



فراوری مصالح ساختمانی آجر با خواص مکانیکی ویژه با استفاده از مواد بازیافتی

بهزاد مهدی خانی*

پژوهشکده مهندسی و فناوری، پژوهشگاه استاندارد، کرج، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۵
بازنگری: ۱۴۰۰/۰۴/۱۶
پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۴۰۰/۰۸/۰۷

کلمات کلیدی:

گچ بازیافت شده
ضایعات سرامیک بدنه قرمز
ضایعات چینی
مقاومت فشاری

خلاصه: هدف این مقاله مطالعه برخی ویژگی‌های مصالح ساختمانی ساخته شده با گچ (تجاری - CGP و بازیافت شده - RGP) و ضایعات (سرامیک قرمز - RC و چینی - PW) با استفاده از بارگذاری تحت فشار (فشار پرس) قبل از سخت شدن مواد است. آجرها با ترکیب جرم جامد ساخته می‌شوند که حاوی ۵۰٪ وزنی ماده چسبنده و ۵۰٪ وزنی مواد ضایعاتی و نسبتی از مقدار خیلی کمی آب / پودر خشک (۰/۲۲) است. بر اساس این یافته‌ها مواد ضایعاتی صنعتی مختلفی به صورت مخلوط مانند پلاستر گچی بازیافت شده، و همچنین مواد تهیه شده از ضایعات سرامیک قرمز (RC) و ضایعات چینی (PW) وجود دارند. در این تحقیق نمونه‌های مورد آزمایش قبل از زمان گیرش با استفاده از دستگاه پرس تک محوری (۱۰ kN) قالب‌گیری شدند. پس از عمل‌آوری و سخت شدن نمونه‌ها مقاومت فشاری و خمشی، تخلخل و ریزساختار نمونه‌ها بررسی شد. نتایج مقاومت فشاری در محدوده ۱۲ MPa تا ۳۵ MPa بود. نسبت آب / جرم جامد و نیروی اعمالی پرس تک محوری قبل از زمان گیرش در کاهش تخلخل نمونه‌ها تاثیر زیادی داشته و خواص مکانیکی آن‌ها افزایش پیدا کرد. نتایج به دست آمده نشان می‌دهند این افزایش مواد ضایعاتی مذکور سبب ایجاد مصالح ساختمانی آجر با کیفیت بهتر خواهد شد.

۱- مقدمه

که یکی با پلاستر گچی بازیافت شده و تجاری و دیگری نمونه‌های ساخته شده از ضایعات سرامیک قرمز (RC) و ضایعات چینی (PW) ساخته شده است [۷ و ۸].

پلاستر گچی (کلسیم سولفات نیمه سولفات) ماده‌ای است که در ساخت‌وساز شهری بسیار کاربرد دارد. این ماده از طریق کشته‌سازی^۴ سنگ گچ (هیدرات سولفات کلسیم) در دمای پایین و با استفاده از مواد چسبنده دیگر ساخته می‌شود. همچنین می‌توان پلاستر گچی را از بازیافت گچ طبیعی و یا گچ مصنوعی ساخت [۹].

در فرایند کشته‌سازی گچ در جریان دی‌هیدراته شدن، مواد آب خود را از دست می‌دهند تا نیمه هیدراته شوند. وقتی ماده نیمه هیدراته با آب تماس داشته باشد فرایند هیدراته (آب پوشی) و بلوری شدن رخ می‌دهد و مصالح سفت‌تر و مقاوم می‌شود [۱۰].

پلاستر گچی را می‌توان ماده‌ای سازگار با محیط زیست و مصرف انرژی کم برای تولید به شمار آورد. دمای کشته‌سازی برای پلاستر گچی در بازه

امروزه مصالح ساختمانی جدید با ترکیبات نوین در کشورهای دنیا ساخته می‌شوند. بسیاری از این مصالح بر پایه مواد معدنی برای تقویت سازه‌ها و اتصالات می‌باشد [۴-۱]. همچنین استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری نیز نقش مهمی در تولید مصالح ساختمانی جدید داشته است [۶ و ۵]. با توجه به محدودیت مصرف انرژی در کشورهای پیشرفته عمدتاً تولید مصالح ساختمانی به سمت استفاده از مواد بازیافتی می‌باشد. تولید مصالح ساختمانی مانند سیمان پرتلند^۱ و یا سرامیک‌ها و کاشی‌ها مصرف انرژی زیادی دارند و باعث آلودگی هوا می‌شوند. استفاده از ضایعات به عنوان مواد جایگزین برای مصالح ساختمانی می‌تواند به محصولاتی ارزان‌تر و مصرف انرژی تولید کمتر منجر شود. برخی از محققان در خصوص ساخت کامپوزیت‌هایی با استفاده از پلاستر گچی^۲ و مواد ضایعاتی مطالعاتی را انجام داده‌اند. بر اساس این یافته‌ها از دو ماده ضایعاتی صنعتی مختلف به صورت مخلوط استفاده شده

- 1 Cement Portland
- 2 Gypsum Plaster

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Beh_mehdikhani@yahoo.com



شوند را دارا بود [۵]. بررسی‌ها نشان می‌دهند که استفاده از ضایعات پلاستر گچ و ضایعات چینی به صورت قطعات مصالح ساختمانی (مانند آجر) مطالعه نشده است. بنابراین در این تحقیق قطعات مورد استفاده به عنوان مصالح ساختمانی ساخته شده از ضایعات پلاستر گچی تجاری (CGP)؛ پلاستر گچی بازیافت شده (RGP)؛ RC، PW که از طریق بارگذاری تحت فشار (پرس) تهیه می‌شوند مورد بررسی قرار خواهند گرفت. این مواد با استفاده از بارگذاری فشاری تک محوری قبل از گیرش اولیه ساخته شده و برخی ویژگی‌های آن‌ها مانند مقاومت فشاری و خمشی، تخلخل و ریز ساختار آن‌ها بررسی خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

در این تحقیق از پلاستر گچی تجاری (CGP)؛ پلاستر گچی بازیافت شده (RGP)؛ RC، PW و آب حاصل از سیستم تامین آب شهری استفاده شد.

RC استفاده شده در این تحقیق ترکیبی از ضایعات کاشی‌های سرامیکی بدنه قرمز است. از این ماده بدون هیچگونه تغییر و تحولی استفاده شد. PW از ضایعات کارخانجات چینی‌سازی تامین شد. این ماده خرد و آسیاب شد تا پودر نرمی به دست آمد سپس الک شده تا ۹۵٪ آن از الک ۴۵ μm عبور کند، در نهایت پودر همگن به دست آمد.

از CGP بدون هیچ تغییر و تحولی استفاده شد. RGP که توسط شرکت‌های ساخت‌وساز محلی تولید شده بود، جمع‌آوری و در معرض نور خورشید خشک شد تا رطوبت آن از بین برود و سپس توسط هاون و به صورت دستی خرد شد. پس از آن این ماده توسط آسیاب چکشی آسیاب شد و به صورت ذراتی با اندازه کمتر از ۳ میکرون درآمد. پودر حاصله در خشک کن و دمای ثابت (۱۵۰ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۱ ساعت کلسینه (کشته‌سازی) شد.

جدول ۱ ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های فیزیکی RGP، CGP و PW و RC را نشان می‌دهد. شکل ۱ و ۲ به ترتیب الگوهای توزیع اندازه ذره و پراش اشعه ایکس (XRD) این مواد را نشان می‌دهد.

دمایی ۱۲۵ تا ۱۸۰ درجه سانتی‌گراد است. در این دما بخار آب از بین می‌رود و دی اکسید کربن به خاطر گرمای کوره از ماده جدا می‌شود [۱۱]. در جریان تولید و استفاده از پلاستر گچی در ساخت‌وسازهای شهری مقدار بسیار زیادی ضایعات پلاستر گچی (GPW) تولید می‌شود. GPW ماده‌ای غیرفعال است که پتانسیل آلوده‌سازی آب‌های زیرزمینی را دارد. می‌توان تحت شرایط بی‌هوازی، سولفات موجود در محل دفن زباله که موجب بوی بد برای کارکنان و ساکنین اطراف این محله‌ها و همچنین موجب زنگ زدگی لوله‌ها می‌شود را به سولفید هیدروژن (H₂S) مبدل کرد [۱۵-۱۲].

می‌توان از GPW دوباره استفاده کرد یا آن را بازیافت نمود. زیرا در مقایسه با پلاستر گچی اصلی عملکرد یکسانی دارد [۱۷ و ۱۶]. برای کشته‌سازی GPW انرژی کمی مورد نیاز است. سوارز و همکاران^۲ نشان دادند انرژی مصرف شده برای فرایند بازیافت گچ ۶۵٪ کمتر از آن چیزی است که برای به دست آوردن گچ طبیعی استفاده می‌شود [۱۸]. کامارینی^۳ و همکارانش نشان دادند وقتی کشته‌سازی به شکلی مطلوب انجام می‌شود، مصرف انرژی برای بازیافت GPW (۴۴۷ kcal/ton) با تولید گچ طبیعی یکسان است (۴۳۹ kcal/ton) [۱۹-۲۳].

ضایعات چینی (PW) که در این مطالعه از آن استفاده شده از ضایعات کارخانجات چینی‌سازی تهیه شد. امروزه تقاضای زیادی برای چینی‌ها وجود دارد و به همین دلیل ضایعات بسیار زیادی از آن در دسترس است. PW یک ماده چگال و سخت است و دفن نهایی و صحیح آن موضوعی مهم برای صنایع تولیدی محسوب می‌شود [۲۶-۲۴]. استفاده از ضایعات به عنوان مواد اولیه به توسعه پایدار کمک کرده و مصرف منابع طبیعی را کاهش می‌دهد. قبلاً از RC و RW برای تولید مصالح ساختمانی استفاده می‌شد [۳۰-۲۷]. مطالعات نشان می‌دهند، RC به عنوان پوزولان^۴ به صورت افزودنی به سیمان پورتلند اضافه شده و در ماده چسبنده قلیایی فعال شده با سنگ دانه‌های ریز و درشت در بتن استفاده می‌شود [۳۲ و ۳۱].

سن آنتونیو گونزالز^۵ و همکارانش شرح دادند که امکان تولید کامپوزیت‌های پلاستر گچی به صورت ترکیب با RC وجود دارد. این محققان برای پوشش داخلی دیوارها به موادی دست یافتند که ویژگی‌های مطلوبی داشت (قدرت مکانیکی، سختی و ظرفیت جذب آب) که حداقل الزامات تعیین شده از سوی استانداردهایی که باید در ساختمان‌سازی رعایت

- 1 Gypsum plaster waste
- 2 Suarez et al.
- 3 Camarini
- 4 Pozzolan
- 5 San-Antonio- Gonzalez

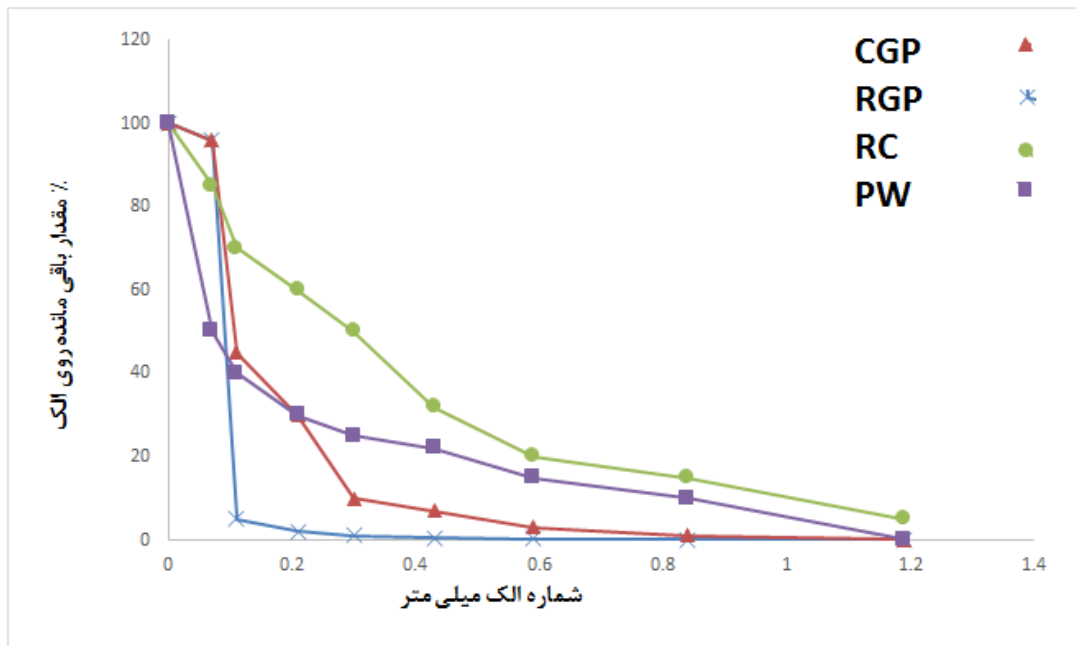
- 6 Commercial gypsum Plaster
- 7 Recycled gypsum plaster
- 8 Commercial gypsum Plaster
- 9 Recycled gypsum plaster

جدول ۱. ترکیب شیمیایی مواد بازیافتی مورد استفاده در این تحقیق

Table 1. Chemical composition of recycled materials used in this research

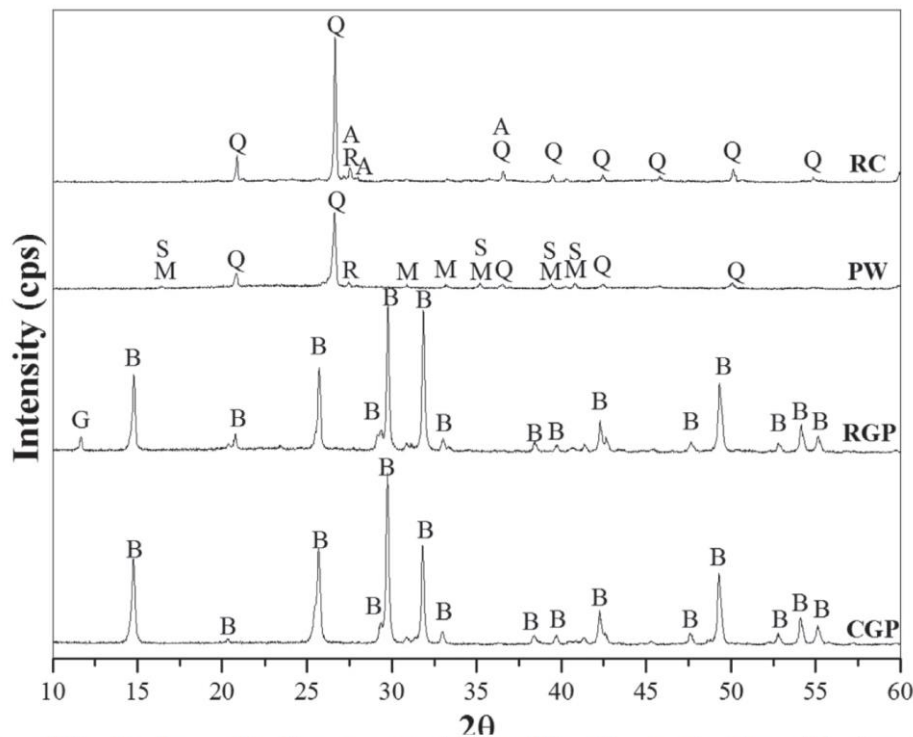
| PW | RC | RGP | CGP | ترکیب % |
|-------|-------|-------|-------|--------------------------------|
| ۷۱/۷۱ | ۶۳/۵۰ | ۰/۱۵ | ۰/۱۵ | SiO ₂ |
| ۱۳/۶۲ | ۱۲/۰۶ | ۰/۰۵ | ۰/۰۸ | Al ₂ O ₃ |
| ۵/۴۷ | ۶/۲۱ | ۰/۰۴ | ۰/۰۵ | K ₂ O |
| ۲/۰۶ | ۱۰/۹۴ | ۰/۰۲ | ۰/۰۵ | Fe ₂ O ₃ |
| ۰/۵۷ | ۱/۴۹ | - | - | TiO ₂ |
| ۰/۲۴ | ۱/۵۵ | ۰/۰۶ | ۰/۰۲ | MgO |
| ۰/۸۱ | ۰/۸۹ | ۰/۷۴ | ۰/۷۱ | P ₂ O ₅ |
| ۱/۵۹ | ۱/۱۸ | ۲۷/۰۸ | ۲۷/۰۴ | CaO |
| ۰/۴۶ | - | ۰/۸ | ۰/۵۴ | Na ₂ O |
| - | - | ۶۲/۷۹ | ۶۰/۷۹ | SO ₃ |
| ۳/۰ | ۱/۶۶ | ۸/۳۳ | ۱۰/۳۳ | LOI |

=CGP = پلاستر گچی تجاری، =RGP = پلاستر گچی بازیافتی، =RC = ضایعات سرامیک قرمز، =PW = ضایعات چینی.



شکل ۱. نمودار توزیع اندازه ذرات نمونه‌های آسیاب شده.

Fig. 1. Particle size distribution diagram of milled samples



A = albite; B = bassanite; G = gypsum; M = mullite; Q = quartz; R = rutile; S = sillimanite

شکل ۲. الگوهای XRD مربوط به RC، RGP، CGP و PW.

Fig. 2. XRD patterns for CGP, RGP, RC and PW.

با نمونه تجاری شباهت داشتند، البته تغییراتی در برخی مختصات فیزیکی ماده بازیافت شده وجود داشت. جرم حجمی CGP بیشتر از ۲ برابر RGP بود.

XRD مربوط به RC سه فاز مختلف را نشان می‌دهد. RC دارای فازهای کریستالی کوارتز (PDF# 01-085-0457 46-1045)، آلبیت (PDF# 01-071-1151 10-393) و روتایل^۵ (PDF# 16-934) است.

PW دارای فازهای کوارتز (PDF# 01-085-0457 46-1045)، سیلیمانیت (PDF# 01-074-0274 38-471) و مولیت^۶ (PDF# 01-073-1389 15-776) بود. CPG فاز باسانیت^۷ (PDF# 01-083-0439-41-224) و RGP فاز باسانیت را داشت و تکه کوچکی از گچ (PDF# 01-086-0944 36-432) در

این ترکیب شیمیایی با استفاده از فلورسانس اشعه ایکس (XRF) مدل Shimadzu XRF 1800 (آزمایشگاه بنیاد علوم کاربردی رازی) به دست آمد. با استفاده از طیف‌سنج اشعه ایکس انتشار طول موج^۲ تحلیل انجام شد. الگوهای XRD در دستگاه فیلیپس اشعه ایکس مدل X'Pert-۳ (MPD پژوهشگاه مواد و انرژی کرج) با پرتو Cu-K α (1/54060) (A^۴، ۴۰ kV، ۴۰ mA و در بازه ۲θ از ۱۰-۶۰° جمع‌آوری شد. از پایگاه داده ساختار بلوری معدنی (ICSD)^۳ برای تشخیص فازهای بلوری استفاده شد. الگوی پراش اشعه ایکس XRD نمونه‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است.

ترکیب شیمیایی CGP و RGP اختلافات معناداری را نشان ندادند و ترکیبات اصلی آن‌ها SO₃ و CaO بود. SiO₂ و Al₂O₃ ترکیبات اصلی ضایعات بودند. پس از فرایند بازیافت ویژگی‌های شیمیایی پلاسترهای گچی

5 Quartz; Albite; Rutile.
6 Sillimanite; Mullite.
7 Bassanite

1 X-ray Fluorescence
2 Wavelength dispersive X-ray spectrometer
3 Philips Analytical X-ray
4 Inorganic Crystal Structure Database

جدول ۲. ترکیب اختلاط نمونه‌ها

Table 2. Sample mixing composition

| نمونه | %CGP | %RGP | RC | PW | نسبت آب به جرم جامد | حداکثر بار فشار اعمالی |
|--------|------|------|----|----|---------------------|------------------------|
| CGP | ۱۰۰ | - | - | - | ۰/۲۲ | ۱۰۰۰ |
| RGP | ۱۰۰ | - | - | - | - | ۱۰۰۰ |
| CGP+RC | ۵۰ | - | ۵۰ | - | - | ۱۰۰۰ |
| CGP+PW | ۵۰ | - | - | ۵۰ | - | ۱۰۰۰ |
| RGP+RC | - | ۵۰ | ۵۰ | - | - | ۱۰۰۰ |
| RGP+PW | - | ۵۰ | - | ۵۰ | - | ۱۰۰۰ |

CGP = پلاستر گچی تجاری؛ RGP = پلاستر گچی بازیافتی؛ RC = ضایعات سرامیک قرمز؛ PW = ضایعات مفره چینی
 W/SM = آب / نسبت جرم جامد.

11/5 ° 20 مشاهده شد.

جدول ۲ طرح نمونه‌های مخلوط که تحت فشار پرس پیش از زمان گیرش تشکیل شده‌اند را نشان می‌دهد.

هدف از این کار استفاده از کمترین نسبتی بود که بتواند کاملاً پلاستر گچی را هیدراته کند و کاربردپذیری لازم برای قالب‌گیری نمونه‌ها را ارائه نماید. جدول ۲ ترکیبات مخلوط و هویت نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

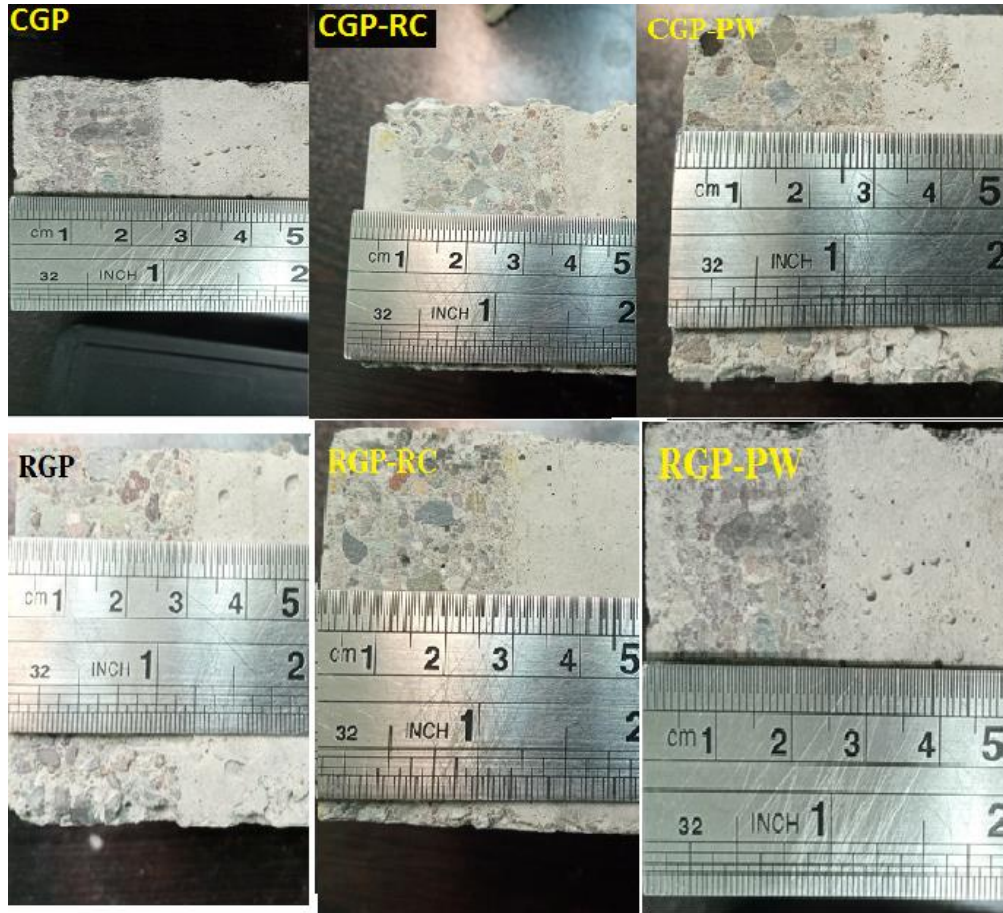
فرایند تهیه نمونه‌ها از پنج مرحله تشکیل شده است: (۱) پودرهای خشک (گچ + ضایعات) مخلوط و یکدست شدند؛ (۲) بخشی از آب که باید با مخلوط ترکیب می‌شد بر روی اسفنج ریخته شد و در انتهای قالب قرار داده شد؛ (۳) مخلوط خشک و یکدست شده اضافه شد و نمونه‌ها با استفاده از فشار پرس قالب‌گیری شدند تا به حداکثر بار مشخص یعنی ۱۰ kN برسند؛ (۴) نمونه‌ها تا زمان آزمایش در شرایط محیطی قالب برداری و خشک شدند (شرایط محیطی دارای میانگین دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد و رطوبت ۶۰٪). فشار پرس با استفاده از دستگاه پرس هیدرولیک TONITECH با ظرفیت ۱۰۰ kN انجام شد. در این روش از قالب‌های مخصوص فولادی به ابعاد ۲۰×۵×۵ سانتی‌متر استفاده شد.

۲-۱- تهیه مخلوط‌ها

در ابتدا نسبت‌های مختلف ماده چسبنده و ضایعات بررسی شد. بهترین مخلوط تجربی با انجام برخی آزمایش‌ها به دست آمد. آزمایش نخست شامل ۷۵٪ وزنی ماده چسبنده و ۲۵٪ وزنی ضایعات (جرم جامد) بود. این مخلوط مقاومت فشاری بالایی داشت اما کاربردپذیری آن پایین بود (خمیرها روی دستگاه قالب‌گیری چسبیدند) و پس از خشک شدن نمونه‌ها ترک برداشتند. برای بهبود کاربردپذیری و از بین بردن ترک‌ها آزمایش دوم با استفاده از ۵۰٪ وزنی ماده چسبنده و ۵۰٪ وزنی ضایعات (جرم جامد) انجام شد. این مخلوط حاوی همان مقدار ماده چسبنده و ضایعات از لحاظ درصد جرم کاربردپذیری بهتری داشت و نمونه نیز ترک نخورد. در آزمایش سوم ۲۵٪ وزنی ماده چسبنده و ۷۵٪ وزنی ضایعات (جرم جامد) استفاده شد. مقاومت فشاری این مخلوط بسیار پایین بود و نمونه‌ها با دست به راحتی شکسته می‌شدند. مخلوط‌های آزمایش اول و سوم تخلیه شده و کار با نسبتی از مخلوط آزمایش دوم ادامه یافت که شامل ۵۰ درصد وزنی ماده چسبنده و ۵۰ درصد وزنی ضایعات بود که در آن جرم جامد نیز در نظر گرفته شد. نمونه‌ها با نسبت حجمی آب/جامد ۰/۲۲ قالب‌گیری شدند، این مقدار به حداقل مورد نیاز برای هیدراته پلاستر گچی نزدیک بود که حدوداً ۱۷ درصد وزنی است. نسبت آب/جرم جامد نیز بعد از برخی آزمایش‌ها با نسبت‌های مختلف مشخص شد.

۲-۲- روش‌ها

برای درک اینکه چگونه افزودن ضایعات می‌تواند بر تنظیمات ماده چسبنده تاثیر می‌گذارد، زمان گیرش ابتدایی و انتهای مخلوط‌ها با استفاده از دستگاه ویکات^۱ طبق استاندارد ملی ایران شماره ۳۹۲ تعیین شد. این تنظیمات به نسبت مخلوط پودر و آب ارتباط داشت. آزمایش با نسبت آب/جرم جامد ۰/۶ انجام شد (برای دستیابی به کاربردپذیری جهت قالب‌گیری نمونه لازم است). برای این آزمایش نمونه‌ها به صورت دستی آماده شدند



شکل ۳. نمونه‌های آماده‌سازی شده برای آزمون‌های استحکام خمشی و فشاری

Fig. 3. Samples prepared for flexural and compressive strength tests

آب ارزیابی شد. نمونه‌های ۲۸ روزه در آون (با دمای ۴۰ درجه سانتی‌گراد) در زمان ۱۲۰ دقیقه خشک شدند و پس از خنک شدن در دمای اتاق وزن نمونه خشک شده به دست آمد (D_m). پس از آن نمونه‌ها در آب (در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد) به مدت ۳ ساعت در محفظه‌ای با پمپ خلاء قرار داده شد تا هوای محبوس در آن تخلیه شود و فرایند سرعت گیرد. زیرا پلاستر گچی نمی‌تواند برای مدت طولانی در آب دوام بیاورد. جرم اشباع شده^۲ نمونه‌هایی که در آب قرار داده شده بودند (S_p) با استفاده از مقیاس هیدروستاتیک به دست آمد. سپس نمونه‌ها از آب خارج و سطح آن‌ها یا دستمال خشک و سپس وزن شدند که جرم اشباع شده (S_m) به دست آمد. جذب آب (W_a) و دفع آب (V_o) به ترتیب با استفاده از معادله ۱ و ۲ محاسبه شد.

$$W_a = 100 (S_m - D_m) / D_m \quad (1)$$

2 Saturated mass

(بدون هیچ فشار بارگذاری).

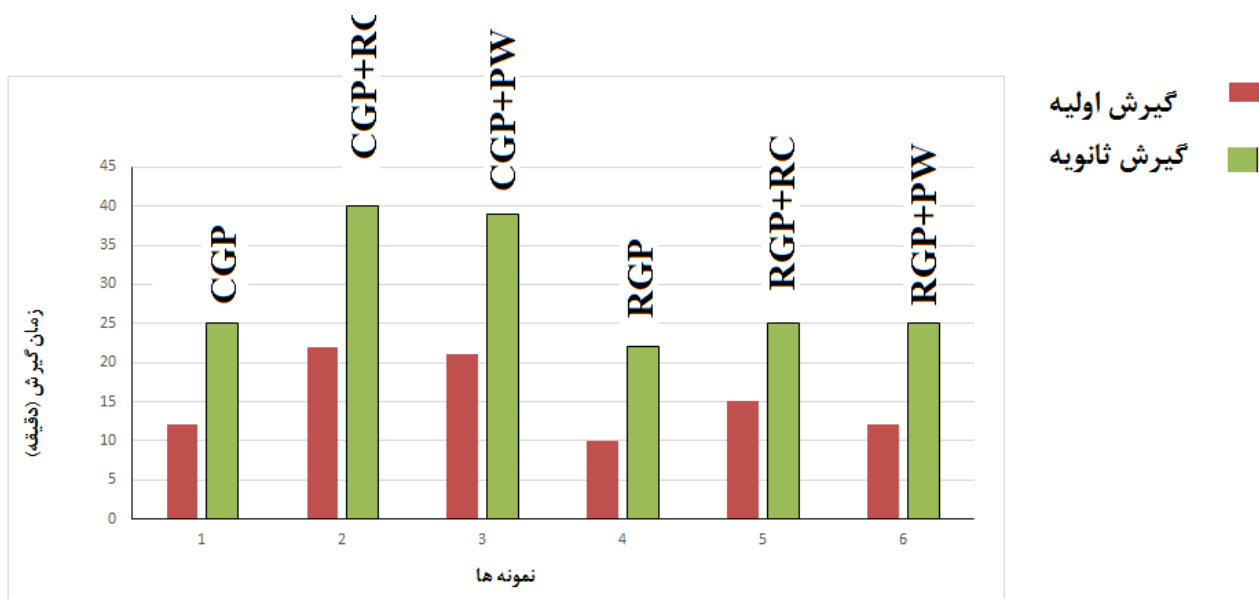
۲-۳- مقاومت فشاری و خمشی

آزمون مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌های آماده شده در مدت زمان ۷، ۲۸ روز اجرا شد. استحکام فشاری در هر دو لبه نمونه (دو نتیجه برای هر آجر) با تقسیم حداکثر بار بر محدوده بار استفاده شده ارزیابی شد. روش انجام آزمون استحکام خمشی و فشاری طبق استاندارد رد ASTM C 78-02 انجام شد. بنابراین مقاومت خمشی با استفاده از تست خمش سه نقطه‌ای^۱ به دست آمد. شکل ۳ تصاویر نمونه‌های آماده‌سازی شده برای آزمون‌های استحکام خمشی و فشاری را نشان می‌دهد.

۲-۴- آزمون جذب آب

تاثیر فشار بارگذاری و افزودن ضایعات به فضاهای خالی و جذب و دفع

1 Three-point-bending test



شکل ۴. نتایج زمان گیرش مخلوط آب و گچ با نسبت آب/ پلاستر گچی = ۰/۶ و بدون فشار

Fig. 4. Results of setting time of water and gypsum mixture with water / gypsum plaster ratio = 0.6 and without pressure

۳- نتایج و بحث‌ها

۳-۱- زمان گیرش

در شکل ۴ نتایج زمان گیرش مخلوط‌های گچی نشان داده شده است. می‌توان از این نتایج متوجه شد که RC و PW باعث تاخیر زمان گیرش شدند. این نتایج با نتایج به دست آمده توسط خلیل و همکارانش^۲ مطابقت دارد. زمان گیرش طولانی‌تر در نمونه‌هایی با RC یا PW رخ می‌دهد زیرا این مخلوط‌ها مقدار کمی ماده چسبنده دارند تا بتواند با آب واکنش دهند و در نتیجه پیشرفت واکنش کندتر می‌شود. به همین دلیل افزایش کلی زمان گیرش محاسبه شد و نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است.

داده‌های جدول ۳ نشان می‌دهند تاثیر افزودن ضایعات بر گیرش CGP بیشتر از RGP است. در هر دو نوع گچ RC زمان گیرش را با نرخ بالاتری از PW افزایش می‌دهد. در همه مخلوط‌ها حساسیت این تاثیر نسبت به زمان گیرش اولیه بیشتر از زمان گیرش نهایی بود. زمان گیرش نهایی مخلوط‌هایی با پلاستر گچی بازیافتی و ضایعاتی (RGP + RC و RGP + PW) با زمان گیرش نهایی مخلوط‌هایی که فقط با پلاستر گچی بازیافت شده

$$V_o = 100 (S_m - D_m) / (S_m - S_b) \quad (2)$$

که در آن W_a = جذب آب کل (%)، V_o = دفع آب (%)، D_m = جرم نمونه خشک شده در آن (kg)، S_b = جرم اشباع شده نمونه درون آب (kg) و S_m = جرم اشباع شده نمونه (kg). این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌های مکعبی $5 \times 5 \times 20$ سانتی‌متر انجام شد. نتیجه عبارت است از میانگین سه نمونه از هر ترکیب. این نمونه‌ها با تاثیر فشار بارگذاری تک محوری روی ویژگی‌های تخلخل مقایسه شد.

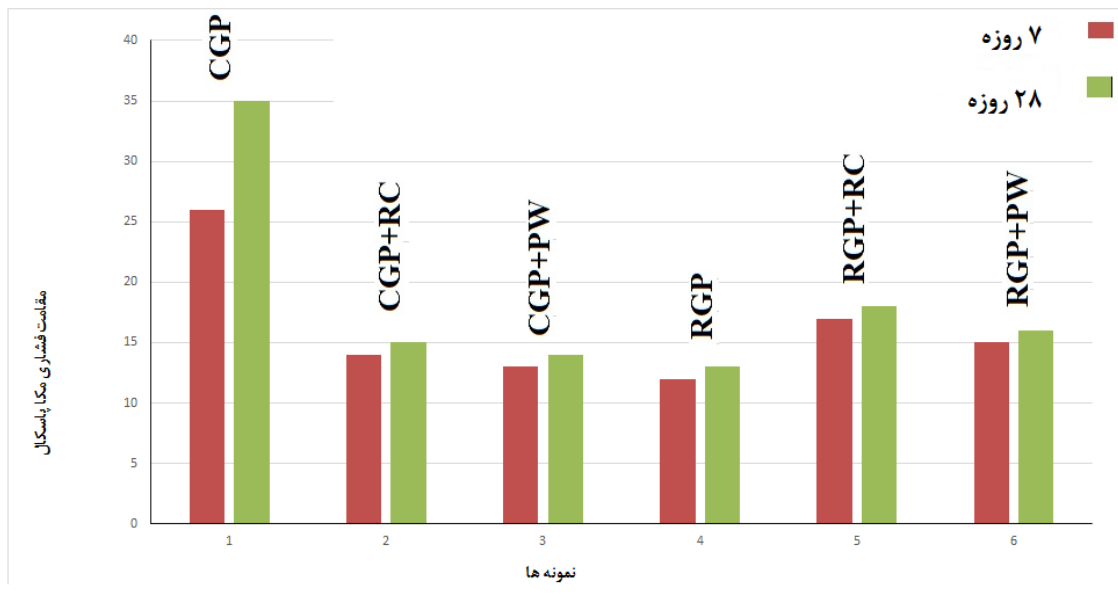
تصاویر با استفاده از میکروسکوپ الکترون روبشی (SEM) مدل زاپس به دست آمد. نمونه‌ها در عرض ۷ روز تحلیل شد و قبل از مشاهدات SEM با طلا پوشش داده شد. نمونه تولید شده در این روش قراردادی (بدون هیچ فشاری) حاوری نسبت آب/ پلاستر گچی = ۰/۶ بود. این نمونه برای مشاهده تفاوت‌های ریزساختاری بین نمونه‌هایی با فشار بارگذاری تک محوری و بدون آن تهیه شد.

جدول ۳. نتایج افزایش زمان گیرش نمونه ها با افزودن ضایعات در مقایسه با نمونه های پلاستر گچی مربوطه (CGP یا RGP)

Table 2. Results of increasing the setting time of samples by adding waste compared to the corresponding gypsum plaster samples (CGP or RGP)

| افزایش زمان گیرش % | | مخلوط |
|--------------------|-------|--------|
| ثانویه | اولیه | |
| ۶۰ | ۹۲ | CGP+RC |
| ۵۲ | ۶۷ | CGP+PW |
| ۹ | ۵۵ | RGP+RC |
| ۶ | ۲۳ | RGP+PW |

CGP=پلاستر گچی تجاری؛ RGP= پلاستر گچی باز یافتی؛ RC= ضایعات سرامیک قرمز؛ PW= ضایعات چینی.



شکل ۵. نتایج مقاومت فشاری.

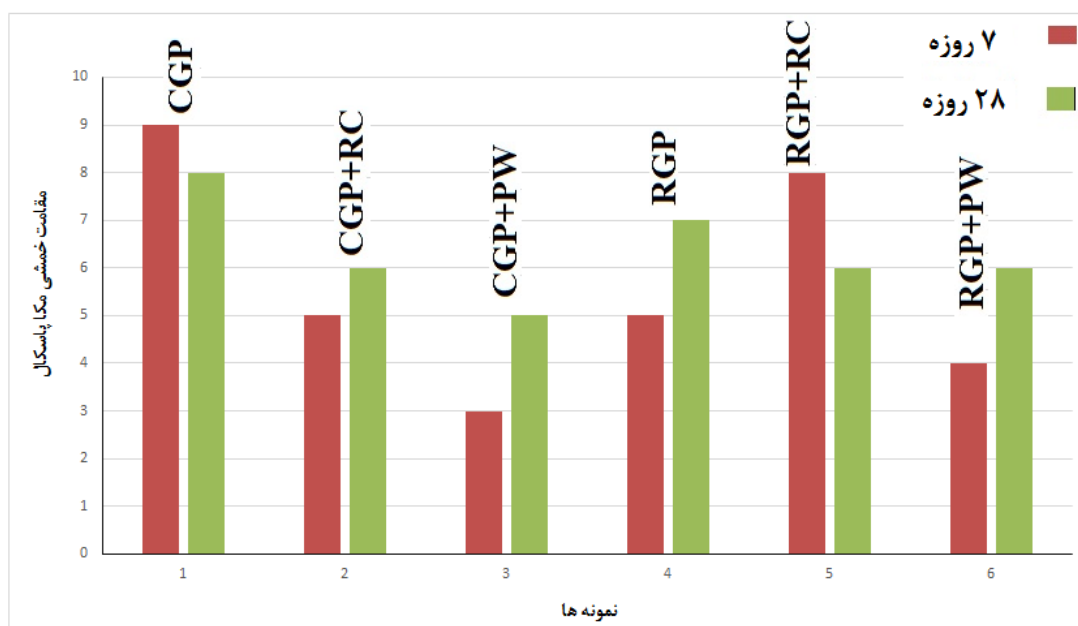
Fig. 5. Compressive strength results.

که به روش قراردادی تولید می‌شوند در زمان تولید به آب بیشتری نیاز دارند تا کاربردپذیر باشند که نتیجه آن زمان گیرش طولانی‌تر خواهد بود.

۳-۲- ویژگی‌ها مکانیکی

شکل ۵ نتایج مقاومت فشاری را نشان می‌دهد. CGP بالاترین نتایج را از نظر مقاومت فشاری و خمشی در همه زمان‌ها داشت. مختصات مکانیکی CGP از RGP بالاتر بود که باردلا و کامارینی نیز آن را در خمیرهای

(RGP) ساخته شده بود، بسیار نزدیک بود. در این مورد افزودن ضایعات فقط ۹٪ زمان گیرش را افزایش داد. همانطور که انتظار می‌رفت پلاستر گچی باز یافتی سریع‌تر از نوع تجاری آن آماده می‌شود. زمان گیرش پارامتری مهم برای صنایع مصالح ساختمانی است. گیرش سریع، مطلوب این صنایع است زیرا مقاومت بالاتر در مدت زمان کمتر را ممکن می‌سازد که معنای آن افزایش بهره‌وری خواهد بود. نسبت پایین آب/جرم جامد که در عناصری استفاده می‌شود که توسط فشار بارگذاری تک محوری قالب‌گیری شده‌اند به گیرش سریع‌تر پلاستر گچی کمک می‌کند. مصالح ساختمانی پلاستر گچی



شکل ۶. نتایج مقاومت خمشی

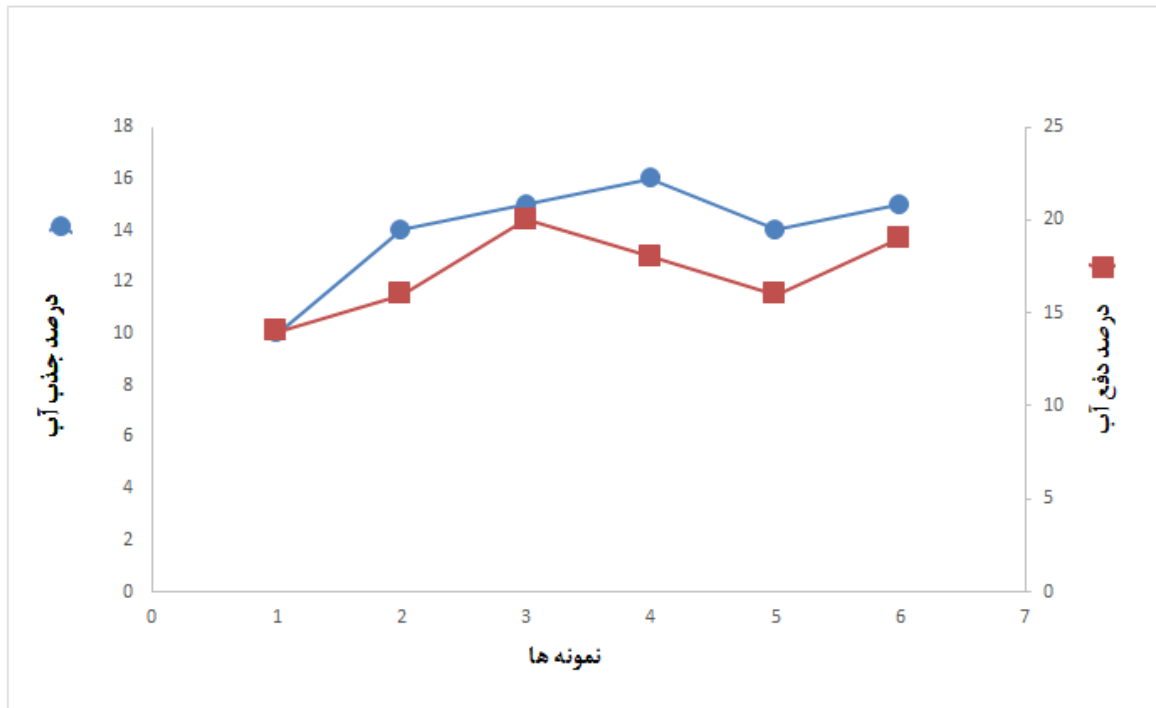
Fig. 6. Results of flexural strength

RC و PW به مخلوط‌های ساخته شده با RGP بر عملکرد مکانیکی آن‌ها تاثیری ندارد (حروف بزرگ در ستون‌ها). افزودن ضایعات سبب کاهش مقاومت خمشی نمونه‌های CGP شد. در مدت ۲۸ روز مقاومت CGP + PW و CGP + RC هنگام مقایسه با CGP به ترتیب ۲۷/۳ درصد وزنی و ۳۹/۲ درصد وزنی کاهش یافت که ایرز و همکاران و سن- آنتونیو- گونزالز و همکاران آن را تایید کردند [۵]. شکل ۶ نتایج مقاومت خمشی نمونه‌ها در ۷ و ۲۸ روز را نشان می‌دهد. نتایج مقاومت خمشی و فشاری به دست آمده از نمونه‌ها نشان می‌دهند فشار پرس استفاده شده قبل از گیرش اولیه برای ایجاد ویژگی‌های مکانیکی بالاتر، مطلوب بود. این مورد به دلیل کاهش تخلخل‌های نمونه خام می‌باشد. گاموح و همکاران^۳ نیز همین مشاهده را داشتند که مقاومت خمشی حدوداً دو برابر از نمونه‌های پلاستر گچی بدون فشار پرس بود. ژو و همکاران^۴ [۳۴] بلوک‌های گچی به دست آمده با این ترکیب با سختی ۱/۴۷ GPa را به دست آوردند که با استفاده از فشار پرس ساخته شده بود.

قالب‌گیری شده بدون هیچ گونه فشار بارگذاری مشاهده کردند. افزودن ضایعات مقاومت فشاری نمونه‌های CGP را کاهش می‌دهد [۱۷]. در زمان ۲۸ روز مقاومت فشاری CGP+RC و CGP + PW در مقایسه با CGP به ترتیب ۵۲/۲٪ و ۵۸/۳٪ کاهش داشتند. نتایج به دست آمده با نتایج ایرز^۱ و همکاران و سن- آنتونیو- گونزالز^۲ و همکاران مطابقت داشت که گزارش کردند مقاومت ترکیب پلاستر گچی با افزودن ضایعات کاهش می‌یابد [۵]. نتایج نشان دادند افزودن ضایعات به RGP سبب تغییر محسوسی در مقاومت فشاری نمی‌شود. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بین ۱۲ MPa و ۳۵ MPa بود. نتایج مقاومت فشاری RGP+RC در ۲۸ روز کمی بالاتر از نتایجی بود که سن- آنتونیو- گونزالز و همکارانش [۵] از کامپوزیت‌های گچی حاوی RC به دست آوردند و بالاتر از پلاستر گچی تجاری نیز بود (CGP). نتایج آماری بین گروه‌های آزمایش شده تایید کرد افزودن ضایعات باعث کاهش مقاومت فشاری نمونه‌هایی می‌شوند که با CGP ساخته شده‌اند. اگرچه، افزودن

3 Gmouh et al.
4 Zhou et al.

1 Eires
2 San-Antonio- Gonzalez



شکل ۷. نمودار درصد جذب آب کل و دفع آب نمونه ها در ۲۸ روز

Fig. 7. Graph of the percentage of total water absorption and water excretion of samples in 28 days

بخار می‌شود و منافذ را ترک می‌کنند که به کاهش ویژگی‌های مکانیکی منتهی می‌شود [۳۵]. فشار بارگذاری تک محوری که قبل از گیرش اولیه استفاده می‌شود امکان استفاده از نسبت پایین آب/پلاستر گچی را می‌دهد و به کاهش تخلخل منجر می‌شود [۳۶]. در نتیجه مقاومت‌های نهایی در این اجزای پلاسترهای گچی بیشتر از پلاسترهایی است که به روش قراردادی به دست آمده اند [۳۷ و ۳۸].

شکل ۸ تصاویر SEM از CGP قراردادی و نمونه‌های بدون فشار بارگذاری CGP + RC، CGP + PW، CGP + RGP، و RGP + PW را نشان می‌دهد.

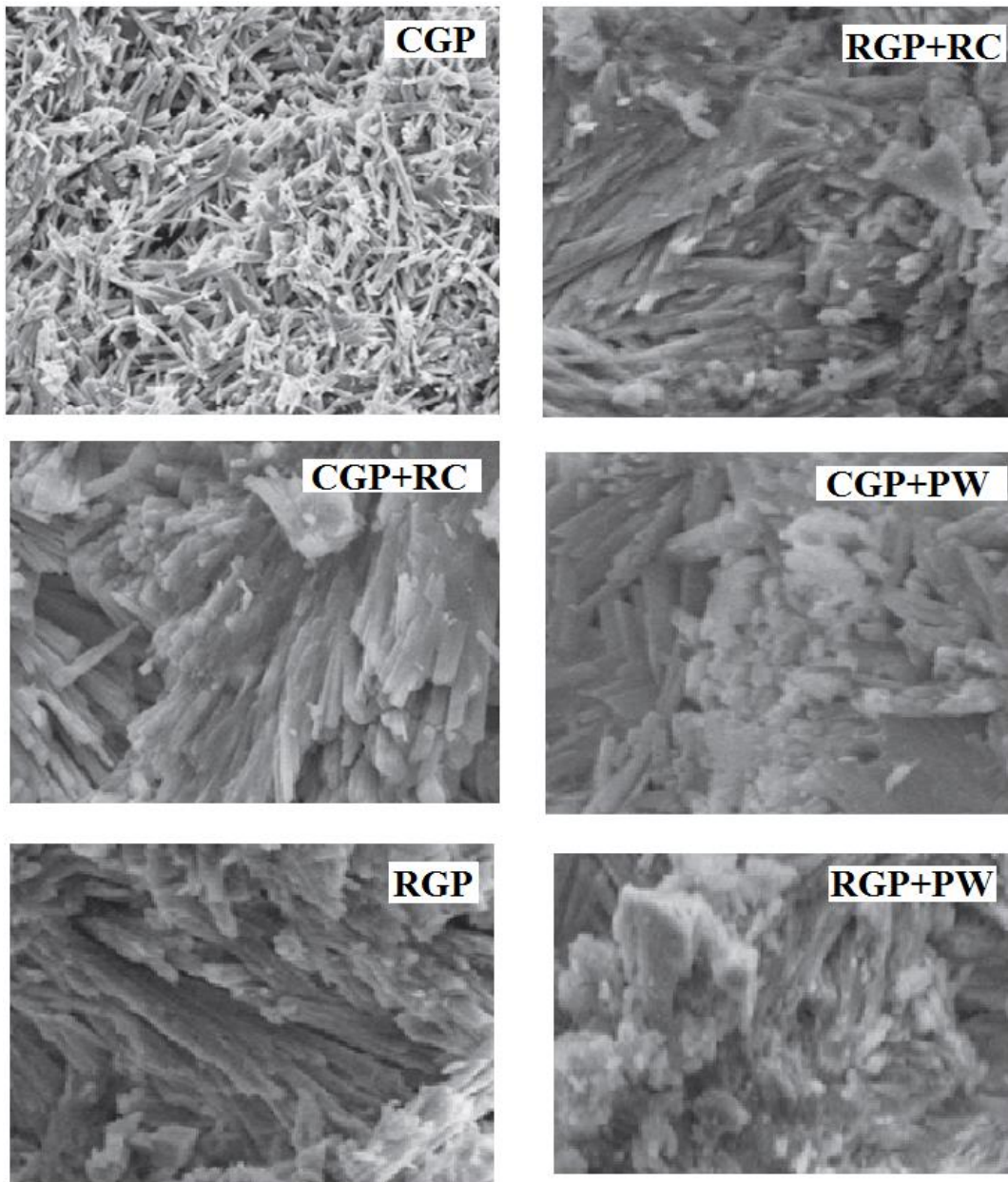
SEM تصاویر نمونه CGP را نشان می‌دهد پس از فرایند هیدراته شدن بلورهای سوزنی شکل تشکیل می‌شود. RGP در مقایسه با CGP ریزساختار فشرده‌تر و متراکمی را نشان دادند. بلورهای گچی هیدراته شده به هم پیوسته‌تر بودند، یعنی ریزساختارهای فشرده و متراکمی دارند. تصویر CGP + RC و CGP + PW و RGP + PW بلورهای گچی را نشان می‌دهند که درون یکدیگر قفل شده‌اند. در این تصاویر همچنین

۳-۳- جذب آب کل و دفع آن

شکل ۷ نتایج حاصل از جذب و دفع کل آب را در زمان ۲۸ روز نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت نتایج نشان دادند نمونه‌های CGP که توسط فشار پرس قالب‌گیری شده بودند قبل از گیرش اولیه جذب و دفع آب پایین‌تری در مقایسه با CGP داشتند که بدون هیچ گونه فشار پرسی ساخته شده بودند.

افزایش نسبت آب/پلاستر گچی به تخلخل بیشتر منجر می‌شود. بنابراین تخلخل کمتر CGP که با استفاده از فشار بارگذاری ساخته شده است در مقایسه با CGP قراردادی بخاطر نسبت کمتر آب/پلاستر گچی است. جذب آب CGP + RC ۵۰٪ بیشتر از CGP است که نشان می‌دهد اضافه شدن RC به افزایش تخلخل منجر می‌شود. سن-آنتونیو-گونزالز مشاهده کرد که استفاده از RC در کامپوزیت‌های پلاستر گچی سبب کاهش جذب آب مویینه^۱ کامپوزیت می‌شود (تا ۲۳٪). مقدار آب کمی برای هیدراته گچ لازم است و آب اضافی معمولاً برای رسیدن به کاربردپذیری مطلوب لازم می‌شود. در مصالح سخت شده این آب اضافی

1 Capillary water



شکل ۸. تصاویر SEM. بزرگنمایی تصاویر ۲ میکرون می‌باشد.

Fig. 8. SEM images. Image magnification is 2 microns.

قبل از گیرش اولیه استفاده شد این بلورها فشرده شدند و آرایش آنها بر ویژگی‌های مکانیکی تاثیر می‌گذارد. با استفاده از فشار بلورهای گچی به خوبی با یکدیگر همبند می‌شوند و بلورهای‌های درهم تنیده شکل می‌گیرد که امکان ایجاد ریزساختار فشرده را می‌دهد و از ویژگی‌های مکانیکی نیز بهره‌مند خواهد بود.

ذرات RC یا PW پراکنده در ماتریس گچی مشاهده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند فشار بارگذاری تک محوری بر ریزساختارهای پلاستر گچی تاثیر می‌گذارد. ویژگی‌های ریز ساختاری پلاستر گچی باز یافتی با نوع تجاری آن یکسان است. بلورهای سوزنی شکل که به خوبی مشخص هستند مشخصه ریزساختار پلاستر گچی معمولی است. بخاطر فشار بارگذاری تک محوری که

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به بررسی مخلوط‌های گچی (تجاری و بازیافتی) با استفاده از ضایعات صنعتی (سرامیک قرمز RC و ضایعات چینی PW) برای تولید اجزای ساختمانی پرداخته شد. مخلوط‌ها با ۵۰٪ وزنی ماده چسبنده و ۵۰٪ وزنی ضایعات با نسبت آب/جرم جامد ۰/۲۲ در نظر گرفته شد. قبل از گیرش از فشار بارگذاری تک محوری برای قالب‌گیری اجزا استفاده شد. مخلوط‌های فشرده شده در مقایسه با گچ قراردادی از عملکرد مکانیکی مطلوب و تخلخل کمتری برخوردار بودند. تحلیل ریزساختار همبندی بالای بلورهای گچی را نشان داد. افزودن ضایعات به طولانی‌تر شدن زمان گیرش منجر شد. در نمونه‌های تولید شده با پلاستر گچی تجاری افزودن ضایعات به مقاومت فشاری کمتری منجر شد، اگر چه وقتی از پلاستر گچی بازیافتی استفاده شد نمونه‌های مرجع نتایج مشابه با نمونه‌های ساخته شده از ضایعات را نشان دادند. مقاومت فشاری ۲۸ روزه بین ۱۲ MPa و ۳۵ MPa بود که چشم‌اندازی مطلوب را نسبت به بازیافت مواد ضایعاتی ارائه می‌کند. نتایج نشان می‌دهند تولید ماده سازگار با محیط زیست با عملکرد مکانیکی مطلوب که در آن‌ها از پلاستر گچی بازیافتی و ضایعات استفاده شده است از لحاظ فنی ممکن است. تولید اجزای ساختمانی مبتنی بر گچ که برای ساخت آن‌ها قبل از گیرش اولیه از فشار بارگذاری تک محوری قالب‌گیری استفاده شده است می‌تواند گزینه‌ای سازگار با محیط زیست برای مقادیر زیادی از ضایعات پلاستر گچی، RC و PW باشد.

منابع

- Structural and Construction Engineering, 5(Special Issue 3) (2018) 92-107
- [5] M. Bagheri, A. Chahkandi, H. Jahangir, Seismic reliability analysis of RC frames rehabilitated by glass fiber-reinforced polymers, *International Journal of Civil Engineering*, 17(11) (2019) 1785-1797.
- [6] H. Jahangir, D.R. Eidgahee, A new and robust hybrid artificial bee colony algorithm-ANN model for FRP-concrete bond strength evaluation, *Composite Structures*, 257 (2021) 113160.
- [7] R.H. Geraldo, S.M. Pinheiro, J.S. Silva, H.M. Andrade, J. Dweck, J.P. Gonçalves, G. Camarini, Gypsum plaster waste recycling: A potential environmental and industrial solution, *Journal of Cleaner Production*, 164 (2017) 288-300.
- [8] J. Rivero, R. Sathre, J.G. Navarro, Life cycle energy and material flow implications of gypsum plasterboard recycling in the European Union, *Resources, Conservation and Recycling*, 108 (2016) 171-181.
- [9] C. Leiva, C.G. Arenas, L. Vilches, J. Vale, A. Gimenez, J. Ballesteros, C. Fernández-Pereira, Use of FGD gypsum in fire resistant panels, *Waste Management*, 30(6) (2010) 1123-1129.
- [10] M. Singh, M. Garg, Activation of fluorogypsum for building materials, (2009).
- [11] M. Arıkan, K. Sobolev, The optimization of a gypsum-based composite material, *Cement and Concrete Research*, 32(11) (2002) 1725-1728.
- [12] L.M. Baltar, C.A.M. Baltar, M. Benachour, Effect of carboxymethylcellulose on gypsum re-hydration process, *International Journal of Mineral Processing*, 125 (2013) 5-9.
- [13] N. Singh, B. Middendorf, Calcium sulphate hemihydrate hydration leading to gypsum crystallization, *Progress in crystal growth and characterization of materials*, 53(1) (2007) 57-77.
- [14] A. Vimmrova, M. Keppert, O. Michalko, R. Černý, Calcined gypsum-lime-metakaolin binders: Design of optimal composition, *Cement and Concrete Composites*, 52 (2014) 91-96.
- [1] M. Santandrea, I. Imohamed, H. Jahangir, C. Carloni, C. Mazzotti, S. De Miranda, F. Ubertini, P. Casadei, An investigation of the debonding mechanism in steel FRP- and FRCM-concrete joints, in: 4th Workshop on the new boundaries of structural concrete, 2016, pp. 289-298.
- [2] H. Jahangir, M.R. Esfahani, Investigating loading rate and fibre densities influence on SRG-concrete bond behaviour, *Steel and Composite Structures*, 34(6) (2020) 877-889.
- [3] H. Jahangir, M.R. Esfahani, Experimental analysis on tensile strengthening properties of steel and glass fiber reinforced inorganic matrix composites, *Scientia Iranica*, 28(3) (2021) 1152-1166.
- [4] H. Jahangir, M.R. Esfahani, Strain of newly-developed composites relationship in flexural tests, *Journal of*

- possibilities, *Matéria (Rio de Janeiro)*, 18 (2013) 1549-1562.
- [25] N. Xu, S. Li, Y. Li, Z. Xue, L. Yuan, J. Zhang, L. Wang, Preparation and properties of porous ceramic aggregates using electrical insulators waste, *Ceramics International*, 41(4) (2015) 5807-5811.
- [26] H. Higashiyama, K. Yamauchi, M. Sappakittipakorn, M. Sano, O. Takahashi, A visual investigation on chloride ingress into ceramic waste aggregate mortars having different water to cement ratios, *Construction and Building Materials*, 40 (2013) 1021-1028.
- [27] R. Senthamarai, P.D. Manoharan, D. Gobinath, Concrete made from ceramic industry waste: Durability properties, *Construction and Building Materials*, 25(5) (2011) 2413-2419.
- [28] M.A. Campos, V.A. Paulon, J.G. Dalfré Filho, Ceramic wastes in the city of Pedreira [SP], Brazil: equationing and recycling solutions, *Labor Eng.* 7 (2013) 74–83.
- [29] R.H. Geraldo, J.D. Souza, S.C. Campos, L.F. Fernandes, G. Camarini, Pressured recycled gypsum plaster and wastes: Characteristics of eco-friendly building components, *Construction and Building Materials*, 191 (2018) 136-144.
- [30] J.M. Mejía, R.M. de Gutiérrez, C. Montes, Rice husk ash and spent diatomaceous earth as a source of silica to fabricate a geopolymeric binary binder, *Journal of Cleaner Production*, 118 (2016) 133-139.
- [31] A.E. Lavat, M.A. Trezza, M. Poggi, Characterization of ceramic roof tile wastes as pozzolanic admixture, *Waste Management*, 29(5) (2009) 1666-1674.
- [32] R.H. Geraldo, C.M. Ouellet-Plamondon, E.A. Muianga, G. Camarini, Alkali-activated binder containing wastes: a study with rice husk ash and red ceramic, *Cerâmica*, 63 (2017) 44-51.
- [33] A. Gmouh, S. Eve, A. Samdi, R. Moussa, J. Hamel, M. Gomina, Changes in plaster microstructure by pre-stressing or by adding gypsum grains: microstructural and mechanical investigations, *Materials Science and Engineering: A*, 352(1-2) (2003) 325-332.
- [34] J. Zhou, C. Liu, Z. Shu, D. Yu, Q. Zhang, T. Li, Q. Xue, [15] K. Condeixa, E. Qualharini, D. Boer, A. Haddad, An inquiry into the life cycle of systems of inner walls: Comparison of masonry and drywall, *Sustainability*, 7(6) (2015) 7904-7925.
- [16] P. Kijjanapanich, A.P. Annachhatre, G. Esposito, E.D. van Hullebusch, P.N. Lens, Biological sulfate removal from gypsum contaminated construction and demolition debris, *Journal of environmental management*, 131 (2013) 82-91.
- [17] P.S. Bardella, G. Camarini, Recycled plaster: physical and mechanical properties, in: *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, 2012, pp. 1307-1310.
- [18] S. Suarez, X. Roca, S. Gasso, Product-specific life cycle assessment of recycled gypsum as a replacement for natural gypsum in ordinary Portland cement: application to the Spanish context, *Journal of Cleaner Production*, 117 (2016) 150-159.
- [19] G. Camarini, K.D. dos Santos Lima, S.M. Pinheiro, Investigation on gypsum plaster waste recycling: An eco-friendly material, *Green Materials*, 3(4) (2016) 104-112.
- [20] L. Reig, M. Tashima, L. Soriano, M. Borrachero, J. Monzó, J. Payá, Alkaline activation of ceramic waste materials, *Waste and Biomass Valorization*, 4(4) (2013) 729-736.
- [21] Y. Abadou, R. Mitiche-Kettab, A. Ghrieb, Ceramic waste influence on dune sand mortar performance, *Construction and Building Materials*, 125 (2016) 703-713.
- [22] M.S. Khan, M. Sohail, N.S. Khattak, M. Sayed, Industrial ceramic waste in Pakistan, valuable material for possible applications, *Journal of Cleaner Production*, 139 (2016) 1520-1528.
- [23] E. GARCIA, M. CABRAL JUNIOR, V. Quarcioni, F.F. Chotoli, Resíduo de cerâmica vermelha (RCV): uma alternativa como material pozolânico, *Cerâmica Industrial*, 19(4) (2014) 31-38.
- [24] V.A. Mantovani, C.S. Franco, S.D. Mancini, H.L. Hasegawa, B.F. Gianelli, V.X. Batista, L.L. Rodrigues, Comparison of polymers and ceramics in new and discarded electrical insulators: reuse and recycling

- components, Construction and Building Materials, 191 (2018) 136-144.
- [37] F.G.S. Silva, R.A.F. Junior, J.S. da Silva, K.W. Pinto, H.M.C. Andrade, J. Dweck, J.P. Gonçalves, Hydration of the equilibrium catalyst (Ecat) calcium hydroxide system, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 120(2) (2015) 1089-1098.
- [38] G. Camarini, S.M. Pinheiro, Microstructure of recycled gypsum plaster by SEM, in: Advanced Materials Research, Trans Tech Publ, 2014, pp. 243-246.
- Preparation of specific gypsum with advanced hardness and bending strength by a novel in-situ loading-hydration process, Cement and Concrete Research, 67 (2015) 179-183.
- [35] A. Barbosa, A. Ferraz, G. Santos, Chemical, mechanical and morphological characterization of gypsum obtained at Araripe, PE, Brazil, Cerâmica, 60 (2014) 501-508.
- [36] R.H. Geraldo, J.D. Souza, S.C. Campos, L.F. Fernandes, G. Camarini, Pressured recycled gypsum plaster and wastes: Characteristics of eco-friendly building

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

B. Mehdikhani, Processing of brick building materials with special mechanical properties using recycled materials, Amirkabir J. Civil Eng., 54(6) (2022) 2067-2080.

DOI: 10.22060/ceej.2021.19548.7199

