Iranian Concrete Society

Investigating the Combined Effect of Diatomite Powder as a Pozzolanic Additive and Limestone Powder as a Partial Replacement for Sand in Ordinary Concrete

B. Shervani Tabar [*1], ***M. Hemmati*** [2]
1- Assistant Professor, Department of civil engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
b.shervani@azaruniv.ac.ir
2- M.Sc., Department of civil engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.
Received*:02 March 2025* ***Revised****:15 April 2025* ***Accepted****:25 May 2025*
Research paper

Abstract

One of the main challenges in today's construction industry is improving the performance of concrete while reducing costs and minimizing its environmental impact. An effective approach to address this challenge is the use of alternative and mineral additives in concrete mixtures. Limestone powder, due to its abundance in the northwest region of the country, accessibility, and affordability, serves as an optimal local material for partially replacing sand in concrete mix designs. On the other hand, pozzolanic additives, such as diatomite powder, enhance mechanical properties and durability of concrete by increasing pozzolanic reactions, making them widely applicable in the concrete industry. The impact of these materials on concrete performance depends on their independent or combined usage. However, most previous studies have focused on the effects of these materials individually, with limited exploration of their combined influence. This research aims to investigate both the independent and combined effects of limestone powder and diatomite powder on the mechanical properties of conventional concrete. The findings can provide practical solutions for producing high-quality, sustainable concrete, optimizing mix designs, and expanding the application of these proposed materials. For this purpose, a reference mix design (B1) and 15 additional mix designs were developed. These included varying proportions of the two proposed materials: limestone powder as a partial replacement for sand, and diatomite powder as a concrete additive at levels of 0%, 10%, 15%, and 20%. Specifically, in three mixes (B2, B3, B4), only diatomite powder was used, in three others (B5, B9, B13), only limestone powder was utilized, and in the remaining nine mixes, both materials were combined. The study measured slump, water absorption during curing, compressive strength, and tensile strength for all 16 concrete mixtures. Results showed an increase in both compressive and tensile strength across all samples. However, the highest compressive strength was achieved in mix B11, which included 10% diatomite powder as an additive and 15% limestone powder as a partial sand replacement. For the 28-day, 90-day, and 180-day samples of mix B11, the compressive strength increased by 60%, 48%, and 45%, respectively.

Keywords: Limestoe Powder, Diatomite Powder, Compressive Strength, Tensile Strength, Optimal Concrete Mix Design, Local Materials.

*Corresponding Author: B. Shervani Tabar
Shervani Tabar B., Hemmati M. Investigating the Combined Effect of Diatomite Powder as a Pozzolanic Additive and Limestone Powder as a Partial Replacement for Sand in Ordinary Concrete. J. Concr. Struct. Mater., 2024; 9(2): 110-134. http://doi.org/10.30478/jcsm.2025.490576.1381
2538-5828/ © 2025The Authors. Published by Iranian Concrete Society
This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

انجمن علمی بتن ایران

بررسی تأثیر توأم پودر دیاتومیت به عنوان یک افزودنی پوزولانی و پودرسنگ‌آهک به‌عنوان جایگزین بخشی از ماسه در بتن معمولی

بهمن شروانی تبار[1*]، محسن همتی[2]

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران

۲- کارشناسی‌ارشد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران،

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: b.shervani@azaruniv.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۲۶، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۳۱، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۰۱

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

از چالش‌های اصلی امروزه در صنعت ساخت‌وساز، بهبود عملکرد بتن در کنار کاهش هزینه و اثرات زیست‌محیطی تولید آن و یک رویکرد موثر برای حل این چالش استفاده از مواد جایگزین و افزودنی‌های معدنی در ترکیب بتن است. پودرسنگ‌آهک، به‌دلیل فراوانی در منطقه شمال‌غرب کشور، در دسترس بودن و قیمت مناسب آن، گزینه‌ای مطلوب، به عنوان یک مصالح بومی، برای جایگزینی بخشی از ماسه در طرح اختلاط بهینه بتن به‌شمار می‌رود. از سوی دیگر، افزودنی‌های پوزولانی مانند پودر دیاتومیت با افزایش واکنش‌های پوزولانی، نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن ایفا می‌کنند به همین دلیل می‌تواند کاربرد گسترده‌ای در صنعت بتن داشته باشد. تأثیر این مواد در بتن می‌تواند تحت تأثیر نحوه استفاده از آن‌ها به صورت مستقل یا ترکیبی باشد، که اغلب تحقیقات انجام‌شده به بررسی اثر این مواد بر بتن به طور جداگانه پرداخته‌اند و اثرات ترکیبی آن‌ها کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌است. هدف این پژوهش، شناخت اثرات مستقل و ترکیبی پودرسنگ‌آهک و پودر دیاتومیت بر خصوصیات مکانیکی بتن معمولی است که می‌تواند به ارائه راهکارهای عملی برای تولید بتن‌های با کیفیت و پایدار، بهینه‌سازی طرح اختلاط و نیز افزایش کاربرد این دو ماده پیشنهادی کمک کند. برای این منظور طرح اختلاط B1 به عنوان نمونه شاهد و ۱۵ طرح اختلاط دیگر با استفاده از دو ماده پیشنهادی، پودر سنگ‌آهک به جای بخشی از ماسه بتن با مقادیر ۰، ۱۰، ۱۵ و۲۰ و پودر دیاتومیت به عنوان افزودنی بتن با مقادیر ۰، ۵، ۱۰ و۲۰ درصد، ارائه شد؛ به این ترتیب که در سه ترکیب B2، B3 و B4 فقط پودر دیاتومیت و در سه ترکیب B5، B9 و B13 فقط پودر سنگ‌آهک و در نه طرح اختلاط دیگر از ترکیب هردو استفاده گردید. در مجموع برای شانزده نوع ترکیب بتنی مقادیر اسلامپ، جذب آب حین عمل‌آوری، مقاومت فشاری و مقاومت کششی بدست آمد. نتایج بررسی‌ها نشان داد که در همه نمونه‌ها افزایش مقاومت فشاری و کششی اتفاق افتاده‌است؛ اما بیش‌ترین افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های B11، شامل ۱۰ درصد پودر دیاتومیت به صورت افزودنی و ۱۵ درصد پودر سنگ‌آهک به‌عنوان جایگزین بخشی از ماسه اتفاق افتاده‌است که مقدار آن برای نمونه‌های ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه به ترتیب برابر ۶۰ ، ۴۸ و ۴۵ درصد می‌باشد.

واژگان کلیدی: پودر سنگ‌آهک، پودر دیاتومیت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، طرح اختلاط بهینه، مصالح بومی.

۱. مقدمه

توسعه و بهبود خواص در عین کاهش هزینه‌های مالی و زیست‌محیطی تولید بتن، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی، از موضوعات مورد توجه محققان و مهندسان در سال‌های اخیر است. نوع، مقدار و نسبت‌های مواد تشکیل‌دهنده بتن از مهم‌ترین مولفه‌های تأثیرگذار بر خواص و رفتار آن در فازخمیری و فاز سخت‌شده می‌باشد؛ از این رو ساخت بتن متناسب با یک پروژه، نیازمند دقت بالا در انتخاب این مولفه‌هاست. علاوه بر مصالح اصلی بتن یعنی شن، ماسه، سیمان و آب، مصالح ساختمانی دیگری هم می‌تواند در آن به صورت جایگزین بخشی از مصالح اصلی بتن و یا به صورت افزودنی بکار گرفته شود. استفاده از مواد با عملکرد مطلوب‌تر، در دسترس‌تر و به صرفه‌تر از روش‌های رایج برای بهبود عملکرد بتن و کاهش اثرات زیست‌محیطی آن است. پر واضح است که استفاده از مصالح بومی هر منطقه، موجب کاهش هزینه خرید و حمل و نقل و نیز افزایش ظرفیت مصالح ساختمانی هر منطقه می‌شود.

سنگ‌آهک یکی از قدیمی‌ترین مصالح است که از حرارت دادن سنگ‌آهک (کربنات کلسیم) به‌دست می‌آید و به مدت هزاران سال در مخلوط بتن و ملات‌های ساختمانی استفاده شده‌است. با رواج سیمان در قرن نوزدهم، استفاده از سنگ‌آهک کاهش یافت، اما به دلیل ویژگی‌هایی مانند خاصیت ضدآب و مقاومت در برابر فرسایش، در سال‌های اخیر محبوبیت یافته‌است. پودرسنگ‌آهک به‌دلیل دسترسی گسترده فراوانی در منطقه شمال‌غرب کشور، قیمت مناسب، به‌عنوان جایگزین بخشی از ماسه در بتن پیشنهاد شده‌است. درصورتیکه با استفاده از پودر سنگ‌آهک به عنوان جایگزین بخشی از ماسه در بتن، بتوان خواص مناسبی را بدست آورد، با توجه به فراوانی ضایعات سنگ‌آهک در ایران، مزایای اقتصادی فراوانی به دنبال خواهد داشت[۱].

همچنین پودر دیاتومیت به عنوان یک ماده معدنی و افزودنی پوزولانی با افزایش واکنش‌های پوزولانی، می‌تواند نقش مهمی در بهبود خواص مکانیکی و دوام بتن ایفا کند. در داخل سیمان اندکی آهک زنده وجود دارد که در هنگام اختلاط بتن، به هیدروکسید کلسیم تبدیل و یونیزه می شود. این ماده در اثر عوامل جوی مانند باران یا هنگام عمل‌آوری بتن با آب بتن می تواند شسته شده و از بتن خارج گردد؛ در نتیجه این اتفاق، حجم لوله‌های موئینه در داخل بتن افزایش می یابد. مواد پوزولانی با هیدروکسیدکلسیم واکنش‌های پوزولانی انجام داده و در نتیجه توپری بتن افزایش می‌یابد. بیشتر مطالعات قبلی تاثیر مواد افزودنی و مواد جایگزین را به طور مستقل بررسی کرده و کمتر به ارزیابی تأثیر ترکیب آن‌ها به‌صورت هم‌زمان پرداخته‌اند.

پیشینه پژوهش

مستوفی‌نژاد و نظری‌منفرد در سال ۱۳۸۵ تاثیر ترکیب سرباره و پودر سنگ‌آهک را در افزایش دوام بتن در مجاورت سولفات سدیم و سولفات منیزیم بررسی کردند. نتایج نشان داد که با جایگزینی ۱۰٪ سرباره و ۱۵٪ پودر سنگ‌آهک به جای سیمان، دوام بتن‌ها در برابر سولفات‌ها بهبود می‌یابد. به طور کلی، این ترکیب برای بتن‌های در مجاورت یون سولفات مانند پایه‌های پل و ابنیه مسیر راه‌ها توصیه می‌شود. این ترکیب علاوه بر بهبود دوام، از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است [۲].

دهیر و همکاران در سال ۲۰۰۷ میلادی عملکرد بتن‌های ساخته‌شده با سیمان پرتلند تا ۴۵ درصد دارای سنگ‌آهک، را بررسی کردند. نتایج حاکی از آن بود که وجود سنگ‌آهک تا ۱۵ درصد تاثیر خاصی بر عملکرد و رفتار بتن بدست‌آمده ندارد. همچنین مقاومت بتن در برابر چرخه‌های ذوب و انجماد، با استفاده از افزودنی‌های حباب‌زا برای تمام نمونه‌ها مطلوب بود. این مطالعه نشان داد جایگزینی تا ۲۵٪ از سیمان با سنگ‌آهک می‌تواند بدون تأثیر منفی قابل‌توجه بر عملکرد بتن، مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی ایجاد کند، اما مقادیر بیشتر موجب افت کیفیت بتن می شود [۳].

بنتز و همکاران در سال ۲۰۰۹ میلادی طی مطالعه‌ای نشان دادند که جایگزینی بخشی از سیمان با پرکننده‌های سنگ‌آهکی در

بتن‌های با نسبت آب به سیمان پایین می‌تواند مصرف انرژی، تولید دی‌اکسیدکربن، و هزینه‌ها را کاهش دهد. در این نوع بتن‌ها، بخشی از سیمان قادر به هیدراته شدن نیست و در واقع به‌عنوان پرکننده‌ای گران‌قیمت عمل می‌کند. بررسی‌ها نشان داد که جایگزینی ۱۰٪ و ۲۰٪ سیمان با پودر سنگ‌آهک به ترتیب کاهش مقاومت فشاری حدود ۷٪ و ۱۲٪ را به همراه دارد، که با کاهش جزئی نسبت آب به سیمان قابل جبران است. همچنین در این نوع بتن، استفاده از سنگ‌آهک با دانه‌بندی درشت می‌تواند تنش‌های موئینگی و ترک‌های اولیه را کاهش دهد. اگرچه برای بتن‌های با نسبت آب به سیمان بالای ۰/۴ این جایگزینی می‌تواند نرخ نفوذ را افزایش دهد، اما برای بتن‌های با نسبت آب به سیمان پایین، تأثیر محسوسی در دوام ندارد. این مطالعه نشان داد که جایگزینی بخشی از سیمان با سنگ‌آهک در این نوع بتن‌ها، یک گزینه پایدار و کمتر استفاده شده‌است[۴].

حبیبی در سال ۱۳۸۸ در تحقیقی اثرات اضافه کردن پودر سنگ‌آهک به بتن را بر خصوصیات مکانیکی آن بررسی نمود. نتایج این تحقیق نشان داد که جایگزینی پودر سنگ‌آهک به جای بخشی از مصالح مانند شن و ماسه، می‌تواند به بهبود خواص مکانیکی بتن کمک کند. همچنین، این مطالعه نشان داد که اندرکنش بین نسبت آب به سیمان و نسبت پودر سنگ‌آهک به سیمان تأثیر قابل توجهی بر مقاومت فشاری و کششی بتن در سنین مختلف (۷، ۲۸ و ۹۰ روز) دارد. در نهایت، نتایج آزمایش‌ها بیانگر این بود که در نسبت‌های بالای آب به سیمان، اضافه کردن پودر سنگ‌آهک می‌تواند منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن گردد[۱].

ویردیت و همکاران در سال ۲۰۱۱ میلادی، اثر افزودن ۵ درصد پودر سنگ‌آهک به سیمان‌های ترکیبی با خاکستر بادی را بررسی کردند. نتایج نشان داد پودر سنگ‌آهک که غنی از کربنات کلسیم است، می‌تواند روند هیدراتاسیون اولیه را تقویت کرده، تخلخل را کاهش داده و خاصیت کارایی سیمان را بهبود بخشد. همچنین، پودر سنگ‌آهک موجب بهبود واکنش‌های خاکستر بادی با ایجاد آلومینای اضافی می‌شود. این اثر در سیمان‌های ترکیبی با خاکستر بادی و سنگ‌آهک بیشتر نمایان می‌شود، چرا که خاکستر بادی، آلومینای اضافی به واکنش‌ها اضافه می‌کند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که هرچند خاکستر بادی ممکن است سرعت هیدراتاسیون اولیه را کاهش دهد، اما در بلندمدت بهبود قابل‌توجهی در مقاومت و دوام سیمان به‌وجود می‌آورد. ترکیب سیمان پرتلند، پودر سنگ‌آهک و خاکستر بادی نه‌تنها به کاهش ردپای کربن کمک می‌کند، بلکه به بهبود عملکرد سیمان در برابر حملات سولفاتی و کاهش تولید حرارت در حین هیدراتاسیون نیز منجر می‌شود.ا ین مقاله همچنین بر تأثیر مثبت این ترکیب بر استحکام و دوام سیمان در محیط‌های مختلف تأکید دارد.[۵]

بوناوتی و همکاران در سال ۲۰۱۳ میلادی با بررسی تاثیر افزودنی‌های کلسیتی بر هیدراتاسیون سیمان پرتلند، محدودیت‌های میزان این افزودنی‌ها را به سیمان را مشخص کردند تا از افزایش نفوذپذیری و تاثیر منفی آن بر مقاومت و دوام جلوگیری شود. نتایج نشان داد برای تولید بتن‌های مقاوم در برابر آب و حملات شیمیایی می‌توان تا ۲۰ درصد ماده کلسیتی اضافه کرد. اما اگر میزان کلسیت بین ۲۵ تا ۳۵ درصد باشد، نیاز به هیدراسیون بسیار بالایی وجود دارد. همچنین، کاهش نسبت آب به سیمان از مقدار ۰/۴۵ در سیمان‌های حاوی بیش از ۲۵ درصد کلسیت منجر به تولید بتن‌های مقاوم به آب، بدون نیاز به هیدراسیون زیاد، می‌شود [۶].

زاجاک و همکاران در سال ۲۰۱۴ میلادی اثرات مقادیر مختلف سنگ‌آهک بر واکنش‌های هیدراسیون و مقاومت فشاری سیمان‌های پرتلند را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش محتوای سولفات کلسیم باعث تسریع واکنش‌های هیدراسیون در روزهای اولیه و افزایش مقاومت فشاری اولیه می‌گردد؛ همچنین تاثیر سنگ‌آهک با مقدار سولفات و زمان هیدراسیون رابطه مستقیم دارد [۷].

اصلانیان و همکاران در سال ۱۳۹۵ طی یک مطالعه تجربی، تاثیر جایگزینی بخشی از ریزدانه‌ها با پودر سنگ‌آهک و بخشی از سیمان با سرباره را بر خصوصیات دوام بتن روسازی غلتکی بررسی کردند. نتایج نشان داد که جایگزینی پودر سنگ‌آهک باعث بهبود دوام و افزایش مقاومت سایشی بتن غلتکی می‌شود. این محققین در نتایج خود بیان کردند پودرهای معدنی مثل پودر سنگ‌آهک

در بتن، به عنوان پرکننده حفره‌ها عمل کرده و موجب کاهش تخلخل می‌شود؛ همچنین حالت خمیری بتن را افزایش داده و از جداشدگی دانه‌ها جلوگیری می‌کنند. در نتیجه می‌توان از آن‌ها در جهت بهبود مقاومت بتن استفاده نمود[۸].

بنتز و همکاران در سال ۲۰۱۷ میلادی تاثیر پودرهای سنگ‌آهک و سیلیکا را بر روانی، هیدراسیون و زمان گیرش سیمان بررسی کردند. نتایج نشان داد که این پودرها موجب بهبود واکنش‌های هیدراسیون سیمان می‌شوند. جایگزینی تا ۵۰ درصد از سیمان با این پودرها تاثیر کمی بر زمان گیرش اولیه دارد. پودر سنگ‌آهک در تسریع هیدراسیون و بهبود روانی موثرتر از پودر سیلیکا است. این ویژگی‌ها باعث می‌شود که این ترکیب‌ها برای کاربردهایی که در آن‌ها کنترل زمان گیرش اهمیت بیشتری نسبت به مقاومت فشاری بیشتر دارد، مانند دوغاب‌ها و پوشش‌های نمای ساختمان، مناسب باشند [۹].

شاه و همکاران در سال ۲۰۱۹ تأثیر نوع جدیدی از پوزولان ترکیبی بر هیدراسیون، خواص مکانیکی و دوام سیمان را مورد بررسی قرار دادند. این پوزولان ترکیبی شامل خاک رس کلسینه‌شده و آهک در نسبت ۲:۱ همراه با ۲٪ گچ بود. جایگزینی سیمان با این پوزولان در نسبت‌های ۰، ۱۰، ۱۵، ۲۰، ۳۰ و ۵۰ درصد انجام شد. نتایج نشان داد که افزودن پوزولان ترکیبی باعث افزایش هیدراسیون سیمان در سنین اولیه و مقاومت فشاری، کاهش زمان شروع گیرش و نیز بهبود ساختار منافذ و کاهش ویژگی‌های انتقالی بتن مانند تخلخل، میزان جذب آب و نفوذپذیری شد؛ اما مقاومت در برابر نفوذ کلرید نیز در مخلوط‌های حاوی پوزولان ترکیبی نسبت به سیمان پرتلند معمولی کم‌تر بود [۱۰].

محمد و آل نومان در سال ۲۰۲۴ میلادی به بررسی عملکرد بتن‌های با مقاومت عادی و زیاد حاوی پودر سنگ‌آهک از نظر خواص مکانیکی و رفتار برش پانچ در دال‌های تخت پرداختند. نتایج نشان داد که افزایش جایگزینی سنگ‌آهک تا ۵٪ موجب افزایش روانی هردو بتن شد، اما در بتن با مقاومت عادی برخلاف نوع دیگر، با افزایش بیشتر از این درصد روانی کاهش یافت. این پژوهش نشان داد که استفاده از سنگ‌آهک به‌عنوان جایگزین سیمان تا ۱۰٪ می‌تواند در ساخت دال‌های تخت بتن مسلح به‌عنوان یک روش پایدار و بدون کاهش ظرفیت بار برش پانچ استفاده شود [۱۱].

دیاتومیت نوعی پوکه سنگ رسوبی است که از اسکلت دیاتوم‌ها تشکیل شده‌است .سیلیس موجود در اسکلت دیاتوم‌ها به اوپال) سیلیس بی‌شکل و آبدار(شباهت دارد. دیاتومیت از بقایای اسکلت سیلیسی جلبک‌های دریایی و غیردریایی کف‌زی و شناور تشکیل شده‌است. دیاتومیت خالص به رنگ سفید و از لحاظ شکل ظاهری شبیه گچ و بسیار خردشونده است. وزن مخصوص دیاتومیت خشک شده در آون بین ۳۲۰-۶۴۰ و وزن مخصوص مطلق پودر دیاتومیت برابر ۱۷۳۰ – ۲۰۰۰ کیلوگرم در متر مکعب است. برای تعریف دقیق دیاتوم می‌توان گفت که دیاتوم یک جلبک ذره بینی تک سلولی دارای یک هسته است که در یک اتاقک کوچک سیلیسی به نام فروستول محفوظ نگه داشته شده‌است. دیاتومیت‌ها خواص غیر عادی نسبت به سنگ‌های دیگر دارند. دیاتومیت‌ها به علت داشتن تخلخل میکروسکوپی زیاد، چگالی کم و ویژگی‌های منحصر به فرد به عنوان صافی، جذب کننده، عایق، پرکننده و سایننده مورد استفاده قرار می‌گیرند و همچنین پودر آن به عنوان سیلیس فعال شناخته می‌شود. واکنش پوزولانی دیاتومیت باعث تولید بیشتر محصولات هیدراسیون سیمان می‌شود که این امر موجب افزایش خواص مکانیکی ملات‌های حاوی آن می گردد]۱۲[. در ایران مهم‌ترین نهفته‌های دیاتومیتی در ناحیه آذربایجان مشاهده شده‌است. این حوضه رسوبی در اطراف تبریز)شرق دریاچه ارومیه(، بخشی از میانه و منطقه ممقان در شمال غرب ایران می‌باشد. همچنین در اطراف بیرجند در خراسان جنوبی معادن دیاتومیت وجود دارد. نخستین کاربرد دیاتومیت به حدود سال ۵۳۲ میلادی در دوره امپراتوری روم قدیم باز می‌گردد که در ساختمان منار کلیسای سنت صوفی در قسطنطنیه وجود دارد، به گونه‌ای که آجرهای آن از خاک دیاتومدار ساخته‌شده‌است. دیاتومیت بعنوان عایق حرارتی، آجر نسوز و ماده افزودنی در ملات مورد استفاده قرار می‌گیرد. دیاتومیت می‌تواند ۲ تا ۳ برابر وزن خود آب جذب کند .ضریب هدایت

حرارتی آن بسیار کم است. دیاتومیت از نظر شیمیایی خنثی بوده و میل ترکیبی با اکثر مایعات و محلول‌ها را ندارد. از نظر خواص شیمیایی دیاتومیت تا حد زیادی مشابه سیلیس می‌باشد و اغلب در ترکیب‌های شیمیایی غیرقابل حل بوده ودارای قابلیت دیرگدازی است. پس از سیلیس، ترکیباتی مانند اکسیدهای آلومینیم و آهن در ترکیب شیمیایی دیاتومیت وجود دارند. دیاتومیت دارای خواص ویژه‌ای است که عبارت است از وزن مخصوص کم، سطح مخصوص بالا، قدرت جذب فراوان، عایق بودن در برابر حرارت و تخلخل بالا؛ سختی دیاتومیت بین ۴ تا ۵ در مقیاس موس است و نقطه ذوب دیاتومیت و انواع خاک‌های دیاتومه به درجه خلوص بستگی دارد و از ۱۰۰۰ تا ۱۷۵۰ درجه سانتی‌گراد متغیر است. تکلس دیاتومه می‌تواند باعث بهبود خواص آن از قبیل افزایش وزن مخصوص از ۱/۷۳ به ۲ تا ۲/۳، سختی از ۴ به۵/۵ تا ۶ شود. وقتی ناخالصی‌های همراه دیاتومیت به مقدار قابل توجهی می‌رسند واژه‌های دیگری برای آن به کار می‌رود. فراگولس و همکاران در سال ۲۰۰۵ میلادی به بررسی استفاده از دو نوع سنگ‌های دیاتومه به عنوان مواد پوزولانی جایگزین برای تولید سیمان‌های پوزولانی در یونان پرداختند. سنگ‌های دیاتومه مورد مطالعه از جزیره ساموس و الاسونا در یونان استخراج شدند. افزودن دیاتومیت به سیمان باعث افزایش سطح ویژه سیمان و نیاز به آب بیشتر در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی می‌شود. در عین حال، مقاومت فشاری سیمان‌های دیاتومیته در سنین بالا، به طور قابل توجهی نسبت به سیمان پرتلند معمولی بهبود می‌یابد. ترکیب سیلیس واکنش‌پذیر و سطح مخصوص بالای دیاتومیت، به نظر می‌رسد که خواص مکانیکی سیمان را بهبود می‌بخشد [۱۳].

کاستیس و همکاران در سال ۲۰۰۶ میلادی تأثیر افزودن دیاتومیت به ملات‌های سیمانی را بر خواص و هیدراسیون آن بررسی کردند. آن‌ها از دیاتومیت حاوی کربنات کلسیم و سیلیس آمورف استفاده کردند. نتایج نشان داد که سیمان‌های ترکیبی حاوی تا ۱۰٪ دیاتومیت مقاومت فشاری مشابه سیمان پرتلند دارند، اما افزودن دیاتومیت نیاز آبی ملات را افزایش می‌دهد. همچنین واکنش پوزولانی آن باعث تولید محصولات هیدراته بیشتری، به‌ویژه در سن ۲۸ روز می‌شود. بر اساس این مطالعه، دیاتومیت می‌تواند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای بخشی از سیمان استفاده شود [۱۲].

دیرمنجی و یلماز در سال ۲۰۰۹ میلادی استفاده از دیاتومیت را به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان در ملات سیمانی در مقادیر ۰ و ۵ و ۱۰ و۱۵ درصد بررسی کردند. نتایج نشان داد مقاومت فشاری و خمشی ملات با افزایش درصد دیاتومیت کاهش یافت، اما ملات حاوی ۵٪ دیاتومیت حداقل مقاومت فشاری استاندارد را داشت. مقاومت فشاری پس از ۲۵ چرخه یخ‌زدگی و ذوب برای ملات‌های حاوی دیاتومیت به‌جز ۵٪ افزایش یافت و ملات‌های حاوی ۱۰٪ و ۱۵٪ دیاتومیت مقاومت بهتری در برابر آسیب‌های یخ‌زدگی و ذوب نشان دادند. وزن مخصوص خشک ملات‌ها به دلیل تخلخل بالا و وزن مخصوص پایین دیاتومیت کاهش یافت. جذب آب همه ملات‌ها با افزایش دیاتومیت، به‌جز برای ملات حاوی ۱۵٪ دیاتومیت، کاهش یافت. همچنین مقاومت ملات‌ها در برابر حمله سولفاتی افزایش یافت و ملات‌های حاوی ۱۰٪ و ۱۵٪ دیاتومیت دوام بهتری در برابر حملات سولفاتی نشان دادند. بر اساس این نتایج، استفاده از دیاتومیت تا ۵٪ جایگزینی سیمان در تولید ملات سیمانی پیشنهاد شده است [۱۴].

آرگون در سال ۲۰۱۱ میلادی تاثیر استفاده از دیاتومیت و پودرضایعات سنگ مرمر را به عنوان جایگزین بخشی از سیمان در تولید بتن با درصدهای مختلف، مورد بررسی قرار داد. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که افزودن ۱۰٪ دیاتومیت و ۵٪ پودرسنگ مرمر به سیمان، بیش‌ترین مقاومت فشاری و خمشی را ایجاد کرده‌است. ترکیب اثر پوزولانی دیاتومیت، اثر پرکنندگی پودرسنگ مرمر و کاهش نیاز به آب با کمک فوق‌روان‌کننده‌ها باعث افزایش خواص مکانیکی شد. این تحقیق نشان داد که جایگزینی سیمان با دیاتومیت و پودرسنگ مرمر به صورت جداگانه یا ترکیبی، به‌عنوان جایگزین سیمان در تولید بتن‌های مقاوم‌تر، از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی منطقی است [۱۵].

پوکورنی و همکاران در سال ۲۰۱۹ در تحقیقی تاثیر پودر دیاتومیت را به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان پرتلند در ترکیب بتن ارزیابی کردند. دیاتومیت یک ماده کم‌هزینه و با فعالیت پوزولانی بالا است که می‌تواند به کاهش مصرف سیمان پرتلند و در نتیجه کاهش هزینه تولید و اثرات زیست‌محیطی مضر تولید سیمان کمک کند. نسبت جایگزینی سیمان ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ به‌صورت حجمی بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که دیاتومیت دارای فعالیت پوزولانی بالایی است که منجر به کاهش تخلخل و افزایش مقاومت مکانیکی بتن‌های تولیدی می‌شود. ساختار متخلخل دیاتومیت کمک کرد تا خواص انتقال حرارت بتن کاهش یابد. بهترین مقاومت مکانیکی در بتن با جایگزینی ۵٪ سیمان مشاهده شد. تنها اثر منفی استفاده از دیاتومیت کاهش قابلیت کارایی مخلوط بتن به دلیل سطح خاص و ناهموار ذرات دیاتومیت بود [۱۶]

لی و همکاران در سال ۲۰۲۳ تحقیقاتی انجام دادند که در آن از دیاتومیت بازیافتی به‌عنوان جایگزین جزئی سیمان (با درصدهای ۱۰٪، ۱۵٪، ۲۰٪، ۳۰٪ و ۴۰٪) در ملات سیمانی استفاده شد. هدف از این تحقیق بررسی ویژگی‌های مکانیکی و مزایای عایق حرارتی دیاتومیت بازیافتی بود. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که با افزایش میزان دیاتومیت جایگزین، مقدار آب اختلاط و زمان گیرش افزایش می‌یابد و نرخ انقباض و وزن از دست رفته در چرخه‌های انجماد - ذوب نیز بیشتر می‌شود ولی جذب آب و هدایت حرارتی کاهش می‌یابد. در خصوص مقاومت فشاری، جایگزینی ۱۰٪ دیاتومیت در ۲۸ روز مقاومت بالاتری نشان داد، اما در ۹۰ روز، جایگزینی ۲۰٪ دیاتومیت مقاوم‌تر بود. این نتایج نشان می‌دهند که استفاده از ۲۰٪ دیاتومیت بازیافتی بهترین عملکرد مکانیکی و عایق حرارتی را به همراه دارد [۱۷].

ضرورت پژوهش

با توجه به افزایش نیاز به ساخت‌وساز و تأثیرات زیست‌محیطی تولید بتن به شیوه‌های متداول، استفاده از مصالح جایگزین و بومی اهمیت می‌یابد. این مواد می‌توانند با کاهش هزینه و اثرات مخرب تولید بتن، بهبود خواص مکانیکی، دوام و کاهش نفوذپذیری بتن را به همراه داشته باشند. ضرورت این پژوهش در بررسی تأثیرات مستقل و ترکیبی این مواد برای بهینه‌سازی طرح اختلاط بتن و ارائه راهکارهایی برای تولید بتن‌های پایدار و با کیفیت نهفته است.

هدف و روش تحقیق

در این تحقیق، اثر جایگزینی بخشی از ماسه با پودر سنگ‌آهک و افزودن پودر دیاتومیت به عنوان یک ماده پوزولانی، به صورت جداگانه و ترکیبی، بر خواص مکانیکی بتن بررسی شده‌است. نمونه‌های بتن با درصدهای مختلف پودر سنگ‌آهک (۰، ۱۰، ۱۵ و ۲۰) و پودر دیاتومیت (۰، ۵، ۱۰ و ۲۰) ساخته و در مجموع ۱۶ ترکیب مورد آزمایش قرار گرفت. سه نمونه B2، B3 و B4 فقط حاوی پودر دیاتومیت، و سه نمونه B5، B9 و B13 فقط حاوی پودر سنگ‌آهک هستند. برای هر ترکیب بتن، سه نمونه ساخته شد و مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام شده، از میانگین نتایج سه نمونه ثبت شد.

۲. مواد و روش‌ها

مصالح مصرفی در ساخت بتن مورد استفاده در این تحقیق عبارت است از: سیمان پرتلند نوع دو کارخانه صوفیان، شن و ماسه کارخانه بلیلا در اطراف تبریز، پودر سنگ‌آهک کارخانه آهک اسپنداردر نزدیکی آذرشهر، دیاتومیت معدن ممقان و آب شرب که در زیر به تفکیک مشخصات هریک ارائه می‌شود.

۲،۱. سیمان

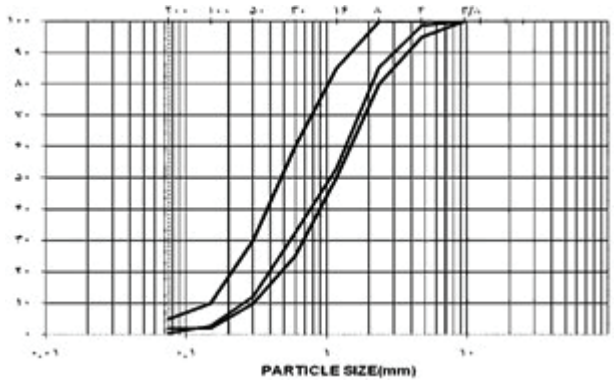
سیمان استفاده شده در این پژوهش سیمان پرتلند تیپ ۲ صوفیان است که مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن مطابق اطلاعات گرفته شده از محل تهیه آن در جدول ۱ قابل مشاهده است.

جدول ۱. مشخصات فیزیکی و شمیایی سیمان‌پرتلند نوع دو صوفیان[۱]

Physical Properties			Chemical Properties	
Item	**Unit**	**Value**	**Item**	**Value**
Fineness (Blaine)	(cm^2/gr)	3230	Calcium oxide (CaO)	64.44
Residue on 90 µ Sieve	(%)	3.86	Silica (SiO_2)	21.70
Autoclave Expansion	(%)	0.18	Aluminum oxide (Al_2O_3)	5.22
Le Chatelier Expansion	(mm)	1.1	Ferric oxide (Fe_2O_3)	3.74
Initial Setting Time	(min)	115	Magnesium oxide (MgO)	2.22
Final Setting Time	(min)	185	Potassium oxide (K_2O)	0.58
Density	(gr/cm^3)	3.16	Sodium oxide (Na_2O)	0.22
days Compressive Strength 3	(gr/cm^2)	240	Chloride Ion (Cl)	0.010
days Compressive Strength 7	(gr/cm^2)	345	LOI	1.36
28days Compressive Strength	(gr/cm^2)	465	Others	0.51

۲،۲. ماسه

مصالح سنگی ریزدانه باید با محدوده دانه‌بندی منـدرج در اسـتاندارد ASTM C33 منطبق باشد. ماسه مورد استفاده از یکی از معادن حومه تبریز تهیه شده‌است. وزن مخصوص مطلق آن ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب، چگالی انبوهی خشک میله نخورده آن ۱۶۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب و درصد جذب آب SSD مطابق استاندارد ASTM C128حدود ۲/۵ درصد تعیین گردید و مدول نرمی آن ۳/۱ تعیین شد. شکل ۱ منحنی دانه‌بندی ماسه مصرفی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. نمودار منحنی دانه‌بندی ماسه بر اساس استاندارد ASTM C33

[۱] _شرکت سیمان صوفیان https://soufiancement.com

۲،۳. شن

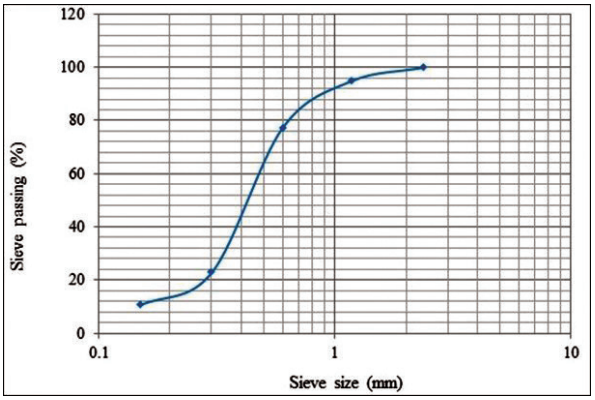
شن مورد استفاده از کارخانه معدن بلیلا در اطراف تبریز تهیه شده‌است. اندازه بزرگ‌ترین سنگدانه شن مصرفی ۲۰ میلی‌متر، چگالی مطلق آن ۲/۷ و وزن مخصوص انبوهی خشک میله خورده آن ۱۳۶۶ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد.

۲،۴. پودر سنگ‌آهک

پودر سنگ‌آهک تهیه شده از کارخانه اسپندار، در نزدیکی آذرشهر، در این پژوهش استفاده شده‌است. جدول ۲ و شکل ۲ دانه‌بندی این مصالح را نشان می‌دهد. همچنین مشخصات فیزیکی و شیمیایی پودر سنگ‌آهک (کربنات کلسیم) تهیه شده، به ترتیب در جدول ۳ مشاهده می‌شود. تصویر ذرات ماسه، شن و پودر سنگ‌آهک مصرفی در شکل ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۲. دانه‌بندی پودر سنگ‌آهک

(%) Sieve passing	(Sieve size (mm
100	2.36
95	1.17
77.4	0.6
22.9	0.3
10.7	0.15

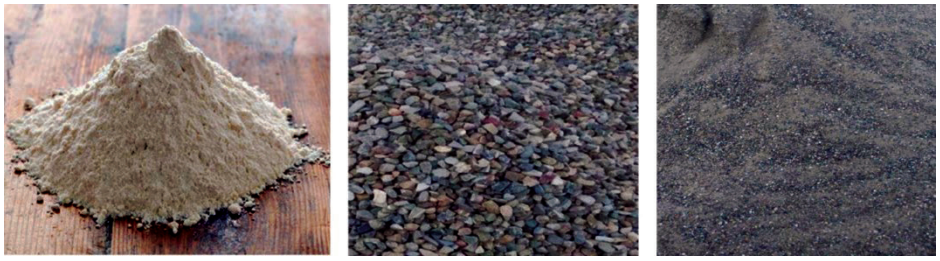


شکل ۲. منحنی دانه‌بندی پودر سنگ‌آهک

جدول ۳. مشخصات فیزیکی و شیمیایی پودر سنگ‌آهک[۲]

Physical Properties		Chemical Properties	
Name	Calcium Carbonate,Limestone	$CaCO_3$ < 99% > 97%	SiO_2+insoluble matter <1.5%
Linear Formula	$CaCO_3$	CaO <55.5% > 54.5%	Na_2O < 0.1%
Molecular weight	g/mol 100.09	L.O.I < 43.7 > 42.0	K_2O < 0.1%
Form	Powder	SiO_2 < 0.7%	P_2O_5 < 0.03%
Specific Gravity	(2.72 - 2.5)	MgO <0.5%	MnO <0.02%
Density	(N.A (depend on size Limestone	Al_2O_3 < 0.5%	SO_3= Trace
Solubility in Water	(g/L (25 °C 0.13	Fe_2O_3 < 0.2%	

[۲] کارخانه آهک اسپندار elcc.espandar.com



شکل ۳. از راست: مصالح ریز دانه (ماسه) / مصالح درشت دانه (شن نخودی و بادامی)/ مصالح جایگزین بخشی از ریزدانه (پودر سنگ‌آهک)

۲,۵. دیاتومیت

یکی از غنی‌ترین معادن دیاتومیت شمال‌غرب کشور، معدن ممقان واقع در ۲۵ کیلومتری جاده تبریز - آذرشهر می‌باشد. در این پژوهش دیاتومیت مورد استفاده از معدن دیاتومیت ممقان واقع در جنوب غرب شهر تبریز تهیه گردید. دیاتومیت مورد استفاده آسیاب گردیده و از الک نمره ۱۰۰ گذرانده شد. جدول ۴ آنالیز شیمیایی و شکل ۴ پودر دیاتومیت و کلوخ‌هایی از معدن دیاتومیت ممقان را نشان می‌دهد.

شکل ۴. تکه‌های دیاتومیت و پودر دیاتومیت مصرفی در ساخت نمونه‌های این پژوهش

جدول ۴. مشخصات شیمیایی پودر دیاتومیت معدن ممقان [۱۸]

Chemical Properties	
Item	Value
Calcium oxide (CaO)	0.98
Silica (SiO_2)	90.40
Aluminum oxide (Al_2O_3)	2.15
Ferric oxide (Fe_2O_3)	0.71
Magnesium oxide (MgO)	0.64
Potassium oxide (K_2O)	0.20
Sodium oxide (Na_2O)	0.45
LOI	3.04
Others	

۳. طرح‌های مخلوط بتن

در جدول ۵ ترکیب‌های بتنی ساخته‌شده آورده شده‌است که ردیف اول نشان دهنده ترکیب بتن شاهد می‌باشد.

جدول ۵. نسبت‌های مخلوط بتنی برای نمونه‌ها، با پودر سنگ‌آهک و پودر دیاتومیت

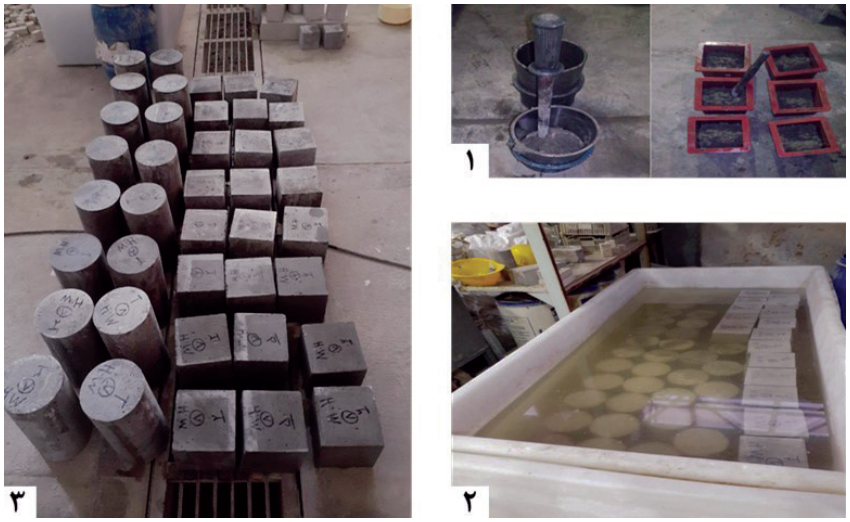
Item	Water / Cementitious material	Cement	Gravel	Sand	Limestone powder	Diatomite powder	Water
Unit / Mix-ratios	Ratio	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(kg/m^3)
B1(0L,0D)	0.52	380	910.5	780	0	0	197.60
B2(0L,5D)	0.52	380	910.5	780	0	19	207.48
B3(0L,10D)	0.52	380	910.5	780	0	38	217.36
B4(0L,20D)	0.52	380	910.5	780	0	76	237.12
B5(10L,0D)	0.52	380	910.5	702	78	0	197.60
B6(10L,5D)	0.52	380	910.5	702	78	19	207.48
B7(10L,10D)	0.52	380	910.5	702	78	38	217.36
B8(10L,20D)	0.52	380	910.5	702	78	76	237.12
B9(15L,0D)	0.52	380	910.5	663	117	0	197.60
B10(15L,5D)	0.52	380	910.5	663	117	19	207.48
B11(15L,10D)	0.52	380	910.5	663	117	38	217.36
B12(15L,20D)	0.52	380	910.5	663	117	76	237.12
B13(20L,0D)	0.52	380	910.5	624	156	0	197.60
B14(20L,5D)	0.52	380	910.5	624	156	19	207.48
B15(20L,10D)	0.52	380	910.5	624	156	38	217.36
B16(20L,20D)	0.52	380	910.5	624	156	76	237.12

۴. آماده سازی نمونه‌ها

به منظور آماده‌سازی و ساخت بتن ، پس از وزن کردن مقدار مصالح مورد نیاز برای هر طرح مخلوط، ابتدا شن و ماسه را در داخل دستگاه ریخته به مدت ۶۰ ثانیه دستگاه را روشن کرده تا شن و ماسه باهم مخلوط شوند. سپس سیمان، پودر سنگ‌آهک و پودر دیاتومیت اضافه شده و دوباره به مدت ۱۵۰ ثانیه دستگاه روشن می‌شود تا باهم مخلوط شوند. در حالی که دستگاه کار می‌کند نصف آب مورد نیاز نیز اضافه می شود. پس از ۳ دقیقه بقیه آب هم اضافه شده و به مدت ۳ دقیقه دیگر مخلوط می‌شود.

مطابق شکل ۵، پس از اتمام زمان مخلوط کردن، بتن تازه در قالب‌های مکعبی با ابعاد۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متری به‌منظور تعیین مقاومت فشاری و همچنین در قالب‌های استوانه ای ۳۰۰ × ۱۵۰ میلی‌متری برای تعیین مقاومت کششی، ریخته می‌شود. برای هر ترکیب بتن، سه نمونه ساخته شد و مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام شده، میانگین نتایج سه نمونه است. نمونه‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب نگهداری می‌شوند. چنانکه در جدول ۵ مشاهده می‌شود در ترکیب‌های شماره ۱، ۲، ۳ و ۴ مقدار پودر دیاتومیت از ۰ تا ۲۰٪ تغییر یافته‌است. در ترکیب‌های ۱، ۵، ۹ و ۱۳ مقدار دیاتومیت صفر بوده و مقادیر پودر سنگ‌آهک از ۰ تا ۲۰٪ تغییر

یافته‌است. در بقیه ترکیب‌ها هم از پودر سنگ‌آهک و هم از پودر دیاتومیت استفاده شده‌است؛ مثلا در ترکیب‌های ۵، ۶، ۷ و ۸ مقدار پودر سنگ‌آهک جایگزین شده به جای ماسه ثابت بوده و برابر ۱۰٪ می‌باشد و مقادیر افزودنی پودر دیاتومیت به ترتیب برابر ۰، ۵، ۱۰ و ۲۰ درصد می‌باشد.



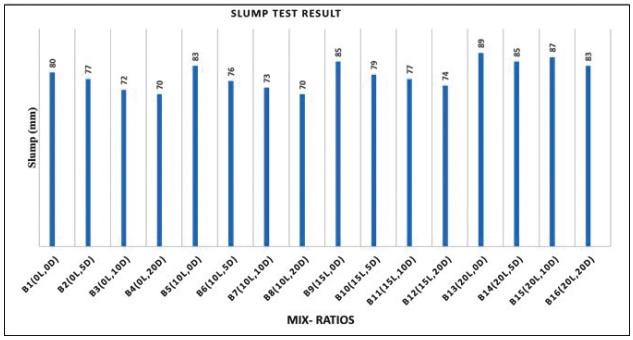
شکل ۵. ۱: ریختن بتن در قالب‌ها / ۲: عمل‌آوری نمونه‌ها در حوضچه آب/ تعدادی از نمونه‌های بتن ساخته شده

۵. بررسی نتایج آزمایش‌ها

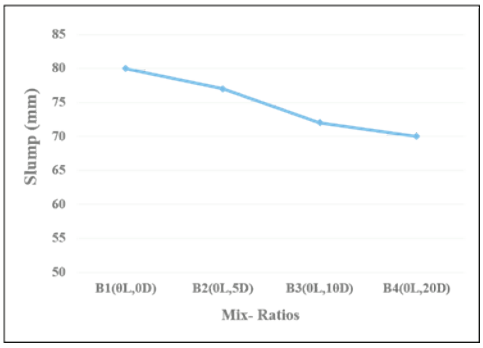
۵،۱. آزمایش اسلامپ

مطابق شکل ۶ برای بررسی روانی ترکیب‌های بتنی، مقدار اسلامپ اندازه‌گیری شد. نتایج بدست‌آمده از این آزمایش در شکل ۷ قابل مشاهده است.

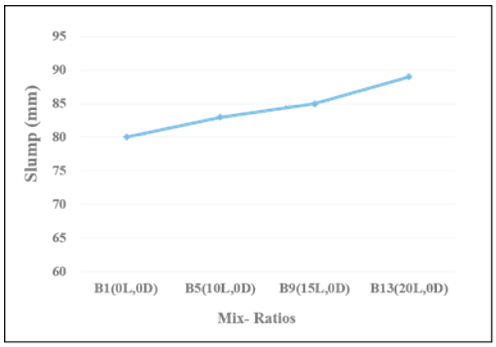
شکل ۶. انجام آزمایش اسلامپ



شکل ۷. نتایج بررسی روانی و قطر پخش‌شدگی نمونه‌های بتنی



شکل ۸. مقایسه روانی نمونه‌های بتنی فقط دارای پودردیاتومیت



شکل ۹. مقایسه روانی نمونه‌های بتنی فقط دارای پودر سنگ‌آهک

با توجه به نمودار شکل ۷ بیش‌ترین مقدار روانی مربوط به نمونه B13 با ۲۰ درصد سنگ‌آهک و ۰ درصد پودردیاتومیت است؛ کم‌ترین حالت آن نیز در مخلوط بتنی B4 و B8 مشاهده می‌شود.

در نمودار شکل ۸ که فقط شامل نمونه‌های دارای افزودنی پودر دیاتومیت است، مشاهده می‌شود که با افزایش پودردیاتومیت، اسلامپ و در نتیجه روانی بتن کاهش یافته‌است؛ پودر دیاتومیت جزو مواد سیمانی محسوب شده و چون مطابق جدول ۵، نسبت آب به مواد سیمانی در ترکیبات مورد بررسی ثابت نگه‌داشته شده‌است، با افزایش پودر دیاتومیت مقدار آب هم افزایش می‌یابد. اما چون ذرات پودر دیاتومیت حفره‌های درون ذره‌ای دارد بنابراین نیاز بیشتری به آب، در مقایسه با سیمان دارد. از این رو در این حالت با وجود افزایش آب، روانی مخلوط بتنی کاهش یافته‌است.

با توجه به نمودار شکل ۹ که فقط شامل نمونه‌های دارای پودر سنگ‌آهک به جای ماسه است، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش درصد جایگزینی پودرسنگ‌آهک، روانی مخلوط بتنی افزایش یافته‌است. شکل ۱، نشان داد که دانه‌بندی ماسه به جداره پایینی محدوده مربوطه نزدیک است و این به معنی درشت‌دانه بودن ماسه مورد استفاده است. همچنین با توجه به دانه‌بندی پودر سنگ‌آهک که در شکل ۲ ارائه شده‌است، اکثر دانه‌های آن کمتر از ۱/۱۸ میلی‌متر است. بنابراین با افزایش درصد جایگزینی پودر سنگ‌آهک به جای ماسه، دانه‌بندی مجموع دانه‌ها به سمت ریزدانه شدن نزدیک‌تر می‌شود که این امر موجب افزایش روانی مخلوط بتنی شده‌است.

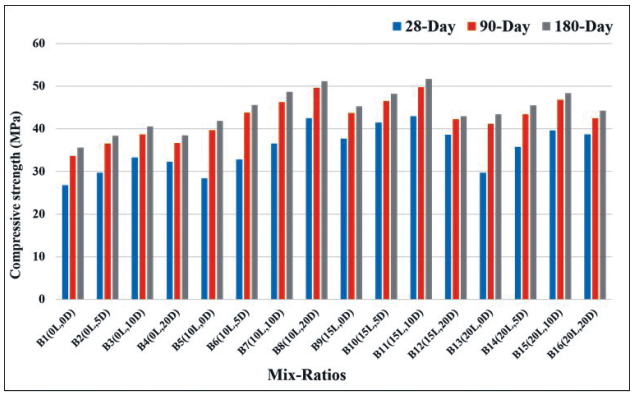
۵،۲. مقاومت فشاری

مقاومت فشاری مهم‌ترین مشخصه بتن سخت شده می‌باشد و اطلاع از این پارامتر نقش مهمی در کنترل کیفیت بتن دارد. مطابق شکل ۱۰، در آزمایش تعیین مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی ساخته‌شده با ابعاد۱۵۰ × ۱۵۰ × ۱۵۰ میلی‌متری استفاده شد و برای هر نوع ترکیب سه نمونه برای سن ۲۸ روزه، سه نمونه برای سن ۹۰ روزه و سه نمونه برای سن ۱۸۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین محاسبه گردیده است. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۶ و شکل ۱۱ نشان داده شده‌است. تاثیر زمان بر مقاومت فشاری ترکیبات و همچنین تاثیر درصد پودر سنگ‌آهک و پودر دیاتومیت در مقاومت فشاری ترکیبات در شکل ۱۱ قابل مشاهده است. با توجه به نمودار می‌توان اظهار کرد که جایگزینی پودر سنگ‌آهک به جای ماسه و افزودن پودر دیاتومیت و همچنین ترکیب هر دو مورد موجب افزایش مقاومت فشاری نمونه‌ها شده‌است.

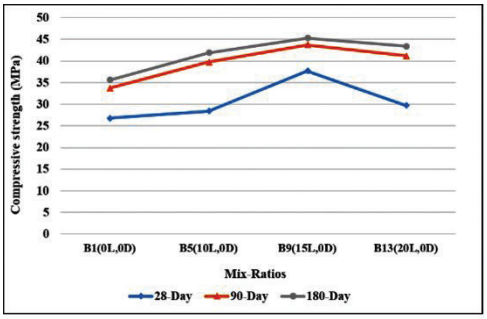
شکل ۱۰ : یک نمونه بتنی حین آزمایش مقاومت فشاری

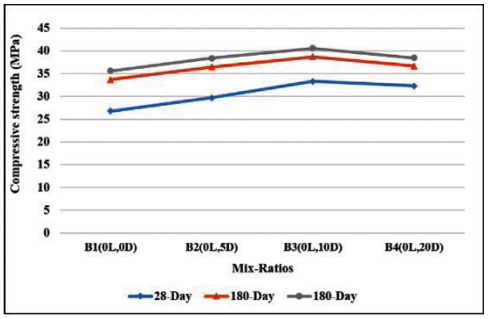
جدول ۶. نتایج آزمایش مقاومت فشاری بر روی نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

	Compressive Strength (MPa)		
Age Mix-ratios	28- days	90- days	180- days
B1(0L,0D)	26.8	33.7	35.6
B2(0L,5D)	29.7	36.5	38.4
B3(0L,10D)	33.3	38.7	40.6
B4(0L,20D)	32.3	36.7	38.5
B5(10L,0D)	28.4	39.7	41.9
B6(10L,5D)	32.8	43.8	45.6
B7(10L,10D)	36.5	46.3	48.7
B8(10L,20D)	42.5	49.6	51.2
B9(15L,0D)	37.7	43.7	45.3
B10(15L,5D)	41.5	46.5	48.2
B11(15L,10D)	43.0	49.8	51.7
B12(15L,20D)	38.6	42.3	43.0
B13(20L,0D)	29.7	41.2	43.4
B14(20L,5D)	35.8	43.4	45.4
B15(20L,10D)	39.6	46.8	48.4
B16(20L,20D)	38.7	42.5	44.3



شکل ۱۱. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری





شکل ۱۲. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های فقط دارای پودردیاتومیت **شکل ۱۳. مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های فقط دارای پودر سنگ‌آهک**

با توجه به نمودار های شکل ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شود که با افزایش مقدار افزودنی پودر دیاتومیت، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. چون مقدار نسبت آب به مواد سیمانی ثابت است، با افزایش مقدار پودر دیاتومیت مقدار آب هم افزایش یافته است؛ اما به دلیل تخلل درون ذره‌ای بیشتر ذرات پودر دیاتومیت نسبت به ذرات سیمان، قابلیت جذب آب بیشتر و نیز افزایش مجموع مواد سیمانی، این روند در نمونه‌های با ۵ و ۱۰ درصد افزودنی مشکلی ایجاد نکرده و مقاومت فشاری بیشتر شده‌است. اما در مقدار افزودنی ۲۰ درصد، جذب آب بیشتر ذرات پودر دیاتومیت نسبت به ذرات سیمان، موجب کاهش نسبی مقاومت فشاری (نسبت به نمونه‌های دارای ۱۰ درصد افزودنی) گردیده البته که همچنان بیشتر از بتن شاهد است. با توجه به دیاگرام شکل ۱۲، می‌توان گفت کاربرد پودر دیاتومیت به صورت افزودنی در حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد (با ثابت نگه داشتن نسبت آب به مواد سیمانی) حالت بهینه خواهد بود.

با توجه به نمودار شکل ۱۳ که فقط شامل نمونه‌های دارای پودر سنگ‌آهک به جای ماسه است، می‌توان مشاهده کرد که مقاومت فشاری نسبت به بتن شاهد کلا افزایش یافته‌است اما مقدار افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های B9 (یعنی جایگزین پودر سنگ‌آهک به مقدار ۱۵ درصد) بیشتر از بقیه است. علت این امر آن است که مطابق جدول ۲ حدود ده درصد از پودر سنگ‌آهک به ریزی ذرات سیمان می‌باشد. این ذرات بسیار ریز در واکنش های پوزولانی همراه با آب و سیمان مشارکت داشته و موجب افزایش مقاومت فشاری شده است.

بنابراین می‌توان گفت که همه نمونه ها در حالت کلی نسبت به بتن شاهد مقاومت فشاری بیشتری دارند؛ ولی در حالت ترکیبی B11، ۲۰ درصد افزودنی پودر دیاتومیت با ۱۰ درصد جایگزینی پودر سنگ‌آهک و نیز در حالت ترکیبی B8، ۱۰ درصد افزودنی دیاتومیت با ۱۵ درصد جایگزینی پودر سنگ‌آهک بالاترین مقاومت فشاری را در سنین مختلف ایجاد کرده اند.

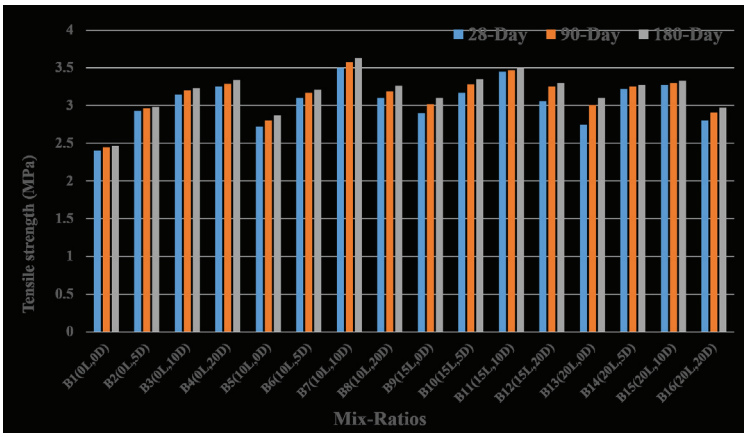
۵،۳. مقاومت کششی

مطابق شکل ۱۴، آزمایش تعیین مقاومت کششی یا همان آزمایش شکافت نمونه‌های استوانه‌ای انجام شد، دستگاه و روش بارگذاری به همان صورت بود که در آزمایش مقاومت فشاری استفاده گردید، فقط نحوه قرار دادن نمونه و شکل نمونه با آزمایش مقاومت فشاری تفاوت دارد. این آزمایش به آزمایش شکافت یا دو نیم شدن یا کشش برزیلی مشهور است. برای هر طرح اختلاط سه نمونه برای هر سن سن ۲۸ مورد آزمایش قرار گرفت و برای تعیین مقاومت نهایی کششی نمونه بتن، میانگین آن‌ها در نظر گرفته شد. نتایج حاصل از این آزمایش در جدول ۷ و شکل ۱۵ نشان‌داده شده‌است؛ ملاحظه می‌شود که همان ترتیب بیان شده برای افزایش مقاومت‌های فشاری در مقاومت‌های کششی هم مشاهده می‌گردد.

شکل ۱۴ : یک نمونه بتنی حین و بعد از آزمایش مقاومت کششی (دونیم شدن)

جدول ۷. نتایج آزمایش مقاومت کششی بروی نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

Tensile Strength (MPa			
Age / Mix-ratios	28- days	90- days	180- days
B1(0L,0D)	2.40	2.45	2.47
B2(0L,5D)	2.93	2.96	2.98
B3(0L,10D)	3.15	3.20	3.23
B4(0L,20D)	3.25	3.29	3.34
B5(10L,0D)	2.72	2.80	2.87
B6(10L,5D)	3.10	3.17	3.21
B7(10L,10D)	3.50	3.57	3.63
B8(10L,20D)	3.10	3.19	3.26
B9(15L,0D)	2.90	3.02	3.10
B10(15L,5D)	3.17	3.28	3.35
B11(15L,10D)	3.45	3.47	3.50
B12(15L,20D)	3.06	3.25	3.30
B13(20L,0D)	2.75	3.01	3.10
B14(20L,5D)	3.22	3.25	3.27
B15(20L,10D)	3.27	3.30	3.33
B16(20L,20D)	2.80	2.91	2.97



شکل ۱۵. مقایسه مقاومت کششی نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

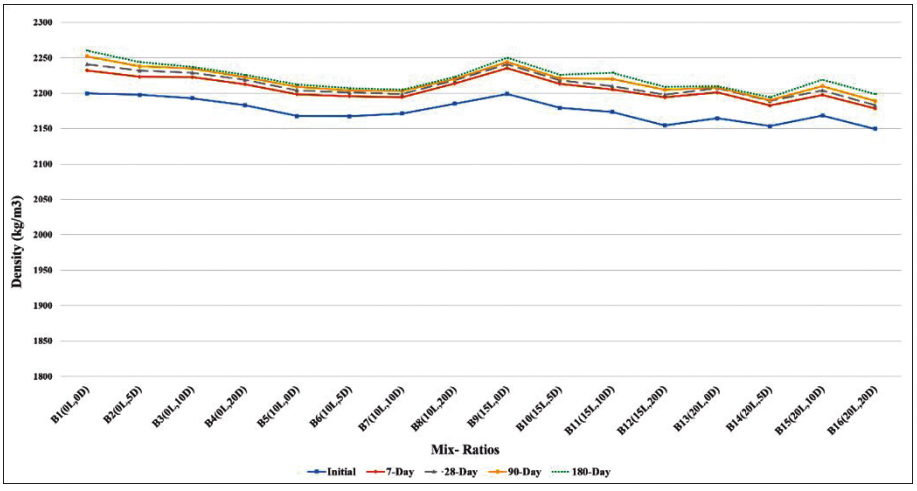
۵،۴. چگالی

چگالی ترکیبات بتنی در سن‌های مختلف در جدول ۸ و شکل ۱۶ قابل مشاهده است. در نمودار شکل ۱۷ که فقط شامل نمونه‌های دارای افزودنی پودر دیاتومیت است، کاهش چگالی با افزایش دیاتومیت مشاهده می‌شود. افزودن پودر دیاتومیت که به منزله افزایش مواد سیمانی است که با افزایش آب همراه است؛ چرا که نسبت آب به مواد سیمانی (جدول ۵) ثابت است. از آنجایی که ذرات پودر دیاتومیت دارای حفره‌های درون ذره‌ای هستند، قابلیت جذب آب بیشتری هم دارند. درنتیجه این روند، مقدار خمیر چسباننده (متشکل از آب، پودر دیاتومیت و سیمان) افزایش می‌یابد که این نیز باعث کاهش وزن مخصوص بتن می‌شود؛ چرا که وزن مخصوص این خمیر چسباننده کمتر از وزن مخصوص دانه‌ها است. این روند کاملا قابل پیش بینی بوده و در نتایج نیز مشاهده گردید.

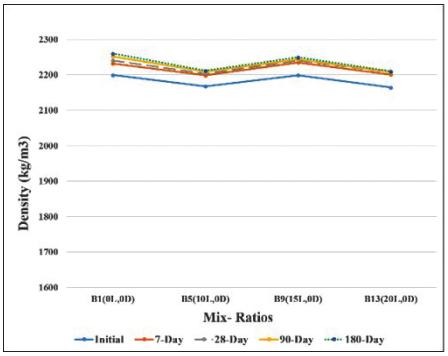
نمودار شکل ۱۸ چگالی نمونه‌های دارای پودر سنگ‌آهک به جای ماسه را نشان می‌دهد. باتوجه به دانه‌بندی ماسه مورد استفاده در شکل ۱، واضح است که دانه‌بندی آن به حد پایین محدوده مربوطه نزدیک است و این یعنی این ماسه تا حدودی درشت دانه و خشن می‌باشد. دانه‌بندی مربوط به پودر سنگ‌آهک هم نشان می‌دهد که این مصالح خیلی ریزدانه است و اغلب دانه‌های آن از ۱/۱۸ میلی‌متر کوچک‌تر است. بنابراین جایگزینی پیشنهادی با بهبود دانه‌بندی، مطابق شکل ۹، می‌تواند موجب افزایش روانی مخلوط گردد. این امر باعث می‌شود که دانه‌های داخل بتن بهتر جابه جا شوند. انتظار می‌رفت جاگیری بهتر این دانه‌ها باعث شود مقدار دانه بیشتری داخل بتن جا شود و تراکم و چگالی بتن حاصله افزایش یابد؛ همچنین افزایش مقاومت فشاری نیز این انتظار را ایجاد می‌کرد. اما مشاهده گردید که چگالی در این نمونه‌ها کاهش یافته، هر چند که مقدار این کاهش بسیار جزئی است. علت این امر به احتمال زیاد آن است که بخشی از پودر سنگ‌آهک که بسیار ریزدانه و میکرونی است در واکنش های پوزولانی با آب و ذرات سیمان شرکت کرده و حجم خمیر چسباننده را افزایش داده‌است. چگالی این خمیر نیز از چگالی دانه‌ها کمتر است به همین خاطر چگالی کل بتن کاهش می‌یابد. مطابق شکل ۱۸ در نمونه B11 با جایگزینی ۱۵ درصد پودرسنگ‌آهک به جای ماسه، کاهش چگالی کمتر است که مطابق شکل ۱۳ در این حالت مقاومت فشاری نیز به بیش‌ترین حد در بین نمونه‌های فقط با جایگزینی سنگ‌آهک، رسیده‌است.

جدول ۸. چگالی نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

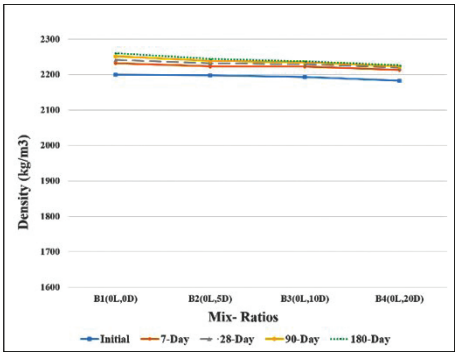
Age / Mix-ratios	Density (Kg/m^3)		
	28- days	90- days	180- days
B1(0L,0D)	2241	2252	2260
B2(0L,5D)	2232	2238	2244
B3(0L,10D)	2229	2235	2237
B4(0L,20D)	2119	2223	2226
B5(10L,0D)	2204	2209	2212
B6(10L,5D)	2201	2204	2207
B7(10L,10D)	2199	2203	2205
B8(10L,20D)	2218	2220	2223
B9(15L,0D)	2241	2244	2250
B10(15L,5D)	2218	2221	2226
B11(15L,10D)	2210	2220	2229
B12(15L,20D)	2198	2205	2209
B13(20L,0D)	2207	2208	2210
B14(20L,5D)	2189	2190	2194
B15(20L,10D)	2204	2210	2219
B16(20L,20D)	2183	2189	2199



شکل ۱۶. چگالی نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری



شکل ۱۷. مقایسه چگالی نمونه‌های بتنی فقط دارای پودردیاتومیت



شکل ۱۸. مقایسه چگالی نمونه‌های بتنی فقط دارای پودر سنگ‌آهک

۵،۵. جذب آب حین عمل‌آوری

جذب آب حین عمل‌آوری مربوط به روند کسب مقاومت و افزایش کریستال‌های حاصل از هیدراسیون مواد سیمانی می‌باشد. می‌دانیم که وزن مخصوص آب مولکولی بیشتر از آب ژل و وزن مخصوص آب ژل بیشتر از آب معمولی است. در روند کسب مقاومت در مدت زمان عمل‌آوری، در هر لحظه در کریستال‌های مربوط به هیدراسیون، مقداری از آب ژل به آب مولکولی تبدیل می‌شود. همچنین مقداری از آب موجود در لوله‌های موئینی به آب ژل تبدیل می‌شود، و به علت بیشتر بودن وزن مخصوص آب مولکولی و آب ژل، کاهش حجم رخ می‌دهد؛ این امر باعث ادامه فرآیند جذب آب به داخل بتن می‌شود. لذا با پیشرفت واکنش‌های هیدراتاسیون جذب آب به داخل بتن ادامه می‌یابد که نشان دهنده سرعت واکنش‌های هیدراتاسیون نیز می‌باشد به طوری که در هفته اول خیلی بیشتر از ۲۱ روز بعدی می‌باشد.

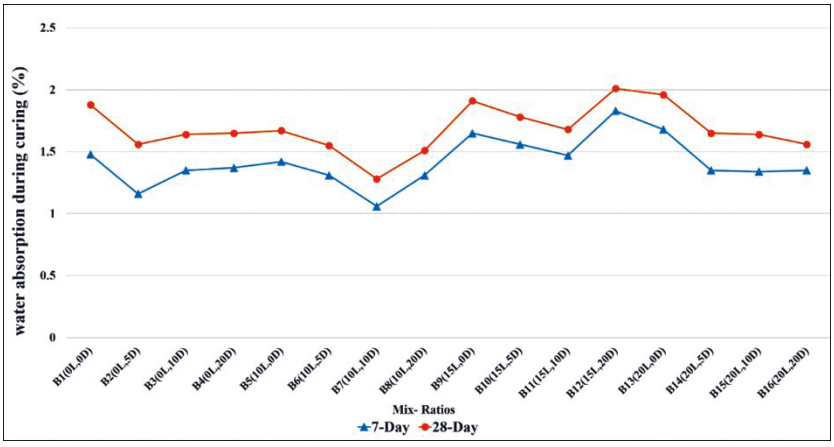
در آزمایش‌های مربوط به این مقاله جذب آب حین عمل‌آوری در سنین موردنظر، با اندازه‌گیری وزن نمونه‌ها توسط ترازوی دیجیتال قبل و بعد از عمل‌آوری، طبق رابطه‌ی (۱) محاسبه شده‌است. بعد از گذشت ۲۴ ساعت از آماده سازی نمونه‌ها، با احتیاط از قالب خارج شده و توزین گردیده‌اند. سپس نمونه‌ها در داخل حوضچه آب برای عمل‌آوری قرار داده شده‌اند. در ادامه در روز هفتم و بیست‌وهشتم نمونه‌ها از آب خارج و پس از خشک شدن سطوح آن‌ها با حوله، مجددا توزین شده‌اند. نتایج حاصل از این توزین‌ها در رابطه (۱) قرار داده شده و جذب آب حین عمل‌آوری بدست آمده که در جدول ۹ و شکل ۱۹ نتایج آن نشان داده شده‌است [۱۹].

$$\text{جذب آب حین عمل‌آوری} = \frac{(\text{جرم قبل از عمل‌آوری} - \text{جرم بعد از عمل‌آوری})}{\text{جرم قبل از عمل‌آوری}} \times 100 \qquad (۱)$$

با توجه به نتایج بدست آمده می‌توان گفت، افزودن پودر دیاتومیت و جایگزینی سنگ‌آهک به جای ماسه در بتن معمولی، به صورت مستقل یا ترکیبی، اختلالی در روند جذب آب حین عمل‌آوری ایجاد نکرده‌اند؛ روند کسب مقاومت و پیشرفت واکنش‌های هیدراتاسیون مانند سایر بتن‌ها به طور طبیعی انجام گرفته، که در ابتدا با سرعت بیشتر و سپس با سرعت کمتر ادامه یافته و در ۲۸ روز تقریبا به بلوغ رسیده‌است.

جدول ۹. جذب آب نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

Mix-ratios \ Age	Water absorption (%) 28- days
B1(0L,0D)	1.88
B2(0L,5D)	1.56
B3(0L,10D)	1.64
B4(0L,20D)	1.65
B5(10L,0D)	1.67
B6(10L,5D)	1.55
B7(10L,10D)	1.28
B8(10L,20D)	1.51
B9(15L,0D)	1.91
B10(15L,5D)	1.78
B11(15L,10D)	1.68
B12(15L,20D)	2.01
B13(20L,0D)	1.96
B14(20L,5D)	1.65
B15(20L,10D)	1.64
B16(20L,20D)	1.56



شکل۱۹. جذب آب نمونه‌های بتنی در زمان‌های مختلف عمل‌آوری

۵،۶. جمع‌بندی نتایج آزمایش‌های انجام‌یافته

در جدول ۱۰ نتایج بدست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده، به طور خلاصه، جمع‌بندی شده‌اند.

جدول ۱۰. جمع‌بندی مشخصه های بتن معمولی تحت اثر جایگزینی پودر سنگ‌آهک به جای ماسه و افزودنی پودردیاتومیت

مشخصه	نمونه‌های بتن معمولی		
	با جایگزینی پودر آهک به جای ماسه و افزودنی پودر دیاتومیت به صورت توام	فقط با افزودنی پودر دیاتومیت	فقط با جایگزینی پودر آهک به جای ماسه
روانی	تغییرات در این حالت نوسانی است. بیش‌ترین مقدار روانی مربوط به نمونه B13 با ۲۰ درصد سنگ‌آهک و ۰ درصد پودردیاتومیت است؛ کم‌ترین حالت آن نیز در مخلوط بتنی B4 و B8 مشاهده می‌شود.	افزایش درصد دیاتومیت باعث کاهش روانی بتن شده‌است. این کاهش به دلیل حفره‌های درون‌ذره‌ای دیاتومیت است که آب بیشتری جذب کرده و با وجود افزایش آب (به دلیل نسبت ثابت آب به مواد سیمانی) باعث کاهش اسلامپ شده‌اند.	جایگزینی پودر سنگ‌آهک گذشته از الک ۱/۱۸ میلی‌متر، به‌جای ماسه با بهبود دانه‌بندی، روانی بتن را افزایش داده‌است؛ یعنی جابه‌جایی و جاگیری ذرات بهبود یافته‌است.
مقاومت فشاری	همه نمونه ها در حالت کلی نسبت به بتن شاهد مقاومت فشاری بیشتری نشان داده‌اند؛ ولی در حالت ترکیبی ۲۰ درصد افزودنی پودر دیاتومیت با ۱۰ درصد جایگزینی پودر سنگ‌آهک و نیز ۱۰ درصد افزودنی دیاتومیت با ۱۵ درصد جایگزینی پودر سنگ‌آهک حالت بهینه می‌باشد.	با افزایش مقدار افزودنی پودر دیاتومیت، به علت تخلل درون ذره‌ای بیشتر ذرات پودر دیاتومیت نسبت به ذرات سیمان، قابلیت جذب آب بیشتر و نیز افزایش مجموع مواد سیمانی، حتی با وجود افزایش آب، مقاومت فشاری افزایش یافته‌است. مقدار بهینه این مواد حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد است.	جایگزینی پودر سنگ‌آهک به جای ماسه مقاومت فشاری را بیشتر کرده‌است زیرا بخشی از آن که شامل ذرات بسیار ریز است در واکنش‌های پوزولانی همراه با آب و سیمان مشارکت نموده‌اند.
چگالی	ترکیب آهک و دیاتومیت به طور کلی باعث کاهش چگالی بتن گردیده‌اند.	دیاتومیت به دلیل وزن مخصوص پایین و ساختار متخلخل، (با جذب آب بیشتر و افزایش حجم خمیر سیمان نسبت به سنگدانه‌ها) چگالی بتن را کاهش داده‌است.	جایگزینی پودرسنگ‌آهک به جای ماسه، علی‌رغم افزایش روانی، جاگیری بهتر ذرات و افزایش مقاومت فشاری، موجب کاهش چگالی شده‌است. زیرا بخشی از پودر سنگ آهک که به صورت ذرات میکرونی است در واکنش‌های پوزولانی با آب و ذرات سیمان مشارکت کرده و حجم خمیر چسباننده (که چگالی کمتر از دانه ها دارد) را افزایش داده‌است.
جذب آب حین عمل‌آوری	افزودن پودر دیاتومیت و جایگزینی سنگ‌آهک به جای ماسه، به صورت مستقل یا ترکیبی، اختلالی در روند جذب آب حین عمل‌آوری ایجاد نکرده و روند کسب مقاومت و پیشرفت واکنش‌های هیدراتاسیون مانند سایر بتن‌ها به طور طبیعی انجام گرفته‌است. مقدار تاثیر این مواد بر کاهش و افزایش این مولفه بسیار جزیی است.		

۶. ارائه یک مدل ریاضی بر اساس نتایج تجربی

در ادامه بر اساس مقادیر بدست‌آمده از آزمایش مقاومت فشاری برای سن ۲۸ روزه، روابط ریاضی برای تعیین f'_C به عنوان مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن‌پودری‌واکنشی با مقادیر مختلف جایگزینی مورد بحث، ارائه گردید. رابطه (۱) برای نمونه‌های بتنی فقط با جایگزینی پودر سنگ‌آهک به جای ماسه، رابطه (۲) برای نمونه‌های بتنی فقط با افزودنی پودر دیاتومیت و رابطه (۳) برای نمونه‌های بتنی دارای هردو ماده می‌باشد. دو رابطه (۱) و (۲) منحنی درجه دوم و رابطه (۳) یک منحنی درجه سوم می باشد؛ هر سه رابطه با روش برازش منحنی و با استفاده از کم‌ترین خطای مربعات بدست آورده شده‌است. در این روابط، f'_{C0} مقاومت فشاری بتن شاهد (با جایگزینی صفر درصد) است که با توجه به جدول ۶ برابر ۲۶/۸ مگاپاسکال می‌باشد. روابط مذکور به نحوی تنظیم شده‌است که منحنی حاصل از آن‌ها از نقطه (یعنی مقاومت فشاری بتن شاهد) عبور کند و نیز مجموع مربعات خطاهای بقیه نقاط به حداقل رسیده باشد. چنانکه ملاحظه می‌شود اگر x معادل صفر در نظر گرفته شود مقدار f'_C در هر سه رابطه برابر با f'_{C0} می‌شود.

$$f'_C(L) = 26.8 + 84\,L - 300\,L^2 \quad (۱)$$

$$f'_C(D) = 26.8 + 67\,D - 160\,D^2 \quad (۲)$$

$$f'_C(LD) = 26.8 - 189.06\,L + 61.27\,D + 3324\,L^2 + 477.7\,LD + 52.2\,D^2 - 11330\,L^3 - 1235\,L^2D - 1209\,LD^2 - 975D^3 \quad (۳)$$

در این رابطه f'_C برابر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بر حسب مگاپاسکال، L برابر مقدار درصد جایگزینی پودر سنگ‌آهک به جای ماسه و D برابر مقدار درصد افزودنی پودر دیاتومیت است. به عنوان مثال برای نمونه حاوی فقط جایگزینی ۲۰ درصد (B13) پودر

سنگ‌آهک به جای ماسه با استفاده از رابطه ۱، مقاومت فشاری تئوری به‌ترتیب ذیل برابر ۳۱/۶ مگاپاسکال به‌دست می‌آید.

$$f'_C(0.15) = 26.8 + (84\times0.2) - (300\times 0.2^2) = 31.6$$

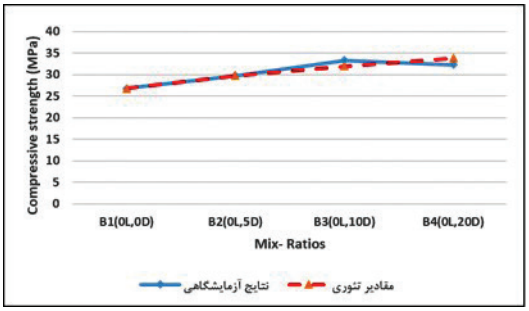
برای نمونه حاوی فقط افزودنی ۲۰ درصد پودر دیاتومیت (B4) با استفاده از رابطه ۲، مقاومت فشاری تئوری به‌ترتیب ذیل برابر ۳۳/۸ مگاپاسکال به‌دست می‌آید.

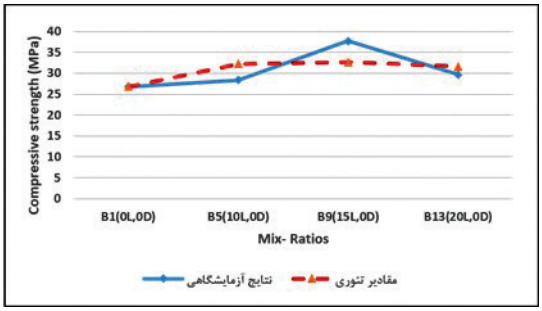
$$f'_C(0.2) = 26.8 + (82.08\times0.2) - (334\times0.2^2) = 33.8$$

همچنین برای نمونه با جایگزینی ۲۰ درصد (B13) پودر سنگ‌آهک به جای ماسه وافزودنی ۲۰ درصد پودر دیاتومیت با استفاده از رابطه ۳، مقاومت فشاری تئوری به‌ترتیب ذیل برابر ۳۷/۴۰ مگاپاسکال به‌دست می‌آید.

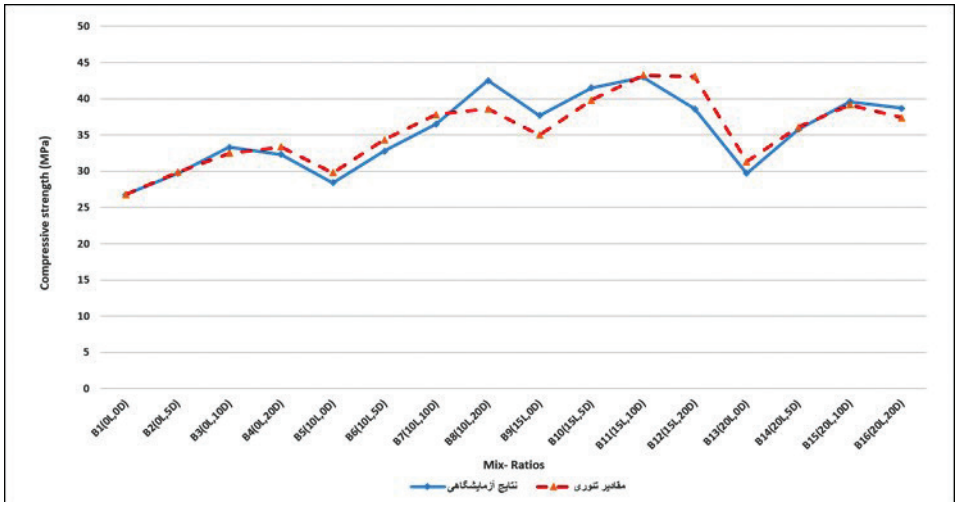
$$f'_C(0.15,0.10) = 37.40$$

پرواضح است که در صورت استفاده از فقط پودر سنگ‌آهک یا فقط دیاتومیت، رابطه ۳ همچنان کاربرد خواهد داشت؛ اما میزان دقت روابط ۱ و ۲ در این نمونه ها بیشتر می‌باشد. در شکل‌های ۲۰ تا ۲۲ میزان تطابق نتایج آزمایشگاهی با نتایج بدست‌آمده از سه رابطه پیشنهادی مشاهده می‌شود.





شکل ۲۰. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از معادله (۱) شکل ۲۱. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج حاصل از معادله (۲)



شکل۲۲. مقایسه نتایج آزمایشگاهی با نتایج بدست‌آمده از معادله (۳)

۶. نتیجه گیری

در این تحقیق آزمایش‌هایی جهت بررسی تأثیر استفاده از پودر سنگ‌آهک به عنوان جایگزین بخشی از ماسه و نیز استفاده از پودر بسیار ریز دیاتومیت به عنوان یک افزودنی پوزولانی و تأثیر توام آن‌ها بر خصوصیات مکانیکی خواص بتن معمولی انجام شد. نتایج حاصل، از آزمایش با استفاده از مصالح بومی بدست آمده است؛ که ممکن است از لحاظ کمی با نتایج آزمایش‌های سایر محققان متفاوت باشد؛ ولی در زمان انجام آزمایش‌ها دقت کامل برای رسیدن به نتایجی با کم‌ترین خطا رعایت شده‌است. بر اساس آزمایش‌های انجام شده نتایج به شرح زیر بدست آمد:

۱. در همه ترکیب‌های بتن که فقط پودر سنگ‌آهک با درصدهای مختلف جایگزین بخشی از ماسه شده، یعنی نمونه‌های B5، B9 و B13 ، مقاومت فشاری بیشتر از بتن شاهد می‌باشد. بیش‌ترین افزایش مقاومت در جایگزینی ۱۵ درصد (نمونه‌های B9) اتفاق افتاده‌است که افزایش مقاومت فشاری آن برای نمونه‌های ۲۸ ، ۹۰ و ۱۸۰ روزه به ترتیب برابر۴۱، ۳۰ و ۲۷ درصد می‌باشد.

۲. در همه ترکیب‌هایی که فقط شامل افزودنی دیاتومیت می‌باشد، یعنی نمونه‌های B2، B3 و B4، مقاومت فشاری افزایش یافته‌است. بیش‌ترین افزایش در نمونه‌های B3 با ۱۰ درصد دیاتومیت به صورت افزودنی، اتفاق افتاده‌است که این افزایش برای نمونه‌های ۲۸، ۹۰ و ۱۸۰ روزه برابر ۲۴ ، ۱۵ و ۱۴ درصد می‌باشد.

۳. در همه نمونه‌هایی که هم شامل افزودنی دیاتومیت می‌باشند و هم جایگزینی پودر سنگ‌آهک به جای بخشی از ماسه انجام گرفته است، افزایش مقاومت فشاری اتفاق افتاده‌است. بیش‌ترین افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های B11 شامل ۱۰ درصد پودر دیاتومیت به صورت افزودنی و ۱۵ درصد پودر سنگ‌آهک به عنوان جایگزین بخشی از ماسه می‌باشد که برای نمونه‌های ۲۸ ، ۹۰ و ۱۸۰ روزه مقدار افزایش مقاومت فشاری آن به ترتیب برابر ۶۰ ، ۴۸ و ۴۵ درصد می‌باشد.

۴. در نمونه‌های کششی هم دقیقا مانند نمونه‌های فشاری افزایش مقاومت مشاهده می‌شود. یعنی همه نمونه‌های شامل پودر دیاتومیت یا پودر سنگ‌آهک و یا هر دو، دارای مقاومت کششی بیشتری نسبت به بتن شاهد (B1) می‌باشند.

۵. جذب آب حین عمل‌آوری نشان دهنده روند پیشرفت واکنش‌های هیدراتاسیون و کسب مقاومت بتن می‌باشد. در همه نمونه‌ها که در سن ۷ روزه و ۲۸ روزه جذب آب حین عمل‌آوری محاسبه شده‌است، روند پیشرفت واکنش‌های هیدراتاسیون و کسب مقاومت بتن ملاحظه می‌گردد.

۶. افزودن پودر دیاتومیت موجب کاهش روانی بتن و جایگزینی پودر سنگ‌آهک به جای ماسه، موجب افزایش روانی بتن می‌شود. علت این امر جذب آب بیشتر پودردیاتومیت نسبت به سیمان و نرم بودن پودر سنگ‌آهک نسبت به ماسه است.

۷. افزایش درصد افزودنی پودر دیاتومیت، چگالی بتن را کاهش می‌دهد. اما رابطه جایگزینی پودر سنگ‌آهک به جای ماسه، چگالی، یک رابطه خطی نیست؛ بلکه با بهینه شدن طرح اختلاط و افزایش مقاومت فشاری آن، چگالی نیز بیشتر می‌شود. به طور کلی چگالی طرح اختلاط‌های بررسی شده، به صورت جزئی کمتر از بتن شاهد است.

۸. با توجه به نتایج فوق الذکر استفاده از ۱۵ درصد پودر سنگ‌آهک به عنوان جایگزین بخشی از ماسه و افزودن ۱۰درصد دیاتومیت به عنوان یک ماده پوزولانی به بتن توصیه می‌شود.

۷. قدردانی و تشکر

این تحقیق در آزمایشگاه بتن و مصالح ساختمانی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان انجام گرفته است؛ بدین‌وسیله از همکاری همه مسئولین مربوطه، از جمله کارشناس محترم آزمایشگاه تشکر و قدردانی می گردد.

منابع

Habibi A. *(2009). Mechanical properties of concrete containing limestone powder. Concrete Research, 7(2):71–84. (in Persian)*

Mostoufi-Nejad D, Nazari Monfared H-H. *(2006). Using slag and limestone powder in concrete to improve its durability in sulfate environment. Journal of Transportation Research, 3(2):139–145. (in Persian)*

Dhir RK, Limbachiya MC, McCarthy MJ, Chaipanich A. Evaluation of Portland limestone cements for use in concrete construction. Materials and structures. 2007 Jun; 40:459-73.

BentzA DP, IrassarB EF, BucherC B, WeissC WJ. Limestone Fillers to Conserve Cement in Low w/cm Concretes: An Analysis Based on Powers' Model.

De Weerdt K, Haha MB, Le Saout G, Kjellsen KO, Justnes H, Lothenbach B. Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. Cement and Concrete Research. 2011 Mar 1;41(3):279-91. DOI: 10.1016/j.cemconres.2010.11.014

Bonavetti VL, Castellano CC, Donza HA, Rahhal VF, Irassar EF. The Powers model and the limits of calcareous addition content in Portland cements. Concrete and Cement. Research and Development. 2013 Dec;5(1):40–51.

Zajac M, Rossberg A, Le Saout G, Lothenbach B. Influence of limestone and anhydrite on the hydration of Portland cements. Cement and Concrete Composites. 2014 Feb 1; 46:99-108. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2013.11.007

Aslanian Z, Chini M, Eftekhari MH, Shaker H, Shekarchi zadeh S. Investigation of the effect of limestone powder and slag on the durability of roller-compacted pavement. In: 8th Annual National Concrete Conference of Iran; 2016; Tehran, Iran. Tehran: Iran Concrete Institute; 2016. p. 1–11. (in Persian)

Bentz DP, Ferraris CF, Jones SZ, Lootens D, Zunino F. Limestone and silica powder replacements for cement: Early-age performance. Cement and Concrete Composites. 2017 Apr 1; 78:43-56. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2017.01.001

Shah V, Parashar A, Mishra G, Medepalli S, Krishnan S, Bishnoi S. Influence of cement replacement by limestone calcined clay pozzolan on the engineering properties of mortar and concrete. Advances in Cement Research. 2020 Mar;32(3):101-11. DOI: 10.1680/jadcr.18.00073

Mohammed BK, Al-Numan BS. Effectiveness of Limestone Powder as a Partial Replacement of Cement on the Punching Shear Behavior of Normal-and High-Strength Concrete Flat Slabs. Sustainability. 2024 Mar 5;16(5):2151. DOI: 10.3390/su16052151

Kastis D, Kakali G, Tsivilis S, Stamatakis MG. Properties and hydration of blended cements with calcareous diatomite. Cement and concrete research. 2006 Oct 1;36(10):1821-6. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.05.005

Fragoulis D, Stamatakis MG, Papageorgiou D, Chaniotakis E. The physical and mechanical properties of composite cements manufactured with calcareous and clayey Greek diatomite mixtures. Cement and Concrete Composites. 2005 Feb 1;27(2):205-9. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2004.02.008

Degirmenci N, Yilmaz A. Use of diatomite as partial replacement for Portland cement in cement mortars. Construction and Building Materials. 2009 Jan 1;23(1):284-8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.12.008