

## بررسی پایداری کلوییدی نانوذرات اکسید آهن در فرو سیال آب پایه با استفاده از فعال سطح‌های پلیمری شانه‌ای

تهمین گویه کی<sup>۱</sup>، ابراهیم قاسمی<sup>۲</sup>، فرهود نجفی<sup>۲</sup>، سعید باغشاهی<sup>۳</sup>، علی نعمتی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات،

<sup>۲</sup> موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ،

<sup>۳</sup> دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)،

<sup>۴</sup> دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی شریف

eghasemi@iust.ac.ir

**چکیده:** در این تحقیق نانو ذرات اکسید آهن مگنتیت با استفاده از روش هم‌رسوبی تهیه و پایداری کلوییدی آنها با استفاده از سه نوع ماده فعال سطح پلیمری شانه‌ای<sup>۱</sup> بر پایه پلی آکرلیک اسید-پلی اتیلن گلیکول آکریلات در محیط آبی مورد بررسی قرار گرفت. تفاوت مواد فعال سطح شانه‌ای در سه نوع پلی اتیلن گلیکول با وزن ملکولی ۱۰۰۰، ۲۰۰۰ و ۴۰۰۰ بود که به بدنه هیدروفوب آکریلاتی متصل است. تاثیر پارامترهای دما و زمان واکنش بر اندازه ذرات تشکیل شده مطالعه شد. محدوده دمایی، بین ۲۷ تا ۹۰°C و محدوده زمانی بین ۱۰ تا ۴۰ دقیقه انتخاب شد. برای بدست آوردن نانو ذرات مگنتیت، کلریدهای آهن دو و سه ظرفیتی با تنظیم pH توسط آمونیاک رسوب داده شد. برای بررسی توزیع اندازه ذرات و بررسی پایداری از روش‌های تفرق دینامیک لیزری (DLS) و کدورت سنجی<sup>۲</sup> استفاده شد. اتصال سطحی مواد فعال سطح شانه‌ای بر روی نانو ذرات با استفاده از روش FTIR بررسی شد. نتایج حاصل نشان داد که بسته به نوع فعال سطح شانه‌ای استفاده شده در محیط آبی، اندازه ذرات متفاوت است و فعال سطح با شانه‌های پلی اتیلن گلیکول با وزن ملکولی ۲۰۰۰ برای دستیابی به اندازه ذرات کوچک‌تر و پایداری بهتر، نسبت به دو نوع دیگر مناسب‌تر است. همچنین مشخص شد که مقدار ۲۲ درصد وزنی از این فعال سطحی، دمای سنتز ۷۰°C و زمان واکنش ۲۰ دقیقه، مناسب‌ترین مقادیر برای دستیابی به بیشترین پایداری است. در این شرایط، اندازه هیدرو دینامیکی ذرات ۸۰nm به دست آمد.

**کلید واژه:** فعال سطح پلیمری شانه‌ای، پایداری، نانو ذرات، اکسید آهن، فرو سیال.

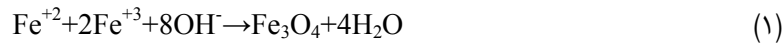
### ۱- مقدمه

فروسیال‌های مغناطیسی سوسپانسیون‌هایی هستند که در آن‌ها نانو ذرات مغناطیسی مانند مگنتیت ( $Fe_3O_4$ )، مگه‌میت ( $\gamma-Fe_2O_3$ )، فریت‌های نیکل، کبالت و غیره در داخل یک سیال آبی یا آلی بطور پایدار پراکنده شده‌اند. در این بین، فرو سیال‌های بر پایه مگنتیت و مگه‌میت به دلیل ویژگی‌های مغناطیسی و زیست سازگاری مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. این مواد در عکس برداری MRI، رسانش دارو، جوهرهای چاپ، آب‌بندی موتورهای بسیار حساس، انتقال حرارت و غیره استفاده می‌شود [۱-۷]. رایج‌ترین راه سنتز این ذرات، روش هم رسوبی شیمیایی یون‌های نمک آهن دو و سه ظرفیتی در حضور یک باز

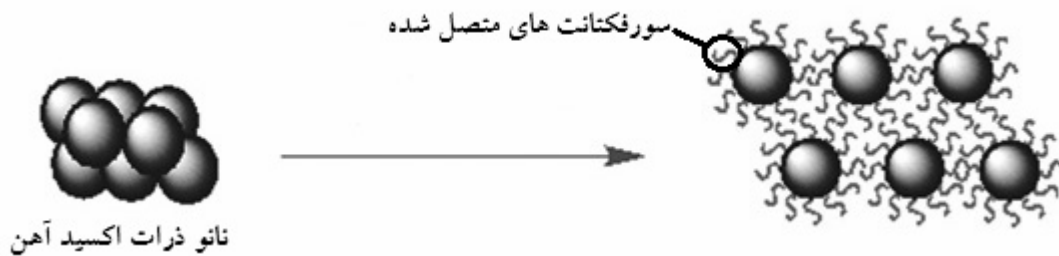
<sup>۱</sup> Comb Polymeric Surfactants

<sup>۲</sup> Turbidimetry

قوی می‌باشد [۸ و ۹]. واکنش تشکیل نانو ذرات، بصورت زیر است:



طبق این واکنش، برای تولید مگنتیت، نسبت مولی اولیه ۱:۲ از  $\text{Fe}^{2+}:\text{Fe}^{3+}$  نیاز است. با توجه به کاربردهای خاص این نانوذرات، پایدار بودن آنها در محیط‌های آبی و آلی در کنترل ویژگی‌های محصولات نهایی نقش ضروری دارد [۹]. برای ایجاد پایداری در نانو ذرات روش‌های مختلفی وجود دارد یکی از روش‌ها، اصلاح سطح ذرات توسط مواد فعال سطحی مختلف است. مواد فعال سطحی معمولاً ترکیبات آلی هستند که دارای گروه‌های آبدوست و آبگریز می‌باشند. گروه‌های آبگریز نقش دم و دنباله را دارد و شامل ترکیباتی رادیکال هیدروکربن است و گروه‌های آبدوست، نقش سر مواد فعال سطحی را دارد که شامل فلزات قلیایی یا بنیان‌های دیگر است. وجود طبیعت دو گانه سبب ویژگی‌های خاصی در این مولکول‌ها می‌شود به طوری که می‌توانند در آب حل شده و در سطح مشترک آب- هوا یا بین دو سطح از دو فاز مختلف تجمع یافته و سبب کاهش کشش سطحی شوند. یکی از کاربردهای مواد فعال سطحی استفاده از آنها در سوسپانسیون‌های کلوییدی است. از آنجا که در سوسپانسیون‌های حاوی نانوذرات با کاهش اندازه ذرات، حرکت براونی افزایش می‌یابد از این رو ذرات شانس زیادی برای نزدیک شدن به یکدیگر و تشکیل آگلومره دارند. استفاده از مواد فعال سطحی کاتیونی و آنیونی باعث می‌شود یکی از دوسر فعال سطحی‌ها به کلئید متصل شده و سر دیگرشان به محلول نزدیک می‌شود، بنابراین سرهایی که در محلول قرار دارند همانام بوده و سبب دافعه بین کلئیدها می‌شوند و در نتیجه از تجمع و بهم پیوستن آنها ممانعت می‌کنند. شکل (۱) نحوه پراکندگی نانو ذرات را توسط جذب مواد فعال سطحی نشان می‌دهد [۱۰ و ۱۱]. سازوکار موجود در این رابطه به سازوکار ممانعت فضایی<sup>۳</sup> معروف است.



شکل ۱- شمایی از پراکندگی نانو ذرات در اثر جذب مواد فعال سطحی [۱۲]

با بررسی‌هایی که ژومان<sup>۴</sup> و همکارانش [۱۳] انجام دادند مشخص شد که استفاده از دو لایه پوشش مواد فعال سطحی بر روی سطح نانوذرات مگنتیت باعث افزایش میزان پراکندگی می‌شود. آنها از اولئیک‌سدیم به عنوان اولین پوشش و سولفات بنزن ددیکیل سدیم<sup>۵</sup> به عنوان دومین لایه پوشش مواد فعال سطحی بر روی سطح نانوذرات استفاده کردند. پوشش اولئیک‌سدیم بر روی نانوذرات مگنتیت باعث شد که شکل ذرات کروی و متوسط اندازه ذرات ۱۰nm شود.

<sup>3</sup> Steric Repulsion

<sup>4</sup> Xuman

<sup>5</sup> SDBS

پراکنده کردن نانو ذرات اکسید آهن در سیال‌های آلی نسبتاً راحت‌تر از سیال‌های آبی است. از طرفی به دلیل اهمیت کاربردهای پزشکی و لزوم زیست سازگاری فروسیال‌ها، لازم است که این ذرات در محیط آبی پراکنده شوند. استفاده از مواد فعال سطحی‌های بر پایه پلی اتیلن گلیکول در این راستا مناسب تشخیص داده شده است [۱۴]. با این حال تاکنون گزارشی مبنی بر استفاده از فعال سطح پلیمری شانه‌ای بر پایه پلی آکرلیک اسید-پلی اتیلن گلیکول آکریلات گزارش نشده است. همچنین در کارهای مشابه قبلی [۱۵ و ۱۶] بیشتر بحث سنتز و خواص ریولوژیکی فروسیال‌های بر پایه محیط‌های آلی مورد بررسی قرار گرفته است. در خصوص پراکندگی نانوذرات اکسید آهن در محیط آبی، اطلاعات چندانی از محققین داخلی منتشر نشده است. در این تحقیق، تاثیر عواملی مانند وزن مولکولی مواد فعال سطحی شانه‌ای بر پایه پلی آکرلیک اسید-پلی اتیلن گلیکول آکریلات بر پراکندگی نانو ذرات مغناطیسی در فرو سیال بر پایه آب مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲- روش کار تجربی

### ۲-۱- مواد اولیه

کلریدهای آهن دو ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) و سه ظرفیتی ( $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )، هیدروکسید آمونیوم ( $\text{NH}_4\text{OH}$ )، محصول شرکت Merck و با خلوص بالاتر از ۹۹٪، آب مقطر و نیز سه ماده فعال سطح پلی آکرلیک اسید-پلی اتیلن گلیکول آکریلات با شانه‌های پلی اتیلن گلیکول PCA-1000، PCA-2000 و PCA-4000 با نام‌های اختصاری PCA-PCA-1000، PCA-PCA-2000 و PCA-PCA-4000 ساخت موسسه پژوهشی علوم و فناوری رنگ استفاده شد.

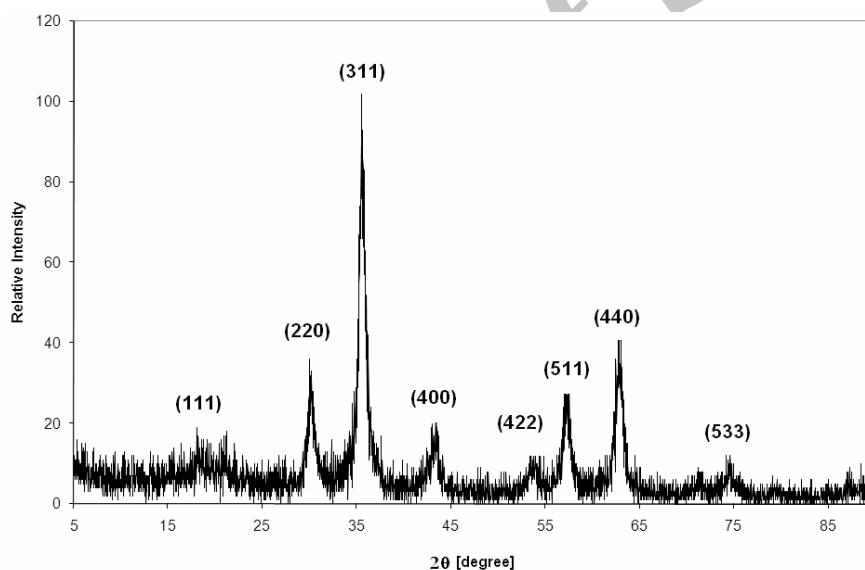
### ۲-۲- روش ساخت فروسیال

برای تهیه نانوذرات مغناطیسی مگنتیت از روش هم‌رسوبی استفاده شد. ابتدا با حل کردن مقادیر مشخص از نمک‌های آهن (II) و آهن (III) که به‌عنوان منابع تولید یون‌های آهن (II) و آهن (III) بودند، محلول‌های یک مولار از هر یک از نمک‌ها تهیه شد. محلول‌های حاصل با نسبت وزنی ۱:۲ از آهن (II): آهن (III) در یک راکتور شیشه‌ای چند دهانه با هم مخلوط شده و با استفاده از همزن مکانیکی به مدت ۵ min در دمای انتخاب شده هم‌زده شد. در این مرحله رنگ محلول نارنجی رنگ بود. در تمام مراحل سنتز، برای جلوگیری از اکسید شدن  $\text{Fe}^{2+}$  به  $\text{Fe}^{3+}$  از اتمسفر خنثی استفاده شد. برای این کار، در تمام مراحل سنتز، گاز نیتروژن به محلول تزریق شد. در هر نمونه، مقدار و نوع مشخصی از مواد فعال سطحی (طبق جدول ۲) افزوده و مجدداً به مدت ۱۰ min هم‌زده شد و در نهایت با استفاده از افزودن سریع ۷۰ ml محلول ۲۵٪ بازی هیدروکسید آمونیوم و افزایش دور هم‌زدن pH محلول به ۱۱ رسانیده شد. به محض افزودن باز، رنگ محلول سیاه رنگ شد. بعد از گذشت زمان لازم جهت به هم‌زدن محلول و یکنواختی آن، عمل هم‌زدن متوقف و رسوب سیاه حاصل به روش ته‌نشینی به کمک آهن‌ریا از محلول جدا و محلول باقی‌مانده از آن سرریز شد. برای جدا کردن کامل آمونیاک و پایین آوردن pH به حدود ۷ عملیات شستشو چندین بار با آب مقطر تکرار شد و در نهایت به منظور پراکنده کردن ذرات در سیال (آب) رسوب به دست آمده در مقدار ۱۵ cc آب دی یونیزه ریخته و به مدت ۵ min تحت التراسونیک قرار گرفت.

برای بررسی توزیع اندازه ذرات از آنالیز تفرق دینامیک لیزری استفاده شد برای این کار از دستگاه Brookhaven مدل PLUS 90 با دقت اندازه‌گیری بین ۶۰۰۰-۱ nm استفاده گردید. برای انجام این آزمون ابتدا نمونه‌ها تا حد لازم برای عبور نور با آب، رقیق شد و قبل از اندازه‌گیری به مدت ۱-۲min توسط همگن‌ساز<sup>۶</sup> همگن شدند. برای بررسی پایداری فروسیال از آزمون کدورت‌سنجی<sup>۷</sup> استفاده شد. این آزمون براساس اندازه‌گیری شدت عبور نور در طول موج مرئی از یک سیال کلئیدی است. برای انجام این آزمون نمونه‌ها رقیق گردیده و به صورت تابعی از زمان مورد بررسی قرارگرفت. برای انجام این آزمون از دستگاه مدل HACH-2100AN استفاده شد.

### ۳- نتایج و بحث

شکل ۲ آنالیز پراش اشعه ایکس رسوب به دست آمده را بدون اعمال سورفکتانت نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که به جز فاز مگنتیت فاز فرعی دیگری مشاهده نمی‌شود. لازم به ذکر است که ویژگی‌های ابعادی و مورفولوژی ذرات مگنتیت به دست آمده در کارهای قبلی اعضای این گروه مورد سنجش قرار گرفته است [۱۵ و ۱۶] که براین اساس، میانگین اندازه ذرات طبق آنالیز میکروسکوپ نوری عبوری TEM معادل ۱۱nm گزارش شده است. از این رو در این تحقیق با توجه به مشابهت کامل روش سنتز، از ارایه نتایج آزمون TEM صرف‌نظر می‌شود.



شکل ۲- آنالیز پراش اشعه ایکس نانو ذرات اکسید آهن

معیار پایداری فروسیال، دستیابی به کمترین میانگین اندازه آگلومرها در نظر گرفته شد و اندازه هیدرودینامیکی ذرات با استفاده از روش DLS در شرایط مختلف بررسی شد. جدول ۱ نمونه‌های مختلف و شرایط تهیه آنها را نشان می‌دهد. پس از آماده سازی، وضعیت پایداری در ابتدا به صورت چشمی مورد مقایسه قرار گرفت [۱۷]. این جدول نشان می‌دهد که تنها نمونه‌هایی که حاوی حدود ۲۲ درصد وزنی مواد فعال سطحی بودند نسبت به سایر نمونه‌ها از پایداری بیشتری برخوردارند. همچنین از این

<sup>6</sup> Homogenizer

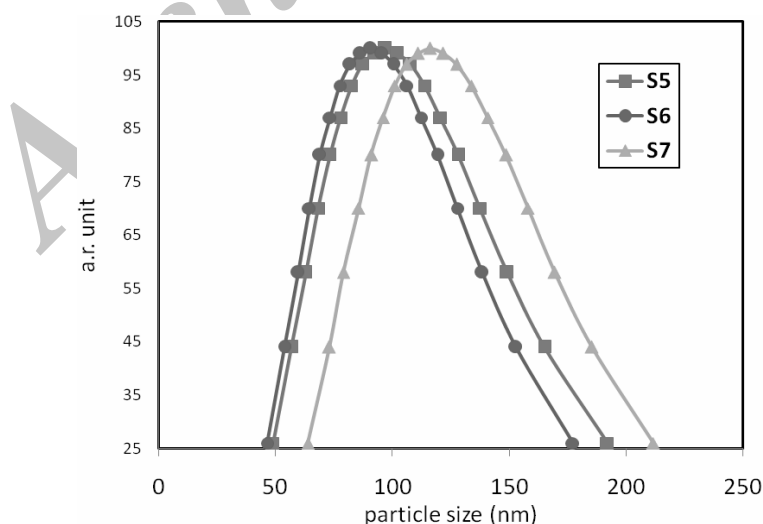
<sup>7</sup> Turbidimeter

جدول نشان می‌دهد که ماده فعال سطحی PCA-2000 با مقدار ۲۲ در صد وزنی نسبت به دو مواد فعال سطحی دیگر در شرایط مختلف دما و زمان سنتز دارای میانگین اندازه آگلومره‌های کوچکتر و در نتیجه محدوده پایداری گسترده‌تری است.

جدول ۱- آماده سازی نمونه‌های مختلف برای بررسی خواص

نمونه	نوع باز	نوع محیط	دما (°C)	زمان واکنش (min)	نوع مواد فعال سطحی	مقدار مواد فعال سطحی (wt%)	وضعیت
S1	آمونیاک	آب	۷۰	۲۰	PCA-1000	۱۲	ناپایدار
S2	آمونیاک	آب	۷۰	۲۰	PCA-1000	۲۲	پایدار
S3	آمونیاک	آب	۷۰	۲۰	PCA-1000	۲۷	ناپایدار
S4	آمونیاک	آب	۷۰	۲۰	PCA-2000	۱۲	ناپایدار
S5	آمونیاک	آب	۷۰	۱۰	PCA-2000	۲۲	پایدار
S6	آمونیاک	آب	۷۰	۲۰	PCA-2000	۲۲	پایدار
S7	آمونیاک	آب	۷۰	۴۰	PCA-2000	۲۲	پایدار
S8	آمونیاک	آب	۲۷	۲۰	PCA-2000	۲۲	پایدار
S9	آمونیاک	آب	۴۰	۲۰	PCA-2000	۲۲	پایدار
S10	آمونیاک	آب	۹۰	۲۰	PCA-2000	۲۲	پایدار
S11	آمونیاک	آب	۷۰	۲۰	PCA-2000	۲۷	ناپایدار
S12	آمونیاک	آب	۷۰	۲۰	PCA-4000	۱۲	ناپایدار
S13	آمونیاک	آب	۷۰	۲۰	PCA-4000	۲۲	پایدار
S14	آمونیاک	آب	۷۰	۲۰	PCA-4000	۲۷	ناپایدار

بر اساس این جدول، از بین مقادیر ۱۲، ۲۲ و ۲۷ درصد وزنی از عامل‌های سطحی PCA-1000، PCA-2000 و PCA-4000 تنها مقدار ۲۲ درصد وزنی منجر به ایجاد پایداری می‌شود. از این رو در ادامه، تمام بررسی‌ها بر اساس مقدار ۲۲ درصد وزنی انجام و بر روی نمونه‌هایی که در ظاهر پایدار بودند آزمون DLS انجام شد.



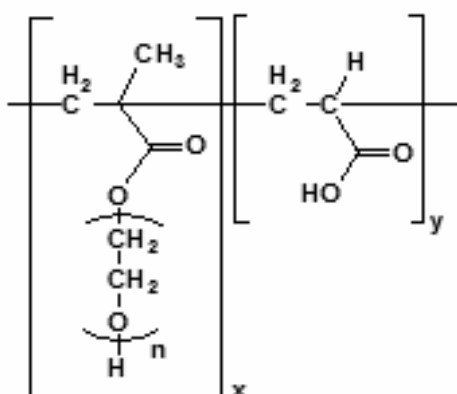
شکل ۳- مقایسه توزیع اندازه ذرات در ۳ نمونه بر پایه آب با مقادیر یکسان عامل‌های سطحی

PCA-1000، PCA-2000، PCA-4000

در شکل ۳ توزیع اندازه هیدرودینامیکی ذرات (نتیجه آزمون DLS)، برای سه نمونه S2، S6 و S13 مقایسه شده و میانگین اندازه ذرات به دست آمده در جدول ۲ قابل مشاهده است. طبق این نتایج، نمونه S6 نسبت به دو نمونه دیگر دارای میانگین و توزیع اندازه ذرات کمتری است. در شکل ۴ شمایی از ساختار مواد فعال سطحی شانه‌ای دیده می‌شود. بر اساس این شکل، این نوع مواد فعال سطحی دارای ساختار شانه‌ای است. مواد فعال سطحی PCA-2000، طول شاخه هیدروکسیلی دارای تعداد ۴۵ واحد اتوکسی است که ظاهراً در مقایسه با نوع PCA-1000 و PCA-4000 که به ترتیب دارای ۲۵ و ۶۵ واحد اتوکسی است، شرایط بهتری را برای پایداری فراهم می‌کند. این موضوع نشان می‌دهد که طول شاخه پلی اتیلن گلیکول بلندتر الزاماً نمی‌تواند منجر به پایداری بهتر شود.

جدول ۲- نتایج آزمون DLS برای نمونه‌های ظاهراً پایدار با غلظت ۲۲ درصد وزنی.

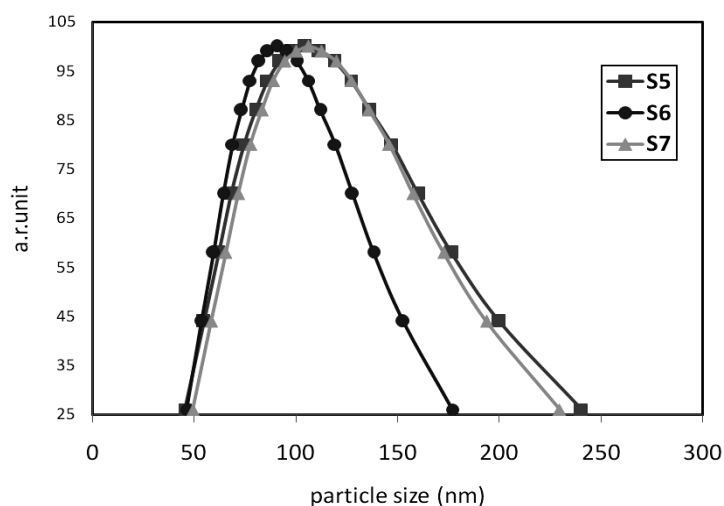
نوع پوشش سطحی	میانگین اندازه هیدرودینامیکی ذرات (nm)	نمونه
PCA-1000	۱۰۶	S2
PCA-2000	۹۸	S6
PCA-4000	۱۲۷	S13



شکل ۴- ساختار مواد فعال سطحی شانه‌ای به عنوان عامل سطحی آنیونی

برای بررسی اثر زمان واکنش بر اندازه ذرات حاصل، سه زمان ۱۰ و ۲۰ و ۴۰ min (نمونه‌های S5، S6 و S7) مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۵ وضعیت توزیع اندازه ذرات و جدول ۳ میانگین اندازه‌های به دست آمده برای این نمونه‌ها را نشان داده می‌دهد. بر این اساس مشخص است که نمونه S6 با زمان ۲۰ min کمترین اندازه ذرات را داراست. نکته جالب این است که نتیجه حاصل برای دو نمونه S5 و S7 تا حد زیادی مشابه است. به عبارت دیگر زمان‌های خارج از محدوده بهینه (۲۰ min) تا یک حد مشخص آگلومره می‌شوند. به نظر می‌رسد که برای نشستن مناسب مواد فعال سطحی بر روی ذرات زمان مناسب لازم است و این امری طبیعی است اما آگلومره شدن ذرات در زمان‌های بالاتر از حد بهینه را می‌توان به دلیل برهمکنش شاخه‌های مواد فعال سطحی و پدیده دپلشن<sup>۸</sup> دانست که منجر به آگلومراسیون می‌شوند [۱۱].

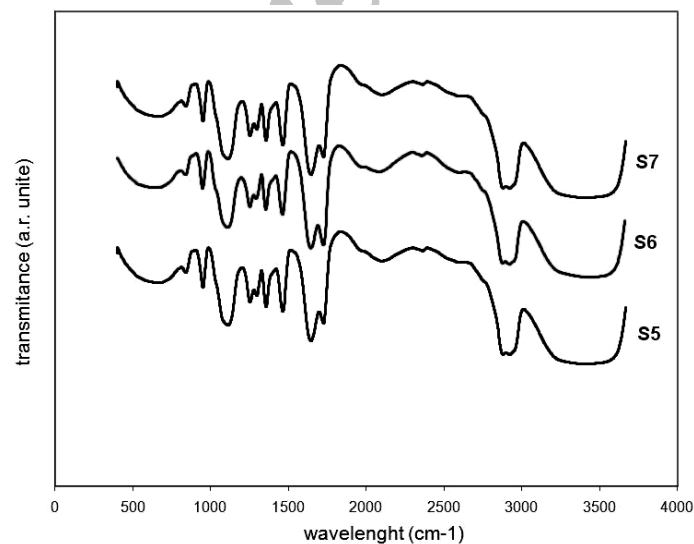
<sup>8</sup> Depletion



شکل ۵- مقایسه توزیع اندازه ذرات در ۳ نمونه بر پایه آب با عامل سطحی PCA-2000 در زمان‌های مختلف واکنش ۱۰، ۲۰ و ۴۰ دقیقه

جدول ۳- میانگین اندازه آگلومرها در زمان‌های مختلف واکنش ۱۰، ۲۰ و ۴۰ دقیقه

نمونه	اندازه متوسط آگلومرها (nm)	نوع پوشش سطحی
S5	۱۱۴	PCA-2000
S6	۹۸	PCA-2000
S7	۱۱۹	PCA-2000

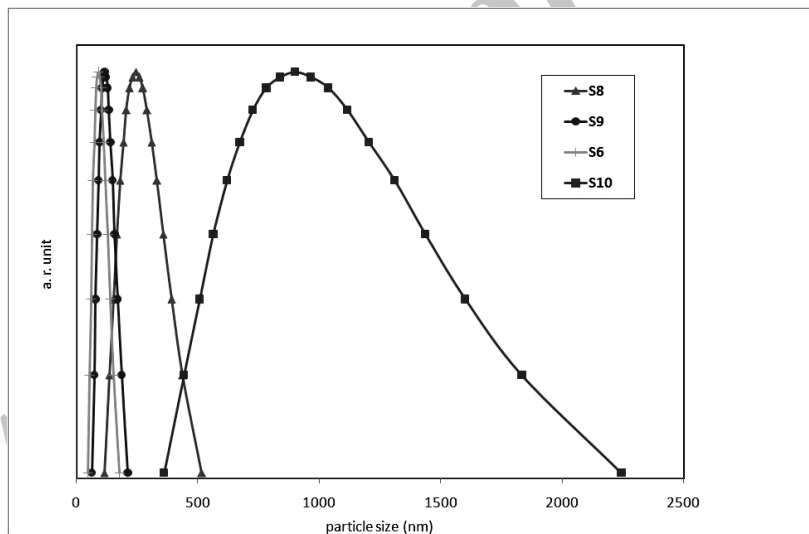


شکل ۶- الگوی FTIR نمونه‌های S5، S6 و S7

شکل ۶ الگوی FTIR نمونه‌های S5، S6 و S7 را نشان می‌دهد. پیک‌های موجود در عدد موج ۱۱۰۸ مربوط به ارتعاشات کششی C-O مربوط به پلی اتیلن گلیکول PCA-2000 است و پیک‌های محدوده ۱۳۵۵ و ۱۴۶۱ به ترتیب مربوط به C-H خمشی مربوط به گروه‌های متیل و CH<sub>2</sub> و پیک موجود در عدد موج ۱۶۴۳ مربوط به گروه کربونیل عامل کربوکسیل اسید در

بدنه ماده فعال سطحی است و پیک موجود در محدوده ۲۹۲۲ مربوط به ارتعاشات کششی پیوند C-H پلی اتیلن گلیکول متصل شده به بدنه آکرلیک است و در نمونه مربوط به زمان ۲۰ دقیقه بیشترین جذب در این عدد موج مشاهده می‌شود و نشان دهنده آن است که عامل سطحی در زمان ۲۰ دقیقه به نحو بهتری بر روی سطح نانو ذرات قرار گرفته است.

نمونه فروسیالی که با عامل سطحی PCA-2000 در زمان ۲۰ min سنتز شد در دماهای مختلف مورد بررسی قرار گرفت. برای این کار، بر روی نمونه‌های مربوط به دماهای ۲۷، ۴۰، ۷۰، ۹۰ درجه سانتی‌گراد آزمون DLS انجام شد. منحنی توزیع اندازه آگلومرها در شکل ۷ و میانگین آنها در جدول ۴ قابل مشاهده است. همان‌طور که این شکل نشان می‌دهد با افزایش دما تا ۷۰°C، اندازه ذرات کاهش می‌یابد ولی اگر دما بیشتر افزایش یابد اندازه ذرات افزایش نشان می‌دهد. اثراتی که افزایش دما در سیستم فروسیال ایجاد می‌کند عمدتاً عبارتند از: افزایش انرژی حرارتی سیستم و افزایش قابلیت انعطاف شاخه‌های آلی عامل‌های فعال سطحی. بدیهی است که برهم‌کنش‌های دیگر مانند برهم‌کنش استریک، دپلشن، و واندروالس نیز در این راستا به طور مستقیم یا غیر مستقیم تحت تاثیر قرار می‌گیرند. با افزایش دما تا یک حد مشخص، عامل‌های سطحی بهتر می‌توانند روی سطح قرار گیرند و انرژی گرمایی ذرات بالاتر برده می‌شود؛ برهم‌کنش‌های دافعه‌ای افزایش یافته و در نتیجه پایداری بیشتر می‌شود. اما اگر دما بیش از اندازه بالا رود عامل‌های سطحی که روی سطح نانو ذرات قرار گرفته‌اند تحت تاثیر عامل بی‌نظمی و ارتعاشات، از روی سطح جدا شده و در نتیجه اندازه ذرات افزایش می‌یابد.



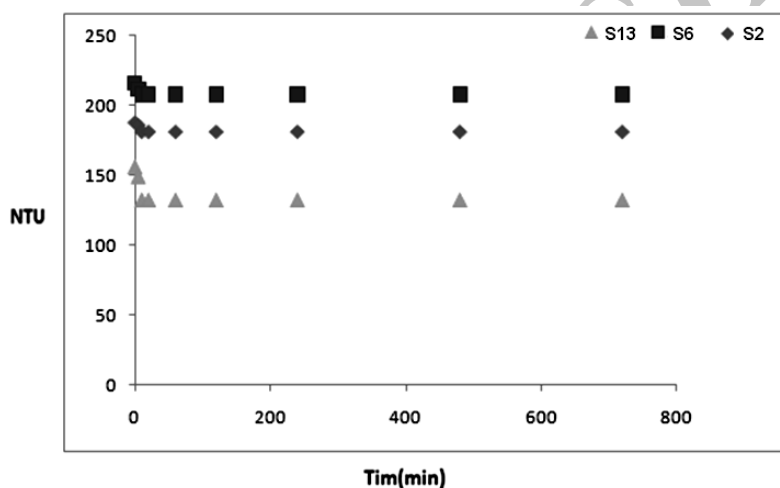
شکل ۷- مقایسه توزیع اندازه ذرات در ۴ نمونه بر پایه آب با عامل سطحی PCA-2000 در دماهای مختلف

جدول ۴- میانگین اندازه آگلومرها در نمونه‌های مربوط به دماهای مختلف

نوع پوشش سطحی	اندازه متوسط آگلومرها (nm)	نمونه
PCA-2000	۹۸	S6
PCA-2000	۲۷۱	S8
PCA-2000	۱۲۴	S9
PCA-2000	۱۰۵۰	S10



نتیجه بررسی پایداری فروسیال با زمان در سه نمونه S2، S6، S12 که از آزمون کدورت سنجی نسبی به دست آمده است در شکل ۸ دیده می‌شود. از این شکل مشخص است که شاخص عبور نور با زمان تنها در محدوده باریکی از شروع آزمایش کمی افت نشان می‌دهد ولی پس از آن به یک مقدار ثابت رسیده و بدون تغییر می‌ماند. کاهش ابتدایی به وجود ذرات آگلومره و عدم پایداری در سیستم مربوط می‌شود. ثابت ماندن مقدار عبور در بازه‌ای از زمان، نشان دهنده پایداری سیستم و پراکندگی مناسب بخش قابل توجهی از نانو ذرات مغناطیسی است. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود نمونه S6 با توجه به شرایط، با گذشت زمان از پایداری بیشتری برخوردار است. البته باید توجه کرد که در این آزمون مشابه آزمون DLS جهت عبور نور مجبور به رقیق کردن نمونه بودیم. چرا که به دلیل کدر بودن سیستم و ضریب شکست نسبتاً بالای اکسید آهن میزان عبور نور از فروسیال غلیظ بسیار مشکل بود. بنابراین شرایط نمونه‌های مورد سنجش با نمونه‌های اصلی از نظر غلظت تفاوت دارند ولی می‌توان به عنوان معیاری در نظر گرفته شود. روش چشمی برای نمونه‌های نسبتاً پایدار، دقت لازم را ندارد ولی روش کدورت‌سنجی به دلیل سادگی آزمون، سرعت سنجش و تعداد نقاط اندازه‌گیری در طی زمان روشی قابل اعتماد است.



شکل ۸- آزمون کدورت سنجی از نمونه‌های پایدار شده S2، S6 و S13 با عامل‌های سطحی PCA-1000 و PCA-2000 و PCA-4000

#### ۴- نتیجه‌گیری

نانو ذرات اکسید آهن نوع مگنتیت با استفاده از روش هم‌رسوبی سنتز و پایداری سوسپانسیونی این ذرات در فروسیال بر پایه آب در حضور سه نوع ماده فعال سطح پلیمری شانه‌ای بر پایه پلی‌آکرلیک اسید-پلی‌اتیلن گلیکول آکریلات بررسی شد. مشخص شد که ماده فعال سطحی حاوی شانه‌های پلی‌اتیلن گلیکول با وزن مولکولی ۲۰۰۰ برای دستیابی به پایداری و پراکندگی بهتر ذرات از دو نوع دیگر که دارای وزن مولکولی ۱۰۰۰ و ۴۰۰۰ بودند، است. نتایج نشان داد که این مورد حتی با بررسی‌های چشمی نیز قابل تشخیص است. تاثیر دما و زمان نشان داد که این عوامل در اندازه ذرات نهایی و در نتیجه پایداری کاملاً موثر هستند و برای دستیابی به نتیجه صحیح دارای یک مقدار بهینه می‌باشند. مقادیر بهینه برای دما و زمان واکنش به ترتیب ۷۰ درجه سانتیگراد و ۲۰ دقیقه به دست آمد و مشخص شد که میانگین اندازه ذرات در این وضعیت حدود ۸۰ نانو متر است.

## مراجع

1. M. Faraji, Y. Yamini and M. Rezaee, Magnetic Nanoparticles: "Synthesis, stabilization, Functionalization, Characterization, and Applications", Journal of the Iranian Chemical Society, 7 [1]:1-37(2010).
2. R. Y. Hong, B. Feng, L. L. Chen, G. H. Liu, H. Z. Li, Y. Zheng, D. G. Wei, "Synthesis, characterization and MRI application of dextran-coated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles", Biochemical Engineering Journal, 42[3] :290-300 (2008).
3. B. Chertoka, B. A. Moffatab, A. E. David, "Iron oxide nanoparticles as a drug delivery vehicle for MRI monitored magnetic targeting of brain tumors", Biomaterials, 29,:487-496(2008).
4. A. P. Astalan, F. Ahrentorp, C. Johansson, K. Larsson, A. krozer, "Biomolecular reactions studied using changes in Brownian rotation dynamics of magnetic particles", Biosens, Bioelectron, 19: 945-951 (2004).
5. J. Philip, T. Jayakumar, P. K. Sundarman, B. Raj, "A tunable optical filter", Meas. Sci. Technol, 14 [3]:1289-1294(2003).
6. S. Ban, V. Korenivski, "Pattern storage and recognition using ferrofluids", J. Appl. Phys. 99: 08R907 (2006).
7. R. L. Vander wal, T. M. Tich, "Comparative flame and furnace synthesis of single-walled carbon nanotubes Chem." Phys. lett. 336: 24 (2001).
8. T. Tsuchiya, Y. Miyake, T. Shigehisa, A. Tomita, M. Watanabe, "Kinetics of magnetite formation in a three-phase system", J. Chem. Eng. Jpn. 38: 509 (2005).
9. Ajay Kumar Gupta and Stephen Wells, "Surface-Modified Superparamagnetic Nanoparticles for Drug Delivery: Preparation, Characterization, and Cytotoxicity Studies66 IEEE Transactions on nanobioscience", 3: 66 (2004).
10. I. Kazeminezhad, S. Mosivand, "Effect of Surfactant Concentration on Size and Morphology of Electrooxidated Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanoparticles", in the proceeding of 3rd Conference on Nanostructures, Kish island (2010).
11. K. C. Birdi, Handbook of surface and colloid chemistry, 2nd ed. (CRC Press LLC, 2003).
12. Xiao-kun Maa, Nam-Hee Lee, Hyo-Jin Oh, Jae-Woo Kim, Chang-Kyu Rhee, Kyoung-Soon Park, Sun-Jae Kim, "Surface modification and characterization of highly dispersed silica nanoparticles

- by a cationic surfactant Colloids and Surfaces" A: Physicochemical and Engineering Aspects, Colloids and Surfaces, 358[1-3]: 172-176 (2010).
13. Xuman Wang, Caining Zhang a, Xiaoliang Wang b, Hongchen Gu, "The study on magnetite particles coated with bilayer surfactants", Applied Surface Science, 253[18]: 7516-7521 (2007).
14. E. Ghasemi, A. Mirhabibi, M. Edrissi, "Synthesis and Rheological Properties of an Iron Oxide Ferrofluid", J. Magn. Magn. Mat., 320: 2635-2639 (2008).
۱۵. مؤده محمدعلیزاده هنجنی، ابراهیم قاسمی، "تاثیر دما و اتمسفر بر ویژگی‌های نانوذرات مغناطیسی اکسید آهن"، هشتمین کنگره سرامیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، اردیبهشت ۱۳۹۰.
16. J. L. Viota, M. Rasa, S. Scana, A. P. Philipse, "Stability of mixtures of charged silica, silica-alumina, and magnetite colloids", Journal of Colloid and Interface Science, 290: 419-425(2005).