

Investigating The Effect of Replacing Quartz Powder with Alborz Green Tuff Powder on The Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete in Order to Increase the Capacity of Building Materials

Z. Pezeshki¹, B. Shervani Tabar^{2*}

1- M.Sc., Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Azarbaijan Shahid Madani University, Tabriz, Iran.

b.shervani@azaruniv.ac.ir

Received: 15 February 2025 Revised: 25 May 2025 Accepted: 16 June 2025

Research paper

Abstract:

The high production cost of Reactive Powder Concrete (RPC) has been one of the main challenges limiting its widespread application. This study has investigated the effects of replacing quartz powder with green tuff powder from the Alborz region in RPC, with the aim of increasing resource availability and reducing the final cost of production. The impact of this substitution on compressive strength, tensile strength, consistency, and water absorption has been evaluated. Initially, a suitable reference mix has been developed based on previous research and trial-and-error procedures. Subsequently, six concrete mixes have been prepared with green tuff powder replacing quartz powder at various proportions, ranging from 20% to 100%. Curing has been carried out in water at 25°C so that the results can also be used for in-situ concrete. The results have indicated that the mix with 100% replacement has achieved a 28-day compressive strength of 72.27 MPa, which has represented a 4.6% decrease compared to the reference mix, yet has remained within the acceptable range for structural applications. Tensile strength has increased with higher replacement levels. This improvement has been attributed to the dual role of green tuff powder, which not only acts as a filler but also has partially participated in pozzolanic reactions due to its weak pozzolanic activity, thereby enhancing the binder matrix and, consequently, the tensile strength. In contrast, compressive strength has been influenced by both the binder and the hardness of filler particles. As such, the increased binder content has not been able to compensate for the lower hardness of green tuff compared to quartz, resulting in a slight reduction in compressive strength. Furthermore, the consistency of the mixes has improved with increasing replacement levels, due to the higher surface water content of green tuff particles. Water absorption has remained relatively unchanged with curing age, indicating that the surface water of green tuff powder has actively contributed to the hydration process.

Keywords: Reactive powder concrete, Alborz green tuff powder, compressive strength, water absorption, Tensile strength.

*Corresponding Author: B. Shervani Tabar

Pezeshki Z., Shervani Tabar B. Investigating The Effect of Replacing Quartz Powder with Alborz Green Tuff Powder on The Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete In Order to Increase the Capacity of Building Materials. *J. Concr. Struct. Mater.*, 2024; 9(2): 45-66. <http://doi.org/10.30478/jcsm.2025.490580.1382>

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/>).

بررسی تأثیر جایگزینی پودر توف سبز البرز به جای پودر کوارتز بر روی مشخصات مکانیکی بتن پودری واکنشی جهت بهبود استفاده از ظرفیت مصالح ساختمانی

زهرا پزشکی^۱، بهمن شروانی تبار^{۲*}

۱- کارشناس ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران.

پست الکترونیکی نویسنده مسئول: ۲- b.shervani@azaruniv.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۲۷، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۳/۰۴، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۶

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

هزینه زیاد تولید بتن پودری واکنشی یکی از چالش‌های اصلی در استفاده گسترده از این نوع بتن است. در این مطالعه، جهت بهبود استفاده از ظرفیت منابع تولید بتن و کاهش هزینه تولید بتن، تأثیر جایگزینی پودر توف سبز البرز به جای پودر کوارتز در بتن پودری واکنشی بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، روانی و جذب آب بررسی شده است. ابتدا، یک طرح مخلوط مناسب به‌عنوان بتن شاهد با تکیه بر پیشینه تحقیقات و آزمون و خطا تعیین گردیده است. سپس شش طرح مخلوط با درصد‌های جایگزینی پودر توف سبز البرز به جای پودر کوارتز مختلف از ۲۰ تا ۱۰۰ درصد ساخته گردیده است. عمل‌آوری آزمون‌ها در داخل آب با دمای 25°C صورت گرفته است تا نتایج برای بتن ریزی درجا نیز قابل استفاده باشد. نتایج نشان داده است که آزمون‌های دارای ۱۰۰٪ جایگزینی در سن ۲۸ روزه، مقاومت فشاری برابر ۷۲/۲۷ مگاپاسکال داشته‌اند که نسبت به بتن شاهد ۴/۶٪ کاهش داشته اما همچنان در محدوده مطلوب برای کاربردهای سازه‌ای هستند. مقاومت کششی با افزایش درصد جایگزینی افزایش یافته است. این امر به دلیل ماهیت توف سبز است که علاوه بر نقش پرکنندگی، بخشی از ذرات آن به‌عنوان یک پوزولان ضعیف در واکنش‌های پوزولانی شرکت کرده و موجب افزایش خمیر چسباننده و در نتیجه افزایش مقاومت کششی شده‌اند. در مقابل مقاومت فشاری بتن علاوه بر خمیر چسباننده، به سختی دانه‌های پرکننده نیز وابسته است؛ بنابراین افزایش میزان خمیر چسباننده نتوانسته کاهش مقاومت ناشی از کم‌تر بودن سختی دانه‌های توف سبز نسبت به کوارتز را جبران کند و در نهایت مقاومت فشاری کاهش یافته است. همچنین، با افزایش میزان جایگزینی، روانی بتن افزایش یافته است که علت آن آب سطحی بیش‌تر ذرات توف سبز نسبت به ذرات پودر کوارتز است. جذب آب طی عمل‌آوری آزمون‌ها با افزایش سن تغییر چندانی نداشت که نشان‌دهنده مشارکت آب سطحی ذرات پودر توف سبز در فرآیند هیدراتاسیون است.

واژگان کلیدی: بتن پودری واکنشی، پودر توف سبز البرز، مقاومت فشاری، جذب آب، مقاومت کششی.

۱. مقدمه

بتن همواره به عنوان یکی از مصالح اصلی و پرکاربرد در صنعت ساخت شناخته می‌شود [۱]؛ اما بتن معمولی دارای ضعف‌هایی از جمله نفوذپذیری است، به همین دلیل محققان همواره سعی در ارتقای کیفیت و دوام این ماده داشته‌اند [۲]. با توجه به رشد روزافزون صنعت ساخت و نیاز به تولید بتن‌هایی با ویژگی‌های خاص، بررسی مصالح جایگزین برای کاهش هزینه‌ها و حفظ منابع طبیعی همراه با بهبود عملکرد بتن، مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است [۳]. در راستای افزایش عملکرد بتن برای کاربردهای خاص، بتن‌های فوق‌توانمند^۱ تولید شده‌اند که یکی از انواع آن‌ها، بتن‌پودری واکنشی^۲ است [۴]. به نقل از مرجع [۵] این نوع بتن اولین بار توسط ریچارد و همکاران در سال ۱۹۹۵ ساخته شده است؛ آن‌ها دریافتند که حذف سنگدانه‌های درشت، امکان دستیابی به یک ماتریس سیمانی همگن و متراکم را فراهم می‌کند [۶]. این بتن به خاطر همگنی مناسب، ضمن دارا بودن مقاومت فشاری زیاد، دارای دوام بیش‌تر در مقابل سایش، نفوذپذیری و خوردگی است [۷] و گزینه‌ای مناسب برای سازه‌هایی با اهمیت زیاد می‌باشد [۸]. البته علت مقاومت فشاری زیاد در بتن‌پودری واکنشی فقط حذف سنگدانه‌های درشت نیست؛ چرا که نتایج مطالعات بر روی جایگزینی انواع ماسه کوارتز ریز آسیاب شده (۰/۴۰ - ۰/۱۵ میلی‌متر) با حجم مساوی از سنگدانه طبیعی به خوبی درجه‌بندی شده (با حداکثر اندازه ۸ میلی‌متر)، تغییری در مقاومت فشاری بتن‌پودری واکنشی، در همان نسبت آب به سیمان، نشان نداده است [۹]. در این نوع بتن از فوق‌روان‌کننده برای ساخت بتن با نسبت آب به مواد سیمانی کم استفاده می‌شود. همچنین می‌توان از عمل‌آوری با دمای زیاد یا بخار برای رسیدن به مقاومت فشاری زیاد استفاده کرد [۱۰]. البته این روش عمل‌آوری فقط برای تولید قطعات پیش‌ساخته کاربرد دارد؛ ولی برای بتن‌ریزی‌های درجا از عمل‌آوری معمولی (آب دادن به بتن همراه با دمای محیطی مناسب) استفاده می‌شود. مقاومت فشاری بتن‌پودری واکنشی تحت عمل‌آوری با اتوکلاو^۳، به طور معمول حدود ۱۰۰-۲۰۰ مگاپاسکال است [۱۱]. این بتن از ترکیب سیمان، دوده سیلیسی^۴، پودر کوارتز، ماسه سیلیسی، آب، فوق‌روان‌کننده و در برخی موارد الیاف فولادی ساخته می‌شود [۱۲]. بتن‌پودری واکنشی به دلیل ظرفیت برشی زیاد خود، باعث کاهش ابعاد قطعات برابر سازه و در نتیجه کاهش بار مرده سازه می‌شود [۱۳]. همچنین، خاصیت شکل‌پذیری قطعات ساخته‌شده از این نوع بتن، آن‌ها را در برابر نیروهای زلزله مقاوم می‌کند [۱۴].

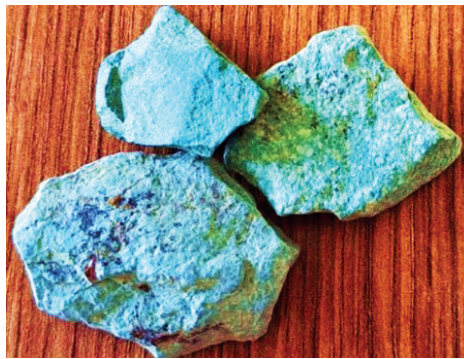
گسترش کاربرد بتن، تحقیقاتی برای کاهش آثار زیست‌محیطی و هزینه‌های تولید این ماده انجام شده است که یکی از این راهکارها استفاده از مواد جایگزین است [۱۵]. در بتن‌پودری واکنشی، مصرف زیاد سیمان و استفاده از پودر کوارتز و فوق‌روان‌کننده‌ها، نه تنها هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهد، بلکه به دلیل اثرات زیست‌محیطی ناشی از تولید و محدودیت منابع این مواد در برخی مناطق، چالش‌هایی را به همراه دارد [۱۶]. به همین دلیل، جایگزینی این مواد با مصالح ارزان‌تر و در دسترس‌تر مانند ضایعات صنعتی و مصالح بازیافتی، می‌تواند ضمن کاهش هزینه‌ها به بهبود عملکرد بتن و کاهش اثرات منفی تولید این نوع بتن کمک کند. استخراج پودر توف‌سبز موجب ایجاد ضایعاتی می‌شود و هدف این پژوهش، بررسی امکان‌سنجی جایگزینی این ضایعات پس از آسیاب کردن به عنوان جایگزین پودر کوارتز در بتن‌پودری واکنشی است.

¹ Ultra-High-Performance Concrete (UHPC)

² Reactive Powder Concrete (RPC)

³ Autoclave

⁴ Silica Fume



شکل ۱: سنگ توفسبز البرز

توف‌های آتشفشانی، نوعی از پوک‌سنگ‌های آذرین و حاصل مواد مذاب آتشفشانی و همچنین خاکسترهای آتشفشانی می‌باشد که انواع مختلف آن هم به صورت پوزولان و هم به صورت مصالح دانه‌ای پرکننده قابل استفاده هستند. یکی از انواع این توف‌ها، توفسبز البرز (شکل ۱) است که در ایران ذخایر بسیاری از آن وجود دارد؛ به طوری که لایه‌های بسیار ضخیمی از توفسبز البرز در دامنه‌های جنوبی البرز از زنجان تا کرج، از کرج تا تهران و در ادامه تا دامغان گسترده شده‌است. از معادن فعال آن می‌توان معدن «سازند کرج» و معدن «آبیک» در نزدیکی تهران را نام برد. ضخامت زیاد و گسترش وسیع معادن توف‌های البرز، موجب اقتصادی بودن استفاده از آن‌ها شده‌است؛ از این رو شناخت ویژگی‌ها و کاربردهای این پوک‌سنگ‌ها ضروری است. پودر توفسبز کاربردهای گسترده‌ای در صنعت ساخت دارد. این ماده در ساخت دیوارهای سنگی در پل‌ها، دیوارهای پشتبند و کانال‌های آب، به ویژه در مناطق البرز جنوبی، به دلیل ویژگی‌های فیزیکی خاص خود مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از این سنگ‌ها می‌توان مصرف مصالح ساختمانی مصنوعی را به میزان زیادی کاهش داد. هزینه میانگین دیوارهای آجر رسی ۱/۵ تا ۳ برابر بیش از دیوارهای سنگی است، بنابراین ساختن دیوارهای سنگی از بلوک‌های توف در این منطقه کاملاً اقتصادی است؛ اما اگر مسافت حمل این سنگ‌ها بیش از ۳۵۰ کیلومتر باشد، مقرون به صرفه نخواهد بود. علاوه بر این، استفاده از سنگ توف شکسته در ساخت بتن عنوان سنگدانه، به دلیل مقاومت و ویژگی‌های مکانیکی مناسب، موجب افزایش مقاومت فشاری و کاهش هزینه‌های تولید می‌شود. همچنین، توف به عنوان عایق حرارتی در برخی کشورها مانند روسیه برای پوشش کوره‌ها و بناهای خاص به کار می‌رود. از دیگر کاربردهای آن می‌توان به استفاده در تولید آجرهای سیلیکات کلسیم اشاره کرد که به دلیل درصد زیاد سیلیس موجود در توف، این آجرها دارای مقاومت و ویژگی‌های مطلوبی هستند. [۱۷].

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته، مطالعه‌ای در مورد جایگزینی پودر توفسبز به جای پودر کوارتز به عنوان پرکننده در بتن پودری واکنشی انجام نشده‌است. از آنجایی که درجه سختی این توف خیلی کم‌تر از سنگ‌های کوارتزی و سیلیسی بوده و معادن خیلی غنی آن در گستره وسیعی در دسترس است [۱۷]، لذا هزینه تولید این پودر خیلی کم‌تر از پودر کوارتز خواهد بود؛ با توجه به هزینه زیاد تولید پودر کوارتز، جایگزینی پودر کوارتز با پودر توفسبز از یک سو می‌تواند به کاهش هزینه‌ها کمک کند و از سوی دیگر، ظرفیت استفاده از انواع مصالح ساختمانی در کاربردهای مختلف را افزایش دهد، که خود ضرورت انجام این پژوهش را ایجاب می‌کند. تحقیق پیش‌رو به بررسی امکان‌سنجی استفاده از پودر توفسبز به عنوان جایگزینی برای پودر کوارتز در بتن پودری واکنشی می‌پردازد، که در این راستا تأثیر این جایگزینی بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی، چگالی و جذب آب بتن ارزیابی شده‌است تا ضمن کاهش هزینه‌های تولید، عملکرد بتن نیز بهبود یابد. به این منظور طرح‌های مخلوط با جایگزینی پودر توفسبز به جای کوارتز

با مقادیر ۰، ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد ارائه شده و آزمون‌هایی از آن‌ها ساخته شده‌است. آزمون‌های آماده شده تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی، جذب آب حین عملآوری و جذب آب ASTM C642-13 قرار گرفته‌اند. همچنین در هر مخلوط بتنی آماده‌شده قبل از بتنریزی در قالب، آزمایش میز جریان برای تعیین روانی انجام گردیده‌است.

۲. پیشینه تحقیق

۲-۱- انواع جایگزینی‌ها برای بهبود عملکرد بتن پودری واکنشی

Yalçınkaya و Yazıcı [۱۸] به بررسی جایگزینی سیمان با خاکستر بادی و سرپاره کوره، با هدف کاهش اثرات زیست محیطی، بر بتن پودری واکنشی پرداخته و دریافته‌اند که جایگزینی ۵۰٪ سیمان با خاکستر بادی، بر خلاف سرپاره کوره، انقباض اولیه بتن را کاهش می‌دهد. Luo و همکاران [۱۹] به بررسی تأثیر جایگزینی ماسه زغال سنگ به جای ماسه طبیعی در بتن پودری واکنشی پرداخته و دریافته‌اند که افزایش مقدار این جایگزینی، باعث کاهش مقاومت فشاری و خمشی بتن در سن ۲۸ روز، بر خلاف سنین ۷ و ۱۴ روز، می‌شود. این کاهش ناشی از مهار واکنش هیدراتاسیون و ایجاد ترک‌های ریز در خمیر سیمان بوده‌است. چاخرلو و شروانی تبار [۲۰] جایگزینی ماسه معمولی معدن سرام تبریز به جای ماسه سیلیسی را بر بتن پودری واکنشی بررسی نموده و دریافته‌اند ماسه این معدن با کاهش هزینه‌ها و افزایش کارایی، توأمأ جایگزینی مناسب برای ماسه سیلیسی و نیز پودر کوارتز است. Alkhaly و همکاران [۲۱] استفاده خاکستر شلتوک به جای دوده سیلیسی و پودر کوارتز را در تولید بتن پودری واکنشی بررسی کرده و بیان داشته‌اند که نسبت بهینه ۳۰٪ خاکستر شلتوک، خواص بتن پودری واکنشی را به طور قابل توجهی بهبود بخشیده و مقاومت فشاری بیش‌تر از ۱۰۰ مگاپاسکال را حاصل می‌گردد. Abellán García و همکاران [۲۲] استفاده از پودر شیشه به عنوان افزودنی در بتن پودری واکنشی را بررسی کرده و دریافته‌اند این افزودنی ضمن کاهش ۲۹٪ مصرف سیمان و ۶۴٪ مصرف میکروسیلیس، موجب افزایش روانی و دوام در برابر یون کلرید، بهبود مشخصات مکانیکی و کاهش انقباض بتن می‌شود. Rahmani و Mohammad Zade [۲۳] با بررسی استفاده از پودر سنگ آهک ضایعاتی به عنوان جایگزین ماسه سیلیسی در تولید بتن پودری واکنشی، دریافته‌اند که با افزایش مقدار این جایگزینی، مشخصات مکانیکی بتن بهبود می‌یابد. Ge و همکاران [۲۴] تحقیقی با هدف ارائه ترکیب‌های اقتصادی‌تر بتن پودری واکنشی با استفاده از محصولات جانبی صنعتی مانند خاکستر بادی، دوده سیلیسی و پودر سرپاره انجام داده‌اند. نتایج نشان داده‌است که جایگزینی ۲۵٪ سیمان با پودر سیلیکا و جایگزینی ۳۰٪ سیمان با پودر سرپاره یا خاکستر بادی منجر به کاهش جذب آب، هزینه‌ها و افزایش تأثیرات مثبت محیط زیستی در عین دستیابی به بیش‌ترین مقاومت فشاری، می‌شوند. Abrahimi و Bhikshma [۲۵] به بررسی استفاده از میکروسیلیس و الکوفاين به عنوان افزودنی سیمانی در بتن پودری واکنشی پرداخته‌اند. نتایج نشان‌دهنده اهمیت ترکیب بهینه مواد و فرآیند مخلوط‌سازی در بهبود ویژگی‌های مکانیکی بتن پودری واکنشی است. Ju و همکاران [۲۶] در تولید بتن پودری واکنشی از خاکستر بادی و سرپاره کوره آهن‌گدازی به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان استفاده کرده و دریافته‌اند این جایگزینی باعث پر شدن منافذ و افزایش چگالی می‌گردد. Ni و همکاران [۲۷] تأثیرات ترکیب الیاف فولادی بلند و کوتاه و مواد سیمانی را بر ویژگی‌های مکانیکی بتن پودری واکنشی را بررسی و تأثیر مثبت آن‌ها را بر مقاومت فشاری تأیید کرده‌اند. همچنین دریافته‌اند استفاده از پودر کوارتز با اندازه ذرات کوچک‌تر به‌عنوان ماده سیمانی موجب افزایش چگالی بتن و بهبود مقاومت خمشی آن می‌گردد. اسدی و شروانی تبار [۲۸] تأثیر جایگزینی پودر دیاتومیت به‌جای پودر کوارتز را در بتن پودری واکنشی بدون استفاده از اتوکلاو بررسی نموده و دریافته‌اند پودر دیاتومیت به‌دلیل سهم بیش‌تر در واکنش‌های پوزولانی، جایگزین مناسبی برای پودر کوارتز است. Huynh و همکاران [۲۹] استفاده از خاکستر بادی در تولید بتن پودری واکنشی را برای کاهش تأثیرات منفی استفاده

زیاد از میکروسلیس و سیمان بررسی کرده و دریافته‌اند مقدار بهینه این جایگزینی ۴۰٪ است که منجر به مقاومت فشاری بیش‌تر (۶۰ مگاپاسکال)، جذب آب و تخلخل کم‌تر نسبت به بتن شاهد می‌شود.

۲-۲- مدل ریاضی تجربی

مرادی و همکاران [۳۰] پژوهشی پیرامون مدل‌سازی رفتاری بتن و مرور روش‌های مختلف تحلیل آن انجام داده‌اند. در این مطالعه، به بررسی مدل‌های رفتاری بتن، شامل مدل‌های مبتنی بر روابط تجربی، مدل‌های الاستیک-پلاستیک، مدل‌های مبتنی بر مکانیک شکست و مدل‌های خسارت پرداخته شده‌است. نتایج پژوهش نشان می‌دهد که مدل‌های تجربی، علیرغم سادگی و دقت در برخی شرایط، محدودیت‌هایی در تعمیم‌پذیری و استفاده در تحلیل‌های پیچیده دارند. Çolak [۳۱] یک معادله تجربی برای تخمین مقاومت فشاری بتن سیمان پرتلند، بر اساس تعیین دقیق نسبت بهینه آب به سیمان ارائه داده‌است [۳۱]. Mostofinejad و همکاران [۳۲] به بررسی تأثیر طرح‌های مخلوط و شرایط عمل‌آوری بر مقاومت فشاری بتن‌پودری واکنشی پرداخته و سه معادله تجربی برای مقاومت فشاری بر اساس سه متغیر نسبت آب به سیمان، نسبت پُرکننده کوارتز به ماسه کوارتز و مقدار سیمان مصرفی ارائه داده‌اند. دانشفر و حسنی [۳۳] پژوهشی آزمایشگاهی برای بررسی رابطه ابعاد آزمون‌های بتنی مسلح شده با الیاف و انرژی شکست انجام داده و در آخر بر اساس نتایج تجربی، یک مدل ریاضی برای رابطه بین ابعاد آزمون‌ها و انرژی شکست ارائه کرده‌اند.

۲-۳- استفاده از انواع توف در بتن

ادبیات فنی مربوط به استفاده از جایگزینی پودر توف‌سبز به جای پودر کوارتز به عنوان پرکننده در انواع بتن فوق توانمند دارای پیشینه ضعیفی است. رضایان‌پور و همکاران تأثیر چهار نوع از پوزولان‌های طبیعی کشور شامل تراس جاجرود، پومیس اسکندان، توف آبیک و پومیس خاش را بر روی خصوصیات بتن مورد مطالعه قرار داده و دریافته‌اند که این مصالح تأثیر چندانی بر مقاومت فشاری بتن به‌ویژه در سنین بالا ندارند [۳۴]. دردائی و همکاران تأثیر استفاده از توف‌سبز شاهین‌دژ را بر مشخصات مکانیکی بتن غلتکی مورد بررسی قرار داده و نتیجه گرفته‌اند که افزودن این ماده می‌تواند موجب بهبود مقاومت فشاری، مقاومت کششی و کاهش نفوذپذیری شود و مقدار بهینه جایگزینی آن ۳۰٪ مواد سیمانی است [۳۵]. قائد رحمتی به بررسی تأثیر جایگزینی بخشی از سیمان مصرفی بتن با پودر توف‌سبز آبیک قزوین، به عنوان یک پوزولان، پرداخته‌است. نتایج حاکی از کاهش نفوذپذیری آب به علت قطع رابطه میان حفرات موئینه و افزایش مقاومت فشاری با افزایش مقدار این جایگزینی است. با گذشت زمان، رشد در کاهش نفوذپذیری بتن مشاهده شده‌است که بیان‌گر ادامه‌دار بودن واکنش‌های پوزولانی در سنین بالا است [۳۶]. Cai و همکاران تأثیر مقادیر مختلف پودر توف را به عنوان جایگزین ماسه در بتن‌پودری واکنشی، به عنوان یک گزینه زیست‌محیطی، بررسی کرده و نشان داده‌اند که با افزایش این جایگزینی تا ۱۲٪، ویژگی‌های مکانیکی بتن‌پودری واکنشی همچنان مطابق با استانداردهای صنعتی باقی می‌ماند، اما مقادیر بیش‌تر، باعث کاهش قابل توجهی در مقاومت فشاری و خمشی می‌شود [۳۷]. نادری و همکاران اقدام به بررسی تأثیر مقاومت ۹ نوع سنگدانه از جمله سنگدانه‌های توف‌سبز سنگی و توف‌سبز بلورین بر خواص بتن‌های خودمتراکم کرده و دریافته‌اند رابطه مستقیمی بین مقاومت فشاری بتن‌های خودمتراکم با مقاومت فشاری سنگ‌های به‌کاررفته در داخل بتن وجود دارد. کم‌ترین و بیش‌ترین مقاومت فشاری به ترتیب مربوط به بتن‌های خودمتراکم حاوی سنگ دانه‌های توف‌سبز بلورین و گرانیت می‌باشد [۳۸].

۳. مطالعات آزمایشگاهی

هدف این مطالعه بررسی جایگزینی پودر توفسبزالبرز به جای پودر کوارتز در بتن پودری واکنشی در پنج نسبت مختلف شامل ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد است. به این منظور، شش طرح مخلوط بتن، شامل یک طرح شاهد، طراحی شده است. برای شبیه سازی شرایط عمل آوری به محیط کارگاهی و فصل معمول بتن ریزی، از اتوکلاو استفاده نشده و آزمون‌ها در آب با دمای ثابت ۲۵ درجه سانتی گراد عمل آوری گردیده است. در حین انجام تحقیق با افزایش تدریجی درصد جایگزینی از ۲۰ تا ۸۰٪ به تدریج روانی بتن افزایش یافته، به طوری که اولین آزمون حاوی ۸۰٪ جایگزینی به علت روانی زیاد از صفحه میز جریان خارج شده و اندازه گیری قطر پخش شدگی آن ممکن نگردیده است. لذا مخلوط T60-2 که همه اجزای آن به غیر از مقدار آب، مانند T60 می باشد، طراحی شده است؛ مقدار آب آن کاهش داده شد تا روانی آن اندکی کاهش یابد و در ادامه اندازه گیری قطر پخش شدگی برای T80 و T100 نیز ممکن شود. همه آزمون‌ها از لحاظ مقاومت فشاری با بتن شاهد (T0) مقایسه شده است، ولی از لحاظ روانی دو آزمون T100 و T80 با T60-2 و ما بقی با بتن شاهد مقایسه شده است.

۱-۳- مصالح مصرفی

مصالح مصرفی در ساخت بتن پودری واکنشی مورد استفاده در این تحقیق عبارت است از: سیمان، دوده سیلیسی، ماسه سیلیسی، پودر کوارتز، پودر توفسبزالبرز، فوق روان کننده و آب. سیمان استفاده شده در تمامی طرح‌های مخلوط، سیمان پرتلند نوع دو و محصول کارخانه سیمان صوفیان تبریز است. جدول ۱ مشخصات و ترکیبات سیمان مصرفی را نشان می دهد. دوده سیلیسی مصرف شده در این تحقیق از تولیدات کارخانه فروآلیاژ ایران واقع در شهر ازنا در استان لرستان می باشد که مشخصات آن مطابق جدول ۲ است. ماسه سیلیسی مصرفی در این پژوهش از معدن ماسه سیلیسی قوم تپه در نزدیکی شهر تبریز می باشد که در حالت اشباع با سطح خشک^۵ مورد استفاده قرار گرفته است. البته لازم به ذکر است که همه دانه‌های این معدن از الک ۶۰۰ میکرون عبور می کند؛ اما در رگه‌های مختلف این معدن مقدار عبوری از الک ۳۰۰ میکرون متفاوت می باشد. دانه بندی، مشخصات و ترکیبات آن در جدول ۳ قابل مشاهده است. پودر کوارتز یعنی کوارتز شکسته و آسیاب شده (با قطر ذرات بین ۵ تا ۲۵ میکرون)، یک جز اصلی در بتن پودری واکنشی می باشد. در این مقاله، پودر کوارتز از شرکت معدن گوهران اصفهان تهیه شده که قبل از مصرف از الک ۲۰۰ عبور داده شده است و مشخصات و ترکیبات آن مطابق جدول ۴ می باشد. پودر توفسبزالبرز به صورت صنعتی (در سنگ کوبی‌ها)، از فرآیند پودر کردن سنگ توف تولید می شود. توف از جمله سنگ‌های آذرین یا همان سنگ‌های آتشفشانی است اما به علت اینکه بر اثر تجمع ذرات تشکیل می شود، ساختاری لایه ای دارد. از ویژگی‌های پودر توفسبزالبرز دانه بندی نرم و یکدست، چسبندگی زیاد و ترکیب پذیری عالی با مصالح ساختمانی دیگر اشاره کرد. ابتدا توفسبزالبرز بصورت شن از معدنی در شهر آبیگ قزوین تهیه شد و سپس در یکی از کارگاه‌های اطراف شهر تبریز آسیاب گردید (شکل ۲). در جدول ۵ مشخصات شیمیایی پودر توفسبزالبرز مصرفی آورده شده است. تحقیقات نشان داده است که موثرترین نوع فوق روان کننده‌ها، انواع با پایه پلی کربوکسیلات اتر می باشند [۳۹]. در این پروژه از فوق روان کننده SPC-N1 از تولیدات شرکت سراپوش استفاده شده که برای ساخت بتن‌های با مقاومت فشاری زیاد و خود تراکم طراحی و تولید شده است. مشخصات آن مطابق جدول ۶ می باشد. همچنین در این تحقیق برای ساخت آزمون‌های بتنی از آب آشامیدنی استفاده شده است؛ با توجه به اکثر استانداردها از جمله مبحث نهم مقررات ملی، اگر برای ساخت و عمل آوری بتن، آب شرب تمیز استفاده شود، نیاز به انجام آزمایش کنترل کیفیت آن نیست [۴۰].

⁵ Saturated Surface Dry (SSD)

جدول ۱: مشخصات و ترکیبات سیمان نوع دو صوفیان

مشخصات			ترکیبات شیمیایی	
ویژگی	واحد	مقدار	ترکیب	مقدار (%)
بلین	(cm ² /gr)	۳۲۳۰	SiO ₂	۲۱/۷۰
انبساط طولی	(%)	۰/۱۸	CL	۰/۰۱
زمان گیرش اولیه	(min)	۱۱۵	Al ₂ O ₃	۵/۲۲
زمان گیرش ثانویه	(min)	۱۸۵	Fe ₂ O ₃	۳/۷۴
چگالی	(gr/cm ³)	۳/۱۶	Na ₂ O	۰/۲۲
مقاومت فشاری ۳ روزه	(kgf/cm ²)	۲۴۰	MgO	۲/۲۲
مقاومت فشاری ۷ روزه	(kgf/cm ²)	۳۴۵	CaO	۶۴/۴۴
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	(kgf/cm ²)	۴۶۵	K ₂ O	۰/۵۸
افت سرخ شدن ^۶	(%)	۱/۳۶	Others	۰/۵۱

جدول ۲: مشخصات و ترکیبات دوده سیلیسی مصرفی

مشخصات فیزیکی			ترکیبات شیمیایی			
ویژگی	واحد	مقدار	ترکیب	مقدار (%)	ترکیب	مقدار (%)
شکل	-	بی شکل (آمورف)	SiO ₂	۹۶/۴	CaO	۰/۴۹
شکل ذرات	-	کروی و غیر کریستاله	CL	۰/۰۴	K ₂ O	۱/۰۱
وزن مخصوص مطلق	(gr/cm ³)	۲/۵۰	H ₂ O	۰/۰۸	SiC	۰/۵
سطح مخصوص	(m ² /kg)	۲۵۰۰۰-۲۰۰۰۰	Al ₂ O ₃	۱/۳۲	P ₂ O ₅	۰/۱۶
اندازه	μm	۰/۱	Fe ₂ O ₃	۰/۸۷	SO ₃	۰/۱۰
			Na ₂ O	۰/۳۱	MgO	۰/۹۷
			C	۰/۳		

جدول ۳: مشخصات ماسه سیلیسی مصرفی

مشخصات			دانه بندی			ترکیبات شیمیایی [۴۱]			
ویژگی	واحد	مقدار	درصد عبوری	شماره الک	اندازه الک (mm)	ترکیب	مقدار (%)	ترکیب	مقدار (%)
جذب آب SSD	%	۱- ۰/۷	۱۰۰	۳۰	۰/۶	SiO ₂	۶۶/۰۰	CaO	۵/۶۲
وزن مخصوص	gr/cm ³	۲/۶۳				FeO	۲/۶۵	K ₂ O	۲/۸۰
اندازه ذرات	mm	> ۰/۶	۲۴/۷۷	۵۰	۰/۳۰	MnO	۰/۰۵	P ₂ O ₅	۰/۱۱
افت سرخ شدن	%	۳/۳۶				Al ₂ O ₃	۱۳/۸۶	S	۰/۰۱
رنگ	-	خاکستری	۰/۱۲	۱۰۰	۰/۱۵	Fe ₂ O ₃	۲/۶۵	MgO	۰/۸۶
رطوبت	%	۰/۲				Na ₂ O	۳/۵۰	TiO ₂	۰/۳۱

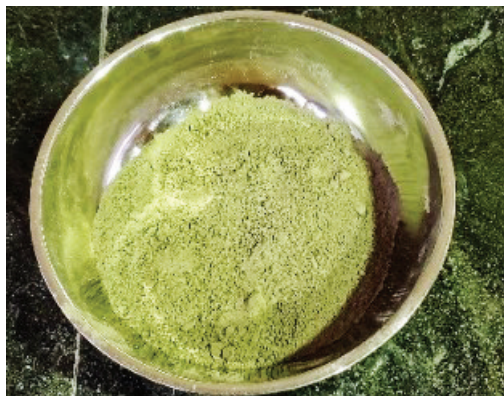
⁶ Loss on ignition (LOI)

جدول ۴: ترکیبات و مشخصات پودر کوارتز

مشخصات فیزیکی			ترکیبات شیمیایی			
ویژگی	واحد	مقدار	ترکیب	مقدار (%)	ترکیب	مقدار (%)
شکل ذرات	-	کریستاله	SiO ₂	۹۶/۶	CaO	۰/۷
رنگ	-	سفید	Al ₂ O ₃	۰/۲۳	K ₂ O	۰/۰۲
وزن مخصوص مطلق	gr/cm ³	۲/۶۸	Fe ₂ O ₃	۰/۰۳	SO ₃	۰/۰۴
افت سرخ شدن	%	۰/۲۸	Na ₂ O	<۰/۱	MgO	<۰/۱

جدول ۵: ترکیبات و مشخصات پودر توف سبزالبرز

مشخصات فیزیکی			ترکیبات شیمیایی			
ویژگی	واحد	مقدار	ترکیب	مقدار (%)	ترکیب	مقدار (%)
مقاومت سایش (تست لس آنجلس)	%	۳۴	SiO ₂	۶۳/۸۹	CaO	۴/۹۴
رنگ	-	سبز	Al ₂ O ₃	۱۳/۳۴	K ₂ O	۲/۸۶
وزن مخصوص	gr/cm ³	۲/۷۳	Fe ₂ O ₃	۲/۴۱	SO ₃	۰/۰۴
جذب آب	%	۲/۱۸	MgO	۱/۵۳		



شکل ۲: پودر توف سبزالبرز

جدول ۶: مشخصات فیزیکی و شیمیایی فوق‌روان‌کننده

زرد عسلی	رنگ
پلی کروکسیلات اتر	پایه
مایع	حالت فیزیکی
۱/۱۷ گرم بر سانتی‌متر مکعب در ۲۵ درجه سانتی‌گراد	وزن مخصوص
کم‌تر از ۰/۱ درصد	میزان کلراید
۸	PH

۲-۳- طرح‌های مخلوط

برای انتخاب طرح مخلوط بتن شاهد، باید ویژگی‌هایی مانند در دسترس بودن مصالح، مقاومت فشاری مناسب بتن ساخته شده و کاهش نسبی مصرف سیمان را در نظر گرفت. در ابتدا با استفاده از مطالعات پیشین و آزمون و خطا چندین طرح اولیه، یک طرح مخلوط برای بتن شاهد (T0)، مطابق سطر اول جدول ۷، بدست آمده است. برای بررسی تأثیر تغییرات جایگزینی پودر توفسبز از نسبت‌های مخلوط بتنی مطابق با سطرهای دوم تا آخر جدول ۷ استفاده شده است که مطابق آن، پودر توفسبز به ترتیب با مقادیر ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰ درصد، جایگزین پودر کوارتز شده است. لازم به ذکر است که از آنجایی که در مخلوط T60 روانی زیاد شده بود و T80 از آن هم روان تر، بتن تازه هنگام اندازه‌گیری روانی، از صفحه میز جریان خارج و اندازه‌گیری قطر پخششده‌گی دچار مشکل گردید؛ از این رو سه طرح آخر اصلاح و در آن‌ها نسبت آب به سیمان کاهش داده شده است. نسبت آب به سیمان جدید برای مخلوط T60 تکرار شده و مخلوط جدید با نسبت آب به سیمان جدید T60-2 نام‌گذاری شده است؛ در ادامه‌ی ساخت مخلوط‌های بتنی، دو مخلوط بتنی T80 و T100 هم با همین نسبت آب به سیمان جدید ساخته شده است. از این رو روانی T80 و T100 با T60-2 مقایسه شده است.

جدول ۷: نسبت‌های مخلوط بتنی برای ساخت آزمون‌های بتن پودری واکنشی

نام طرح مخلوط	سیمان (kg/m ³)	دوده سیلیس (kg/m ³)	ماسه (kg/m ³)	پودر کوارتز (kg/m ³)	پودر توفسبز (kg/m ³)	آب (kg/m ³)	فوق‌روان‌کننده (kg/m ³)	نسبت آب به مواد سیمانی
T0	۹۷۰	۱۷۰	۸۷۰	۱۶۰	۰	۲۴۵/۱	۲۳	۰/۲۱۵
T20	۹۷۰	۱۷۰	۸۷۰	۱۲۸	۳۲	۲۴۵/۱	۲۳	۰/۲۱۵
T40	۹۷۰	۱۷۰	۸۷۰	۹۶	۶۴	۲۴۵/۱	۲۳	۰/۲۱۵
T60	۹۷۰	۱۷۰	۸۷۰	۶۴	۹۶	۲۴۵/۱	۲۳	۰/۲۱۵
T60-2	۹۷۰	۱۷۰	۸۷۰	۶۴	۹۶	۲۲۸	۲۳	۰/۲
T80	۹۷۰	۱۷۰	۸۷۰	۳۲	۱۲۸	۲۲۸	۲۳	۰/۲
T100	۹۷۰	۱۷۰	۸۷۰	۰	۱۶۰	۲۲۸	۲۳	۰/۲

۳-۳- ساخت و عمل‌آوری آزمون‌های بتنی

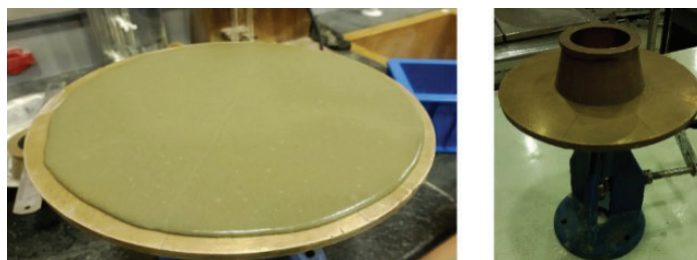
یکی از مهم‌ترین عوامل برای مطالعه بتن پودری واکنشی مرحله مخلوط کردن مواد تشکیل‌دهنده است. به دلیل اینکه این نوع بتن از مصالح بسیار ریز ساخته می‌شود، روش مخلوط کردن به صورت معمولی نمی‌تواند برای ساخت آن مناسب باشد. ترتیب مخلوط کردن مواد بر اساس مطالعات قبلی و سعی و خطا، به ترتیبی که در ادامه بیان می‌شود، در نظر گرفته شده است؛ ابتدا مصالح خشک (شامل ماسه کوارتزی، سیمان، پودر توفسبز، پودر کوارتز و دوده سیلیسی) به مدت ۸ دقیقه با یکدیگر مخلوط شده‌اند. سپس ۸۰٪ ترکیب آب و فوق‌روان‌کننده اضافه شده و به مدت ۷ دقیقه مخلوط گردیده و بعد از آن ۲۰٪ باقی مانده‌ی ترکیب آب و فوق‌روان‌کننده اضافه شده و به مدت ۷ دقیقه دیگر مخلوط شده‌اند. بعد از ساخت هر طرح مخلوط و قبل از ریختن بتن تازه در قالبها، آزمایش میز جریان انجام گردیده است. ریختن بتن در قالب در دو مرحله انجام شده و همچنین از وایبر کردن برای خروج هوای حبس شده در بتن استفاده گردیده است. بعد از قالب‌گیری، آزمون‌ها به مدت ۲۴ ساعت در قالب نگهداری و پس از آن از قالب بیرون آورده شده‌اند. بعد از خروج آزمون‌ها از قالب، ابتدا توزین صورت گرفته و سپس تا زمان انجام آزمایش در داخل حوضچه آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در حالت غرقاب، عمل‌آوری شده‌اند. برای انجام آزمایش‌های تعیین مقاومت فشاری و جذب آب ASTM C642-13 آزمون‌های مکعبی استاندارد با ابعاد ۱۰×۱۰×۱۰ سانتی‌متری و برای انجام آزمایش کشش برزیلی (دو نیم شدن)

آزمونه‌های استوانه‌ای استاندارد 10×20 سانتی‌متری ساخته شده‌است. در هر کدام از سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز از هر طرح مخلوط، سه آزمونه مورد آزمایش مقاومت فشاری و سه آزمونه مورد آزمایش مقاومت کششی قرار گرفته‌است. قبل از انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی نیز، آزمونه‌ها با حوله خشک و در حالت SSD وزن شده‌اند که از روی وزن‌های بدست آمده جذب آب حین عمل‌آوری محاسبه گردیده‌است.

۳-۴- معرفی آزمایش‌ها

۳-۴-۱- آزمایش میز جریان

مخلوط‌های بتن پودری واکنشی تازه به دلیل ریزی دانه‌ها و حجم زیاد آن‌ها نسبت به آب مصرفی (با نسبت کم آب به مواد سیمانی) اغلب یکدست، منسجم، چسبناک و روان هستند. در نتیجه برای اندازه‌گیری روانی این نوع بتن، آزمون اسلامپ و آزمون وی بی قابل استفاده نیست؛ از این رو روانی و کارایی بتن پودری واکنشی با استفاده از میز جریان مطابق با ASTM C230 ارزیابی شده‌است (شکل ۳). استفاده از میز جریان فقط مربوط به تعیین کارایی یا روانی ملات‌ها نیست، بلکه از آن می‌توان در بهدست آوردن میزان روانی بتن پودری واکنشی، به علت تشکیل از مواد ریزدانه، نیز استفاده کرد [۴۲]. برای هر ترکیب بتن پودری واکنشی این آزمایش انجام شده و میزان قطر پخش‌شدگی قبل از ریختن در قالب اندازه‌گیری شده‌است



شکل ۳: سمت راست: دستگاه میز جریان - سمت چپ: حین پخش‌شدگی بتن در میز جریان

۳-۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری

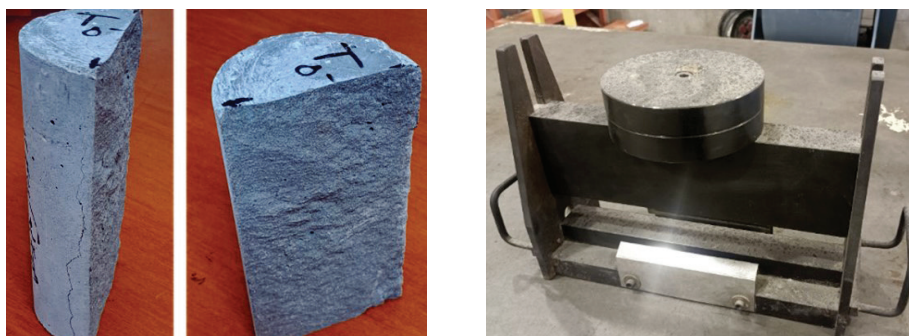
برای بهدست آوردن مقاومت فشاری که از مهم‌ترین مشخصه‌های بتن سخت شده می‌باشد، مطابق ASTM C39/39M از دستگاه جک هیدرولیکی و آزمونه‌های مکعبی $10 \times 10 \times 10$ سانتی‌متر در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه استفاده شده‌است. در هر سن، سه عدد از آزمونه‌ها در دستگاه جک هیدرولیکی شکسته (شکل ۴) و میانگین مقاومت فشاری بدست آمده، ثبت گردیده‌است.



شکل ۴: آزمونه ساخته شده از طرح مخلوط T80، حین و پس از آزمایش مقاومت فشاری

۳-۴-۳- آزمایش مقاومت کششی

برای به دست آوردن مقاومت کششی طرح‌های مخلوط از آزمایش دونیم شدن (تست برزیلی) مطابق ASTM D3967 استفاده شده است؛ به این منظور برای هر یک از سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روز، سه عدد از نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۰×۲۰ سانتی‌متر در محفظه مخصوص آزمایش (شکل ۵) مورد آزمایش قرار گرفته و میانگین مقاومت کششی بدست آمده، ثبت گردیده است.



شکل ۵: سمت راست: محفظه آزمایش دونیم شدن - سمت چپ: نمونه ساخته شده از طرح مخلوط T0، بعد از آزمایش مقاومت کششی

۳-۴-۴- آزمایش جذب آب استاندارد

این آزمایش مربوط به جذب آب براساس ASTM C642-13 نمونه‌های بتنی سخت شده است. جذب آب زیاد باعث ایجاد مشکلاتی در بتن می‌شود و به همین علت این آزمایش اهمیت زیادی دارد. نمونه‌های بتنی ابتدا در آون با دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد خشک شده، سپس به مدت ۳ روز در حالت غوطه‌وری در آب ۲۵ درجه سانتیگراد نگهداری شده‌اند. سپس با حوله خشک و در حالت SSD توزین شده‌اند و جذب آب آن‌ها محاسبه گردیده است. این نتایج در واقع تخلخل بتن را نشان می‌دهد؛ با افزایش دما، آب حبس شده در خلل و فرج بتن تبخیر می‌شود، سپس در زمان غوطه‌وری، آب جذب این حفرات می‌شود.

۳-۴-۵- آزمایش تعیین جذب آب در طول مدت زمان عمل‌آوری

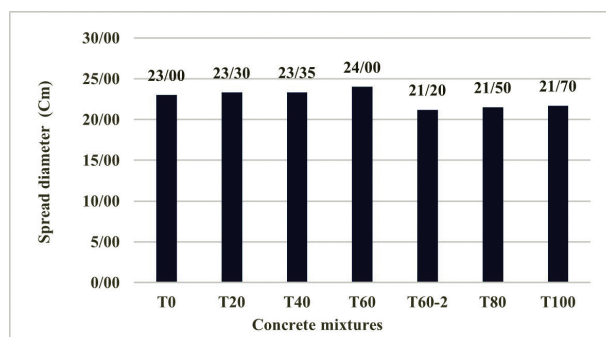
جذب آب حین عمل‌آوری نشان‌دهنده روند هیدراتاسیون پس از باز کردن نمونه از قالب تا روز انجام آزمایش می‌باشد [۴۳]. برای محاسبه جذب آب در طول مدت عمل‌آوری، بعد از خارج نمودن نمونه‌ها از قالب، وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. سپس بعد از عمل‌آوری و هنگام خارج کردن از آب نیز در سنین ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه توزین انجام گرفته است؛ به این ترتیب که با استفاده از یک پارچه نخی، آب روی نمونه‌ها را خشک کرده و در همین حالت SSD، وزن نمونه‌ها اندازه‌گیری شده است. در نهایت با استفاده از رابطه (۱)، میزان جذب آب در طول مدت زمان عمل‌آوری محاسبه گردیده است [۴۳].

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

۴. تجزیه و تحلیل نتایج

۴-۱- آزمایش میز جریان

مطابق نتایج آزمایش میز جریان در شکل ۶، با افزایش میزان جایگزینی پودرتوفسبزه به جای پودرکوارتز، روانی و کارایی افزایش یافته است. با توجه به تفاوت نسبت آب سیمان در سه طرح مخلوط T60-2، T80 و T100 با بقیه طرح‌های مخلوط، میزان قطر پخششدهگی T20، T40، T60 با T0 مقایسه شده و این عدد در T80، T100 با T60-2 مقایسه شده است.



شکل ۶: نتایج آزمایش میز جریان

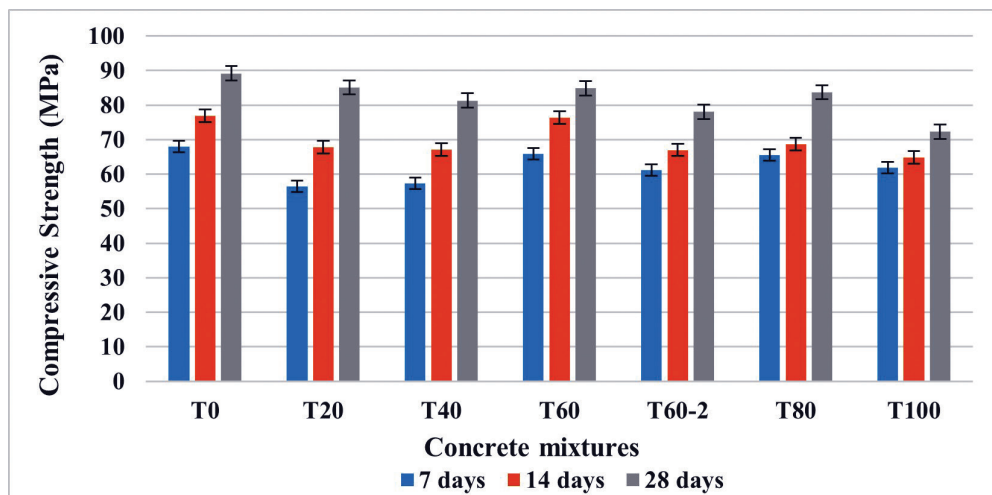
نتایج آزمایش میز جریان نشان داده است که میزان قطر پخششدهگی تا ترکیب T60 افزایش داشته یعنی روان تر شده است. سپس با انتخاب نسبت آب به مواد سیمانی کم تر در ترکیب T60-2 میزان قطر پخششدهگی نسبت به T60 کاهش یافته و بعد از آن مجدداً در ترکیب T80 و T100 افزایش یافته است. لذا در حالت کلی می توان نتیجه گرفت با افزایش درصد جایگزینی پودرتوفسبزه به جای پودرکوارتز در همه آزمون‌ها روانی افزایش یافته است. جذب آب ذرات توفسبزه در ابتدا به صورت آب سطحی در سطح این ذرات جذب می شود، با توجه به افزایش روانی با افزایش مقدار جایگزینی توفسبزه، احتمالاً این آب سطحی نسبت به آب سطحی دانه های پودر کوارتز یکنواخت تر و ماندگارتر است. باید توجه شود که کاهش روانی مابین T60 و T60-2 مربوط به تغییر مقدار آب است و مربوط به جایگزینی توفسبزه نیست، چون در هر دوی این‌ها جایگزینی ۶۰٪ است.

۴-۲- آزمایش مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری در جدول ۸ و شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۸: نتایج آزمایش مقاومت فشاری

نام ترکیب	مقاومت فشاری (MPa)			درصد کاهش نسبت به بتن شاهد ۲۸ روزه
	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	
T0	۶۷/۹۲	۷۶/۹۳	۸۹/۲۰	-
T20	۵۶/۳۰	۶۷/۷۹	۸۵/۱۰	٪ ۴/۶
T40	۵۷/۳۹	۶۷/۱۱	۸۱/۳۰	٪ ۸/۸۶
T60	۶۵/۸۲	۷۶/۳۰	۸۴/۹۰	٪ ۴/۸۲
T60-2	۶۱/۲۳	۶۷/۰۱	۷۸/۱۰	٪ ۱۲/۴۴
T80	۶۵/۶۱	۶۸/۷۰	۸۳/۷۰	٪ ۶/۱۶
T100	۶۱/۸۸	۶۴/۸۸	۷۲/۲۷	٪ ۱۸/۹۸



شکل ۷: نمودار ستونی برای نتایج مقاومت فشاری هر طرح مخلوط

با وجود تغییر نسبت آب به سیمان در سه طرح مخلوط آخر، از لحاظ مقاومت فشاری همه آزمون‌ها با T0 مقایسه شده است، چرا که تغییر در مقدار آب برای اینکه روانی در حد معمول باشد مرسوم است. با توجه به نتایج بدست آمده، کاهش مقاومت فشاری کمی مشاهده شده است؛ این کاهش با توجه به جدول ۸، از ۴/۶ تا ۱۸/۹۸٪ با افزایش مقدار جایگزینی پودر توف از ۲۰ تا ۱۰۰٪ متغیر است. لازم به ذکر است که با وجود کاهش مقاومت فشاری، همچنان نتایج بسیار بیش تر از مقاومت فشاری لازم برای کارهای اجرایی (حداقل ۳۰ مگاپاسکال) و نیز جزو بتن های پرمقاومت (با مقاومت فشاری بیش تر از ۵۰ مگاپاسکال) می باشد؛ بنابراین با اطمینان می توان گفت که پودر توف سبزلبرز با مقدار جایگزینی ۱۰۰٪ یک جایگزین مناسب برای پودر کوارتز می باشد. علت کاهش مقاومت فشاری به احتمال زیاد مربوط به سختی دانه های توف سبز و پودر کوارتز می باشد یعنی چون سختی دانه های کوارتز از دانه های توف سبز بیش تر است [۱۷]، در نتیجه با افزایش مقدار دانه های توف سبز، مقاومت فشاری اندکی کاهش یافته است.

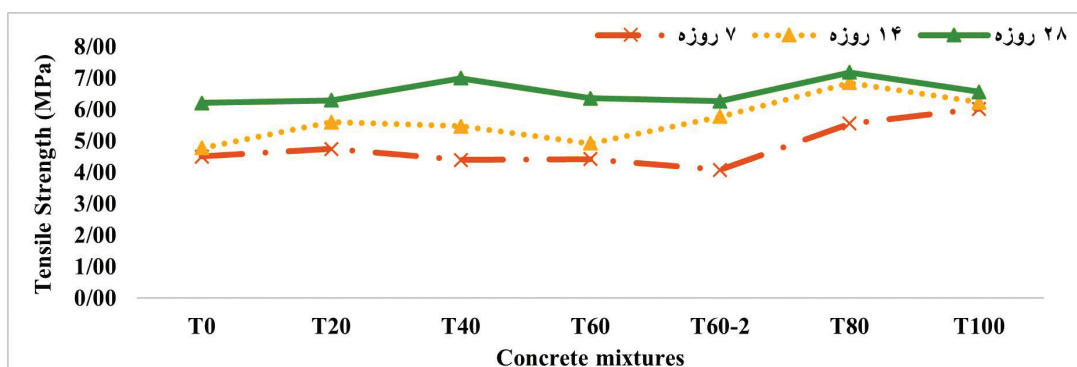
در مقایسه مقاومت فشاری T40 و T80 در سن هفت روزه تفاوت قابل ملاحظه است. و احتمالاً به این علت است که در T80 آب بیشتری توسط دانه های توف سبز جذب شده است و در نتیجه نسبت پایین آب به سیمان واقعی آمده و مقاومت فشاری افزایش یافته است. اما در ادامه روند عمل آوری این آب جذب شده اضافی (در T80) مورد استفاده واکنش های هیدراتاسیون و پوزولانی قرار گرفته و در مقاومت های فشاری ۱۴ روزه و ۲۸ روزه ملاحظه می گردد که تفاوت چندانی مابین T40 و T80 وجود ندارد

۳-۴- آزمایش مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی در جدول ۹ و شکل ۸ قابل ملاحظه است. مطابق نتایج بدست آمده، افزایش میزان استفاده از پودر توف سبز نه فقط موجب کاهش در مقاومت کششی نمی شود، حتی در جایگزینی ۱۰۰ درصد نیز باعث افزایش جزئی مقاومت کششی در بتن پودری واکنشی شده و مقاومت های کششی همه آزمون های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه نسبت به بتن شاهد افزایش یافته اند؛ بیش ترین مقاومت کششی مربوط به آزمون های T80 است که در سن ۲۸ روزه نسبت به بتن شاهد ۱۵/۸٪ افزایش یافته است. علت این امر می تواند مربوط به واکنش های پوزولانی بخشی از پودر توف سبزلبرز با خمیر چسباننده موجود در بتن پودری واکنشی (شامل سیمان، دوده سیلیسی و آب) باشد.

جدول ۹: نتایج آزمایش مقاومت کششی

نام ترکیب	مقاومت کششی (MPa)			درصد افزایش نسبت به بتن شاهد ۲۸ روزه
	۷ روزه	۱۴ روزه	۲۸ روزه	
T0	۴/۵۰	۴/۷۷	۶/۲۰	-
T20	۴/۷۴	۵/۵۹	۶/۲۹	% ۱/۴۵
T40	۴/۳۹	۵/۴۶	۶/۹۹	% ۱۲/۷۴
T60	۴/۴۲	۴/۹۲	۶/۳۵	% ۲/۴۲
T60-2	۴/۰۸	۵/۷۷	۶/۲۶	% -۰/۹۷
T80	۵/۵۵	۶/۸۴	۷/۱۸	% ۱۵/۸۰
T100	۶/۰۲	۶/۲۲	۶/۵۶	% ۵/۸۱



شکل ۸: نتایج آزمایش مقاومت کششی

در نتایج بدست آمده، روند تغییرات مقاومت فشاری و کششی با افزودن درصدهای جایگزینی (پودر توفسبزالبرز به جای پودر کوارتز) در یک راستا نمی باشند. به طوری که با افزایش درصد جایگزینی، مقاومت فشاری کمی کاهش و برعکس مقاومت کششی افزایش داشته است. علت این امر را می توان این گونه توضیح داد که سختی دانه های کوارتز از دانه های توفسبز بیشتر است و در نتیجه با افزایش مقدار دانه های توفسبز، مقاومت فشاری اندکی کاهش یافته است. از طرف دیگر توفسبز یک پوزولان ضعیف می باشد (بر خلاف دانه های پودر کوارتز که اغلب کریستالی و در نقش پرکننده می باشند)، که بخشی از دانه های آن در واکنش های پوزولانی نیز شرکت کرده و واکنش های پوزولانی آن باعث افزایش مجموعه خمیر چسباننده می شوند. از آنجایی که مقاومت کششی بتن به خمیر چسباننده آن مرتبط است، در نتیجه افزایش مقاومت کششی ملاحظه می گردد؛ چون مقاومت کششی بتن کلا کم است، این افزایش مجموع خمیر چسباننده، اثر خود را در آنجا کاملا نشان داده است.

از طرف دیگر مقاومت فشاری هر چند که با افزایش قدرت خمیر چسباننده اندکی افزایش می یابد اما تحت تأثیر مقاومت دانه های پرکننده نیز می باشد؛ و به علت اینکه سختی دانه های کوارتز از توفسبز بیشتر است این جایگزینی موجب کاهش مقاومت فشاری می شود. چون مقاومت فشاری بتن هم خیلی زیاد است، لذا افزایش مجموعه خمیر چسباننده نیز نتوانسته است مقدار آن را به قدری افزایش دهد که تأثیر کاهش سختی دانه های پرکننده بر آن را جبران کند؛ و در مجموع اندکی کاهش در مقاومت فشاری مشاهده رخ داده است.

جدول ۱۰: مقدار جذب آب در طول مدت زمان عمل آوری

نام ترکیب	میانگین درصد جذب آب ۰ تا ۷ روزه	میانگین درصد جذب آب ۰ تا ۱۴ روزه	میانگین درصد جذب آب ۰ تا ۲۸ روزه
T0	۰/۶۷	۱/۲۵	۲/۱۰
T20	۰/۶۶	۰/۷۲	۰/۷۹
T40	۰/۷۵	۰/۹۱	۱/۱۱
T60	۰/۵۶	۰/۶۰	۰/۶۶
T60-2	۰/۷۳	۰/۷۹	۰/۸۰
T80	۰/۵۴	۰/۷۰	۱/۳۰
T100	۰/۵۴	۰/۵۵	۰/۹۴

علت اینکه جذب آب ۱۴ روزه و ۲۸ روزه اختلاف کمی با جذب آب ۷ روزه دارند این است که بتن پودری واکنشی یک بتن پرمقاومت، پر سیمان و دارای حجم زیادی مواد چسباننده می باشد که در هفته اول، مقاومت فشاری خیلی زیادی کسب کرده و به بلوغ نزدیک می شود. از طرف دیگر، با توجه به اینکه مطابق نمودار شکل ۶ با افزایش درصد جایگزینی، ترکیبها روان تر شده اند، می توان نتیجه گرفت که لایه نازکی از آب که اطراف همه دانه ها را می گیرد، در دانه های پودر توف سبز نسبت به دانه های پودر کوارتز یکنواخت تر و ماندگارتر است. لذا احتمالاً این روان تر شدن مخلوط موجب جابه جایی بهتر دانه ها و کاهش حجم لوله های موئینه می شود و نیز در مدت زمان عمل آوری، این آب سطحی نیز به تدریج در واکنش های هیدراتاسیون مصرف شده و از این رو ترکیب های دارای پودر توف سبز البرز در هفته های بعدی خیلی کم تر آب جذب کرده اند.

مطابق نتایج، مقاومت فشاری با افزایش سن از ۷ تا ۲۸ روز در همه جایگزینی ها مرتباً افزایش یافته است؛ لذا واکنش های هیدراتاسیون سیمان و واکنش های پوزولانی افزایش یافته اند؛ ولی از لحاظ جذب آب حین عمل آوری مشاهده شده که به غیر از بتن شاهد، در بقیه بتن ها با افزایش سن بتن از ۷ تا ۲۸ روز، جذب آب حین عمل آوری افزایش چندانی نیافته است؛ بنابراین از آب سطحی ذرات پودر توف سبز استفاده شده است، چون مقاومت فشاری افزایش یافته است.

۴-۶- ارائه یک مدل ریاضی بر اساس نتایج تجربی برای مقدار f'_c با افزایش درصد جایگزینی

با استفاده از مقادیر بدست آمده از آزمایش مقاومت فشاری برای آزمون های ۲۸ روزه، یک معادله درجه دوم مطابق رابطه (۲) برای تعیین f'_c به عنوان مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن پودری واکنشی با مقادیر مختلف جایگزینی مورد بحث، ارائه گردیده است. این رابطه با روش برازش منحنی درجه دوم با استفاده از کم ترین خطای مربعات بدست آورده شده است. در این رابطه f'_{c0} مقاومت فشاری بتن شاهد (با جایگزینی صفر درصد) است که با توجه به جدول ۸ برابر $89/2$ مگاپاسکال می باشد. فرمول مذکور به نحوی تنظیم شده است که منحنی حاصل از آن از نقطه f'_{c0} (یعنی مقاومت فشاری بتن شاهد) عبور کند و نیز مجموع مربعات خطاهای بقیه نقاط به حداقل رسیده باشد. چنانکه ملاحظه می شود اگر X معادل صفر در نظر گرفته شود f'_c برابر با f'_{c0} می شود.

$$f'_c = f'_{c0} - 14 + 14(x - 1)^2 = 75.2 + 14(x - 1)^2 \quad (\text{رابطه } 2)$$

در این رابطه f'_c برابر مقاومت ۲۸ روزه بتن پودری واکنشی و X برابر مقدار جایگزینی پودر توف سبز البرز به جای پودر کوارتز است. به عنوان مثال برای جایگزینی ۴۰ درصد، مقاومت فشاری تئوری به ترتیب ذیل برابر $80/24$ مگاپاسکال بدست می آید:

$$f'_c = 75.2 + 14(0.4 - 1)^2 = 80.24$$

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق تأثیر استفاده از پودر توف‌سبزالبرز در بتن‌پودری واکنشی به عنوان جایگزینی برای پودر کوارتز بررسی شده است. به این منظور بتن‌پودری واکنشی بدون جایگزینی توف‌سبز (T0) به عنوان بتن شاهد در نظر گرفته شد و در بقیه طرح‌های مخلوط از جایگزینی پودر توف‌سبز با مقادیر ۲۰، ۴۰، ۶۰، ۸۰ و ۱۰۰٪ استفاده شده است. برای عمل‌آوری نمونه‌ها در داخل آب با دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد عمل‌آوری شده‌اند، تا نتایج بدست آمده برای بتن‌ریزی درجا نیز قابل استفاده باشد. آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق عبارتند از: اندازه‌گیری مقاومت‌های فشاری و کششی بر روی نمونه‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روزه، جذب آب حین عمل‌آوری، جذب آب ASTM C642-13 و آزمایش میز جریان. اهم نتایج به شرح ذیل می‌باشد:

۱) مقاومت فشاری با افزایش جایگزینی کاهش یافته به‌طوری‌که در ۱۰۰٪ جایگزینی ۱۸/۹۸٪ نسبت به بتن شاهد کاهش یافته است. اما با این حال مقدار مقاومت فشاری در همه موارد همچنان بیش‌تر از مقاومت فشاری لازم برای کارهای اجرایی (حداقل ۳۰ مگاپاسکال) و نیز جزو بتن‌های پرمقاومت (با مقاومت فشاری بیش‌تر از ۵۰ مگاپاسکال) می‌باشد.

۲) بیش‌ترین مقاومت فشاری بعد از بتن شاهد مربوط به نمونه‌های ۲۸ روزه با ۲۰ درصد جایگزینی (۸۵/۱ مگاپاسکال) و بعد از آن مربوط به نمونه‌های ۲۸ روزه با ۶۰ درصد جایگزینی (۸۴/۹ مگاپاسکال) می‌باشد.

۳) مقاومت کششی با افزایش جایگزینی، تا ۱۵/۸٪ افزایش یافته است و برخلاف معمول، روند تغییرات مقاومت فشاری و کششی با افزایش جایگزینی، هم‌سو نیستند؛ زیرا توف‌سبز، برخلاف دانه‌های کریستالی و پرکننده پودر کوارتز، یک پوزولان ضعیف است که بخشی از دانه‌های آن در واکنش‌های پوزولانی نیز شرکت کرده و موجب افزایش مجموعه خمیر چسباننده و مقاومت کششی شده است. ولی مقاومت فشاری بیش‌تر از خمیر چسباننده، تحت تأثیر مقاومت دانه‌های پرکننده است؛ و به علت سختی کم‌تر دانه‌های توف‌سبز نسبت به کوارتز، این جایگزینی موجب کاهش مقاومت فشاری شده است.

۴) قطر پخش‌شدگی تا جایگزینی ۶۰٪، ۴/۳۵٪ افزایش داشته است، سپس با انتخاب نسبت آب به مواد سیمانی کم‌تر در نمونه T60-2 (برای اینکه روانی در حد متعارفی باشد)، این قطر ۷/۸۳٪ کاهش یافته است. در ادامه با افزایش درصد جایگزینی در نسبت آب به مواد سیمانی جدید (T80 و T100)، قطر پخش‌شدگی مجدداً افزایش یافته است. بنابراین همواره با افزایش جایگزینی، قطر پخش‌شدگی و روانی افزایش یافته است. علت این امر، آب سطحی بیش‌تر ذرات توف‌سبزالبرز نسبت به ذرات پودر کوارتز است که باعث شده مخلوط به مرور روان‌تر شود.

۵) جذب آب حین عمل‌آوری در همه نمونه‌ها نسبت به بتن شاهد کاهش یافته است که بیش‌ترین میزان این کاهش با مقدار ۶۸/۵۷٪ در نمونه‌های با ۶۰ درصد جایگزینی مشاهده شده است. این مقدار در نمونه T60-2، ۶۱/۹٪، در نمونه T80، ۳۸/۱٪ و در نمونه T100، ۵۵/۲۴٪ بوده است.

۶) مقاومت فشاری در نمونه‌های دارای جایگزینی، مانند بتن شاهد، با افزایش سن، افزایش یافته یعنی واکنش‌های هیدراتاسیون سیمان و واکنش‌های پوزولانی افزایش یافته‌اند؛ ولی جذب آب حین عمل‌آوری در این نمونه‌ها، برخلاف بتن شاهد، با افزایش سن، افزایش چندانی نداشته است. بنابراین برای افزایش مقاومت فشاری، از آب سطحی ذرات پودر توف‌سبز استفاده شده است.

۷) میزان جذب آب و در نتیجه تخلخل، با افزایش جایگزینی، کاهش یافته که بیش‌ترین این کاهش در نمونه T80 با مقدار ۲۹/۲۶٪ بوده است. پودر توف‌سبزالبرز یک پوزولان ضعیف است، لذا با این جایگزینی، واکنش‌های پوزولانی مابین مواد چسباننده افزایش و تخلخل کاهش یافته است. همچنین بیش‌تر بودن آب سطحی ذرات توف‌سبز، نسبت به ذرات پودر کوارتز، باعث روان‌تر شدن مخلوط و در نتیجه جاگیری بهتر انواع دانه‌ها در مخلوط و کاهش حجم فضاهای خالی مربوط به لوله‌های موئینه و حباب‌های اتفاقی و در نهایت کاهش تخلخل شده است.

۶. تشکر و قدردانی

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

مراجع

- Awoyera, P. O., Isleem, H. F., & Nagaraju, V. (2025). Fire performance in eco-friendly concrete: An overview. *Construction Materials and Their Properties for Fire Resistance and Insulation*, 277-299.
- Gulzar, M. A., Ali, B., Barakat, O., Azab, M., Najemalden, A. M., Salih Mohammed, A., & Alashker, Y. (2023). Influence of jute fiber on tensile, electrical, and permeability characteristics of slag concrete: a better, cheaper, and eco-friendly substitute for conventional concrete. *Journal of Natural Fibers*, 20(1), 2170947.
- Emami Korandeh, M., Farrokhzadeh, S., & Ganjidoust, H. (2024). Sensitivity analysis in modeling compressive strength of green concrete with incineration ash using deep learning methods. *Civil Engineering and Modern Technologies*, 3(3). (Persian)
- Li, F., Lv, T., & Wei, S. (2023). Performance, mechanical properties and durability of a new type of UHPC—basalt fiber reinforced reactive powder concrete: a review. *Polymers*, 15(14), 3129.
- Aylas-Paredes, B. K., Han, T., Neithalath, A., Huang, J., Goel, A., Kumar, A., & Neithalath, N. (2025). Data driven design of ultra-high-performance concrete prospects and application. *Scientific Reports*, 15(1), 9248.
- Dong, S., Gu, J., Ouyang, X., Jang, S. H., & Han, B. (2025). Enhancing mechanical properties, durability and multifunctionality of concrete structures via using ultra-high performance concrete layer: A review. *Composites Part B: Engineering*, 112329.
- Hou, X., Wang, N., He, T., & Chen, C. (2024). Compressive stress-strain relationship of steam free reactive powder concrete at ultra-low temperatures. *Cement and Concrete Composites*, 152, 105655.
- Wang, B., & Chaimoon, K. (2023). Numerical Study on Structural Behavior of RPC Deep Beams (Doctoral dissertation, Mahasarakham University).
- Collepari, S., et al., Mechanical properties of modified reactive powder concrete. *ACI Special Publications*, 1997. 173: p. 1-22.
- Ahmed, S., Abed, F., & Mannan, M. A. (2022, May). Compressive strength development of dune sand reactive powder concrete (RPC) under different curing conditions. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 1026, No. 1, p. 012017). IOP Publishing.
- Yazıcı, H., Deniz, E., & Baradan, B. (2013). The effect of autoclave pressure, temperature and duration time on mechanical properties of reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 42, 53-63.
- Amiri Shiri, A. A., & Darbhanzi, A. (2025). Experimental study on the elevated temperature performance of composite reactive powder concrete with polypropylene fiber—a case study. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 10(1), 67.

- Samani, E. G., & Heidari, A. (2023). Investigation of the effect of different grading on the mechanical properties of reactive powder concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02168.
- Jianbing, Y., Zhiqiang, X., Yufeng, X., & Zhengxing, G. (2023). Seismic behavior of reactive powder concrete (RPC) interior beam-to-column joints under reversed cyclic loading. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01792.
- Roy, R., Mottaghi, M., Woods, M., & Pearce, J. M. (2025). Life Cycle Carbon Emissions Savings of Replacing Concrete with Recycled Polycarbonate and Sand Composite. *Sustainability*, 17(3), 839.
- Marini, L., Mannan, M. A., Kueh, A. B. H., Abdullah, A. A., Abed, F., & Gunasekaran, K. (2024). An analysis of the environmental effects of three types of concrete: Ready-mixed, reactive powder, and geopolymer. *Alexandria Engineering Journal*, 63(1), 102926.
- Veisheh, S., Mir Mohamadi, M. and Feyz Niya, S. (1991). Properties and applications of Alborz green tuff. Tehran: Building and housing research center, p 64. (In persian).
- Yalçinkaya, Ç., & Yazıcı, H. (2022). Early-age shrinkage properties of eco-friendly reactive powder concrete with reduced cement content. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26(2), 456-472.
- Luo, W., Wang, H., Li, X., Wang, X., Wu, Z., Zhang, Y., Lian, X., & Li, X. (2022). Mechanical properties of reactive powder concrete with coal gangue as sand replacement. *Materials*, 15(5), 1807.
- Chakherlou, J. and Shervani Tabar, B. (2020). Investigation of the effect of silica sand replacement with sand and quartz powder on compressive strength of reactive powder concrete. *Modares Civil Engineering journal*, Vol. 20(1), pp 7-17. (In Persian).
- Alkhalay, Y. R., Abdullah, H., & Hasan, M. (2022). Characteristics of reactive powder concrete comprising synthesized rice husk ash and quartzite powder. *Journal of Cleaner Production*, 375, 134154.
- Abellán-García, J., Daza, N., Molinares, M., Abbas, Y. M., & Khan, M. I. (2023). Multi-criteria optimization of cost-effective and environmentally friendly reactive powder concrete incorporating waste glass and micro calcium carbonate. *Materials*, 16(19), 6434.
- Rahmani, H., & Mohammad Zade, N. (2023). CO₂ Curing of Reactive Powder Concretes Modified by Waste Limestone Powder. *Jordan Journal of Civil Engineering*, 17(3).
- Ge, W., Wang, A., Zhang, Z., Ge, Y., Chen, Y., Li, W., Jiang, H., Shuai, H., Sun, C., Yao, S., & Qiu, L. (2023). Study on the workability, mechanical property, and water absorption of reactive powder concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01777.
- Abrahimi, A., & Bhikshma, V. (2024). Experimental investigation on reactive powder concrete designed with micro silica and Alccofine1203. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1409(1), 012042.
- Ju, Y., Zhang, H., Wang, D., Kong, X., Ma, Y., Zhang, X., & Bai, J. (2024). Effect of mineral admixtures on the resistance to sulfate attack of reactive powder concrete. *Journal of Cleaner Production*, 440, 140769.
- Ni, W., Cui, X., Yuan, J., Sun, W., Cui, C., Wu, Y., & Feng, J. (2024). The influence of fiber, aggregate, and cementitious materials on the mechanical properties of ultra-high content steel fiber reinforced reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 431, 136530.
- Asadi, A., & Sharvani tabar, B. (2024). Investigating the effect of replacing diatomite powder instead of quartz powder in reactive powder concrete. In 14th National Congress on Civil Engi-

neering, Zanjan. (In persian).

Huynh, T. P., Ngo, S. H., & Nguyen, V. D. (2024). *A Modified Reactive Powder Concrete Made with Fly Ash and River Sand: An Assessment on Engineering Properties and Microstructure*. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 68(4), 1031-1039.

Moradi, M., Bagherieh, A., & Esfahani, M. R. (2017). *A review of behavioral modeling methods for concrete*. In *7th International Conference on Sustainable Development and Urban Construction*, Isfahan. (In persian).

Çolak, A. (2006). *A new model for the estimation of compressive strength of Portland cement concrete*. *Cement and Concrete Research*, 36(12), 1409–1413.

Moštofinejad, D., Roštami Nikoo, M., & Hosseini, S. A. (2016). *Determination of optimized mix design and curing conditions of reactive powder concrete (RPC)*. *Construction and Building Materials*, 123, 754–767.

Hasani, A., & Daneshfar, M. (2020). *An experimental model for the effect of changes in the dimensions of fiber-reinforced concrete samples on fracture energy*. *Journal of Structural Engineering and Construction*, 7(1), 72-87. (In Persian).

Ramezaniapour, A., Mirvalad, S.S., Aramoun, E., and Peydayesh, M. (2015). *Effect of Four Iranian Natural Pozzolans on Concrete Durability Against Sulfate Attack*. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, Vol. 46(2), pp 11–17. (In Persian).

Dardaei, S., Aghayari, R. and Nik Nia, B. (2016). *Study on the effect of Shahin-Dezh green Tuff on the mechanical characteristics of roller compact concrete*. *Journal of Structural and Construction Engineering*. Vol. 3 (3). Pp 97-111. (In Persian).

Ghaed Rhmati, A. (2019). *Investigating the effect of Abic green tuff on the properties and durability of concrete under the attack of magnesium sulfate*. In: *International Conference on civil engineering, architecture and urban development management in Iran*. Tehran: University of Tehran, p 17. (In Persian).

Cai, Y., Lin, Z., Zhang, J., Lu, K., Wang, L., Zhao, Y., & Huang, Q. (2022). *Dosage effect of wet-process tuff silt powder as an alternative material of sand on the performance of reactive powder concrete*. *Materials*, 15(11), Article 3930.

Naderi, M., Rashvand Aveh, A. and Saberi Vaezaneh, A. (2023). *Investigation of the Effect of Different Aggregates on the durability of Self-Compacting Concretes Exposed to Sulfate using “Friction-Transfer” method*. *Journal of structural and construction engineering*, Vol. 9(12), pp 43-60. (In Persian).

K. Wille, A.E. Naaman, G.J. Parra-Montesinos “Ultra-High-Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa: A Simpler Way”, *Aci Materials Journal*, 108, pp.46-54 (2011).

National Building Regulations. Chapter 9: Design and construction of concrete structures (2020 edition). Management and Planning Organization of Iran.

Mamaghani Bonabi, A., Zare Ahmadabad, M., & Maqsoodi, M. (2019). *Aeolian sand provenance using mineralogy and morphoscopy of sand grains (Case study: Qumtapeh, Soufian – North of Lake Urmia)*. *Geography and Environmental Hazards*, 8(3), 59–77.

Gowripalan, N., Watters, R., Gilbert, R. I., & Cavill, B. (2003). *Reactive powder concrete for precast structural concrete-research and development in Australia*. In *21st Biennial Conference of*

The Concrete Institute of Australia, Brisbane, Australia (pp. 99-108).

Shervani Tabar, B., & Asadi Melerdi, M. (2022). Experimental Investigation of the Effects of Curing Temperature and Amount of Silica Fume on Properties of Reactive Powder Concrete Made from Local Materials. Journal of Concrete Structures and Materials, 7(2), 191-212. (In persian).