Journal of Structural and Construction Engineering, 13(03), 2026, pp. 5-25

Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir

The Influence of Mixing and Curing Methods on the Mechanical Properties of Lightweight Concrete with Perlite Aggregates

Rooholah Bakhtiari Doost[1]*, Mohammadparsa Alizadeh[2], Mahdi Fattahi[2]

1- Assistant Professor, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran
2- Graduate B.Sc. Civil Engineering, Faculty of Engineering, Qom University of Technology, Qom, Iran

ABSTRACT

This study investigated the influence of two mixing designs (using dry perlite vs. pre-saturated perlite) and five curing methods (water ponding, wet burlap, burlap + nylon sheet, curing compound, and air curing) on the compressive strength, flexural strength, and ductility of lightweight concrete containing perlite aggregates. The primary objective was to identify optimal methods for enhancing the performance of lightweight concrete under various operational conditions. In the first mix design, dry perlite (without pre-saturation) was added, with the necessary water for saturation added during concrete mixing, whereas in the second mix design, the perlite was pre-saturated for 24 hours prior to mixing. Compressive strength was tested using a 200-ton jack, flexural strength was tested with a 60-ton jack, and ductility was evaluated through stress-strain curve analysis. The second mixing design (saturated perlite) exhibited higher compressive and flexural strengths compared to the first design. This strength increase was attributed to adequate water absorption by the saturated perlite and more effective cement hydration. Curing with wet burlap for 7 days provided over 90% of the 28-day strength achieved under standard curing conditions. Curing with a curing compound and air curing yielded the lowest strengths. This research demonstrates that combining suitable materials (saturated perlite) with optimized curing methods (burlap or burlap + nylon) can produce lightweight concrete with desirable mechanical performance without the need for complex processes.

ARTICLE INFO

Receive Date: 07 June 2025
Revise Date: 13 September 2025
Accept Date: 10 October 2025

Keywords:
Lightweight concrete
Perlite aggregates
Mixing design
Curing methods
Mechanical properties

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.526176.3751

*Corresponding author: Rooholah Bakhtiari Doost
Email address: Bakhtiaridoost@qut.ac.ir

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)
www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

تأثیر روش‌های اختلاط و عمل‌آوری بر خواص مکانیکی بتن سبک با سنگدانه‌های پرلیت

روح‌اله بختیاری‌دوست[1*]، محمدپارسا علیزاده[2]، مهدی فتاحی[2]

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران
۲- دانش آموخته کارشناسی مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه صنعتی قم، قم، ایران

چکیده

این مطالعه به بررسی تأثیر دو طرح اختلاط (استفاده از پرلیت خشک و پرلیت اشباع‌شده) و پنج روش عمل‌آوری (حوضچه آب، گونی مرطوب، گونی+نایلون، ماده عمل آورنده، و رهاسازی در محیط) بر مقاومت فشاری، خمشی و شکل‌پذیری بتن سبک حاوی سنگدانه‌های پرلیت پرداخته است. هدف اصلی، شناسایی روش‌های بهینه برای بهبود عملکرد بتن سبک در شرایط عملیاتی مختلف بود. در طرح اختلاط اول پرلیت خشک (بدون پیش‌مرطوب‌سازی) با اضافه کردن آب لازم جهت اشباع آن در هنگام اختلاط بتن و در طرح اختلاط دوم پرلیت اشباع‌شده (پیش‌مرطوب‌سازی ۲۴ ساعته) استفاده شد. نمونه‌ها در بازه‌های ۷، ۱۴ و ۲۸ روز تحت شرایط مختلف عمل‌آوری قرار گرفتند. مقاومت فشاری با جک ۲۰۰ تنی، مقاومت خمشی با جک ۶۰ تنی، و بررسی شکل‌پذیری با تحلیل نمودارهای تنش-کرنش انجام شد. طرح اختلاط دوم (پرلیت اشباع) مقاومت فشاری و مقاومت خمشی بالاتری نسبت به طرح اختلاط اول نشان داد. افزایش مقاومت ناشی از جذب آب کافی توسط پرلیت اشباع و هیدراتاسیون مؤثرتر سیمان بود. عمل آوری ۷ روزه با گونی، بیش از ۹۰٪ مقاومت ۲۸ روزه در شرایط عمل آوری استاندارد را تأمین کرد. عمل آوری با ماده عمل آورنده و رهاسازی در محیط کمترین مقاومت را ایجاد کردند. این پژوهش نشان می‌دهد که ترکیب مواد مناسب (پرلیت اشباع) و روش‌های عمل‌آوری بهینه (گونی یا گونی+نایلون) می‌تواند بدون نیاز به فرآیندهای پیچیده، به تولید بتن سبک با عملکرد مکانیکی مطلوب منجر شود.

کلمات کلیدی: بتن سبک، سنگدانه‌های پرلیت، طرح‌های اختلاط، روش‌های عمل‌آوری، خواص مکانیکی

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/jsce.2025.526176.3751
۱۴۰۴/۰۳/۱۷	۱۴۰۴/۰۶/۲۲	۱۴۰۴/۰۷/۱۸	۱۴۰۴/۰۷/۱۸	۱۴۰۵/۰۳/۳۱	doi: 10.22065/jsce.2025.526176.3751

*نویسنده مسئول: روح‌اله بختیاری‌دوست
پست الکترونیکی: Bakhtiaridoost@qut.ac.ir

۱- مقدمه

بتن به عنوان یکی از پرکاربرد ترین مصالح ساختمانی می‌باشد که با رشد سریع شهرنشینی سالانه حدود ۳۳ میلیارد تن بتن مصرف می‌شود[۱]. بتن از سه جزء اصلی سیمان، آب، و سنگدانه‌ها تشکیل شده است. سنگدانه‌ها، که حدود ۷۵ درصد از حجم بتن را تشکیل می‌دهند، نقشی کلیدی در تعیین ویژگی‌های نهایی این ماده ایفا می‌کنند. استفاده از سنگدانه‌های سبک و متخلخل مانند پرلیت[1]، می‌تواند به تولید بتن سبک‌وزن با خواص بهینه از جمله عایق حرارتی بهتر و کاهش هزینه‌های ساخت کمک کند [۲] ,[۳].

به‌عنوان جایگزینی برای سنگدانه‌های بازیافتی، محصولات آتشفشانی شناسایی شده‌اند که علیرغم پتانسیل فراوان، به طور کامل مورد بهره‌برداری قرار نگرفته‌اند. سنگ‌های آتشفشانی مانند پومیس، لاپیلی، توف، زئولیت‌ها و پرلیت در مقایسه با سنگدانه‌های رودخانه‌ای طبیعی، مزایای متعددی دارند از جمله سبک‌وزنی، بهبود خواص عایق حرارتی و صوتی، مقاومت در برابر آتش و ویژگی‌های پوزولانی [۴].

پرلیت، که نوعی شیشه آتشفشانی آلومینوسیلیکات آمورف است، به دلیل چگالی کم و ظرفیت بالای نگهداری آب با قابلیت انبساط تا حدود ۵ تا ۲۰ برابر حجم اولیه خود، به‌طور گسترده‌ای در تولید بتن‌های سبک استفاده می‌شود. حرارت دادن پرلیت در دماهای ۸۷۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد، آن را به ماده‌ای متخلخل با چگالی پایین تبدیل می‌کند[۵]، که برای تولید بتن‌های سبک با خواص عایق حرارتی مطلوب بسیار مناسب است و باعث کاهش هزینه‌های ساخت‌وساز نیز می‌گردد[۶], [۷].با این حال، جایگزینی پرلیت به جای سنگدانه‌های ریز می‌تواند منجر به کاهش مقاومت فشاری شود [۸],[۹]. همچنین جایگزینی درشت‌دانه‌ها با پرلیت باعث کاهش وزن نهایی سازه می‌شود و در عین حال به بهبود ویژگی‌های حرارتی بتن کمک می‌کند[۹].

افزون بر این، پرلیت به‌عنوان یک افزودنی پوزولانی در سیمان، با واکنش شیمیایی با هیدروکسید کلسیم تولید شده در فرآیند هیدراسیون سیمان، به افزایش دوام و مقاومت بتن کمک می‌کند[۱۰].تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از پرلیت، به‌ویژه در درصدهای بالاتر، می‌تواند مقاومت فشاری بتن را به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد[۷], [۸].

به‌طور کلی، جایگزینی پرلیت منبسط به‌عنوان سنگدانه‌های ریز و درشت در بتن، موجب بهبود ویژگی‌های عملکردی بتن و کاهش هزینه‌های ساخت می‌شود و این مزایا، پرلیت را به یکی از مواد کلیدی در تولید بتن سبک تبدیل کرده است[۲], [۱۱], [۱۲].

از دیگر مزایای استفاده از پرلیت در بتن، بهبود فرآیند عمل‌آوری آن است. پرلیت، با ظرفیت بالای جذب و نگهداری آب، آب مورد نیاز برای هیدراتاسیون سیمان را تأمین می‌کند که به‌ویژه برای بتن‌هایی با نسبت آب به سیمان کم، اهمیت دارد. آب می‌تواند در سنگدانه های سبک از پیش مرطوب شده، قبل از اختلاط ذخیره شود و با فرآیند هیدراتاسیون سیمان در خمیر بتن آزاد شود[۱۳]. در نتیجه، مقاومت در برابر ترک‌خوردگی ناشی از جمع‌شدگی محدود با افزودن سنگدانه های سبک از پیش مرطوب شده به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد[۱۴].

در تحقیقیات اخیر محققان توجه ویژه ای به سنگ دانه های سبک داشته اند به عنوان مثال پژوهش انجام‌شده بر روی ترکیب سرباره آلومینیوم و سبک‌دانه سبک لیکا نشان داده است که عمل‌آوری داخلی با لیکا می‌تواند اثرات منفی سرباره بر مقاومت مکانیکی را کاهش دهد و به بهبود خواص بتن کمک نماید [۱۵].

همچنین اخیراً، امکان به حداکثر رساندن ظرفیت سنگدانه های سبک به‌عنوان ماده عمل‌آورنده داخلی از طریق یک نسبت بهینه ماده انبساطی و عملیات خنک‌سازی را نشان دادند. با این حال، تحقیقات در مورد بتن با نسبت‌های مختلف w/c تحت شرایط عمل آوری داخلی سنگدانه های سبک از پیش مرطوب شده محدود باقی مانده است [۱۶].

[1] Perlite

مطالعات اخیر نشان دادند که جایگزینی کامل پرلیت به‌جای ماسه طبیعی در بتن، ضمن کاهش وزن مخصوص و ضریب هدایت حرارتی، می‌تواند با ایجاد اثر عمل‌آوری داخلی موجب بهبود هیدراتاسیون و حفظ مقاومت فشاری در بتن‌های با نسبت سیمان بالا شود. بنابراین، پرلیت را می‌توان به‌عنوان یک ماده مؤثر برای تولید بتن‌های سبک‌وزن و حرارتی با عملکرد مکانیکی قابل قبول معرفی نمود [۱۷].

عمل‌آوری مناسب، که شامل کنترل دما و رطوبت است، می‌تواند به افزایش استحکام و دوام بتن کمک کند[۱۸]. شرایط رطوبتی مناسب بسیار مهم است، زیرا هیدراتاسیون سیمان زمانی متوقف می‌شود که رطوبت نسبی درون منافذ موئینه به زیر ۸۰ درصد برسد[۱۹]. همچنین، تحقیقات در مورد ویژگی‌های بتن سخت‌شده و تأثیر عمل‌آوری بر هیدراتاسیون سیمان نشان‌دهنده اهمیت انتخاب مناسب روش عمل‌آوری برای رسیدن به ویژگی‌های مطلوب بتن است[۲۰ و ۲۱].

اهمیت انتخاب روش عمل‌آوری مناسب بتن در تحقیقات متعددی مورد تأکید قرار گرفته است. برای مثال، در مطالعه‌ای مقایسه‌ای نشان داده شد که عمل‌آوری بتن در آب و یا استفاده از گونی مرطوب به همراه پوشش نایلونی موجب افزایش حدود ۳۰ تا ۴۰ درصدی مقاومت فشاری و کششی نسبت به بتن شاهد می‌شود، در حالی که عمل‌آوری با مواد عمل‌آورنده بیشترین میزان نفوذپذیری آب را به همراه داشت. همچنین، افزایش دمای عمل‌آوری از ۲۵ به ۳۵ درجه سانتی‌گراد موجب بهبود مقاومت مکانیکی بتن گردید [۲۲].

تحقیقات نشان داده‌اند که نمونه‌های ساخته شده از پرلیت با افزایش سن نمونه ها مقاومت خمشی و فشاری نمونه ها به دلیل عمل آوری داخلی بتن ناشی از وجود سنگدانه های پرلیت منبسط شده افزایش یافت[۲۳].

همچنین تحقیقات نشان داده‌اند که میزان و نرخ هیدراتاسیون سیمان و ساختار فیزیکی محصولات هیدراتاسیون به عواملی نظیر زمان، رطوبت و دما بستگی دارد. برای مثال، عمل‌آوری سنتی با آب به‌طور کلی کارآمدترین روش است و در مقایسه با سایر روش‌ها نظیر عمل‌آوری با غشاء و خودعمل‌آوری، عملکرد بهتری دارد. روش‌های خودعمل‌آوری به‌ویژه برای ساختمان‌های بلندمرتبه مناسب بوده و می‌توانند تا ۹۰ درصد از کارایی روش‌های سنتی را ارائه دهند[۲۴]. استفاده از سنگدانه‌های سبک اشباع‌شده نیز می‌تواند جمع‌شدگی را به‌طور قابل‌توجهی بدون تأثیر منفی بر مقاومت یا مدول الاستیسیته بتن، کاهش دهد [۲۵].

همچنین اخیرا [۲۶] با استفاده از ضایعات سرامیکی به‌عنوان جایگزین بخشی از مصالح بتن، سه روش عمل‌آوری استاندارد، پوشش پلاستیکی و قرارگیری در هوای آزاد مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که انتخاب روش عمل‌آوری نقش مهمی در مقاومت نهایی دارد؛ به‌گونه‌ای که نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در شرایط استاندارد عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها از خود نشان دادند.

اخیرا در تحقیق انجام‌شده با استفاده از ضایعات سرامیکی به‌عنوان جایگزین بخشی از مصالح بتن، سه روش عمل‌آوری استاندارد، پوشش پلاستیکی و قرارگیری در هوای آزاد مورد مقایسه قرار گرفتند. نتایج نشان داد که انتخاب روش عمل‌آوری نقش مهمی در مقاومت نهایی دارد؛ به‌گونه‌ای که نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در شرایط استاندارد عملکرد بهتری نسبت به سایر روش‌ها از خود نشان دادند.

با افزایش تقاضا برای بتن سبکدانه، مسائل مرتبط با طرح اختلاط، ریختن، تراکم و عمل‌آوری آن اهمیت بیشتری یافته‌اند. این تحقیق به بررسی تأثیر روش‌های مختلف عمل‌آوری شامل عمل‌آوری با حوضچه آب، گونی و نایلون، گونی، ماده عمل آورنده و رها شده در محیط با دو وضعیت پرلیت اشباع‌شده با سطح خشک و غیر اشباع، بر ویژگی‌های مکانیکی بتن سبکدانه پرلیتی پرداخته است. تحلیل نتایج می‌تواند به بهبود طراحی و اجرای بتن‌های سبکدانه کمک کرده و راهکارهای جدیدی برای استفاده بهینه از پرلیت و بهبود فرآیند عمل‌آوری بتن ارائه دهد.

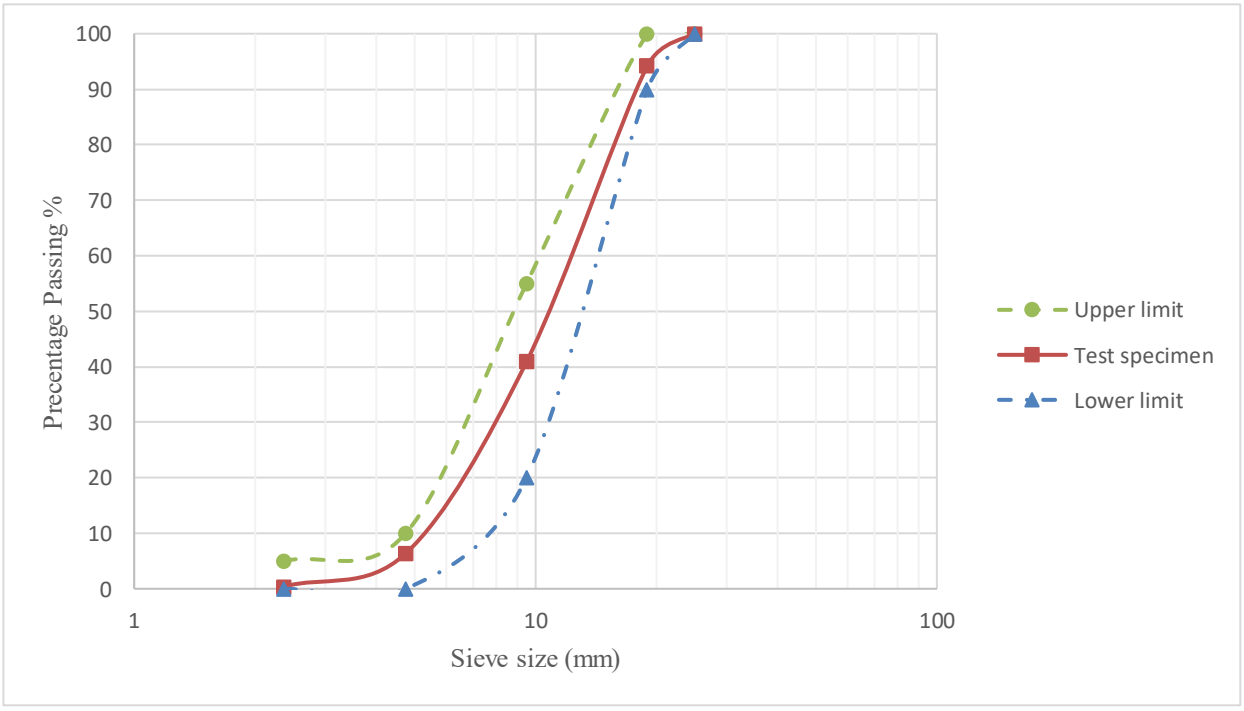
برای بهبود عملکرد بتن سبکدانه، توصیه می‌شود که سبکدانه‌ها به‌صورت کاملاً خشک یا کاملاً پیش‌مرطوب استفاده شوند. در صورتی که سبکدانه‌ها ظرفیت جذب آب بالایی داشته باشند، پیش‌مرطوب‌سازی ضروری است تا از کاهش شدید اسلامپ جلوگیری شود.

پیش‌مرطوب‌سازی به معنای افزایش رطوبت و میزان آب جذب‌شده توسط سبکدانه‌ها است. اما اگر ظرفیت جذب آب سبکدانه‌ها کم باشد، نیازی به پیش‌مرطوب‌سازی نخواهد بود.

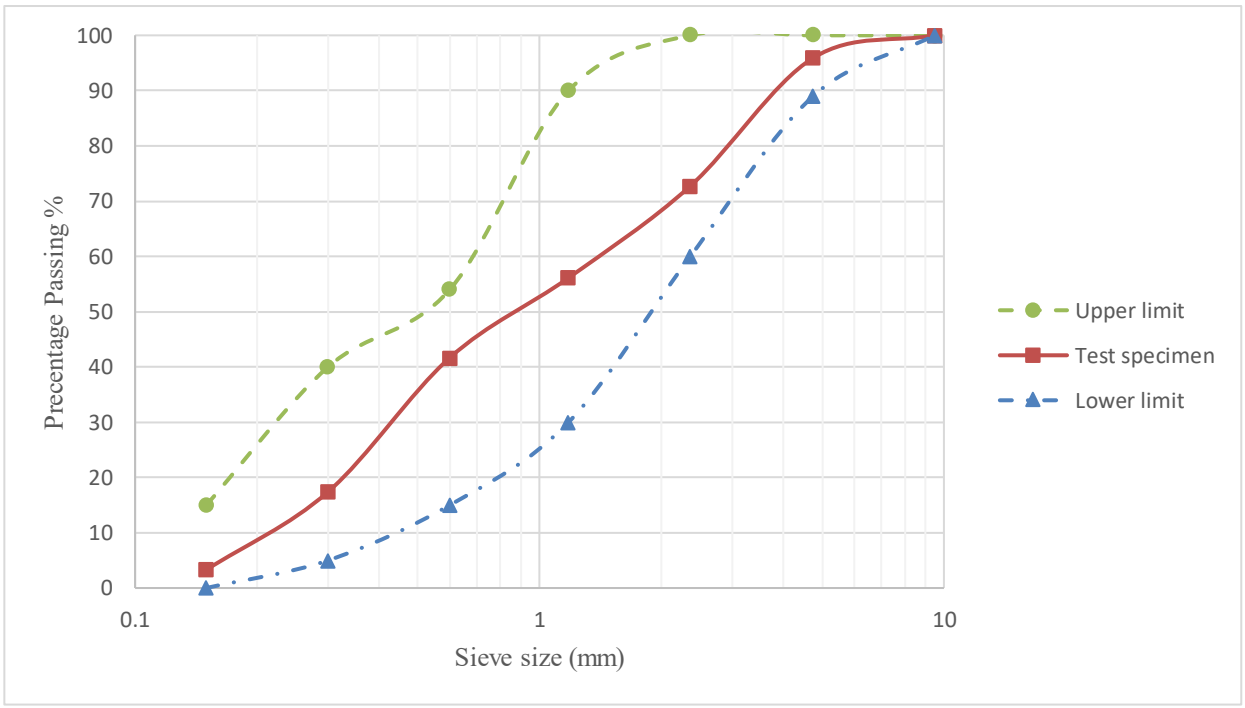
۲- ساخت نمونه های آزمایشگاهی

۲-۱-مصالح مصرفی

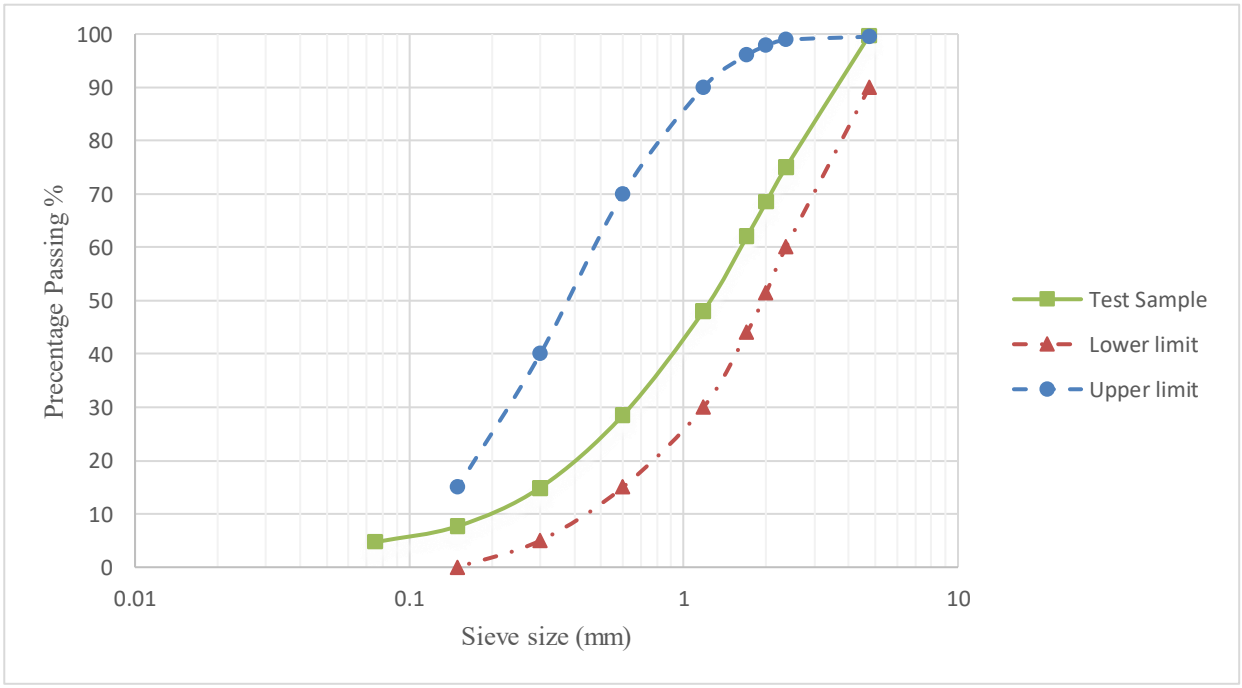
در تمام نمونه های بتن از سنگدانه های معمولی و پرلیت منبسط شده به عنوان سنگدانه استفاده شد. همچنین جهت بررسی سنگدانه ها، آزمایش دانه بندی بر روی نمونه هایی از سنگدانه های معمولی و پرلیت منبسط شده بر اساس استاندارد [۲۷] انجام شده است. شن و ماسه مورد استفاده در این طرح از نوع شکسته بوده و آزمایش‌های مربوط به تعیین منحنی دانه‌بندی ریزدانه و درشت‌دانه مطابق با محدوده‌های مجاز ارائه‌شده توسط استانداردهای [۲۸] و [۲۹]، که به تهیه مصالح بتن سبکدانه مربوط هستند، انجام شده است. نمودار۱ و نمودار۲ به ترتیب منحنی های دانه بندی شن و ماسه را نشان می‌دهد. آب مصرفی در این مطالعه از نوع آب آشامیدنی است. همچنین، بر اساس استاندارد [۳۰] بیشترین قطر مجاز برای سنگدانه‌های مصرفی در بتن سبک باید کمتر از ۱۹/۵۰ میلی‌متر باشد. نتایج آزمایش دانه بندی پرلیت صفر تا پنج میلیمتر نیز در نمودار۳ نشان داده شده است. از نتایج مشخص است که سنگدانه های پرلیت منبسط شده دارای دانه بندی پیوسته هستند. نمودار نهایی در محدوده استاندارد نشان می‌دهد که سنگدانه های پرلیت منبسط شده به خوبی دانه بندی شده‌اند.



نمودار ۱ : منحنی دانه بندی شن



نمودار ۲: منحنی دانه بندی ماسه



نمودار ۳: منحنی دانه بندی سنگدانه های ۵-۰ میلیمتر پرلیت منبسط شده

۲-۲- طرح اختلاط

در مجموع سه طرح اختلاط با ترکیب‌های مختلف از سنگدانه‌ها آماده شد. نمونه کنترلی برای دستیابی به مقاومت بتن ۳۵ مگاپاسکال طراحی شده است. مخلوط بتن $C_{۳۵}$ حاوی ۳۸۵/۱۰۶ کیلوگرم بر متر مکعب سیمان در نظر گرفته شده است. برای تمام مخلوط‌های بتن نسبت آب به سیمان ۰/۴۷ در نظر گرفته شد. شایان ذکر است که طرح اختلاط بر اساس استاندارد [۳۱] انجام شده است. همچنین در جدول ۱ درصد جذب آب و وزن مخصوص مصالح نشان داده شده است.

جدول ۱: درصد جذب آب و وزن مخصوص مصالح

	سنگدانه های معمولی		سنگدانه های پرلیت منبسط شده
	شن	ماسه	۰-۵ میلیمتر
جذب آب (٪)	۱/۳	۱/۹	۲۰۰
وزن مخصوص (kg/m^3)	۱٦٤۰	۱۷۸۰	۱۳۰

برای مطالعه تأثیر وجود پرلیت منبسط شده و اثر عمل آوری داخلی، سنگدانه‌های پرلیت به میزان ۷۵ درصد به جای ماسه معمولی به دو روش جایگزین شدند:

روش اول ($\boldsymbol{75\%\ Perlite_1}$): در این روش(شکل ۱-الف)، سنگدانه‌های پرلیتی به صورت خشک وارد مخلوط طرح اختلاط بتن شده و عمل جذب آب را در حین عمل هیدراتاسیون بتن انجام می‌دهند.

روش دوم ($\boldsymbol{75\%\ Perlite_2}$): در این روش، مطابق با استاندارد [۳۲] قبل از مخلوط‌سازی، سنگدانه‌های پرلیت در دمای اجاق خشک شده و به دمای محیط هوا خنک شدند. سپس، آب مورد نیاز برای عمل‌آوری داخلی و مخلوط‌سازی به سنگدانه‌های سبک به مدت ۲۴ ساعت جذب شد(شکل ۲-ب). آب اضافی که توسط سنگدانه‌های سبک جذب نشده بود، از مخلوط خارج شد و به عنوان آب مخلوط‌سازی بتن استفاده گردید.

در هنگام تهیه نمونه‌ها در هر دو روش، قالب در سه لایه تقریباً برابر پر شد تا یکنواختی آن تضمین شود. پس از ریختن و لرزاندن هر لایه، لایه بعدی بلافاصله ریخته و لرزانده شد تا تمام نمونه آماده شود، همانطور که در استاندارد [۳۳] توصیه شده است. از هر طرح اختلاط پرلیتی۲۴ نمونه مکعبی با ابعاد ۱۵۰×۱۵۰×۱۵۰ میلی‌متر و از طرح اختلاط مبنا ۳ نمونه مکعبی و در مجموع ۵۱ نمونه فشاری ساخته شد. از هر طرح اختلاط ۳ نمونه نمونه خمشی با ابعاد ۵۰۰×۱۰۰×۱۰۰ میلی‌متر و در مجموع ۱۲ نمونه خمشی ساخته شد. جزئیات طرح‌های اختلاط در جدول ۲ نشان داده شده است. طرح اختلاط بتن پیشنهادی مربوط به حالت اشباع با سطح خشک است و میزان آب و سنگدانه ها با توجه به رطوبت سنگدانه ها در آزمایشگاه اصلاح شده است.

الف ب

شکل ۱: الف.سنگدانه پرلیت ۰-۵ میلیمتر خشک ب. سنگدانه پرلیت ۰-۵ میلیمتر اشباع از آب

جدول۲ : طرح اختلاط بتن با درصدهای مختلف سنگدانه سبک پرلیت

بتن	شن SSD (kg)	ماسه SSD (kg)	سیمان (kg)	آب (kg)	پرلیت ۵-۰ میلیمتر خشک (kg)	پرلیت ۵-۰ میلیمتر SSD (kg)
CONTROL	۱۱۰٤	۷۲۲/۷	۳۸۵/۱	۱۸۱	۰	۰
75% $Perlite_1$	۱۱۰٤	۱۰۸/٦	۳۸۵/۱	۲۵۸/۹	٤۱/۵	۰
75% $Perlite_2$	۱۱۰٤	۱۰۸/٦	۳۸۵/۱	۱۸۱	۰	۱۲۳/۵

۲-۳-عمل‌آوری نمونه ها

نمونه های ساخته شده از طرح اختلاط پرلیتی، با پنج روش عمل‌آوری زیر مورد بررسی قرار گرفته است:

۱. عمل‌آوری در حوضچه آب: نمونه‌های نشان داده شده درشکل ۲ در حوضچه آب قرار داده شدند تا فرایند هیدراتاسیون بتن به طور کامل انجام شود. عمل‌آوری بتن با قرارگیری در حوضچه آب، یکی از رایج‌ترین و مؤثرترین روش‌های عمل‌آوری است که باعث تامین رطوبت لازم برای هیدراتاسیون سیمان می‌شود و به بهبود مقاومت فشاری و دوام بتن کمک می‌کند.

شکل ۲: نمونه‌های عمل آوری شده در حوضچه آب

۲. عمل‌آوری با گونی: نمونه‌های نشان داده شده درشکل ۳ با استفاده از گونی مرطوب پوشانده شدند تا از تبخیر آب جلوگیری شود.استفاده از گونی مرطوب نیز به عنوان یک روش سنتی عمل‌آوری، به حفظ رطوبت سطحی بتن کمک کرده و از ترک‌خوردگی زودرس جلوگیری می‌کند. این روش معمولاً در پروژه‌های ساختمانی با منابع محدود و دسترسی کمتر به تجهیزات پیشرفته مورد استفاده قرار می‌گیرد.

شکل ۳: نمونه‌های عمل آوری شده با گونی

۳. عمل‌آوری با گونی و نایلون: نمونه‌های نشان داده شده در شکل ۴ با گونی مرطوب و سپس با نایلون پوشانده شدند تا از تبخیر آب به طور کامل جلوگیری شود. ترکیب گونی و نایلون، یک روش ترکیبی است که با افزایش نگهداری رطوبت و

جلوگیری از تبخیر سریع آب، به بهبود فرآیند عمل‌آوری کمک می‌کند. این روش برای مناطق گرم و خشک که تبخیر آب سریع‌تر صورت می‌گیرد، مناسب است.

شکل ۴: نمونه‌های عمل آوری شده با گونی و نایلون

۴. عمل‌آوری با ماده عمل آورنده: نمونه‌های نشان داده شده در شکل ۵ با استفاده از ماده عمل آورنده پوشانده شدند تا رطوبت درون بتن حفظ شود. ماده عمل‌آورنده‌ای که در این تحقیق به کار رفته است، از محصولات شرکت $CHRYSO®Cure\ AR$ بوده و با استاندارد ASTM C 309 Type 1 [۳۴] مطابقت دارد. این ماده، که توانایی پوشش‌دهی سطحی بین ۴ تا ۵ متر مربع در هر لیتر را دارد، بلافاصله پس از باز کردن قالب‌ها با استفاده از یک فرچه به تمامی سطوح نمونه‌های بتنی اعمال شد.پس از اعمال این ماده، نمونه‌های بتنی تا زمان انجام آزمایش در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند تا از حفظ رطوبت و جلوگیری از تبخیر زودهنگام آب بتن اطمینان حاصل شود.

شکل ۵: نمونه‌های عمل آوری شده با ماده عمل آورنده

۵. رها شده در محیط آزاد: نمونه‌های نشان داده شده در شکل ۶ بدون پوشش خاصی در محیط آزاد قرار داده شدند. به عنوان روش کنترل، مورد بررسی قرار گرفته است تا تاثیرات ناشی از عدم عمل‌آوری بر ویژگی‌های مکانیکی بتن مورد ارزیابی قرار گیرد .

شکل ۶: نمونه‌های رها شده در محیط

نمونه‌های ساخته شده از هر دو طرح اختلاط پرلیتی با پنج روش عمل آوری ذکر شده، طی مدت ۷ و ۱۴ روز مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در جدول ۳ به تفکیک نام‌گذاری شده‌اند.

جدول۳ : نمونه‌های ساخته شده از هر دو طرح اختلاط پرلیتی

بتن	روش‌های عمل آوری	حوضچه اب	با گونی و نایلون	با گونی	curing with	رها شده در محیط
$75\%\ Perlite_1$	در طی ۷ روز	M1-7DS	M1-7DGN	M1-7DG	M1-C	M1-A
	در طی ۱۴ روز	M1-14DS	M1-14DGN	M1-14DG		
$75\%\ Perlite_2$	در طی ۷ روز	M2-7DS	M2-7DGN	M2-7DG	M2-C	M2-A
	در طی ۱۴ روز	M2-14DS	M2-14DGN	M2-14DG		

۳-نتایج آزمایش

۳-۱-مصالح مصرفی

وزن واحد، مقاومت فشاری و کششی بتن سخت شده خلاصه شده و در جدول ۳ ارائه شده است. آزمایش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی نمونه های ۷ روزه، ۲۸ روزه به ترتیب با استفاده از یک جک ۲۰۰ تنی فشاری و جک خمشی ۶۰ تنی مطابق شکل ۷ انجام شده است.

الف

ب

شکل ۷: الف. آزمایش مقاومت فشاری بتن با نصب دستگاه اندازه گیری تغییرشکل نمونه (LVDT) ب.آزمایش مقاومت خمشی

۳-۲- اندازه‌گیری مقاومت فشاری

برای اندازه‌گیری مقاومت فشاری نمونه‌های بتن، نمونه‌های مکعبی ساخته شده و مقاومت فشاری آنها با استفاده از دستگاه جک فشاری ۲۰۰ تنی آزمایش شد. مقاومت فشاری نمونه‌های ساخته شده از هر دو طرح اختلاط با لحاظ روش‌های عمل‌آوری ذکر شده، در سن ۲۸ روز اندازه‌گیری شده و نتایج در جدول ۴ و جدول ۵ ارائه شده است. بتن پرلیتی ساخته‌شده با طرح اختلاط دوم (با استفاده از پرلیت اشباع) توانست مقاومت فشاری قابل‌توجهی را کسب کند. با این حال، مقاومت نهایی بتن پرلیتی به‌طور کلی کمتر از بتن کنترلی بدون پرلیت است که مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن برابر با ۳۶/۲ N/mm^2 بوده است. این کاهش در مقاومت نهایی می‌تواند به دلیل ویژگی‌های ذاتی پرلیت، مانند جذب آب و ساختار سلولی آن باشد که بر چسبندگی و تراکم ذرات سیمان تأثیر می‌گذارد.

جدول۴ : مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۲۸ روزه طرح اختلاط اول بر اساس عمل آوری های گوناگون

مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه به مقاومت ۲۸ روزه استاندارد	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (N/mm^2)	نام اختصاری	$Perlite_1$ 75%_ساخت بتن پرلیتی بدون اشباع کردن دانه های پرلیت (P75)
٪۹۵/۳۹	۲۶/۵۲	M1-7DS	نمونه ۷ روزعمل‌آوری شده در حوضچه آب
٪۹۴/۰۶	۲۶/۱۵	M1-7DG	نمونه ۷ روز عمل‌آوری شده با گونی
٪۹۵/۵۶	۲۶/۲۹	M1-7DGN	نمونه ۷ روز عمل‌آوری شده با گونی و نایلون
٪۹۷/۱۶	۲۷/۰۱	M1-14DS	نمونه ۱۴ روز عمل‌آوری شده در حوضچه آب
٪۹۴/۸۳	۲۶/۳۷	M1-14DG	نمونه ۱۴ روز عمل‌آوری شده با گونی
٪۹۶/۴۹	۲۶/۸۳	M1-14DGN	نمونه ۱۴ روز عمل‌آوری شده با گونی و نایلون
٪۷۷/۵۰	۲۱/۵۶	M1-C	نمونه عمل‌آوری با ماده عمل آورنده
٪۶۳/۵۳	۱۷/۶۷	M1-A	نمونه رها شده در محیط
٪۱۰۰	۲۷/۸۰	M1-28DS	نمونه ۲۸ روزعمل‌آوری شده در حوضچه آب

جدول۵ : مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۲۸ روزه طرح اختلاط دوم بر اساس عمل آوری های گوناگون

مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه به مقاومت ۲۸ روزه استاندارد	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (N/mm^2)	نام اختصاری	$Perlite_2$ 75%_ساخت بتن پرلیتی با اشباع کردن دانه های پرلیت (P75)
٪۹۶/۴۰	۲۷/۷۸	M2-7DS	نمونه ۷ روزعمل‌آوری شده در حوضچه آب
٪۹۵/۵۰	۲۶/۴۱	M2-7DG	نمونه ۷ روز عمل‌آوری شده با گونی
٪۹۱/۵۲	۲۶/۶۳	M2-7DGN	نمونه ۷ روز عمل‌آوری شده با گونی و نایلون
٪۹۷/۹۳	۲۸/۴۹	M2-14DS	نمونه ۱۴ روز عمل‌آوری شده در حوضچه آب
٪۹۶/۹۲	۲۸/۰۴	M2-14DG	نمونه ۱۴ روز عمل‌آوری شده با گونی
٪۹۶/۴۰	۲۸/۲۰	M2-14DGN	نمونه ۱۴ روز عمل‌آوری شده با گونی و نایلون
٪۷۹/۴۰	۲۳/۱۰	M2-C	نمونه عمل‌آوری با ماده عمل آورنده
٪۷۲	۲۰/۹۴	M2-A	نمونه رها شده در محیط
٪۱۰۰	۲۹/۰۹	M2-28DS	نمونه ۲۸ روزعمل‌آوری شده در حوضچه آب

الف **ب**

شکل ۸ : تصاویر نمونه های بتنی پس از شکست

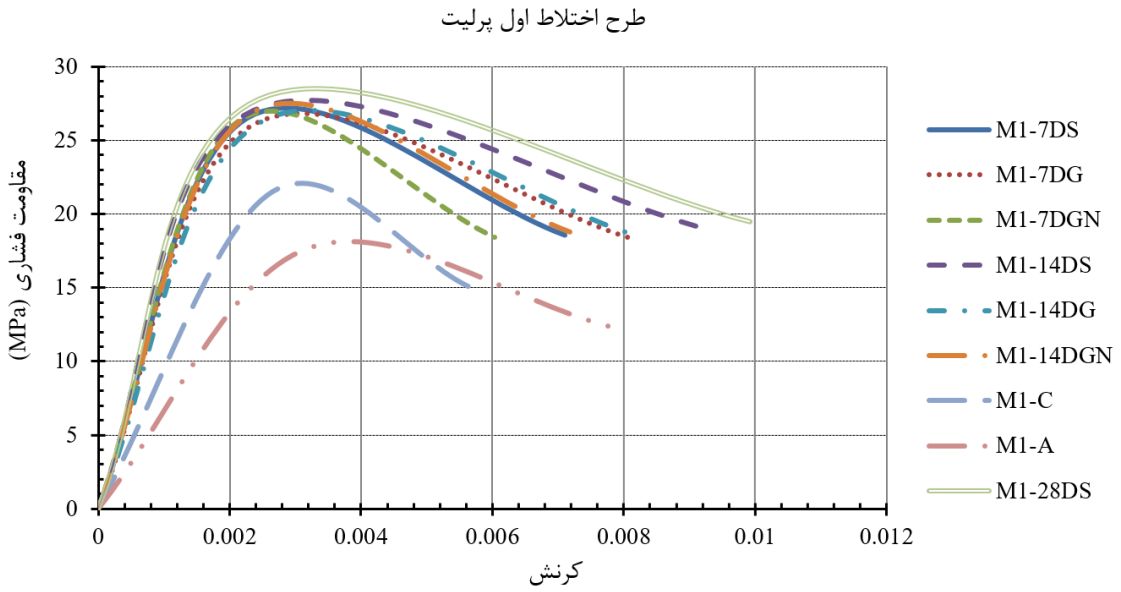
بررسی نتایج نشان می‌دهد که روش‌های عمل‌آوری با گونی و همچنین عمل‌آوری در حوضچه آب به مدت ۷ یا ۱۴ روز، از کارآمدترین روش‌ها برای دستیابی به مقاومت فشاری بالا در بتن‌های پرلیتی با هر دو طرح اختلاط هستند. این روش‌ها در برخی موارد حتی پس از ۷ روز، قادرند بیش از ۹۰ درصد از مقاومت نهایی بتن که در نمونه‌های ۲۸ روزه عمل‌آوری‌شده در حوضچه آب به دست آمده، فراهم کنند.

مقایسه مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه‌ها با مقاومت استاندارد ۲۸ روزه (نمونه‌هایی که ۲۸ روز در حوضچه آب عمل‌آوری شده‌اند) نشان می‌دهد که حتی عمل‌آوری ۷ روزه با روش‌هایی مانند حوضچه آب، گونی و نایلون، یا فقط گونی، می‌تواند بیش از ۹۰ درصد مقاومت نهایی را تأمین کند. در مقابل، روش‌هایی مانند عمل‌آوری با ماده عمل‌آورنده یا رها کردن نمونه‌ها در محیط آزاد، به‌طور قابل توجهی باعث کاهش مقاومت فشاری بتن می‌شوند. این نتایج بر اهمیت انتخاب روش عمل‌آوری مناسب، به ویژه برای بتن‌های سبکدانه پرلیتی تأکید دارند

تا بتوان به مقاومت فشاری مطلوب دست یافت. شکل ۸ تصاویری از نمونه‌های بتنی پس از شکست را نشان می‌دهد. در این نمونه‌ها، فرآیند شکست به‌صورت تدریجی و با ایجاد ترک‌هایی در گوشه‌های نمونه آغاز شده و در نهایت منجر به کاهش ظرفیت باربری و وقوع شکست فشاری گردیده است.

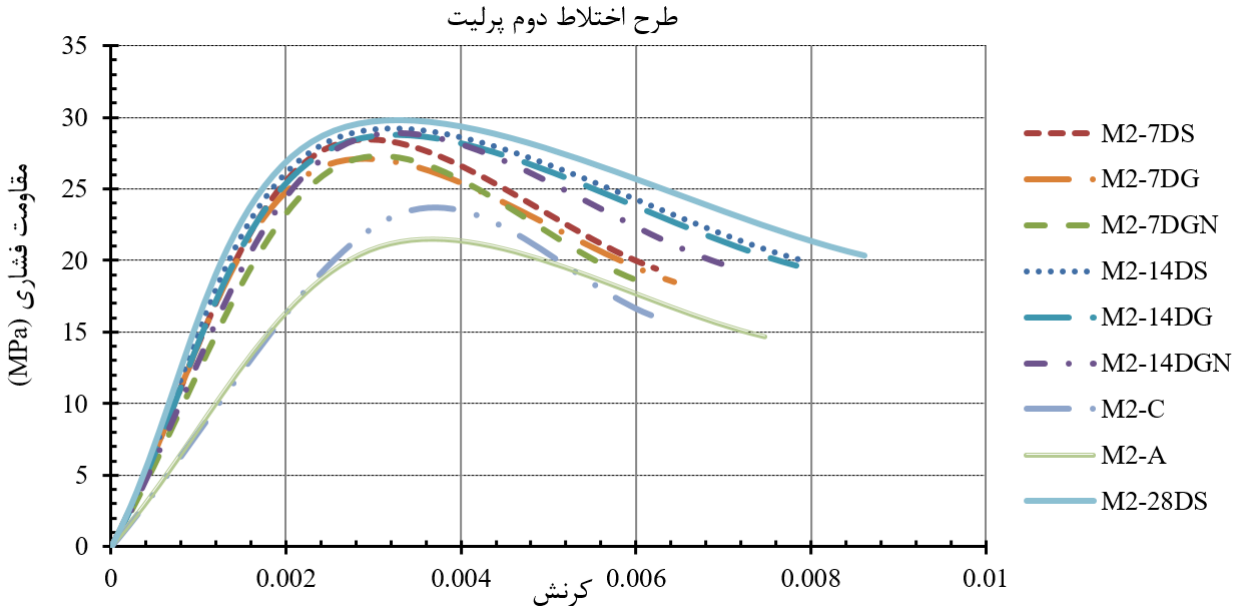
۳-۳- تحلیل نتایج تنش-کرنش

نمودارهای تنش–کرنش مربوط به طرح اختلاط اول (نمودار ۴) و طرح اختلاط دوم (نمودار ۵) نشان دادند که کیفیت عمل‌آوری تأثیر چشمگیری بر مقاومت فشاری و رفتار مکانیکی بتن پرلیتی دارد. نمونه‌های ۱۴ روزه‌ای که با گونی یا گونی و نایلون عمل‌آوری شده بودند، مقاومت فشاری مشابه نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در حوضچه آب داشتند. این نتیجه بیانگر آن است که عمل‌آوری با گونی و نایلون یا حتی تنها گونی، می‌تواند جایگزین مناسبی برای عمل‌آوری سنتی در حوضچه آب باشد و به دستیابی به مقاومت نزدیک به شرایط ایده‌آل کمک کند.

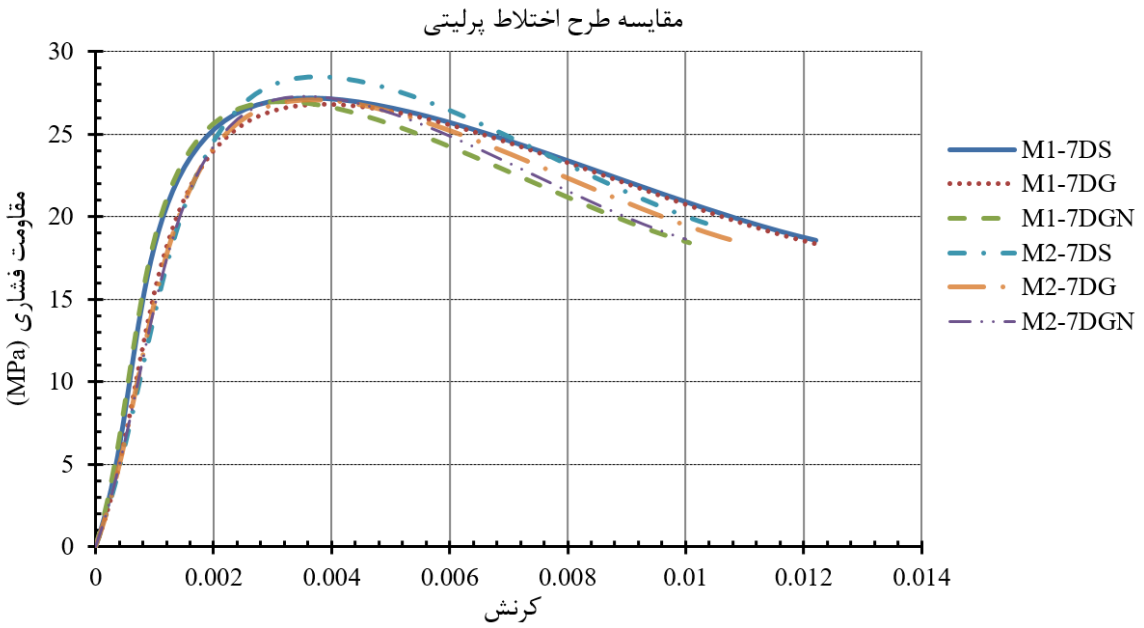


نمودار ۴: نمودارهای تنش-کرنش بتن با طرح اختلاط اول در شرایط عمل‌آوری گوناگون

نمونه‌های ۷ روزه که در شرایط مختلف (حوضچه آب، گونی، گونی و نایلون) نگهداری شدند، بیش از ۹۰ درصد مقاومت ۲۸ روزه را کسب کردند. این امر نشان می‌دهد که حتی عمل‌آوری کوتاه‌مدت، در صورتی که به‌درستی انجام شود، می‌تواند مقاومت فشاری قابل‌قبولی ایجاد کند. به‌ویژه عمل‌آوری ۷ روزه با گونی، روشی ساده، کم‌هزینه و کارآمد برای حفظ رطوبت و تضمین هیدراتاسیون سیمان به شمار می‌رود.



نمودار ۵: نمودارهای تنش-کرنش بتن با طرح اختلاط دوم در شرایط عمل‌آوری گوناگون



نمودار ۶: مقایسه شرایط عمل‌آوری گوناگون بر دو طرح اختلاط پرلیت

در طرح اختلاط دوم که پرلیت اشباع استفاده شد، مقاومت و شکل‌پذیری بتن به‌طور محسوسی افزایش یافت. رطوبت ذخیره‌شده در پرلیت سبب عمل‌آوری داخلی شد و امکان هیدراتاسیون بهتر را حتی در شرایط محدود یا کوتاه‌مدت فراهم کرد. به همین دلیل، نمونه‌های این گروه رفتار مکانیکی ملایم‌تر و انرژی شکست بیشتری نسبت به طرح اختلاط اول داشتند.

مقایسه منحنی‌ها در نمودار ۶ نشان داد که بتن پرلیتی حاوی پرلیت اشباع در تمام شرایط عمل‌آوری عملکرد بهتری نسبت به طرح اول داشت. شاخه نزولی ملایم‌تر و مقاومت باقی‌مانده بیشتر در اختلاط دوم، نشانه‌ی افزایش شکل‌پذیری و توانایی جذب انرژی بود. در مقابل، نمونه‌های عمل‌آوری‌شده در هوا رفتار شکننده‌تری داشتند و کمترین انرژی شکست را از خود نشان دادند.

بررسی منحنی‌ها نشان داد که شاخه نزولی تندتر به معنای شکست ناگهانی و رفتار شکننده‌تر است (مانند M1-7DS یاM1-A) ، در حالی‌که شاخه نزولی ملایم‌تر(مانند M2-14DGN یا M2-28DS) بیانگر ظرفیت بالاتر در جذب انرژی و توزیع مجدد بار پس از رسیدن به بیشینه تنش است. از دیدگاه طراحی سازه، چنین رفتاری به‌ویژه در مناطق زلزله‌خیز یا تحت بارگذاری دینامیکی اهمیت دارد و ایمنی بیشتری فراهم می‌کند.

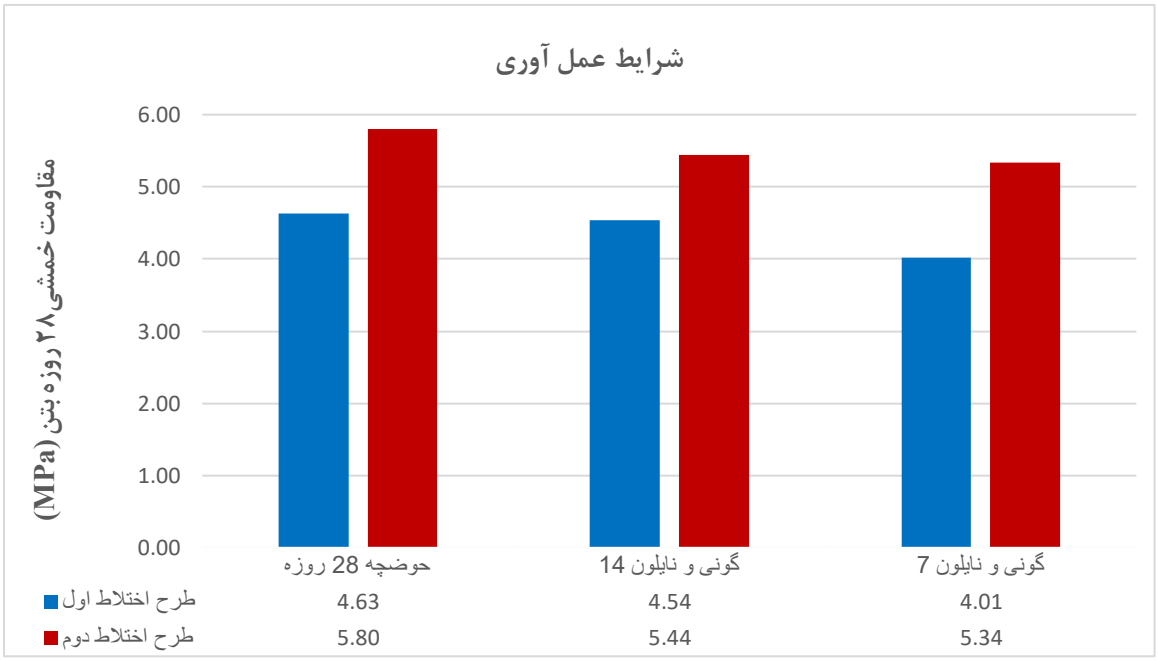
به‌طور کلی، استفاده از پرلیت اشباع در ترکیب بتن پرلیتی و به‌کارگیری عمل‌آوری مناسب (به‌خصوص با گونی و نایلون) باعث افزایش مقاومت فشاری، بهبود شکل‌پذیری و افزایش انرژی شکست شد. این ویژگی‌ها بتن پرلیتی را به گزینه‌ای مطلوب و اقتصادی برای سازه‌های سبک و مقاوم در برابر بارهای دینامیکی تبدیل می‌کند.

۳-۴- تاثیر طرح اختلاط بتن پرلیتی و روش‌های عمل‌آوری بر مقاومت خمشی بتن

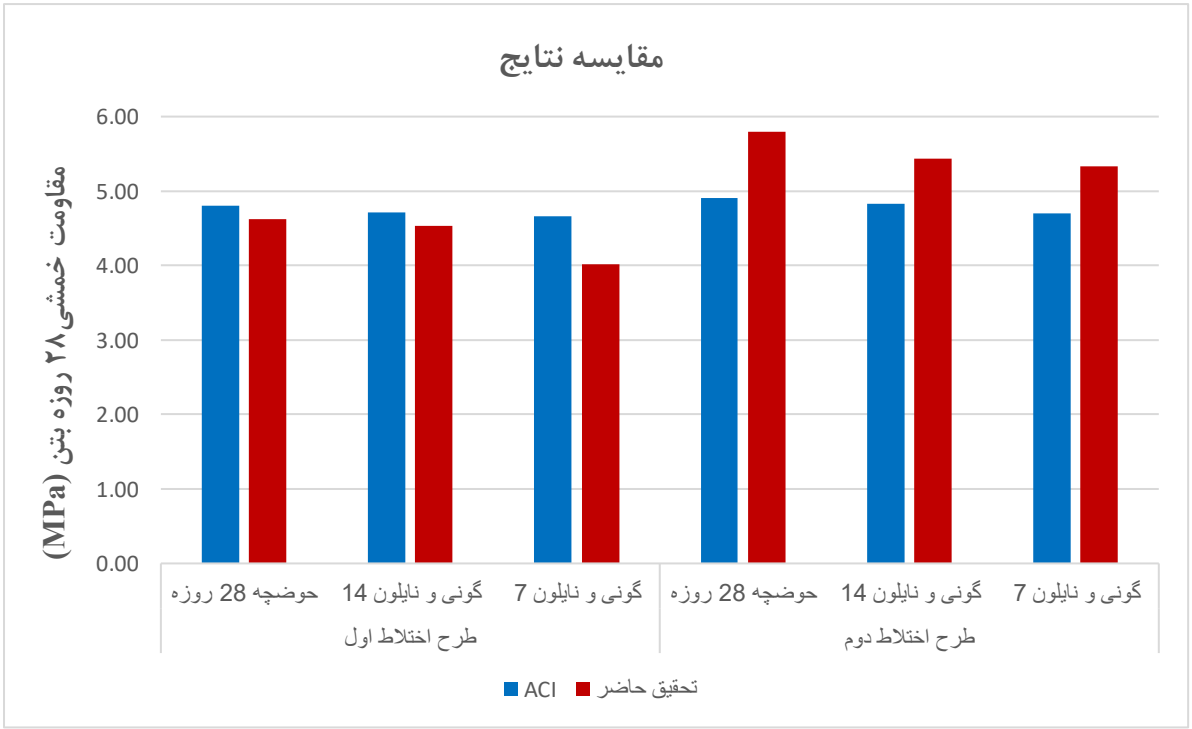
داده‌های به‌دست‌آمده از دو طرح اختلاط پرلیتی در دو شرایط عمل‌آوری مختلف (حوضچه آب، گونی و نایلون) که در نمودار ۷ نشان داده شده‌اند، حاکی از عملکرد بهتر طرح اختلاط دوم (حاوی پرلیت اشباع) در مقایسه با طرح اختلاط اول در تمامی شرایط عمل‌آوری است. در شرایط عمل‌آوری ۱۴ روزه با گونی و نایلون، مقاومت خمشی طرح اختلاط دوم به ۵/۴۴ مگاپاسکال رسید که به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای بیشتر از مقاومت ۴/۵۴ مگاپاسکال طرح اختلاط اول بود. در شرایط عمل‌آوری کوتاه‌مدت‌تر (۷ روز)، نتایج نشان می‌دهد که ترکیب پرلیت اشباع با عمل‌آوری توسط گونی و نایلون، حتی در مدت زمان کوتاه‌تر نیز منجر به دستیابی به مقاومت خمشی قابل توجهی می‌شود. همچنین، در شرایط عمل‌آوری ۲۸ روزه در حوضچه آب، طرح اختلاط دوم با ثبت مقاومت خمشی ۵/۸۰ مگاپاسکال، بالاترین مقدار را نشان داد. این نتایج به وضوح بیانگر این است که ترکیب پرلیت اشباع با روش‌های عمل‌آوری مناسب، می‌تواند بهبود قابل توجهی در خواص مکانیکی بتن سبک‌دانه ایجاد کند. بطور میانگین نمونه‌های طرح اختلاط دوم در شرایط یکسان دارای ۲۵٪ مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های طرح اختلاط اول هستند.

نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی برای این دو طرح اختلاط با مقادیر مرجع ارائه شده توسط ACI318-25 [۳۵]در نمودار ۸ مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که در طرح اختلاط اول، مقاومت خمشی نمونه‌ها در مقایسه با مقادیر مرجع ACI318-25 کاهش یافته است. این کاهش مقاومت می‌تواند به دلیل جذب ناکافی آب توسط سنگدانه‌های خشک در حین هیدراتاسیون بتن و در نتیجه تشکیل حفره‌های بیشتر در ساختار بتن باشد. از سوی دیگر، در طرح اختلاط دوم، نتایج نشان‌دهنده افزایش مقاومت خمشی در مقایسه با ACI318-25 است. این افزایش مقاومت را می‌توان به جذب کافی آب توسط سنگدانه‌های پرلیتی قبل از مخلوط‌سازی و تامین بهتر رطوبت در فرآیند هیدراتاسیون نسبت داد. به طور خاص، در نمودار مقایسه‌ای نشان داده شده است که مقاومت خمشی نمونه‌های ۲۸ روزه که در حوضچه آب نگهداری شده‌اند در طرح اختلاط دوم به طور قابل توجهی بیشتر از طرح اختلاط اول است. این نتیجه بیانگر آن است که استفاده از سنگدانه‌های پرلیتی اشباع (روش دوم) به بهبود خواص مکانیکی بتن کمک کرده و مقاومت خمشی بیش‌تری را ارائه می‌دهد.

در نهایت، این تحقیق نشان می‌دهد که انتخاب روش مناسب برای آماده‌سازی سنگدانه‌ها می‌تواند تاثیر بسزایی در عملکرد مکانیکی بتن داشته باشد. روش دوم با توجه به نتایج به دست آمده، عملکرد بهتری نسبت به روش اول داشته و می‌تواند به عنوان گزینه‌ای مناسب‌تر برای پروژه‌های ساختمانی مورد توجه قرار گیرد.



نمودار ۷: تاثیر شرایط عمل‌آوری و طرح اختلاط بر مقاومت خمشی



نمودار ۸: مقایسه نتایج مقاومت خمشی تحقیق حاضر با $ACI318-25$

۴- نتیجه گیری

در این مطالعه، اثر روش‌های مختلف عمل‌آوری شامل عمل‌آوری با حوضچه آب، گونی و نایلون، گونی، ماده عمل آورنده و رها شده در محیط با دو وضعیت پرلیت اشباع‌شده با سطح خشک و غیر اشباع، بر مقاومت فشاری و خمشی بتن سبکدانه و همچنین کارآمدی روش‌های مختلف عمل‌آوری مورد بررسی قرار گرفت. به طور کلی نتایج زیر از مطالعه به دست آمد:

۱. **افزایش مقاومت بتن با استفاده از پرلیت اشباع:** اشباع کردن پرلیت در طرح اختلاط دوم موجب افزایش قابل‌توجهی در مقاومت فشاری و خمشی بتن شد. این افزایش مقاومت به بهبود توزیع کرنش و افزایش توانایی بتن در جذب تنش نسبت داده می‌شود. به طور میانگین، نمونه‌های طرح اختلاط دوم در شرایط یکسان دارای ۲۵٪ مقاومت خمشی بیشتری نسبت به نمونه‌های طرح اختلاط اول بودند.

۲. **کارآمدی روش‌های عمل‌آوری:** روش‌های عمل‌آوری با گونی و نایلون، چه به‌صورت ترکیبی و چه به‌صورت مجزا، توانستند مقاومت نهایی بتن را به سطحی نزدیک به روش‌های مرسوم مانند عمل‌آوری در حوضچه آب برسانند. این نتایج نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های ساده‌تر و اقتصادی‌تر نیز می‌تواند به دستیابی به مقاومت نهایی مطلوب کمک کند.

۳. **دستیابی به مقاومت نهایی در زمان کوتاه‌تر:** عمل‌آوری ۷ روزه با گونی یا گونی و نایلون بیش از ۹۰ درصد مقاومت نهایی ۲۸ روزه بتن را تأمین کرد. این نشان‌دهنده کارایی بالای این روش‌ها در مقایسه با عمل‌آوری طولانی‌مدت در حوضچه آب است و بیانگر این است که می‌توان در زمان کوتاه‌تر و با هزینه‌های کمتر به مقاومت مطلوب دست یافت.

۴. **بهبود شکل‌پذیری بتن:** عمل‌آوری در حوضچه آب بیشترین شکل‌پذیری را برای بتن فراهم کرد، که این موضوع نقش مهمی در بهبود عملکرد بتن سبکدانه تحت بارگذاری دینامیکی و تغییرات حرارتی ایفا می‌کند.

۵. **مقایسه با استاندارد ACI 318-25:** نتایج آزمایش‌های مقاومت خمشی نشان داد که در طرح اختلاط اول، مقاومت خمشی نمونه‌ها در مقایسه با مقادیر مرجع ACI 318-25 کاهش یافته است. این کاهش مقاومت احتمالاً به دلیل جذب ناکافی آب توسط سنگدانه‌های خشک در حین هیدراتاسیون و تشکیل حفره‌های بیشتر در ساختار بتن بوده است. در مقابل، در طرح اختلاط دوم، مقاومت خمشی افزایش یافته و بالاتر از مقادیر مرجع ACI 318-25 بوده است که این امر به جذب کافی آب توسط سنگدانه‌های پرلیتی و تأمین بهتر رطوبت در فرآیند هیدراتاسیون نسبت داده می‌شود. همچنین، در شرایط عمل‌آوری ۲۸ روزه در حوضچه آب، طرح اختلاط دوم با ثبت مقاومت خمشی بالاتر از طرح اختلاط اول عملکرد بهتری نشان داد.

این نتایج تأکید می‌کنند که با انتخاب مواد مناسب و استفاده از روش‌های عمل‌آوری مؤثر و بدون نیاز به فرآیندهای پیچیده و پرهزینه عمل‌آوری، می‌توان به بهبود خواص مکانیکی بتن سبکدانه پرلیتی دست یافت. از این رو، روش دوم که از پرلیت اشباع استفاده می‌کند، به‌عنوان گزینه‌ای مناسب‌تر برای بهبود عملکرد مکانیکی بتن در پروژه‌های ساختمانی مورد توجه قرار می‌گیرد.

مراجع

[۱] Huang, L., Yang, Z., Li, Z., Xu, Y. and Yu, L. (2020). *Recycling of the end-of-life lightweight aggregate concrete (LWAC) with a novel approach*. *Journal of Cleaner Production*, *275*, p.123099.

[۲] Chandra, S. and Berntsson, L. (2002). *Lightweight aggregate concrete*. Amsterdam: Elsevier.

[۳] Othman, M., Sarayreh, A., Abdullah, R., Sarbini, N., Yassin, M. and Ahmad, H. (2020). *Experimental study on lightweight concrete using lightweight expanded clay aggregate (LECA) and expanded perlite aggregate (EPA)*. *Journal of Engineering Science and Technology*, *15*(2), pp.1186–1201.

[۴] Barbieri, L., Altimari, F., Andreola, F., Maggi, B., & Lancellotti, I. (2023). *Characterization of volcano-sedimentary rocks and related scraps for design of sustainable materials*. *Materials, 16*, 3408.

[۵] Alexa-Stratulat, S.-M., et al. (2024). *Effect of expanded perlite aggregates and temperature on the strength and dynamic elastic properties of cement mortar*. *Construction and Building Materials, 438*, 137229.

[۶] Topcu, I.B. (1999). *High heat transfer coefficient brick produce with perlite, Osmangazi University*. *Journal of Engineering and Architecture Faculty*, *5*(12), pp.71–82.

[۷] Erdem, T.K., Meral, Ç., Tokyay, M. and Erdoğan, T.Y. (2007). *Use of perlite as a pozzolanic addition in producing blended cements*. *Cement and Concrete Composites*, *29*(1), pp.13–21.

[۸] Demirboğa, R. and Gül, R. (2003). *The effects of expanded perlite aggregate, silica fume and fly ash on the thermal conductivity of lightweight concrete*. *Cement and Concrete Research*, *33*(5), pp.723–727.

[۹] Qasim, A.J. and Fawzi, N.M. (2024). *Enhancement of Perlite Concrete Properties containing Sustainable Materials by Incorporation of Hybrid Fibers*. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, *14*(3), pp.13870–13877.

[۱۰] Topçu, İ.B. and Işıkdağ, B. (2007). *Manufacture of high heat conductivity resistant clay bricks containing perlite*. *Building and Environment*, *42*(10), pp.3540–3546.

[۱۱] Celik, A.G., Kilic, A.M. and Cakal, G.O. (2013). *Expanded perlite aggregate characterization for use as a lightweight construction raw material*. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, *49*(2), pp.689–700.

[۱۲] Urhan, S. (1987). *Alkali silica and pozzolanic reactions in concrete. Part 2: Observations on expanded perlite aggregate concretes*. *Cement and Concrete Research*, *17*(3), pp.465–477.

[۱۳] Ma, X., Liu, J. and Shi, C. (2019). *A review on the use of LWA as an internal curing agent of high performance cement-based materials*. *Construction and Building Materials*, *218*, pp.385–393.

[۱۴] Bentz, D.P. and Weiss, W.J. (2011). *Internal curing: a 2010 state-of-the-art review*. Gaithersburg, MD: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology.

[۱۵] Dastan Diznab, M. A., Ghaderan, S., Yousefi, F., & Bonyadi, M. (2025). *Evaluation of characteristics and preference of mortar samples with aluminum slag and LECA with internal curing*. *Journal of Structural and Construction Engineering*.

[۱۶] Cuevas, K. and Lopez, M. (2021). *The effect of expansive agent and cooling rate in the performance of expanded glass lightweight aggregate as an internal curing agent*. *Construction and Building Materials*, *271*, p.121505.

[۱۷] Whwah, M. S., et al. (2025). *Investigation of the effects of water-to-cement ratios on concrete with varying fine expanded perlite aggregate content*. *Journal of Composites Science, 9*(8), 390.

[۱۸] Jackson, N. and Dhir, R.K. (1996). *Bricks and Blocks*. In: *Civil Engineering Materials*, Vol. 5.

[۱۹] Pawar, Y. and Kate, S. (2020). *Curing of Concrete: A Review*.

[۲۰] Ananthi, A., Ranjith, R., Latha, S.S. and Raj, R.V. (2017). *Experimental study on the properties of self-curing concrete*. *Micron*, *5*, p.4.

[۲۱] Kholia, N.R., Vyas, B.A. and Tank, T.G. (2013). *Effect on concrete by different curing method and efficiency of curing compounds–a review*. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, *4*(II), p.57.

[۲۲] Naderi, M., Valibeigi, R., & Mir Safi, S. M. (2018). *Investigating the effect of kind of aggregate on strength and permeability of concrete*. *Journal of Structural and Construction Engineering, 5*(1), 109–126.

[۲۳] Bakhtiari Doost, R. (1401). *Evaluation of mechanical properties of lightweight concrete containing lightweight perlite aggregates affected by internal curing. In: The 2nd International Conference on Architecture, Civil Engineering, Urban Development. Tabriz.*

[۲۴] Whiting, N.M. and Snyder, M.B. (2003). *Effectiveness of Portland cement concrete curing compounds*. *Transportation Research Record*, *1834*(1), pp.59–68.

[۲۵] Cusson, D. and Hoogeveen, T. (2008). *Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking*. *Cement and Concrete Research*, *38*(6), pp.757–765.

[۲۶] Ghasemzadeh Mousavinejad, S. H., & Rastad, S. (2025). *Investigating the properties of concrete containing pozzolan and porcelain ceramic waste under different curing conditions* (e200978). *Journal of Structural and Construction Engineering, 12*(01).

[۲۷] ASTM (2017). ASTM C330: *Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete.* West Conshohocken, PA: ASTM International.

[۲۸] ASTM Committee C09 (2014). *Standard specification for lightweight aggregates for structural concrete*. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

[۲۹] ASTM Committee C331-10 (2010). *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Concrete Masonry Units*. Philadelphia, PA: ASTM International.

[۳۰] ASTM Committee C33 (2003). *Standard specification for concrete aggregates*. Philadelphia, PA: American Society for Testing and Materials.

[۳۱] American Concrete Institute, (2022). *ACI 211.1-22: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete*. Farmington Hills: American Concrete Institute.

[۳۲] ASTM (2007). *ASTM C192: Standard practice for making and curing concrete test specimens in the laboratory*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[۳۳] ASTM Committee C1581 (2009). *Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[۳۴] ASTM (2019). ASTM C309: *Standard specification for liquid membrane-forming compounds for curing concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International.

[۳۵] American Concrete Institute (2025). *ACI 318-25 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*. Farmington Hills, MI: ACI.