

## ***Removal of Furfural from Industrial Wastewater Using Electrocoagulation Process: A Taguchi Experimental Design***

Ghorban Asgari<sup>1</sup>,  
Sima Maleki<sup>2</sup>,  
Abdolmotaleb Seidmohammadi<sup>1</sup>,  
Javad Faradmal<sup>3</sup>,  
Mostafa Leili<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Associate Professor, Social Determinants of Health Research Center, Department of Environmental Health Engineering, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran

<sup>2</sup> MSc in Environmental Health Engineering, School of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran

<sup>3</sup> Associate Professor, Department of Biostatistics and Epidemiology, School of Public Health, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran

<sup>4</sup> Associate Professor, Research Center for Health Sciences, Department of Environmental Health Engineering, Hamedan University of Medical Sciences, Hamedan, Iran

(Received June 20, 2016; Accepted November 13, 2016)

### ***Abstract***

**Background and purpose:** Furfural is a toxic chemical that is widely used in refinery and petrochemical industries. Wastewater containing furfural need appropriate treatments before being disposed to the environment in order to avoid the toxic effects of this compound on the environment and human. This study aimed to investigate the efficiency of electrocoagulation process in removal of furfural.

**Materials and methods:** This experimental study was conducted using a Plexiglas reactor with an approximate volume of 500 ml equipped with four Al and Fe electrodes (Anode-Cathode) in monopolar-parallel mode. The effects of operating parameters such as electrodes connection, type of electrodes, pH of solution, applied voltage, furfural initial concentration, and reaction time were evaluated by defined factor of 4×4 using Taguchi L16 orthogonal array in a batch mode. Concentration of furfural was determined using HPLC wavelength of 254 nm. Data analysis was performed in Minitab 16™ software.

**Results:** Based on the results of the Taguchi method, the optimum conditions for furfural removal included the initial furfural concentration of 100 mg/L, pH= 7, voltage= 10 V, and reaction time= 30 min. The contribution rate of each parameter was determined through ANOVA test. Accordingly, the most and least influential factors were found to be the initial furfural concentration and pH, respectively. Furthermore, in optimum conditions, the furfural removal efficiency of this model was 94.7%.

**Conclusion:** As the findings of the present study indicated, electrocoagulation process is believed to be an effective method in furfural removal which could remove 95% of furfural in optimum laboratory conditions.

**Keywords:** electrocoagulation, furfural, industrial wastewater, taguchi model

## حذف فورفورال از فاضلاب صنعتی با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی: طراحی آزمایش با استفاده از مدل تاگوچی

قربان عسگری<sup>۱</sup>

سیما ملکی<sup>۲</sup>

عبدالمطلب صیدمحمدی<sup>۱</sup>

جواد فردمال<sup>۳</sup>

مصطفی لیلی<sup>۴</sup>

### چکیده

**سابقه و هدف:** فورفورال یک ترکیب شیمیایی سمی است که در مقیاس وسیع، در پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمی استفاده می‌شود. برای جلوگیری از اثرات آن بر محیط زیست و انسان، باید فاضلاب‌های حاوی فورفورال را پیش از دفع به محیط، به صورت مناسب تصفیه نمود. این مطالعه با هدف بررسی کارایی فرآیند انعقاد الکتریکی در حذف فورفورال انجام شد.

**مواد و روش‌ها:** این پژوهش، یک مطالعه تجربی است. راکتور مورد استفاده، از جنس پلکسی گلاس به حجم مفید ۵۰۰ ml، مجهز به چهار الکترود از جنس آلومینیوم و آهن (آند-کاتد) و با اتصال تک قطبی موازی بود. پارامترهای pH، زمان تماس، ولتاژ و غلظت‌های مختلف فورفورال، برای حذف آن توسط انعقاد الکتریکی با تعریف این چهار عامل در چهار سطح به کمک طرح ماتریکس ترکیبی L-16 مدل تاگوچی در شرایط آزمایشگاهی و به صورت ناپیوسته مورد بررسی قرار گرفت. غلظت باقیمانده فورفورال با استفاده از دستگاه HPLC در طول موج ۲۵۴ nm قرائت گردید. سپس داده‌ها توسط نرم‌افزار Minitab 16 تجزیه و تحلیل شدند.

**یافته‌ها:** با توجه به نتایج حاصل از آنالیز آماری تاگوچی، شرایط بهینه در میزان غلظت فورفورال ۱۰۰ mg/L، pH: ۷، ولتاژ ۱۰ V و زمان ۳۰ دقیقه بود. بر اساس مجموع مربعات محاسبه شده در جدول آنالیز واریانس، درصد مشارکت هر یک از پارامترها تعیین گردید. بر این اساس، از بین عوامل مورد بررسی، بیشترین میزان تأثیر مربوط به غلظت اولیه فورفورال و کمترین تأثیر مربوط به pH مشاهده شد. همچنین، پیش‌بینی مدل برای بهترین شرایط حذف فورفورال ۹۴/۷ درصد بود.

**استنتاج:** نتایج این مطالعه نشان داد، فرآیند الکتروکواگولاسیون یک فرآیند مؤثر در حذف فورفورال بوده که تحت شرایط بهینه آزمایشگاهی می‌تواند حدود ۹۵ درصد کارایی در حذف فورفورال داشته باشد.

**واژه‌های کلیدی:** انعقاد الکتریکی، روش تاگوچی، فاضلاب صنعتی، فورفورال

### مقدمه

امروزه وجود ترکیبات، مواد مقاوم و سمی در منابع آب و همچنین تولید فاضلاب‌های حاوی ترکیبات سمی و پیچیده، کاربرد فرآیندهای متداول تصفیه‌ی آب و فاضلاب را محدود و در برخی موارد

Email: mostafa.leili@gmail.com

**مؤلف مسئول:** مصطفی لیلی - همدان: دانشگاه علوم پزشکی همدان، دانشکده بهداشت، گروه مهندسی بهداشت محیط

۱. دانشیار، مرکز تحقیقات اجتماعی مؤثر بر سلامت، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

۲. کارشناس ارشد مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

۳. دانشیار، گروه آمار زیستی و اپیدمیولوژی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

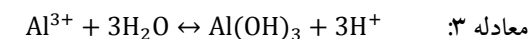
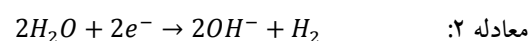
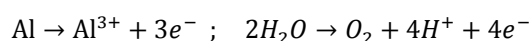
۴. دانشیار، گروه مهندسی بهداشت محیط، دانشکده بهداشت و مرکز تحقیقات علوم بهداشتی، دانشگاه علوم پزشکی همدان، همدان، ایران

✉ تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۳/۳۱ تاریخ ارجاع جهت اصلاحات: ۱۳۹۵/۵/۳۱ تاریخ تصویب: ۱۳۹۵/۸/۲۳

پارامترهای مختلف راهبری، سمیت فورفورال در غلظت‌های بالا و شوک‌پذیری سیستم می‌باشند. استفاده از روش‌های جذب نیز، محدودیت‌هایی از جمله هزینه‌های خریداری و یا احیاء مجدد آن‌ها دارد. با توجه به نارسایی‌ها و پیش‌فرض‌های موجود در روش‌های متداول در حذف فورفورال، می‌توان از روش‌های نوین به‌عنوان جایگزین استفاده کرد که به‌علت آثار کم بر محیط زیست، بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌اند (۱۵). یکی از این روش‌ها، فرآیند انعقاد الکتریکی است. روش انعقاد الکتریکی، روشی مؤثر و مطمئن است که در حذف آلاینده‌های مختلف زیست‌محیطی استفاده می‌شود (۱۶، ۱۷). در فرآیند انعقاد الکتریکی با الکترودهای آهن و آلومینیوم، فرآیند با اکسیداسیون آندهای قربانی شروع شده و در ادامه به‌ترتیب یون‌های  $Al^{2+}$  و  $Fe^{2+}$  توسط الکترودهای آهن و آلومینیوم تولید می‌شود که این یون‌های فلزی با یون‌های هیدروکسید ناشی از الکترولیز آب، ترکیب شده و هیدروکسیدهای فلزی را ایجاد می‌کنند که باعث ناپایداری آلاینده‌ها و جامدات معلق می‌شوند و لخته‌ها را تشکیل می‌دهند. در ادامه، لخته‌های تشکیل‌شده می‌توانند براساس دانسیته با استفاده از فرآیند شناورسازی و یا به‌وسیله ته‌نشینی از سطح مایع حذف شوند (۱۸).

در حالت استفاده از الکترود آلومینیوم در آند و کاتد، واکنش‌های الکترودی به‌صورت زیر انجام می‌پذیرد (۱۸-۱۵):

معادله ۱:



و در حالت استفاده از الکترود آهن در آند و کاتد، واکنش‌های الکترودی به‌صورت زیر انجام می‌گیرد

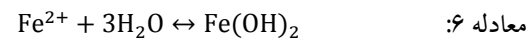
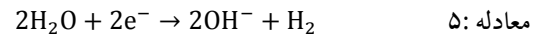
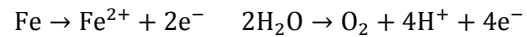
ناتوان کرده است (۱). صنایع نفت و پتروشیمی به‌عنوان یکی از بزرگ‌ترین و مهم‌ترین منابع آلاینده‌ی محیط زیست محسوب می‌شوند که ترکیبات شیمیایی پیچیده‌ی مختلفی از واحدهای فرآیندی و تولیدی این صنایع وارد محیط زیست شده و همواره به‌عنوان یک منبع عمده‌ی آلوده‌کننده‌ی محیط زیست به‌ویژه خاک و منابع آبی محسوب می‌شوند (۲).

فورفورال با فرمول شیمیایی  $C_5H_4O_2$ ، یکی از انواع آلدهیدهای آروماتیک است که در ساختار خود دارای یک حلقه با چهار اتم کربن و یک اتم اکسیژن است. در فرم خالص، فورفورال مایعی بی‌رنگ و روغنی است که از آن در مقیاس وسیع در پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمی، کاغذ و مقواسازی، تصفیه‌ی روغن استفاده شده و در فاضلاب تولیدی آن‌ها در دامنه  $100-1200 \text{ mg/l}$  وجود دارد (۶-۳). فورفورال در آب محلول بوده و نقطه‌ی جوش آن  $161/8^{\circ}C$  است (۷، ۸). در مواجهه‌ی انسانی، فورفورال می‌تواند از طریق استنشاق، بلع، تماس با پوست و چشم یا جذب از طریق پوست اتفاق بیفتد که می‌تواند به‌عنوان محرک پوست، چشم‌ها و غشاهای مخاطی باشد. مواجهه برخی کارگران با این ماده، باعث سردرد، سرخ‌شدن چشم‌ها و ریزش اشک، ادم ریوی می‌شود (۷، ۹)؛ بنابراین، باید از جریان‌های فاضلاب یا پساب حذف شود. تاکنون، روش‌های متعددی توسط محققین مختلف در حذف فورفورال مورد بررسی قرار گرفته است که از جمله عمده‌ترین آن‌ها، روش زیستی (۳)، فرآیند جذب (۹، ۱۰)، روش‌های کاتالیستی و فتوکاتالیستی (۱۳-۱۱)، و روش‌های نانوفیلتراسیون است (۱۴). روش‌های زیستی دارای مزایای بسیاری از جمله دوست‌دار محیط زیست بودن و غیره می‌باشد؛ ولی معایبی نیز دارند از جمله اینکه به‌شدت تحت تأثیر

(۱۵-۱۸):

هیدروکربن‌های نفتی از آب‌های زیرزمینی آلوده مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که ترکیب الکترودهای آهن- استیل به‌عنوان کاتد- آند در شرایط pH خنثی بیشترین کارایی را در حذف ترکیبات نفتی دارد. Asadi Habib و همکاران (۲۲) عملکرد فرآیند انعقاد الکتریکی در حذف کروم به کمک مدل آماری تاگوچی را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که در بین پارامترهای بررسی شده، بیشترین تأثیر مربوط به شدت جریان الکتریکی و جنس الکترود و کمترین تأثیر نیز مربوط به دور همزنی بوده است. در مطالعه‌ای دیگر، Jaafarzadeh و همکاران (۲۴) از مدل تاگوچی برای بهینه‌سازی راکتور زیستی با بستر متحرک استفاده کردند. نتایج این مطالعه نشان داد که تحت شرایط بهینه، کارایی سیستم براساس اکسیژن مورد نیاز شیمیایی (COD) ۹۷ درصد می‌باشد. Asgari و همکاران (۲۵) نیز، از روش طراحی آزمایش تاگوچی در حذف رنگ راکتیو بلاک ۵، فرآیند ازن زنی کاتالیزوری و کاتالیزور خاکستر استخوان تثبیت‌شده با MgO استفاده کردند. براساس نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها، شرایط بهینه حذف رنگ در زمان ۲۰ دقیقه، pH برابر ۸، غلظت اولیه رنگ ۵۰ mg/L و دوز کاتالیزور ۰/۳ g/L به‌دست آمد. تحت این شرایط، بازده حذف رنگ ۹۸ درصد و حذف COD برابر با ۸۵ درصد گزارش شد. Amin و همکاران (۲۶) از روش طراحی آزمایش تاگوچی برای تعیین شرایط بهینه حذف بنزن توسط نانوذرات مغناطیسی از محلول‌های آبی استفاده کردند. نتایج این مطالعه نیز نشان داد که نانوذرات قادر به حذف بنزن به میزان ۹۸/۷ درصد تحت شرایط بهینه ناپیوسته و ۹۴/۵ درصد در شرایط بهینه پیوسته هستند. در مطالعه‌ای دیگر، Vidal و همکاران (۲۷) با استفاده از فرآیند انعقاد الکتریکی با الکترودهای آلومینیوم، رنگ اسید بلک ۱۹۴ را از آب حذف نمودند. نتایج این مطالعه

معادله ۴:



از جمله مزایای روش انعقاد الکتریکی، تطابق‌پذیری با شرایط مختلف، سازگاری با شرایط زیست‌محیطی، نیاز به تجهیزات ساده، زمان ماند پایین، بهره‌برداری آسان، قابلیت تصفیه‌ی دامنه‌ی وسیعی از آلاینده‌ها و عدم نیاز به افزودن مواد شیمیایی است (۱۷-۱۹).

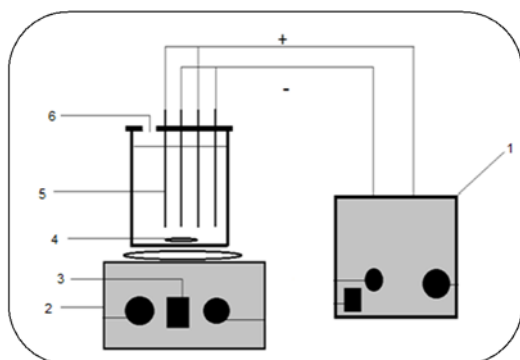
امروزه برای کاهش تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای تعیین شرایط بهینه‌ی آزمایش‌ها، کاهش زمان و هزینه‌ها از انواع روش‌های آماری استفاده می‌شود. روش تاگوچی، یک روش تحلیل آزمایش است که براساس آن می‌توان با تعداد معینی آزمایش و با ترکیب‌های خاص و از پیش تعیین‌شده‌ی سطوح، میزان تأثیر عوامل و سطوح بهینه‌ی مطالعات تجربی و آزمایشگاهی را تعیین کرد (۲۱،۲۰). این روش به‌صورت گسترده برای بهینه‌سازی متغیرهای واکنش از طریق مدل‌سازی حداقل آزمایشات استفاده می‌شود. در این روش، هر سیستم با پارامترهای مستقل و سطوح مختلف مورد مطالعه قرار می‌گیرد و دارای کاربردهای فراوانی از علم شیمی تا مهندسی است. از مزایای این روش می‌توان به حداقل‌بودن هزینه‌ی آزمایش‌ها و تعداد نمونه‌ها اشاره کرد (۲۲).

مطالعات در خصوص استفاده از روش انعقاد الکتریکی در تصفیه‌ی فاضلاب‌های حاوی ترکیبات آلی، صنایع رنگ، آلاینده‌های سمی و همچنین استفاده از مدل‌های آماری همچون تاگوچی در طی دهه‌ی گذشته افزایش یافته که به برخی از آن‌ها اشاره می‌گردد. موسوی و همکاران (۲۳)، فرآیند انعقاد الکتریکی را برای حذف

ویژگی‌های دستگاه استفاده‌شده در این مطالعه، امکان تغییر ولتاژ و آمپر جریان وجود داشته و در مطالعات انجام‌گرفته در این زمینه نیز، یکی از رویه‌های ولتاژ ثابت یا آمپر ثابت مورد استفاده قرار گرفت؛ بنابراین، در مطالعه حاضر از رویه اول؛ یعنی ولتاژ ثابت استفاده شد. تمام ترکیبات شیمیایی مورد استفاده، از جمله: فورفورال، اسید سولفوریک، هیدروکسید سدیم و اسید کلریدریک ساخت شرکت Merck آلمان بود. محلول ذخیره فورفورال با حل کردن مقدار معینی از فورفورال در آب دوبار تقطیر به‌دست آمد. برای ممانعت از تأثیر مداخله‌گرها، ابتدا الکترودها با آب مقطر دوبار تقطیر، شسته و پس از تمیز نمودن با محلول اسید کلریدریک یک نرمال، دوباره با آب مقطر دوبار تقطیر شستشو داده شد. سنجش غلظت فورفورال با استفاده از دستگاه HPLC (High Performance Liquid Chromatography) با دتکتور UV (Ultraviolet) (Kanuer)، ساخت کشور آلمان) در طول موج ۲۵۴ nm، ستون C18 و فاز متحرک استونیتریل- آب مقطر با نسبت ۶۰ به ۴۰ و پس از رسم منحنی کالیبراسیون در این طول موج صورت گرفت (۲۹).

#### طراحی مدل و آزمایشات

در این تحقیق، به‌منظور بررسی عملکرد انعقاد



تصویر شماره ۱: شماتیک راکتور مورد استفاده در تحقیق: (۱) دستگاه برق مولد جریان مستقیم، (۲) میکسر، (۳) کلید تنظیم، (۴) مگنت، (۵) الکترودها، (۶) محل نمونه‌برداری

نشان داد که این روش قادر به حذف کامل رنگ، محتوای TOC و COD تحت شرایط pH اسیدی و زمان‌های واکنش نسبتاً کوتاه می‌باشد. Pekey در سال ۲۰۱۶، از روش الکتروشیمیایی با طراحی ترکیبی مرکزی برای حذف ترکیبات رنگی استفاده کرد (۲۸). نتایج این تحقیق نشان داد که برای غلظت‌های رنگ ۲۷۵ و ۶۲۵ mg/L، کارایی حذف فرآیند به‌ترتیب برابر ۸۰ و ۹۸ درصد می‌باشد. بررسی پژوهش‌های گوناگون نشان می‌دهد که، از روش معرفی‌شده در این تحقیق برای حذف فورفورال و نیز از روش آماری تاگوچی برای تعیین شرایط بهینه استفاده نشده است؛ بنابراین، مطالعه حاضر با هدف بررسی تأثیر پارامترهای مختلف راهبری و بهینه‌سازی این پارامترها در فرآیند انعقاد الکتریکی در حذف فورفورال با طراحی آزمایش به روش مدل آماری تاگوچی صورت گرفت.

## مواد و روش‌ها

### راکتور و شرایط آزمایش

مطالعه‌ی حاضر، یک مطالعه‌ی تجربی است که در یک راکتور با جریان منقطع در آزمایشگاه آب و فاضلاب دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی همدان انجام شد. راکتور مورد استفاده در این پژوهش، از جنس پلکسی گلاس به حجم مفید ۵۰۰ ml، مجهز به چهار الکترودها از جنس آهن و آلومینیوم (کاتد-آند) با اتصال تک‌قطبی موازی بود. ابعاد این تیغه‌ها ۱۵۰×۵۰×۱ mm بوده و در هر آزمایش از چهار تیغه با فاصله ثابت ۱/۵ cm استفاده گردید. برای هم زدن محلول و ایجاد اختلاط، از یک مگنت مغناطیسی و برای تأمین انرژی الکتریکی برای انجام فرآیندها، از یک منبع تغذیه جریان برق مستقیم (DAZHENG PS-305D مدل DC Power Supply) استفاده شد. در تصویر شماره ۱، شماتیک راکتور مورد استفاده در مطالعه، نشان داده شده است. با توجه به

(۲۱،۲۰) و همچنین هر کدام از آزمایشات دوبرار تکرار و در مدل وارد شده و سپس تجزیه و تحلیل‌ها توسط مدل صورت گرفت.

برای تحلیل دقیق‌تر آماری نتایج در روش تاگوچی، از یک تابع پاسخ تبدیل یافته که به صورت نسبت علامت هر اثر (Signal: S) به اثرات ناشی از خطا (Noise: N) تعریف می‌گردد، استفاده شد. مزیت استفاده از این پاسخ جدید در تحلیل آماری، نسبت به تصویر اولیه پاسخ، مقایسه‌ی بزرگی اثرات ناشی از هر عامل اصلی با اثرات ناشی از عوامل خطا و اغتشاش در اندازه‌گیری است که در نتیجه منجر به برداشت دقیق‌تری از تأثیر واقعی عوامل بر سیستم خواهد شد (۲۴،۲۰). در این مطالعه پاسخ در نظر گرفته شده، درصد حذف فورفورال می‌باشد و نسبت S/N به صورت معادله ۷ محاسبه می‌گردد:

معادله ۷:

$$\frac{S}{N} = -10 \log \frac{(1/y_1^2 + 1/y_2^2 + \dots + 1/y_n^2)}{n}$$

جدول شماره ۱: آرایه‌ها و سطوح مختلف آن‌ها

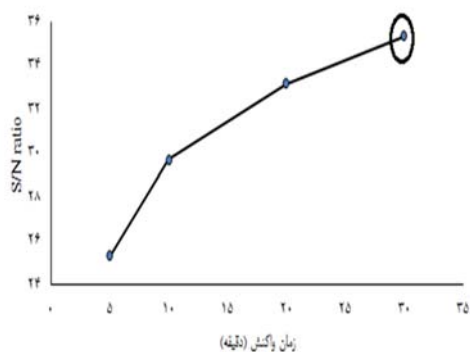
عامل (آرایه)	سطوح	۱	۲	۳	۴
۱ زمان واکنش (دقیقه)	۵	۱۰	۲۰	۳۰	
۲ غلظت آلاینده (mg/l)	۱۰۰	۳۰۰	۷۰۰	۱۰۰۰	
۳ pH	۳	۵	۷	۹	
۴ ولتاژ اولیه (V)	۵	۱۰	۲۰	۳۰	

الکتریکی چهار پارامتر تأثیرگذار در فرآیند حذف فورفورال شامل: pH، غلظت اولیه‌ی فورفورال، ولتاژ و زمان واکنش به‌عنوان آرایه انتخاب شدند که هر کدام از آرایه‌ها دارای چهار سطح می‌باشند. سطوح انتخاب هر یک از آن‌ها به‌عنوان داده‌های مدل تاگوچی در جدول شماره ۱ ارائه شده است. لازم به ذکر است که محدوده‌ی هر یک از پارامترها براساس مطالعات موجود و نیز انجام آزمایشات اولیه انتخاب شد.

پس از طراحی آزمایش‌ها با استفاده از روش تاگوچی برای چهار پارامتر، ۱۶ مرحله آزمایش توسط طرح "L-16" طبق ترکیب ارائه شده تعیین گردید که جزئیات هر کدام از آزمایش‌ها در جدول شماره ۲ ارائه شده است. لازم به ذکر است، آزمایشات به‌صورت تصادفی انجام شد که جزء ملزومات این روش بوده

جدول شماره ۲: ترکیب آزمایشات پیشنهاد شده توسط روش تاگوچی و نتایج حاصل

شماره آزمایش	زمان واکنش (min)	غلظت (mg/L)	ولتاژ (V)	pH	میانگین بازده حذف (درصد)	انحراف معیار	S/N
۱	۵	۱۰۰	۵	۳	۴۵	۱/۲۴	۳۳/۰۵۷۸
۲	۵	۳۰۰	۱۰	۵	۵۲/۵	۱/۱۲	۳۴/۳۹۲۵
۳	۵	۷۰۰	۲۰	۷	۶	۱/۴۱	۱۵/۱۹۹۳
۴	۵	۱۰۰۰	۳۰	۹	۸/۷۵	۱/۰۶	۱۸/۷۴۴۳
۵	۱۰	۱۰۰	۱۰	۷	۸۵	۱/۰۴	۳۸/۵۸۶۶
۶	۱۰	۳۰۰	۵	۹	۶۱/۷۵	۱/۰۶	۳۵/۸۱۰۸
۷	۱۰	۷۰۰	۳۰	۳	۱۶	۱/۴۴	۲۴/۰۳۱۵
۸	۱۰	۱۰۰۰	۲۰	۵	۱۰/۵	۰/۷۱	۲۰/۳۹۴۲
۹	۲۰	۱۰۰	۲۰	۹	۷۶	۱/۴۱	۳۷/۶۱۴۰
۱۰	۲۰	۳۰۰	۳۰	۷	۸۳/۵	۱/۴۵	۳۸/۴۲۹۵
۱۱	۲۰	۷۰۰	۵	۵	۳۱	۱/۴۱	۲۹/۸۱۳۷
۱۲	۲۰	۱۰۰۰	۱۰	۳	۲۲/۵	۰/۷۱	۲۷/۰۳۷۲
۱۳	۳۰	۱۰۰	۳۰	۵	۹۱/۵	۰/۷۳	۳۹/۲۲۸۰
۱۴	۳۰	۳۰۰	۲۰	۳	۷۷	۱/۴۱	۳۷/۷۲۷۶
۱۵	۳۰	۷۰۰	۱۰	۹	۵۴/۵	۰/۷۴	۳۴/۷۲۶۸
۱۶	۳۰	۱۰۰۰	۵	۷	۳۱/۵	۱/۳۸	۲۹/۹۳۶۷



نمودار شماره ۱: نتایج آنالیز میانگین نرخ S/N در مقابل زمان واکنش

افزایش بازده است. ردیف برجسته و پررنگ شده در جدول شماره ۲، بیشترین میزان نرخ S/N را در بین ۱۶ آزمایش در شرایط آزمایشگاهی و تجربی انجام گرفته، نشان می‌دهد. برای تعیین شرایط بهینه هر فاکتور (ماکزیمم نرخ میانگین S/N هر فاکتور از بین چهار سطح) و پیش‌بینی چهار فاکتور بهینه براساس روش‌های تحلیلی و آنالیز، میانگین نرخ S/N هر فاکتور (mean of s/n ratio) در چهار سطح اندازه‌گیری و بیشترین میزان S/N به دست آمده، به‌عنوان سطح بهینه‌ی آن فاکتور لحاظ و در نمودارهای شماره ۱ تا ۴ ارائه شده است.

#### اثر زمان واکنش

یکی از پارامترهای در نظر گرفته شده در حذف فورفورال توسط فرآیند انعقاد الکتریکی، زمان تماس می‌باشد. زمان‌های تماس انتخاب شده بین ۵ تا ۳۰ min است که با شرایط از پیش تعیین شده به وسیله انجام آزمایش‌های پیش‌آزمون نیز سازگاری دارد. نتایج آزمایشات انجام گرفته تحت شرایط تجربی که در جدول شماره ۲ ارائه شده، نشان می‌دهد که ترکیب آزمایشی شماره ۱۳ (که به صورت Bold در جدول نشان داده شده است) با زمان ماند ۳۰ min بالاترین نسبت S/N را به خود اختصاص داده است. همچنین، نتایج حاصل از

در این معادله،  $Y_n$  مقدار پاسخ اندازه‌گیری شده برای هر آزمایش در هر آزمون، و  $n$  تعداد تکرار آزمایش‌ها (در اینجا برابر ۲ می‌باشد) است.

در جدول شماره ۲، نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها براساس طرح L-16 و میانگین بازده حذف فورفورال به همراه انحراف معیار مربوطه برای هر ترکیب آزمایشی بر مبنای دو تکرار بیان شده است. در ستون آخر جدول شماره ۲، مقادیر S/N مربوط به هر آزمایش گزارش شده است. لازم به ذکر است که طراحی، تحلیل آزمایش‌ها و تعیین سطح بهینه در مطالعه‌ی حاضر با استفاده از نرم‌افزار Minitab 16™ (Minitab Inc., State College, PA) انجام شد.

#### تعیین سینتیک فرآیند

در پایان، به منظور تعیین درجه واکنش و سرعت حذف فورفورال، آزمایشات حذف فورال در شرایط بهینه و در زمان‌های مختلف صورت گرفت و نتایج حاصل با رایج‌ترین معادلات سینتیکی درجه یک کاذب (معادله ۸) و درجه دو کاذب (معادله ۹) برازش داده شد (۶، ۳۰):

معادله ۸:

$$q_t = q_e - \exp(\ln q_e - k_1 t)$$

معادله ۹:

$$q_t = \frac{q_e^2 k_2 t}{q_e k_2 t + 1}$$

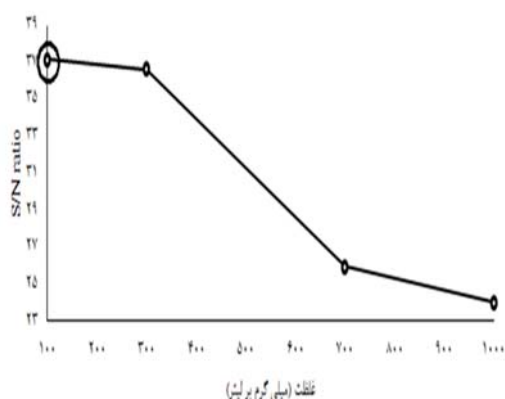
## یافته‌ها

بازده حذف آلاینده با توجه به ترکیب آزمایشات پیشنهادی تعیین شده و پاسخ هر آزمایش با استفاده از معادله ۷ که پیش‌تر ارائه شد به نرخ S/N تبدیل و برای هر آزمایش مشخص گردید (ستون آخر جدول شماره ۲). افزایش نرخ S/N نشان دهنده‌ی بهتر شدن شرایط و

جدول شماره ۳: جدول آنالیز واریانس مدل آماری تاگوچی

فاکتور	درجه آزادی (Df)	مجموع مربعات (Sum Sq)	میانگین مربعات (Mean Sq)	درصد مشارکت (CF)
زمان واکنش (min)	۳	۲۳۱/۷۴۳	۷۷/۲۴۸	۲۴/۱۵
غلظت فورفورال (mg/l)	۳	۵۷۱/۵۲۳	۱۹۰/۵۰۸	۶۱/۸۵
ولتاژ (V)	۳	۷۹/۹۳۹	۲۶/۶۴۶	۷/۳۱
pH	۳	۱۵/۴۵۷	۵/۱۵۲	۱/۱۲
Residuals	۳	۱۴/۰۷	۴/۶۹	
Total	۱۵	۹۲۱/۷۲۳		

۶۱/۸۵ درصد (CF= ۶۱/۸۵ درصد) در حذف فورفورال توسط فرآیند انعقاد الکتریکی تأثیر دارد (جدول شماره ۳).



نمودار شماره ۲: نتایج آنالیز میانگین نرخ S/N در مقابل غلظت فورفورال

آنالیز میانگین نرخ S/N (Mean of S/N ratio) (نمودار شماره ۱) پیش‌بینی می‌کند که پارامتر زمان واکنش در سطح چهار، بالاترین نسبت S/N را دارا خواهد بود که این میزان برابر با ۳۵/۴۰ می‌باشد. براساس این نتایج، زمان واکنش در شرایط بهینه، ۳۰min تعیین شده است. همچنین، برای تعیین اثرگذاری و درصد مشارکت هر یک از پارامترها، نتایج حاصل از آنالیز واریانس متوسط S/N نشان داد که این پارامتر انتخابی، ۲۴/۱۵ درصد (CF= ۲۴/۱۵ درصد) در حذف فورفورال تأثیر دارد و از لحاظ تأثیرگذار بودن در مکان دوم پارامترهای انتخابی قرار دارد (جدول شماره ۳).

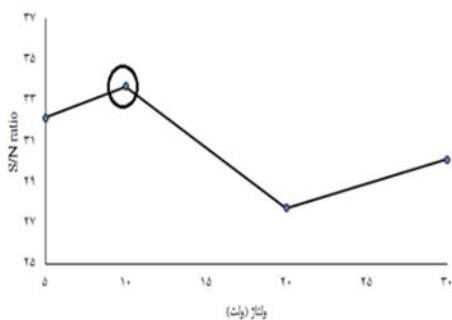
#### اثر pH محلول

برای تعیین میزان تأثیر pH در فرآیند مورد مطالعه، pH در چهار دامنه (۳، ۵، ۷، ۹) بر بازده حذف فورفورال مورد بررسی قرار گرفت. همان‌طور که در جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود، آزمایش ۱۳ با pH برابر ۵، بالاترین نسبت S/N را به خود اختصاص داده است. برای تعیین میزان بهینه‌ی pH، آنالیز میانگین S/N بر روی داده‌ها انجام شد و نتایج آن نشان داد که میزان بهینه‌ی pH برابر با ۷ یا سطح سه آرایه‌ها پیش‌بینی گردیده است (نمودار شماره ۳) که S/N نهایی در این صورت برابر ۳۱/۷۲ می‌باشد. همچنین، نتایج آنالیز واریانس، تأثیرگذاری این پارامتر را جزئی (CF= ۱/۱۲ درصد) و در اولویت آخر قرار داد (جدول شماره ۳).

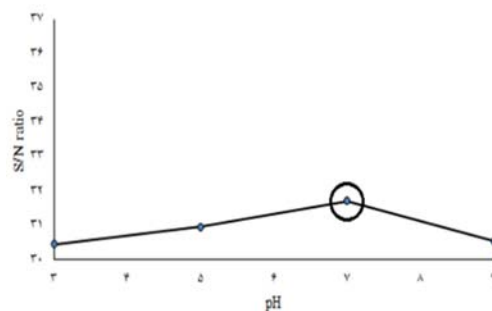
#### اثر غلظت اولیه

تأثیر غلظت اولیه در چهار دامنه از غلظت فورفورال (۱۰۰، ۳۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ mg/L) در فرآیند انعقاد الکتریکی با ترکیب آزمایشات در جدول شماره ۲ ارائه شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در آزمایشات صورت گرفته، بالاترین نسبت S/N مربوط به آزمایش ۱۳ با سطح اول غلظت؛ یعنی غلظت ۱۰۰ mg/L می‌باشد. برای یافتن بهترین غلظت ورودی در شرایط بهینه‌ی آنالیز، میانگین S/N انجام شد. نتایج حاصل از این آنالیز نیز، غلظت بهینه را ۱۰۰ mg/L با بالاترین سطح S/N برابر با ۳۷/۱۲ نشان داد (نمودار شماره ۲). این پارامتر انتخابی براساس آنالیز واریانس صورت گرفته از لحاظ تأثیرگذار بودن در مکان اول پارامترهای انتخابی قرار دارد و



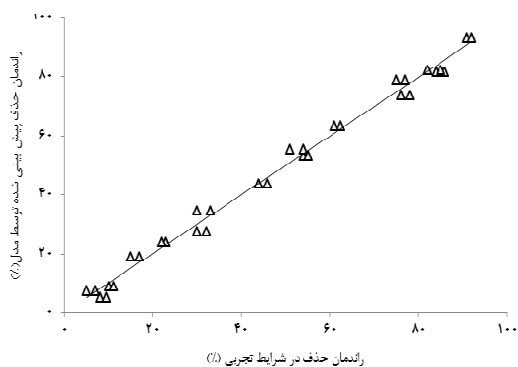


نمودار شماره ۴: نتایج آنالیز میانگین نرخ S/N در مقابل تغییرات ولتاژ



نمودار شماره ۳: نتایج آنالیز میانگین نرخ S/N در مقابل pH

این شرایط پیش‌بینی شده صورت گرفت و نرخ S/N محاسبه گردید. با توجه به جدول شماره ۴، نرخ S/N در شرایط بهینه (۴۳/۴۲۵) نسبت به آزمایش ۱۳ (۳۹/۲۲۰) مقدار بیشتری می‌باشد و به تبع آن میزان بازده حذف تحت شرایط بهینه، بالاتر از شرایط آزمایش انجام شده است. همان‌طور که نتایج نمودار شماره ۵ نشان می‌دهد، در نهایت نمودار پراکنش بازده حذف فورفورال در شرایط آزمایشگاهی در مقابل بازده حذف فورفورال در شرایط پیش‌بینی شده توسط مدل، با ضریب اطمینان بالا ( $R^2 = 0.9913$ ) معیار مناسبی از ارزیابی مدل را ارائه می‌نماید.



نمودار شماره ۵: میزان تبیین مدل آماری از حذف فورفورال

### اثر شدت ولتاژ جریان

از دیگر پارامترهای مهم در فرآیند انعقاد الکتریکی که نقش قابل توجهی در حذف آلاینده‌ها دارد، تأثیر تغییرات ولتاژ جریان است. در این بررسی، اثر ولتاژ در چهار دامنه (۵ تا ۳۰ V) مورد آزمایش قرار گرفت و جهت بهینه‌کردن این پارامتر، نتایج آنالیز میانگین انجام شده، بالاترین نسبت S/N را برابر با ۳۳/۶۹ به دست آورد و همان‌طور که در جدول شماره ۳ نشان داده شد، این نتیجه مربوط به سطح دوم ولتاژ؛ یعنی ۱۰ V می‌باشد که این میزان در ترکیب آزمایش ۱۳، ۳۰ V گزارش گردید. تأثیرگذاری این پارامتر طبق جدول شماره ۳، ۷/۳۱ درصد (CF= ۷/۳۱) می‌باشد که در رتبه سوم اثرگذاری حذف فورفورال توسط انعقاد الکتریکی قرار می‌گیرد (نمودار شماره ۴ و جدول شماره ۳).

### شرایط بهینه‌ی تعیین شده توسط مدل

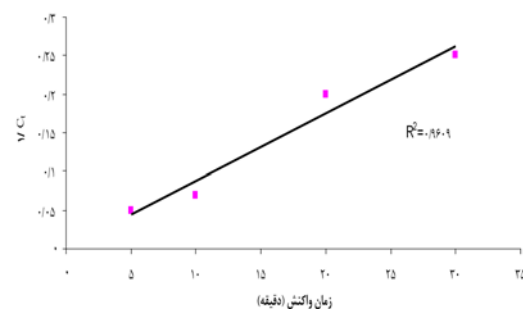
بر اساس نتایج پیش‌بینی شده در جدول شماره ۴، شرایط بهینه برای حذف فورفورال در غلظت ۱۰۰ mg/l فورفورال، ولتاژ ۱۰ V، pH برابر ۷ و طی مدت زمان ۳۰ min برآورد گردید. آزمایشات تأییدی برای رسیدن به

جدول شماره ۴: شرایط بهینه آزمون شده و نتایج حاصل

شماره آزمایش	زمان واکنش (دقیقه)	pH	ولتاژ	غلظت (mg/L)	بازده حذف (درصد)	بازده حذف، تکرار (درصد)	S/N
۱۳	۳۰	۵	۳۰	۱۰۰	۹۱	۹۲	۳۹/۲۲۸۰
شرایط بهینه	۳۰	۷	۱۰	۱۰۰	۹۴/۷	-----	۴۳/۴۲۵

مطالعه حاضر همخوانی دارد (۳۱). تقریباً در بیشتر مطالعات اخیر (۱۹-۱۵)، این پارامتر جزء پارامترهای اصلی و مهم بوده؛ زیرا علاوه بر تأثیر روی هزینه‌های مورد نیاز، بر انتخاب نقطه‌ی بهینه‌ی زمان تماس بر روی پارامترهای راهبری دیگر نیز تأثیرگذار خواهد بود. در این مطالعات، مشاهده شد که با افزایش زمان واکنش، بازده حذف آلاینده‌ها نیز بیشتر می‌شود؛ اما با افزایش هرچه بیشتر زمان‌های واکنش، بازده حذف با شیب کمتری افزایش پیدا می‌کند. در واقع، برای هر فرآیند در حذف هر آلاینده، یک زمان واکنش بهینه و ایده‌آل وجود دارد که مرز اقتصادی بودن فرآیند را تعیین می‌کند (۳۲).

همان‌گونه که در نمودار شماره ۲ مشاهده می‌شود، با افزایش غلظت فورفورال از ۱۰۰ mg/L به ۱۰۰۰ mg/L، میزان S/N از ۳۶ به ۲۴ کاهش یافته است. در نتیجه غلظت ۱۰۰ mg/L به‌عنوان غلظت بهینه انتخاب گردید. براساس مطالعات انجام‌شده، می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که برای غلظت‌های بالاتر آلاینده، اختلاف پتانسیل و زمان واکنش بیشتر لازم است (۳۳). زمانی که غلظت اولیه آلاینده افزایش داشته، بازده حذف نیز کاهش یافته است؛ زیرا در یک ولتاژ ثابت، مقدار مشخصی از ترکیبات هیدروکسید آهن در محیط تولید می‌شود و این مقدار هیدروکسید آهن تولیدی، قادر به حذف مقدار مشخصی از مولکول‌های ماده‌ی آلی می‌باشد. همچنین، در صورت افزایش غلظت اولیه، مقدار لخته‌های هیدروکسید آهن موجود در محیط برای حذف مولکول‌های اضافی ماده‌ی آلی کافی نبوده؛ در نتیجه بازده حذف کاهش می‌یابد (۳۴). این موضوع توسط تئوری محلول‌های رقیق نیز قابل تفسیر است؛ بدین ترتیب که در محلول‌های رقیق، تشکیل لایه‌ی پراکنده در نزدیکی الکترود سبب کندتر شدن واکنش می‌شود؛ اما در



نمودار شماره ۶: سینتیک حذف فورفورال

### بررسی سینتیک فرآیند

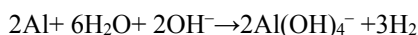
نتایج مربوط به بررسی سینتیک حذف فورفورال در فرآیند الکتروکواگولاسیون در نمودار شماره ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، حذف فورفورال در فرآیند انعقاد الکتریکی از واکنش درجه دو تبعیت می‌کند.

### بحث

نتایج حاصل از آنالیز میانگین نرخ S/N (Mean of S/N ratio) برای چهار سطح زمان واکنش در روش تاگوچی نشان می‌دهد که با افزایش زمان واکنش در فرآیند، نرخ S/N نیز افزایش پیدا کرده و بهترین زمان انتخابی طی مدت ۳۰ min می‌باشد. افزایش زمان در فرآیند انعقاد الکتریکی نقش به‌سزایی در انجام فرآیند حذف دارد و کارایی حذف به‌طور مستقیم وابسته به غلظت یون‌های تولیدی در الکترودها می‌باشد. در واقع، با افزایش زمان واکنش، غلظت این یون‌ها افزایش می‌یابد و در نتیجه، لخته‌های هیدروکسید نیز بیشتر می‌شود؛ ولی با افزایش هرچه بیشتر زمان، ممکن است لخته‌های تشکیل‌شده نیز شکسته شده؛ بنابراین، شاهد کاهش روند افزایشی بازده حذف خواهیم بود (۱۸، ۱۹). نتایج بررسی صورت‌گرفته توسط رحمانی و همکاران در خصوص حذف رنگ با فرآیند الکتروکواگولاسیون با نتایج

اصلی انعقاد؛ یعنی  $\text{Al(OH)}_3$  شده؛ بنابراین کارایی فرآیند را کاهش می‌دهد (۳۸،۳۷،۳۵):

معادله ۱۰:



ولی در محدوده‌های pH خنثی (۵-۷)،  $\text{Al(OH)}_3$  در آب به صورت پایدار غیرقابل حل بوده و توانایی جذب آلاینده‌ها را از محیط آبی داشته که باعث بیشتر شدن کارایی فرآیند در این محدوده‌ی pH شده است. در استفاده از الکتروود آهن به عنوان آند، در محیط اسیدی گونه‌ی  $\text{Fe(OH)}_2$ ، در محیط خنثی گونه‌های  $\text{Fe(OH)}_2$  و  $\text{Fe(OH)}_3$  و در محیط قلیایی گونه‌ی  $\text{Fe(OH)}_3$  به عنوان گونه‌های غالب تولید می‌شوند (۳۸،۳۷،۳۵)؛ بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت در کاربرد تلفیقی الکتروودها (آلومینیم و آهن)، تشکیل  $\text{Fe(OH)}_2$ ،  $\text{Fe(OH)}_3$  و  $\text{Al(OH)}_3$  عامل اصلی حذف فورفورال بوده (معادلات ۳ و ۶) و تشکیل این سه گونه فلزی در شرایط انتخابی در این آزمایش باعث افزایش بازده حذف فورفورال می‌شود. در سایر مطالعات انجام شده در زمینه‌ی استفاده از فرآیندهای الکتروشیمیایی نیز، از تأثیر pH محیط به عنوان یک عامل مهم در انجام واکنش‌ها بحث شده است. به طور مثال، در مطالعه Mollah و همکاران، بهترین عملکرد برای فرآیند انعقاد الکتریکی در حذف رنگ به عنوان یک ترکیب آلی، در pH خنثی گزارش شده است (۳۷). در مطالعه‌ی بصیری پارسا و همکاران نیز، بهترین عملکرد برای فرآیند انعقاد الکتریکی، در pH خنثی مشاهده گردید (۳۵). در مطالعه‌ی Gao که از فرآیند الکتروکواگولاسیون/فلوتاسیون با کمک الکتروود آلومینیوم به منظور حذف جلبک استفاده شد، بهترین عملکرد فرآیند در pH های ۵ تا ۷ گزارش گردید (۳۹). مطالعات بیگلری و همکاران در خصوص استفاده از فرآیند الکتروشیمیایی

محلول‌های غلیظ، لایه‌ی پراکنده اثری بر روی میزان انتشار یون‌های فلزی به سطح الکتروود ندارد (۳۲). این نتایج با نتایج حاصل از تعیین سینتیک واکنش حذف فورفورال همخوانی دارد؛ زیرا نتایج سینتیک حذف فورفورال، نشان داد که سرعت حذف آن در فرآیند انعقاد استفاده شده با غلظت، رابطه‌ی عکس دارد. در مطالعه‌ای که توسط بصیری پارسا و همکاران (۳۵) در خصوص استفاده از روش انعقاد الکتریکی در حذف رنگ بدون طراحی آزمایش صورت گرفت و همچنین مطالعه‌ای که توسط آخوندی و همکاران (۳۶) در مورد استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی در حذف کادمیوم انجام شد، هر دو حاکی از کاهش بازده با افزایش غلظت آلاینده در فرآیند الکتروکواگولاسیون می‌باشد.

یکی دیگر از پارامترهای مورد بررسی در فرآیند انعقاد الکتریکی، تأثیر pH محلول بر میزان حذف فورفورال می‌باشد. همان‌طور که مشاهده شد، pH: ۵ و pH: ۷ بیشترین میزان نرخ را دارند که از این بین، pH: ۷ نرخ بالاتری را به خود اختصاص داده است. دلیل این امر را می‌توان بدین صورت تفسیر کرد که عامل مهم در فرآیندهای انعقاد الکتریکی از طریق تأثیر بر تشکیل انواع هیدروکسیدهای فلزی بر کارایی فرآیند تأثیرگذار است. با توجه به بررسی نتایج مطالعات مختلف، در فرآیند انعقاد الکتریکی و در pH: ۲-۴،  $\text{Al(OH)}_2$  و  $\text{Al}^{3+}$  گونه‌های فلزی غالب هستند و در pH بالاتر از ۱۰، انواع  $\text{Al(OH)}_4$  جایگزین هیدروکسید آلومینیوم می‌شوند که در هر دو مورد، قدرت تشکیل فلوک آن‌ها از  $\text{Al(OH)}_3$  کمتر است. همچنین، نتایج بررسی‌های اخیر نشان داده که بر اثر افزایش pH به بالاتر از ۱۰، یون‌های  $\text{OH}^-$  تولید شده در خلال واکنش به الکتروود کاتد حمله کرده و طی واکنش زیر، یون‌های  $2\text{Al(OH)}_4^-$  را تشکیل می‌دهند که جایگزین عامل

است (۴۲،۴۱). همچنین، در مطالعات بیگلری و همکاران و بذرافشان و همکاران بر این مطلب که با افزایش اختلاف پتانسیل، بازده حذف فنل نیز افزایش می‌یابد، اشاره شده است (۴۰،۳۲).

نتایج حاصل از فرآیند انعقاد الکتریکی با الکترودهای ترکیبی آهن و آلومینیوم و آنالیز آماری تاگوچی نشان داد که با استفاده از این روش طراحی، می‌توان شرایط بهینه برای حذف فورفورال را تعیین نمود. شرایط بهینه جهت حذف فورفورال در میزان غلظت ۱۰۰ mg/L فورفورال، pH: ۷، ولتاژ ۱۰ V و زمان ۳۰ min حاصل شد که در این شرایط، کارایی فرآیند در حذف فورفورال برابر ۹۴/۷ درصد بود. همچنین، با توجه به نتایج به‌دست آمده از مدل و انجام آزمایشات تأییدی می‌توان نتیجه گرفت که از این مدل آماری می‌توان به‌عنوان یک روش کارآمد استفاده کرده و به این ترتیب باعث کاهش زمان و هزینه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایشات شد؛ بنابراین، با توجه به نتایج حاصل از این تحقیق و مطالعات مشابه، روش الکتروشیمیایی می‌تواند به‌عنوان یک روش دوست‌دار محیط زیست و خوش‌آتیه در حذف فورفورال از فاضلاب‌های صنایع مطرح باشد.

### سپاسگزاری

این مقاله حاصل بخشی از پایان‌نامه با عنوان مطالعه‌ی عملکرد فرآیند انعقاد الکتریکی در حذف فورفورال از محیط‌های آبی با بهینه‌سازی فرآیند حذف با طراحی آزمایش تاگوچی در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط مصوب دانشگاه علوم پزشکی همدان در سال ۱۳۹۱ با کد ۹۱۱۲۱۴۴۳۸۳ می‌باشد. نویسندگان از حوزه معاونت پژوهشی این دانشگاه که این طرح

در حذف فنل نیز نشان داد که بهترین pH بر عملکرد فرآیند، در pH: ۷ برای الکتروده آهن و pH: ۵ برای الکتروده آلومینیوم بوده است (۳۲).

یکی از فاکتورهای حائز اهمیت در فرآیند انعقاد الکتریکی، تأثیر تغییرات ولتاژ جریان است. این فاکتور از طریق تأثیر بر میزان یون‌های فلزی که از سطح الکتروده جدا می‌شوند، بر سرعت انجام واکنش‌های الکتروکواگولاسیون تأثیرگذار است (۳۸). در نمودار شماره ۴، روند تأثیر ولتاژ در چهار دامنه، نسبت به نرخ S/N آورده شده است. براساس آنالیز این نتایج، مشاهده می‌شود که بالاترین نرخ S/N مربوط به ولتاژ ۱۰ V می‌باشد که به‌عنوان ولتاژ بهینه در نظر گرفته شده است. با توجه به میزان ولتاژ ۳۰ V در آزمایش ۱۳ که قبل از بهینه‌سازی شرایط انجام شده بود و مقایسه با ولتاژ بهینه‌ی ۱۰ V بعد از انجام آنالیزهای آماری مدل تاگوچی، می‌توان نتیجه گرفت که این بهینه‌سازی روند مثبتی در جهت کاهش میزان انرژی داشته است. علت افزایش کارایی فرآیند با افزایش ولتاژ جریان را می‌توان به افزایش جریان الکتریسته عبوری از محلول نسبت داد که این عامل منجر به تجزیه‌ی بیشتر الکترودهای آهن و آلومینیوم و تولید هیدروکسیدهای فلزی و سوسپانسیون ژلاتینی می‌شود. هیدروکسیدهای آلومینیوم و آهن، خنثی‌کننده‌ی بارهای الکتروستاتیک در ذرات بوده و سبب کاهش نیروی دافعه‌ی الکتریکی و افزایش نیروی جاذبه‌ی واندروالسی می‌شوند؛ در نتیجه به تشکیل لخته کمک می‌کنند (۳۸). به‌علاوه، این نکته به اثبات رسیده است که با افزایش اختلاف پتانسیل، دانسیته‌ی جاب‌ها افزایش و اندازه‌ی آن‌ها کاهش می‌یابد و این امر حذف سریع‌تر و بیشتر آلاینده‌ها را به‌دنبال خواهد داشت (۴۰). نتایج سایر مطالعات در خصوص تغییرات شدت جریان، نشان داده که با افزایش ولتاژ جریان، میزان حذف آلاینده‌های آرسنیک و اسید هیومیک نیز افزایش یافته

می‌نمایند.

را از لحاظ مالی حمایت نمودند، تشکر و قدردانی

## References

1. United State Environmental Protection Agency (USEPA). Handbook of Advanced Photochemical Oxidation Processes, (USEPA); 1998. P. 1-15.
2. Hoydonckx HE, Van Rhijn WM, De Vos DE, Jacobs PA. Furfural and Derivatives. Wiley – Vellag GmbH & Co; 2000.
3. Moussavi G, Leili M, Nadafi K. Investigation of furfural biodegradation in a continuous inflow cyclic biological reactor. Water Sci Technol. 2016; 73(2):292-301.
4. Samarghandi MR, Leili M, Harati R, Tarlani Azar M, maleki S. Efficiency of Electro/persulfate Process by Iron Electrode in Removing Furfural from Aqueous Solution. J Mazandaran Univ Med Sci. 2014; 24(119):95-108 (Persian).
5. Leili M, Moussavi G, Naddafi K. Degradation and mineralization of furfural in aqueous solutions using heterogeneous catalytic ozonation. Desalination and Water Treatment. 2013; 51(34-36):6789-6797.
6. Li YC, Wang X H, Shao J A, Li P, Yang H P, Chen HP. Utilization of pyrolytic char derived from bamboo chips for furfural removal: Kinetics, isotherm, and thermodynamics. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2016; 38(11):1520-1529.
7. Leili M, Mousavi SG, Nadafi K, Ghaffari M. The investigation of single ozonation process, catalytic ozonation process and single adsorption on activated carbon efficiencies for removal of furfural from aqueous solution. J Sabzevar Univ Med Sci. 2013; 20(1):51-61 (Persian).
8. Mao L, Zhang L, Gao N, Li A. FeCl<sub>3</sub> and acetic acid co-catalyzed hydrolysis of corncob for improving furfural production and lignin removal from residue. Bioresour Technol. 2012; 123: 324-331.
9. Sahu AK, Srivastava VC, Mall ID, Lataye DH. Adsorption of furfural from aqueous solution onto activated carbon: Kinetic, equilibrium and thermodynamic study. Separ Sci Technol. 2008; 43(5):1239-1259.
10. Mebrek OR, Derriche Z. Removal of Furfural from Aqueous Solutions by Adsorption Using Organobentonite: Isotherm and Kinetic Studies. Adsorpt Sci Technol. 2010; 28(6):533-545.
11. Borghei S, Hosseini S. Comparison of furfural degradation by different photooxidation methods. Chem Eng J. 2008; 139(3):482-488.
12. Zazouli MA, Ebrahimzadeh MA, Yazdani Charati J, Shiralizadeh Dezfoli A, Rostamali E, Veisi F. Effect of Sunlight and Ultraviolet Radiation in the Titanium Dioxide (TiO<sub>2</sub>) Nanoparticles for Removal of Furfural from Water. J Mazandaran Univ Med Sci. 2013; 23(107):126-138 (Persian).
13. Veisi F, Zazouli MA, Ebrahimzadeh MA, Charati JY, Dezfoli AS. Photocatalytic degradation of furfural in aqueous solution by N-doped titanium dioxide nanoparticles. Environ Sci Pollut Res. 2016; 23(2):1-15.
14. Qi B, Luo J, Chen X, Hang X, Wan Y. Separation of furfural from monosaccharides

- by nanofiltration. *Bioresour Technol.* 2011; 102(14): 7111-7118.
15. Emamjomeh MM, Sivakumar M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. *J Environ Manage.* 2009; 90(5):1663-1679.
  16. Linares-Hernández I, Barrera-Díaz C, Bilyeu B, Juárez-GarcíaRojas P, Campos-Medina E. A combined electrocoagulation–electrooxidation treatment for industrial wastewater. *J Hazard Mater.* 2010; 175(1):688-694.
  17. Salles NA, Fourcade F, Geneste F, Floner D, Amrane A. Relevance of an electrochemical process prior to a biological treatment for the removal of an organophosphorous pesticide, phosmet. *J Hazard Mater.* 2010; 181(1):617-623.
  18. Ahmadi Moghadam M, Amiri H. Investigation of TOC Removal from Industrial Wastewaters using Electrocoagulation Process. *Iran J Health Environ.* 2010; 3(2):185-194 (Persian).
  19. Zazouli MA, Yazdani Charati J, Alavinia M, Esfandyari Y. Efficiency of Electrocoagulation Process Using Aluminum Electrode in Hospital Laundry Wastewater Pretreatment. *J Mazandaran Univ Med Sci.* 2016;25(134):251-260 (Persian).
  20. Ramavandi B, Ahmadi M, Faradmal J, maleki S, Asgari G. Optimization of Fluoride Adsorption from Aqueous Solution by Marble Powder Using Taguchi Model. *J Mazandaran Univ Med Sci.* 2014;24(115):113-121 (Persian).
  21. Ramavandi B, Asgari G, Faradmal J, Sahebi S, Roshani B. Abatement of Cr (VI) from wastewater using a new adsorbent, cantaloupe peel: Taguchi L16 orthogonal array optimization. *Korean J Chem Eng.* 2014;31(12):2207-2214.
  22. Asadi Habib M, Alavi Moghaddam M, Arami M, Hashemi H. Optimization of the Electrocoagulation Process for Removal of Cr(VI) Using Taguchi Method. *Water and wastewater.* 2010 ; 22(4):2-8 (Persian).
  23. Moussavi G, Khosravi R, Farzadkia M. Removal of petroleum hydrocarbons from contaminated groundwater using an electrocoagulation process: Batch and continuous experiments. *Desalination.* 2011; 278(1-3):288-289.
  24. Jaafarzadeh Haghighifard N, Mehrabani Ardakani MM, Nabizadeh Nodehi R, Yazdanbakhsh AR. Optimization of Moving Bed Biofilm Reactor Using Taguchi Method. *Iranian J Health Environ (ijhe).* 2009;2(1):1-15 (Persian).
  25. Asgari G, Almasi H, Fardmal J, Ghanbari F, Daraie Z, Akbari S. Optimization of Catalytic Ozonation Process for Removal of Reactive Black 5 dye Using Bone Char Ash Modified by Magnesium Oxide and Applying Taguchi Design. *J Mazandaran Univ Med Sci.* 2015;24(122):252-262 (Persian).
  26. Amin MM, Bina B, Majd AMS, Pourzamani H. Benzene removal by nano magnetic particles under continuous condition from aqueous solutions. *Frontiers of Environmental Science & Engineering.* 2014;8(3):345-356.
  27. Vidal L, Villegas JM, Peralta-Hernández R, Salazar G. Removal of Acid Black 194 dye from water by electrocoagulation with aluminum anode. *J Environ Sci Health A Tox Hazard Subst Environ Eng.* 2016; 51(4): 289-296.

28. Pekey H. Evaluation of electrochemical peroxidation (ECP) process variables for removal of co-complex dye using a central composite design. *Desalination and Water Treatment*. 2016; 57(21): 9845-9858.
29. Faramarzpour M, Vossoughi M, Borghei M. Photocatalytic degradation of furfural by titania nanoparticles in a floating-bed photoreactor. *Chem Eng J*. 2009;146 (1):79-85.
30. Tarlani Azar M, Leili M, Taherkhani F, Bhatnagar A. A comparative study for the removal of aniline from aqueous solutions using modified bentonite and activated carbon. *Desalination and Water Treatment*. 2016; 57(51): 1-14.
31. Rahmani A, Samarghandi M. Electrocoagulation Treatment of Color Solution Containing Colored Index Eriochrome Black T. *Water and wastewater*. 2007;1:52-58 (Persian).
32. Biglari H, Bazrafshan E. Performance evaluation of electrochemical process using iron and aluminum electrodes in phenol removal from synthetic aqueous environment. *Iran J Health Environ*. 2013;6(1):445-456 (Persian).
33. Mahvi A, Bazrafshan E, Naseri S, Vaezi F. Chromium ( $Cr^{+6}$ ) Removal from Aqueous Environments by Electrocoagulation Process Using Aluminum Electrode. *Water and Wastewater*. 2007; 18(2):28-34 (Persian).
34. Dalvand A, Jonidi Jafari A, GHolmi M, Ameri A, Mahmoodi M. Treatment of Synthetic Wastewater Containing Reactive Red 198 by Electrocoagulation Process. *Iran J Health Environ*. 2011;4(1):11-22 (Persian).
35. Basiri Parsa J, Vahidian HR, Soleymani A, Abbasi M. Removal of Acid Brown 14 in aqueous media by electrocoagulation: Optimization parameters and minimizing of energy consumption. *Desalination*. 2011; 278(1):295-302.
36. Akhondi A, Khhodadadi Darban A, Ganjidoust H. The Effectiveness of Electro Coagulation Process for the Removal of Cadmium from Water. *Water and Wastewater*. 2012;23 (2): 85-92 (Persian).
37. Mollah MY, Gomes JA, Das KK, Cocke DL. Electrochemical treatment of Orange II dye solution-use of aluminum sacrificial electrodes and floc characterization. *J Hazard Mater*. 2010; 174(1-3):851-858.
38. Asgari G, Saidmohamadi A, Roshanai GH, Mehralipor J, Shabanlo A, Sharifi Z, et al. electrocoagulation (EC) and electrocoagulation/flotation (ECF) processes for removing high turbidity from surface water using Al and Fe electrodes. *Water and Wastewater*. 2013;24(2):62-69 (Persian).
39. Gao S, Yang J, Tian J, Ma F, Tu G, Du M. Electro-coagulation-flotation process for algae removal. *J Hazard Mater*. 2010; 177(1):336-343.
40. Bazrafshan E, Mahvi AH, Naseri S, Mesdaghinia AR. Performance evaluation of electrocoagulation processes for removal of chromium solutions using iron and aluminum electrodes. *Turkish J Eng Env Sci*. 2008;32(2):192-210.
41. Ratna Kumar P, Chaudhari S, Khilar KC, Mahajan S. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*. 2004; 55(9):1245-1252.
42. Feng Q-y, Li X-d, Cheng Y-j, Meng L, Meng Q-j. Removal of humic acid from

groundwater by electrocoagulation. Journal of  
China University of Mining and Technology.

2007; 17(4):513-520.