

## مقاله پژوهشی

## مطالعه و بررسی آزمایشگاهی تاثیر تزریق پذیری دوغاب سیمان سوپر فاین به همراه نانو سیلیس افزودنی

بهنام بهنیا<sup>۱</sup>، علی عالی انوری<sup>۲\*</sup>، محمدحسن نظری<sup>۳</sup>

۱. دانشگاه کاشان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن، ایران، اصفهان، کاشان، behnambehnia1368@yahoo.com

۲. دانشگاه کاشان، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی معدن، ایران، اصفهان، کاشان، ali\_aalianvari@kashanu.ac.ir

۳. مشاور صنعتی (دکتری زمین‌شناسی مهندسی)، hassanrey@yahoo.com

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۱۵ - پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۰۹)

## چکیده

تزریق فرآیندی است که به وسیله آن ماده تزریق به داخل درز و شکافها و فضاهای متخلخل سنگها و خاک وارد شده و باعث بهبود ویژگی‌های فیزیکی، مقاومتی و کاهش نفوذپذیری تشکیلات می‌شود. در دو دهه گذشته کاربرد نانو ذرات در علوم مهندسی، پزشکی و نظایر آن بسیار قابل توجه بوده است. در سال‌های اخیر افزودن نانو ذرات سیلیس، آهن و نظایر آن به بتن، سیمان و کلیه مصالح ساختمانی به دلیل افزایش راندمان و بهبود پارامترهای مهم و اساسی در این صنعت بسیار رو به رشد بوده است. هدف از انجام این تحقیق، تزریق سیمان سوپر فاین به همراه نانو ذرات سیلیس افزودنی با نسبت‌های W/C مختلف در شرایط فشار تزریق یکسان، به وسیله سیلندر تزریق انجام گرفت. شبیه‌سازی محیط‌های سنگی شکسته، دارای تک درزه و یا یک شکاف به وسیله فیلتر تیغه‌ای با ابعاد ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ میکرون با سیلندر تزریق در شرایط آزمایشگاهی انجام گرفته است. نتایج حاصل از عملیات تزریق سیمان سوپر فاین به همراه نانو ذرات سیلیس بیانگر این موضوع است که بهترین و موثرترین عملیات تزریق مربوط به نسبت‌های ۱/۰/۷ و ۱/۱/۱، ۳/۱/۱ و ۳/۲/۱ W/C در فیلتر تیغه‌ای است.

## کلمات کلیدی

تزریق دوغاب، سیمان سوپر فاین، نانو سیلیس، نسبت اختلاط آب و سیمان، بازشدگی درزه.

## ۱- مقدمه

شرایط مناسب و بهبود خواص ماده می‌توان از نانو مواد در عملیات تزریق به دلیل بالا بردن مقاومت سیمان و نفوذ و گیرش بهتر و مناسب‌تر در درزه و شکاف‌های ایجاد شده در سنگ استفاده کرد [۱۰، ۱۱]. تاثیر ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ بر ویژگی‌های مهندسی سنگ به مراتب نقشی بیش از تاثیر ماده سنگ در این مورد دارد [۱۳]. در حال حاضر به‌طور گسترده برای تزریق در فضاهای سنگی سست و ناپایدار، برای جلوگیری از ریزش، نشت آب و رطوبت، از سیمان با تیپ و بلین‌های مختلف استفاده می‌شود [۶]. هدف از انجام این تحقیق بررسی، تجزیه و تحلیل تزریق سیمان سوپر فاین بلین بالا به همراه نانو سیلیس افزودنی با نسبت‌های W/C مختلف در شرایط فشار تزریق یکسان به وسیله سیلندر تزریق طراحی و ساخته شده و شبیه‌سازی محیط‌های سنگی خرد و شکسته شده و دارای درزه و شکاف و صفحات سست و ریزی به وسیله فیلتر تیغه‌ای با ابعاد ۴۰، ۵۰، ۶۰، ۸۰، ۱۰۰، ۱۵۰ میکرون در شرایط آزمایشگاهی بوده است و نتایج بدست آمده می‌تواند به عنوان یک مرجع برای ارزیابی و بهبود عملیات تزریق در محیط‌های سنگی و در پی آن افزایش مقاومت محیط از لحاظ فیزیکی و شیمیایی و آب‌بندی و جلوگیری از نشت به داخل و خارج سازه‌های عظیم روباز و زیرزمینی و ترمیم آن‌ها در فازهای مختلف شود و در نتیجه ثبات و ایمنی محیط را چند برابر کند.

## ۱-۱- مواد و روش کار

برای انجام این تحقیق از سیمان نوع پ-۵ یا سیمان پرتلند تیپ ۵، کارخانه سیمان دلیجان (شرکت سیمان عمران انارک) با استاندارد کشور ایران به شماره ISIRI389 و استاندارد اروپایی BS EN 196-1 استفاده شده است. انتخاب این نوع سیمان به دلیل مصرف بالا در صنعت سدسازی، تونل، پایه پل، اسکله، سازه‌های حساس و نظایر آن است. در جدول ۱ ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی سیمان مورد استفاده در آزمایش و در شکل ۱ نیز هیستوگرام توزیع ابعاد نمونه پودر سیمان پرتلند تیپ ۵ سوپر فاین آورده شده است.

جدول ۱- ترکیب شیمیایی و خواص فیزیکی نمونه سیمان پرتلند تیپ ۵.

عناصر تشکیل‌دهنده	مقدار موجود (درصد)
SiO <sub>2</sub>	۲۱٫۲۰
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴٫۰۹
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	۴٫۹۹
Cao	۶۳٫۵۹
Mgo	۱٫۱۴

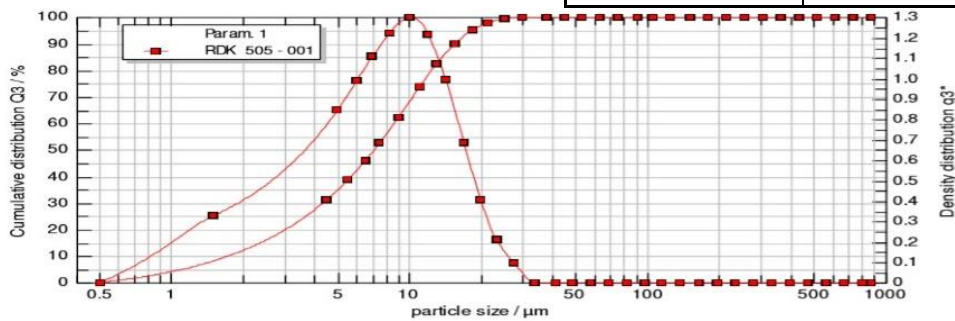
عملیات تزریق در یک بیان جامع مجموعه فرآیندها و اقداماتی را شامل می‌شود که طی آن سیال مورد تزریق که با عنوان کلی دوغاب معرفی می‌شود، از منبع آماده‌سازی با طی مسیری تحت عنوان خط جریان دوغاب وارد گمانه می‌شود و با عبور از آن به محیطی درون زمین تحت عنوان مقطع تزریق نفوذ می‌کند و معمولاً در مقطع مورد نظر جایگزین سیالات موجود شده و سخت می‌شود [۱، ۴]. با انجام عملیات تزریق، نفوذپذیری محیط کم شده و مقاومت کلی آن افزایش می‌یابد و در نتیجه تغییر شکل‌پذیری محیط کم می‌شود [۹]. چون بیشتر سنگ‌ها نفوذپذیری کمی دارند، رفتار هیدرولیکی توده سنگ فقط با الگوی درزه‌داری که دارای هدایت هیدرولیکی جهت‌داری‌اند، تامین می‌شود. در حالت کلی تزریق در محیط‌های سنگی به دو منظور بهبود مشخصه‌های ژئومکانیکی توده سنگ و کاهش نفوذپذیری محیط سنگی انجام می‌گیرد [۲].

در عملیات تزریق با توجه به نوع و مکان انجام عملیات تزریق، نوع ماده تزریق‌شونده می‌تواند شامل مواد معدنی و غیر معدنی، مواد قلیایی، سیلیکات‌ها، هیدرات‌ها، اپوکسی، پلی اورتان، انواع سیمان‌ها، چسب‌ها و نظایر آن باشد ولی از بین این مواد سیمان به دلیل فراوانی، قیمت تمام‌شده پایین، سازگار با محیط‌زیست بودن، مقاومت شیمیایی و فیزیکی مناسب، کارپذیری مناسب، امکان ایجاد دوغاب‌هایی با گستره دانه‌بندی بسیار وسیع و نظایر آن در اکثر پروژه‌های عملیاتی انجام تزریق در سنگ و محیط‌های خردشده و شکسته استفاده می‌شود [۸]. فناوری نانو، یا نانوتکنولوژی رشته‌ای از دانش کاربردی و فناوری است که جستارهای گسترده‌ای را پوشش می‌دهد. در سال‌های اخیر افزودن نانو ذرات سیلیس به بتن، سیمان و کلبه مصالح ساختمانی به دلیل افزایش راندمان و بهبود پارامترهای مهم و اساسی در این صنعت بسیار رو به رشد بوده است [۳]. از میان تمام نانو مواد، نانو سیلیکا به دلیل فراوانی، قیمت پایین، تولید و ساخت ساده‌ترین کاربرد را در سیمان، بتن و مصالح ساختمانی دارد [۱۲]. در سال‌های اخیر استفاده از مواد نانو در سیمان رشد روزافزونی داشته است. غالباً از نانو سیلیس کلوییدی با ابعاد بین ۵ تا ۱۰۰ نانومتر استفاده شده است. با توجه به این که سیلیس خالص استفاده می‌شود، بنابراین کاملاً بی‌ضرر و دوستدار محیط‌زیست است [۵]. عملکرد نانو ذرات سیلیکا مانند یک پرکننده نانو است که فضاهای خالی بین ژل کلسیم سیلیکات هیدراته را پر می‌کند [۷]. به دلیل ایجاد

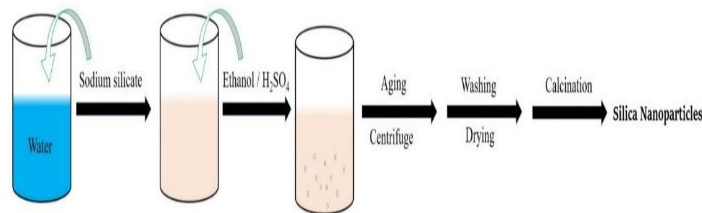
۱-۱-۱- روش سنتز نانو ذرات سیلیس (SiO<sub>2</sub>)

برای ساخت نانو ذرات سیلیس به روش سول- ژل ابتدا یک بشر ۵۰۰ میلی لیتر انتخاب شد سپس اسید سولفوریک و اتانول با نسبت یک به یک در بشر ریخته و توسط همزن مخلوط شد. در مرحله بعد ۵ گرم سدیم اورتو سیلیکات در ۶۰ میلی لیتر آب حل و محلول ساخته شده در مرحله اول که شامل اسید سولفوریک و اتانول بود به صورت قطره قطره به محلول سدیم اورتو سیلیکات و آب اضافه شد. بعد از سپری شدن ۴ ساعت محلول تولید شده به مدت ۳۰ دقیقه در دستگاه سانتریفیوژ با دور ۸۰۰۰ دور در دقیقه قرار داده شد و محلول جامد ته نشین شده به مدت ۱۰ ساعت در دمای ۶۰ درجه سانتی گراد قرار گرفت تا کاملا خشک شود. پودر حاصل به مدت ۲ ساعت در دمای ۵۰۰ درجه سانتی گراد در کوره گذاشته شد تا کلسینه شود و در نهایت پودر سفیدرنگ نانو سیلیکا تشکیل و برای تولید بیشتر جهت استفاده در مراحل آزمایش همین روش یاد شده در بالا انجام می گیرد. در شکل ۲ فرآیند مراحل ساخت نانو ذرات سیلیکا نشان داده شده است.

عناصر تشکیل دهنده	مقدار موجود (درصد)
So <sub>3</sub>	۱٫۹۸
K <sub>2</sub> O	۰٫۶۱
Na <sub>2</sub> O	۰٫۲۹
L.O.I.	۲٫۴۳
CL <sup>-</sup>	۰٫۰۲
I.R.	۰٫۳۲
SiM	۲٫۳۳
AIM	۰٫۸۲
L.S.F.	۹۲٫۳
C <sub>3</sub> S	۵۷٫۳
C <sub>2</sub> S	۱۸٫۰
C <sub>3</sub> A	۲٫۴
C <sub>4</sub> AF	۱۵٫۲
CaSO <sub>4</sub>	۳٫۴
وزن مخصوص	۳٫۱۵ (g/cm <sup>3</sup> )
رنگ	خاکستری
بلین سیمان	۶۵۰۰ (cm <sup>2</sup> /g)



شکل ۱- هیستوگرام توزیع ابعاد نمونه پودر سیمان پرتلند تیپ ۵ سوپر فاین.



شکل ۲- فرآیند مراحل ساخت نانو ذرات سیلیکا با استفاده از روش سول- ژل.

برای انجام آزمون تزریق پس از مطالعات و بررسی روش‌هایی که در گذشته انجام گرفته است، این تصمیم اتخاذ شد که این دستگاه به صورت ترکیبی از روش‌های پیشین ولی به صورت تکمیل یافته تر طراحی و ساخته شود. در شکل ۳ سیلندر تزریق و متعلقات آن نشان داده شده است.

۱-۱-۲- طراحی و ساخت سیلندر تزریق سیمان سوپر فاین به همراه نانو افزودنی ذرات سیلیس

پس از تولید نانو ذرات سیلیس و اختلاط آن با سیمان تیپ ۵ بلین بالا نیاز به انجام آزمون تزریق این نوع سیمان نانو افزودنی و عملکرد آن در شرایط آزمایشگاهی است. بنابراین

فاز آزمایشگاهی طبق شرایط جدول‌های ۲ و ۳ انجام گرفت. در کلیه آزمون‌ها جدول ۲ به صورت ثابت در نظر گرفته شده است



شکل ۴- فیلتر تیغه‌ای به همراه متعلقات.

برای انجام فرآیند عملیات تزریق بدین گونه عمل می‌شود که ابتدا نسبت W/C (نسبت آب به پودر سیمان) مشخص شده و بر اساس مقدار سیمان، نانو سیلیس و روان کننده فرکوپلاست به آب و سیمان اضافه می‌شود و با همزن طبق شرایط جدول ۲ به مدت ۴ دقیقه مخلوط می‌شود تا کاملاً تمامی مواد همگن شوند. در مرحله بعد دوغاب، داخل سیلندر تزریق ریخته شده و پیستون بر روی دوغاب قرار داده می‌شود و فلنج بالای دستگاه تزریق بسته و شیر کپسول هوا را باز می‌شود و فشار سیلندر به صورت دستی روی ۵ (Psi) تنظیم می‌شود. با باز کردن شیر خروجی سیلندر دوغاب سیمان از فیلتر گذشته و بر اساس زمان و وزن مقدار دوغاب خروجی از سیلندر و تیغه فیلتر شرایط استفاده از سیمان بلین بالا به همراه نانو ذرات سیلیس ارزیابی می‌شود.

جدول ۲- پارامترهای ثابت در هر مرحله از آزمایش.

پارامترهای ثابت در آزمایش	
سیمان	خاکستری
تیپ	۵
بلین	۶۵۰۰ (Cm <sub>2</sub> /gr)
نوع روان کننده	P10N
وزن مخصوص روان کننده	۱٫۱ (Kg/Lit) ۲۰c
مقدار مصرف روان کننده (نسبت به وزن سیمان)	۱ درصد
استاندارد آزمون قیف مارش	۲۶٫۴۵ (sec)
فشار	۵ (psi)
دما آب	۱۸ (c)
نوع نانو مواد	SiO <sub>2</sub>
مقدار مصرف نانو مواد (نسبت به وزن سیمان)	۲ درصد
ابعاد نانو مواد	۴۰ تا ۶۰ (nm)
سرعت همزن	۶۰۰۰ (rpm)
مدت زمان هم زدن	۴ (min)



شکل ۳- سیلندر تزریق به همراه متعلقات.

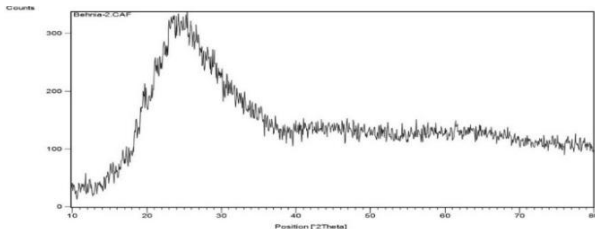
برای انجام و تکمیل عملیات تزریق با سیلندر تزریق، نیاز به فیلتر با ابعاد مختلف به صورت تیغه‌ای است که بتوان با آن شرایط محیط‌هایی به صورت تک درزه را شبیه‌سازی کرد. فیلتر تیغه‌ای به گونه‌ای طراحی شده است که قابلیت تغییر سایز از ۵ تا ۱۰۰۰ میکرون را دارد و این تغییر سایز به وسیله آچار فیلر انجام می‌گیرد. در شکل ۴ فیلتر تیغه‌ای که برای انجام آزمون با سیلندر تزریق طراحی و ساخته شده است آورده شده است.

پس از سنتز نانو ذرات سیلیس و اختلاط آن با سیمان سوپر فاین، طراحی و ساخت دستگاه تزریق، عملیات تزریق در

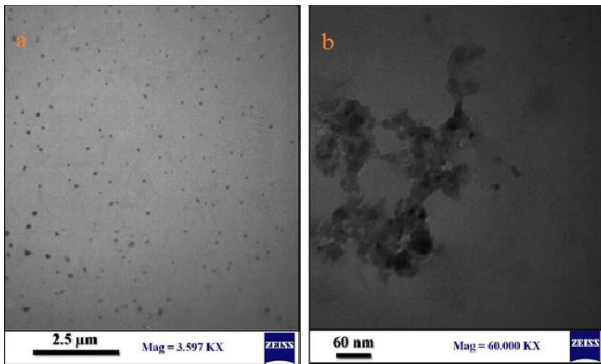
جدول ۳- شرایط انجام عملیات تزریق با فیلتر تیغه‌ای.

وزن مخصوص دوغاب (g/cm <sup>3</sup> )	آزمون ورقه لومباردی (g)	آزمون کیف مارش (sec)	سایز فیلتر (mic)	نوع فیلتر	وزن سیمان (g)	وزن آب (ml)	W/C	آزمایش
۱٫۶۰	۷٫۵	۳۳٫۶۴	۴۰	تیغه‌ای	۱۰۰۰	۷۰۰	۰٫۷/۱	a & a*
۱٫۲۱	۳	۲۸٫۲۷	۵۰	تیغه‌ای	۷۰۰	۱۰۰۰	۱/۰٫۷	b & b*
۱٫۳۸	۴	۲۹٫۲۹	۶۰	تیغه‌ای	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۱/۱	c & c*
۱٫۵۱	۱۱	۳۴٫۲۵	۸۰	تیغه‌ای	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۱/۱٫۵	d & d*
۱٫۲۲	۴	۲۸٫۳۱	۱۰۰	تیغه‌ای	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۱٫۵/۱	e & e*
۱٫۰۵	۲	۲۸٫۲۱	۱۵۰	تیغه‌ای	۱۰۰۰	۳۰۰۰	۳/۱	f & f*
۱٫۲۵	۳	۳۰٫۵۱	۲۰۰	تیغه‌ای	۲۰۰۰	۳۰۰۰	۳/۲	g & g*

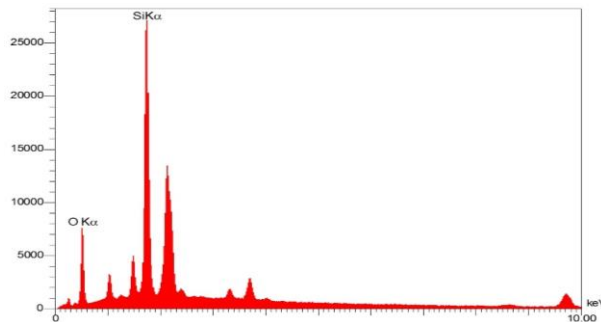
a & a\* آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۴۰ میکرون، b & b\* آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۵۰ میکرون، c & c\* آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۶۰ میکرون، d & d\* آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۸۰ میکرون، e & e\* آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۱۰۰ میکرون، f & f\* آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۱۵۰ میکرون، g & g\* آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۲۰۰ میکرون.



شکل ۵- نمودار XRD نمونه نانو ذرات سیلیکا تولیدشده در آزمایشگاه با استفاده از روش سول-ژل.



شکل ۶- تصویر TEM نمونه ذرات نانو سیلیس تولیدشده در آزمایشگاه با استفاده از روش سول-ژل.



شکل ۷- آزمون EDS نمونه ذرات نانو سیلیس تولیدشده در آزمایشگاه با استفاده از روش سول-ژل.

## ۲- بحث و بررسی

پس از سنتز نانو سیلیس، برای صحت آزمایش و تعیین اندازه و ابعاد نانو ذرات سیلیکا تولیدشده به روش سول-ژل آزمون‌های XRF, DLS, SEM, EDS, TEM, XRD بر روی نمونه انجام گرفت. از آزمون X-Ray Diffraction یا XRD برای تشخیص ساختار بلوری و تعیین فاز، ویژگی‌ها و ساختار کریستال نمونه نانو ذرات سیلیس تولیدشده استفاده شده است. در شکل ۵، آزمون XRD نمونه نانو ذرات سیلیکا تولیدشده، نشان داده شده است.

همان‌طور که از پراش نمودار XRD مشخص است پودر حاصل پس از فرآیند، سنتز نانو ذرات سیلیکا تولیدشده را نشان می‌دهد. از میکروسکوپ انتقال الکترونی<sup>۱</sup> برای مشاهده با وضوح بالاتر نانو ذرات سیلیس تولیدشده استفاده شده است. در شکل ۶، آزمون TEM نمونه نانو ذرات سیلیکا تولیدشده نشان داده شده است.

نانو ذرات سیلیس با بزرگنمایی ۲/۵ میکرومتر در تصویر a از شکل ۶ آورده شده است و در تصویر b از شکل ۶، نانو ذرات سیلیس که به صورت صفحه‌ای تشکیل شده با بزرگنمایی ۶۰ نانومتر نشان داده شده است. از روش طیف‌سنجی پراش انرژی پرتو ایکس (EDS یا EDX) که یک روش تحلیلی است برای تجزیه و تحلیل ساختاری یا تشخیص ویژگی‌های شیمیایی نمونه نانو سیلیکا استفاده شده است. در شکل ۷، آزمون EDS نمونه نانو ذرات سیلیکا تولید شده نشان داده شده است و بالاترین پراش انرژی مربوط به سیلیس است.

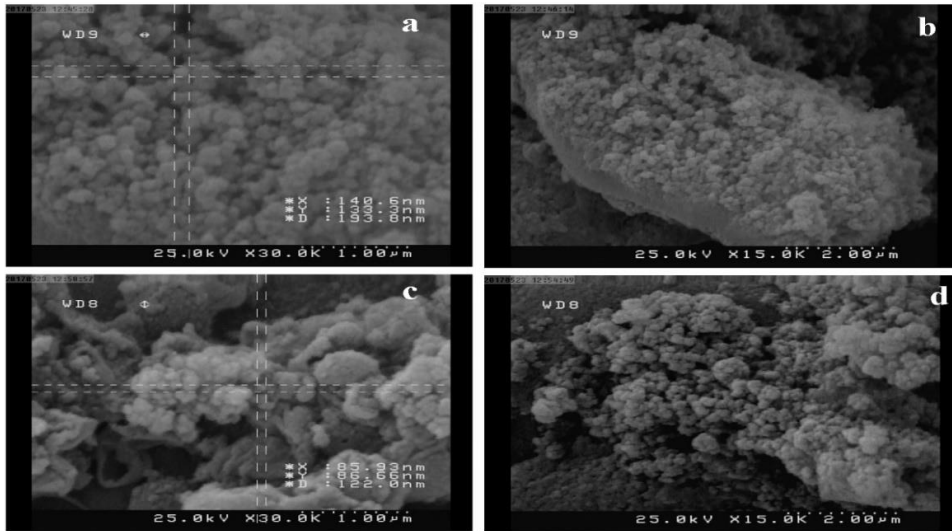
1-Transmission Electron Microscope (TEM)

موجود از نظر کیفی و کمی در نمونه نانو سیلیس تولید شده استفاده شده است. در جدول ۴ آزمون XRF نمونه نانو ذرات سیلیکا تولید شده نشان داده شده است و بالاترین درصد خلوص مربوط به عنصر سیلیس با ۹۹/۱۶ درصد است.

از روش پراکندگی نور دینامیکی یا DLS که روشی فیزیکی است برای تعیین توزیع ذرات نانو سیلیکا استفاده شده است. در شکل ۹، آزمون DLS نمونه نانو سیلیس تولید شده با استفاده از روش سول-ژل نشان داده شده است.

از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM که نوعی میکروسکوپ الکترونی است که قابلیت عکس برداری از سطوح با بزرگنمایی ۱۰ تا ۵۰۰۰۰۰ برابر با قدرت تفکیکی کمتر از ۱ تا ۲۰ نانومتر (بسته به نوع نمونه) را دارد در این آزمون استفاده شده است. در شکل ۸، تصویر SEM نمونه نانو ذرات سیلیکا تولید شده نشان داده شده است.

در تصاویر a و c از شکل ۸ ابعاد یک نانوذره سیلیس نشان داده شده است. از آنالیز XRF یا X-Ray Fluorescence (فلورسانس اشعه ایکس) برای آنالیز و شناسایی ترکیب عناصر



شکل ۸- تصویر SEM نمونه نانو ذرات سیلیکا تولید شده در آزمایشگاه با استفاده از روش سول-ژل.

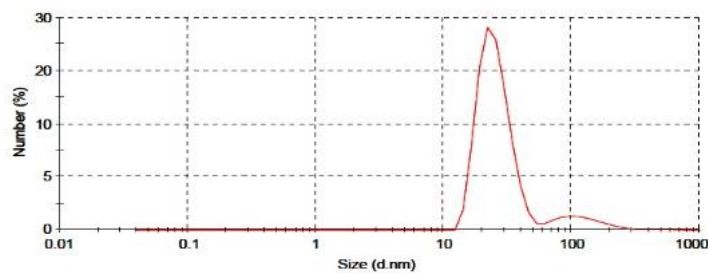
جدول ۴- آزمون XRF نمونه نانو ذرات سیلیکا تولید شده در آزمایشگاه با استفاده از روش سول-ژل.

Element (% Unit)	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	BaO	CaO	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	SO <sub>3</sub>
DL	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۵
Scheme	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01	WR-01
SI-1	۹۹/۱۶	۰/۲	۰/۴۱	۰/۰۵	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۱	۰/۰۱

Results

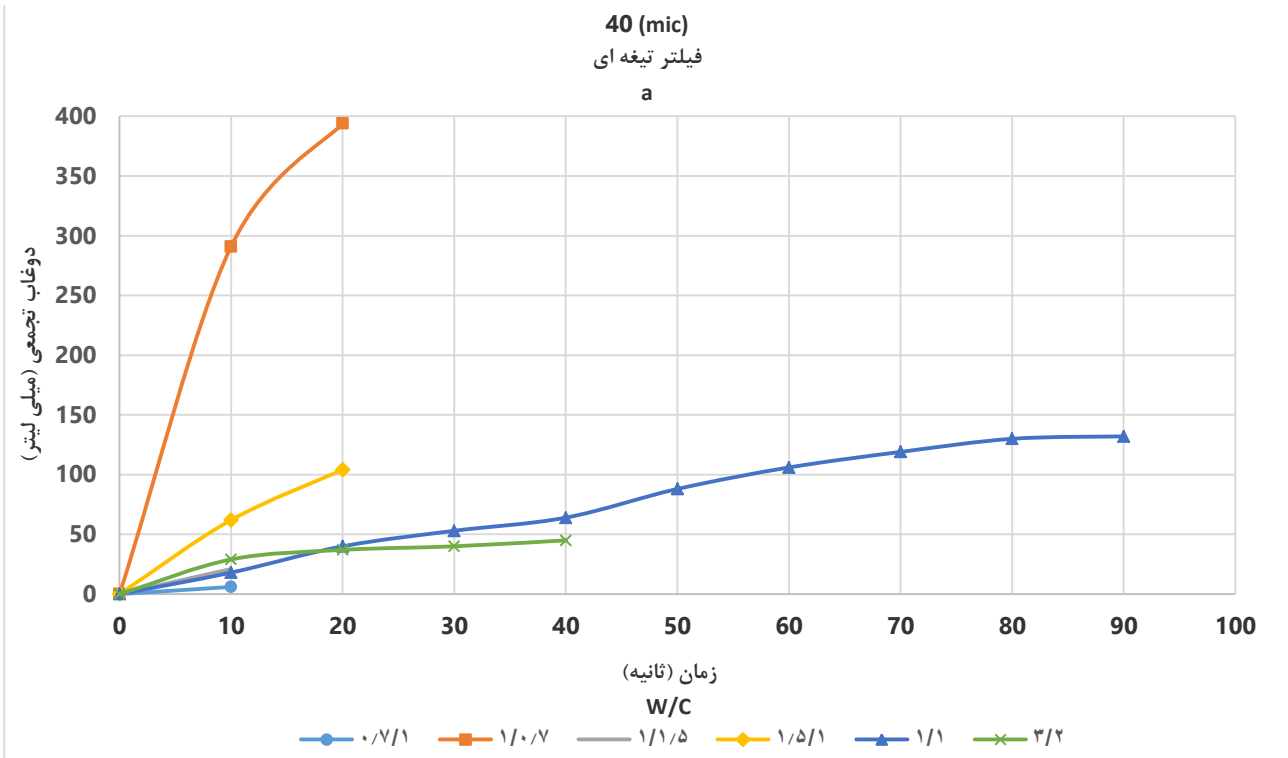
<b>Z-Average (d.nm):</b> 51.55	<b>Peak 1:</b> 25	<b>% Number:</b> 93.2	<b>Width (nm):</b> 36
<b>Pdl:</b> 0.418	<b>Peak 2:</b> 98.1	<b>% Number:</b> 7.8	<b>Width (nm):</b> 97.2
<b>Intercept:</b> 0.914			

Size Distribution by Number

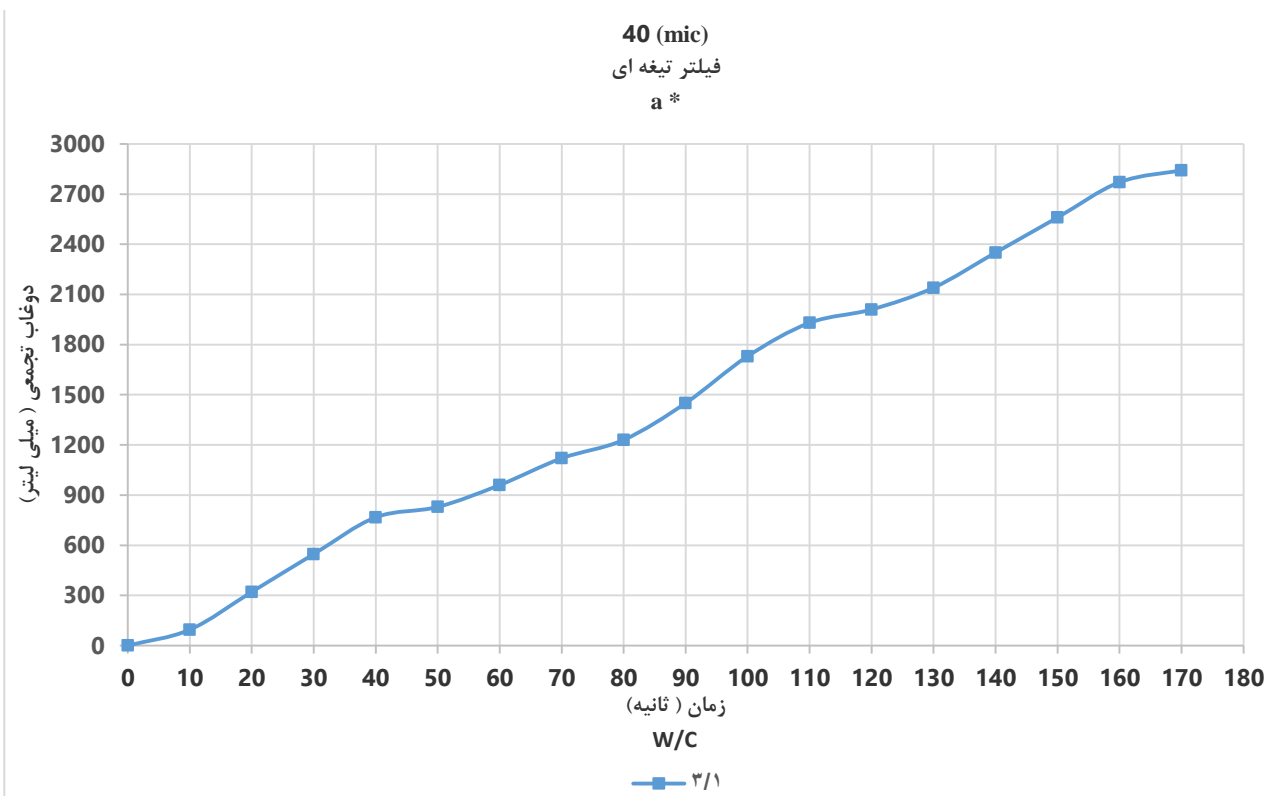


شکل ۹- آزمون DLS نمونه نانو سیلیس تولید شده در آزمایشگاه با استفاده از روش سول-ژل.

همان طور که در نمودار شکل ۹ مشاهده می شود، میانگین ابعاد نانو سیلیس تولید شده در آزمایشگاه تقریباً ۵۰ نانومتر است. پس از انجام عملیات تزریق با سیلندر تزریق نمودارهای زیر حاصل شد. در نمودار شکل های ۱۰ و ۱۱ آزمایش های a & a\*، فیلتر تیغه ای ۴۰ میکرون طبق جدول ۳ آورده شده است.

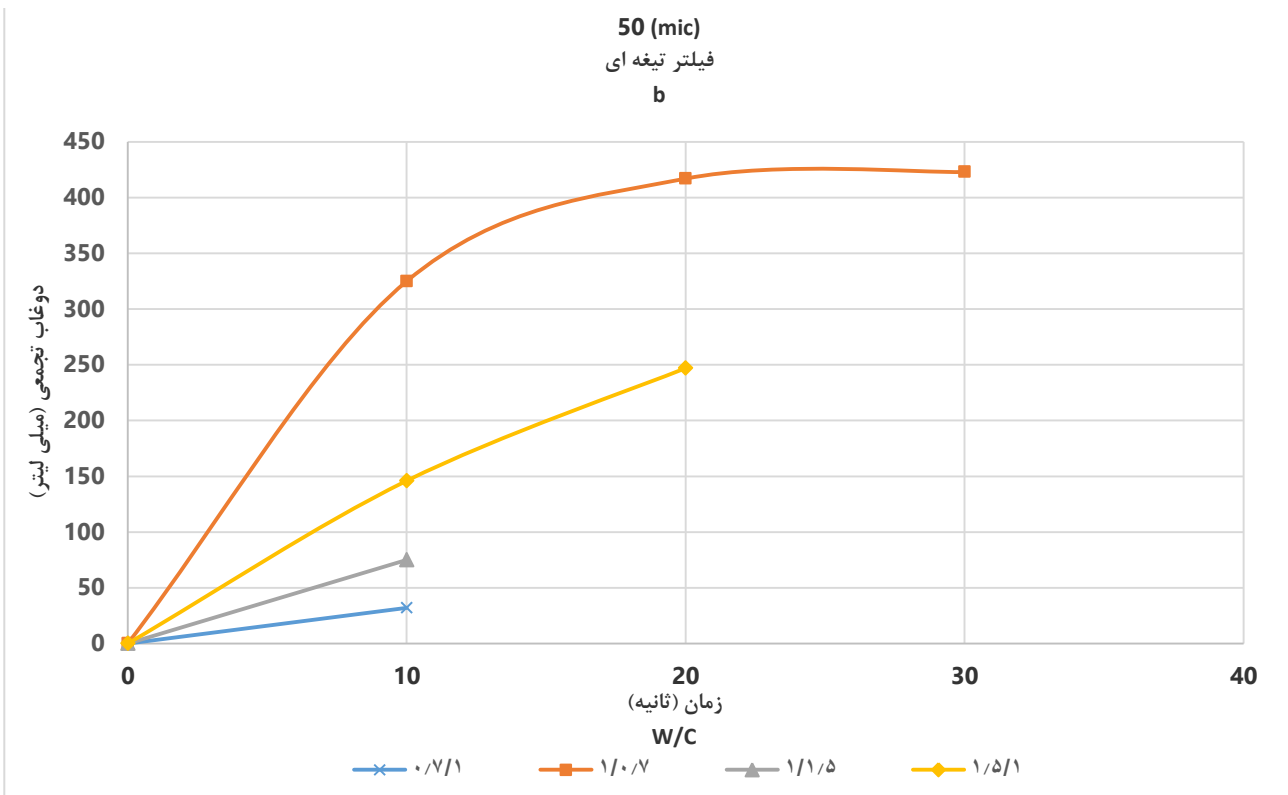


شکل ۱۰- آزمایش فیلتر تیغه ای ۴۰ میکرون.

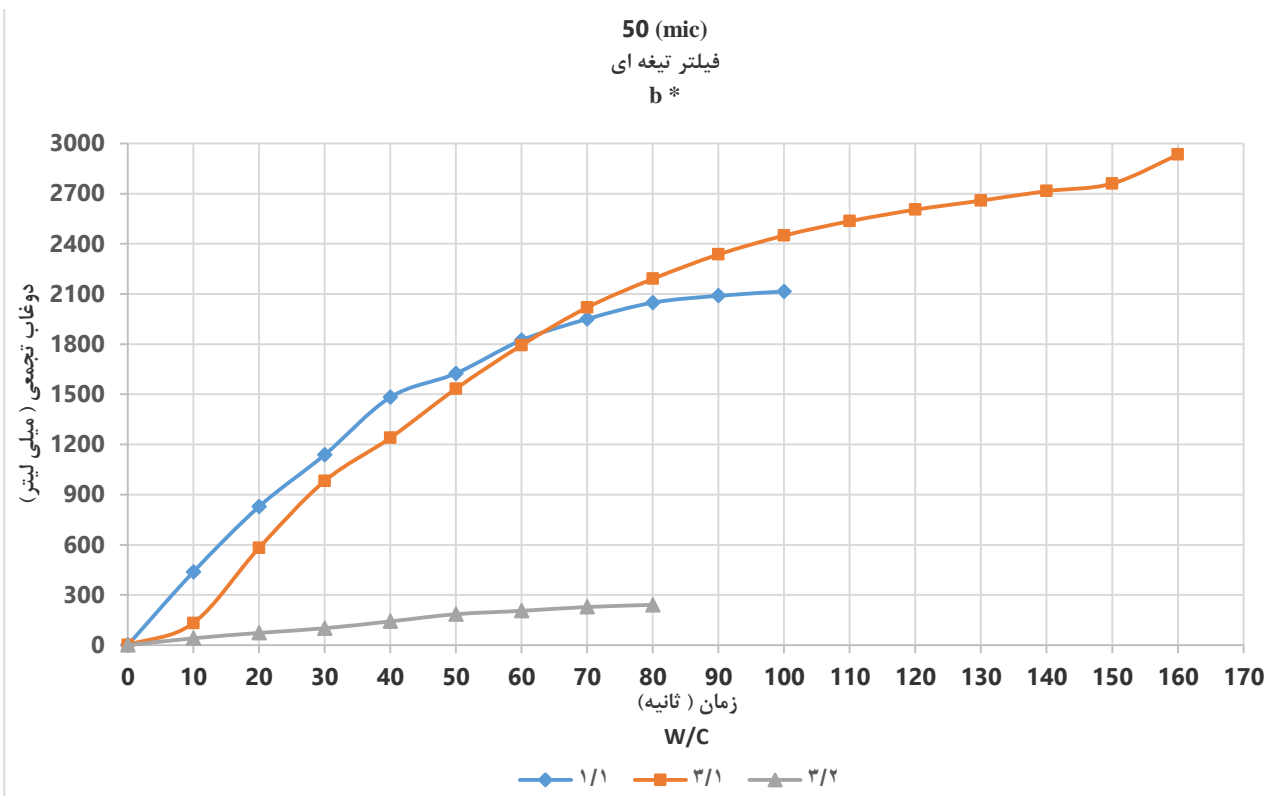


شکل ۱۱- آزمایش فیلتر تیغه ای ۴۰ میکرون.

در نمودار شکل‌های ۱۲ و ۱۳ آزمایش‌های b & b\* فیلتر تیغه‌ای ۵۰ میکرون طبق جدول ۳ آورده شده است.



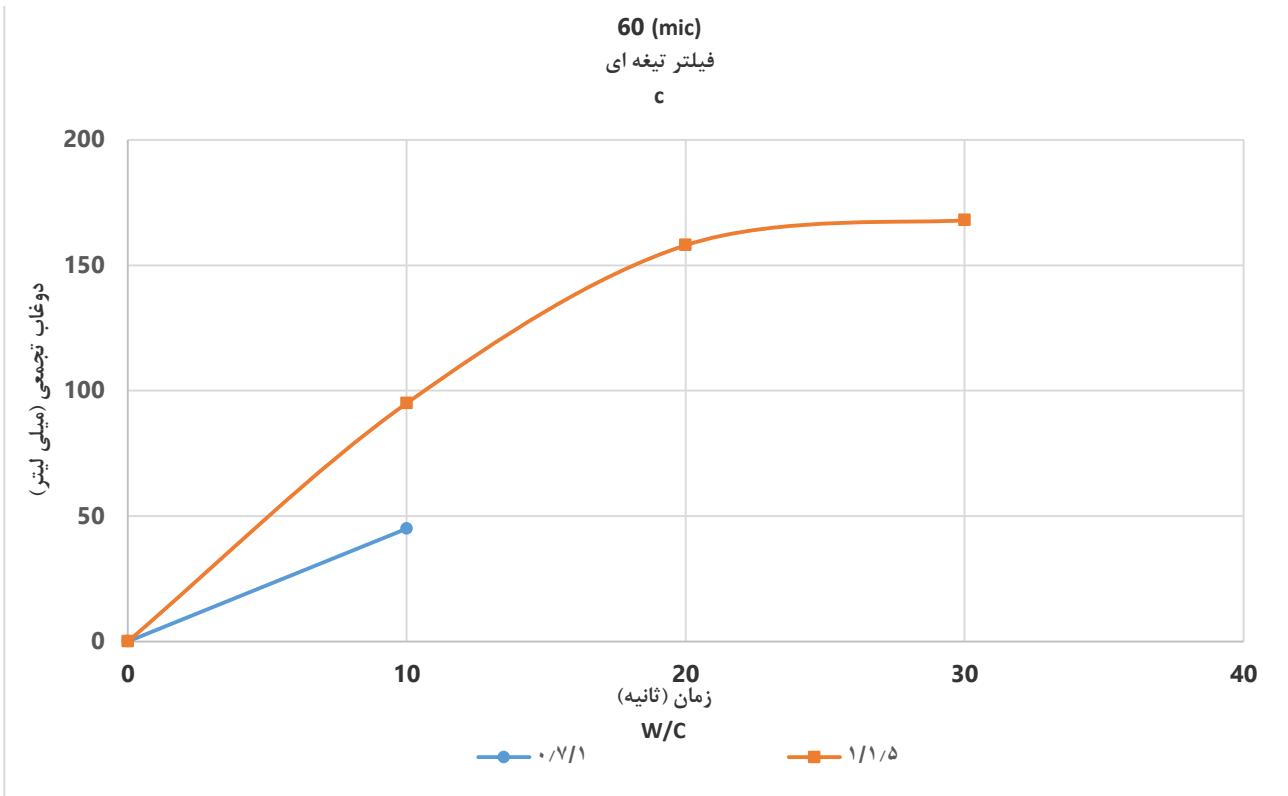
شکل ۱۲- آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۵۰ میکرون.



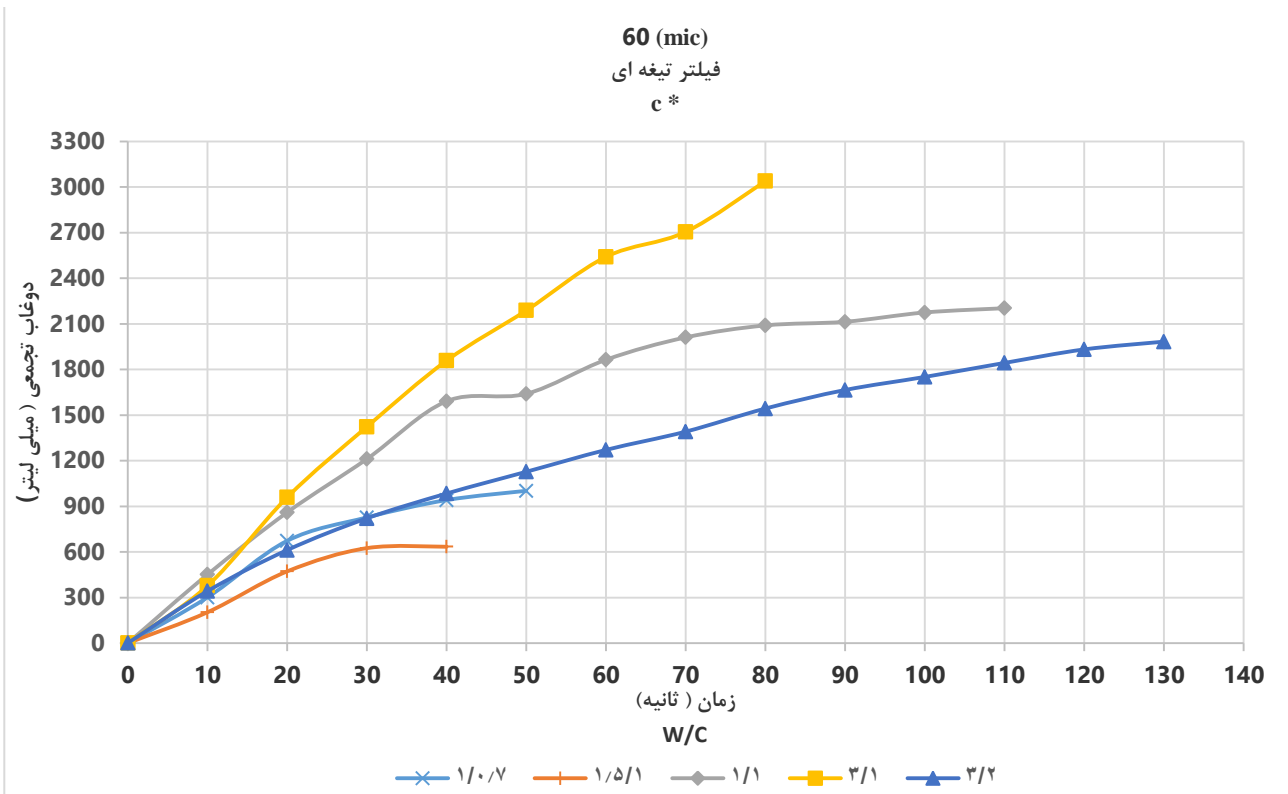
شکل ۱۳- آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۵۰ میکرون.



در نمودار شکل‌های ۱۴ و ۱۵ آزمایش‌های c & c\* فیلتر تیغه‌ای ۶۰ میکرون طبق جدول ۳ آورده شده است.

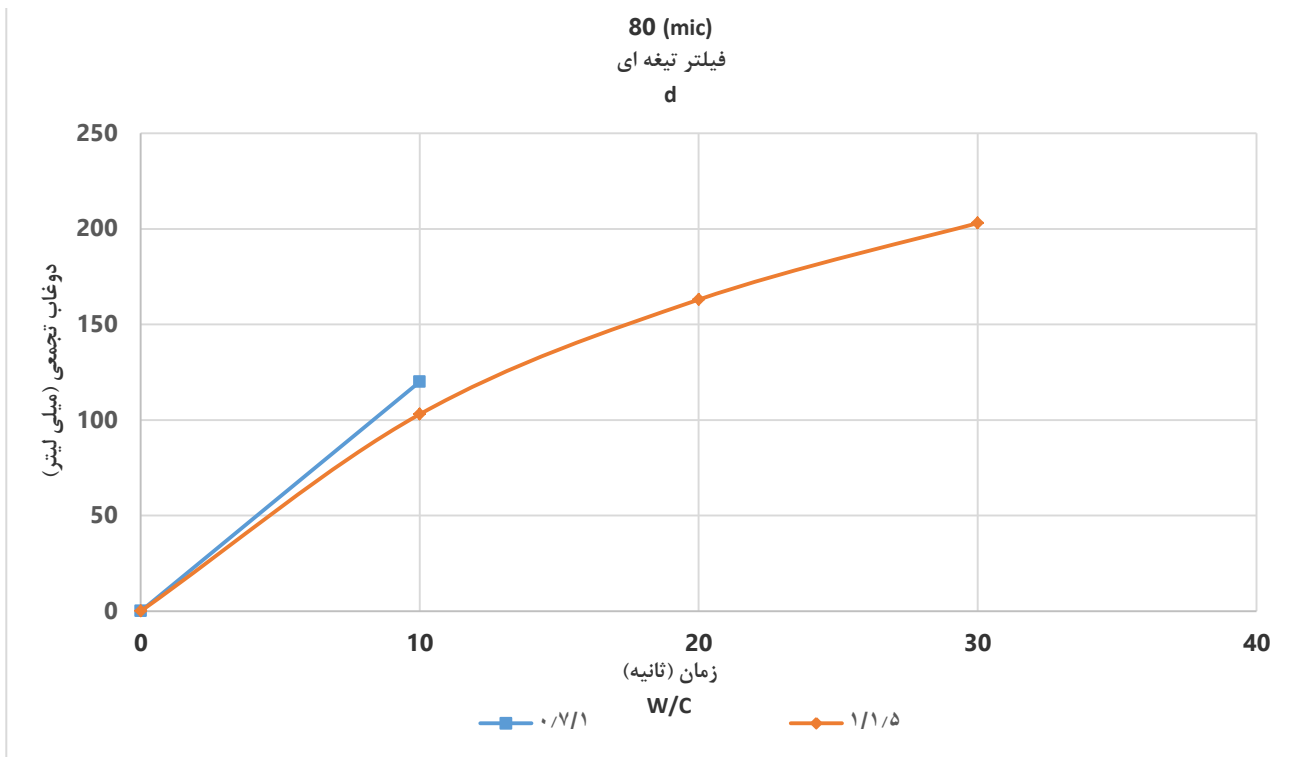


شکل ۱۴- آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۶۰ میکرون.

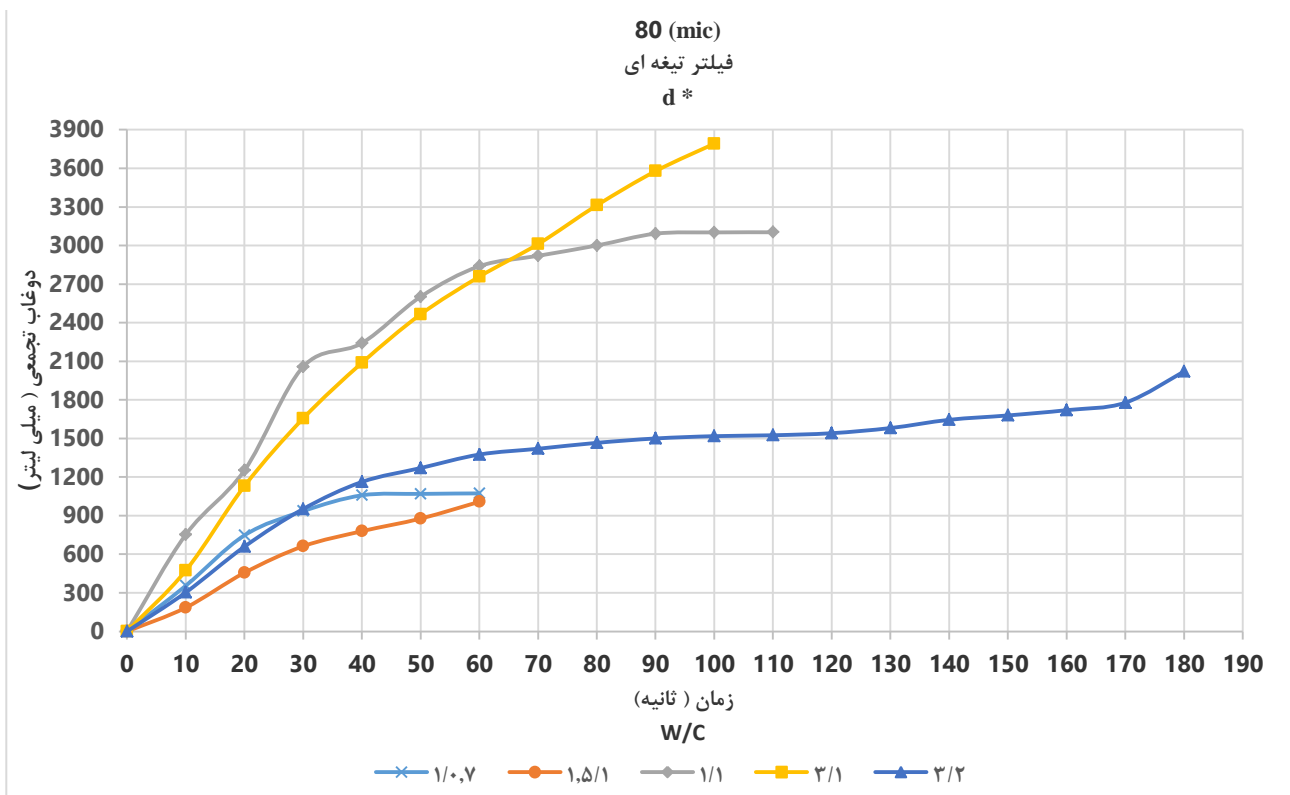


شکل ۱۵- آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۶۰ میکرون.

در نمودار شکل‌های ۱۶ و ۱۷ آزمایش‌های  $d$  و  $d^*$  فیلتر تیغه‌ای ۸۰ میکرون طبق جدول ۳ آورده شده است.

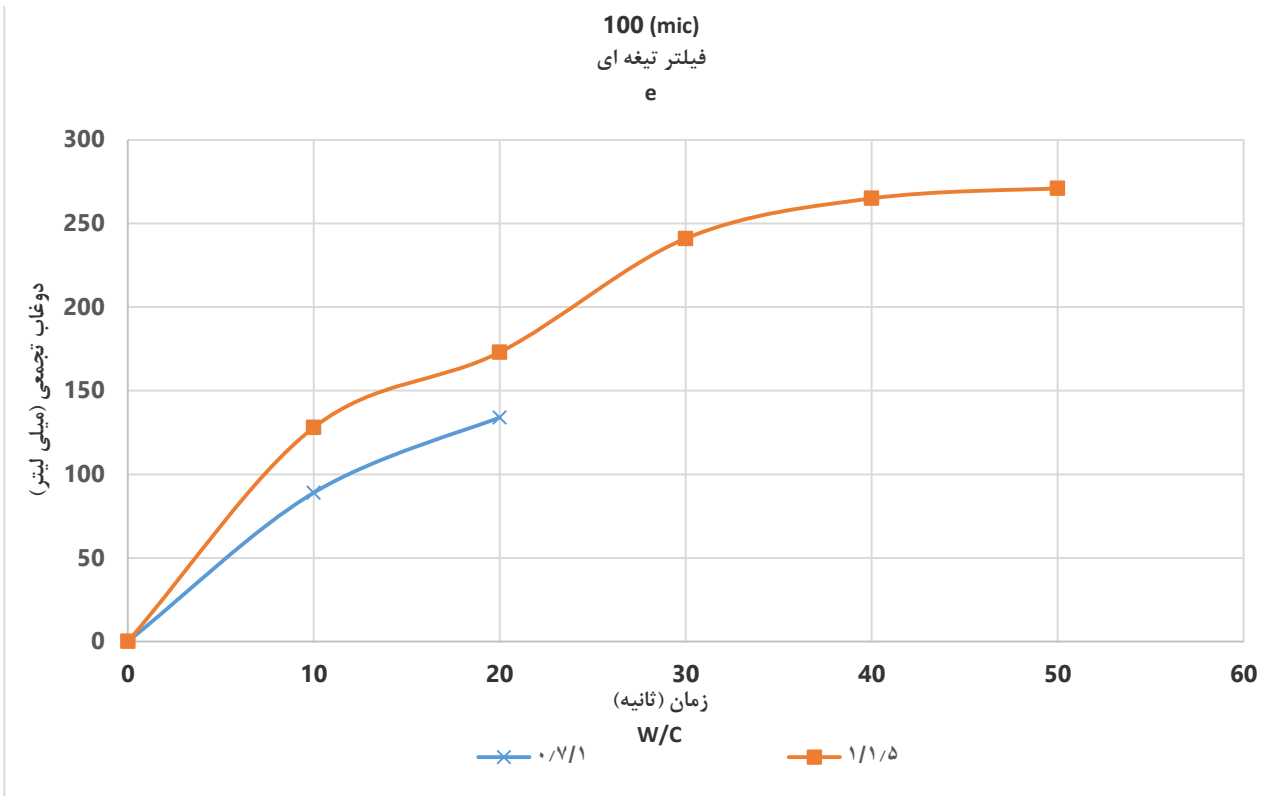


شکل ۱۶- آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۸۰ میکرون.

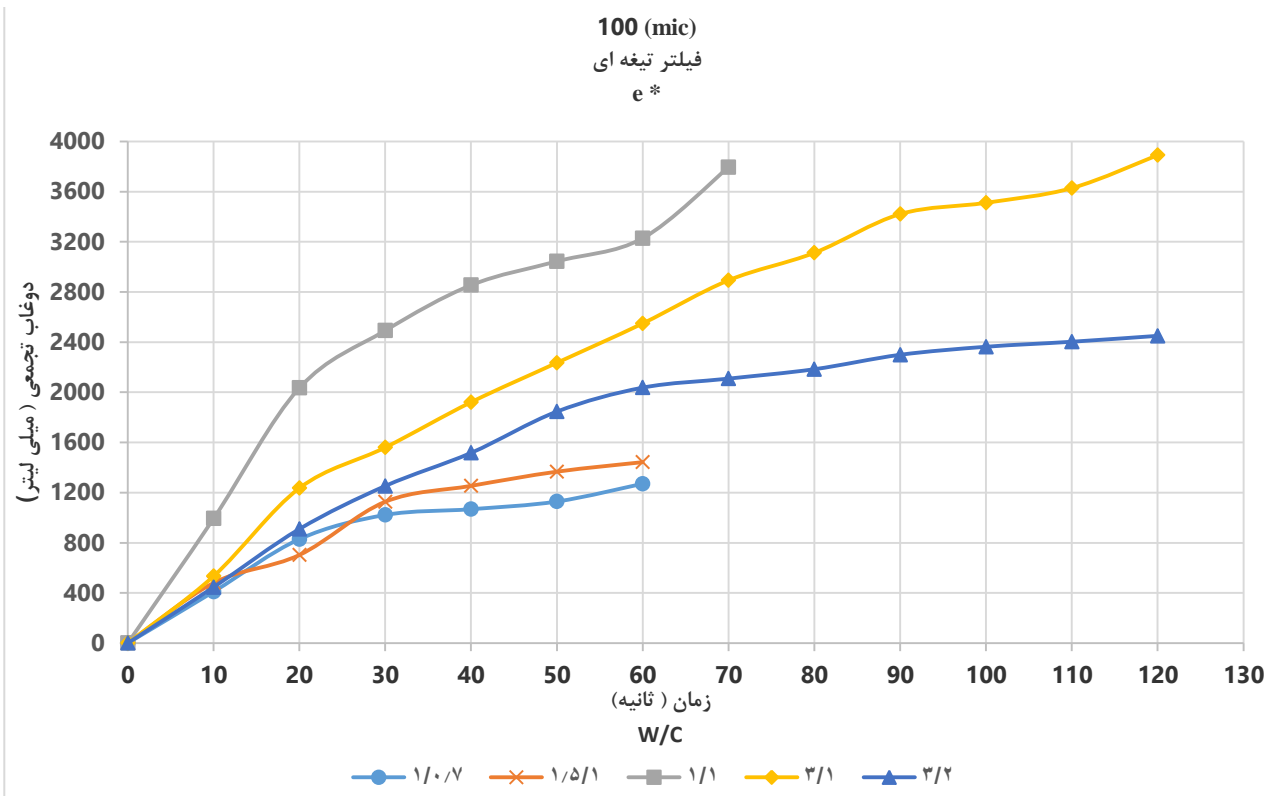


شکل ۱۷- آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۸۰ میکرون.

در نمودار شکل‌های ۱۸ و ۱۹ آزمایش‌های e\* و e فیلتر تیغه‌ای ۱۰۰ میکرون طبق جدول ۳ آورده شده است.

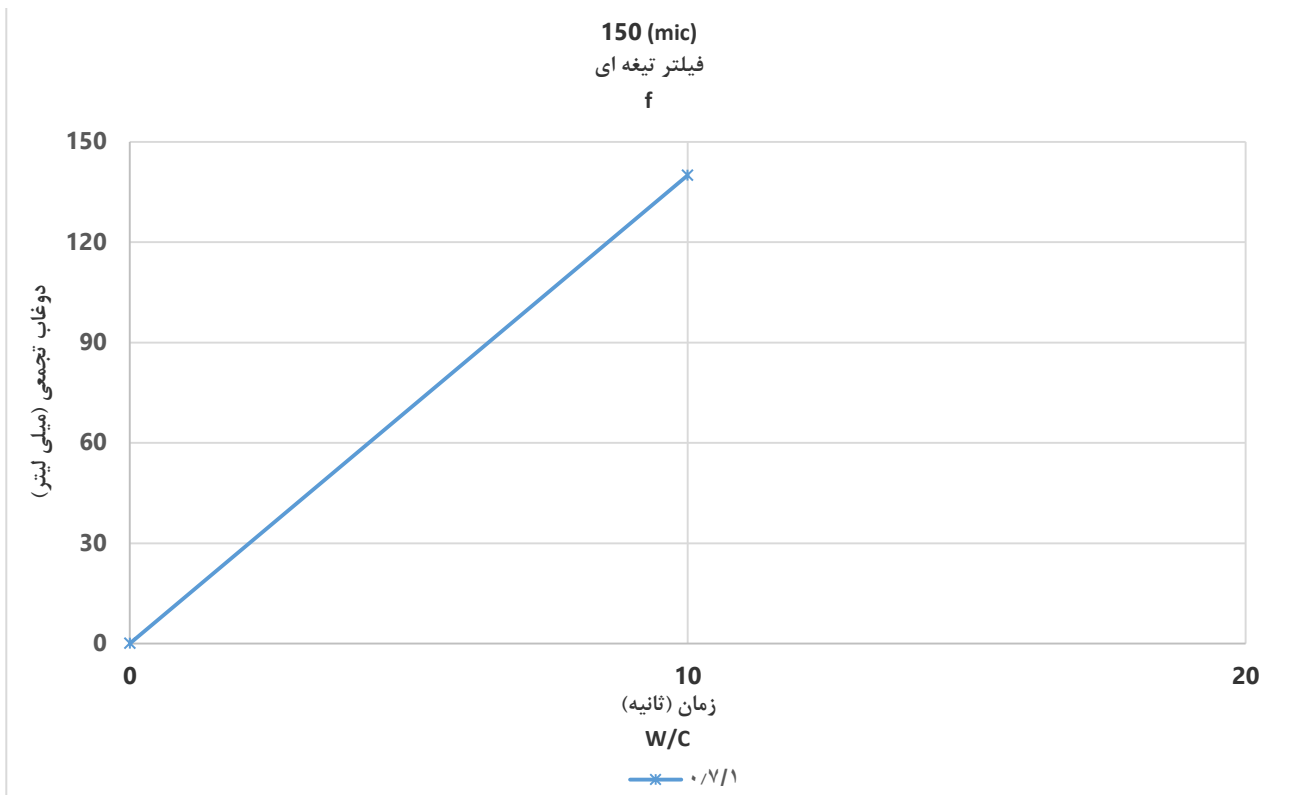


شکل ۱۸- آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۱۰۰ میکرون.

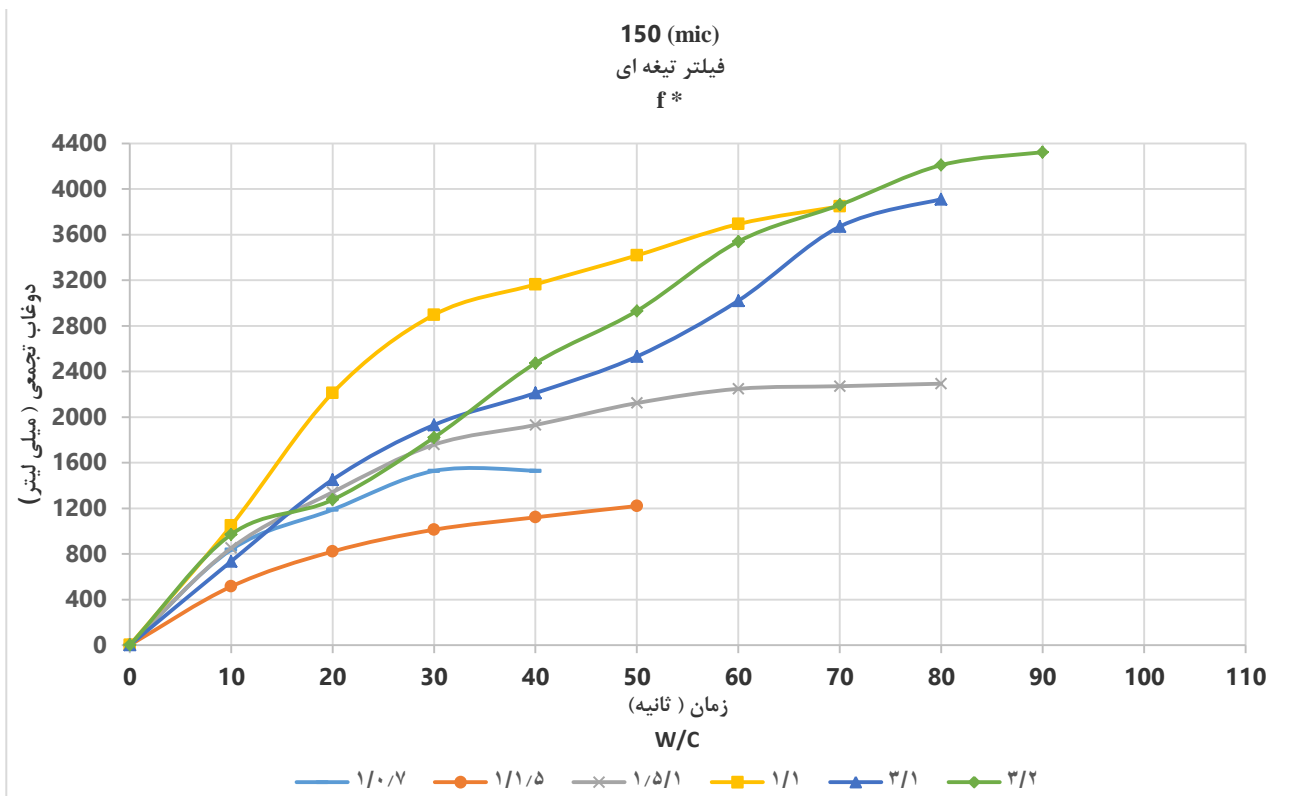


شکل ۱۹- آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۱۰۰ میکرون.

در نمودار شکل‌های ۲۰ و ۲۱ آزمایش‌های  $f$  &  $f^*$  فیلتر تیغه‌ای ۱۵۰ میکرون طبق جدول ۳ آورده شده است.

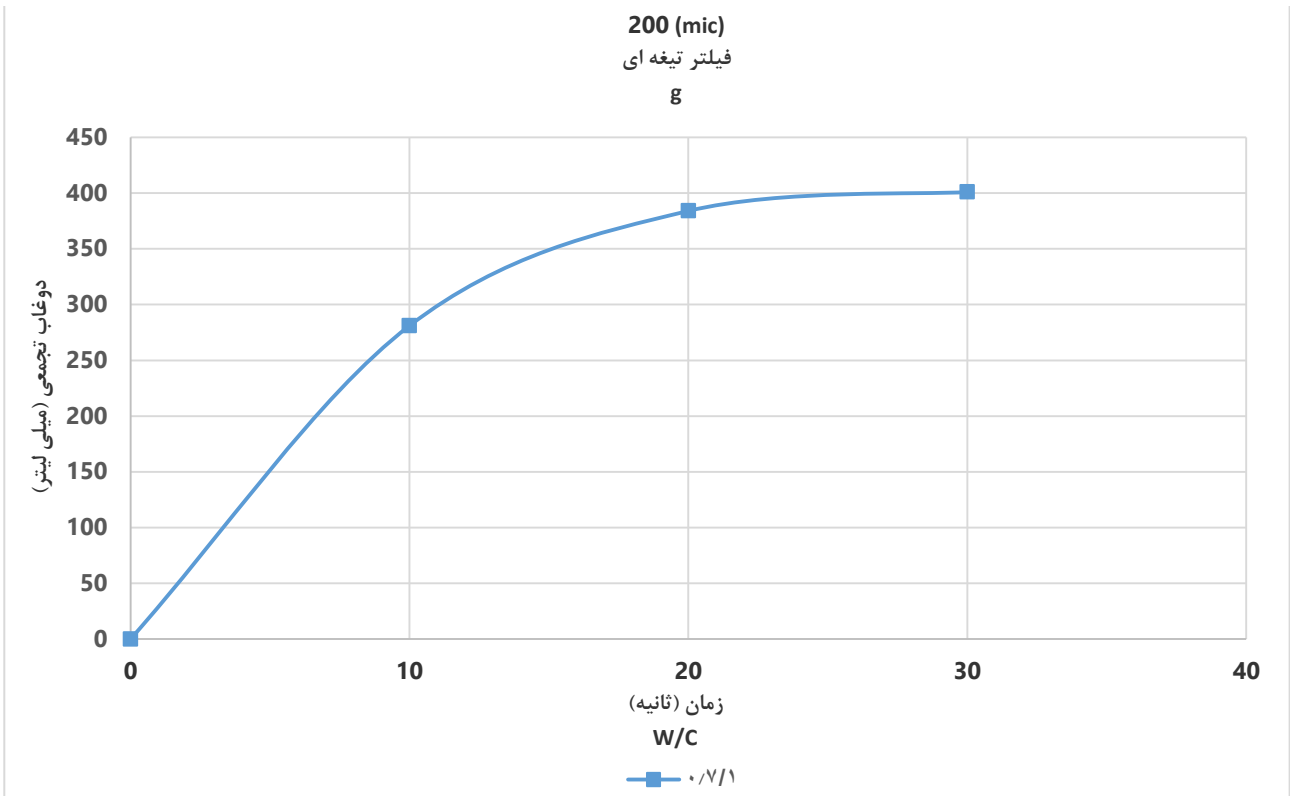


شکل ۲۰- آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۱۵۰ میکرون.

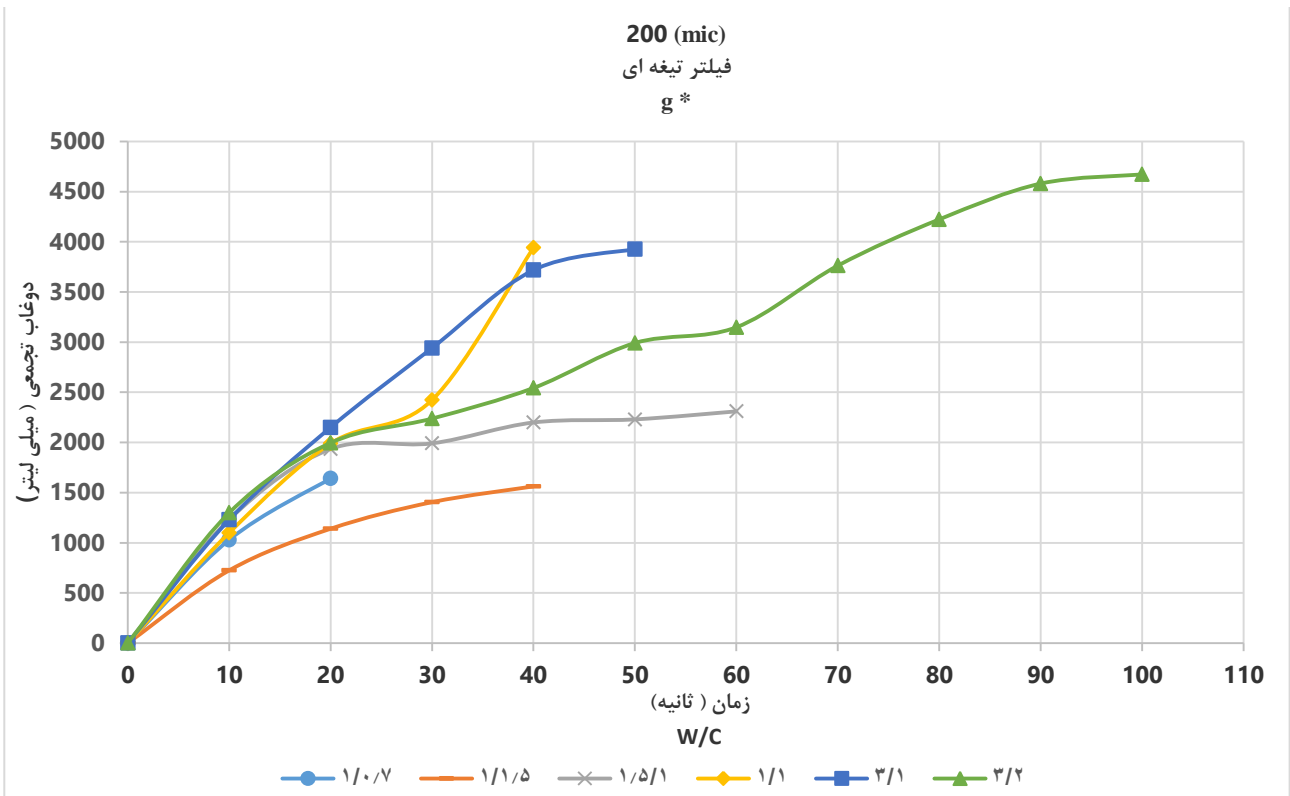


شکل ۲۱- آزمایش فیلتر تیغه‌ای ۱۵۰ میکرون.

در نمودار شکل های ۲۲ و ۲۳ آزمایش های \*g & g فیلتر تیغه ای ۲۰۰ میکرون طبق جدول ۳ آورده شده است.



شکل ۲۲- آزمایش فیلتر تیغه ای ۲۰۰ میکرون.



شکل ۲۳- آزمایش فیلتر تیغه ای ۲۰۰ میکرون.

۱/۵/۱، ۱/۱ W/C: است.

### ۳- نتیجه‌گیری

- کاربردهای نانو سیلیس در بتن و سیمان را از قبیل، نحوه پراکندگی ذرات نانو سیلیس در سیمان، اندازه و شکل و نوع ذرات نانو سیلیس، درصد اختلاط با سیمان در فاز صنعتی، رفتار و مقاومت این نوع بتن در برابر خوردگی به وسیله مواد اسیدی، سولفات‌ها و کربنات‌ها، تاثیر بر خواص مکانیکی و فیزیکی بتن و نظایر آن است.
- استفاده از این نوع سیمان با فناوری نانو باعث، کاهش مصرف سیمان و صرفه‌جویی در زمان و پول می‌شود.
- مصرف این نوع سیمان کاهش تخریب محیط‌زیست را در پی دارد. به دلیل مقاومت بالاتر هزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز کاهش پیدا می‌کند.
- نتایج حاصل از عملیات تزریق سیمان سوپر فاین به همراه نانو ذرات سیلیس بیانگر این موضوع است که بهترین و موثرترین عملیات تزریق مربوط به نسبت‌های ۳/۲، ۳/۱، ۱/۱، ۱/۰/۷ W/C: فیلتر تیغه‌ای است و دلیل این امر این است که هر چه نسبت آب به سیمان افزایش پیدا می‌کند، دوغاب روان‌تر شده و عملیات تزریق بهتر انجام می‌گیرد و در تیغه‌ای ۱۰۰ میکرون به بالا به دلیل افزایش فاصله بین دو لبه عملیات تزریق مناسب‌تر و با سرعت بالاتری انجام می‌شود.

### منابع

۱. کربلا، م. کتیبه، ه. ۱۳۸۸. «تزریق دوغاب سیمانی در سنگ». مرکز نشر ترآوا.
2. Alemo J ., 2004 “Injection and sealing of cracks, Report from the Rehabcon project” Vattenfall Utveckling AB, Älvkrleby, Sweden.
3. Birgisson, B., Mukhopadhyay, A. K., Geary, G., Khan, M., & Sobolev, K. 2012. “Nanotechnology in concrete materials: A synopsis” Transportation Research Circular, (E-C170).
4. Eriksson, M., Friedrich, M., & Vorschulze, C., 2004. “Variations in the rheology and penetrability of cement-based grouts— an experimental study” Cement and Concrete Research, 34(7), 1111-1119.
5. Feng, P., Chang, H., Liu, X., Ye, S., Shu, X., & Ran, Q. (2020). “The significance of dispersion of nano-SiO<sub>2</sub> on early age

پس از انجام عملیات، نتایج زیر بر اساس پارامترهای جدول‌های ۲ و ۳ به دست آمده است. آزمایش  $a^*$  &  $a$  طبق نمودار شکل‌های ۱۰ و ۱۱ (فیلتر تیغه‌ای ۴۰ میکرون)، با توجه به نمودارها تمامی نسبت‌ها خروج دوغاب از مجرای بین دو لبه تیغه را داشته‌اند ولی اکثر نسبت‌ها خروج دوغاب بسیار کمی را ثبت کرده‌اند و این به دلیل تشکیل کیک دوغاب و مسدود شدن مجرای تیغه است، این مسدود شدن به دلیل کاملاً همگن نشدن مواد نانو و دوغاب سیمان است که به صورت دلمه شدن باعث ایجاد کیک دوغاب پشت تیغه می‌شود ولی نسبت‌های ۳/۱، ۱/۱، ۱/۰/۷ W/C: از بقیه نسبت‌ها تزریق بهتر، مناسب، دارای نمودار محدب و جریان متناوب را ثبت کرده‌اند. آزمایش  $b^*$  &  $b$  شامل نمودار شکل‌های ۱۲ و ۱۳ (فیلتر تیغه‌ای ۵۰ میکرون)، نسبت‌های ۳/۲، ۱/۱/۵، ۱/۰/۷ W/C: به دلیل تشکیل کیک دوغاب، خروج دوغاب بسیار ناچیز است. نسبت  $W/C: 1/5/1$  به دلیل تشکیل کیک دوغاب فرآیند تزریق در ثانیه ۲۰ متوقف شده (به دلیل غلظت بالای دوغاب) و نمودار دارای رفتار خطی است. نسبت  $W/C: 1/0/7$  نمودار کاملاً محدب است و عملیات تزریق به خوبی انجام گرفته است. نسبت‌های ۳/۱، ۱/۱ W/C: قبل از تشکیل کیک دوغاب تقریباً تمامی مواد دوغاب از تیغه عبور کرده است، عملیات تزریق به خوبی انجام گرفته است. نسبت  $W/C: 1/1$  مقداری آشفستگی در نمودار وجود دارد و این به دلیل تشکیل و از بین رفتن کیک دوغاب در لحظاتی از عملیات تزریق است. آزمایش  $c^*$  &  $c$  طبق نمودار شکل‌های ۱۴ و ۱۵ (فیلتر تیغه‌ای ۶۰ میکرون)، در این حالت بهترین نسبت مربوط به  $W/C: 1/1, 3/1, 3/2$  است که در هر ۳ حالت رفتار منحنی تجمعی، محدب و متناوب است و عمده مواد از سیلندر تزریق خارج شده و آشفستگی که در نمودار نسبت  $W/C: 1/1$  است به دلیل برطرف شدن کیک دوغاب در زمان‌های بین ۴۰ تا ۵۰ ثانیه است. آزمایش  $d^*$  &  $d$  شامل نمودار شکل‌های ۱۶ و ۱۷ (فیلتر تیغه‌ای ۸۰ میکرون)، تیغه ۸۰ میکرون نیز بسیار شبیه به تیغه ۶۰ میکرون است و بهترین تزریق دوغاب مربوط به نسبت‌های  $W/C: 1/1, 3/1, 3/2$  است و در هر ۳ حالت رفتار منحنی تجمعی، محدب و متناوب بوده و عمده مواد از سیلندر تزریق خارج شده است. آزمایش‌های  $e^*$  &  $e$  (فیلتر تیغه‌ای ۱۰۰ میکرون)،  $f^*$  &  $f$  (فیلتر تیغه‌ای ۱۵۰ میکرون) و  $g^*$  &  $g$  (فیلتر تیغه‌ای ۲۰۰ میکرون) که شامل نمودار شکل‌های شماره ۱۸ تا ۲۳ است نیز دقیقاً مانند حالت‌های تیغه ۶۰ و ۸۰ میکرون است و بهترین حالت تزریق که تقریباً تمامی دوغاب در یک مدت زمان کوتاه از سیلندر تخلیه شده است، مربوط به نسبت‌های  $W/C: 3/1, 3/2$

- Engineering and Architecture, 8(7).
10. Son, H. M., Park, S. M., Jang, J. G., & Lee, H. K., 2018. "Effect of nano-silica on hydration and conversion of calcium aluminate cement" Construction and Building Materials, 169, 819-825.
  11. Xu, S., Xie, N., Cheng, X., Huang, S., Feng, L., Hou, P., & Zhu, Y., 2018. "Environmental resistance of cement concrete modified with low dosage nano particles" Construction and Building Materials, 164, 535-553.
  12. Zutshi, A., & Creed, A., 2015. "An international review of environmental initiatives in the construction sector" Journal of cleaner production, 98, 92-106.
  13. Zou, L., Håkansson, U., & Cvetkovic, V. (2018). "Two-phase cement grout propagation in homogeneous water-saturated rock fractures" International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 106, 243-249.
  6. Flores, Y. C., Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., & Tavares, L. M. (2017). "Performance of Portland cement pastes containing nano-silica and different types of silica" Construction and Building Materials, 146, 524-530.
  7. Iwaro, J., & Mwashia, A., 2013. "The impact of sustainable building envelope design on building sustainability using Integrated Performance Model" International Journal of Sustainable Built Environment, 2(2), 153-171.
  8. Mohammed, M. H., Pusch, R., & Knutsson, S., 2015. "Study of cement-grout penetration into fractures under static and oscillatory conditions" Tunnelling and Underground Space Technology, 45, 10-19.
  9. Pachta, V., Stefanidou, M., Konopisi, S., & Papayianni, I., 2014. "Technological evolution of historic structural mortars" Journal of Civil