

## Improving the compressive strength of concrete by using nano fly ash (NFA) and investigating the interfacial transition zone (ITZ)

Reza Farzad<sup>1</sup>, Ebrahim Nohani<sup>2\*</sup>, Mehdi Ghobeiti Hasab<sup>3</sup>, Ali Heydari Moghadam<sup>4</sup>

1- Ph.D. Student, Department of Civil Engineering, Science and Research Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Materials and Energy Research Center, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.

3- Assistant Professor, Materials and Energy Research Center, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.

4- Assistant Professor, Materials and Energy Research Center, Dezful Branch, Islamic Azad University, Dezful, Iran.

### ABSTRACT

The purpose of this research is to reduce cement consumption by replacing nano fly ash (NFA) in the concrete mixture and increase the compressive strength of concrete by strengthening the interfacial transition zone (ITZ). Thus, four proportions of NFA with values of 0.1, 0.5, 1 and 5% by weight were selected in the concrete mixture and the compressive strength of concrete was evaluated within 7 and 28 days. A scanning electron microscope (SEM) equipped with an X-ray energy diffraction spectrometer (EDS) was used to detect the compounds resulting from the reaction between particles. Based on the results, in the sample containing 1% NFA (optimal sample), compared to the samples without NFA, the 7-day compressive strength of concrete increases by 97% and the 28-day compressive strength increases by 61%; which shows the NFA has a better performance in increasing the strength of concrete at early ages. Also, the amount of water absorption in the sample containing 1% NFA decreased to 33%, therefore, the permeability of concrete against destructive agents is improved. These results show that the interfacial transition zone (ITZ), which is the weakest link in the concrete chain and the limiting factor of concrete strength, is strengthened in the presence of NFA, and leads to an increase in durability and compressive strength of concrete.

### ARTICLE INFO

Receive Date: 28 July 2022

Revise Date: 01 November 2022

Accept Date: 14 November 2022

### Keywords:

Concrete

Compressive strength

Nano fly ash (NFA)

Interfacial transition zone (ITZ)

Scanning electron microscope (SEM)

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.352576.2882>

\*Corresponding author: Ebrahim Nohani  
Email address: Ebrahim.Nohani@iau.ac.ir

## بهبود مقاومت فشاری بتن با به کارگیری نانو خاکستر بادی و بررسی ناحیه انتقال میان سطحی (ITZ)

رضا فرزاد<sup>۱</sup>، ابراهیم نوحانی<sup>۲\*</sup>، مهدی قبیتی حسب<sup>۳</sup>، علی حیدری مقدم<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- گروه عمران، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

۳- استادیار، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

۴- گروه مواد و متالوژی، مرکز تحقیقات مواد و انرژی، واحد دزفول، دانشگاه آزاد اسلامی، دزفول، ایران.

### چکیده

هدف از این تحقیق کاهش مصرف سیمان با جایگزینی نانو خاکستر بادی (NFA) در مخلوط بتن و افزایش مقاومت فشاری بتن با تقویت ناحیه انتقال میان سطحی (ITZ) است. بدین منظور ۴ نسبت NFA با مقادیر ۰،۱، ۰،۵، ۱ و ۵ درصد وزنی در مخلوط بتن انتخاب و مقاومت فشاری بتن طی ۷ و ۲۸ روز مورد ارزیابی قرار گرفت. از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مجهز به طیف سنج پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) برای تشخیص ترکیبات حاصل از واکنش بین ذرات استفاده گردید. بر اساس نتایج حاصل در نمونه حاوی ۱ درصد NFA (نمونه بهینه)، نسبت به نمونه های بدون NFA مقاومت فشاری ۷ روزه بتن ۹۷ درصد و مقاومت فشاری ۲۸ روزه ۶۱ درصد افزایش می یابد. این مطلب نشان می دهد که NFA عملکرد بهتری در افزایش مقاومت بتن در سنین پایین دارد. همچنین میزان جذب آب در نمونه حاوی ۱ درصد NFA تا ۳۳ درصد کاهش یافت، لذا نفوذ پذیری بتن در برابر عوامل مخرب بهبود می یابد. این نتایج نشان می دهد که ناحیه انتقال میان سطحی (ITZ)، که ضعیف ترین حلقه در زنجیره بتن و عامل محدود کننده مقاومت بتن است در حضور NFA تقویت گردیده که در نتیجه باعث افزایش دوام و مقاومت فشاری بتن می شود.

کلمات کلیدی: بتن، مقاومت فشاری، نانو خاکستر بادی (NFA)، ناحیه انتقال میان سطحی (ITZ)، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.352576.2882">https://doi.org/10.22065/jsce.2022.352576.2882</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.352576.2882	۱۴۰۲/۰۶/۳۱	۱۴۰۱/۰۸/۲۳	۱۴۰۱/۰۸/۲۳	۱۴۰۱/۰۸/۱۰	۱۴۰۱/۰۵/۰۶
ابراهیم نوحانی Ebrahim.Nohani@iau.ac.ir				*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## ۱- مقدمه

توجه به مکانیزم تولید بتن با توجه به چالش های زیست محیطی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. از آغاز استفاده از سیمانهای پرتلند تاکنون، متناسب با رشد چشمگیر استفاده از این ماده صنعتی، آلودگیهای زیست محیطی (تولید دی اکسید کربن) ناشی از فرآیند تولید سیمان به شدت افزایش یافته است. از این رو همواره محققین به دنبال این بوده اند تا با افزودن مواد جدید به ترکیب بتن، در میزان مصرف سیمان به عنوان یک محصول استراتژیک صرفه جویی کرده تا علاوه بر کاهش محدودیت های اقتصادی و زیست محیطی، مقاومت و دوام آن را بهبود بخشند. از جمله موفق ترین ابداعات در این زمینه پوزولان ها بودند. هر چند تلاش های محققین به پوزولان ها محدود نگردیده و طیف وسیعی از مواد و آثارشان بر روی بتن در طی سالیان متمادی مورد ارزیابی قرار گرفته که از آن جمله می توان به نانو ذرات دی اکسید سیلیکون ( $SiO_2$ )، اکسید تیتانیوم ( $TiO_2$ )، اکسید آلومینیوم ( $Al_2O_3$ )، کربنات کلسیم ( $CaCO_3$ )، اکسید زیرکونیوم ( $ZrO_2$ )، اکسید آهن ( $Fe_2O_3$ ) و نانولوله های کربنی اشاره کرد. این نانو مواد برای بهبود خواص بتن سیمانی تازه و سخت شده و ویژگی های جدیدی همچون خود تمیز شوندگی، خود ترمیم شوندگی، ضد مه و ... به ترکیب بتن اضافه می شوند [۱-۳].

استفاده از دوده سیلیس، خاکستر پوسته برنج، خاکستر بادی (FA) و سرباره کوره تولید آهن در ترکیب بتن مورد بررسی قرار گرفته است. مطالعات نشان داد که سرباره کوره تولید آهن و خاکستر بادی موجب افزایش مقاومت سایشی بتن می شود. با استفاده از ۱۵ درصد وزنی سرباره کوره تولید آهن، مقاومت سایشی بتن بهبود قابل توجهی می یابد در حالی که خاکستر بادی مقاومت به سایش را بهبود بخشد اما اگر میزان آن بیش از ۲۰ درصد وزنی باشد مقاومت به سایش کاهش می یابد [۴-۷]. بتنی که حاوی ۵۰ درصد وزنی و یا بیشتر خاکستر بادی (FA) باشد، به عنوان بتن FA با حجم بالا در نظر گرفته می شود [۸]. از FA در بتن فشرده غلتکی (RCC) جهت کاهش هزینه کلی، افزایش استحکام و دوام طولانی مدت نیز استفاده می شود [۹]. مطالعات اخیر نشان داده است که استفاده از سنگدانه FA در بتن معمولی در مقایسه با سنگدانه های طبیعی عملکرد بتن را افزایش می دهد [۱۰]. ژانگ و همکاران گزارش کردند که افزودن ۲ درصد نانوذرات سیلیس، مقاومت فشاری نمونه های بتن FA با حجم بالا را به ترتیب پس از ۳ و ۷ روز ۳۰ و ۲۵ درصد افزایش می دهد [۱۱]. از طرفی مردانی و همکاران مخلوط هایی از سیمان حاوی FA در مقادیر وزنی ۰/۳، ۰/۳۵، ۰/۴ و ۰/۴۵ تهیه کردند و گزارش کردند که مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و مقاومت سایشی با افزایش FA کاهش می یابد [۱۲]. در یک مطالعه مشابه، یرامالا و بابو با جایگزینی FA در مقادیر ۴۰ و ۸۵ درصد وزنی بجای سیمان نفوذپذیری کلریدی بتن را کاهش دادند [۱۳]. سوپیت و شایخ با افزودن ۲ و ۴ درصد نانو سیلیس و ۴۰ و ۶۰ درصد خاکستر بادی به عنوان جایگزین سیمان بهبود قابل توجهی در مقاومت فشاری گزارش کردند [۱۴ و ۱۵]. در تحقیقی متفاوت پاجیده و همکاران در سال ۲۰۱۹ به بررسی تاثیر دمای زیاد بر روی ویژگی های مکانیکی و ریز ساختار بتن حاوی نانو تیوب کربنی چند دیواره پرداختند. آنها از ۰،۵، ۱ و ۱،۵ درصد نانو تیوب کربنی جایگزین وزنی سیمان استفاده کردند و سپس نمونه ها را در کوره الکتریکی در دماهای ۲۵، ۱۰۰، ۲۵۰، ۵۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتی گراد قرار دادند و نهایتاً دما را کاهش دادند و مقاومت فشاری و کششی، مدول الاستیسیته و ظرفیت جذب انرژی نمونه ها را اندازه گیری نمودند. نتایج مقاومت فشاری آنها در دماهای مذکور به ترتیب ۶۹، ۴۹، ۷۰، ۵۵ و ۱۵۲ بدست آمده است و آنها نتیجه گرفتند که نانو تیوب کربن در دمای بالا تاثیر بیشتری بر روی مقاومت فشاری دارد. همچنین نتایج مقاومت کششی آنها باعث بهبود نتایج و به ترتیب ۲۷، ۵۸، ۸۸، ۸۸ و ۵۳ درصد گزارش شده است. همچنین نانو تیوب کربنی در کاهش ترک های عرضی عملکرد خوبی از خود به نمایش گذاشته است [۱۶]. در سال بعد پاجیده و توفیق (۲۰۲۲) به مطالعه بر روی ملات های سیمانی حاوی نانولوله های کربنی چند دیواره و نانوگرافن پرداختند [۱۷]. در همین راستا صدیقی و همکاران در سال ۲۰۲۱ به بررسی خواص مکانیکی و ریزساختاری بتن هوادهی اتوکلاو شده حاوی نانو گرافن پرداختند. بدین منظور آنها از نانو گرافن با درصدهای ۰،۲، ۰،۴ و ۰،۶ درصد جایگزین وزنی سیمان روی بتن تحت اتوکلاو (AAC) استفاده کردند و تست های مقاومت فشاری و کششی را انجام دادند همچنین آنها تحلیل های SEM و XRD را تفسیر نمودند. نتایج بررسی های آنها حاکی از بهبود مقاومت فشاری و کششی در مقایسه با نمونه کنترل بوده است. مقاومت فشاری نمونه های حاوی ۰،۲، ۰،۴ و ۰،۶ نانو گرافن به ترتیب باعث افزایش مقاومت فشاری ۹، ۳۷ و ۴۵ درصد گزارش شده است همچنین مقاومت کششی به ترتیب ۱۳، ۲۷ و ۸۱ درصد افزایش داشته است [۱۸].

فهییم و همکاران در سال ۲۰۲۰ به بررسی عملکرد دوام بتن اصلاح شده با خاکستر بادی و ارزیابی تاثیر میکروارگانیسم ها پرداختند. آنها ۴ درصد مختلف از خاکستر بادی شامل ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد وزنی سیمان و نمونه های مختلف میکروارگانیسم با درصد های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ استفاده کردند. نتایج آنها حاکی از افزایش مقاومت فشاری بیش از ۳۰ درصدی بتن حاوی ۱۰ درصد خاکستر بادی و میکروارگانیسم بود [۱۹]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۲۲ به بررسی تاثیر دوز های مختلف خاکستر بادی بر روی افت، مقاومت در برابر ترک و ویژگی های فراکتال (شکست از نظر ساختار هندسی) بر روی دال های بتنی پرداختند. در این تحقیق آنها از ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد خاکستر بادی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که افزایش مقدار خاکستر بادی می تواند مقاومت بتن را در برابر ترک بهبود بخشد [۲۰].

از سال ۲۰۲۱ رویکرد آزمایشات بیش تر به سمت پیش بینی با هوش مصنوعی رفت بطوریکه فاروق و همکاران (۲۰۲۱) به مطالعه تطبیقی برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن خود متراکم اصلاح شده با خاکستر بادی پرداختند. آنها از مدل های شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و برنامه ریزی بیان ژن (GEP) برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن استفاده کردند. آنها با بیان مقادیر خطای متوسط عملکرد مدل GEP را مناسب تر از دیگر مدل ها گزارش کردند [۲۱].

در همان سال ۲۰۲۱ خورشید و همکاران به پیشبینی مقاومت فشاری بتن حاوی خاکستر بادی با استفاده از تکنیک ماشین لرنینگ پرداختند. آنها از ۴ الگوریتم رگرسیون ماشین با حداقل احتمال (MPMR)، ماشین بردار ارتباط (RVM)، برنامه ریزی ژنتیکی (GP)، شبکه عصبی احساسی (ENN) و ماشین لرنینگ مفرط (ELM) استفاده کردند. ورودی مدل آنها شامل سیمان، خاکستر بادی، سنگدانه درشت، سنگدانه ریز، آب و نسبت آب به چسب سیمان بود. خروجی مدل آنها نیز پیش بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بوده است. پس از بررسی ها و ارزیابی ها، آنها نتیجه گرفتند که مدل MPMR مناسبترین مدل برای پیش بینی مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن می باشد [۲۲].

نیروهای جاذبه و اندروالسی علت چسبندگی سنگدانه ها و مواد حاصل از هیدراتاسیون می باشند. پیوستگی بین سنگدانه و خمیر سیمان موسوم به ناحیه انتقال میان سطحی (ITZ) از پارامترهای مهمی است که بر خواص مکانیکی و دوام بتن تاثیر می گذارد. ریزساختار ITZ متأثر از نوع و خواص مصالح مصرفی است. کریستاله شدن مواد در فضای خالی ITZ به علت افزایش سن بتن و در اثر واکنش های شیمیایی بین خمیر سیمان و سنگدانه ها می باشد که باعث تشکیل سیلیکات کلسیم هیدراته در صورت وجود سنگ آهک می دهند. وجود بلور های بزرگ هیدروکسید کلسیم به دلیل ظرفیت چسبندگی کمتر، عامل نیرو های و اندروالسی ضعیف تر هستند [۲۳]. ریزساختار خمیر سیمان هیدراته شده مجاور ذرات سنگدانه با ریزساختار توده خمیر سیمان تفاوت دارد زیرا در جریان مخلوط نمودن، ذرات خشک سیمان نمی توانند کاملاً در مجاورت ذرات نسبتاً بزرگ سنگدانه ها متراکم شوند [۲۴]. علاوه بر بلورهای هیدروکسید کلسیم یکی از عوامل تاثیر گذار در ITZ وجود ترک های ریز در بتن می باشد. ITZ ضعیف ترین بخش بتن است و عامل محدودکننده مقاومت بتن می باشد لذا برای تقویت این ناحیه باید ترک ها و حفرات کمتری تشکیل شود تا باعث استحکام و افزایش مقاومت بتن گردد [۲۵].

هدف از این مطالعه افزایش مقاومت فشاری بتن و بهبود ناحیه انتقال میان سطحی بتن (ITZ) توسط نانو خاکستر بادی (NFA) با تعیین درصد بهینه آن در مخلوط بتن می باشد. همچنین میزان جذب آب نمونه ها بررسی می گردد و طی تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورفولوژی سطح شکست، مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این تحقیق ابتدا به بیان مواد و مصالح مورد استفاده و ترکیبات شیمیایی آنها پرداخته می شود، سپس شرایط بالمیر کردن خاکستر تا حصول نانو خاکستر شرح داده می شود و طرح اختلاط بتن بیان می گردد. در قسمت نتایج و بحث آزمایشات اسلامپ، مقاومت فشاری و جذب آب ارزیابی می شوند و نهایتاً در مورد مورفولوژی سطح شکست بر اساس آزمایشات میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) و آنالیز پراش اشعه ایکس (XRD) به بحث پرداخته می شود.

## ۲- مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از سیمان پرتلند معمولی تیپ ۲ مطابق با استاندارد ASTM C150 با وزن مخصوص ۳/۱۶ و ترکیب شیمیایی مطابق جدول ۱ استفاده گردید. ترکیب شیمیایی سیمان و خاکستر بادی مورد استفاده در این تحقیق بر اساس نتایج XRF در جدول ۱ و ۲ آورده شده است. از تست XRF جهت آنالیز عنصری مواد استفاده می شود که این آزمایش در شرکت پرتورایان رستاک تحت دستگاه فلورسانس اشعه ایکس، مجهز به لامپ اشعه ایکس با توان ۴KW و هشت بلور آنالیز کننده شناسایی و تفکیک عناصر و همچنین مجهز به نرم افزار IQ+ جهت آنالیز کیفی و نیمه کمی نمونه ها انجام گردید. سنگدانه مصرفی در این تحقیق مطابق با استاندارد ASTM C33 و از نوع ماسه شسته و شن شکسته می باشد. چگالی ماسه برابر ۲/۲۸ با درصد جذب آب ۱/۹۰ و چگالی شن برابر ۲/۶ با بزرگترین بعد دانه ۱۶ میلی متر و درصد جذب آب ۱/۶۵ می باشد.

جدول ۱: ترکیب شیمیایی سیمان پرتلند معمولی تیپ ۲ مورد استفاده در این تحقیق

مینرال	درصد
CaO	۶۲/۶۱
SiO <sub>2</sub>	۲۰/۱۶
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۶۳
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴/۹۰
K <sub>2</sub> O	۱/۳۸
Na <sub>2</sub> O	۰/۸۱
SO <sub>3</sub>	۱/۸۳
MgO	۳/۷
LOI	۱/۸

جدول ۲: ترکیب شیمیایی خاکستر بادی (FA) مورد استفاده در این تحقیق

مینرال	خاکستر بادی
CaO	۴۰/۹
SiO <sub>2</sub>	۱۰/۲۱۵
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲/۰۸۶
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۲۰/۶۰
K <sub>2</sub> O	۴/۶۶
Na <sub>2</sub> O	۰/۸۶۷
SO <sub>3</sub>	۱/۳۸۵
MgO	۳/۳۶
LOI	۳/۱۰

برای تهیه نانو خاکستر بادی ابتدا با احتراق زغال چوب، خاکستر بادی تهیه گردید. سپس خاکستر حاصل با استفاده از آسیای گلوله ای پر انرژی مدل Retsch PM400 با محفظه های تنگستنی، سرعت چرخش ۲۰۰ دور بر دقیقه و نسبت گلوله به پودر ۱:۱۰ به مدت

۱۰ ساعت به نانو پودر تبدیل شد (شکل ۱). برای ساخت نمونه ها کلیه شرایط ثابت و فقط میزان جایگزینی NFA با سیمان متفاوت در نظر گرفته شد. دو مخلوط بدون NFA به عنوان مخلوط کنترل و ۸ مخلوط دیگر به ترتیب با ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۵ درصد وزنی NFA جایگزین با سیمان تهیه گردید. نسبت آب به سیمان بتن ۰/۴۴ در نظر گرفته شد. همچنین فوق روان کننده مایع نفتالین سولفونات در مخلوطی که حاوی ۵ درصد NFA بود، مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به مدول نرمی بالای نانو ذرات، نانو خاکستر بادی به همراه مقداری از سیمان به خوبی مخلوط شد تا از گلوله شدن آن در آب جلوگیری شود. سپس آب به ترکیب اضافه شد و به مدت ۳ دقیقه با میکسر آزمایشگاهی مخلوط گردید. خمیر حاصل به تدریج به مصالح سنگی افزوده و به مدت ۵ دقیقه مخلوط شد. برای نمونه برداری از قالب های مکعبی با ابعاد ۱۵×۱۵×۱۵ سانتی متر استفاده گردید (شکل ۲). نمونه ها به مدت ۲۴ ساعت طبق استاندارد IS 516:1959 در قالب و در دمای اتاق نگه داری شدند، سپس از قالب جدا شده و در مخزن آب در دمای ۳۸ درجه سانتی گراد تا زمان مورد نظر عمل آوری شده اند. جهت ارزیابی تأثیر NFA در بتن طبق استاندارد IS 456، مقاومت فشاری ۷ و ۲۸ روزه بتن مورد بررسی قرار گرفت. وزن اجزای مخلوط برای نمونه های مختلف در جدول ۳ ارائه شده است.



شکل ۱: آسیای گلوله ای پراورزی مورد استفاده در این تحقیق



شکل ۲: نمونه های مکعبی بتنی ساخته شده در این تحقیق

بند ۱۵،۴ از IS456 (200) بیان می کند که نتایج آزمایش ۲۸ روزه باید میانگین مقاومت سه نمونه باشد و تغییراتش نباید بیش از  $\pm 15\%$  درصد میانگین باشد و اگر بیشتر باشد آزمایش نامعتبر است.

جدول ۳: میزان مواد مصرفی برای نمونه های مختلف

کد	نمونه	سیمان (kg/m <sup>3</sup> )	آب (kg/m <sup>3</sup> )	NFA (kg/m <sup>3</sup> )	شن (kg/m <sup>3</sup> )	ماسه (kg/m <sup>3</sup> )	روان کننده (kg/m <sup>3</sup> )
۱	۷ روزه بدون نانو خاکستر	۳۲۰	۱۴۱	-	۷۵۷	۱۱۳۵	-
۲	۰٫۱ درصد نانو خاکستر	۳۱۹٫۷۰	۱۴۱	۰٫۲۹	۷۵۷	۱۱۳۵	-
۳	۰٫۵ درصد نانو خاکستر	۳۱۸٫۵۱	۱۴۱	۱٫۴۸	۷۵۷	۱۱۳۵	-
۴	۱ درصد نانو خاکستر	۳۱۷٫۰۳	۱۴۱	۲٫۹۶	۷۵۷	۱۱۳۵	-
۵	۵ درصد نانو خاکستر	۳۰۵٫۱۸	۱۴۱	۱۴٫۸۱	۷۵۷	۱۱۳۵	۴/۸
۶	۲۸ روزه بدون نانو خاکستر	۳۲۰	۱۴۱	-	۷۵۷	۱۱۳۵	-
۷	۰٫۱ درصد نانو خاکستر	۳۱۹٫۷۰	۱۴۱	۰٫۲۹	۷۵۷	۱۱۳۵	-
۸	۰٫۵ درصد نانو خاکستر	۳۱۸٫۵۱	۱۴۱	۱٫۴۸	۷۵۷	۱۱۳۵	-
۹	۱ درصد نانو خاکستر	۳۱۷٫۰۳	۱۴۱	۲٫۹۶	۷۵۷	۱۱۳۵	-
۱۰	۵ درصد نانو خاکستر	۳۰۵٫۱۸	۱۴۱	۱۴٫۸۱	۷۵۷	۱۱۳۵	۴/۸

## ۳- نتایج و بحث

## ۳-۱- آزمایش اسلامپ

کارایی مخلوط بتن با استفاده از آزمایش اسلامپ مطابق استاندارد ASTM C143 انجام و قابلیت روانی بتن تازه با محاسبه میزان جریان اسلامپ در جدول ۴ ارایه شده است. اسلامپ در نمونه شاهد به میزان ۷۰ میلی متر محاسبه شد. با افزودن ۰/۱، ۰/۵ و ۱ درصد NFA به نمونه ها، میزان اسلامپ با کاهش مواجه شد. در این نمونه ها از فوق روان کننده استفاده نشد. دلیل کاهش اسلامپ با افزایش درصد NFA، مدول نرمی بالای آن می باشد. در نمونه حاوی ۵ درصد NFA که از فوق روان کننده استفاده گردید میزان اسلامپ نسبت به حالات قبل افزایش یافت.

جدول ۴: قابلیت روانی بتن تازه

نمونه	اسلامپ (میلی متر)
بدون نانو خاکستر بادی	۷۰
۰٫۱ درصد نانو خاکستر	۶۸
۰٫۵ درصد نانو خاکستر	۶۵
۱ درصد نانو خاکستر	۶۲
۵ درصد نانو خاکستر	۷۱

## ۳-۲- مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری مطابق استاندارد ASTM C 642 با استفاده از نمونه های مکعبی با ابعاد ۱۵ سانتی متر در سنین ۷ و ۲۸ روزه انجام گردید (شکل ۳).



شکل ۳: دستگاه تست مقاومت فشاری

نمودار نشان داده شده در شکل ۴ مقاومت فشاری نمونه های بتن با درصد های مختلف ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۵ درصد NFA به همراه نمونه شاهد (بدون افزودن نانو خاکستر بادی) را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود مقاومت فشاری بتن با حضور NFA افزایش چشمگیری داشته است. بیشترین افزایش مقاومت مربوط به نمونه حاوی ۱ درصد NFA است. مقاومت نمونه شاهد پس از ۷ روز برابر با ۱۶ مگاپاسکال و نمونه شامل ۱ درصد نانو خاکستر (NFA) حدود ۳۰/۵۲ مگاپاسکال بود که نشان دهنده افزایش مقاومت فشاری ۹۱ درصدی بتن می باشد. به نظر می رسد مدول نرمی مناسب NFA باعث بهبود پیوند بین سنگدانه ها و خمیر سیمان، بهبود ناحیه انتقال بتن (ITZ)، کاهش ترک ها و حفره ها و نهایتاً منجر به افزایش مقاومت فشاری بتن شده است. به عبارتی NFA توانسته است مرز بین ذرات ریزدانه و درشت دانه را پوشش دهد و یک بتن یکپارچه و منسجم ایجاد کند.

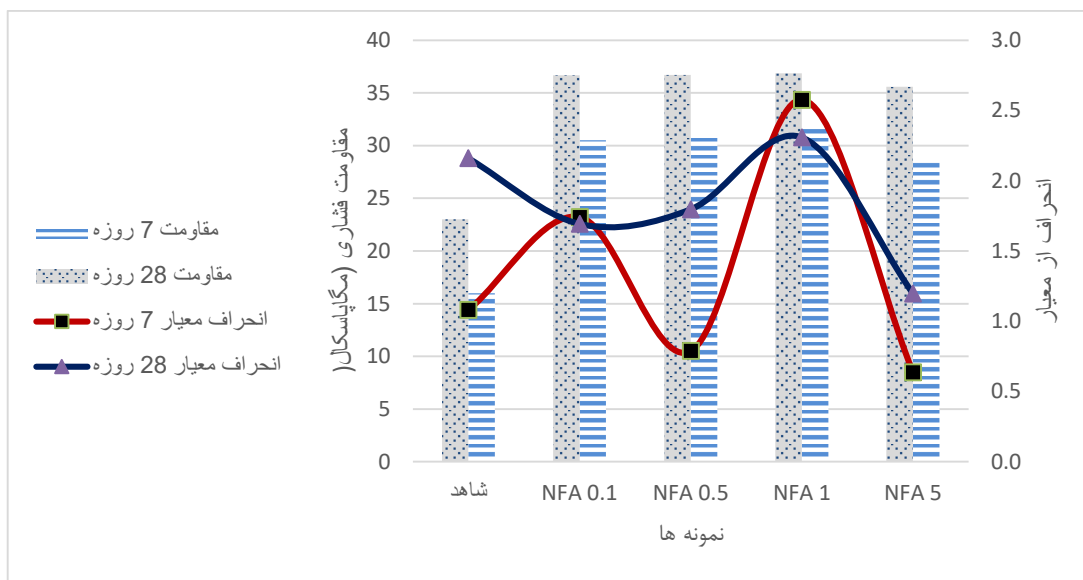
همچنین این پدیده را می توان با مکانیزمی مشابه آنچه شهباز پناهی (۱۳۹۶) برای خاکستر پوسته جو و احمدی و همکاران (۱۳۹۴) در مورد زئولیت توجیه نموده است، توجیه کرد [۲۶ و ۲۳]. اگر نانو ذرات به خوبی پخش نشوند باعث گلوله شدن و ایجاد یک ناحیه ضعیف میگردند و در نتیجه آن میکروساختار های هیدرات شیمان تشکیل نمی شوند و مقاومت بتن پایین می آید مانند زمانی که از NFA با مقدار ۵ درصد وزنی سیمان استفاده شده است. واکنش تدریجی نانو خاکستر بادی با هیدروکسید کلسیم باعث ایجاد مقدار بیشتری ژل C-S-H می گردد و فضاهای خالی، خلل و فرج را به نحو مناسب پوشش داده و باعث تقویت ناحیه ITZ و در نهایت افزایش مقاومت بتن می گردد. وقتی توزیع بی شمار نانو ذرات بطور یکنواختی در خمیر سیمان پخش گردند با توجه به انرژی سطحی بالا که در اثر بالمیر کردن آنها اتفاق افتاده است باعث تسریع در روند هیدراتاسیون شوند و افزایش مقاومت فشاری را مانند حالت ۱ درصد NFA می شوند. این در حالی است که NFA در سنین اولیه فعال تر و اثرگذار تر عمل کرده است پس احتمال واکنش قوی تر NFA با هیدروکسید کلسیم و تولید مقداری فراتر از حالت نرمال از ژل C-S-H همانطور که در تصاویر SEM نشان داده می شود وجود دارد.

درصد افزایش مقاومت ۷ روزه بتن به ترتیب برای ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۵ درصد NFA حدوداً برابر با ۹۱، ۹۴، ۹۷ و ۸۰ درصد می باشد و این افزایش مقاومت برای ۲۸ روزه به ترتیب برابر با ۵۹، ۶۰، ۶۱ و ۵۵ درصد می باشد. مناسب ترین درصد اختلاط NFA در طرح ۱ درصد می باشد و تاثیر NFA در مقاومت ۷ روزه بیشتر از تاثیر آن در مقاومت ۲۸ روزه می باشد. به عبارتی کاربرد NFA در بتن، به افزایش مقاومت بتن در سنین پایین کمک می کند. در شکل ۵ این نتایج با نتایج مطالعات آدامو و همکاران [۲۷]، آداک و همکاران [۲۸]، سینگ و همکاران [۲۹] مقایسه شده است.

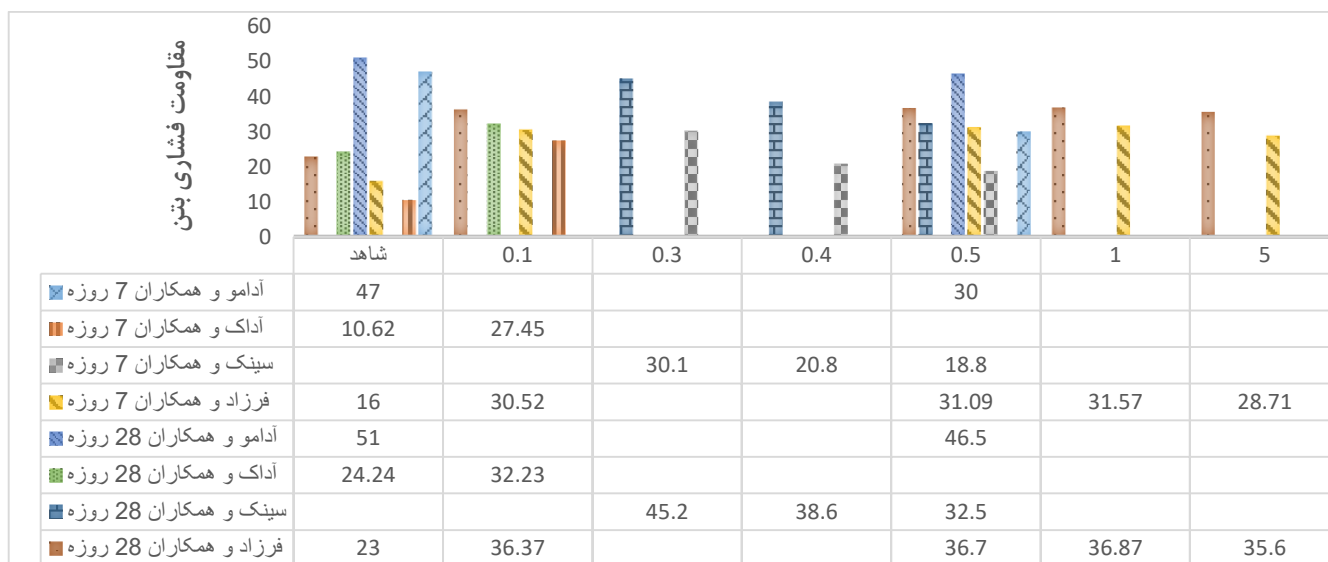
بر روی شکل شماره ۴ انحراف از معیار داده ها نشان داده شده است، به این منظور برای تعداد مشابه از هر نمونه مقدار میانگین و انحراف معیار آنها محاسبه گردید و بر اساس مقاومت ۷ و ۲۸ روزه رسم شده است. هر چه میزان انحراف معیار عددی بالاتر باشد میزان



پراکندگی داده ها از مقدار میانگین بیشتر است به عنوان مثال در شکل ۴ مناسب ترین مقدار انحراف معیار برای نمونه حاوی ۵ درصد NFA می باشد که مقدار انحراف معیار برای مقاومت ۷ روزه ۰/۶۴ و برای مقاومت ۲۸ روزه ۱/۱۹ بدست آمده است. همچنین بیشترین مقدار انحراف معیار مربوط به نمونه ۱ درصد NFA بوده که حداکثر و حداقل مقدار آن به ترتیب ۲/۳۰ و ۲/۵۷ می باشد.



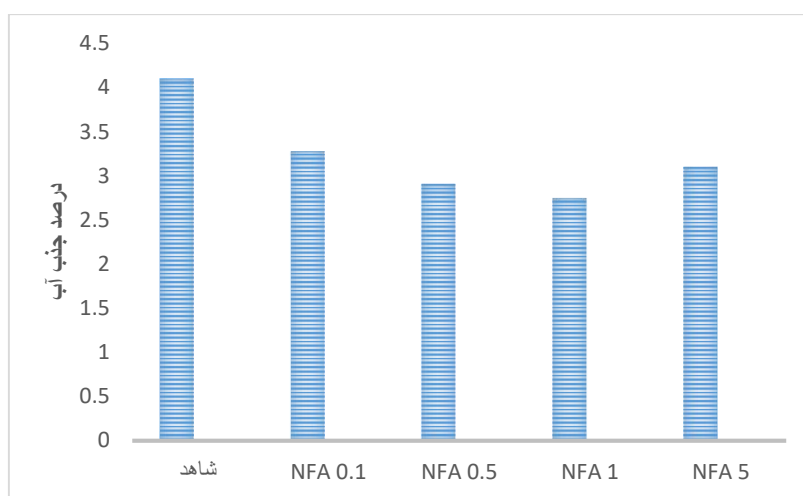
شکل ۴: مقاومت فشاری نمونه های ۷ و ۲۸ روزه بتن



شکل ۵: مقایسه نتایج سایر محققین در خصوص تاثیر NFA بر مقاومت فشاری بتن

## ۳-۳- جذب آب

قابلیت نفوذ پذیری بتن به عنوان یک عامل مهم در جلوگیری از تهاجم عوامل مخرب بر بتن در مقاومت و دوام بتن موثر است. آزمایش جذب آب مطابق با استاندارد BSI 1881 بر روی نمونه های بتنی انجام و نتایج در شکل ۶ در سن ۲۸ روزه ارائه شده است. با توجه به اینکه میزان جذب آب با حفرات و شبکه منافذ داخل بتن ارتباط مستقیم دارد مشاهده می شود که با بکارگیری NFA این میزان به شدت کاهش یافته است. درصد کاهش جذب آب به ترتیب برای ۰,۱، ۰,۵، ۱ و ۵ درصد NFA به ترتیب ۲۰، ۲۹، ۳۳ و ۲۴ درصد می باشد. استفاده از ۱ درصد NFA منجر به کاهش حداکثری جذب آب شده است. این موضوع بیان می کند که در حالتی که از ۱ درصد NFA استفاده شده است، ذرات بسیار ریز نانو، ذرات درشت تر سیمان را احاطه کرده و حفرات مویین را که در بافت سیمان به صورت شبکه های ارتباطی وجود دارد پر نموده و با پیوند یکنواخت میکروساختارها [۳۰]، توزیع هیدراتاسون را بهبود بخشیده و حفرات نفوذ پذیر را کاهش داده است و در نتیجه جذب آب را به حداقل تقلیل داده است.



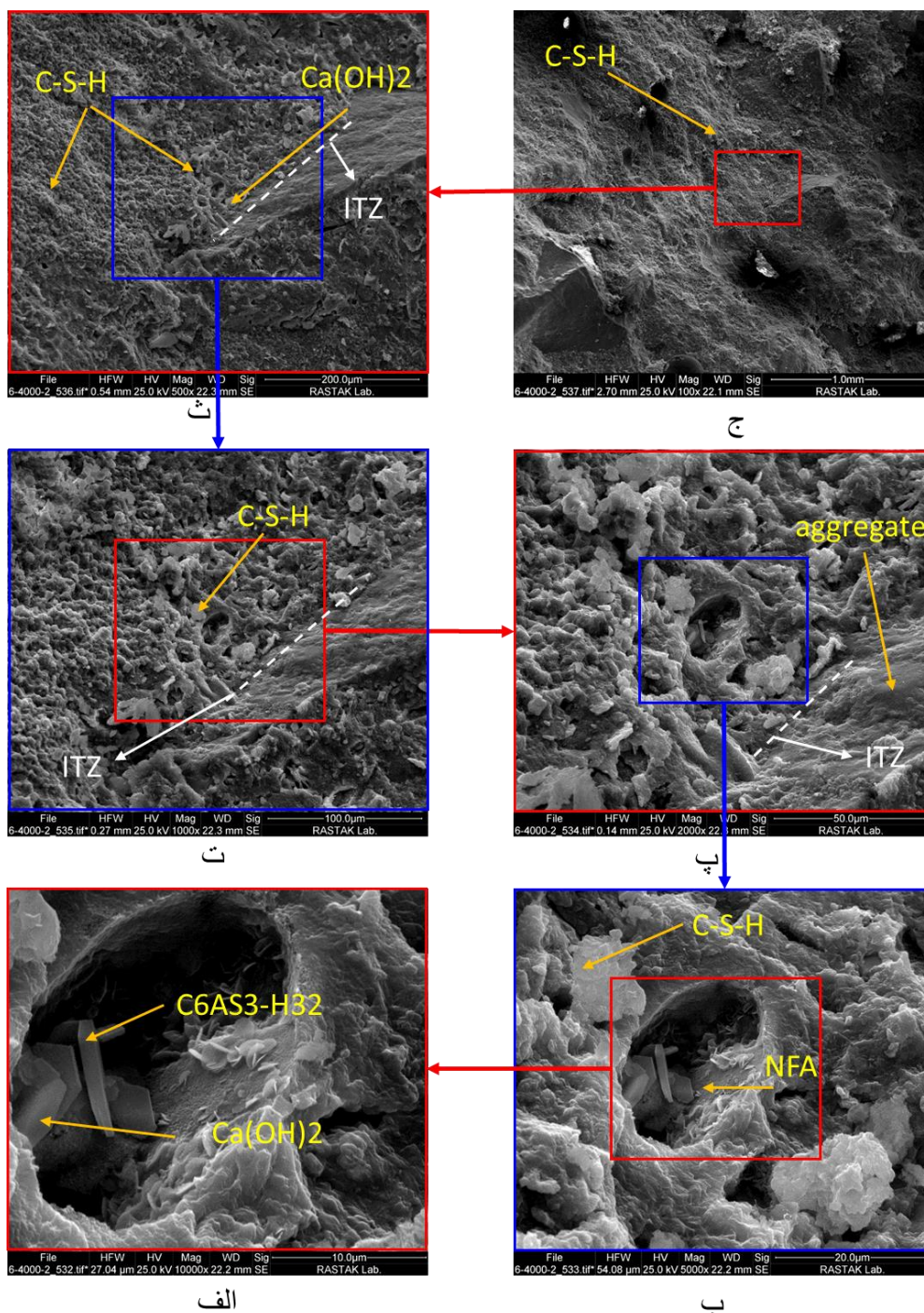
شکل ۶: درصد جذب آب نمونه ها

## ۳-۴- مورفولوژی سطح شکست

## ۳-۴-۱- میکروسکوپ الکترونی روبشی

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای تعیین مورفولوژی سطح (تجزیه و تحلیل در مقیاس نانو) مورد استفاده قرار می گیرد. فاز سیلیکات کلسیم هیدراته که به اختصار C-S-H نامیده می شود، بیشترین حجم (۵۰ تا ۶۰ درصد) جامد خمیر سیمان است و به شکل کریستالهایی خوشه ای در تصویر SEM مشاهده می گردد. هیدروکسید کلسیم  $(Ca(OH)_2)$  حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد از حجم قسمت جامد خمیر هیدراته را تشکیل می دهند. این ترکیب معمولاً از بلورهای مجزای بزرگ با شکل منشوری شش ضلعی تشکیل شده است. ترکیبات سولفوآلومینات کلسیم  $(C_6A_3H_32)$  حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد حجم قسمت جامد خمیر هیدراته را تشکیل می دهند و بنابراین نقش کمتری در خواص و ساختار آن دارند و دارای کریستال های سوزنی شکل هستند. همان طور که اشاره شد ناحیه انتقال میان سطحی  $(ITZ)$  همانند پلی بین سنگدانه ها و خمیر سیمان عمل می کند. حتی اگر هر قسمت (سنگدانه ها، خمیر و سیمان) دارای سختی بالایی باشند، سختی بتن (ماده مرکب) می تواند با وجود ترک های ریز و حفره ها در ناحیه  $ITZ$  به علت عدم انتقال تنش ها بین دو ناحیه، پایین باشد [۸]. تاثیر NFA در خمیر سیمان زمانی مشخص می شود که هیدراتاسیون تولید شده در بتن بطور موثر شکاف ها و درزها را پر می کند

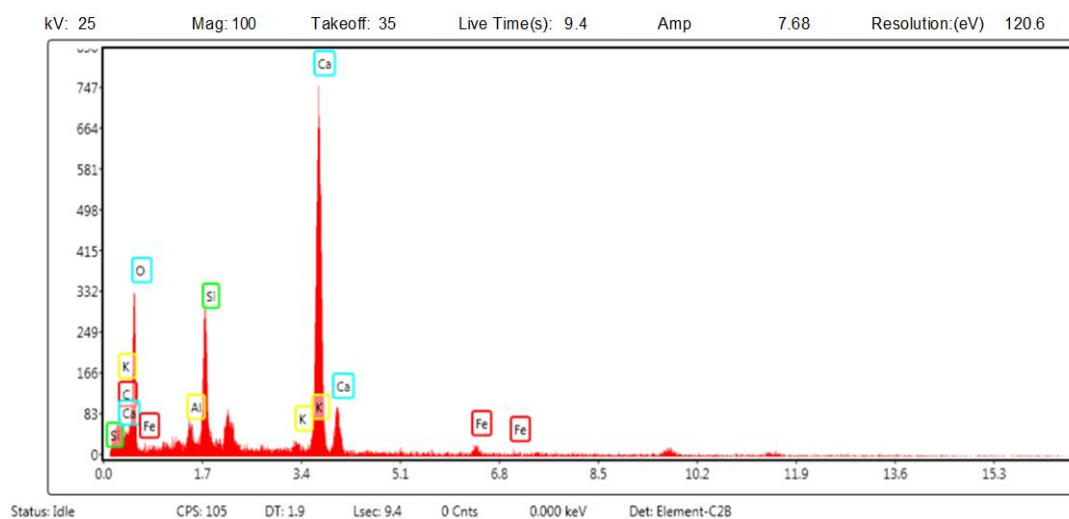
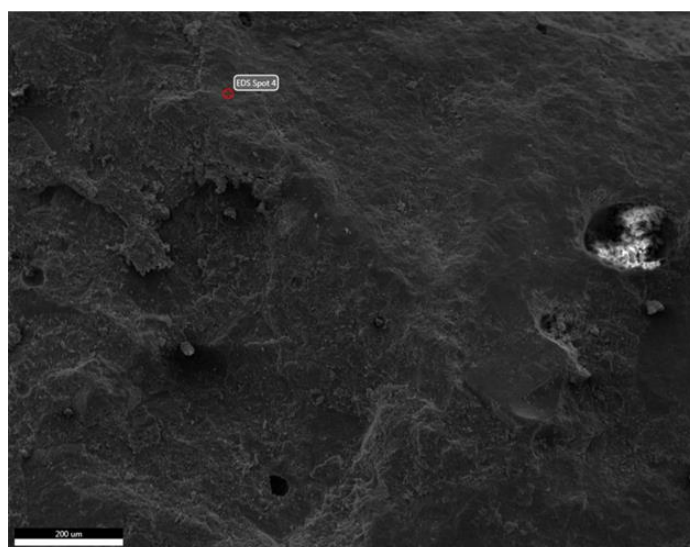
و این افزایش تراکم ناشی از NFA باعث افزایش مقاومت بتن می‌شود. شکل ۷ مورفولوژی سطح نانو خاکستر بادی در مقیاس‌های مختلف و فازبندی ترکیبات آن مشخص شده است. در این شکل مورفولوژی به ترتیب از تصویر ج (1mm) که شماتیکی کلی از منطقه مورد مطالعه می‌باشد به سمت تصویر الف (10 μm) که بیشترین بزرگنمایی را دارد نشان می‌دهد. منطقه ITZ در شکل‌های پ، ت و ث مشخص شده است و همان‌طور که مشاهده می‌شود نانو خاکستر بادی (NFA) این فضا را به خوبی پوشش داده است و پیوستگی مناسبی بین اجزا بتن ایجاد شده است.



شکل ۷: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه انتقال میان سطحی بتن در حضور ۱٪ نانو خاکستر بادی

## ۳-۴-۲- طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس

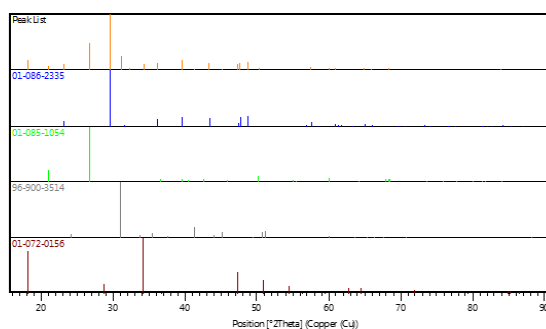
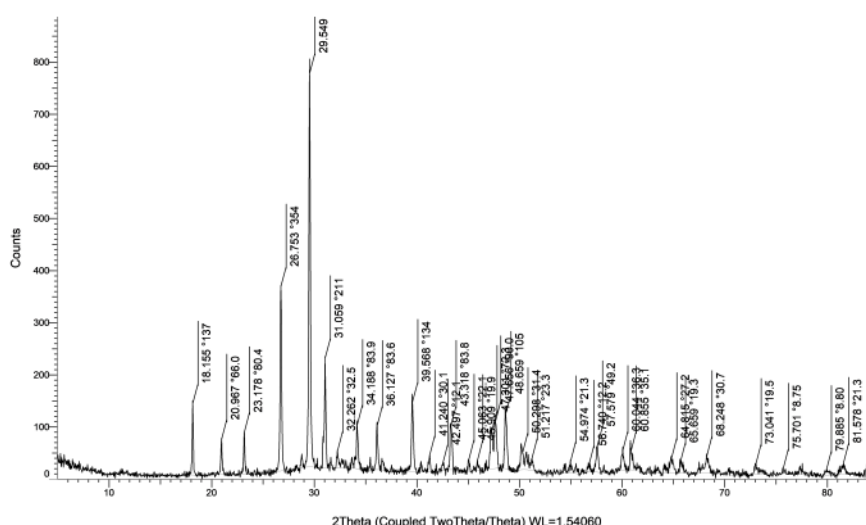
طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS یا EDAX) یک افزونه در دستگاه های SEM می باشد که جهت مشخص کردن عناصر در نمونه های جامد بصورت درصد بیان می گردد. در این آزمایش با ساطع شدن انرژی اشعه ایکس به نمونه مورد نظر، نوع عنصر، درصد وزنی و اتمی آن مشخص می شود. در شکل ۸ نمونه حاوی ۱ درصد نانو خاکستر بادی مورد آنالیز و ارزیابی قرار داده شده است. با توجه به اینکه بی نهایت نقطه و منطقه در سطح مورفولوژی بتن وجود دارد، عناصر یک نقطه به عنوان نقطه شاخص در نمودار مربوط به آنالیز EDS مشخص شده اند. این نمودار بیانگر عناصر و طول موج های ایجاد شده در آنالیز می باشد. بیشترین پیک و مهمترین عناصر تشکیل دهنده بتن Ca (کلسیم)، Si (سیلیسیم) و O (اکسیژن) می باشند.



شکل ۸: طیف سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS) در حضور ۱٪ نانو خاکستر بادی در بتن

## ۳-۴-۳- آنالیز پراش اشعه ایکس

تحلیل پراش اشعه ایکس (XRD) جهت تعیین فازها و ساختارهای کریستالی مواد مورد استفاده قرار می‌گیرد. این آزمون در شرکت پرتو رایان رستاک با دستگاه مدل Xpert برند PANalytical ساخت کشور هلند و با لامپ اشعه ایکس ۲/۲ KW و ولتاژ ۶۰ KV و رزولوشن ۰/۰۰۱ درجه انجام گردید. در شکل شماره ۹ آنالیز XRD برای نمونه حاوی ۱ درصد نانو خاکستر بادی در سن ۲۸ روزه انجام شده است و ترکیبات شیمیایی که بیشترین طول موج را دارند معین شده اند. تمامی طول موج‌ها در زاویه ۲ تا گرفته شده اند با توجه به شکل و جدول بیشترین پیک مربوط به نمونه ۲۳۳۵-۰۸۶-۰۱ با ترکیبات منیزیم کلسیم کربنات و فرمول شیمیایی  $(Mg_3O_64)$   $(Ca_3)(Co_3)$  می‌باشد و بعد از آن عنصر دولومیت با کد نمونه ۳۵۱۴-۹۰۰-۹۶ و فرمول شیمیایی  $(Ca_3)(Mg_3)(C_6)(O_{18})$  قرار دارد و عنصر اکسید سیلیکون با فرمول شیمیایی  $(SiO_2)$  و ترکیب هیدروکسید کلسیم با کد نمونه ۰۱۵۶-۰۷۲-۰۱ بیشترین پیک عناصر را در زاویه ۲ تا دارا می‌باشند.



Ref.Code	Compound Name	Chemical Formula
01-086-2335	Magnesium Calcium Carbonate	$(Mg_3O_64 Ca_3)(C_3O_3)$
01-085-1054	Silicon Oxide	$SiO_2$
96-900-3514	Dolomite	$(Ca_3O_0)(Mg_3O_0)(C_6O_0)(O_{18}O_0)$
01-072-0156	Calcium Hydroxide	$Ca(OH)_2$

شکل ۹: تجزیه و تحلیل پراش اشعه ایکس (X-ray) حاوی ۱٪ نانو خاکستر بادی در نمونه های ۲۸ روزه بتن

## ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق تاثیر افزودن نانو خاکستر بادی (NFA) بر مقاومت فشاری بتن متشکل از سیمان پرتلند تیپ ۲ و سنگدانه شامل ماسه شسته و شن شکسته با نسبت آب به سیمان برابر با ۰/۴۴ بررسی شد. نمونه هایی حاوی ۰/۱، ۰/۵، ۱ و ۵ درصد وزنی NFA جایگزین با سیمان تهیه گردید. بر اساس آزمایشات انجام شده، نتایج زیر قابل توجه می باشد.

- ۱- در نمونه حاوی ۱ درصد NFA نسبت به نمونه بدون NFA مقاومت فشاری ۷ روزه بتن ۹۷ درصد افزایش و مقاومت فشاری ۲۸ روزه آن ۶۱ درصد افزایش می یابد.
- ۲- افزایش مقاومت فشاری ۷ روزه بتن نسبت به مقاومت ۲۸ روزه آن، نشان می دهد که NFA عملکرد بهتری در افزایش مقاومت بتن در سنین پایین دارد.
- ۳- همچنین میزان جذب آب در نمونه حاوی ۱ درصد NFA تا ۳۳ درصد کاهش یافت، به عبارتی نفوذ پذیری بتن در برابر عوامل مخرب کاهش می یابد و منجر به افزایش دوام بتن می گردد.
- ۴- سیلیکات کلسیم هیدراته (C-S-H) بیشترین حجم جامد خمیر سیمان را دارد و سولفوآلومینات کلسیم (C6AS3H32) نقش کمتری در خواص و ساختار خمیر سیمان دارد.
- ۵- با توجه به تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، NFA در پوشش فضای ناحیه میان سطحی (ITZ) نقش حائز اهمیتی داشته است و بهبود این ناحیه باعث کاهش ترک های ریز و افزایش مقاومت بتن شده است.
- ۶- آزمایش EDS بیان می کند که مهمترین عناصر تشکیل دهنده بتن با بیشترین پیک شامل Ca (کلسیم)، Si (سیلیسیم) و O (اکسیژن) می باشند.
- ۷- بر اساس نتایج آزمایش XRD ترکیب منیزیم کلسیم کربنات و فرمول شیمیایی (Mg.064 Ca.936)(Co3) بیشترین پیک را در زاویه تابش ۲ تتا دارد.

## مراجع

- [1] Kolib, A., Pakkala, T.A., Lahdensivu, J., Kiviste, M. (2014). Durability demands related to carbonation induced corrosion for Finnish concrete buildings in changing climate, *Eng. Struct.*, 63, 42-52.
- [2] Singh, L.P., Ali, D., Sharma, U. (2016). Studies on optimization of nanoparticles dosage in cementitious system, *Cem. Concr. Compos.*, 70, 60-68.
- [3] Ganjian, E., Pouya, H.S. (2009). The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag, *Constr. Build. Mater.*, 23, 644-652.
- [4] Juenger, M.C., Siddique, R. (2015). Recent advances in understanding the role of supplementary cementations materials in concrete, *Cem. Concr. Res.*, 78, 71-80.
- [5] Yen, T., Hsu, T.H., Liu, Y.W., Chen, S.H. (2007). Influence of class F FA on the abrasion-erosion resistance of high-strength concrete, *Constr. Build. Mater.*, 21(2), 458-463.
- [6] Kumar, G.B.R., Sharma, U.K. (2014). Abrasion resistance of concrete containing marginal aggregates, *Constr. Build. Mater.*, 66 (1), 712-722.
- [7] Cai, X.H., He, Z., Tang, S.W., Chen, X.R. (2016). Abrasion erosion characteristics of concrete made with moderate heat Portland cement, FA and silica fume using sandblasting test, *Constr. Build. Mater.*, 127, 804-814.
- [8] Mehta, P.K. and Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*. New York: McGraw-Hill.
- [9] Rao, S.K., Sravana, P., Rao, T.C. (2016). Investigating the effect of M-sand on abrasion resistance of FA RCC (FRCC), *Constr. Build. Mater.*, 118, 352-363.
- [10] Terzić, A., Pezo, L., Mitić, V., Radojević, Z. (2015). Artificial FA based aggregates properties influence on lightweight concrete performances, *Ceram. Int.*, 41, 2714-2726.
- [11] Zhang, M., Islam, J. (2012). Use of nano-silica to reduce setting time and increase early Strength of concretes with high volumes of FA or slag, *Constr. Build. Mater.*, 29, 573-580.

- [12] Mardani-Aghabaglou, A., Andiç-Çakir, Ö., Ramyar, K. (2013). Freeze-thaw resistance and transport properties of high-volume FA Roller Compacted Concrete designed by maximum density method, *Cem. Concr. Compos.*, 37 (1), 259-266.
- [13] Yerramala, A., Babu, K.G. (2011). Transport properties of high-volume FA roller compacted concrete, *Cem. Concr. Compos.*, 33, 1057-1062.
- [14] Supit, S.W.M., Shaikh, F.U.A. (2015). Durability properties of high-volume FA concrete containing nano-silica, *Mater. Struct.*, 48 (8), 2431-2445.
- [15] Shaikh, F.U.A., Supit, S.W. (2015). Chloride induced corrosion durability of high-volume FA concretes containing nano particles, *Constr. Build. Mater.*, 99, 208-225.
- [16] G. Pachideh, "An Investigation on the Effect of High Temperatures on the Mechanical Properties and Microstructure of Concrete Containing Multiwalled Carbon Materials Performance and Characterization An Investigation on the Effect of High Temperatures on the Mechanical," no. March 2018, 2019, doi: 10.1520/MPC20180061.
- [17] G Pachideh, V Toufigh. (2022). A Study on the Cementitious Mortars Containing Multi-Walled Carbon Nanotubes and Nanographene, *Journal of Testing and Evaluation*, Accepted.
- [18] F. Seddighi, G. Pachideh, and S. Behnoush, "Journal of Building Engineering A study of mechanical and microstructures properties of autoclaved aerated concrete containing nano-graphene," *J. Build. Eng.*, vol. 43, no. May, p. 103106, 2021, doi: 10.1016/j.job.2021.103106.
- [19] Fahim, G., Hussein, Z., Hafizah, N., Khalid, A., Rahman, A., Sam, M., Tahir, M., Hasanah, N., Shukor, A., Alyousef, R., Mirza, J., 2020. Durability performance of modified concrete incorporating fly ash and effective microorganism. *Constr. Build. Mater.* 120947. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120947>
- [20] L. Wang, Z. Yu, B. Liu, F. Zhao, S. Tang, and M. Jin, "Effects of Fly Ash Dosage on Shrinkage, Crack Resistance and Fractal Characteristics of Face Slab Concrete," 2022.
- [21] S. C. Modified, F. Farooq, S. Czarnecki, P. Niewiadomski, and F. Aslam, "A Comparative Study for the Prediction of the Compressive," 2021.
- [22] S. Khurshed, J. J. Pijush, and S. Sanjay, "Compressive strength prediction of fly ash concrete by using machine learning techniques," *Innov. Infrastruct. Solut.*, 2021, doi: 10.1007/s41062-021-00506-z.
- [23] J. Ahmadi, H. Azizi, and M. Koochi, "Investigation of the effect of zeolite in different grades of cement on the strength and permeability of concrete," *Concr. Res.*, vol. 8, no. 2, pp. 5–18, 2015.
- [24] G. Fahim et al., "Durability performance of modified concrete incorporating fly ash and effective microorganism," *Constr. Build. Mater.*, no. xxxx, p. 120947, 2020, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.120947.
- [25] Scrivener, K.L., Crumbie, A.K., Laugesen, P. (2004). The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete, *Interface Sci.*, 12, 411-421.
- [26] Shahbazapanahi, S. (2017). Influence of Barley Husk Ash with Nano- Silica on the Concrete Behavior, *Journal of Concrete Research*, 10, 111-122.
- [27] Adamu, M., Mohammed, B.S., Liew, M.S. (2018). Mechanical properties and performance of high volume fly ash roller compacted concrete containing crumb rubber and nano silica *Constr. Build. Mater.*, 171, 521-538.
- [28] Adak, D., Sarkar, M., Mandal, S. (2014). Effect of nano-silica on strength and durability of fly ash based geopolymer mortar, *Constr. Build. Mater.*, 70, 435-459.
- [29] Singh, L.P., Ali, D., Tyagi, I., Sharma, U., Singh, R., Hou, P. (2019). Durability studies of nano-engineered fly ash concrete, *Constr. Build. Mater.*, 194, 205-215.
- [30] R. Madandoust, M. M. Ranjbar, and E. Mohseni, "Effect of Nano Materials on Engineering Properties of Self Compacting Mortar Containing Fly Ash," *Concr. Res.*, vol. 5, no. 2, pp. 55–67, 2012.