دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست

گروه مهندسی محیط زیست

پایان نامه کارشناسی ارشد

مهندسی عمران- مهندسی محیط زیست

حذف رنگزا به روش انعقاد الکتریکی/ شناورسازی الکتریکی با الکترودهای آلومینیومی

امین هوشمندفر

استاد راهنما:

دکتر بیتا آیتی

استاد مشاور:

دکتر احمد خدادادی

آذر ۱۳۹۳

بسمه تعالی

تاییدیه اعضای هیات داوران حاضر در جلسه دفاع از پایان نامه

آقای امین هوشمندفر پایان نامه ۱۲ واحدی خود را با عنوان **حذف رنگزا به روش انعقاد الکتریکی/شناورسازی الکتریکی با الکترودهای آلومینیومی** در تاریخ ۱۳۹۳/۹/۲٤ ارائه کردند.

اعضای هیات داوران نسخه نهایی این پایان نامه را از نظر فرم و محتوا تایید کرده و پذیرش آنرا برای تکمیل درجه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - محیط زیست پیشنهاد می کنند.

عضو هیات داوران	نام و نام خانوادگی	رتبه علمی	امضا
استاد راهنما	دکتر بیتا آیتی	دانشیار	
استاد مشاور	دکتر احمد خدادادی	دانشیار	
استاد ناظر	دکتر نادر مختار انی	استادیار	
استاد ناظر	دکتر محمد دلنواز	استادیار	
مدیر گروه (یا نماینده گروه تخصصی)	دکتر نادر مختار انی	استادیار	

دستورالعمل 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 پایان نامه/ رساله و درآمدهای حاصل از آن‌ها متعلق به دانشگاه می‌باشد 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 پایان نامه 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 دانشکده‌ها، مراکز تحقیقاتی، پژوهشکده‌ها، پارک علم و فناوری و دیگر واحدها باید با مجوز کتبی صادره از معاونت پژوهشی دانشگاه و براساس آئین نامه‌های مصوب انجام شود.

ماده ۴- ثبت اختراع و تدوین دانش فنی و یا ارائه یافته‌ها 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 امین هوشمندفر دانشجوی رشته مهندسی عمران-محیط زیست ورودی سال تحصیلی ۹۱ مقطع کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست متعهد می‌شوم کلیه نکات مندرج در آئین نامه حق مالکیت مادی و معنوی در مورد نتایج پژوهش‌های علمی دانشگاه تربیت مدرس را در انتشار یافته‌های علمی مستخرج از پایان نامه / رساله تحصیلی خود رعایت نمایم. در صورت تخلف از مفاد آئین نامه فوق الاشعار 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»

امضا: .....

تاریخ: ۹۳/۱۱/۲۸

آیین نامه چاپ پایان‌نامه های دانشجویان دانشگاه تربیت مدرس

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایان نامه‌های 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 می‌شوند:

ماده ۱: در صورت اقدام به چاپ پایان نامه‌ی 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 نگارنده امین هوشمندفر در رشته مهندسی عمران- محیط زیست است که در سال۹۳ در دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست دانشگاه تربیت مدرس به راهنمایی خانم دکتر بیتا آیتی از آن دفاع شده است.»

ماده ۳: به منظور جبران بخشی از هزینه‌های انتشارات دانشگاه، تعداد یک درصد شمارگان کتاب (در هر نوبت‌چاپ) را به «دفتر نشر آثارعلمی» دانشگاه اهدا کند. دانشگاه می‌تواند مازاد نیاز خود را به نفع مرکز نشر درمعرض فروش قرار دهد.

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

ماده ۵: دانشجو تعهد و قبول می‌کند در صورت خودداری از پرداخت بهای خسارت، دانشگاه می‌تواند خسارت مذکور را از طریق مراجع قضایی مطالبه و وصول کند؛ به علاوه به دانشگاه حق می‌دهد 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 امین هوشمندفر دانشجوی رشته مهندسی عمران- محیط زیست مقطع کارشناسی ارشد تعهد فوق و ضمانت اجرایی آن را قبول کرده، به آن ملتزم می‌شوم.

نام و نام خانوادگی: امین هوشمندفر

تاریخ و امضا:

۹۴/ ۱۱/ ۲۸

تقدیم به مادر و پدرم

به پاس عاطفه سرشار و گرمای امید بخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است

به پاس قلب های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می گراید

و به پاس محبت های بی دریغشان که هرگز فروکش نمی کند.

تقدیم به خواهرم

که وجودش شادی بخش و صفایش مایه آرامش من است.

باسپاس از سه وجود مقدس: آنان که ناتوان شدند تا ما به توانایی برسیم... موهایشان سپید شد تا ما روسفید شویم... و عاشقانه سوختند تا گرما بخش وجود ما و روشنگر راهمان باشند...

پدرانمان

مادرانمان

استادانمان

بسی شایسته است از استاد با کمالات و شایسته؛ سرکار خانم دلقی که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ قلمی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این پایان نامه را بر عهده گرفتند؛ تقدیر و تشکر نمایم.

از استاد فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر احمد خدادادی به عنوان استاد مشاور که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم.

با تشکر و سپاس از اساتید دانشمند و بزرگوارم جناب آقایان دکتر حسین بحی دوست و دکتر مختاراعی که از محضر پر فیض دانش شان، بهره ها برده ام.

باسپاس بی دریغ خدمت دوستان عزیز ام آقای محمد قالبی زاده که مرا صمیمانه و مشفقانه یاری داد.

و با تشکر خالصانه خدمت همه کسانی که به نوعی مرا در به انجام رساندن این مهم یاری نموده اند

باشد که این خرد ترین، بخشی از زحمات آنان را سپاس گوید.

چکیده

با توجه به احتمال آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی در نزدیکی صنایع مصرف کننده رنگزا، حذف مواد رنگی از این فاضلاب‌ها یک اولویت زیست محیطی می‌باشد. شفافیت آب و انحلال گازها در آن با حضور حتی مقدار کمی از رنگزا کاهش می‌یابد. در صورت وجود مواد رنگی سمی در آب نفوذ نور به لایه‌های زیرین و در نتیجه فتوسنتز گیاهان آبی و میزان اکسیژن محلول کم شده، حیوانات آبزی از بین می‌روند. رنگزاها ترکیبات پایداری هستند که به راحتی تجزیه بیولوژیکی نمی‌شوند و به خصوص رنگزاهای آزو جزو عوامل سرطان زا به حساب می‌آیند. اخیرا روش الکتروشیمیایی به دلیل تطبیق پذیری و سازگاری آن با محیط زیست به عنوان یک روش مناسب برای تصفیه فاضلاب صنایع حاوی رنگزا، مورد توجه قرار گرفته است. در روش انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی با اعمال جریان الکتریکی به الکترودهای کاتد و آند در یک محلول رسانا، با حل شدن آند آلومینیومی مواد منعقدکننده در محل تولید شده و موجب ایجاد لخته‌هایی می‌گرددکه همراه با حباب‌های گاز هیدروژن تولیدی در کاتد شناور می‌شوند. هدف از این تحقیق بررسی کارایی سیستم همزمان انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی در حذف رنگزا اسید قرمز ۱۴ از فاضلاب مصنوعی بود. به این منظور، بر اساس راندمان حذف رنگزا، میزان مصرف انرژی و آلومینیوم و TSS لجن جدا شده مقدار بهینه پارامترهای موثر بر فرایند شامل سطح الکترودها، فاصله بین الکترودها، هدایت الکتریکی محلول، دانسیته جریان الکتریکی، غلظت اولیه رنگزا، pH و دما در جریان ناپیوسته به دست آمده و تاثیر پارامترهای دیگر شامل نوع جریان هیدرولیکی و نوع الکترولیت و الکترودها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین مدلسازی فرایند با نرم افزار طراحی آزمایش Design Expert 7 انجام شد.

در شرایط بهینه با سطح و فاصله بین الکترود cm^2 ۲۴/۸۶ و cm ۱، هدایت الکتریکی µS/cm ۱۶۰۰، دانسیته جریان الکتریکی mA/cm^2 ۶۰، غلظت اولیه mg/L ۱۸۵ رنگزا، pH=۷ و ^0C ۲۵=دما راندمان حذف ۹۳ درصد رنگزا با سینتیک مرتبه اول و ۸۱ درصد COD در مدت زمان ۱۸۰ دقیقه با مصرف انرژی مخصوص kWh/kg Dye Removed ۱۰۶ و kWh/kg COD Removed ۷۹، مصرف آند kg Al/kg Dye Removed ۲/۱۸ و kg Al/kg COD Removed ۱/۶۲ و TSS لجن mg/L ۱۵۰۵۰ به دست آمد. شرایط بهینه به دست آمده مطابق با مدل پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار با درجه مطلوبیت ۰/۸ بود. نتایج نشان داد که سیستم عملکرد مناسبی با جریان پیوسته داشته و استفاده از نمک NaCl به عنوان الکترولیت و الکترودهای آلومینیومی عملکرد بهتری را تامین می‌کنند. همچنین فاضلاب واقعی رنگرزی پارچه در شرایط بهینه به دست آمده تصفیه شد که راندمان حذف ۹۰ درصد COD در مدت زمان ۳۰۰ دقیقه با مصرف انرژی مخصوص kWh/kg COD Removed ۷۰، مصرف آند kg Al/kg COD Removed ۱/۳ و TSS لجن mg/L ۱۶۱۰۰ حاصل شد. از مزایای این روش می‌توان به مصرف کم مواد و انرژی درکنار لجن تولیدی کم که منجر به کاهش هزینه‌های تصفیه و دفع لجن و مشکلات مربوط به آن می‌گردد، اشاره کرد. در نتیجه استفاده از این روش به عنوان گزینه‌ای مناسب جایگزین روش‌های معمول تصفیه مطرح است.

کلمات کلیدی: اسید قرمز ۱۴، تصفیه الکتروشیمیایی، لجن، مصرف انرژی، طراحی آزمایش

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل ۱: کلیات ۴
۱-۱- مقدمه ۴
۱-۲- منابع تولید فاضلاب حاوی رنگزا ۴
۱-۳- مشخصات فاضلاب نساجی ۵
۱-۴- ضرورت تصفیه پساب‌های حاوی رنگزا ۶
۱-۵- طبقه بندی رنگزاهای نساجی ۶
۱-۶- روش‌های تصفیه پساب‌های حاوی رنگزا ۸
فصل ۲: انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی ۱۱
۲-۱- مقدمه ۱۱
۲-۲- الکتروشیمی، انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی ۱۱
۲-۲-۱- تئوری فرایند انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی ۱۲
۲-۲-۲- فاکتورهای موثر بر فرایند ۱۵
۲-۲-۲-۱- فاصله بین الکترودها و آرایش آن‌ها ۱۵
۲-۲-۲-۲- دانسیته جریان الکتریکی ۱۶
۲-۲-۲-۳- هدایت الکتریکی محلول ۱۶
۲-۲-۲-۴- غلظت ورودی آلاینده ۱۷
۲-۲-۲-۵-pH ۱۸
۲-۲-۲-۶- دما ۱۹
۲-۲-۲-۷- طراحی راکتور ۱۹
۲-۳- کاربردهای فرایند ۲۰
۲-۳-۱- استفاده در تصفیه آب ۲۰
۲-۳-۲- استفاده در تصفیه فاضلاب ۲۰
۲-۴- مزایا ۲۱
۲-۵- معایب ۲۲
فصل ۳: مطالعات انجام شده ۲۴
۳-۱- مقدمه ۲۴
۳-۲- مطالعات انجام شده در زمینه حذف رنگزا ۲۴
۳-۳- مطالعات انجام شده در زمینه حذف Acid Red 14 ۳۱
۳-۴- مطالعات انجام شده در زمینه حذف دیگر آلاینده‌ها ۳۱
۳-۵- هدف از انجام تحقیق ۳۶
فصل ۴: روش انجام تحقیق **۳۷**

۴-۱- مقدمه ۳۷
۴-۲- روش کار ۳۷
۴-۲-۱- طراحی و ساخت پایلوت ۳۸
۴-۲-۲- انتخاب نوع رنگزا و اندازه گیری غلظت آن ۴۰
۴-۲-۳- انجام آزمایشات جریان ناپیوسته ۴۱
۴-۲-۴- انجام آزمایشات جریان شبه پیوسته و پیوسته ۴۲
۴-۲-۵- بررسی قابلیت سیستم در تصفیه فاضلاب واقعی ۴۳
۴-۲-۶- بررسی منحنی جذب در ناحیه مرئی-فرابنفش ۴۳
۴-۲-۷- آزمایش LC-UV و LC-Mass ۴۳
۴-۲-۸- طراحی آزمایش ۴۴
۴-۳- پارامترهای اندازه گیری و کنترل شده ۴۵
۴-۳-۱- دمای محلول ۴۵
۴-۳-۲- میزان مصرف انرژی و آلومینیوم ۴۵
۴-۴- مواد مورد استفاده ۴۵
۴-۵- تجهیزات مورد استفاده ۴۶
فصل ۵: نتایج و بحث ۴۷
۵-۱- مقدمه ۴۷
۵-۲- تعیین سطح بهینه الکترودها ۴۷
۵-۳- تعیین فاصله بهینه بین الکترودها ۵۲
۵-۴- تعیین هدایت الکتریکی بهینه ۵۷
۵-۵- تعیین دانسیته جریان الکتریکی بهینه ۶۰
۵-۶- تعیین غلظت اولیه بهینه رنگزا ۶۴
۵-۷- تعیین pH اولیه بهینه ۶۷
۵-۸- تعیین دمای بهینه ۷۳
۵-۹- بررسی سینتیک واکنش ۷۷
۵-۱۰- منحنی جذب UV-Vis برای فاضلاب تصفیه شده در شرایط بهینه ۷۹
۵-۱۱- جریان شبه پیوسته ۸۰
۵-۱۲- جریان پیوسته ۸۴
۵-۱۳- نوع الکترولیت ۸۷
۵-۱۴- نوع الکترودها ۹۰
۵-۱۵- فاضلاب واقعی ۹۴
۵-۱۶- طراحی آزمایش ۹۷
۵-۱۷- براورد اقتصادی ۱۰۳
۵-۱۸- LC-UV و LC-Mass ۱۰۴

۵-۱۹- مقایسه با سایر تحقیقات ۱۰۸
فصل ۶: جمع بندی و پیشنهادات ۱۱۰
۶-۱- مقدمه ۱۱۰
۶-۲- جمع بندی ۱۱۰
۶-۳- پیشنهادات ۱۱۲
مراجع ۱۱۳
پیوست ۱۲۱

فهرست اشکال

عنوان **صفحه**

شکل ۴-۱- فلوچارت مراحل تحقیق ۳۸
شکل ۴-۲- طرح شماتیک سلول الکتروشیمیایی مورد استفاده ۳۹
شکل ۴-۳- طیف جذب محلول اسید قرمز ۱۴ در طول موج های ۳۰۰ nm تا ۹۰۰ ..... ۴۱
شکل ۴-۴- سیستم جریان پیوسته ۴۲
شکل ۵-۱- راندمان حذف رنگزا بر حسب زمان در سطوح مختلف الکترود ۴۸
شکل ۵-۲- تغییرات مصرف انرژی مخصوص بر حسب سطح الکترود در راندمان‌های مختلف حذف رنگزا ۴۹
شکل ۵-۳- تغییرات مصرف انرژی مخصوص بر حسب زمان برای سطوح مختلف الکترود ۴۹
شکل ۵-۴- میزان انحلال آند آلومینیومی نسبت به زمان در شدت جریان ۱/۵ A ۵۰
شکل ۵-۵- میزان انحلال آند آلومینیومی بر حسب سطح الکترود برای درصدهای مختلف حذف رنگزا ۵۱
شکل ۵-۶- تغییرات pH در طول فرایند برای سطوح مختلف الکترود ۵۱
شکل ۵-۷- میزان TSS لجن جدا شده برای سطوح مختلف الکترود ۵۲
شکل ۵-۸- راندمان حذف رنگزا بر حسب زمان در فواصل مختلف الکترود ۵۳
شکل ۵-۹- تغییرات مصرف انرژی مخصوص بر حسب فاصله الکترود برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا ۵۴
شکل ۵-۱۰- تغییرات مصرف انرژی مخصوص بر حسب زمان برای فواصل مختلف الکترود ۵۴
شکل ۵-۱۱- میزان انحلال آند آلومینیومی بر حسب فاصله بین الکترود برای درصدهای مختلف حذف رنگزا ۵۵
شکل ۵-۱۲- تغییرات pH در طول فرایند برای فواصل مختلف بین الکترود ۵۶
شکل ۵-۱۳- میزان TSS لجن جدا شده برای فواصل مختلف بین الکترود ۵۶
شکل ۵-۱۴- راندمان حذف رنگزا در هدایت‌های الکتریکی مختلف ۵۷
شکل ۵-۱۵- تغییرات مصرف انرژی بر حسب هدایت الکتریکی در راندمان‌های مختلف حذف رنگزا ۵۸
شکل ۵-۱۶- میزان انحلال آند بر حسب هدایت الکتریکی در راندمان‌های مختلف حذف رنگزا ۵۸
شکل ۵-۱۷- تغییرات pH در طول فرایند برای هدایت‌های الکتریکی مختلف ۵۹
شکل ۵-۱۸- میزان TSS لجن جدا شده برای هدایت‌های الکتریکی مختلف ۶۰
شکل ۵-۱۹- راندمان حذف رنگزا در دانسیته‌های جریان الکتریکی مختلف ۶۱
شکل ۵-۲۰- تغییرات مصرف انرژی بر حسب دانسیته‌های جریان الکتریکی برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا ۶۱
شکل ۵-۲۱- میزان انحلال آند بر حسب دانسیته جریان الکتریکی برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا ۶۲
شکل ۵-۲۲- تغییرات pH در طول فرایند برای دانسیته‌های مختلف جریان الکتریکی ۶۳
شکل ۵-۲۳- میزان TSS لجن جدا شده در دانسیته‌های جریان الکتریکی مختلف ۶۳
شکل ۵-۲۴- راندمان حذف رنگزا در غلظت‌های اولیه مختلف ۶۴
شکل ۵-۲۵- تغییرات مصرف انرژی بر حسب غلظت اولیه برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا ۶۵
شکل ۵-۲۶- میزان انحلال آند بر حسب غلظت اولیه برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا ۶۶
شکل ۵-۲۷- تغییرات pH در طول فرایند برای غلظت‌های اولیه مختلف ۶۶

شکل ۵-۲۸- میزان TSS لجن جدا شده در غلظت‌های اولیه مختلف ۶۷
شکل ۵-۲۹- راندمان حذف رنگزا در pHهای اولیه مختلف..... ۶۸
شکل ۵-۳۰- تغییرات pH طی فرایند برای pHهای اولیه مختلف ۶۸
شکل ۵-۳۱- نمودار حلالیت هیدرولیز آلومینیوم ۷۰
شکل ۵-۳۲- تغییرات مصرف انرژی بر حسب pH اولیه برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا..... ۷۲
شکل ۵-۳۳- میزان انحلال آند بر حسب pH اولیه برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا..... ۷۲
شکل ۵-۳۴- مقادیر TSS لجن جدا شده در pH های اولیه مختلف..... ۷۳
شکل ۵-۳۵- راندمان حذف رنگزا در دماهای اولیه مختلف ۷۳
شکل ۵-۳۶- تغییرات دما طی فرایند..... ۷۴
شکل ۵-۳۷- تغییرات مصرف انرژی بر حسب دمای اولیه برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا.... ۷۵
شکل ۵-۳۸- تغییرات مصرف انرژی مخصوص بر حسب زمان برای دماهای اولیه مختلف ۷۵
شکل ۵-۳۹- میزان انحلال آند بر حسب دمای اولیه برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا..... ۷۶
شکل ۵-۴۰- مقادیر TSS لجن جدا شده در دماهای اولیه مختلف ۷۶
شکل ۵-۴۱- مدل سینتیک مرتبه صفر برای حذف رنگزا در شرایط بهینه ۷۸
شکل ۵-۴۲- مدل سینتیک مرتبه اول برای حذف رنگزا در شرایط بهینه..... ۷۸
شکل ۵-۴۳- مدل سینتیک مرتبه دوم برای حذف رنگزا در شرایط بهینه ۷۹
شکل ۵-۴۴- نمودار میزان جذب در ناحیه **UV-Vis** برای فاضلاب تصفیه شده در زمان‌های مختلف..... ۷۹
شکل ۵-۴۵- راندمان حذف رنگزا نسبت به زمان در نرخ‌های بازگردش مختلف ۸۰
شکل ۵-۴۶- تغییرات مصرف انرژی بر حسب نرخ بازگردش برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا.. ۸۱
شکل ۵-۴۷- تغییرات مصرف انرژی مخصوص بر حسب زمان برای نرخ‌های مختلف بازگردش ۸۲
شکل ۵-۴۸- میزان انحلال آند بر حسب نرخ بازگردش برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا ۸۲
شکل ۵-۴۹- تغییرات pH طی فرایند برای نرخ‌های مختلف بازگردش..... ۸۳
شکل ۵-۵۰- مقادیر TSS لجن جدا شده در نرخ‌های مختلف بازگردش..... ۸۳
شکل ۵-۵۱- راندمان حذف رنگزا نسبت به زمان برای جریان پیوسته ۸۵
شکل ۵-۵۲- میزان مصرف انرژی نسبت به زمان برای جریان پیوسته ۸۵
شکل ۵-۵۳- میزان مصرف آلومینیوم نسبت به زمان برای جریان پیوسته..... ۸۶
شکل ۵-۵۴- تغییرات pH نسبت به زمان برای جریان پیوسته..... ۸۶
شکل ۵-۵۵- راندمان حذف رنگزا نسبت به زمان برای الکترولیت‌های مختلف..... ۸۸
شکل ۵-۵۶- تغییرات مصرف انرژی بر حسب نوع الکترولیت برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا.۸۸
شکل ۵-۵۷- تغییرات مصرف انرژی مخصوص بر حسب زمان برای الکترولیت‌های مختلف..... ۸۹
شکل ۵-۵۸- میزان انحلال آند بر حسب نوع الکترولیت برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا..... ۹۰
شکل ۵-۵۹- راندمان حذف رنگزا نسبت به زمان برای الکترودهای مختلف..... ۹۱
شکل ۵-۶۰- تغییرات مصرف انرژی بر حسب نوع الکترود برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا..... ۹۱
شکل ۵-۶۱- تغییرات مصرف انرژی مخصوص بر حسب زمان برای الکترودهای مختلف..... ۹۲

شکل ۵-۶۲- میزان انحلال آند بر حسب نوع الکترود برای راندمان‌های مختلف حذف رنگزا..... ۹۳
شکل ۵-۶۳- تغییرات pH طی فرایند برای الکترودهای مختلف..... ۹۳
شکل ۵-۶۴- راندمان حذف COD فاضلاب واقعی و سنتزی نسبت به زمان..... ۹۵
شکل ۵-۶۵- تغییرات میزان جذب فاضلاب واقعی در طول موج‌های مختلف نسبت به زمان..... ۹۵
شکل ۵-۶۶- تغییرات مصرف انرژی بر حسب راندمان حذف COD فاضلاب واقعی و سنتزی..... ۹۶
شکل ۵-۶۷- میزان مصرف آلومینیوم بر حسب راندمان حذف COD فاضلاب واقعی..... ۹۶
شکل ۵-۶۸- تغییرات pH فاضلاب واقعی در طول فرایند..... ۹۷
شکل ۵-۶۹- میزان پیوستگی بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده برای راندمان حذف رنگزا..... ۹۸
شکل ۵-۷۰- میزان پیوستگی بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده برای میزان مصرف انرژی..... ۹۸
شکل ۵-۷۱- میزان پیوستگی بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده برای میزان مصرف آلومینیوم.. ۹۹
شکل ۵-۷۲- میزان پیوستگی بین مقادیر واقعی و پیش بینی شده برای TSS لجن جدا شده..... ۹۹
شکل ۵-۷۳- راندمان حذف رنگزا نسبت به زمان و هدایت الکتریکی..... ۱۰۱
شکل ۵-۷۴- راندمان حذف رنگزا نسبت به زمان و دانسیته جریان الکتریکی..... ۱۰۱
شکل ۵-۷۵- راندمان حذف رنگزا نسبت به زمان و غلظت اولیه رنگزا..... ۱۰۲
شکل ۵-۷۶- راندمان حذف رنگزا نسبت به زمان و pH..... ۱۰۲
شکل ۵-۷۷- LC-UV نمونه‌های مختلف الف) ۰ ب) ۳۰ ج) ۶۰ د) ۲۴۰ و) ۳۰۰ دقیقه..... ۱۰۵
شکل ۵-۷۸- طیف جرمی مواد خارج شده از ستون کروماتوگرافی در زمان‌های مختلف..... ۱۰۶
شکل ۵-۷۹- ترکیب میانی خارج شده از ستون کروماتوگرافی در دقیقه ۲/۸..... ۱۰۷

فهرست جداول

عنوان **صفحه**

جدول ۱-۱ - طبقه بندی مواد موجود در فاضلاب نساجی ۵
جدول ۱-۲ - نمونه مشخصات فاضلاب فرایند شیمیایی نساجی ۵
جدول ۱-۳ - طبقه بندی انواع رنگزا ۷
جدول ۱-۴ - مشخصات کلی و کاربرد انواع رنگزا ۸
جدول ۴-۱ - مقادیر پارامترهای مورد بررسی در آزمایشات جریان ناپیوسته ۳۸
جدول ۴-۲ - مشخصات رنگزای اسید قرمز ۱۴ ۴۰
جدول ۴-۳ - مشخصات فاضلاب واقعی ۴۳
جدول ۴-۴ - بازه متغیرها و سطوح مدل طراحی شده ۴۴
جدول ۵-۱ - شرایط بهینه به دست آمده در تحقیق ۷۷
جدول ۵-۲ - هدایت الکتریکی محاسبه شده برای الکترولیت‌های مختلف ۸۹
جدول ۵-۳ - مقایسه بین نتایج واقعی و پیش بینی شده توسط مدل در شرایط بهینه ۱۰۳
جدول ۵-۴ - شرایط بهینه پیش بینی شده توسط مدل ۱۰۳
جدول ۵-۵ - مقایسه تحقیق حاضر با مطالعات مشابه انجام شده ۱۰۹
جدول پ-۱- نتایج واقعی طراحی آزمایش ۱۲۱
جدول پ-۲- آنالیز واریانس برای راندمان حذف رنگزا (Y_1) ۱۲۲
جدول پ-۳- آنالیز واریانس برای میزان مصرف انرژی (Y_2) ۱۲۳
جدول پ-۴- آنالیز واریانس برای میزان مصرف آلومینیوم (Y_3) ۱۲۴
جدول پ-۵- آنالیز واریانس برای TSS لجن (Y_4) ۱۲۴

پیشگفتار

صنعت نساجی تاثیر قابل توجهی بر روی محیط زیست دارد زیرا با کاربرد آب و مواد شیمیایی با حجم بالا، فاضلاب زیادی در فرایندهای مختلف از قبیل آهار زنی، شست و شو، سفید کردن، رنگرزی، چاپ و پرداخت تولید می‌شود. این فاضلاب حاوی محصولات جانبی، نمک‌ها، اسید یا قلیا، مواد شیمایی دیگر، حلال‌های شست و شو و رنگزای باقی مانده می‌باشد که حتی در غلظت کم قابل رویت است. شفافیت آب و انحلال گازها در آن با حضور حتی مقدار کمی از رنگزا کاهش می‌یابد. در صورت وجود مواد رنگی سمی در آب نفوذ نور به لایه‌های زیرین و در نتیجه فتوسنتز گیاهان آبی و میزان اکسیژن محلول کم شده، حیوانات آبزی از بین می‌روند. رنگزاها ترکیبات پایداری هستند که به راحتی تجزیه بیولوژیکی نمی‌شوند و به خصوص رنگزاهای آزو جزو عوامل سرطان زا به حساب می‌آیند که موجب آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌شوند. بنابراین تدابیر و اقدامات لازم در جهت کنترل، تصفیه و تخلیه پسابهای حاوی رنگزا بایستی در نظر گرفته شود.

حذف رنگ از طریق روش‌های مختلف فیزیکی، شیمیایی، بیولوژیکی و یا تلفیقی از آن‌ها امکان‌پذیر است که می‌توان به روش‌های فیزیکی مانند جذب، فیلتراسیون غشایی و امواج اولتراسونیک، روش‌های شیمیایی مانند تبادل یونی، الکترولیز، انعقاد و لخته‌سازی، اکسیداسیون متعارف و پیشرفته و روش‌های بیولوژیکی با استفاده از جلبک، قارچ و باکتری اشاره کرد. انعقاد شیمیایی یک روش متداول در تصفیه فاضلاب‌های حاوی رنگزا است. از معایب روش انعقاد شیمیایی، تولید لجن زیاد و جامدات محلول بالا در پساب تصفیه شده است. انعقاد شیمیایی برای رنگزاهای سولفوری و دیسپرس موثر است. رنگزاهای اسیدی، مستقیم، وت و راکتیو منعقد شده اما ته‌نشین نمی‌شوند. در حالی که رنگزاهای کاتیونی حتی منعقد نمی‌گردند.

اخیرا روش انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی به دلیل تطبیق پذیری و سازگاری آن با محیط زیست به عنوان یک روش مناسب برای تصفیه فاضلاب صنایع، مورد توجه قرار گرفته است. این روش نسبت به سایر روش‌ها برای رنگ‌زدایی دارای مزایایی مانند نیاز به تجهیزات ساده، سرعت بالا و زمان ماند کوتاه جهت حذف آلاینده‌ها، راهبری آسان و نیاز کم به مواد شیمیایی می‌باشد که برای تصفیه انواع رنگزا می‌تواند به کار برده شود. همچنین میزان لجن تولیدی کم دارای سرعت ته‌نشینی یا شناوری بالا با میزان آب کم، از دیگر مزایای این روش است.

در انعقاد الکتریکی تولید در محل مواد منعقد کننده حاصل از انحلال فلز آند (آلومینیوم) در اثر عبور جریان الکتریسیته اتفاق می افتد. یون‌های آلومینیومی که به صورت الکتریکی به آب اضافه می‌شوند، بسیار فعال‌تر از یون‌های آلومینیومی است که به صورت شیمیایی اضافه می‌گردند. به همین دلیل در روش

انعقاد الکتریکی آلومینیوم کمتری در لجن ته‌نشین شده موجود است. تولید همزمان گاز هیدروژن در کاتد به شناورسازی ذرات لخته شده کمک می‌کند. در صورتی که بین آند مثبت و کاتد منفی که به برق وصل شده اند، فاضلاب قرار داده شود، یک میدان الکتریکی در نتیجه هدایت الکتریکی محلول برقرار می‌شود. با الکترولیز آب، حباب‌های ریز اکسیژن و هیدروژن تولید شده و به طرف بالا حرکت می‌کنند و تشکیل یک پتو را در سطح می‌دهند. حباب‌ها ذرات معلق را به سطح آورده و یک لایه لجن تشکیل می‌شود که به صورت مکانیکی جمع‌آوری می‌شود. اکسیژن اتمی آزاد در لایه پخشی آند تولید می‌شود و با جریان همرفت به داخل محلول فاضلاب وارد شده و مواد آلی و معدنی را اکسید می‌کند. در یک روند مشابه، یک دگرگونی در هیدروژن تهییج شده الکتریکی اتفاق می‌افتد که منجر به واکنش کاهش محتویات فاضلاب می‌شود. طی الکترولیز در کاتد قلیائیت تولید می‌شود. گازهای در حال تولید هیدروژن و اکسیژن بسیار فعال هستند و وقتی به سطح جامدات حمله می‌کنند، خواص شناوری آن‌ها را تغییر می‌دهند. به این تغییرات، اثرات الکتروشیمیایی گفته می‌شود که در سایر روش‌های شناورسازی وجود ندارد.

با توجه به مطالب ذکر شده، هدف از این تحقیق بررسی کارایی سیستم الکتروشیمیایی است که از روش‌های انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی به طور همزمان برای حذف آلاینده رنگزای اسید قرمز ۱۴ با استفاده از الکترودهای آلومینیومی بهره می‌برد. انتظار می‌رود استفاده از فرایند شناورسازی الکتریکی همزمان با انعقاد الکتریکی نیاز به واحد ته‌نشینی ثقلی برای جداسازی لخته‌ها را از بین برده و منجر به جداسازی توامان آلاینده و کاهش هزینه‌های تصفیه گردد. تحقیقات انجام شده در زمینه حذف رنگزا به روش الکتروشیمیایی بر محوریت انعقاد الکتریکی بوده و از خاصیت شناورسازی حباب‌های تولیدی به ندرت استفاده شده است. در این تحقیق طراحی راکتور به گونه‌ای در نظر گرفته شده تا از خاصیت انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی به طور همزمان بتوان استفاده کرد. تاثیر پارامترهای مهم بر عملکرد سیستم الکتروشیمیایی شامل سطح الکترودها، فاصله بین الکترودها، هدایت الکتریکی اولیه، دانسیته جریان الکتریکی، غلظت، pH اولیه، دما، جریان شبه پیوسته و پیوسته، نوع الکترولیت و نوع الکترودها مورد مطالعه قرار گرفته و مقدار بهینه آن‌ها بر اساس میزان مصرف انرژی و آلومینیوم و تامین عملکرد مناسب از لحاظ تولید مواد منعقدکننده و حباب‌ها تعیین شده است.

این پایان نامه متشکل از شش فصل می‌باشد که در فصل اول کلیاتی درباره انواع رنگزاها و اثرات آنها بر محیط زیست و نیز روش‌های مختلف تصفیه، مزایا و معایب هر کدام ارائه شده است. در فصل دوم پس از توضیح مختصری درباره انواع روش‌های الکتروشیمیایی، مبانی روش‌های انعقاد الکتریکی و شناورسازی الکتریکی و زمینه‌های کاربرد این روش‌ها بیان شده است. فصل سوم مربوط به مطالعات کتابخانه‌ای سایر محققین بوده که از این روش‌ها برای تصفیه فاضلاب‌های مختلف استفاده کرده اند. در فصل چهارم روش کار، مواد و تجهیزات تحقیق آمده است. نتایج آزمایش‌ها و بحث در مورد آن‌ها و

چگونگی تاثیر هر یک از موارد مورد مطالعه بر فرایند در فصل پنجم ارائه شده است. در نهایت جمع بندی و پیشنهادات این تحقیق در فصل ششم بیان شده است.

فصل ۱

کلیات

۱-۱- مقدمه

میزان تولید رنگ‌های سنتزی در دنیا سالانه بالغ بر ۷۰۰ هزار تن است که در صنایع زیادی از جمله نساجی، دباغی، چرم سازی، چاپ و کاغذ سازی، لوازم آرایشی و داروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بسته به صنعت و فرایند مورد استفاده، حدود ۲۰-۱۰ درصد از کل رنگ تولیدی وارد فاضلاب می‌شود (Martinez و Brillas، ۲۰۰۹). با توجه به اهمیت و نقش رنگ در زندگی بشر و استفاده بسیار زیاد از آن که منجر به افزایش تولید فاضلاب‌های حاوی رنگ شده، نیاز به شناخت منابع و خصوصیات فاضلاب‌های رنگی به منظور مدیریت، برنامه ریزی و تامین معیارهای زیست محیطی می‌باشد. در این فصل به طور مختصر راجع به اثرات زیست محیطی و منابع تولید فاضلاب‌های رنگی با تاکید بر صنعت نساجی توضیحاتی ارائه می‌شود. در ادامه انواع رنگزاها معرفی شده و روش‌های مختلف تصفیه فاضلاب‌های حاوی رنگزا مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱-۲- منابع تولید فاضلاب حاوی رنگزا

منابع تولید فاضلاب حاوی رنگزا به دو دسته طبیعی و مصنوعی تقسیم می‌شوند. اجزای مختلف بسیاری از گیاهان می‌توانند عامل تولید رنگزاهای مختلف در طبیعت باشند (www.tabriziau.ac.ir؛ chemlack.blogfa.com) تماس با اجزای ریز مواد آلی از قبیل برگ‌های درختان، برگ‌های سوزنی گیاه جوز آور، علف هرز یا چوب، کلروفیل جلبک‌ها، علاوه بر اخذ موادی نظیر جوهر مازو و اسید هیومیک باعث تغییر رنگ آب به زرد مایل به قهوه‌ای یا سبز می‌شود (www.ewrc.sharif.edu).

پساب‌های صنعتی ناشی از صنایع نساجی و عملیات رنگرزی، خمیر کاغذ و تولید ورق‌های کاغذ، صنایع غذایی، تولید مواد شیمیایی، استخراج سنگ معدن و عملیات مربوط به کشتارگاه‌ها ممکن است در اثر ارتباط با نهرها و رودخانه‌های طبیعی در آب ایجاد رنگ نمایند که با توجه به موضوع تحقیق در ادامه در رابطه با پساب نساجی توضیحاتی داده می‌شود (dos Santos و همکاران، ۲۰۰۷؛ نایبی و آیتی، ۱۳۹۰؛ قدسیان، ۱۳۹۰).

۱-۳- مشخصات فاضلاب نساجی

صنعت نساجی شامل فرایندهای مختلف برای تولید محصول می‌باشد. فاضلاب زیادی در فرایندهای مختلف از قبیل آهار زنی، شست و شو، سفید کردن، رنگرزی، چاپ و پرداخت تولید می‌گردد. این فاضلاب حاوی محصولات جانبی، رنگزای باقی مانده، نمک‌ها، اسید یا قلیا، مواد شیمیایی دیگر و حلال‌های شست و شو است (Khandegar و Saroha، ۲۰۱۳). مواد موجود در فاضلاب نساجی به طور عمده به چهار دسته تقسیم بندی می‌شود که هر گروه تصفیه خاص خود را لازم دارد (Das، ۲۰۰۰). همانطور که در جدول ۱-۱ ملاحظه می‌شود، رنگزاها جزء مواد سخت تجزیه پذیر فاضلاب به شمار می روند. در جدول ۱-۲ مشخصات فاضلاب فرایند شیمیایی نساجی آورده شده است.

جدول ۱-۱ - طبقه بندی مواد موجود در فاضلاب نساجی (Das، ۲۰۰۰)

گروه	مواد
سخت تجزیه پذیر	• فلزات، رنگزاها، فنل، سورفکتانت، مواد آلی سمی مانند حشره‌کش‌ها وفسفات‌ها
ضایعات خطرناک یا سمی	• حلال‌های کلرینه، مواد آلی فرار یا غیر قابل تجزیه
زائدات با مقدار زیاد	• آب حاصل از شستشو در مرحله آماده سازی و فرایندهای رنگرزی • فاضلاب قلیایی از فرایندهای آماده سازی • زائدات رنگی حاوی مقدار زیادی از نمک، اسید، قلیا
زائدات نامطلوب	• مایه رنگ (چاپ و شستشوی استوانه چاپ) • زائدات پنبه (آماده سازی، رنگرزی و عملیات شستشو) • فوم ناشی از عملیات آسترکشی • حلال ناشی از تمیز کردن دستگاه‌ها • ته مانده راکد بازیافت حلال‌ها • مواد اضافی استفاده نشده در فرایند

جدول ۱-۲ - نمونه مشخصات فاضلاب فرایند شیمیایی نساجی (Khandegar و Saroha، ۲۰۱۳)

مشخصات	شست و شو	سفید کردن	آهار زنی	رنگرزی	ترکیب کلی
pH	۱۰-۱۲	۸/۵-۱۱	۸-۱۰	۹-۱۱	۸-۱۰
(mg/L) TDS	۱۲۰۰۰-۳۰۰۰۰	۲۵۰۰-۱۱۰۰۰	۲۰۰۰-۲۶۰۰	۱۵۰۰-۴۰۰۰	۵۰۰۰-۱۰۰۰۰
(mg/L) TSS	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۲۰۰-۴۰۰	۱۰۰-۴۰۰	۵۰-۳۵۰	۱۰۰-۷۰۰
(mg/L) BOD	۲۵۰۰-۳۵۰۰	۱۰۰-۵۰۰	۵۰-۱۲۰	۱۰۰-۴۰۰	۵۰-۵۵۰
(mg/L) COD	۱۰۰۰۰-۲۰۰۰۰	۱۲۰۰-۱۶۰۰	۲۵۰-۴۰۰	۴۰۰-۱۴۰۰	۲۵۰-۸۰۰۰
کلرید (mg/L)	-	-	۳۵۰-۷۰۰	-	۱۰۰-۵۰۰
سولفات (mg/L)	-	-	۱۰۰-۳۵۰	-	۵۰-۳۰۰
رنگ	-	-	به شدت رنگی	به شدت رنگی	به شدت رنگی