بسم الله الرحمن و الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی شیمی

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی شیمی گرایش پیشرفته

اندازه گیری و پیش بینی زمان تأخیر کریستالیزاسیون واکنشی نانوذرات نقره

استاد راهنما :

دکتر ستار قادر

استاد مشاور :

دکتر حسن هاشمی پور رفسنجانی

مؤلف :

نگین حاتمی

آذرماه ۱۳۸۸

دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط احراز درجه کارشناسی ارشد به

گروه : مهندسی شیمی

دانشکده : فنی و مهندسی

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: نگین حاتمی

استاد راهنما : دکتر ستار قادر

استاد مشاور: دکتر حسن هاشمی پور رفسنجانی

داور۱ : دکتر محمد مهدی افصحی

داور۲: دکترامیر صرافی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: مهندس محمد رنجبر

حق چاپ محفوظ ومخصوص به دانشگاه شهید باهنر کرمان است

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که اولین معلمان زندگیم هستند و محبت هایشان برایم دلگرم کننده و تلاششان در راه زندگی برایم غرورآفرین.

تقدیم به:

خواهر مهربانم امید همیشگی زندگیم.

تشکر و قدردانی :

با سپاس و تشکر از زحمات تمام اساتید گرامی که در طی تمامی این سال ها رهنمودهایشان روشن گر راهم بود. مراتب قدردانی ویژه خود را از استاد ارجمند جناب آقای دکتر ستار قادرکه در تمامی مراحل انجام این پایان نامه صمیمانه مرا یاری دادند و از هیچ کوششی دریغ نداشتند ابراز می دارم.

همچنین از زحمات جناب آقای دکتر هاشمی پور رفسنجانی بسیار سپاسگزارم. از توجهات و محبت های تمامی دوستانم بخصوص آقای حسین میرزایی کمال تشکر را دارم.

چکیده

نانوذرات نقره خواص متعددی از جمله خواص نوری، الکتریکی، کاتالیستی، ضدمیکروبی و دارویی وغیره دارند. با توجه به کاربردهای گسترده و روزافزون نانوذرات نقره در تکنولوژی و صنایع مختلف، مطالعه دقیق بر نانوذرات نقره اهمیت بالایی پیدا می کند. از این رو دانستن سینتیک تشکیل نانوذرات نقره کمک شایانی بر استفاده بهتر از این نانوذرات می نماید. یکی از پارامترهایی که با توجه به آن می‌توان به سینتیک فاز جدید تشکیل شده پی‌برد، زمان تأخیر تشکیل نانوذرات نقره است.

پایان نامه به بررسی زمان تأخیر تشکیل نانوذرات نقره در کریستالیزاسیون واکنشی می پردازد. مطالعات پایان نامه را می توان به دو بخش اصلی تقسیم نمود. در بخش اول به اندازه گیری آزمایشگاهی زمان تأخیر تشکیل نانوذرات نقره در کریستالیزاسیون واکنشی پرداخته می شود و در بخش دوم پایان نامه به پیش بینی زمان تأخیر آزمایشگاهی توسط مدل‌های تجمع خوشه‌ای نظیر تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی، مدل انعقاد خوشه‌ها و مدل انعقاد کاشچیف می‌پردازیم.

زمان بین ایجاد فوق اشباع محلول و اولین تغییرات فیزیکی سیستم درطی تشکیل نانوذرات (تشکیل هسته هایی با سایز بحرانی) را زمان تأخیر می نامند. وقتی پرتو نور به محلول حاوی نانوذرات نقره وارد شود بخشی از پرتو نور جذب نانوذرات شده و محلول رنگی (زرد رنگ) به نظر می آید. در حالی که قبل از تشکیل نانوذرات نقره در محلول تمامی پرتوها از محلول عبور کرده و هیچ پرتو نوری جذب محلول نمی شود، از همین خاصیت برای اندازه گیری زمان تأخیر کریستالیزاسیون نانوذرات نقره می توان استفاده نمود. نانوذرات نقره توسط واکنش نیترات نقره با احیاگر هیدرازین هیدرات در حضور پایدارکننده سیترات سدیم سنتز می شود. همچنین اثرات متغیرهای فرآیندی نظیر فوق اشباع، دما، حضور ناخالصی و افزودن دانه کریستالی بر روی زمان تأخیر به صورت آزمایشگاهی بررسی می گردد.

در مرحله دوم پایان نامه، زمان‌های تأخیر آزمایشگاهی در سه حالت تشکیل نانوذرات نقره، در حضور ناخالصی و با اضافه کردن دانه کریستالی را با مدل های خوشه ای مطابقت می دهیم. نهایتاً بهترین مدل برای پیش بینی

زمان تأخیر نانوذرات نقره تعیین می گردد. از روی بهترین مدل برای زمان تأخیر می توان پارامترهای هسته زایی در کریستالیزاسیون واکنشی نانوذرات نقره مانند سرعت هسته زایی، سرعت رشد، مرتبه هسته زایی، کشش سطحی بین نانوذرات و محلول، انرژی فعالسازی تشکیل نانوذرات نقره و انرژی گیبس لازم برای تشکیل نانوذرات نقره را تعیین نمود.

فهرست مطالب :

فصل اول: مقدمه

۱-۱ نانوذرات فلزی..... ۲

۱-۲ خواص نانوذرات فلزی..... ۳

۱-۲-۱ خواص نوری..... ۳

۱-۲-۲ خواص مکانیکی..... ۴

۱-۲-۳ خواص حرارتی..... ۵

۱-۲-۴ خواص شیمیایی..... ۵

۱-۲-۵ خواص الکتریکی..... ۶

۱-۲-۶ خواص مغناطیسی..... ۶

۱-۳ روش های تولید نانوذرات نقره..... ۷

۱-۳-۱ روش های رسوب دهی..... ۸

۱-۳-۲ روش پراکندگی نظیر کاهش با لیزر..... ۹

۱-۴ کاربرد نانوذرات نقره..... ۹

۱-۴-۱ طیف سنج رامان سطح افزایش یافته..... ۹

۱-۴-۲ حسگرها و حسگرهای محیطی..... ۱۰

۱-۴-۳ فعالیت کاتالیستی..... ۱۰

۱-۴-۴ فعالیت ضد میکروبی..... ۱۱

۱-۴-۵ صنایع الکترونیکی و تکنولوژی اطلاعات..... ۱۱

۱-۵ جذب نور توسط نانوذرات فلزی..... ۱۱

۱-۶ مروری بر تعاریف مهم..... ۱۲

۱-۷ هدف از انجام پایان نامه..... ۱۲

فصل دوم: مروری بر پژوهش های پیشین

۲-۱ مروری بر پژوهش های پیشین بر زمان تأخیر ۱۵

۲-۱-۱ تئوری کلاسیک هسته زایی همگن ۱۸

۲-۲ روش های اندازه گیری زمان تأخیر ۲۴

۲-۳ مروری بر تعیین سینتیک کریستالیزاسیون ۲۵

فصل سوم: تئوری

۳-۱ کریستالیزاسیون واکنشی ۲۸

۳-۲ سینتیک کریستالیزاسیون ۳۰

۳-۲-۱ هسته زایی ۳۱

۳-۲-۲ رشد کریستال ها ۳۳

۳-۳ زمان تأخیر ۳۵

۳-۴ تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی ۳۶

۳-۴-۱ پیش بینی زمان تأخیر توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی ۳۶

۳-۴-۲ پیش بینی اثر دانه کریستالی بر زمان تأخیر ۳۹

۳-۴-۳ تعیین انرژی فعالسازی تجمع خوشه ها ۴۰

۳-۵ مدل انعقاد خوشه ها ۴۱

۳-۵-۱ پیش بینی زمان تأخیر توسط مدل انعقاد خوشه ها ۴۱

۳-۵-۲ پیش بینی اثر دانه کریستالی بر زمان تأخیر ۴۲

۳-۶ مدل انعقاد خوشه کاشچیف ۴۳

۳-۷ اثر ناخالصی بر زمان تأخیر نانوذرات نقره ۴۵

فصل چهارم : روش انجام آزمایش ها

۴-۱ مواد آزمایشگاهی ۴۷

۴-۲ سامانه آزمایشگاهی ۴۷
۴-۳ واکنش تولید نانوذرات نقره ۴۸
۴-۴ آزمایش اندازه گیری زمان تأخیر نانوذرات نقره ۴۹
۴-۵ آزمایش اندازه گیری اثر ناخالصی بر زمان تأخیر نانوذرات نقره ۵۰
۴-۶ آزمایش اندازه گیری اثر دانه کریستالی بر زمان تأخیر نانوذرات نقره ۵۱

فصل پنجم: بحث و نتیجه گیری

۵-۱ تعیین زمان تأخیر کریستالیزاسیون واکنشی نانوذرات نقره ۵۴
۵-۲ بررسی زمان تأخیر تشکیل نانوذرات نقره ۵۶
۵-۲-۱ اثر میزان فوق اشباع بر زمان تأخیر نانوذرات نقره ۵۶
۵-۲-۲ اثر دما بر زمان تأخیر نانوذرات نقره ۵۷
۵-۳ بررسی اثر ناخالصی بر زمان تأخیر نانوذرات نقره ۵۸
۵-۴ بررسی اثر دانه کریستالی بر زمان تأخیر نانوذرات نقره ۶۲
۵-۵ روش به دست آوردن انحراف مطلق ۶۳
۵-۶ تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی ۶۴
۵-۶-۱ مدلسازی زمان تأخیر تشکیل نانوذرات نقره ۶۴
۵-۶-۱-۱ تخمین کشش سطحی و ضریب تجمع خوشه های نانوذرات نقره ۶۴
۵-۶-۱-۲ تخمین انرژی فعالسازی تشکیل خوشه های نانوذرات نقره ۶۸
۵-۶-۲ بررسی اثر ناخالصی بر زمان تأخیر نانوذرات نقره ۶۹
۵-۶-۲-۱ تخمین کشش سطحی و ضریب تجمع خوشه های در حضور ناخالصی ۶۹
۵-۶-۳ بررسی اثر دانه کریستالی بر زمان تأخیر نانوذرات نقره ۹۰
۵-۷ مدل انعقاد خوشه ها ۹۴
۵-۷-۱ مدلسازی زمان تأخیر تشکیل نانوذرات نقره ۹۵

۵-۷-۱-۱ محاسبه انرژی گیبس لازم برای تشکیل نانوذرات نقره ۹۸
۵-۷-۲ بررسی اثر ناخالصی بر زمان تأخیر نانوذرات نقره..... ۱۰۰
۵-۷-۳ بررسی اثر دانه کریستالی بر زمان تأخیر نانوذرات نقره ۱۱۶
۵-۸ مدل انعقاد خوشه کاشچیف..... ۱۱۹
۵-۸-۱ تخمین چگالی ماگما نانوذرات نقره..... ۱۲۰
۵-۸-۲ مدلسازی زمان تأخیر تشکیل نانوذرات نقره..... ۱۲۳
۵-۸-۳ بررسی اثر ناخالصی بر زمان تأخیر نانوذرات نقره..... ۱۲۵
۵-۸-۴ بررسی اثر دانه کریستالی بر زمان تأخیر نانوذرات نقره..... ۱۳۵
۵-۹ بیان و مقایسه مدل های کشش سطحی..... ۱۳۸
۵-۱۰ مقایسه مدل های پیش بینی کننده زمان تأخیر نانوذرات نقره ۱۴۰

فصل ششم: نتیجه گیری نهایی و پیشنهادات

۶-۱ نتیجه گیری..... ۱۴۵
۶-۲ پیشنهادهای پژوهش های آتی..... ۱۴۷
پیوست..... ۱۴۸
مراجع ۱۵۰

فهرست علائم

a_{ij}	ضریب تجمع دو خوشه	-
A	ثابت همکر	(J)
AAD	انحراف مطلق میانگین	-
A_{abs}	مقدار جذب محلول	-
b_{ij}	ضریب شکست خوشه ها	-
B	سرعت هسته زایی	$(no./m^3s)$
C_0	غلظت اولیه محلول	(mol/l)
C_0'	غلظت محلول در مجاورت دانه کریستالی	(mol/l)
C	غلظت محلول	(mol/l)
C_{ext}	ضریب خاموشی	-
C_g	ضریب شکلی	-
C_n	غلظت خوشه ها با اندازه n	(mol/l)
C_s	غلظت مولی حل شونده در فاز جامد تشکیل شده	(mol/l)
C_{sat}	غلظت اشباع	(mol/l)
C^*	غلظت تعادلی محلول	(mol/l)
d	فاصله بین هسته ها	(m)
$d_{Impeller}$	قطر همزن	(m)
D_{ab}	ضریب نفوذ جرمی	(m^2/s)
D_s	ضریب نفوذ سطحی	(m^2/s)
E_a	انرژی فعالسازی	(J/mol)
f_v	فاکتور اندازه حجمی	-
f_a	فاکتور اندازه سطحی	-

g_c	اندازه بحرانی خوشه ها	-
$\overline{g}$	اندازه غالب خوشه ها	-
G	سرعت رشد	(m/s)
I	شدت نور	(cd)
k	ثابت بولتزمن	(J/°k)
$K_{i=1,2,3}$	ثابت سرعت تجمع خوشه ها	(m^3/mol.s)
L	اندازه	(m)
m	عدد ابعادی	-
M	جرم	(kg)
M_T	دانسیته ماگما	(g/g)
M_W	جرم مولکولی	(g/mol)
n	مرتبه هسته زایی	-
n_1	تعداد غلظت مونومرها	(no./m^3)
$\overline{n}$	اندازه متوسط خوشه ها	-
$n_{\overline{g}}$	تعداد غلظت $\overline{g}$ تایی ها	(no./m^3)
$n'_{\overline{g}}$	تعداد غلظت $\overline{g}$ تایی ها در فاصله d از سطح دانه کریستالی	(no./m^3)
N	دور همزن	(rev/s)
N_A	عدد آووگادرو	(no./mol)
N_{np}	تعداد نانوذرات در واحد حجم	(no./m^3)
N_p	عدد توانی	-
r	شعاع	(m)
r_1	شعاع اتم های کروی تشکیل دهنده محلول	(m)
r_c	شعاع بحرانی	(m)

r_g	شعاع کریستال های قابل مشاهده در محلول	(m)
$r_{\bar{g}}$	شعاع $\bar{g}$ تایی ها	(m)
R	ثابت جهانی گازها	(J/mol°k)
S	فوق اشباع	-
t	زمان	(s)
t_g	زمان رشد	(s)
t_{ind}	زمان تأخیر	(s)
t_n	زمان هسته زایی	(s)
t_r	زمان استراحت	(s)
T	دما محلول	(°k)
V	حجم	(m^3)
V_d	حجم فاز جدید کریستال های قابل مشاهده در محلول	(m^3)
V_m	حجم اتم	(m^3)
x	ضخامت لایه فیلمی	(m)
x^*	کسر مولی حلالیت	-
ΔC	اختلاف غلظت	(mol/l)
ΔG	انرژی آزاد گیبس	(J)
ΔG_s	انرژی آزاد گیبس لازم برای ایجاد سطح	(J)
ΔG_v	انرژی آزاد گیبس در واحد حجم	(J)
$\Delta G_{\bar{g}}$	انرژی آزاد گیبس لازم برای تشکیل $\bar{g}$ تایی ها	(J)
Δt	اختلاف زمان	(s)
α	کسر حجمی فاز جدید تشکیل شده	-
ε	انحراف مطلق	-

ε_0	سرعت اتلاف انرژی	(W/kg)
ρ	چگالی محلول	(kg/m^3)
δ	کشش سطحی	(J/m^2)
η	ویسکوزیته محلول	($N.s/m^2$)

فهرست نمودارها

نمودار(۱-۱): رابطه استحکام و سختی مواد نانومتری با اندازه دانه ۴

نمودار(۲-۱): مقایسه زمان ها: t_n زمان هسته زایی، t_{ind} زمان تأخیر، t_{lp} زمان نهفته، C^* غلظت اشباع تعادلی محلول . ۱۷

نمودار(۲-۲): نمودار انرژی آزاد گیبس ۱۹

نمودار(۲-۳): زمان تأخیر با تابعیتی از فوق اشباع برای کریستالیزاسیون واکنشی $CaCO_3$ در دمای $25^\circ c$ ۲۲

نمودار(۲-۴): زمان تأخیر با تابعیتی از فوق اشباع برای سیستم $Ni(NH_4)_2(SO_4)_2.6H_2O$ ۲۲

نمودار(۳-۱): شرایط فرآیند کریستالیزاسیون واکنشی ۲۸

نمودار(۳-۲): دسته بندی هسته زایی ۳۲

نمودار(۳-۳): نمودار فوق اشباع بر حسب زمان در کریستالیزاسیون واکنشی ۳۶

نمودار(۵-۱): زمان تأخیر کریستالیزاسیون واکنشی نانوذرات نقره در دما و فوق اشباع های مختلف ۵۷

نمودار(۵-۲): تغییرات زمان تأخیر نانوذرات نقره در حضور ناخالصی بر حسب فوق اشباع محلول در دمای $25^\circ c$ ۵۹

نمودار(۵-۳): تغییرات زمان تأخیر نانوذرات نقره در حضور ناخالصی بر حسب فوق اشباع محلول در دمای $35^\circ c$ ۵۹

نمودار(۵-۴): تغییرات زمان تأخیر نانوذرات نقره در حضور ناخالصی بر حسب فوق اشباع محلول در دمای $45^\circ c$ ۶۰

نمودار(۵-۵): تغییرات زمان تأخیر نانوذرات نقره در حضور ناخالصی بر حسب غلظت ناخالصی در فوق اشباع 1×10^8 ..... ۶۰

نمودار(۵-۶): تغییرات زمان تأخیر نانوذرات نقره در حضور ناخالصی بر حسب غلظت ناخالصی در فوق اشباع $2/5\times10^8$ ۶۰

نمودار(۵-۷): تغییرات زمان تأخیر نانوذرات نقره در حضور ناخالصی بر حسب غلظت ناخالصی در فوق اشباع $3/5\times10^8$ ۶۱

نمودار(۵-۸): تغییرات زمان تأخیر نانوذرات نقره در حضور ناخالصی بر حسب غلظت ناخالصی در فوق اشباع 5×10^8 ..... ۶۱

نمودار(۵-۹): تغییرات زمان تأخیر نانوذرات نقره در حضور ناخالصی بر حسب غلظت ناخالصی در فوق اشباع 10×10^8 ..... ۶۱

نمودار(۵-۱۰): تغییرات زمان تأخیر نانوذرات نقره در حضور ناخالصی بر حسب غلظت ناخالصی در فوق اشباع ۱۵×۱۰^{۸} ۶۲
نمودار(۵-۱۱): تغییرات زمان تأخیر نانوذرات نقره در حضور دانه کریستالی بر حسب فوق اشباع محلول در دماهای ۲۵°c، ۳۵°c و ۴۵°c ۶۳
نمودار(۵-۱۲): مقایسه داده های آزمایشگاهی زمان تأخیر با بهترین مدل پیش بینی کننده زمان تأخیر تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی در دماهای ۲۵°c، ۳۵°c و ۴۵°c ۶۷
نمودار(۵-۱۳): تغییرات $\ln K_3$ بر حسب $\frac{1}{T}$ ۶۸
نمودار(۵-۱۴): داده های تئوری و آزمایشگاهی زمان تأخیر در حضور ناخالصی در دمای ۲۵°c توسط مدل انعقاد اسمولوچوفسکی ۷۷
نمودار(۵-۱۵): داده های تئوری و آزمایشگاهی زمان تأخیر در حضور ناخالصی در دمای ۳۵°c توسط مدل انعقاد اسمولوچوفسکی ۸۴
نمودار(۵-۱۶): داده های تئوری و آزمایشگاهی زمان تأخیر در حضور ناخالصی در دمای ۴۵°c توسط مدل انعقاد اسمولوچوفسکی ۸۵
نمودار(۵-۱۷): کشش سطحی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب نسبت غلظت ناخالصی به غلظت نقره در دمای ۲۵°c ۸۶
نمودار(۵-۱۸): کشش سطحی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب نسبت غلظت ناخالصی به غلظت نقره در دمای ۳۵°c ۸۶
نمودار(۵-۱۹): کشش سطحی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب نسبت غلظت ناخالصی به غلظت نقره در دمای ۴۵°c ۸۶
نمودار(۵-۲۰): کشش سطحی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب غلظت ناخالصی در دمای ۲۵°c ۸۷
نمودار(۵-۲۱): کشش سطحی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب غلظت ناخالصی در دمای ۳۵°c ۸۷

نمودار(۵-۲۲): کشش سطحی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب غلظت ناخالصی در دمای ۴۵°c ۸۷
نمودار(۵-۲۳): ضریب تجمعی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب نسبت غلظت ناخالصی به غلظت نقره در دمای ۲۵°c ۸۸
نمودار(۵-۲۴): ضریب تجمعی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب نسبت غلظت ناخالصی به غلظت نقره در دمای ۳۵°c ۸۸
نمودار(۵-۲۵): ضریب تجمعی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب نسبت غلظت ناخالصی به غلظت نقره در دمای ۴۵°c ۸۹
نمودار(۵-۲۶): ضریب تجمعی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب غلظت ناخالصی در دمای ۲۵°c ۸۹
نمودار(۵-۲۷): ضریب تجمعی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب غلظت ناخالصی در دمای ۳۵°c ۸۹
نمودار(۵-۲۸): ضریب تجمعی تخمین زده شده توسط تئوری انعقاد اسمولوچوفسکی بر حسب غلظت ناخالصی در دمای ۴۵°c ۹۰
نمودار(۵-۲۹): مقایسه زمان تأخیر آزمایشگاهی و تئوری در حالت های بدون حضور دانه کریستالی با حضور دانه کریستالی توسط مدل انعقاد اسمولوچوفسکی در دمای ۲۵°c ۹۳
نمودار(۵-۳۰): مقایسه زمان تأخیر آزمایشگاهی و تئوری در حالت های بدون حضور دانه کریستالی با حضور دانه کریستالی توسط مدل انعقاد اسمولوچوفسکی در دمای ۳۵°c ۹۴
نمودار(۵-۳۱): مقایسه زمان تأخیر آزمایشگاهی و تئوری در حالت های بدون حضور دانه کریستالی با حضور دانه کریستالی توسط مدل انعقاد اسمولوچوفسکی در دمای ۴۵°c ۹۴
نمودار(۵-۳۲): نمودار زمان تأخیر آزمایشگاهی و تئوری توسط مدل انعقاد خوشه ها در $\overline{g} = 1$ ۹۷
نمودار(۵-۳۳): تغییرات انرژی گیبس لازم برای تشکیل محلول حاوی نانوذرات نقره در دمای ۲۵°c ۹۹
نمودار(۵-۳۴): تغییرات انرژی گیبس لازم برای تشکیل محلول حاوی نانوذرات نقره در دمای ۳۵°c ۹۹

نمودار(۵-۳۵): تغییرات انرژی گیبس لازم برای تشکیل محلول حاوی نانوذرات نقره در دمای ۴۵°c ۹۹
نمودار(۵-۳۶): داده های تئوری و آزمایشگاهی زمان تأخیر در حضور ناخالصی در دمای ۲۵°c توسط مدل انعقادخوشه ها ۱۰۷
نمودار(۵-۳۷): داده های تئوری و آزمایشگاهی زمان تأخیر در حضور ناخالصی در دمای ۳۵°c توسط مدل انعقادخوشه ها ۱۱۲
نمودار(۵-۳۸): داده های تئوری و آزمایشگاهی زمان تأخیر در حضور ناخالصی در دمای ۴۵°c توسط مدل انعقادخوشه ها ۱۱۳
نمودار(۵-۳۹): کشش سطحی تخمین زده شده توسط مدل انعقادخوشه ها بر حسب نسبت غلظت ناخالصی به غلظت نقره در دمای ۲۵°c ۱۱۴
نمودار(۵-۴۰): کشش سطحی تخمین زده شده توسط مدل انعقادخوشه ها بر حسب نسبت غلظت ناخالصی به غلظت نقره در دمای ۳۵°c ۱۱۴
نمودار(۵-۴۱): کشش سطحی تخمین زده شده توسط مدل انعقادخوشه ها بر حسب نسبت غلظت ناخالصی به غلظت نقره در دمای ۴۵°c ۱۱۴
نمودار(۵-۴۲): کشش سطحی تخمین زده شده توسط مدل انعقادخوشه ها بر حسب غلظت ناخالصی در دمای ۲۵°c ۱۱۵
نمودار(۵-۴۳): کشش سطحی تخمین زده شده توسط مدل انعقادخوشه ها بر حسب غلظت ناخالصی در دمای ۳۵°c ۱۱۵
نمودار(۵-۴۴): کشش سطحی تخمین زده شده توسط مدل انعقادخوشه ها بر حسب غلظت ناخالصی در دمای ۴۵°c ۱۱۵
نمودار(۵-۴۵): مقایسه زمان تأخیر آزمایشگاهی و تئوری در حالت های بدون حضور دانه کریستالی با حضور دانه کریستالی توسط مدل انعقاد خوشه ها در دمای ۲۵°c ۱۱۸
نمودار(۵-۴۶): مقایسه زمان تأخیر آزمایشگاهی و تئوری در حالت های بدون حضور دانه کریستالی با حضور دانه کریستالی توسط مدل انعقاد خوشه ها در دمای ۳۵°c ۱۱۹

نمودار(۵-۴۷): مقایسه زمان تأخیر آزمایشگاهی و تئوری در حالت های بدون حضور دانه کریستالی با حضور دانه کریستالی توسط مدل انعقاد خوشه ها در دمای ۴۵°c ۱۱۹
نمودار(۵-۴۸): داده های تئوری و آزمایشگاهی زمان تأخیر در حضور ناخالصی در دمای ۲۵°c توسط مدل انعقادخوشه های کاشچیف ۱۲۸
نمودار(۵-۴۹): داده های تئوری و آزمایشگاهی زمان تأخیر در حضور ناخالصی در دمای ۳۵°c توسط مدل انعقادخوشه های کاشچیف ۱۳۴
نمودار(۵-۵۰): داده های تئوری و آزمایشگاهی زمان تأخیر در حضور ناخالصی در دمای ۴۵°c توسط مدل انعقادخوشه های کاشچیف ۱۳۵
نمودار(۵-۵۱): مقایسه زمان تأخیر آزمایشگاهی و تئوری در حالت های بدون حضور دانه کریستالی با حضور دانه کریستالی توسط مدل انعقاد خوشه ها در دمای ۲۵°c ۱۳۷
نمودار(۵-۵۲): مقایسه زمان تأخیر آزمایشگاهی و تئوری در حالت های بدون حضور دانه کریستالی با حضور دانه کریستالی توسط مدل انعقاد خوشه ها در دمای ۳۵°c ۱۳۸
نمودار(۵-۵۳): مقایسه زمان تأخیر آزمایشگاهی و تئوری در حالت های بدون حضور دانه کریستالی با حضور دانه کریستالی توسط مدل انعقاد خوشه ها در دمای ۴۵°c ۱۳۸