

## The Effect of $TiO_2$ and $Al_2O_3$ on the Compressive Strength and Abrasion Resistance of Self-Cleaning Concrete

Leila shahryari<sup>1\*</sup>, Mojtaba askari<sup>2</sup>, Maryam sepasi<sup>3</sup>

\*1-Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran  
2- Instructor, Department of Civil Engineering, Firozabad Branch, Islamic Azad University, Firozabad, Iran  
3- Assistant Professor, Department of Mathematics, Shi.C., Islamic Azad University, Shiraz, Iran

### ABSTRACT

The significant growth of urbanization and the increase in environmental pollutants resulting from industrial and urban activities have made the need for modern materials to mitigate these pollutions more apparent than ever. Self-cleaning concrete is considered one of the major innovations in the concrete industry, offering the ability to reduce pollutants and preserve the aesthetic quality of urban environments. Due to its photocatalytic properties, this type of concrete has a high capability to decompose and reduce the pollutants present in the environment. However, one of the main challenges in using self-cleaning concrete is its weakness in abrasion resistance. This research aims to investigate the effect of adding titanium dioxide ( $TiO_2$ ) and aluminum oxide ( $Al_2O_3$ ) on the mechanical properties, abrasion durability, and self-cleaning capability of concrete. In order to achieve optimal mechanical properties, economic considerations, and self-cleaning functionality simultaneously, this study focuses on the use of additives in macro-scale sizes. For this purpose, aluminum oxide at 3% by cement weight and titanium dioxide at 5%, 10%, 15%, and 20% by cement weight were used. The experimental program includes slump, compressive strength at various ages, abrasion resistance, and the photocatalytic property for different concrete mixes. The results of this study showed that the RAM-15% mix design demonstrated desirable mechanical performance and provided the most optimal self-cleaning property. Additionally, the abrasion resistance in the RAM-20% mix increased by 45% compared to the control mix.

### ARTICLE INFO

Received: 11 June 2025  
Revised: 11 November 2025  
Accepted: 20 November 2025

### Keywords:

Self-Cleaning Concrete  
 $TiO_2$   
 $Al_2O_3$   
Photocatalytic  
Abrasion Resistance

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

DOI: 10.22065/jsce.2025.512704.3682

\*Corresponding author: Leila Shahryari  
Email address: Leila.shahryari@iau.ac.ir



## تأثیر $TiO_2$ و $Al_2O_3$ بر مقاومت فشاری و سایشی بتن خودتمیزشونده

لیلا شهریاری<sup>۱\*</sup>، مجتبی عسکری<sup>۲</sup>، مریم سپاسی<sup>۳</sup>

\* ۱-دانشیار، گروه مهندسی عمران، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

۲-مربی، گروه مهندسی عمران، واحد فیروزآباد، دانشگاه آزاد اسلامی، فیروزآباد، ایران

۳-استادیار، گروه ریاضی، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

### چکیده

رشد چشمگیر شهرنشینی و افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی ناشی از فعالیت‌های صنعتی و شهری، نیاز به مصالح نوین برای کاهش این آلودگی‌ها را بیش از پیش آشکار کرده است. بتن خودتمیزشونده یکی از نوآوری‌های مهم در صنعت بتن محسوب می‌شود که قابلیت کاهش آلاینده‌ها و حفظ زیبایی محیط شهری را دارد. این نوع بتن به واسطه ویژگی فوتوکاتالیستی خود، توان بالایی در تجزیه و کاهش آلاینده‌های موجود در محیط دارد. اما یکی از چالش‌های استفاده از بتن خودتمیزشونده، ضعف مقاومت سایشی است. این تحقیق با هدف بررسی تأثیر افزودن  $(TiO_2)$  و  $(Al_2O_3)$  بر خواص مکانیکی، دوام سایشی و قابلیت خودتمیزشوندگی بتن انجام شده است. به منظور دستیابی همزمان به خواص مکانیکی مناسب، جنبه‌های اقتصادی و قابلیت خودتمیزشوندگی، این مطالعه بر استفاده از مواد افزودنی در اندازه ماکرو تمرکز داشته است. بدین منظور از  $Al_2O_3$  به میزان ۳٪ وزنی سیمان و از  $TiO_2$  به میزان ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ وزنی سیمان استفاده شد. برنامه آزمایشی این تحقیق شامل اسلامپ، مقاومت فشاری در سنین مختلف، مقاومت سایشی و خاصیت فوتوکاتالیستی طرح‌های مختلف می‌شود. نتایج این تحقیق نشان داد که طرح مخلوط حاوی ۳٪  $Al_2O_3$  و ۱۵٪  $TiO_2$  عملکرد مکانیکی مطلوبی داشته و بهینه‌ترین خاصیت خودتمیزشوندگی ممکن را ارائه می‌دهد. همچنین، مقاومت سایشی طرح مخلوط حاوی ۳٪  $Al_2O_3$  و ۱۵٪  $TiO_2$  نسبت به طرح کنترل ۴۵٪ افزایش یافت.

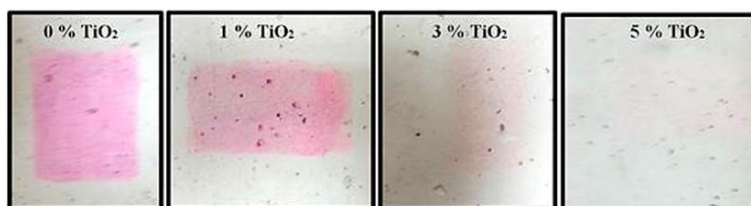
کلمات کلیدی: بتن خودتمیزشونده،  $Al_2O_3$ ،  $TiO_2$ ، فوتوکاتالیستی، مقاومت سایشی.

شناسه دیجیتال:	سابقه مقاله:				
	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.512704.3682					
10.22065/jsce.2025.512704.3682	۱۴۰۵/۰۴/۳۱	۱۴۰۴/۰۸/۲۹	۱۴۰۴/۰۸/۲۹	۱۴۰۴/۰۸/۲۰	۱۴۰۴/۰۳/۲۲
لیلا شهریاری					نویسنده مسئول:
Leila.shahryari@iau.ac.ir					پست الکترونیکی:

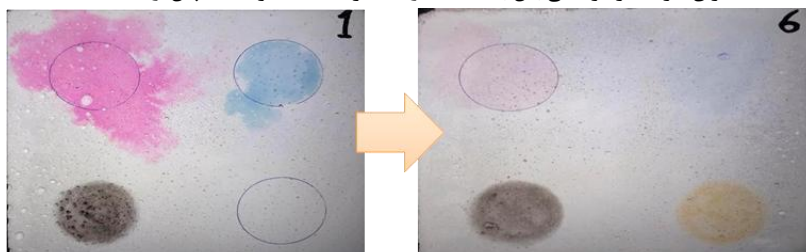
## ۱- مقدمه

با رشد شهرنشینی و افزایش تولید آلاینده‌ها، نیاز به راهکارهای علمی و عملی برای کاهش یا حذف این آلاینده‌ها بیش از گذشته احساس می‌شود. در این میان، بتن خودتمیزشونده به عنوان یکی از فناوری‌های نوین مورد توجه فراوان قرار گرفته است. این نوع بتن به واسطه ویژگی فوتوکاتالیستی خود، توان بالایی در تجزیه و کاهش آلاینده‌های موجود در محیط دارد [۱]. مهم‌ترین مزیت بتن خودتمیزشونده، حفظ زیبایی سطح بتن و تجزیه آلاینده‌هایی است که عمدتاً ناشی از تردد وسایل نقلیه و عابرین می‌باشند. استفاده از بتن خودتمیزشونده علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی پاک‌سازی محیط، به بهداشت و زیباسازی شهری نیز کمک شایانی می‌کند. این خاصیت عمدتاً به واسطه افزودن مواد خاص به طرح مخلوط بتن ایجاد می‌شود که در میان آن‌ها  $TiO_2$ ، به دلیل دسترسی آسان، قیمت مناسب و عملکرد قابل قبول در کاربری‌هایی نظیر پیاده‌روسازی، جداول بتنی، نماهای ساختمان و پوشش‌های دیگر، کاربرد فراوان دارد [۲].  $TiO_2$  تحت تأثیر اشعه فرابنفش خورشید وارد واکنش‌های اکسایشی می‌شود و از طریق فرآیند فوتوکاتالیستی، ترکیبات آلی، غشای باکتری‌ها و سایر آلاینده‌ها را تجزیه می‌کند. به همین علت، این ماده در ایجاد خاصیت خودتمیزشوندگی برای مصالحی همچون رنگ، شیشه و به ویژه بتن، نقش کلیدی ایفا می‌نماید [۳].

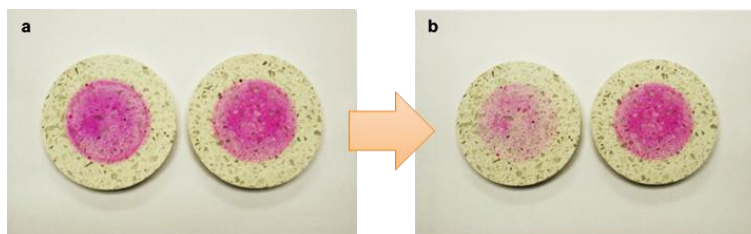
با وجود فواید زیاد  $TiO_2$  در بتن خودتمیزشونده، کاهش مقاومت مکانیکی و سایشی آن به ویژه در کف‌سازی‌های پررفت و آمد یک چالش مهم است و می‌توان عمر مفید بتن را کاهش دهد [۴]. برای جبران این مشکل، افزودن  $Al_2O_3$  با سختی بالا به بتن پیشنهاد می‌شود که سبب افزایش تراکم، کاهش نفوذپذیری و ارتقای دوام سازه می‌گردد [۵]. با وجود به‌کارگیری بتن‌های خودتمیزشونده در کشورهای توسعه یافته، دستیابی همزمان به خواص مکانیکی مطلوب، صرفه اقتصادی و قابلیت خودتمیزشوندگی در این بتن‌ها همچنان یک معضل اساسی به‌شمار می‌رود. تاکنون تحقیقات زیادی بر روی بتن‌های خودتمیزشونده یا بتن‌های ضدسایش انجام شده. باگیاما و همکاران در سال ۲۰۲۳ به امکان‌سنجی ساخت و بررسی رفتار ملات سیمانی خودتمیزشونده پرداختند. در این تحقیق از  $TiO_2$  و پودر باریت در ملات سیمانی استفاده شد و خاصیت خودتمیزشوندگی آن مورد ارزیابی قرار گرفت. در نهایت عملکرد خودتمیزشوندگی ملات‌ها با حداقل ۴٪  $TiO_2$  موثرترین طرح مورد بررسی انتخاب شد [۶]. سارگونان و همکاران در سال ۲۰۲۲ میلادی به بررسی آزمایشگاهی رفتار بتن خودتمیزشونده با استفاده از  $Al_2O_3$  پرداختند. در این تحقیق از  $Al_2O_3$  در نسبت‌های مختلف وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵٪ سیمان در بتن استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن  $Al_2O_3$  به میزان حداقل ۵٪، علاوه بر القای خاصیت خودتمیزشوندگی باعث می‌شود تا بتن به بیشترین مقاومت فشاری و کششی دست یابد [۷]. دیکار و همکاران در سال ۲۰۲۱ به امکان‌سنجی ساخت و بررسی رفتار بتن خودتمیزشونده با نانو  $TiO_2$  پرداختند. در این تحقیق از نانو  $TiO_2$  در نسبت‌های مختلف وزنی ۰/۵، ۱ و ۱/۵٪ سیمان استفاده شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که استفاده از مقادیر بیش از ۰/۵ نانو  $TiO_2$  در بتن تأثیری بر خواص خودتمیزشوندگی نخواهد داشت [۸]. ویسالی و همکاران در سال ۲۰۲۰ به امکان‌سنجی ساخت بتن خود تمیز شونده سازگار با محیط زیست با استفاده از دی‌اکسید روی پرداختند. در نتایج این تحقیق اعلام شد که افزودن ۵٪ دی‌اکسید روی در بتن بهترین عملکرد را در مقایسه با سایر نمونه‌های ساخته شده داشته است [۹]. یوسفی نژاد و همکاران در سال ۱۴۰۰ به بررسی کاربرد نانو  $Al_2O_3$  در بهبود برخی خواص مکانیکی و افزایش مقاومت در برابر سایش بتن پرداختند. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن ۵٪ پودر نانو  $Al_2O_3$  در بتن می‌تواند ضمن بهبود نسبی برخی از خواص مکانیکی مورد آزمایش، مقاومت سایشی بتن را نیز تا ۷۷٪ افزایش دهد [۱۰]. شکل شماره ۱ تا ۴ مربوط به آزمایش خودتمیزشوندگی بتن را در تعدادی از تحقیقات گذشته نشان می‌دهند که به صورت مستقل توسط محققان انجام شده و نتایج آن به‌طور کیفی و بر پایه مشاهده چشمی مورد ارزیابی قرار گرفته است.



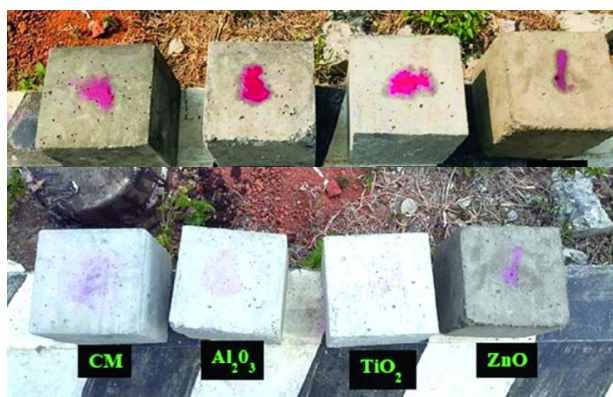
شکل ۱ مقایسه میزان خودتمیزشوندگی بتن با استفاده از مقادیر مختلف نانو  $TiO_2$  پس از گذشت ۲۴ ساعت [۸]



شکل ۲ سطح نمونه بتنی آغشته شده با ماده آلوده کننده دوده (مشکی)، رودامین B (صورتی) و متیلن (آبی) به منظور آزمایش بر روی رنگ سطح بتن نمونه با ۵٪  $TiO_2$  بعد از گذشت ۲۴ ساعت را نشان می‌دهد [۱۱]



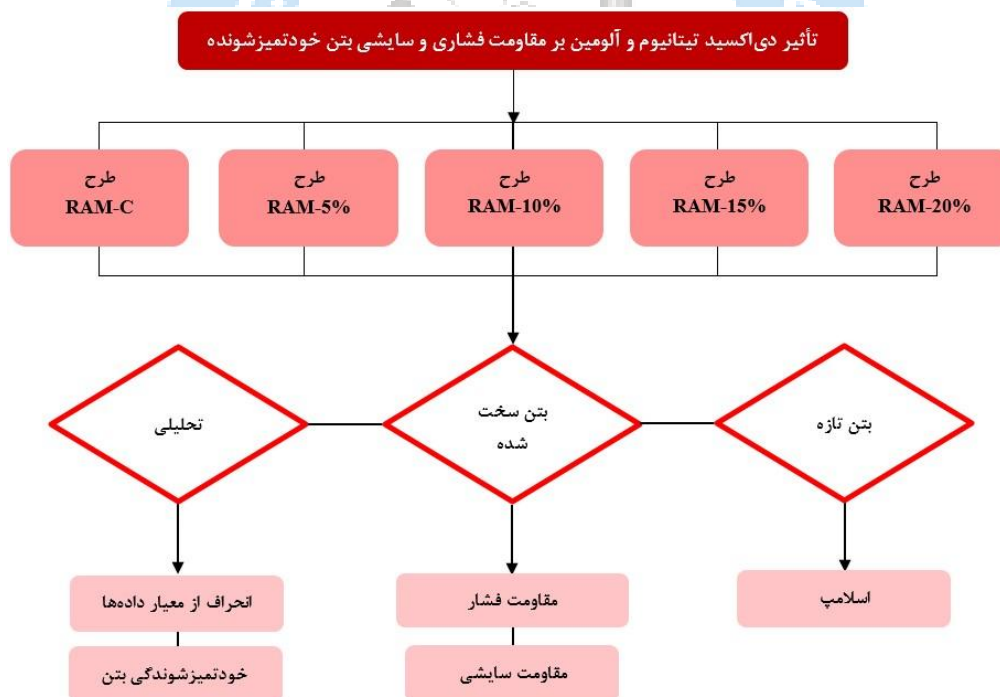
شکل ۳ تغییر رنگ آلاینده (رودامین B) روی نمونه‌های خودتمیزشونده را نشان می‌دهد. در سمت چپ نمونه حاوی ۵٪  $TiO_2$  و در سمت راست نمونه بدون  $TiO_2$  را نشان می‌دهد. تصویر (a) وضعیت نمونه‌ها را پیش از آزمایش، و تصویر (b) را پس از ۶ ساعت تابش اشعه فرابنفش (UV) نشان می‌دهد [۱۲]



شکل ۴ مقایسه میزان خودتمیزشوندگی بتن با استفاده از مواد مختلف کاتالیزور اعم از  $Al_2O_3$ ،  $TiO_2$ ،  $ZnO$  پس از گذشت ۲۴ ساعت در معرض نور خورشید [۱۳]

با جمع‌بندی نتایج تحقیقات گذشته ملاحظه گردید که مواد فوتوکاتالیستی، با قرارگیری در معرض نور خورشید آلودگی‌های محیطی یا چسبیده به سطح را تجزیه کرده و کاهش می‌دهد. پرکاربردترین مواد فوتوکاتالیستی که تاکنون شناسایی شده‌اند عبارتند از  $TiO_2$ ، دی‌اکسید روی، دی‌اکسید تنگستن که در این میان  $TiO_2$  دارای عملکرد بهتر و دسترسی به آن راحت‌تر می‌باشد. مکانیسم کارکرد  $TiO_2$  اینگونه است که با جذب پرتوهای فرابنفش نور خورشید به سطح فتوکالیست، الکترون‌های این ماده تحریک شده و با مواد اطراف خود واکنش می‌دهند که اغلب این الکترون‌ها سبب تشکیل رادیکال‌ها و یون‌های هیدروکسید می‌شود. این واکنش قادر به اکسیداسیون مواد شیمیایی آلی،

تخریب چربی‌ها و آلودگی‌ها، تخریب باکتری‌ها و ویروس‌ها می‌شود [۷-۱۰]. همچنین افزودن نانو مواد، به ویژه نانو  $TiO_2$ ، باعث تقویت واکنش فوتوکاتالیستی و افزایش خاصیت خودتمیزشوندگی بتن می‌شود، اما استفاده از این مواد هنوز با محدودیت‌های فنی و اقتصادی همراه است. هزینه بالای تولید نانو ذرات موجب شده توسعه استفاده صنعتی از آن‌ها محدود بماند و تنها چند محصول خاص در مقیاس بازار قابل عرضه باشند [۱۴]. برای نمونه، هزینه ساخت بتن خودتمیزشونده با نانو  $TiO_2$  حداقل ۶۳ برابر بیشتر از استفاده از  $TiO_2$  معمولی است و با توجه به میزان بهبود عملکرد، این افزایش هزینه از نظر اقتصادی توجیه‌پذیر نیست. یکی از مشکلات اصلی در کاربرد نانو مواد، توزیع غیر یکنواخت آن‌ها در ماتریس بتن است. این ذرات در هنگام اختلاط تمایل به تجمع دارند و به صورت کلوخه ظاهر می‌شوند، که تنها با استفاده از رقیق‌کننده‌ها یا دستگاه‌های مخلوط‌کن پر قدرت می‌توان این مشکل را تا حدی رفع کرد. علاوه بر این، وجود سطح ویژه زیاد در نانوذرات باعث افزایش جذب آب و در نتیجه کاهش اسلامپ می‌شود. این عوامل در مجموع چالش‌هایی هستند که باید پیش از گسترش کاربرد نانو مواد در صنعت بتن برطرف شوند [۱۲، ۱۳]. همچنین با توجه به پیشینه موضوع می‌توان دریافت که عمدتاً میزان مصرف  $Al_2O_3$  و  $TiO_2$  در بتن بسیار متغیر است. بنابراین بهتر است نوع و میزان استفاده از این ماده در بتن بر اساس آزمایش یا توصیه کارخانه سازنده صورت گیرد [۱۵، ۱۶]. زیرا با توجه به نوع و ویژگی محصول، روش ساخت، میزان خلوص و پایه شیمیایی آن می‌تواند میزان اثرگذاری آن تغییر یابد. از طرفی میزان اثرگذاری  $TiO_2$  با  $Al_2O_3$  در بتن همواره از ابهامات است که تاکنون پاسخی برای آن یافت نشده است. در این تحقیق به بررسی اثر همزمان  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  در نسبت‌های مختلف وزنی سیمان، بر خواص مکانیکی و دوام سایشی بتن خودتمیزشونده پرداخته شد. همچنین این تحقیق به دنبال شناخت تأثیرات متقابل این دو ماده بر عملکرد فوتوکاتالیستی بتن می‌باشد. انتظار می‌رود که نتایج حاصل از این مطالعه بتواند به ارائه یک طرح اختلاط بهینه برای بتن‌های خودتمیزشونده، با خواص متعادل میان دوام مکانیکی و اثرات زیست‌محیطی، منجر گردد. شکل شماره ۵ فلوجارت روند انجام این تحقیق را نشان می‌دهد.



شکل ۵ فلوجارت روند انجام تحقیق

## ۲- مواد و مصالح

## ۲-۱- شن

شن مصرفی جهت ساخت نمونه‌های بتن در این تحقیق، مخلوط نخودی و بادامی شکسته بود که از معدن دوکوهک استان فارس تهیه شد. جدول شماره ۱ سایر مشخصات فیزیکی این محصول را نشان می‌دهد.

جدول ۱ مشخصات شن مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	میزان جذب آب	وزن مخصوص SSD
	mm	%	kg/m <sup>3</sup>
مخلوط بادامی و نخودی	۱۹	۱/۵	۲۶۳۰

## ماسه

## ۲-۲-

ماسه مصرفی جهت ساخت نمونه‌های بتن در این تحقیق از معادن منطقه دوکوهک فارس تهیه شد. ماسه مصرفی بصورت شکسته بود. جدول شماره ۲ سایر مشخصات فیزیکی این محصول را نشان می‌دهد.

جدول ۲ مشخصات ماسه مصرفی مورد استفاده در ساخت بتن

نوع سنگدانه	حداکثر قطر سنگدانه	مدول نرمی	وزن مخصوص SSD	جذب آب
	mm	نرمی	kg/m <sup>3</sup>	%
ماسه	۴/۷۵	۳/۱	۲۶۰۰	۲/۳

## ۲-۳- سیمان

سیمان مصرفی در این تحقیق تیپ ۲ فارس نو می‌باشد. چگالی این سیمان ۳/۱۰ گرم بر سانتیمتر مربع است. ساختار شیمیایی این سیمان در جدول شماره ۳ که منطبق بر شناسه منتشر شده از طرف شرکت سازنده این سیمان می‌باشد ارائه شده است [۲۹].

جدول ۳ ساختار شیمیایی سیمان تیپ ۲ فارس نو [۲۹]

C <sub>3</sub> S	CaO	SO <sub>3</sub>	MgO	FE <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>
% ۲۲/۶۸	% ۶۰/۴۶	% ۱/۳۵	% ۲/۲۰	% ۳/۹۵	% ۴/۷۰	% ۲/۹۰

## ۲-۴- دی‌اکسید تیتانیوم

دی‌اکسید تیتانیوم با نماد TiO<sub>2</sub> یک ماده معدنی است که برای استفاده در محصولات مصرفی متنوع فراوری و استفاده می‌شود. این ماده با نام‌های اکسید تیتانیوم یا تیتانیا نیز شناخته می‌شود. این ماده از فلز تیتانیوم و اکسیژن تشکیل شده است و در طبیعت به صورت کریستال آناتاز، بروکیت و روتیل یافت می‌شود. تیتانیوم نهمین عنصر رایج در پوسته زمین محسوب می‌شود و در طبقه بندی شیمیایی یک ماده خنثی است. این ماده به عنوان جاذب اشعه UV یا فتوکاتالیست شهرت دارد. این خاصیت آن را به عنوان یک ماده حفاظتی و فوتوکاتالیزور تبدیل کرده است. طبق آمار ارائه شده سالانه حدود ۷/۵ میلیون تن TiO<sub>2</sub> در جهان تولید و بسته‌بندی می‌شود و این مقدار در حال افزایش است [۱۸، ۱۷]. ایران به عنوان یکی از غنی‌ترین کشورهای جهان از لحاظ دارا بودن معادن تیتانیوم شمرده می‌شود. از بزرگترین معادن تیتانیوم ایران می‌توان به معدن قره‌آغاج در استان آذربایجان شرقی و معدن کهنوج در استان کرمان اشاره کرد که عمدتاً محصول آن بصورت خام به

کشورهای چین یا هند صادر می‌شود [۱۸]. در این تحقیق از  $TiO_2$  فاز آناتاز، تولید شرکت Lomon Billions محصول کشور چین استفاده شده است. این ماده با خلوص بیش از ۹۹٪ عرضه می‌گردد و حداکثر اندازه ذرات آن ۵ میکرون می‌باشد. سایر مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن برگرفته از اطلاعات مندرج بر روی بسته‌بندی محصول است که به شرح جدول شماره ۴ و ۵ می‌باشد.

جدول ۴ خصوصیات شیمیایی اکسید  $TiO_2$ 

SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	SO <sub>2</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	AlO <sub>2</sub>
٪۰/۷	٪۰/۲	٪۱	٪۰/۱	٪۱	٪۹۵	٪۲

جدول ۵ خصوصیات فیزیکی  $TiO_2$ 

حداکثر رطوبت	٪۰/۱۵
pH	۷
جرم مولکولی	۸۰ g/mol
وزن مخصوص	۴/۱ g/cm <sup>3</sup>
نقطه جوش	۲۹۷۲ C
شکل ظاهری	سفید رنگ بدون بو
میزان انحلال پذیری	کم



شکل ۶ دی‌اکسید تیتانیوم مصرفی

## ۲-۵- دی‌اکسید آلومین

دی‌اکسید آلومین با فرمول شیمیایی  $Al_2O_3$  یک ماده معدنی است که در طبیعت به صورت بوکسیت و کوراندوم یافت می‌شود. این ماده به‌عنوان پودری جاذب، خشک‌کننده و کاتالیزور در صنایع مختلف صنعتی، شیمیایی و تجاری کاربرد دارد.  $Al_2O_3$  ماهیتی خنثی و آمفوتریک داشته و یک عایق الکتریکی محسوب می‌شود. این ماده به دلیل خنثی بودن از لحاظ شیمیایی، با محیط زیست سازگار است و

استفاده از آن برای انسان بی خطر می باشد. علاوه بر ویژگی پرکنندگی و افزایش تراکم خمیره بتن،  $Al_2O_3$  به واسطه خاصیت پوزولانی و سطح ویژه بالای آن در مقایسه با مواد ماکروسکوپی، موجب بهبود همگنی و افزایش استحکام محیط سیمانی می شود [۱۵].  $Al_2O_3$  مصرفی در این تحقیق، به صورت پودر اکسیدی با ساختار کروی کریستالی فاز آلفا و حداکثر اندازه ۴۵ میکرون بوده است. آلومینای فاز آلفا به عنوان قوی ترین و سخت ترین سرامیک اکسیدی شناخته می شود. سایر مشخصات فیزیکی و شیمیایی این محصول برگرفته از اطلاعات مندرج بر روی بسته بندی آن است که به شرح جدول شماره ۶ و ۷ می باشد.

جدول ۶ خصوصیات شیمیایی  $Al_2O_3$ 

SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
٪ ۳	٪ ۳	٪ ۱	٪ ۱	٪ ۱	٪ ۱	٪ ۹۰

جدول ۷ خصوصیات فیزیکی  $Al_2O_3$ 

جرم مولکولی	۱۰۱ g/mol
شکل ظاهری	جامد سفید رنگ و بدون بو
چگالی	۳/۹ g/cm <sup>3</sup>
نقطه ذوب	۲۹۷۷ C
نقطه جوش	۲۰۷۰ C
انحلال پذیری	نامحلول در آب و اکثر حلال ها



شکل ۷ دی اکسید آلومین مصرفی جهت تقویت مقاومت سایشی بتن خودتمیزشونده

## ۲-۶- آبر روان کننده

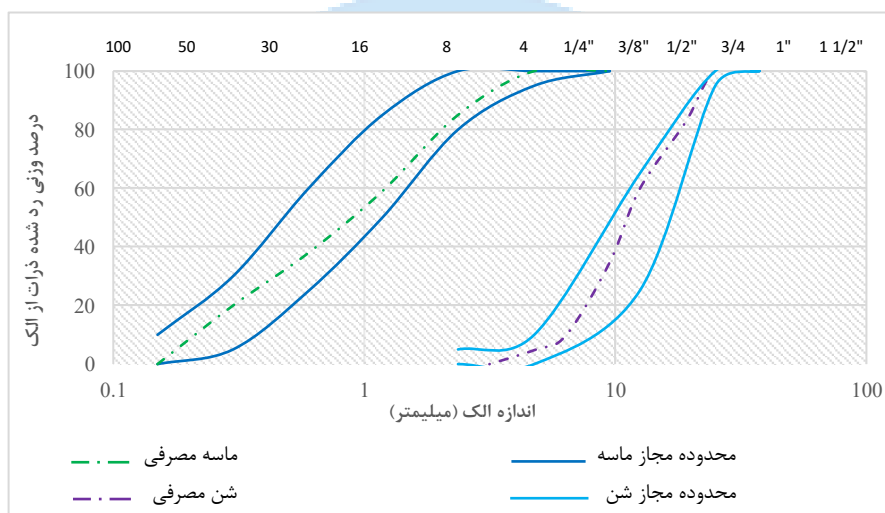
استفاده از محصولات روان کننده یا کاهنده آب، به جهت افزایش کیفیت خصوصیات مکانیکی و دستیابی به روانی مطلوب بسیار مرسوم بوده و مورد استفاده قرار می گیرد [۱۱]. در این تحقیق برای ساخت بتن و تامین روانی مدنظر از آبر روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات، استفاده گردید. خصوصیات فیزیکی این ماده مطابق جدول شماره ۸ می باشد.

جدول ۸ خصوصیات فیزیکی ابر روان کننده بر پایه کربوکسیلات

رنگ	وزن مخصوص	استاندارد	یون کلر	PH	حالت فیزیکی	مقدار جایگزینی
بی رنگ	1/1 gr/cm <sup>3</sup>	ASTM C1017	کمتر از ۰/۱ درصد	۵/۵۸	مایع	۰/۱ تا ۰/۳٪ وزن سیمان

### ۳- دانه بندی

در آزمایش دانه بندی سنگدانه‌ها، مصالح سنگی با ایجاد لرزه توسط الک‌های مختلف شماره بندی شده عبور داده می‌شوند و اندازه دانه‌های روی هر الک و مقدار آن مشخص می‌گردد. قابل ذکر است که برای دانه بندی مصالح درشت دانه یا شن از دستگاه یکنواخت کننده دانه استفاده می‌شود. مطابق با استاندارد ASTM-C136 دانه بندی از الک‌های سیمی استاندارد با سوراخ‌های مربعی استفاده گردید. با محاسبه مقادیر درصد تجمعی میزان عبور کرده از هر الک که بر اساس شماره بندی استاندارد روی یکدیگر قرار گرفته‌اند، می‌توان این مقادیر را با منحنی استاندارد ASTM-C33 مقایسه نمود [۲۰]. در منحنی دانه بندی، محور عمودی نمایش دهنده درصد تجمعی عبور داده شده از هر الک و محور افقی بیانگر اندازه یا شماره الک می‌باشد.



شکل ۸ دانه بندی شن و ماسه مورد استفاده جهت ساخت بتن و انطباق آن با محدوده استاندارد ASTM-C33

### ۴- برنامه آزمایشگاهی و طرح مخلوط

در این تحقیق برای ساخت نمونه‌های بتنی خودتمیزشونده و مقاوم در برابر سایش از ترکیب  $\text{TiO}_2$  و  $\text{AL}_2\text{O}_3$  استفاده گردید. در ابتدا برای تعیین مقدار بهینه و موثر  $\text{AL}_2\text{O}_3$  در بتن، از نسبت‌های مختلف ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵٪ وزنی سیمان استفاده شد و پس از ۷ روز عمل آوری، تحت آزمایش مقاومت سایشی قرار گرفتند. نتایج این بخش از تحقیق نشان داد که بیشترین مقاومت سایشی مربوط به استفاده از  $\text{AL}_2\text{O}_3$  به میزان ۳٪ وزنی سیمان در بتن می‌باشد و مقادیر بیش از آن تاثیر محسوسی در افزایش مقاومت سایشی بتن نخواهد داشت. پس از آن چند طرح مخلوط با نسبت ثابت و یکسان  $\text{AL}_2\text{O}_3$  و نسبت‌های مختلف وزنی  $\text{TiO}_2$  تهیه گردید. بدین منظور از  $\text{AL}_2\text{O}_3$  به میزان ۳٪ وزنی سیمان و از  $\text{TiO}_2$  به میزان ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ وزنی سیمان به مخلوط بتن اضافه شد. لازم به ذکر است که درصدهای جایگزینی نامبرده بر مبنای توصیه سایر تحقیقات گذشته در نظر گرفته شد [۱۴-۱۸]. در این تحقیق عیار سیمان مصرفی ۴۳۰ کیلوگرم در هر متر مکعب، حداکثر اندازه اسمی سنگدانه (شن) ۱۹ میلی‌متر، نسبت آب به سیمان ۰/۳ در نظر گرفته شد. همچنین میزان استفاده از آبروان کننده پایه کربوکسیلات ۰/۰۵٪ وزنی سیمان در نظر گرفته شد. جدول شماره ۹ طرح اختلاط بتن به ازای هر متر مکعب را نشان می‌دهد.

جدول ۹ میزان مصالح مصرفی و طرح مخلوط برای ساخت هر متر مکعب بتن

ردیف	نام	سیمان	شن	ماسه	TiO <sub>2</sub>	AL <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	آبر روان کننده	آب	نسبت افزودن TiO <sub>2</sub> به سیمان
		kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	%
۱	RAM-C	۴۳۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۰	۱۲/۹	۲/۱۵	۱۲۹	۰
۲	RAM-5%	۴۳۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۲/۱۵	۱۲/۹	۲/۱۵	۱۲۹	۵
۳	RAM-10%	۴۳۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۴۳	۱۲/۹	۲/۱۵	۱۲۹	۱۰
۴	RAM-15%	۴۳۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۶۴/۵	۱۲/۹	۲/۱۵	۱۲۹	۱۵
۵	RAM-20%	۴۳۰	۶۰۰	۱۲۰۰	۸۶	۱۲/۹	۲/۱۵	۱۲۹	۲۰

برنامه آزمایشگاهی این تحقیق شامل ۵۵ نمونه است که از این تعداد، ۴۵ نمونه برای آزمون مقاومت فشاری، ۵ نمونه برای بررسی خاصیت خودتمیزشوندگی و ۵ نمونه برای آزمون مقاومت سایشی در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی مقاومت فشاری و کنترل انحراف نتایج، از سه نمونه برای هر نمونه و هر سن استفاده شده و میانگین نتایج به عنوان مقدار نهایی گزارش شده است. جزئیات مربوط به ابعاد، اندازه و دستورالعمل اجرای آزمون‌ها در جدول شماره ۱۰ ارائه شده‌اند.

جدول ۱۰ برنامه آزمایشگاهی این تحقیق شامل نوع آزمایشات، استاندارد آزمایش، ابعاد نمونه مورد آزمایش و تعداد نمونه

ردیف	نام آزمایش	استاندارد آزمایش	تعداد نمونه	ابعاد نمونه (cm)	نوع نمونه
۱	اسلامپ بتن	ASTM-C143	-	-	-
۲	مقاومت فشاری	BS-EN-12390-3	۴۵ عدد	۱۵×۱۵×۱۵	مکعبی
۳	مقاومت سایشی	ISIRI 755-2	۵ عدد	۱۰×۱۰×۱۰	مکعبی
۴	خودتمیزشوندگی	سایر تحقیقات گذشته	۵ عدد	۱۵×۱۵×۱۵	مکعبی

در این تحقیق سنگدانه مصرفی قبل از اختلاط در بتن، بصورت اشباع با سطح خشک (حالت SSD) درآمد. در این شرایط سنگدانه آب بتن تازه را جذب نمی‌کند و آب اضافه‌ای هم وارد بتن نمی‌کند. بدین ترتیب سنگدانه‌ها اعم از شن و ماسه کاملاً به حالت اشباع درآمدند سپس به مدت ۲۴ ساعت در معرض هوای بیرون در دمای ۳۰+ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا رطوبت سطحی آن خشک گردد. پس از آن سنگدانه‌ها وارد مخلوط‌کن شده و به همراه سیمان و نیمی از آب به مدت ۲ دقیقه مخلوط شدند. سپس AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> و TiO<sub>2</sub> به همراه آبروان کننده رقیق شده و با همزن مخلوط شدند تا محلولی رقیق و یکدست بدست آید. سپس این محلول به مخلوط بتن اضافه گردید و به مدت ۱ دقیقه مخلوط شدند. در انتها باقیمانده آب به آرامی اضافه و به مدت ۲ دقیقه دیگر اختلاط صورت گرفت. نمونه‌ها پس از قالب‌گیری به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند و پس از آن به مدت ۷، ۲۸ و ۹۰ روز عمل‌آوری شدند. شکل شماره ۹ برخی از نمونه‌ها را حین قالب‌گیری نشان می‌دهد.



شکل ۹ قالب‌گیری برخی از نمونه‌های مورد تحقیق

## ۵- یافته‌ها

## ۵-۱- اسلامپ

جدول شماره ۱۱ میزان اسلامپ طرح مخلوط‌های مورد آزمایش نشان می‌دهد. طبق نتایج بدست آمده، هرچه میزان استفاده از  $TiO_2$  در بتن بیشتر باشد، میزان اسلامپ به واسطه آن کاهش می‌یابد. بطوریکه با افزودن ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪  $TiO_2$  در بتن اسلامپ آن به ترتیب ۸، ۲۰، ۴۱ و ۵۴٪ کاهش می‌یابد. عامل اصلی افت اسلامپ، افزایش سطح ویژه ذرات  $TiO_2$  است که منجر به افزایش جذب آب آزاد مخلوط و کاهش حجم آب مؤثر در جریان یافتگی خمیر سیمان می‌شود. همچنین در مقادیر بالاتر (به‌ویژه در نمونه‌های RAM-15, 20%) پدیده کلوخگی موضعی ذرات محتمل‌تر است. این امر ضمن افزایش مقاومت اصطکاکی بین ذرات، موجب افت بیشتر اسلامپ می‌شود. این روند با یافته‌های پژوهش‌های پیشین [۲۵، ۱۳] نیز هم‌خوانی دارد که کاهش اسلامپ در اثر افزایش سطح ویژه و جذب فیزیکی آب توسط  $TiO_2$  را گزارش کرده‌اند.

جدول ۱۱ میزان اسلامپ نمونه‌های مختلف

تغییرات	اسلامپ	نام طرح
%	cm	
-	۱۲	RAM-C
۸	۱۱	RAM-5%
۲۰	۹/۵	RAM-10%
۴۱	۷	RAM-15%
۵۴	۵/۵	RAM-20%



شکل ۱۰ مقایسه اسلامپ بتن معمولی با بتن خود تمیز شونده

## ۵-۲- مقاومت فشاری و انحراف از معیار داده

در این تحقیق برای بررسی مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه از استاندارد BS-EN-12390-3 پیروی شد. جدول شماره ۱۲ مقاومت فشاری نمونه‌ها را نشان می‌دهد. پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از نانو  $TiO_2$  در بتن موجب افزایش مقاومت فشاری می‌گردد [۷-۱۲]. در این تحقیق نیز همان‌طور که انتظار می‌رفت، ترکیب  $Al_2O_3$  و  $TiO_2$  باعث افزایش مقاومت فشاری بتن گردیدند. اما این افزایش مقاومت تا آستانه استفاده از حداکثر ۱۰٪ وزنی  $TiO_2$  و ۳٪ وزنی  $Al_2O_3$  در بتن حاصل شد، به‌گونه‌ای که افزودن مقادیر بیشتر از این حد باعث کاهش مقاومت فشاری بتن گردید. نتایج این تحقیق نشان داد که طرح RAM-5، 10% می‌تواند مقاومت فشاری نمونه را در تمامی سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه افزایش دهد. همچنین طرح RAM-15% نسبت به طرح RAM-C که طرح کنترل می‌باشد توانست مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه را اندکی افزایش دهد اما این افزایش مقاومت کمتر از ۱۰٪ بود، در حالی که این طرح در کسب مقاومت فشاری ۷ روزه تا ۱۸٪ کاهش مقاومت داشته یا به عبارتی بتن دیرگیر شده است. در طرح RAM-20% کاهش مقاومت بتن در سن ۷ روز مشاهده می‌شود و مقاومت ۲۸ و ۹۰ روزه نسبت به طرح RAM-C بدون تغییر مانده است. همچنین استفاده از  $TiO_2$  به همراه  $Al_2O_3$  موجب افزایش سن گیرش بتن یا به عبارتی ساده‌تر بتن دیرگیر می‌شود. برخی از دلایلی که موجب این افزایش مقاومت در بتن شده‌اند عبارتند از: ریز بودن ذرات  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  که موجب افزایش تراکم و مقاومت می‌گردد.  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  هر دو دارای سختی و استحکام بالایی می‌باشند که در افزایش مقاومت فشاری بتن تأثیرگذارند.  $Al_2O_3$  یکی از عناصر پایه در ساختار سیمان و واکنش هیدراتاسیون آن می‌باشد که موجب افزایش چسبندگی و مقاومت فشاری بتن می‌شود.

در ادامه به منظور بررسی دقیق‌تر رفتار  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  بر روی مقاومت فشاری بتن، از روش ارزیابی انحراف معیار داده‌ها استفاده شد. در این راستا ارتباط میان نتایج بین مقاومت فشاری طرح‌های متفاوت در سنین مختلف و میزان تغییرات بین نتایج آزمون‌ها بررسی شده و در جدول شماره ۱۲ ارائه شد. نتایج این تحلیل نشان داد که طرح RAM-20% دارای بیشترین میزان انحراف از معیار (V) و ضریب تغییر (S) در بین سایر طرح مخلوط‌ها می‌باشد. بنابراین می‌توان دریافت که افزودن مقادیر بالای  $TiO_2$  در بتن ریسک تشکیل کلوخه و ناحیه ضعف در بتن را افزایش می‌دهد. اما مقادیر پایین آن خللی در بتن ایجاد نکرده و به راحتی به همراه آب و روان‌کننده در ماتریس بتن پخش می‌شود. پیشنهاد شده که ضریب تغییرات مساوی یا کوچکتر از ۱۰٪ در بتن، نشان دهنده کنترل کیفیت مناسب می‌باشد [۱۱].

میزان انحراف معیار یکی از شاخص‌های پراکندگی است که نشان می‌دهد به‌طور میانگین داده‌ها چه میزان از مقدار متوسط فاصله دارند. اگر انحراف معیار مجموعه‌ای از داده‌ها نزدیک به صفر باشد، نشانه آن است که داده‌ها نزدیک به میانگین هستند و پراکندگی اندکی دارند. در حالیکه انحراف معیار بزرگ بیانگر پراکندگی قابل توجه داده‌ها می‌باشد. به‌طور کلی واریانس و انحراف معیار، معیارهای پراکندگی هستند که درجه تغییر پذیری، گسترش یا پراکندگی یک متغیر را تعیین می‌کنند [۲۷]. در این تحقیق میزان انحراف از معیار داده‌ها از طریق رابطه شماره ۱ تا ۴ محاسبه گردید. همچنین شکل شماره ۱۱ میزان انحراف از معیار داده برای هر نمونه را مقایسه می‌کند.

در ابتدا از رابطه شماره ۱ میزان میانگین مقاومت فشاری نمونه‌های مورد آزمایش تعیین می‌شود [۲۷]:

$$A = \frac{\sum \chi_i}{N} \quad (1)$$

در گام دوم از رابطه شماره ۲ مربع اختلاف میزان هر داده محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$m = (\chi_i - A)^2 \quad (2)$$

در گام سوم از رابطه شماره ۳ انحراف معیار نمونه محاسبه می‌شود [۲۷]:

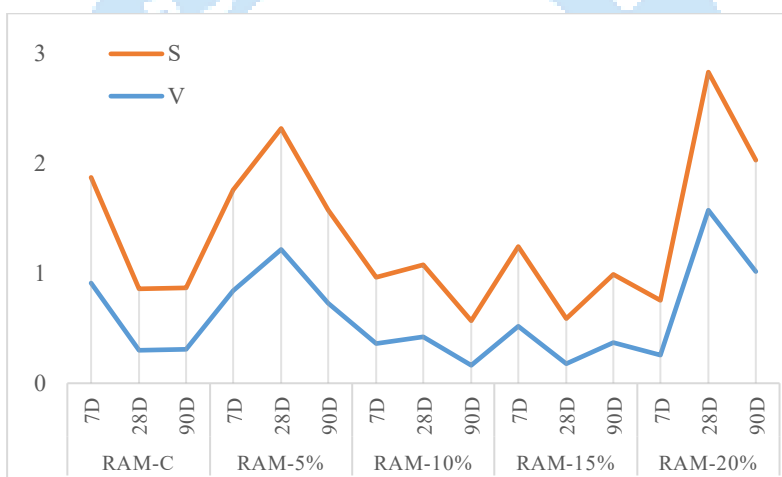
$$S = \sqrt{\frac{\sum (x_i - m)^2}{N - 1}} \quad (3)$$

در نهایت از رابطه شماره ۴ میزان ضریب تغییر محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$V = \frac{S}{A} \times 100 \quad (4)$$

$\sum \chi_i$  = مجموع مقاومت فشاری نمونه‌ها

$N$  = تعداد نمونه‌ها

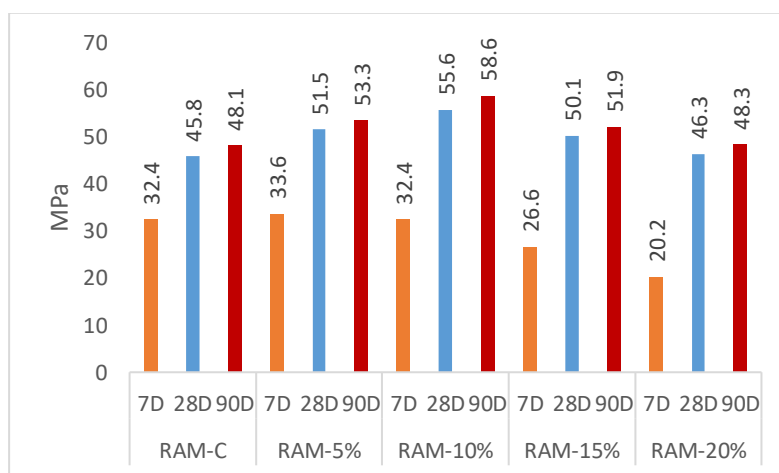


شکل ۱۱ مقایسه میزان انحراف از معیار داده‌ها

جدول ۱۲ مقاومت فشاری نمونه‌های مختلف در سنین ۲۸، ۷ و ۹۰ روزه و مقایسه درصد تغییرات آن

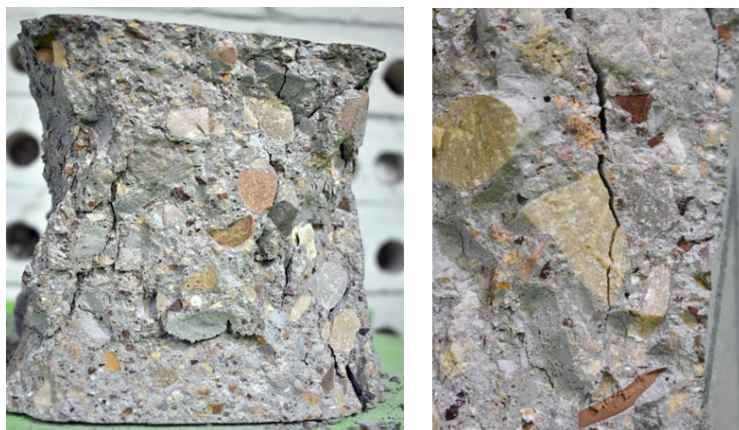
نام طرح	سن بتن DAY	مقاومت فشاری نمونه مکعبی			میانگین مقاومت فشاری نمونه مکعبی			میانگین تغییرات تغییرات %	ضریب تغییرات (V) %	انحراف از معیار (S)
		MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa			
RAM-C	۷ روزه	۳۳/۴	۳۱/۵	۳۲/۳	۳۲/۴	۲۷/۴	-	۰/۹۱	۰/۹۵۴	
	۲۸ روزه	۴۵/۸	۴۵/۲	۴۶/۳	۴۵/۷	۴۰/۷	-	۰/۳۰۳	۰/۵۵۱	
	۹۰ روزه	۴۸/۶	۴۷/۸	۴۸/۲	۴۸/۱	۴۳/۱	-	۰/۳۱	۰/۵۵۷	
RAM-5%	۷ روزه	۳۳/۴	۳۴/۶	۳۲/۸	۳۳/۶	۲۸/۶	۳/۷	۰/۸۴	۰/۹۱۷	
	۲۸ روزه	۵۱/۵	۵۰/۴	۵۲/۶	۵۱/۵	۴۶/۵	۱۱/۸	۱/۲۱	۱/۱	
	۹۰ روزه	۵۳/۳	۵۲/۵	۵۴/۲	۵۳/۳	۴۸/۳	۱۰/۹	۰/۷۲۳	۰/۸۵	

۰/۶	۰/۳۶	۰/۰	۲۷/۴	۳۲/۴	۳۲/۴	۳۳/۰	۳۱/۸	۷ روزه	RAM-10%
۰/۶۵۱	۰/۴۲۳	۲۰/۶	۵۰/۶	۵۵/۶	۵۵/۶	۵۶/۲	۵۴/۹	۲۸ روزه	
۰/۴۰۴	۰/۱۶۳	۲۱/۹	۵۳/۶	۵۸/۶	۵۸/۷	۵۸/۲	۵۹/۰	۹۰ روزه	
۰/۷۲۱	۰/۵۲	-۱۷/۹	۲۱/۶	۲۶/۶	۲۶/۸	۲۷/۲	۲۵/۸	۷ روزه	RAM-15%
۰/۴۱۶	۰/۱۷۳	۸/۸	۴۵/۱	۵۰/۱	۵۰/۶	۴۹/۸	۵۰/۰	۲۸ روزه	
۰/۶۱۱	۰/۳۷۳	۸/۰	۴۶/۹	۵۱/۹	۵۱/۴	۵۲/۶	۵۱/۸	۹۰ روزه	
۰/۵۰۳	۰/۲۵۳	-۳۷/۶	۱۵/۲	۲۰/۲	۱۹/۷	۲۰/۳	۲۰/۷	۷ روزه	RAM-20%
۱/۲۵۳	۱/۵۷	۰/۵	۴۱/۳	۴۶/۳	۴۶/۲	۴۷/۶	۴۵/۱	۲۸ روزه	
۱/۰۰۷	۱/۰۱۳	۰/۳	۴۳/۳	۴۸/۳	۴۸/۴	۴۹/۲	۴۷/۲	۹۰ روزه	



شکل ۱۲ مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه

شکل شماره ۱۳ نحوه شکست نمونه بتن خودتمیزشونده را نمایش می‌دهد. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، شکست نمونه به صورت کامل و مطابق با الگوی شکست ساعت شنی رخ داده است. علاوه بر این، محل شکست عمدتاً در بخش سنگدانه (شن) مشاهده می‌شود که این امر حاکی از آن است که گسیختگی نمونه ناشی از شکست صحیح در ناحیه سنگدانه و نه تخریب خمیر سیمان بوده است. این موضوع بیانگر آن است که افزودنی‌های به‌کاررفته در بتن، تأثیری منفی بر یکپارچگی و دوام خمیر سیمان نداشته‌اند و لذا خمیر سیمانی کیفیت و کارایی مطلوب خود را حفظ کرده است. بنابراین، طراحی مخلوط و استفاده از مواد افزودنی موجب تضعیف ساختار ماتریس سیمان نگردیده و فاز شکست بتن عمدتاً به‌درستی از مسیر سنگدانه‌ها صورت پذیرفته است.



شکل ۱۳ شکست نمونه بتنی خود تمیزشونده

### ۵-۳- سایش

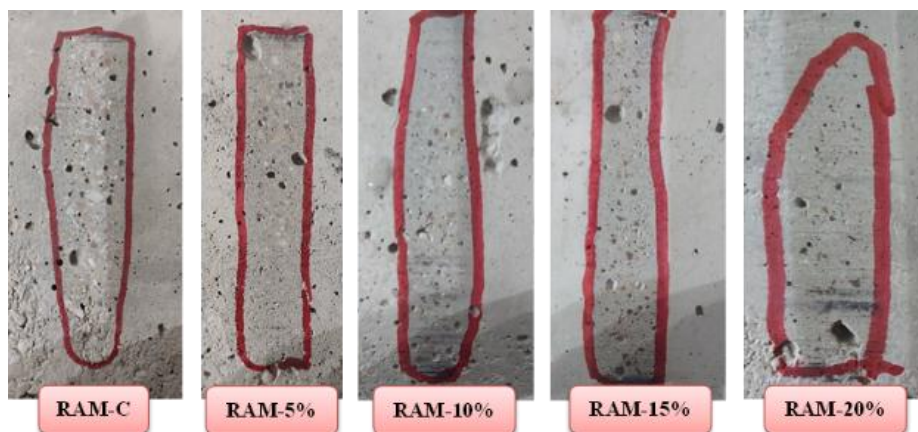
سایش رویه بتن از متداول ترین علل زوال و خرابی سطح بتن است و غالباً بر اثر اصطکاک اجسام سخت روی سطح بتن رخ می دهد. سیمان سخت شده در بتن مقاومت کمی در برابر سایش به خصوص تحت بارهای متناوب دارد. عبور مداوم وسایل نقلیه و افراد در محیط های صنعتی موجب سایش کف سازی های بتنی می شود. در این تحقیق برای بهبود مقاومت سایشی از  $Al_2O_3$  در طرح مخلوط بتن استفاده شده است. آزمایش مقاومت سایشی بر اساس استاندارد ملی ایران ISIRI-755-2 انجام شده و در آن سطح بتن به کمک پودر کوراندوم با مش ۸۰ و دستگاه سایش چرخ پهن دوار انجام گرفت. این دستگاه شامل یک چرخ ساینده فولادی با قطر ۲۰۰ میلی متر و ضخامت ۷۰ میلی متر، یک مخزن ذخیره پودر کوراندوم و شیر کنترل است. چرخ ساینده با سرعت ۷۵ دور در دقیقه دوران می کند و نمونه مکعبی ۲۸ روزه به ابعاد  $10 \times 10 \times 10$  سانتی متر پس از خشک و تمیز شدن، در تماس با چرخ ساینده قرار می گیرد. مواد ساینده از مخزن به کمک قیف هدایت گر به سطح بتن و چرخ ساینده پاشیده می شوند. جریان مواد ساینده باید ثابت بوده، حداقل ۲۵ میلی متر در قیف وجود داشته باشد و با سرعت ۲/۵ لیتر در دقیقه پاشش صورت گیرد. پس از چرخش چرخ ساینده، نمونه برای تعیین میزان سایش برداشته می شود و میانگین طول سایش به عنوان مقاومت سایشی بتن محاسبه می شود [۱۵].

نتایج این بخش از تحقیق نشان داد که با افزایش  $TiO_2$ ، مقاومت سایشی بتن نیز افزایش می یابد که ناشی از سختی بالای  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  می باشد. جدول شماره ۱۳ میزان طول، عرض و مساحت سایش نمونه ها را نشان می دهد. طبق نتایج بدست آمده، میزان طول سایش در طرح RAMC-5، 10، 15، 20% به ترتیب ۸/۰، ۷/۱۲، ۷/۱۴، ۷/۱۸ و ۶/۵۶ سانتی متر می باشد. همچنین میانگین عرض ساینده شده به ترتیب ۱/۶۰، ۱/۴۱، ۱/۱۸، ۱/۰۹ و ۰/۹۸ سانتی متر می باشد. در نهایت میزان مساحت ساینده شده نمونه های مذکور به ترتیب ۱۳/۷۵، ۱۰/۲۳، ۹/۱۴، ۸/۹۵ و ۷/۵۵ سانتی متر مربع می باشد. با مقایسه مساحت ساینده شده هر نمونه مشخص گردید که طرح RAM-5، 10، 15، 20% نسبت به طرح RAM-C به ترتیب به میزان ۲۵/۶، ۳۳/۵، ۳۴/۹ و ۴۵/۰٪ افزایش مقاومت در برابر سایش داشته اند.

جدول ۱۳ مقایسه میزان طول، عرض و مساحت ساینده شده نمونه های مختلف

ردیف	نام طرح	طول سایش cm	میانگین عرض سایش cm	مساحت سایش cm <sup>2</sup>	نسبت تغییرات %

۰	۱۳/۷۵	۱/۶۰	۸/۰	RAM-C	۱
۲۵/۶	۱۰/۲۳	۱/۴۱	۷/۱۲	RAM-5%	۲
۳۳/۵	۹/۱۴	۱/۱۸	۷/۱۴	RAM-10%	۳
۳۴/۹	۸/۹۵	۱/۰۹	۷/۱۸	RAM-15%	۴
۴۵/۰	۷/۵۵	۰/۹۸	۶/۵۶	RAM-20%	۵

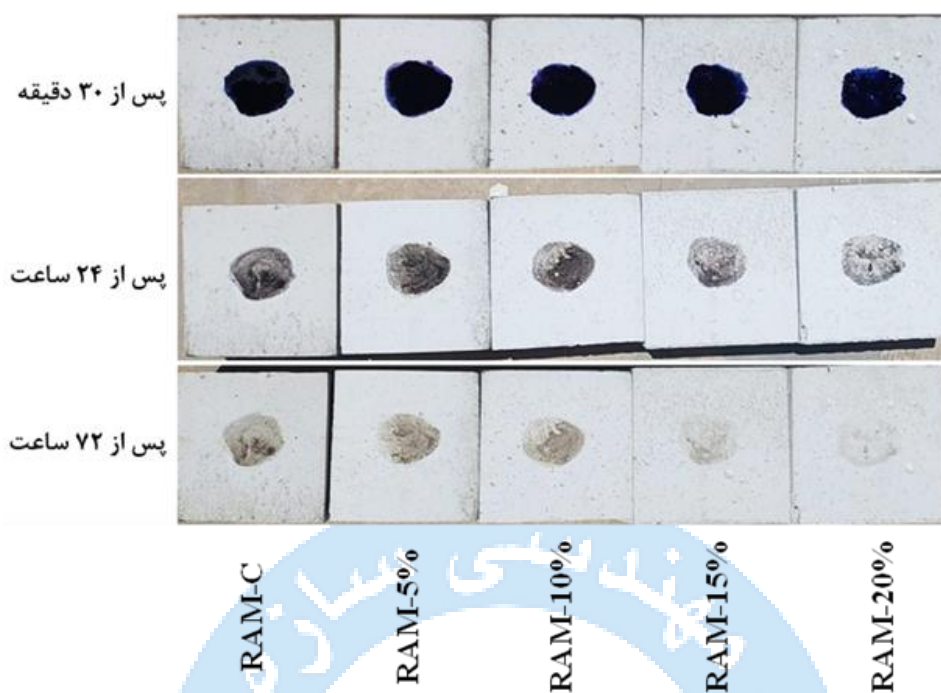


شکل ۱۴ مقایسه میزان ساییده شده در نمونه‌های خودتمیزشونده

#### ۵-۴- خودتمیزشوندگی

برای سنجش میزان خودتمیزشوندگی بتن دستورالعمل یا استاندارد مشخصی وجود ندارد. بنابراین برای صحت عملکرد و مقایسه خاصیت خودتمیزشوندگی از سایر تحقیقات گذشته الهام گرفته شد. مشاهده گردید که محققان روش‌های مختلفی را برای آزمایش میزان خودتمیزشوندگی در نظر گرفتند. یکی از این روش‌ها ایجاد لکه یا جوهر روی سطح بتن و کنترل کیفی آن در مدت زمان مختلف می‌باشد. بدین منظور آلاینده‌هایی مختلفی روی سطح بتن ریخته و آن در معرض آفتاب (اشعه UV) قرار می‌دهند و روزانه تغییرات آن ثبت و پایش می‌نمایند. در این تحقیق برای تست خودتمیزشوندگی از روش رایجی که در سایر تحقیقات گذشته مرسوم است استفاده گردید [۷-۱]. به این ترتیب، جوهر صنعتی بر پایه کربن به رنگ سیاه با استفاده از قطره چکان، در قالب سه قطره بر سطح هر نمونه اعمال شد تا نقش آلاینده را ایفا کند. سپس نمونه‌ها در معرض نور مستقیم خورشید با دمای محیط  $10 \pm 35$  درجه سانتی‌گراد، رطوبت نسبی  $7 \pm 25\%$  و شدت تابش فرابنفش (UV) به میزان حداکثر  $10 \text{ W/m}^2$  قرار گرفتند. تغییرات ظاهری سطح در بازه‌های زمانی مختلف پایش و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه شدند.

طبق نتایج بدست آمده از شکل شماره ۱۵ مشخص گردید که نمونه‌های RAM-15, 20% تا حد زیادی از جوهر پاک شده‌اند و تنها آثاری کم‌رنگ بر سطح آن‌ها مشاهده می‌شود. این تفاوت معنادار نشانه عملکرد مؤثر مواد فوتوکاتالیستی مانند نانوذرات  $\text{TiO}_2$  است که با فعال شدن تحت تأثیر نور آفتاب منجر به آغاز واکنش‌های اکسایشی و تجزیه ترکیبات آلی آلودگی می‌شوند. بنابراین استفاده دقیق و بهینه از این مواد در طرح اختلاط بتن می‌تواند نقش تعیین‌کننده‌ای در افزایش خاصیت خودتمیزشوندگی و بهبود دوام و زیبایی سطوح ایفا کند. نتیجه این یافته‌ها بر اهمیت انتخاب صحیح نوع و مقدار مواد افزودنی تأکید داشته و نشان می‌دهد که استفاده طرح RAM-15, 20% برای القای خاصیت خودتمیزشوندگی اقتصادی‌تر و توجیه‌پذیرتر می‌باشد. شکل شماره ۱۵ روند خودتمیزشوندگی بتن را پس از گذشت ۳۰ دقیقه، ۲۴ و ۷۲ ساعت را نشان می‌دهد.



شکل ۱۵ مقایسه میزان خودتمیزشوندگی نمونه‌های مورد تحقیق

به منظور ارزیابی عملکرد فوتوکاتالیستی طرح‌های مختلف و تحلیل تغییرات سطح نمونه‌ها پس از آزمون خودتمیزشوندگی، از روش تحلیل تصویری با نرم‌افزار ImageJ استفاده شد. در این روش، درجه روشنایی سطح نمونه‌ها بر اساس میزان تیرگی لکه جوهر در بازه‌های زمانی مختلف، اندازه‌گیری شد. افزایش مقدار روشنایی در طول زمان نشان دهنده تجزیه آلاینده و روشن‌تر شدن سطح بتن در نتیجه فعالیت فوتوکاتالیستی ذرات  $TiO_2$  می‌باشد. داده‌های عددی استخراج شده از نرم‌افزار ImageJ به شرح جدول شماره ۱۴ می‌باشد که برای مقایسه درصد تغییر در روشنایی سطوح و تعیین ترکیب بهینه از نظر کارایی فوتوکاتالیستی استفاده شد.

تحلیل نتایج آزمون خودتمیزشوندگی نشان داد که روند تغییر رنگ لکه آلاینده در تمامی طرح‌ها با گذشت زمان دارای الگوی افزایشی بوده و بیانگر روشن‌تر شدن سطح نمونه‌ها در اثر تجزیه لکه آلاینده است. رنگ لکه آلاینده در نمونه کنترل (RAM-C) در ۳۰ دقیقه برابر ۲۲، پس از ۲۴ ساعت برابر با ۱۰۷ و پس از ۷۲ ساعت برابر با ۱۵۵ به دست آمد. این ارقام نشان می‌دهد که در نمونه فاقد  $TiO_2$  تنها مقداری از لکه آلاینده محو شده و آثار آن هنوز پابرجاست. با افزودن  $TiO_2$  در طرح RAM-5% رنگ لکه آلاینده در ۲۴ ساعت به ۱۱۷ رسید که نسبت به نمونه کنترل حدود ۹/۳٪ افزایش یافته است. این تغییر، نشان دهنده آغاز اثر فوتوکاتالیستی توسط ذرات  $TiO_2$  می‌باشد اما مقدار آن ناچیز است. در نمونه RAM-10% رنگ لکه آلاینده در ۲۴ ساعت به ۱۲۷ افزایش یافت و میزان روشن‌شدگی نسبت به نمونه کنترل ۱۸/۷٪ بیشتر شد. در مدت ۷۲ ساعت نیز این دو طرح به ترتیب حدود ۵/۸٪ و ۹/۷٪ افزایش نسبت به طرح کنترل داشتند که حاکی از استمرار واکنش فتوتخریبی و تثبیت نسبی رفتار آن‌ها است. در نمونه RAM-15% طی ۲۴ ساعت رنگ لکه آلاینده به ۱۶۵ رسید که ۵۴/۲٪ افزایش نسبت به نمونه کنترل را نشان می‌دهد. همچنین پس از ۷۲ ساعت این مقدار به ۲۰۲ افزایش یافت که ۳۰/۳٪ بیشتر از نمونه کنترل در وضعیت مشابه بود. عملکرد طرح RAM-20% در هر دو بازه زمانی بالاتری مقدار را نشان داد. بطوریکه رنگ لکه آلاینده در ۲۴ ساعت برابر ۱۷۹ و در ۷۲ ساعت ۲۱ بود که به ترتیب معادل ۶۷/۳٪ و ۳۵/۵٪ افزایش نسبت به نمونه کنترل داشت.

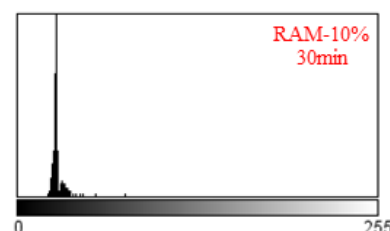
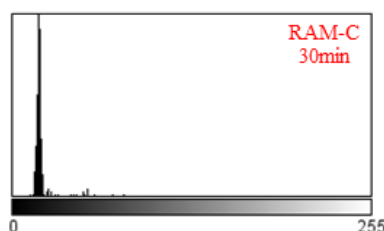
نتایج تحلیل تصویری نشان داد که میزان رنگ باقی مانده و درجه روشنایی سطح در طرح‌های RAM-15% و RAM-20% طی بازه‌های ۲۴ و ۷۲ ساعت بسیار نزدیک است و افزایش  $TiO_2$  از ۱۵ به ۲۰٪، بهبود معناداری در تجزیه آلاینده‌ها و خودتمیزشوندگی ایجاد

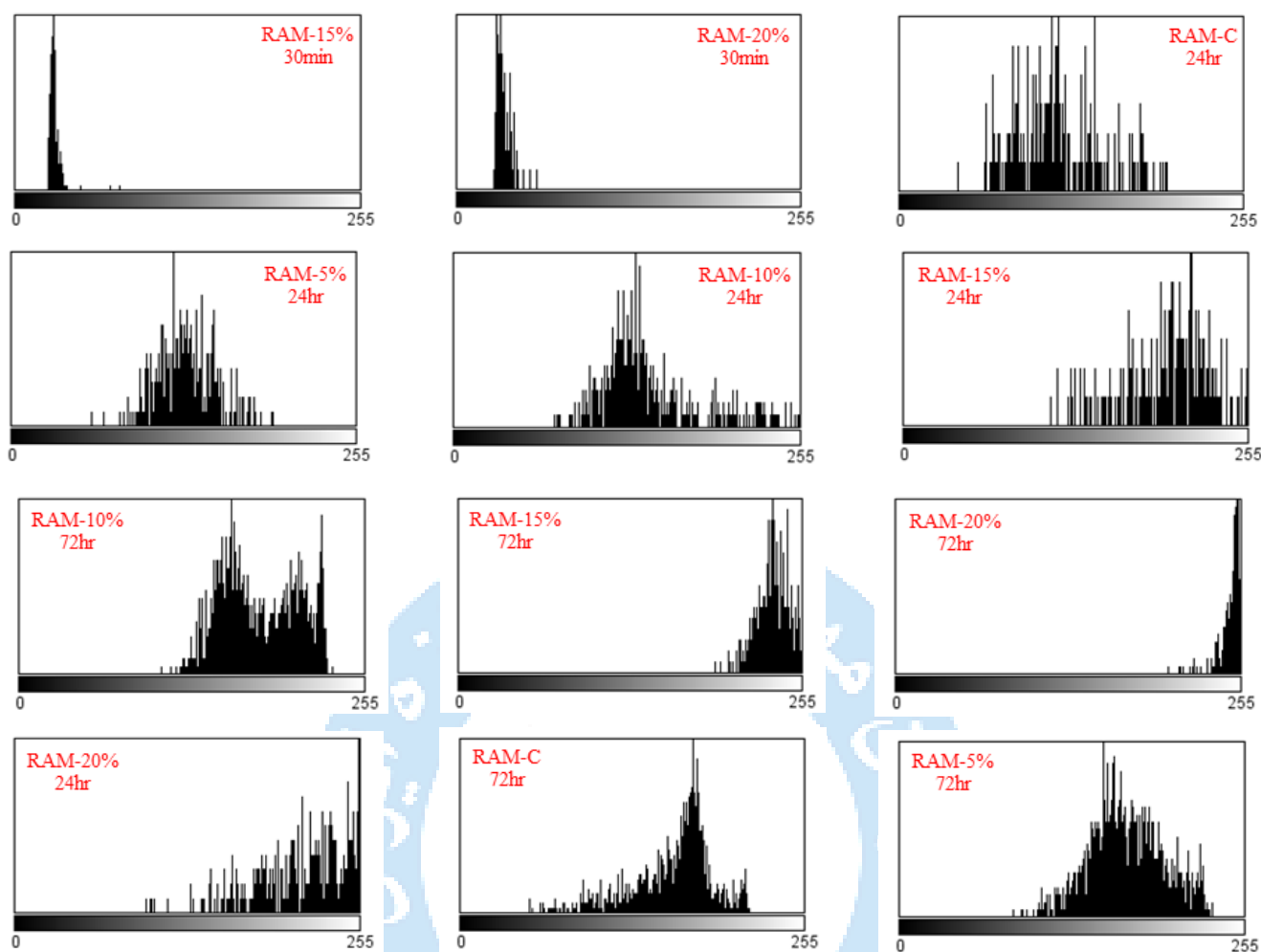
نمی‌کند. در مقابل طرح RAM-20% باعث افت قابل توجه برخی شاخص‌های مکانیکی از جمله مقاومت فشاری و دوام سایشی شد که علت آن تراکم بیش از حد ذرات فوتوکاتالیست و کاهش پیوستگی ماتریس سیمانی بود. بر این اساس طرح RAM-15% به عنوان نقطه بهینه معرفی می‌شود که بالاترین تعادل را میان واکنش فوتوکاتالیستی، تجزیه آلاینده و حفظ خواص مکانیکی داشته و در شرایط واقعی بهره‌برداری نیز عملکرد پایدار و مقرون به صرفه ارائه می‌دهد.

جدول ۱۴ مقایسه خاصیت خودتمیزشوندگی در نمونه‌های مورد تحقیق با بررسی تغییر رنگ لکه آلاینده طی زمان‌های مختلف

نام نمونه	RAM-C	RAM-5	RAM-10	RAM-15	RAM-20
پس از ۳۰ دقیقه	۲۲	۲۳	۲۲	۲۲	۲۱
پس از ۲۴ ساعت	۱۰۷	۱۱۷	۱۲۷	۱۶۵	۱۷۹
پس از ۷۲ ساعت	۱۵۵	۱۶۴	۱۷۰	۲۰۲	۲۱۰
تغییرات پس از ۲۴ ساعت	%۰	%۹/۳	%۱۸/۷	%۵۴/۲	%۶۷/۳
تغییرات پس از ۷۲ ساعت	%۰	%۵/۸	%۹/۷	%۳۰/۳	%۳۵/۵

شکل شماره ۱۶ هیستوگرام‌های خروجی از نرم‌افزار ImageJ را نشان می‌دهد که نمایانگر توزیع شدت روشنایی پیکسل‌ها در ناحیه انتخاب شده از سطح بتن هستند و تغییر موقعیت و شکل این نمودارها روند تجزیه آلاینده را با گذشت زمان مشخص می‌کند. محور افقی محدوده شدت روشنایی را از ۰ تا ۲۵۵ نمایش می‌دهد که عدد ۰ بیانگر رنگ سیاه و عدد ۲۵۵ بیانگر سفید کامل است. محور عمودی نیز تعداد پیکسل‌هایی را نشان می‌دهد که شدت روشنایی مشخصی دارند. زمانی که قله‌های نمودار در محدوده مقادیر پایین قرار می‌گیرند، سطح نمونه تیره و لکه آلاینده همچنان فعال و تجزیه نشده است. با افزایش زمان تابش نور و پیشرفت واکنش‌های فوتوکاتالیستی، قله‌ها به تدریج به سمت مقادیر بالاتر جابه‌جا می‌شوند و توزیع نمودار به سمت عدد ۲۵۵ منتقل می‌شود. این جابه‌جایی نشان‌دهنده افزایش روشنایی سطح بتن و در نتیجه تجزیه مؤثر آلاینده است. در هیستوگرام‌هایی که تمرکز اصلی پیکسل‌ها در سمت رنگ سیاه نمودار قرار دارد، لکه‌ها تیره و تازه هستند و هنوز فرآیند فوتوکاتالیستی آغاز نشده است. در دوره‌های زمانی بعدی، پهنای نمودار افزایش می‌یابد و توزیع پیکسل‌ها در ناحیه میانی و راست متمرکز می‌شود که به معنای افزایش شدت بازتاب نور و کاهش تیرگی لکه است. نمودارهایی که قله آن‌ها در محدوده بالای خاکستری متمرکز شده‌اند، بیانگر این هستند که سطح نمونه روشن‌تر شده و بخش اعظم آلاینده از بین رفته است. بنابراین روند حرکت قله‌ها از سمت چپ به سمت راست در طول زمان بیانگر تکمیل تدریجی فرآیند فوتوکاتالیستی و افزایش توان خودتمیزشوندگی سطح بتن محسوب می‌شود. این تغییرات عددی و تصویری به شکل هم‌زمان شاخصی از میزان کارایی و پایداری واکنش‌های سطحی در نمونه‌های مختلف است و امکان قضاوت دقیق درباره عملکرد فوتوکاتالیستی هر طرح را فراهم می‌کند.





شکل ۱۶ شدت رنگ آلاینده روی سطح بتن و تحول تدریجی آن در نمونه‌ها و بازه‌های زمانی مختلف

## ۶- تصاویر الکترونی روبشی

شکل شماره ۱۷ تصاویر الکترونی روبشی (SEM) از ساختار بتن را نشان می‌دهد. این تصاویر با هدف بررسی فضای میکروسکوپی نمونه‌های حاوی ذرات  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  تهیه شده، سپس بوسیله تست XRF عناصر شناسایی شدند. در تصویر (الف) طرح RAM-20%، سطح بتن حاوی ذرات  $\text{TiO}_2$  و  $\text{Al}_2\text{O}_3$  با بزرگنمایی حدود ۶۰۰۰ برابر مشاهده می‌شود. فاز سوزنی اترینگایت<sup>۱</sup> که با مشخصه ETT مشخص شده، ناشی از هیدراسیون سیمان وضوح قابل مشاهده است و نشان می‌دهد افزودنی‌ها در واکنش گیرش اختلالی ایجاد نکرده‌اند. بنابراین سازگاری شیمیایی مناسبی با زمینه سیمان دارند. در نواحی مشخص شده با عبارت Lumpy، تجمع موضعی  $\text{TiO}_2$  رخ داده که ناشی از باز نشدن کامل یا جذب رطوبت سطحی این ذرات است. این کلوخه‌ها باعث ایجاد نقاط ضعیف، ناهمگنی و اختلاف در مقاومت فشاری نمونه‌های RAM-20% می‌شوند، زیرا تنش‌ها در بخش‌های مترکم متمرکز می‌گردند. همچنین ذرات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  بزرگ‌تر و پراکنده‌تر از  $\text{TiO}_2$  هستند و توزیعی یکنواخت‌تر دارند. این پراکندگی بدون ایجاد مانع در هیدراسیون، موجب بهبود سختی و مقاومت سایشی سطح شده است. تفاوت اندازه و رفتار پراکنشی دو افزودنی ناشی از خواص سطحی و اندازه اولیه متفاوت آن‌هاست. در سایر نواحی،  $\text{TiO}_2$  به شکل ریز و گسترده در سطح پخش شده و پوشش

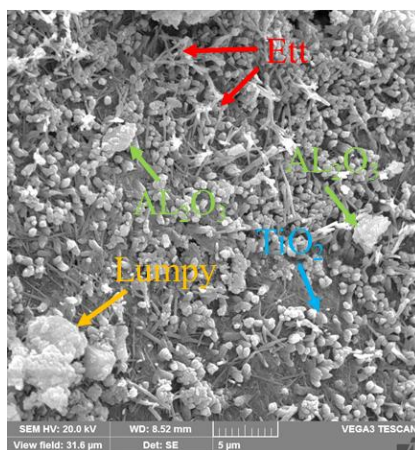
<sup>1</sup> Ettringite

یکنواختی در شبکه سیمانی ایجاد کرده است. این پراکنش مطلوب سبب تقویت خاصیت فوتوکاتالیستی، افزایش خودتمیزشوندگی و شکل‌گیری شبکه فعال سطحی مؤثر در بتن شده است.

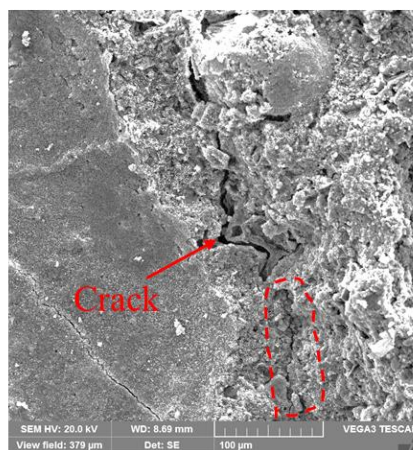
در تصویر (ب) که مربوط به نمونه RAM-15% می‌باشد، ترک و محدوده پیرامون آن در بزرگ‌نمایی ۵۰۰ برابر مشاهده می‌شود. این ترک در مرزی بین خمیر سیمان و سنگدانه شکل گرفته و در امتداد سطح شکست گسترش یافته است. ناحیه خط‌چین قرمز تجمع  $TiO_2$  در اطراف و درون ترک را نشان می‌دهد. بر اساس تصویر، ذرات  $TiO_2$  با پر کردن منافذ و ترک‌های مویینه، میزان تخلخل را کاهش داده که می‌تواند چسبندگی موضعی را افزایش دهد. همچنین با فازهای هیدراسیونی مانند C-S-H و اترینگایت پیوند ایجاد کرده و مانع انقطاع ساختار سیمانی می‌شوند.

تصویر (ج) که مربوط به نمونه RAM-5% می‌باشد، سطح بتن با بزرگ‌نمایی ۱۵۰۰ برابر را نشان می‌دهد. در این تصویر حضور هم‌زمان ذرات  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  مشخص است. همچنین در این طرح تجمع ذرات  $TiO_2$  و ایجاد کلوخه مشاهده می‌شود که ناشی از باز نشدن کامل یا جذب رطوبت سطحی است. اما در غلظت ۵٪ و با در نظر گرفتن نتایج آزمون مقاومت فشاری، تأثیر منفی قابل توجهی بر ساختار بتن ندارد. ذرات  $Al_2O_3$  اندکی بزرگ‌تر بوده و بدون تشکیل کلوخه به‌صورت جداگانه پراکنده می‌باشند. به‌طور کلی، توزیع یکنواخت این افزودنی‌ها در نمونه RAM-5% بیانگر آن است که  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  بدون ایجاد اختلال در فرآیند هیدراسیون، باعث افزایش تراکم و انسجام ماتریس سیمانی شده است.

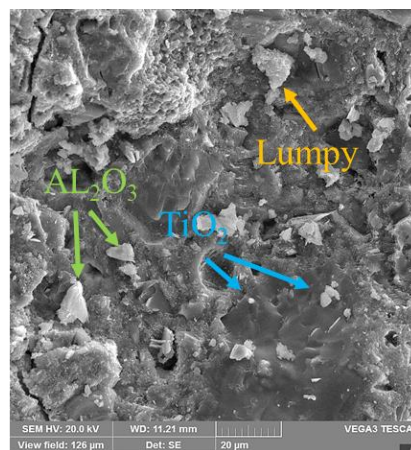
در تصاویر SEM، توزیع یکنواخت‌تر ذرات  $TiO_2$  در نمونه RAM-15% باعث پر شدن منافذ ریز و تراکم بیشتر ژل C-S-H شده است. این پدیده موجب کاهش تخلخل مؤثر و افزایش مقاومت فشاری و سایشی شده است. در مقابل، در نمونه RAM-20% به‌دلیل تراکم بیش از حد ذرات و تشکیل کلوخه‌های  $TiO_2$ ، نواحی با تخلخل موضعی و تمرکز تنش ایجاد گردیده که افت استحکام فشاری را توجیه می‌کند. علاوه بر این، حضور  $Al_2O_3$  به‌عنوان ذره‌ای با سختی بالا، ساختار سطحی را متراکم کرده و درگیرشدگی مکانیکی بین ذرات خمیر سیمان و سنگدانه را تقویت نموده است. بنابراین از منظر مکانیزم عملکرد، افزایش یا افت مقاومت کلان بتن نتیجه مستقیم نحوه پراکنش و اثر متقابل این ذرات بر ساختار ژل سیمانی و میزان تخلخل داخلی است.



شکل الف



شکل ب



شکل ج

شکل ۱۷ تصاویر الکترونی روبشی (SEM) از نمونه‌های مختلف بتن حاوی ذرات  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  با تمرکز بر قسمت‌های مختلف

## ۷- بحث

در این تحقیق مشخص شد که استفاده همزمان از ذرات  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  بر خواص رئولوژیکی، مکانیکی و فوتوکاتالیستی بتن تاثیر محسوسی دارد. افزایش مقدار  $TiO_2$  باعث کاهش اسلامپ شد که ناشی از ماهیت آب دوست این ماده و جذب بخشی از آب آزاد مخلوط است. با وجود این، ترکیب متعادل  $Al_2O_3$  و  $TiO_2$  موجب بهبود ساختار خمیر سیمان و افزایش چسبندگی داخلی گردید و در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه، مقاومت فشاری را تا ۲۰٪ نسبت به نمونه کنترل ارتقا داد. همچنین تصاویر SEM نشان داد که ترکیب متعادل ذرات  $TiO_2$  در سطح بتن، پخش یکنواختی دارند و بدون ایجاد اختلال در واکنش هیدراسیون، فازهای پایدار اترینگایت را حفظ می کنند. نتایج مقاومت سایشی و آزمون خودتمیزشوندگی نیز اثر مکمل دو افزودنی را تایید کرد. سختی بالای این مواد، موجب کاهش مساحت سایش و افزایش ۴۵٪ مقاومت سایشی شد. همچنین فعال سازی فوتوکاتالیستی  $TiO_2$  تحت نور خورشید منجر به تجزیه آلاینده های سطحی و نظافت سطح بتن گردید. عملکرد بهینه در طرح RAM-15% به دست آمد که تعادلی میان کارایی مکانیکی و خودتمیزشوندگی فراهم می کند. در مقادیر بالاتر از این حد، تراکم زیاد ذرات سطحی موجب کاهش نفوذ نور و افت توان فوتوکاتالیستی شد. در مجموع، ترکیب ۱۵٪ وزنی  $TiO_2$  و ۳٪ وزنی  $Al_2O_3$  به عنوان نسبت بهینه معرفی می شود. زیرا ضمن حفظ گیرش و انسجام خمیر، مقاومت سایشی و دوام سطحی را افزایش داده و خاصیت خودتمیزشوندگی پایدار در شرایط طبیعی نور خورشید ایجاد می کند. این نتیجه نشان می دهد که افزودنی های فوتوکاتالیستی اگر با نسبت دقیق و توزیع یکنواخت در سیمان مصرف شوند، می توانند نقش مؤثری در تولید بتن های عملکرد بالا با ویژگی زیست محیطی و دوام افزوده داشته باشند.

## ۸- نتیجه گیری

برخی از مهم ترین نتایج بدست آمده در این تحقیق به شرح زیر می باشند:

- استفاده همزمان از  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  میزان اسلامپ بتن را بطور چشمگیری کاهش می دهد. بطوریکه طرح RAM-20% میزان اسلامپ را ۵۴٪ کاهش داد.
- نتایج نشان داد که افزودن  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  (طرح RAM-10%) موجب افزایش قابل توجه مقاومت فشاری ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه بتن نسبت به نمونه کنترل می شود. در طرح RAM-10%، میانگین مقاومت فشاری ۲۸ روزه به ۵۵/۶ مگاپاسکال رسید که بیشترین مقدار میان نمونه ها بود.
- استفاده از سطح بالای  $TiO_2$  (RAM-15% و RAM-20%) سبب کاهش مقاومت فشاری ۷ روزه می شود و بتن دیرگیرتر می گردد. به طوری که در طرح RAM-15%، مقاومت فشاری ۷ روزه ۲۶/۶ مگاپاسکال است که کمترین مقدار در بین سایر طرح ها است.
- نتیجه آزمایش های مقاومت سایشی حاکی از آن است که ترکیب همزمان و به میزان مناسب  $TiO_2$  و  $Al_2O_3$  (در طرح RAM-20%) سبب کاهش مساحت ساییده شده و بهبود ۴۵٪ مقاومت سایشی می گردد.
- بررسی روند تجزیه آلاینده (جوهر) نشان داد که طرح RAM-15% و RAM-20% پس از ۷۲ ساعت قرارگیری در معرض نور خورشید، بیشترین میزان پاکیزگی سطح را نسبت به نمونه کنترل دارند. این امر نشانه اثربخشی بالای فرایند فوتوکاتالیستی  $TiO_2$  و نقش کلیدی آن در تخریب آلودگی های سطحی می باشد.
- تحلیل مد شکست نمونه های فشاری بیانگر آن است که افزودنی های به کاررفته نه تنها منجر به کاهش کیفیت خمیر سیمان نشده اند بلکه عمده فاز شکست نمونه ها در ناحیه سنگدانه رخ داده است که نشانه حفظ استحکام و یکپارچگی خمیر سیمان است.

## منابع

- Lapidus, A., Korolev, E., Topchiy, D., Kuzmina, T., Shekhovtsova, S., & Shestakov, N. (2022). Self-cleaning cement-based building materials. *Buildings*, 12(5), 606. <https://doi.org/10.3390/buildings12050606>
- Xu, Y., Chen, W., & Jiang, T. (2023). Self-cleaning fair-faced concrete adopting recycled aggregates. In *Multi-Functional Concrete With Recycled Aggregates* (pp. 227–250). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-89838-6.00018-9>
- Hossein Beiki, N. (2023). Investigation of the photocatalytic properties of titanium dioxide with nanosilica in self-cleaning concrete. *Research in Science, Engineering and Technology*, 31(9), 31–46. [https://doi.org/10.1515/revce-2022-0039?urlappend=%3Futm\\_source%3Dresearchgate](https://doi.org/10.1515/revce-2022-0039?urlappend=%3Futm_source%3Dresearchgate)
- Amiri, M., Arzanian, K., & Jahanbakhsh, A. (2020). The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete containing aluminum slag from a microstructural perspective. *Concrete Research*, 13(3), 19–32. <https://doi.org/10.22124/jcr.2020.15566.1421>
- Bhagyamma, G., & Panchangam, S. C. (2023). Development of self-cleaning cement mortar exposed to indoor and outdoor environment. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.215>
- Sargunan, K., Rao, M. V., Rajesh, A. A., Babu, R., Prasanthni, P., Jagadeep, K., & Rinawa, M. L. (2022). Experimental investigations on mechanical strength of concrete using nano-alumina and nano-clay. *Materials Today: Proceedings*, 62, 5420–5426. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.703>
- Dikkar, H., Kapre, V., Diwan, A., & Sekar, S. K. (2021). Titanium dioxide as a photocatalyst to create self-cleaning concrete. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4058–4062. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.948>
- Visali, C., Priya, A. K., & Dharmaraj, R. (2021). Utilization of ecofriendly self-cleaning concrete using zinc oxide and polypropylene fibre. *Materials Today: Proceedings*, 37, 1083–1086. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.309>
- Muzenski, S., Flores-Vivian, I., & Sobolev, K. (2019). Ultra-high strength cement-based composites designed with aluminum oxide nano-fibers. *Construction and Building Materials*, 220, 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.175>
- Yousefinejad, Hamed and Jabbari, Mohammad Mehdi. (1401). Application of nano alumina in improving some mechanical properties and increasing wear resistance of concrete. *Amirkabir Civil Engineering Journal*, 54(11), 4343–4364. doi: 10.22060/ceej.2022.21040.7603
- Nejad Naderi, M., Khoshkalam Soleimandarabi, S. F., & Rostami, R. (2020). Comparison of the application of titanium dioxide and nanosilica and silica fume in the self-cleaning properties of concrete facades for sustainable development. *Structural Engineering and Construction*, 8(Special Issue 2), 44–58. <https://doi.org/10.22065/jsce.2020.222435.2096>
- Chen, J., & Poon, C. S. (2011). Photocatalytic construction and building materials: From fundamentals to applications. *Building and Environment*, 44(9), 1899–1906. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.01.002>
- Sani, M. M., Muftah, F., & Ahmad, N. (2022). An assessment of mechanical properties on self-cleaning concrete incorporating rutile titanium dioxide. In *Design in Maritime Engineering: Contributions from the ICMAT 2021* (pp. 287–298). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89988-2\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89988-2_22)
- Esmaili, H. R., & Hajiani Bushehrian, A. R. (2019). The effect of nano titanium dioxide on the permeability and compressive strength of concrete. *Concrete Research*, 12(4), 111–122. <https://doi.org/10.22124/jcr.2019.5888.1132>
- Ghadim Takmeh Dash, F., Jafari Sadeghi, A., & Afshin, H. (2021). Investigation of some durability properties of concrete pavements containing nanoparticles. *Journal of Amirkabir Civil Engineering*, 1–10. DOI: 10.22060/ceej.2020.17893.6705
- Kalvandi, M., Rezaei, M., & Kalvandi, M. (2015). Profile of the authors: The effect of iron nanoparticles, iron oxide, titanium and silica particles on the properties and durability of concrete. *2nd National Congress of Civil Engineering and Construction Projects*, 20–31. DOI: 10.22060/ceej.2022.21040.7603
- Safari Fatemeh, Monshi Ahmad, Nourbakhsh Amir Abbas, & Soltanpour Mojtaba. (2018). Manufacturing and investigation of suitable polishing agent for glass polishing using silica, cerium oxide and silicon carbide compounds.
- National Geological and Mineral Exploration Organization. (2023). Statistical report on titanium mines in Iran. Ministry of Industry, Mine, and Trade.
- Sakthipriya, C., & Manikandan, R. K. (2020). An experimental study on TiO<sub>2</sub>-based self-cleansing concrete by partial replacement of sand by waste glass. *SSRG International Journal of Civil Engineering*, 7(12), 9–12. <https://doi.org/10.14445/23488352/IJCE-V7I12P103>

20. Puentes, J., & Barluenga, G. (2015). Effect of silica-based nano and micro additions on SCC at early age and on hardened porosity and permeability. *Construction and Building Materials*, 81, 154–161. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.053>
21. Zhu, L., Hao, Y., Lu, Z., Wu, H., & Ran, Q. (2019). Do economic activities cause air pollution? Evidence from China's major cities. *Sustainable Cities and Society*, 49.
22. Khannyra, S., Mosquera, M. J., Addou, M., & Gil, M. L. A. (2021). Cu-TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> photocatalysts for concrete-based building materials: Self-cleaning and air de-pollution performance. *Construction and Building Materials*, 313, 125419. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125419>
23. Shen, W., Zhang, C., Li, Q., Zhang, W., Cao, L., & Ye, J. (2015). Preparation of titanium dioxide nanoparticle-modified photocatalytic self-cleaning concrete. *Journal of Cleaner Production*, 87, 762–765. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.014>
24. Sharma, S., Kaur, I., & Gupta, S. (2019). Effect of fly ash and nano titanium dioxide on compressive strength of concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 6(07), 2262–2265.
25. Benny, G., & Kumar, G. K. (2021). Experimental study of self-cleaning concrete by using various photocatalysts. In *Proceedings of SECON 2020: Structural Engineering and Construction Management 4* (pp. 241–249). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-55115-5\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-55115-5_23)
26. Ballari, M. M., Hunger, M., Hüsken, G., & Brouwers, H. J. H. (2020). NO<sub>x</sub> photocatalytic degradation employing concrete pavement containing titanium dioxide. *Applied Catalysis B: Environmental*, 95(3–4), 245–254.
27. Fujishima, A., & Zhang, X. (2016). Titanium dioxide photocatalysis: Present situation and future approaches. *Comptes Rendus Chimie*, 9(5–6), 750–760. <https://doi.org/10.1016/j.crci.2005.02.055>
28. Shen, S., Burton, M., Jobson, B., & Haselbach, L. (2022). Pervious Concrete With Titanium Dioxide As A Photocatalyst Compound For A Greener Urban Road Environment. *Construction And Building Materials*, 35, 874-883. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.097>
29. Farsnov Cement Co. (2023). <https://www.farsnov.com>

