بهینه‌سازی فرایند تصفیه پساب کارخانجات لبنی با استفاده از لخته‌کننده‌های طبیعی و شیمیایی

الهام سادات حسینی[1]، فاطمه اردستانی[2]، مازیار شریف زاده[3]

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی شیمی، واحد شاهرود، دانشگاه آزاد اسلامی، شاهرود، ایران
۲- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی شیمی، واحد قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، قائم‌شهر، ایران
(نویسنده مسئول) ۴۲۱۵۵۰۲۵ (۰۱۱) f.ardestani@qaemiau.ac.ir
۳- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی شیمی، واحد آیت اله آملی، دانشگاه آزاد اسلامی، آمل، ایران

(دریافت ۹۴/۱۱/۱ پذیرش ۹۵/۶/۱۶)

Hosseini, E. S., Ardestani, F. & Sharifzadeh, M., 2017, "Optimization of the refining process of dairy factories wastewater using natural and chemical coagulants", *Journal of Water and Wastewater* Vol. 28 No. 2 (108), 47-54. (In Persian)

چکیده

پساب‌های لبنی، با کاهش اکسیژن محلول در آب، اکوسیستم‌های فعال آب را غیرفعال کرده و باعث از بین رفتن موجودات آبزی می‌شوند. این تحقیق با هدف بهینه‌سازی فرایند کاهش COD در پساب کارخانجات لبنی با استفاده از ترکیبات لخته‌کننده انجام شد. فرمولاسیون ترکیبی بهینه‌ای از ترکیبات لخته‌کننده طبیعی و شیمیایی شامل پکتین، آلژینات سدیم، سولفات آلومینیوم و کلرید آهن و همچنین دمای لخته‌سازی به‌منظور کاهش شاخص مورد نظر، تعیین شد. طراحی آزمایش‌ها با روش آماری کسری از فاکتوریل کامل و نرم‌افزار Qualitek-4 و تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی با آنالیز سیگنال به نویز انجام شد. شرایط بهینه با غلظت سولفات آلومینیوم، آلژینات سدیم، کلرید آهن و پکتین به‌ترتیب برابر با ۱/۵، ۰/۰۳، ۱/۵ و ۱ گرم در لیتر و دمای ۳۰ درجه سلسیوس حاصل شد. مقدارکاهش COD تحت شرایط بهینه، ۲۸/۴۱۱ درصد تخمین زده شد. کاهش ۲۹ درصد در COD آب پنیر در آزمایش‌های انجام شده تحت شرایط بهینه به‌دست آمد. مؤثرترین فاکتور در کاهش بار آلی پساب، تغییرات غلظت کلرید آهن با سهم ۳۵ درصد بود. تغییر در غلظت پکتین، کمترین تأثیرگذاری (۱/۸ درصد) و تغییرات غلظت آلژینات سدیم نیز اثر ناچیزی در حد ۸/۸ درصد داشت. تغییرات غلظت سولفات آلومینیوم و دمای لخته‌سازی به ترتیب ۳۰/۸ درصد و ۲۳/۳ درصد در کاهش میزان COD مؤثر بودند. نتایج نشان داد که لخته‌کننده‌های طبیعی نسبت به لخته‌کننده‌های شیمیایی دارای اثرات کمتری در کاهش اکسیژن مورد نیاز شیمیایی در پساب صنایع لبنی می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: COD، پساب لبنی، تصفیه، کسری از فاکتوریل کامل، لخته‌کننده‌های طبیعی

۱- مقدمه

یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی بشر در عصر حاضر، معضل پساب‌های آلاینده محیط زیست است که در نتیجه توسعه صنایع و کارخانجات روی داده است. آلاینده‌های گوناگون به روش‌های مختلف، اثرات نامطلوبی در محیط زیست بر جا می‌گذارند. برخی از این مواد دارای ترکیباتی هستند که با جذب اکسیژن، میزان اکسیژن محلول در آب را کاهش داده، اکوسیستم فعال و زنده آب را تبدیل به یک اکوسیستم مرده و غیرفعال کرده و باعث از بین رفتن موجودات آبزی می‌شوند. آب‌های سطحی از حساس‌ترین اکوسیستم‌ها می‌باشند و کمبود اکسیژن، به‌سرعت موجب به هم‌خوردن تعادل آن‌ها می‌شوند. این امر با ورود مواد آلی از طریق فاضلاب‌های شهری و صنعتی و سایر آلاینده‌های مصرف کننده اکسیژن محلول آب رخ می‌دهد. از جمله کارخانجاتی که دفع پساب‌های آن‌ها بدون تصفیه و یا بازیابی مواد مفید در سال‌های اخیر باعث به هم خوردن تعادل اکوسیستم شده، صنایع لبنیات و به‌ویژه صنایع تولید پنیر است. در صنایع لبنی به ازای هر یک لیتر شیر تا ۱۰ لیتر پساب تولید می‌شود (Balanne 2005). آب پنیر یکی از پساب‌های صنایع لبنی و غنی از ترکیبات آلی و نمکی از جمله لاکتوز، پروتئین، چربی و املاح معدنی است (Ntuli et al. 2001). هر دو نوع آب پنیر شیرین و اسیدی، دارای ۵۰ درصد از ترکیبات اصلی شیر هستند (Jelen 2011). مشکل آلایندگی این ماده، بالا بودن میزان COD آن است. برخی از مواد آلی موجود در پساب‌های لبنی، قابل تجزیه توسط باکتری‌ها نیستند و باید با استفاده از روش‌های

شیمیایی تجزیه شوند (Carvalho et al. 2013). برای کاهش بار آلی آب پنیر، روش‌های متعددی وجود دارد. یکی از روش‌های فیزیکوشیمیایی، استفاده از لخته کننده‌ها است (Parazeres et al. 2012).

در رابطه با استفاده از لخته کننده‌ها برای کاهش میزان COD در آب پنیر تحقیقات بسیار معدودی انجام شده است. البته در رابطه با کاربرد سایر روش‌ها برای دستیابی به این مهم، فعالیت‌هایی صورت گرفته است. نتایج تحقیقاتی که در رابطه با استفاده از روش الکتروهیدرولیز و الکترودهای آلومینیومی با ولتاژ بین ۰/۵ تا ۵ ولت برای کاهش میزان COD در آب پنیر انجام شده نشان داده که بیشترین درصد کاهش میزان COD، ۲۳ درصد بوده که در ولتاژ ۳ حاصل شده است. در این روش، مکانیسم عمده کاهش COD، تجزیه بی‌هوازی کربوهیدرات‌ها و تولید اسیدهای چرب فرار و دی اکسید کربن است (Kargi & Uzuncar 2012). نتایج برخی از تحقیقات انجام شده در زمینه تصفیه پساب‌های صنعتی نیز نشان داده که روش الکتروشیمیایی می‌تواند برای کاهش بار آلی و COD در پساب صنایع لبنی مناسب باشد. نتایج یکی از تحقیقات انجام شده در کاربرد این روش، نشان داده که در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و ولتاژ ۱۱/۲۹ ولت، میزان کاهش COD به ۲۹/۲۷ درصد رسیده است. البته با ادامه دادن این فرایند تا ۸ ساعت، این کاهش به ۵۳ درصد هم رسیده است (Guven et al. 2008). نتایج تحقیقی که در رابطه با استفاده از صمغ دانه لوبیای *کاسیا ابتوسیفولا* [1] به‌عنوان یک ماده لخته کننده طبیعی برای تصفیه پساب صنایع لبنی انجام شده نشان داده که کارایی این صمغ در حذف مواد جامد معلق و کاهش بار آلی پساب بیشتر از سولفات آلومینیوم بوده است (Yee Shark & Wu 2019). کاربرد پلیمرهای زیستی نیز به‌دلایلی از جمله زیست تخریب‌پذیر بودن آنها و همچنین برخورداری از کارایی بالا در دزهای کم برای لخته کردن ترکیبات آلی موجود در پساب‌ها امروزه بسیار چشمگیر شده است (Lee et al. 2014). در یک تحقیق در سال ۲۰۱۴ از گلوتارآلدئید همراه با نانوذرات کیتوزان به‌عنوان لخته کننده در حذف ترکیبات آلی از پساب‌ها استفاده شده است. این ماده کارایی بسیار خوبی را در pH برابر با ۳ و دمای ۲۵ درجه سلسیوس در حذف ترکیبات آلی از فازهای آبی نشان داده است (Zhou et al. 2014). در برخی از پژوهش‌ها از کربن اکتیو به‌دست آمده از برخی گونه‌های جلبکی مانند *الوا لاکتوکا* [2] و *سیستوسریا استریکتا* [3] برای کاهش بار آلی پساب‌ها استفاده شده و کارایی این ترکیبات مورد تأیید قرار گرفته است (Attouti et al. 2013).

در این تحقیق از یک سری لخته کننده‌های طبیعی نظیر پکتین و همچنین لخته کننده‌های سنتزی مانند آلژینات سدیم، سولفات آلومینیوم و کلرید آهن به‌منظور کاهش COD در پساب کارخانجات پنیرسازی استفاده شد. در ضمن، اثر دما بر عملکرد این ترکیبات لخته کننده نیز مورد بررسی قرار گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مواد

آب پنیر مورد استفاده در این تحقیق از کارخانه پگاه گلستان تهیه شد. پکتین (پلی-D-گالاکتورونیک اسید متیل استر) با میزان رطوبت کمتر از ۱۰ درصد و آلژینات سدیم از شرکت سیگما-آلدریچ [4] تهیه شدند. سولفات آلومینیوم (Al_2O_3-$18H_2O$) و جرم مولی ۶۶۶/۴۲ گرم بر مول و کلرید آهن ($FeCl_3$-$6H_2O$) با جرم مولی ۲۷۰ گرم بر مول از شرکت مرک [5] تهیه شدند. سایر مواد شیمیایی مورد استفاده در اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی همگی از شرکت مرک تهیه شدند.

۲-۲- نمونه‌برداری و آماده‌سازی نمونه‌ها

۱۵ نمونه متناوب اولیه آب پنیر هریک به حجم ۱ لیتر از مخزن همزن‌دار نگهداری آب‌پنیر محتوی ۱۵۰۰ لیتر آب‌پنیر در بطری‌های شیشه‌ای درب‌دار برداشته شد. سپس نمونه‌ها کاملاً با یکدیگر مخلوط شده و در نهایت یک نمونه به حجم ۵ لیتر از این مخلوط، به‌عنوان نمونه آب‌پنیر نهایی برداشته شد. نمونه نهایی بلافاصله و بدون تأخیر برای فرایند لخته‌سازی استفاده شد (Moghtader & Montazeri 2005).

۲-۳- تعیین حدود غلظت لخته کننده‌ها

برای تعیین حدود تقریبی دما و غلظت لخته کننده‌ها در فرایند بهینه‌سازی، ۴۰ لوله آزمایش آماده شده و در هر کدام مقدار ۵ میلی لیتر از نمونه آب پنیر ریخته شد. ترتیب مقادیر ۰/۰۱، ۰/۰۵، ۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲، ۲/۵، ۳ و ۳/۵ گرم در لیتر سولفات آلومینیوم به ۱۰ لوله اول، آلژینات سدیم به ۱۰ لوله دوم، کلرید آهن به ۱۰ لوله سوم و پکتین به ۱۰ لوله چهارم به‌طور جداگانه اضافه شد. سپس لوله‌ها به‌مدت ۵ ساعت، در انکوباتورهای مناسب با دمای ۳۰ درجه سلسیوس نگهداری شدند. پس از آن محتویات

[1] *Cassia obtusifolia*
[2] *Ulva lactuca*
[3] *Systoceira stricta*
[4] Signma Aldrich
[5] Merck

بطری‌ها به‌صورت جداگانه از کاغذ صافی عبور داده شده و محلول‌های صاف شده برای آزمون اندازه‌گیری COD استفاده شدند. حدود غلظت‌های هریک از لخته کننده‌ها در فرایند بهینه‌سازی با استفاده از نتایج این آزمایش‌ها تعیین شد (Ganjidous & Mokhtarani 2002).

۲-۴- طراحی آزمایش‌ها

طراحی آزمایش‌ها به‌منظور بررسی همزمان عملکرد این فاکتورها با استفاده از روش آماری کسری از فاکتوریل کامل و نرم‌افزار Qualitek-4 انجام شد. تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی با استفاده از روش تاگوچی و آنالیز سیگنال به نویز در نهایت به تعیین شرایط بهینه از لحاظ فاکتورهای مورد اشاره منجر شد.

یک آرایه متعامد برای انجام آزمایش‌ها، لخته‌سازی با استفاده از نرم‌افزار Qualitek-4 با توجه به در نظر گرفتن پنج عامل متغیر دما و غلظت لخته کننده‌ها شامل سولفات آلومینیوم، آلژینات سدیم، کلرید آهن و پکتین هرکدام در ۴ سطح مختلف طراحی شد (جدول ۱).

در این تحقیق از نرم‌افزار Qualitek–4 version 4.82.0 استفاده شد. کاربرد این نرم‌افزار در طراحی آزمایش‌ها به‌منظور به حداقل رساندن تعداد آزمایش‌ها و همچنین تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌ها برای بهینه‌سازی فرایندها می‌باشد. در این نرم‌افزار با استفاده از یک سری روابط ریاضی و آرایه‌ها و با در نظر گرفتن تأثیر عوامل دخیل در نتایج هر آزمایش بر روی یکدیگر، تعداد آزمایش‌ها به کمترین حد ممکن تقلیل می‌یابد.

۲-۵- فرایند لخته‌سازی

برای انجام آزمایش‌های لخته‌سازی، ۱۶ بطری درب‌دار تهیه شد و در داخل هرکدام از آن‌ها مقدار ۱۰۰ میلی لیتر آب پنیر ریخته شد و در حین هم زدن با سرعت ۵۰ دور در دقیقه، سولفات آلومینیوم، آلژینات سدیم، کلرید آهن و پکتین طبق طرح تعیین شده اضافه شد. سپس بطری‌ها به‌مدت ۵ ساعت در انکوباتورهای مناسب با دمای تعیین شده نگهداری شدند (جدول ۱). پس از آن محتویات بطری‌ها به‌صورت جداگانه از کاغذ صافی عبور داده شدند و محلول‌های صاف شده برای آزمون اندازه‌گیری COD استفاده شدند.

۲-۶- اندازه‌گیری COD

برای تعیین مقدار COD، محلول استاندارد پتاسیم هیدروژن فتالات با غلظت ۸/۵ گرم در لیتر تهیه شد. میزان COD این محلول برابر با ۱۰۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر بود. به‌منظور تعیین منحنی استاندارد، به یک گروه بالن‌های اندازه‌دار ۱۰۰ میلی لیتری به‌ترتیب ۰، ۱، ۵، ۷، ۹، ۱۵ و ۲۰ میلی‌لیتر محلول استاندارد پتاسیم هیدروژن فتالات افزوده شد و با آب مقطر به حجم ۱۰۰ میلی‌لیتر رسانده شدند. میزان COD در محلول‌های به‌دست آمده به‌ترتیب ۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰۰، ۷۰۰۰، ۹۰۰۰، ۱۵۰۰۰ و ۲۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر بود.

برای تهیه محلول هضم ۷/۳۵ گرم از پتاسیم دی کرومات که به‌مدت ۲ ساعت در دمای ۱۰۵ درجه سلسیوس خشک شده در یک بشر محتوی ۱۵۰ میلی‌لیتر آب مقطر، حل شد و سپس به دقت و در حال همزدن به آرامی ۴۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک غلیظ با جرم حجمی ۱/۸۴ گرم بر میلی‌لیتر به آن اضافه شد. پس از سرد شدن، توسط آب مقطر به حجم ۲۵۰ میلی‌لیتر رسانده شد. محلول کاتالیست شامل ۸۰ گرم سولفات جیوه در ۲۰۰ میلی‌لیتر اسید سولفوریک رقیق (محلول ۲ درصد حجمی از اسید سولفوریک غلیظ در آب) تهیه شد (Nargani 2015).

در هر لوله آزمایش درب‌دار به‌ترتیب ۱/۵ میلی‌لیتر محلول هضم، ۳/۵ میلی‌لیتر محلول کاتالیست و ۲ میلی‌لیتر نمونه از محلول‌های استاندارد و نمونه‌های آب پنیر تیمار شده با لخته کننده‌ها، هریک به‌طور جداگانه ریخته شد. لوله‌ها توسط دستگاه شیکر به هم زده شد تا یکنواخت شود. برای دقت کار از هر نمونه پساب ۳ لوله آزمایش و از محلول‌های استاندارد هر کدام ۲ لوله آزمایش و یک لوله هم به عنوان شاهد (آب مقطر خالص با COD برابر با صفر) برداشته شد. لوله‌ها پس از علامت گذاری، داخل دستگاه ترموراکتور مدل AQUALYTIC, AL125T ساخت آلمان قرار داده شدند.

پس از رسیدن دما به ۱۵۰ درجه سلسیوس، زمان یادداشت شد و سپس به‌مدت ۲ ساعت، نمونه‌ها در این دما قرار گرفتند. سپس نمونه‌ها از دستگاه خارج شده و در یک محل سرد و تاریک قرار داده داده شدند. لوله‌ها با استفاده از دستگاه شیکر تکان داده شده و سپس به‌مدت ۱۵ دقیقه نگهداری شدند تا مواد معلق آنها ته‌نشین شود. سپس میزان جذب نور در محلول‌های استاندارد و نمونه‌های آب پنیر تیمار شده با لخته‌کننده‌ها با استفاده از دستگاه اسپکتروفوتومتر (شیمادزو[1]، مدل UV1601pc) در طول موج ۶۰۰ نانومتر خوانده شد. منحنی استاندارد مطابق شکل ۱ توسط دستگاه رسم شد و در همان طول موج، میزان COD نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. ابتدا توسط شاهد، دستگاه صفر شد و سپس در مقابل نمونه شاهد، میزان COD نمونه‌ها با استفاده از منحنی استاندارد دستگاه، به‌طور اتوماتیک محاسبه شد (Nargani 2015).

[1] Shimadzu

Table 1. Level of each factor in the tests proposed by the software for optimization of the whey treatment process

جدول ۱- سطوح هریک از فاکتورها در آزمایش‌های پیشنهادی نرم‌افزار برای بهینه‌سازی فرایند تصفیه آب‌پنیر

		Factor level			
Experiment number	Temperature (°C)	Pectin Conc. (g/L)	Iron Chloride Conc. (g/L)	Sodium Alginate Conc. (g/L)	Aluminum Sulfate Conc. (g/L)
1	20	1	0.4	0.01	0.6
2	20	2	0.8	0.02	1
3	20	4	1.5	0.03	1.5
4	20	6	3	0.04	2
5	25	6	1.5	0.02	0.6
6	25	4	3	0.01	1
7	25	2	0.4	0.04	1.5
8	25	1	0.8	0.03	2
9	30	2	3	0.03	0.6
10	30	1	1.5	0.04	1
11	30	6	0.8	0.01	1.5
12	30	4	0.3	0.02	2
13	35	4	0.8	0.04	0.6
14	35	6	0.4	0.03	1
15	35	1	3	0.02	1.5
16	35	2	1.5	0.01	2

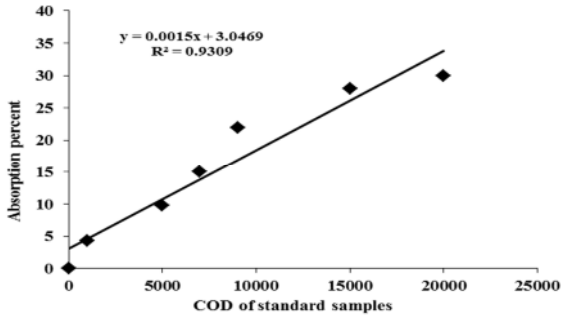

Fig. 1. COD standard curve

شکل ۱- منحنی استاندارد COD

۳- نتایج و بحث

بر اساس نتایج به‌دست آمده، میزان COD در نمونه آب‌پنیر اولیه برابر با ۴۰۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر بود. در این تحقیق، هدف اصلی کاهش میزان COD در نمونه آب پنیر با استفاده از افزودن ترکیبات لخته‌کننده و همچنین کنترل فاکتور دمای لخته سازی بود. نتایج مربوط به اندازه‌گیری میزان COD در نمونه‌های تیمار شده با لخته کننده‌ها در جدول ۱ و درصد کاهش COD در هریک از تیمارها در جدول ۲ ارائه شده است.

آزمایش‌های مربوط به کاهش بار آلی آب پنیر در ۱۶ نمونه بررسی و اندازه‌گیری درصد کاهش میزان COD نسبت به نمونه اولیه آب پنیر، دو بار تکرار شد. در جدول ۳ نتایج نهایی این تکرارها و مقدار میانگین مورد استفاده در تجزیه و تحلیل‌های آماری ارائه شده است. متغیر خروجی یک کمیت فیزیکی قابل اندازه‌گیری است (در اینجا درصد کاهش میزان COD) که هر چه بزرگ‌تر باشد بهتر است. آنالیز در نظر گرفته شده در این تحقیق با استفاده از نسبت S/N (شاخص آماری سیگنال به نویز) بوده که با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شده است

$$(S/N) = -10\log(MSD) \qquad (۱)$$

که در این رابطه

MSD میانگین مربع انحراف است و بر حسب نوع آنالیز مورد نظر به‌صورت زیر تعریف می‌شود

$$MSD = \frac{\sum_{i=1}^{n}(1/y_i)^2}{n} \qquad (۲)$$

که در آن

n تعداد کل تکرار یک آزمایش و y_i نتایج به‌دست آمده از هر آزمایش است. برای به‌دست آوردن نسبت S/N ابتدا باید نتایج به‌دست آمده از تمامی ۱۶ آزمایش انجام شده که در چند سری تکرار شده وارد برنامه شود تا آنالیز S/N انجام شود و با توجه به نتایج آنالیز، شرایط بهینه محاسبه شود (جدول ۳).

میانگین نسبت S/N سطوح مختلف مورد بررسی از هریک از فاکتورهای مؤثر بر کاهش میزان COD در شکل ۱ ارائه شده است. در شکل ۲ برای هریک از فاکتورهای مورد بررسی، نمودار میانگین مقادیر نسبت سیگنال به نویز در چهار سطح مختلف از آن فاکتور ارائه شده است. اولین نمودار از سمت چپ در شکل ۲ مربوط به تأثیر فاکتور دما بر کاهش بار آلی آب پنیر در فرایند تصفیه به روش لخته‌سازی است. همان‌گونه که از روی نمودار مشاهده می‌شود مقدار میانگین S/N آزمایش‌هایی که با استفاده از سطح ۱ فاکتور دما انجام شده‌اند برابر با ۲۵/۰۷۵ و همین میانگین برای سطح ۲ فاکتور دما برابر با ۲۵/۴۹۵ بوده است. به‌همین ترتیب میانگین نسبت S/N برای سطوح ۳ و ۴ فاکتور دما به ترتیب برابر با

Table 2. Value and percent of COD reduction in whey samples treated with flocculants based on tests designed with the Qualitek-4 software (first iteration) for the optimization of treatment process and reduction of organic load of whey effluent

جدول ۲- میزان و درصد کاهش **COD** در نمونه‌های آب پنیر تیمار شده با لخته‌کننده‌ها طبق آزمایش‌های طراحی شده با نرم افزار Qualitek-4 (تکرار اول) در بهینه‌سازی فرایند تصفیه و کاهش بار آلی آب پنیر

Experiment number	COD Conc. after Coagulation (mg/L)	Percent COD Reduction
1	32617.3	18.47
2	34409.08	13.80
3	30940	22.63
4	32796.44	17.97
5	33089.56	18.30
6	32633.52	18.39
7	31949.62	20.15
8	32617.30	18.43
9	39343.02	20.32
10	31852	20.37
11	31314.5	20.39
12	34294.66	21.69
13	33138.42	14.30
14	32307.88	17.12
15	31477.34	19.25
16	31888	20.28

۲۶/۳۱ و ۲۴/۹۰۱ می‌باشد. بنابراین در این نمودار، میانگین نسبت S/N در آزمایش‌های انجام شده در چهار سطح در نظر گرفته شده برای فاکتور دما نشان داده شده است. این نمودار نشان می‌دهد که بیشترین درصد کاهش COD در نمونه آب پنیر با استفاده از سطح ۳ فاکتور دما (طبق جدول ۱ برابر با ۳۰ درجه سلسیوس) حاصل شده است. همچنین با توجه به این نمودار مشخص می‌شود که با افزایش دما از سطح ۱ (۲۰ درجه سلسیوس) به سطح ۲ (۲۵ درجه سلسیوس)، درصد کاهش COD در آب پنیر تیمار شده، فقط ۱/۷ درصد افزایش یافته در حالی که با افزایش دمای لخته‌سازی از سطح ۲ به سطح ۳ (۳۰ درجه سلسیوس) درصد کاهش COD در آب پنیر تیمار شده، ۳/۲ درصد افزایش یافته است. با افزایش دمای لخته‌سازی از سطح ۳ به سطح ۴ (۳۵ درجه سلسیوس) درصد کاهش COD در آب پنیر تیمار شده ۵/۳۵ درصد کاهش یافته است. البته در تجزیه و تحلیل‌های انجام شده جهت تعیین شرایط بهینه نهایی، تأثیرات متقابل هر پنج فاکتور مورد بررسی در نظر گرفته شده است. در حالی که در این نمودارها تأثیر هر فاکتور به‌صورت جداگانه و بدون توجه به اثرات متقابل سایر فاکتورها بر روی آن بیان شده است. نتایج تحقیق Guven et al. در سال ۲۰۰۸ نشان داد که دمای ۲۵ درجه سلسیوس بهترین دما برای کاهش COD با استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی است (Guven et al. 2008). البته باید توجه داشت که روش مورد استفاده در تحقیق ایشان با روش به کار رفته در تحقیق حاضر متفاوت بوده است.

نمودارهای ارائه شده در شکل ۲ نشان می‌دهد که در مورد فاکتور غلظت آلژینات سدیم بهترین نتیجه در سطح ۳ و ضعیف‌ترین کارایی در سطح ۲ مشاهده شده است. البته اختلاف بین این دو سطح فقط ۲/۷ درصد بود. در مورد فاکتور غلظت سولفات آلومینیوم، بیشترین درصد کاهش در COD در نمونه آب پنیر تیمارشده، با استفاده از سطح ۳ این فاکتور (۱/۵ گرم در لیتر) حاصل شده است. کلرید آهن نیز بهترین کارایی را در کاهش بار آلی آب پنیر در سطح ۳ خود (غلظت ۱/۵ گرم در لیتر) نشان داد. پکتین در غلظت ۱ گرم در لیتر (سطح ۱) بهترین تأثیر را در لخته‌سازی ترکیبات آلی موجود در آب پنیر داشته است. شرایط بهینه برای دستیابی به بالاترین راندمان کاهش بار آلی و در نتیجه، کاهش میزان COD آب پنیر در جدول ۴ ارائه شده است. تحت این شرایط درصد کاهش مورد انتظار در میزان COD برابر با ۲۸/۴۱۱ درصد محاسبه شده است. این مقدار در واقع، درصد تئوری مورد انتظار برای کاهش میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیایی آب پنیر در شرایط بهینه است. آزمایش‌های انجام شده با استفاده از دمای بهینه (۳۰ درجه سلسیوس) و با استفاده از کاربرد همزمان چهار ماده لخته کننده (سولفات آلومینیوم، آلژینات سدیم، پکتین و کلرید آهن) در غلظت‌های بهینه، میزان کاهش COD معادل با ۲۹ درصد را نشان داد که با مقدار تئوری مطابقت قابل قبولی داشت. همچنین اطلاعات جدول ۴ نشان می‌دهد که مؤثرترین فاکتور در کاهش بار آلی آب پنیر، تغییرات غلظت کلرید آهن بوده است.

Table 3. Percent of COD reduction in whey samples treated with flocculants based on the tests designed with the Qualitek-4 software (first and second iterations with average values obtained) for the optimization of the treatment process and reducing the organic load of whey

جدول ۳- درصد کاهش COD در نمونه‌های آب پنیر تیمار شده با لخته کننده‌ها طبق آزمایش‌های طراحی شده با نرم‌افزار Qualitek-4 (تکرار اول و دوم و میانگین) در بهینه‌سازی فرایند تصفیه و کاهش بار آلی آب پنیر

Experiment number	Percent COD reduction Trial 1	Percent COD reduction Trial 2	The mean percent COD reduction	S/N
1	18.47	18.45	18.46	25.324
2	13.80	13.77	13.785	22.781
3	22.63	22.65	22.64	27.097
4	17.97	18	17.985	25.098
5	18.30	18.28	18.29	25.244
6	18.39	18.42	18.405	25.298
7	20.15	20.13	20.14	26.081
8	18.43	18.64	18.445	25.359
9	20.32	20.29	20.305	26.152
10	20.37	20.35	20.36	26.175
11	20.39	20.37	20.38	26.184
12	21.69	21.71	21.70	26.729
13	14.30	14.26	14.28	23.094
14	17.12	17.15	17.135	24.677
15	19.25	19.23	19.24	25.684
16	20.28	20.31	20.295	26.147

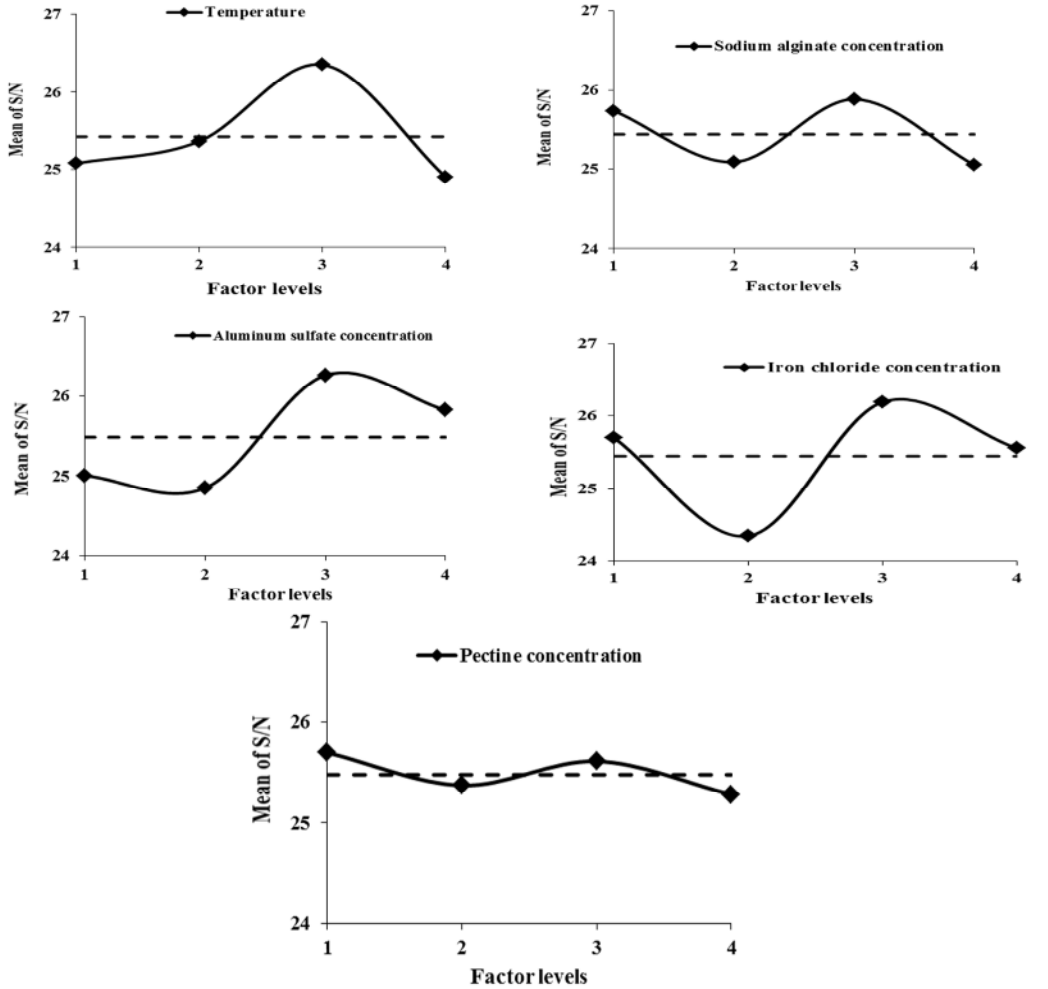

Fig. 2. Curves of the mean values of signal to noise ratio for different levels of each factor involved in COD reduction

شکل ۲- نمودارهای میانگین نسبت سیگنال به نویز برای سطوح مختلف هریک از فاکتورهای موثر بر کاهش میزان COD

Table 4. Optimum levels and effectiveness of each factor examined for reducing the organic load of whey in the coagulation treatment process

جدول ۴- سطوح بهینه و درصد اثرگذاری هریک از فاکتورهای مورد بررسی در کاهش بار آلی آب پنیر در فرایند تصفیه با استفاده از لخته‌کننده‌ها

Factor	Optimum level	The amount of optimum level	Effectiveness percent
Temperature (°C)	3	30	23.292
Aluminum sulfate (g/L)	3	1.5	30.811
Sodium alginate (g/L)	3	0.03	8.878
Iron chloride (g/L)	3	1.5	35.184
Pectin (g/L)	1	1	1.833

سهم تغییرات فاکتور غلظت کلرید آهن در تأثیرگذاری بر کاهش بار آلی آب پنیر در بین پنج فاکتور مورد بررسی در این تحقیق تقریباً ۳۵/۲ درصد بوده است. تغییر در غلظت پکتین کمترین تأثیرگذاری (۱/۸ درصد) را در کاهش بار آلی آب پنیر نشان داده است. همچنین تأثیر تغییرات غلظت سولفات آلومینیوم نیز در کاهش بار آلی آب پنیر قابل ملاحظه و در حد ۳۱ درصد بوده است. اما تغییرات دما، ۲۳ درصد و تغییرات غلظت آلژینات سدیم ۹ درصد در کاهش میزان COD در آب پنیر نقش داشته‌اند.

در این تحقیق، تحت شرایط بهینه، درصد کاهش مورد انتظار در میزان COD برابر با ۲۸/۴۱۱ درصد محاسبه شده است. همچنین میزان کاهش COD تحت شرایط بهینه در آزمایشگاه برابر با ۲۹ درصد به‌دست آمده است. نتایج تحقیق گنجی‌دوست و مختاریان در سال ۲۰۰۲ نشان داده که با استفاده از ترکیبات لخته کننده مانند آلژینات سدیم و کیتوسان می‌توان بار آلی آب پنیر را تا ۲۳درصد کاهش داد که بسیار کمتر از بازدهی به‌دست آمده در تحقیق حاضر است (Ganjidoost & Mokhtarani 2002). در تحقیق حاضر، لخته کننده‌های طبیعی مورد مطالعه مانند پکتین و آلژینات سدیم تأثیر قابل توجهی بر کاهشCOD در آب پنیر نداشتند. Patil & Hugar در سال ۲۰۱۵ با استفاده از برخی ترکیبات لخته کننده طبیعی به‌دست آمده از گیاهان بومی هندوستان، تا ۸۰ درصد کاهش در میزان COD آب پنیر را گزارش نمودند. بنابراین نوع ترکیبات طبیعی لخته کننده می‌تواند اثرات قابل توجهی بر افزایش راندمان فرایند تصفیه و کاهش بار آلی پساب‌ها داشته باشد. نتایج تحقیقات Balannec et al. در سال ۲۰۰۵ نشان داده که استفاده از غشاهای اسمزی خاص می‌تواند با قابلیت منعقدکنندگی بسیار بالا تا ۹۹ درصد کاهش در COD ایجاد کند. همچنین Guven et al. در سال ۲۰۰۸ توانستند با استفاده از روش‌های الکتروشیمیایی به راندمان ۲۹/۲۷ درصد در کاهش COD دست یابند که به نتایج تحقیق حاضر بسیار نزدیک می‌باشد. Kargi & Uzuncar در سال ۲۰۱۲ نیز با استفاده از الکترودهای آلومینیوم به راندمان ۲۲ درصد در کاهش COD در آب پنیر رسیدند که بسیار کمتر از نتایج حاصله در این تحقیق می‌باشد. Mehdipour et al. در سال ۲۰۱۵ توانستند با ترکیب فرایند ازناسیون و استفاده از لخته کننده‌های شیمیایی کلرید آهن و سولفات آلومینیوم به‌ترتیب به کاهش ۳۴ و ۴۸ درصدی در میزان اکسیژن مورد نیاز شیمیایی در فاضلاب صنایع لاستیک‌سازی دست یابند. ۵۰ درصد کاهش در میزان COD در پساب کارخانجات لبنی با استفاده از سولفات آلومینیوم و سولفات آهن نیز توسط Parmar et al. در سال ۲۰۱۱ گزارش شده است

۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق اولین گزارش از کاربرد روش آماری کسری از فاکتوریل کامل و نرم‌افزار Qualitek-4 برای طراحی آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل نتایج آزمایشگاهی به‌منظور تعیین شرایط بهینه از لحاظ فاکتورهای دمای لخته‌سازی و غلظت سولفات آلومینیوم، آلژینات سدیم، کلرید آهن و پکتین برای دستیابی به بیشترین درصد کاهش در بار آلی آب پنیر و در نتیجه، کاهش میزان COD آن بود.

تحت شرایط بهینه با استفاده از ترکیبی از لخته کننده‌های طبیعی مانند پکتین و لخته کننده‌های سنتزی مانند سولفات آلومینیوم، آلژینات سدیم و کلرید آهن و همچنین با کنترل دمای لخته‌سازی می‌توان تا ۲۹ درصد شاخص میزان COD را کاهش داد. تغییرات غلظت کلرید آهن در کاهش شاخص مذکور بیشترین نقش را داشته و به‌عنوان مهم‌ترین فاکتور در بازدهی فرایند لخته‌سازی شناخته شد. بر اساس نتایج این تحقیق، اثرات لخته کننده‌های طبیعی مانند پکتین و آلژینات سدیم در کاهش COD در پساب کارخانجات لبنی نسبت به لخته‌کننده‌های شیمیایی، بسیار کمتر بود.

۵- قدردانی

نویسندگان این مقاله مراتب سپاس و تشکر خود را از معاونت‌های محترم پژوهش و فناوری دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم‌شهر و دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود به جهت فراهم نمودن امکانات علمی و آزمایشگاهی در راستای اجرای این تحقیق اعلام می‌نمایند.

۶- مراجع

Attouti, S., Bestani, B., Benderdouche, N. & Laurent, D., 2013, "Application of *Ulva lactuca* and *Systoceira stricta* algae-based activated carbons to hazardous cationic dyes removal from industrial effluents", *Water Research,* 47(10), 3375-3388.

Balannec, B., Vourch, M., Rabiller-Baudry, M. & Chaufer, B., 2005, "Comparative study of different nanofiltration and reverse osmosis membranes for dairy effluent treatment by dead-end filtration", *Separation Purification Technology*, 42(2), 195-200.

Carvalho, F., Prazeres, A. R. & Rivas, J., 2013, "Cheese whey wastewater: Characterization and treatment", *Science Total Environment*, 445-446, 385-396.

Ganjidoost, H. & Mokhtarani, N., 2002, "Comparison of natural polymers and chemical coagulants in the reduction of organic load of whey", *Iranian Journal Polymer Science Technology*, 15(2), 75-79.

Guven, G., Perendeci, A. & Tanyolac, A., 2008, "Electrochemical treatment of deproteinated whey wastewater and optimization of treatment conditions with response surface methodology", *Journal Hazardous Materials,* 157(1), 69-78.

Jelen, P., 2011, "Whey processing/utilization and products", *Encyclopedia Dairy Sciences*, 2, 731-737.

Kargi, F. & Uzuncar, S., 2012, "Electro-hydrolysis of cheese whey solution for hydrogen gas production and chemical oxygen demand (COD) removal using photo-voltaic cells (PVC)", *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(21), 15841-15849.

Kargi, F. & Uzuncar, S., 2012, "Simultaneous hydrogen gas formation and COD removal from cheese whey wastewater by electro-hydrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(16), 11656-11665.

Lee, C.S., Robinson, J. & Chong, M. F., 2014, "A review on application of flocculants in wastewater treatment", *Process Safety Environmental Protection*, 92(6), 489-508.

Mehdipoor, M., Dehghani, M.H., Nasseri, S., Nadafi, K. & Mahvi, A.H., 2015, "Efficiency of ozonation and chemical coagulation using aluminum sulfate and ferric chloride for reduction of COD from wastewater of rubber industry", *Research Environmental Health*, 1(2), 79-84.

Moghtader, M. & Montazeri, N., 2005, "Water quality-determination of the chemical oxygen demand", *Iranian National Standard Organization*, 12, 5-6.

Nargani, Sh., 2015, "Water quality-determination of the chemical oxygen demand index (St-COD)-Small-scale sealed-Tube method", *Iranian National Standard Organization*, 5, 2-11.

Ntuli, F., Kuipa, K. P. & Muzenda, E., 2011, "Designing of sampling programs for industrial effluent monitoring", *Environmental Science Pollution Research*, 18(3), 479-484.

Parmar, K.A., Prajapati, S., Patel, R. & Dabhi, Y. 2011, "Effective use of ferrous sulfate and alum as a coagulant in treatment of dairy industry wastewater", *Journal of Engineering & Applied Sciences*, 6(9), 42-45.

Patil, Ch. & Hugar, M., 2015, "Treatment of dairy wastewater by natural coagulants", *International Research Journal of Engineering & Technology*, 2(4), 1120-1125.

Prazeres, A., Carvalho, F. & Rivas, J., 2012, "Cheese whey management: A review", *Journal of Environmental Management*, 110, 48-68.

Yee Shark, K.P. & Wu, T.Y., 2014, "Coagulation–flocculation treatment of high-strength agro-industrial wastewater using natural *Cassia obtusifolia* seed gum: Treatment efficiencies and flocs characterization", *Chemical Engineering Journal,* 256, 293-305.

Zhou, Z., Lin, S., Yue, T. & Lee, T.C., 2014, "Adsorption of food dyes from aqueous solution by glutaraldehyde cross-linked magnetic chitosan nanoparticles", *Journal of Food Engineering*, 126, 133-141.