

## تولید سنگ مصنوعی از ضایعات سنگ تزئینی

زهرا سپهوند، کیانوش بارانی\*

گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، ایران

## تاریخچه داوری:

دریافت: ۳ اسفند ۱۳۹۵

بازنگری: ۲۹ اسفند ۱۳۹۵

پذیرش: ۴ اردیبهشت ۱۳۹۶

ارائه آنلاین: ۲۳ خرداد ۱۳۹۶

## کلمات کلیدی:

ضایعات سنگ تزئینی

سنگ مصنوعی

کارخانجات سنگبری

بازیابی ضایعات

**چکیده:** سالانه میلیون‌ها تن را به دنبال دارند. در این تحقیق ضایعات درشت و پودر پساب کارخانجات سنگبری با رزین ترکیب و اسلب‌های سنگ مصنوعی تولید شده است. نتایج نشان می‌دهد اسلب‌های تولیدی دارای مشخصات فیزیکی و شیمیایی مطابق با استانداردهای ملی ایران برای سنگ ساختمانی می‌باشند. با افزایش مقدار رزین در ترکیب سنگ، مقاومت خمشی و کششی افزایش و مقاومت فشاری و ضریب جذب آب کاهش یافته است. اسلب‌های تولیدی از ضایعات سنگ گرانیته در مقایسه با اسلب‌های تولیدی از ضایعات سنگ مرمریت دارای مشخصات فیزیکی و مکانیکی بهتری هستند. در بهترین شرایط، با هدف بیشترین مصرف ضایعات، با ترکیبی شامل ۹۰ درصد ضایعات مرمریت و ۱۰ درصد رزین، اسلب‌های تولید شده است که دارای مقاومت فشاری ۱۴۳ مگاپاسکال، مقاومت خمشی ۲۱ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۲۵ مگاپاسکال، ضریب جذب آب ۱ درصد و وزن مخصوص ۲/۳۲ می‌باشند.

## ۱- مقدمه

ایران چهارمین تولید کننده سنگ تزئینی فرآوری نشده در دنیا است که نزدیک به ۹ درصد تولید جهانی را در اختیار دارد. بر اساس آمارهای جهانی در سال ۲۰۱۴ بیش از ۱۳ میلیون تن سنگ تزئینی فرآوری نشده از معادن ایران استخراج شده است [۱]. به دلایل مختلف نظیر عدم استفاده از تکنولوژی‌های و ماشین آلات مدرن در استخراج و فرآوری سنگ، حمل و نقل نامناسب، عدم آموزش مناسب و استفاده از نیروهای غیر متخصص و ماهر، سالانه بخش عظیمی از منابع سنگ در مرحله معدنکاری و فرآوری سنگ به ضایعات تبدیل می‌شود [۲-۴]. بطور میانگین در مرحله استخراج ۵۶ درصد و در مرحله برش و فرآوری سنگ ۵۰ درصد سنگ تبدیل به ضایعات می‌شود. سالانه نزدیک به ۱۴ میلیون تن سنگ در کارخانجات سنگبری فرآوری می‌شود که نزدیک به ۷ میلیون به پلاک‌های قابل فروش تبدیل و ۳/۸ میلیون تبدیل به پودر پساب و ۳/۲ میلیون تن تبدیل به ضایعات درشت می‌شوند. در اغلب موارد این ضایعات در طبیعت رها می‌شوند که مخاطرات زیست محیطی را به دنبال دارند. پودر پساب سنگبری‌ها، بخاطر دانه‌ریز بودن پس از خشک شدن به راحتی توسط باد پخش می‌شود و موجب آلودگی خاک‌های کشاورزی و آب‌های اطراف می‌شود [۵].

درسال‌های اخیر استفاده از ضایعات سنگبری‌ها (شامل پودر پساب و قطعات درشت) برای کاربردهای مختلف نظیر تولید بتن [۶-۸]، تولید آجر ساختمانی [۹-۱۱]، تولید سرامیک [۱۲ و ۱۳]، تولید سنگ مصنوعی [۱۸]-

[۱۴]، تولید آسفالت [۱۹-۲۱]، بهبود خاک‌های کشاورزی [۲۲]، تصفیه آب [۲۳ و ۲۴] و سایر کاربردهای دیگر مورد بررسی قرار گرفته است. تولید سنگ مصنوعی از ضایعات مختلف از جمله ضایعات سنگ‌های طبیعی توسط محققین مورد بررسی قرار گرفته است. وولف<sup>۱</sup> (۱۹۱۲) تولید سنگ مصنوعی از ضایعات سنگ‌های طبیعی را مورد بررسی قرار داده است. در روش پیشنهادی پودر سنگ ضایعاتی با فسفات یا آلومینا و کربنات سدیم و مقدار کمی آب مخلوط سپس در فرم مورد دلخواه پرس شده و برای فرآیند کلسیناسیون درون کوره قرار می‌گیرد. این روش شامل فرآیند کلسیناسیون و حرارت با دمای زیاد است [۲۵].

جین<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۰) تولید سنگ مصنوعی را از شیشه‌های ضایعاتی مورد بررسی قرار داده‌اند. در روش پیشنهادی خرده شیشه ضایعاتی، سیمان پورتلند سفید و یک ترکیب لیتیومی مانند هیدروکسید لیتیوم به همراه آب و یک روان کننده بتن با نسبت‌های مختلف ترکیب و به خوبی مخلوط می‌شوند تا یک ملات روان بدست آید. مخلوط همگن و روان را در قالب ریخته و روی یک میز لرزان قرار می‌دهند تا هوای موجود در مخلوط خارج شود. سپس مهلت داده می‌شود تا مخلوط سخت شود. این روش شامل هیچ گونه عملیات حرارتی نیست. در روش ارائه شده از ضایعات سنگ استفاده نشده است علاوه بر این ماده چسباننده سیمان است [۲۶].

لی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۰۸) شیشه ضایعاتی خرد شده (۴۰ درصد وزنی) و

1 Wolf

2 Jin

3 Lee

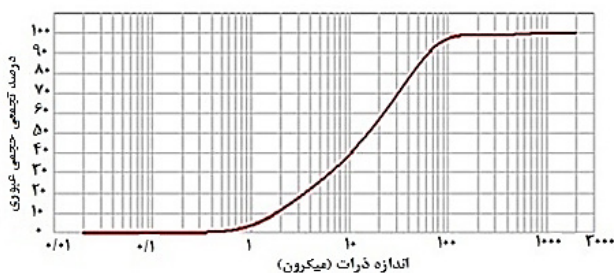
\* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: barani.k@lu.ac.ir

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- تهیه و شناسایی ضایعات

ضایعات مورد استفاده برای انجام این تحقیق از کارخانجات برش سنگ گرانیت و مرمریت واقع در شهرک صنعتی شماره ۲ شهرستان خرم آباد جمع‌آوری شده‌اند. ضایعات جمع‌آوری شده ابتدا در آن خشک و سپس ضایعات درشت توسط سنگ شکن فکی و مخروطی آزمایشگاهی خرد شده‌اند. با سرند کردن، محصول خردایش به ۲ محدوده دانه بندی ذرات دانه متوسط (۱ + ۶/۷ میلی‌متر) و ذرات دانه ریز (۰/۱۵ + ۱ میلی‌متر) تقسیم شده است. شکل ۱ توزیع دانه‌بندی نمونه پودر پساب را که به کمک دستگاه آنالیز دانه‌بندی لیزری<sup>۴</sup> انجام شده است را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که بیش از ۴۰ درصد حجم نمونه حاوی ذرات کمتر از ۱۰ میکرون است. در جدول ۱ آنالیز شیمیایی XRF نمونه‌های گرانیتی و مرمریتی گزارش شده است. ضایعات سنگ گرانیت عمدتاً شامل ترکیبات  $\text{SiO}_2$ ،  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ،  $\text{CaO}$ ،  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  و  $\text{K}_2\text{O}$ ،  $\text{Na}_2\text{O}$  می‌باشند. مهمترین ترکیب اکسیدی موجود در ضایعات سنگ مرمریتی  $\text{CaO}$  است.

بررسی کانی شناسی نمونه‌ها توسط آنالیز XRD انجام شده است. نتایج آنالیز XRD نشان می‌دهد در ضایعات گرانیتی، کوارتز، آلپیت و مسکویت و در ضایعات مرمریتی کلسیت مهمترین کانی‌های تشکیل دهنده بافت سنگ هستند.



شکل ۱: توزیع دانه بندی پودر پساب

Fig. 1. Size distribution of sludge

### ۲-۲- ساخت نمونه‌ها

شکل ۲ مراحل ساخت اسلب‌های سنگ را نشان می‌دهد. مواد تشکیل دهنده شامل، ضایعات درشت خرد شده، پودر پساب و ماده چسباننده (رزین پلی استر غیر اشباع اورتوفتالیک) با نسبت‌های مشخص در یک همزن به مدت ۳۰ دقیقه مخلوط می‌شوند. ماده مخلوط شده در قالب‌هایی به ابعاد  $30 \times 30 \times 30$  سانتی‌متر ریخته شده و سپس قالب‌ها درون دستگاه فشرده سازی قرار می‌گیرند. در دستگاه فشرده‌سازی سه فرآیند خلاگیری، فشرده‌سازی و ارتعاش روی قالب‌ها انجام می‌شود. فرآیند خلاگیری در تمام زمانی که قالب زیر دستگاه است با مکش ۵۰ میلی‌متر جیوه انجام می‌شود. ابتدا بستر مواد توسط یک جک هیدرولیکی به مدت ۳ دقیقه تحت فشار ۲ مگاپاسکال قرار

قطعات خرد شده سنگ که از ضایعات کارخانجات سنگبری تهیه شده است (۶۰ درصد وزنی) را با یک رزین پلیمری غیر اشباع (مقدار رزین ۸ درصد وزنی مجموع شیشه و قطعات سنگ) مخلوط و سپس تحت فرآیند همزمان فشار، لرزش و خلا و در ادامه عملیات حرارتی قرار داده و اسلب<sup>۱</sup> سنگ مصنوعی تولید کرده‌اند. نتایج نشان داده است که اسلب‌های تولید شده دارای خصوصیات فیزیکی مناسب برای مصارف ساختمانی هستند. در این تحقیق فقط از ضایعات درشت سنگ گرانیت در ابعاد ۴-۶ میلی‌متر استفاده شده است و از پودر پساب سنگبری‌ها که بسیار دانه ریز است و معمولاً ۱۰۰ درصد زیر ۱۰۰ میکرون است استفاده نشده است [۱۶].

چانگ<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۱۰) با استفاده از پودر پساب کارخانجات سنگبری (۳۵ درصد وزنی)، پسماند خاک رُس به‌جای مانده از کارخانجات ماسه شویی (۵۰ درصد وزنی) و سیمان پوزولانیک (۱۵ درصد وزنی) به عنوان ماده چسباننده سنگ مصنوعی تولید کرده‌اند. در این تحقیق از ضایعات درشت سنگبری‌ها استفاده نشده است [۱۷].

اسلاوو<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۲) تولید سنگ مصنوعی از پودر سنگ و سیلیکات سدیم را مورد بررسی قرار داده‌اند. در روش پیشنهادی پودر سنگ‌های آذرین با اندازه ذرات کمتر از ۴ میلی‌متر، رُس، پودر پساب کارخانجات سنگبری و سیلیکات سدیم به‌خوبی مخلوط می‌شوند و سپس در یک قالب ریخته شده و قالب درون کوره با دمای حدود ۱۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار می‌گیرد تا فرآیند سینترینگ به‌وقوع بپیوندد. نقش سیلیکات سدیم محکم کننده سنگ است و کلرید کبالت به عنوان ماده رنگی استفاده می‌شود. روش ارائه شده در این پتنت نیز شامل فرآیند سینترینگ با دمای زیاد است [۲۷].

در تحقیقات قبلی که توسط نویسندگان این مقاله در دانشگاه لرستان انجام شده است تولید اسلب‌های سنگ مصنوعی از پودر پساب کارخانجات سنگبری مورد بررسی قرار گرفته است. بیشترین درصد پودر پساب استفاده شده در این تحقیق ۶۰ درصد بوده است. در بهترین شرایط با ترکیب شامل ۵۰ درصد پودر پساب، ۱۲ درصد پودر کواتز، ۲۵ درصد خرده شیشه و ۱۳ درصد رزین نمونه‌هایی با مقاومت فشاری حداکثر ۹۰ مگاپاسکال، مقاومت خمشی ۴۵ مگاپاسکال، مقاومت کششی ۳۵ مگاپاسکال، جذب آب ۰/۶۴ و دانسیته ۲/۶۸ تولید شده است. نقطه ضعف این تحقیق مصرف زیاد رزین بخاطر ریز دانه بودن پودر پساب است. مصرف رزین بیش از ۱۰ درصد باعث غیر اقتصادی بودن طرح می‌شود [۱۸].

تحقیق پیش رو در ادامه تحقیق پیشین نویسندگان و با هدف افزایش مصرف ضایعات، استفاده همزمان از ضایعات درشت و ریز دانه، کاهش مصرف رزین و افزایش مقاومت اسلب‌های تولیدی انجام گرفته است.

- 1 Slab
- 2 Chang
- 3 Sglavo

4 Laser particle size analyzer

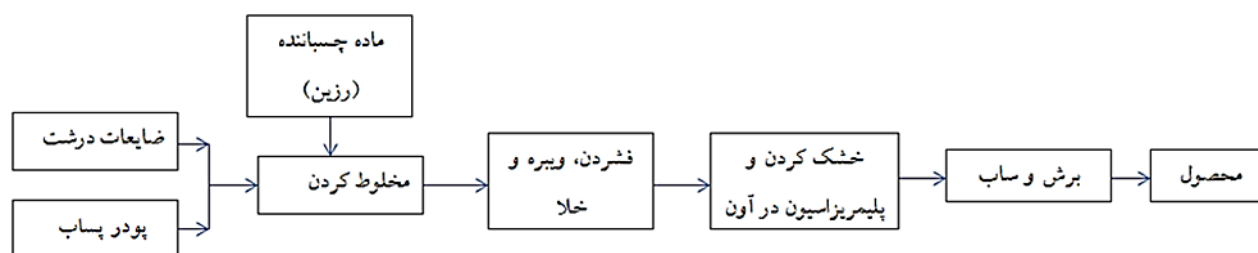
به مدت ۹۰ دقیقه درون یک آون با دمای ۱۰۰ درجه سانتیگراد قرار داده می‌شوند. بعد از این مرحله قالب‌ها در دمای اتاق سرد و سپس سنگهای تولید شده از آنها خارج و برش و ساب داده می‌شوند.

می‌گیرد تا مواد فشرده شده و حباب‌های هوا بین ذرات خارج شود. در ادامه به مدت ۴ دقیقه قالب‌ها تحت ارتعاش با فرکانس ۵۰ هرتز قرار می‌گیرند تا حباب‌های باقیمانده کاملاً خارج و محتوی داخل قالب‌ها بصورت یک ژل یک دست و همگن شود. قالب‌ها برای فرآیند خشک شدن و پلیمریزاسیون

جدول ۱: ترکیب شیمیایی ضایعات

Table 1. Chemical composition of waste stone

L.O.I	SrO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	MgO	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	ترکیب (%)
۳/۴۶	-	-	۳/۸۹	۳/۰۷	۰/۳۷	۱/۱۲	۴/۳۷	۲/۸۸	۱۳/۵۲	۶۷/۲۵	گرانیتی
۴۳/۳	۰/۱۱	۰/۰۹	-	-	-	۰/۴۲	۵۴/۸۶	-	۰/۲۴	۰/۹۵	مرمریتی



شکل ۲: ساخت اسلب‌های سنگ مصنوعی

Fig. 2. Manufacturing procedure of artificial stone slabs

جدول ۲: طرح آزمایش‌های تولید سنگ مصنوعی از ضایعات سنگ مرمریت

Table 2. Plan of experiments for making artificial stone from marble waste

شماره آزمایش	ضایعات درشت خرد شده		رزین (درصد)	پودر پساب (درصد)
	ذرات دانه متوسط (درصد)	ذرات دانه ریز (درصد)		
۱	۴۳	۱۸	۱۲	۲۷
۲	۴۲	۱۹	۱۱	۲۷
۳	۴۰	۲۲	۱۰	۲۸
۴	۳۸	۲۴	۹	۲۹
۵	۳۸	۲۴	۸	۳۰
۶	۳۷	۲۶	۷	۳۰

## جدول ۳: طرح آزمایش‌های تولید سنگ مصنوعی از ضایعات سنگ گرانیت

Table 3. Plan of experiments for making artificial stone from granite waste

شماره آزمایش	ضایعات درشت خرد شده		رزین (درصد)	پودر پساب (درصد)
	ذرات دانه متوسط (درصد)	ذرات دانه ریز (درصد)		
۱	۳۹	۱۸	۱۳	۳۰
۲	۳۸	۲۰	۱۲	۳۰
۳	۳۷	۲۰/۵	۱۱/۵	۳۱
۴	۳۵	۲۳	۱۱	۳۱
۵	۳۴	۲۳/۵	۱۰/۵	۳۲
۶	۳۴	۲۴	۱۰	۳۲

و بر اساس استاندارد بین‌المللی مکانیک سنگ ISRM77 انجام شده‌اند. آزمون‌های تعیین مقاومت خمشی بر اساس روش آزمون استاندارد ملی ایران شماره 8229 ISIRI انجام شده‌اند. آزمون‌های تعیین جذب آب و وزن مخصوص بر اساس روش آزمون استاندارد ملی ایران شماره 5699 ISIRI انجام شده‌اند. تمام آزمون‌ها در آزمایشگاه شرکت فنی مهندسی دیده‌بان کیفیت غرب که دارای صلاحیت از سازمان ملی استاندارد است انجام شده‌اند.

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- مقاومت سنگ

شکل ۳ و شکل ۴ تغییرات مقاومت فشاری، کششی و خمشی اسلب‌های تولیدی را با تغییر ترکیب سنگ نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود با افزایش مقدار رزین و به تبع آن کاهش مقدار ضایعات، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد اما مقاومت‌های کششی و خمشی افزایش یافته است. در اسلب‌های مرمیتی با افزایش مقدار رزین از ۷ به ۱۲ درصد مقاومت فشاری از ۱۴۳/۲ به ۱۱۸/۹ مگاپاسکال کاهش (۱۷ درصد کاهش)، مقاومت کششی از ۲۵/۱۶ به ۳۷/۴۲ مگاپاسکال افزایش (۴۹ درصد افزایش) و مقاومت خمشی از ۲۱/۴۳ به ۴۲/۱۲ مگاپاسکال افزایش یافته (۹۶ درصد افزایش) است. در اسلب‌های گرانیتی با افزایش مقدار رزین از ۱۰ به ۱۳ درصد مقاومت فشاری از ۱۶۷/۱ به ۱۲۸/۳ مگاپاسکال کاهش (۲۳ درصد کاهش)، مقاومت کششی از ۳۱/۸۵ به ۴۲/۲۸ مگاپاسکال افزایش (۳۳ درصد افزایش) و مقاومت خمشی از ۳۱/۱۸ به ۴۷/۲۱ مگاپاسکال افزایش یافته (۵۱ درصد افزایش) است.

بطور کلی برای هر دوسری اسلب‌های گرانیتی و مرمیتی افزایش مقدار رزین (کاهش مقدار ضایعات) بیشترین تاثیر را به ترتیب بر مقاومت‌های خمشی، کششی و فشاری داشته است. با افزایش مقدار رزین اسلب‌های تولیدی حالت لاستیکی پیدا کرده و در نتیجه مقاومت خمشی و کششی آنها افزایش پیدا می‌کند. بطور کلی نتایج نشان می‌دهد رابطه معکوسی بین

برای ساخت سنگ مصنوعی نوع درگیری ذرات از حساسیت و اهمیت خاصی برخوردار می‌باشد. در صورتیکه ذرات به خوبی با همدیگر درگیر شوند و به اصطلاح جورشدگی مناسبی با هم داشته باشند مقاومت فیزیکی سنگ افزایش و مقدار مصرف رزین کاهش می‌یابد. اگر در مخلوطی که سنگ مصنوعی از آن تهیه می‌شود میزان ذرات درشت بیش از اندازه باشد، از آنجا که ذرات درشت نمی‌توانند به آسانی بر روی هم بلغزند بنابراین از کارایی مخلوط کاسته می‌شود، در چنین مخلوطی ذرات تمایل به جدا شدن از یکدیگر را دارند و لذا برای تقویت مقاومت مکانیکی نهایی مخلوط بایستی مقدار رزین را افزایش داد. همچنین با افزایش مقدار ذرات دانه ریز در مخلوط با توجه سطح تماس بیشتری که ذرات دانه ریز دارند مقدار مصرف رزین افزایش می‌یابد.

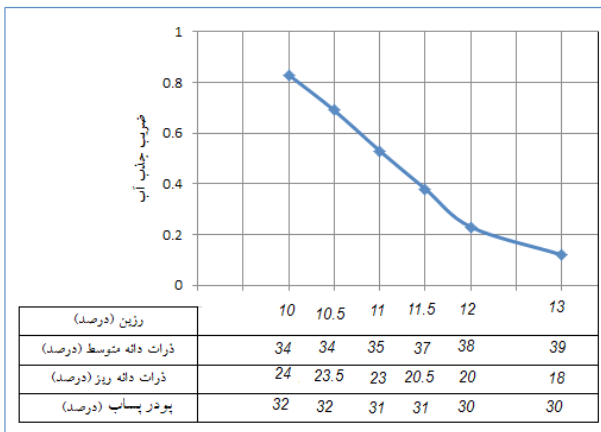
اگر نوع دانه‌بندی به گونه‌ای انتخاب شود که میزان رزین استفاده شده درصد بالایی داشته باشد، سنگ حالت لاستیکی پیدا می‌کند که در نتیجه مقاومت خمشی و کششی آن زیاد می‌شود اما توجیه اقتصادی نخواهد داشت. اگر میزان رزین کم‌تر از حد نصاب باشد، سنگ بسیار ترد و شکننده می‌باشد و مقاومت آن کاسته می‌شود. لذا بایستی در مخلوط سنگ بطور متناسب از ذرات درشت، ذرات دانه ریز و رزین استفاده کرد. ذرات دانه ریز فضای خالی بین ذرات درشت را پر کرده و مقدار مصرف رزین کاهش می‌یابد. بر اساس ملاحظات یاد شده آزمایش‌های ساخت اسلب‌های سنگ مصنوعی با ضایعات مرمیتی و گرانیتی طراحی گردیده است (جدول ۲ و جدول ۳).

## ۳-۲- آزمون‌های تعیین مشخصات فیزیکی و مکانیکی

برای تعیین خواص مکانیکی و فیزیکی نمونه‌های ساخته شده، پارامترهایی مانند مقاومت فشاری، خمشی، کششی و همچنین وزن مخصوص و جذب آب نمونه‌ها، اندازه‌گیری شده است. آزمون‌های تعیین مقاومت فشاری بر اساس روش آزمون استاندارد ملی ایران شماره 15-16618 INSO انجام شده‌اند. آزمون‌های تعیین مقاومت کششی غیر مستقیم به روش برزیلی

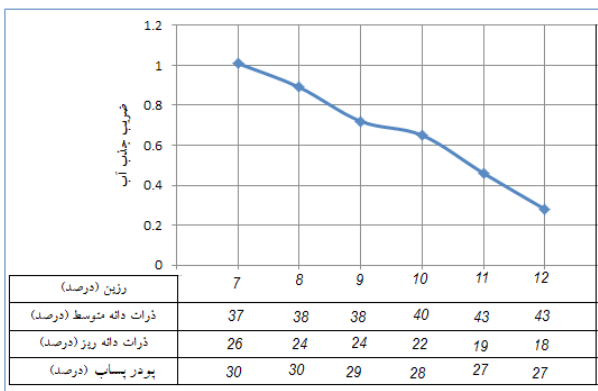
۳-۲- ضریب جذب آب و وزن مخصوص

شکل ۵ و شکل ۶ تغییرات ضریب جذب آب اسلب‌های تولیدی را با تغییر ترکیب سنگ نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که هرچه مقدار رزین افزایش یافته است ضریب جذب آب کاهش یافته است. وظیفه رزین نفوذ در بین خلل و فرج ذرات و پر کردن این فضاها می‌باشد. با افزایش مقدار رزین فضای بین دانه‌ها بخوبی پر شده و ضریب جذب کاهش می‌یابد. همچنین رزین یک ماده آبران است که باعث آبرانی سطح اسلب و ذرات می‌شود و به تبع آن ضریب جذب آب کاهش می‌یابد. البته برای بررسی بیشتر این موضوع بهتر است میزان آبرانی سطح با آزمایش‌های مربوطه مانند تعیین زاویه تماس قطره آب با سطح، اندازه‌گیری شود.



شکل ۵: تغییرات ضریب جذب آب برای اسلب‌های تولیدی از ضایعات سنگ مرمریت

Fig. 5. Water absorption of slabs made from marble waste

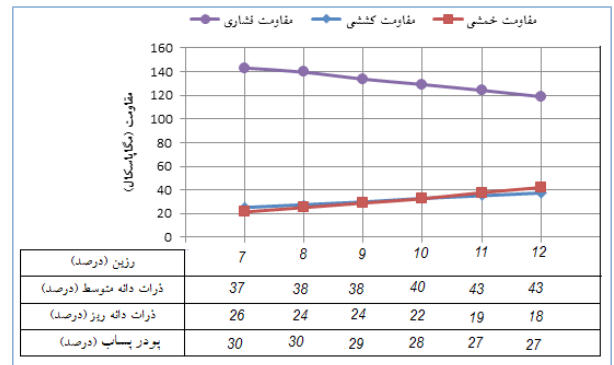


شکل ۶: تغییرات ضریب جذب آب برای اسلب‌های تولیدی از ضایعات سنگ گرانیت

Fig. 6. Water absorption of slabs made from granite waste

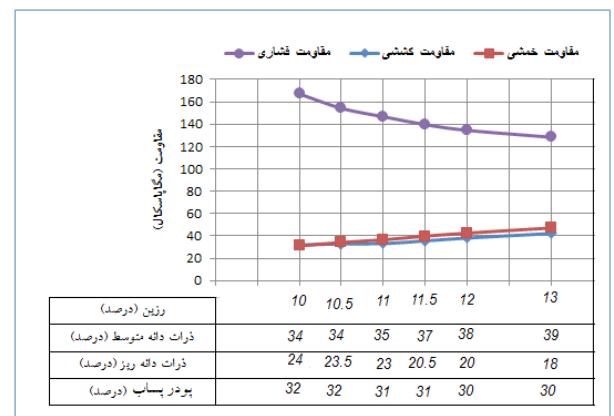
مقاومت فشاری و مقاومت کششی و خمشی وجود دارد. در تمام نمونه‌های تولید شده مقاومت خمشی و کششی تقریباً به هم نزدیک بوده و کمتر از مقاومت فشاری هستند. مقاومت فشاری سنگ به وضعیت دانه‌بندی سنگ بستگی دارد. در مقاومت فشاری، مقدار و نوع رزین و نحوه اتصال دانه‌ها اهمیت زیاد دارد. بطور کلی هرچه ذرات سنگ دانه ریزتر باشند مقاومت فشاری تک محوره سنگ بیشتر است. در اسلب‌های تولیدی نیز مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار ذرات دانه ریز و پودر پساب، مقاومت فشاری افزایش یافته است.

در مقایسه اسلب‌های تولیدی از ضایعات مرمریتی و گرانیتی، مقاومت نوع گرانیتی بیشتر است که این به امر به مقاومت ذرات و کانی‌های موجود در گرانیت مربوط می‌شود. همانطور که نتایج مطالعات XRD و XRF نشان داد محتوی اصلی ضایعات گرانیتی، کانی کوارتز است که دارای مقاومت و سختی بیشتری است و همچنین در مقایسه با کانی کلسیت که مهمترین کانی موجود در ضایعات مرمریتی است، چسبندگی بیشتر با رزین پیدا می‌کند.



شکل ۳: تغییرات مقاومت اسلب‌های تولیدی از ضایعات سنگ مرمریت

Fig. 3. Strength of slabs made from marble waste



شکل ۴: تغییرات مقاومت اسلب‌های تولیدی از ضایعات سنگ گرانیت

Fig. 4. Strength of slabs made from granite waste

و ظاهری برای اسلب‌های مرمریتی به طور متوسط نزدیک به ۱/۸ درصد است در صورتیکه این اختلاف برای اسلب‌های گرانیتی بطور متوسط نزدیک به ۱/۱ درصد است و این بدین معناست که اسلب‌های گرانیتی بهتر متراکم شده‌اند و نتایج آزمایش‌های ضریب جذب آب نیز این امر را تایید می‌کند زیرا هرچه جسم تخلخل موثر بیشتری داشته باشد میزان جذب آب نیز بیشتر خواهد بود. ضریب جذب آب اسلب‌های مرمریتی بطور میانگین ۰/۶۸ و اسلب‌های گرانیتی ۰/۴۶ است.

### ۳-۳- مقایسه نتایج با شرایط استاندارد و سایر سنگ‌های طبیعی

هدف از این تحقیق استفاده هرچه بیشتر از ضایعات سنگ می‌باشد. بر این اساس آزمایش‌هایی که در آنها بیشتر مقدار ضایعات مورد استفاده قرار گرفته است به عنوان شرایط بهینه انتخاب و در جدول زیر مشخصات فیزیکی و مکانیکی آنها با شرایط استاندارد و چندین نمونه از سنگ‌های طبیعی تجاری که در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار می‌گیرند، مقایسه شده است.

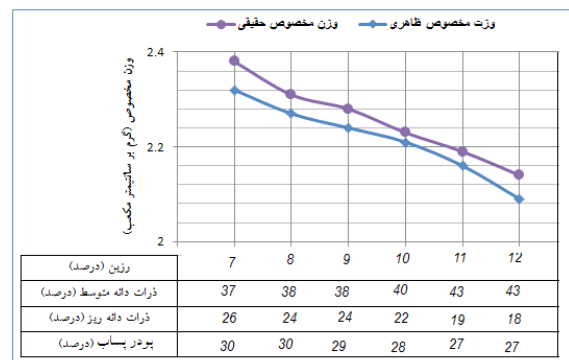
اطلاعات جدول ۴ نشان می‌دهد که اسلب تولیدی از ضایعات گرانیت که شامل ۹۰ درصد ضایعات است (آزمایش ۶ جدول ۳) همه شرایط استاندارد ملی ایران برای سنگ گرانیت به جز درصد جذب آب را دارد. اسلب تولیدی از ضایعات مرمریتی که شامل ۹۳ درصد ضایعات است (آزمایش ۶ جدول ۲) نیز همه شرایط استاندارد ملی ایران برای سنگ مرمریت را به جز درصد جذب آب را دارد. مقایسه مشخصات فیزیکی و مکانیکی با نمونه‌های سنگ‌های طبیعی تجاری در بازار نظیر گوهره خرم آباد، چینی ازنا و گرانیت بروجرد نشان می‌دهد که نمونه‌های تولیدی دارای شرایط بهتری هستند و در نمونه های تجاری یاد شده نیز مقدار درصد جذب آب بیشتر از شرایط استاندارد است.

مقایسه نتایج با تحقیقات قبلی نویسندگان [۱۸] که تنها از پودر پساب در ترکیب سنگ استفاده شده است، نشان داد با ترکیب مناسبی از پودر پساب و ضایعات درشت، بطور متوسط مصرف رزین بیش از ۵۰ درصد کاهش یافته و مقاومت اسلب‌های تولید نیز افزایش یافته است.

### ۴- نتیجه‌گیری

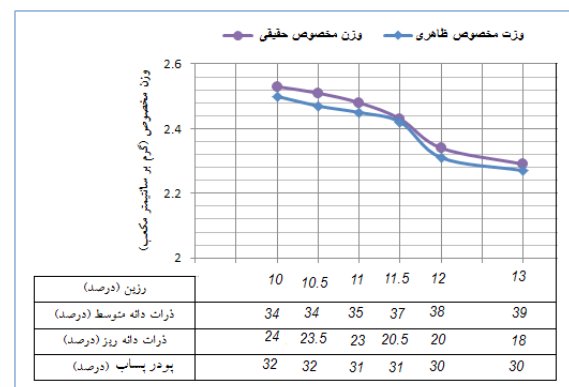
با ترکیبی مناسب از ضایعات درشت و پودر پساب کارخانجات سنگبری، اسلب‌های سنگ مصنوعی تولید شده است که دارای مشخصات فیزیکی و شیمیایی مطابق با استانداردهای ملی ایران برای سنگ ساختمانی می‌باشند. محصول تولید شده در این تحقیق را می‌توان به عنوان کانترا آشپزخانه، سینک ظرفشویی و روشویی، وان حمام، پوش داخلی کف ساختمان و پله‌های داخلی ساختمان استفاده کرد. با توجه به اینکه این اسلب‌ها در مقیاس صنعتی تولید و در مقایسه با تولیدات معمول سنگ مصنوعی صنعتی مصرف رزین بیشتر نیست و بخش زیادی از مواد اولیه با ضایعات ارزان قیمت جایگزین می‌شود لذا تولید در مقیاس صنعتی اقتصادی خواهد بود. اما به هر حال

شکل ۷ و شکل ۸ تغییرات وزن مخصوص اسلب‌های تولیدی را با تغییر ترکیب سنگ نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار رزین، وزن مخصوص حقیقی و ظاهری کاهش یافته است. وزن مخصوص حقیقی رزین بین ۱/۲-۱/۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است، در حالیکه وزن مخصوص ضایعات سنگی بین ۲/۷-۲/۶ گرم بر سانتی‌متر مکعب است. لذا درصد حجمی رزین به مراتب بیشتر از درصد وزنی آن است. برای مثال، ۷ درصد وزنی رزین معادل ۳۴ درصد حجمی آن در ترکیب سنگ است. بنابراین حتی اضافه شدن مقدار کم رزین باعث کاهش وزن مخصوص حقیقی و ظاهری مخلوط و اسلب‌های تولیدی می‌شود.



شکل ۷: تغییرات وزن مخصوص اسلب‌های تولیدی از ضایعات سنگ مرمریت

Fig. 7. Density of slabs made from marble waste



شکل ۸: تغییرات وزن مخصوص اسلب‌های تولیدی از ضایعات سنگ گرانیت

Fig. 8. Density of slabs made from granite waste

وزن مخصوص ظاهری سنگ عبارت است از وزن واحد حجم سنگ کاملاً خشک با روزنه و درزه‌های موجود در آن. وزن مخصوص ظاهری سنگ اصولاً کمی از وزن حقیقی آن کمتر است و هرچه این اختلاف بیشتر باشد نشانه وجود روزنه و درزه بیشتر می‌باشد. اختلاف وزن مخصوص حقیقی

شهرداری‌ها می‌باشد. تولید سنگ مصنوعی از ضایعات سنگ نه تنها موجب ارزش افزوده می‌شود همچنین به حل معضل زیست محیطی این پسماندها کمک خواهد کرد.

تولید در سطح صنعتی با توجه به مشکلات بازار و بازاریابی نیازمند مشوق‌های لازم از طرف سازمان‌هایی نظیر صنعت، معدن، تجارت، محیط زیست و

جدول ۴: مقایسه مشخصات فیزیکی و مکانیکی اسلب‌های حاوی بیشترین مقدار ضایعات با شرایط استاندارد و چندین نمونه از سنگ‌های طبیعی

Table 4. Comparison of physical and mechanical properties of slabs made from waste with standard condition and natural stones

وزن مخصوص حقیقی (g/cm <sup>3</sup> )	جذب آب (%)	مقاومت خمشی (MPa)	مقاومت فشاری (MPa)	نوع سنگ
۲/۵۶	۰/۴	۸/۳	۱۳۱	استاندارد ملی ایران برای گرانیت INSO 5694
۲/۵۳	۰/۸۳	۳۱/۱۸	۱۶۷/۱	سنگ مصنوعی شامل ۹۰ درصد ضایعات گرانیتی و ۱۰ درصد رزین (آزمایش ۶ جدول ۳)
۲/۶	۰/۲	۷	۵۲	استاندارد ملی ایران برای مرمریت ISIRI 5696
۲/۳۸	۱/۰۱	۲۱/۴۳	۱۴۳/۲	سنگ مصنوعی شامل ۹۳ درصد ضایعات مرمریتی و ۷ درصد رزین (آزمایش ۶ جدول ۲)
۲/۶۵	۱/۱۳	۹/۱	۵۳/۷	سنگ مرمریتی گوهره خرم آباد
۲/۹۶	۱	۱۹	۸۰	سنگ مرمریتی چینی ازنا
۲/۶	۱	۱۸	۱۱۰	سنگ گرانیت بروجرد

### تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از دانشگاه لرستان، شرکت سنگ آذرین پارس، شهرک صنعتی شماره ۲ خرم آباد، شرکت مهندسی دیده‌بان کیفیت غرب برای کمک و فراهم آوردن امکانات مورد نیاز برای انجام این تحقیق کمال تشکر و امتنان را دارند.

### مراجع

- [5] H. Smaili, Reuse and Application of Powder Sludge of Stone for manufacturing artificial stone (MS thesis in persian), Lorestan University (1393).
- [6] H. M. A. Mahzuz, A. A. M. Ahmed, and M. A. Yusuf, Use of stone powder in concrete and mortar as an alternative of sand, African J. Environ. Sci. Technol., 5(5) (2011) 381–388.
- [7] H. Binici, T. Shah, O. Aksogan, and H. Kaplan, Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates, J. Mater. Process. Technol., 208(1) (2008) 299–308.
- [8] H. Hebhouh, H. Aoun, M. Belachia, H. Houari, and E. Ghorbel, Use of waste marble aggregates in concrete, Constr. Build. Mater., 25(3) (2011) 1167–1171.
- [9] F. J. Aukour, Incorporation of marble sludge in industrial building eco-blocks or cement bricks formulation, Jordan J. Civ. Eng., 3(1) (2009) 58–65.
- [10] M. Rajgor and J. Pitroda, Stone Sludge: Economical Solution for Manufacturing of Bricks, Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng., 2 (2013) 16–20.
- [1] M. Gussoni, Annual Report and Prospects for the International Stone Trade (Stone sector 2016) by Internazionale Marmi e Macchine (IMM), Italy (2016).
- [2] K. Barani, Stone industry in Lorestan province, problems and solutions (in persian), The International Congress of Investment Opportunities, Province of Lorestan (2015).
- [3] P. Yaghobi, Economic analysis of stone industry, with an emphasis on building and decorative stones (in persian), barresybazargani, 71(April) (1394) 69–81.
- [4] K. Barani and H. Esmaili, Production of artificial stone slabs using waste granite and marble stone sludge samples, J. Min. Environ., 7(1) (2016) 135–141.

- [19] M. Karaşahin and S. Terzi, Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete, *Constr. Build. Mater.*, 21(3) (2007) 616–620.
- [20] P. C. Hou, Reuse of waste glass powder for substitution of fine aggregate in the recycling asphalt concrete, *Natl. Yunlin Univ. Sci. Technol. Dep. Constr. master's Cl.* (2003).
- [21] H. Akbulut and C. Gürer, Use of aggregates produced from marble quarry waste in asphalt pavements, *Build. Environ.*, 42(5) (2007) 1921–1930.
- [22] I. Zorluer and M. Usta, Stabilization of soils by waste natural stone dust, fourth national natural stone symposium (2003).
- [23] S.-C. Pan, C.-C. Lin, and D.-H. Tseng, Reusing sewage sludge ash as adsorbent for copper removal from wastewater, *Resour. Conserv. Recycl.*, 39(1) (2003) 79–90.
- [24] X. Chen, S. Jeyaseelan, and N. Graham, Physical and chemical properties study of the activated carbon made from sewage sludge, *Waste Manag.*, 22(7) (2002) 755–760.
- [25] W. Laufer, Process for the production of artificial stone from natural-rock waste, Google Patents (1914).
- [26] W. Jin, Artificial stone employing waste glass, Patent WO 2000044686 A1 (2000).
- [27] V. M. Sglavo, T. E. Dalla, and G. Holler, Artificial stone production process, Patent EP 2455352 A1 (2012).
- [11] N. Bilgin, H. A. Yeprem, S. Arslan, A. Bilgin, E. Günay, and M. Marşoglu, Use of waste marble powder in brick industry, *Constr. Build. Mater.*, 29 (2012) 449–457.
- [12] F. Saboya, G. C. Xavier, and J. Alexandre, The use of the powder marble by-product to enhance the properties of brick ceramic, *Constr. Build. Mater.*, 21(10) (2007) 1950–1960.
- [13] W. Acchar, F. A. Vieira, and D. Hotza, Effect of marble and granite sludge in clay materials, *Mater. Sci. Eng. A*, 419(1) (2006) 306–309.
- [14] C. R. Cheeseman and G. S. Viridi, Properties and microstructure of lightweight aggregate produced from sintered sewage sludge ash, *Resour. Conserv. Recycl.*, 45(1) (2005) 18–30.
- [15] P. J. Wainwright and D. J. F. Cresswell, Synthetic aggregates from combustion ashes using an innovative rotary kiln, *Waste Manag.*, 21(3) (2001) 241–246.
- [16] M.-Y. Lee, C.-H. Ko, F.-C. Chang, S.-L. Lo, J.-D. Lin, M.-Y. Shan, and J.-C. Lee, Artificial stone slab production using waste glass, stone fragments and vacuum vibratory compaction, *Cem. Concr. Compos.*, 30(7) (2008) 583–587.
- [17] F.-C. Chang, M.-Y. Lee, S.-L. Lo, and J.-D. Lin, Artificial aggregate made from waste stone sludge and waste silt, *J. Environ. Manage.*, 91(11) (2010) 2289–2294.
- [18] K. Barani and H. Esmaili, Production of artificial stone slabs using waste granite and marble stone sludge samples, *J. Min. Environ.*, 7(1) (2016) 135–141.

Please cite this article using:

Z. Sepahvand, K. Barani, Production of Artificial Stone from Dimension Stone Waste, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 50(3) (2018) 453-460.

DOI: 10.22060/ceej.2017.12563.5230

