

## نقش الکتروانققاد و لخته‌سازی تکمیلی در کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی مواد شوینده فاضلاب به‌منظور مصرف در آبیاری فضای سبز

هستی هاشمی‌نژاد<sup>\*</sup>، محبوبه سیدبرزانی، کهربا جیرانی و امیر تائبی<sup>۱</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۲/۲۳)

### چکیده

شوینده‌ها از آلاینده‌های آلی اصلی در فاضلاب‌های صنعتی و شهری است. الکتروشیمی روش تصفیه پیشرفته است که با ویژگی راندمان بالا در حال توسعه است. هدف این تحقیق بررسی امکان استفاده از فرایند الکتروانققاد و لخته‌سازی تکمیلی برای دست‌یابی به بالاترین کارایی کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی مواد شوینده است. بدین‌منظور با الکتروود فلزی آهن، نمونه‌های مصنوعی از فاضلاب در سطح غلظت ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی‌گرم بر لیتر (با اکسیژن‌خواهی شیمیایی به‌ترتیب ۲۶۸، ۲۱۷ و ۳۷۰ میلی‌گرم اکسیژن بر لیتر) و با pH اولیه در سه سطح ۵، ۷/۳ و ۹ مورد آزمایش قرار گرفت. پارامترهای متغیر در حین فرایند انققاد الکتریکی شامل مدت زمان عبور جریان الکتریسیته در سطح ۳ و ۵ و ۱۰ دقیقه و چگالی جریان در سطح ۴، ۱۰ و ۱۶، ۲۲ میلی‌آمپر بر سانتی‌متر مربع بودند. نتایج نشان داد در شرایط بهینه، فرایند انققاد الکتریکی و لخته‌سازی تکمیلی قادر است تا اکسیژن‌خواهی شیمیایی نمونه با غلظت اولیه مواد شوینده ۵۰۰ mg/L را، از ۲۱۷ mgO<sub>۲</sub>/L به ۸۱/۳۰ mgO<sub>۲</sub>/L کاهش دهد. روش الکتروانققاد می‌تواند اکسیژن‌خواهی شیمیایی را به حد پایین‌تر از حد استاندارد ورود فاضلاب به محیط‌زیست (۲۰۰ mgO<sub>۲</sub>/L) کاهش دهد و امکان آبیاری فضای سبز را با توجه به کمبود آب جبران کند.

واژه‌های کلیدی: مواد شوینده، انققاد الکتریکی، اکسیژن‌خواهی شیمیایی، فاضلاب، آلاینده‌های آلی، لخته‌سازی تکمیلی

۱. دانشکده عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان

\*: مسئول مکاتبات: پست الکترونیکی: hhasheminejad@cc.iut.ac.ir

## مقدمه

گسترش بیش از حد تولید و مصرف مواد شوینده سبب افزایش پتانسیل آلودگی آب‌های قابل دسترس انسان شده است. مواد شوینده، یکی از آلاینده اصلی فاضلاب‌های شهری و صنعتی هستند. مواد شوینده به دلیل خاصیت دیر تجزیه‌شوندگی توسط عوامل زیستی موجب تهدید جدی محیط‌زیست و اثرات مخرب بیولوژیکی بر جانداران شده‌اند. این مواد همچنین باعث کف در سطح آب‌ها و حوضچه‌های تصفیه می‌شوند و سبب اختلال اکسیژن‌گیری آب، ایجاد پدیده غنی‌شدگی آب‌ها و اختلال در تنفس و متابولیسم موجودات ذره بینی آب و همچنین باعث کاهش راندمان فرایند تصفیه در حوضچه‌های تصفیه فاضلاب می‌شوند (۱). تاکنون برای تصفیه فاضلاب‌های حاوی مواد شوینده از فرایندهایی مانند اکسیداسیون شیمیایی، انعقاد شیمیایی، انعقاد الکتریکی، شناورسازی، جذب سطحی و روش‌های بیولوژیکی استفاده شده است (۲). در سال‌های اخیر روش الکتروشیمیایی به علت راندمان مطلوب برای حذف انواع آلاینده‌ها مورد توجه قرار گرفته است. یکی از روش‌های الکتروشیمیایی، روش الکتروانعقاد است (۳). انعقاد الکتریکی اکسایش الکتریکی هر یک داری مزایا و معایبی هستند و هیچ یک به تنهایی در حذف آلاینده‌های آلی صنعتی مناسب نیستند. اما ترکیب این دو فرایند باعث تجزیه ترکیبات آلی به مواد معدنی ساده‌تر می‌شود (۴ و ۵). یکی از روش‌های اکسیداسیون، اکسایش الکتریکی است. در این روش با عبور جریان الکتریکی به الکترود فلز مناسب، در سلول الکتریکی اکسیدکننده تولید می‌شود. در روش اکسیداسیون الکتریکی آلاینده هم از طریق فرایند اکسیداسیون مستقیم و هم اکسیداسیون غیرمستقیم حذف می‌شود. در فرایند اکسیداسیون آندی مستقیم، آلاینده در ابتدا در سطح الکترود آند جذب شده و سپس با واکنش انتقال الکترونی آند، تخریب می‌شود. در فرایند اکسیداسیون غیرمستقیم، اکسید کننده‌های قوی مثل هیپوکلریت، کلر، ازن و پراکسید هیدروژن به طریقه الکتروشیمیایی تولید می‌شود و سپس آلاینده از طریق انجام واکنش‌های اکسیداسیون حذف می‌شود (۵ و ۶). تاوینگ و

همکاران با مطالعه روش الکتروانعقاد و شناورسازی الکتریکی روی پساب مصنوعی رختشویی حاوی شوینده با استفاده از الکترودهای آلومینیوم دریافتند میزان حذف قابل قبول اکسیژن‌خواهی شیمیایی ۶۲ درصد و مقدار انرژی الکتریکی مصرفی بهینه پنج وات است، همچنین آنها گزارش دادند اتصالات تک‌قطبی از اتصالات دو قطبی الکترودها در حذف مواد شوینده مؤثرتر است (۷).

تک‌دستان و همکاران با بررسی کارایی فرایند انعقاد الکتریکی در حذف کلریت، اکسیژن‌خواهی شیمیایی، دترجنت و فسفات از پساب کارواش، دریافتند کارایی حذف آلاینده‌ها با افزایش ولتاژ (۱۰،۲۰ و ۳۰) و زمان واکنش (۳۰، ۶۰ و ۹۰ دقیقه) رابطه مستقیم دارد و راندمان حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی در pH اسیدی با ولتاژ ۳۰ و زمان واکنش یا زمان ماند ۹۰ دقیقه‌ای با الکترود آهن ۹۴ درصد و راندمان حذف دترجنت در pH خنثی با ولتاژ ۳۰ و زمان ماند ۹۰ دقیقه‌ای با الکترود آهن ۹۴ درصد است. همچنین فرایند الکتروانعقاد می‌تواند یک روش اقتصادی برای تصفیه پساب کارواش‌ها پیشنهاد شود (۸).

شاه منصوری و روشنی با بررسی فرایند انعقاد شیمیایی روی فاضلاب حاوی مواد شوینده با منعقد کننده‌های آلوم، آهنک، فریک سولفات و فریک کلرید دریافتند آهنک کمترین تأثیر را در حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی مواد شوینده دارد ولی نقش آن به عنوان کمک منعقد کننده در این فرایند خوب است، همچنین گزارش دادند قابلیت حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی مواد شوینده توسط فریک سولفات و فریک کلرید در فاضلاب از آهنک و آلوم بیشتر است (۹). ویلی و همکاران با بررسی تصفیه شیرابه زباله‌های شهری به وسیله روش الکتروشیمی گزارش دادند حدود ۹۰ درصد اکسیژن‌خواهی شیمیایی ناشی از شیرابه با این روش قابل حذف است. همچنین با مقایسه روش الکتروشیمی و روش الکتروانعقاد برای حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی شیرابه دریافتند روش الکتروانعقاد با استفاده از الکترود آهن در تصفیه شیرابه زباله‌های شهری از راندمان بهتری برخوردار است. آنان پیشنهاد دادند انعقاد الکتریکی جایگزین

جدول ۱. مشخصات دستگاه‌های مورد استفاده در آزمایش‌ها

نام وسیله	کارخانه سازنده	مدل	توضیحات
مبدل جریان برق	MEGATEK	MP-6003, 0-4 A, 60 V	۰/۰۱ ولت
ترازوی دیجیتال	ELE-Sartorius	-	با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم
پی‌اچ متر	EIE International	3045 Ion Analyzer	۰/۰۱
همزن مغناطیسی	Heidolph	MR 3000	۱۰۰-۸۰۰ rpm
جارتست	Phipps & Bird	-	شش پدالی با قاشقک مستطیلی
دستگاه تولید آب مقطر	Labortechnik	D3006	-
راکتور COD	Hach	-	-
اسپکتروفتومتر	Hach	DR/2010	۰/۰۰۱
هدایت‌سنج	HANNA	EC 214	۰/۰۱
زمان‌سنج	HITRAX	-	۰/۰۱ ثانیه

نمک‌های فلزی، پلیمرها و پلی‌الکترولیت‌ها به‌عنوان منعقد کننده، از انحلال صفحات فلزی برای تولید و افزودن مواد منعقد کننده به فاضلاب استفاده می‌شود.

هدف از این تحقیق بررسی امکان استفاده از فرایند الکتروانققاد و لخته‌سازی تکمیلی برای دست‌یابی به بالاترین کارایی کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی مواد شوینده در فاضلاب با الکتروود و ولتاژ بهینه در مقیاس آزمایشگاهی است.

### مواد و روش‌ها

تحقیق حاضر در مقیاس آزمایشگاه به‌صورت پایلوت در آزمایشگاه محیط‌زیست دانشکده عمران دانشگاه صنعتی اصفهان به‌منظور تأثیر جریان برق مستقیم روی راندمان کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی در نمونه حاوی مواد شوینده انجام شد (جدول ۱). ماده شوینده مصرفی (مایع ظرف‌شویی) با مشخصات ترکیبی، آلکیل بنزن سولفات خطی، هیدروکسید سدیم، دی‌اتانل آمین، تری‌اتانل آمین، کوکونات فتی اسید دی اتانل آمید، اوره، اسانس، آب دیونیزه، متیل کلروایزوتیازولینون (۱/۰ درصد) استفاده شد. پارامترهای فاضلاب به روش استاندارد آب و فاضلاب اندازه‌گیری شد (۱۶). روش طرح آزمایش، فاکتوریل کامل انتخاب شد و تحلیل

مناسب برای تصفیه شیرابه زباله‌های شهری است (۱۰). جان‌پور و همکاران با مطالعه روی تصفیه پساب رختشویی با استفاده از فرایند الکتروانققاد و صفحات موازی الکتروود آلومینیم دریافتند درصد حذف شاخص‌های اکسیژن‌خواهی شیمیایی، فسفر، دترجنت، رنگ و کدورت به ترتیب ۹۳/۲، ۹۶/۷، ۹۳/۵، ۹۰/۱، ۹۵/۹ از مقدار اولیه به ترتیب ۴۱۵۵، ۲۷/۶، ۴۶۳، ۱۴۳۰ و ۲۴۵ میلی‌گرم بر لیتر است (۱۱).

اوندر و همکاران، فرایند حذف مواد فعال سطحی (سورفاکتانت‌ها) را از محلول مدل و نمونه آب آلوده با روش انعقاد الکتروشیمیایی و با استفاده از یون‌های  $Fe^{2+}$  از آند محلول بررسی کردند. آنان گزارش دادند میزان راندمان حذف مواد فعال سطحی با غلظت اولیه ۱۰ میلی‌گرم در صد است (۱۲). همچنین فرایند انعقاد یکی از پرکاربردترین روش‌های حذف ذرات معلق و کلوئیدی است. فرایند انعقاد الکتريکی تاکنون به‌عنوان روش مناسب برای تصفیه انواع فاضلاب حاوی مواد روغنی، رنگ، ترکیبات حاوی فنل، آرسنیک و غیره توسط پژوهشگران به‌کار برده شده است (۱۳ و ۱۴ و ۱۵). همان‌طور که در مطالعات پیشین نیز بیان شد می‌توان از تکنولوژی انعقاد الکتريکی به‌عنوان روش جایگزین مناسب برای روش‌های انعقاد (شیمیایی) استفاده کرد. در این تکنولوژی به‌جای استفاده از

جدول ۲. نتایج آنالیز واریانس آزمایش‌ها

پارامتر	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	نسبت F	درصد تأثیر (P)
غلظت اولیه مواد شوینده	۲	۲۰۹۲۲/۶۷	۱۰۴۶۱/۳۴	۵۴/۴	۷/۹۵
pH	۲	۴۳۰۷۲/۱۵	۲۱۵۳۶/۰۷	۱۱۱/۹۸	۱۶/۵۲
زمان جریان الکتریکی	۲	۴۵۵۶۱/۳۷	۲۲۷۸۰/۶۸	۱۱۸/۴۵	۱۷/۴۸
چگالی جریان الکتریکی	۳	۷۵۶۹۷/۲۴	۲۵۲۳۲/۴۱	۱۳۱/۲	۲۹/۰۷
زمان جریان × غلظت شوینده	۴	۱۱۸۳/۳۳	۲۹۵/۸۳	۱/۵۴	۰/۱۶
pH × غلظت شوینده	۴	۴۵۲۴/۸۰	۱۱۳۱/۲۰	۵/۸۸	۱/۴۵
چگالی جریان × غلظت شوینده	۶	۱۸۵۹/۳۶	۳۰۹/۹۰	۱/۶۱	۰/۲۷
زمان جریان × pH	۴	۱۱۶۸/۳۵	۲۹۲/۰۹	۱/۵۲	۰/۱۵
pH × چگالی جریان	۶	۵۹۹۰/۰۰	۹۹۸/۳۳	۵/۱۹	۱/۸۷
چگالی جریان × زمان جریان	۶	۲۱۷۷/۸۹	۳۶۲/۹۸	۱/۸۹	۰/۴۰
زمان جریان × pH × غلظت شوینده	۸	۲۴۹۹/۸۷	۳۱۲/۴۸	۱/۶۲	۰/۳۷
چگالی جریان × pH × غلظت شوینده	۱۲	۳۸۶۵/۹۴	۳۲۲/۱۶	۱/۶۸	۰/۶۰
چگالی جریان × زمان جریان × غلظت شوینده	۱۲	۳۷۸۰/۹۷	۳۱۵/۰۸	۱/۶۴	۰/۵۷
چگالی جریان × زمان جریان × pH	۱۲	۱۶۲۶۳/۵۰	۱۳۵۵/۲۹	۷/۰۵	۵/۴۰
چگالی جریان × زمان جریان × pH × غلظت شوینده	۲۴	۹۱۰۲/۷۲	۳۷۹/۲۸	۱/۹۷	۱/۷۴
خطای آزمایش	۱۰۸	۲۰۷۷۰/۵۰	۱۹۲/۳۲		۱۶
کل	۲۱۵	۲۵۸۴۴۰/۶۶			۱۰۰

انجام شد و خلاصه نتایج آن در جدول (۲) نشان داده شده است.

اگر نسبت F بیشتر از یک باشد، نشان‌دهنده بزرگ‌تر بودن واریانس هر عامل نسبت به واریانس خطا است و تأثیر فاکتور در پاسخ نهایی معنادار بوده است. با توجه به جدول (۲) نسبت F برای تمامی عوامل بیشتر از یک است، ستون درصد تأثیر P، میزان تأثیر هر یک از عوامل را بر پاسخ نشان می‌دهد. نتایج آنالیز واریانس نشان داد چگالی جریان الکتریکی مهم‌ترین عامل تأثیرگذار در راندمان کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی است. برای تعیین مقدار راندمان کاهش از رابطه

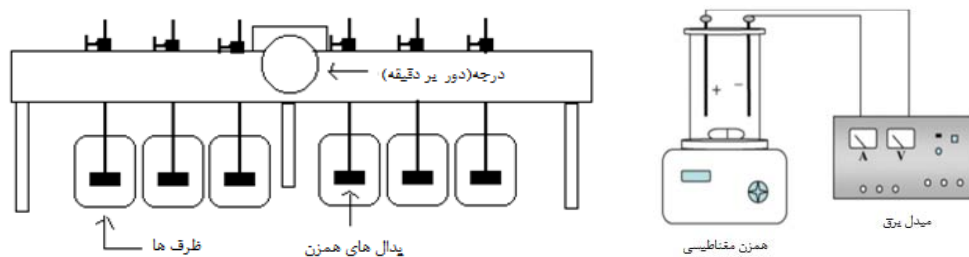
$$\text{COD} = 100 \times \frac{\text{COD}_0 - \text{COD}_e}{\text{COD}_0} \quad (1)$$

استفاده شد. زمان برقراری جریان و pH نیز از فاکتورهای تأثیر

آماري داده‌ها در این تحقیق از نرم‌افزارهای Excel و SAS برای تحلیل آماری نتایج به‌دست آمده استفاده شد (۱۷). به‌منظور مشاهده عوامل مؤثر و اطمینان آنها در فرایند از آنالیز واریانس (ANOVA) و از تست t به‌عنوان ابزاری برای مشاهده اثر معنی‌داری عوامل فرایند بر راندمان کاهش استفاده شد (جدول ۲)

لیست تجهیزات مورد استفاده در جدول (۱) آورده شده است. الکتروود آهن مصرفی در فرایند انعقاد الکتریکی با مشخصات طولی (۹۰ میلی‌متر)، عرضی (۵۰ میلی‌متر)، ضخامتی (۲ میلی‌متر) و فاصله الکتروودها از یکدیگر (۴۰ میلی‌متر) مورد استفاده قرار گرفت.

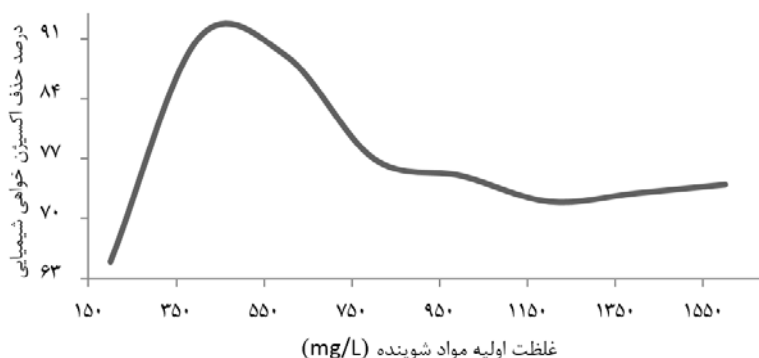
داده‌های به‌دست آمده از آزمایشات در نرم‌افزار آمار وارد شد و پس از بررسی داده‌ها، آزمون آنالیز واریانس (ANOVA)



شکل ۱. شماتیک ساده از سیستم فرایند انققاد الکتریکی

جدول ۳. عوامل و سطوح انتخاب شده

۱۰۰۰	۷۵۰	۵۰۰	غلظت اولیه مواد شوینده (میلی گرم بر لیتر)
۹	۷/۳	۵	pH
۱۰	۵	۳	زمان برقراری جریان الکتریکی (دقیقه)
۲۲	۱۶	۴	چگالی جریان الکتریکی (میلی آمپر بر سانتی متر مربع)



شکل ۲. تغییرات غلظت اولیه مواد شوینده در درصد حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی در آزمایش‌های اولیه (pH=۷/۳، زمان برقراری جریان الکتریکی ۱۰ دقیقه، چگالی جریان الکتریکی  $22 \text{ mA/cm}^2$ ، سرعت اختلاط  $20 \text{ rpm}$ ، زمان اختلاط کند ۲۰ دقیقه و زمان ته‌نشینی ۳ دقیقه)

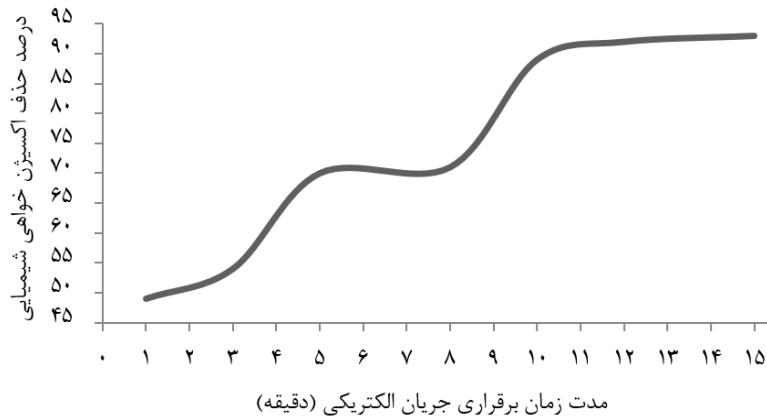
۲۱۷، ۲۶۸ و ۳۷۰ میلی گرم در لیتر) و با pH اولیه در سه سطح ۵، ۷/۳ و ۹ آزمایش شد. جدول (۳) عوامل و سطوح انتخاب شده را نشان داده است.

عوامل و سطوح انتخاب شده مورد آزمایش قرار گرفت و مهم‌ترین عوامل مؤثر در شکل‌های (۲) تا (۵) آورده شده است. در شکل (۲) با توجه به ثابت بودن چگالی جریان و زمان عبور جریان، میزان ماده منعقدکننده آزاد شده مقدار ثابت است، بنابراین با افزایش غلظت ماده شوینده متناسب با آن افزایش راندمان کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی را نشان داده است و

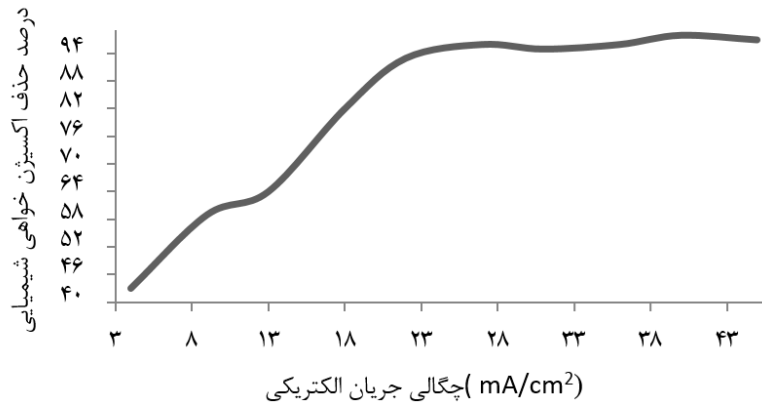
گذار ولی با درصد تأثیر کمتری هستند و غلظت اولیه مواد شوینده کمترین میزان تأثیر را دارا بوده است.

در این تحقیق به منظور بررسی عوامل مؤثر بر راندمان کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی مواد شوینده توسط فرایند انققاد الکتریکی آزمایشات در دمای آزمایشگاه  $21 \pm 2$  درجه سانتی گراد انجام شد. سیستم با الکتروود فلزی آهن طراحی شد (شکل ۱).

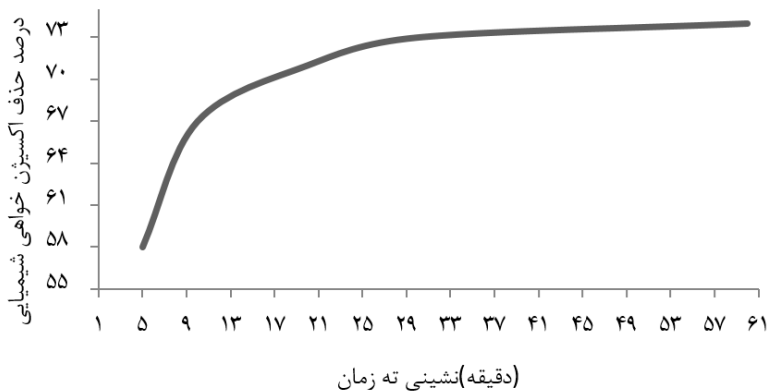
نمونه‌ها در سه سطح غلظت اولیه مواد شوینده، ۵۰۰، ۷۵۰ و ۱۰۰۰ میلی گرم در لیتر (با اکسیژن‌خواهی شیمیایی به ترتیب



شکل ۳. مدت زمان عبور جریان الکتریکی در درصد حذف اکسیژن خواهی شیمیایی در آزمایش های اولیه (غلظت اولیه مواد شوینده  $\text{pH} = 7/3$ ,  $500 \text{ mg/L}$ ، چگالی جریان الکتریکی  $22 \text{ mA/cm}^2$ ، سرعت اختلاط کند  $20 \text{ rpm}$ ، زمان اختلاط کند ۲۰ دقیقه و زمان ته نشینی ۳۰ دقیقه)



شکل ۴. محدوده چگالی جریان الکتریکی در درصد حذف اکسیژن خواهی شیمیایی (غلظت اولیه مواد شوینده  $\text{pH} = 7/3$ ,  $500 \text{ mg/L}$ ، مدت زمان عبور جریان الکتریکی ۱۰ دقیقه، سرعت اختلاط کند  $20 \text{ rpm}$ ، زمان اختلاط کند ۲۰ دقیقه و زمان ته نشینی ۳۰ دقیقه)



شکل ۵. نمودار درصد کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی در زمان های ته نشینی مختلف (غلظت اولیه مواد شوینده  $\text{pH} = 7/3$ ,  $1000 \text{ mg/L}$ ، مدت زمان عبور جریان الکتریکی سه دقیقه، چگالی جریان الکتریکی  $22 \text{ mA/cm}^2$ ، سرعت اختلاط کند  $40 \text{ rpm}$  و زمان اختلاط کند ۲۰ دقیقه)

کاهش اکسیژن‌خواهی از ۷۳ به ۷۴ درصد افزایش یک درصدی نشان داده است. بنابراین درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی در سرعت اختلاط کند ۴۰ rpm به‌عنوان سرعت اختلاط بهینه در مرحله لخته‌سازی تکمیلی و مدت زمان ته‌نشینی ۳۰ دقیقه انتخاب شد.

### نتایج و بحث

در این تحقیق برای بهینه‌سازی فرایند انعقاد الکتریکی، چهار عامل غلظت اولیه مواد شوینده، pH، مدت زمان عبور جریان الکتریکی و چگالی جریان الکتریکی در راکتور ناپیوسته بررسی شدند. نتایج نشان داد اثر متقابل غلظت اولیه مواد شوینده در مقابل pH اولیه در کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی مواد شوینده از اهمیت زیادی برخوردار است. شکل (۶) اثر متقابل pH با غلظت شوینده بر درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی را نشان می‌دهد.

در شرایط ثابت pH برابر ۷/۳ در بین غلظت‌های مورد آزمایش، غلظت ۵۰۰ میلی‌گرم بر لیتر نسبت به غلظت‌های دیگر، بالاترین مقدار درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی را نشان داده است. می‌توان علت این شرایط را به تشکیل رسوب هیدروکسیدهای آهن سه ظرفیتی در نمونه‌ها و در پی آن کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی از نمونه‌های وابسته به pH بیان کرد. در pHهای پائین، یون‌های غالب  $Fe^{3+}$ ،  $Fe(OH)_2^+$  و  $FeOH^{2+}$  هستند ولی در محدوده pH بین ۷/۳، یون‌های  $Fe_2(OH)_2^{4+}$  هستند و یون غالب  $Fe(OH)_3(s)$  است که می‌تواند پس از انجام نقش خود به‌عنوان منعقد کننده، به راحتی رسوب کند و از محیط آبی خارج شود و این موضوع باعث افزایش راندمان کاهش می‌شود. در pHهای بازی گونه غالب  $Fe(OH)_4^{-}$  است که به‌صورت محلول است (۱۸).

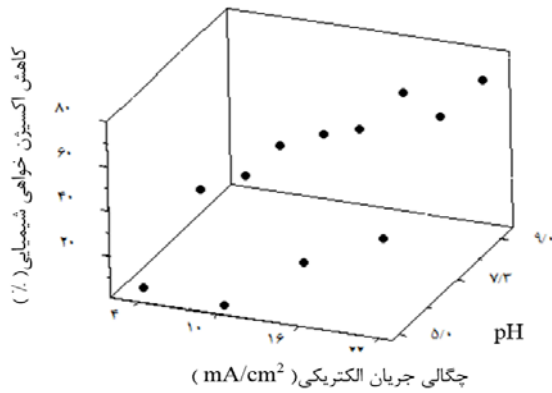
همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است با افزایش pH درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی، روند افزایشی را نشان می‌دهد. همچنین با افزایش چگالی جریان الکتریکی در pHهای خنثی و بازی، روند افزایشی در راندمان کاهش

پس از افزایش غلظت شوینده از حدود ۵۰۰ میلی‌گرم در لیتر به دلیل ناکافی بودن چگالی جریان (دز منعقد کننده تولیدی) راندمان کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی کاهش یافته است. همچنین غلظت‌های مورد آزمون نشان داد غلظت ۶۰۰ mg/L تا ۸۰۰ mg/L، درصد حذف به‌میزان ۱۲ درصد کاهش یافته است و در این محدوده غلظت ۷۵۰ mg/L به‌عنوان شاخص غلظت میانی و برای شاخص غلظت‌های کم، ۵۰۰ mg/L با توجه به مقدار پارامتر چگالی جریان الکتریکی، سرعت اختلاط و زمان ته‌نشینی انتخاب شده است.

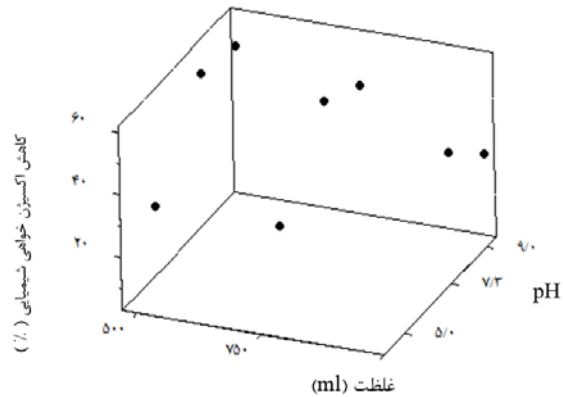
شکل (۳) نمونه‌ای از سری آزمایشات برای به‌دست آوردن بهترین مدت زمان جریان الکتریکی آزمایش با سایر متغیرها را نشان می‌دهد. در شکل مذکور غلظت ماده شوینده ثابت و مدت زمان برقراری جریان الکتریکی به‌عنوان متغیر است، با افزایش مدت زمان برقراری جریان الکتریکی، درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی، روند افزایشی را نشان داد. تا جایی که دیگر افزودن ماده منعقد کننده با توجه به غلظت شوینده تأثیر زیادی در کاهش آن نداشته و راندمان کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی تقریباً روند ثابت را نشان داده است. بنابراین از بین مدت جریان‌های الکتریکی مورد آزمون، مدت زمان عبور جریان الکتریکی ۱۰ دقیقه انتخاب شد.

در شکل (۴) اثر چگالی‌های جریان الکتریکی مورد آزمون بر میزان حذف اکسیژن‌خواهی شیمیایی نشان داده شده است. آزمایشات انجام شده پس از چگالی جریان الکتریکی  $22 \text{ mA/cm}^2$ ، درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی را فقط با نوسان سه تا چهار درصد نشان می‌دهد، لذا از نظر صرفه اقتصادی چگالی جریان الکتریکی بهینه،  $22 \text{ mA/cm}^2$  انتخاب شده است.

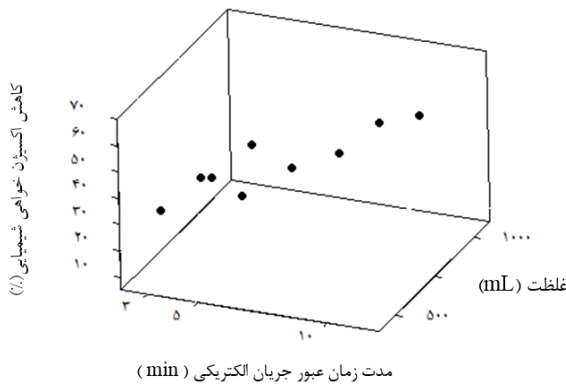
در شکل (۵) آزمون‌های مدت زمان ته‌نشینی با سایر عوامل تأثیرگذار مورد آزمون قرار گرفته است. شکل نشان می‌دهد با افزایش مدت زمان ته‌نشینی از ۵ به ۳۰ دقیقه، راندمان کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی از ۵۸ به ۷۳ درصد افزایش می‌یابد و سپس با افزایش مدت زمان ته‌نشینی از ۳۰ به ۶۰، راندمان



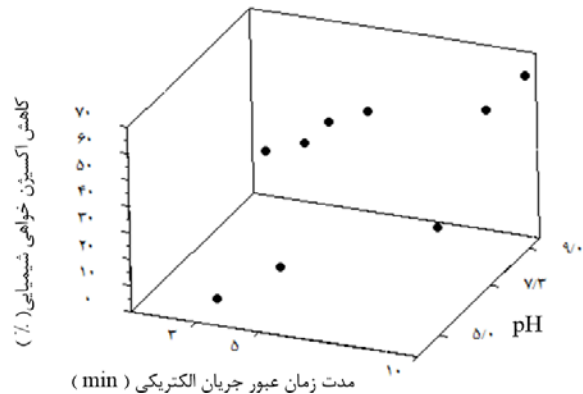
شکل ۷. اثر متقابل pH با چگالی جریان الکتریکی بر راندمان کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی



شکل ۶. اثر متقابل pH با غلظت شوینده بر راندمان کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی



شکل ۹. اثر متقابل غلظت با مدت زمان عبور جریان الکتریکی بر درصد کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی



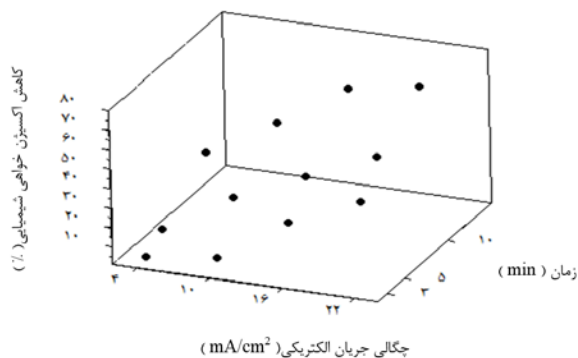
شکل ۸. اثر متقابل PH با مدت زمان عبور جریان الکتریکی بر درصد کاهش اکسیژن خواهی

در شکل (۸) با افزایش همزمان pH از ۵ به ۷/۳ و زمان عبور جریان از ۳ به ۵ درصد، کاهش از ۱ به ۵۲ افزایش یافته و با افزایش همزمان pH از ۷/۳ به ۹ و مدت زمان عبور جریان از ۵ به ۱۰ دقیقه، راندمان از ۵۲ به ۶۶ رسیده است. این روند افزایشی همزمان می تواند به علت مدت زمان بیشتر برای تولید ماده منعقد کننده مؤثر بر ماده شوینده و خارج شدن آن از محیط محلول باشد. همان طور که پیشتر نیز اشاره شد، در pH های بازی به علت ایجاد یون های هیدرواکسید آهن در حضور ماده شوینده، درصد کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی به علت خارج شدن ماده شوینده طی مکانیسم جاروب کردن در فرایند انعقاد افزایش یافته است.

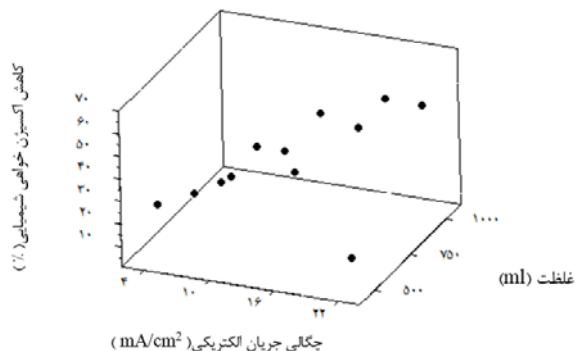
در شکل (۹) با افزایش همزمان غلظت اولیه مواد شوینده از

اکسیژن خواهی شیمیایی به دست آمده است. با افزایش همزمان pH از پنج به ۷/۳ و افزایش چگالی جریان الکتریکی از  $4 \text{ mA/cm}^2$  به  $10 \text{ mA/cm}^2$  درصد، کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی از ۵ به ۴۹ افزایش یافته و با افزایش همزمان pH از ۷/۳ به ۹ و افزایش چگالی جریان الکتریکی از  $10 \text{ mA/cm}^2$  به  $16 \text{ mA/cm}^2$  مشاهده می شود که درصد کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی از ۴۹ به ۶۰ مجدداً افزایش می یابد. این اتفاق می تواند در حضور ماده شوینده در pH های بازی باشد که این ماده با توجه به استفاده از جریان الکتریکی و استفاده از الکترود آهن منجر به تولید یون های هیدرواکسید آهن شده و می تواند منجر به خارج شدن ماده شوینده به وسیله مکانیسم جاروب کردن در فرایند انعقاد و به دنبال آن کاهش اکسیژن خواهی شیمیایی محلول شود.





شکل ۱۱. اثر متقابل زمان عبور جریان الکتریکی با چگالی جریان الکتریکی بر درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی



شکل ۱۰. اثر متقابل غلظت با چگالی جریان الکتریکی بر راندمان کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی

بیشتر در اثر افزایش چگالی جریان و احتمال برخورد مواد شوینده به علت بالابودن غلظت مواد شوینده باشد که این موضوع منجر به ایجاد کمپلکس‌های لخته‌ای می‌شود.

در شکل (۱۱) با افزایش همزمان زمان عبور جریان و چگالی جریان درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی افزایش می‌یابد. برای مثال با افزایش زمان برقراری جریان از سه به پنج دقیقه و چگالی جریان از  $4 \text{ mA/cm}^2$  به  $10 \text{ mA/cm}^2$  و همچنین زمان عبور جریان از ۵ به ۱۰ دقیقه و چگالی جریان از  $10 \text{ mA/cm}^2$  به  $16 \text{ mA/cm}^2$  به ترتیب درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی از ۳۱ به ۳۱ و از ۳۱ به ۷۲ افزایش یافته است. افزایش شیب نمودار درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی در این مورد می‌تواند به علت اثر همزمان دو پارامتر مدت زمان عبور جریان الکتریکی و چگالی جریان (که هر دو با تولید مواد منعقد کننده رابطه دارند) بر لخته‌سازی حاصل از ماده شوینده باشد.

### نتیجه‌گیری

درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی با توجه به شرایط فاضلاب حاصل از ماده شوینده مورد بررسی قرار گرفته است. فرایند انعقاد الکتریکی با الکتروود آهن در محدوده مدت زمان عبور جریان الکتریکی از ۳ تا ۱۰ دقیقه و چگالی جریان الکتریکی از  $4 \text{ mA/cm}^2$  تا  $22 \text{ mA/cm}^2$  قادر است، میزان اکسیژن‌خواهی شیمیایی نمونه با غلظت اولیه مواد شوینده

$500 \text{ mg/L}$  به  $750 \text{ mg/L}$  و افزایش مدت زمان عبور جریان الکتریکی از سه به پنج دقیقه، درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی از ۳۱ به ۴۴ افزایش یافته است. این روند صعودی می‌تواند به علت افزایش تولید منعقد کننده بیشتر در اثر افزایش مدت زمان برقراری جریان و احتمال برخورد مواد شوینده به علت افزایش غلظت مواد شوینده باشد که این موضوع منجر به ایجاد کمپلکس‌های لخته‌ای می‌شود. با افزایش همزمان غلظت اولیه مواد شوینده از  $750 \text{ mg/L}$  به  $1000 \text{ mg/L}$  و مدت زمان برقراری جریان الکتریکی از ۵ به ۱۰ دقیقه، درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی از ۴۴ به ۴۸ مشاهده شده است که این مقدار ناچیز است.

شکل (۱۰) با افزایش همزمان غلظت اولیه مواد شوینده از  $500 \text{ mg/L}$  به  $750 \text{ mg/L}$  و افزایش چگالی جریان الکتریکی از  $4 \text{ mA/cm}^2$  به  $10 \text{ mA/cm}^2$ ، درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی از ۲۴ به ۳۸ افزایش یافته و با افزایش همزمان غلظت اولیه مواد شوینده از  $750 \text{ mg/L}$  به  $1000 \text{ mg/L}$  و افزایش چگالی جریان الکتریکی از  $10 \text{ mA/cm}^2$  به  $16 \text{ mA/cm}^2$ ، درصد کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی از ۳۵ به ۳۸ افزایش یافته است. به همین ترتیب با افزایش چگالی جریان الکتریکی و مقدار غلظت ماده شوینده، روند صعودی کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی (حداکثر ۶۵ درصد) را نشان داده است. این روند صعودی می‌تواند به علت افزایش تولید منعقد کننده

راندمان کاهش اکسیژن‌خواهی شیمیایی افزایش می‌یابد. روش الکترو انعقاد می‌تواند اکسیژن‌خواهی شیمیایی فاضلاب را پایین‌تر از توصیه سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران برای ورود فاضلاب به آب‌های سطحی ( $200 \text{ mgO}_2/\text{l}$ ) کاهش دهد و امکان استفاده مجدد از فاضلاب بهداشتی برای فضای سبز را با توجه به خشکسالی‌های پی‌درپی و کمبود آب آبیاری ایجاد کند.

$500 \text{ mg/L}$  را، از  $217 \text{ mg/L}$  به  $81/30 \text{ mg/L}$  کاهش دهد. غلظت اولیه مواد شوینده  $500 \text{ mg/L}$  نشان داد با افزایش چگالی جریان از  $16 \text{ mA/cm}^2$  تا  $22 \text{ mA/cm}^2$ ، بازدهی منعقد کننده کاهش می‌یابد. در فرایند انعقاد الکتریکی، pH مناسب، معادل  $7/3$  (pH طبیعی تیمارها) است. با افزایش مدت زمان عبور جریان و چگالی جریان الکتریکی در فرایند انعقاد الکتریکی (که به معنای تولید بیشتر ماده منعقد کننده است)

### منابع مورد استفاده

- Javid, A. H., S. A. Mirbagheri and M. Pourtalari. 2006. Detergent removal from wastewater of automobile industry and its standardization. *Journal of Environmental Science and Technology* 3(8): 29-34.
- Aboulhassan, M. A., S. Souabi, A. Yaacoubi and M. Baudu. 2006. Removal of surfactant from industrial wastewaters by coagulation flocculation process. *International Journal of Environmental Science and Technology* 3(4): 327-332.
- Zhao, X., G. B. Zha and J. Liu. 2010. Removal of arsenite by simultaneous electro-oxidation and electro-coagulation. *Journal of Hazardous Materials* 184: 472-476.
- Linares, I., C. Barrera, P. Bilyeu and E. Campos. 2010. A combined electrocoagulation electro oxidation treatment for industrial wastewater. *Journal of Hazardous Materials* 175: 688-694.
- Mancha, C. 2002. Combined electrocoagulation and assisted electrochemical coagulation of aqueous. *Journal of Applied Electrochemistry* 32: 1241- 1246.
- Ashtoukhy, E. S. Z. E. I. and N. K. Amin. 2009. Removal of acid green dye 50 from wastewater by anodic oxidation and electrocoagulation-A comparative study. *Journal of Hazardous Materials* 179: 113-119.
- Tawang, C., W. Lung chou and Y. Ming kuo. 2009. Removal of COD from laundry wastewater by electrocoagulation/electro flotation. *Journal of Hazardous Materials* 164: 81-86.
- Takdastan, A., M. Ahmadi moghadam, M. Rahimi. 2010. Study on the removal of COD from petrochemicals wastewater by electrocoagulation with aluminum and iron electrodes. *In: Proceeding of the Conference and Exhibition on Environmental Engineering, Tehran.*
- Shahmansori, M. and B. Roshani. 2005. Investigating wastewater treatment of detergent industries by coagulation process at laboratory scale. *Journal of Shahid Sadoughi University of Medical Sciences and Health Services of Yazd* 1(13): 62-65.
- Veli, S., T. Ozturk and A. Dimoglo. 2008. Treatment of municipal solid wastes leachate by means of chemical and electro-coagulation. *Separation and Purification Technology* 61: 82-88.
- Janpoor, F., A. Torabian and V. Khatibikamal. 2011. Treatment of laundry waste-water by electrocoagulation". *Journal of Chemical Technology and Biotechnology* 86: 1113-1120.
- Onder, E., A. Savas, K. Ülker and B. Ögü tveren. 2007. An alternative method for the removal of surfactants from waste water: electrochemical coagulation. *Separation and Purification Technology* 52: 527-532.
- Chen, X., G. Chen, P. L. Yue. 2000. Separation of pollutants from restaurant wastewater by electrocoagulation. *Separation and Purification Technology* 19(1): 65-765.
- Koby, M., O. Taner Can, M. Bayramoglu. 2003. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials* 100(1): 163-178.
- Sanchez-Calvo, L., J. P. Leclerc, G. Tanguy and M. C. Cames. 2003. An electrocoagulation unit for the purification of soluble oil wastes of high COD. *Environmental Progress* 22(1): 57-65
- Rice E. W., R. B. Baird and A. D. Eaton. 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater", 23<sup>th</sup> Ed., American public Health Association, Washington DC.
- Dehghani, M. 2007. A summary of the design and analysis of the experiments", 1<sup>st</sup> Ed, pelk publication, Tehran.
- Yousuf, M., A. Mollah, R. Schennac, J. R. Parga and D. Cocke. 2001. Electrocoagulation (EC). *Science and Applications* (84): 29-41.

## The Role of Electrocoagulation and Complementary Flocculation in Reducing the COD of Wastewater Detergents for Irrigation Use

H. Hasheminejad\*, M. Sayedbarzin K. Jeirany and A. Taebi<sup>1</sup>

(Received: October 31-2017 ; Accepted: March 14-2018)

### Abstract

Detergents are the main organic pollutants in the industrial and domestic wastewater. Electro-chemistry methods are advanced purification methods developed with high efficiency features. The goal of this study was to investigate the possibility of using electrocoagulation and the complementary flocculation process to achieve the highest removal efficiency of the detergent COD. So, with iron electrode, synthetic samples at the concentrations of 500, 750 and 1000 mg/l (with COD of 217, 268 and 370 mg/l, respectively) and with the initial pH levels of 5, 7.3 and 9 were tested. Variable parameters during the electrocoagulation process included the current duration at 3, 5 and 10 minutes, and the current density was at 4, 10, 16 and 22 mA/cm<sup>2</sup>. The primary results showed that in the optimum conditions, the coagulation process and complementary flocculation could reduce the sample's COD with an initial concentration of detergent (500 mg/l) from 217 mgO<sub>2</sub>/l to 81.30 mgO<sub>2</sub>/l. The electrocoagulation method could reduce the chemical oxygen demand to below the standard limit of environmental discharge (200 mgO<sub>2</sub>/l) and compensate for the possibility of the irrigation of green spaces due to water shortages.

**Keywords:** Detergent, Electrical coagulation, Chemical oxygen demand, Sewage, Organic pollutants, Complementary flocculation

---

1. Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

\*: Corresponding Author, Email: hhasheminejad@cc.iut.ac.ir