

# استفاده از روش شناورسازی با هوای محلول برای جداسازی

## رنگ، چربی و مواد معلق از فاضلاب صنعتی

عمران دژبرد، کارشناس ارشد مهندسی شیمی، مهندسی محیط زیست - دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

داود کاه فروشان\*، دانشیار دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

سیروس شفیعی، استاد دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

جواد احمدی، کارشناس ارشد، مهندسی شیمی، مهندسی محیط زیست - دانشگاه صنعتی سهند، تبریز، ایران.

E-mail\*: kahforoushan@sut.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۴/۰۷/۰۸ - پذیرش: ۱۳۹۴/۰۹/۱۷

### چکیده

شناورسازی یک روش تصفیه فیزیکی است که برای جداسازی ذرات جامد یا مایع از یک فاز مایع به کار می‌رود و برای کاهش آلاینده‌های فاضلاب به‌ویژه چربی و روغن، جامدات معلق، رنگ و بو مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش از روش شناورسازی با هوای محلول، در فشارهای مختلف و در کنار فرایند انعقاد و لخته‌سازی با استفاده از منعقدکننده آلوم جهت حذف همزمان رنگ، چربی و مواد معلق از یک نمونه فاضلاب صنعتی مربوط به کارخانه تولید خمیر مایه استفاده گردید. آزمایش‌ها با استفاده از یک پایلوت آزمایشگاهی انجام گرفته و میزان حذف شاخص‌های روغن، جامدات معلق و رنگ در فاضلاب به عنوان کارایی سیستم مورد بررسی قرار گرفتند. مقدار بهینه آلوم برای تصفیه این نوع پساب ۵ g/L به دست آمد. بیشترین بازده حذف جامدات معلق و چربی به ترتیب ۹۰/۵۷ و ۸۷/۸۸ درصد حاصل شد. نتایج نشان داد که به دلیل ماهیت رنگ موجود در فاضلاب مورد بررسی، روش شناورسازی با هوای محلول در حذف رنگ از این نوع پساب بی‌تأثیر است. همچنین بر طبق نتایج با افزایش فشار از ۳ تا ۵ اتمسفر، میزان حذف شاخص‌های روغن و جامدات معلق افزایش یافت. فشار، دبی آب اشباع و زمان ماند واکنش شناورسازی در بهترین مقادیر بازده حذف به ترتیب برابر ۵ اتمسفر، ۴ لیتر بر دقیقه و ۱۲۰ ثانیه به دست آمدند.

واژه‌های کلیدی: شناورسازی با هوای محلول، جداسازی، رنگ، چربی، جامدات معلق.

### ۱- مقدمه

شناوری مجموعه ذره و حباب‌های گاز به قدری زیاد است که سبب صعود ذره به سطح می‌شود، بدین ترتیب می‌توان ذراتی را که چگالی آنها از مایع بیشتر نیز است، به صعود به سطح واداشت (Arnold, Grubb and Harvey, 1995). مزیت اصلی شناورسازی بر ته‌نشینی

شناورسازی یک روش تصفیه فیزیکی است که برای جداسازی ذرات جامد یا مایع از فاز مایع به کار می‌رود. جداسازی از طریق وارد کردن حباب‌های ریز گاز (معمولاً هوا) به داخل فاز مایع صورت می‌پذیرد. حباب‌های هوا به ذرات جامد می‌چسبند و نیروی

صنعتی تولید خمیر مایه با استفاده از یک پایلوت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار گرفت. همچنین برای بالا بردن بازده جداسازی در کنار سیستم DAF از فرآیند انعقاد نیز جهت کاهش بار مواد معلق استفاده شد. در ادامه با استفاده از روش طراحی آزمایش مقادیر بهینه سیستم تعیین شد. لازم به ذکر است فاضلاب مورد استفاده از نظر مشخصات ظاهری به دلیل وجود ملاس رنگ قهوه‌ای مایل به قرمز بسیار دارد که با گذشت زمان کدر می‌گردد. این فاضلاب به دلیل داشتن اکسیژن مورد نیاز شیمیایی بسیار بالا (حدود  $4000 \text{ mg/L}$ )، غنی از مواد آلی بوده و بر طبق استانداردهای زیست محیطی، قبل از تصفیه کامل، قابلیت تخلیه در محیط را ندارد.

## ۲- روش‌ها

برای انجام تحقیق از یک سیستم پایلوت آزمایشگاهی DAF استفاده شد. در شکل ۱ شمای کلی فرآیند شناورسازی مورد استفاده در این تحقیق ارائه شده است. این پایلوت آزمایشگاهی شامل سه مخزن تحت فشار (اشباع‌ساز)، مخزن شناورسازی و مخزن پساب اولیه بود و هوای مورد نیاز جهت عملیات شناورسازی، توسط کمپرسور هوای مرکزی تأمین می‌شد. میزان pH نمونه فاضلاب تقریباً خنثی بود که جهت انجام عملیات شناورسازی هنگام کار با آلوم، این مقدار، عدد مناسبی بود.

(الف)



این است که در این روش، ذراتی را که بسیار کوچک و یا سبک هستند و به آرامی ته‌نشین می‌شوند، می‌توان کامل‌تر و در زمان کوتاه‌تر حذف کرد (Crossely and Valade, 2006).

روش‌های متداول شناورسازی، شامل هوادهی در فشار اتمسفر (شناورسازی با هوای پخش‌شده)، شناورسازی در خلأ، شناورسازی الکتریکی و شناورسازی با هوای محلول DAF<sup>۱</sup> می‌باشند. (Fris et al., 2001). در روش DAF حباب‌ها در اثر کاهش فشار آب اشباع شده با هوا، در فشار بیش از فشار اتمسفر ایجاد می‌شوند. در این سیستم، هوا تحت فشار ۳ تا ۵ اتمسفر در فاضلاب حل می‌شود، سپس فشار تا حد فشار اتمسفر کاهش می‌یابد (Rubio, Souz and Smith, 2002). کل جریان به مدت چند ساعت در یک مخزن تحت فشار باقی می‌ماند تا فرصت برای حل شدن هوا تأمین شود، سپس جریان تحت فشار با عبور از یک شیر فشارشکن به قسمت زیرین مخزن شناورسازی، جایی که هوا به صورت حباب‌های کوچک از میان کل حجم مایع خارج می‌شود، راه می‌یابد. در سال‌های اخیر از فرآیند DAF به‌طور گسترده جهت جداسازی جامدات معلق و روغن استفاده شده است (Edzwald, 2010; Al-shamrani, Jamesd and Xiao, 2002). همچنین به دلیل کارایی بالای این روش در تصفیه پساب صنایع کشتارگاه‌ها، صنایع نساجی و کاغذسازی، جداسازی جامدات، چربی و روغن و دیگر مواد در تصفیه‌خانه‌های آب آشامیدنی، تغلیظ لجن فعال و جداسازی لخته‌های بیولوژیکی، جداسازی یون‌ها، ناپایدار کردن امولسیون‌های آب - روغن، حذف جامدات آلی، روغن‌های محلول و ترکیبات آلی فرار، حذف جلبک و گونه‌های باکتری استفاده شده است (Edzwald, 1995).

در این تحقیق، کارایی روش DAF برای حذف همزمان جامدات معلق، رنگ و چربی از فاضلاب یک کارخانه

استفاده از روش شناورسازی با هوای محلول برای جداسازی رنگ، چربی و مواد معلق از فاضلاب صنعتی

(ب)

آزمایش از روش طراحی آزمایش با استفاده از نرم‌افزار MINTAB استفاده شد.

همچنین برای افزایش دقت داده‌ها، یک بار تکرار برای تمام آزمایش‌ها لحاظ گردید. در جدول ۱ متغیرهای مورد بررسی، مقادیر و سطوح مورد بررسی آمده است.

جدول ۱. متغیرهای مورد بررسی، تعداد سطوح و مقادیر آنها

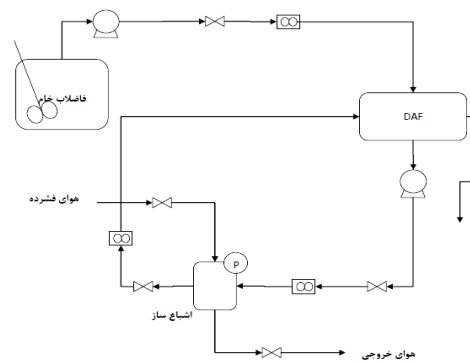
ردیف	فاکتورها (پارامترهای تأثیرگذار)	تعداد سطح	مقادیر سطح
۱	فشار اشباع‌ساز (اتمسفر)	۳	۵، ۳، ۴
۲	دبی آب اشباع ورودی (لیتر بر دقیقه)	۲	۲، ۴
۳	زمان ماند ناحیه جدایی (ثانیه)	۲	۵، ۴، ۲

### ۳- نتایج

آنالیز اولیه فاضلاب مورد مطالعه نشان داد که میزان اولیه جامدات معلق، روغن و رنگ در فاضلاب خام به ترتیب ۱/۰۰۸، ۳/۰ و ۴/۰ گرم بر لیتر است. بنابراین به دلیل میزان بالای آلاینده‌ها، فاضلاب تا ۲۰ بار رقیق شده و در آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت.

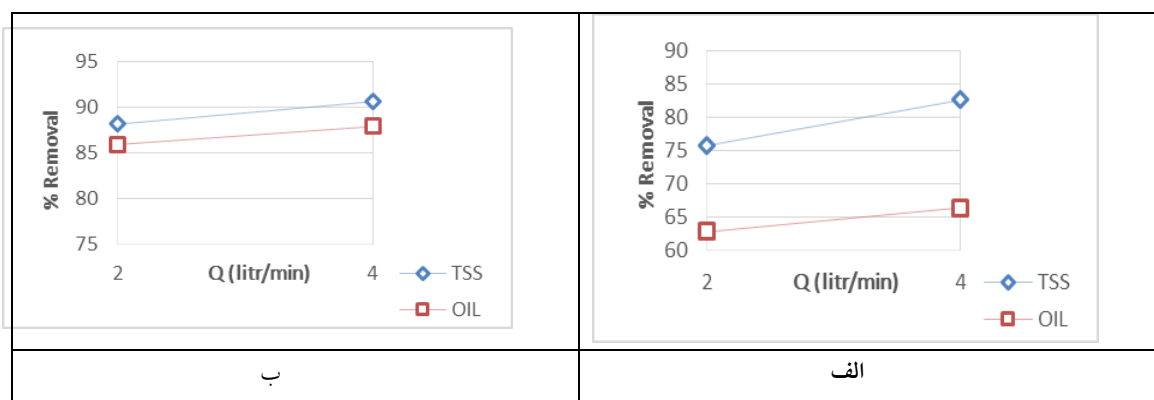
در شکل‌های ۲ تا ۴ به ترتیب نتایج آزمایش‌های بر اساس تأثیر متغیرهای فشار اشباع‌ساز، دبی آب اشباع‌ساز و زمان ماند فرآیند بر میزان حذف جامدات معلق و چربی ارائه شده است.

بر طبق نتایج کمترین میزان حذف برای شاخص‌های جامدات معلق و چربی به ترتیب برابر ۷۵/۷۴٪ و ۶۲/۸۱٪ در فشار ۳ اتمسفر، دبی آب اشباع ۲ لیتر بر دقیقه و زمان ماند ۶۰ ثانیه به دست آمد. همچنین بیشترین میزان حذف در فشار ۵ اتمسفر و دبی آب اشباع ۴ لیتر بر دقیقه و زمان ماند ۱۲۰ ثانیه به دست آمد که برای شاخص‌های جامدات معلق و چربی به ترتیب برابر ۹۰/۵۴٪ و ۸۷/۸۶٪ بود.

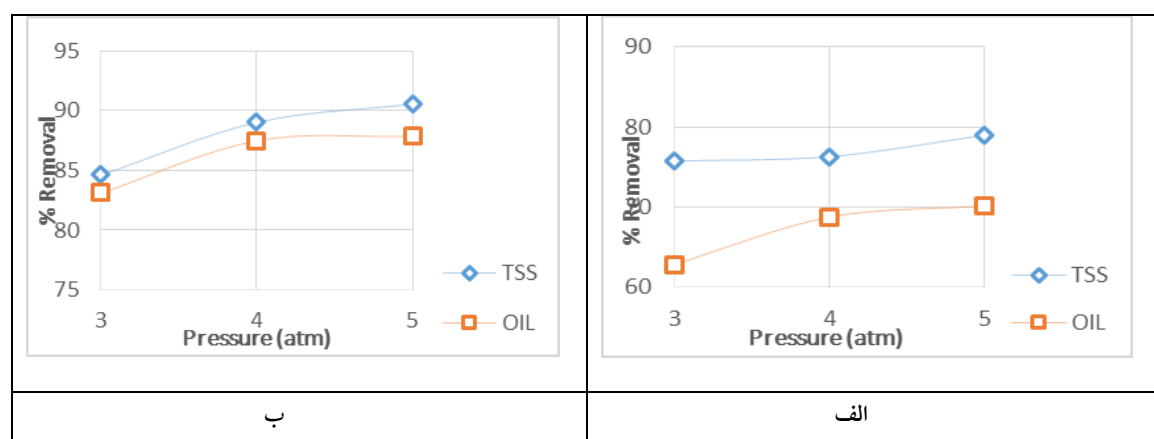


شکل ۱. سیستم تصفیه شناورسازی با هوای محلول (الف) نمودار جریان فرآیند (ب) تصویر پایلوت مورد استفاده

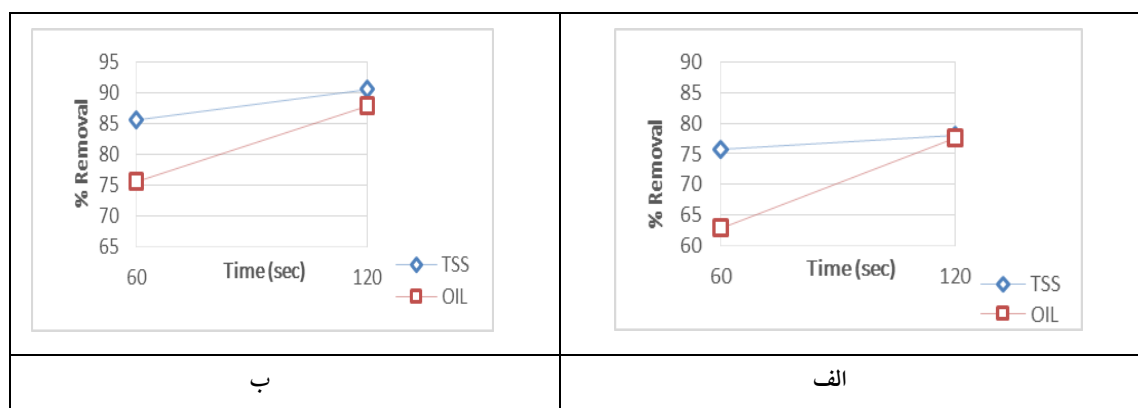
روش کار در این تحقیق بدین صورت بود که ابتدا آب در تانک اشباع‌ساز تحت فشارهای ۳، ۴ و ۵ اتمسفر قرار گرفت، سپس به مدت ۴ ساعت فرصت داده شد تا هوا به طور کامل در آب حل شود. از طرفی فرآیند انعقاد در مخزن پساب، بر روی نمونه اولیه فاضلاب انجام گرفت. در ادامه، آب تحت فشار قرار گرفته با ایجاد افت فشار ناگهانی از طریق عبور از یک شیر فشارشکن وارد مخزن شناورسازی شده و در زمان‌های شناورسازی ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه و در دبی آب اشباع ۲ و ۴ لیتر بر دقیقه، عمل شناورسازی بر روی فاضلاب انجام گرفت. پس از انجام آزمایش‌ها مقدار حذف شاخص‌های رنگ، مواد معلق و چربی بر اساس روش‌های استاندارد برای آزمایش‌های آب و فاضلاب تعیین گردیدند. اندازه‌گیری چربی به روش سوکسله و توسط استخراج با حلال نرمال هگزان به مدت ۸ ساعت انجام گرفت و برای اندازه‌گیری مقادیر جامدات معلق از آون در دمای ۱۰۵ درجه سانتی‌گراد استفاده شد. همچنین از آزمایش جار جهت تعیین مقدار بهینه ماده منعقدکننده آلوم استفاده شد (APHA, AWWA and WPCF, 1999). در این پژوهش به منظور بررسی دقیق‌تر پارامترها و بهینه‌سازی شرایط



شکل ۳. نمودارهای میزان حذف جامدات و چربی در دبی‌های مختلف الف) فشار ۳ اتمسفر و زمان ۶۰ ثانیه  
ب) فشار ۵ اتمسفر و زمان ۱۲۰ ثانیه



شکل ۴. نمودارهای میزان حذف جامدات و چربی در فشارهای مختلف اشباع‌ساز الف) دبی آب اشباع ۲ لیتر بر دقیقه و زمان ۶۰ ثانیه  
ب) دبی آب اشباع ۴ لیتر بر دقیقه و زمان ۱۲۰ ثانیه



شکل ۵. نمودارهای میزان حذف جامدات و چربی در زمان ماندهای مختلف الف) در فشار ۳ اتمسفر و دبی آب اشباع  
۲ لیتر بر دقیقه ب) در فشار ۵ اتمسفر و دبی آب اشباع ۴ لیتر بر دقیقه

میزان حذف در دبی آب اشباع بالاتر، افزایش مقدار حباب‌ها بوده و همان‌طور که گفته شد با افزایش حباب‌ها به‌علت بیشتر شدن تعداد برخوردها میان حباب‌ها و ذرات آلاینده و نهایتاً افزایش تعداد توده‌های لخته شناور، بازده جداسازی افزایش می‌یابد.

نتایج حاصل از تغییرات بازده بر اساس زمان ماند فرآیند در شکل ۴ آورده شده است. این آزمایش‌ها در دو دبی ۲ و ۴ لیتر بر دقیقه و در فشارهای ۳، ۴ و ۵ اتمسفر انجام شده است. طبق پیش‌آزمایش‌های انجام‌شده برای تعیین زمان ماند، در زمان‌های کمتر از ۶۰ ثانیه شناورسازی به‌طور کامل انجام نگردید بنابراین بر اساس نتایج تحقیقات گذشته زمان ماند بیشتر تا حدود ۱۲۰ ثانیه برای جداسازی در نظر گرفته شد. همان‌طور که شکل ۴ نشان می‌دهد با افزایش زمان از ۶۰ به ۱۲۰ بازده افزایش می‌یابد. لازم به‌ذکر است در این پژوهش با انجام پیش‌آزمایش‌هایی با زمان ماند ۱۸۰ و ۲۴۰ ثانیه شاهد کاهش بازده به‌ویژه در مورد پارامتر جامدات بودیم که دلیل آن گسسته‌شدن توده‌های لخته از حباب‌ها در سطح پساب و بازگشت آلاینده‌ها به داخل پساب بود. بنابراین زمان‌های ۶۰ و ۱۲۰ ثانیه به‌عنوان زمان‌های آزمایش انتخاب گردیدند. در تمامی آزمایش‌ها میزان حذف چربی به مراتب کمتر از جامدات معلق است ولی چنانچه زمان کافی به فرآیند داده شود، میزان حذف هر دو آلاینده به هم نزدیک می‌گردد. دلیل اصلی این امر دادن فرصت لازم به توده‌های لخته-حباب چربی برای شناورسازی است. در این تحقیق رنگ فاضلاب به‌دلیل دارا بودن ساختار پیچیده ملانوییدی، توسط روش شناورسازی با هوای محلول، حذف چندانی نداشت. با استفاده از نتایج بهینه‌سازی با استفاده از جارتست میزان دز بهینه برای آلوم ۵ گرم بر لیتر به‌دست آمد که در این دز نیز حذف رنگ از فاضلاب مشاهده نشد. البته در مقادیر بیشتر از ۱۲

همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد با افزایش فشار روند حذف پارامترهای جامدات و چربی افزایش یافته و دلیل آن افزایش حلالیت گاز در فشارهای بالا و در نهایت افزایش تعداد و کاهش اندازه حباب‌ها است که منجر به افزایش بازده می‌شود. عوامل متعددی در بازده سیستم DAF تأثیر دارند که از بین آنها می‌توان به سرعت بالاروندگی حباب‌ها و تعداد حباب‌ها اشاره کرد. در حالت کلی نرخ انتقال جرم در این سیستم‌ها بر اساس ضریب انتقال جرم مایع بیان می‌شود و مقاومت انتقال جرم گاز قابل صرف‌نظر کردن است (Palaniandy et al., 2010; Haarhoff and Steinbach, 1996). فشار بر ضریب انتقال حجمی اثرگذار است و اعمال فشار است که موجب تولید حباب با قطر کمتر می‌گردد که منجر به افزایش سطح تماس می‌گردد. نقش شکل حباب‌ها در ضریب انتقال جرم مایع بسیار دارای اهمیت است. حباب‌های کوچک گرچه منجر به افزایش سطح ویژه می‌گردد، اما ممکن است فشارهای بالا موجب به هم‌آمیختگی این حباب‌ها گردد که نتیجه این پدیده کاهش سطح ویژه حباب‌ها است. بنابراین افزایش فشار پارامتری است که هم می‌تواند تأثیر مثبت داشته باشد هم تأثیر منفی. طبق مطالعات انجام‌شده، فشار در سیستم‌های DAF در بازه ۳-۵ بار و بعضاً ۶ بار، متغیر است، چرا که فشارهای بیشتر از ۶ بار ممکن است موجب پدیده به‌هم‌آمیختگی حباب‌ها شود و فشارهای کمتر از ۳ بار نیز بازده کافی برای عملیات جداسازی را ندارد (Schumpe and Deckwer, 1987). دبی آب اشباع یکی دیگر از پارامترهای مؤثر بر بازده حذف در سیستم‌های شناورسازی با هوای محلول است. شکل ۳ تأثیر دبی آب اشباع را بر بازده حذف نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با افزایش دبی آب اشباع میزان حذف پارامترهای جامدات و چربی‌ها افزایش یافته و این نتیجه کاملاً مورد انتظار است. دلیل افزایش

ترتیب برابر ۹۰/۵۴٪ و ۸۷/۸۶٪ بود. در بهینه برای آلوم ۵ گرم بر لیتر به دست آمد. با افزایش فشار از ۳ تا ۵ اتمسفر در اشباع ساز درصد حذف پارامترها افزایش یافت. همچنین با افزایش دبی آب اشباع و زمان ماند بازده حذف هر دو پارامتر چربی و جامدات افزایش یافت. نمودار حاصل از آنالیز واریانس برای اثر پارامترها موید نتایج مشاهده شده بود مضاف بر اینکه نتایج نشان داد کلیه پارامترها به صورت متقابل در حذف ذرات معلق از فاضلاب تاثیر گذار هستند.

#### ۵- پی نوشتها

##### 1. Dissolved Air Flotation (DAF)

#### ۶- منابع

- سادات اسمعیل نژاد، ش.، کاه فروشان، د.، فاتحی فر، ا.، "امکان سنجی حذف ترکیبات آلی فرار از پساب با روش شناورسازی با هوای محلول"، پژوهش های محیط زیست.

- AL-Shamrani, A - James, A - H. Xiao (2002) "Separation of oil from water by dissolved air flotation", *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 209 (1), pp.15-26.

- Arnold, S.R - Grubb, T.P - Harvey, P.J (1995) "Recent applications of dissolved air flotation pilot studies and full scale design", *Water Science and Technology*, 31(3), pp. 327-340.

- APHA, AWWA, WPCF (1999). "Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater", 20th Edition. USA: American Public Health Association.

- Crossley, I., Valade, M (2006) "A review of the technological developments of dissolved air flotation" *Journal of Water Supply: Research and Technology- AQUA*, 55(7-8), p p. 479-491.

- Edzwald, J.K (1995) "Principles and applications of dissolved air flotation", *Water Science and Technology*, 31(3), pp.1-23.

گرم بر لیتر آلوم، میزان ۲۵٪ حذف رنگ مشاهده شد که استفاده این مقدار منعقدکننده نمی تواند توجیه اقتصادی داشته باشد.

در جدول های ۲ و ۳ نتایج آنالیز واریانس برای بررسی تاثیر تکی و متقابل متغیرهای مورد بررسی، به ترتیب بر میزان حذف جامدات معلق و رنگ آمده است. بر طبق آنالیز واریانس اگر مقادیر  $P$  در محاسبات واریانس از عدد ۰/۰۵ کوچک تر باشد بدین معنی است که پارامتر عامل مؤثر بر پاسخ خواهد بود که بالا بودن میزان  $F$  مقدار این تاثیر را نشان می دهد (Montgomery, 1998). بر طبق این نتایج در حذف جامدات ترتیب اثرگذاری بر اساس اهمیت عبارتند از: دبی آب اشباع، زمان، فشار اشباع ساز. در مورد تاثیرات متقابل، تاثیر متقابل فشار و زمان، دبی آب اشباع و زمان و فشار و دبی آب اشباع به ترتیب اهمیت دارند. به همین ترتیب در بازده حذف چربی ها ترتیب اثرگذاری پارامترها عبارتند از: زمان، فشار و دبی آب اشباع. لازم به ذکر است برای بازده حذف چربی ها تاثیر متقابل پارامترهای دبی آب اشباع و زمان، تاثیر متقابل فشار و زمان و تاثیر متقابل دبی آب اشباع و فشار بسیار کم بوده و دلیل آن بالاتر بودن ضرایب  $P$  آنها از مقدار ۰/۰۵ است.

#### ۴- نتیجه گیری

در این تحقیق روش شناورسازی با هوای محلول در کنار فرآیند متداول انعقاد و لخته سازی با آلوم برای حذف همزمان ذرات معلق و چربی از یک نمونه فاضلاب کارخانه خمیر مایه انجام گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش پارامترهای فشار، زمان و دبی آب اشباع، بازده حذف شاخص های مورد بررسی، افزایش می یابد. مقادیر حذف در بیشترین میزان حذف در فشار ۵ اتمسفر و دبی آب اشباع ۴ لیتر بر دقیقه و زمان ماند ۱۲۰ ثانیه به دست آمد که برای شاخص های جامدات معلق و چربی به

- Palaniandy, P - Adlan, M.N- Aziz, H.A - Murshed, M.F. (2010) "Application of dissolved air flotation (DAF) in semi-aerobic leachate treatment", Chemical Engineering Journal, 157(2), pp. 316-322.
- Rubio, J -Souz, M. - Smith, R (2002) "Overview of flotation as a wastewater treatment technique", Minerals Engineering, 15(3), pp. 139-155
- Schumpe, A – Deckwer, W.D (1987) "Organic liquids in a bubble column: holdups and mass transfer coefficients", AIChE Journal, 33(9), pp. 1473-1480.
- Edzwald, J.K (2010) "Dissolved air flotation and me", Water research, 44(7), pp. 2077-2106.
- Fris, L - Gallina, C.W. R.T. Rodrigues - Rubio, J (2001) "Optimizing dissolved air flotation design and saturation", Water Science & Technology, 43(8), pp.145-157.
- Haarhoff, J – Steinbach, S (1996) "A model for the prediction of the air composition in pressure saturators", Water Research, 30 (12), pp. 3074-3082.
- Montgomery, D. (1998) "Design and analysis of experiments", 5th Edition. USA: Jhon wiley, NewYork.

