





دانشکده مهندسی

گروه مهندسی شیمی

بررسی عملکردی و طراحی پایه یک راکتور FBC به منظور حذف سختی کلسیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد فرآوری و انتقال گاز

آرش رئوف شیبانی

استاد راهنما

دکتر سید مصطفی نوعی

اینجانب آرش رئوف شیبانی دوره کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، نویسنده پایان نامه: بررسی عملکردی و طراحی پایه یک راکتور FBC به منظور حذف سختی کلسیمی، تحت راهنمایی آقای دکتر سید مصطفی نوعی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد و مقالات مستخرج با نام دانشگاه فردوسی مشهد و یا Ferdowsi University of Mashhad به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آوردن نتایج اصلی پایان نامه تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از رساله رعایت شده است.
- در کلیه مراحل این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های آنها) استفاده شده ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است، اصل رازداری و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه فردوسی مشهد می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر گردد.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

متن این صفحه باید در ابتدای تمام نسخه های تکثیر شده وجود داشته باشد.

تاریخ

امضای دانشجو

تقدیم بہ پدر و مادرم

آنانکہ

در نشیب قرن

میان جادوی کمی دوبارہ مہ گرفتہ

مرا میان بال ہای سبزشان

بہ سرزمین عافیت کرہ زوند

آنانکہ

فروع چشمانشان

صراحی کلامشان

و گرمی دستانشان

چو بادبان قیامت

ہمارہ قامت مرا میان سنگین ترین غروب دریا بلبہ ساحل سپید معرفت رساندہ اندہ

تقدیر و تشکر:

برخود لازم می دانم از تمامی بزرگوارانی که بی دریغ در طی نگارش این اثر مرا یاری نمودند قدردانی نمایم. کسانی چون استاد محترم جناب دکتر نوعی که همواره با صبر و ملاحظت مرا در راه انجام این پژوهش راهنمایی فرمودند. کلیه مدیران محترم شرکت معظم مهندسین مشاور طوس آب و بطور خاص جناب مهندس گیفانی مدیر بخش تصفیه خانه های آب و ایستگاه های پمپاژ که راهنمایی های فنی ایشان همواره راهگشا بود. شرکت آب منطقه ای خراسان شمالی و مدیران محترم بخصوص جناب مهندس عقیل مرتضوی مدیر طرح آبرسانی به بجنورد که بدون حمایت های فنی ایشان انجام این تحقیق ناممکن می نمود. مهندس احسان غفاری که در سختترین تنگناها همواره یاور من بودند، و سایر همکاران عزیزی که هریک به نوعی در طی این تحقیق محبت خویش را از بنده دریق نمودند.

و در انتها کسی که همواره همپا و یاور من بود. و بی حضور و محبت بی پایانش دستی

به نگارش این اثر نمی رفت همسرم سرکار خانم مهندس پریا ترکمان

چکیده

در این پایان نامه بررسی عملکردی و طراحی پایه یک راکتور FBC جهت حذف سختی کلسیمی از یک نمونه آب مشخص مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. پس از تعریف مسئله (ساخت یک واحد سختی گیری برای تصفیه خانه آب بجنورد) نتایج کیفی خوراک ورودی بررسی شده و مقادیر پارامترهای مدنظر برای طراحی تعیین گردید. سپس جهت تعیین پارامترهای عملکردی، آزمایشات پایلوت توسط یک راکتور نیمه صنعتی بر روی یک نمونه با حجم 1 m^3 از خوراک و با استفاده از انواع و مقادیر مختلف مواد شیمیایی و سرعت های بالاروندگی انجام شد. در طی آزمایش های پایلوت مواردی مانند: دبی ها (خوراک و مواد شیمیایی)، pH جریان ها، دما، میزان EC در ورودی و خروجی، ارتفاع بستر ثابت و سیال شده و میزان غلظت کلسیم و منیزیم کل در ورودی و خروجی مورد سنجش قرار گرفت. سپس با تحلیل نتایج حاصل، بهترین نوع ماده شیمیایی (NaOH) جهت سختی گیری، بهترین سرعت بالاروندگی (80 m/hr) در راکتور و بهترین مقدار pH ($9/5$) جهت انجام واکنش سختی گیری تعیین شد. سپس نتایج حاصل جهت افزایش مقیاس در طراحی یک راکتور با دبی معادل 950 l/s از خوراک ورودی صورت گرفت و مشخصات راکتور از قبیل شکل سطح مقطع، مساحت و تعداد، ارتفاع راکتور، میزان دوزینگ مواد شیمیایی، مقدار ماسه مصرفی و تولید شده، ارتفاع بستر اولیه و سرعت بالا روندگی مناسب تعیین گردید. همچنین براساس پارامتر G (شدت بهم زنی)، معادله ای برای تعیین نقطه مناسب بر اساس میزان تخلخل بهینه، جهت تزریق مواد شیمیایی پیشنهاد شد، که مقادیر سرعت بالا روندگی متناظر با میزان تخلخل حاصل از آن تطابق خوبی را با نتایج آزمایشگاهی پایلوت دارند. در انتها پس از تعیین مشخصات اجزای راکتور و تهیه نقشه های ابعادی آن جهت بررسی راکتور از لحاظ هیدرولیکی اقدام به مدلسازی CFD گردید. ابتدا با توجه به وجود شرایط Symmetry، $1/4$ از فضای راکتور به عنوان Domain در محیط نرم افزار Gambit مدل گردید. شرط مرزی دیواره No slip و شروط مرزی در ورودی نازل های خوراک و مواد شیمیایی و بالای راکتور به ترتیب Velocity inlet و Pressure outlet ($P_g=0$) انتخاب شد. به علت پیچیدگی بیش از حد در مدل سازی به کمک نرم افزار Fluent (v6) از رفتار ذرات سیال صرف نظر شده و تنها به هیدرولیک جریان پرداخته شد، روش حل DP بوده و از مدل چندفازی mixture (فاز اولیه خوراک و فاز ثانویه مواد شیمیایی) استفاده شد. با طرح سه سناریو مختلف (بر اساس مقادیر مختلف جریان ورودی و مواد شیمیایی) بردارهای سرعت حاصله از هر یک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل نشانگر وجود اختلاط مناسب جریان در پایین راکتور و جریان Plug در طول راکتور بوده و هیچگونه نقاط گردابی در گوشه ها و بر روی دیواره مشاهده نشد.

کلمات کلیدی: سختی گیری، راکتور بستر سیال، بررسی عملکردی، طراحی پایه، مدل سازی CFD

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: مقدمه (تعریف سختی و اثرات بهداشتی و اقتصاد آن)

۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- تعریف سختی	۳
۳-۱- مقادیر استاندارد و اثرات بهداشتی سختی	۴
۴-۱- تعریف رسوب گذاری	۵
۱-۴-۱- انواع مختلف رسوب گذاری	۵
۲-۴-۱- مراحل ایجاد پدیده رسوب گذاری	۷
۵-۱- اثرات مالی - اقتصادی پدیده رسوب گذاری	۹
۱-۵-۱- تاثیر پدیده رسوب گذاری بر روی هزینه‌های سرمایه گذاری	۹
۲-۵-۱- افزایش در هزینه‌های بهره برداری و نگهداری	۱۲
۳-۵-۱- هزینه‌های ناشی از کاهش راندمان	۱۴
۴-۵-۱- هزینه‌های کاهش تولید	۱۶
۵-۵-۱- دیگر هزینه‌های جانبی	۱۶
۶-۵-۱- کل هزینه‌های تمام شده	۱۷

فصل دوم: معرفی روش سختی گیری با راکتور FBC

۱-۲- مقدمه	۱۹
۲-۲- تاریخچه	۲۰
۳-۲- ساختار و نحوه کارکرد	۲۳

فصل سوم: مروری بر کارهای انجام شده

۲۶	۱-۳-۱- مقدمه
۲۶	۲-۳-۲- تعادل شیمیایی
۲۹	۳-۳-۳- سنتیک تشکیل و رشد کریستال در راکتور های FBC
۳۰	۱-۳-۳-۱- مدل بهبود یافته
۳۲	۲-۳-۳-۲- رویکرد تحلیلی در محیطی با pH ثابت
۳۴	۱-۲-۳-۳-۱- تعیین منطقه ناپایدار
۳۵	۲-۲-۳-۳-۲- تعیین نرخ رشد کریستال ها در متد pH ثابت
۳۷	۳-۲-۳-۳-۳- بررسی اثر پارامترهای مختلف در تعیین نرخ رشد کریستال در FBC (pH ثابت)
۳۹	۴-۲-۳-۳-۴- تعیین میزان درجه واکنش سطحی
۴۱	۵-۲-۳-۳-۵- تعیین میزان ضرایب k_f و k_d
۴۶	۶-۲-۳-۳-۶- فاکتور کارائی
۴۷	۳-۳-۳-۳- رویکرد تحلیلی در محیط با غلظت ثابت
۴۷	۱-۳-۳-۳-۱- روش انجام تست در محیط با غلظت ثابت:
۴۹	۲-۳-۳-۳-۲- نحوه اطمینان از ثابت ماندن غلظت در محیط
۵۰	۴-۳-۳-۳-۴- بررسی اثر پارامترهای مختلف در تعیین نرخ رشد کریستال در FBC (غلظت ثابت)
۵۲	۴-۳-۳-۳-۴- مقایسه نتایج حاصل از روش های pH ثابت و غلظت ثابت
۵۲	۵-۳-۳-۳-۵- معادله کاربردی رشد کریستال
۵۳	۴-۳-۳-۳-۴- مدل های هیدرولیکی حاکم در FBC ها
۵۴	۱-۴-۳-۳-۱- مدل ارگون
۵۸	۲-۴-۳-۳-۲- مدل ریچاردسون-زاکي
۶۰	۳-۴-۳-۳-۳- بررسی اثر رشد دانه ها، دانسیته و ته نشینی آنها بر روی مدل های هیدرولیکی
۶۱	۴-۴-۳-۳-۴- بررسی نتایج مدل ها با داده های آزمایشگاهی، پیلوت تست و راکتور واقعی
۶۴	۵-۳-۳-۳-۵- قیودهای عملیاتی در راکتور های FBC
۶۵	۱-۵-۳-۳-۱- مدل سازی قیود

- ۶۵ ۳-۵-۱-۱- قید جلوگیری از خروج ریز دانه‌ها از راکتور
- ۶۷ ۳-۵-۱-۲- قید کمینه تخلخل مورد نیاز برای بستر
- ۶۹ ۳-۶- مدل سازی کلی فرآیند FBC
- ۷۴ ۳-۷- بررسی استفاده از مواد شیمیایی مختلف در فرآیند سختی گیری

فصل چهارم: شرح مسئله و نحوه انجام آزمایشات

- ۸۱ ۴-۱- مقدمه
- ۸۱ ۴-۲- شرح مسئله
- ۸۳ ۴-۲-۱- کیفیت فیزیکی شیمیایی آب سد شیرین دره
- ۸۷ ۴-۲-۲- فرآیند تصفیه انتخابی
- ۸۷ ۴-۳- نحوه انجام آزمایشات پایلوت
- ۸۸ ۴-۳-۱- مشخصات سیستم پایلوت
- ۹۰ ۴-۳-۲- پارامترهای فرآیندی موثر
- ۹۱ ۴-۳-۳- نحوه سنجش و آنالیز پارامترها
- ۹۳ ۴-۳-۴- تست‌های صورت گرفته

فصل پنجم: تحلیل و بررسی نتایج آزمایشات پایلوت

- ۹۶ ۵-۱- مقدمه
- ۹۶ ۵-۲- بررسی مشخصات نمونه آب
- ۹۸ ۵-۳- نتایج آزمایشات پایلوت
- ۹۸ ۵-۳-۱- تغییرات میزان pH بر اثر میزان OH⁻ تزریق شده
- ۱۰۰ ۵-۳-۲- تاثیر میزان pH بر راندمان حذف کلسیم
- ۱۰۱ ۵-۳-۳- تاثیر میزان pH بر میزان سختی کل
- ۱۰۱ ۵-۳-۴- تاثیر میزان pH بر میزان منیزیم خروجی
- ۱۰۲ ۵-۳-۵- تاثیر میزان pH بر هدایت الکتریکی خروجی

- ۱۰۳-۳-۵-۶- تاثیر میزان pH بر بار کلسیم کریستال شده عبوری از سطح راکتور
- ۱۰۵-۳-۷- بررسی مقدار تشکیل حالت‌های مختلف کلسیم در راکتور
- ۱۰۸-۳-۸- بررسی میزان بلند شدگی بستر (L/L_0) در سرعت‌های بالا روندگی مختلف
- ۱۱۰-۴- جمع بندی نتایج پایلوت تست

فصل ششم: طراحی پایه راکتور FBC

- ۱۱۴-۱-۶- مقدمه
- ۱۱۴-۲-۶- طراحی پایه راکتور
- ۱۱۴-۱-۲-۶- محاسبه تعداد و ابعاد راکتور
- ۱۱۴-۱-۱-۲-۶- مساحت راکتور
- ۱۱۶-۲-۱-۲-۶- تعداد و شکل راکتور ها
- ۱۱۷-۳-۱-۲-۶- ارتفاع راکتور
- ۱۱۸-۲-۲-۶- محاسبه میزان ماسه و مواد شیمیایی مصرفی
- ۱۱۹-۱-۲-۲-۶- محاسبه میزان مواد شیمیایی مصرفی
- ۱۲۰-۲-۲-۲-۶- تعیین میزان ماسه اولیه مورد نیاز و مقدار دانه تولیدی
- ۱۲۱-۳-۲-۶- مدل پیشنهادی جهت تعیین نقطه بهینه برای تزریق مواد شیمیایی
- ۱۲۶-۳-۶- محاسبات فرآیندی برای یک راکتور FBC
- ۱۳۰-۴-۶- ارائه نقشه‌های ابعادی راکتور و مدل سازی CFD آن

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

- ۱۴۷-۱-۷- نتیجه گیری
- ۱۴۸-۲-۷- پیشنهادات
- ۱۴۹-مراجع

فهرست جداول

- جدول ۱-۱-۱- مقادیر مجاز ترکیبات موثر در سختی آب شرب ۴
- جدول ۱-۲- ضرایب گرفتگی انتخابی ۱۱
- جدول ۱-۳- ضرایب انتقال گرمای جابجایی ۱۱
- جدول ۲-۱- مشخصات مواد خروجی از فرآیند ۲۴
- جدول ۳-۱- بررسی اثر تغییرات پارامترهای مختلف بر میزان نرخ رشد در حالت pH ثابت ۳۸
- جدول ۳-۲- مقادیر محاسبه شده برای ضرایب انتقال جرم و واکنش سطحی در مقادیر r مختلف و میزان خطای نسبی آن ۴۰
- جدول ۳-۳- بررسی اثر فرض $r=2$ در میزان خطای نسبی معادلات برای سیستم‌های مختلف ۴۰
- جدول ۳-۴- مقادیر kd محاسبه شده به ازای سرعت‌های بالاروندگی و اندازه ای مختلف کریستال ۴۱
- جدول ۳-۵- بررسی اثر تغییرات پارامترهای مختلف بر روی میزان kr, G و kd در روش غلظت ثابت ۵۱
- جدول ۳-۶- مقایسه نتایج نرخ رشد در دو روش pH ثابت و غلظت ثابت ۵۲
- جدول ۳-۷- مقادیر اولیه جهت حل معادلات کلی راکتور دانه‌ای ۷۲
- جدول ۳-۸- میزان تغییرات ترکیبات شیمیایی آب ($mmol/l$) به ازای میزان ماده شیمیایی مصرفی ($mmol/l$) ۷۵
- جدول ۴-۱- نتایج آنالیز نمونه برداری‌های صورت گرفته بر روی سد شیرین دره (توسط شرکت آب منطقه ای خراسان شمالی) ۸۴
- جدول ۴-۲- مقادیر ماکزیمم، مینیمم و میانگین انواع آنیون‌ها و کاتیون‌ها در خروجی سد شیرین دره ۸۶
- جدول ۴-۳- مقادیر ماکزیمم، مینیمم و میانگین انواع تعاریف سختی در خروجی سد شیرین دره ۸۶
- جدول ۴-۴- مشخصات فیزیکی نمونه ماسه انتخابی ۸۸
- جدول ۴-۵- مشخصات شیمیایی نمونه ماسه انتخابی ۸۸
- جدول ۴-۶- تست‌های انجام شده و نحوه تغییر پارامترها اولیه در هر کدام ۹۴

- جدول ۵-۱- نتایج آنالیز نمونه برداشته شده از سد شیرین دره..... ۹۷
- جدول ۵-۲- تغییرات میزان OH- بر اثر تزریق مقادیر مختلف مواد شیمیایی..... ۹۹
- جدول ۵-۳- مقادیر محاسبه شده برای بار کلسیم راکتور در تست‌های مختلف..... ۱۰۴
- جدول ۵-۴- انتخاب بهترین نوع ماده شیمیایی بر طبق نتایج پایلوت تست..... ۱۱۰
- جدول ۵-۵- انتخاب بهترین سرعت بالا روندگی بر طبق نتایج پایلوت تست..... ۱۱۱
- جدول ۵-۶- انتخاب بهترین میزان pH بر طبق نتایج پایلوت تست..... ۱۱۲
- جدول ۶-۱- محاسبه سرعت بالا روندگی در هنگام از کار افتادن یک راکتور برای تعداد راکتورهای مختلف..... ۱۱۶
- جدول ۶-۲- مقادیر مختلف ارتفاع اولیه بستر در راکتورهای در حال کار کشور هلند..... ۱۱۷
- جدول ۶-۳- مقادیر پارامترهای مختلف جهت حل معادله ۶-۱۷..... ۱۲۵
- جدول ۶-۴- مشخصات سیستم خوراک دهی به راکتورها..... ۱۲۶
- جدول ۶-۵- مشخصات تکمیلی، ساختار و ابعاد راکتور..... ۱۲۸
- جدول ۶-۶- مشخصات سناریوهای انتخابی جهت انجام مدل سازی..... ۱۳۵

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- تغییرات میزان سطح مورد نیاز در حالت تمیز به سطح مورد نیاز در حالت وجود گرفتگی با تغییر میزان $h \dots 12$
- شکل ۱-۲- هزینه‌های پرداخت شده بابت سطوح اضافی در کشور چین (۱۹۹۷-۲۰۰۶)..... 12
- شکل ۱-۳- تغییرات ضریب گرفتگی در دوره کامل کار کرد یک مبدل (Operating-Cleaning)..... 13
- شکل ۱-۴- درصد کاهش شار انتقال حرارت به عنوان تابعی از میزان ضریب گرفتگی..... 15
- شکل ۲-۱- توسعه واحدهای حذف سختی در کشور هلند..... 21
- شکل ۲-۲- نمونه برخی از ترکیبات جداسازی شده توسط این فرآیند..... 22
- شکل ۲-۳- عناصری که فرآیند FBC قادر به جداسازی آنها از یک ترکیب آبی می‌باشد..... 22
- شکل ۲-۴- ساختار یک راکتور کریستالیزاسیون بستر سیال..... 23
- شکل ۳-۱- اجزای سیستم کریستالیزاسیون بستر سیال در pH ثابت..... 32
- شکل ۳-۲- میزان جزئی یون‌های مختلف در مقادیر مختلف pH (a) CO_3^{2-} ، (b) HCO_3^- ، (c) $[\text{H}_2\text{CO}_3]$ 33
- شکل ۳-۳- میزان اشباعیت نسبی برای کربنات کلسیم به عنوان تابعی از pH در 25°C و $[\text{CO}_3]T = 0.005 \text{ kmol/m}^3$ 34
- شکل ۳-۴- ناحیه ناپایدار برای کربنات کلسیم (چپ) براساس $-\log$ غلظت یون‌های Ca^{2+} و CO_3^{2-} در pH های ۸/۵-۹/۵ و ۱۰/۵، (راست) $-\log$ اکتیویته یون‌های Ca^{2+} و CO_3^{2-} در pH های ۸/۵-۹/۵ و ۱۰/۵..... 35
- شکل ۳-۵- پروفایل غلظت $[\text{Ca}^{2+}]$ بر حسب زمان..... 37
- شکل ۳-۶- نتایج حاصل از رسم معادله ۳-۲۷ برای سیستم کربنات کلسیم در $\text{pH} = 9/5$ و $I = 0.0025$ و $d = 460 \mu\text{m} - \Delta$
- ۴۱..... $d = 920 \mu\text{m} - \odot$ ، $d = 650 \mu\text{m} - \square$
- شکل ۳-۷- خطی سازی نرخ رشد در برابر عدد رینولد حاصل از ذرات بر اساس رابطه (۳-۳۱) [۴]..... 44
- شکل ۳-۸- اجزای سیستم کریستالیزاسیون بستر سیال در غلظت ثابت..... 48
- شکل ۳-۹- نمودار تیتراسیون برای $\text{pH} = 9/5$ و $\sigma = 1$ ، - - - - نمودار خطی منطبق شده؛ و - - - نمودار حاصل از آزمایش..... 48
- شکل ۳-۱۰- نمودار غلظت کلسیم کل با (راست) و بدون (چپ) استفاده از الکتروود کلسیم..... 49
- شکل ۳-۱۱- بررسی دقت معادله ۳-۴۶ بر روی داده‌های تجربی..... 56

- شکل ۳-۱۲- بررسی میزان تغییرات MSE به ازای تغییرات اندازه دانه‌ها (آبی نتایج حاصل از معادله ۳-۴۶ و قرمز نتایج معادله ۳-۴۷) ۵۶
- شکل ۳-۱۳- بررسی میزان تغییرات MSE به ازای تغییرات سرعت سیال (آبی نتایج حاصل از معادله ۳-۴۶ و قرمز نتایج معادله ۳-۴۷) ۵۷
- شکل ۳-۱۴- تغییرات میزان MSE با تغییر میزان C_e در C_e ثابت ۵۸
- شکل ۳-۱۵- تغییرات میزان MSE برای مدل‌های مختلف (براساس نتایج آزمایشگاهی) ۶۲
- شکل ۳-۱۶- تغییرات میزان MSE برای مدل‌های مختلف (براساس نتایج پایلوت) ۶۳
- شکل ۳-۱۷- تغییرات میزان MSE برای مدل‌های مختلف (براساس نتایج پایلوت) ۶۴
- شکل ۳-۱۸- نحوه رخ دادن پدیده وارونگی بستر ۶۵
- شکل ۳-۱۹- نحوه رخ دادن پدیده وارونگی بستر و اثر آن بر روی تغییرات گرادیان فشار ۶۶
- شکل ۳-۲۰- محدوده قیود عملیاتی راکتور FBC در زمستان ($5^{\circ}C$) ۶۸
- شکل ۳-۲۱- محدوده قیود عملیاتی راکتور FBC در تابستان ($22^{\circ}C$) ۶۸
- شکل ۳-۲۲- لایه بندی راکتور ۶۹
- شکل ۳-۲۳- تغییرات پارامترهای مختلف در طول راکتور ۷۴
- شکل ۳-۲۴- تعیین نوع ماده شیمیایی مصرفی بر اساس تجربیات بدست آمده از واحدهای کشور هلند ۷۶
- شکل ۳-۲۵- اثر تغییر پارامترهای مختلف در طول راکتور در صورت استفاده از سود (قرمز) و آهک (آبی) به عنوان ماده شیمیایی ۷۷
- شکل ۳-۲۶- اثر تزریق مواد شیمیایی در راکتور برای آب ورودی با سختی کل 150 mg/l CaCO_3 ۷۸
- شکل ۳-۲۷- اثر تزریق مواد شیمیایی در راکتور برای آب ورودی با سختی کل 300 mg/l CaCO_3 ۷۹
- شکل ۳-۲۸- اثر تزریق مواد شیمیایی در راکتور برای آب ورودی با سختی کل 500 mg/l CaCO_3 ۷۹
- شکل ۴-۱- نمایشی از پروژة آبرسانی از سد شیرین دره به بجنورد ۸۲
- شکل ۴-۲- مشخصات سیستم پایلوت ۸۹
- شکل ۴-۳- سیستم دوزینگ مواد شیمیایی واکنش دهنده ۹۰
- شکل ۵-۱- تغییرات میزان pH بر اثر تغییر میزان OH- ۹۹

- شکل ۵-۲- راندمان حذف کلسیم در مقادیر مختلف pH ۱۰۰
- شکل ۵-۳- میزان حذف سختی کل در مقادیر مختلف pH ۱۰۱
- شکل ۵-۴- میزان حذف منیزیم در مقادیر مختلف pH ۱۰۲
- شکل ۵-۵- تغییرات میزان EC در مقادیر مختلف pH ۱۰۳
- شکل ۵-۶- مقادیر اندازه گیری شده برای بار کلسیم کریستال شده در راکتور در تست‌های مختلف ۱۰۵
- شکل ۵-۷- مقادیر جزئی حالت‌های مختلف کلسیم تشکیل شده برای هریک از تست‌ها ۱۰۷
- شکل ۵-۸- اثرات ناشی از تشکیل کلسیم آمورف در راکتور ۱۰۸
- شکل ۵-۹- مقدار بلند شدگی بستر در سرعت‌های مختلف ۱۰۹
- شکل ۵-۱۰- شکل و اندازه نهایی ماسه‌های خروجی از راکتور پایلوت ۱۰۹
- شکل ۶-۱- ارتفاع بستر اولیه مناسب در هریک از سرعت‌های بالا روندگی ممکن در راکتور ۱۱۸
- شکل ۶-۲- میزان تزریق سود ۲۵٪ در مقادیر مختلف سرعت بالاروندگی و تزریق اولیه ۱۱۹
- شکل ۶-۳- ترازهای اصلی سیستم ۱۲۷
- شکل ۶-۴- نمونه از نازل‌های انتخابی (بالا نازل آب و پایین نازل سود) ۱۲۹
- شکل ۶-۵- نقشه‌های ابعادی پلان و مقطع راکتور طراحی شده ۱۳۱
- شکل ۶-۶- شمایی از محدوده انتخابی، جهت انجام مدل سازی راکتور، مختصات و شرایط مرزی انتخابی ۱۳۲
- شکل ۶-۷- تعیین نقاط ورودی جریان بر روی نازل‌ها ۱۳۳
- شکل ۶-۸- نحوه مش بندی بر روی نازل‌ها ۱۳۴
- شکل ۶-۹- نحوه تغییر تراکم مش‌ها بر روی نازل‌ها ۱۳۴
- شکل ۶-۱۰- نحوه مش بندی کل راکتور ۱۳۵
- شکل ۶-۱۱- سناریو ۱ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های آب (دید نزدیک) ۱۳۷
- شکل ۶-۱۲- سناریو ۲ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های آب (دید نزدیک) ۱۳۷
- شکل ۶-۱۳- سناریو ۳ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های آب (دید نزدیک) ۱۳۸
- شکل ۶-۱۴- سناریو ۱ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های آب (دید دور) ۱۳۸
- شکل ۶-۱۵- سناریو ۲ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های آب (دید دور) ۱۳۹

- شکل ۶-۱۶- سناریو ۳ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های آب (دید دور)..... ۱۳۹
- شکل ۶-۱۷- سناریو ۱ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های سود (دید نزدیک)..... ۱۴۰
- شکل ۶-۱۸- سناریو ۲ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های سود (دید نزدیک)..... ۱۴۰
- شکل ۶-۱۹- سناریو ۳ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های سود (دید نزدیک)..... ۱۴۱
- شکل ۶-۲۰- سناریو ۱ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های سود (دید دور)..... ۱۴۱
- شکل ۶-۲۱- سناریو ۲ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های سود (دید دور)..... ۱۴۲
- شکل ۶-۲۲- سناریو ۳ بردارهای سرعت بر روی نازل‌های سود (دید دور)..... ۱۴۲
- شکل ۶-۲۳- سناریو ۱ بردارهای سرعت در طول راکتور..... ۱۴۳
- شکل ۶-۲۴- سناریو ۲ بردارهای سرعت در طول راکتور..... ۱۴۳
- شکل ۶-۲۵- سناریو ۳ بردارهای سرعت در طول راکتور..... ۱۴۴
- شکل ۶-۲۶- تعداد Iteration و همگرایی پاسخ ها..... ۱۴۴

فصل اول

مقدمه

(تعریف سختی و اثرات بهداشتی و اقتصادی آن)

۱-۱- مقدمه

آب‌های زیر زمینی معمولاً پیش از پمپاژ و یا جاری شدن به سطح زمین سال‌های سال در لایه‌های زیر سطحی باقی می‌مانند. به علت زمان ماند بالای این منابع آبی در زیر سطح زمین، تعادل شیمیایی در آب‌های زیرزمینی برقرار می‌باشد (بخصوص تعادل کربنات کلسیم). هنگامی که آب‌های زیر زمینی در معرض اتمسفر قرار می‌گیرند. دی اکسید کربن در آنها ناپدید شده و تعادل کربنات کلسیم از بین خواهد رفت. همچنین هنگامی که آب حرارت می‌بیند نیز این تعادل تغییر می‌یابد، و یون‌هایی مانند: Ca^{2+} ، HCO_3^- ، Mg^{2+} و SO_4^{2-} تشکیل نمک‌های غیر آلی داده بر روی سطوح مختلف رسوب می‌کنند.

این مسئله بخصوص در مقادیر زیاد رسوب گذاری سبب ایجاد ناخرسندی در مصرف کنندگان بجهت زیان‌های فراوان اقتصادی خواهد گردید (برای مثال از بین رفتن بویلرها، گرفتگی مبدل‌ها علی‌الخصوص مبدل‌های shell & tube). لذا شناخت دقیق تعادل‌های کربنات و بی کربنات و یون‌های عامل در افزایش سختی و ایجاد پدیده رسوب از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد.

در این فصل به بررسی تعریف سختی، یون‌های موثر در آن و انواع روش‌های اندازه‌گیری و بیان آن، مقادیر استاندارد و اثرات بهداشتی سختی و یون‌های تشکیل دهنده آن بر بدن انسان، انواع رسوب‌ها، مکانیزم‌های تشکیل آنها، نحوه ایجاد زیان‌های اقتصادی توسط آنها و سنجش میزان این زیان‌ها در کشورهای مختلف پرداخته خواهد شد.

۱-۲- تعریف سختی

سختی آب یک راه سنتی برای محاسبه ظرفیت واکنش پذیری آب و صابون است [۱]، هرچه میزان سختی آب بیشتر باشد به طبع آن مقدار بیشتری صابون برای تشکیل مقدار برابر کف مورد نیاز خواهد بود. آب سخت همچنین میزان قابل توجهی رسوب بر روی سطوح می‌نماید. یون‌های مختلفی در ایجاد سختی دخیل هستند که مهمترین آنها کلسیم و منیزیم می‌باشند.

با وجود یون‌های دیگر نیز مانند آهن، منگنز، استرانسیم و روی نیز می‌توانند در ایجاد سختی موثر باشند ولی به علت میزان کم آنها نسبت به کلسیم و منیزیم غالباً برای محاسبه سختی از آنها صرف نظر می‌گردد. سختی را می‌توان به کمک واحدهای مختلفی از قبیل mg/lit ، meq/lit و یا mmol/lit بیان نمود. به طور کلی به آب‌های با سختی زیر 60 mg/lit نرم، بین 60 mg/lit – 120 mg/lit نسبتاً سخت و بیش از 180 mg/lit بسیار سخت می‌گویند [۲].

انواع سختی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

- سختی کل (Total Hardness-TH): کل املاح کلسیم و منیزیم موجود در آب سختی کل نامیده می‌شود و شامل دو قسمت است:

الف- سختی کل کلسیم: که نشان دهنده مقدار یون کلسیم موجود در آب می‌باشد.

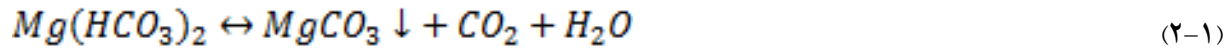
ب- سختی کل منیزیم: که نشان دهنده مقدار یون منیزیم موجود در آب می‌باشد.

- سختی دائم (Permanent Hardness): شامل کلیه املاح کلسیم و منیزیم به جز بی‌کربنات‌ها می‌باشد.

- سختی موقت (Temporary Hardness): به میزان یون‌های بی‌کربنات کلسیم و منیزیم موجود در آب

گفته می‌شود. این مواد بر اثر جوشاندن بر طبق واکنش زیر تجزیه می‌شوند و رسوب می‌کنند:





مجموع سختی دائم و موقت برابر با سختی کل می‌باشد.

- سختی کاذب (Pseudo Hardness): در اندازه گیری سختی کل محلول‌های غلیظ به روش تیتراسیون استاندارد، مقدار بدست آمده بیش از مقدار واقعی یون‌های تولید کننده سختی می‌باشد. اختلاف این دو مقدار را سختی کاذب می‌نامند.

۱-۳- مقادیر استاندارد و اثرات بهداشتی سختی

در استاندارد ملی آب شرب در ایران (استاندارد ۱۰۵۳)، میزان مجاز برای سختی کل و یون‌های موثر در آن به شکل زیر بیان شده است (جدول ۱-۱).

جدول ۱-۱- مقادیر مجاز ترکیبات موثر در سختی آب شرب [۳].

ردیف	نوع ترکیب	حداکثر مجاز بر حسب میلی‌گرم در لیتر
۱	سختی کل بر حسب $CaCO_3$	۵۰۰
۲	کلسیم بر حسب Ca	۲۵۰
۳	منیزیم بر حسب Mg	۵۰

در بررسی جدول فوق می‌بایست به موارد زیر توجه نمود:

- نظر به اینکه بین میزان یون‌های منیزیم و سولفات از نظر تغییر طعم و امکان اختلال در جهاز هاضمه رابطه مستقیم وجود دارد. از این رو در شرایطی که مقدار منیزیم از ۳۰ میلی گرم در لیتر تجاوز کند. مقدار سولفات نباید بیش از ۲۵۰ گرم در لیتر باشد.