

A review study on the mechanical and durability properties of magnesium oxide-based mixtures for advancing low-carbon systems in the construction industry.

Zeinab Abdoos¹, Kianoosh Samimi^{2*}, Mohammad Reza Hafezi³, Mahyar Pakan⁴

1- Masters student, Faculty of Architecture and Urban planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Civil, Water and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

3- Associate Professor, Faculty of Architecture and Urban planning, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

4- Ph.D., Faculty of Civil Engineering, Water, and Environmental Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

ABSTRACT

Cement is one of the most widely used construction materials, and its production process leads to the emission of carbon dioxide. This emission results from the decomposition of calcium carbonate at high temperatures (around 1450°C), which significantly contributes to the production of greenhouse gases in the construction industry. Therefore, to reduce the carbon footprint and promote the development of sustainable materials, the use of magnesium oxide (MgO) as a high-potential alternative has been proposed by researchers. This material, by absorbing carbon dioxide, forming stable carbonate hydration products, and reducing calcination temperatures, has attracted the attention of civil engineering researchers. In this review study, the methods of producing magnesium oxide, its applications, and the impact of MgO on the mechanical properties and durability of cementitious mixtures are examined. Additionally, this paper identifies the challenges and opportunities of using MgO by analyzing the results of conducted studies and proposes solutions for improving the design of MgO-based cementitious mixtures. The findings indicate that the use of MgO, especially at optimal levels, can lead to significant improvements in the mechanical properties and durability of cementitious materials. However, high amounts of MgO and its insufficient reactivity can increase porosity and reduce mechanical strength. On the other hand, proper curing and adjustment of moisture and temperature conditions play an important role in optimizing the performance of these materials. Furthermore, the findings suggest that the utilization of these materials can be an effective step toward the development of low-carbon building materials and achieving environmental goals in the construction industry.

ARTICLE INFO

Receive Date: 23 February 2025

Revise Date: 01 May 2025

Accept Date: 04 June 2025

Keywords:

Magnesium oxide,
Concrete,
Mechanical properties,
Durability,
Cement.

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.499574.3627

*Corresponding author: Kianoosh Samimi

Email address: k_samimi@sbu.ac.ir

مطالعه مروری خواص مکانیکی و دوامی مخلوط‌های بر پایه اکسید منیزیم جهت پیشبرد سیستم‌های کم کربن در صنعت ساخت و ساز

زینب عبدوس^۱، کیانوش صمیمی^{۲*}، محمدرضا حافظی^۳، مهیار پاکان^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهیدبهشتی، تهران، ایران.

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۳- دانشیار، دانشکده معماری و شهرسازی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

۴- دکتری، دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط‌زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران.

چکیده

سیمان یکی از پرکاربردترین مصالح ساختمانی است که فرآیند تولید آن به انتشار دی‌اکسید کربن منجر می‌گردد. این انتشار ناشی از تجزیه کربنات کلسیم در دماهای بالا (حدود ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد) است که نقش بسزایی در تولید گازهای گلخانه‌ای ناشی از صنعت ساخت‌وساز دارد. لذا اخیراً به منظور کاهش ردپای کربن و توسعه مصالح پایدار، استفاده از اکسید منیزیم (MgO) به‌عنوان جایگزینی با پتانسیل بالا از سوی محققین مطرح شده است. این ماده با جذب دی‌اکسید کربن، تشکیل محصولات هیدراتاسیون، کربناته پایدار و کاهش دمای کلسیناسیون، توانسته توجه محققان مهندسی عمران را به خود جلب کند. در این مطالعه مروری، روش‌های تولید اکسید منیزیم و کاربردهای آن و همچنین تأثیر MgO بر خواص مکانیکی و دوام مخلوط‌های سیمانی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، این مقاله با تحلیل نتایج پژوهش‌های انجام‌شده، چالش‌ها و فرصت‌های استفاده از MgO را شناسایی کرده و راهکارهایی برای بهبود طراحی مخلوط‌های سیمانی مبتنی بر MgO ارائه می‌دهد. یافته‌ها نشان می‌دهد که استفاده از MgO، به‌ویژه در مقادیر بهینه، می‌تواند بهبود قابل‌توجهی در خواص مکانیکی و دوام مواد سیمانی ایجاد کند. با این حال، مقادیر بالای MgO و واکنش‌پذیری ناکافی آن می‌تواند موجب افزایش تخلخل و کاهش مقاومت مکانیکی شود. از سوی دیگر، عمل‌آوری مناسب و تنظیم شرایط رطوبتی و حرارتی نقش مهمی در بهینه‌سازی عملکرد این مواد ایفا می‌کند. علاوه بر این، یافته‌ها نشان می‌دهد که بهره‌گیری از این مواد می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه مصالح ساختمانی کم‌کربن و دستیابی به اهداف زیست‌محیطی در صنعت ساخت‌وساز به شمار آید.

کلمات کلیدی: اکسید منیزیم، بتن، خواص مکانیکی، دوام، سیمان.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2025.499574.3627	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2025.499574.3627	۱۴۰۴/۱۲/۲۹	۱۴۰۴/۰۳/۱۴	۱۴۰۴/۰۳/۱۴	۱۴۰۴/۰۲/۱۱	۱۴۰۳/۱۲/۰۵
*نویسنده مسئول: کیانوش صمیمی						
پست الکترونیکی: k_samimi@sbu.ac.ir						

۱- مقدمه

یکی از چالش‌های بزرگ محیط‌زیستی در عصر حاضر، افزایش چشمگیر غلظت دی‌اکسید کربن در جو است. این پدیده، که عمدتاً از فعالیت‌های انسانی سرچشمه می‌گیرد، به تغییرات گسترده و غیرقابل پیش‌بینی در الگوهای آب و هوایی منجر شده و تعادل زیست‌محیطی را به شدت مختل کرده است. صنعت ساخت و ساز یکی از عوامل مهم در این افزایش به شمار می‌آید که در این بین فعالیت‌هایی نظیر تولید سیمان سهم قابل توجهی در انتشار دی‌اکسید کربن را دارد [۱]. صنعت سیمان به‌تنهایی حدود ۸ درصد از انتشار گازهای گلخانه‌ای صنعتی را تشکیل می‌دهد [۲، ۳]. در این میان، ایران به‌عنوان یکی از تولیدکنندگان بزرگ سیمان در جهان شناخته می‌شود و در سال ۲۰۲۱ رتبه هفتم را در این زمینه به خود اختصاص داده است [۴]. همچنین انتظار می‌رود مصرف جهانی سیمان تا سال ۲۰۲۵ به حدود ۸/۴ گیگاتن در سال افزایش یابد [۵]. برای تولید هر تن سیمان حدود ۱/۷ تن سنگ آهک به‌عنوان ماده اولیه مصرف می‌شود و تقریباً ۹۰۰ کیلوگرم دی‌اکسید کربن به جو آزاد می‌شود [۶، ۷]. این میزان انتشار عمدتاً از دو فرآیند کلیدی ناشی می‌شود: نخست، فرآیند تکلیس سنگ آهک که در آن سنگ آهک (CaCO_3) به آهک (CaO) و دی‌اکسید کربن (CO_2) تجزیه می‌شود و به‌تنهایی ۶۰ درصد از این انتشار را تشکیل می‌دهد. دوم، سوزاندن سوخت‌های فسیلی برای تأمین حرارت کوره‌های دوار تا دمای ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد جهت تولید کلینکر که ۳۰ درصد دیگر از انتشار را شامل می‌شود [۸]. این فرایند نه تنها به منابع طبیعی آسیب می‌زند، بلکه به گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی نیز دامن می‌زند [۹، ۱۰]. بر اساس مطالعات صورت گرفته در دانشگاه آکسفورد [۱۱] پیش‌بینی می‌شود که انتشار کربن جهانی تا ۵۰ سال آینده به دو تریلیون تن خواهد رسید و دمای زمین را حدود ۴ درجه سانتی‌گراد افزایش خواهد داد. این افزایش دما، تهدیدی جدی برای حیات بر روی زمین است و عواقب ویرانگری مانند افزایش سطح آب دریاها، وقوع حوادث طبیعی شدید و از بین رفتن بسیاری از گونه‌های زیستی را به دنبال خواهد داشت. بنابراین، کاهش تولید و مصرف سیمان و یافتن جایگزین‌های سازگار با محیط‌زیست برای ساخت‌وساز، از جمله اقدامات ضروری برای مقابله با تغییرات آب و هوایی است. در حال حاضر، سه استراتژی کلیدی در سطح جهانی برای کاهش ردپای کربن صنعت سیمان در حال پیاده‌سازی است: (۱) جایگزینی بخشی از سیمان با مواد کم‌کربن: این رویکرد شامل استفاده از مواد جایگزین مانند خاکستر بادی، سرباره یا پوزولان‌ها است که به دلیل انرژی و کربن پایین‌تر در فرآیند تولید، نقش مهمی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای ایفا می‌کنند، (۲) بهبود بهره‌وری انرژی با استفاده از مواد اولیه جایگزین: از طریق استفاده از مواد و سوخت‌های جایگزین و فناوری‌های نوین، مصرف انرژی در فرآیند تولید بهینه شده و به کاهش انتشار دی‌اکسید کربن کمک می‌شود و (۳) توسعه فرمولاسیون‌های جدید سیمان با مصرف انرژی و کربن کمتر، مانند سیمان‌های منیزیم و اکسید پذیر (MgO) که اخیراً توسعه یافته‌اند [۱۲، ۱۳]. استفاده از اکسید منیزیم (MgO) در تولید سیمان، به دلیل مزایای متعدد آن، توجه بسیاری از محققان و صنعتگران را به خود جلب کرده است. این ماده نه تنها می‌تواند انتشار گازهای گلخانه‌ای را به‌طور قابل توجهی کاهش دهد، بلکه به‌عنوان یک جاذب طبیعی دی‌اکسید کربن عمل می‌کند و کربن را به‌صورت پایدار در قالب کربنات تثبیت می‌کند. چنین قابلیت‌هایی امکان ایجاد یک چرخه کربنی پایدار را فراهم می‌کند که در آن کربن آزاد شده به‌جای ورود به جو، بازیابی و ذخیره می‌شود. این فرآیند به‌عنوان یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش تأثیرات اقلیمی صنعت سیمان مطرح است. علاوه بر این، استفاده از MgO باعث کاهش هزینه‌های تولید و افزایش سرعت ساخت‌وساز می‌شود [۱۴]. به دلیل کاهش نیاز به دمای بالا در فرآیند تولید، مصرف انرژی کاهش می‌یابد که این امر، هزینه‌ها و تأثیرات زیست‌محیطی را به حداقل می‌رساند. خاصیت جذب دی‌اکسید کربن توسط MgO می‌تواند در شرایط مختلف بهینه‌سازی شود، به‌طوری‌که برآوردها نشان می‌دهد این رویکرد قادر است سالانه ۲ تا ۳ گیگا تن دی‌اکسید کربن را از جو حذف کند. در نتیجه، این ماده پتانسیل بالایی برای جایگزینی سیمان‌های سنتی و کاهش تأثیرات مخرب صنعت ساخت و ساز بر محیط‌زیست دارد [۱۵]. بسیاری از سیمان‌های جایگزین، آن‌چنان که انتظار می‌رود، در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مؤثر نیستند (شکل ۱) و گزینه‌هایی که پتانسیل بالایی در این زمینه دارند، به ندرت یافت می‌شوند. در این میان، سیمان سیلیکات منیزیم با توانایی حذف کامل ردپای کربن، به‌عنوان یک راهکار امیدوارکننده مطرح است. با این حال، دسترسی محدود به معادن سیلیکات منیزیم که در اعماق زمین قرار دارند، توسعه و کاربرد گسترده‌ی این نوع سیمان را با چالش مواجه ساخته است.



شکل ۱: مقایسه چسبنده های جایگزین در حال توسعه [۲].

افزودن MgO به مواد سیمانی از دو روش اصلی انجام می‌شود که هر کدام کاربردها و مزایای خاص خود را دارند. روش اول شامل مخلوط کردن MgO با کلینکر برای تولید سیمان‌های با محتوای بالای منیزیم است. این نوع سیمان‌ها در کاربردهای بتن نسوز بسیار مفید هستند. به‌طور خاص، در سیستم‌های نسوز مانند Al_2O_3 -MgO، زمانی که MgO در دماهای بالای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با آلومینا واکنش می‌دهد، فاز اسپینل درجا ($MgAl_2O_4$) تشکیل می‌شود. تشکیل اسپینل درجا یکی از ویژگی‌های کلیدی این سیستم است که آن را نسبت به روش‌های دیگر متمایز می‌کند. در این فرآیند، به‌جای استفاده از اسپینل پیش‌ساخته، واکنش MgO و آلومینا در شرایط عملیاتی منجر به ایجاد اسپینل مستحکم در داخل ساختار بتن می‌شود. این اسپینل درجا مزایایی چون چسبندگی بهتر به ماتریس سیمانی و کاهش حفره‌های میکروسکوپی را ارائه می‌دهد، که در نهایت منجر به افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ سرباره‌های مذاب، شوک‌های حرارتی، و تخریب‌های ناشی از واکنش‌های شیمیایی می‌شود [۱۶، ۱۷]. روش دوم شامل تولید MgO از کلسیناسیون منیزیت ($MgCO_3$) و سپس افزودن آن به بتن به‌عنوان یک ماده چسبنده است [۱۷]. وقتی MgO به‌عنوان چسبنده استفاده می‌شود، ابتدا هیدراته شده و $Mg(OH)_2$ تشکیل می‌دهد (مطابق با معادله ۱). در ادامه، این ترکیب با فرآیند کربناتاسیون (مطابق با معادله ۲) به کربنات‌های هیدراته منیزیم تبدیل می‌شود. این نوع چسبنده برای جایگزینی بخشی از سیمان پرتلند طراحی شده است و مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی از جمله کاهش انتشار دی‌اکسید کربن را فراهم می‌کند [۱۸].



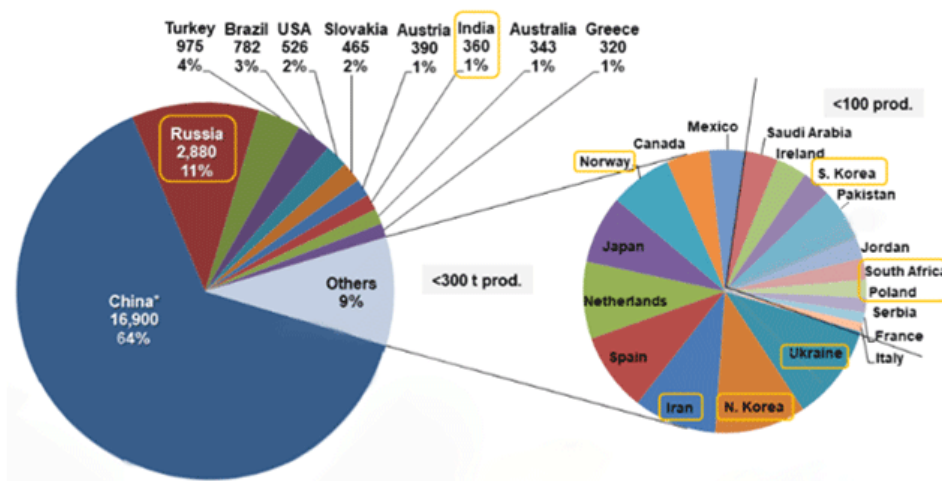
خواص مواد سیمانی مبتنی بر اکسید منیزیم مانند تشکیل محصولات هیدراتاسیون و کربناتاسیون، ساختار داخلی (میکروساختار) و توسعه مقاومت، به‌شدت تحت تأثیر عوامل مختلفی قرار دارد. این عوامل شامل واکنش‌پذیری ذرات MgO، نسبت آب به سیمان و شرایط عمل‌آوری از جمله دما، رطوبت نسبی و غلظت دی‌اکسید کربن (CO_2) هستند [۱۹، ۲۰]. تحقیقات اخیر عمدتاً بر بررسی خواص مکانیکی و دوام مواد سیمانی حاوی اکسید منیزیم (MgO) متمرکز شده است. با وجود این پیشرفت‌ها، هنوز بررسی جامع و سیستماتیک در مورد تأثیر ویژگی‌های ذاتی MgO و تعامل آن با سایر پارامترهای سیمانی انجام نشده است.

بنابراین هدف از این پژوهش، ارائه یک مرور جامع و ساختارمند بر روی خواص MgO و تأثیر آن بر عملکرد مواد سیمانی از جمله ملات‌ها و بتن است. در این بررسی، ابتدا به بررسی فرآیند تولید MgO، دمای کلسیناسیون و واکنش‌پذیری آن پرداخته می‌شود. سپس، تأکید بر نقش MgO در بهبود یا کاهش خواص مکانیکی مانند مقاومت فشاری، خمشی و کششی، مدول الاستیسیته و همچنین رفتار دوام از جمله

کربناته شدن و نفوذ یون کلرید خواهد بود. با ارائه این مرور جامع، می‌توان به درک بهتری از پتانسیل استفاده از مواد سیمانی حاوی MgO به‌عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند در شرایط مختلف کاربردی دست یافت. همچنین، با تحلیل نتایج مطالعات پیشین، می‌توان به تعیین درصد بهینه جایگزینی MgO در مخلوط‌های سیمانی و شناسایی انواع مناسب برای کاربردهای خاص پرداخت. در نهایت، انتظار می‌رود این بررسی به‌عنوان یک رویکرد برای محققان، مهندسان و صنعتگران فعال در زمینه مواد ساختمانی مورد استفاده قرار گیرد و به پیشرفت دانش در این حوزه کمک شایانی نماید.

۲- تولید منیزیم اکسید و کاربردها

منیزیم هشتمین عنصر فراوان در پوسته زمین است و حدود ۲/۳ درصد از وزن آن را تشکیل می‌دهد. این عنصر در انواع مختلف سازندهای سنگی مانند دولومیت، منیزیت و سیلیکات یافت می‌شود. همچنین منیزیم سومین عنصر پرمصرف در آب دریا است که غلظتی نزدیک به ۱۳۰۰ پی‌پی‌ام دارد. تولید جهانی اکسید منیزیم (MgO) در حال حاضر سالانه ۲۹ میلیون تن است (طبق آمار USGS در سال ۲۰۱۲)، در حالی که تولید سیمان پرتلند (OPC) بیش از ۲/۶ میلیارد تن است. شکل ۲ توزیع ذخایر منیزیت در سراسر جهان را نشان می‌دهد. هزینه تولید MgO کلسینه شده (منیزیم راکتیو) حدود ۲۰۰ پوند به ازای هر تن است، در حالی که هزینه تولید OPC حدود ۷۰ پوند به ازای هر تن می‌باشد. فرآیند تولید سیمان، که به طور عمده در صنایع سیمان‌سازی اجرا می‌شود، به فرآیند خشک معروف است و مراحل اصلی آن شامل آسیاب کردن و همگن‌سازی مواد اولیه برای تهیه مخلوط خام، کلسینه کردن مخلوط خام در کوره‌های دوار برای تولید کلینکر، خنک‌سازی کلینکر تولید شده، آسیاب کردن کلینکر و افزودن گچ برای تولید سیمان نهایی است. سپس سیمان بسته‌بندی شده و ارسال می‌شود. این فرآیند به مقدار زیادی انرژی نیاز دارد و به دلیل دمای بالا (حدود ۱۴۰۰ درجه سانتی‌گراد)، باعث تولید گازهای آلاینده زیادی می‌شود. این در حالی است که اکسید منیزیم (MgO) عمدتاً از کلسینه کردن منیزیت در فرآیندی مشابه با تولید آهک از سنگ آهک تولید می‌شود. بخش کمتری از تولید MgO در جهان از منابع آب دریا، آب نمک یا دیگر منابع تأمین می‌شود [۱۵].



شکل ۲: توزیع ذخایر منیزیت در سراسر جهان را نشان می‌دهد.

۲-۱ روش‌های تولید

۱. اکسید منیزیم (MgO) ماده‌ای است که به‌طور طبیعی به شکل خالص یافت نمی‌شود و به همین دلیل از سایر مواد معدنی استخراج می‌شود. یکی از مهم‌ترین منابع تولید MgO، ماده معدنی منیزیت ($MgCO_3$) است که ذخایر بسیار گسترده‌ای در سراسر جهان دارد.

با توجه به برآوردها، حدود ۱۲ میلیارد تن منیزیت قابل استخراج در جهان وجود دارد. واکنش شیمیایی این فرآیند به صورت زیر قابل نمایش است:



۲. از روش‌های دیگر تولید اکسید منیزیم، استخراج آن از منابع آبی مانند آب دریا و آب‌های شور داخلی است. در این روش، از فراوانی بالای یون‌های منیزیم در آب دریا (با غلظتی حدود ۱/۲۹ تا ۱/۳۵ گرم بر لیتر) بهره می‌برند. با افزایش pH آب دریا یا آب شور به حدود ۱۰/۵ از طریق افزودن یک باز قوی مانند آهک هیدراته (Ca(OH)₂)، هیدروکسید منیزیم (Mg(OH)₂) به صورت رسوب جامد از محلول جدا می‌شود. در مرحله بعد، کلرید منیزیم (MgCl₂) به صورت محلول باقی می‌ماند. در آخر، رسوب هیدروکسید منیزیم خشک شده و با حرارت دادن به آن، آب موجود در ترکیب تبخیر شده و اکسید منیزیم خالص (MgO) به دست می‌آید [۱۸]. واکنش‌های شیمیایی این فرآیند به صورت زیر قابل نمایش است:



۳. اکسید منیزیم علاوه بر روش‌های قبلی، می‌تواند از طریق کلسیناسیون بروسیت (یک ماده معدنی حاوی هیدروکسید منیزیم) نیز تولید شود. بروسیت اغلب از رسوبات ترکیبات مختلف منیزیم به دست می‌آید. دمای کلسیناسیون نقش مهمی در خواص اکسید منیزیم تولید شده دارد. بر اساس این دما، اکسید منیزیم به چندین نوع تقسیم می‌شود. در دمای بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، کربنات منیزیم موجود در بروسیت به اکسید منیزیم تبدیل می‌شود. در این بازه دمایی، ساختار سطحی اکسید منیزیم به تدریج بهبود می‌یابد و نقص‌های کمتری خواهد داشت. با افزایش دما به بالای ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد، این فرآیند بازسازی سطح ادامه می‌یابد. اما در دماهای بالاتر از ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد، ذرات اکسید منیزیم ذوب شده و به هم می‌چسبند. این نوع اکسید منیزیم که به اکسید منیزیم مرده سوز معروف است، ساختار بسیار پایدار و کم واکنشی دارد. از طرف دیگر، اکسید منیزیمی که در دمای پایین‌تر (بین ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد) تولید می‌شود، به دلیل وجود نقص‌های سطحی بیشتر، واکنش‌پذیری بالاتری دارد. به همین دلیل، به آن اکسید منیزیم سبک سوز یا واکنش‌پذیر می‌گویند. این نوع اکسید منیزیم، به عنوان ماده اولیه اصلی در تولید انواع سیمان‌های منیزیمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، در تولید سیمان فسفات منیزیم از اکسید منیزیم مرده سوز بهره گرفته می‌شود [۲۱، ۲۲].

همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد، با افزایش دمای کلسیناسیون، واکنش‌پذیری اکسید منیزیم کاهش می‌یابد. دلیل اصلی این کاهش، کاهش سطح ویژه و افزایش اندازه ذرات اکسید منیزیم است. به عبارت دیگر، با افزایش دما، ذرات اکسید منیزیم درشت‌تر شده و سطح تماس آن‌ها با محیط اطراف کمتر می‌شود. در نتیجه، امکان واکنش با سایر مواد کاهش یافته و واکنش‌پذیری کاهش می‌یابد. این پدیده به وضوح در میکروگراف‌های سطح اکسید منیزیم در دماهای مختلف (شکل ۳) قابل مشاهده است. همچنین، بررسی تأثیر زمان و دمای پخت بر روی واکنش‌پذیری منیزیم حاصل از یک نوع منیزیت خاص، نشان می‌دهد که با افزایش دما و زمان پخت، واکنش‌پذیری کاهش می‌یابد. این کاهش واکنش‌پذیری با استفاده از پارامتر $X_{corrected}$ تأیید شده است که میزان تجزیه منیزیت از سنگ معدن را نشان می‌دهد، (شکل ۴). این نتایج نشان می‌دهند که دما و زمان پخت، دو عامل مؤثر بر واکنش‌پذیری اکسید منیزیم هستند.

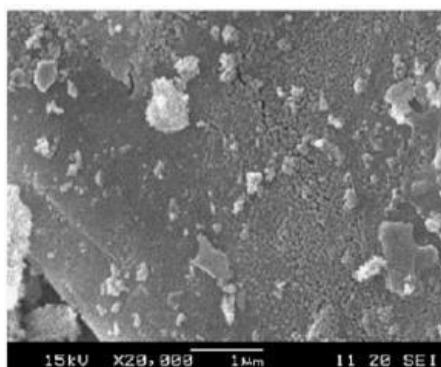
تاکنون، روش تجزیه نمک‌های منیزیم به عنوان ساده‌ترین راه برای تولید اکسید منیزیم در نظر گرفته می‌شد و در نتیجه، مطالعات محدودی بر روی روش‌های دیگر تولید این ماده صورت گرفته است. با این حال، یکی از محدودیت‌های اصلی این روش، عدم توانایی در کنترل دقیق شکل و اندازه ذرات اکسید منیزیم تولید شده است. برای رفع این محدودیت، پرادیتا^۱ و همکاران [۲۳] روشی نوین مبتنی بر پاشش

¹ Pradita T et al.

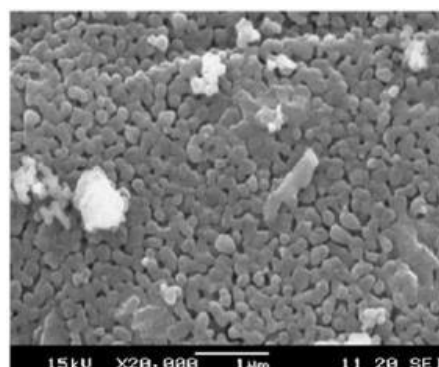
التراسونیک پیرولیز را برای سنتز اکسید منیزیم پیشنهاد کردند. در این روش، با استفاده از دو پیش ماده مختلف منیزیم (استات منیزیم و نیترات منیزیم)، موفق به تولید ذرات اکسید منیزیم با مورفولوژی‌های متفاوت شدند. نتایج این مطالعه نشان داد که ذرات حاصل از پیش ماده استات منیزیم دارای شکل نامنظم و توخالی بوده درحالی که ذرات حاصل از نیترات منیزیم شکل کروی و توخالی داشتند.

جدول ۱: خواص و کاربردهای منیزیم اکسید

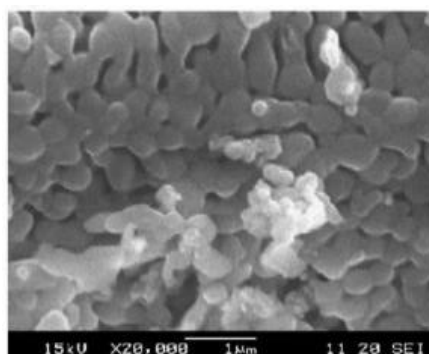
کاربردها	واکنش پذیری	دمای کلسیناسیون (°C)	درجه
کشاورزی، کاتالیست، مصالح ساختمانی	بالا	۷۰۰-۱۰۰۰	سوخته سبک
مواد ساینده، سرامیک	پایین	۱۰۰۰-۱۵۰۰	سوخته سخت
مواد نسوز، عایق الکتریکی	بسیار پایین	۱۵۰۰-۲۰۰۰	مرده سوز
مواد نسوز، عایق الکتریکی	بسیار پایین	>۲۸۰۰	ذوب شده



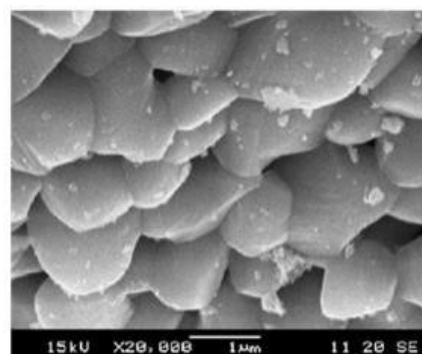
۹۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت



۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱ ساعت

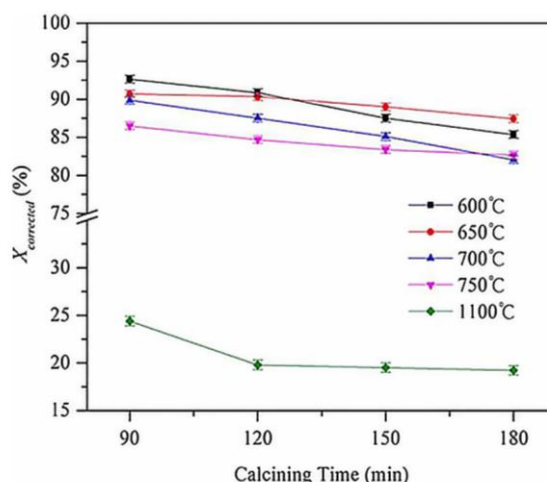


۱۱۰۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۱/۵ ساعت



۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد برای ۱ ساعت

شکل ۳: تصاویر SEM سطح MgO تحت دمای مختلف کلسینه [۲۴].



شکل ۴: نسبت تبدیل $MgO (X_{corrected})$ در دماها و زمان سوختن مختلف [۲۵].

۳- خواص منیزیم

۳-۱- خواص مکانیکی

جدول ۲ خواص مکانیکی خمیر سیمان، ملات و مخلوط بتن تولید شده با انواع مختلف MgO در سوابق موضوع را نمایش می‌دهد. مطالعات متعدد نشان داده‌اند که افزایش مقدار اکسید منیزیم (MgO) در سیمان، به‌طور معمول با کاهش مقاومت فشاری و خمشی بتن همراه است [۲۶-۲۹]. در ادامه، بیشترین و کمترین مقاومت‌های مکانیکی نمونه‌های خمیر، ملات و بتن در سن ۲۸ روز معرفی شده است. در میان نمونه‌های بتنی بررسی شده، سنگ^۲ و همکاران [۳۰] بالاترین مقاومت را با مقدار ۵۸ مگاپاسکال در شرایطی به دست آوردند که ترکیبی از MgO ، میکروسیلیس و بذر هیدرومگنیزیت تحت عمل‌آوری با CO_2 استفاده شد. این ترکیب با تشکیل فازهای کربناته‌ی پایدار و افزایش تراکم ریزساختار، موجب بهبود چشمگیر مقاومت مکانیکی شد. در مقابل، تران^۳ و همکاران [۳۱] پایین‌ترین مقاومت را با مقدار ۴۴ مگاپاسکال گزارش کردند که به عمل‌آوری بدون کربناتاسیون و ساختار متخلخل تر $M-S-H$ نسبت داده شد. در نمونه‌های ملاتی اسکات^۴ و همکاران [۳۲]، مخلوط $CM-RS$ (ترکیب منیزیا تجاری و سیلیکای بازیابی شده) با دستیابی به مقاومت ۴۹/۱ مگاپاسکال، به عنوان مقاوم‌ترین ترکیب شناسایی شد؛ که این به تشکیل گسترده‌ی فاز $M-S-H$ ناشی از واکنش‌پذیری بالای سیلیکای آمورف و ایجاد ریزساختاری متراکم نسبت داده می‌شود. از سوی دیگر، دهاکال^۵ و همکاران [۳۳] در بررسی خود پایین‌ترین مقاومت را با مقدار ۳۷ مگاپاسکال ثبت کردند؛ که این موضوع به وجود تخلخل بالاتر، هیدراتاسیون کند و در نتیجه تشکیل ساختاری ضعیف‌تر، با وجود حضور فازهای هیدروتالسیت و $M-S-H$ نسبت داده می‌شود. در مطالعه‌ی شاه و اسکات^۶ [۳۴]، در میان نمونه‌های خمیری بررسی شده، خمیر (M60MK40) با ۶۰٪ منیزیم اکسید و ۴۰٪ متاکائولن، مقاومت ۴۵ مگاپاسکالی را نشان داد. این به تشکیل فازهای مقاوم و کاهش محسوس تخلخل نسبت داده شد. اما در تحقیق دیگر شاه^۷ و همکاران [۳۵]، نمونه‌ی MK40 با واکنش‌پذیری کمتر MgO و تخلخل بالاتر، کمترین مقاومت را با مقدار ۲۷ مگاپاسکال داشت. بنابراین خواص فیزیکی و شیمیایی مواد اولیه، تشکیل فازهای مقاوم و کنترل تخلخل، عوامل کلیدی تعیین‌کننده‌ی مقاومت مکانیکی نمونه‌ها هستند.

² Singh G.B et al.

³ Tran H.A Scott

⁴ Allan Nye S et al.

⁵ Dhakal M et al.

⁶ Shah V. and A. Scott.

⁷ Shah V. and A. Scott.

م^۸ و همکاران در مطالعه خود [۲۷] به بررسی تأثیر افزودن اکسید منیزیم (MgO) بر مقاومت فشاری ملات‌ها پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که با افزایش مقدار MgO در ملات، مقاومت فشاری آن به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در ملات‌هایی که ۵٪ و ۸٪ MgO به آن‌ها اضافه شده بود، کاهش مقاومت فشاری به ترتیب ۱۳٪ و ۱۹٪ نسبت به مخلوط شاهد مشاهده شد. محققان علت اصلی این کاهش را کاهش تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) دانستند که یکی از مهم‌ترین ترکیبات ایجاد کننده مقاومت در بتن است. در مطالعه دیگری، گونسالوس^۹ و همکارانش [۳۶] مقادیر بسیار بیشتری از MgO را به ملات‌ها اضافه کردند. آن‌ها دریافتند که با افزایش مقدار MgO، علاوه بر کاهش مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته ملات‌ها نیز کاهش می‌یابد. در سن ۲۸ روز، استفاده از MgO باعث کاهش مقاومت فشاری بین ۱۲٪ تا ۲۷٪ و کاهش مدول الاستیسیته بین ۳٪ تا ۱۲٪ بود. نویسندگان این روند را با نیاز آبی بالاتر مخلوط‌های با MgO توضیح دادند که باعث رقیق شدن سیمان به دلیل آب اضافی می‌شود. این کاهش در مقاومت و مدول الاستیسیته به دلیل افزایش نیاز آبی مخلوط‌های حاوی MgO و تشکیل ساختاری متخلخل‌تر است. به‌طور کلی، نتایج هر دو مطالعه نشان می‌دهد که افزودن MgO به ملات‌ها، به‌ویژه در مقادیر بالا، منجر به کاهش قابل توجه مقاومت فشاری و سایر خواص مکانیکی می‌شود. علت اصلی این کاهش، کاهش تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته و جایگزینی آن با هیدروکسید منیزیم (Mg(OH)₂) است که نقش کمتری در ایجاد مقاومت دارد.

در سال‌های اخیر، پژوهشگران به‌جای بخشی از سیمان پرتلند در بتن، از مواد جایگزینی مانند پوزولان‌های طبیعی (مانند خاکستر برنج)، پلیمرها و الیاف استفاده کرده‌اند [۳۷-۳۹]. هدف از این جایگزینی، کاهش مصرف سیمان پرتلند و در نتیجه کاهش آلودگی محیط‌زیست است. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از مخلوط‌های سیمانی با چند جزء می‌تواند تا ۶۰ درصد آلودگی ناشی از تولید سیمان پرتلند را کاهش دهد. عبدالقادر و التباع^{۱۰} [۴۰] در مطالعه‌ای، مقاومت فشاری سیمان پرتلند معمولی (OPC) (۳۰-۷۵٪)، خاکستر بادی (FA) (۱۵-۲۵٪)، سرباره کوره بلند گرانول شده (GGBS) (۴۵-۶۰٪) و MgO (۵-۱۰٪) را در سنین ۳، ۷، ۱۸ و ۵۶ روز عمل‌آوری بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش سن، مقاومت فشاری این ملات‌ها به تدریج افزایش می‌یابد. در ۲۸ روز، ۲۰ درصد کاهش نسبت به مخلوط شاهد مشاهده شد. باین‌حال، در ۵۶ روز، مقدار مقاومت فشاری در خمیرهای پایدار تنها ۷ درصد کمتر از مقدار به دست آمده در مخلوط شاهد بود. در مطالعه دیگری، ماورولیدو^{۱۱} و همکاران [۴۱] به بررسی تأثیر استفاده هم‌زمان از خاکستر بادی، متاکائولن و اکسید منیزیم در بتن پرداختند. آن‌ها دریافتند که افزایش مقدار اکسید منیزیم منجر به کاهش اندکی در مقاومت فشاری بتن می‌شود. علت این کاهش، افزایش تخلخل بتن به دلیل تشکیل حفره‌های کوچک در آن است. ژانگ^{۱۲} و همکاران [۴۲] اثر متاکائولن (MK) و اکسید منیزیم (MgO) بر مقاومت خمشی بتن با عملکرد فوق‌العاده بالا (UHPC) را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که با افزایش تدریجی مقدار MgO، مقاومت فشاری UHPC ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد. حداکثر مقاومت فشاری در نسبت جایگزینی ۵٪ مشاهده می‌شود. این بهبود اولیه در مقاومت فشاری احتمالاً به دلیل پر شدن حفرات و ایجاد یک ماتریس متراکم‌تر است. باین‌حال، افزایش بیش از حد MgO می‌تواند منجر به کاهش مقاومت فشاری شود که ممکن است به دلیل توزیع نامناسب MgO در ماتریس بتن یا واکنش‌های جانبی ناخواسته باشد.

طبق تحقیقات ژانگ و همکاران، مشابه مقاومت فشاری، مقاومت خمشی UHPC ابتدا با افزایش MgO افزایش و سپس کاهش می‌یابد. حداکثر مقاومت خمشی در نسبت جایگزینی ۱۰٪ حاصل می‌شود. این تفاوت نشان می‌دهد که مکانیسم‌های کنترل‌کننده‌ی مقاومت خمشی پیچیده‌تر هستند. بهبود مقاومت خمشی در مقادیر کم MgO ممکن است به دلیل تشکیل محصولات هیدراتاسیون جدید باشد. نتایج نشان می‌دهند که افزودن مقدار مناسب MgO می‌تواند به بهبود هم‌زمان مقاومت فشاری و خمشی کمک کند. با این‌حال، مقدار بهینه MgO وجود دارد که در آن خواص مکانیکی بتن به حداکثر می‌رسد. فراتر رفتن از این مقدار بهینه می‌تواند منجر به کاهش خواص مکانیکی شود. عوامل مختلفی مانند نوع MgO، اندازه ذرات و روش اختلاط بر مقدار بهینه تأثیر می‌گذارند.

بر اساس گزارش سکوپرا^{۱۳} و همکاران [۴۳]، جایگزینی ۱۰٪ و ۲۰٪ از سیمان با خاکستر بادی (FA)، سبب کاهش مقاومت خمشی به ترتیب ۸٪ و ۱۸٪ شد. علاوه بر این، جایگزینی بخشی از سیمان با اکسید منیزیم (MgO) به میزان ۷٪ و ۱۵٪ منجر به کاهش قابل

⁸ Mo L et al.

⁹ Gonçalves T et al.

¹⁰ Abdalqader A. and A. Al-Tabbaa.

¹¹ Mavroulidou M et al.

¹² Zhang B et al.

¹³ Sequeira L et al.

توجه مقاومت خمشی به ترتیب ۲۷/۴٪ و ۳۷/۳٪ نسبت به مخلوط شاهد شد. در ملات‌های سه‌تایی، کاهش مقاومت خمشی کمتر از مقدار پیش‌بینی شده بود که نشان‌دهنده بهبود برخی خواص به دلیل ترکیب چندین ماده است. این بهبود احتمالاً به واکنش‌پذیری مکمل خاکستر بادی و ماده جایگزین سیمان (RC) و تشکیل ژل سیلیکات هیدرات منیزیم (M-S-H) در حضور MgO برمی‌گردد. به‌طور کلی، استفاده از مواد جایگزین در ملات‌های سیمانی می‌تواند به کاهش مصرف سیمان پرتلند و کاهش آلودگی محیط‌زیست کمک کند. انتخاب نوع و مقدار مناسب مواد جایگزین به عوامل مختلف بستگی دارد.

بر اساس جدول ۲، مقاومت مکانیکی مخلوط‌ها تحت تأثیر عواملی همچون نسبت آب به مواد، شرایط تولید، نوع و کیفیت پیش‌ماده‌ها، و استفاده از افزودنی‌ها قرار دارد. تنظیم دقیق این پارامترها می‌تواند به افزایش استحکام مکانیکی، کاهش تخلخل و بهبود عملکرد کلی مخلوط‌ها کمک کند. برنارد^{۱۴} و همکاران [۴۴]، به بررسی تأثیر ترکیبات مختلف آلومینا (Al) و منیزیم (Mg) بر مقاومت فشاری نمونه‌های سیمانی پرداختند. آن‌ها دریافتند که بهترین مقاومت فشاری مربوط به نمونه‌ی AMS^{۱۵} است که این نمونه حاوی مقدار متوسط آلومینا با نسبت $Mg/Al = 1/5$ و $Al/Si = 1$ و بدون هیدرومنیزیت بود. مقاومت بالای این نمونه ناشی از واکنش MgO و متاکائولن بود. وینیت شاه^{۱۶} و همکاران [۳۴] با استفاده از ترکیب‌هایی نظیر متاکائولن (MK)، دوده سیلیس (SF)، کربنات منیزیم (MC) و خاک کائولینیت خام (CC) به بهبود مقاومت فشاری سیمان‌های پایه منیزیم پرداختند. بر مبنای مطالعات آن‌ها، نمونه‌های حاوی ۶۰٪ MgO و ۴۰٪ متاکائولن (MK)، مقاومت فشاری به میزان تقریباً ۲۰٪ بیشتر از نمونه‌های حاوی دوده سیلیس (SF) از خود نشان دادند. همچنین، افزودن کربنات منیزیم (MC) به این ترکیب باعث بهبود مقاومت فشاری در سنین اولیه گردید. دلیل این افزایش مقاومت، تشکیل فازهای هیدروتالسیتی با ساختار حجیم و واکنش مؤثر MgO با سیلیکای متاکائولن است که باعث کاهش تخلخل و بهبود واکنش‌های هیدراتاسیون می‌شود. همچنین وینیت شاه^{۱۷} و همکاران [۳۵]، در تحقیقی دیگر، ترکیب بهینه‌ای از مواد مکمل سیمانی (SCM) برای دستیابی به مقاومت فشاری بالا در تمامی سنین توسعه یافت. محققان دریافتند که مخلوط ۵۰٪ متاکائولن (MK) و نسبت آب به سیمان ۰/۵، بیشترین مقاومت فشاری را دارد. این عملکرد به دلیل واکنش سریع‌تر متاکائولن، تشکیل فازهای مقاوم مانند M-S-H، کاهش تخلخل به‌واسطه محصولات هیدراتاسیون متراکم‌تر و افزایش محتوای آب متصل است. در مقایسه با مخلوط‌های حاوی دوده سیلیس (SF)، این ترکیب در سنین اولیه بهتر عمل کرد.

دهاکال^{۱۸} و همکاران [۳۳] تلاش کردند تا ویژگی‌های مکانیکی سیستم ملات MgO-SF (اکسید منیزیم-دوده سیلیس) را بهبود بخشند. هدف اصلی آن‌ها دستیابی به ترکیبی بود که بیشترین مقاومت فشاری ممکن را ارائه دهد. آن‌ها با استفاده از دوده سیلیس به‌عنوان یکی از اجزای اصلی و تنظیم نسبت‌های مولی MgO به SiO₂ (برابر با ۲/۲۴) و نسبت آب به مواد سیمانی (w/cm برابر با ۰/۳۵)، موفق به ثبت بالاترین مقاومت فشاری ۸۷ مگاپاسکال در این سیستم شدند. سونات^{۱۹} و همکاران [۴۵] به دنبال طراحی مخلوطی با عملکرد مکانیکی و دوام بالا بودند. ترکیب خاصی از سیمان منیزیم-سیلیکات-هیدرات (M-S-H) با نام SHMSHC^{۲۰} طراحی شد که با نسبت ۱:۱/۵ از اکسید منیزیم (MgO) و سیلیکای میکرو (MS) ساخته شده است. این ترکیب شامل ۴۰٪ ماده چسبنده و ۶۰٪ سنگدانه‌های درشت بوده و با نسبت آب به چسبنده ثابت ۰/۴ تولید شده است. برای بهبود سیالیت، ۲٪ هگزامتافسفات سدیم (NaHMP) و برای تقویت، ۲٪ الیاف میکروفیبر پلی‌وینیل الکل (PVA) به آن اضافه شده است. الیاف PVA با ایجاد پل‌زدن ترک‌ها و شکل‌گیری میکروتکرک‌های متعدد، مقاومت کششی را به حدود ۳ مگاپاسکال و کرنش کششی را به بیش از ۳٪ افزایش داده و مقاومت فشاری ۵۴/۳ مگاپاسکال در سن ۲۸ روزه را تضمین کرده است. این طرح، با مصرف کمتر انرژی و انتشار پایین‌تر کربن نسبت به سیمان پرتلند، گزینه‌ای پایدارتر بوده و امکان کاربردهای جدیدی را برای سیستم‌های M-S-H فراهم می‌کند.

در پژوهشی که توسط اسکات^{۲۱} و همکاران [۳۲] انجام شده، مشخص شد که جایگزینی بخشی از سیلیکا با سیلیکای بازیافتی در سیستم چسباننده MgO-SiO₂ منجر به افزایش قابل توجه مقاومت فشاری می‌شود. بر اساس نتایج، بهترین عملکرد زمانی در ترکیبی مشاهده

¹⁴ Bernard E et al.

¹⁵ Alumina-Magnesia-Silicate

¹⁶ Shah V. and A. Scott.

¹⁷ Shah V. and A. Scott.

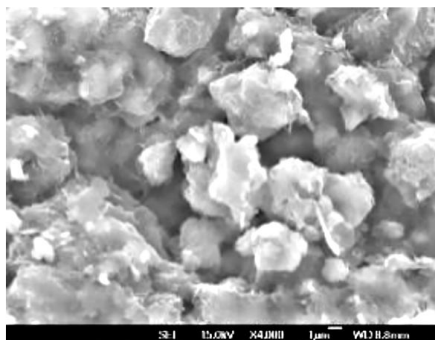
¹⁸ Dhakal M et al.

¹⁹ Sonat C et al.

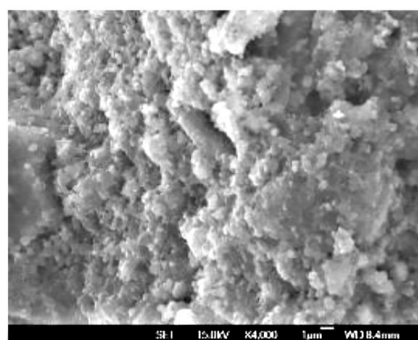
²⁰ Strain Hardening Magnesium-Silicate-Hydrate Composites

²¹ Allan Nye S et al.

شد که شامل ۵۰ درصد منیزیم اکسید تجاری و ۵۰ درصد سیلیکای بازیافت شده باشد. این ترکیب مقاومت فشاری را حدود ۶۰ درصد نسبت به طرحی که از دوده سیلیس تجاری با همان میزان منیزیم اکسید تجاری استفاده می‌کرد، افزایش داد. این بهبود به واکنش‌پذیری سریع‌تر سیلیکا بازیافتی و تشکیل سریع‌تر فاز مقاوم‌کننده M-S-H نسبت داده شد. نتایج نشان داد که مواد بازیافتی با تولید حرارت بیشتر طی هیدراتاسیون، مقاومت اولیه و نهایی را افزایش می‌دهند. بررسی محصولات هیدراتاسیون اکسید منیزیم تجاری و بازیافت‌شده در شکل ۵ با میکروسکوپ الکترونی (SEM) نشان می‌دهد که بلورهای هیدروکسید منیزیم در نمونه تجاری اندازه بزرگ‌تری دارند و ساختار آن‌ها کمتر فشرده است، در حالی که نمونه بازیافت‌شده دارای بلورهای کوچک‌تر و ساختاری فشرده‌تر است. این تفاوت به حضور سیلیس آمورف در نمونه بازیافت‌شده نسبت داده می‌شود که با اکسید منیزیم واکنش کرده و ژل هیدرات سیلیکات منیزیم (M-S-H) همگن تشکیل می‌دهد.



ب) اکسید منیزیم تجاری



الف) اکسید منیزیم بازیافت شده

شکل ۵: بررسی میکروسکوپی محصولات هیدراتاسیون حاصل از منابع مختلف اکسید منیزیم [۴، ۵]

در پژوهش سینگ^{۲۲} و همکاران [۳۰]، هدف اصلی ارزیابی تأثیر شرایط عمل‌آوری و استفاده از هسته‌زا بر روی تشکیل فازهای مختلف و افزایش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی منیزیم اکسید بوده است. نتایج نشان داد که افزودن ۱ درصد وزنی هیدرومگنیزیت به عنوان هسته‌زا، باعث تسریع در تشکیل فازهای مقاوم‌تر شده و در نهایت، مقاومت فشاری نمونه‌ها را پس از ۲۸ روز به ۵۶ تا ۶۰ مگاپاسکال رسانده است. دلیل اصلی مقاومت بالاتر، استفاده از هسته‌زایی و بهینه‌سازی ترکیب مواد بود. این مقاومت شامل نسبت آب به سیمان مناسب برای ایجاد تعادل میان فرآیند هیدراتاسیون و کربناتاسیون، افزایش درجه کربناتاسیون که منجر به کاهش تخلخل و افزایش چگالی شد، و همچنین اعمال شرایط عمل‌آوری کنترل‌شده با رطوبت و غلظت بالا بود که فرآیند تشکیل کربنات‌های مقاوم را تسریع کرد.

تران^{۲۳} و همکاران [۳۱]، به بررسی تأثیر فیلر کوارتز (Q10) بر مقاومت فشاری ترکیب خاصی از سیمان منیزیم-سیلیکات-هیدرات M-S-H پرداختند. هدف آن‌ها ارزیابی نقش فیلر کوارتز در بهبود تراکم و کاهش تخلخل چسباننده و مقایسه آن با سیمان پرتلند بود. نتایج نشان داد که بهترین عملکرد مربوط به ترکیب M-S-H با ۱۰ درصد فیلر کوارتز است که در ۲۸ روز به مقاومت فشاری ۴۴ مگاپاسکال و در ۹۰ روز به ۵۶ مگاپاسکال دست یافت. این بهبود ناشی از تراکم بیشتر و کاهش تخلخل، همراه با ایجاد همگنی بیشتر در چسباننده بود. متغیرهای آزمایش شامل نوع چسباننده، نسبت فیلر کوارتز، زمان عمل‌آوری (۷، ۲۸ و ۹۰ روز) و استفاده از فوق‌روان‌کننده برای بهبود کارایی بتن بودند. گونزالوز^{۲۴} و همکاران [۳۶]، به بررسی تأثیر جایگزینی MgO و ماسه بازیافتی (RCA) بر مقاومت فشاری بتن پرداختند. هدف آن‌ها ارزیابی اثر این جایگزینی‌ها بر ساختار و تراکم نمونه‌ها بود. نتایج نشان داد بهترین مقاومت فشاری در نمونه‌هایی به دست آمد که شامل ۱۰٪ MgO به عنوان جایگزین سیمان و ۵۰٪ RCA به جای ماسه سیلیسی بودند. کاهش درصد MgO و RCA در این طرح باعث کاهش نیاز به آب، کاهش تخلخل، و بهبود مقاومت شد.

²² Singh G.B et al.

²³ Tran H.A Scott

²⁴ Gonçalves T et al.

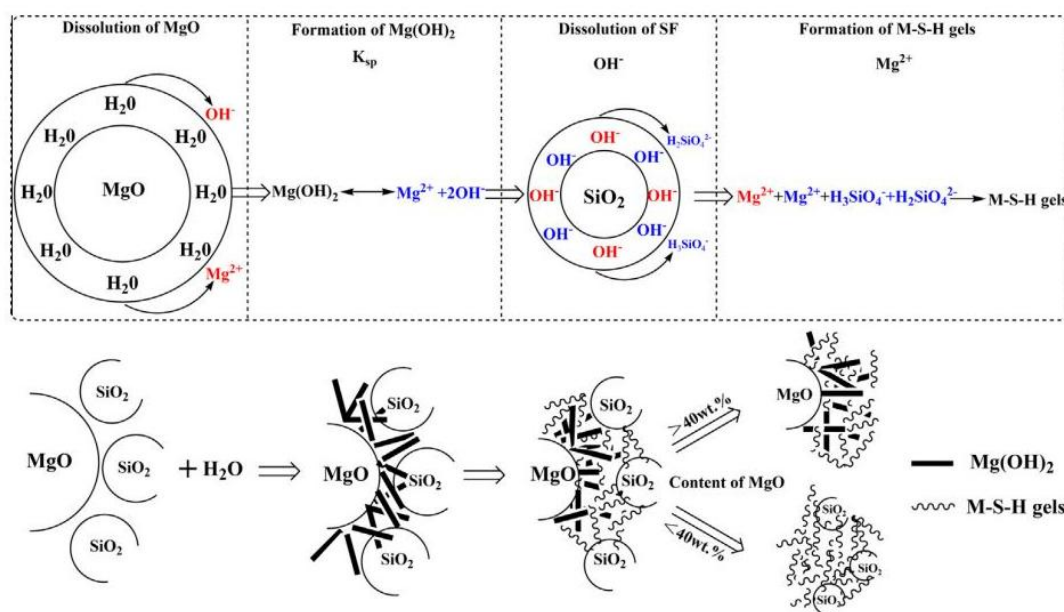
جدول ۲: خواص مکانیکی مواد سیمانی با MgO

منابع	نتایج بهترین مقاومت	دمای کیورینگ، رطوبت نسبی	نسبت آب به مواد چسباننده	سنگدانه یا الیاف	فوق روان کننده	مواد اصلی
[۴۴]	مقاومت فشاری ۹۱ روز: ۲۷ مگاپاسکال مقاومت خمشی ۹۱ روز: ۳/۵ مگاپاسکال مقاومت کششی: -	رطوبت نسبی ۹۸٪ دمای کیورینگ ۲۳ درجه سانتیگراد	۰/۹	ماسه با نسبت ۰/۵ تا ۳ درصد وزنی چسب	پلی کربوکسیلیک اتر (PCE) ۱/۵ تا ۳ درصد جرمی چسبنده	منیزیم اکسید (MgO)، میکرو سیلیس (MS)، متاکائولن (MK)، آلومینا
[۳۳]	مقاومت فشاری ۹۱ روز: ۵۲/۴ مگاپاسکال مقاومت خمشی: - مقاومت کششی: -	دمای کیورینگ ۲۲ درجه سانتیگراد	۰/۵۸-۰/۴۲	گرد سنگ خرد شده با اندازه اسمی ۴/۷۵ میلی متر و مدول نرمی ۳/۷۷	پلی کربوکسیلیک اتر (PCE)	منیزیم اکسید (MgO)، متاکائولن (MK)، دوده سیلیس (SF)، کرنات منیزیم (MC) و خاک کائولینیت خام (CC)
[۴۵]	مقاومت فشاری ۲۸ روز: ۵۴/۳ مگاپاسکال مقاومت خمشی: - مقاومت کششی ۲۸ روز: ۲/۹۳ مگاپاسکال	رطوبت نسبی ۹۵٪ دمای کیورینگ ۲۸ درجه سانتیگراد	۰/۴۵	الیاف میکروفیبر پلی وینیل الکل PVA	پلی کربوکسیلیک اثر (PCE)، هگزامتافسفات سدیم (NaHMP)	منیزیم اکسید (MgO)، میکروسیلیس (MS)
[۳۴]	مقاومت فشاری ۹۰ روز: ۶۰ مگاپاسکال مقاومت خمشی: - مقاومت کششی: -	دمای کیورینگ ۲۰ درجه سانتیگراد	۰/۴۵-۰/۴	پودر کوارتز (Q)	پلی کربوکسیلیک اثر (PCE)	منیزیم اکسید (MgO)، متاکائولن (MK)، دوده سیلیس (SF)، کرنات منیزیم (MC) و خاک کائولینیت خام (CC)
[۳۵]	مقاومت فشاری ۹۰ روز: ۴۷ مگاپاسکال مقاومت خمشی: - مقاومت کششی: -	رطوبت نسبی ۹۵٪ دمای کیورینگ ۲۰ درجه سانتیگراد	۰/۵	-	پلی کربوکسیلیک اثر (PCE)	منیزیم اکسید (MgO)، دوده سیلیس (SF)، متاکائولن (MK)
[۳۲]	مقاومت فشاری ۲۸ روز: ۲۲ مگاپاسکال مقاومت خمشی: - مقاومت کششی: -	رطوبت نسبی ۶۰٪ دمای کیورینگ ۲۰ درجه سانتیگراد	۰/۷۵	ماسه با نسبت ثابت ۱:۳ چسبنده به ماسه	-	منیزیم اکسید باز یافتی از الیوم (RM) و منیزیم اکسید تجاری (CM)، دوده سیلیس (SF) نوع باز یافتی از الیوم (RS)، دوده سیلیس تجاری (SF)
[۳۱]	مقاومت فشاری ۹۰ روز: ۵۶ مگاپاسکال مقاومت خمشی: - مقاومت کششی ۹۰ روز: ۳/۵ مگاپاسکال	دمای کیورینگ ۲۰ درجه سانتیگراد	۰/۴	ماسه رودخانه‌ای اندازه ذرات حداکثر ۴/۷۵ میلی متر، سنگ درشت دانه اندازه ذرات حداکثر ۱۶ میلی متر	Sika ViscoCrete-5-555	منیزیم اکسید ۶۰٪ (MgO)، دوده سیلیس ۴۰٪ (SF)، فیلر کوارتز (Q)، سیمان پرتلند (PC)
[۳۰]	مقاومت فشاری ۲۸ روز: ۵۸ مگاپاسکال مقاومت خمشی: - مقاومت کششی: -	رطوبت نسبی ۹۵٪ دمای کیورینگ ۳۰ درجه سانتیگراد	۰/۴۶	سنگدانه‌های درشت با اندازه ذرات بین ۴/۷ تا ۹/۵ میلی متر	هیدرومگنیزیت (HM) ۱٪ وزنی از کل مواد چسباننده، هگزامتافسفات سدیم (NaHMP) ۱/۲٪ وزنی از کل مواد چسباننده	منیزیم اکسید (MgO)، میکرو سیلیس (MS)

مقاومت فشاری ۲۸ روز: ۵۴ مگاپاسکال	سنگدانه بازیافتی بتن	دو نوع منیزیم
مقاومت خمشی ۲۸ روز: [۳۶]	ماسه (RCA)	اکسید (MgO) تفاوت در
۷/۶۶ مگاپاسکال	سیلیسی ریزدانه (۲/۰ میلی‌متر) و درشت‌دانه (۴/۰ میلی‌متر)	هگزامتاسفات سدیم (NaHMP)
مقاومت کششی: -		اندازه ذرات و سطح مخصوص، سیمان (OPC)

۳-۲- خواص دوام

ژل سیلیکات هیدرات منیزیم (M-S-H) تأثیر قابل توجهی در افزایش دوام بتن دارد و این ژل معمولاً در مرحله هیدراتاسیون، زمانی که بروسیت (Mg(OH)₂) با سیلیس حل شده واکنش می‌دهد، طی چند روز اول تشکیل می‌شود. تشکیل ژل سیلیکات هیدرات منیزیم (M-S-H) در سیستم متشکل از SiO₂، MgO و H₂O در شکل ۶ نشان داده شده است. زمانی که اکسید منیزیم با آب تماس پیدا می‌کند، هیدراته شده و بروسیت تشکیل می‌دهد که این فرآیند باعث افزایش مقدار pH و آزاد شدن حرارت در چند ساعت اول می‌شود. بروسیت با سیلیکا حل شده واکنش داده و ژل M-S-H را تولید می‌کند. بر اساس مقدار pH و تکامل حرارتی، این واکنش معمولاً طی ۳ روز انجام می‌شود. تشکیل ژل M-S-H تا زمانی ادامه دارد که یا ماده واکنش‌دهنده به طور کامل مصرف شود. بسته به تغییرات نسبت Mg/Si در ماده اولیه، محصولات هیدراتاسیون متفاوت خواهند بود. حضور منیزیم در سیستم‌های سیمانی با تشکیل فازهای ژلی پایدار مانند M-S-H و کاهش تخلخل، باعث انسداد منافذ و متراکم‌تر شدن ریزساختار بتن می‌شود؛ این ویژگی‌ها نفوذ یون کلر و گاز دی‌اکسید کربن را محدود کرده و در نهایت دوام بتن را افزایش می‌دهند [۴۶].



شکل ۶: تصویر شماتیک از تشکیل ژل سیلیکات هیدرات منیزیم M-S-H [۲].

جدول ۳ نتایج مطالعات مختلف در مورد تأثیر MgO بر خواص دوامی مواد سیمانی را نشان می‌دهد. بر اساس این مطالعات، افزودن MgO به مواد سیمانی منجر به کربناتاسیون بیشتر و افزایش نفوذپذیری یون‌های کلر می‌شود. آنلور^{۲۵} و پو [۲۰] در پژوهشی مشاهده کردند که افزودن ۱۰ درصد MgO به بتن، عمق کربناتاسیون را نسبت به بتن شاهد تقریباً دو برابر افزایش می‌دهد. کانکالوس^{۲۶} و همکاران

²⁵ Pu L and C Unluer.

²⁶ Gonçalves T et al.

[۳۶] نیز نتایج مشابهی را گزارش کرده‌اند و نشان داده‌اند که با افزایش مقدار MgO در ملات، سرعت کربناتاسیون به‌طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال، در برخی از مخلوط‌ها، افزودن ۲۰ درصد MgO منجر به افزایش بیش از چهار برابری عمق کربناتاسیون در مقایسه با ملات شاهد شد. چوی^{۲۷} و همکاران [۴۷] نیز به بررسی تأثیر هم‌زمان MgO و خاکستر بادی (FA) بر رفتار بتن پرداخته‌اند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در کوتاه‌مدت (۲۸ روز)، افزودن MgO می‌تواند به کاهش نفوذپذیری بتن نسبت به یون کلرید کمک کند. اما در بلندمدت (۳۶۰ روز)، این اثر معکوس شده و بتن‌های حاوی MgO نفوذپذیری بالاتری نسبت به بتن‌های شاهد از خود نشان می‌دهند. مطالعه چوی نشان می‌دهد که افزودن اکسید منیزیم (MgO) و خاکستر بادی (FA) به بتن، تأثیر پیچیده‌ای بر فرآیند کربناتاسیون دارد. در این مطالعه، محققان متوجه شدند که در کوتاه‌مدت (تا ۱۸۰ روز)، حضور MgO تأثیر قابل توجهی بر عمق نفوذ کربناتاسیون ندارد. اما در بلندمدت (۳۶۰ روز)، بتن حاوی MgO عمق کربناتاسیون کمتری نسبت به بتن شاهد نشان می‌دهد. این نتایج نشان می‌دهند که اگرچه افزایش تخلخل به‌طور کلی فرآیند کربناتاسیون را تسریع می‌کند، اما مکانیسم‌های دیگری نیز در تعامل با یکدیگر بر رفتار بتن حاوی MgO تأثیرگذار هستند. به‌عنوان مثال، واکنش‌های جانبی بین MgO و سایر اجزای سیمان ممکن است بر تشکیل محصولات هیدراتاسیون و در نتیجه بر نفوذپذیری بتن تأثیر بگذارد. در مجموع، نتایج این مطالعه حاکی از آن است که استفاده از MgO به‌تنهایی نمی‌تواند به‌عنوان یک راهکار قطعی برای کاهش کربناتاسیون در نظر گرفته شود. عوامل متعددی مانند نوع سیمان، مقدار و نوع مواد افزودنی، شرایط عمل‌آوری و محیط قرارگیری بتن بر عملکرد بلندمدت آن تأثیرگذار هستند. بنابراین، برای ارزیابی دقیق تأثیر MgO بر دوام بتن، نیاز به انجام مطالعات جامع‌تر و در نظر گرفتن تمامی متغیرهای مؤثر است.

هی^{۲۸} و همکاران [۴۸] گزارش کردند که بتن حاوی منیزیم اکسید، پس از قرارگیری در شرایط کربناتاسیون تسریع شده و عمل‌آوری مرطوب، عملکرد بهتری از خود نشان می‌دهد. این عملکرد به دلیل ژل سیلیکات هیدرات منیزیم (M-S-H) و همچنین محصولات کربناته هیدراته منیزیم است که موجب کاهش تخلخل و افزایش مقاومت می‌شود. این ژل با ایجاد تراکم بیشتر در ماتریس بتن، دوام و مقاومت آن را در برابر عوامل مهاجم بهبود می‌بخشد. برای ارزیابی خوردگی، نمونه‌ها در محلول ۳/۵ درصد NaCl قرار داده شدند. مخلوط مذکور توانست ۴/۶ درصد دی‌اکسید کربن جذب کند و نشان داد که سیمان منیزیم اکسید واکنش‌پذیر (RMC) می‌تواند دوام و عملکرد بتن را در این شرایط بهبود دهد. همچنین، آزمایش‌ها نشان داد که بتن کربناتاسیون شده حاوی منیزیم اکسید واکنش‌پذیر در مقایسه با سایر نمونه‌ها، به دلیل کاهش تخلخل، پالایش منافذ، و تشکیل محصولات پایدار کربناته مقاومت بهتری در برابر نفوذ یون کلر دارد. سئو^{۲۹} و همکاران [۴۹]، در نمونه‌های ساخته شده با اکسید منیزیم به میزان ۰ تا ۲۰ درصد به این نتیجه رسیدند که نمونه‌ای حاوی ۱۰٪ MgO به‌عنوان جایگزین بخشی از سیمان، بهترین عملکرد را در تست کربناتاسیون داشته است. حضور MgO در این مقدار باعث تشکیل فازهای پایدار هیدروکسید شده که با کاهش نفوذ CO₂ به ساختار سیمان، فرآیند کربناتاسیون را مهار کرده است و همین‌طور به دلیل تولید ژل سیلیکات هیدرات منیزیم (M-S-H) بهترین عملکرد را در تست نفوذ یون کلر داشته است، زیرا حضور مقدار بهینه MgO منجر به تشکیل فازهای ثانویه پایدار مانند هیدروکسید شده که با کاهش نفوذپذیری، از حرکت یون‌های کلر به داخل ماتریس جلوگیری می‌کنند. ایلانگو^{۳۰} و همکاران [۵۰]، دریافتند که افزودن ماده‌ای به نام استات منیزیم به بتن، باعث می‌شود که بتن بهتر بتواند دی‌اکسید کربن را جذب کند. این ماده با ایجاد تغییراتی در ساختار بتن، باعث می‌شود که بتن متراکم‌تر شده و ترک‌های کمتری داشته باشد. در نتیجه، نفوذ آب و مواد مضر مانند یون کلر به داخل بتن کاهش می‌یابد و عمر مفید بتن افزایش می‌یابد. با توجه به نتایج گزارش شده در مطالعات فوق، می‌توان بررسی و مقایسه‌هایی میان یافته‌ها برقرار کرد. مطالعه آنلور و پو [۲۰] و همچنین کانکالوس و همکاران [۳۶] نشان داد که افزودن اکسید منیزیم (MgO) باعث افزایش قابل توجه سرعت و عمق کربناتاسیون در بتن می‌شود، به طوری که در برخی موارد این افزایش تا چهار برابر نسبت به بتن شاهد گزارش شده است. در مقابل، چوی و همکاران [۴۷]، هی و همکاران [۴۸]، سئو و همکاران [۴۹] و ایلانگو و همکاران [۵۰] هر کدام به نحوی اشاره کردند که افزودن MgO یا ترکیبات منیزیمی می‌تواند باعث کاهش نفوذپذیری بتن نسبت به یون کلر شود؛ این به شرطی است که مقدار MgO بهینه باشد و فازهای پایداری همچون ژل سیلیکات هیدرات منیزیم (M-S-H) یا هیدروکسید تشکیل گردد.

²⁷ Choi S-w et al.

²⁸ Hay R and K Celik.

²⁹ Seo J et al.

³⁰ Ilango, N.K., et al.

جدول ۳: خواص دوام مواد سیمانی با MgO

منابع	نتایج بهترین مقاومت	دمای کیورینگ، رطوبت نسبی	نسبت آب به مواد چسباننده	سنگدانه یا الیاف	فوق روان کننده	مواد اصلی
[۴۸]	کربناتاسیون: سیمان منیزیم اکسید واکنشی با افزایش زمان کربن دار شدن، مقاومت آن افزایش یافت و فاکتور جذب دی اکسید کربن به ۴/۶٪ در ۲۸ روز رسید. نفوذ یون کلر: -	دما ۳۰ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی ۸۰٪ با غلظت ۲۰٪ CO ₂	۰/۵۵	-	-	منیزیم اکسید فعال (RMC)، سیمان پرتلند (OPC)، منیزیم استات (CH ₃ COO) ₂ Mg با غلظت ۰/۰۵ مولار
[۴۹]	کربناتاسیون: افزودن ۲۰٪ MgO باعث کاهش ۹۰ درصدی درجه کربناتاسیون در مقایسه با نمونه‌ای که فاقد منیزیم اکسید بوده است. نفوذ یون کلر: -	دما ۲۵ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی ۵۰٪ با غلظت ۳٪ CO ₂	۰/۵	-	-	منیزیم اکسید (MgO)، سیمان سولفوالومینات کلسیم (CSA)، گچ
[۵۰]	کربناتاسیون: نمونه‌ای که با ۰/۵ مولار محلول منیزیم استات هیدراته شده، ۹۰٪ جذب کربن دی اکسید بیشتری نسبت به نمونه هیدراته شده با آب مقطر داشته است. نفوذ یون کلر: -	دما ۲۳ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی ۷۰٪	۱	-	-	منیزیم اکسید (MgO)، محلول‌های استات منیزیم (Mg(CH ₃ COO) ₂ ·4H ₂ O)
[۵۱]	کربناتاسیون: کربناتاسیون PESCC ³¹ جذب آلومینیوم در ژل C-A- S-H را افزایش می‌دهد. افزودن MgO این جذب را کاهش داده و منجر به کاهش کربناتاسیون در نمونه‌های حاوی MgO با نسبت‌های ۰/۳۳٪ تا ۰/۱۰٪ می‌شود. نفوذ یون کلر: -	دما ۲۰ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی ۷۰٪ با غلظت ۲۰٪ CO ₂	۰/۵	-	-	منیزیم اکسید (MgO)، سیمان پرتلند نوع ۲ (۵٪ وزنی، سرباره (معمولی، فوق ریز)، فسفوژپس (Phosphogypsum)
[۵۲]	کربناتاسیون: مقاومت فشاری نمونه‌هایی که تحت شرایط کربناتاسیون تسریع شده بودند، بین ۰/۳٪ تا ۲۷۸٪ افزایش یافت. محصولات کربنات منیزیم کربناتاسیون، خواص مکانیکی بهتری نسبت به هیدراته دارند. نفوذ یون کلر: -	دما ۳۰ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی ۸۰٪ با غلظت ۱۰٪ CO ₂	۰/۴	سنگدانه‌های طبیعی با قطر ۴/۷۵ تا ۹/۵ میلی‌متر	هگزامتافسفات سدیم (NaHMP) ۱۰٪ از جرم آب	منیزیم اکسید (MgO)
[۵۳]	کربناتاسیون: - نفوذ یون کلر: افزودن ۲۰٪ اکسید منیزیم فعال به نمونه‌ها باعث کاهش ۱۹/۷ درصدی ضریب نفوذ یون کلرید و ۳۷/۷ درصدی شار الکتریکی آن‌ها شده است.	دما ۲۰ درجه سانتی گراد، رطوبت نسبی ۷۰٪ با غلظت ۲۰٪ CO ₂ ، ۳۶ ساعت کربناته‌سازی و ۲۶/۵ روز عمل‌آوری	۰/۵	ماسه رودخانه طبیعی با مدول نرمی ۲/۴	PCA®-I (بر پایه پلی‌کربوکسیلات) با ۰/۳ درصد وزنی مواد سیمانی	منیزیم اکسید (MgO)، سیمان پرتلند نوع P-II

³¹ Precipitated Alkali-Activated Slag Cement

[۵۴]	کربناتاسیون: ۱۰٪ MgO باعث بهبود مقاومت در برابر کربناتاسیون به میزان ۴۱٪ شده است. نفوذ یون کلر: افزودن ۱۰٪ MgO باعث بهبود تراکم ساختاری و کاهش نفوذ یون کلر شد.	دما ۲۳ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۶۵٪ با غلظت CO ₂ ۱۰٪	۰/۴۵-۰/۳۵	ماسه سیلیسی (Siliceous) با چگالی (Sand) و ۲/۶۷ و نسبت حجمی ثابت ۵۰٪	—	منیزیم اکسید (MgO)، سرباره کوره بلند دانه‌ای آسیاب شده، متاکائولین (Metakaolin)، سدیم کربنات (Na ₂ CO ₃) به مقدار ۱۰٪ از وزن کل مواد پودری
[۵۵]	کربناتاسیون: افزودن MgO و سدیم بی‌کربنات و اعمال کربناتاسیون تسریع شده باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری شد. این روش نسبت به نمونه‌های ساده تا بیش از ۵۰٪ افزایش مقاومت نشان داد. نفوذ یون کلر: —	دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۸۰٪ با غلظت CO ₂ ۲۰٪	۱/۱	—	—	اکسید منیزیم واکنش‌پذیر (Reactive MgO)، کربنات سدیم (Na ₂ CO ₃)، بی‌کربنات سدیم (NaHCO ₃)، سدیم سسکوی کربنات دی‌هیدرات (Na ₂ H(CO ₃) ₂ ·2H ₂ O)
[۵۶]	کربناتاسیون: استفاده از ۵٪ MgO و ۱۵٪ FA عمق کربناتاسیون را ۳۵/۴٪ افزایش می‌دهد. نفوذ یون کلر: —	دما ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۰٪ با غلظت CO ₂ ۵٪	۰/۶۲-۰/۵۵	سنگدانه های ریز: شن و ماسه سیلیسی (درجات ۲ و ۴) سنگدانه های درشت طبیعی با جنس سیلیسی (درجات ۶/۲ و ۱۲/۶ و ۲۰/۱۲)	—	دو نوع اکسید منیزیم (MgO)، خاکستر بادی (Fly Ash)
[۳۶]	کربناتاسیون: جایگزینی کامل ماسه با سنگدانه‌های بازیافتی بتن و بخشی از سیمان با اکسید منیزیم، باعث شد بتن بیش از ۳ برابر افزایش در عمق نفوذ کربناتاسیون نسبت به حالت اولیه داشته باشد. نفوذ یون کلر: —	دما ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۰٪ با غلظت CO ₂ ۵٪	۰/۵	ماسه طبیعی، سنگدانه‌های بازیافتی بتن (RCA) به عنوان جایگزین ماسه طبیعی در درصدهای ۵۰٪ و ۱۰۰٪	—	دو نوع اکسید منیزیم واکنش‌پذیر (Reactive MgO)، سیمان نوع CEM I 42.5 R
[۲۰]	کربناتاسیون: نمونه‌های ۱۰٪ MgO در مقایسه با سیمان پرتلند ۱۰٪ مقاومت ۸۳٪ بالاتری در ۷ روز داشتند و درصد کربناتاسیون در عمق ۰ میلی‌متر آن‌ها پس از ۱۴ روز به ۵۸٪ رسید، درحالی‌که این مقدار برای نمونه‌های PC تنها ۲۸٪ بود. نفوذ یون کلر: —	دما ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۰٪ با غلظت CO ₂ ۱۰٪	۰/۸۰-۰/۴۲	ماسه طبیعی با اندازه ۴-۰ میلی‌متر، شن با اندازه ۲-۱۰ میلی‌متر	—	اکسید منیزیم واکنش‌پذیر (Reactive MgO)، سیمان پرتلند (PC)
[۵۴]	کربناتاسیون: ۱۰٪ MgO باعث بهبود مقاومت در برابر کربناتاسیون به میزان ۴۱٪ شده است. نفوذ یون کلر: افزودن ۱۰٪ MgO باعث بهبود تراکم ساختاری و کاهش نفوذ یون کلر شد.	دما ۲۳ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۶۵٪ با غلظت CO ₂ ۱۰٪	۰/۴۵-۰/۳۵	ماسه سیلیسی (Siliceous) با چگالی (Sand) و ۲/۶۷ و نسبت حجمی ثابت ۵۰٪	—	منیزیم اکسید (MgO)، سرباره کوره بلند دانه‌ای آسیاب شده، متاکائولین (Metakaolin)، سدیم کربنات (Na ₂ CO ₃) به مقدار ۱۰٪ از وزن کل مواد پودری

[۵۵]	کربناتاسیون: افزودن MgO و سدیم بی کربنات و اعمال کربناتاسیون تسریع شده باعث افزایش چشمگیر مقاومت فشاری شد. این روش نسبت به نمونه‌های ساده تا بیش از ۵۰٪ افزایش مقاومت نشان داد. نفوذ یون کلر: -	دما ۲۵ درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی ۸۰٪ با غلظت ۲۰٪ CO ₂	۱/۱	-	اکسید منیزیم واکنش‌پذیر (Reactive MgO)، کربنات سدیم (Na ₂ CO ₃)، بی کربنات سدیم (NaHCO ₃)، سدیم سسکوی کربنات دی‌هیدرات (Na ₂ H(CO ₃) ₂ ·2H ₂ O)
[۵۶]	کربناتاسیون: استفاده از ۵٪ MgO و ۱۵٪ FA عمق کربناتاسیون را ۳۵/۴٪ افزایش می‌دهد. نفوذ یون کلر: -	دما ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۰٪ با غلظت ۵٪ CO ₂	۰/۶۲-۰/۵۵	سنگدانه‌های ریز: شن و ماسه سیلیسی (درجات ۲ و ۴) سنگدانه‌های درشت طبیعی با جنس سیلیسی (درجات ۲/۶ و ۲/۱۲)	دو نوع اکسید منیزیم (MgO)، خاکستر بادی (Fly Ash)
[۳۶]	کربناتاسیون: جایگزینی کامل ماسه با سنگدانه‌های بازیافتی بتن و بخشی از سیمان با اکسید منیزیم، باعث شد بتن بیش از ۳ برابر افزایش در عمق نفوذ کربناتاسیون نسبت به حالت اولیه داشته باشد. نفوذ یون کلر: -	دما ۲۳ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۶۰٪ با غلظت ۵٪ CO ₂	۰/۵	ماسه طبیعی، سنگدانه‌های بازیافتی بتن (RCA) به‌عنوان جایگزین ماسه طبیعی در درصدهای ۵۰٪ و ۱۰۰٪	دو نوع اکسید منیزیم واکنش‌پذیر (Reactive MgO)، سیمان نوع CEM 1 42.5 R
[۲۰]	کربناتاسیون: نمونه‌های ۱۰٪ MgO در مقایسه با سیمان پرتلند ۱۰٪ مقاومت ۸۳٪ بالاتری در ۷ روز داشتند و درصد کربناتاسیون در عمق ۰ میلی‌متر آن‌ها پس از ۱۴ روز به ۵۸٪ رسید، درحالی‌که این مقدار برای نمونه‌های PC تنها ۲۸٪ بود. نفوذ یون کلر: -	دما ۳۰ درجه سانتی‌گراد و رطوبت نسبی ۸۰٪ با غلظت ۱۰٪ CO ₂	۰/۸۰-۰/۴۲	ماسه طبیعی با اندازه ۴-۰ میلی‌متر، شن با اندازه ۲-۱۰ میلی‌متر	اکسید منیزیم واکنش‌پذیر (Reactive MgO)، سیمان پرتلند (PC)

۳-۳- بررسی توأمان عوامل مؤثر بر دوام و مقاومت مکانیکی در بتن

مطالعه گونزالوز^{۳۲} و همکاران [۳۶] با هدف ارزیابی همزمان عملکرد مکانیکی و دوام ملات‌های سیمانی حاوی اکسید منیزیم واکنشی (MgO) و سنگدانه‌های ریز بازیافتی (RCA) صورت گرفت تا تأثیر این ترکیبات جایگزین بر مقاومت فشاری، خمشی و رفتار در برابر عوامل مخرب محیطی بررسی شود. در میان نمونه‌های مورد ارزیابی، ملات مرجع M-0-0 که تنها شامل سیمان پرتلند و ماسه طبیعی بود، بالاترین عملکرد مکانیکی را با مقاومت فشاری ۵۳/۷ مگاپاسکال و مقاومت خمشی ۷/۶۶ مگاپاسکال از خود نشان داد؛ عملکردی که ناشی از استفاده از مواد اولیه با کیفیت، نسبت آب به مواد چسباننده پایین و ریزساختار فشرده و کم‌تخلخل آن بود. در نقطه مقابل، نمونه MG-100-10 با وجود استفاده از ۱۰ درصد MgO-G و جایگزینی کامل ماسه با RCA، موفق شد بیشترین مقاومت فشاری را در میان نمونه‌های حاوی MgO (۴۷/۹ مگاپاسکال) به دست آورد که این امر به توزیع مناسب ذرات MgO، واکنش‌پذیری اولیه بالای آن و بهبود نسبی ساختار پیوسته مرتبط

³² Gonçalves T et al.

است. با این حال، مقایسه این دو نمونه صرفاً از منظر مقاومت مکانیکی کافی نیست، چرا که دوام سازه‌های تغییرات چشم‌گیری کرده است؛ به طوری که نمونه M-0-0 دارای عمق کربناتاسیون بسیار کمتری (۱/۷۶ میلی‌متر در ۹۱ روز) نسبت به MG-100-10 (۴/۷۲ میلی‌متر) بود. این تفاوت به افزایش تخلخل، کاهش فازهای کلسیمی پایدارکننده مانند $\text{Ca}(\text{OH})_2$ و همچنین افت pH ناشی از حضور $\text{Mg}(\text{OH})_2$ در نمونه‌های دارای MgO نسبت داده می‌شود. در نتیجه، هر چند ترکیب MgO و RCA می‌تواند بخشی از مقاومت مکانیکی را حفظ کند، اما اثر منفی آن بر دوام به ویژه در برابر کربناتاسیون و نفوذپذیری، اهمیت کنترل ریزساختار و طراحی دقیق را در کاربردهای واقعی نشان می‌دهد. این یافته‌ها بر این نکته تأکید دارند که ارتباط میان مقاومت مکانیکی و دوام همبستگی مستقیمی ندارد و درک درست از سازوکارهای فیزیکی و شیمیایی زمینه‌ای، کلید انتخاب مناسب مصالح جایگزین در صنعت ساخت‌وساز است.

۴. نتیجه‌گیری:

از بررسی ادبیات منتشر شده متمرکز بر مقاومت مکانیکی و رفتار دوام مخلوط‌های سیمانی حاوی MgO، نتایج اصلی زیر حاصل گردید:

۱. تأثیر افزودن اکسید منیزیم (MgO) بر مقاومت فشاری، خمشی و کششی مخلوط‌های سیمانی به عوامل متعددی از جمله میزان و نوع MgO و شرایط عمل‌آوری وابسته است. افزایش MgO تا مقادیر ۵٪ تا ۸٪ وزنی منجر به کاهش مقاومت فشاری بین ۱۳/۷٪ تا ۱۹/۷٪ شده است. این کاهش به دلیل افزایش تخلخل و تشکیل محصولات هیدراتاسیون متفاوت نسبت به مخلوط‌های بدون MgO گزارش شده است.
۲. اکسید منیزیم با واکنش‌پذیری بالاتر در مقایسه با انواع معمولی باعث کاهش تخلخل و بهبود مقاومت مکانیکی شده است. به عنوان مثال، به نحوی که استفاده از MgO واکنش‌پذیر مقاومت فشاری را تا ۱۰٪ تا ۲۰٪ افزایش داده است، در حالی که MgO کم‌واکنش در برخی موارد باعث کاهش مقاومت تا ۱۵٪ شده است.
۳. عمل‌آوری در رطوبت نسبی بالا و دماهای مناسب بین ۲۰ تا ۳۰ درجه سانتی‌گراد در حضور MgO، تخلخل را به میزان ۵٪ تا ۱۲٪ کاهش داده و دوام مصالح را در برابر نفوذ یون کلرید تا ۲۰٪ بهبود بخشیده است. در مقابل، عمل‌آوری در شرایط خشک‌تر یا دماهای پایین‌تر باعث افزایش تخلخل و کاهش مقاومت فشاری تا ۱۰٪ شده است.
۴. شرایط کربناتاسیون تسریع شده و معمولی تأثیرات متفاوتی بر مخلوط‌های حاوی MgO دارند. در شرایط تسریع شده غلظت CO_2 برابر با ۲۰٪ و رطوبت نسبی ۸۰٪، کربناتاسیون مخلوط‌های حاوی MgO تا ۱۲/۷٪ بیشتر از مخلوط‌های شاهد بوده که این روند با کاهش تخلخل و بهبود تراکم ساختار همراه شده است. در مقابل، در شرایط معمولی غلظت CO_2 بین ۵٪-۱۰٪ و رطوبت نسبی ۵۰٪-۶۰٪، کربناتاسیون تنها ۵/۱٪ - ۵/۸٪ افزایش یافت و تخلخل بیشتری نسبت به شرایط تسریع شده نشان داد.
۵. مخلوط‌های MgO در کوتاه‌مدت نفوذ کلرید بیشتری نسبت به مخلوط‌های شاهد داشته اند، اما در بلندمدت عملکرد بهتری از خود نشان دادند. این تغییر به تکامل محصولات هیدراتاسیون و کاهش فضای منافذ نسبت داده شده است.

قدردانی

نویسندگان مقاله از شرکت دانش بنیان توسعه فناوری‌ان سبزکارا و آزمایشگاه دوام و توسعه پایدار دانشگاه شهید بهشتی جهت مجوز انجام آزمایش‌ها، قدردانی می‌نمایند.

مراجع:

[1] Possan, E., Thomaz, W. A., Aleandri, G. A., Felix, E. F., & Dos Santos, A. C. (2017). CO_2 uptake potential due to concrete carbonation: A case study. *Case Studies in Construction Materials*, 6, 147-161.

- [2] Samimi, K., Pakan, M., Eslami, J., & Asgharnejad, L. (2022). Investigation of two different water-dispersed graphene on the performance of graphene/cement paste: Surfactant and superplasticizer effect. *Construction and Building Materials*, 349, 128756.
- [3] Samimi, K., & Zareechian, M. (2022). Chemical resistance of synthesized graphene-modified cement paste containing natural pozzolans to acid attack. *Journal of Building Engineering*, 60, 105174.
- [4] Nejad, B. M., Enferadi, S., & Andrew, R. (2025). A comprehensive analysis of process-related CO₂ emissions from Iran's cement industry. *Cleaner Environmental Systems*, 16, 100251.
- [5] Kelly, T.D. and Van Oss, H.G., 2014. Historical statistics for mineral and material commodities: Cement statistics.
- [6] Samimi, K., Kamali-Bernard, S., Maghsoudi, A. A., Maghsoudi, M., & Siad, H. (2017). Influence of pumice and zeolite on compressive strength, transport properties and resistance to chloride penetration of high strength self-compacting concretes. *Construction and building materials*, 151, 292-311.
- [7] Samimi, K., & Shirzadi Javid, A. A. (2021). Magnesium sulfate (MgSO₄) attack and chloride isothermal effects on the self-consolidating concrete containing metakaolin and zeolite. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 45(1), 165-180.
- [8] Jiang, B., Xia, D., Yu, B., Xiong, R., Ao, W., Zhang, P., & Cong, L. (2019). An environment-friendly process for limestone calcination with CO₂ looping and recovery. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118147.
- [9] Haselbach, L., & Thomas, A. (2014). Carbon sequestration in concrete sidewalk samples. *Construction and Building Materials*, 54, 47-52.
- [10] He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M., & Wang, Y. (2019). Comparison of CO₂ emissions from OPC and recycled cement production. *Construction and Building Materials*, 211, 965-973.
- [11] Pierrehumbert, R. (2019). There is no Plan B for dealing with the climate crisis. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 75(5), 215-221.
- [12] Althoey, F., Ansari, W. S., Sufian, M., & Deifalla, A. F. (2023). Advancements in low-carbon concrete as a construction material for the sustainable built environment. *Developments in the built environment*, 16, 100284.
- [13] Dung, N. T., Hay, R., Lesimple, A., Celik, K., & Unluer, C. (2021). Influence of CO₂ concentration on the performance of MgO cement mixes. *Cement and Concrete Composites*, 115, 103826.
- [14] Liska, M., Al-Tabbaa, A., Carter, K., & Fifield, J. (2012). Scaled-up commercial production of reactive magnesia cement pressed masonry units. Part II: Performance. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 165(4), 225-243.
- [15] McQueen, N., Kelemen, P., Dipple, G., Renforth, P., & Wilcox, J. (2020). Ambient weathering of magnesium oxide for CO₂ removal from air. *Nature communications*, 11(1), 3299.
- [16] Mo, L., Deng, M., Tang, M., & Al-Tabbaa, A. (2014). MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future. *Cement and concrete research*, 57, 1-12.
- [17] Kalinin, D. V., & Ovchinnikova, O. N. (1971). Kinetics of hydrothermal synthesis of diopside in the systems CaO-MgO-2SiO₂ and CaCO₃-MgCO₃-2SiO₂ at water vapor pressure of 500 atm. *International Geology Review*, 13(1), 40-42.
- [18] Walling, S. A., & Provis, J. L. (2016). Magnesia-based cements: a journey of 150 years, and cements for the future?. *Chemical reviews*, 116(7), 4170-4204.
- [19] Dung, N. T., & Unluer, C. (2019). Performance of reactive MgO concrete under increased CO₂ dissolution. *Cement and Concrete Research*, 118, 92-101.
- [20] Pu, L., & Unluer, C. (2016). Investigation of carbonation depth and its influence on the performance and microstructure of MgO cement and PC mixes. *Construction and Building Materials*, 120, 349-363.
- [21] Al-Tabbaa, A., 2013. Eco-efficient concrete: 19. Reactive magnesia cement. Elsevier Inc. Chapters.
- [22] Du, C. (2005). A review of magnesium oxide in concrete. *Concrete international*, 27(12), 45-50.
- [23] Pradita, T., Aji, B.B., Shih, S.J. and Sudibyo, S., 2017, March. Controlled morphological structure of magnesium oxide particles. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 1823, No. 1). AIP Publishing.
- [24] Mo, L., Deng, M., & Tang, M. (2010). Effects of calcination condition on expansion property of MgO-type expansive agent used in cement-based materials. *Cement and Concrete Research*, 40(3), 437-446.
- [25] Zhu, J., Ye, N., Liu, J., & Yang, J. (2013). Evaluation on hydration reactivity of reactive magnesium oxide prepared by calcining magnesite at lower temperatures. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52(19), 6430-6437.
- [26] Cao, F., & Yan, P. (2019). The influence of the hydration procedure of MgO expansive agent on the expansive behavior of shrinkage-compensating mortar. *Construction and Building Materials*, 202, 162-168.
- [27] Mo, L., Liu, M., Al-Tabbaa, A., & Deng, M. (2015). Deformation and mechanical properties of the expansive cements produced by inter-grinding cement clinker and MgOs with various reactivities. *Construction and Building Materials*, 80, 1-8.
- [28] Mo, L., Liu, M., Al-Tabbaa, A., Deng, M., & Lau, W. Y. (2015). Deformation and mechanical properties of quaternary blended cements containing ground granulated blast furnace slag, fly ash and magnesia. *Cement and concrete Research*, 71, 7-13.

- [29] Moradpour, R., Taheri-Nassaj, E., Parhizkar, T., & Ghodsian, M. (2013). The effects of nanoscale expansive agents on the mechanical properties of non-shrink cement-based composites: The influence of nano-MgO addition. *Composites Part B: Engineering*, 55, 193-202.
- [30] Singh, G. B., Sonat, C., Yang, E. H., & Unluer, C. (2020). Performance of MgO and MgO-SiO₂ systems containing seeds under different curing conditions. *Cement and Concrete Composites*, 108, 103543.
- [31] Gonçalves, T., Silva, R. V., De Brito, J., Fernández, J. M., & Esquinas, A. R. (2020). Mechanical and durability performance of mortars with fine recycled concrete aggregates and reactive magnesium oxide as partial cement replacement. *Cement and Concrete Composites*, 105, 103420.
- [32] Allan Nye, S., Vineet, S., Christopher, O., Barnaby, S., & Chris, C. (2021). Use Of Olivine For The Production Of MgO-SiO₂ Binders. *Frontiers in Built Environment*, 7, 640243.
- [33] Dhakal, M., Scott, A. N., Shah, V., Dhakal, R. P., & Clucas, D. (2021). Development of a MgO-metakaolin binder system. *Construction and Building Materials*, 284, 122736.
- [34] Shah, V., & Scott, A. (2021). Use of kaolinite clays in development of a low carbon MgO-clay binder system. *Cement and Concrete Research*, 144, 106422.
- [35] Shah, V., & Scott, A. (2021). Hydration and microstructural characteristics of MgO in the presence of metakaolin and silica fume. *Cement and Concrete Composites*, 121, 104068.
- [36] Gonçalves, T., Silva, R. V., De Brito, J., Fernández, J. M., & Esquinas, A. R. (2020). Mechanical and durability performance of mortars with fine recycled concrete aggregates and reactive magnesium oxide as partial cement replacement. *Cement and Concrete Composites*, 105, 103420.
- [37] Abbass, W., Khan, M. I., & Mourad, S. (2018). Evaluation of mechanical properties of steel fiber reinforced concrete with different strengths of concrete. *Construction and building materials*, 168, 556-569.
- [38] Ghafari, R., 2025. Enhancing mechanical and durability properties of green concrete using polymer composite materials: A sustainable approach to eco-friendly construction. In 9th International Conference on Research in Science and Engineering and the 6th International Congress on Civil Engineering, Architecture and Urban Planning in Asia, Bangkok, Thailand.
- [39] Endale, S. A., Taffese, W. Z., Vo, D. H., & Yehualaw, M. D. (2022). Rice husk ash in concrete. *Sustainability*, 15(1), 137.
- [40] Abdalqader, A. and Al-Tabbaa, A., 2014, June. Mechanical and microstructural characterisation of multicomponent blended cements incorporating reactive magnesia. In *Proceedings of the 1st Concrete Innovative Conference (CIC)*, Oslo, Norway (pp. 11-13).
- [41] Mavroulidou, M., Morrison, T., Unsworth, C., & Gunn, M. J. (2015). Properties of concrete made of multicomponent mixes of low-energy demanding binders. *Construction and Building Materials*, 101, 1122-1141.
- [42] Zhang, B., Ji, T., Ma, Y., & Zhang, Q. (2022). Effect of metakaolin and magnesium oxide on flexural strength of ultra-high performance concrete. *Cement and Concrete Composites*, 131, 104582.
- [43] Sequeira, L., Cantero, B., Bravo, M., de Brito, J., & Medina, C. (2023). The influence of recycled cement, fly ash, and magnesium oxide on the mechanical performance of sustainable cementitious materials. *Materials*, 16(7), 2760.
- [44] Bernard, E., Lothenbach, B., German, A., Rentsch, D., & Winnefeld, F. (2023). Effect of aluminate and carbonate in magnesia silicate cement. *Cement and Concrete Composites*, 139, 105010.
- [45] Sonat, C., He, S., Li, J., Unluer, C., & Yang, E. H. (2021). Strain hardening magnesium-silicate-hydrate composites (SHMSHC) reinforced with short and randomly oriented polyvinyl alcohol microfibers. *Cement and Concrete Research*, 142, 106354.
- [46] Mo, L., Deng, M., & Wang, A. (2012). Effects of MgO-based expansive additive on compensating the shrinkage of cement paste under non-wet curing conditions. *Cement and Concrete Composites*, 34(3), 377-383.
- [47] Choi, S. W., Jang, B. S., Kim, J. H., & Lee, K. M. (2014). Durability characteristics of fly ash concrete containing lightly-burnt MgO. *Construction and Building Materials*, 58, 77-84.
- [48] Hay, R., & Celik, K. (2020). Hydration, carbonation, strength development and corrosion resistance of reactive MgO cement-based composites. *Cement and Concrete Research*, 128, 105941.
- [49] Seo, J., Yoon, H. N., Kim, S., Wang, Z., Kil, T., & Lee, H. K. (2021). Characterization of reactive MgO-modified calcium sulfoaluminate cements upon carbonation. *Cement and Concrete Research*, 146, 106484.
- [50] Ilango, N. K., Nguyen, H., German, A., Winnefeld, F., & Kinnunen, P. (2024). Role of magnesium acetate in hydration and carbonation of magnesium oxide-based cements. *Cement and Concrete Research*, 175, 107357.
- [51] Wang, Z., Shui, Z., Sun, T., Li, H., Chi, H., Ouyang, G., ... & Tang, P. (2024). Effect of MgO and superfine slag modification on the carbonation resistance of phosphogypsum-based cementitious materials: based on hydration enhancement and phase evolution regulation. *Construction and Building Materials*, 415, 134914.
- [52] Meng, D., Feng, J., Yeo, H. X., & Qian, S. (2024). Effect of carbonation on development of reactive MgO-based pervious concrete. *Construction and Building Materials*, 422, 135839.
- [53] Liu, Y., Wang, B., Fan, Y., Yu, J., Shi, T., Zhou, Y., ... & Zhou, X. (2024). Effects of reactive MgO on durability and microstructure of cement-based materials: Considering carbonation and pH value. *Construction and Building Materials*, 426, 136216.

- [54] Akturk, B., Abolfathi, M., Ulukaya, S., Kizilkanat, A. B., Hooper, T. J., Gu, L., ... & Unluer, C. (2022). Hydration kinetics and performance of sodium carbonate-activated slag-based systems containing reactive MgO and metakaolin under carbonation. *Cement and Concrete Composites*, 132, 104617.
- [55] Ma, S., Akca, A. H., Esposito, D., & Kawashima, S. (2020). Influence of aqueous carbonate species on hydration and carbonation of reactive MgO cement. *Journal of CO₂ Utilization*, 41, 101260.
- [56] Sequeira, L., Forero, J., Bravo, M., Evangelista, L., & de Brito, J. (2023). Durability of concrete with partial replacement of Portland cement by incorporating reactive magnesium oxide and fly ash. *Materials*, 16(7), 2670..