



Compressive Behavior and Durability of Concrete Containing Waste Aggregates as A Replacement of Coarse Aggregates and Marble Powder as a Replacement of Cement

Seyed Mohammad Reza Hasani¹, Mahdi Nematzadeh^{2*}

¹PhD Candidate, Faculty of Civil Engineering, Babol Noshirvani University, Babol, Iran.

²Associate Professor, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 11.16.2021

Revised: 02.04.2022

Accepted: 04.04.2022

Keyword:

Marble Powder
Waste Aggregates
Endurance
Compressive Strength
Porosity

*Corresponding Author:

Mahdi Nematzadeh

Email: m.nematzadeh@umz.ac.ir

ABSTRACT

Green concrete can be produced as environmentally friendly concrete using recycled materials. In this study, the compressive and endurance behavior of green concrete containing waste aggregates as a replacement to coarse (gravel) and cement-replaced marble powders was evaluated experimentally. In the present research, 10 mix designs in addition to the control sample mix design were constructed and compared. The main variables included the volume percentage of waste aggregates as replacement sand with percentages of 0, 25, 50 and 100, and the volume percentage of marble powder as replacement cement with percentages of 0, 10 and 20. Compressive strength at 28 days and water absorption percentage and density tests were performed to evaluate the endurance of concrete. According to the results, gravel substitute waste stone had a negative effect and cement substitute marble powder had a positive effect on the compressive strength of concrete. By replacing gravel with 100% waste stone, approximately 49% reduction in strength was observed compared to the control sample, and by replacing cement with 10% marble powder, approximately 13.4% increase in resistance was observed compared to the control sample, demonstrating the minimum and maximum changes in compressive strength of concrete compared to the control test, respectively.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Green concretes are known as environmentally friendly concretes that can be produced using recycled materials. In this research, an attempt was made to test the effects of waste aggregates used for smoothing stones in stone factories as a substitute for coarse grains and waste marble powder as a substitute for cement on the compressive strength and durability of concrete experimentally tested. The materials used are shown in Figure 1.



a) marble powder

b) waste aggregates (after sieving)

c) waste aggregates (before sieving)

Figure 1. Materials used in the experiment.

The method used in this research was wholly experimental. The amounts of marble powder replacing cement by weight were 0%, 10% and 20% and the amount of waste aggregates replacing coarse grain were 0%, 25%, 50% and 100% in the concrete mix design. In general, 30 cubic test specimens with dimensions of 150 x 150 x 150 mm were considered in 10 different mix designs, and for each design mix, three test pieces were made for greater accuracy so that the compressive strength was investigated in 28 days. In naming the concrete mixtures, P represents marble powder and S represents waste aggregates. Table 1 shows the design of the used mixtures. The average compressive strength of three tests was reported as the result. The conducted tests included slump, density, percentage of water absorption, porosity and compressive strength of concrete.

Table 1. Mixed design of experimental specimens.

Number	Specimen	Fine-Grained (Kg)	Coarse Aggregates		Water to cement (W/B)	Water (Kg)	Cement	
			Coarse Aggregates (Kg)	Waste Aggregates (Kg)			Marble Powder (Kg)	Cement (Kg)
2	S25	740	742.5	247.5	0.43	200	0	465
3	S50	740	495	495	0.43	200	0	465
4	S100	740	0	990	0.43	200	0	465
5	P10	740	990	0	0.43	200	46.5	418.5
6	P10S25	740	742.5	247.5	0.43	200	46.5	418.5
7	P10S50	740	495	495	0.43	200	46.5	418.5

Number	Specimen	Fine-Grained (Kg)	Coarse Aggregates		Water to cement (W/B)	Water (Kg)	Cement	
			Coarse Aggregates (Kg)	Waste Aggregates (Kg)			Marble Powder (Kg)	Cement (Kg)
8	P20	740	990	0	0.43	200	93	372
9	P20S25	740	742.5	247.5	0.43	200	93	372
10	P20S50	740	495	495	0.43	200	93	372

Results and discussion

The results of tests including slump, density, percentage of water absorption, porosity, and compressive strength for all specimens are presented in Table 2. According to the results, gravel substitute waste stone had a negative effect and cement substitute marble powder had a positive effect on the compressive strength of concrete. By substituting 100% waste stone for gravel, the compressive strength was reduced by approximately 49% compared to the control specimen, and by substituting 10% marble powder for cement, an increase of 13.4% in resistance was observed compared to the control specimen, which are the lowest and highest, respectively. The compressive strength of concrete was compared to the control specimen.

Table 2. Results of tests on specimens.

Number	Specimen	Slump (mm)	Density (Kg/m ³)	Water Absorption (%)	Porosity (%)	Compressive Strength (MPa)
1	OC	70	2220	5.7	9.738	24.6
2	S25	70	2150	5.7	9.541	24.4
3	S50	75	2147.5	6.1	10.353	20.2
4	S100	85	2070	10.1	16.374	12.5
5	P10	65	2254.2	4.3	7.111	27.9
6	P10S25	75	2223.7	6	10.046	23.5
7	P10S50	80	2187.8	6.4	10.869	17.9
8	P20	65	2253.6	5.6	9.365	26.7
9	P20S25	75	2219.8	6	10.278	20.7
10	P20S50	80	2180.7	8.1	13.846	14.3

Conclusions

Based on the experiments conducted in this research, the following findings were obtained:

- 1- By increasing the amount of waste aggregates instead of natural coarse aggregates, the compressive strength of the specimen decreased in such a way that with its complete replacement, the compressive strength of the specimen decreased by 50%. In addition, by increasing the amount of waste marble powder instead of cement by up to 10%, the compressive strength of the test sample increased, which was due to the filling property of marble powder; but for higher percentages, this increase in resistance was not observed due to the increase in the amount of marble powder and the decrease in cement and cementitious materials, which are mainly responsible for increasing the strength of concrete.
- 2- Waste aggregates had a decreasing effect on the compressive strength of the specimens because of the weak structure of waste aggregates compared to natural aggregates. Another reason for this was the high porosity of waste aggregates and the creation of more pores on the concrete surface.
- 3- With the increase of marble powder, the density of concrete increased and with the

- increase of waste aggregates the density of its specimens decreased due to the lightness of waste aggregates.
- 4- The increase of marble powder instead of cement in specimens without waste aggregates had a decreasing effect on the porosity, percentage of water absorption and slump of the specimens. In all three concrete mix designs (including without the presence of marble powder, with the replacement of 10 % and 20% of marble powder instead of cement), with the increase of waste aggregates instead of natural coarse grains, the amount of porosity, percentage of water absorption and slump of the specimens increased.



رفتار فشاری و دوام بتن حاوی سنگ‌دانه‌های ضایعاتی جایگزین درشت‌دانه و پودرسنگ مرمر جایگزین سیمان

سید محمدرضا حسنی^۱، مهدی نعمت‌زاده^{۲*}

- ۱- دانشجوی دکتری، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران.
- ۲- دانشیار، گروه سازه، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران.

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	بتن‌های سبز به‌عنوان بتن‌های دوست‌دار محیط‌زیست شناخته می‌شوند که با استفاده از مواد بازیافتی قابل تولید هستند. در این پژوهش رفتار فشاری و دوام بتن سبز حاوی سنگ‌دانه‌های ضایعاتی (ضایعات سنگ‌ساب) جایگزین درشت‌دانه و پودرسنگ مرمر جایگزین سیمان به‌صورت آزمایشگاهی ارزیابی شده است. در این مقاله ۱۰ طرح مخلوط به همراه طرح مخلوط شاهد ساخته شده و نتایج آزمون‌های بتنی با یکدیگر مقایسه شده است. متغیرهای اصلی شامل درصد حجمی سنگ‌دانه‌های ضایعاتی جایگزین شن با مقادیر ۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد و همچنین، درصد حجمی پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان با مقادیر ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد می‌باشد. آزمایش‌های مقاومت فشاری در ۲۸ روز و نیز درصد جذب آب و تخلخل برای بررسی دوام بتن انجام شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده، سنگ‌دانه‌های ضایعاتی جایگزین شن، تأثیر منفی و پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان، تأثیر مثبتی بر مقاومت فشاری بتن داشته‌اند. با جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگ‌دانه‌های ضایعاتی به جای شن طبیعی، کاهش مقاومت ۴۹ درصد نسبت به آزمون شاهد و با جایگزینی ۱۰ درصد پودرسنگ مرمر به‌جای سیمان، افزایش مقاومت ۱۳/۴ درصد نسبت به آزمون شاهد مشاهده می‌شود که این میزان به‌ترتیب کمترین و بیشترین میزان تغییرات مقاومت فشاری بتن در مقایسه با آزمون شاهد می‌باشد.
دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۲۵	
بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۱۵	
پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۵	
کلید واژگان: پودر سنگ مرمر سنگ‌دانه‌های ضایعاتی دوام مقاومت فشاری تخلخل	
*نویسنده مسئول: مهدی نعمت‌زاده پست الکترونیکی: m.nematzadeh@umz.ac.ir	

مقدمه

استفاده از بتن در سراسر دنیا روزبه‌روز در حال افزایش است که به همین علت کمبود سیمان و سنگ‌دانه‌های طبیعی در آینده‌ای نزدیک امری قابل پیش‌بینی خواهد بود که ناگزیر باید جایگزینی مناسب برای آن‌ها پیدا شود [۱]; ۲]. بسیاری از کشورها در مورد نحوه استفاده مجدد از مواد ضایعاتی و زائد برای جلوگیری از آسیب به محیط‌زیست کار می‌کنند [۳-۷]. استفاده از مواد زائد در تولید بتن نیز در برخی مطالعات دیگر مورد توجه قرار گرفته است [۸; ۹]. مواد زائد و ضایعاتی به‌کاررفته در تولید بتن در این تحقیقات گونه‌های متفاوتی دارند که از جمله آنها می‌توان به ضایعات پلاستیکی [۱۰]، الیاف لاستیک ضایعاتی [۱۱]، انواع پودر سنگ‌های ضایعاتی اشاره کرد. در سال ۲۰۲۰ سلواسوفیا^۱ و همکارانش نقش ضایعات پودر سنگ مرمر در توسعه بتن پایدار را بررسی کردند که در آن نمونه‌هایی بتنی با جایگزینی خرده‌های سنگ مرمر به میزان ۰ تا ۵۰ درصد به‌جای ریزدانه‌ها ساخته شد. طبق نتایج به‌دست‌آمده، نمونه‌های بتنی ساخته‌شده با ۱۰ درصد جایگزینی پودر سنگ مرمر به‌جای ریزدانه، مقاومت فشاری بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته‌شده با سایر درصدهای جایگزینی دارد [۱۲]. همچنین، استفاده از مواد مکمل سیمانی به دلیل کاهش مصرف سیمان یا مصرف نکردن آن و استفاده از مواد مصرفی بازیافتی در تولید بتن و پیش‌بینی مقاومت فشاری بتن بازیافتی رو به افزایش است [۱۳]. مطالعات بسیاری در مورد استفاده از مواد مکمل سیمانی که خاصیت سیمانی دارند از جمله پوزولان‌های طبیعی و صنعتی برای جایگزینی سیمان یا بهبود خواص بتن انجام شده است [۱۴-۱۸]. یکی از این مکمل‌ها یا جایگزین‌های سیمانی پودر سنگ مرمر است. مقدار ضایعات سنگی نیز مانند ضایعات سنگ مرمر به ۸۰ تا ۹۰ درصد سنگ استخراج‌شده از معدن می‌رسد [۱۹]. بنابراین، بسیار مهم است که راهی برای مصرف این ضایعات و کاهش پیامدهای زیست‌محیطی آن پیدا شود. از نظر فیزیکی نیز حضور پودر سنگ در خمیر سیمان سخت‌شده، نقش پرکننده را ایفا می‌کند و تخلخل خمیر را کاهش می‌دهد. فعل و انفعالات شیمیایی این پودر سنگ بین کربنات کلسیم که اصلی‌ترین ماده معدنی بلوری پودر سنگ مرمر است و خمیر سیمان رخ می‌دهد که با واکنش بین هیدروآلومینات کلسیم و یون‌های کربناته منجر به تشکیل کربوآلومینات‌های جایگزینی می‌توانند تأثیرات متفاوتی را در پر کردن خلل و فرج و ظرفیت دوام بتن داشته باشند. پژوهش‌های گذشته نشان داده‌اند که استفاده از ضایعات پودر سنگ مانند مرمر و آهک به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید بتن، امکان‌پذیر است [۲۰].

ارگون^۲ در سال ۲۰۱۱ نشان داد که می‌توان با حفظ خصوصیات مکانیکی بتن، پودر مرمر و دیاتومیت را به‌ترتیب تا ۵ و ۱۰ درصد به‌طور جداگانه و هم‌زمان جایگزین بخشی از سیمان کرد. نتایج آزمایش نشان داد که نمونه‌های بتنی حاوی ۱۰ درصد دیاتومیت، ۵ درصد پودر مرمر و ترکیب ۱۰ درصد دیاتومیت به همراه ۵ درصد پودر مرمر جایگزین وزن سیمان دارای بهترین مقاومت فشاری و خمشی هستند [۲۰]. گروهی از محققان تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان با پودر مرمر بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن را بررسی کردند. براساس نتایج آن‌ها جایگزینی سیمان با پودر مرمر تا ۱۰ درصد، تأثیر قابل توجهی بر خصوصیات مکانیکی و دوام بتن ندارد اما با افزایش درصدهای جایگزینی بیشتر از ۱۰ درصد، خصوصیات مکانیکی و دوام بتن روندی کاهشی را دنبال می‌کنند [۲۱; ۲۲]. ساردینها^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۶ تأثیر فوق‌روان‌کننده‌ها بر بتن حاوی پودر مرمر را بررسی کردند و نشان دادند که می‌توان پودر مرمر را تا ۲۰

¹ Selvasofia et al.

² Ergün

³ Sardinha et al.

درصد جایگزین سیمان کرد و با کمک فوق‌روان‌کننده‌ها خصوصیات دوام بتن را حفظ کرد [۲۳]. تورکر^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۲ تأثیر پودر مرمر بر ساختار و هیدراته‌شدن سیمان را بررسی کردند و اعتقاد داشتند که کاهش مقاومت ایجادشده در بتن حاوی پودر مرمر به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان می‌تواند به دلیل کاهش کلسیم‌سیلیکات باشد [۲۴]. مطابق با پژوهش‌های آرل^۲ در سال ۲۰۱۶، جایگزینی ۵ تا ۱۰ درصد پودر مرمر با سیمان علاوه بر این که خصوصیات مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد، از انتشار گاز کربن‌دی‌اکسید حاصل از تولید سیمان تا ۱۲ درصد می‌کاهد [۲۵]. شلکه^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۲ تأثیر پودر مرمرهای ۰، ۵، ۸، ۱۲ و ۱۶ درصد و میکروسلیس‌های ۰ و ۸ درصد را به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان برای محاسبه مقاومت فشاری بتن در ۷ و ۲۸ روز بررسی کردند. آن‌ها مقاومت فشاری تمامی ترکیب‌های حاوی پودرمرمر را به‌طور قابل‌توجهی کمتر از بتن معمولی گزارش دادند؛ به‌جز نمونه حاوی ۸ درصد میکروسلیس و ۸ درصد پودر مرمر که افزایش مقاومتی برابر با ۳/۹۲ درصد نسبت به بتن معمولی داشته است [۲۶]. امین و همکاران در سال ۲۰۱۴ تأثیر جایگزینی سیمان با درصد پودر مرمر به همراه ۵ و ۱۰ درصد میکروسلیس را بررسی کردند؛ این ترکیب‌های جایگزینی، مقاومت بتن را به‌ترتیب تا ۶۰ و ۴۷ درصد در سن ۹۰ روز کاهش داده است [۲۷]. ژانگ^۴ و همکارانش در سال ۲۰۲۰ تأثیر سیلیس و پودر سنگ مرمر را بر خواص مکانیکی و دوام بتن بررسی کردند. در این پژوهش مقادیر اسلامپ، چگالی، درصد جذب آب و سایر خصوصیات مکانیکی بتن تولیدی با جایگزینی ۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد پودر مرمر به همراه ۰، ۲/۵، ۵ و ۱۰ درصد سیلیکا به جای سیمان ارزیابی شد که طبق نتایج به‌دست‌آمده ۵ درصد پودر مرمر اثر افزایشی بر مقاومت فشاری آزمونه‌ها داشته است [۲۸]. پژوهش‌های انجام شده پیرامون پودر سنگ مرمر به‌صورت خلاصه در جدول ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش سعی شده است تأثیرات سنگ‌دانه‌های ضایعاتی که از ضایعات سنگ‌ساب‌های مصرفی که برای صیقل دادن سنگ‌ها در کارخانجات سنگ‌بری استفاده می‌شوند به‌عنوان جایگزین درشت‌دانه و ضایعات پودر سنگ مرمر جایگزین سیمان بر مقاومت فشاری و دوام بتن به‌صورت آزمایشگاهی بررسی گردد.

جدول ۱. خلاصه نتایج تحقیقات سایر پژوهشگران.

پژوهشگر	پارامتر موردبررسی جایگزین سیمان	نتایج
ارگون	پودر مرمر و دیاتومیت	آزمونه‌های بتنی حاوی ۱۰ درصد دیاتومیت و ۵ درصد پودر مرمر بیشترین مقاومت فشاری را دارند
ساردین‌ها	تأثیر فوق‌روان‌کننده‌ها بر بتن حاوی پودر مرمر	حفظ خواص دوام بتن تا ۲۰ درصد جایگزینی
آرل	۵ تا ۱۰ درصد پودر مرمر	بهبود خواص مکانیکی بتن+کاهش گازهای گلخانه‌ای تا ۱۲ درصد
شلکه	پودر مرمر و میکروسلیس	افزایش مقاومت فشاری فقط در آزمونه ۸ درصد پودر مرمر+۰/۸٪ میکروسلیس
ژانگ	پودر مرمر و میکروسلیس	افزایش مقاومت فشاری فقط در آزمونه ۵ درصد پودر مرمر

¹ Türker et al.

² Arel

³ Shelke

⁴ Zhang

برنامه آزمایشگاهی

مواد و مصالح مصرفی

پودر سنگ مرمر و سنگدانه‌های ضایعاتی که در شکل ۱ (الف، ب و ج) نشان داده شده‌اند از ضایعات کارخانه سنگ‌بری فیروزه واقع در ابتدای جاده قدیم قم- کاشان تهیه شده‌اند. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی پودر سنگ مرمر مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است. چگالی این پودر برابر با ۲/۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب و میزان جذب آب ۰/۱۹ درصد بوده است. سیمان پرتلند نوع ۲ مصرفی با چگالی ۳/۱۵ گرم بر سانتی‌مترمکعب، از کارخانه سیمان نینزار قم بوده که سایر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی آن در جدول ۲ و منحنی دانه‌بندی آن در شکل ۲ آورده شده است. فازهای گوناگون پودر سنگ مرمر و سنگدانه‌های ضایعاتی توسط آزمون پراش پرتوی ایکس (XRD) بررسی شده که نتایج آن در شکل ۳ ارائه شده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده پودر سنگ مرمر دارای کلسیم‌کربنات به‌صورت عمده و سنگدانه‌های ضایعاتی نیز دارای کلسیم‌کربنات و اکسیدمنیزیم بوده است. همچنین، حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌های ضایعاتی، ۱۲/۵ میلی‌متر و محدوده اصلی دانه‌های آن بین ۵ تا ۱۰ میلی‌متر بوده که دانه‌بندی آن مطابق با الزامات ASTM C۳۳ [۲۹] در شکل ۴ نشان داده شده است. این سنگدانه‌های ضایعاتی دارای چگالی برابر با ۱/۲۷ گرم بر سانتی‌مترمکعب، درصد جذب آب برابر با ۱۳/۸ درصد می‌باشند. سنگدانه‌های مصرف‌شده از نوع شکسته و از محل تأمین‌کنندگان مصالح سنگی جاده جمکران (حومه شهر قم) تهیه گردید. چگالی درشت‌دانه ۲/۶۸ گرم بر سانتی‌مترمکعب، جذب آب به میزان ۱/۶۸ درصد و حداکثر بعد درشت‌دانه مصرفی ۱۹ میلی‌متر بوده که منحنی دانه‌بندی آن نیز در شکل ۵ ارائه شده است. مدول نرمی ماسه شکسته که به‌عنوان ریزدانه به‌کار رفته برابر با ۳/۱، چگالی به میزان ۲/۵۶ گرم بر سانتی‌مترمکعب، جذب آب برابر با ۲/۴ درصد و حداکثر بعد ریزدانه نیز ۴/۷۵ میلی‌متر بوده است. همچنین، از آب شرب برای ساخت نمونه‌ها استفاده گردید.



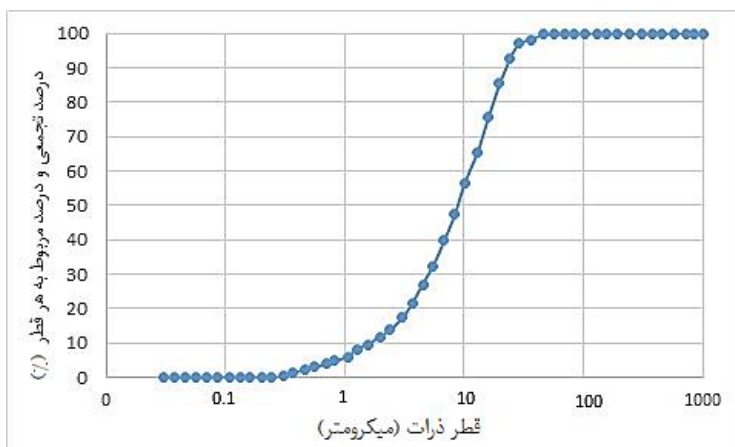
ج) پودر سنگ مرمر

ب) سنگدانه‌های ضایعاتی
(الک‌شده)الف) سنگدانه‌های ضایعاتی
(قبل از الک شدن)

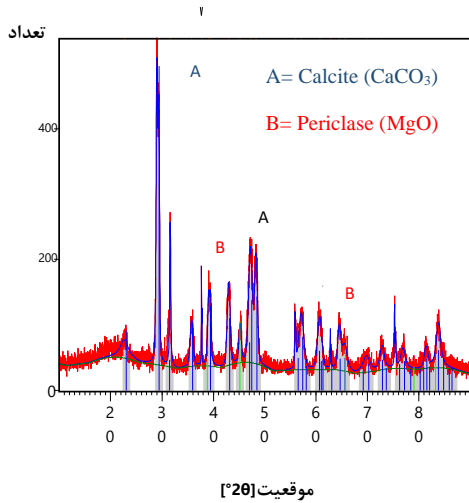
شکل ۱. نمونه مصالح مصرفی.

جدول ۲. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی سیمان و پودر مرمر.

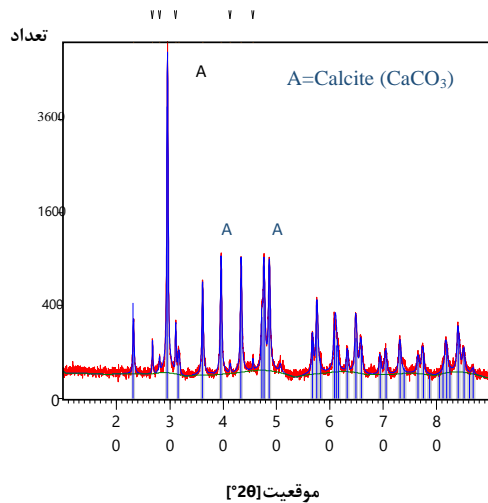
خصوصیات فیزیکی و شیمیایی	سیمان	پودر مرمر [۳۰]
SiO ₂ (%)	۲۰/۵	۰/۱۲
Al ₂ O ₃ (%)	۴/۹۰	۰/۰۹
Fe ₂ O ₃ (%)	۳/۵۵	۰/۲۱
CaO(%)	۶۳/۹	۵۵/۶۴
MgO(%)	۱/۵۰	۰/۰۸
SO ₃ (%)	۲/۱۰	-
K ₂ O(%)	۰/۵۵	-
Na ₂ O(%)	۰/۳۵	۰/۰۱
Free CaO(%)	۱/۵۰	۰/۵۰
L.O.I	۲/۶	۴۳/۷۶
C ₃ A(%)	۶/۹۸	-
C ₄ AF(%)	۱۰/۸۰	-
جرم مخصوص (gr/cm ³)	۳/۲	۲/۵
سطح مخصوص (cm ² /gr)	۳۱۵۰	-
جذب آب (%)	-	۰/۱۹
مقاومت فشاری (MPa)	۴۹	۵۵



شکل ۲. منحنی دانه‌بندی سیمان مصرفی.

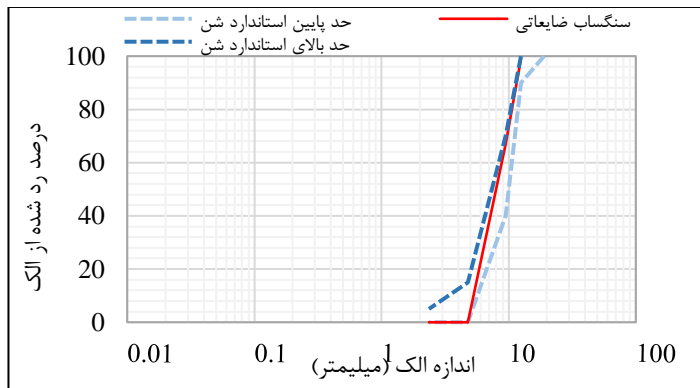


ب) شناسایی فازهای سنگ‌دانه ضایعاتی

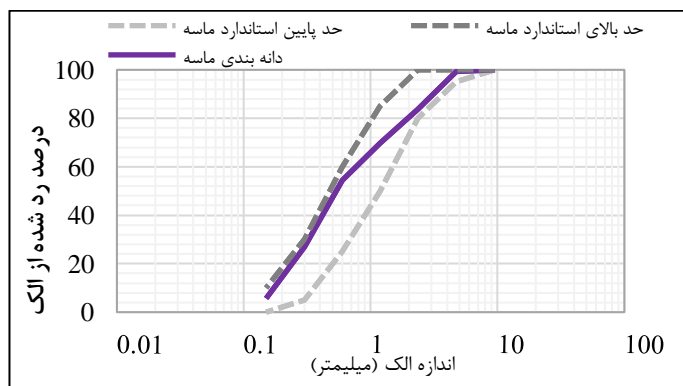


الف) شناسایی فازهای پودر سنگ مرمر

شکل ۳. نتایج آزمون XRD برای سنگ‌دانه ضایعاتی و پودر سنگ مرمر.



شکل ۴. منحنی دانه‌بندی سنگ‌دانه‌های ضایعاتی.



شکل ۵. منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی.

مشخصات طرح مخلوط

برای نام‌گذاری مخلوط‌های بتن، P نشان‌دهنده پودر سنگ مرمر و S نشان‌دهنده سنگ‌دانه‌های ضایعاتی هستند. توضیحات علائم اختصاری در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. توضیحات علائم اختصاری.

علائم اختصاری در طرح‌های مخلوط بتن	شرح علائم	توضیحات و یک نمونه
OC	طرح مخلوط شاهد	طرح مخلوط بدون پودر مرمر و سنگ‌دانه‌های ضایعاتی
PX	طرح مخلوط حاوی X درصد پودر مرمر ضایعاتی جایگزین سیمان	P10: طرح مخلوط حاوی ۱۰ درصد پودر مرمر ضایعاتی جایگزین سیمان
SY	طرح مخلوط حاوی Y درصد سنگ‌دانه‌های ضایعاتی جایگزین درشت‌دانه	S25: طرح مخلوط حاوی ۲۵ درصد سنگ‌دانه‌های ضایعاتی جایگزین درشت‌دانه
PXSY	طرح مخلوط حاوی X درصد پودر مرمر ضایعاتی جایگزین سیمان و Y درصد سنگ‌دانه‌های ضایعاتی جایگزین درشت‌دانه	P10S25: طرح مخلوط حاوی ۱۰ درصد پودر مرمر ضایعاتی جایگزین سیمان و ۲۵ درصد سنگ‌دانه‌های ضایعاتی جایگزین درشت‌دانه

نسبت‌های طرح مخلوط برای یک مترمکعب بتن با توجه به مشخصات ACI ۲۱۱.۱ [۳۱] در جدول ۴ ارائه شده است. نسبت آب به مواد سیمانی (W/B) برای تمام طرح‌های مخلوط مقداری ثابت و برابر با ۰/۴۳ در نظر گرفته شد. میزان پودر سنگ مرمر جایگزین وزنی سیمان به ترتیب ۰، ۱۰ و ۲۰ درصد و میزان سنگ‌دانه‌های ضایعاتی جایگزین درشت‌دانه به ترتیب ۰، ۲۵، ۵۰ و ۱۰۰ درصد در طرح مخلوط بتن بوده است. به‌طور کلی ۳۰ آزمون مکعبی به ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر در ۱۰ طرح مخلوط گوناگون در نظر گرفته شد که برای هر طرح مخلوط سه آزمون برای دقت بیشتر پاسخ ساخته شد تا مقاومت فشاری در ۲۸ روز بررسی شود. میانگین مقاومت فشاری سه آزمون به‌عنوان نتیجه گزارش گردید.

جدول ۴. طرح مخلوط آزمون‌های آزمایشگاهی*.

شماره	نام آزمون	سیمان		نسبت آب به مواد سیمانی (W/B)	درشت‌دانه		ریزدانه (کیلوگرم)
		سیمان (کیلوگرم)	پودر مرمر (کیلوگرم)		درشت‌دانه (کیلوگرم)	سنگدانه‌های ضایعانی (کیلوگرم)	
۱	OC	۴۶۵	۰	۰/۴۳	۰	۹۹۰	۷۴۰
۲	S25	۴۶۵	۰	۰/۴۳	۲۴۷/۵	۷۴۲/۵	۷۴۰
۳	S50	۴۶۵	۰	۰/۴۳	۴۹۵	۴۹۵	۷۴۰
۴	S100	۴۶۵	۰	۰/۴۳	۹۹۰	۰	۷۴۰
۵	P10	۴۱۸/۵	۴۶/۵	۰/۴۳	۰	۹۹۰	۷۴۰
۶	P10S25	۴۱۸/۵	۴۶/۵	۰/۴۳	۲۴۷/۵	۷۴۲/۵	۷۴۰
۷	P10S50	۴۱۸/۵	۴۶/۵	۰/۴۳	۴۹۵	۴۹۵	۷۴۰
۸	P20	۳۷۲	۹۳	۰/۴۳	۰	۹۹۰	۷۴۰
۹	P20S25	۳۷۲	۹۳	۰/۴۳	۲۴۷/۵	۷۴۲/۵	۷۴۰
۱۰	P20S50	۳۷۲	۹۳	۰/۴۳	۴۹۵	۴۹۵	۷۴۰

* مقادیر داده شده برای آزمون مرجع (OC) به ازای یک مترمکعب بتن می باشد.

آزمایش‌های انجام شده

اسلامپ: برای تمامی آزمون‌ها آزمایش اسلامپ مطابق با استاندارد ASTM C143 [۳۲] برای بررسی کارایی و روانی بتن انجام گردید.

وزن مخصوص بتن: براساس جرم و حجم آزمون‌ها وزن مخصوص بتن به صورت میانگین برای هر سه آزمون مکعبی در هر طرح مخلوط محاسبه گردیده است. این روش مشابه با روش به کاررفته در استاندارد ASTM C642 [۳۳] است که در آن از آزمون‌های استوانه‌ای استفاده شده است.

درصد جذب آب: مطابق با استاندارد ASTM C642 [۳۳] آزمون‌ها پس از عمل‌آوری در حوضچه‌های آب با دمای ثابت 2 ± 23 درجه سانتی‌گراد، از آب خارج شدند و پس از خشک شدن تدریجی در محیط آزمایشگاه، برای تعیین وزن خشک در داخل گرمکن با دمای ۱۰۰ الی ۱۱۰ درجه سانتی‌گراد به مدت حداقل ۲۴ ساعت (در این تحقیق، ۳۶ ساعت) قرار داده شدند. سپس، آزمون‌ها از گرمکن خارج و پس از رسیدن به دمای محیط توسط ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۱ گرم توزین شدند. پس از آن برای ۲۴ ساعت دیگر آزمون‌ها در گرمکن قرار داده شدند و سپس توزین گردیدند. این فرایند تا آنجا ادامه پیدا کرد که تفاضل دو توزین متوالی کمتر از ۰/۵ درصد وزن خشک شود. آخرین توزین به عنوان وزن خشک آزمون یادداشت گردید. پس از خنک شدن تدریجی آزمون‌ها در محیط آزمایشگاه، برای به دست آوردن وزن آزمون اشباع با سطح خشک، آزمون‌ها به داخل حوضچه آب با دمای ۲۱ درجه سانتی‌گراد بازگردانده شدند. آزمون‌ها پس از گذشت حداقل ۴۸ ساعت از حوضچه خارج و پس از خشک کردن رطوبت سطحی توسط حوله خشک، توزین شدند. آزمون‌های مذکور دوباره به مدت ۲۴ ساعت در همان حوضچه نگهداری شدند و سپس از حوضچه خارج گردیدند و دوباره به همان شیوه قبلی توزین شدند. این روند تا جایی ادامه پیدا می‌کند که

اختلاف دو توزین متوالی کمتر از ۰/۵ درصد وزن سنگین‌تر باشد. در پایان، آخرین توزین به‌عنوان وزن اشباع با سطح خشک یادداشت گردید و درصد جذب آب محاسبه شد.

تخلخل: درصد تخلخل آزمون‌های بتنی تهیه‌شده براساس استاندارد ASTM C۶۴۲ [۳۳] اندازه‌گیری شد. بدین منظور، درصد تخلخل پس از محاسبه و ثبت وزن خشک‌شده آزمون به وسیله گرمکن (A)، وزن آزمون با سطح خشک بعد از غوطه‌وری (C) و وزن ظاهری آزمون با سطح خشک بعد از غوطه‌وری (D) از طریق رابطه (۱) محاسبه گردید:

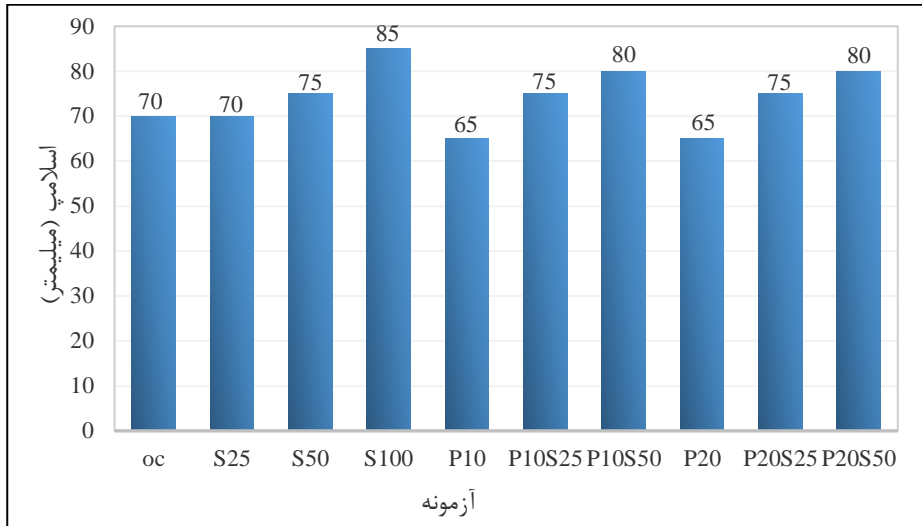
$$(1) \text{درصد تخلخل} = (C-A) \times 100 / (C-D)$$

مقاومت فشاری بتن: آزمایش مقاومت فشاری بتن براساس استاندارد BS-EN-۱۲۳۹۰-۳ [۳۴] بوده است. از هر طرح مخلوط، ۳ آزمون در سن ۲۸ روز آزمایش شد و میانگین آن‌ها ثبت گردید. سرعت بارگذاری استاندارد برای شکست آزمون بتنی تحت آزمایش ۰/۲۵ مگاپاسکال بر ثانیه بوده است.

تحلیل نتایج و بحث

اسلامپ

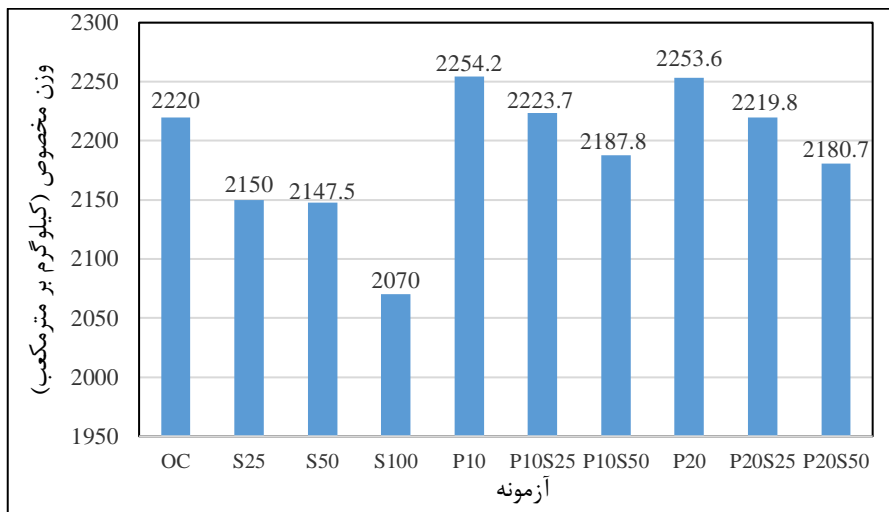
نتایج آزمایش اسلامپ در شکل ۶ ارائه شده است. با افزایش میزان جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد پودر مرمر با سیمان، اسلامپ بتن کاهش می‌یابد. این کاهش اسلامپ در مخلوط‌های حاوی پودر مرمر می‌تواند به دلیل ریزتر بودن ذرات پودر مرمر در مقایسه با سیمان و کاهش فضاهای خالی در مخلوط‌های بتن می‌باشد [۳۰]. همچنین، در جایگزینی ۱۰۰ درصد سنگدانه‌های ضایعاتی، بیشترین کارایی مشاهده می‌گردد. از نتایج می‌توان دریافت که تأثیر سنگدانه‌های ضایعاتی در مقایسه با تأثیر پودر مرمر بر افزایش اسلامپ بتن چشمگیرتر بوده است. علت این امر می‌تواند چسبندگی سنگدانه‌های ضایعاتی و خمیر سیمان ناشی از سطوح کم‌اصطکاک بین این دو ماده باشد به‌طوری که سنگدانه‌های ضایعاتی به‌عنوان حفره در ماتریس مخلوط بتنی عمل نمی‌کنند و در نتیجه میزان روانی و اسلامپ در این آزمون‌ها بیشتر می‌شود.



شکل ۶. مقایسه اسلامپ آزمون‌ها.

وزن مخصوص بتن

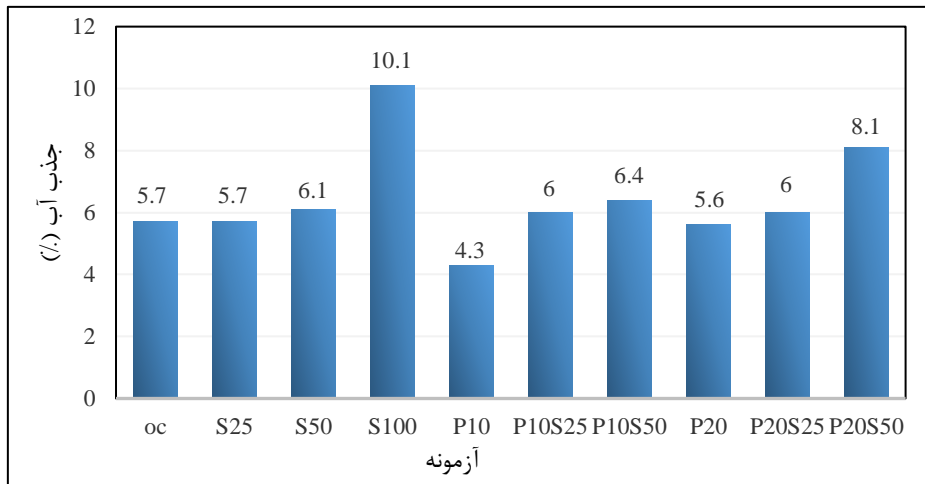
وزن مخصوص آزمون‌های بتنی در شکل ۷ نشان داده شده است. زمانی که پودر مرمر به‌تنهایی در طرح مخلوط شرکت داشت؛ وزن مخصوص به‌طور ناچیزی افزایش یافت به‌طوری که در حالت جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد به‌ترتیب ۱/۵۴ و ۱/۵۱ درصد نسبت به آزمون مرجع، افزایش مشاهده می‌گردد. برای آزمون‌هایی که سنگ‌دانه‌های ضایعاتی به‌عنوان جایگزین درشت‌دانه حضور داشته است میزان وزن مخصوص روند کاهشی نسبت به آزمون مرجع داشت؛ به‌طوری که با جایگزینی کامل آن به جای درشت‌دانه، بیشترین میزان کاهش وزن مخصوص که به میزان ۶/۷۳ درصد است، مشاهده می‌گردد. علت این امر می‌تواند مرتبط با سبک بودن اجزای سنگ‌دانه‌های ضایعاتی (از نوع سنگ‌ساب ضایعاتی) باشد که چگالی ارائه شده برای این سنگ‌دانه‌های ضایعاتی تأییدکننده این مطلب است.



شکل ۷. مقایسه وزن مخصوص آزمونه‌ها.

جذب آب

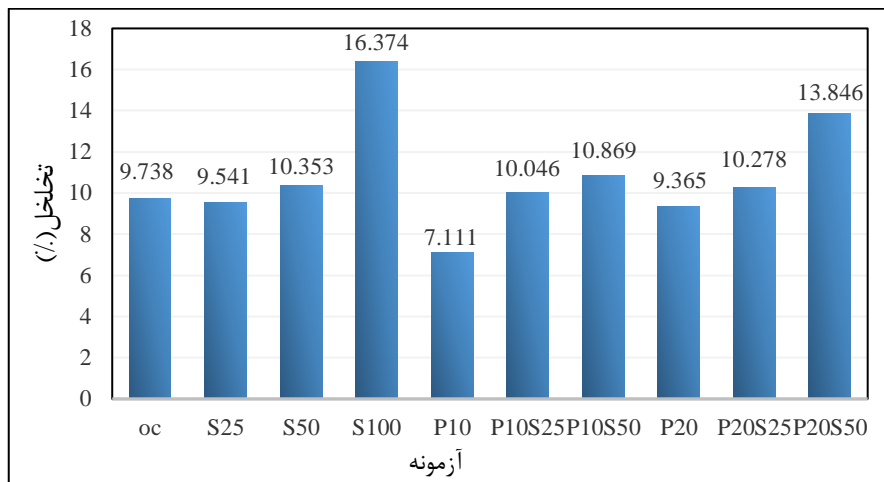
نتایج به‌دست‌آمده بر آزمونه‌های بتنی برای محاسبه درصد جذب آب در شکل ۸ نشان داده شده است. میزان جذب آب آزمونه‌ها در محدوده $\frac{4}{3}$ تا $\frac{10}{1}$ درصد به‌دست آمده است. بیشترین درصد جذب آب زمانی است که سنگدانه‌های ضایعاتی به طور کامل جایگزین درشت‌دانه شده است. این می‌تواند به دلیل ظاهر متخلخل سنگدانه‌های ضایعاتی (از نوع سنگ‌ساب ضایعاتی) باشد که خاصیت جذب آب بالایی دارد. علاوه بر این، از نتایج می‌توان دریافت که با اضافه کردن پودر مرمر به‌تنهایی به مخلوط بتن، درصد جذب آب بتن کاهش می‌یابد. علت کاهش درصد جذب آب بتن در این آزمونه این است که با افزودن پودرسنگ مرمر به دلیل افزایش چسبندگی سیمان به سنگدانه و پر شدن خلل و فرج سنگدانه‌ها، جذب آب کاهش می‌یابد.



شکل ۸. مقایسه درصد جذب آب آزمون‌ها.

تخلخل

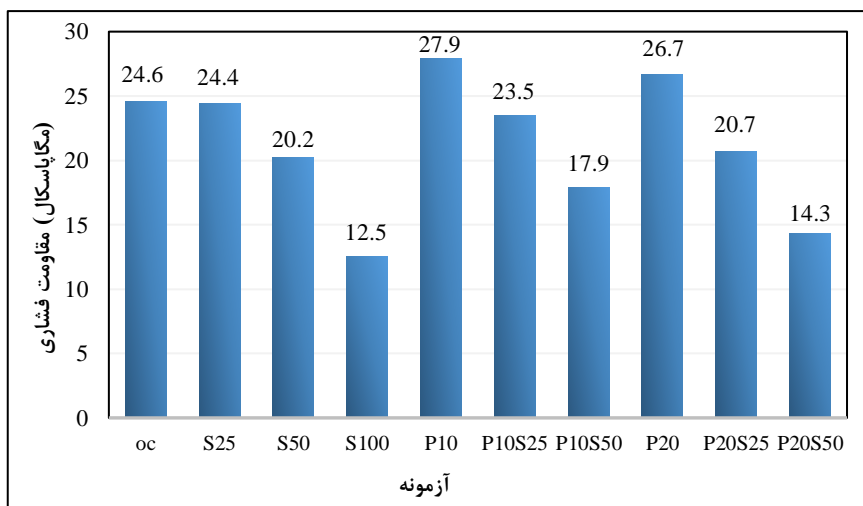
درصد تخلخل آزمون‌های بتنی در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد کمترین میزان تخلخل زمانی است که پودر سنگ مرمر به مقدار ۱۰ درصد جایگزین سیمان شده است و بیشترین میزان تخلخل زمانی است که سنگ‌دانه‌های ضایعاتی به‌طور کامل جایگزین درشت‌دانه شده است. از آنجا که سنگ‌دانه‌های ضایعاتی تخلخل بالایی دارند، جایگزینی آن‌ها به‌جای سنگ‌دانه‌های طبیعی منجر به افزایش منافذ در بتن و در نهایت ایجاد تخلخل بیشتر در بتن می‌شود. این در حالی است که ذرات پودر سنگ مرمر به‌عنوان جایگزین سیمان در مخلوط‌های حاوی سنگ‌دانه‌های طبیعی نقش کاهش‌دهنده تخلخل و در مخلوط‌های حاوی سنگ‌دانه‌های ضایعاتی نقش افزایش‌دهنده تخلخل را دارد.



شکل ۹. مقایسه تخلخل آزمون‌ها.

مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری روی آزمون‌ها در شکل ۱۰ آورده شده است. در شکل ۱۱ تصویر آزمون‌های S100 و P20S25 پس از پایان آزمایش مقاومت فشاری آورده شده است. طبق شکل ۱۱ شکست کلیه آزمون‌ها به صورت شکست از وسط سنگ‌دانه‌ها و با زاویه ۴۵ درجه به صورت قطری (ترک برشی در هنگام شکست) بوده است که در این لحظه، آزمون‌ها به ظرفیت باربری نهایی خود رسیده‌اند.



شکل ۱۰. مقایسه مقاومت فشاری آزمون‌ها.



ب) شکست آزمون P20.S25



الف) شکست آزمون S100

شکل ۱۱. نحوه شکست آزمون‌ها پس از آزمایش مقاومت فشاری.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است با اضافه کردن ۲۵ درصد سنگ‌دانه‌های ضایعاتی به میزان ۰/۸ درصد از مقاومت فشاری آزمون کاسته شده است در حالی که اگر میزان جایگزینی سنگ‌دانه‌های ضایعاتی به جای درشت‌دانه، ۱۰ درصد باشد مقاومت فشاری به میزان ۴۹ درصد کاهش می‌یابد.

در مورد تأثیر پودر مرمر نیز می‌توان مشاهده کرد که با جایگزینی ۱۰ درصد پودر مرمر (آزمون P10)، مقاومت فشاری ۱۲/۴ درصد افزایش می‌یابد در حالی که برای مقادیر بیشتر جایگزینی پودر مرمر، این روند افزایشی دیگر مشاهده نمی‌شود؛ به‌طوری که با جایگزینی ۲۰ درصد پودر مرمر به‌جای سیمان (آزمون P20)، مقاومت فشاری در مقایسه با جایگزینی ۱۰ درصد به میزان ۴/۳ درصد کاهش می‌یابد. هرچند مقاومت فشاری آزمون حاوی ۲۰ درصد سنگ‌دانه ضایعاتی به میزان ۸/۵ درصد نسبت به مقاومت آزمون شاهد افزایش یافته است. از مقایسه نتایج آزمون‌های P10.S25 و P20.S25 می‌توان دریافت که در حالی که میزان سنگ‌دانه‌های ضایعاتی جایگزین، ثابت و برابر با ۲۵ درصد است، مقاومت فشاری در آزمون‌های که میزان پودر مرمر جایگزین ۲۰ درصد است به میزان ۱۲ درصد کمتر از مقاومت آزمون با ۱۰ درصد جایگزینی پودر سیمان است. از مقایسه نتایج آزمون‌های P10 و P20 نسبت به نتایج آزمون‌های P10.S25 و P20.S25 میزان تأثیرگذاری سنگ‌دانه‌های ضایعاتی در کاهش مقاومت کاملاً مشخص است به گونه‌ای که با افزایش ۲۵ درصد سنگ‌دانه‌های ضایعاتی و با ثابت نگه‌داشتن مقدار پودر سنگ مرمر در ۱۰ درصد، میزان مقاومت فشاری به میزان ۱۵/۸ درصد کاهش می‌یابد. همین روند در حالتی که میزان پودر سنگ مرمر ۲۰ درصد باشد و سنگ‌دانه‌های ضایعاتی از صفر به ۲۵ درصد افزایش یابد مشهودتر است به‌طوری که مقاومت فشاری به میزان ۲۲/۵ درصد در این حالت کاهش می‌یابد.

طبق نتایج بیان‌شده سنگ‌دانه‌های ضایعاتی (از نوع سنگ‌ساب‌های ضایعاتی) به شدت در کاهش مقاومت فشاری بتن ساخته شده نقش دارند. علت این روند، ساختار ضعیف سنگ‌دانه‌های ضایعاتی در مقایسه با سنگ‌دانه‌های طبیعی می‌باشد. در واقع، از آنجا که نقش اصلی در ایجاد مقاومت بتن برعهده سنگ‌دانه‌های آن و به‌ویژه درشت‌دانه‌هاست، با

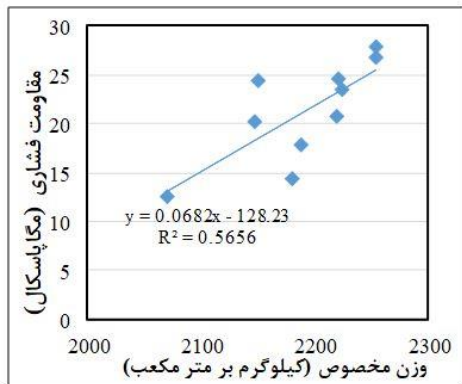
توجه به شکننده و ضعیف بودن سنگ‌دانه‌های ضایعاتی، آزمون‌های بتنی ساخته‌شده با استفاده از این نوع ضایعات تأثیرات تنزلی روی مقاومت فشاری خواهند گذاشت.

شایان ذکر است که نتیجه به‌دست‌آمده در خصوص افزایش مقاومت فشاری با افزایش درصد جایگزینی پودر مرمر به‌ویژه در ۱۰ درصد، مشابه با نتایج پژوهش رانا^۱ و علی ابدو^۲ [۲۱; ۲۲] بوده است. طبق نتایج به‌دست‌آمده مرز ۱۰ درصد در جایگزینی پودر مرمر به‌جای سیمان می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش مقاومت فشاری بتن داشته باشد. علت این افزایش مقاومت را می‌توان با خاصیت پرکنندگی پودر مرمر و ایجاد هسته‌ای مناسب برای تسریع هیدراتاسیون توضیح داد. اما با افزایش بیشتر پودر مرمر، مقاومت فشاری نیز کاهش می‌یابد که علت این امر کاهش مواد سیمانی مانند تری‌کلسیم‌سیلیکات و دی‌کلسیم‌سیلیکات است که عمدتاً مسئول افزایش مقاومت بتن هستند می‌باشد. همچنین، طبق نتایج به‌دست‌آمده در تحقیق حاضر، مقاومت فشاری آزمون‌ها حاوی ۱۰ درصد پودر مرمر جایگزین سیمان نسبت به آزمون مرجع ۱۳/۴ درصد افزایش داشته است در حالی که در پژوهش ارگون [۲۰] مقاومت فشاری آزمون‌ها با همین مقدار جایگزینی پودر مرمر به‌جای سیمان، به میزان ۱۴/۵ درصد کاهش داشته است.

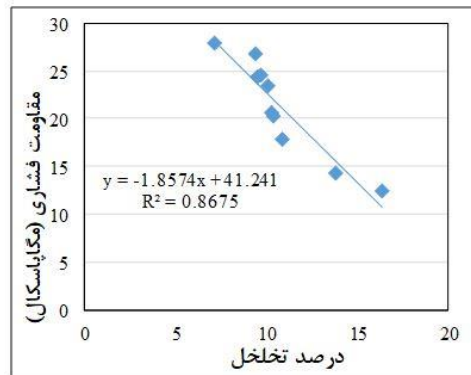
ارتباط مقاومت فشاری با تخلخل و وزن مخصوص

روابط به‌دست‌آمده از رگرسیون خطی نتایج مقاومت فشاری در مقابل تخلخل و نیز وزن مخصوص آزمون‌ها به‌ترتیب در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۲ مشخص است که همبستگی بالایی بین نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش مقاومت فشاری و تخلخل بتن وجود دارد. از این رو، با داشتن مقادیر تخلخل بتن با قطعیت بالایی می‌توان مقدار مقاومت فشاری بتن را برای طرح مخلوط‌های مختلف تعیین کرد.



شکل ۱۳. رابطه میان مقاومت فشاری و وزن مخصوص.



شکل ۱۲. رابطه میان مقاومت فشاری و تخلخل.

¹ Rana et al.

² Aliabdo

با توجه به شکل ۱۳، شدت همبستگی میان نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش مقاومت فشاری و وزن مخصوص چندان بالا نیست که علت این امر به خصوصیات مصالح و مقادیر آن‌ها در طرح مخلوط برمی‌گردد. سنگ‌دانه‌های ضایعاتی دارای ساختار ضعیف و سبک در مقایسه با درشت‌دانه طبیعی هستند به‌طوری که هم وزن مخصوص و هم مقاومت فشاری بتن را کاهش می‌دهد در حالی که پودرسنگ مرمر وزن مخصوص بتن را افزایش داده ولی تأثیرات نامشخصی (هم افزایشی و هم کاهش) بر پارامتر مقاومت فشاری بتن داشته است. از این رو، رابطه میان پارامترهای وزن مخصوص و مقاومت فشاری برای نمونه‌های بتنی حاوی سنگ‌دانه‌های ضایعاتی و پودرسنگ مرمر، همبستگی چندان بالایی ندارد.

نتیجه‌گیری

براساس آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق، نتایج زیر به‌دست آمده است:

- ۱- با افزایش میزان سنگ‌دانه‌های ضایعاتی جایگزین درشت‌دانه طبیعی، مقاومت فشاری نمونه کاهش یافت به گونه‌ای که با جایگزینی کامل آن، مقاومت فشاری نمونه به میزان ۵۰ درصد کاهش یافت. علاوه بر این، با افزایش میزان پودرسنگ مرمر ضایعاتی جایگزین سیمان تا مقدار ۱۰ درصد، مقاومت فشاری نمونه افزایش یافت که علت این افزایش مقاومت به سبب خاصیت پرکنندگی پودر مرمر و ایجاد هسته‌ای مناسب برای تسریع هیدراتاسیون بوده ولی برای درصدهای بیش از آن، این روند افزایشی مقاومت مشاهده نشده است که علت آن افزایش میزان پودر مرمر و کاهش سیمان و مواد سیمانی مانند تری‌کلسیم‌سیلیکات و دی‌کلسیم‌سیلیکات است که عمدتاً مسئولیت افزایش مقاومت بتن را بر عهده دارند.
- ۲- سنگ‌دانه‌های ضایعاتی تأثیر کاهشی بر مقاومت فشاری نمونه‌ها داشته است که علت این امر ساختار ضعیف سنگ‌دانه‌های ضایعاتی در مقایسه با سنگ‌دانه‌های طبیعی می‌باشد. علت دیگر این امر تخلخل بالای سنگ‌دانه‌های ضایعاتی و ایجاد منافذ بیشتر در سطح بتن است.
- ۳- با افزایش پودر سنگ مرمر، وزن مخصوص بتن افزایش و با افزایش سنگ‌دانه‌های ضایعاتی به دلیل سبک بودن اجزای سنگ‌دانه‌های ضایعاتی، وزن مخصوص نمونه‌های آن کاهش یافت.
- ۴- افزایش پودر سنگ مرمر، جایگزین سیمان در نمونه‌های فاقد سنگ‌دانه‌های ضایعاتی بر روی تخلخل، درصد جذب آب و اسلامپ نمونه‌ها اثر کاهشی داشت در حالی که در هر سه طرح مخلوط بتنی شامل بدون حضور پودر سنگ مرمر، با جایگزینی ۱۰ و ۲۰ درصد پودر سنگ مرمر به‌جای سیمان، با افزایش سنگ‌دانه‌های ضایعاتی جایگزین درشت‌دانه‌های طبیعی، میزان تخلخل، درصد جذب آب و اسلامپ نمونه‌ها افزایش یافت.

References

- [1] Ann, K. Y., Moon, H. Y., Kim, Y. B., & Ryou, J. (2008). Durability of recycled aggregate concrete using pozzolanic materials. *Waste Management*, 28(6), 993-999. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.03.003>
- [2] Awoyera, P. O., & Okoro, U. C. (2019). Filler-Ability of Highly Active Metakaolin for Improving Morphology and Strength Characteristics of Recycled Aggregate Concrete. *Silicon*, 11(4), 1971-1978. <https://doi.org/10.1007/s12633-018-0017-8>

- [3] Binici, H. (2007). Effect of crushed ceramic and basaltic pumice as fine aggregates on concrete mortars properties. *Construction and Building Materials*, 21(6), 1191-1197. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.06.002>
- [4] Binici, H., Shah, T., Aksogan, O., & Kaplan, H. (2008). Durability of concrete made with granite and marble as recycle aggregates. *Journal of Materials Processing Technology*, 208(1-3), 299-308. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.12.120>
- [5] Karaşahin, M., & Terzi, S. (2007). Evaluation of marble waste dust in the mixture of asphaltic concrete. *Construction and Building Materials*, 21(3), 616-620. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.001>
- [6] Mazzilli, B., Palmiro, V., Saueia, C., & Nisti, M. B. (2000). Radiochemical characterization of Brazilian phosphogypsum. *Journal of Environmental Radioactivity*, 49(1), 113-122. [http://doi.org/10.1016/S0265-931X\(99\)00097-1](http://doi.org/10.1016/S0265-931X(99)00097-1)
- [7] Somlai, J., Jobbágy, V., Németh, C., Gorjánác, Z., Kávási, N., & Kovács, T. (2005). Radiation dose from coal slag used as building material in the Transdanubian region of Hungary. *Radiation Protection Dosimetry*, 118(1), 82-87. <https://doi.org/10.1093/rpd/nci323>
- [8] Al-Manaseer, A., & Dalal, T. (1997). Concrete containing plastic aggregates. *Concrete international*, 19(8), 47-52. <https://www.semanticscholar.org/paper/Concrete-Containing-Plastic-Aggregates-Al-Manaseer-Dalal/3159475ef5fccb7607a0bbe37b866aaf6ad7bdfc>
- [9] Soroushian, P., Plasencia, J., & Ravanbakhsh, S. (2003). Assessment of reinforcing effects of recycled plastic and paper in concrete. *American Concrete Institute Materials Journal*, 100(3), 203-207. https://www.researchgate.net/publication/280015894_Assessment_of_reinforcing_effects_of_recycled_plastic_and_paper_in_concrete
- [10] Rahat Dahmardeh, S., & Mirabi Moghaddam, M. H. (2019). Assessment of the idea of using various types of plastic waste in concrete production: engineering properties. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 16(1), 151-168. https://karafan.tvu.ac.ir/article_100537_538a306251ef4bb2bc9826d5c9757138.pdf
- [11] Salimbahrami, S. R., Shakeri, R., & Habibi Hajikolae, B. (2021). Proposed Mix Design of Recycled Concrete Used in Urban Concrete Tables Using Neural Network. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 17(4), 209-230. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.128404>
- [12] Anitha Selvasofia, S. D., Dinesh, A., & Sarath Babu, V. (2021). Investigation of waste marble powder in the development of sustainable concrete. *Materials Today: Proceedings*, 44, 4223-4226. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.536>
- [13] Heidari, A., Hashempour, M., & Tavakoli, D. (2017). Using of Backpropagation Neural Network in Estimation of Compressive Strength of Waste Concrete. *Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 1(1), 54-64. <https://doi.org/10.22115/scce.2017.48040>
- [14] Aydın, S., Yazıcı, H., Yiğiter, H., & Baradan, B. (2007). Sulfuric acid resistance of high-volume fly ash concrete. *Building and Environment*, 42(2), 717-721. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.10.024>
- [15] Caballero, C. E., Sanchez, E., Cano, U., Gonzalez, J. G., & Castano, V. (2000). On The Effect Of Fly Ash On The Corrosion Properties Of Reinforced Mortars. *Corrosion Reviews*, 18(2-3), 105-112. <https://doi.org/10.1515/CORRREV.2000.18.2-3.105>
- [16] Goyal, S., Kumar, M., Sidhu, D. S., & Bhattacharjee, B. (2009). Resistance of Mineral Admixture Concrete to Acid Attack. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 7(2), 273-283. <https://doi.org/10.3151/jact.7.273>
- [17] Mane, K. M., Kulkarni, D. K., & Prakash, K. B. (2019). Prediction of Flexural Strength of Concrete Produced by Using Pozzolanic Materials and Partly Replacing NFA by MS.

- Journal of Soft Computing in Civil Engineering*, 3(2), 65-75. <https://doi.org/10.22115/scc.e.2019.197000.1121>
- [18] Van Der Wegen, G., Polder, R. B., & Van Breugel, K. (2012). Guideline for service life design of structural concrete—a performance based approach with regard to chloride induced corrosion. *Heron*, 57(3), 153-168. <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1078.2508&rep=rep1&type=pdf>
- [19] Rodrigues, R., de Brito, J., & Sardinha, M. (2015). Mechanical properties of structural concrete containing very fine aggregates from marble cutting sludge. *Construction and Building Materials*, 77, 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.104>
- [20] Ergün, A. (2011). Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 25(2), 806-812. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.002>
- [21] Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., & Auda, E. M. (2014). Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 28-41. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.09.005>
- [22] Rana, A., Kalla, P., & Csetenyi, L. J. (2015). Sustainable use of marble slurry in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 94, 304-311. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.053>
- [23] Sardinha, M., Brito, J., & Rodrigues, R. (2016). Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge. *Construction and Building Materials*, 119, 45-52. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.071>
- [24] Türker, P., Erdogan, B., & Erdogdu, K. (2002). Influence of marble powder on microstructure and hydration of cements. *Cem. Concr. World J. TÇMB (Turkey)*, 7, 38-89.
- [25] Şahan Arel, H. (2016). Recyclability of waste marble in concrete production. *Journal of Cleaner Production*, 131, 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.05.052>
- [26] Shelke, V., Pawde, P., & Shrivastava, R. (2012). Effect of marble powder with and without silica fume on mechanical properties of concrete. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 1(1), 40-45. https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/vol1-issue1/E01_14045.pdf
- [27] Amin, E. H., Khalid, A., & Alam, A. (2014, December 28-30). *Use of silica fume and marble dust as partial binding material in concrete*. 1st International Conference on Emerging Trends in Engineering, Management and Sciences, Peshawar, Pakistan. <http://cusit.edu.pk/icetems/Proceeding/Civil%20Engineering/PK-CE-118.pdf>
- [28] Zhang, S., Cao, K., Wang, C., Wang, X-h., & Sun, B. (2020). Effect of silica fume and waste marble powder on the mechanical and durability properties of cellular concrete. *Construction and Building Materials*, 241(5), 117980. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117980>
- [29] American Society for Testing and Materials. (2016). *Standard Specification for Concrete Aggregates (ASTM C33 / C33M:2016)*. American Society for Testing and Materials. <https://www.gso.org.sa/store/standards/GSO:738778?lang=en>
- [30] Khodabakhshian, A., Ghalehnovi, M., Brito, J., & Asadi Shamsabadi, E. (2017). Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Journal of Cleaner Production*, 170, 42-60. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.116>
- [31] American Concrete Institute Committee 211. (1991). *Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (ACI 211.1-91)* (ACI 211.1-91). American Concrete Institute Committee. https://dl.wqtxts1xzle7.cloudfront.net/50311941/211.1_91-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1656944903&Signature=ROktpU~r7It-XduwXKJ5KfC4Ci-ZZ18qnVIsuZsuBVL6SJERtsD71oRoJh

[tZuxqn0puC3p7b7vt7vstZ2~AxoBOsMB6hDosJ2~s3yC2eM7v-ZCNjEF4oDdM
MBAWBjWp26lxZttN1mcVjCJheuIiuKbb~9R5HGEO6Dc6JteQyHjsbAb44Cs85
O5Mf43LZTqfSohGfbrX-oDsmYty4rIY3Djww0Dbsc9HRAqLqMwedkVRuaz4t2
cvdrlv1W2mY2E5QUuH-wtZFs7NdnKT1muAd-Ayx5pL5RipzBQb6Ek7TJt0Dd
VIE3dEXLjK8OhIrrPUahApgQ7o-DLXrNysa5A &Key-Pair-Id=APKAJL_OHF
5GGSLRBV4ZA](https://www.mystandards.biz/standard/astm-c143-c143m-12-1.11.2012.html)

- [32] American Society for Testing and Materials. (2012). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete* (ASTM C143/C143M-12). American Society for Testing and Materials. <https://www.mystandards.biz/standard/astm-c143-c143m-12-1.11.2012.html>
- [33] American Society for Testing and Materials. (2013). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete* (ASTM C642-13). American Society for Testing and Materials. <https://www.madcad.com/store/subscription/ASTM-C642-13/>
- [34] British Standards Institution. (2002). *Testing hardened concrete* (BS EN12390-3: 2002). British Standards Institution. https://dl.wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36451394/BS_EN_12390_PT_3-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1656944519&Signature=Kt9tTIqvbXR8LkWNHN0c0BMZh0BzNMM6jdT97M5QlauFpzrbW~gbgO~cejBHy7Bj9Sjqk3z411cNd6JApGFiscKhhTnc~P~TeGF-of2jPdJDFHi0pMLCt2RMz1swVcQ2q7AoWLUTyWZO0ptF6VgFzLI-GNcYGPdETy7tyO87As9JbMr3DpBZq7OT7FZlwXgXgSTWSyxH1UeSYynsyjO18jr-f8xINdmw5OPcYIE0YuY4F9XEhSKEWCnu3oHDhhOVQh7Ftjw0hDAQZSpowU8IzJ8~lSkBxwiglYUllkwzFrbVcriZhX~L75gL-YYvh8~8ubMV~rXctzIoWYNETKDKYA&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA