

# بررسی اثر ترکیبی نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن بر مشخصات مکانیکی، نفوذپذیری و تهاجم کلریدی کامپوزیت سیمانی

صفا پیمان

استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

پست الکترونیکی نویسنده:

[speyman@ihu.ac.ir](mailto:speyman@ihu.ac.ir)

## چکیده:

در پژوهش حاضر اثر توأمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن بر مشخصات مکانیکی، نفوذپذیری و تهاجم کلریدی کامپوزیت سیمانی بررسی شده است. لذا از ۲ درصد وزنی نانوسیلیس به عنوان جایگزین سیمان و به ترتیب ۱ و ۰/۲ درصد حجمی از الیاف فولادی و پلی پروپیلن به عنوان افزودنی در کامپوزیت سیمانی به صورت مجزا و همچنین به صورت توأمان استفاده شده است. آزمایش‌هایی هم چون مقاومت فشاری، خمشی و کششی، سرعت پالس فراصوت، نرخ جذب آب مویینه و مهاجرت تسریع شده یون کلرید (RCMT) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاکی از آن است که حضور همزمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن در طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی ۹۰ روزه به ترتیب منجر به افزایش ۵۹/۳، ۳۲/۳، ۶۷/۲ و ۲۵/۹ درصدی مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، چقرمگی خمشی و مقاومت کششی در مقایسه با نمونه شاهد شده است. کاهش نرخ جذب آب و افزایش دوام در برابر تهاجم کلریدی از دیگر نتایج قابل توجه حاصل از این پژوهش بوده است.

## واژگان کلیدی:

نانوسیلیس، الیاف فولادی، الیاف پلی پروپیلن، مشخصات مکانیکی، دوام.

# **The investigation of the combined effect of nano-silica, steel, and polypropylene microfibers on the mechanical characteristics, permeability, and chloride attack resistance of cement composite**

**Safa Peyman**

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Imam Hossein University, Tehran, Iran,

## **Abstract:**

The objective of this study was to investigate the combined impact of nano-silica, steel microfibers, and polypropylene microfibers on the mechanical properties, permeability, and resistance to chloride attack of cement composite. To achieve this goal, a 2% weight ratio of nano-silica was used as a cement substitute, while 1.0% steel and 0.2% polypropylene microfibers, respectively, by volume of the binders were separately and simultaneously employed as additives in the cement composite. Experimental analyses, including compressive, flexural, and tensile strength tests, were conducted to evaluate the mechanical properties. Additionally, the ultrasonic pulse velocity (UPV) and sorptivity tests were employed to assess permeability, and the durability against chloride attack was examined using the Rapid Chloride Migration Test (RCMT). The results demonstrate that the simultaneous incorporation of nano-silica, steel microfibers, and polypropylene microfibers in the cement composite mixture resulted in a significant enhancement in compressive strength, flexural strength, flexural toughness, and tensile strength by 59.3%, 32.3%, 67.2%, and 25.9%, respectively, compared to the control sample after a curing period of 90 days. Moreover, significant decreases were observed in terms of the initial and secondary water absorption rates. Furthermore, the penetration depth of chloride ions was notably reduced from 33.6 mm (in the control composite) to 14.2 mm (in the composite containing the combined effects of nano-silica, steel microfibers, and polypropylene microfibers) after 90 days. The enhancement of mechanical properties, permeability, and durability against chloride attack in cement composite can be attributed to the synergistic mechanisms promoted by the utilization of nano-silica, steel microfibers, and polypropylene microfibers. The filling effect, nucleation sites, and pozzolanic activity of silica nanoparticles significantly contribute to the reduction of porosity and refinement of the cementitious matrix's microstructure. Simultaneously, the inclusion of steel microfibers and polypropylene microfibers reinforces the cement matrix and effectively controls existing microcracks, thereby impeding the propagation of macrocracks and brittle failure in the cement composite. Furthermore, the bridging effect of steel and polypropylene fibers aids in the control of cracks caused by plastic shrinkage during the early stages and secondary or thermal cracks, thereby further improving the properties of cement composite.

**Keywords:** Nano silica, Steel fiber, Polypropylene fiber, Mechanical characteristics, Durability.

## ۱ - مقدمه

بتن ماده‌ای ساختمانی است که از مخلوط کردن سیمان پرتلند با ماسه، سنگ‌دانه خردشده و آب ساخته می‌شود، که به‌طور گسترده در صنعت ساخت استفاده می‌گردد [۱]. مقرون‌به‌صرفه بودن، در دسترس بودن منابع فراوان اجزای بتن، سازگاری با محیط‌زیست و مقاومت مناسب، از جمله ویژگی‌هایی هستند که سبب استفاده مطلوب آن شده است [۲ و ۳]. در طراحی سازه‌های بتنی، علاوه بر دارا بودن مقاومت مکانیکی بالا، دوام بتن نیز به عنوان یک مشخصه حیاتی بایستی در نظر گرفته شود. بتن بادوام باید در برابر هرگونه فرآیند شیمیایی، فیزیکی یا بیولوژیکی که در طول عمر خدماتی سازه ممکن است به آن آسیب رساند، مقاومت کند [۴].

فناوری نانو رویکردی جدید است که در زمینه‌های مختلف دانش و فناوری وارد شده است. از این رو تحقیقات گسترده‌ای در راستای افزایش عملکرد مصالح ساختمانی و توسعه بتن‌های بادوام و پایدار برای صنعت ساخت با به‌کارگیری فناوری نانو صورت گرفته است [۵]. اخیراً استفاده از نانوذرات در مواد پایه سیمانی توجه زیادی را به خود جلب کرده است، زیرا آن‌ها می‌توانند در مقیاس نانو برخی خواص منحصر به فرد را ایجاد کنند [۶]. با توجه به ساختار هیدراته سیمان با منافذ نانومقیاس، نانوذرات می‌توانند به‌طور مؤثر منافذ با سایز نانو را پر کنند و استحکام و دوام بتن را افزایش دهند [۷]. از سویی دیگر نانوذرات به‌عنوان کانون‌های هسته‌زایی می‌توانند منجر به تسریع واکنش هیدراسیون سیمان شوند. متعاقباً محصولات حاصل از واکنش هیدراسیون به ایجاد ریزساختار متراکم‌تر و تخلخل کمتر ماتریس سیمانی کمک می‌نمایند [۸ و ۹].

سیلیس دارای فرمول شیمیایی سیلیکون دی اکسید ( $\text{SiO}_2$ ) می‌باشد. نانوسیلیس به نانوذره‌ای اطلاق می‌شود که با کاهش اندازه ذرات پودر سیلیس به سطح نانومتری از طریق تعدادی از فرآیندهای مختلف تولید می‌شود. نانوسیلیس می‌تواند به‌عنوان افزودنی برای بهبود خواص مکانیکی و دوام کامپوزیت‌های سیمانی استفاده شود [۱۰]. در همین راستا، چیترا و همکاران [۱۱] تأثیر افزودن نانوسیلیس کلوئیدی بر خواص مکانیکی و دوام بتن پرمقاومت را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که جایگزینی جزئی سیمان با نانوسیلیس در بتن پرمقاومت نه تنها منجر به افزایش مقاومت

فشاری، خمشی و کششی می‌شود بلکه دوام در برابر نفوذ یون کلرید را نیز بهبود می‌بخشد.

میکروالیاف فولادی یک نوع مسلح‌کننده فلزی است؛ که دارای ویژگی‌هایی از جمله طول کوتاه، نسبت ابعادی (نسبت طول به قطر) حدود ۲۰ تا ۱۰۰ و سطح مقطع‌های مختلف می‌باشند. لازم به ذکر است که الیاف فولادی به اندازه کافی کوچک هستند لذا امکان پخش - شدگی کاملاً تصادفی آن‌ها در یک ماتریس سیمانی فراهم می‌باشد. نکته قابل توجه در مورد الیاف فولادی این است که مصرف مقدار معینی از این نوع الیاف در بتن می‌تواند باعث تغییرات کیفی در خصوصیات فیزیکی بتن شود و مقاومت در برابر ترک خوردگی، ضربه، خستگی، خمش، دوام و سایر خواص را به شکل قابل توجهی افزایش دهد [۱۲]. سمسی یازیچی و همکاران [۱۳] نشان دادند که استفاده از الیاف فولادی با نسبت ابعادی و درصد‌های افزودنی مختلف در بتن، منجر به افزایش حدود ۴ تا ۱۹ درصدی مقاومت فشاری، حدود ۱۱ تا ۵۴ درصدی مقاومت کششی و حدود ۳ تا ۸۱ درصدی مقاومت خمشی می‌شود. همچنین در پژوهشی دیگر توسط بهرنیا و بهروان [۱۴] تأثیر الیاف فولادی بر مقاومت در برابر نفوذ کلرید بتن بررسی شد. گزارش شده است که عمق نفوذ در نمونه‌های تقویت شده با الیاف فولادی نسبت به نمونه شاهد ۱۵ درصد کاهش یافته است.

از سویی میکروالیاف پلی‌پروپیلن نوعی الیاف پلیمری است که متشکل از رشته‌های بسیار نازک تک رشته‌ای می‌باشد که باعث ایجاد یک سیستم بتن مسلح با کارایی مناسب و کیفیت بسیار بالا می‌شود. میکروالیاف پلی‌پروپیلن به دلیل مشخصات بارزی مانند شکل‌پذیری و انعطاف‌پذیری بالا، دوام مناسب و قیمت ارزان، به‌صورت گسترده در حوزه کامپوزیت سیمانی استفاده می‌شود [۱۵]. جیاکینگ وانگ و همکاران [۱۶] در پژوهشی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر مشخصات مکانیکی بتن لاستیکی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از بهبود خصوصیات مکانیکی بتن لاستیکی حاوی الیاف پلی‌پروپیلن شامل مقاومت کششی و خمشی بود. از طرفی تأثیر الیاف پلی‌پروپیلن بر مقاومت در برابر نفوذ کلرید بتن توسط بسیاری از محققین بررسی شده است. نتایج آزمایش برخی از محققین [۱۷ و ۱۸] نشان داده که افزودن الیاف پلی‌پروپیلن در بتن منجر به افزایش مقاومت بتن در برابر نفوذ کلرید می‌شود، در حالی که سایر محققین [۱۵ و ۱۹] نتایج

متناقضی را گزارش کرده‌اند که حاکی از کاهش مقاومت در برابر نفوذ کلرید بتن حاوی الیاف پلی پروپیلن می‌باشد.

بنابراین با مروری بر ادبیات موضوع مشخص گردید نانوسیلیس و همچنین میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن دارای پتانسیل‌های ویژه‌ای در راستای بهبود مشخصات خاصی از کامپوزیت‌های سیمانی می‌باشند. با این وجود هر کدام از مواد مذکور به دلیل ویژگی‌های ذاتی می‌توانند تنها بر روی برخی از خصوصیات کامپوزیت‌های سیمانی تأثیرگذاری قابل توجهی داشته باشند؛ در حالیکه استفاده توأمان آن‌ها می‌تواند چندین ویژگی کامپوزیت‌های سیمانی را به صورت همزمان اتقا بخشد. از سویی بررسی محققین این مقاله حاکی از عدم وجود پژوهشی جامع و مدون در خصوص تأثیر توأمان نانوسیلیس و میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن بر خصوصیات مختلف کامپوزیت سیمانی بود. لذا در پژوهش حاضر هدف بررسی اثر توأمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن بر مشخصات مکانیکی، نفوذپذیری و تهاجم کلریدی کامپوزیت سیمانی در نظر گرفته شد؛ تا از این طریق چندین ویژگی عملکردی کامپوزیت‌های سیمانی به صورت همزمان اتقا داده شود.

## ۲- برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱- مصالح مصرفی

در این پژوهش از سیمان تیپ دو تهران با سطح ویژه ۰/۳۴ متر مربع بر گرم و وزن مخصوص ۳/۱۲ گرم بر سانتی‌متر مکعب استفاده شده است. ترکیبات شیمیایی سیمان مصرفی در این پژوهش در جدول (۱) نشان داده شده است. ماسه سیلیسی طبیعی با وزن مخصوص ۲/۶۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و مدول نرمی ۲/۴۹ به عنوان ریزدانه مورد استفاده قرار گرفت؛ که الزامات دانه‌بندی آن مطابق با استاندارد ASTM C۷۷۸ [۲۰] بود. نانوسیلیس مورد استفاده در این تحقیق محصول شرکت صنایع نانوسیلیس ایساتیس بوده، که مشخصات آن در جدول (۲) قابل مشاهده است. همچنین از میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن مطابق با مشخصات ذکر شده در جدول (۳) استفاده شد، که تصاویر ظاهری آن‌ها در شکل (۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است به منظور دستیابی به کارایی مورد نظر در کامپوزیت سیمانی و همینطور به عنوان یک ماده سطح‌پرداز جهت پخش‌شدگی مناسب نانوسیلیس در ملات سیمانی، از فوق روان‌کننده پلی کربوکسیلات اتر محصول شرکت وندشیمی، مطابق با رده‌بندی F براساس استاندارد ASTM C۴۹۴/C۴۹۴M [۲۱]، استفاده شد. علاوه بر این، آب شرب شهری با مقدار pH برابر با ۶/۹ مورد استفاده قرار گرفت.

جدول ۱: ترکیبات شیمیایی سیمان پرتلند تیپ دو.

| MnO  | TiO <sub>2</sub> | K <sub>2</sub> O | MgO  | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SO <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | CaO   | ترکیبات شیمیایی |
|------|------------------|------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------|------------------|-------|-----------------|
| ۰/۱۹ | ۰/۲۹             | ۰/۷۱             | ۲/۷۰ | ۳/۲۳                           | ۳/۶۳                           | ۶/۷۸            | ۱۹/۴۲            | ۶۳/۰۱ | درصد وزنی       |

جدول ۲: ویژگی‌های نانوسیلیس مصرفی.

| شکل       | درصد خلوص | رنگ  | pH      | اندازه ذرات       |
|-----------|-----------|------|---------|-------------------|
| نانو پودر | ۹۹        | سفید | ۳/۵-۵/۵ | ۱۵ تا ۱۸ میلی‌متر |

جدول ۳: مشخصات میکروالیاف فولادی و پلی پروپیلن.

| ویژگی                   | الیاف فولادی | الیاف پلی پروپیلن |
|-------------------------|--------------|-------------------|
| طول (میلی‌متر)          | ۱۸           | ۱۲                |
| قطر (میلی‌متر)          | ۰/۷          | ۰/۱               |
| مقاومت کششی (مگاپاسکال) | ۱۰۵۰         | ۳۲۰               |
| نسبت ابعادی (L/D)       | ۲۵/۷         | ۱۲۰               |

نسبت آب به مواد سیمانی و ماسه به مواد سیمانی در نظر گرفته شد. لذا مقادیر اولیه فوق‌الذکر به همراه درصدهای مصرفی مختلف فوق‌روان‌کننده تحت سعی و خطاهای مکرر آزمایشگاهی قرار گرفتند. به همین منظور از آزمایش‌های مینی‌اسلامپ [۲۸] و میز جریان [۲۹] با هدف ثابت نگه‌داشتن کارایی (مقدار افت اسلامپ  $1 \pm 0.1$  سانتی-متر و همینطور مقدار پخش‌شدگی  $10 \pm 130$  میلی‌متر در آزمایش میز جریان) در کلیه مخلوط‌ها استفاده گردید. نهایتاً مقادیر  $0.45$  و  $2/6$  به ترتیب به‌عنوان مقادیر بهینه نسبت آب به مواد سیمانی و ماسه به مواد سیمانی در پژوهش حاضر مورد استفاده قرار گرفت. همچنین درصدهای بهینه فوق‌روان‌کننده مصرفی نیز در جدول (۴) ارائه شده است.

براساس جزئیات طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی ارائه شده در جدول (۴) و مطابق روش پیشنهادی استاندارد ASTM C۳۰۵ [۳۰] مصالح مصرفی مخلوط شدند. پس از آماده‌سازی قالب‌های مربوطه، ملات ساخته‌شده در قالب‌ها ریخته شد. برای کاهش حباب‌های هوای موجود در کامپوزیت سیمانی، نمونه‌ها به مدت ۲ دقیقه با فرکانس ۲۵ هرتز بر روی میز لرزه قرار داده شده و تحت ویبره قرار گرفتند. نمونه‌ها بعد از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و به مدت ۲۸ و ۹۰ روز در آب آهک اشباع شده مطابق با استاندارد ASTM C۵۱۱ [۳۱] عمل‌آوری شدند.



شکل ۱: تصاویر ظاهری میکروالیاف مصرفی: (الف) میکروالیاف فولادی و (ب) میکروالیاف پلی‌پروپیلن.

## ۲-۲- روش ساخت سوسپانسیون حاوی نانوسیلیس

به‌منظور ساخت سوسپانسیون حاوی نانوسیلیس، ابتدا به اندازه مورد نیاز آب، نانوسیلیس و فوق‌روان‌کننده پلی‌کربوکسیلات اتر توزین و در بشر ریخته شده و سپس بشر را در دستگاه مافوق صوت پروبی قرار داده و با انتخاب توان ۲۰۰ وات و مدت زمان ۱۰ دقیقه، عمل پراکنش نانوسیلیس در آب انجام می‌گردید. لازم به ذکر است که در حین فرآیند آلتراسونیک، بشر حاوی نانوسیلیس را در حمام آب یخ گذاشته شد، تا در هنگام پراکنش توسط دستگاه مافوق صوت از گرم شدن بیش از حد محلول جلوگیری شود.

## ۲-۳- نسبت‌های مخلوط، نحوه اختلاط، آماده‌سازی و عمل-آوری نمونه‌های کامپوزیت سیمانی

جزئیات نسبت‌های مخلوط کامپوزیت سیمانی در جدول (۴) آورده شده است. درصدهای مصرفی نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، در این پژوهش براساس درصدهای مطلوب و بهینه مورد استفاده در پژوهش‌های اخیر انتخاب گردیده است. در همین راستا از ۲ درصد وزنی نانوسیلیس [۲۲ و ۲۳] به‌عنوان جایگزین سیمان و به ترتیب ۱ درصد حجمی از میکروالیاف فولادی [۲۳-۲۵] و  $0.2$  درصد حجمی میکروالیاف پلی‌پروپیلن [۷ و ۲۳ و ۲۶] به‌عنوان افزودنی در کامپوزیت سیمانی به‌صورت مجزا و همچنین به‌صورت توأمان استفاده شده است.

لازم به ذکر است که با اقتباس از استاندارد ASTM C۱۰۹ [۲۷] مقادیر  $0.485$  و  $2/75$  به ترتیب به‌عنوان مقادیر اولیه برای

جدول ۴: جزئیات نسبت‌های مخلوط کامپوزیت سیمانی.

| کد طرح  | مواد سیمانی<br>( $kg/m^3$ ) |           | میکروالیاف (درصد<br>حجمی مواد سیمانی) |                 | نسبت آب<br>به مواد<br>سیمانی | نسبت ماسه<br>به مواد<br>سیمانی | پلی کریوکسیلات<br>اثر (درصد وزنی<br>مواد سیمانی) |
|---------|-----------------------------|-----------|---------------------------------------|-----------------|------------------------------|--------------------------------|--|
|         | سیمان                       | نانوسیلیس | فولادی                                | پلی-<br>پروپیلن |                              |                                |  |
| Control | ۵۳۴                         | -         | -                                     | -               | ۰/۴۵                         | ۲/۶                            | ۰/۳  |
| M۱      | ۵۲۳/۳۲                      | ۱۰/۶۸     | -                                     | -               | ۰/۴۵                         | ۲/۶                            | ۰/۵۵   |
| M۲      | ۵۳۴                         | -         | ۱                                     | -               | ۰/۴۵                         | ۲/۶                            | ۰/۵  |
| M۳      | ۵۳۴                         | -         | -                                     | ۰/۲             | ۰/۴۵                         | ۲/۶                            | ۰/۵۵   |
| M۴      | ۵۳۴                         | -         | ۱                                     | ۰/۲             | ۰/۴۵                         | ۲/۶                            | ۰/۶  |
| M۵      | ۵۲۳/۳۲                      | ۱۰/۶۸     | ۱                                     | ۰/۲             | ۰/۴۵                         | ۲/۶                            | ۰/۷  |

#### ۴-۲- شرح آزمایش

##### ۱-۴-۲- مقاومت فشاری

به منظور تعیین مقاومت فشاری، نمونه‌های مکعبی شکل کامپوزیت سیمانی با ابعاد ۵ سانتی‌متر مطابق با استاندارد ASTM C۱۰۹ [۲۷] تحت آزمایش قرار گرفتند. در پایان میانگین نتایج سه آزمایش به عنوان مقاومت فشاری ثبت شده برای هر نسبت مخلوط گزارش گردید.

##### ۲-۴-۲- مقاومت کششی

آزمایش مقاومت کششی به روش دو نیم کردن نمونه‌ها که تحت عنوان آزمایش کشش برزلی نیز شناخته می‌شود، مطابق با الزامات استاندارد ASTM C۴۹۶ [۳۳] و بر روی نمونه‌های استوانه‌ای با ابعاد ۱۵×۳۰ سانتی‌متر انجام شد.

##### ۲-۴-۲- مقاومت خمشی

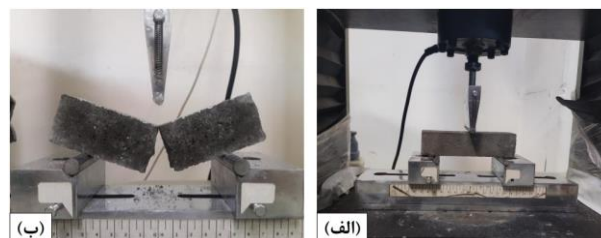
به منظور تعیین مقاومت خمشی، نمونه‌های منشوری شکل کامپوزیت سیمانی با ابعاد ۴×۴×۱۶ سانتی‌متر مطابق با استاندارد ASTM C۳۴۸ [۳۲] تحت آزمایش خمش سه نقطه قرار گرفتند (شکل (۲)). در پایان میانگین نتایج سه آزمایش ثبت شده و مقاومت خمشی برای هر نسبت مخلوط محاسبه گردید.

##### ۲-۴-۲- سرعت پالس فراصوت

آزمایش سرعت پالس فراصوت بر روی نمونه‌های منشوری با ابعاد ۴×۴×۱۶ سانتی‌متر قبل از انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای مطابق استاندارد ASTM C۵۹۷ [۳۴] انجام شد. لازم به ذکر است که قبل از انجام آزمایش دستگاه با کمک میله استاندارد کالیبره شده و سپس به منظور اتصال بهتر پروب‌های دستگاه، سطوح نمونه‌ها روغن کاری شده و سرعت پالس عبوری هر نمونه سه بار اندازه‌گیری شده و مقدار میانگین آن‌ها به عنوان سرعت پالس فراصوت گزارش شده است.

##### ۲-۴-۵- جذب آب مویینه

نرخ جذب آب کامپوزیت سیمانی مطابق استاندارد ASTM C۱۵۸۵ [۳۵] بر روی سه نمونه دیسکی مشابه با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر انجام شد. پس از خشک کردن نمونه‌ها در آون معمولی با دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد به مدت ۲۴ ساعت، سطوح جانبی و بالایی نمونه‌ها با استفاده از چسب آلومینیومی و پوششی



شکل ۲: (الف) نمونه منشوری تحت بارگذاری خمش سه نقطه، (ب) نحوه شکست نمونه خمشی.

نایلونی کاملاً پوشانده شد تا آب به صورت تک جهته از سطح در تماس با آب (سطح زیرین) نمونه حرکت نماید (شکل (۳) الف و ب)). پس از آن نمونه‌ها توزین شده و به عنوان وزن خشک نمونه‌ها قبل از غوطه‌وری در آب ثبت گردید. در ادامه نمونه‌های دیسکی در یک ظرف حاوی آب که فقط ۳ میلی‌متر آن بالاتر از کف نمونه بود، قرار گرفتند (شکل (۳) پ)). سپس وزن نمونه‌ها در فواصل زمانی ۱، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۶۰ دقیقه و ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۲۴ ساعت و ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ و ۷ و ۸ روز از زمان شروع آزمایش ثبت شد. بدین ترتیب با در اختیار داشتن وزن نمونه در حالت خشک و وزن نمونه در هر یک از فواصل زمانی ذکر شده و استفاده از دستورالعمل ارائه شده توسط استاندارد ASTM C1585 [۳۵] نرخ جذب آب اولیه و ثانویه تعیین شد.



شکل ۳: (الف) نمای سه یعدی سطح جانبی و فوقانی نمونه عایق‌بندی شده، (ب) نمای جانبی و (پ) تصویر آزمایش جذب آب مویینه.

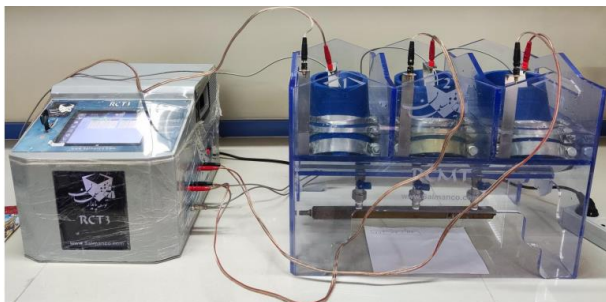
### ۲-۴-۶- مهاجرت تسریع شده یون کلرید (RCMT)

آزمایش RCMT کامپوزیت سیمانی مطابق استاندارد NT BUILD ۴۹۲ [۳۶] بر روی سه نمونه دیسکی مشابه با قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر انجام شد (شکل (۴)). لازم به ذکر است که به منظور اندازه‌گیری عمق نفوذ یون کلرید، پس از پایان آزمایش نمونه‌ها از دستگاه آزمایش خارج نموده و با آب مقطر شسته شده و آن‌ها را در راستای طولی با کمک جک فشاری (مشابه آزمایش کشش برزیلی) دو نیم کرده و یک نیمه برای اندازه‌گیری عمق نفوذ انتخاب گردید. در ادامه محلول نقره نترات ۰/۱ نرمال را بر روی سطح تازه شکافته شده افشاندند. هنگامی که رسوب سفید رنگ نقره کلرید بر روی سطح شکافته شده به وضوح قابل مشاهده بود، عمق نفوذ یون کلرید اندازه‌گیری شد. پس از اتمام مدت زمان آزمایش ضریب مهاجرت را براساس رابطه (۱) محاسبه گردید:

(۱)

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)L \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right)}{(U-2)t}$$

$D_{nssm}$  ضریب مهاجرت حالت غیرپایدار ( $\times 10^{-12} m^2/s$ )،  $U$  ولتاژ اعمال شده برحسب ولت،  $T$  مقدار میانگین دمای اولیه و نهایی در محلول آنولیت برحسب سانتی‌گراد،  $L$  ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر،  $x_d$  مقدار میانگین عمق نفوذ برحسب میلی‌متر و  $t$  مدت زمان انجام آزمایش برحسب ساعت می‌باشد.



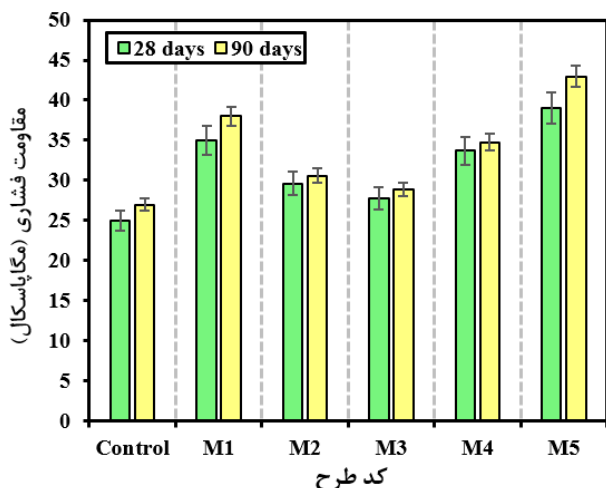
شکل ۴: تصویر آزمایش RCMT.

### ۳- نتایج و بحث

#### ۳-۱- مقاومت فشاری

شکل (۵) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری بر روی طرح مخلوط‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود که با افزایش سن عمل‌آوری از ۲۸ به ۹۰ روز مقاومت فشاری کلیه طرح مخلوط‌ها افزایش یافته است. این افزایش در مقادیر مقاومت فشاری به واسطه پیشرفت فرآیند هیدراسیون سیمان و همچنین افزایش واکنش پوزولانی در نمونه‌های حاوی نانوسیلیس با گذشت زمان می‌باشد [۳۷-۳۹] علاوه بر این می‌توان مشاهده کرد با جایگزینی ۲ درصد وزنی نانوسیلیس در طرح مخلوط M۱ مقاومت فشاری ۲۸ و ۹۰ روزه ملات سیمانی افزایش یافته است؛ به نحوی که نتایج حاکی از آن است در نمونه M۱، ۴۰/۱ و ۴۰/۹ درصد افزایش مقاومت فشاری به ترتیب در سن ۲۸ و ۹۰ روزه در مقایسه با نمونه شاهد در سن‌های متناظر حاصل گردیده است. افزایش مقاومت فشاری در نمونه حاوی نانوسیلیس می‌تواند به واسطه چند مکانیزم عملکردی باشد که به صورت زیر خلاصه شده است:

۱- تسریع در فرآیند هیدراسیون سیمان و افزایش ژل کلسیم



شکل ۵: مقاومت فشاری نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

### ۲-۳- مقاومت خمشی

شکل (۶) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت خمشی بر روی طرح مخلوط‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مشابه با نتایج حاصل از مقاومت فشاری، با افزایش سن عمل‌آوری از ۲۸ به ۹۰ روز مقاومت خمشی کلیه طرح مخلوط‌ها نیز افزایش یافته است. علاوه بر این مشاهده می‌گردد که افزودن ۲ درصد وزنی نانوسیلیس تأثیر چندانی بر بهبود مقاومت خمشی نداشته است.

درحالی‌که نتایج نشان‌دهنده افزایش قابل توجه مقاومت خمشی در نمونه‌های حاوی میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه می‌باشد. در نمونه‌های حاوی ۱ درصد حجمی الیاف فولادی (M۲)، ۰/۲ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن (M۳) و حالت هیبریدی آن‌ها (M۴) به ترتیب در سن ۲۸ روزه ۲۷/۳، ۲۱/۶ و ۲۹/۹ درصد و در سن ۹۰ روزه ۲۴/۶، ۲۲/۹ و ۲۷/۰ درصد افزایش مقاومت خمشی در مقایسه با نمونه شاهد در سنین متناظر حاصل شده است. الیاف فولادی با توجه به مقاومت کششی بالایی که از خود نشان می‌دهند، میکروتکرک‌های موجود در ماتریس سیمانی را به نحو مناسبی کنترل می‌کنند و تنش‌های خمشی را جذب کرده و مانع از گسترش ماکروتکرک‌ها در کامپوزیت سیمانی می‌شوند [۲۶ و ۴۳]. در نتیجه نمونه‌های حاوی الیاف فولادی عملکرد مطلوب‌تری را در معرض بارگذاری خمشی در مقایسه با نمونه شاهد از خود نشان می‌دهند. از سویی دیگر الیاف پلی‌پروپیلن نیز به سبب انعطاف‌پذیری

سیلیکات هیدراته (C-S-H) به واسطه ایجاد کانون‌های هسته‌زایی در ماتریس سیمانی [۷ و ۳۹]؛ (در واقع نانوذرات سیلیس به واسطه سایز نانویی خود دارای واکنش‌پذیری فوق‌العاده بالایی هستند، لذا هر نانوذره به عنوان یک دانه برای هسته‌زایی ژل C-S-H و فرآیند رشد در خمیر سیمانی عمل می‌کند. بنابراین به واسطه این اثر منحصر به فرد، حضور نانوذرات سیلیس منجر به تسریع در واکنش هیدراسیون سیمان می‌شوند [۷ و ۴۰ و ۴۱]،

۲- کاهش تخلخل، اصلاح ساختار منافذ و ایجاد ریزساختار متراکم‌تر به دلیل ابعاد نانو مقیاس و اثر پرکنندگی آن‌ها [۷ و ۴۲].

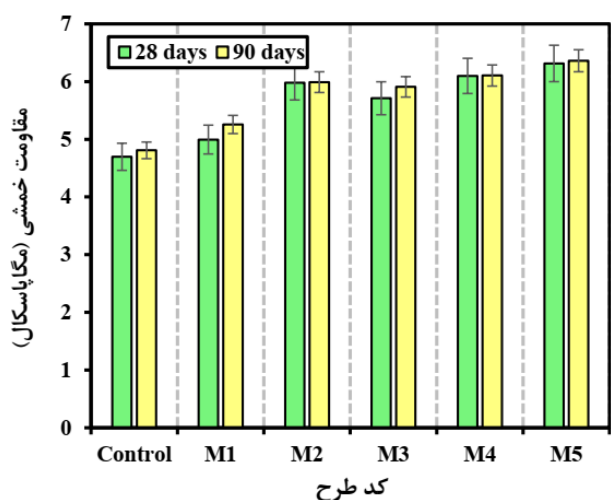
۳- افزایش تشکیل ژل C-S-H ثانویه به علت خاصیت پوزولانی نانوسیلیس و واکنش با کلسیم هیدروکسید حاصل از هیدراسیون سیمان [۷ و ۳۹ و ۴۲].

بنابراین افزایش مقاومت فشاری در نمونه‌های ملات سیمانی حاوی نانوسیلیس از سه مکانیزم فوق‌الذکر نشأت می‌گیرد.

از طرفی با افزودن ۱ درصد حجمی الیاف فولادی و ۰/۲ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن به صورت جداگانه در مخلوط‌های M۲ و M۳ و به صورت هیبریدی در مخلوط M۴ مشاهده می‌گردد که به ترتیب در سن ۲۸ روزه ۱۸/۵، ۱۱/۳ و ۳۴/۸ درصد و همچنین در سن ۹۰ روزه ۱۳/۴، ۷/۲ و ۲۸/۹ درصد افزایش مقاومت فشاری در مقایسه با نمونه شاهد در سنین متناظر را به دنبال داشته است. علت بهبود مقاومت فشاری با افزودن الیاف فولادی و همینطور الیاف پلی‌پروپیلن به واسطه اثر مسلح‌کنندگی آن‌ها و ممانعت از شکست ترد در کامپوزیت سیمانی می‌باشد [۲۶ و ۴۳]

علاوه بر این در طرح مخلوط M۵ که بیانگر اثر توأمان نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن می‌باشد؛ مشاهده گردید که مقاومت فشاری در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه به ترتیب به میزان ۵۶/۱ و ۵۹/۳ درصد در مقایسه با نمونه شاهد در سنین متناظر افزایش یافته است. با توجه به مطالب بیان شده در نمونه حاوی ترکیب نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن به دلیل حضور همزمان سه ماده افزودنی در کامپوزیت سیمانی می‌توان مجموعه‌ای از مکانیزم‌های فوق‌الذکر را متصور بود.





شکل ۶: مقاومت خمشی نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.



شکل ۷: باقت کامپوزیت سیمانی M5 پس از آزمایش خمش سه نقطه‌ای.

شکل (۸) منحنی نیرو-جابجایی خمشی نمونه‌های کامپوزیت سیمانی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را نشان می‌دهد. با در اختیار داشتن منحنی‌های نیرو-جابجایی می‌توان مقدار چقرمگی خمشی را محاسبه نمود. لازم به ذکر است که چقرمگی خمشی به جذب انرژی تا زمان شکست اشاره دارد که برابر با مساحت زیر منحنی نیرو-جابجایی می‌باشد [۴۴]. مقادیر چقرمگی خمشی نمونه‌های کامپوزیت سیمانی در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در جدول (۵) ارائه شده است. الگوی تغییرات چقرمگی خمشی نیز مشابه تغییرات مقاومت خمشی است

بالتر، خاصیت مسلح‌کنندگی و پل‌زدگی خود نقش کلیدی را در جلوگیری از گسترش سریع ترک‌ها ایفا می‌نمایند؛ لذا منجر به بهبود مقاومت خمشی در مقایسه با نمونه شاهد شدند [۱۶].

با این وجود، با بررسی دقیق‌تر نتایج مشاهده گردید که نتایج مقاومت خمشی نمونه M2 بالاتر از نمونه M3 می‌باشد؛ هرچند اختلاف آن‌ها جزئی می‌باشد. علت افزایش جزئی مقاومت خمشی نمونه حاوی میکروالیاف فولادی نسبت به نمونه حاوی میکروالیاف پلی‌پروپیلن می‌تواند به واسطه عدم پخش‌شدگی یکنواخت میکروالیاف فولادی در ماتریس سیمانی باشد. در واقع با توجه به درصد مصرفی بالاتر میکروالیاف فولادی در مقایسه با میکروالیاف پلی‌پروپیلن، عدم پخش‌شدگی یکنواخت الیاف فولادی در ماتریس سیمانی محتمل می‌باشد. لذا ممکن است پتانسیل آن‌ها برای بهبود مقاومت خمشی محدود شده باشد. از سویی با توجه به نسبت ابعادی بالاتر میکروالیاف پلی‌پروپیلن نسبت به میکروالیاف فولادی، این عامل نیز ممکن است در اختلاف کم مابین این دو طرح تأثیرگذار باشد. همچنین هندسه میکروالیاف فولادی مصرفی در این پژوهش (صاف با سطح مقطع دایره‌ای) نیز ممکن است در مقایسه با سایر شکل‌های میکروالیاف فولادی (الیاف فولادی با قلاب یا شکل چین‌دار) در بهبود مقاومت خمشی کامپوزیت سیمانی مورد مطالعه تأثیرگذاری کمتری داشته است. به صورت خلاصه می‌توان بیان کرد که دلایل فوق‌الذکر می‌تواند علت احتمالی افزایش جزئی مقاومت خمشی نمونه M2 نسبت به نمونه M3 باشد.

علاوه بر این مشاهده گردید که نمونه حاوی اثر توأمان نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن (M5) بیشترین افزایش مقاومت خمشی را نتیجه داده است که به ترتیب به میزان ۳۴/۴ و ۳۲/۳ درصد در سن ۲۸ و ۹۰ روز در مقایسه با نمونه شاهد در سنین متناظر می‌باشد. لذا چنین می‌توان بیان کرد که در نمونه مذکور اثر مسلح‌کنندگی میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، و تا حدی اثرات کانون‌های هسته‌زایی، پرکنندگی و فعالیت پوزولانی نانوسیلیس با همدیگر توأم شده است و لذا بیشترین افزایش مقاومت خمشی در نمونه M5 حاصل شده است. شایان ذکر است که شکل (۷) بافت کامپوزیت سیمانی M5 را پس از آزمایش خمش سه نقطه‌ای نشان می‌دهد.

جدول ۵: چقرمگی خمشی نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

| سن عمل‌آوری       |             |                   |             | کد طرح  |
|-------------------|-------------|-------------------|-------------|---------|
| ۹۰ روزه           |             | ۲۸ روزه           |             |         |
| چقرمگی خمشی (ژول) | درصد افزایش | چقرمگی خمشی (ژول) | درصد افزایش |         |
| -                 | -           | ۰/۲۱۹             | -           | Control |
| ۱۵/۳              | ۰/۲۶۴       | ۱۱/۹              | ۰/۲۴۵       | M1      |
| ۴۳/۱              | ۰/۳۲۸       | ۳۷/۰              | ۰/۳۰۰       | M2      |
| ۴۱/۹              | ۰/۳۲۵       | ۲۸/۸              | ۰/۲۸۲       | M3      |
| ۶۰/۷              | ۰/۳۶۸       | ۶۳/۹              | ۰/۳۵۹       | M4      |
| ۶۷/۲              | ۰/۳۸۳       | ۶۸/۹              | ۰/۳۷۰       | M5      |

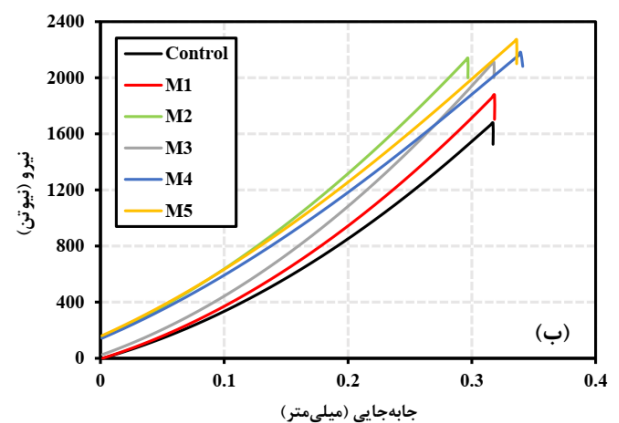
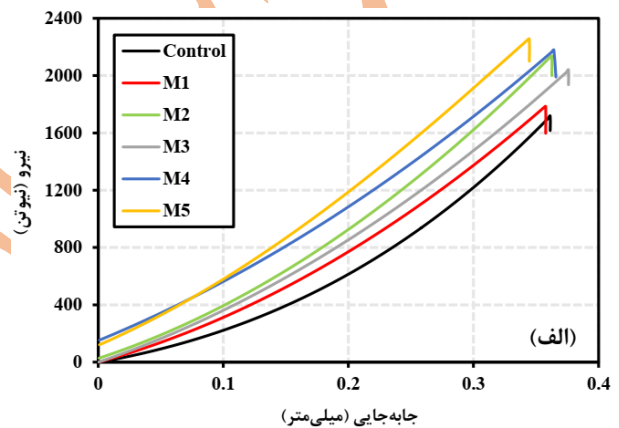
### ۳-۳- مقاومت کششی

شکل (۹) نتایج حاصل از آزمایش مقاومت کششی بر روی طرح مخلوط‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود مشابه با نتایج حاصل از مقاومت فشاری و خمشی، با افزایش سن عمل‌آوری از ۲۸ به ۹۰ روز مقاومت کششی کلیه طرح مخلوط‌ها نیز به صورت جزئی افزایش یافته است. افزون بر این مشاهده گردید که افزودن ۲ درصد وزنی نانوسیلیس تأثیر قابل توجهی بر بهبود مقاومت کششی نداشته است.

از سویی در نمونه‌های حاوی ۱ درصد حجمی الیاف فولادی (M2)، ۰/۲ درصد حجمی الیاف پلی‌پروپیلن (M3) و حالت هیبریدی آنها (M4) به ترتیب در سن ۲۸ روزه ۲۶/۴، ۱۵/۱ و ۲۶/۴ درصد و در سن ۹۰ روزه ۲۵/۰، ۱۴/۸ و ۲۵/۹ درصد افزایش مقاومت کششی در مقایسه با نمونه شاهد در سنین متناظر حاصل شده است. افزایش مقاومت کششی در این نمونه‌ها ناشی از عواملی مانند نقش مسلح-کنندگی و پل‌زدگی میکروالیاف‌ها، خاصیت انعطاف‌پذیری الیاف پلی-پروپیلن و مقاومت کششی بالای الیاف فولادی می‌باشد [۱۶ و ۲۶]. [۴۳]

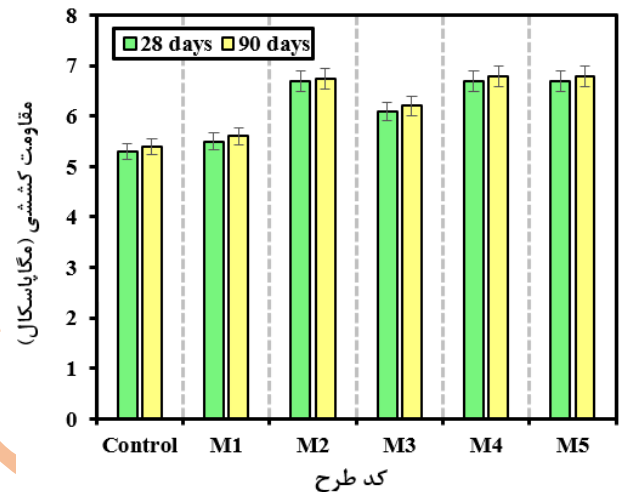
همچنین مشاهده گردید که نمونه حاوی اثر توأمان نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن (M5) بیشترین افزایش مقاومت کششی، به میزان ۲۶/۴ و ۲۵/۹ درصد به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در مقایسه با نمونه شاهد در سنین متناظر، را نتیجه داده است.

که بالاتر تشریح گردید. به صورت ویژه نتایج نشان دهنده آن است که نمونه حاوی اثر توأمان نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن (M5) بیشترین میزان چقرمگی خمشی یا به عبارتی جذب انرژی در حین بارگذاری استاتیکی را نتیجه داده است. لذا چنین می‌توان بیان کرد که در نمونه مذکور اثر مسلح‌کنندگی میکروالیاف فولادی و پلی-پروپیلن نقش ویژه‌ای را در جذب تنش‌های خمشی ناشی از بارگذاری استاتیکی ایفا نموده و از طرفی اثرات کانون‌های هسته‌زایی و پوزولانی نانوسیلیس نیز با کمک به تشکیل ژل‌های مقاوم بیشتر در ماتریس سیمانی می‌تواند منجر به جذب انرژی بالاتر در نمونه مذکور شوند که تجمیع این اثرات موجب دستیابی به بهبود در مقادیر چقرمگی خمشی مربوط به نمونه M5 شده است.



شکل ۸: منحنی نیرو-جاب‌جایی خمشی نمونه‌های کامپوزیت سیمانی: (الف) ۲۸ روزه و (ب) ۹۰ روزه.

لذا می‌توان بیان کرد که در نمونه‌های مذکور اثر مسلح‌کنندگی میکروالیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن، و تا حدی اثر کانون‌های هسته‌زایی و پوزولانی نانوسیلیس با همدیگر توأم شده است؛ که تجمع این آثار علت افزایش مقاومت کششی ملات سیمانی نسبت به حالت معمولی است.



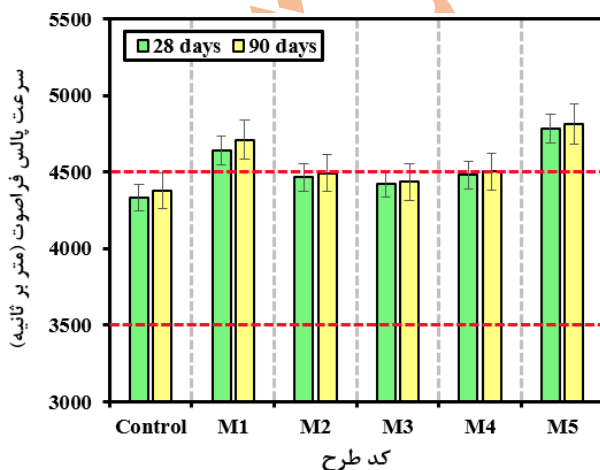
شکل ۹: مقاومت کششی نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

مقایسه با سایر مخلوط‌ها (Control, M<sup>۲</sup>, M<sup>۳</sup>, M<sup>۴</sup>) از خود نشان داده است. در واقع حضور نانوذرات سیلیس می‌تواند به واسطه اثر پرکنندگی منجر به کاهش تخلخل و اصلاح ریزساختار ماتریس سیمانی شوند. از سویی اثر کانون‌های هسته‌زایی نیز می‌تواند با تسریع واکنش هیدراسیون سیمان و تشکیل ژل C-S-H بیشتر نقش قابل‌توجهی را در اصلاح میکروساختار ماتریس سیمانی ایفا نماید. لازم به ذکر است که نانوذرات سیلیس به واسطه خاصیت پوزولانی نیز می‌توانند با مصرف کلسیم هیدروکسید، تشکیل ژل C-S-H را تشدید نموده و بهبود کیفیت ریزساختار و افزایش همگنی آن را به ارمغان آورند [۷ و ۱۱]. از طرفی نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن تنها، بهبودی جزئی را در افزایش سرعت پالس فراصوت داشته‌اند؛ که می‌تواند به واسطه افزایش همگنی ریزساختار در نتیجه مکانیزم مسلح‌کنندگی میکروالیاف در کامپوزیت سیمانی باشد.

از سویی دیگر نمونه حاوی هیبرید نانوذرات سیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن (M<sup>۵</sup>) بیشترین افزایش سرعت پالس فراصوت در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را در مقایسه با نمونه شاهد در سنین متناظر از خود نشان داده است. لذا می‌توان بیان کرد که در نمونه مذکور اثر مسلح‌کنندگی میکروالیاف‌های فولادی و پلی-پروپیلن، اثرات پرکنندگی، کانون‌های هسته‌زایی و پوزولانی نانوذرات سیلیس با همدیگر توأم شده است و لذا بیشترین بهبود در مقدار سرعت پالس فراصوت در نمونه M<sup>۵</sup> حاصل شده است.

### ۳-۴- سرعت پالس فراصوت

شکل (۱۰) نتایج حاصل از آزمایش سرعت پالس فراصوت بر روی طرح مخلوط‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه را نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که با افزایش سن عمل‌آوری از ۲۸ تا ۹۰ روز سرعت پالس فراصوت کلیه طرح مخلوط‌ها نیز افزایش یافته است؛ که دلیل این امر می‌تواند به دلیل این واقعیت باشد که مقادیر سرعت پالس فراصوت به شدت با نسبت حجمی فاز جامد موجود در ماتریس سیمان نظیر ژل‌های مقاوم مرتبط است [۴۵]. از این رو، پیشرفت بیشتر فرآیند هیدراسیون سیمان و پیشرفت واکنش پوزولانی در طرح مخلوط‌های حاوی نانوسیلیس، با افزایش سن عمل‌آوری منجر به تشکیل بیشتر محصولات حاصل از هیدراسیون از جمله ژل C-S-H شده و متعاقباً تخلخل ماتریس سیمانی کاهش یافته و موجب ایجاد ریزساختار متراکم‌تر و چگال‌تر خواهد شد [۳۸]. علاوه بر این می‌توان مشاهده کرد با جایگزینی ۲ درصد وزنی نانوسیلیس در طرح مخلوط M<sup>۱</sup>، پالس فراصوت با سرعت بالاتری از نمونه عبور کرده است به نحوی که بالاترین سرعت موج عبوری را در



شکل ۱۰: سرعت پالس فراصوت نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

بر اساس طبقه‌بندی ارائه شده در جدول (۶) برای کیفیت بتن بر اساس نتایج حاصل از آزمایش سرعت پالس فراصوت مشاهده می‌گردد که مخلوط حاوی نانوسیلیس تنها (M۱) و همینطور مخلوط حاوی هیبرید نانوذرات سیلیس، الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن (M۵) دارای مقادیر سرعت پالس فراصوت بیش از ۴۵۰۰ متر بر ثانیه می‌باشند؛ بنابراین در دسته کامپوزیت‌های سیمانی با کیفیت عالی طبقه‌بندی خواهند شد.

جدول ۶: طبقه‌بندی کیفیت ریزساختار بتن بر اساس مقادیر سرعت پالس فراصوت [۴۶].

| کیفیت بتن | سرعت پالس فراصوت (متر بر ثانیه) |
|-----------|---------------------------------|
| عالی      | بیشتر از ۴۵۰۰                   |
| خوب       | ۳۵۰۰ تا ۴۵۰۰                    |
| مشکوک     | ۳۰۰۰ تا ۳۵۰۰                    |
| ضعیف      | ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰                    |
| خیلی ضعیف | ۲۰۰۰                            |

نفوذ آب به کامپوزیت سیمانی کاهش یافته و در نتیجه شاهد کاهش نرخ جذب آب مویینه اولیه خواهیم بود [۴۲].

از سویی در نمونه‌های حاوی میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن تنها (M۲ و M۳) و همینطور حالت هیبریدی آن‌ها (M۴) نیز شاهد کاهش جزئی نرخ جذب آب اولیه در مقایسه با نمونه شاهد هستیم. این پدیده را می‌توان به عملکرد مناسب میکروالیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن در کنترل افزایش ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک در ساعات اولیه گیرش کامپوزیت سیمانی و ترک‌های ثانویه یا حرارتی که منجر به ایجاد تخلخل در کامپوزیت سیمانی خواهند شد؛ نسبت داد [۱۵].

همچنین مشاهده گردید که کمترین مقدار نرخ جذب آب اولیه متعلق به نمونه حاوی اثر توأمان نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن (M۵) در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه بوده است. لذا در توضیح آن می‌توان بیان کرد که تجمع مکانیزم‌های عملکردی فوق‌الذکر علت کاهش قابل توجه نرخ جذب مویینه اولیه نسبت به نمونه شاهد (به میزان ۲۳/۴ و ۲۷/۷ درصدی به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه) است.

مطابق جدول (۷) قابل ذکر است که الگوی مشاهده شده در ارتباط با نرخ جذب آب ثانویه نیز کاملاً مشابه نرخ جذب آب اولیه در کلیه طرح‌های مخلوط ساخته شده است.

### ۳-۵- نرخ جذب آب

نتایج نرخ جذب آب مویینه طرح مخلوط‌های ساخته شده و خطوط برازش دو مرحله‌ای اعمال شده بر نتایج حاصله، در شکل (۱۱) نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نتایج جذب مویینگی محاسبه شده از خطوط برازش شده در شکل (۱۱)، در جدول (۷) ارائه گردیده است. همانطور که از نتایج جدول (۷) مشاهده می‌شود افزودن نانوسیلیس در ملات سیمانی می‌تواند مقاومت در برابر جذب آب اولیه ملات سیمانی را نسبت به نمونه شاهد بهبود ببخشد. به-نحوی که در نمونه حاوی ۲ درصد نانوسیلیس (M۱) نرخ جذب آب مویینه اولیه به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روز، ۱۹/۲ و ۱۴/۷ درصد در مقایسه با نمونه شاهد در سنین متناظر کاهش یافته است. علت کاهش نرخ جذب آب اولیه در نمونه M۱ می‌تواند به واسطه کاهش تخلخل و بهبود ریزساختار ماتریس سیمانی با کمک مکانیزم‌های پرکنندگی، کانون‌های هسته‌زایی و خاصیت پوزولانی نانوسیلیس باشد [۳۷-۳۹]. لذا در اثر مکانیزم‌های ذکر شده، ساختار منافذ اصلاح شده و یک ماتریس سیمانی متراکم‌تر با تخلخل کمتر حاصل شده و اندازه حفرات به سمت حفرات با اندازه ریزتر سوق پیدا کرده و متعاقباً

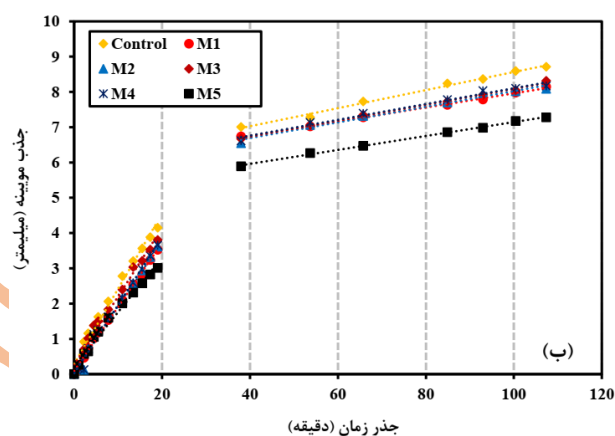
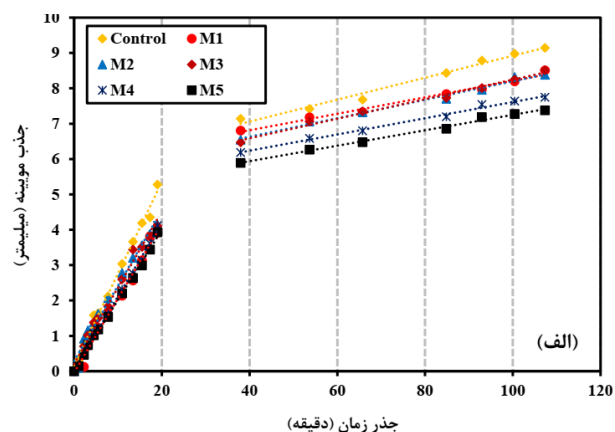
جدول ۷: نتایج جذب موبینه محاسبه شده از خطوط برازش شده در شکل ۱۱.

| نرخ جذب آب ثانویه<br>( $\times 10^{-2}$ )<br>mm/min <sup>۰.۵</sup> | نرخ جذب آب اولیه<br>( $\times 10^{-2}$ )<br>mm/min <sup>۰.۵</sup> | کد طرح  | سن عمل آوری |
|--|---|---------|-------------|
| ۳/۱۰   | ۲۵/۹۲   | Control | ۲۸ روز      |
| ۲/۳۳   | ۲۰/۹۴   | M۱      |             |
| ۲/۶۱   | ۲۱/۳۲   | M۲      |             |
| ۲/۷۶   | ۲۱/۵۹   | M۳      |             |
| ۲/۲۹   | ۲۱/۱۱   | M۴      |             |
| ۲/۱۸   | ۱۹/۸۵   | M۵      |             |
| ۲/۵۶   | ۲۱/۳۲   | Control | ۹۰ روز      |
| ۲/۰۰   | ۱۸/۱۹   | M۱      |             |
| ۲/۲۲   | ۱۹/۰۷   | M۲      |             |
| ۲/۲۶   | ۱۹/۴۳   | M۳      |             |
| ۲/۱۹   | ۱۹/۲۶   | M۴      |             |
| ۱/۹۷   | ۱۵/۴۲   | M۵      |             |

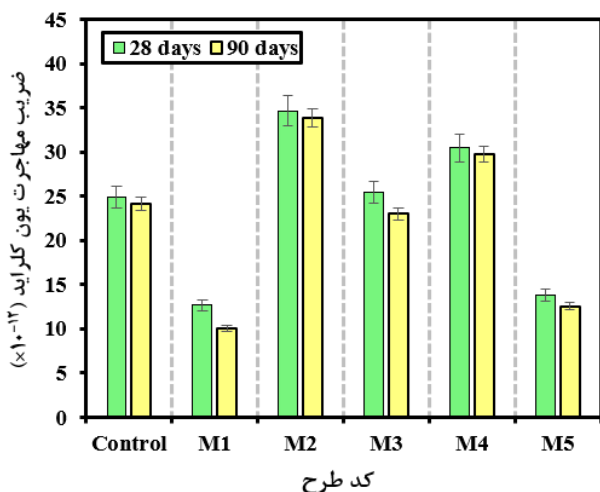
### ۳-۶- مهاجرت تسریع شده یون کلرید (RCMT)

نتایج آزمایش RCMT طرح مخلوط‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه در شکل (۱۲) نشان داده شده است. نتایج حاکی از آن است که با افزایش سن عمل آوری از ۲۸ به ۹۰ روز مقادیر ضریب مهاجرت کلرید کلیه طرح مخلوط‌ها کاهش یافته است. از سویی دیگر، کامپوزیت سیمانی حاوی ۲ درصد نانوسیلیس (M۱) به ترتیب در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه دارای کمترین مقدار  $10^{-12} \times 12/66$  و  $10^{-12}$  - باشد، که به مقاومت بالاتر در برابر نفوذ یون کلرید اشاره دارد. علت کاهش مقادیر ضریب مهاجرت یون کلرید در نمونه M۱ می‌تواند به واسطه کاهش تخلخل و بهبود ریزساختار ماتریس سیمانی با کمک مکانیزم‌های پرکنندگی، کانون‌های هسته‌زایی و خاصیت پوزولانی نانوسیلیس باشد [۳۷ و ۳۹ و ۴۲].

در نمونه حاوی الیاف پلی‌پروپیلن به تنهایی (M۳) نیز ضریب مهاجرت یون کلرید در مقایسه با نمونه شاهد کاهش یافته است. علت این موضوع می‌تواند به واسطه کنترل ترک‌های پلاستیک و در نتیجه کاهش تخلخل ماتریس سیمانی باشد [۴۷]؛ در نتیجه یون‌های کلرید کمتری قادر به نفوذ در نمونه حاوی میکروالیاف پلی‌پروپیلن می-



شکل ۱۱: روابط بین مقدار جذب موبینه، جذر زمان، و خطوط برازش دو مرحله‌ای: (الف) ۲۸ روزه و (ب) ۹۰ روزه.



شکل ۱۲: ضریب مهاجرت یون کلراید نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

علاوه بر این، جدول (۸) مقادیر عمق نفوذ یون کلراید اندازه‌گیری شده در طرح مخلوط‌های ساخته شده در سنین ۲۸ و ۹۰ روز را لیست می‌کند و همچنین شکل (۱۳) پروفیل فیزیکی نفوذ یون کلراید در ملات‌های سیمانی را نشان می‌دهد؛ که عمق نفوذ با خطوط سفید نشان داده شده است. مطابق نتایج ارائه شده در جدول (۸)، کاهش قابل توجه عمق نفوذ یون کلراید را می‌توان برای نمونه M1 در مقایسه با نمونه شاهد در هر دو سن ۲۸ و ۹۰ روزه را مشاهده کرد. از سویی افزایش عمق نفوذ یون کلراید در نمونه‌های M2 و M4 در مقایسه با نمونه شاهد مشهود است. شایان ذکر است که در نمونه M5 نیز واضح می‌باشد که جایگزینی سیمان با ۲ درصد نانوسیلیس و افزودن ۱ درصد حجمی میکروالیاف فولادی و ۰/۲ درصد حجمی میکروالیاف پلی‌پروپیلن منجر به کاهش عمق نفوذ یون کلراید تا ۱۴/۲ میلی‌متر در سن ۹۰ روزه شده است.

جدول ۸: عمق نفوذ یون کلراید نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

| کد طرح  | سن عمل‌آوری   |               |
|---------|---------------|---------------|
|         | ۲۸ روز        | ۹۰ روز        |
| Control | ۳۴/۶ میلی‌متر | ۳۳/۶ میلی‌متر |
| M1      | ۱۸/۵ میلی‌متر | ۱۵/۰ میلی‌متر |
| M2      | ۳۵/۶ میلی‌متر | ۳۴/۹ میلی‌متر |
| M3      | ۲۶/۷ میلی‌متر | ۲۴/۴ میلی‌متر |
| M4      | ۲۸/۰ میلی‌متر | ۲۵/۹ میلی‌متر |
| M5      | ۱۸/۷ میلی‌متر | ۱۴/۲ میلی‌متر |

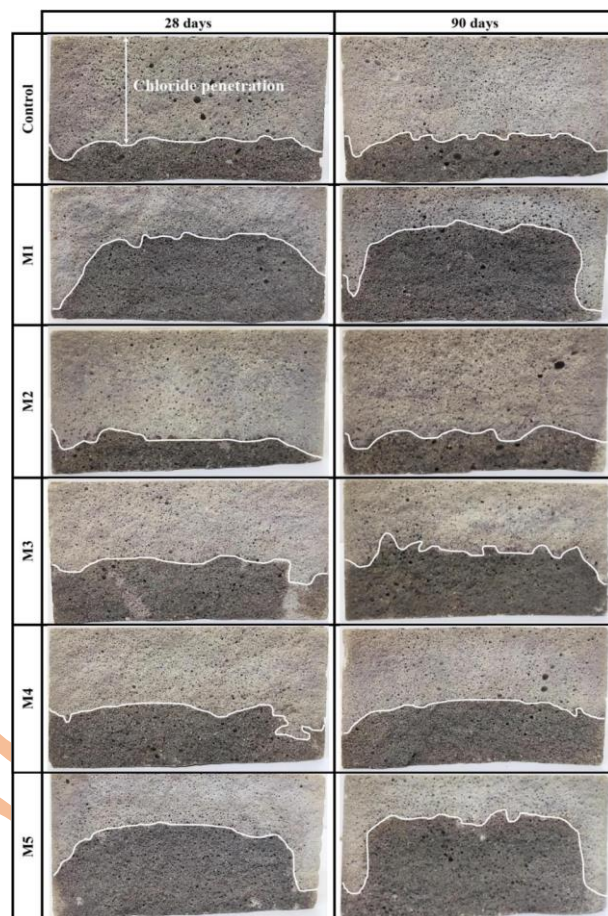
باشند. در مقابل مقادیر ضریب مهاجرت یون کلراید در نمونه حاوی الیاف فولادی به تنهایی (M2) و حالت هیبریدی میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن (M4) افزایش قابل توجهی در مقایسه با نمونه شاهد داشته است. علت این موضوع به حضور مؤلفه رسانایی همچون الیاف فولادی در کامپوزیت سیمانی‌های مذکور نسبت داده می‌شود؛ که به‌نوبه خود منجر به عبور جریان الکتریکی بیشتر از نمونه‌های مذکور در حین آزمایش RCMT خواهد شد [۲۶]. اساساً در آزمایش‌های تسریع شده نفوذ یون کلراید، مقدار کل جریان عبوری از یک نمونه اشباع شده تحت اختلاف ولتاژ مشخص در طی یک مدت زمان مشخص تحت اثر یک میدان الکتریکی اندازه‌گیری می‌شود. فرض بر این است که عبور جریان از نمونه و از طریق محلول منفذی بتن که به عنوان الکترولیت عمل می‌کند، صورت می‌گیرد. با توجه به اینکه مقدار و پیوستگی منافذ نمونه‌های بتنی روی عبور یون‌ها و در نتیجه مقدار جریان عبوری تأثیرگذار می‌باشند، انتظار می‌رود که نمونه‌های متخلخل با منافذ پیوسته دارای جریان عبوری زیاد و نمونه‌های با تخلخل و پیوستگی منافذ کم دارای جریان عبوری کم باشند. حال حضور یک مؤلفه رسانا نیز در کامپوزیت سیمانی تحت آزمایش منجر به تشدید عبور جریان الکتریکی از نمونه خواهد شد. لذا بر همین اساس مقادیر به‌دست آمده برای ضریب مهاجرت مربوط به نمونه M2 بیشتر از نمونه M3 است، و روند معکوسی در مقایسه با نتایج نرخ جذب آب منتج شده است.

در ارتباط با نمونه حاوی اثر توأمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و میکروالیاف پلی‌پروپیلن (M5) می‌توان مشاهده کرد که حضور میکروالیاف فولادی در این طرح مخلوط منجر به افزایش ضریب مهاجرت یون کلراید شده و در مقابل حضور نانوسیلیس و همینطور میکروالیاف پلی‌پروپیلن منجر به کاهش ضریب مهاجرت یون کلراید می‌شوند. لذا با توجه به مقادیر به‌دست آمده در نمونه M5 در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه و مقایسه با نمونه‌های حاوی نانوذرات سیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به تنهایی، می‌توان پی برد که نانوذرات سیلیس و میکروالیاف پلی‌پروپیلن می‌توانند اثر منفی میکروالیاف فولادی بر مقادیر ضریب مهاجرت یون کلراید را خنثی نموده و نهایتاً منجر به حصول مقادیر ضریب مهاجرت یون کلراید کمتر از نمونه شاهد در نمونه M5 شوند.

و ۹۰ روزه است. همچنین نتایج مربوط به آزمایش RCMT نیز نشان‌دهنده افزایش مقاومت در برابر نفوذ یون کلرید و همینطور کاهش عمق نفوذ یون کلرید در کامپوزیت سیمانی M۵ بود. به‌نحوی- که ترکیب همزمان ۲ درصد نانوسیلیس، ۱ درصد میکروالیاف فولادی و ۰/۲ درصد میکروالیاف پلی‌پروپیلن در کامپوزیت سیمانی ۹۰ روزه موجب کاهش عمق نفوذ یون کلرید از ۳۳/۶ میلی‌متر (در نمونه شاهد) به ۱۴/۲ میلی‌متر (در نمونه M۵) شده است.

۳- بهبود خواص مکانیکی، نفوذپذیری و دوام در برابر کلرید کامپوزیت سیمانی در هنگام استفاده همزمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن می‌تواند به‌واسطه مجموعه‌ای از مکانیزم‌های عملکردی مواد مذکور باشد. در واقع اثر پرکنندگی، کانون‌های هسته-زایی و فعالیت پوزولانی نانوذرات سیلیس می‌تواند به کاهش تخلخل و بهبود ریزساختار ماتریس سیمانی کمک شایانی نماید. از طرفی میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن نیز به موجب اثر مسلح‌کنندگی و کنترل میکروترک‌های موجود در ماتریس سیمانی مانع از گسترش ماکروترک‌ها و شکست ترد در کامپوزیت سیمانی می‌شوند. افزون بر این، اثر کنترل ترک‌های ناشی از جمع‌شدگی پلاستیک در ساعات اولیه گیرش و ترک‌های ثانویه یا حرارتی به‌واسطه اثر پل‌زدگی الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن نیز می‌تواند در بهبود مشخصات ملات سیمانی ایفای نقش نماید.

۴- استفاده از نانوذرات سیلیس به تنهایی می‌تواند عملکرد قابل توجهی در کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام کامپوزیت‌های سیمانی را داشته باشد. از سویی به‌کارگیری میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن به صورت منفرد می‌تواند تنها نقش برجسته‌ای در بهبود خواص مکانیکی داشته باشند. با این تفاسیر استفاده همزمان نانوذرات سیلیس و میکروالیاف‌های فولادی و پلی‌پروپیلن نه تنها منجر به بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌های سیمانی خواهد شد بلکه کاهش نفوذپذیری و بهبود دوام در برابر تهاجم کلریدی را به صورت همزمان منجر خواهد شد. لذا در جمع‌بندی نهایی می‌توان چنین بیان کرد استفاده از ترکیب توأمان نانوذرات سیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن، در کامپوزیت‌های سیمانی در مقایسه با استفاده مجزای آن‌ها می‌تواند بهبود چندگانه خصوصیات مختلف کامپوزیت‌های سیمانی را به ارمغان آورد.



شکل ۱۳: پروفیل فیزیکی نفوذ یون کلرید در نمونه‌های کامپوزیت سیمانی.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش اثر ترکیبی نانوذرات سیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بر مشخصات مکانیکی، نفوذپذیری و تهاجم کلریدی کامپوزیت سیمانی مورد بررسی قرار گرفت، که مهم‌ترین نتایج آن به شرح زیر است:

۱- حضور همزمان نانوسیلیس، میکروالیاف فولادی و پلی‌پروپیلن در طرح مخلوط کامپوزیت سیمانی منجر به بهبود مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، چقرمگی خمشی، مقاومت کششی و سرعت پالس فراصوت آن شد.

۲- بررسی نتایج نرخ جذب آب مویینه به عنوان شاخصی مهم در بحث نفوذپذیری کامپوزیت سیمانی، نشان داد که کمترین مقدار نرخ جذب آب اولیه و ثانویه متعلق به نمونه حاوی ترکیب توأمان نانوسیلیس، الیاف فولادی و الیاف پلی‌پروپیلن (M۵) در سنین ۲۸

- [۱۱] S. Chithra, S. S. Kumar, and K. Chinnaraju, "The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate," *Construction and Building Materials*, vol. ۱۱۳, pp. ۷۹۴-۸۰۴, ۲۰۱۶, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.119>.
- [۱۲] B. Han, X. Yu, and J. Ou, *Self-sensing concrete in smart structures*, 1st ed. Butterworth-Heinemann (Elsevier), ۲۰۱۴, p. ۳۹۸.
- [۱۳] Ş. Yazıcı, G. İnan, and V. Tabak, "Effect of aspect ratio and volume fraction of steel fiber on the mechanical properties of SFRC," *Construction and Building Materials*, vol. ۲۱, no. ۶, pp. ۱۲۵۰-۱۲۵۳, ۲۰۰۷, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.05.025>.
- [۱۴] K. Behfarnia and A. Behravan, "Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels," *Materials & Design*, vol. ۵۵, pp. ۲۷۴-۲۷۹, ۲۰۱۴, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.075>.
- [۱۵] H. A. Toutanji, "Properties of polypropylene fiber reinforced silica fume expansive-cement concrete," *Construction and Building Materials*, vol. ۱۳, no. ۴, pp. ۱۷۱-۱۷۷, ۱۹۹۹, doi: [https://doi.org/10.1016/S0950-0618\(99\)0027-6](https://doi.org/10.1016/S0950-0618(99)0027-6).
- [۱۶] J. Wang, Q. Dai, R. Si, and S. Guo, "Mechanical, durability, and microstructural properties of macro synthetic polypropylene (PP) fiber-reinforced rubber concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. ۲۳۴, pp. ۱۳۵۱-۱۳۶۴, ۲۰۱۹, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.272>.
- [۱۷] S. Kakooei, H. M. Akil, A. Dolati, and J. Rouhi, "The corrosion investigation of rebar embedded in the fibers reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. ۳۵, pp. ۵۶۴-۵۷۰, ۲۰۱۲, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.051>.
- [۱۸] H. G. Wheat, "Using polymers to minimize corrosion of steel in concrete," *Cement and Concrete Composites*, vol. ۲۴, no. ۱, pp. ۱۱۹-۱۲۶, ۲۰۰۲, doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)0032-4](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)0032-4).
- [۱۹] T. Söylev and T. Özturan, "Durability, physical and mechanical properties of fiber-reinforced concretes at low-volume fraction," *Construction and Building Materials*, vol. ۷۳, pp. ۶۷-۷۵, ۲۰۱۴, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.058>.
- [۲۰] *ASTM C778-13, Standard Specification for Standard Sand*, ASTM International, West Conshohocken, PA, ۲۰۱۳. doi: 10.1520/C0778-21.
- [۲۱] *ASTM C494/C494M-16, Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. doi: 10.1520/C0494M-19E01.
- [۱] P. K. Mehta and P. J. Monteiro, *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education, ۲۰۱۴. doi: 10.1036/0071462899.
- [۲] S. Zhao and W. Sun, "Nano-mechanical behavior of a green ultra-high performance concrete," *Construction and Building Materials*, vol. ۶۳, pp. ۱۵۰-۱۶۰, ۲۰۱۴, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.029>.
- [۳] C. Wang, C. Yang, F. Liu, C. Wan, and X. Pu, "Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials," *Cement and concrete composites*, vol. ۳۴, no. ۴, pp. ۵۳۸-۵۴۴, ۲۰۱۲, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.11.005>.
- [۴] J. Massana, E. Reyes, J. Bernal, N. León, and E. Sánchez-Espinosa, "Influence of nano-and micro-silica additions on the durability of a high-performance self-compacting concrete," *Construction and Building Materials*, vol. ۱۶۵, pp. ۹۳-۱۰۳, ۲۰۱۸, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.100>.
- [۵] A. Shekari and M. S. Razzaghi, "Influence of nano particles on durability and mechanical properties of high performance concrete," *Procedia Engineering*, vol. ۱۴, pp. ۳۰۳۶-۳۰۴۱, ۲۰۱۱, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.382>.
- [۶] H. Du, S. Du, and X. Liu, "Durability performances of concrete with nano-silica," *Construction and building materials*, vol. ۷۳, pp. ۷۰۵-۷۱۲, ۲۰۱۴, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.014>.
- [۷] M. H. Beigi, J. Berenjian, O. L. Omran, A. S. Nik, and I. M. Nikbin, "An experimental survey on combined effects of fibers and nanosilica on the mechanical, rheological, and durability properties of self-compacting concrete," *Materials & Design*, vol. ۵۰, pp. ۱۰۱۹-۱۰۲۹, ۲۰۱۳, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.03.046>.
- [۸] Y. Rashidi, A. H. Korayem, S. Farsi, and J. Sadeghi, "Utilizing halloysite nanotube to enhance the properties of cement mortar subjected to freeze-thaw cycles," *Journal of Building Engineering*, p. ۱۰۶۸۳۲, ۲۰۲۳, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106832>.
- [۹] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, "Nanotechnology: Advantages and drawbacks in the field of construction and building materials," *Construction and building materials*, vol. ۲۵, no. ۲, pp. ۵۸۲-۵۹۰, ۲۰۱۱, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.07.009>.
- [۱۰] M. I. Khan, "Nanosilica/silica fume," in *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*: Elsevier, ۲۰۱۸, pp. ۴۶۱-۴۹۱. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-1۰۲۱۵۶-۹,۰۰۱۴-۶>.



- International, West Conshohocken, PA, 2014.* doi: 10.1520/C349-18.
- [33] ASTM C 496/C 496M-04, *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. doi: 10.1520/C0496-C0496M-17.
- [34] ASTM C597-16, *Standard Test Method for Pulse Velocity through Concrete*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. doi: 10.1520/C0597-16.
- [35] ASTM C 1585-04, *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. doi: 10.1520/C1585-20.
- [36] NT. BUILD 492, *Chloride Migration Coefficient from Non-steady-state Migration Experiments*, Nordtest, Finland, 1999.
- [37] M. Zahedi, A. A. Ramezani-pour, and A. M. Ramezani-pour, "Evaluation of the mechanical properties and durability of cement mortars containing nanosilica and rice husk ash under chloride ion penetration," *Construction and Building Materials*, vol. 78, pp. 354-361, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.045>.
- [38] M. A. M. Langaroudi and Y. Mohammadi, "Effect of nano-clay on workability, mechanical, and durability properties of self-consolidating concrete containing mineral admixtures," *Construction and building materials*, vol. 191, pp. 619-634, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.044>.
- [39] A. A. Ramezani-pour, M. Mortezaei, and S. Mirvalad, "Synergic effect of nano-silica and natural pozzolans on transport and mechanical properties of blended cement mortars," *Journal of Building Engineering*, vol. 44, p. 102667, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102667>.
- [40] D. Kong, S. Huang, D. Corr, Y. Yang, and S. P. Shah, "Whether do nano-particles act as nucleation sites for CSH gel growth during cement hydration?," *Cement and Concrete Composites*, vol. 87, pp. 98-109, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.007>.
- [41] V. B. Bosiljkov, "SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler," *Cement and Concrete Research*, vol. 33, no. 9, pp. 1279-1286, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)0013-9](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)0013-9).
- [42] A. M. Said, M. S. Zeidan, M. Bassuoni, and Y. Tian, "Properties of concrete incorporating nano-silica," *Construction and building materials*, vol. 36, pp. 838-844, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.044>.
- [43] P. Abhilash, D. K. Nayak, B. Sangoju, R. Kumar, and V. Kumar, "Effect of nano-silica on concrete; a review," *Construction and Building Materials*, vol. 278, p. 122347, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122347>.
- [44] H. Sujay, N. A. Nair, H. S. Rao, and V. Sairam, "Experimental study on durability characteristics of composite fiber reinforced high-performance concrete incorporating nanosilica and ultra fine fly ash," *Construction and Building Materials*, vol. 262, p. 120738, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120738>.
- [45] K. J. Folliard, D. Sutfin, R. Turner, and D. P. Whitney, "Fiber in continuously reinforced concrete pavements," 2006.
- [46] M. Khooshechin and J. Tanzadeh, "Experimental and mechanical performance of shotcrete made with nanomaterials and fiber reinforcement," *Construction and Building Materials*, vol. 165, pp. 199-205, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.199>.
- [47] V. Afroughsabet, L. Biolzi, and T. Ozbakkaloglu, "High-performance fiber-reinforced concrete: a review," *Journal of materials science*, vol. 51, pp. 6517-6551, 2016, doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-016-9917-4>.
- [48] ASTM C109 / C109M-16a, *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016. . doi: 10.1520/C0109-C0109M-21.
- [49] Y. Rashidi, M. R. R. Roudi, A. H. Korayem, and E. Shamsaei, "Investigation of ultrasonication energy effect on workability, mechanical properties and pore structure of halloysite nanotube reinforced cement mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 304, p. 124610, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124610>.
- [50] ASTM C230/C230M - 14, *Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. doi: 10.1520/C0230-C0230M-23.
- [51] ASTM C305-14, *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. doi: 10.1520/C0305-20.
- [52] ASTM C 511-03, *Standard Practice for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes*, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014. doi: 10.1520/C0511-21.
- [53] ASTM C348-14, *Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic Cement Mortars*, ASTM

- [۴۳] P. Song and S. Hwang, "Mechanical properties of high-strength steel fiber-reinforced concrete," *Construction and Building Materials*, vol. ۱۸, no. ۹, pp. ۶۶۹-۶۷۳, ۲۰۰۴, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.027>.
- [۴۴] L. Zhao *et al.*, "Mechanical behavior and toughening mechanism of polycarboxylate superplasticizer modified graphene oxide reinforced cement composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. ۱۱۳, pp. ۳۰۸-۳۱۶, ۲۰۱۷, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.01.056>.
- [۴۵] G. Ye, P. Lura, K. Van Breugel, and A. Fraaij, "Study on the development of the microstructure in cement-based materials by means of numerical simulation and ultrasonic pulse velocity measurement," *Cement and Concrete Composites*, vol. ۲۶, no. ۵, pp. ۴۹۱-۴۹۷, ۲۰۰۴, doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00081-7](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00081-7).
- [۴۶] E. A. Whitehurst, "Soniscope tests concrete structures," in *Journal Proceedings*, ۱۹۵۱, vol. ۴۷, no. ۲, pp. ۴۳۳-۴۴۴.
- [۴۷] O. Karahan and C. D. Atiş, "The durability properties of polypropylene fiber reinforced fly ash concrete," *Materials & Design*, vol. ۳۲, no. ۲, pp. ۱۰۴۴-۱۰۴۹, ۲۰۱۱, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.07.011>.

نشریه