

Investigating the Effect of Using Granite Waste and Combining Porcelain Ceramic Waste on the Mechanical Behavior of Reactive Powder Concrete (RPC)

Hossein Esmaili Malekabadi, Seyed Behzad Talaeitaba*

Department of Mechanical, Civil and Architectural Engineering, Kho.C., Branch, Islamic Azad University, Iran.

ABSTRACT: This study investigates the feasibility of reducing silica sand consumption in Reactive Powder Concrete (RPC) by replacing it with granite waste powder (GWP) and combined granite–porcelain ceramic waste (PCW). Nine RPC mixtures were designed using two microsilica contents (12.5% and 25% by cement weight) and two replacement levels (50% and 75%) of silica sand. All mixtures had a constant water-to-cementitious materials ratio of 0.20 and a superplasticizer content of 2% by cement weight. Mechanical performance was evaluated through compressive and flexural strength tests at curing ages of 3, 7, 14, and 28 days under steam curing at 95°C. Results demonstrated that waste incorporation significantly improved mechanical properties while reducing material cost, confirming the technical and economic viability of sustainable RPC production.

Review History:

Received: Jul. 09, 2024

Revised: Nov. 24, 2025

Accepted: Dec. 12, 2025

Available Online: Dec. 30, 2025

Keywords:

Reactive Powder Concrete

Compressive Strength

Granite Waste

Ceramic Waste

Flexural Strength

1- Introduction

Reactive Powder Concrete (RPC) is classified as an ultra-high-performance cementitious composite due to its dense microstructure, very low porosity, and superior mechanical performance [1,2]. These properties are mainly achieved by eliminating coarse aggregates, using very fine silica sand, applying a low water-to-cementitious materials ratio, and incorporating highly reactive pozzolanic materials such as microsilica. Despite its advantages, the high consumption of silica sand and cement increases the cost and environmental footprint of RPC. Therefore, the use of industrial and construction wastes as alternative fine materials has attracted increasing attention. Granite cutting waste and porcelain ceramic waste are produced in large quantities and often disposed of in landfills, causing environmental concerns. Their mineralogical composition, mechanical strength, and particle angularity suggest that they can be suitable substitutes for silica sand in RPC [3-5].

The primary focus of this study was on the compressive strength of reactive powder concrete (RPC) incorporating waste materials, with the aim of identifying a mixture design that maximizes the utilization of such by-products. In the experimental program, 50% and 75% of the silica sand were replaced, in one case solely with granite waste and in another case with a combined mixture of granite and porcelain

ceramic wastes. In addition, silica fume, as one of the most critical constituents in RPC production, was incorporated at two different dosage levels with a 50% variation between the investigated mix designs.

2- Materials and Methods

Portland cement Type I, microsilica, silica sand, granite waste powder, and porcelain ceramic waste were used in this study. Granite waste was collected from stone-cutting sludge, dried, crushed, and sieved to achieve the desired particle size distribution. Porcelain ceramic waste was obtained from discarded tiles and mechanically crushed into fine particles. A polycarboxylate-based high-range water-reducing admixture was employed to ensure adequate workability. Mixing was performed using a high-speed mixer following a staged procedure to achieve homogeneous dispersion. All specimens were steam-cured at 95°C after demolding. Compressive strength tests were conducted according to ASTM C109, while flexural strength tests were performed using the three-point bending method in accordance with ASTM C78.

In total, eight concrete mixture designs were prepared. One mixture served as the control specimen, while the remaining mixtures were developed by partially replacing silica sand with waste-derived aggregates.

In all mix designs, the water-to-cementitious materials

*Corresponding author's email: talaeitaba@iaukhsh.ac.ir

ratio (W/CM) was kept constant at 20%, and the dosage of the super plasticizer (SP) was fixed at 2% by weight of cement. Silica fume was incorporated at two dosage levels of 12.5% and 25% by weight of cement. Moreover, silica sand was partially replaced with granite waste powder at replacement levels of 50% and 75%. In the hybrid mixtures, porcelain ceramic waste was used to replace 50% of the granite waste powder.

3- Results and Discussion

Figure 1 presents a comparison of the 28-day compressive strength of selected RPC mixtures. Most mixtures containing granite waste powder or combined granite–porcelain waste exhibited higher compressive strength than the control mixture.

The highest compressive strength was observed in mixtures containing combined wastes, which can be attributed to the angular shape of ceramic particles, their low water absorption, and improved particle interlocking. Flexural strength results showed similar trends, indicating enhanced crack resistance and improved load transfer mechanisms in waste-containing mixtures. Reducing microsilica content did not significantly compromise strength in mixtures incorporating combined wastes, highlighting the efficiency of ceramic particles in enhancing mechanical performance.

Also the results showed that when 50% of the silica sand was replaced solely with granite waste, the specimens containing the lower silica fume content (12.5%) consistently exhibited higher compressive strength than those with the higher silica fume content (25%) at all curing ages up to 28 days. This trend, however, was not observed when the replacement level increased to 75% of the silica sand. Nevertheless, in the case of 75% replacement of silica sand with granite waste alone, the compressive strength remained higher than that of the control mixture throughout the entire curing period up to 28 days.

Moreover, for mixtures with 50% replacement of silica sand by granite waste and 12.5% silica fume, the compressive strength exceeded that of the control mixture at all ages up to 28 days, whereas for mixtures containing 25% silica fume, the compressive strength surpassed that of the control only after 14 days of curing.

In the case of combined waste utilization (Figures 9c and 9d), different trends were observed. At a 50% replacement level, the mixture containing 25% silica fume exhibited higher compressive strength throughout the curing period up to 28 days, while at a 75% replacement level, the mixture incorporating 12.5% silica fume demonstrated superior compressive strength. This behavior can be attributed to the increased proportion of angular porcelain ceramic particles, which enhanced particle interlocking and load transfer within the concrete matrix.

In the case of using combined waste materials at a replacement level of 75% of the silica sand, reducing the silica fume content by 50% did not lead to any reduction in the achieved compressive strength enhancement. This outcome can be regarded as one of the most significant findings of the

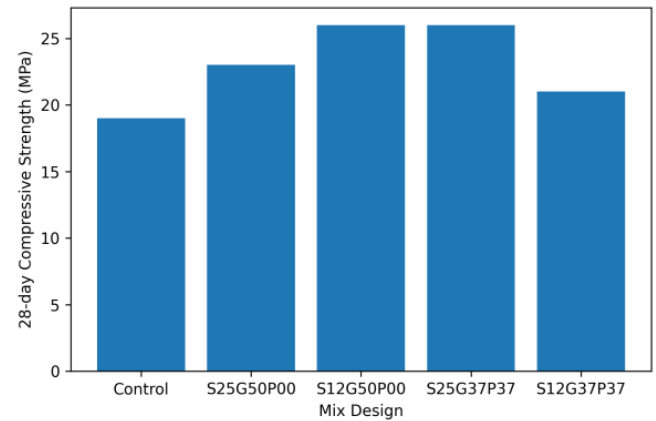


Fig. 1. Comparison of 28-day compressive strengths

present study.

Compared with the mixtures incorporating only granite waste, this behavior can be reasonably explained by the distinctive characteristics of the porcelain ceramic particles. Specifically, their pronounced angularity and considerably lower water absorption appear to play a dominant role in maintaining the compressive strength, even at reduced silica fume contents.

4- Economic Evaluation

An economic assessment was conducted based on local market prices of raw materials. Silica sand was found to be significantly more expensive than granite waste and porcelain ceramic waste. Replacing 50% and 75% of silica sand with granite waste resulted in cost reductions of approximately 46% and 70%, respectively. Combined waste mixtures achieved cost savings ranging from 37% to 56%, while maintaining acceptable mechanical properties. Additionally, reducing microsilica content further decreased the overall production cost of RPC.

5- Conclusion

The results of this study confirm that granite waste powder and porcelain ceramic waste can be effectively utilized as partial replacements for silica sand in Reactive Powder Concrete. Combined waste mixtures demonstrated superior compressive and flexural performance, even at high replacement levels and reduced microsilica content. The proposed approach not only enhances mechanical performance but also significantly reduces material cost and environmental impact. Therefore, the sustainable production of RPC using industrial wastes is both technically feasible and economically attractive.

References

- [1] Richard, P., and Cheyrezy, M.H. Reactive powder concretes with high ductility and 200–800 MPa compressive strength. *Cement and Concrete Research*,

- 1995.
- [2] Cheyrezy, M., Maret, V., and Frouin, L. Microstructural analysis of RPC. *Cement and Concrete Research*, 1995.
- [3] Radhi, M.S., Rasoul, Z.M.A., and Alsaad, A.J. Mechanical behavior of modified reactive powder concrete with waste materials powder replacement. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 2021.
- [4] Zegardło, B., Szelağ, M., and Ogrodnik, P. Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes. *Construction and Building Materials*, 2016.
- [5] Safari, M., and Reisi, M. Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in RPC. *Journal of Cleaner Production*, 2020.



بررسی تأثیر مصرف تنها و ترکیبی ضایعات گرانیات و ضایعات سرامیک پرسلان بر رفتار بتن پودری واکنشی

حسین اسماعیلی ملک‌آبادی، سید بهزاد طلایی طبا*

گروه مهندسی عمران، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۱۹
بازنگری: ۱۴۰۴/۰۹/۰۳
پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۱
ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۱۰/۰۹

کلمات کلیدی:

بتن پودری واکنشی
مقاومت فشاری
ضایعات گرانیات
ضایعات سرامیک
مقاومت خمشی

خلاصه: در ساخت بتن پودری واکنشی (RPC)، حجم زیادی ماسه‌ی سیلیسی مصرف می‌شود. برای کاهش مصرف ماسه‌ی سیلیسی، استفاده از ضایعات، گزینه مناسب و کم هزینه‌ای است. در این تحقیق تأثیر جایگزینی پودر ضایعات گرانیات (GWP) و همچنین جایگذاری ضایعات سرامیک پرسلان (PCW) و پودر ضایعات گرانیات به صورت ترکیبی به جای ماسه‌ی سیلیسی در ساخت بتن RPC، با ۹ طرح اختلاط مورد بررسی قرار گرفت. میکروسلیس با دو مقدار ۱۲/۵ و ۲۵٪ وزن سیمان مصرف شد. در همه طرح‌ها نسبت آب به مواد سیمانی برابر با ۲۰٪ و ابر روان کننده برابر ۲٪ وزن سیمان در نظر گرفته شد. ۵۰ و ۷۵٪ وزن ماسه‌ی سیلیسی با ضایعات گرانیات به تنهایی یا ترکیبی با خرده سرامیک پرسلان جایگزین شد. نمونه‌ها با بخار آب در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد برای آزمایش مقاومت فشاری و خمشی به مدت ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز عمل‌آوری شدند. نتایج نشان داد طرحی که حاوی مواد سیمانی با ۲۵٪ میکروسلیس و مواد ماسه‌ای متشکل از ۵۰٪ ماسه‌ی سیلیسی و ۵۰٪ ضایعات ترکیبی بود، بالاترین مقاومت فشاری در تمام سنین را بدست آورد. همچنین در سایر حالات جایگزینی ماسه‌ی سیلیسی، مقاومت فشاری نسبت به نمونه شاهد به طور میانگین بیش از ۹٪ افزایش نشان داد. کمترین مقاومت فشاری در طرح حاوی میکروسلیس ۱۲/۵٪ و ۷۵٪ ضایعات گرانیات تنها دیده شد. در آزمایش مقاومت خمشی به طور میانگین ۱۶/۴٪ افزایش در نمونه‌های حاوی ضایعات دیده شد. بالاترین افزایش مقاومت خمشی (۳۷٪) در دو طرح که یکی حاوی ۷۵٪ ضایعات ترکیبی و ۱۲/۵٪ میکروسلیس و دیگری حاوی ۵۰٪ ضایعات گرانیات و ۲۵٪ میکروسلیس بود مشاهده شد. میانگین مقاومت همه طرح‌های اختلاط ۱۵۹ مگاپاسکال شد؛ که برای یک بتن RPC قابل قبول است.

و ساز محسوب می‌شود.

۱- مقدمه

استفاده از ضایعات صنعتی یا ساختمانی (مانند خرده بتن بازیافتی، خرده لاستیک، خرده شیشه، ...) به عنوان جایگزین سنگدانه‌های بتنی سالها است که در دنیا مطرح است. علاوه بر این استفاده از ضایعات (مانند پودر گرانیات، پودر شیشه، سبوس برنج، ...) بعنوان جایگزین درصدی از سیمان نیز می‌تواند انتشار کربن را کاهش دهد؛ پس می‌توان نتیجه گرفت، پژوهش در خصوص توسعه بتن حاوی ضایعات با عملکرد مکانیکی و دوام بالا امری ضروری و قابل کاربرد است.

بتن پودری واکنش پذیر (RPC^۱) به عنوان یکی از انواع بتن با توانمندی بسیار بالا می‌باشد که در دهه‌های اخیر توجه محققان زیادی را به خود جلب نموده است. بتن RPC در دهه ۱۹۹۰ توسط بخش علمی بویگ در فرانسه بصورت کاملاً حرفه‌ای و با افزایش مشخصه‌های مکانیکی توسعه یافت. به

یکی از مسائل چالش برانگیز جهانی، استفاده از مواد زائد به دست آمده از صنایع مختلف، مانند ضایعات سرامیکی، کارخانه‌جات و سنگ‌های مختلف است. به عنوان نمونه سالانه میلیون‌ها تن ضایعات سرامیک تنها در قاره‌ی اروپا تولید می‌شود. این در کنار چند نمونه ضایعات دیگر مانند ضایعات شیشه، بتن و ضایعات کارخانه‌های سنگبری دغدغه‌های جدی در حوزه ساختمان ایجاد کرده است. صنعت ساخت و ساز می‌تواند نقش بسیار مهمی در استفاده دوباره از ضایعات برای کاهش خطرات زیست محیطی ایفا کند [۱].

در ساخت بتن به عنوان یکی از پرمصرف‌ترین مصالح ساختمانی، مقدار بسیار زیادی مواد خام مصرف می‌شود. این امر سطح بالایی از انتشار کربن به همراه داشته و بعنوان یکی از خطرات زیست محیطی در عرصه ساخت

1. Reactive Powder Concrete

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: talaeetaba@iaukhsh.ac.ir



بخشی از سیمان، مصرف این ماده را کاهش دهند [۱۲-۱۶]؛ همچنین با جایگزین آن‌ها بجای ماسه، میزان وابستگی به ماسه‌ی سیلیسی را نیز کاهش دهند [۱۷-۲۰].

مطالعات بسیاری در این زمینه انجام شده است، که برخی از آن‌ها به شرح زیر است:

صدیق و همکاران در سال ۲۰۲۱ در یک مطالعه روی بتن RPC با جایگزین پودر ضایعات سرامیک و شیشه به جای دوده سیلیس مشاهده کردند که ضایعات شیشه پودری و ضایعات کاشی سرامیک پودری را می‌توان با هم به عنوان ماده پوزولانیک مورد استفاده قرار داد. نسبت اختلاط بهینه برای این ماده پوزولانی ۸۰ درصد شیشه و ۲۰ سرامیک است. مقاومت فشاری RPC حاوی پودر ضایعات تا ۲۵ درصد جایگزینی دوده سیلیس، بالاتر بوده و جذب آب RPC با افزایش محتوای پودر ضایعات افزایش می‌یابد. درصد بهینه جایگزینی پودر ضایعات جای دوده سیلیس در RPC، ۱۵ درصد است که بیشترین افزایش در مقاومت فشاری را همراه دارد [۴].

اولویچ و هالبنیک، در سال ۲۰۱۶ در مطالعه‌ای به بررسی تأثیر استفاده از ضایعات سرامیک در بتن پرداختند. بررسی‌ها نشان داد که مقاومت فشاری ملات سیمان حاوی ضایعات سرامیکی با میزان تکه تکه شدن این ضایعات افزایش می‌یابد. استفاده از قطعات خرد شده کمتر از ۰/۲ میلی متر، ملات سیمانی با مقاومت کششی خوب و قابلیت جذب آب کم را حاصل می‌کند. همچنین افزایش میزان مصرف ضایعات سرامیکی باعث افزایش مقاومت فشاری بتن‌های مورد بررسی شد. بیشترین مقاومت فشاری (با افزایش ۱۲/۳ درصدی نسبت به نمونه شاهد) در بتن‌های حاوی ۳۰ درصد ضایعات سرامیکی دیده شد. این بتن پس از ۱۵۰ سیکل انجماد و یخ زدایی نسبت به نمونه‌های شاهد ۱۰ درصد کاهش مقاومت نشان داد [۲۱].

ماس و همکاران، در یک تحقیق برای ساخت بتن حاوی ضایعات، بخشی از سیمان مصرفی آن را با ضایعات سرامیک (CW) پرسلان جایگزین کردند. ضایعات سرامیک را از ۱۵٪ تا ۵۰٪ وزنی برای جایگزینی سیمان پرتلند به جهت ارزیابی رفتار پوزولانی این ماده استفاده کردند. نمونه‌ها را در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد به مدت زمان‌های مختلف تحت عمل آوری قرار دادند. آن‌ها دریافتند که ترکیب CW برای واکنش با پرتلندیت تشکیل شده در طی هیدراتاسیون سیمان پرتلند برای تشکیل ترکیبات سیمانی از طریق واکنش پوزولانی مناسب است. کارایی ملات‌های حاوی CW شبیه به کارایی ملات شاهد بود. مواد افزودنی در محدوده ۱۵ تا ۳۵٪ وزنی،

عنوان نمونه در سال ۱۹۹۵ میلادی چیریزی و همکاران اصول ساخت و نکات این بتن را معرفی نمودند. از مشخصه‌های این بتن می‌توان به حداقل مقاومت فشاری ۱۵۰ مگاپاسکال، تراکم حجمی بالا، نفوذپذیری بسیار کم، دوام زیاد، مقاومت سایشی و خوردگی بسیار خوب اشاره داشت؛ همچنین شایان ذکر است که تمام مواد در این بتن از ذرات بسیار ریز پودری بوده و از نظر شیمیایی بسیار واکنش پذیر هستند [۲-۵].

ترکیب ماسه‌ی سیلیسی، میکروسیلیس و سایر مواد ریز در این بتن فعالیت پوزولانی را بهبود می‌بخشد و به متراکم شدن ذرات کمک می‌کند. استفاده از ابر روان کننده برای کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، موجب بهبود مشخصه‌های مکانیکی می‌شود [۲]. این نوع بتن مزایای زیادی همچون: افزایش همگنی اندازه ذرات، متراکم شدن ذرات به دلیل حذف سنگدانه‌های درشت و استفاده از ماسه‌ی بسیار ریز (۱۵۰ تا ۶۰۰ میکرون) دارد [۴]. این امر موجب ایجاد ناحیه انتقال بسیار قوی در بتن و تشکیل ساختاری متراکم و بسیار مستحکم می‌شود.

RPC را می‌توان بر اساس مقاومت، به دو گروه با مقاومت ۲۰۰ و ۸۰۰ مگاپاسکال طبقه بندی کرد. مقاومت فشاری اولی در محدوده ۱۵۰ تا ۲۳۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی از ۲۰ تا ۵۰ مگاپاسکال است. مقاومت فشاری دومی در محدوده ۵۰۰ تا ۸۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی در محدوده ۴۵ تا ۱۴۰ مگاپاسکال است [۵، ۶].

سایر خواص مکانیکی، همانطور که در مقالات گزارش شده است، شامل مدول یانگ در محدوده ۵۰-۷۰ گیگاپاسکال، مدول گسیختگی در محدوده ۲۵-۱۵۰ مگاپاسکال، کرنش کششی‌نهایی در حدود ۱٪ و انرژی شکست در محدوده ۱۲-۴۰ کیلوژول بر متر مربع [۵، ۷، ۸].

اولین سازه RPC ساخته شده پل عابر پیاده و دوچرخه رو در شهر شبروک است که در سال ۱۹۹۷ ساخته شد [۹].

مکان‌های دیگری که با موفقیت از این بتن در ساخت آن‌ها استفاده شد، که می‌توان به پل تپه مریخ در آیووا، ایالات متحده، پل پیاده ساکاتا میرای در ژاپن و پل عابر پیاده ۱۲۰ متری تک دهانه‌ای در سؤل کره که به طور کامل با استفاده از RPC ساخته شده است، اشاره کرد [۱۰].

از آنجایی که تقاضای RPC در جهان افزایش یافته است، بسیاری از کشورها از جمله استرالیا، کانادا، چین، فرانسه و کره جنوبی تولید تجاری آن را طی چند سال گذشته شروع کرده‌اند [۱۱].

تا به امروز، بسیاری از محققان سعی کرده اند تا از ضایعات مختلفی در عرصه ساخت بتن RPC استفاده و یا با جایگزین کردن ضایعات بعنوان

1. Ceramic Waste
2. Scanning Electron Microscopy

مقاومت خوبی را کسب کردند و به ترتیب پس از عمل‌آوری ۲۸ و ۹۰ روزه، بالاتر از ۷۵ و ۸۵٪ نسبت به نمونه شاهد هستند [۲۲].

چان و چو در سال ۲۰۰۴ در تحقیقی بر روی RPC گزارش دادند که استفاده از میکروسیلیس در RPC به همراه الیاف فولادی، موجب رشد چسبندگی بین الیاف فولادی و مواد سیمان شد. بهترین درصد جایگزینی میکروسیلیس به جای سیمان بین ۲۰ تا ۳۰ درصد بود [۷].

میوهوب و همکاران در سال ۲۰۲۱ در تحقیقی بر روی خواص بتن RPC نشان دادند که استفاده از روش عمل‌آوری اتوکلاو با استفاده از دوز کم سیمان برابر با ۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب می‌تواند نتایج مقاومت فشاری بالاتری نسبت به عمل‌آوری با بخار داشته باشد. درصد افزایش مقاومت فشاری به ۳۳٪ در هنگام استفاده از خاکستر بادی با ۴۰٪ جایگزینی سیمان تحت عمل‌آوری اتوکلاو منتهی شد. درصد افزایش مقاومت فشاری در هنگام استفاده از خاکستر پسته برنج با ۳۰ درصد جایگزینی دوده سیلیس تحت عمل‌آوری با بخار به ۴۵٪ افزایش یافت. ترکیب نانو مواد نیز، با جایگزینی ۳٪ از سیمان باعث افزایش مقاومت فشاری تا حدود ۱۲٪ شد [۲۳].

سانجوان و آندرا در سال ۲۰۲۱ در یک مطالعه بر روی دوام بتن RPC نشان دادند: در RPC ضریب نفوذپذیری هوا حدود ۵۰ برابر کمتر و انتشار کلرید حدود ۳۰ برابر پایین‌تر از بتن 80°C و عمق کربناته شدن در RPC پس از دو سال قرار گرفتن در معرض شرایط طبیعی تقریباً صفر بود. نرخ خوردگی در RPC حدود ۲۵ برابر کمتر نسبت به بتن 80°C بود [۲۴]. هیرمات و و یاراگال در سال ۲۰۱۷ در تحقیقی بروی تأثیر مدت زمان اختلاط بر روی RPC، با انجام آزمایش SEM^2 یافتند که به طور کلی، با افزایش مدت زمان اختلاط، درصد حفره‌های هوای محبوس شده نیز افزایش می‌یابد؛ همچنین RPC تهیه شده با مدت زمان اختلاط ۱۵ دقیقه در مقایسه با سایر مخلوط‌های RPC تهیه شده با مدت زمان اختلاط ۱۰، ۲۰، ۲۵ و ۳۰ دقیقه، مقاومت بالاتری را نشان داد [۱۸].

احمد و همکاران در سال ۲۰۲۳ در یک تحقیق برای ساخت بتن معمولی از ضایعات سرامیک (CW) استفاده کردند. نتایج حاکی از این بود که تجزیه و تحلیل هزینه نشان می‌دهد که CW تا ۷۵٪ می‌تواند برای کاربردهای سازه‌ای استفاده شود که هزینه بتن را ۹/۸۱٪ کاهش می‌دهد. CW به علت ایجاد تخلخل در بتن موجب کاهش مقاومت می‌شوند با این حال مصرف CW تا ۱۰٪ می‌تواند برای بتن با مقاومت معمولی استفاده شود [۲۵].

دوورکین و همکاران در سال ۲۰۲۴ برای بهینه سازی بتن اسفنجی

از ضایعات خرد شده گرانیت استفاده کردند. مقاومت فشاری بتن اسفنجی ساخته شده با خرده‌های گرانیت (۲/۵ تا ۵ میلی‌متر) بیشتر از بتن ساخته شده خرده‌های گرانیت (۵ تا ۱۰ میلی‌متر) بود. خرده‌های ریزتر (۲/۵ تا ۵ میلی‌متر) به دلیل کاهش تخلخل، منجر به چگالی بالاتر بتن شده و مقاومت و کیفیت بتن را نیز افزایش داد [۲۶].

منحاج الدین و سها (۲۰۲۵) در مطالعه‌ای با استفاده از پودر ضایعات گرانیت (WGP^1) در بتن مشاهده کردند که مقاومت فشاری بتن با پودر ضایعات گرانیت تا ۴۰ درصد جایگزینی افزایش می‌یابد که این افزایش مقاومت به دلیل کاهش بسیار زیاد تخلخل و تسریع هیدراتاسیون می‌باشد. اما بعد از ۴۰٪ به دلیل افزایش تخلخل، مقاومت کاهش می‌یابد. اما با جایگزینی ۵۰٪ WGP مقاومت خمشی ۲۹٪ افزایش داشت. همچنین با استفاده از WGP ۶/۳۲ درصد هزینه ها کاهش می‌یابد [۲۷].

هاتس و همکاران (۲۰۲۴) در تحقیقی با اضافه کردن غبار گرانیت در کنار دوده سیلیس در بتن پودری یافتند که با مصرف ۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب دوده سیلیس و مقدار ۱۰۰، ۰ و ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب غبار گرانیت، به ترتیب ۲۵، ۴۶ و ۵۶ درصد افزایش در مقاومت ۲۸ روزه حاصل شد. همچنین مهمترین عامل که در تمام مراحل بر مقاومت فشاری تأثیر می‌گذارد، مقدار دوده سیلیس است که افزایش آن تا ۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب، بسته به میزان گرد و غبار گرانیت، موجب به افزایش ۲۵ تا ۴۰ درصدی مقاومت در سن ۱ روزه بتن می‌شود. تأثیر غبار گرانیت در ۳ روزگی عمل‌آوری بیشتر مشخص می‌شود [۲۸].

توافیک و همکاران در سال ۲۰۲۳، پودر سرامیک بازیافتی و پودر آجر بازیافتی را در درصدهای ۵ تا ۱۵٪ به جای سیمان در بتن پرمقاومت جایگزین نمودند [۲۹]. مزیت مهم این کار در جایگزینی ۱۵٪، کاهش میزان مصرف انرژی مورد نیاز در فرآیند تولید سیمان به میزان ۱۳٪ بود. همچنین با جایگزینی ۵ و ۱۰٪ از سیمان مصرفی در بتن پرمقاومت، نتایج تحقیق یاد شده نشان داد که ماتریس متراکم تری در خمیر سیمان هیدراته شده حاصل خواهد شد؛ هرچند در تمام درصدهای جایگزینی مقاومت فشاری بتن حاصل کم شده بود.

صفری و ریسی در سال ۲۰۲۰ با جایگزین نمودن ضایعات گرانیت در بتن پودری واکنشی دریافتند که ۳۰٪ جایگزینی ماسه سیلیسی با گرانیت و دارابودن ۲۵٪ میکروسیلیس منجر به بهترین میزان افزایش مقاومت فشاری خواهد شد [۳۰].

نظر توسعه مصالح پایدار و انتشار کربن را حاصل کردند.

فرهان و همکاران در سال ۲۰۲۵ یک بتن پودری واکنشی قلیا فعال حاوی الیاف فولادی ساختند [۳۶]. الیاف فولادی و الیاف بازیافتی حاصل از تایرهای دور ریز در آن پژوهش با درصد حجمی ۱ تا ۴٪ مورد استفاده قرار گرفت. افزوده شدن جریان پذیری، مقاومت فشاری و کششی و مدول الاستیسیته به ویژه در حالت استفاده از ۳٪ الیاف بازیافتی از مهمترین نتایج آن پژوهش بود.

ژو و همکاران در سال ۲۰۲۴ پودر شیشه فوق ریز بازیافتی را در RPC برای کاربرد در پرینترهای سه بعدی مورد بررسی قرار دادند [۳۷]. دانه های شیشه بازیافتی با بعد ۱۰ میکرومتر به عنوان جایگزین صفر تا ۲۵ درصد سیمان به کار رفت. نتایج تحقیق ایشان نشان داد که افزودن حدود ۲۰٪ پودر شیشه علاوه بر دست یابی به خواص مکانیکی مناسب برای RPC، پتانسیل قابل توجهی در رسیدن به بتن پایدار را از خود نشان میدهد.

الخالی و همکاران در سال ۲۰۲۲ بتن پودری واکنشی حاوی خاکستر پوسته برنج و پودر کوارتزیت ساختند [۳۸]. عمده توجه ایشان در آن تحقیق بر خواص مکانیکی این نوع بتن متمرکز بوده است. این محققین توانستند با مصرف سیمان کمتر در طرحهای حاوی خاکستر پوسته برنج و کوارتزیت، به مقاومت فشاری مورد قبول برای بتن پودری واکنشی برسند.

کاتیرول و مورالی در سال ۲۰۲۳ سرباره گرانول کوره بلند و پودر کوارتز را برای ساخت بتن پودری واکنشی استفاده کردند [۳۹]. RPC ساخته شده در آن پژوهش که حاوی الیاف هم بود توانست مشخصات مکانیکی قابل قبولی را نشان دهد. بهترین نتیجه مربوط به نمونه حاوی ۱٪ الیاف و ۳۰٪ کوارتزیت بود.

آرسلان و همکاران در سال ۲۰۲۲ نانوپلیتهای گرافن و سنگدانه های شیشه بازیافتی را در ساخت RPC استفاده کردند [۴۰]. ایشان موفق شدند با افزودن ۰/۱۴٪ نانوپلیت گرافن و ۳۰٪ پودر شیشه بازیافتی، حدود ۳۸٪ مقاومت فشاری بتن پودری واکنشی را افزایش دهند. همچنین مشاهده شد که با کاهش مصرف سیمان، ویژگی های دوام و محیط زیستی این بتن بهبود خواهد یافت.

با نگاهی به تاریخچه و ادبیات موضوع استفاده از ضایعات در بتن از یک سو و کاربرد بتن پودری واکنشی به دلیل خواص منحصر به فرد آن از سوی دیگر، در کنار مصرف زیاد سیمان و ماسه سیلیسی در این نوع بتن و همچنین موارد گزارش شده در تحقیقات گذشته در خصوص تأثیرات مثبت استفاده از ضایعات گرانیت و پیرسلان به نظر میرسد میتوان خواص بتن

هاتس و همکاران در سال ۲۰۲۴ در یک پژوهش آزمایشگاهی - تحلیلی تأثیر استفاده از غبار گرانیت و میکروسیلیس به صورت توأم را بر خواص فیزیکی و مکانیکی و ریزساختار RPC بررسی نمودند [۲۸]. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن غبار گرانیت به طرح مخلوط این بتن تا حدود ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب منجر به افزایش مقاومت فشاری تا بیش از ۵۰٪ خواهد شد. همچنین در این حالت خمیر سیمان هیدراته شده ریزساختار متراکم تری را از خود نشان داده بود.

محمد و همکاران در سال ۲۰۲۰ مقاومت فشاری RPC را در حالت استفاده از مصالح گوناگون مورد بررسی قرار دادند [۳۱]. این مصالح دانه های سرامیک پیرسلان، دانه های خرده شیشه و دانه های گرانول کربن فعال بود. نتایج تحقیق یاد شده افزایش مقاومت فشاری در حالت جایگزینی ۲۰٪ از سنگدانه ماسه ای با مواد پیش گفته بود. البته در تمام حالات مورد بررسی در آن پژوهش حداکثر افزایش مقاومت فشاری زیر ۳۰٪ بود.

ونکاتسان و همکاران در سال ۲۰۲۱ مقاومت و دوام بتن RPC حاوی پودر گرانیت و پودر شیشه را مورد ارزیابی قرار دادند [۳۲]. این دو ماده به عنوان جایگزین بخشی از سیمان به کار رفت. نتایج نشان داد که درصد جایگزینی ۱۵٪ و ۳۵٪ گرانیت و شیشه، رضایت بخش ترین نتیجه را در مقاومت الکتریکی و مقاومت در برابر یون کلر به همراه خواهد داشت.

سنگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ سرباره فولادی را به میزان بسیار زیاد (بیش از ۵۰٪) به عنوان جایگزین سیمان در RPC استفاده نمودند [۳۳]. همچنین از الیاف فولادی نیز در نمونه های مورد بررسی آن پژوهش استفاده شد. نتایج آزمایشگاهی و تحلیلی ایشان نشان داد که تمام شاخصه های عملکردی RPC بهبود یافته است.

گارسا و همکاران در سال ۲۰۲۳ در پژوهشی به منظور دستیابی بتن پودری واکنشی ارزان تر، جایگزینی سیمان و دوده سیلیس در RPC را با پودر شیشه و کربنات کلسیم بررسی کردند [۳۴]. در آن پژوهش که با فرآیندهای بهینه سازی همراه بود مصرف سیمان، پودر شیشه بازیافتی و کربنات کلسیم به میزان ۶۰۳، ۳۶۸ و ۱۱۸ کیلوگرم بر متر مکعب، علاوه بر تأمین ویژگی های مقاومتی RPC، از نظر زیست محیطی مقرون به صرفه ترین حالت را ایجاد میکرد.

ژیانگ و همکاران در سال ۲۰۲۴ بر اساس فن آوری همگن سازی کریستال یخ یک RPC نوآورانه را معرفی نمودند [۳۵]. با این روند توانستند با مصرف ۱۵٪ میکروسیلیس، ضمن دست یابی به مقاومت فشاری حدود ۳۰۰ مگاپاسکال، و کاهش حدود ۵۰ درصدی جذب آب بهینه ترین حالت از

با حداکثر سایز ۵۰۰ میکرون، درشت‌ترین آن‌ها بود، استفاده شود تا ناحیه انتقال بسیار قدرتمندی پدید آید. در جدول ۱ آنالیز شیمیایی مصالح مصرفی مشخص شده است.

۲-۱-۱- منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی

برای رسم منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی، آزمایش دانه‌بندی با الک مطابق با استاندارد ASTM-C136 انجام شد؛ اما این استاندارد صرفاً برای دانه‌بندی حداکثر تا الک ۲۰۰ تعریف شده است و از آنجایی که مصالح مصرف شده از الک شماره ۲۰۰ قابل عبور است، به استاندارد ASTM-C117 که مربوط به ذرات عبوری از الک ۲۰۰ است، مراجعه شد [۴۵-۴۷]. منحنی دانه بندی مصالح مصرفی در شکل ۱ قابل مشاهده است. همانگونه که در مقدمه نیز بیان شد در کنار نسبت پایین آب به سیمان و مصرف بالای سیمان، بسیار ریز بودن سنگدانه‌ها عامل اساسی در دستیابی به خواص مکانیکی ویژه RPC است. به طوری که عمده سنگدانه‌ها بعدی بین ۱۵۰ تا ۶۰۰ میکرون دارند. با بررسی منحنی دانه بندی ماسه، پودر گرانیت و پودر سرامیک پرسیلانی موجود و مقایسه با مراجع موجود [۲-۵] در پژوهش حاضر می‌توان این مصالح را از نظر ابعاد در محدوده متعارف برای ساخت RPC دانست.

RPC را با جایگزینی پودر سرامیک پرسیلانی و یا پودر ضایعات گرانیت به جای ماسه سیلیسی، بهبود بخشید. هدف از انجام تحقیق پیش رو، مقایسه عملکرد بتن RPC حاوی ضایعات گرانیت و یا پرسیلان به جای درصدی از ماسه‌ی سیلیسی است.

به دلیل این که بتن RPC عمدتاً با استحکام فوق العاده بالا شناخته می‌شود، تمرکز اصلی در این تحقیق بر روی مقاومت فشاری RPC حاوی ضایعات برای یافتن طرحی که تا حد امکان از این مواد زائد بهره گیرد، بود. در روند انجام پژوهش پیش رو، درصد‌های ۵۰ و ۷۵٪ از ماسه سیلیسی یک بار به تنهایی با ضایعات گرانیت و یک بار با ترکیب ضایعات گرانیت و پرسیلان جایگزین شده است. همچنین میکروسیلیس به عنوان یکی از مهمترین مصالح در ساخت RPC در دو میزان مختلف با اختلاف ۵۰٪ نسبت به هم در طرح اختلاط‌های مورد بررسی، استفاده شده است.

۲- مصالح و روش آزمایشگاهی

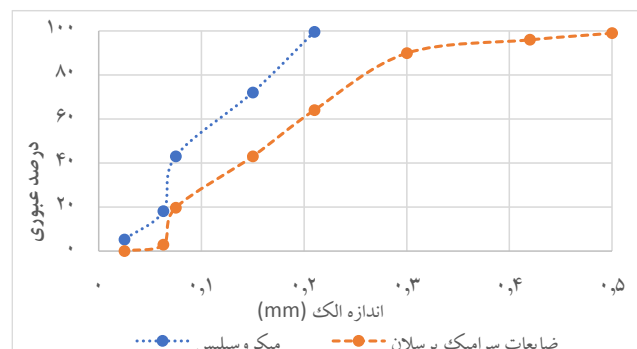
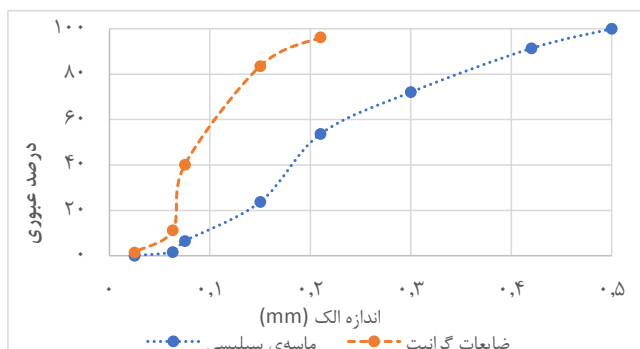
۲-۱- مصالح مصرفی

از آنجایی که بتن RPC یک بتن پودری می‌باشد، سعی بر آن شد که تا حد امکان از مصالح بسیار ریز که میکروسیلیس ریزترین و ماسه‌ی سیلیسی

جدول ۱. آنالیز شیمیایی مصالح مصرفی [۴۱-۴۴].

Table 1. Chemical analysis of used materials.

گرانیت (%)	ماسه سیلیسی (%)	میکروسیلیس (%)	سیمان (%)	
۶۱/۳۵	۹۶ - ۹۹	۸۵	۲۲/۸	SiO _۲
۱۶/۹۷	۰/۴ - ۱/۷	۱	۵/۷	Al _۲ O _۳
۶/۴۴	۰/۰۲ - ۰/۰۶	۲	۳/۶	Fe _۲ O _۳
۶/۵۰	۰/۰۷ - ۰/۲	۱/۵	۵۹/۱۱	CaO
۰/۰۴۸	--	--	۲/۵۴	SO _۳
۲/۴۷	--	۱/۵	۲/۳۸	MgO
۱/۳۰	۰/۰۲ - ۰/۰۶	--	۰/۲۷	K _۲ O
۳/۲۸	۰ - ۰/۰۱	---	۰/۷۴	Na _۲ O
۰/۱۵	۰/۰۱ - ۰/۳۵	۳/۵	۲/۱۶	L.O.I
--	--	--	۹	C _۳ A
۰/۱۷	--	--	--	MnO
۰/۲۴	--	۰/۱۰	--	P _۲ O _۵
--	--	۰/۵	--	Sic
--	--	۳	--	C
۰/۹۲	--	--	--	TiO _۲



شکل ۱. منحنی دانه‌بندی مصالح مصرفی.

Fig. 1. Granulation curve of consumable materials.

جدول ۲. خواص فیزیکی میکروسیلیس [۴۱]

Table 2. Physical properties of micro silica

چگالی kg/m^3	چگالی ویژه	ساختار	رنگ	سطح مخصوص
۳۱۰ - ۳۵۰	۲/۲	آمورف	خاکستری روشن	۳۰ - ۱۵

۲-۱-۲- سیمان

در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ ۱-۳۲۵ کارخانه سیمان اصفهان [۴۳]، مطابق با استاندارد ASTM C150 [۴۸] استفاده شد. این مدل سیمان در کارهای بتنی و بنایی به صورت عمومی در جاهایی که محدودیت خاصی برای مصرف وجود نداشته باشد، مصرف می‌شود.

۲-۱-۳- ماسه سیلیسی

ماسه سیلیس، با مرغوبیت بسیار بالا، به عنوان پرکننده استفاده شد. ماسه سیلیسی مصرفی در این تحقیق از شرکت چپروک است [۴۴]. نفوذ پذیری مناسب و تأخیر در واکنش قلیایی دانه‌های ماسه، از دیگر ویژگی این ماده معدنی است. ماسه سیلیسی از نظر شیمیایی بی اثر است، به این معنی که با اکثر مواد واکنش شیمیایی نمی‌دهد. این ویژگی آن را در محیط‌هایی با قرار گرفتن در معرض مواد شیمیایی بالا یا آب و هوای شدید، که در آن مواد دیگر ممکن است خورده یا تخریب شوند، ایده‌آل می‌کند. یکی از مهم ترین ویژگی‌ها و مزیت‌های ماسه سیلیسی این است که معادن آن فراوان و دسترسی به آن آسان است.

۲-۱-۴- میکروسیلیس

میکروسیلیس به دلیل بالا بودن محتوای سیلیس آمورف، بعنوان یک ماده بسیار مهم در تولید RPC است که باعث بهبود واکنش پوزولانی می‌شود [۴۹-۵۱].

میکروسیلیس مصرفی در این تحقیق در کارخانه فروسیلیس ایران (IFC)، تولید شده است [۴۱]. این محصول طبق استاندارد ASTM-C1240 به عنوان یک افزودنی به سیمان استفاده شد [۵۲]. خواص فیزیکی این پودر در جدول ۲ مشخص شده است.

۲-۱-۵- ابر روان کننده

در این تحقیق از ابر روان کننده سیکا ۵۱۱۰ (Sika ViscoCrete IR 5110-) که از نسل سوم افزودنی برای بتن و ملات می‌باشد و باعث افزایش و حفظ کارایی بتن برای مدت طولانی می‌گردد، مطابق با ASTM C494 استفاده شد [۵۳]. این ابر روان کننده برپایه پلی‌کربکسیلات و با چگالی ۱/۱ کیلوگرم بر لیتر است. این افزودنی با مکانیزم اثر دوگانه جذب سطحی و ایجاد ممانعت فضایی مولکول‌های پلیمری، باعث جدایی ذرات

جدول ۳. کیفیت سنگ گرانیت مشکى نطنز از دید ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی [۴۲].

Table 3. Quality of Natanz black granite in terms of physical and mechanical properties.

توصیف	پارامتر
بسیار پایین	تخلخل
بسیار پایین	جذب آب آزاد
بالا	مقاومت خمشی
بالا	مقاومت فشاری تک محوری
بالا	مقاومت کششی

۲-۱-۸- آب

از آنجایی که با افزودن آب به ترکیب مصالح مصرفی فعل و انفعالات شیمیایی بتن شروع می‌شود، آب نقشی بسیار حیاتی را در ساخت بتن به همراه دارد؛ لذا مقدار مصرف آب باید مناسب باشد تا فرآیند واکنش‌های سیمان به خوبی به انجام برسد. برای تولید و پخت بتن RPC از آب آشامیدنی که از شبکه آب شهری خمینی شهر بود، استفاده شد.

۲-۲- طرح‌های اختلاط

از آنجایی که این تحقیق بصورت آزمایشگاهی و طرح‌های اختلاط با حجم کم ساخته شد، یک ترازو با حساسیت ۰/۰۱ گرم برای وزن‌کشی مصالح مصرفی استفاده شد.

در تمامی طرح‌های اختلاط نسبت آب به مواد سیمانی (W/CM)^۱ ۲۰٪ و مقدار ابر روان کننده مصرفی ۲٪ (SP^۲) وزن سیمان ثابت بود. میکروسیلیس با دو دوز مصرف ۱۲/۵ و ۲۵٪ وزن سیمان استفاده شد، همچنین ماسه سیلیسی با پودر ضایعات گرانیت با دو مقدار ۵۰ و ۷۵٪ جایگذاری شد و در طرح‌های ترکیبی ضایعات سرامیک پرتالان به جای ۵۰٪ از پودر ضایعات گرانیت جایگذاری شد.

به منظور نامگذاری نمونه‌ها از سه شاخص S--، G-- و P-- که به ترتیب بیانگر میزان درصد میکروسیلیس، درصد جایگزینی ماسه سیلیسی با پودر ضایعات گرانیت و میزان درصد جایگزینی ماسه سیلیسی با خرده سرامیک پرتالان هستند استفاده شده است. میکروسیلیس در دو میزان ۲۵٪ و ۱۲/۵٪ سیمان استفاده شده است. به این ترتیب در نامگذاری نمونه‌ها از دو شاخص S25 یا S12 استفاده شده است. میزان جایگزینی ماسه

چسباننده از هم شده و موجب عدم نیاز به ویبره و کاهش میل به جمع شدگی در بتن می‌شود. همچنین امکان کاهش بسیار زیاد آب را فراهم می‌کند که باعث افزایش مقاومت و تراکم می‌شود و اینکه اثر پلاستیسیته (روانی) عالی دارد که در نتیجه بهبود رفتار تراکمی، قالب‌گیری و روانسازی بتن حاصل می‌شود. به دلیل عدم وجود ذرات کلراید، برای بتن‌های مسلح کاملاً بی‌ضرر بوده و میزان واکنش کربناسیون در بتن را کاهش می‌دهد.

۲-۱-۶- ضایعات سرامیک پرتالان

اصلی‌ترین و مهم‌ترین ویژگی سرامیک‌های پرتالانی، تخلخل بسیار کم آن‌هاست که در اثر پخت در دمای بالا اتفاق می‌افتد همین تخلخل کم، مقاومت خمشی بالا و ویژگی‌ها و خواص منحصر به فرد دیگری را نیز برای این محصول فراهم می‌کند. سرامیک پرتالان بدلیل ساختار بسیار سخت، متراکم و با جذب آب بسیار پایین، به نظر می‌رسد می‌تواند تا حدودی نیازهای بتن RPC با ضایعات را برآورده کند.

۲-۱-۷- ضایعات گرانیت

سنگ گرانیت یکی از سنگ‌هایی است که در ایران معادن زیادی دارد و از اصلی‌ترین محصولات کارخانه‌های سنگبری به‌شمار می‌آید [۵۴]. ضایعات سنگ گرانیت مصرفی در این تحقیق از نوع گرانیت سیاه نطنز است که در شهر اصفهان به فراوانی یافت می‌شود. این سنگ به دلیل چقرمگی و استحکام بالا، قدرت مقاومت در شرایط سخت آب و هوایی را دارد. کیفیت این سنگ از دید ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی در جدول ۳ شرح داده شده است. ضایعات گرانیت مورد استفاده به صورت لجن خشک شده از کارخانه تهیه شده و سپس با استفاده از دستگاه تست لس آنجلس خرد شدند. این محصول برای الک کردن و دانه بندی استفاده شد.

1. Water/Cement Material
2. Super Plasticizer

طرح S25G75P00، به مقدار ۷۵٪ از ماسه‌ی سیلیسی طرح شاهد با ضایعات گرانیت جایگذاری شد. برای ساخت طرح S12G50P00، مقدار میکروسیلیس مصرف شده در طرح S25G50P00 که ۲۵٪ است به ۱۲/۵٪ کاهش یافت؛ همچنین طرح S12G75P00 نیز با کاهش مقدار میکروسیلیس مصرفی در طرح S25G75P00 از ۲۵٪ به ۱۲/۵٪ طراحی شد.

در این تحقیق به صورت کلی ۹ طرح اختلاط طراحی شد که تا به اینجا نحوه‌ی شکل‌گیری ۵ طرح اختلاط اول شرح داده شد اما برای طراحی ۴ طرح اختلاط دیگر صرفاً نیمی از ضایعات گرانیت در طرح‌های شماره ۱ تا ۴ در جدول ۴ با ضایعات سرامیک پرتالان جایگذاری شدند. خاطر نشان میشود که مبنای طرح اختلاط بتن RPC مورد استفاده در نمونه شاهد (شماره "۰" در جدول ۴)، به ویژه پارامترهای اساسی آن مانند نسبت آب به سیمان، میزان سیمان و میکروسیلیس با عنایت به تحقیقات گذشته انتخاب شده است [۲-۶].

سیلیسی با پودر گرانیت ۰٪، ۵۰٪ یا ۷۵٪ بوده است. به این ترتیب در نامگذاری نمونه‌ها از شاخص G00، G50 یا G75 استفاده شده است. در مورد جایگزینی پودر سرامیک پرتالانی به جای ماسه سیلیسی، در نامگذاری‌ها، شاخص P00 به معنای جایگزینی ۰٪، P25 به معنای جایگزینی ۲۵٪ و P37 به معنای جایگزینی ۳۷/۵٪ از ماسه سیلیسی با پودر سرامیک است. خاطر نشان میشود که در نمونه‌های اخیر، همزمان با این میزان جایگزینی پرتالان، به میزان مساوی (با همان درصد ۲۵٪ یا ۳۷/۵٪) از ضایعات گرانیت استفاده شده است. در جدول ۴ مشخصات طرح اختلاط نشان داده شده است.

طرح شاهد با ۸۴۵ کیلوگرم مواد سیمانی، میکروسیلیس به میزان ۲۵٪ وزن سیمان، ماسه‌ی سیلیسی به میزان ۱۲۶۹ کیلوگرم بر مترمکعب و بدون ضایعات ساخته شد. در طراحی طرح اختلاط S25G50P00 نصف ماسه‌ی سیلیسی طرح شاهد (طرح شماره ۱) با پودر ضایعات گرانیت جایگذاری شد. برای طراحی

جدول ۴. میزان مصالح مصرفی در هر طرح اختلاط.

Table 4. Amount of materials used in each mixing plan.

		مصالح مصرفی بر حسب (kg/m ³)					مصالح مصرفی بر حسب (%)		
شماره طرح	نام طرح	CM	C	SF	SS	GWP	PCW	SP	W/CM
۰	S25G00P00	۸۴۵	۶۳۴	۲۱۱	۱۲۶۹	--	--	۲	۲۰
۱	S25G50P00	۸۴۵	۶۳۴	۲۱۱	۶۳۴/۵	۶۳۴/۵	--	۲	۲۰
۲	S25G75P00	۸۴۵	۶۳۴	۲۱۱	۳۱۷/۲۵	۹۵۱/۷۵	--	۲	۲۰
۳	S12G50P00	۸۴۵	۷۳۹	۱۰۶	۶۳۴/۵	۶۳۴/۵	--	۲	۲۰
۴	S12G75P00	۸۴۵	۷۳۹	۱۰۶	۳۱۷/۲۵	۹۵۱/۷۵	--	۲	۲۰
۵	S25G25P25	۸۴۵	۶۳۴	۲۱۱	۶۳۴/۵	۳۱۷/۲۵	۳۱۷/۲۵	۲	۲۰
۶	S12G25P25	۸۴۵	۷۳۹	۱۰۶	۶۳۴/۵	۳۱۷/۲۵	۳۱۷/۲۵	۲	۲۰
۷	S12G37P37	۸۴۵	۷۳۹	۱۰۶	۳۱۷/۲۵	۴۷۵/۹	۴۷۵/۹	۲	۲۰
۸	S25G37P37	۸۴۵	۶۳۴	۲۱۱	۳۱۷/۲۵	۴۷۵/۹	۴۷۵/۹	۲	۲۰

^۱C = سیمان، ^۲SF = میکروسیلیس، ^۳S = ماسه، ^۴GW = ضایعات گرانیت، ^۵PCW = ضایعات سرامیک پرتالان، W = آب،
^۶CM = مواد سیمانی، SP = ابر روان کننده،

^۱ Cement

^۲ Silica fume

^۳ Sand

^۴ Granite waste

^۵ Porcelain ceramic waste

^۶ Cementitious materials

۲-۳- آماده سازی نمونه‌ها

برای مخلوط کردن مصالح از یک میکسر سرعت بالا که حداکثر سرعت آن ۳۶۰ دور بر دقیقه و در سه حالت دور کند با ۱۲۰ دور، دور متوسط با ۲۴۰ دور و دور تند با ۳۶۰ دور بر دقیقه قابل تنظیم بود، استفاده شد. ابتدا سیمان و میکروسیلیس با هم به داخل مخزن میکسر اضافه شده و به مدت ۲ دقیقه با دور کند مخلوط شدند زیرا ساختار پودری میکروسیلیس بسیار سبک است و اگر با دور متوسط و یا دور تند مخلوط شود، بخش زیادی از آن در هوا پخش می‌شود. سپس ماسه‌ی سیلیسی اضافه شده و با دور کند به مدت ۲ دقیقه مخلوط شد. بعد از آن ضایعات اضافه شده و ۲ دقیقه دیگر با دور کند مخلوط شدند تا ساختاری کاملاً یک پارچه و در هم آمیخته ایجاد شود. در آخر آب حاوی ابر روان کننده اضافه شد که برای تأثیر بهتر و قدرتمندتر ابر روان کننده، ابتدا آب مصرفی به دو قسمت تقسیم شده که به قسمت اول ۳۰٪ و به قسمت دوم ۷۰٪ ابر روان کننده اضافه شده بود؛ سپس هر یک از دو قسمت آب یاد شده به خوبی مخلوط شدند تا ابر روان کننده‌ها کاملاً در آب حل و یک پارچه شوند. برای افزودن آب، ابتدا قسمت اول آب که حاوی ۳۰٪ ابر روان کننده است را اضافه کرده و به مدت ۱ دقیقه با دور کند مخلوط شد تا از پاشیده شدن آب به جداره‌های مخزن جلوگیری شود زیرا اگر آب با دور متوسط و یا تند مخلوط شود مقداری از آن با پاشیده شدن به اطراف هدر می‌رود بعد از آنکه آب به خوبی به خورد مصالح رفت، باقی مانده آب که حاوی ۷۰٪ ابر روان کننده است، به تدریج به مخلوط اضافه شده و به مدت ۵ دقیقه با دور تند مخلوط شد تا مصالح کاملاً ترکیب شوند.

۲-۴- قالب‌ها

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های مقاومت فشاری از قالب‌های سه خانه فولادی به ابعاد ۷×۷×۷ سانتی‌متر که در شکل ۲ - الف مشخص شده است، و برای مقاومت خمشی از قالب‌های سه خانه فولادی به ابعاد ۴×۴×۱۶ سانتی‌متر که در شکل ۲- ب مشخص شده است، استفاده شد.

۲-۵- عمل آوری

بعد از ویبره کردن، قالب‌ها داخل پوشش نایلون قرار داده شدند تا از تبخیر رطوبت نمونه‌ها جلوگیری شود. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب ماندند و بعد از قالب خارج شده و داخل مخزن بخار آب قرار گرفتند. از دستگاه تولید بخار آب، مدل MATEST-C307 برای عمل آوری استفاده شد، که در شکل ۳ قابل مشاهده است. دمای دستگاه بر روی ۹۵ درجه سانتی‌گراد تنظیم شد، همچنین نرخ افزایش دمای این دستگاه حداکثر ۲۲ درجه سانتی‌گراد بر ساعت بود.

۲-۶- آزمایش‌ها

برای سنجش خواص مکانیکی نمونه‌های ساخته شده از دو آزمایش مقاومت فشاری و خمشی استفاده شد. یک نکته بسیار مهم که صحت نتایج آزمایش‌ها را از بین می‌برد این است که اگر نمونه‌ها دچار شوک حرارتی شوند آزمایش‌ها با خطا همراه می‌شود و اعداد بدست آمده صحیح نیستند. به همین علت پس از آنکه نمونه‌ها عمل آوری شدند، برای جلوگیری از وارد شدن



شکل ۲. قالب‌های مورد استفاده.

Fig. 2. Formworks used.



شکل ۳. مخزن تولید بخار آب.

Fig. 3. Steam generation tank.

شوک حرارتی به نمونه‌ها، ابتدا دستگاه خاموش شد تا دمای داخل دستگاه کاهش یابد و تا حد امکان به دمای محیط نزدیک شود، سپس درب دستگاه برداشته شد و نمونه‌ها از داخل دستگاه بخار خارج شدند.

۲-۶-۱- آزمایش مقاومت خمشی

در این تحقیق از یک دستگاه آزمایش مقاومت خمشی سه نقطه‌ای مطابق با استاندارد ASTM-C 78 استفاده شد [۵۵]. در آزمایش مقاومت خمشی، سرعت بارگذاری دستگاه در محدوده ۰/۹ تا ۱/۱۲ میلی متر بر دقیقه تنظیم شد. سپس تنش ترک خوردگی (مقاومت خمشی یا مدول گسیختگی) مطابق رابطه ۱ بدست آمد.

$$\sigma = \frac{3PL}{2bd^2} \quad (1)$$

که در این رابطه تنش خمشی، P حداکثر نیروی اعمال شده، L فاصله بین دو تکیه گاه، b عرض نمونه و d ضخامت نمونه است. شکل ۴ دستگاه آزمایش مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.

۲-۶-۲- آزمایش مقاومت فشاری

یکی از اصلی ترین و مهمترین ویژگی‌های بتن سخت شده مقاومت فشاری بتن آن است. اهمیت مقاومت فشاری بتن به حدی زیاد است که



شکل ۴. دستگاه آزمایش مقاومت خمشی.

Fig. 4. Bending strength testing device.



شکل ۵. دستگاه آزمایش مقاومت فشاری.

Fig. 5. Compressive strength testing device.

می‌توان آن را به عنوان معیاری برای سنجش اولیه تمام ویژگی‌های بتن دانست. در واقع در پژوهش حاضر مقاومت فشاری به جهت مشخص نمودن خواص مکانیکی نمونه‌های RPC تولید شده مورد استفاده قرار گرفته است. برای سنجش مقاومت فشاری نمونه‌ها از یک جک بتن شکن با ظرفیت ۲۰۰۰ کیلونیوتن استفاده شد. این آزمایش بر اساس استاندارد ASTM-C109 انجام شده است [۵۵]. سرعت وارد کردن نیرو به نمونه ۰/۲ مگاپاسکال بر ثانیه تنظیم شد. همچنین دقت شد که نمونه کاملاً در وسط دستگاه قرار گیرد. برای تعیین مقاومت فشاری نمونه‌ها، با ثبت میزان نیرویی که از جانب دستگاه به نمونه‌ها وارد شد، مقاومت فشاری تعیین گردید. شکل ۵ دستگاه آزمایش مقاومت خمشی را نشان می‌دهد.

۳- نتایج

در این مطالعه، مقاومت خمشی و مقاومت فشاری نمونه‌ها مورد آزمایش قرار گرفته‌اند تا به تحلیل دقیق‌تری از رفتار مکانیکی آن‌ها پرداخته شود. هر ۹ طرح اختلاط در ۴ سری برای تعیین مقاومت ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه ساخته شدند. در هر مرتبه ۶ نمونه مقاومت فشاری و ۶ نمونه مقاومت خمشی ساخته شد که در مجموع ۲۱۶ نمونه مقاومت فشاری و ۲۱۶ نمونه مقاومت خمشی ساخته شدند. پس از انجام آزمایش‌ها میانگین اعداد به دست آمده را حساب نموده و سپس عددی که نهایتاً ۵٪ با عدد میانگین فاصله داشت، قابل قبول واقع شد. ولی چنانچه عدد فاصله‌ی بیشتر از ۵٪ با میانگین اعداد داشت، بعنوان عدد مردود در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری و خمشی در جدول ۵ قابل مشاهده هستند.

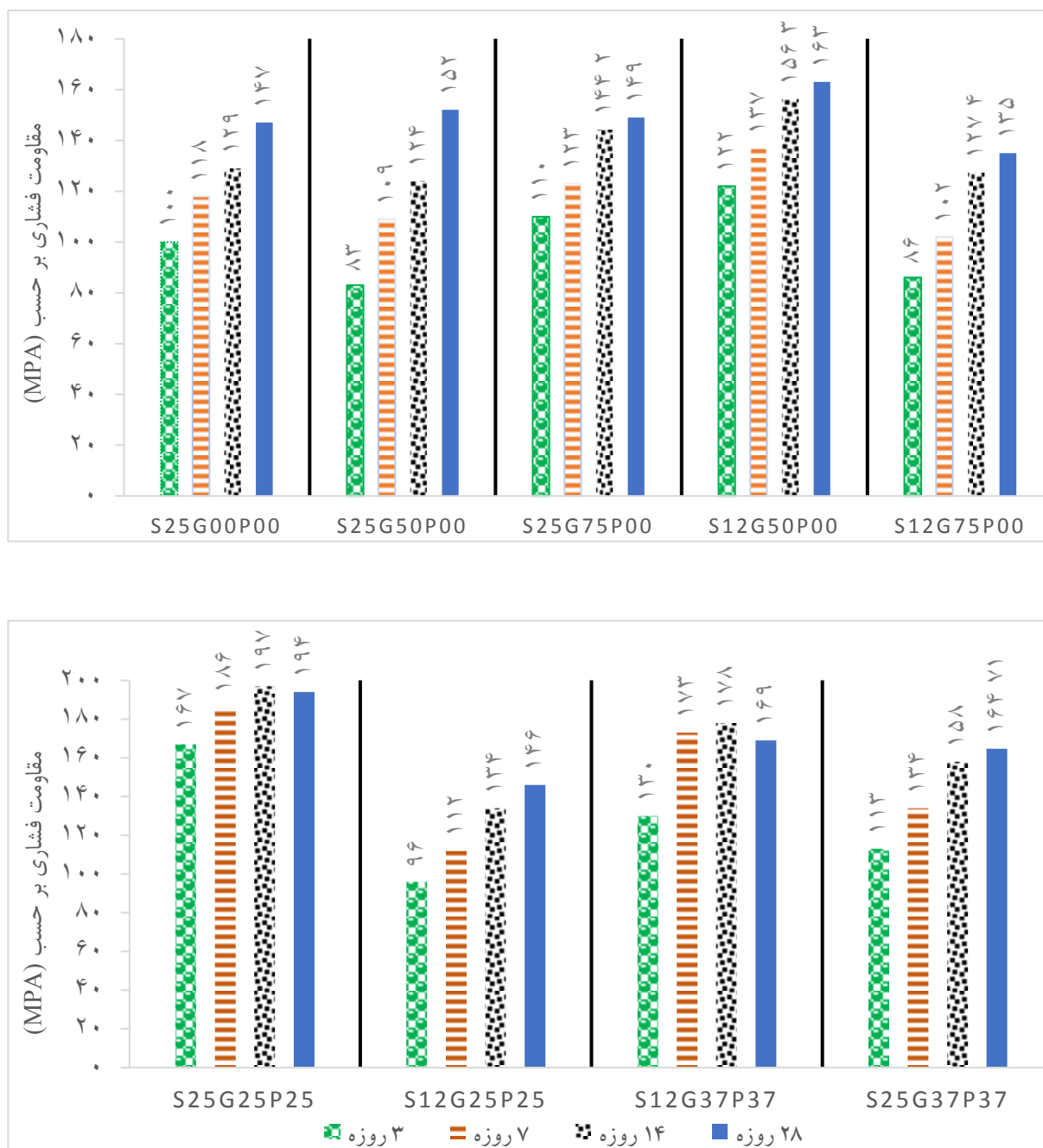
۳-۱- نتایج مقاومت فشاری

در شکل ۶ نتایج مقاومت فشاری نمونه‌ها مشخص شده است. در یک نگاه کلی میتوان گفت که مقاومت فشاری همه نمونه‌ها با افزایش سن، روند افزایشی داشته است؛ اما طرح S25G25P25 در سن ۱۴ روز

جدول ۵. نتایج آزمایش مقاومت فشاری و خمشی نمونه‌ها.

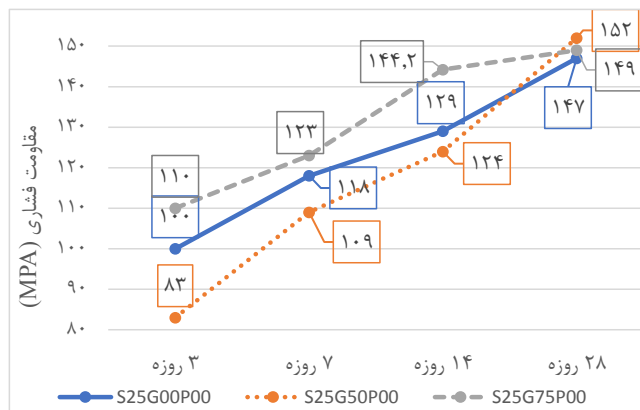
Table 5. Compressive and flexural strength test results of the samples.

نام طرح	مقاومت فشاری بر حسب مگاپاسکال (MPa)				مقاومت خمشی بر حسب مگاپاسکال (MPa)			
	۳ روزه	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	۳ روزه	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه
S25G00P00	۱۰۰	۱۱۸	۱۲۹	۱۴۷	۹	۱۴/۸	۱۷	۱۹
S25G50P00	۸۳	۱۰۹	۱۲۴	۱۵۲	۷/۷۱	۱۳	۲۰/۳	۲۳
S25G75P00	۱۱۰	۱۲۳	۱۴۴/۲	۱۴۹	۱۰	۱۵/۳۳	۱۸/۱۳	۲۱/۳
S12G50P00	۱۲۲	۱۳۷	۱۵۶/۳	۱۶۳	۱۵	۱۸/۷۴	۲۲/۹۱	۲۵/۹۴
S12G75P00	۸۶	۱۰۲	۱۲۷/۴	۱۳۵	۸/۶	۱۲	۱۵/۸۹	۱۷/۴
S25G25P25	۱۶۷	۱۸۶	۱۹۷	۱۹۴	۱۲/۴۲	۱۹	۲۱/۸۳	۲۳/۷۹
S12G25P25	۹۶	۱۱۲	۱۳۴	۱۴۶	۱۱	۱۶/۳۹	۱۹/۴۸	۱۹/۱۲
S12G37P37	۱۲۲	۱۷۵/۱	۱۶۹/۶	۱۶۵	۱۳	۱۸/۲	۲۰	۲۱
S25G37P37	۱۱۳	۱۳۴	۱۵۸	۱۶۴/۷۱	۱۴/۹	۱۹	۲۳/۷۴	۲۶

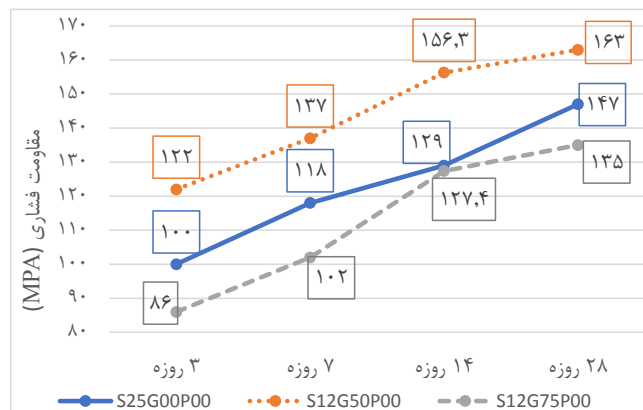


شکل ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها.

Fig. 6. Compressive strength test results of the samples.



الف



ب

شکل ۷. تأثیر میزان مصرف ضایعات گرانیت بر مقاومت فشاری.

Fig. 7. Effect of granite waste consumption on compressive strength.

است. ولی با کاستن از میزان میکروسیلیس و همزمان جایگزینی ۷۵٪ از ماسه سیلیسی با پودر گرانیت، مقاومت فشاری در حدود ۹٪ کاهش یافته است. دلیل این موضوع را میتوان کاسته شدن از وزن مجموع سیمان و میکروسیلیس و همچنین افزوده شدن نسبت آب به مواد سیمانی دانست.

در شکل ۷ همچنین نکته جالب توجه دیگر روند افزایش مقاومت در طی زمان تا ۲۸ روز است. این روند برای همه حالات عمدتاً افزایشی است؛ لیکن با افزایش درصد جایگزینی از ۵۰ به ۷۵٪ شیب منحنی کاسته شده است. همچنین بر اساس مراجع موجود میتوان این تغییر شیب را با افزایش تخلخل مرتبط دانست [۲۵].

۳-۱-۲- تأثیر ضایعات ترکیبی بر مقاومت فشاری

در شکل ۸ نمودارهای تغییرات مقاومت فشاری نمونه های حاوی ضایعات ترکیبی در سنین مختلف در دو دسته نمونه های ۲۵٪ و ۱۲/۵٪ میکروسیلیس نشان داده شده است.

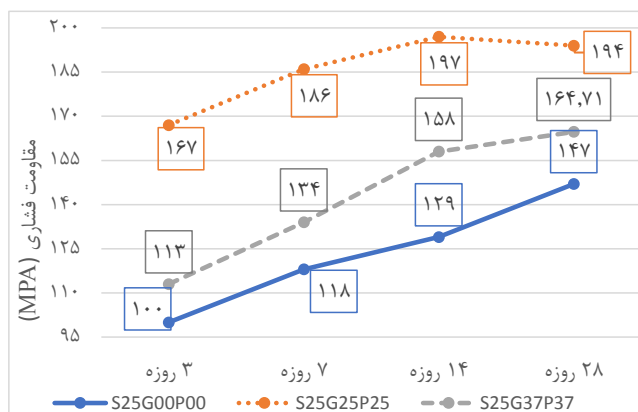
با بررسی مقادیر در شکل ۸ و جدول ۵ می توان دید که در نمونه های حاوی میکروسیلیس بیشتر، باز هم مشابه حالت استفاده از ضایعات گرانیت تنها، درصد جایگزینی ۵۰٪ تأثیر بهتری در افزایش مقاومت فشاری داشته است. از سوی دیگر با مقایسه با حالت استفاده از ضایعات گرانیت به تنهایی، مشخص می شود که استفاده همزمان از ضایعات گرانیت و پرسلان به میزان بسیار بیشتری بر مقاومت فشاری RPC مؤثر بوده است (افزایش ۳۲ درصدی مقاومت فشاری در این حالت در مقایسه با افزایش ۳ درصدی

و طرح S12G37P37 در سن ۷ روز بیشترین مقاومت را از خود نشان داده اند. در ادامه در چهار بخش مجزا، تأثیر هر یک از عوامل «ضایعات گرانیت»، «ترکیب ضایعات گرانیت و پرسلان»، «ضایعات پرسلانی» و «میکروسیلیس» بر مقاومت فشاری مورد بررسی دقیق تر قرار خواهد گرفت.

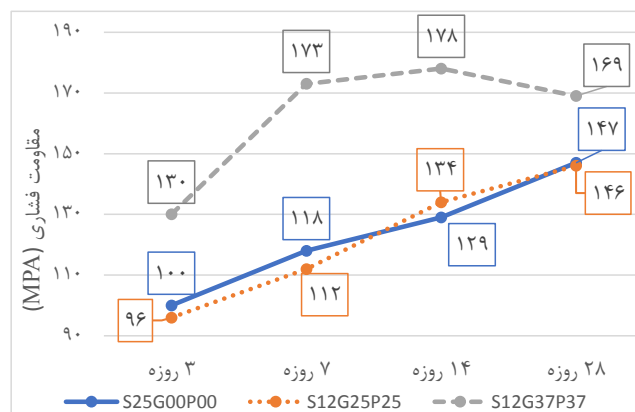
۳-۱-۱- تأثیر ضایعات گرانیت بر مقاومت فشاری

در شکل ۷ تأثیر میزان مصرف ضایعات گرانیت بر مقاومت فشاری نمونه ها در سنین مختلف نشان داده شده است. این تأثیر همچنین در دو دسته نمونه های دارای ۱۲/۵٪ و ۲۵٪ میکروسیلیس در این شکل قابل مشاهده است.

با بررسی اعداد مقاومت فشاری ۲۸ روزه در شکل ۷ و جدول ۵ ملاحظه می شود که نمونه های حاوی ۵۰٪ ضایعات گرانیت به جای ماسه سیلیسی، بیشترین افزایش مقاومت فشاری را به خود اختصاص داده است. این افزایش برای نمونه های حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس در حدود ۳٪ و برای نمونه های حاوی ۱۲/۵٪ میکروسیلیس ۱۰٪ بوده است. نتیجه اول (نمونه های حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس) در تحقیقات گذشته نیز مشاهده شده است [۲۷]؛ لیکن نتیجه دوم (نمونه های حاوی ۱۲/۵٪ میکروسیلیس) از نتایج قابل توجه تحقیق حاضر است. دلیل این افزایش مقاومت را میتوان در سطح مخصوص بسیار بالای مصالح ریزدانه گرانیتی و مقاومت ذاتی آنها جستجو کرد. این در حالی است که با افزایش درصد جایگزینی از ۵۰ به ۷۵٪، در نمونه های حاوی میکروسیلیس بیشتر، درصد افزایش مقاومت فشاری تقریباً ۱٪ بوده



الف



ب

شکل ۸. تأثیر میزان مصرف ضایعات ترکیبی بر مقاومت فشاری.

Fig. 8. Effect of mixed waste consumption rate on compressive strength.

در حالت جایگزینی ۵۰٪ از ماسه سیلیسی با ضایعات گرانیت تنها، در تمام سنین تا ۲۸ روز مقاومت فشاری نمونه ها با میزان میکروسیلیس کمتر (۱۲/۵٪)، بیش از نمونه های با میزان میکرو سیلیس بیشتر (۲۵٪) بوده است. این نتیجه در حالت جایگزین ۷۵٪ از ماسه سیلیسی نقض شده است. ولی در حالت جایگزینی ۷۵٪ از ماسه سیلیسی با ضایعات گرانیت تنها، در تمام مدت زمان تا ۲۸ روز، مقاومت از نمونه شاهد بالاتر بوده است. این در حالی است که در حالت جایگزینی ۵۰٪ از ماسه سیلیسی با ضایعات گرانیت و وجود ۱۲/۵٪ میکروسیلیس در تمام مدت تا ۲۸ روز مقاومت بیش از نمونه شاهد بوده ولی در حالت استفاده از ۲۵٪ میکروسیلیس بعد از ۱۴ روز مقاومت نمونه از نمونه شاهد بالاتر رفته است.

در حالت استفاده از ضایعات ترکیبی (شکل ۹-ج و ۹-د) نتایج متفاوت هستند. به این صورت که در جایگزینی ۵۰٪ نمونه دارای ۲۵٪ میکروسیلیس در تمام مدت تا ۲۸ روز مقاومت بالاتری نشان داد است ولی در حالت جایگزینی ۷۵٪ نمونه دارای ۱۲/۵٪ میکروسیلیس مقاومت بیشتری داشته است. علت این امر را میتوان افزایش میزان دانه های تیز گوشه پسران بیان نمود.

۳-۱-۴- تأثیر ضایعات سرامیک پسران بر مقاومت فشاری

منحنی های نشان داده شده در شکل ۱۰ به گونه ای تنظیم شده اند که تفاوت تغییرات مقاومت فشاری در سنین مختلف را در یک میزان ثابت میکروسیلیس (۲۵٪ یا ۱۲/۵٪) بین نمونه های حاوی ضایعات گرانیتی تنها

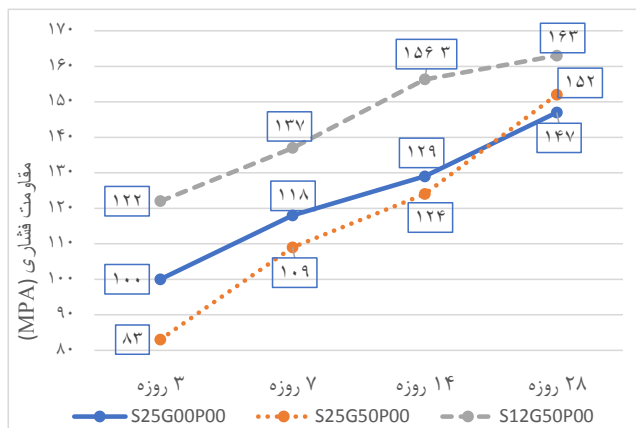
در حالت استفاده از گرانیت تنها)، دلیل اصلی این تأثیر چشمگیر را می توان در گوشه دار بودن خرده های سرامیک بازیافتی و همچنین جذب آب بسیار ناچیز این دانه ها دانست.

در کنار نتیجه پیش گفته، یک مورد بسیار جالب توجه دیگر آن است که در حالت استفاده از ضایعات ترکیبی آن هم به میزان ۷۵٪ وزن ماسه سیلیسی، با کاهش میزان میکروسیلیس مصرفی (آن هم به میزان ۵۰٪) هیچ تغییری در میزان افزایش مقاومت فشاری حاصل نشده است. این نتیجه را میتوان یکی از بهترین نتایج تحقیق حاضر دانست. دلیل این امر در مقایسه با حالت استفاده تنها از ضایعات گرانیت قابل تبیین است. به نظر میرسد که در این حالت تیز گوشه بودن و جذب آب کمتر دانه های پسران نقش عمده ای را ایفا نموده است.

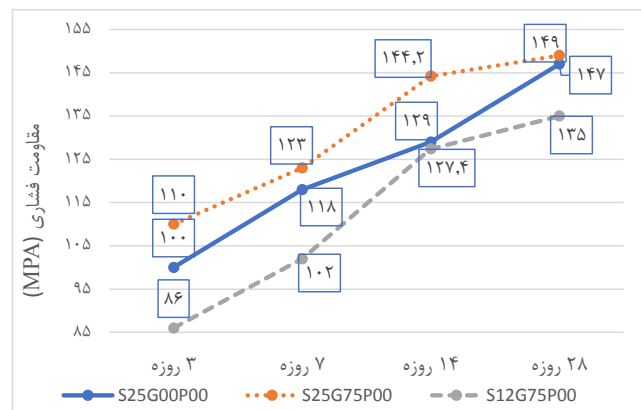
با مقایسه شکل های ۸ و ۷ مشخص می شود که در روند عمل آوری تا ۲۸ روز، در این حالت نیز شیب منحنی افزایش مقاومت بر حسب سن بتن پس از ۱۴ روز، کم شده و حتی در حالاتی منفی شده است که این مسئله مربوط به درصد بالای جایگزینی و درصد پایین تر میکرو سیلیس هستند که هر دو با توجه به موارد پیش گفته قابل تفسیر می باشند.

۳-۱-۳- تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری

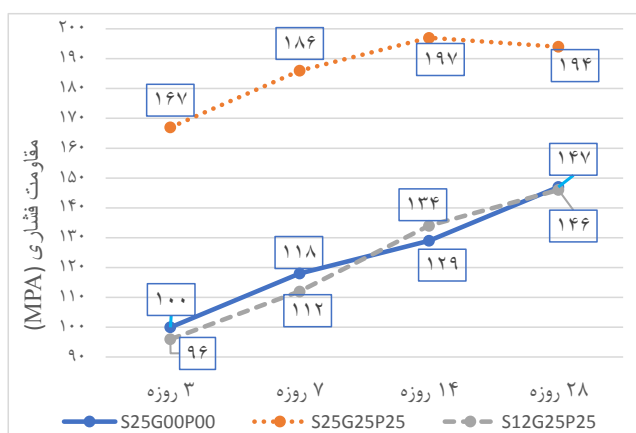
در شکل ۹ در قاب ۴ تصویر، تأثیر میزان میکروسیلیس در دو نسبت ۲۵٪ و ۱۲/۵٪ به همراه یا بدون ضایعات گرانیت و ضایعات ترکیبی قابل مشاهده است. با نگاهی به دو شکل ۹-الف و ۹-ب مشاهده می شود که



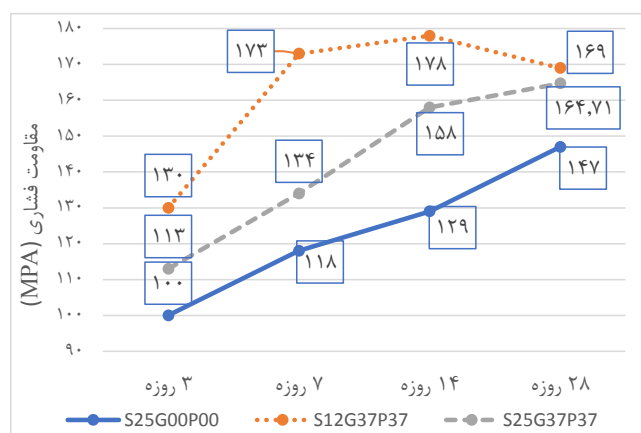
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۹. تأثیر میزان مصرف میکروسیلیس بر مقاومت فشاری.

Fig. 9. Effect of microsilica consumption on compressive strength.

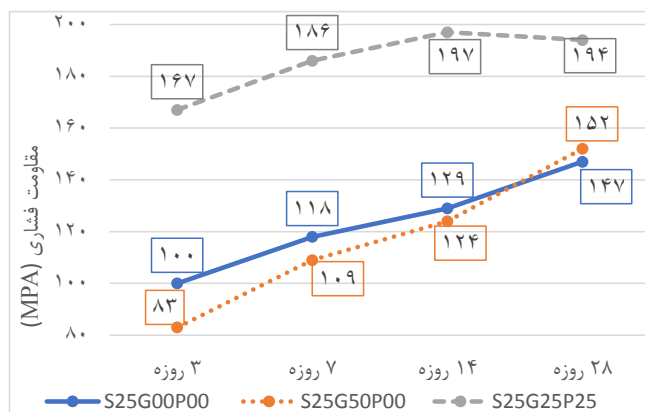
لازم برای پوشیده شدن این دانه ها کمتر است. به این ترتیب حتی با میزان کمتر میکروسیلیس نیز درصد افزایش مقاومت قابل توجه است.

۳-۲- نتایج مقاومت خمشی

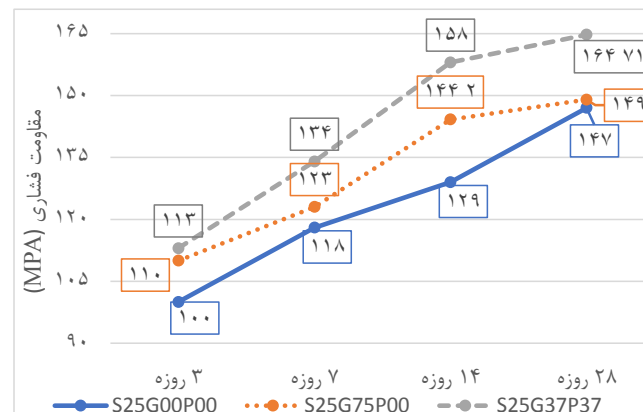
پیش تر در جدول ۵ نتایج مقاومت خمشی برای هر ۹ طرح اختلاط بتن RPC ارائه شده بود. در شکل ۱۱ نتایج مقاومت خمشی نمونه ها در سنین مختلف تا ۲۸ روز به صورت نمودار میله ای نشان داده است. در این نمودار ابتدا مقاومت خمشی نمونه شاهد در سنین ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز آمده است. سپس نمودارهای میله ای مربوط به مقاومت خمشی نمونه های حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس به ترتیب جایگزینی با ضایعات گرانیت تنها و ضایعات ترکیبی آمده است. در آخر نیز نمودارهای مشابه برای نمونه های حاوی

یا ضایعات ترکیبی نشان می دهند. همچنین در جدول ۵ ردیف های مربوط به نمونه های حاوی میکروسیلیس کمتر (۱۲/۵٪) با رنگ خاکستری مشخص شده اند.

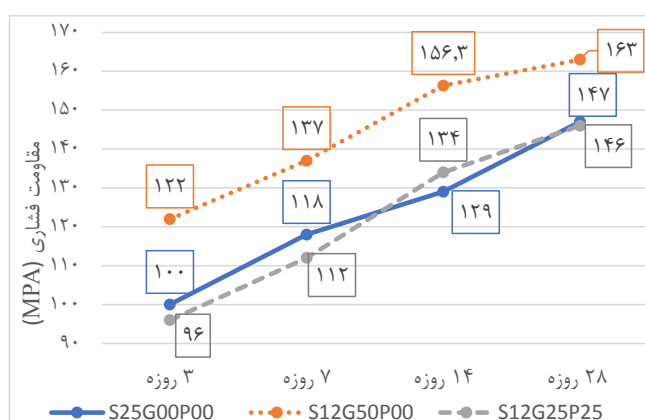
در هر چهار منحنی شکل ۱۰ مشاهده می شود که جایگزینی ماسه سلیسی با ضایعات ترکیبی در تمام مدت عمل آوری تا ۲۸ روز منجر به حصول مقاومت فشاری بالاتری نسبت به نمونه شاهد و نمونه حاوی ضایعات گرانیت تنها شده است. علت این امر را نیز میتوان در «تیز گوشه بودن خرده های سرامیک»، «جذب آب کمتر آنها» و «بالا بودن مقاومت سنگدانه های سرامیک پسران» جستجو نمود. خاطر نشان می شود که دانه بندی سنگدانه های سرامیک پسران درشت تر از سنگدانه های گرانیت بوده است (شکل ۱). از این رو سطح مخصوص آنها کمتر است و میزان خمیر سمیان



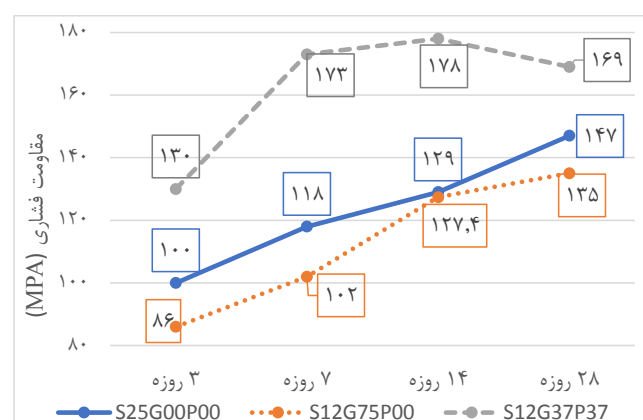
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۰. تأثیر میزان مصرف ضایعات سرامیک بر مقاومت فشاری

Fig. 10. Effect of ceramic waste consumption on compressive strength

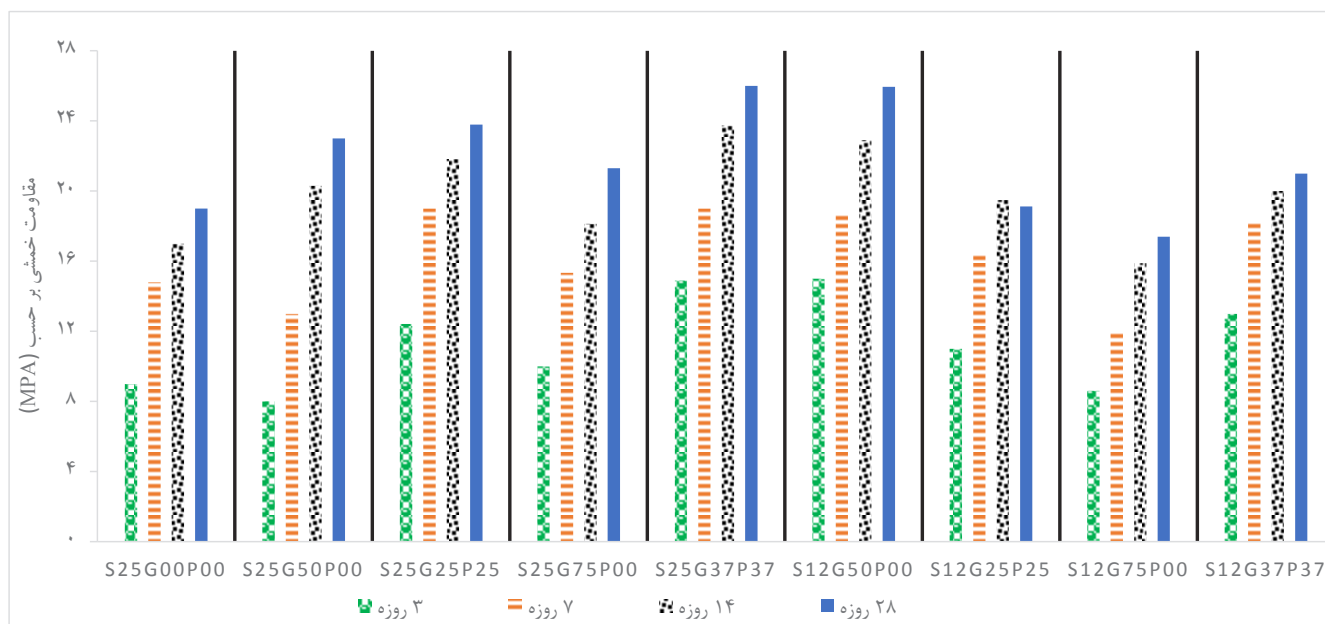
۳-۲-۱- برآورد مقاومت خمشی نمونه ها

همانگونه که در مقدمه بیان شد، مقاومت خمشی قابل توجه بتن پودری واکنشی یکی از مزایای مهم آن است. در جدول ۵ مقادیر مقاومت خمشی (مدول گسیختگی یا f_r) و فشاری هر یک از بتن های ساخته شده با طرح اختلاط مورد نظر در پژوهش حاضر ارائه شد. حال در جدول ۶ نسبت مقاومت خمشی با مقاومت فشاری ۲۸ روزه (f_c) و با جذر مقاومت فشاری ارائه شده است. شایان ذکر است که در مراجع موجود معمولاً مقاومت کششی یا به صورت درصدی از مقاومت فشاری ذکر میگردد و یا به صورت ضریبی از مقاومت فشاری ($f_r = \alpha \sqrt{f_c}$). به این ترتیب در جدول ۶ ضریب α برای نمونه های مورد بررسی ارائه شده است. در این جدول نسبت مقاومت خمشی و فشاری نمونه ها به نمونه شاهد نیز گزارش شده است.

۱۲/۵٪ میکروسیلیس نشان داده شده است. در این نمودار نکات زیر قابل

توجه هستند:

- در تمام حالات با افزایش سن نمونه تا ۲۸ روز مقاومت خمشی افزوده شده است. به جز نمونه حاوی ۱۲/۵٪ میکروسیلیس و جایگزینی ۵۰٪ از ماسه سیلیسی با ضایعات ترکیبی گرانیت و پرسلان.
- در نمونه های حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس، جایگزینی ماسه سیلیسی با ضایعات ترکیبی تأثیری بیشتری بر افزایش مقاومت کششی داشته است. این نتیجه در مورد مقاومت فشاری نیز دیده شد.
- در نمونه های حاوی ۱۲/۵٪ میکروسیلیس، به طور میانگین در حالات مختلف جایگزینی، مقاومت کششی افزایش یافته است. به جز نمونه حاوی ۷۵٪ جایگزینی ماسه سیلیسی با ضایعات گرانیت تنها.



شکل ۱۱. نتایج آزمایش مقاومت خمشی نمونه‌ها.

Fig. 11. Results of flexural strength test of samples.

جدول ۶. مقادیر مدول گسیختگی و نسبت آن با مقاومت فشاری و جذر مقاومت فشاری

Table 6. Values of modulus of rupture and its ratio to compressive strength and root of compressive strength.

نام طرح	f_c	% افزایش	f_r	% افزایش	$\alpha = f_r / \sqrt{f_c}$	f_r / f_c (%)
S25G00P00	۱۴۷	---	۱۹	---	۱/۵۷	۰/۱۳
S25G50P00	۱۵۲	+۳	۲۳	+۲۱	۱/۸۷	۰/۱۵
S25G75P00	۱۴۹	+۱	۲۱/۳	+۲۱	۱/۷۴	۰/۱۴
S12G50P00	۱۶۳	+۱۱	۲۵/۹۴	+۳۷	۲/۰۴	۰/۱۶
S12G75P00	۱۳۵	-۸	۱۷/۴	-۹	۱/۵۰	۰/۱۳
S25G25P25	۱۹۴	+۳۲	۲۳/۷۹	+۲۵	۱/۷۱	۰/۱۲
S12G25P25	۱۴۶	-۱	۱۹/۱۲	۰	۱/۵۸	۰/۱۳
S12G37P37	۱۶۵	+۱۲	۲۱	+۱۱	۱//۶۳	۰/۱۳
S25G37P37	۱۶۴/۷۱	+۱۲	۲۶	+۳۷	۲/۰۱	۰/۱۶

۳-۳- مقایسه اقتصادی

بر اساس قیمت‌های موجود در بازار مصالح ساختمانی قیمت هرکیلو ماسه‌سیلیسی ۵۰۰۰ تومان و هرکیلو ضایعات گرانیت ۳۲۰ تومان و هرکیلو ضایعات سرامیک ۲۱۴۰ تومان است. هزینه‌های فوق با احتساب حمل و نقل و خرد کردن سرامیک می‌باشد. بر اساس این قیمت‌ها با ۵۰٪ جایگزینی گرانیت به جای ماسه‌سیلیس، ۴۶/۸٪ و با ۷۵٪ جایگزینی گرانیت به جای ماسه‌سیلیس، ۷۰/۲ درصد هزینه‌ها کاهش یافت.

همچنین در طرح ۷۵٪ جایگزینی ترکیبی ۵۶/۵۵٪ و در طرح با ۵۰٪ جایگزینی ترکیبی ۳۷/۷٪ در هزینه‌ها صرفه جویی شد. این بررسی در حالی است که در ۴ دسته از طرح اختلاط‌های ساخته شده در پژوهش حاضر، میزان میکروسیلیس نیز ۵۰٪ کاهش داشته که این خود به کم شدن قیمت تمام شده خواهد انجامید.

۴- نتیجه گیری

به طور خلاصه، در این تحقیق طرح‌های اختلاط بتن پودری واکنشی، با میکروسیلیس ۱۲/۵٪ و ۲۵٪ وزن سیمان، ضایعات به میزان ۵۰٪ و ۷۵٪ وزن ماسه‌ی سیلیسی با ضایعات گرانیت یا ضایعات ترکیبی گرانیت و سرامیک پسران به میزان مساوی تعریف و نمونه‌های تست مقاومت فشاری و خمشی ساخته شدند. در همه طرح‌ها نسبت آب به مواد سیمانی ۲۰٪ و ابر روان کننده ۲٪ وزن سیمان تعیین شد. همچنین عمل آوری در دمای ۹۵ درجه سانتی‌گراد با بخار آب انجام گرفت. مهمترین نتایج حاصل شده به قرار زیر است:

۱- در تمام حالات با جایگزینی گرانیت افزایش مقاومت فشاری دیده شده مگر در حالتی که همزمان با ۷۵٪ جایگزینی با گرانیت میکروسیلیس مصرفی نصف شده است.

۲- در حالت ترکیبی با درصد جایگزینی ۵۰٪ و میکروسیلیس ۲۵٪، ۳۲٪ افزایش مقاومت فشاری ملاحظه شد.

۳- در این حالت حتی با نصف شدن میزان میکروسیلیس و ۷۵٪ جایگزینی ماسه‌ی سیلیسی، مقاومت فشاری رشد ۱۲ درصدی نشان داد.

۴- طرح S25G50P00 که حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس و ۵۰٪ جایگزینی با ضایعات گرانیت بود، نسبت به طرح شاهد ۳/۴٪ افزایش مقاومت داشت. این در حالی است که با کاهش میکروسیلیس از ۲۵٪ به ۱۲/۵٪، مقاومت فشاری طرح S12G50P00 حدود ۱۱٪ افزایش یافت.

۵- به طور میانگین مقدار ۵۰٪ ضایعات گرانیت، تأثیر بهتری نسبت

بررسی مقادیر جدول ۶ نیز نشان دهنده‌ی موارد زیر است:

اولاً در هر دو دسته نمونه‌های حاوی گرانیت تنها و حاوی ترکیب گرانیت و پسران، میزان مقاومت خمشی نسبت به نمونه شاهد افزایش داشته است. (به جز یک نمونه که مقاوم‌تر خمشی بدون تغییر مانده است. در مورد این یک نمونه می‌توان کم شدن میزان میکروسیلیس را عامل ایجاد این نتیجه دانست. ثانیاً بیشترین میزان افزایش مقاومت خمشی مربوط به دو نمونه S12G50P00 و S25G37P37 است. جالب توجه است که در نمونه اول جایگزین ۵۰٪ از ماسه‌ی سیلیسی با گرانیت تنها را داشته ایم و در نمونه دوم جایگزینی ۷۵٪ ماسه‌ی سیلیسی با دانه‌های ترکیبی. به این ترتیب مشاهده می‌شود که تأثیر جایگزینی ترکیبی حتی در حد ۷۵٪ از ماسه‌ی سیلیسی بر مقاومت خمشی تأثیر چشمگیری بوده است. علت این امر را می‌توان در درگیری دانه‌های پسران به دلیل تیز گوشه بودن آنها دانست. این امر منجر به در هم قفل شدگی دانه‌ها^۱ و افزایش مقاومت خمشی شده است.

ثالثاً میزان افزایش نسبت مقاومت خمشی به فشاری در نمونه‌های حاوی گرانیت تنها نسبت به نمونه‌های حاوی ضایعات ترکیبی گرانیت و پسران بیشتر بوده است (۱۱٪ افزایش در مقایسه با ۱٪ افزایش در میانگین نسبت یاد شده به ترتیب).

رابعاً نسبت مقاومت خمشی به جذر مقاومت فشاری نیز در نمونه‌های حاوی ضایعات گرانیت به تنهایی، نسبت به نمونه‌های حاوی ضایعات ترکیبی گرانیت و سرامیک پسران، بیشتر بوده است.

دلیل این اتفاق را می‌توان در موارد زیر جستجو نمود:

۱- سطح مخصوص بیشتر ضایعات گرانیت که نگاه به منحنی دانه بندی (شکل ۱) و ریزدانه تر بودن این مصالح نیز تطابق دارد.

۲- مقاومت ذاتی دانه‌های گرانیت.

شایان ذکر است که افزایش مقاومت خمشی که ارتباط مستقیم با مقاومت فشاری دارد از نتایج تحقیقات سایر محققان نیز قابل استخراج است [۲۷-۲۹]. لیکن در تحقیق حاضر اولاً در هر دو حالت استفاده از ضایعات گرانیت به تنهایی و یا در ترکیب با سرامیک پسرانی، حتی با جایگزینی ۷۵٪ از ماسه‌ی سیلیسی مقاومت خمشی به میزان قابل توجه نسبت به نمونه شاهد افزوده شده است؛ ثانیاً حتی در حالت استفاده کمتر از میکروسیلیس (در حد ۵۰٪، ردیف‌های پررنگ شده در جدول ۶) با استفاده از ضایعات گرانیت به تنهایی یا در ترکیب با خرده سرامیک پسران، مقاومت خمشی افزایش مشهود داشته است.

- 4518.
- [2] S. Ahmad, O.S.B. Al-Amoudi, S.M. Khan, M. Maslehuddin, Effect of silica fume inclusion on the strength, shrinkage and durability characteristics of natural pozzolan-based cement concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 17 (2022) e01255.
- [3] M. Cheyrezy, V. Maret, L. Frouin, Microstructural analysis of RPC (reactive powder concrete), *Cement and concrete research*, 25(7) (1995) 1491-1500.
- [4] M.S. Radhi, Z.M.A. Rasoul, A.J. Alsaad, Mechanical behavior of modified reactive powder concrete with waste materials powder replacement, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 65(2) (2021) 649-655.
- [5] P. Richard, M.H. Cheyrezy, Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, *Special Publication*, 144 (1994) 507-518.
- [6] J. Song, S. Liu, Properties of reactive powder concrete and its application in highway bridge, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016(1) (2016) 5460241.
- [7] Y.-W. Chan, S.-H. Chu, Effect of silica fume on steel fiber bond characteristics in reactive powder concrete, *Cement and concrete research*, 34(7) (2004) 1167-1172.
- [8] S. Ahmad, A. Zubair, M. Maslehuddin, Effect of key mixture parameters on flow and mechanical properties of reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 99 (2015) 73-81.
- [9] P.Y. Blais, M. Couture, PRECAST, prestressed pedestrian BRIDGE-WORLD'S first reactive powder concrete bridge, *PCI journal*, 44(5) (1999).
- [10] P.N. Hiremath, S.C. Yaragal, Effect of different curing regimes and durations on early strength development of reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 154 (2017) 72-87.
- [11] J. Resplendino, F. Toulemonde, *Designing and Building with UHPFRC*, John Wiley & Sons, 2013.
- [12] B. Asteray, W. Oyawa, S. Shitote, Experimental investigation on compressive strength of recycled reactive powder concrete containing glass powder and rice husk ash, *Journal of Civil Engineering Research*, ۵۷، شماره ۹، سال ۱۴۰۴، صفحه ۱۵۷۱ تا ۱۵۹۶
- به مقدار ۷۵٪، بر مقاومت فشاری داشت. در طرح‌هایی که ضایعات گرانیت از ۵۰٪ به ۷۵٪ افزایش یافت، درصد افزایش مقاومت فشاری بتن کاهش یافت.
- ۶- طرح S12G50P00 با حاوی ۵۰٪ ضایعات گرانیت و ۱۲/۵٪ میکروسیلیس بیشترین افزایش مقاومت فشاری نسبت به طرح شاهد را در طرح‌های حاوی ضایعات گرانیت تنها، کسب کرد (۳۶٪ افزایش).
- ۷- کمترین مقاومت فشاری در میان تمام طرح‌ها با ۸٪ کاهش نسبت به طرح شاهد، در طرح S12G75P00 که حاوی ۷۵٪ ضایعات گرانیت به همراه ۱۲/۵٪ میکروسیلیس بود، مشاهده شد.
- ۸- بهترین عملکرد میکروسیلیس با دوز سیلیس ۱۲/۵٪، در طرح S12G37P37 که حاوی ۷۵٪ ضایعات ترکیبی بود، با ۱۵٪ افزایش مقاومت نسبت به طرح شاهد مشاهده شد.
- ۹- طرح S12G75P00 با ۱۲/۵٪ میکروسیلیس و ۷۵٪ ضایعات گرانیت، در حدود ۸/۵٪ نسبت به طرح شاهد، با افت مقاومت خمشی همراه بود؛ همچنین کمترین مقاومت را در بین تمام طرح‌ها در سنین مختلف کسب کرد.
- ۱۰- در طرح‌های حاوی ضایعات ترکیبی، مقاومت خمشی رابطه مستقیم با مقدار میکروسیلیس دارد؛ یعنی با افزایش درصد میکروسیلیس، مقاومت نیز افزایش می‌یابد.
- ۱۱- در طرح‌های حاوی ضایعات ترکیبی، طرح S12G25P25 با ۵۰٪ ضایعات ترکیبی و ۱۲/۵٪ میکروسیلیس، کمترین مقاومت فشاری را که از طرح شاهد نیز کمتر بود، کسب کرد.
- ۱۲- مقاومت خمشی طرح‌های حاوی ضایعات ترکیبی حاوی ۲۵٪ میکروسیلیس مقاومت بهتری نسبت به طرح‌های حاوی ۱۲/۵٪ میکروسیلیس از خود نشان دادند.
- ۱۳- نتایج حاصل از تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت خمشی، شباهت بسیاری به نتایج حاصل از تأثیر میکروسیلیس بر مقاومت فشاری داشت؛ همچنین در طرح‌های حاوی ضایعات گرانیت نیز این شباهت در فشار و خمش پا برجا بود.

منابع

- [1] H. Song, A. Ahmad, K.A. Ostrowski, M. Dudek, Analyzing the compressive strength of ceramic waste-based concrete using experiment and artificial neural network (ANN) approach, *Materials*, 14(16) (2021)

- Processing, 52 (2016).
- [22] M.A. Mas, J. Monzó, J. Payá, L. Reig, M.V. Borrachero, Ceramic tiles waste as replacement material in Portland cement, *Advances in Cement Research*, 28(4) (2016) 221-232.
- [23] O.A. Mayhoub, E.-S.A. Nasr, Y. Ali, M. Kohail, Properties of slag based geopolymer reactive powder concrete, *Ain Shams Engineering Journal*, 12(1) (2021) 99-105.
- [24] M.Á. Sanjuán, C. Andrade, Reactive powder concrete: Durability and applications, *Applied Sciences*, 11(12) (2021) 5629.
- [25] J. Ahmad, W. Alattyih, Y.M. Jebur, M. Alqurashi, N. Garcia-Troncoso, A review on ceramic waste-based concrete: A step toward sustainable concrete, *Reviews on Advanced Materials Science*, 62(1) (2023) 20230346.
- [26] L. Dvorkin, O. Bordiuzhenko, T. Tracz, K. Mróz, Optimizing porous concrete using granite stone-crushing waste: composition, strength, and density analysis, *Applied Sciences*, 14(16) (2024) 6934.
- [27] A. Minhajuddin, A. Saha, Performance evaluation of geopolymer concrete with waste granite powder as a sustainable alternative to sand, *Journal of Materials Science: Materials in Engineering*, 20(1) (2025) 20.
- [28] A. Huts, J. Konkol, V. Marchuk, Granite Dust and Silica Fume as a Combined Filler of Reactive Powder Concrete, *Materials*, 17(24) (2024) 6025.
- [29] T.A. Tawfik, A. Sičáková, E. Kuzielová, Š. Kušnir, A. Eštoková, M. Bálintová, N. Junáková, Sustainable reuse of waste ceramic tiles powder and waste brick powder as a replacement for cement on green high strength concrete properties, *Innovative Infrastructure Solutions*, 9(5) (2024) 166.
- [30] M.S. Savadkoobi, M. Reisi, Environmental protection based sustainable development by utilization of granite waste in Reactive Powder Concrete, *Journal of Cleaner Production*, 266 (2020) 121973.
- [31] S.D. Mohammed, H.K. Awad, R.K. Aboud, Compressive strength performance of reactive powder concrete using different types of materials as a partial replacement of
- 7(4) (2017) 124-129.
- [13] R.S. Edwin, E. Gruyaert, N. De Belie, Influence of intensive vacuum mixing and heat treatment on compressive strength and microstructure of reactive powder concrete incorporating secondary copper slag as supplementary cementitious material, *Construction and building materials*, 155 (2017) 400-412.
- [14] E. Pawluczuk, Recycled concrete powder as partial cement replacement in fine-grained concrete, *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 17 (2017) 169-176.
- [15] B. Zegardło, M. Szeląg, P. Ogrodnik, Ultra-high strength concrete made with recycled aggregate from sanitary ceramic wastes—The method of production and the interfacial transition zone, *Construction and Building Materials*, 122 (2016) 736-742.
- [16] P. Zhu, X. Mao, W. Qu, Z. Li, Z.J. Ma, Investigation of using recycled powder from waste of clay bricks and cement solids in reactive powder concrete, *Construction and building materials*, 113 (2016) 246-254.
- [17] A. Tiwari, S. Singh, R. Nagar, Feasibility assessment for partial replacement of fine aggregate to attain cleaner production perspective in concrete: A review, *Journal of Cleaner Production*, 135 (2016) 490-507.
- [18] P.N. Hiremath, S.C. Yaragal, Influence of mixing method, speed and duration on the fresh and hardened properties of Reactive Powder Concrete, *Construction and Building Materials*, 141 (2017) 271-288.
- [19] H.S. Gökçe, Ç. Yalçinkaya, M. Tuyan, Optimization of reactive powder concrete by means of barite aggregate for both neutrons and gamma rays, *Construction and building materials*, 189 (2018) 470-477.
- [20] L. Xiaoying, L. Jun, L. Zhongyuan, H. Li, C. Jiakun, Preparation and properties of reactive powder concrete by using titanium slag aggregates, *Construction and Building Materials*, 234 (2020) 117342.
- [21] M. Ulewicz, J. Halbiniak, Application of waste from utilitarian ceramics for production of cement mortar and concrete, *Physicochemical Problems of Mineral*

- [40] S. Arslan, N. Öksüzer, H. Gökçe, Improvement of mechanical and transport properties of reactive powder concrete using graphene nanoplatelet and waste glass aggregate, *Construction and Building Materials*, 318 (2022) 126199.
- [41] <https://www.iran-ifc.com>.
- [42] www.soroushstone.com.
- [43] www.isfahancement.com.
- [44] <https://chirook.ir>.
- [45] ASTM, ASTM C136/C136M, Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, in, ASTM Standards West Conshohocken, PA, USA, 2014.
- [46] B.S. Nasional, ASTM C117: 2012: Metode Uji Bahan yang Lebih Halus dari Saringan 75 mm (No. 200) dalam Agregat Mineral dengan Pencucian, Badan Standarisasi Nasional, 200 (2012).
- [47] A.S.f. Testing, Materials, Annual book of ASTM standards, ASTM C136-06 standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates, in, ASTM International West Conshohocken, PA, 2012.
- [48] M.A. Issa, Effect of portland cement (current ASTM C150/AASHTO M85) with limestone and process addition (ASTM C465/AASHTO M327) on the performance of concrete for pavement and bridge decks, Illinois Center for Transportation, 2014.
- [49] Y. Ju, K. Tian, H. Liu, H.-W. Reinhardt, L. Wang, Experimental investigation of the effect of silica fume on the thermal spalling of reactive powder concrete, *Construction and Building materials*, 155 (2017) 571-583.
- [50] K.P. Tian, Y. Ju, H.B. Liu, J.H. Liu, L. Wang, P. Liu, X. Zhao, Effects of silica fume addition on the spalling phenomena of reactive powder concrete, *Applied Mechanics and Materials*, 174 (2012) 1090-1095.
- [51] M. Vigneshwari, K. Arunachalam, A. Angayarkanni, Replacement of silica fume with thermally treated rice husk ash in Reactive Powder Concrete, *Journal of Cleaner Production*, 188 (2018) 264-277.
- [52] A. Committee, ASTM C 1240 Standard specification fine aggregate, *Key Engineering Materials*, 857 (2020) 39-47.
- [32] B. Venkatesan, V. Kannan, M. Sophia, Utilization of granite powder and glass powder in reactive powder concrete: Assessment of strength and long-term durability properties, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 49(6) (2022) 885-898.
- [33] G. Sheng, S. Jin, C. Li, Q. Bai, Uniaxial compressive stress-strain behavior of alkali activated steel slag powder-based reactive powder concrete (SSP-RPC), *Construction and Building Materials*, 453 (2024) 139038.
- [34] J. Abellan-Garcia, M. Molinares, N. Daza, Y.M. Abbas, M.I. Khan, Formulation of inexpensive and green reactive powder concrete by using milled-waste-glass and micro calcium-carbonate—A multi-criteria optimization approach, *Construction and Building Materials*, 409 (2023) 134167.
- [35] C. Jiang, W. Zhao, L. Li, Y. Qin, L. Lu, Influence of silica fume on pore structure, mechanical properties and carbon emission of reactive powder concrete prepared by ice crystal homogenization technology, *Case Studies in Construction Materials*, 21 (2024) e03972.
- [36] N.A. Farhan, M.N. Sheikh, M.N. Hadi, Alkali-activated reactive powder concrete with recycled and industrial steel fibres, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 178(6) (2024) 415-427.
- [37] Y. Zhou, H. Luo, K. Anand, A. Singh, Y.M. Xie, Sustainable use of ultrafine recycled glass in additive manufactured (3D printed) reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 419 (2024) 135556.
- [38] Y.R. Alkhaly, M. Hasan, Characteristics of reactive powder concrete comprising synthesized rice husk ash and quartzite powder, *Journal of Cleaner Production*, 375 (2022) 134154.
- [39] P. Kathirvel, G. Murali, Effect of using available GGBFS, silica fume, quartz powder and steel fibres on the fracture behavior of sustainable reactive powder concrete, *Construction and Building Materials*, 375 (2023) 130997.

- [۵۴] ه. نیکوسخن، سنگ گرانیت نطنز، in، ۱۴۰۲.
- [55] A.S.f. Testing, Materials, ASTM C293, Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), in, ASTM Philadelphia, 2001.
- for silica fume used in cementitious mixtures, in, United States: ASTM, 2005.
- [53] C. ASTM, 494: Standard Specifications for Chemical Admixtures for Concrete.[book auth.], ASTM International. Annual book of ASTM Standards. West Conshohocken: ASTM International, (2013).

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

H. Esmaili Malekabadi, S. B. Talaeitaba, Investigating the Effect of Using Granite Waste and Combining Porcelain Ceramic Waste on the Mechanical Behavior of Reactive Powder Concrete (RPC), Amirkabir J. Civil Eng., 57(9) (2025) 1571-1596.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23334.8145](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23334.8145)



