و دو لبه‌ی نواری آن به عنوان تکیه‌گاه تیر عمل می‌کند. شکست برشی در صفحه‌ی بین لبه‌ی بلوک بارگذاری و لبه‌ی تکیه‌گاه به وقوع می‌پیوندد.

در سال ۲۰۰۲ Mirsayah و Banthia طی تحقیقات خود به این نتیجه رسیدند که روش نمونه‌ی Z شکل شرایط برش خالص را ایجاد نمی‌کند و استفاده از روش استاندارد JSCEG553 نتایج دقیق‌تری را بدست می‌دهد [۸]. Shoaib نیز در این مورد بیان می‌کند که در این روش آزمایش بعلاوه فاصله ناچیز بین تکیه‌گاه‌های بالایی و پایینی خمش به حداقل خود می‌رسد [۹].

در تمامی روش‌های فوق برای ایجاد صفحه شکست برشی، باید مقطع بین زوج نیروی برشی بوسیله‌ی ایجاد شکاف^۷ و بریدگی ضعیف گردد. ایجاد شیار در مقطع برشی در هر روش ضامن ثابت ماندن و یکنواختی تنش برشی بیشینه در سطح مقطع می‌گردد. لذا نمونه در حالت نزدیک به برش خالص خواهد بود [۱۰].

یکی از نوآوری‌هایی که در زمینه‌ی فناوری بتن در دهه نود میلادی در فرانسه رخ داده است ابداع بتن پودری واکنش پذیر^۱ (RPC) می‌باشد. ویژگی‌هایی مکانیکی عالی این بتن نسبت به سایر بتن‌ها توجه محققان را به خود جلب کرده و گسترش سریع کاربرد آن را در پی داشته است. بتن پودری واکنش پذیر نوعی بتن با مقاومت بسیار بالا می‌باشد. مواد تشکیل دهنده‌ی RPC عبارتند از: ماسه سیلیسی، پودر سیلیس^۲، سیمان، میکروسیلیس، آب، فوق روان‌کننده^۳ و در صورت نیاز به مقاومت کششی یا جذب انرژی بالا، الیاف فولادی است. RPC علاوه بر مقاومت بالا دارای خصوصیات دیگری نظیر نفوذپذیری کم، مقاومت سایشی و خوردگی بالا و تخلخل پایین و نیز دوام زیاد می‌باشد [۱].

این بتن، فاقد سنگ‌دانه‌های درشت می‌باشد و تنها از ماسه بسیار ریز (حداکثر اندازه‌ی دانه ۶۰۰ میکرومتر) و پودر سیلیس (متوسط اندازه‌ی دانه‌ها ۱۰ میکرومتر) استفاده شده است. مشکل ناهمگنی که در بتن معمولی وجود دارد در بتن پودری واکنش پذیر به دلایل حذف درشت دانه و جای‌گزینی آن با ماسه ریز، بهبود خواص مکانیکی خمیر و کاهش نسبت سنگدانه به خمیر کاهش یافته است. در این بتن به‌دلیل استفاده از ریز دانه، اندازه ریز ترک‌ها^۴ کاهش شدیدی یافته است. مدول الاستیسیته این بتن بیش از ۵۰ گیگا پاسگال می‌باشد [۲]. مقاومت فشاری این بتن از بتن‌های با مقاومت بالا، بیشتر می‌باشد.

پدیده‌ی شکست در بتن اصلی‌ترین و مهم‌ترین مسئله در مصالح ساختمانی و اعضای یک سازه می‌باشد. لذا مطالعه و تحقیق و بررسی رفتار مصالح جدید در زمینه‌ی عمران و سازه تحت انواع مودهای گسیختگی ضروری است. شکست اجسام بر سه مود کلی استوار است: ۱- مود کششی یا بازشدگی ۲- مود برشی یا لغزشی ۳- مود پارگی [۳].

در این پژوهش رفتار بتن تحت مود دوم گسیختگی که تصویر شماتیک آن مطابق شکل (۱) می‌باشد، مورد بررسی قرار می‌گیرد. ایجاد حالت برش خالص در یک نمونه بتنی مشکل می‌باشد و تا به حال با وجود تحقیقات بسیار شرایط ایده‌آل برش خالص میسر

⁵ Block with two knife edges

⁶ Rigid

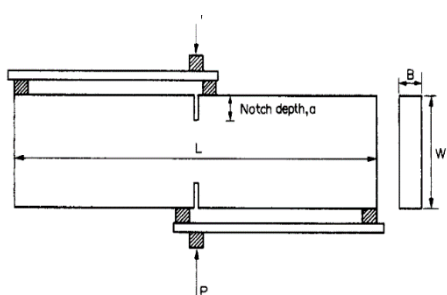
⁷ Natch

¹ Reactive powder concrete (RPC)

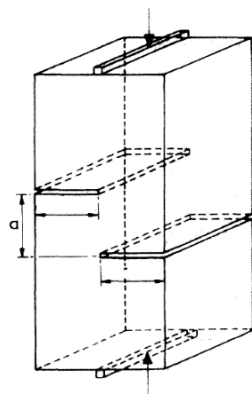
² Silica Powder

³ Superplasticizer

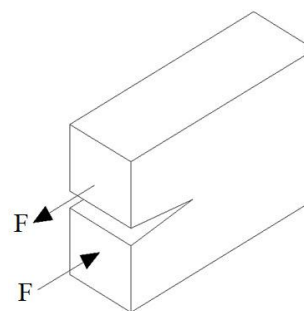
⁴ Microcracks



شکل ۳- تیر ایزوپسکو

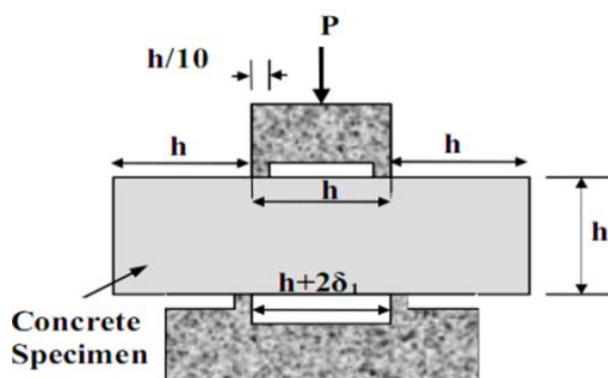


شکل ۲- نمونه Z شکل



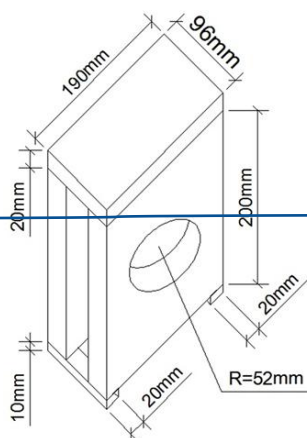
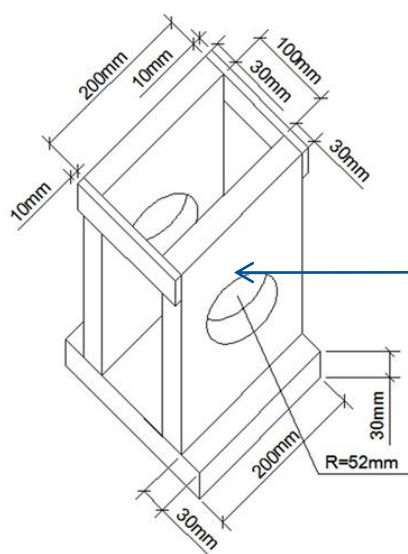
شکل ۱- نمایی از مود دوم شکست اجسام

دستگاه سنجش مقاومت برشی بتن مطابق شکل (۵) شامل دو قطعه اصلی، هسته داخلی و تکیه گاه خارجی می باشد. سوراخی به قطر ۱۰۰ mm در این قطعات ایجاد گردیده است که قطعه بتنی در داخل این سوراخ ها قرار می گیرد سپس نیرویی در جهت عمود بر محور قطعه استوانه ای شکل به هسته داخلی وارد می شود. در واقع نمونه بتنی در یک طرف به طور کامل در تکیه گاه خارجی مهار می شود و قسمت دیگر نمونه در هسته داخلی دستگاه قرار می گیرد به طوری که ممان خمشی در این مقطع به حداقل خود رسیده و نمونه بتنی تحت اثر برش خالص قرار می گیرد و در فاصله ما بین هسته داخلی و تکیه گاه خارجی که تنش برشی به حداکثر مقدار خود می رسد، دچار شکست برشی می شود [۱۱].



شکل ۴- تصویر شماتیک روش استاندارد JSCE G553

۴- روش ابداعی افشین- علیلو: این روش به تازگی توسط آقایان افشین و علیلو در دانشگاه صنعتی سهند تبریز ابداع گردیده است.



نمونه استوانه ای

شکل ۵- دستگاه آزمایش برش مستقیم افشین- علیلو [۱۱]

جدول ۱- مشخصات ماسه سیلیس معدن بابک شهر

مقدار	مشخصه مکانیکی
۲/۶۲	چگالی نسبی در حالت SSD
۱/۹۹	درصد جذب آب (%)
۱/۴۱	مدول نرمی
۰/۶	حداکثر اندازه دانه (mm)

سیمان: سیمان مورد استفاده سیمان تیپ دو کارخانه سیمان صوفیان می باشد. مشخصات شیمیایی اصلی این نوع سیمان مطابق جدول (۲) است.

جدول ۲- ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی [۱۲]

ترکیبات	درصد (%)	
Tricalcium-silicate (C ₃ S)	سه کلسیم سیلیکا	۴۹/۵۰
Dicalcium-silicate (C ₂ S)	دو کلسیم سیلیکات	۲۵/۴۷
Tricalcium-aluminate (C ₃ A)	سه کلسیم آلومینات	۷/۰۰
Tetracalcium-aluminoferrite(C4AF)	چهار کلسیم آلومینو فریت	۱۰/۳۵

پودر سنگ آهک: پودر سنگ آهک (CaCO₃) مورد استفاده از کارخانه آهک آذر شهر تهیه شده است. مشخصات آن به قرار جدول (۴) است.

جدول ۴- ترکیبات شیمیایی پودر سنگ آهک آذر شهر

ماده	درصد (%)
CaO	min ۵۴/۰
SiO ₂	max ۰/۵
Fe ₂ O ₃	max ۰/۱
Al ₂ O ₃	max ۰/۲
MgO	max ۰/۴
SO ₃	max ۰/۱
CO ₂	min ۴۳/۲
H ₂ O	Trace
SiO ₂ +ln	۱/۰

فوق روان کننده: برای افزایش کارایی و کاهش نسبت آب به سیمان، در اختلاط‌های بتن پودری واکنش پذیر از نسل سوم فوق روان کننده‌ها بر پایه پلی کربوکسیلات‌های اصلاح شده و در بعضی از اختلاط‌های بتن معمولی از روان کننده بر پایه نفتالین استفاده شده است.

در این تحقیق ویژگی‌هایی مکانیکی ۱۷ طرح اختلاط بتن پودری واکنش پذیر و ۶ طرح اختلاط بتن معمولی مطابق جداول (۵) و (۶) به لحاظ مقاومت برشی و مقاومت فشاری مورد بررسی آزمایشگاهی قرار گرفت.

۲- مصالح مصرفی

ماسه سیلیسی: در این پروژه از ماسه سیلیسی معدن شهر بابک استان کرمان استفاده شده است. ویژگی این ماسه در جدول (۱) ذکر گردیده است. پودر سیلیس: در این پروژه از پودر سیلیس (SiO₂) منطقه ازندریان همدان با وزن مخصوص ۲/۶۳ gr/cm³ و درصد خلوص بالای ۹۹٪ و حداکثر اندازه دانه ۰/۰۶۶mm استفاده شده است.

میکروسیلیس: در این پژوهش از میکروسیلیس از نای لرستان استفاده شده است. ترکیبات شیمیایی و سطح مخصوص این ماده مطابق جدول (۳) می باشد.

جدول ۳- ترکیبات شیمیایی میکروسیلیس از نای لرستان [۱۳]

ماده	درصد
H ₂ O	۰/۸
SiC	۰/۵
C	۰/۳
SiO ₂	۹۶/۴-۹۴/۶
Fe ₂ O ₃	۰/۸۷
Al ₂ O ₃	۱/۰۲
CaO	۰/۳۹
MgO	۰/۸۷
Na ₂ O	۰/۳۱
K ₂ O	۱/۱۰
P ₂ O ₅	۰/۱۶
SO ₃	۰/۰۱
CL	۰/۰۴
سطح مخصوص	۲۰ (m ² /gr)

۳- آزمایش‌های انجام شده

ترتیب مطابق جداول (۵) و (۶) می‌باشد. مقادیر مصالح در هر دو جدول بر اساس kg/m^3 بیان شده است.



شکل ۶- نمایی از نمونه و نحوه بارگذاری آزمایش برش خالص



شکل ۷- نمایی از نمونه داخل دستگاه آزمایش برش خالص

آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری و مقاومت برشی بر روی کلیه‌ی نمونه‌های بتنی سخت شده در سن ۲۸ روزه با نرخ بارگذاری یکسان انجام گرفت. نمونه‌های بتن پودری واکنش پذیر به مدت ۵ روز در آب با دمای ۹۰ درجه و نمونه‌های بتن معمولی به مدت ۲۸ روزه در آب با دمای ۲۵ درجه سلسیوس عمل‌آوری شده‌اند. آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی بر اساس استاندارد BS1881 : part 116 [۱۴] و آزمایش‌های مقاومت برشی به روش استاندارد JSCE G553 (با استفاده از نمونه‌ی مکعب مستطیلی $(7/5 \times 7/5 \times 25 \text{ cm})$) و آزمایش‌های مقاومت برشی به روش افشین-علیلو (با استفاده از نمونه استوانه‌ای $(10 \times 10 \text{ cm})$) در آزمایشگاه فناوری بتن دانشگاه صنعتی سهند تبریز انجام گرفت. صفحه تحت برش خالص در نمونه‌های بتنی آزمایش به روش JSCE G553 توسط شیاری به عرض ۲mm و عمق ۱۰mm کوچک‌تر شده بود. شکل (۶) نمای از نمونه بتنی منشوری در داخل جک بارگذاری را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۷) نمایی از نحوه قرار گیری نمونه بتنی استوانه‌ای در داخل دستگاه برش خالص افشین-علیلو را نشان می‌دهد. در این پژوهش سعی شده است طرح‌های اختلاط هر دو بتن به نحوی انتخاب شود که مقاومت فشاری کسب شده توسط طرح‌های مختلف متفاوت بوده و بازه وسیعی از مقاومت‌ها را شامل شود. طرح‌های اختلاط نمونه‌های بتن پودری واکنش پذیر و بتن معمولی به

جدول ۵- طرح‌های اختلاط بتن پودری واکنش پذیر

مصالح نام طرح	سیمان	ماسه سیلیسی	پودر سیلیس	پودر سنگ آهک	میکروسیلیس	فوق روان- کننده	آب	وزن حجمی بتن تازه (kg/m^3)
RPC1	۹۰۱	۱۱۱۷	۰	۰	۱۵۳	۳۷	۱۷۵	۲۳۸۳
RPC2	۸۱۰	۹۶۱	۱۸۲	۰	۱۶۷	۴۰	۲۰۰	۲۳۶۰
RPC3	۸۲۸	۹۰۲	۰	۱۷۱	۱۹۴	۴۵	۱۹۶	۲۳۳۶
RPC4	۸۴۶	۹۲۰	۰	۱۸۱	۱۸۱	۴۰	۱۹۴	۲۳۶۲
RPC5	۸۹۷	۷۹۷	۲۰۵	۰	۱۸۸	۴۶	۲۰۶	۲۳۳۹
RPC6	۶۷۳	۱۱۲۵	۱۴۴	۰	۱۹۲	۴۰	۱۷۳	۲۳۴۷
RPC7	۷۳۰	۱۰۷۰	۱۷۵	۰	۱۷۵	۳۹	۱۷۰	۲۳۵۹
RPC8	۹۱۹	۸۷۰	۷۷	۰	۲۲۱	۳۸	۲۰۴	۲۳۲۹
RPC9	۷۱۴	۱۲۰۳	۸۶	۰	۱۳۲	۳۹	۱۸۶	۲۳۶۰
RPC10	۶۲۹	۱۰۸۵	۲۶۱	۰	۱۵۱	۳۶	۱۹۸	۲۳۶۰
RPC11	۸۳۰	۱۰۸۰	۱۰۰	۰	۱۵۰	۴۲	۱۸۰	۲۳۸۲
RPC12	۷۵۰	۱۰۵۱	۱۱۹	۰	۲۱۵	۴۱	۱۷۰	۲۳۴۶
RPC13	۱۰۲۱	۶۶۲	۱۲۲	۰	۲۵۳	۴۸	۲۰۴	۲۳۱۰
RPC14	۸۴۰	۹۲۴	۱۷۸	۰	۲۰۲	۴۲	۱۸۰	۲۳۶۶
RPC15	۸۸۳	۷۸۶	۰	۲۰۱	۱۸۵	۴۵	۲۱۶	۲۳۱۶
RPC16	۸۹۸	۸۹۵	۱۱۰	۰	۱۸۸	۴۴	۲۰۷	۲۳۴۲
RPC17	۸۹۰	۷۰۰	۲۹۶	۰	۱۸۷	۴۶	۲۰۳	۲۳۲۲

جدول ۶- طرح‌های اختلاط بتن معمولی

مصالح نام طرح	سیمان	ماسه	شن - نخودی	شن - بادامی	فوق روان - کننده	آب	وزن مخصوص بتن تازه (kg/m^3)
NC1	۳۱۳	۹۸۶	۵۱۶	۵۴۱	۴	۱۵۰	۲۵۱۰
NC2	۳۸۶	۹۳۷	۵۵۲	۵۱۸	۶	۱۵۸	۲۵۵۷
NC3	۳۷۰	۹۱۸	۵۳۰	۴۹۹	۴	۱۸۴	۲۵۰۵
NC4	۴۲۵	۹۰۰	۴۲۷	۵۳۲	۰	۱۹۱	۲۴۷۵
NC5	۴۱۹	۸۹۲	۴۷۱	۵۲۲	۰	۲۰۹	۲۵۱۳
NC6	۳۲۹	۹۶۰	۵۱۹	۵۵۲	۶	۱۵۳	۲۵۱۹

۴- بحث در نتایج

نتایج به دست آمده از آزمایش‌های مقاومت برشی و مقاومت مستقیم به روش JSCE G553 و روش ۲ انجام آزمایش برش فشاری بر اساس نمونه‌ی استاندارد استوانه‌ای $15 \times 30 \text{ cm}$ در مستقیم به روش افشین - علیلو می‌باشد. جدول (۷) ارائه شده است. منظور از روش ۱ انجام آزمایش برش

جدول ۷- نتایج آزمایش‌ها

مشخصه مکانیکی نام طرح	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت برشی (MPa) روش ۱	مقاومت برشی (MPa) روش ۲	اختلاف روش (۱) و (۲) بر حسب درصد
NC1	۶۰	۸/۲	۸/۰	۲/۴
NC2	۶۵	۸/۶	۸/۶	۰
NC3	۵۳	۷/۶	۷/۰	۹/۲
NC4	۴۴	۶/۶	۶/۳	۴/۵
NC5	۳۴	۶/۱	۶/۱	۰
NC6	۶۸	۸/۹	۸/۷	۲/۲
RPC1	۱۳۵	۱۳/۰	۱۱/۹	۸/۴
RPC2	۱۳۲	۱۳/۸	۱۳/۱	۵/۱
RPC3	۱۲۷	۱۱/۸	۱۱/۰	۶/۱
RPC4	۱۱۷	۱۱/۴	۱۰/۷	۶/۱
RPC5	۱۴۳	۱۳/۱	۱۲/۵	۴/۶
RPC6	۱۳۰	۱۲/۶	۱۲/۵	۰/۸
RPC7	۱۳۴	۱۲/۷	۱۲/۲	۳/۹
RPC8	۱۳۹	۱۲/۵	۱۲/۴	۰/۸
RPC9	۱۲۱	۱۱/۹	۱۱/۵	۳/۳
RPC10	۱۲۵	۱۲/۱	۱۲/۳	۱/۶
RPC11	۱۳۲	۱۲/۸	۱۲/۸	۰
RPC12	۱۳۱	۱۳/۵	۱۲/۸	۵/۱
RPC13	۱۳۶	۱۲/۲	۱۱/۲	۸/۲
RPC14	۱۴۱	۱۴/۰	۱۳/۵	۳/۵
RPC15	۱۱۲	۱۰/۹	۱۰/۵	۳/۶
RPC16	۱۳۸	۱۳/۲	۱۲/۸	۳
RPC17	۱۴۴	۱۳/۶	۱۳/۳	۲/۲

درصد اختلاف و میانگین اختلاف بین دو روش برای هر نوع بتن طبق جدول (۸) است.

مقاومت فشاری مشخصه‌ای است که بر سایر مشخصات بتن تأثیر گذار می‌باشد لذا بررسی روند تغییرات مقاومت برشی نسبت به تغییرات مقاومت فشاری امری مفید خواهد بود. معمولاً مقاومت برشی را براساس روابطی بر حسب جذر مقاومت فشاری ذکر می‌کنند. در نمودارهای شکل‌های (۹) و (۱۰) مقاومت برشی بر حسب جذر مقاومت فشاری بتن‌های معمولی و پودری واکنش‌پذیر رسم گردیده است.

نمونه‌هایی از مقطع شکست تحت آزمایش برش خالص در شکل‌های (۸) نمایش داده شده است.

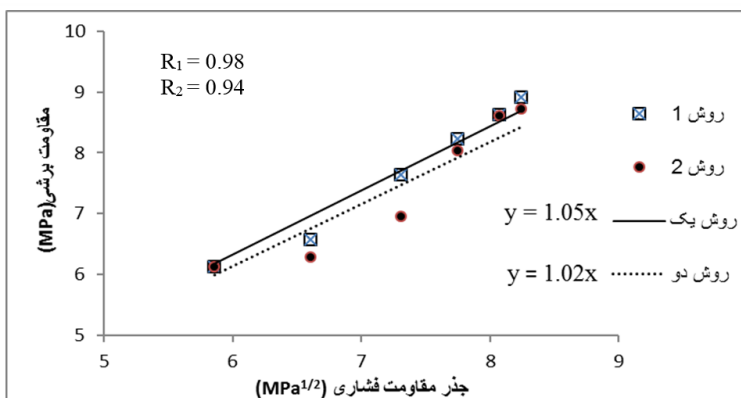


شکل ۸- نمونه‌ای از مقطع شکست نمونه‌های بتنی تحت آزمایش JSCE G553

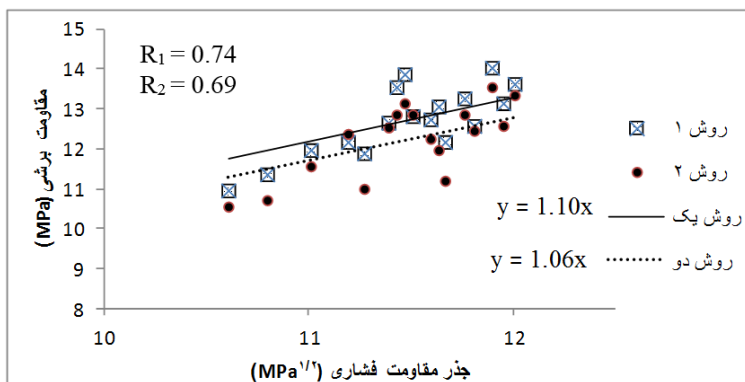
جدول ۸- درصد اختلاف نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم به دو روش

نوع بتن	بیشینه اختلاف (%)	میانگین اختلاف (%)
بتن معمولی	۹/۲	۳/۰
بتن پودری واکنش‌پذیر	۸/۴	۳/۹

نتایج به دست آمده از روش ابداعی افشین-علیلو بسیار نزدیک به نتایج به دست آمده از روش JSCE G553 و معمولاً اندکی کمتر از آن می‌باشد. علت این امر اثر نیرو در یک نقطه و تمرکز تنش در روش افشین-علیلو می‌باشد. بیشینه اختلاف بین دو روش ۹/۲٪ است. لذا با توجه به سادگی نمونه‌های بتنی مورد استفاده در روش دو، می‌توان آنرا جایگزین روش‌های دیگر نمود. بیشینه



شکل ۹- رابطه مقاومت برشی و جذر مقاومت فشاری در مقطع بتن معمولی

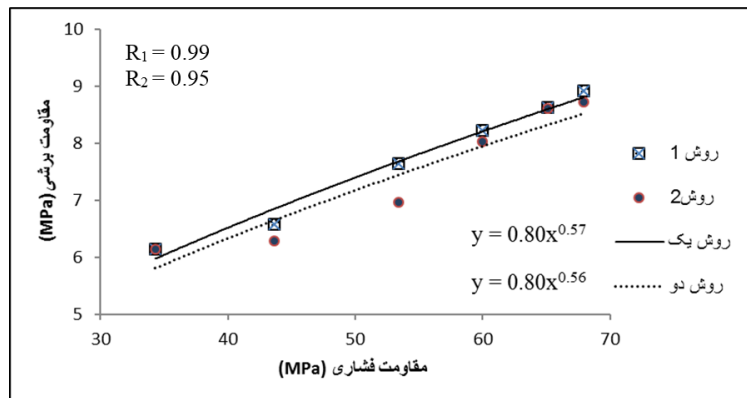


شکل ۱۰- رابطه مقاومت برشی و جذر مقاومت فشاری در مقطع بتن پودری واکنش پذیر

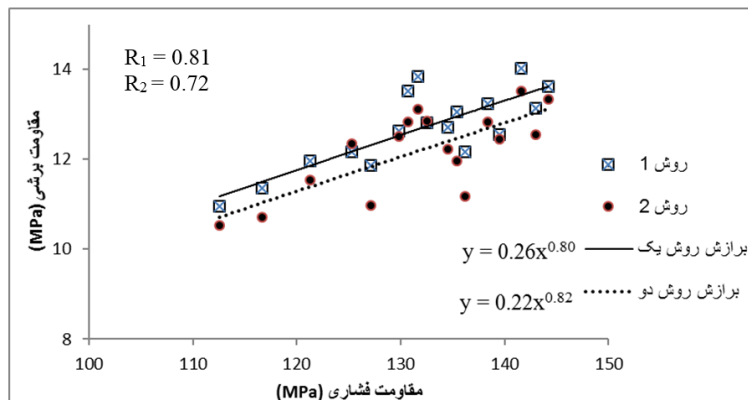
آنچه که در حالت کلی در تمامی نمودارهای فوق نمایان است با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت برشی نیز در تمامی بتن‌ها افزایش می‌یابد.

ضریب همبستگی خط برازش در بتن معمولی نزدیک به یک و بیشتر از RPC می‌باشد. پایین بودن این ضریب در بتن پودری واکنش پذیر نشانگر این نکته است که عوامل دیگری علاوه بر مقاومت فشاری بر مقاومت برشی این بتن‌ها تأثیر گذار می‌باشد. در بتن معمولی خمیر نسبت به اجزای دیگر ضعیف‌تر بوده و شکست در فاز چسبندگی بین خمیر و سنگدانه اتفاق می‌افتد و مؤلفه‌های دیگر تأثیر چندانی در مقاومت برشی و فشاری ندارد لذا استقامت خمیر سیمان عامل تعیین کننده می‌باشد و رابطه بین این دو مقاومت روند تقریباً ثابتی دارد. در RPC به علت مستحکم بودن خمیر عواملی همچون مقادیر سنگدانه و مواد سیمانی موجود در طرح اختلاط در مقاومت برشی تأثیر گذار

با مقایسه مقاومت برشی دو نوع بتن معمولی و پودری واکنش پذیر در شکل‌های (۹) و (۱۰) و روابط حاصل از برازش خطی، شیب نمودار برازش در بتن پودری واکنش پذیر بیشتر از بتن معمولی است و افزایش شیب نشانگر بالا بودن حساسیت مولفه γ نسبت به تغییرات X است. لذا حساسیت مقاومت برشی بتن پودری واکنش پذیر نسبت به تغییرات مقاومت فشاری بیشتر از بتن معمولی می‌باشد. به جهت حصول بهترین رابطه با ضریب همبستگی مطلوب‌تر، عمل برازش منحنی با توابع مختلف نمایی، خطی، لگاریتمی و توانی بر روی نقاطی که مختصات آن بر حسب مقاومت فشاری و مقاومت برشی می‌باشد انجام گرفت. بهترین تابع منحنی برازش بصورت شکل‌های (۱۱) و (۱۲) بترتیب برای بتن معمولی و بتن پودری واکنش پذیر می‌باشد.



شکل (۱۱): رابطه مقاومت برشی و مقاومت فشاری در مقطع بتن معمولی



شکل (۱۲): رابطه مقاومت برشی و مقاومت فشاری در مقطع بتن پودری واکنش پذیر

در بتن معمولی به علت ضعیف بودن خمیر سیمان، مشاهده می شود که با کاهش مقدار خمیر سیمان یا افزایش مقدار درشت دانه (شن) مقاومت برشی افزایش می یابد زیرا بعد از ترک خوردن، انتقال برش در عضو بتنی توسط ترکیبی از مکانیزم های زیر صورت می گیرد:

- ۱- مقاومت برشی بتن در قسمت ترک نخورده
 - ۲- نیروی ناشی از درگیر بودن درشت دانه در محل ترک [۱۵]
- علیلو و افشین نیز در تحقیقات خود به این نتیجه دست یافتند که خصوصیات برشی بتن نسبت به تغییرات درشت دانه حساسیت بیشتری دارد [۱۱].

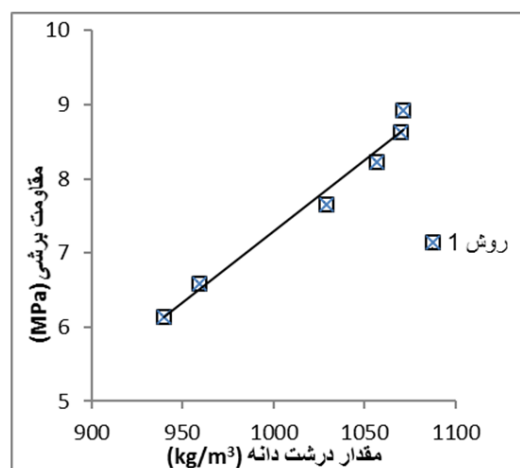
با توجه به نمودارهای فوق ملاحظه می گردد که نمودار در مورد RPC به صورت سهموی بوده و برای حصول بیشینه مقاومت برشی باید از مقادیر بهینه ی خمیر و سنگدانه استفاده کرد. در بتن پودری واکنش پذیر بر خلاف بتن معمولی، به علت مستحکم بودن خمیر و معادل بودن تقریبی مشخصات مکانیکی خمیر و دانه های سنگی، علاوه بر عامل مقاومت، عامل سطح چسبندگی و یا به عبارت دیگر انتقال تنش مابین دانه های سنگی و خمیر مواد سیمانی نیز دخیل می باشد. با افزایش میزان سنگدانه ها در این بتن، سطح مخصوص سنگدانه ها کاهش می یابد و در نتیجه مقاومت عمومی بتن از جمله مقاومت برشی آن دچار کاهش می شود. از طرفی، کاهش سنگدانه اثر قفل و بست بین دانه ها را کاهش می دهد و سبب کاهش مقاومت برشی می شود. علت پایین بودن ضریب همبستگی برآزش منحنی برای بتن پودری واکنش پذیر در نمودار شکل های (۹) و (۱۰)، نیز به این موضوع بر می گردد. لذا هر دو عامل سنگدانه و مواد سیمانی در مقاومت برشی RPC تاثیر گذار بوده و در مقادیر بهینه هر دو عامل، بیشینه مقاومت برشی حاصل می شود. مقدار بهینه سنگدانه برای مقاومت برشی در طرح اختلاط RPC که متشکل از ماسه سیلیسی و پودر سیلیس می باشد با توجه به نمودار شکل (۱۴) نزدیک به ۱۰۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب و مقدار بهینه مقدار خمیر مواد سیمانی که متشکل از سیمان، میکروسیلیس، آب و فوق روان کننده است نزدیک به ۱۲۵۰ کیلوگرم در هر متر مکعب می باشد.

ریز دانه بودن مصالح RPC باعث کاهش مقاومت برشی می گردد اما تقویت خمیر سیمان توسط میکروسیلیس و عمل آوری حرارتی این نقصان را تا حدودی جبران می کند و سبب بهبود

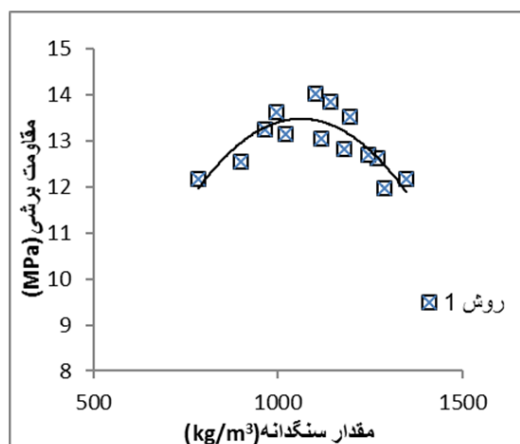
با مقایسه ی ضرایب همبستگی ملاحظه می گردد در ضریب همبستگی رابطه ی منحنی برآزش در بتن معمولی افزایش جزئی نسبت به ضریب همبستگی رابطه ی قبلی ایجاد گردید و لکن در مورد بتن پودری واکنش پذیر این افزایش چشمگیر می باشد. لذا با توجه به سادگی رابطه ی $V = a \cdot \sqrt{f'_c}$ ، استفاده از این رابطه را برای بتن معمولی پیشنهاد می گردد و در مورد بتن پودری واکنش پذیر رابطه ی (۱) پیشنهاد می گردد.

$$V = 0.26 (f'_c)^{0.18} \quad (1)$$

شایان ذکر است با افزایش تعداد آزمایشات و ورود متغیرهایی غیر از مقاومت فشاری در رابطه تعیین مقاومت برشی می توان روابط مناسب تری با ضریب همبستگی مطلوب تر پیشنهاد نمود. با توجه به اینکه تمامی مشخصات مکانیکی یک بتن به طرح اختلاط آن وابسته است. در نمودار شکل های (۱۳) و (۱۴) تاثیر طرح اختلاطها بر مقاومت برشی بررسی می گردد.



شکل ۱۳- رابطه مقاومت برشی و مقدار درشت دانه در بتن معمولی



شکل ۱۴- رابطه مقاومت برشی و مقدار ماسه و پودر سیلیس در بتن پودری واکنش پذیر

[9] Shoaib A., "Shear in Steel Fiber Reinforced Concrete Members without Stirrups", Canada, Edmonton, Alberta, 2012.

[10] Guenther C. L., "Evaluation of Shear and Diagonal Tension in Plain Concrete", Thesis, Department of Civil and Architectural Engineering, University of Wyoming, United States, 2007.

[۱۱] علیلو یاسر، افشین حسن، چوپانی نقدعلی، "بررسی خصوصیات برشی بتن خود تراکم"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، ۱۳۹۰.

[۱۲] نتایج آزمایشات شیمیایی و فیزکی سیمان صوفیان، مهرماه ۱۳۹۲، گزارشات آزمایشگاه سیمان کارخانجات سیمان صوفیان، soufiancement.ir

[۱۳] نتایج آزمایشات شیمیایی، مهرماه ۱۳۹۲، گزارش آزمایشگاه آنالیز شیمیایی شرکت صنایع فرو آلیاژ ایران

[14] BS 1881 : part 116, "Testing concrete. Method for determination of compressive strength of concrete cubes", British Standards, 1983.

[۱۵] مسعود کی نیا، "آنالیز و طراحی سازه‌های بتن آرمه"، انتشارات دانشگاه اصفهان، ۱۶۵-۱۵۷.

رفتار برشی آن نسبت به بتن معمولی می‌شود و لکن اختلاف چشمگیری در مقدار نسبت مقاومت برشی به مقاومت فشاری رخ نمی‌دهد.

۵- نتیجه گیری

۱- در بتن‌های معمولی با افزایش مقدار سنگدانه‌ها مقاومت برشی بتن افزایش می‌یابد ولی در بتن پودری واکنش پذیر برای مقدار سنگدانه‌ها مقدار بهینه‌ای وجود دارد که با افزایش مقدار سنگدانه‌ها از آن میزان مقاومت برشی کاهش می‌یابد.

۲- نتایج به دست آمده از روش ابداعی افشین-علیلو بسیار نزدیک به نتایج به دست آمده از روش JSCE G553 می‌باشد.

۳- رابطه پیشنهادی بین مقاومت برشی و مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسگال مطابق روابط زیر می‌باشد:

$$V = 1/0.5 \sqrt{f'_c} \quad (1) \quad \text{برای بتن معمولی:}$$

$$V = 0/26 (f'_c)^{0.18} \quad (2) \quad \text{برای بتن پودری واکنش پذیر:}$$

۶- مراجع

[1] Malik A. R. and Foster S. J., "Carbon Fiber-Reinforced Polymer Confined Reactive Powder Concrete Columns-Experimental Investigation," ACI Structural Journal, vol. 107, no. 3, pp. 263 – 271, 2010.

[2] Richard P. and Cheyrezy M., "Composition of reactive powder concretes", Cement and concrete research, vol. 25, pp. 1501-1511, 1995

[۳] راس.امگید، ترجمه دکتر غلامحسین فرهی، "مکانیک شکست"، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا ۱۳۸۷.

[4] Talbot A. N., "Tests of Concrete: I. Shear; II. Bond" University of Illinois, United States, 1906.

[5] J.A. Hofbeck, I.O. Ibrahim, A.H. Mattock, Shear transfer in reinforced concrete, Journal of the American Concrete Institute, vol 66 (2) 119–12, 1969 .

[6] Appa Rao G. and Rao A.S., "Toughness indices of fiber reinforced concrete subjected to mode II loading", Korea Concrete Institute, Seoul, ISBN, 2010

[7] JSCE-G 553-1999. Test method for shear strength of steel fiber reinforced concrete. Standard Specifications for Concrete Structures, Test Methods and Specifications, Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Tokyo, 2005.

[8] Mirsayah A. A. & Banthia N., "Shear strength of steel fiber-reinforced concrete". ACI Materials Journal, vol 99(5) 473-479, 2002.

Evaluation of Pure Shear Strength in Reactive Powder Concrete and its comparison with Normal Concrete

A. Toofani Milani*

M. Sc, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology

H. Afshin

Associate Professor of Structural Engineering, Sahand University of Technology

Y. Aliloo

P.h.D Candidate. Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology

H. Naseri

M. Sc, Faculty of Civil Engineering, Sahand University of Technology

Abstract

Reactive Powder Concrete (RPC) is one of the latest achievements in concrete technology. Development and application of this concrete depends on the knowledge on its specifications and characteristics. Shear strength is one of the most important specifications in design of RC structures. One of the effective methods to determine the shear strength of concrete is to estimate this strength using concrete's compressive strength. In this study, RPC and normal concretes with different mixture designs and using the existing materials in Iran were produced. Then their compressive and shear strengths evaluated. Two methods (JSCE G553, Afshin Aliloo's) were used to measure the shear strength. The result show that there are difference between reactive powder concrete shear properties and normal concrete. Also, shear strength that measured by either of two methods is close together. Using the results of the experiments, an equation is developed to estimate the shear strength of RPC using its compressive strength.

Keywords: Reactive Powder Concrete (RPC), Mechanical properties, shear strength, Compressive Strength.

* Corresponding Author: Aydin.Toofani@gmail.com