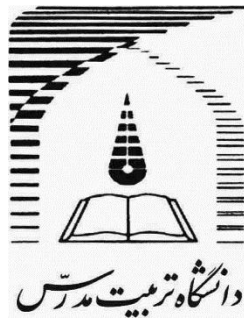


سورة الاحقاف



دانشکده مهندسی شیمی

رساله دکتری مهندسی شیمی

مدل سازی ترمودینامیکی و بررسی آزمایشگاهی تشکیل رسوب‌های معدنی در محیط‌های متخلخل بر اثر سیلاب زنی

محمدجواد کمالی

استاد راهنما :

دکتر علی حق طلب

استاد مشاور:

دکتر عباس شهرآبادی

خرداد ماه ۱۳۹۳

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از رساله دکتری

آقای محمدجواد کمالی رساله ۲۴ واحدی خود را با عنوان مدل سازی ترمودینامیکی و بررسی آزمایشگاهی تشکیل رسوب های معدنی در محیط های متخلخل بر اثر سیلاب زنی در تاریخ ۱۳۹۳/۳/۷ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این رساله را از نظر فرم و محتوا تایید کرده، پذیرش آنرا برای اخذ درجه دکتری مهندسی شیمی پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر علی حق طلب	استاد	
استاد مشاور	دکتر عباس شهرآبادی	استادیار	غ
استاد ناظر	دکتر محمدرضا امیدخواه نسرین	استاد	غ
استاد ناظر	دکتر مجتبی صدر عاملی	استاد	
استاد ناظر	دکتر علیرضا بهرامیان	استادیار	
استاد ناظر	دکتر سید شهاب الدین آیت اللهی	استاد	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر مجتبی صدر عاملی	استاد	

این نسخه به عنوان نسخه نهایی پایان نامه / رساله مورد تأیید است

امضاء استاد راهنما:



آیین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس

مقدمه: با عنایت به سیاست‌های پژوهشی و فناوری دانشگاه در راستای تحقق عدالت و کرامت انسانها که لازمه شکوفایی علمی و فنی است و رعایت حقوق مادی و معنوی دانشگاه و پژوهشگران، لازم است اعضای هیأت علمی، دانشجویان، دانش‌آموختگان و دیگر همکاران طرح، در مورد نتایج پژوهش‌های علمی که تحت عناوین پایان‌نامه، رساله و طرح‌های تحقیقاتی با هماهنگی دانشگاه انجام شده است، موارد زیر را رعایت نمایند:

ماده ۱- حق نشر و تکثیر پایان‌نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آنها متعلق به دانشگاه نمی‌باشد ولی حقوق معنوی پدید آورندگان محفوظ خواهد بود.

ماده ۲- انتشار مقاله یا مقالات مستخرج از پایان‌نامه/ رساله به صورت چاپ در نشریات علمی و یا ارائه در مجامع علمی باید به نام دانشگاه بوده و با تایید استاد راهنمای اصلی، یکی از اساتید راهنما، مشاور و یا دانشجو مسئول مکاتبات مقاله باشد. ولی مسئولیت علمی مقاله مستخرج از پایان‌نامه و رساله به عهده اساتید راهنما و دانشجو می‌باشد.

تبصره: در مقالاتی که پس از دانش‌آموختگی بصورت ترکیبی از اطلاعات جدید و نتایج حاصل از پایان‌نامه/ رساله نیز منتشر می‌شود نیز باید نام دانشگاه درج شود.

ماده ۳- انتشار کتاب، نرم افزار و یا آثار ویژه (اثری هنری مانند فیلم، عکس، نقاشی و نمایشنامه) حاصل از نتایج پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی کلیه واحدهای دانشگاه اعم از دانشکده ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین‌نامه های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته ها در جشنواره‌های ملی، منطقه‌ای و بین‌المللی که حاصل نتایج مستخرج از پایان‌نامه/ رساله و تمامی طرح‌های تحقیقاتی دانشگاه باید با هماهنگی استاد راهنما یا مجری طرح از طریق معاونت پژوهشی دانشگاه انجام گیرد.

ماده ۵- این آیین‌نامه در ۵ ماده و یک تبصره در تاریخ ۸۷/۴/۱ در شورای پژوهشی و در تاریخ ۸۷/۴/۲۳ در هیأت رئیسه دانشگاه به تایید رسید و در جلسه مورخ ۸۷/۷/۱۵ شورای دانشگاه به تصویب رسیده و از تاریخ تصویب در شورای دانشگاه لازم‌الاجرا است.

«اینجانب.....^{۴۲۲۲۴} دانشجوی رشته.....^۲ متعهد می‌شوم کلیه نکات مندرج در آئین‌نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته‌های علمی مستخرج از پایان‌نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین‌نامه فوق‌الاشعار به دانشگاه وکالت و نمایندگی می‌دهم که از طرف اینجانب نسبت به لغو امتیاز اختراع بنام بنده و یا هر گونه امتیاز دیگر و تغییر آن به نام دانشگاه اقدام نماید. ضمناً نسبت به جبران فوری ضرر و زیان حاصله بر اساس برآورد دانشگاه اقدام خواهم نمود و بدینوسیله حق هر گونه اعتراض را از خود سلب نمودم»

امضاء:.....
تاریخ: ۸۷/۴/۲۳

آیین نامه چاپ پایان نامه (رساله) های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه (رساله) های تحصیلی دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس، مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشگاه است بنابراین به منظور آگاهی و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان این دانشگاه نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه (رساله) ی خود، مراتب را قبلاً به طور کتبی به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اطلاع دهد.

ماده ۲: در صفحه سوم کتاب (پس از برگ شناسنامه) عبارت ذیل را چاپ کند:
«کتاب حاضر، حاصل پایان نامه کارشناسی ارشد / رساله دکتری نگارنده در رشته فلسفه است که در سال ۱۳۹۳ در دانشکده فلسفه دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی سرکار مجتهد / جناب آقای دکتر محمد علی ، مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر محمد علی و مشاوره سرکار خانم / جناب آقای دکتر محمد علی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت چاپ) را به «دفتر نشر آثار علمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر در معرض فروش قرار دهد.

ماده ۴: در صورت عدم رعایت ماده ۳، ۵۰٪ بهای شمارگان چاپ شده را به عنوان خسارت به دانشگاه تربیت مدرس، تأدیه کند.

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می دهد به منظور استیفای حقوق خود، از طریق دادگاه، معادل وجه مذکور در ماده ۴ را از محل توقیف کتابهای عرضه شده نگارنده برای فروش، تامین نماید.

ماده ۶: اینجانب محمد علی / دانشجوی رشته فلسفه مقطع دکتری

تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می شوم.

نام و نام خانوادگی: محمد علی

تاریخ و امضا: ۹۳/۳/۲۱

تقدیم بہ پدر و مادر عزیز و، مہمسر مہربانم

تشکر و قدردانی

سپاس مخصوص ذات باریتعالی است که از نجات انشس هستی معنا یافت و آدمی را معرفت.

از زحمات دلسوزانه استاد بزرگواری جناب آقای دکتر حق طلب که با رهنمودهایشان این مسیر دشوار آسان شد، متشکرم . از کمک ها و مشاوره های جناب آقای دکتر شهرآبادی در پژوهشگاه صنعت نفت نیز سپاسگذارم.

از دوستانم در دانشگاه تربیت مدرس، آقایان مظلومی، محمودی، مرزبان، شجاعیان، پرچ، محمدی، شهبازی و ...، از یاران مهربانم در پژوهشگاه صنعت نفت، آقایان گلقدردشتی، باقرزاده و ... و نیز دوستانم در باشگاه ورزشی، آقایان فیض آبادی و مرادی کمال امتنان و تشکر را دارم.

در نهایت از پدر، مادر، خواهر، برادران و همسر عزیزم تشکر و قدردانی می کنم.

چکیده

آب تزریقی به مخازن نفتی که برای ازدیاد برداشت و تثبیت فشار مخزن به مخازن نفتی تزریق می‌شود، عموماً حاوی مقادیر بالای یون سولفات است، در حالی که شورابه‌های سازندی مخزن حاوی غلظت بالای کاتیون‌هایی نظیر کلسیم، باریوم و استرنسیم است. در نتیجه در اثر فرایند تزریق، این دو آب به صورت ناسازگار با یکدیگر ترکیب شده و رسوب‌های سولفات کلسیم، باریوم و استرنسیم را به وجود می‌آورند. این رسوبات منافذ محیط متخلخل درون مخزن، دهانه چاه، مشبک‌ها و لوله‌های تولید و تزریق را مسدود و میزان تولید نفت را به شدت کاهش می‌دهد. برای شبیه‌سازی شرایط مخزن از آزمایش‌های سیلاب‌زنی در مغزه‌های ماسه سنگی استفاده شده است. آسیب سازندی ناشی از تشکیل رسوب سولفات کلسیم و استرنسیم در شرایط مختلف سرعت تزریق، فشار، دما، غلظت یون منیزیم و حضور بازدارنده تجاری DETPMP بررسی شد. هر چند که آسیب سازندی ناشی از تشکیل رسوب سولفات کلسیم نسبت به رسوب سولفات استرنسیم بیشتر است اما اثرات دما، فشار، سرعت تزریق، غلظت منیزیم و بازدارنده در هر دو مورد یکسان است. غلظت یون منیزیم تا 830 ppm و فشار تا 1500 psia اثری بر آسیب سازندی ندارد ولی با افزایش دما آسیب سازندی در مورد هر دو نمک افزایش می‌یابد. افزایش سرعت تزریق تا 12 cc/hr برای رسوب سولفات کلسیم و تا 18 cc/hr برای رسوب سولفات استرنسیم باعث افزایش آسیب سازندی می‌شود. ضریب فعالیت اجزاء در شورابه توسط مدل ضریب فعالیت ENRTL با پارامترهای بهینه شده محاسبه و اثرات دما و فشار بر روی ضریب حلالیت ترمودینامیکی نمک‌های سولفات بهینه می‌شود. خطای پیش بینی این مدل برای حلالیت سیستم‌های مختلف الکترولیتی $4/52$ درصد است. سپس به کمک معادلات تعادلی جامد-مایع، معادلات موازنه جرم و الکتروخثایی میزان تشکیل رسوب و نمایه اشباعیت هر رسوب در اثر اختلاط ناسازگار شورابه‌های مختلف محاسبه و با سایر مدل‌ها مقایسه می‌شود. با استفاده از فرضیات مناسب و حل دستگاه معادلات دیفرانسیل پاره‌ای موازنه جرم اجزاء، توزیع غلظت یون‌ها و رسوب در مقاطع مختلف مغزه تعیین می‌شود. سپس با استفاده از ضریب آسیب سازندی و غلظت رسوب در محیط متخلخل کاهش تراوایی به دست می‌آید. عدد بی‌بعد ضریب نفوذ و عدد Damkohler به ترتیب با خطای استاندارد $0/028$ و $0/066$ برای هر دو نمک محاسبه شد. درصد خطای نسبی در محاسبه آسیب سازندی برای نمک‌های سولفات کلسیم و استرنسیم به ترتیب $3/8$ و $1/57$ درصد است. ضریب آسیب سازندی نیز بر اساس قطره‌هیدرولیکی یا نمایه کیفی محیط متخلخل برای رسوب سولفات کلسیم و استرنسیم به ترتیب با خطای نسبی $7/54$ و $6/33$ درصد پیش بینی می‌شود.

کلمات کلیدی: تزریق آب، اختلاط ناسازگار، تشکیل رسوب، مدل سینتیکی، مدل سازی ترمودینامیکی

فهرست

فصل اول : مقدمه.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ اهداف رساله.....	۴
۳-۱ ساختار رساله.....	۵
فصل دوم: مروری بر مطالعات تشکیل رسوب و آسیب سازندی در اثر سیلاب زنی.....	۶
۱-۲ مقدمه.....	۷
۲-۲ آسیب سازندی و ساز و کارهای آن.....	۷
۳-۲ سیلاب زنی و تشکیل رسوب.....	۹
۴-۲ ساز و کارهای تشکیل رسوب.....	۱۱
۵-۲ انواع رسوب‌های سولفات تشکیل شده در عملیات سیلاب زنی.....	۱۵
۱-۵-۲ رسوب سولفات کلسیم.....	۱۶
۲-۵-۲ رسوب سولفات باریم.....	۱۸
۳-۵-۲ رسوب سولفات استرنسیم.....	۱۹
۶-۲ بازدارندگی و جلوگیری از تشکیل رسوب.....	۱۹
۷-۲ مطالعات تشکیل رسوب در محیط متخلخل.....	۲۲
۱-۷-۲ مطالعات آزمایشگاهی.....	۲۲
۲-۷-۲ مطالعات مدل‌سازی.....	۴۰
فصل سوم: مدل‌سازی.....	۴۷
۱-۱-۳ مقدمه.....	۴۸

۴۸	۲-۱-۳ ضریب حلالیت عمومی و ضرایب فعالیت برای محلول‌های الکترولیتی مختلف
۵۰	۳-۱-۳ مدل‌های ضریب فعالیت
۵۲	۱-۳-۱-۳ مدل ضریب فعالیت E-NRTL
۵۵	۲-۳ مدل‌سازی سینتیکی تشکیل رسوب
۵۵	۱-۲-۳ مقدمه
۵۵	۲-۲-۳ تشکیل رسوب و آسیب‌سازندی در محیط متخلخل
۶۰	فصل چهارم: مواد، تجهیزات و روش‌های آزمایشگاهی
۶۱	۱-۴ مقدمه
۶۱	۲-۴ تهیه آب سینتیکی سازندی و تزریقی
۶۲	۳-۴ آماده‌سازی نمونه‌های مغزه و اندازه‌گیری تخلخل و تراوایی مطلق آن‌ها
۶۶	۴-۴ کاهش تراوایی و آسیب‌سازندی
۶۸	فصل پنجم: نتایج و بحث
۶۹	۱-۵ مقدمه
۶۹	۲-۵ نتایج آزمایشگاهی
۶۹	۱-۲-۵ محاسبه تراوایی و تخلخل مغزه‌ها
۷۲	۲-۲-۵ تشکیل رسوب و کاهش تراوایی مغزه
۷۳	۱-۲-۲-۵ تاثیر یون منیزیم
۷۵	۲-۲-۲-۵ تاثیر سرعت تزریق
۷۹	۳-۲-۲-۵ تاثیر فشار
۸۲	۴-۲-۲-۵ تاثیر دما
۸۵	۵-۲-۲-۵ اثر افزایش غلظت بازدارنده DETPMP
۸۹	۶-۲-۲-۵ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح برش خورده مغزه

۹۳	۳-۵ نتایج مدل سازی ترمودینامیکی تشکیل رسوب
۹۴	۱-۳-۵ بهینه سازی پارامترهای مدل E-NRTL و معادله ضریب حلالیت
۱۰۷	۲-۳-۵ محاسبه تشکیل رسوب
۱۲۱	۴-۵ نتایج مدل سازی سینتیکی و آسیب سازندی
۱۲۲	۱-۴-۵ توزیع غلظت اجزاء در محیط متخلخل
۱۳۹	۳-۴-۵ آسیب سازندی محیط متخلخل
۱۴۹	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها
۱۵۰	۱-۶ نتیجه گیری
۱۵۲	۲-۶ پیشنهادها
۱۵۳	مراجع
۱۶۱	پیوست

فهرست علائم و نشانه‌ها

فعالیت	<i>a</i>
ضریب فرکانسی (M^{-1}/s)	A
سطح مقطع (m^2)	A
خطای نسبی	AAD
غلظت مولی (M)	c
ضریب نفوذ (m^2/s)، قطر هیدرولیکی متوسط (m)	D
قطر مغزه (m)	d
انرژی فعال سازی واکنش (J/mol)	E
شورابه سازندی	FW
انرژی آزاد گیبس (kJ/kmol)	G
قدرت یونی	I
تراوایی مغزه (mD)	K
تراوایی اولیه مغزه (mD)	K₀
ثابت سرعت واکنش (L/mol.s)	k_{rxn}
ضریب حلالیت	K_{sp}
طول (m)	L
حلالیت (molal)	m
مول	n
عدد آووگادرو	N_A
تعداد نقاط	N_p
فشار (Pa)	P
عدد پکلت	Pe
حجم منافذ خالی مغزه (m^3)	PV
افت فشار (Pa)	ΔP
دبی تزریقی (cc/hr)	q
ثابت جهانی گازها (kJ/kmol.K)	R
سرعت واکنش (mol/l.s)	r

ریشه متوسط مربعات خطا	RMSE
نمایه کیفی مخزن	RQI
نمایه اشباعیت	SI
مجموع مربعات خطا	SSE
آب دریا	SW
دما (K)	T
زمان (s)	t
غلظت نمک حل شده (mg/L)	TDS
سرعت خطی (m/s)	U
حجم محلول (m^3)	V
کسر مولی، طول مغزه	x
کسر مولی موضعی	X
بار یونی	z
ظرفیت گرمایی استاندارد (kJ/kmol.K)	ΔC_{p0}
انرژی گیبس استاندارد (kJ/kmol)	ΔG_0
آنتالپی استاندارد (kJ/kmol)	ΔH_0

نشانه‌های یونانی

ضریب فشاری بهینه، ضریب غیرتصادفی	α
ضریب فشاری بهینه، ضریب آسیب سازندی (1/ppm)	β
ضریب فعالیت	γ
عدد نفوذ بی بعد	ε_D
عدد <i>Damkohler</i>	ε_k
ویسکوزیته سیال (cp)	μ
دانسیته (mol/m^3)	ρ
ضریب برهمکنش	τ
ضریب استوکیومتری	ν
تخلخل	ϕ
بالانویس و زیرنویس‌ها	
متوسط	\pm
استاندارد، اولیه	0
حالت مرجع رقت بی نهایت	∞

آنیون	A
کاتیون	C
محاسبه شده	cal
آزمایشگاهی	exp
ترکیب موضعی	LC
برد بلند	LR
برد کوتاه	SR
آب	w

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲. تقسیم بندی ساز و کارهای آسیب سازندی ۹
- شکل ۲-۲. تشکیل رسوب در مناطق مختلف ۱۱
- شکل ۳-۲. هسته‌زایی همگن (سمت راست) و ناهمگن (سمت چپ)..... ۱۲
- شکل ۴-۲. آسیب در چاه تولیدی ناشی تولید رسوب در محیط نزدیک دهانه چاه ۱۴
- شکل ۵-۲. اثر تغییر دما بر حلالیت گچ ، همی‌هیدرات و انیدریت در آب خالص ۱۷
- شکل ۶-۲. تفرق و پایدارسازی به وسیله بازدارنده‌ها ۲۲
- شکل ۱-۳. شماتیک حرکت آب تزریقی در طول مغزه اشباع شده از شورابه سازندی ۵۶
- شکل ۱-۴. سیستم آزمایشگاهی سیلاب زنی در مغزه ۶۳
- شکل ۲-۴. نگه دارنده مغزه، غلاف لاستیکی و توزیع کننده آن ۶۴
- شکل ۳-۴. محفظه انتقالی ۶۵
- شکل ۱-۵. دبی تزریق آب سازندی بر حسب افت فشار پایا در نمونه مغزه ۴ ۷۱
- شکل ۲-۵. دبی تزریق آب سازندی بر حسب افت فشار پایا در نمونه مغزه ۵ ۷۱
- شکل ۳-۵. دبی تزریق آب سازندی بر حسب افت فشار پایا در نمونه مغزه ۷ ۷۲
- شکل ۴-۵. کاهش تراوایی ناشی از رسوب سولفات کلسیم در غلظت‌های مختلف یون منیزیم ۷۴
- شکل ۵-۵. کاهش تراوایی ناشی از رسوب سولفات استرنسیم در غلظت‌های مختلف یون منیزیم ۷۴
- شکل ۶-۵. کاهش تراوایی ناشی از تشکیل رسوب سولفات کلسیم در سرعت تزریق مختلف آب دریا ۷۶
- شکل ۷-۵. کاهش تراوایی ناشی از تشکیل رسوب سولفات استرنسیم در سرعت تزریق مختلف آب دریا ۷۶
- شکل ۸-۵. تغییرات غلظت یون‌های کلسیم و منیزیم خروجی از مغزه بر حسب حجم آب تزریقی در دبی‌های تزریقی مختلف آب دریا (رسوب سولفات کلسیم) ۷۸
- شکل ۹-۵. تغییرات غلظت یون‌های استرنسیم و منیزیم خروجی از مغزه بر حسب حجم آب تزریقی در دبی‌های تزریقی مختلف آب دریا (رسوب سولفات استرنسیم) ۷۹

- شکل ۵-۱۰. تغییرات کاهش تراوایی مغزه در فشارهای مختلف بر حسب حجم آب تزریقی (رسوب سولفات کلسیم)..... ۸۰
- شکل ۵-۱۱. تغییرات کاهش تراوایی مغزه در فشارهای مختلف بر حسب حجم آب تزریقی (رسوب سولفات استرنسیم)..... ۸۱
- شکل ۵-۱۲. تغییرات کاهش تراوایی مغزه در دماهای مختلف بر حسب حجم آب تزریقی (رسوب سولفات کلسیم)..... ۸۳
- شکل ۵-۱۳. تغییرات کاهش تراوایی مغزه در دماهای مختلف بر حسب حجم آب تزریقی (رسوب سولفات استرنسیم)..... ۸۳
- شکل ۵-۱۴. تغییرات غلظت یون منیزیم و کلسیم خروجی از مغزه بر حسب حجم آب تزریقی در دماهای مختلف..... ۸۵
- شکل ۵-۱۵. تغییرات غلظت یون استرنسیم خروجی از مغزه بر حسب حجم آب تزریقی در دماهای مختلف.. ۸۵
- شکل ۵-۱۶. تغییرات کاهش تراوایی مغزه بر حسب حجم آب تزریقی در مقادیر مختلف غلظت بازدارنده (رسوب سولفات کلسیم)..... ۸۶
- شکل ۵-۱۷. تغییرات کاهش تراوایی مغزه بر حسب حجم آب تزریقی در مقادیر مختلف غلظت بازدارنده (رسوب سولفات استرنسیم)..... ۸۷
- شکل ۵-۱۸. تغییرات غلظت یون کلسیم خروجی از مغزه بر حسب حجم آب تزریقی در مقادیر مختلف غلظت بازدارنده..... ۸۸
- شکل ۵-۱۹. تغییرات غلظت یون استرنسیم خروجی از مغزه بر حسب حجم آب تزریقی در مقادیر مختلف غلظت بازدارنده..... ۸۸
- شکل ۵-۲۰. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح برش خورده مغزه بدون تشکیل رسوب (الف) با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر (ب) با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر (ج) با بزرگنمایی ۴۰۰۰ برابر..... ۹۰
- شکل ۵-۲۱. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح برش خورده مغزه پس از تشکیل رسوب سولفات کلسیم (الف) با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر (ب) با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر (ج) با بزرگنمایی ۴۰۰۰ برابر..... ۹۱

- شکل ۵-۲۲. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطح برش خورده مغزه پس از تشکیل رسوب سولفات استرنسیم (الف) با بزرگنمایی ۱۰۰۰ برابر (ب) با بزرگنمایی ۲۰۰۰ برابر (ج) با بزرگنمایی ۴۰۰۰ برابر ۹۲
- شکل ۵-۲۳. مقادیر آزمایشی و محاسبه شده ضریب فعالیت متوسط نمک CaCl_2 توسط مدل E-NRTL در دماهای مختلف نسبت به ریشه قدرت یونی ۹۶
- شکل ۵-۲۴. مقادیر آزمایشی و محاسبه شده ضریب فعالیت متوسط نمک MgSO_4 توسط مدل E-NRTL در دماهای مختلف نسبت به ریشه قدرت یونی ۹۷
- شکل ۵-۲۵. داده‌های آزمایشی و محاسبه شده حلالیت سولفات کلسیم در دماهای مختلف نسبت به مولالیته نمک کلرید سدیم ۱۰۰
- شکل ۵-۲۶. داده‌های آزمایشی و محاسبه شده حلالیت سولفات باریم در دماهای مختلف نسبت به مولالیته نمک کلرید سدیم ۱۰۰
- شکل ۵-۲۷. داده‌های آزمایشی و محاسبه شده حلالیت سولفات استرنسیم در دماهای مختلف نسبت به مولالیته مولالیته نمک کلرید سدیم ۱۰۰
- شکل ۵-۲۸. پیش بینی دیاگرام فازی NaCl-KCl در سیستم الکترولیتی سه تایی با استفاده از مدل ضریب فعالیت E-NRTL و معادله ضریب حلالیت ۱۰۲
- شکل ۵-۲۹. پیش بینی دیاگرام فازی CsCl-KCl در سیستم الکترولیتی سه تایی با استفاده از مدل ضریب فعالیت E-NRTL و معادله ضریب حلالیت ۱۰۳
- شکل ۵-۳۰. پیش بینی دیاگرام فازی CsBr-KBr در سیستم الکترولیتی سه تایی با استفاده از مدل ضریب فعالیت E-NRTL و معادله ضریب حلالیت ۱۰۳
- شکل ۵-۳۱. پیش بینی دیاگرام فازی $\text{NaCl-Na}_2\text{SO}_4$ در سیستم الکترولیتی سه تایی با استفاده از مدل ضریب فعالیت E-NRTL و معادله ضریب حلالیت ۱۰۴
- شکل ۵-۳۲. نمودار پراکندگی داده‌های حلالیت آزمایشی و محاسبه شده سولفات کلسیم ۱۰۵
- شکل ۵-۳۳. نمودار پراکندگی داده‌های حلالیت آزمایشی و محاسبه شده سولفات باریم ۱۰۶
- شکل ۵-۳۴. نمودار پراکندگی داده‌های حلالیت آزمایشی و محاسبه شده سولفات استرنسیم ۱۰۶
- شکل ۵-۳۵. روندنا مدل پیش بینی رسوب ۱۱۱

- شکل ۵-۳۶. محاسبه تشکیل رسوب در دماهای مختلف برای شورابه‌های A، B و C ۱۱۵
- شکل ۵-۳۷. محاسبه تشکیل رسوب‌های سولفات‌ها برحسب نسبت آب دریا در مخلوط شورابه سازندی ۱ و آب تزریقی ۱ ۱۱۶
- شکل ۵-۳۸. محاسبه تشکیل رسوب‌های سولفات‌ها برحسب نسبت آب دریا در مخلوط شورابه سازندی ۱ و آب تزریقی ۲ ۱۱۶
- شکل ۵-۳۹. محاسبه تشکیل رسوب در اثر تزریق آب دریای شمال به آب سازندی Forties در دمای 25°C و فشار ۱ bar ۱۱۸
- شکل ۵-۴۰. فوق اشباعیت رسوب‌های سولفات‌ها در اثر تزریق آب دریای شمال به آب سازندی Forties در دمای 25°C و فشار ۱ bar ۱۱۸
- شکل ۵-۴۱. محاسبه تشکیل رسوب در اثر تزریق آب دریای شمال به آب سازندی Forties در دمای 100°C و فشار ۱ bar ۱۱۹
- شکل ۵-۴۲. فوق اشباعیت رسوب‌های سولفات‌ها در اثر تزریق آب دریای شمال به آب سازندی Forties در دمای 100°C و فشار ۱ bar ۱۱۹
- شکل ۵-۴۳. محاسبه تشکیل رسوب در اثر تزریق آب دریای شمال به آب سازندی Forties در دمای 100°C و فشار ۲۵ و فشار ۳۰۰ bar ۱۲۰
- شکل ۵-۴۴الف. تغییرات غلظت کلسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق 6cc/hr ، دمای 25°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL) ۱۲۵
- شکل ۵-۴۴ب. تغییرات غلظت کلسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق 12cc/hr ، دمای 25°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL) ۱۲۵
- شکل ۵-۴۴ج. تغییرات غلظت کلسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق 18cc/hr ، دمای 25°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL) ۱۲۶
- شکل ۵-۴۴د. تغییرات غلظت کلسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق 24cc/hr ، دمای 25°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL) ۱۲۶

شکل ۵-۴۵-الف. تغییرات غلظت استرنسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق ۶cc/hr، دمای ۲۵°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL)..... ۱۲۷

شکل ۵-۴۵-ب. تغییرات غلظت استرنسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق ۱۲cc/hr، دمای ۲۵°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL)..... ۱۲۷

شکل ۵-۴۵-ج. تغییرات غلظت استرنسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق ۱۸cc/hr، دمای ۲۵°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL)..... ۱۲۸

شکل ۵-۴۵-د. تغییرات غلظت استرنسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق ۲۴cc/hr، دمای ۲۵°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL)..... ۱۲۸

شکل ۵-۴۶-الف. توزیع غلظت یون کلسیم در طول مغزه و حجم تزریقی مختلف (آسیب سازندی ناشی از رسوب سولفات کلسیم)..... ۱۲۹

شکل ۵-۴۶-ب. توزیع غلظت یون سولفات در طول مغزه و حجم تزریقی مختلف (آسیب سازندی ناشی از رسوب رسوب سولفات کلسیم)..... ۱۳۰

شکل ۵-۴۷-الف. توزیع غلظت یون استرنسیم در طول مغزه و حجم تزریقی مختلف (آسیب سازندی ناشی از رسوب سولفات استرنسیم)..... ۱۳۰

شکل ۵-۴۷-ب. توزیع غلظت یون سولفات در طول مغزه و حجم تزریقی مختلف (آسیب سازندی ناشی از رسوب سولفات استرنسیم)..... ۱۳۱

شکل ۵-۴۸-الف. توزیع رسوب سولفات کلسیم در طول مغزه و حجم تزریقی مختلف (سرعت تزریق ۶cc/hr)..... ۱۳۲

شکل ۵-۴۸-ب. توزیع رسوب سولفات کلسیم در طول مغزه و حجم تزریقی مختلف (سرعت تزریق ۱۲cc/hr)..... ۱۳۳

شکل ۵-۴۸-ج. توزیع رسوب سولفات کلسیم در طول مغزه و حجم تزریقی مختلف (سرعت تزریق ۱۸cc/hr)..... ۱۳۳

شکل ۵-۴۹-الف. توزیع رسوب سولفات استرنسیم در طول مغزه و حجم تزریقی مختلف (سرعت تزریق ۶cc/hr)..... ۱۳۴

- شکل ۵-۴۹-ب. توزیع رسوب سولفات استرنسیم در طول مغزه و حجم تزریقی مختلف (سرعت تزریق ۱۲cc/hr) ۱۳۴
- شکل ۵-۴۹-ج. توزیع رسوب سولفات استرنسیم در طول مغزه و حجم تزریقی مختلف (سرعت تزریق ۱۸cc/hr) ۱۳۵
- شکل ۵-۵۰-الف. تغییرات غلظت یون‌های کلسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق ۱۲cc/hr ، دمای ۵۰°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL) ۱۳۷
- شکل ۵-۵۰-ب. تغییرات غلظت یون‌های کلسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق ۱۲cc/hr ، دمای ۷۰°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL) ۱۳۷
- شکل ۵-۵۱-الف. تغییرات غلظت یون‌های استرنسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق ۱۸cc/hr ، دمای ۵۰°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL) ۱۳۸
- شکل ۵-۵۱-ب. تغییرات غلظت یون‌های استرنسیم و سولفات خروجی از مغزه در سرعت تزریق ۱۸cc/hr ، دمای ۷۰°C و فشار ۱ اتمسفر (مدل ضریب فعالیت E-NRTL) ۱۳۸
- شکل ۵-۵۲. نسبت کاهش تراوایی یا آسیب سازندی ناشی از تشکیل رسوب سولفات کلسیم بر حسب حجم منافذ تزریقی ۱۴۰
- شکل ۵-۵۳. نسبت کاهش تراوایی یا آسیب سازندی ناشی از تشکیل رسوب سولفات استرنسیم بر حسب حجم منافذ تزریقی ۱۴۰
- شکل ۵-۵۴. تابعیت ضریب آسیب سازندی با RQI اولیه به عنوان معیاری از محیط متخلخل (رسوب سولفات کلسیم) ۱۴۴
- شکل ۵-۵۵. تابعیت ضریب آسیب سازندی با RQI اولیه به عنوان معیاری از محیط متخلخل (رسوب سولفات استرنسیم) ۱۴۵
- شکل ۵-۵۶. نسبت کاهش تراوایی در اثر تشکیل رسوب سولفات کلسیم در دماهای مختلف (سرعت تزریق ۱۲cc/hr) ۱۴۶
- شکل ۵-۵۷. نسبت کاهش تراوایی در اثر تشکیل رسوب سولفات استرنسیم در دماهای مختلف (سرعت تزریق ۱۸cc/hr) ۱۴۷