

## Evaluation of mechanical properties and durability of concrete with provided marble dust from Kurdistan

Aryan Bazrafkan<sup>1</sup>, Alireza Habibi<sup>2\*</sup>, Arash Sayari<sup>3</sup>

1- Ph.D. student in structural Engineering, Department of Civil Engineering, Sanandaj branch, Islamic Azad University, Sanandaj, Iran

2- professor, Department of Civil Engineering, Shahed University, Tehran, Iran

3- Assistant professor, Department of Civil Engineering, Sanandaj branch, Islamic Azad University,

### ABSTRACT

Marble dust is an industrial by-product that has recently been used as a mineral powder to improve the mechanical properties of concrete. Furthermore, since large amounts of marble dust is available in the waste of stone crushing plants in areas like Kurdistan, employing this powder in the process of making concrete reduces both environmental pollution and the final price of concrete. In this paper, an experimental study was conducted to evaluate the effects of using marble dust as a partial replacement of sand in concrete on slump, 28-day compressive strength, and durability at 28 days. To this end, 180 cubic specimens with 30 mixing designs were tested at the age of 28 days. Studied mixing designs by considering two general groups include three ratios of water to cement (0.4, 0.45, and 0.5) with five ratios of marble dust to sand (0, 0.05, 0.1, 0.15, and 0.2) for each water to cement ratios, and two fineness moduluses of 2.4, and 3 for each groups. The results indicated that partial replacement of sand with marble dust in concrete has different effects on concrete slump. Whereas, it improves compressive strength and decreases permeability of concrete. Moreover, it was found that for each of water to cement ratios, and for both quantities of fineness modulus of sand, increasing marble dust-to-sand ratio from 0 to 20%, increases the compressive strength by 5 to 16% with respect to its respective control specimen. In addition, the results indicated that for each of water to cement ratios, and for both amounts of fineness modulus of sand, increasing the marble dust to sand ratio from 0 to 20%, decreases the depth of water penetration by 55 to 79% with respect to its respective control specimen.

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 25 March 2020

**Revise Date:** 20 May 2020

**Accept Date:** 29 June 2020

### Keywords:

Concrete

Marble dust

Mix Design

Slump

Compressive strength

Depth of water penetration

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.224231.2113>

\*Corresponding author: Alireza habibi.

Email address: ar.habibi@shahed.ac.ir

## ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن با پودر سنگ مرمر کردستان

آرین بذرافکن<sup>۱</sup>، علیرضا حبیبی<sup>۲\*</sup>، آرش سیاری<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سازه، گروه مهندسی عمران، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

۲- استاد، گروه مهندسی عمران، دانشگاه شاهد، تهران، ایران

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

### چکیده

پودر سنگ مرمر یک فراورده فرعی صنعتی است که اخیراً به عنوان یک پودر معدنی در جهت بهبود خواص مکانیکی بتن مورد استفاده قرار گرفته است. علاوه بر این، استفاده از این پودر در بتن در مناطقی مثل کردستان که این ماده به صورت ضایعات سنگبری‌ها به مقدار قابل توجهی وجود دارد می‌تواند باعث جلوگیری از آلودگی محیط زیست شده و موجب ارزان‌تر شدن قیمت نهایی بتن گردد. در این مقاله به مطالعه آزمایشگاهی اثرات استفاده از پودر سنگ مرمر در بتن به عنوان جایگزینی بخشی از ماسه، بر اسلامپ، مقاومت فشاری و دوام ۲۸ روزه بتن پرداخته می‌شود. بدین منظور ۱۸۰ نمونه مکعبی با در نظر گرفتن ۳۰ طرح اختلاط، در دو گروه کلی که هر گروه شامل سه نسبت آب به سیمان (۰،۵ و ۰،۴۵ و ۰،۴۰)، پنج نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه (۰،۲ و ۰،۱۵ و ۰،۱ و ۰،۰۵ و ۰،۰) برای هر نسبت آب به سیمان و ماسه با دو مدول نرمی ۲،۴ و ۳ می‌باشد، ساخته شده و در سن ۲۸ روزه تحت آزمایش قرار گرفتند. نتایج حاکی از آن است که جایگزینی بخشی از ماسه با پودر سنگ مرمر در بتن اثرات مختلفی بر روی اسلامپ داشته اما باعث بهبود مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن می‌شود. با افزایش نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه از صفر تا ۲۰ درصد، مقاومت فشاری در حدود ۵ تا ۱۶ درصد مقاومت نمونه شاهد در هر یک از نسبت‌های آب به سیمان و برای هر دو مقدار مدول نرمی ماسه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه از صفر تا ۲۰ درصد، عمق نفوذ آب در نمونه‌ها در هر یک از نسبت‌های آب به سیمان و برای هر دو مقدار مدول نرمی ماسه، در حدود ۵۵ تا ۷۹ درصد عمق نفوذ آب در نمونه شاهد در هر دسته کاهش می‌یابد.

کلمات کلیدی: بتن، پودر سنگ مرمر، طرح اختلاط، اسلامپ، مقاومت فشاری، نفوذپذیری آب در بتن

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.224231.2113">https://dx.doi.org/10.22065/jsce.2020.224231.2113</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2020.224231.2113	۱۴۰۰/۱۱/۳۰	۱۳۹۹/۰۴/۰۹	۱۳۹۹/۰۴/۰۹	۱۳۹۹/۰۲/۳۱	۱۳۹۹/۰۱/۰۶
علیرضا حبیبی ar.habibi@shahed.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

## ۱- مقدمه

خصوصیات مکانیکی بتن را می‌توان با جایگزینی برخی از اجزای بتن با مواد مناسب یا افزودن مواد خاصی به آن بهبود بخشید. از دلایل استفاده از پودر سنگ مرمر (MD<sup>1</sup>) به عنوان جایگزین بخشی از ماسه در بتن، اصلاح ماسه موجود، افزایش مقاومت فشاری بتن، کاهش نفوذپذیری آب در بتن و کم شدن پتانسیل خوردگی بتن می‌باشد. همچنین با استفاده از پودر سنگ مرمر در بتن، علاوه بر کاهش آلودگی محیط زیست می‌توان قیمت تمام شده بتن را نیز کاهش داد. بنابراین، در کردستان نیز به دلیل وجود سنگبری‌های فراوان، و با توجه به اینکه پودر سنگ مرمر جز ضایعات سنگبری‌هاست، استفاده از این پودر در ساخت بتن بسیار مفید به نظر می‌رسد. طبق مطالعات نویل [۱] در سال ۱۹۹۵ پرکننده می‌تواند به صورت طبیعی و یا به صورت فرآوری شده وجود داشته باشد. پرکننده‌ها باید ویژگی و نرمی یکنواختی داشته باشند و نباید هنگام استفاده در بتن، میزان آب مصرفی را افزایش دهند. از طرفی پوزولان یک ماده معدنی است که به خودی خود خاصیت سیمانی ندارد، اما هنگامی که به مخلوط بتنی اضافه می‌شود مانند پودر سیمان واکنش نشان می‌دهد. پاچیده و همکاران [۲ و ۳] در سال‌های ۲۰۱۹ و ۲۰۲۰ به ارزیابی رفتار پس از گرما ملات سیمانی با میکروسیلیس و سرباره کوره آهن گدازی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش‌ها با بکار بردن این مواد با درصد جایگزینی‌های ۷، ۱۴ و ۲۱ و دماهای انتخابی ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به این نتیجه رسیدند که اثرات اساسی استفاده از این مواد بر مقاومت فشاری، کششی و خمشی ملات سیمانی، در دماهای کم (تا ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) و بالا (۵۰۰ درجه سانتی‌گراد و بالاتر) صورت می‌گیرد. چنگ و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۸ خصوصیات الکتریکی و مهندسی ملات سیمانی با ضایعات پودرهای شیشه و پیزوالکتریک را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که جایگزینی ۲۰٪ وزنی سیمان با پودر شیشه، منافذ ریزتری را پر کرده و هیدراسیون را تسریع می‌بخشد. پاچیده و همکاران [۵] در سال ۲۰۲۰ به بررسی تاثیر ضایعات پوزولانی بر خصوصیات مکانیکی، دوام و ریزساختار ملات‌های سیمانی پرداختند. نتایج نشان داد که استفاده از پوزولان‌ها تا نسبت جایگزینی ۱۴٪، مقاومت فشاری را تا ۲۸٪ در مقایسه با نمونه شاهد افزایش داده و استفاده از ۷٪ پوزولان، مقاومت کششی را بهبود می‌بخشد. علاوه بر این مشاهده شد که درصد جذب آب نمونه‌های حاوی پوزولان در مقایسه با نمونه شاهد کمتر می‌باشد. الطایب و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۳ تحقیقاتی درباره تاثیر کاهش سیمان با افزودن پودر ضایعات لاستیک بر رفتار ضربه‌ای بتن انجام دادند. نتایج نشان داد که با وجود کاهش مقدار سیمان، افزودن پودر لاستیک تا ۱۰٪، مقاومت ضربه‌ای، بار اینرسی و بار خمشی را بهبود می‌بخشد. پاچیده و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۹ به بررسی تاثیر مواد پوزولانی بر خصوصیات مکانیکی و جذب آب بتن هوادار اتوکلاو شده پرداختند. نتایج نشان داد که افزودن مواد پوزولانی به بتن می‌تواند خصوصیات مکانیکی بتن را بهبود داده و از جذب آب بتن هوادار اتوکلاو شده بکاهد. همچنین پاچیده و همکاران [۸] در سال ۲۰۲۰ به مطالعه تجربی مقاومت مکانیکی بتن متخلخل روسازی حاوی پوزولان پرداختند. نتایج نشان داد که با افزودن ۱۰٪ میکروسیلیس در بتن متخلخل به عنوان جایگزین بخشی از سیمان، مقاومت فشاری و کششی افزایش یافته و با افزایش مقدار میکروسیلیس، درصد جذب آب نمونه‌ها کاهش می‌یابد. شیرامورا [۹] در سال ۱۹۹۴ تحقیقاتی در مورد استفاده از پودر سنگ آهک در بتن انجام داد. در این مطالعات، تاثیر اختلاط‌های مختلف پودرهای معدنی خوب مثل پودر سنگ آهک، بر مقاومت فشاری بتن RCD<sup>2</sup> بررسی شده است. توگاوا و همکاران [۱۰] در سال ۱۹۹۶ تحقیقاتی در مورد خصوصیات آب انداختگی، مقاومت آب شدگی-یخبندان و جذب آب بتن با خاکستر فرونیکل انجام دادند که در این تحقیقات، اثرات پودرهای معدنی از جمله پودر سنگ آهک بر روی بهبود مقاومت فشاری، آب انداختگی و مقاومت آب شدگی-یخبندان بررسی شده است. ناس و کوربتسی [۱۱] در سال ۲۰۱۸ در مورد احتمال استفاده از ژئولیت طبیعی در تولید بتن و تأثیرات آن بر مقاومت و دوام بتن تحقیق کردند. در این تحقیق، سیمان پرتلند با ژئولیت طبیعی در نسبت‌های ۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد وزن جایگزین شد. علاوه بر اندازه‌گیری مقاومت فشاری و خمشی، مقاومت در برابر یخ زدگی و دمای بالا، نفوذپذیری سریع آزمایش‌های جذب آب کلرید و موینگی روی مخلوط‌های بتنی اندازه‌گیری شد. با مقایسه نتایج، مخلوط بتنی حاوی ۱۰٪ ژئولیت، با بالاترین مقاومت فشاری و خمشی همراه بود. نفوذپذیری سریع کلریدها و اندازه‌گیری موینگی با افزایش ژئولیت طبیعی کاهش یافت. همچنین مقاومت به آب شدگی-یخبندان با افزایش نسبت جایگزینی ژئولیت به طور قابل توجهی بهبود یافت. تاثیرات ریز ساختار، بر روی خصوصیات فیزیکی بتن تهیه شده با جایگزینی پودر معدنی به جای ریزدانه، توسط یوچیکاوا و

<sup>1</sup> Marble Dust<sup>2</sup> Roller Compacted Concrete Dams

همکارانش [۱۲] در سال ۱۹۹۶ انجام شد. در تحقیقات یوچیکاوا، واکنش هیدراسیون و ساختار حفره‌ها بررسی شد. همچنین مقاومت فشاری ۳-۹۱ روزه بتن با جایگزینی ۳۶ درصد ریزدانه با پودر سنگ آهک و نسبت آب به سیمان ۰.۵۹، مورد تحقیق قرار گرفت. بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن ژئوپلیمر با خاکستر بادی و کلسیم کم با افزودن آلکوفاین به عنوان یک افزودنی توسط جیندال و همکارانش [۱۳] در سال ۲۰۱۸ مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش نشان داد که افزودن آلکوفاین به طور قابل توجهی خصوصیات مکانیکی بتن را بهبود می‌بخشد. همچنین ارتباط خوبی بین عمق نفوذ آب و مقاومت فشاری، درصد حفره‌های قابل نفوذ و مقاومت فشاری، به ویژه بین مقاومت فشاری و مقاومت خمشی مشاهده شد. خصوصیات ناحیه انتقال در خمیر سیمان با افزودنی‌های اطراف دانه‌ها، توسط کوبایاشی [۱۴] در سال ۱۹۹۶ بررسی شد. در این تحقیقات، ناحیه انتقال خمیر سیمان محتوی پودر سنگ آهک، به وسیله آزمایش ویکرز مطالعه شده است. نتیجه مطالعات کوبایاشی این بود که اضافه کردن پودر سنگ آهک به بتن، ضخامت ناحیه انتقال را کم می‌کند. ساکاتا و همکارانش [۱۵] در سال ۱۹۹۶ مطالعاتی در مورد روش طرح اختلاط بتن خود متراکم با پودر سنگ آهک انجام دادند. تحقیقات آن‌ها، به تعیین مقدار موثر پودر سنگ آهک در طرح اختلاط، منتهی شد. ساویز و هنگ [۱۶] در سال ۱۹۹۶ مطالعاتی در مورد دوام بتن با پودر سنگ آهک انجام دادند. در این تحقیقات، تاثیرات تداخلی پودر سنگ آهک و نسبت آب به سیمان روی دوام بتن در ۵ درصد سولفات سدیم و مقاومت فشاری و جذب آب ۲۸ روزه بتن بررسی گردید. کوبایاشی و همکارانش [۱۷] در سال ۱۹۹۷ اثرات پودر سنگ آهک را روی هیدراسیون سیمان در سنین پایین بررسی کردند. در این تحقیق از دو نوع پودر سنگ آهک با نرمی‌های مختلف استفاده شد. تاثیر افزودنی‌های معدنی در آب مورد نیاز خمیر سیمان، در سال ۲۰۰۰ توسط گالیاس و همکارانش [۱۸] مورد بررسی قرار گرفت. نتیجه این تحقیقات، این بود که سطح مخصوص مواد معدنی، به عنوان پارامتر اصلی در مقدار آب مورد نیاز خمیر سیمان، بدون استفاده از روان‌کننده، می‌باشد. کاتو و همکارانش [۱۹] در سال ۲۰۰۱، تاثیر پودر سنگ آهک در توسعه مقاومت، گیرش و انقباض بتن با روانی بالا را مورد بررسی قرار دادند. نتیجه تحقیقات آن‌ها افزایش سرعت گیرش، کاهش مقاومت، کاهش انقباض کوتاه مدت و افزایش انقباض بلند مدت بتن حاوی پودر سنگ آهک، بود. بیرالینگودا و گانداکال [۲۰] در سال ۲۰۱۳ تاثیر اضافه کردن پودر سنگ آهک را روی خصوصیات بتن خود متراکم تازه و سخت شده بررسی کردند و نشان دادند که پودر سنگ آهک خصوصیات مکانیکی و کارایی بتن را تا ۲۰ درصد بهبود می‌دهد. حبیبی [۲۱] در سال ۱۳۸۸، اثرات تداخلی پودر سنگ آهک منطقه‌ی اصفهان را بر خواص مکانیکی بتن بررسی نمود. با انجام آزمایشات، در این تحقیق، نشان داده شد که یکی از بهترین نوع جایگزینی‌های پودر سنگ آهک در بتن، جایگزینی آن با شن و ماسه به‌طور مساوی می‌باشد.

در این مقاله با توجه به مطالعات انجام شده و همچنین عدم وجود تحقیقات در زمینه بررسی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن با پودر سنگ مرمر بطور همزمان، تاثیر نسبت‌های مختلف پودر سنگ مرمر به ماسه، آب به سیمان و ماسه با دو مدول نرمی، بر کارایی، مقاومت فشاری و دوام ۲۸ روزه بتن بررسی شده است. به این منظور ۱۸۰ نمونه مکعبی با در نظر گرفتن ۳۰ طرح اختلاط در دو گروه کلی که هر گروه شامل سه نسبت آب به سیمان (۰.۴۵ و ۰.۴۰ و ۰.۳۵)، پنج نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه (۰.۲، ۰.۱۵، ۰.۱۰، ۰.۰۵، ۰.۰) برای هر نسبت آب به سیمان و ماسه با دو مدول نرمی ۲.۴ و ۳ می‌باشد، ساخته شده و تحت آزمایش‌های اسلامپ، مقاومت فشاری و نفوذپذیری آب قرار گرفتند. در نهایت، نتایج حاصل از آزمایشات ارزیابی شدند.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

سیمان مصرفی در مخلوط‌های آزمایشی، سیمان پرتلند معمولی (OPC<sup>۳</sup>) نوع ۴۲۵-۱ می‌باشد که تولید کارخانه سیمان سامان غرب بوده و وزن مخصوص آن ۳۱۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است. این سیمان مطابق استاندارد [۲۲] ISIRI 389 ایران تولید می‌شود. مشخصات فیزیکی و شیمیایی سیمان مورد استفاده در جدول ۱ ارائه شده است.

<sup>3</sup> Ordinary Portland Cement

جهت ساخت نمونه‌ها از شن رودخانه‌ای به اندازه ۵ تا ۱۹ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و جرم حجمی ۱۶۱۶ کیلوگرم بر مترمکعب استفاده شده است. در این مطالعه، محدوده استاندارد اندازه دانه‌ها مطابق با استاندارد [۲۳] ASTM C33-03 مشخص شده است. به منظور تعیین نسبت اندازه‌های مختلف شن (نخودی و بادامی)، در منحنی استاندارد تنها قسمت مربوط به شن در نظر گرفته شده، که با تناسب‌بندی درصد عبوری از الک، ۵۵٪ بادامی و ۴۵٪ نخودی بدست آمده است. همچنین، در کل مخلوط‌های بتنی این تحقیق، از ماسه رودخانه‌ای با دانه‌بندی ۰ تا ۲٫۴ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲۶۴۰ کیلوگرم بر مترمکعب، جرم حجمی ۱۷۲۲ کیلوگرم بر مترمکعب و دو مدول نرمی ۲٫۴ و ۳ استفاده شده است. منحنی دانه‌بندی برای سنگدانه‌های درشت (شن) و سنگدانه‌های ریز (ماسه) با دو مدول نرمی  $FM^F=2.4$  و  $FM=3$  مطابق با استاندارد [۲۴] ASTM C136-06 در شکل ۱ ارائه شده است.

در این پژوهش با تحقیق در منطقه کردستان (ایران) و با مراجعه به کارخانه‌های سنگبری و منابع معدنی موجود، پودر سنگ مرمر  $(CaCO_3)$  مناسب، با وزن مخصوص ۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و مطابق با مشخصات مورد نیاز تهیه شد. ترکیبات شیمیایی و خصوصیات فیزیکی پودر سنگ مرمر استفاده شده در جدول ۲ ارائه شده است.

آب نقش بسیار مهمی در بتن دارد، بنابراین استفاده از آب مناسب در بتن همیشه باید در نظر گرفته شود. در کل فرآیند این تحقیق از جمله ساخت نمونه، عمل‌آوری و غیره از آب آشامیدنی در کارگاه استفاده شده است. آب استفاده شده بدون انجام آزمایش اضافی مطابق بند ۹-۱۰-۴-۲ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان ایران ۱۳۹۲ پذیرفته شده است [۲۵].

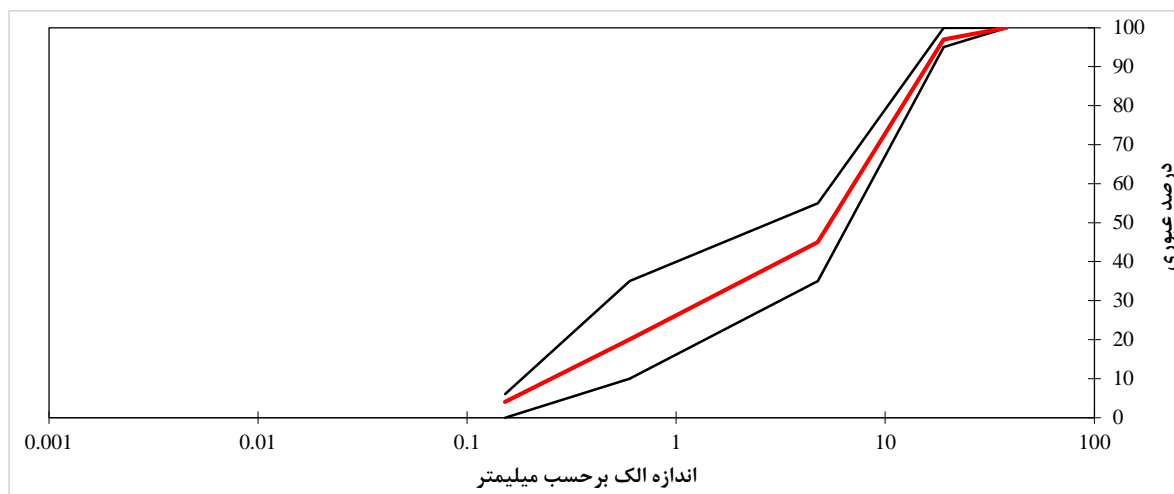
جهت افزایش کارایی برای نسبت آب به سیمان معین، از فوق روان‌کننده نوع POWER PLAST-ES شرکت آبادگران استفاده شده است. مزایای اخیر برای بتن متراکم و با مقاومت بالا با مقدار مشخص سیمان نتیجه مطلوب‌تری می‌دهد. این خاصیت برای صرفه جویی در سیمان ضمن حفظ مقاومت آن استفاده می‌شود. خصوصیات فیزیکی و شیمیایی فوق روان‌کننده مورد استفاده در جدول ۳ آورده شده است. مقدار فوق روان‌کننده‌ها توسط کارگاه‌ها تعیین می‌شود، اما بسته به طرح اختلاط بتن (اندازه و نوع سنگدانه‌ها، محتوای سیمان، نسبت آب به سیمان، دمای هوا و نوع تولید بتن)، میزان مصرف در حدود ۰٫۳ تا ۰٫۹ درصد وزن سیمان و مواد جایگزین سیمان مصرفی می‌باشد.

جدول ۱: مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان پرتلند تپ ۴۲۵-۱

نتایج	مشخصات فیزیکی	نتایج	مشخصات شیمیایی
$3200 \pm 100$	سطح مخصوص سیمان (بلین) ( $cm^2/g$ )	$20.7 \pm 0.3$	اکسید سیلیسیوم $SiO_2$ %
$0.08 \pm 0.02$	روش اتوکلاو %	$5.2 \pm 0.2$	اکسید آلومینیوم $Al_2O_3$ %
$140 \pm 20$	زمان گیرش اولیه (دقیقه)	$4.6 \pm 0.2$	اکسید آهن $Fe_2O_3$ %
$240 \pm 20$	زمان گیرش نهایی (دقیقه)	$65 \pm 0.5$	اکسید کلسیم $CaO$ %
$210 \pm 10$	مقاومت فشاری ۲ روزه ( $Kg/cm^2$ )	$1.8 \pm 0.2$	اکسید منیزیم $MgO$ %
$440 \pm 10$	مقاومت فشاری ۷ روزه ( $Kg/cm^2$ )	$2.2 \pm 0.4$	اکسید سولفور $SO_3$ %
$530 \pm 10$	مقاومت فشاری ۲۸ روزه ( $Kg/cm^2$ )	$0.5 \pm 0.6$	اکسید پتاسیم $K_2O$ %
$1.2 \pm 0.1$	الک ۰٫۰۹ میلیمتر	$0.15 \pm 0.05$	اکسید سدیم $Na_2O$ %
$3.13 \pm 0.01$	چگالی ( $g/cm^3$ )	۵۹٫۴۷	تری کلسیم سیلیکات $C_3S$ %
		۱۴٫۴۸	دی کلسیم سیلیکات $C_2S$ %
		۶	تری کلسیم آلومینات $C_3A$ %
		۱۴	تترا کلسیم آلومینوفریت $C_4AF$ %

<sup>4</sup> Fineness modulus

<sup>5</sup> Calcium carbonate



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی سنگدانه‌های مصرفی

جدول ۲: مشخصات فیزیکی و شیمیایی پودر سنگ مرمر

۹۹٫۸	کربنات کلسیم (%) (CaO)	ترکیبات شیمیایی
۰٫۰۰۳	اکسید منیزیم (%) (MgO)	
۰٫۰۲۹	اکسید آهن (%) (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	
۰٫۱۳۷	اکسید سیلیس (%) (SiO <sub>2</sub> )	
۰٫۰۲	حداکثر باقیمانده روی الک ۳۲ میکرون (%)	نرمی
۲۵	حداکثر اندازه (μm)	
۶	اندازه متوسط (μm)	
۲٫۷	وزن مخصوص (gr.cm <sup>-3</sup> )	مشخصات فنی
۱	وزن مخصوص توده‌ای (gr.cm <sup>-3</sup> )	

جدول ۳: مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق روان کننده

بنیان شیمیایی	پلی کربوکسیلات
وزن مخصوص	۱۰۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب
حالت فیزیکی	مایع
یون کلر	ندارد-کمتر از استاندارد [۲۶] ISIRI 2930-2

## ۲-۲- طرح اختلاط بتن مصرفی

اجزای مخلوط بتن با نسبت‌های آب به سیمان ۰٫۴، ۰٫۴۵ و ۰٫۵، نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه ۰٫۰۵، ۰٫۱، ۰٫۱۵ و ۰٫۲، نسبت‌های فوق روان کننده به سیمان ۰٪، ۰٫۲۵٪، ۰٫۵٪، ۰٫۷۵٪ و ۱٪ و ماسه با دو مدول نرمی ۲٫۴ و ۳ با توجه به روش حجمی آیین‌نامه [۲۷] ACI-211 تعیین شد. مقادیر محاسبه شده برای دانه‌ها با توجه به رطوبت طبیعی اصلاح می‌گردد. همچنین مقدار آب، با توجه به رطوبت طبیعی و حالت اشباع دانه‌ها تصحیح گردید. در نهایت، به ازای مقادیر مختلف نسبت‌های آب به سیمان، مقادیر اجزاء بتن محاسبه شدند. در جدول ۴ مقادیر محاسبه شده اجزای بتنی در یک متر مکعب ارائه شده است. در این جدول اجزای مخلوط‌های بتنی به ۲ گروه کلی (۱۶-۳۰ و ۱-۱۵) تقسیم بندی شده که طرح اختلاط‌های شماره ۱ تا ۱۵ مربوط به ماسه با مدول نرمی ۳ و طرح اختلاط‌های ۱۶ تا ۳۰ مربوط به ماسه با مدول نرمی ۲٫۴ می‌باشند. همچنین هر گروه به ۳ دسته ۵ تایی (۲۶-۳۰؛ ۲۱-۲۵؛ ۱۶-۲۰؛ ۱۱-۱۵؛ ۶-۱۰-۵) تقسیم شده که دسته‌های ۱-۵ و ۱۶-۲۰ مربوط به نسبت آب به سیمان ۰٫۵، دسته‌های ۶-۱۰ و ۲۱-۲۵ مربوط به نسبت آب به

سیمان ۰,۴۵ و دسته‌های ۱۵-۱۱ و ۳۰-۲۶ مربوط به نسبت آب به سیمان ۰,۴ می‌باشند. در هر دسته نیز، پنج نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه جهت بررسی اثر جایگزینی‌های مختلف آن بر بتن، و پنج نسبت فوق روان‌کننده به سیمان جهت حفظ کارایی مخلوط در هر حالت در نظر گرفته شده است.

جدول ۴: مقادیر اجزای طرح اختلاط بتن با پودر سنگ مرمر در یک متر مکعب بر حسب کیلوگرم

شماره طرح اختلاط	$\frac{W}{C}$ <sup>۶</sup>	$\frac{MD}{S}$ <sup>۷</sup>	$\frac{SP}{C}$ <sup>۸</sup>	شن	ماسه	مدول نرمی	سیمان	آب	پودر سنگ مرمر	فوق روان‌کننده
۱	۰,۵	۰	۰	۹۷۵,۳	۷۵۱,۶	۳	۴۱۰	۲۰,۴	۰	۰
۲	۰,۵	۰,۰۵	۰,۰۰۲۵	۹۷۵,۳	۷۱۶,۱	۳	۴۱۰	۲۰,۴,۱	۳۵,۷	۱
۳	۰,۵	۰,۱	۰,۰۰۵	۹۷۵,۳	۶۸۳,۶	۳	۴۱۰	۲۰,۴,۱	۶۸	۲,۱
۴	۰,۵	۰,۱۵	۰,۰۰۷۵	۹۷۵,۳	۶۵۴,۲	۳	۴۱۰	۲۰,۴,۱	۹۷,۳	۳,۱
۵	۰,۵	۰,۲	۰,۰۱	۹۷۵,۳	۶۲۷,۳	۳	۴۱۰	۲۰,۴,۲	۱۲۳,۹	۴,۱
۶	۰,۴۵	۰	۰	۹۷۵,۳	۷۱۳	۳	۴۵۵,۶	۲۰,۴,۱	۰	۰
۷	۰,۴۵	۰,۰۵	۰,۰۰۲۵	۹۷۵,۳	۶۷۹,۳	۳	۴۵۵,۶	۲۰,۴,۱	۳۳,۹	۱,۱
۸	۰,۴۵	۰,۱	۰,۰۰۵	۹۷۵,۳	۶۴۸,۴	۳	۴۵۵,۶	۲۰,۴,۲	۶۴,۴	۲,۳
۹	۰,۴۵	۰,۱۵	۰,۰۰۷۵	۹۷۵,۳	۶۲۰,۵	۳	۴۵۵,۶	۲۰,۴,۲	۹۲,۱	۳,۴
۱۰	۰,۴۵	۰,۲	۰,۰۱	۹۷۵,۳	۵۹۵	۳	۴۵۵,۶	۲۰,۴,۲	۱۱۷,۳	۴,۶
۱۱	۰,۴	۰	۰	۹۷۵,۳	۶۶۴,۹	۳	۵۱۲,۵	۲۰,۴,۱	۰	۰
۱۲	۰,۴	۰,۰۵	۰,۰۰۲۵	۹۷۵,۳	۶۳۳,۴	۳	۵۱۲,۵	۲۰,۴,۲	۳۱,۵	۱,۳
۱۳	۰,۴	۰,۱	۰,۰۰۵	۹۷۵,۳	۶۰۴,۸	۳	۵۱۲,۵	۲۰,۴,۲	۶۰	۲,۶
۱۴	۰,۴	۰,۱۵	۰,۰۰۷۵	۹۷۵,۳	۵۷۸,۸	۳	۵۱۲,۵	۲۰,۴,۳	۸۵,۷	۳,۸
۱۵	۰,۴	۰,۲	۰,۰۱	۹۷۵,۳	۵۵۵,۳	۳	۵۱۲,۵	۲۰,۴,۳	۱۰۹	۵,۱
۱۶	۰,۵	۰	۰	۱۰۷۲,۸	۶۵۵	۲,۴	۴۱۰	۲۰,۴,۱	۰	۰
۱۷	۰,۵	۰,۰۵	۰,۰۰۲۵	۱۰۷۲,۸	۶۲۴	۲,۴	۴۱۰	۲۰,۴,۱	۳۱,۱	۱
۱۸	۰,۵	۰,۱	۰,۰۰۵	۱۰۷۲,۸	۵۹۵,۷	۲,۴	۴۱۰	۲۰,۴,۲	۵۹,۲	۲,۱
۱۹	۰,۵	۰,۱۵	۰,۰۰۷۵	۱۰۷۲,۸	۵۷۰,۱	۲,۴	۴۱۰	۲۰,۴,۲	۸۴,۶	۳,۱
۲۰	۰,۵	۰,۲	۰,۰۱	۱۰۷۲,۸	۵۴۶,۶	۲,۴	۴۱۰	۲۰,۴,۳	۱۰۷,۸	۴,۱
۲۱	۰,۴۵	۰	۰	۱۰۷۲,۸	۶۱۶,۴	۲,۴	۴۵۵,۶	۲۰,۴,۲	۰	۰
۲۲	۰,۴۵	۰,۰۵	۰,۰۰۲۵	۱۰۷۲,۸	۵۸۷,۲	۲,۴	۴۵۵,۶	۲۰,۴,۲	۲۹,۳	۱,۱
۲۳	۰,۴۵	۰,۱	۰,۰۰۵	۱۰۷۲,۸	۵۶۰,۵	۲,۴	۴۵۵,۶	۲۰,۴,۲	۵۵,۶	۲,۳
۲۴	۰,۴۵	۰,۱۵	۰,۰۰۷۵	۱۰۷۲,۸	۵۳۶,۴	۲,۴	۴۵۵,۶	۲۰,۴,۳	۷۹,۵	۳,۴
۲۵	۰,۴۵	۰,۲	۰,۰۱	۱۰۷۲,۸	۵۱۴,۳	۲,۴	۴۵۵,۶	۲۰,۴,۳	۱۰۱,۱	۴,۶
۲۶	۰,۴	۰	۰	۱۰۷۲,۸	۵۶۸,۳	۲,۴	۵۱۲,۵	۲۰,۴,۲	۰	۰
۲۷	۰,۴	۰,۰۵	۰,۰۰۲۵	۱۰۷۲,۸	۵۴۱,۴	۲,۴	۵۱۲,۵	۲۰,۴,۳	۲۶,۹	۱,۳
۲۸	۰,۴	۰,۱	۰,۰۰۵	۱۰۷۲,۸	۵۱۶,۹	۲,۴	۵۱۲,۵	۲۰,۴,۳	۵۱,۲	۲,۶
۲۹	۰,۴	۰,۱۵	۰,۰۰۷۵	۱۰۷۲,۸	۴۹۴,۷	۲,۴	۵۱۲,۵	۲۰,۴,۳	۷۳,۱	۳,۸
۳۰	۰,۴	۰,۲	۰,۰۱	۱۰۷۲,۸	۴۷۴,۶	۲,۴	۵۱۲,۵	۲۰,۴,۴	۹۲,۹	۵,۱

<sup>۶</sup> Water to Cement

<sup>۷</sup> Marble Dust to Sand

<sup>۸</sup> Superplasticizer to Cement

## ۲-۳- روش آزمایش

قبل از تهیه و ساخت نمونه‌ها، شن مورد استفاده جهت رفع خاک رس موجود در آن شسته شد. رطوبت سنگدانه‌ها مورد بررسی قرار گرفت و آب مخلوط برای رساندن رطوبت سنگدانه‌ها به حالت اشباع با سطح خشک که در طرح اختلاط به کار رفته بود، اصلاح شد. از طرف دیگر، برای تهیه بتنی با کیفیت خوب و یکنواخت، اجزای تشکیل دهنده بتن باید با دقت اندازه گیری و مخلوط شوند. بدین منظور ابتدا مقادیر صحیح سیمان، مصالح سنگی، آب و ماده افزودنی پیمان‌شده. سپس جهت مخلوط کردن مصالح بتن که اساساً با بهم زدن یا دوران دادن مصالح تامین می‌شود، از مخلوط کن کج شونده (بتونیر معمولی) استفاده شد.

پس از ساخت هر طرح اختلاط، قالب‌هایی که از قبل روغن کاری شده بودند آماده و مطابق با استاندارد [۲۸] BS EN12390-2 بتن ساخته شده در سه لایه و با حداقل ۳۵ بار میله زدن با یک کوبه مربعی فولادی برای تراکم هر لایه، در آن‌ها ریخته شدند. نمونه‌ها پس از ساخت و قالب‌گیری، بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج و تا سن ۲۸ روز در حوضچه آب و در دمایی در محدوده  $20 \pm 2$  درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش، از نوع مکعبی با ابعاد استاندارد ۱۵۰ میلی‌متر انتخاب شده است، که با سه نسبت آب به سیمان، پنج نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه و ماسه با دو مدول نرمی ساخته شدند. برای هر مخلوط از مجموع ۳۰ طرح اختلاط پیشنهاد شده در جدول ۵، سه نمونه برای انجام آزمایش مقاومت فشاری و سه نمونه جهت انجام آزمایش نفوذپذیری آب، در نظر گرفته شده که تعداد کل نمونه‌های مورد نیاز برابر ۱۸۰ نمونه مکعبی بتنی گردید.

## ۳- انجام آزمایش

آزمایش‌های بتنی را می‌توان به دو نوع آزمایش بر روی بتن تازه (اسلامپ) و آزمایش بر روی بتن سخت شده (مقاومت فشاری و نفوذپذیری آب) تقسیم کرد.

## ۳-۱- آزمایش بتن تازه

جهت تعیین میزان کارایی بتن‌های ساخته شده هر طرح اختلاط، از آزمایش اسلامپ استفاده شد. برای انجام آزمایش مطابق با جزئیات شرح داده شده در استاندارد [۲۹] BS EN12350-2، بتن تازه در سه لایه درون مخروط ناقص فلزی به ارتفاع ۳۰۵ میلی‌متر (۱۲ اینچ)، قطر قاعده بزرگ ۲۰۳ میلی‌متر (۸ اینچ) و قطر قاعده کوچکتر در بالا به اندازه ۱۰۲ میلی‌متر (۴ اینچ) ریخته شده و هر لایه با ۲۵ ضربه توسط میله فلزی با سر مدور به قطر ۱۶ میلی‌متر (۰٫۶۲۵ اینچ) متراکم می‌گردد. سپس سطح آن را با حرکت اره‌ای و غلتشی میله کوبه‌ای شمشه کشی صاف کرده، مخروط به آرامی و به صورت قائم بالا کشیده می‌شود. بتن پس از بیرون آمدن از قالب مخروطی مقداری افت می‌کند. افت بتن و ارتفاع کم شده با خط‌کش از بلندترین بخش بتن با تقریب ۵ میلی‌متر (۰٫۲۵ اینچ) یادداشت می‌شود. میزان این افت را اسلامپ می‌نامند.

## ۳-۲- آزمایش‌های بتن سخت شده

## ۳-۲-۱- آزمایش مقاومت فشاری

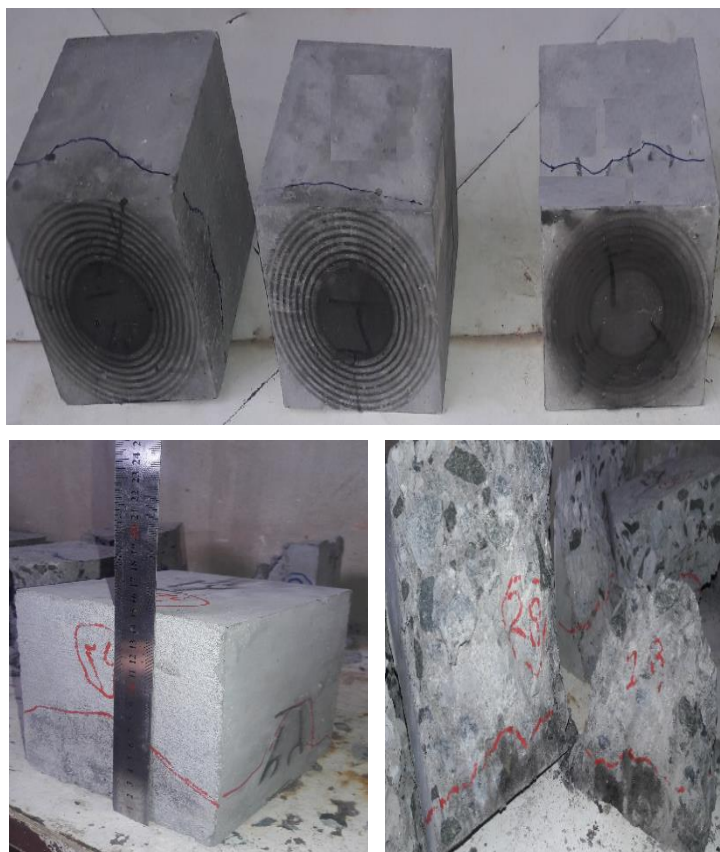
در این تحقیق، مقاومت فشاری بتن براساس نمونه مکعبی با ابعاد استاندارد ۱۵۰ میلی‌متر ارزیابی شد. بنابراین نمونه‌ها در سن ۲۸ روزه بعد از عمل‌آوری برای تعیین مقاومت فشاری مورد آزمایش قرار گرفتند. مطابق با استاندارد [۳۰] BS EN12390-3 وجوه چسبیده به قالب در تماس با فک‌های ماشین قرار گرفته، بار با نرخ ثابت تنش در محدوده ۰٫۲ تا ۱٫۰ مگاپاسکال بر ثانیه اعمال شده و مقدار مقاومت



در لحظه شکست یادداشت شد. برای هر طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۵، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین مقاومت فشاری آن‌ها به عنوان مقاومت فشاری مخلوط بتنی در نظر گرفته شد.

### ۳-۲-۲- آزمایش نفوذپذیری آب در بتن

در تحقیق حاضر، آزمایش نفوذپذیری آب در بتن براساس استاندارد [۳۱] BS EN12390-8 و با هدف تعیین عمق نفوذ آب در بتن براساس زمان و فشار معین صورت پذیرفته است. در این روش نمونه‌ها بعد از عمل آوری تا سن ۲۸ روز، به مدت ۲۴ ساعت در گرمخانه و در دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری و پس از خشک شدن، در دستگاه نفوذپذیری قرار گرفته و محکم در جای خود نگهداری می‌گردند. سپس به تدریج از طریق کمپرسور، فشار هوای دستگاه افزایش یافته تا به میزان 5 Bar برسد. سیلندرهای آب پر شده و هواگیری صورت می‌گیرد و سطح آب داخل سیلندرها به عنوان سطح قرائت اولیه منظور می‌گردد. با باز کردن شیرهای هوا، فشار هوا به آب سیلندرها و نمونه‌ها منتقل می‌گردد و آزمایش آغاز می‌گردد. قرائت سطح آب در داخل سیلندرها طی زمان‌های مشخصی صورت می‌گیرد. آزمایش به مدت ۷۲ ساعت ادامه می‌یابد و در پایان ۷۲ ساعت، سطح تراز آب داخل سیلندرها به عنوان قرائت نهایی ثبت می‌گردد. پس از قرائت نهایی فشار حذف گردیده و نمونه‌ها جهت تعیین عمق نفوذ زیر دستگاه جک اعمال نیرو دو نیمه می‌شوند. پس از شکافت نمونه‌ها و مشاهده مقطع داخلی آن‌ها، پروفیل تقریبی نفوذ مشخص و ثبت می‌گردد (شکل شماره ۲). برای هر طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۵، سه نمونه مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین حداکثر عمق نفوذ آب در آن‌ها به عنوان حداکثر عمق نفوذ آب آن مخلوط بتنی در نظر گرفته شد.

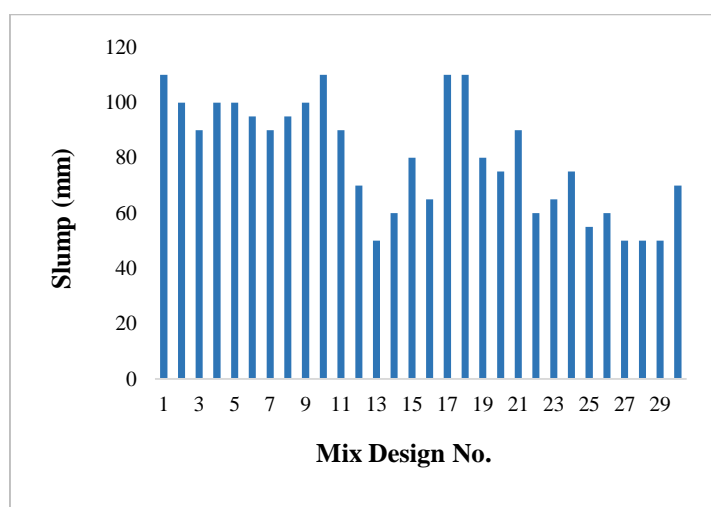


شکل ۲: اندازه‌گیری میزان عمق نفوذ آب از سطح بیرونی و مقطع داخلی نمونه‌ها

## ۴- بررسی و تفسیر نتایج آزمایشات

## ۴-۱- اسلامپ

در این پژوهش، به منظور دستیابی به اسلامپ مناسب در هر طرح اختلاط، پنج نسبت فوق روان کننده به سیمان ۰،۲۵٪، ۰،۵٪، ۰،۷۵٪ و ۱٪ به ترتیب برای نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه ۰،۰۵، ۰،۱، ۰،۱۵، ۰،۲ و ۰،۳ در نظر گرفته شد. نتایج آزمایش اسلامپ مخلوط‌های ساخته شده، در شکل ۳ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر حداقل و حداکثر اسلامپ به ترتیب برابر ۵۰ میلی‌متر (مربوط به مخلوط‌های ۱۳، ۲۷، ۲۸ و ۲۹) و ۱۱۰ میلی‌متر (مربوط به مخلوط‌های ۱، ۱۰، ۱۷ و ۱۸) شده است. مطابق آیین‌نامه ACI-211 این محدوده اسلامپ برای تیرها، ستون‌ها و دیوارهای بتن آرمه مناسب می‌باشد. از آنجائیکه مقدار فوق روان کننده جهت حصول اسلامپ مناسب در هر طرح اختلاط تعیین شده است، ملاحظه می‌گردد که پودر سنگ مرمر اثرات مختلفی بر روی اسلامپ داشته است؛ بطوریکه در بعضی از طرح اختلاط‌ها آن را کاهش، در برخی بی‌تاثیر، و در مواردی آن را افزایش می‌دهد.



شکل ۳: نتایج آزمایش اسلامپ

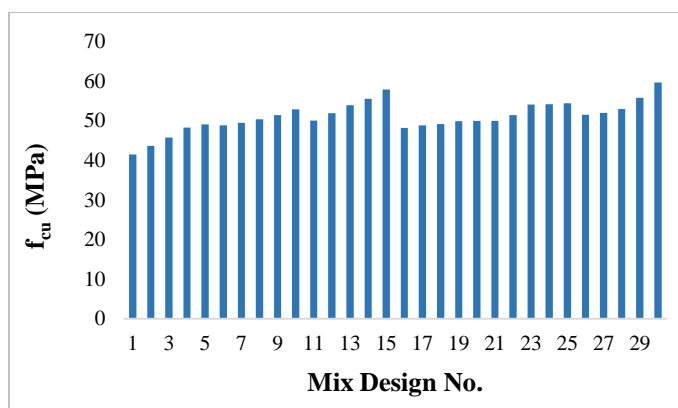
## ۴-۲- مقاومت فشاری بتن

نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌ها در شکل ۴ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود مقادیر حداقل و حداکثر مقاومت فشاری به ترتیب برابر ۴۱،۵ مگاپاسکال (مربوط به مخلوط ۱) و ۵۹،۶ مگاپاسکال (مربوط به مخلوط ۳۰) شده است. مخلوط شماره ۱ دارای کمترین میزان سیمان و بدون پودر سنگ مرمر بوده در حالیکه مخلوط شماره ۳۰ دارای بیشترین مقادیر سیمان و پودر سنگ مرمر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش سیمان و پودر سنگ مرمر در مخلوط‌ها، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش می‌یابد. تغییرات مقاومت فشاری نمونه‌ها برحسب نسبت آب به سیمان ( $\frac{W}{C}$ ) در هر یک از نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه ( $\frac{MD}{S}$ ) و برای هر دو مقدار مدول نرمی ماسه (۳ و  $FM=2,4$ )، در شکل شماره ۵ ترسیم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، در تمامی نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه (به استثنای حالت  $\frac{W}{C}=0,4$  و  $\frac{MD}{S}=0,1$ ) با  $FM=2,4$  که این مورد می‌تواند ناشی از خطاهای آزمایش باشد) با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. در گروه اول طرح اختلاط (۱-۱۵) که مربوط به ماسه با مدول نرمی ۳ می‌باشد مشاهده می‌شود که کمترین افزایش مقاومت فشاری برابر ۱۴ درصد در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰،۱۵ بوده است. که در آن مقاومت فشاری از ۵۴،۴۱ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰،۵ به مقدار ۶۲،۲۵ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰،۴ افزایش یافته است. همچنین بیشترین افزایش مقاومت فشاری برابر ۱۸ درصد در نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه ۰،۰۵ و ۰،۲ بوده است. که در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰،۰۵، مقاومت فشاری از ۴۹،۳۶ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰،۵ به مقدار ۵۸،۲۱ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰،۴ و در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰،۲، مقاومت فشاری از ۵۵،۰۳ مگاپاسکال به ازای نسبت

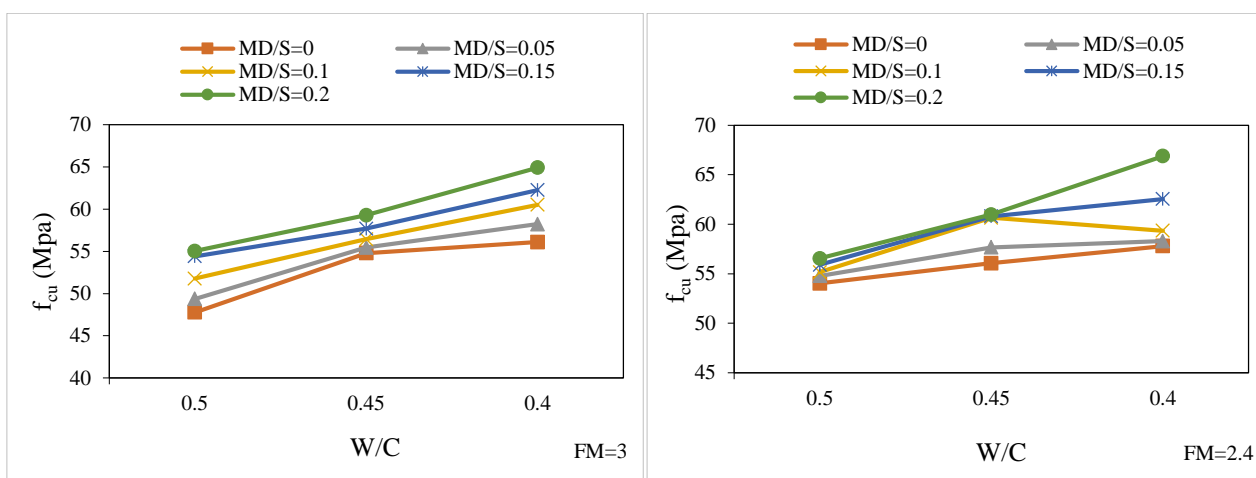
آب به سیمان ۰,۵ به مقدار ۶۴,۹۱ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۴ افزایش یافته است. در گروه دوم طرح اختلاط (۳۰-۱۶) که مربوط به ماسه با مدول نرمی ۲,۴ می باشد مشاهده می شود که کمترین افزایش مقاومت فشاری برابر ۶ درصد در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۵ بوده است. که در آن مقاومت فشاری از ۵۴,۷۸ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۵ به مقدار ۵۸,۳ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۴ افزایش یافته است. همچنین بیشترین افزایش مقاومت فشاری برابر ۱۸ درصد در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ بوده است. که مقاومت فشاری از ۵۶,۵۴ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۵ به مقدار ۶۶,۸۸ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۴ افزایش یافته است.

تغییرات مقاومت فشاری نمونه ها برحسب نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ( $\frac{MD}{S}$ ) در هر یک از نسبت های آب به سیمان ( $\frac{W}{C}$ )، در شکل شماره ۶ ترسیم شده است. از نمودارهای ترسیم شده در هر نسبت آب به سیمان، نتیجه گرفته می شود که در هر دسته از مخلوط ها (۳۰-۲۶ و ۲۵-۲۱؛ ۲۰-۱۶؛ ۱۵-۱۱؛ ۱۰-۶؛ ۵-۱) با افزایش نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه، مقاومت فشاری در همه حالات افزایش می یابد. دلیل افزایش مقاومت این است که پودر سنگ مرمر به خاطر ریزی زیادش، خلل و فرج را در بتن می کاهد و ساختار بتن را متراکم تر می کند. در گروه اول طرح اختلاط (۱۵-۱) که مربوط به ماسه با مدول نرمی ۳ می باشد مشاهده می شود که کمترین افزایش مقاومت فشاری برابر ۸ درصد در نسبت آب به سیمان ۰,۴۵ بوده است. که در آن مقاومت فشاری از ۵۴,۷۸ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۵۹,۲۸ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ افزایش یافته است. همچنین بیشترین افزایش مقاومت فشاری برابر ۱۶ درصد در نسبت آب به سیمان ۰,۴ بوده است. که مقاومت فشاری از ۵۶,۱ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۶۴,۹۱ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ افزایش یافته است. در گروه دوم طرح اختلاط (۳۰-۱۶) که مربوط به ماسه با مدول نرمی ۲,۴ می باشد مشاهده می شود که کمترین افزایش مقاومت فشاری برابر ۵ درصد در نسبت آب به سیمان ۰,۵ بوده است. که در آن مقاومت فشاری از ۵۴,۰۲ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۵۶,۵۴ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ افزایش یافته است. همچنین بیشترین افزایش مقاومت فشاری برابر ۱۶ درصد در نسبت آب به سیمان ۰,۴ بوده است. که مقاومت فشاری از ۵۷,۷۹ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۶۶,۸۸ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ افزایش یافته است.

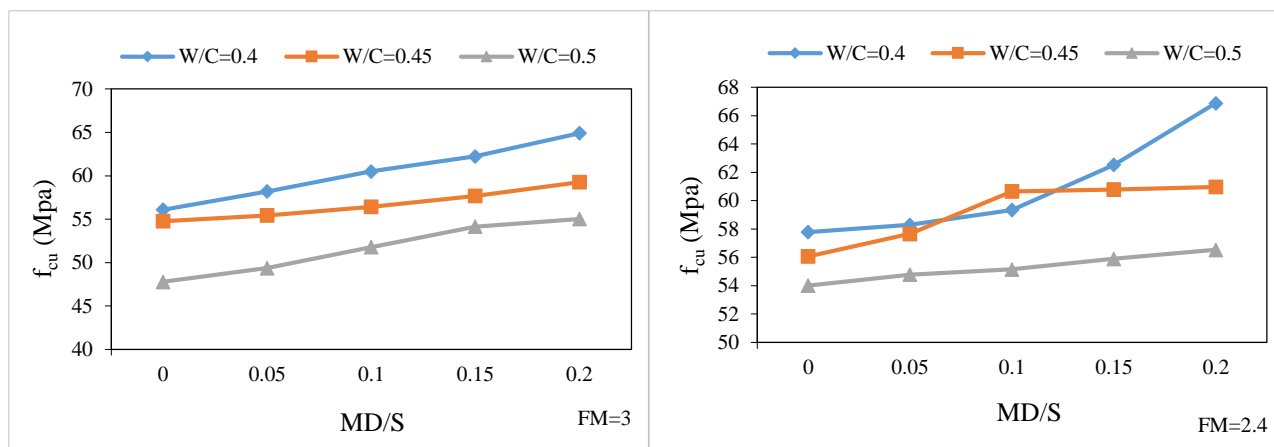
تغییرات مقاومت فشاری در دو مدول نرمی ۲,۴ و ۳، برحسب نسبت آب به سیمان ( $\frac{W}{C}$ ) در هر یک از نسبت های پودر سنگ مرمر به ماسه ( $\frac{MD}{S}$ )، در شکل شماره ۷ ترسیم شده است. مقایسه مقاومت فشاری مخلوط های مشابه با مدول نرمی های مختلف (مخلوط ۱۱ با ۲۶؛ ۱۲ با ۲۷؛ ۱۳ با ۲۸؛ ۱۴ با ۲۹؛ ۱۵ با ۳۰؛ ۱۶ با ۳۱؛ ۱۷ با ۳۲؛ ۱۸ با ۳۳؛ ۱۹ با ۳۴؛ ۲۰ با ۳۵؛ ۲۱ با ۳۶؛ ۲۲ با ۳۷؛ ۲۳ با ۳۸؛ ۲۴ با ۳۹؛ ۲۵ با ۴۰؛ ۲۶ با ۴۱؛ ۲۷ با ۴۲؛ ۲۸ با ۴۳؛ ۲۹ با ۴۴؛ ۳۰ با ۴۵؛ ۳۱ با ۴۶؛ ۳۲ با ۴۷؛ ۳۳ با ۴۸؛ ۳۴ با ۴۹؛ ۳۵ با ۵۰؛ ۳۶ با ۵۱؛ ۳۷ با ۵۲؛ ۳۸ با ۵۳؛ ۳۹ با ۵۴؛ ۴۰ با ۵۵؛ ۴۱ با ۵۶؛ ۴۲ با ۵۷؛ ۴۳ با ۵۸؛ ۴۴ با ۵۹؛ ۴۵ با ۶۰؛ ۴۶ با ۶۱؛ ۴۷ با ۶۲؛ ۴۸ با ۶۳؛ ۴۹ با ۶۴؛ ۵۰ با ۶۵؛ ۵۱ با ۶۶؛ ۵۲ با ۶۷؛ ۵۳ با ۶۸؛ ۵۴ با ۶۹؛ ۵۵ با ۷۰؛ ۵۶ با ۷۱؛ ۵۷ با ۷۲؛ ۵۸ با ۷۳؛ ۵۹ با ۷۴؛ ۶۰ با ۷۵؛ ۶۱ با ۷۶؛ ۶۲ با ۷۷؛ ۶۳ با ۷۸؛ ۶۴ با ۷۹؛ ۶۵ با ۸۰؛ ۶۶ با ۸۱؛ ۶۷ با ۸۲؛ ۶۸ با ۸۳؛ ۶۹ با ۸۴؛ ۷۰ با ۸۵؛ ۷۱ با ۸۶؛ ۷۲ با ۸۷؛ ۷۳ با ۸۸؛ ۷۴ با ۸۹؛ ۷۵ با ۹۰؛ ۷۶ با ۹۱؛ ۷۷ با ۹۲؛ ۷۸ با ۹۳؛ ۷۹ با ۹۴؛ ۸۰ با ۹۵؛ ۸۱ با ۹۶؛ ۸۲ با ۹۷؛ ۸۳ با ۹۸؛ ۸۴ با ۹۹؛ ۸۵ با ۱۰۰) نشان می دهد که (به استثنای حالت  $\frac{W}{C} = 0,4$  و  $\frac{MD}{S} = 0,1$  که این مورد می تواند ناشی از خطاهای آزمایش باشد) مقاومت فشاری تمامی مخلوط های حاوی ماسه با مدول نرمی ۲,۴ از مقاومت فشاری مخلوط های حاوی ماسه با مدول نرمی ۳ بزرگ تر می باشند. این مطلب بیان می کند که استفاده از ماسه با مدول نرمی کمتر به دلیل مصرف مقدار بیشتر شن، منجر به مقاومت فشاری بالاتری می شود.



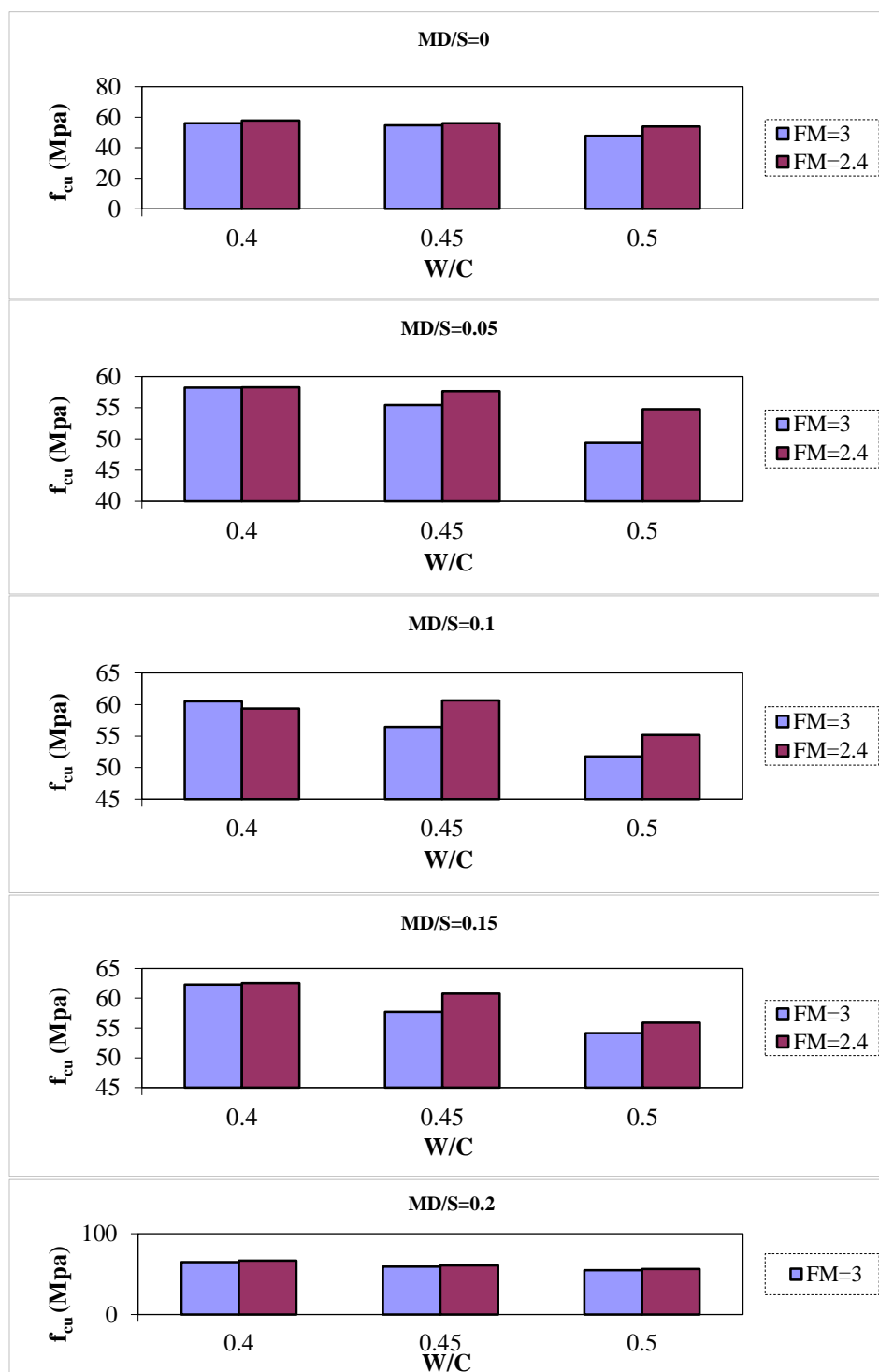
شکل ۴: نتایج آزمون مقاومت فشاری



شکل ۵: تغییرات مقاومت فشاری بر حسب نسبت  $\frac{W}{C}$  در هر یک از نسبت‌های  $\frac{MD}{S}$



شکل ۶: تغییرات مقاومت فشاری بر حسب نسبت  $\frac{MD}{S}$  در هر یک از نسبت‌های  $\frac{W}{C}$



شکل ۷: تغییرات مقاومت فشاری در دو مدول نرمی  $FM=3$  و  $FM=2.4$  برحسب  $\frac{W}{C}$  در هر یک از نسبت‌های  $\frac{MD}{S}$

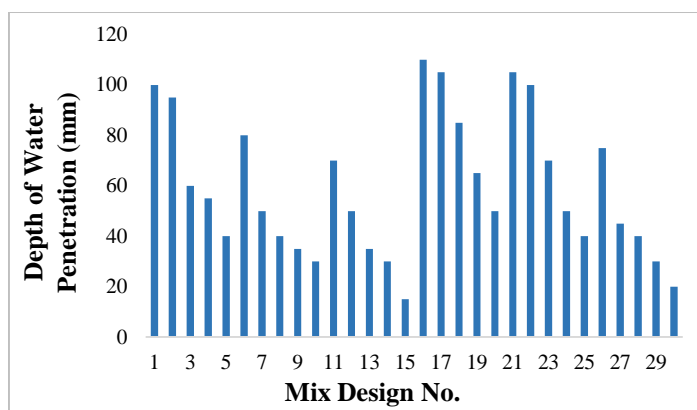
## ۴-۳- نفوذپذیری و دوام بتن

نتایج آزمایش نفوذپذیری آب در نمونه‌های بتنی ساخته شده در شکل شماره ۸ ارائه شده است. براساس نتایج نشان داده شده، مشاهده می‌شود که حداقل و حداکثر مقادیر عمق نفوذ آب به ترتیب برابر ۱۵ میلی‌متر (مربوط به مخلوط ۱۵) و ۱۱۰ میلی‌متر (مربوط به مخلوط ۱۶) شده است.

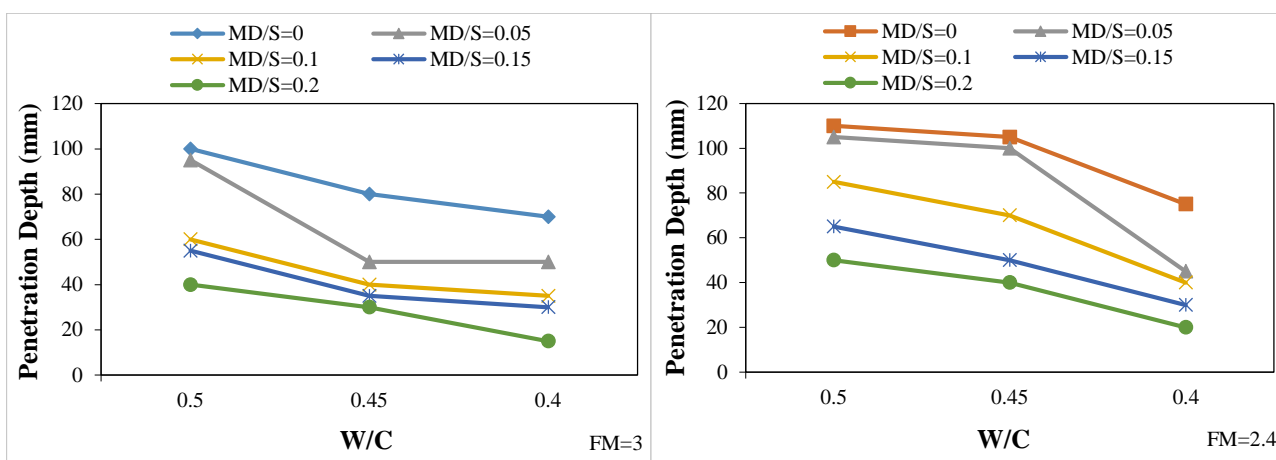
تغییرات عمق نفوذ آب برحسب نسبت آب به سیمان ( $\frac{W}{C}$ ) در هر یک از نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه ( $\frac{MD}{S}$ )، در شکل شماره ۹ ترسیم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت، ملاحظه می‌گردد در تمامی نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه، عمق نفوذ آب در نمونه‌ها با کاهش نسبت آب به سیمان و برای هر دو مقدار مدول نرمی کاهش می‌یابد. در گروه اول طرح اختلاط (۱-۱۵) که مربوط به ماسه با مدول نرمی ۳ می‌باشد مشاهده می‌شود که کمترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۳۰ درصد در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر بوده است. که در آن عمق نفوذ آب از ۱۰۰ میلی‌متر به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۵ به مقدار ۷۰ میلی‌متر به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۴ کاهش یافته است. همچنین بیشترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۶۳ درصد در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ بوده است. که عمق نفوذ آب از ۴۰ میلی‌متر به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۵ به مقدار ۱۵ میلی‌متر به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۴ کاهش یافته است. در گروه دوم طرح اختلاط (۱۶-۳۰) که مربوط به ماسه با مدول نرمی ۲,۴ می‌باشد مشاهده می‌شود که کمترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۳۲ درصد در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر بوده است. که در آن عمق نفوذ آب از ۱۱۰ میلی‌متر به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۵ به مقدار ۷۵ میلی‌متر به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۴ کاهش یافته است. همچنین بیشترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۶۰ درصد در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ بوده است. که عمق نفوذ آب از ۵۰ میلی‌متر به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۵ به مقدار ۲۰ میلی‌متر به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۴ کاهش یافته است.

تغییرات عمق نفوذ آب برحسب نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ( $\frac{MD}{S}$ ) در هر یک از نسبت‌های آب به سیمان ( $\frac{W}{C}$ )، در شکل شماره ۱۰ ترسیم شده است. با مقایسه عمق نفوذ آب در دسته‌های مختلف (۲۶-۳۰ و ۲۱-۲۵ و ۱۶-۲۰ و ۱۱-۱۵ و ۱۰-۶ و ۱-۵) و نسبت‌های مختلف پودر سنگ مرمر، ملاحظه می‌گردد که با افزایش درصد جایگزینی بخشی از ماسه با پودر سنگ مرمر، عمق نفوذ آب در نمونه‌ها کاهش می‌یابد. در گروه اول طرح اختلاط (۱-۱۵) که مربوط به ماسه با مدول نرمی ۳ می‌باشد مشاهده می‌شود که کمترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۶۰ درصد در نسبت آب به سیمان ۰,۵ بوده است. که در آن عمق نفوذ آب از ۱۰۰ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۴۰ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ کاهش یافته است. همچنین بیشترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۷۹ درصد در نسبت آب به سیمان ۰,۴ بوده است. که عمق نفوذ آب از ۷۰ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۱۵ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ کاهش یافته است. در گروه دوم طرح اختلاط (۱۶-۳۰) که مربوط به ماسه با مدول نرمی ۲,۴ می‌باشد مشاهده می‌شود که کمترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۵۵ درصد در نسبت آب به سیمان ۰,۵ بوده است. که در آن عمق نفوذ آب از ۱۱۰ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۵۰ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ کاهش یافته است. همچنین بیشترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۷۳ درصد در نسبت آب به سیمان ۰,۴ بوده است. که عمق نفوذ آب از ۷۵ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۲۰ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ کاهش یافته است.

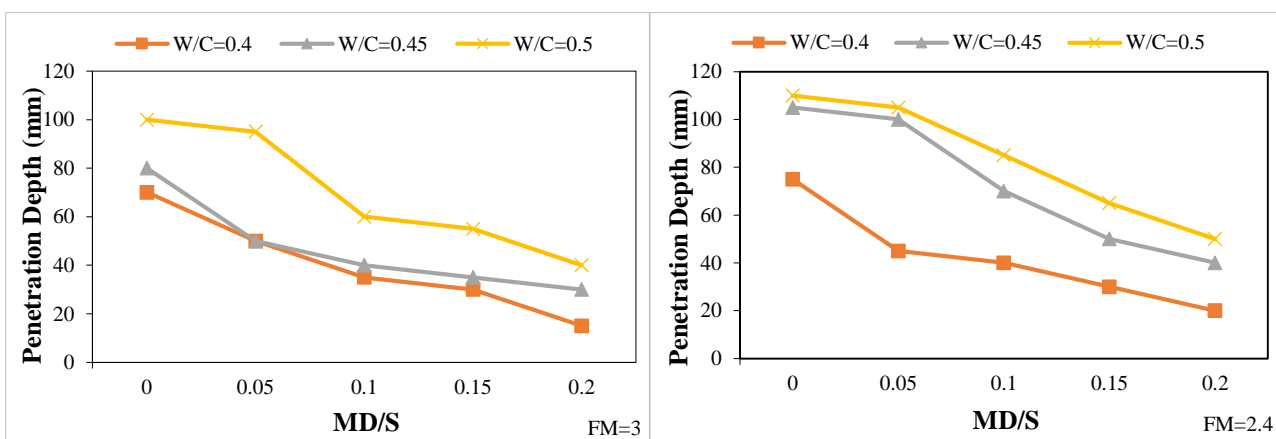
تغییرات عمق نفوذ آب در دو مدول نرمی ۲,۴ و ۳، برحسب نسبت آب به سیمان ( $\frac{W}{C}$ ) و در هر یک از نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه ( $\frac{MD}{S}$ )، در شکل شماره ۱۱ ترسیم شده است. مقایسه عمق نفوذ آب در مخلوط‌های مشابه با مدول نرمی‌های مختلف (مخلوط ۱۱ با ۲۶، مخلوط ۱۲ با ۲۷، مخلوط ۱۳ با ۲۸، مخلوط ۱۴ با ۲۹، مخلوط ۱۵ با ۳۰، مخلوط ۱۶ با ۳۱، مخلوط ۱۷ با ۳۲، مخلوط ۱۸ با ۳۳، مخلوط ۱۹ با ۳۴، مخلوط ۲۰ با ۳۵، مخلوط ۲۱ با ۳۶، مخلوط ۲۲ با ۳۷، مخلوط ۲۳ با ۳۸، مخلوط ۲۴ با ۳۹، مخلوط ۲۵ با ۴۰، مخلوط ۲۶ با ۴۱، مخلوط ۲۷ با ۴۲، مخلوط ۲۸ با ۴۳، مخلوط ۲۹ با ۴۴، مخلوط ۳۰ با ۴۵، مخلوط ۳۱ با ۴۶، مخلوط ۳۲ با ۴۷، مخلوط ۳۳ با ۴۸، مخلوط ۳۴ با ۴۹، مخلوط ۳۵ با ۵۰، مخلوط ۳۶ با ۵۱، مخلوط ۳۷ با ۵۲، مخلوط ۳۸ با ۵۳، مخلوط ۳۹ با ۵۴، مخلوط ۴۰ با ۵۵، مخلوط ۴۱ با ۵۶، مخلوط ۴۲ با ۵۷، مخلوط ۴۳ با ۵۸، مخلوط ۴۴ با ۵۹، مخلوط ۴۵ با ۶۰، مخلوط ۴۶ با ۶۱، مخلوط ۴۷ با ۶۲، مخلوط ۴۸ با ۶۳، مخلوط ۴۹ با ۶۴، مخلوط ۵۰ با ۶۵، مخلوط ۵۱ با ۶۶، مخلوط ۵۲ با ۶۷، مخلوط ۵۳ با ۶۸، مخلوط ۵۴ با ۶۹، مخلوط ۵۵ با ۷۰، مخلوط ۵۶ با ۷۱، مخلوط ۵۷ با ۷۲، مخلوط ۵۸ با ۷۳، مخلوط ۵۹ با ۷۴، مخلوط ۶۰ با ۷۵، مخلوط ۶۱ با ۷۶، مخلوط ۶۲ با ۷۷، مخلوط ۶۳ با ۷۸، مخلوط ۶۴ با ۷۹، مخلوط ۶۵ با ۸۰، مخلوط ۶۶ با ۸۱، مخلوط ۶۷ با ۸۲، مخلوط ۶۸ با ۸۳، مخلوط ۶۹ با ۸۴، مخلوط ۷۰ با ۸۵، مخلوط ۷۱ با ۸۶، مخلوط ۷۲ با ۸۷، مخلوط ۷۳ با ۸۸، مخلوط ۷۴ با ۸۹، مخلوط ۷۵ با ۹۰، مخلوط ۷۶ با ۹۱، مخلوط ۷۷ با ۹۲، مخلوط ۷۸ با ۹۳، مخلوط ۷۹ با ۹۴، مخلوط ۸۰ با ۹۵، مخلوط ۸۱ با ۹۶، مخلوط ۸۲ با ۹۷، مخلوط ۸۳ با ۹۸، مخلوط ۸۴ با ۹۹، مخلوط ۸۵ با ۱۰۰) نشان می‌دهد که (به استثنای حالت  $\frac{W}{C} = 0,4$  و  $\frac{MD}{S} = 0,05$  که این مورد می‌تواند ناشی از خطاهای آزمایش باشد) عمق نفوذ آب در مخلوط‌های حاوی ماسه با مدول نرمی ۳ از مخلوط‌های حاوی ماسه با مدول نرمی ۲,۴ کمتر می‌باشند.



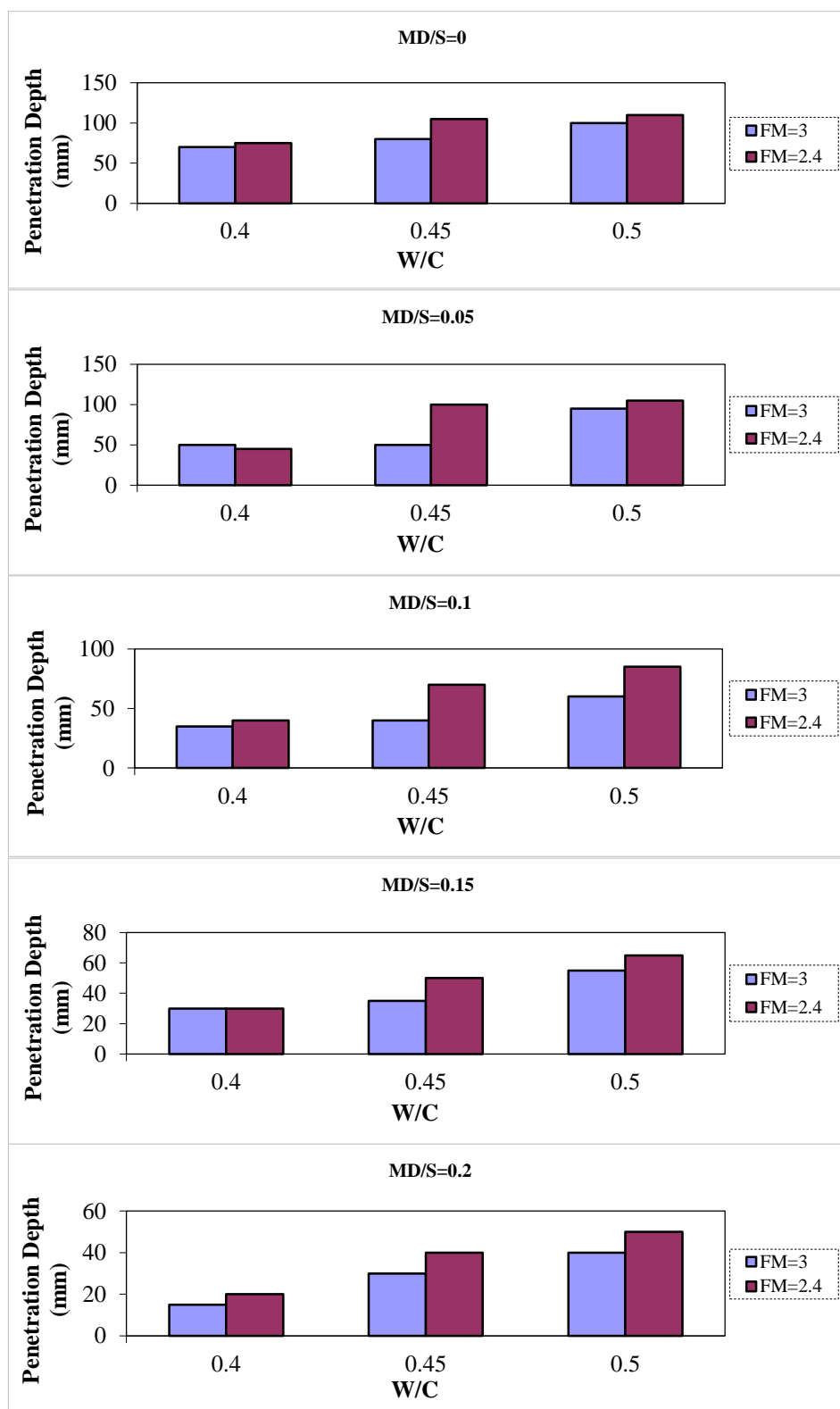
شکل ۸: نتایج عمق نفوذ آب در نمونه‌ها در آزمایش نفوذپذیری آب در بتن



شکل ۹: تغییرات عمق نفوذ آب بر حسب  $\frac{W}{C}$  در هر یک از نسبت‌های  $\frac{MD}{S}$



شکل ۱۰: تغییرات عمق نفوذ آب بر حسب نسبت  $\frac{MD}{S}$  در هر یک از نسبت‌های  $\frac{W}{C}$



شکل ۱۱: تغییرات عمق نفوذ آب در دو مدول نرمی  $FM=3$  و  $FM=2.4$  برحسب  $\frac{W}{C}$  در هر یک از نسبت‌های  $\frac{MD}{S}$



## ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق، به ارزیابی خصوصیات ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن با پودر سنگ مرمر ارزیابی خصوصیات مکانیکی و دوام بتن با پودر سنگ مرمر پرداخته شد. برای این منظور، تعداد ۱۸۰ عدد نمونه مکعبی به ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر با نسبت‌های آب به سیمان ۰٫۴، ۰٫۴۵ و ۰٫۵، نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه ۰، ۰٫۰۵، ۰٫۱، ۰٫۱۵ و ۰٫۲، نسبت‌های فوق روان‌کننده به سیمان ۰، ۰٫۰۲۵، ۰٫۰۵، ۰٫۰۷۵ و ۱٪ و ماسه با دو مدول نرمی ۲٫۴ و ۳ تحت آزمایش اسلامپ، مقاومت فشاری و نفوذپذیری آب در بتن در سن ۲۸ روزه قرار گرفتند. نتایج مهم حاصل از تحقیق را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود:

۱. مقادیر حداقل و حداکثر اسلامپ به ترتیب برابر ۵۰ میلی‌متر (مربوط به مخلوط‌های ۱۳، ۲۷، ۲۸ و ۲۹) و ۱۱۰ میلی‌متر (مربوط به مخلوط‌های ۱، ۱۰، ۱۷ و ۱۸) گردید. از آنجائیکه مقدار فوق روان‌کننده جهت حصول اسلامپ مناسب در هر طرح اختلاط تعیین شده بود، ملاحظه گردید که پودر سنگ مرمر اثرات مختلفی بر روی اسلامپ داشته است؛ بطوریکه در بعضی از طرح اختلاط‌ها آن را کاهش، در برخی بی‌تاثیر، و در مواردی آن را افزایش می‌دهد.

۲. با افزایش مقدار سیمان و پودر سنگ مرمر در مخلوط‌ها، مقاومت فشاری نمونه‌ها افزایش یافت. کمترین مقاومت فشاری با مقدار ۴۱٫۵ مگاپاسکال مربوط به مخلوط شماره ۱ (دارای کمترین میزان سیمان و بدون استفاده از پودر سنگ مرمر) بوده و بیشترین مقاومت فشاری با مقدار ۵۹٫۶ مگاپاسکال مربوط به مخلوط شماره ۳۰ (دارای بیشترین مقادیر سیمان و پودر سنگ مرمر) بود.

۳. در تمامی نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه (به استثنای حالت  $\frac{W}{C} = ۰٫۴$  و  $\frac{MD}{S} = ۰٫۱$  و ماسه با  $FM = ۲٫۴$  که این مورد می‌تواند ناشی از خطاهای آزمایش باشد) با کاهش نسبت آب به سیمان، مقاومت فشاری افزایش یافت. مشاهده شد که کمترین افزایش مقاومت فشاری مربوط به ماسه با مدول نرمی ۳ در نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه ۰٫۰۵ و ۰٫۲ بوده است. که در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰٫۰۵، مقاومت فشاری از ۴۹٫۳۶ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰٫۵، به مقدار ۵۸٫۲۱ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰٫۴ و در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰٫۲، مقاومت فشاری از ۵۵٫۰۳ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰٫۵، به مقدار ۶۴٫۹۱ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰٫۴ افزایش یافت. همچنین بیشترین افزایش مقاومت فشاری برابر ۱۸ درصد مربوط به ماسه با مدول نرمی ۲٫۴ در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰٫۲ بوده است. که مقاومت فشاری از ۵۶٫۵۴ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰٫۵، به مقدار ۶۶٫۸۸ مگاپاسکال به ازای نسبت آب به سیمان ۰٫۴ افزایش یافت.

۴. در هر دسته از مخلوط‌ها (۲۶-۳۰ و ۲۱-۲۵؛ ۱۶-۲۰؛ ۱۱-۱۵؛ ۱۰-۱۶؛ ۵-۱) با افزایش نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه، مقاومت فشاری در همه حالات افزایش یافت. مشاهده شد که کمترین افزایش مقاومت فشاری برابر ۵ درصد مربوط به ماسه با مدول نرمی ۲٫۴ در نسبت آب به سیمان ۰٫۵ بوده است. که در آن مقاومت فشاری از ۵۴٫۰۲ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۵۶٫۵۴ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰٫۲ افزایش یافت. همچنین بیشترین افزایش مقاومت فشاری برابر ۱۶ درصد در نسبت آب به سیمان ۰٫۴ بوده است. که برای ماسه با مدول نرمی ۳ مقاومت فشاری از ۵۶٫۱ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۶۴٫۹۱ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰٫۲ و برای ماسه با مدول نرمی ۲٫۴ مقاومت فشاری از ۵۷٫۷۹ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۶۶٫۸۸ مگاپاسکال به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰٫۲ افزایش یافت.

۵. مقاومت فشاری تمامی مخلوط‌های حاوی ماسه با مدول نرمی ۲٫۴ از مقاومت فشاری مخلوط‌های حاوی ماسه با مدول نرمی ۳ دارای مقدار بزرگتری بودند (به استثنای حالت  $\frac{W}{C} = ۰٫۴$  و  $\frac{MD}{S} = ۰٫۱$  که این مورد می‌تواند ناشی از خطاهای آزمایش باشد). که می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از ماسه با مدول نرمی کمتر به دلیل مصرف مقدار بیشتر شن، منجر به مقاومت فشاری بالاتری می‌شود.

۶. حداقل عمق نفوذ آب برابر ۱۵ میلی‌متر (مربوط به مخلوط ۱۵) و حداکثر عمق نفوذ آب برابر ۱۱۰ میلی‌متر (مربوط به مخلوط ۱۶) بود.

۷. در تمامی نسبت‌های پودر سنگ مرمر به ماسه، عمق نفوذ آب در نمونه‌ها با کاهش نسبت آب به سیمان و برای هر دو مقدار مدول نرمی کاهش یافت. مشاهده شد که کمترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۳۰ درصد مربوط به ماسه با مدول نرمی ۳ در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر بوده است. که در آن عمق نفوذ آب از ۱۰۰ میلی‌متر به ازای نسبت آب به سیمان ۰٫۵، به مقدار ۷۰ میلی‌متر به

ازای نسبت آب به سیمان ۰,۴ کاهش یافت. همچنین بیشترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۶۳ درصد مربوط به ماسه با مدول نرمی ۳ در نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ بوده است. که عمق نفوذ آب از ۴۰ میلی‌متر به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۵ به مقدار ۱۵ میلی‌متر به ازای نسبت آب به سیمان ۰,۴ کاهش یافت.

۸. در هر دسته از مخلوطها (۲۶-۳۰ و ۲۱-۲۵ ؛ ۱۶-۲۰ ؛ ۱۱-۱۵ ؛ ۱۰-۶ ؛ ۵-۱)، با افزایش نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه، عمق نفوذ آب در نمونه‌ها کاهش یافت. مشاهده شد که کمترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۵۵ درصد مربوط به ماسه با مدول نرمی ۲,۴ در نسبت آب به سیمان ۰,۵ بوده است. که در آن عمق نفوذ آب از ۱۱۰ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۵۰ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ کاهش یافت. همچنین بیشترین کاهش عمق نفوذ آب برابر ۷۹ درصد مربوط به ماسه با مدول نرمی ۳ در نسبت آب به سیمان ۰,۴ بوده است. که عمق نفوذ آب از ۷۰ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه صفر به مقدار ۱۵ میلی‌متر به ازای نسبت پودر سنگ مرمر به ماسه ۰,۲ کاهش یافت.

۹. حداکثر عمق نفوذ آب در مخلوطهای حاوی ماسه با مدول نرمی ۳ از مخلوطهای حاوی ماسه با مدول نرمی ۲,۴ دارای مقدار کمتری بودند (به استثنای حالت  $\frac{W}{C} = 0,4$  و  $\frac{MD}{S} = 0,05$  که این مورد می‌تواند ناشی از خطاهای آزمایش باشد).

## مراجع

- [1] Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*. Longman Group Limited, London, UK, 88.
- [2] Pachideh, G., Gholhaki, M., Moshtagh, A. (2019). On the post-heat performance of cement mortar containing silica fume or granulated blast-furnace slag. *Journal of Building Engineering*, [online] 24, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100757>.
- [3] Pachidah, G., Gholhaki, M. (2020). Assessment of post-heat behavior of cement mortar incorporating silica fume and granulated blast-furnace slag. *Journal of Structural Fire Engineering*, [online] Available at: <https://doi.org/10.1108/JSFE-11-2018-0038>.
- [4] Chang, S. C., Wang, C. C., Wang, H. Y. (2018). Study on the engineering and electricity properties of cement mortar added with waste LCD glass and piezoelectric powders. *Computers and Concrete*, 21 (3), 311-319.
- [5] Pachideh, G., Gholhaki, M., Ketabdari, H. (2020). Effect of pozzolanic wastes on mechanical properties, durability and microstructure of the cementitious mortars. *Journal of Building Engineering*, [online] 29, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.job.2020.101178>.
- [6] Al-Tayeb, M. M., Abu Bakar, B. H., Md Akil, H., Ismail, H. (2013). Experimental and numerical investigations of the influence of reducing cement by adding waste powder rubber on the impact behavior of concrete. *Computers and Concrete*, 11 (1).
- [7] Pachideh, G., Gholhaki, M. (2019). Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete. *Journal of Building Engineering*, [online] 26, Available at: <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100856>.
- [8] Pachideh, G., Gholhaki, M., Moshtagh, A. (2020). Experimental study on mechanical strength of porous concrete pavement containing pozzolans. *Advanced in Civil Engineering Materials*, 9 (1) 38-52.
- [9] Shiramura, Satoru, Suzuki, Noriyuki. (1994). Effect of changing the mixing ratio of fine powder on characteristics of RCD concrete. *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineering*, 484, 77-86.
- [10] Togawa, Kazuo Shoya, Masami, Kokubu, Katsuro. (1996). Characteristics of bleeding, freeze-thaw resistance and watertightness of concrete with ferro-nickel slag fine aggregates. *Zairyo/Journal of the Society of Materials Science*, 45 (1), 101-109.
- [11] Nas, M., Kurbetci, S. (2018). Mechanical durability and microstructure properties of concrete containing natural zeolite. *Computers and concrete*. 22 (5), 449-459.
- [12] Uchikawa, H., Henehara, S., Hirao, H. Jan (1996). Influence of microstructure on the physical properties of concrete by substituting mineral powder for part of fine aggregate. *Cement and Concrete Research*, 26 (1), 101-111.
- [13] Jindal, B-B., Singhal, D., Sharma, S., Parveen. (2018). Enhancing mechanical and durability properties of geopolymer concrete with mineral admixture. *Computers and concrete*, 21 (3), 345-353.
- [14] Kobayashi, Koichi, Hattori, Atsushi, Miyagawa, Toyooki, Fujii, Manabu. (1996). Characters of interfacial zone of cement paste with additives around aggregate. *Zairyo/Journal of the Society of Materials Science*, 45 (9), 1001-1007.
- [15] Sakata K., Ayano T. (1996). Study of mix design method for self-compactable high performance concrete with limestone powder. *Zairyo/Journal of the Society of Materials Science*, 45 (9), 993-1000.
- [16] Sawicz, Z., Heng, S.S. (1996). Durability of concrete with addition of limestone powder. *Magazine of Concrete Research*, 48 (175), 131-137.

- [17] Kobayashi, K., Hattori, A., Miyagawa, T., Fujii, M. (1997). Effects of limestone powder as additive on hydration of cement in early age. *Internal Conference on Engineering Materials*, 811-815.
- [18] Gallias, J. L., Kara-Ali, R., Bigas, J. P. (2000). The Effect of fine mineral admixtures on water requirement of cement pastes. *Cement and Concrete Research*, 1543-1549.
- [19] Kato, H., Nakamura, A., Doi, H., Miyagawa, T. (2001). Strength development and autogenous shrinkage of high-flow concrete with limestone powder. *Zairyo/Journal of the Society of Materials Science*, 50 (5), 543-549.
- [20] Beeralingegowda, B., Gundakalle, V.D. (2013). The effect of addition of limestone powder on the properties of self-compacting concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2 (9) 4996.
- [21] Habibi, A. (2010). Mechanical properties of concrete with limestone powder. *Quarterly Journal of Concrete Research*, 2, (2), 71-84. (In Persian).
- [22] ISIRI Number 389. (2017). *Specification for Portland Cement*. Institute of Standards and Industrial Research of Iran, 8th Edition, Iran. (In Persian).
- [23] ASTM Standards: C33-03. (2003). *Standard Specification for Concrete Aggregates*, American Society for Testing and Materials.
- [24] ASTM Standards: C136-06. (2006). *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*, American Society for Testing and Materials.
- [25] 9th issue of the national building regulations. (2013). *Reinforced concrete structures codes*. Iran Standard, 4th Edition, Iran. (In Persian).
- [26] INSO Number 2930-2. (2014). *Admixtures for concrete, mortar and grout-part 2: Concrete admixtures specifications*. Iranian national standardization organization, 1<sup>st</sup> Edition, Iran. (In Persian).
- [27] ACI: 211.1-91, (reapproved 2002) - *Standard Practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete*: American Concrete Institute.
- [28] BS EN 12390-2. (2019). Testing hardened concrete. *Making and curing specimens for strength tests*.
- [29] BS EN 12350-2. (2019). Testing Fresh concrete. *Slump Test*.
- [30] BS EN 12390-3. (2019). Testing hardened concrete. *Compressive strength of test specimens*.
- [31] BS EN 12390-8. (2019). Testing hardened concrete. *Depth of penetration of water under pressure*.