

## بررسی کارایی فرایند شناورسازی با هوای محلول در حذف آنیلین از محیط‌های آبی

شهین احمدی<sup>۱</sup>، فردوس کردمصطفی پور<sup>۲</sup>، ادریس بذرافشان<sup>۳</sup>، زهراکاشی تراش اصفهانی<sup>۴</sup>، عطاله رخس خورشید<sup>۵</sup>

۱- عضو هیئت علمی گروه بهداشت محیط، دانشگاه علوم پزشکی زابل

۲- دانشیار، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زاهدان

(نویسنده مسئول) Ferdos\_66@yahoo.com

۳- استاد، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زاهدان

۴- دکترای تخصصی مهندسی محیط زیست، آب و فاضلاب

دانشکده مهندسی عمران، آب و محیط زیست، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

۵- مربی، دانشکده بهداشت، دانشگاه علوم پزشکی زاهدان

(دریافت ۹۴/۶/۹ پذیرش ۹۵/۲/۲۸)

### چکیده

آنیلین به‌عنوان یک ترکیب سخت تجزیه‌پذیر در پساب بسیاری از صنایع وجود دارد. هدف از انجام این مطالعه تعیین کارایی فرایند شناورسازی با هوای محلول در حذف آنیلین از محیط‌های آبی بود. در این مطالعه کاربردی-تجربی از پایلوت شناورسازی با هوای محلول در مقیاس آزمایشگاهی استفاده شد. پس از تعیین شرایط بهینه pH و دز پلی‌آلومینیوم کلراید توسط آزمایش جار، تأثیر پارامترهای مؤثر در فرایند شناورسازی با هوای محلول، شامل غلظت ماده منعقدکننده (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ میلی‌گرم در لیتر)، زمان لخته‌سازی (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ دقیقه)، زمان شناورسازی (۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ ثانیه)، فشار اشباع (۳/۳، ۴ و ۵/۵ اتمسفر) و کدورت (۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۶۰ NTU) بر میزان کاهش پارامترهای COD و آنیلین محاسبه شد. نتایج نشان داد که فرایند شناورسازی با هوای محلول می‌تواند پارامترهای COD و آنیلین را به ترتیب به میزان ۸۶/۶ درصد و ۹۵ درصد در pH برابر ۶، غلظت اولیه آنیلین معادل ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان لخته‌سازی ۱۰ دقیقه، زمان شناورسازی ۲۰ ثانیه، فشار اشباع ۴ اتمسفر و غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر PAC کاهش دهد. همچنین نتایج حاکی از آن بود که با افزایش کدورت در فرایند شناورسازی، راندمان حذف کاهش می‌یابد. با توجه به نتایج به‌دست آمده از این تحقیق می‌توان بیان داشت که فرایند شناورسازی با هوای محلول می‌تواند روش مؤثری برای حذف آنیلین از محیط‌های آبی باشد.

**واژه‌های کلیدی:** شناورسازی با هوای محلول، محیط‌های آبی، آنیلین، حذف

### ۱- مقدمه

در زمان رها شدن در محیط‌های آبی در چرخه زندگی گونه‌های آبی تداخل ایجاد کرده و باعث به وجود آمدن تومورهای سرطانی در حیوانات شده و خطر سرطان مثانه را در انسان افزایش می‌دهد، همچنین در خون به سادگی واکنش داده و هموگلوبین را به متهموگلوبین تبدیل کرده و مانع جذب اکسیژن و بروز بیماری متهموگلوبینا می‌شود (Kakavandi 2013; Han et al. 2005). مطابق توصیه سازمان حفاظت محیط زیست امریکا<sup>۱</sup> حد مجاز آلاینده آنیلین در آب‌های زیرزمینی برابر ۶ میلی‌گرم در لیتر ذکر شده است (Han et al. 2006). لذا حذف آنیلین از محلول‌های آبی ضروری به نظر می‌رسد. فرایندهای متداول تصفیه پساب‌های حاوی آنیلین شامل روش‌های فیزیکی: جذب با کربن فعال،

آنیلین یا آمینوبنزن یک ترکیب ساده آروماتیک، مایعی روغنی بی‌رنگ و آتش‌زا و دارای حلقه بنزنی با یک پیوند  $\text{NH}_2$  می‌باشد و مانند بسیاری از آمین‌های فرار بوی نامطلوبی مشابه ماهی فاسد شده دارد (Rappoport 2007). آمین‌های آروماتیک به‌عنوان یکی از ترکیبات آلی با اهمیت، به‌عنوان آلاینده‌های سمی آب شناخته شده‌اند (Han et al. 2005). آنیلین و مشتقات آن از جمله ترکیبات صنایع کارخانجات رنگ، لاستیک، تولید دارو، پلاستیک‌سازی و آفت‌کش‌ها بوده و به‌عنوان حلال در تولید رنگ و مواد منفجره نیز کاربرد دارد (Wu al. 2012). آنیلین به‌میزان ۳/۵ درصد در آب محلول بوده و این میزان حلالیت، احتمال حضور آلودگی آن را در چنین منابعی افزایش می‌دهد (Kakavandi et al. 2013). آنیلین

<sup>1</sup> US. Environmental Protection Agency (USEPA)

در پژوهش انجام شده در سال ۲۰۰۱ در کشور برزیل، آب خام دارای کدورت پایین و رنگ بالا توسط شناورسازی با هوای محلول مورد تصفیه قرار گرفت و راندمان حذف بیش از ۹۰ درصد برای رنگ، ۸۸ درصد برای کدورت و ۹۴ درصد برای TSS به دست آمد (Real & Cind Marchetto 2001). در مطالعه‌ای در سال ۲۰۰۲ حذف توام کادمیم و کدورت با استفاده از فرایند شناورسازی با هوای محلول مورد بررسی قرار گرفت که حداکثر راندمان حذف به ترتیب برابر ۸۰ و ۱۹ درصد حاصل شد (Park et al. 2002). مطالعات نشان داده که فرایند DAF یک روش فیزیکی مؤثر با کارایی بالای ۹۸ درصد در حذف ترکیبات آلی از آب‌های آلوده است (Vakili 1997). از جمله مزایای این فرایند شروع به کار سریع، حذف بیشتر جامدات، کاهش استفاده از مواد منعقدکننده و اغلب عدم نیاز به پلیمر کمکی، تحمل نسبی تغییرات هیدرولیکی، کنترل خوب بر فرایند جداسازی و مقدار بالای بار سطحی در واحدهای کوچک است که مورد توجه محققان قرار گرفته است. در این مطالعه عملکرد شناورسازی با هوای محلول بر حذف همزمان آنیلین و COD ناشی از آنیلین از محلول‌های آبی و تعیین اثر پارامترهای pH، مقدار منعقدکننده، فشار اشباع سازی، زمان لخته‌سازی و زمان شناورسازی و کدورت مورد بررسی قرار گرفت.

## ۲- مواد و روش‌ها

این پژوهش از نوع تجربی-کابردی است که در آن عملکرد فرایند شناورسازی با هوای محلول در حذف آنیلین از محلول‌های آبی در مقیاس آزمایشگاهی، در دانشکده بهداشت دانشگاه علوم پزشکی زاهدان مورد مطالعه قرار گرفته است.

## ۲-۱- مواد

کلیه مواد شیمیایی مورد نیاز در این مطالعه، شامل پلی آلومینیوم کلراید با فرمول مولکولی  $Al_n(OH)_m Cl_{3n-m}$ ، اسیدکلریدریک (HCL خلوص ۳۰-۳۳ درصد)، هیدروکسید سدیم (NaOH) و آنیلین از شرکت مرک<sup>۵</sup> آلمان تهیه شد.

اسمز معکوس<sup>۱</sup>، میکروفیلتراسیون<sup>۲</sup>، الترافیلتراسیون<sup>۳</sup>، تکنولوژی‌های غشایی و روش‌های شیمیایی: فرایند انعقاد و الکتروفتون و روش‌های تجزیه بیولوژیکی می‌باشند که معمولاً حذف کامل آنیلین و مشتقات آن با برخی از این فرایندها مشکل و یا غیرممکن است (Kakavandi et al. 2013; Han et al. 2006; Gomez et al. 2009; Goncharuk et al. 2002; Pithan & Lichtenthaler 2002; Xiao et al. 2009; Kiurau 2001; Kord Mostafapour & Kamani 2010)

یکی از روش‌های تصفیه در سال‌های اخیر فرایند شناورسازی با هوای محلول<sup>۴</sup> می‌باشد. شناورسازی با هوای محلول یک روش تصفیه فیزیکی است که برای جداسازی ذرات جامد یا مایع از یک 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 شناوری مجموعه ذره و حباب‌های گاز به قدری زیاد است که سبب صعود ذره به سطح می‌شود؛ به این ترتیب می‌توان ذراتی را که چگالی آنها از مایع بیشتر است، به صعود به سطح واداشت. در این روش، ذراتی که بسیار کوچک و یا سبک هستند و به آرامی ته‌نشین می‌شوند را می‌توان کامل‌تر و در زمان کوتاه‌تر حذف کرد. سابقه کاربرد این فرایند در تصفیه آب به دهه ۱۹۲۰ برمی‌گردد (Kord Mastafapour & Kamani 2010) مکانیسم شناورسازی از طریق رهاسازی حباب‌های هوا در تانک شناورسازی از طریق انحلال هوا در آب خام با استفاده از فشار و سپس پایین آوردن فشار به دلیل مواجهه آن با هوای اتمسفر صورت می‌پذیرد. به دلیل کاربرد مقادیر بالای فشار، حباب‌های کوچکی به قطر حدود ۴۰ میکرون (در گستره ۱ تا ۱۰۰ میکرون) تولید می‌شود. در حال حاضر فرایند شناورسازی با هوای محلول در تصفیه آب آشامیدنی به‌طور موفقیت آمیزی در ترکیب با فرایند لخته‌سازی به‌منظور حذف جلبک‌ها و مواد هیومیکی و غلظت بالای رنگ و کدورت پایین و به‌طور گسترده جهت جداسازی مواد معلق، روغن چربی و ترکیبات آلی فرار مورد استفاده قرار گرفته است (Adames & Josef 1999; Sena et al. 2009)

<sup>1</sup> Reverse Osmosis (RO)

<sup>2</sup> Microfiltration (MF)

<sup>3</sup> Ultrafiltration (UF)

<sup>4</sup> Dissolved Air Flotation (DAF)

<sup>5</sup>Merck

تقریبی ۲/۵ لیتر، ۵- شیر نمونه برداری، ۶- شلنگ هوا، ۷- شلنگ خروجی از مخزن اشباع سازی به استوانه، ۸- میز کار

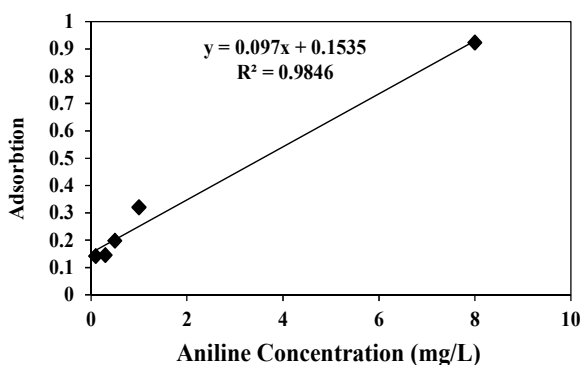


Fig. 2. Calibration curve for standard concentrations of Aniline based on adsorption ratios

شکل ۲- منحنی کالیبراسیون غلظت‌های استاندارد آنیلین بر اساس میزان جذب

برای تنظیم pH از اسیدکلریدریک و هیدروکسید سدیم ۰/۰۱ نرمال استفاده شد. برای تنظیم سوسپانسیون کدورت با استفاده از پودر کائولین به روش اسمیت<sup>۱</sup> و کوهن<sup>۲</sup> تهیه شد (Adames & Josef 1999; Park et al. 2002) به منظور تعیین شرایط بهینه واکنش و بررسی تأثیر عوامل مختلف بر میزان کارایی فرایند شناورسازی در حذف آنیلین، آزمایش‌ها در مقدار مختلف pH (۲، ۴، ۶، ۸)، مقدار پلی آلومینیوم کلراید (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰)، غلظت‌های متفاوت آنیلین (۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰، ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر)، زمان لخته‌سازی (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ دقیقه)، زمان شناورسازی (۵، ۱۰، ۱۵، ۲۰ ثانیه)، فشار اشباع (۳/۵، ۴، ۴/۵، ۵ اتمسفر) و کدورت (۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۶۰ NTU) انجام پذیرفت. سپس از جار با شرایط لخته‌سازی ۳۸۰ دور در دقیقه به مدت ۲ دقیقه و ۳۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه استفاده شد. غلظت آلاینده آنیلین ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر (COD اولیه برابر ۵۰/۲۹ میلی‌گرم در لیتر) در نظر گرفته شد. سپس عمل لخته‌سازی در قسمت ستون به صورتی که ابتدا ۳۸۰ دور در دقیقه به مدت ۲ دقیقه و سپس ۳۰ دور در دقیقه به مدت ۲۰ دقیقه اختلاط صورت گیرد، به انجام رسید. با استفاده از آب مقطر اشباع شده از هوا در فشار ۳/۵ اتمسفر در داخل مخزن تحت فشار،

به منظور انجام آزمایش‌ها، پایلوت مورد نظر برای فرایند شناورسازی با هوای محلول در حذف آلاینده آنیلین مطابق شکل ۱ طراحی شد.

## ۲-۲- روش انجام آزمایش‌ها

آنیلین ساخت شرکت مرک آلمان برای تهیه غلظت‌های مورد نیاز با آب مقطر (با هدایت الکتریکی ۰/۹ میکروزیمنس بر سانتی‌متر pH=۷) تهیه شد. ابتدا محلول استوک با غلظت ۱۰۰۰ میلی‌گرم در لیتر آنیلین (درصد خلوص ۹۹ درصد) در آب مقطر تهیه و سپس منحنی استاندارد آنیلین رسم شد. با به دست آوردن میزان جذب و استفاده از رگرسیون خطی به دست آمده ( $y = 0.097x + 0.1535$ ) در منحنی کالیبراسیون مطابق شکل ۲، میزان آنیلین باقیمانده بر حسب میلی‌گرم در لیتر با استفاده از دستگاه اسپکتروفتومتری SPECTROMETER\_T80 مدل ۷۵۲ ساخت ژاپن در طول موج حداکثر ۱۹۹ نانومتر تعیین شد. شکل ۲ منحنی کالیبراسیون آنیلین را بر حسب میزان جذب را نشان می‌دهد.

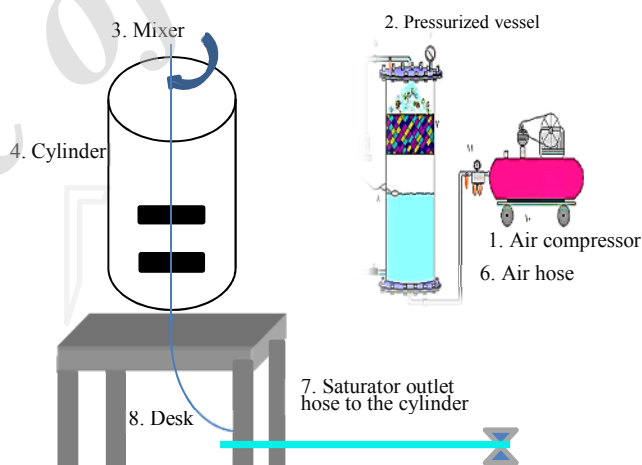


Fig. 1. Dissolved air flotation pilot unit

شکل ۱- پایلوت شناورسازی با هوای محلول

مشخصات پایلوت DAF مورد استفاده در این تحقیق به صورت زیر است:

۱- کمپرسور هوا جهت تأمین فشار اشباع‌سازی، ۲- مخزن فلزی با قطر ۱۰ سانتی‌متری به ارتفاع ۱۷۰ سانتی‌متر تحت فشار برای اشباع سازی آب با هوا، ۳- همزن، ۴- استوانه به قطر ۶ سانتی‌متری از جنس پلکسی گلاس و به ارتفاع حدود ۸۵ سانتی‌متر و حجم

<sup>1</sup> Smith  
<sup>2</sup> Cohen

مطالعات نشان داده‌اند شرایطی از قبیل قطر لخته‌ها، ناپایداری ذرات، آبریز شدن آنها، قطر حباب‌های تشکیل شده و سرعت برخاستن حباب‌ها در روش شناورسازی با هوای محلول می‌توانند منجر به شناور شدن بهتر لخته‌ها شوند (Sena et al. 2009). مکانیسم‌هایی که در شناورسازی با هوای محلول تأثیرگذار هستند شامل ناپدید شدن لخته یا آبریز شدن لخته، مساعد شدن شرایط جهت چسبیدن حباب به لخته و همچنین رشد حباب به دلیل برخاستن حباب‌ها در تانک شناورسازی از طریق کاهش فشار هیدرواستاتیکی هستند (Adames & Josef 1999). لخته‌های مناسب برای حذف با روش شناورسازی با هوای محلول با جریان پیوسته، شامل لخته‌های نوک سوزنی با قطر ۱۰ تا ۳۰ میکرون است (Kawamura 2000).

### ۳-۱- بررسی اثر غلظت‌های مختلف PAC بر حذف آنیلین

#### در فرایند انعقاد و DAF

شکل ۳ اثر غلظت‌های مختلف PAC در pH بهینه برابر ۶ بر حذف آنیلین با غلظت اولیه ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و COD ناشی از آن با غلظت ۵۰ میلی‌گرم در لیتر در فرایندهای انعقاد و DAF را نشان می‌دهد. مطالعاتی که توسط مرکز تحقیقات آبی انگلستان انجام شد، نشان داد که استفاده از منعقدکننده‌هایی از قبیل پلی‌آلومینیوم کلراید می‌تواند حذف مؤثر رنگ، کدورت و جلبک را به دنبال داشته باشد (Edzwald et al. 1992). مطالعه انجام شده نشان می‌دهد که پلی‌آلومینیوم کلراید در pH مساوی ۶ بیشترین کارایی را دارد (Edwald et al. 1999). مشخصه دیگر PAC این است که بخشی از آن نیز شامل یون‌های هیدروکسید می‌باشد. این یون‌های هیدروکسید باعث ایجاد مجموعه‌های کوچک پلیمر از AL در PAC می‌شوند. بخش اصلی PAC را مجموعه AL+713 تشکیل می‌دهد. به دلیل تناسب بهتر بار الکتریکی به شعاع، این گونه ساختارهای پلیمری تأثیر بهتری بر بی‌ثباتی کلوئیدها دارند (Han & Dockko 2001). پلی‌آلومینیوم کلراید قدرت زیادی در حذف آلاینده‌های آلی و COD دارد. شاید دلیل این امر را بتوان این گونه توجیه نمود که این منعقدکننده بعد از هیدرولیز شدن در آب بار مثبت زیادی تولید می‌کند، بنابراین انتظار می‌رود در خنثی‌سازی بار منفی ذرات کلوئیدی و مواد آلی موجود در آب مؤثر باشد.

شناورسازی به مدت ۲۰ ثانیه انجام پذیرفت. آب اشباع شده با هوا از قسمت پایین وارد استوانه شد. ورود آب اشباع‌سازی شده به مخزن شناورسازی، تولید حباب‌های بسیار کوچکی می‌نماید که حین صعود به سطح آب، به ذرات لخته متصل شده و باعث شناور شدن آن‌ها می‌شوند. پس از عمل شناورسازی، شیر سوزنی بسته شد و نمونه‌ها از ارتفاع ۳/۵ سانتی‌متری کف استوانه از طریق شیر نمونه‌برداری، تهیه شد. سپس با تغییر متغیرهای زمان لخته‌سازی، زمان شناورسازی و فشار اشباع‌سازی، راندمان حذف پارامترهای مورد نظر در مطالعه (COD و غلظت باقیمانده آنیلین) تحت این شرایط تعیین مقدار شد. در انتها بر اساس هدف مطالعه، تأثیر کدورت‌های مختلف در این فرایند مورد بررسی قرار گرفت. به منظور سنجش کدورت از کدورت‌سنج مدل wt.w.TURB355.IR ساخت آمریکا و سنجش pH با دستگاه pH متر MIT65 ساخت ایران و هضم نمونه‌ها برای قرائت COD با استفاده از دستگاه DR5000 مدل هج<sup>۱</sup> آلمان، آنالیز COD در طول موج ۶۰۰ نانومتر از روش 5220D کتاب استاندارد آزمایش‌های آب و فاضلاب و غلظت باقیمانده آنیلین با دستگاه اسپکتروفتومتری T80 مدل 752 ساخت ژاپن در طول موج حداکثر ۱۹۹ نانومتر قرائت شد (APHA 1993). پس از انجام آزمایش‌ها و به دست آمدن نتایج، میزان حذف پارامترهای COD و آنیلین از طریق رابطه زیر محاسبه شد و از نرم‌افزار اکسل<sup>۲</sup> برای تجزیه و تحلیل داده‌ها استفاده شد

$$(1) \quad \text{درصد حذف} = \frac{(C_i - C_f)}{C_i} \times 100$$

که در آن

$C_i$  غلظت اولیه بر حسب میلی‌گرم در لیتر و  $C_f$  غلظت نهایی بر حسب میلی‌گرم در لیتر است.

### ۳- نتایج و بحث

نتایج حاصل از مطالعه عملکرد شناورسازی با هوای محلول بر حذف آنیلین از محلول‌های آبی و تعیین اثر پارامترهای مقدار ماده منعقدکننده، فشار اشباع‌سازی، زمان لخته‌سازی و زمان شناورسازی و کدورت در شکل‌های ۳ تا ۸ ارائه شده است.

<sup>1</sup> Hach

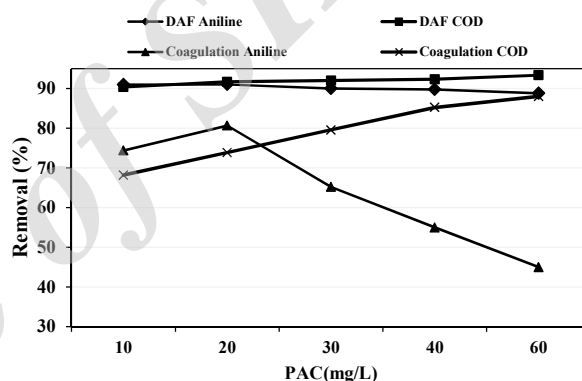
<sup>2</sup> Excel

محلول نسبت به لخته‌های بزرگ حذف می‌شوند و نیازمند تولید لخته‌های متخلخل و غیرمترکم هستند. این ویژگی باعث کاهش چگالی لخته‌ها می‌شود و در نتیجه شناور شدن آنها را تسهیل می‌کند (Adames & Josef 1999). در تحقیق دیگری نشان داده شد بر خلاف واحدهای ته‌نشینی که اغلب به افزایش دز منعقد کننده نیاز دارند، برای شناورسازی با هوای محلول این امر ضرورت ندارد (Kawamura 2000). در کل سیستم شناورسازی با هوای محلول نسبت به ته‌نشینی نیازمند دز مصرفی کمتر ماده منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید است.

### ۳-۲- بررسی اثر غلظت‌های اولیه آنیلین بر حذف آنیلین در فرایند DAF

افزایش غلظت اولیه آنیلین، باعث افزایش حذف آن مطابق شکل ۴ شده است. در سیستم DAF با افزایش غلظت آنیلین از مقدار ۵۰ تا ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، بیشترین راندمان حذف در غلظت ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر و COD ناشی از آن در این غلظت با ۱۷۹ میلی‌گرم در لیتر به ترتیب برابر ۹۴/۵ درصد و ۸۳/۱۵ درصد به دست آمد. در روش شناورسازی با هوای محلول بیشتر، حذف موادی با چگالی کمتر و یا نزدیک به چگالی آب، مد نظر قرار می‌گیرد. اغلب مواد آلی قابل تجزیه بیولوژیکی و مواد قابل تجزیه شیمیایی چگالی کمتری از آب داشته و لذا تغییرات مطلوبی در حذف آنها دیده می‌شود. تغییرات درصد حذف آنیلین در آب ناشی از تغییرات شرایط لخته از نظر اندازه، پایداری و اثر متقابل بارالکتریکی بین حباب و لخته است. به منظور شناورسازی مطلوب، دو شرط خنثی‌سازی بار ذره و تولید ذرات هیدروفوبیک لازم است. یعنی افزایش غلظت می‌تواند شرایط مساعدی را برای تشکیل کمپلکس لخته حباب نماید که باعث بهتر شناور شدن آنیلین شود. با افزایش غلظت آنیلین میزان باقیمانده آنیلین در آب کمتر می‌شود، به این معنی که افزایش غلظت سبب بهبود شرایط حذف آنیلین می‌شود. دلیل این امر شاید آن باشد که خود یون آنیلین درگیر در چسبیدن لخته حباب شده و پایداری این چسبندگی را موجب می‌شود. پایداری ما بین ذرات و حباب می‌تواند تحت تأثیر اثر متقابل بارالکتریکی حباب-ذره و اثر هیدروفیلک به دلیل آب پیوندی موجود در سطح ذرات باشد (Kord Mostafapour & Kamani 2010; Adames Josef 1999)

طبق شکل افزایش غلظت منعقد کننده باعث افزایش قدرت انعقاد و حذف بیشتر آنیلین شده است. به طوری که بیشترین راندمان حذف آنیلین در دز ۶۰ میلی‌گرم در لیتر پلی آلومینیوم کلراید به میزان ۹۳/۳۴ درصد و COD آن برابر ۸۸ درصد می‌باشد. همچنین در روش شناورسازی با هوای محلول در زمان لخته‌سازی ۱۰ دقیقه، زمان شناورسازی ۵ ثانیه و فشار ۳/۵ اتمسفر با افزایش غلظت ماده منعقد کننده راندمان حذف کاهش یافته و در غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر از این منعقد کننده، حداکثر راندمان حذف برابر ۹۱ درصد و COD آن برابر ۸۰/۶۳ درصد می‌باشد. دانسیته PAC ۰/۶۵ تا ۰/۸۵ گرم در سانتی متر مکعب است و این منعقد کننده از طریق پل‌سازی بین ذرات و فشرده نمودن لایه دوگانه الکتریکی باعث ناپایدار نمودن ذرات کلوئیدی می‌گردد، این امر منجر به بهبود

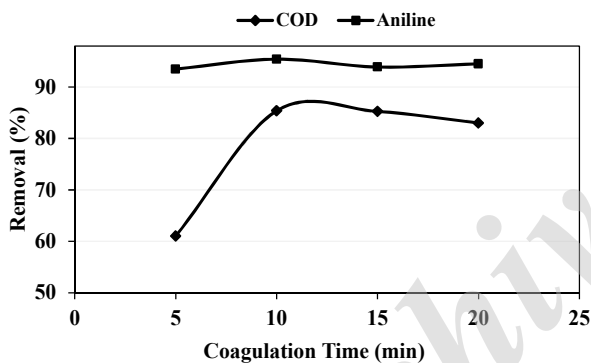


**Fig. 3.** Effect of Poly Aluminum Chloride coagulant concentration on removing Aniline and Aniline-induced COD removal using coagulation and dissolved air flotation processes (pH=6, Aniline concentration= 100 mg/L, and initial concentration of COD= 50 mg/L)

شکل ۳- اثر غلظت‌های مختلف منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید در حذف آنیلین و COD ناشی از آنیلین با استفاده از فرایندهای انعقاد و شناورسازی با هوای محلول (pH= ۶، غلظت آنیلین = ۱۰۰ میلی‌گرم در لیتر و COD اولیه ۵۰ میلی‌گرم در لیتر)

و پیشرفت عمل ناپایدارسازی می‌شود. تجمع ذره حباب با دانسیته‌های کمتر از آب (اگر بر سانتی متر مکعب) انتظار است که شناور شوند (Adames & Joseph 1999). برخلاف ته‌نشینی که برای پیش تصفیه نیاز به ذرات به لخته درشت دارد، روش شناورسازی با هوای محلول به لخته درشت و سنگین نیاز ندارد. چون لخته‌های کوچک به خوبی به وسیله شناورسازی با هوای

شناورسازی با هوای محلول به زمان لخته‌سازی طولانی نیاز ندارد و زمان لخته‌سازی کوتاه می‌تواند برای عملکرد واحد شناورسازی با هوای محلول بهتر و قیمت سرانه کمتر باشد (Kawamura 2000). مطالعه ادوارد نشان داد که زمان لخته‌سازی به‌طور قابل ملاحظه‌ای عملکرد فرایند شناورسازی با هوای محلول را تحت تأثیر قرار نمی‌دهد و شناورسازی با هوای محلول در صورتی موفق‌آمیز خواهد بود که لخته‌های با تراکم اندک و در اصطلاح لخته‌های نوک سوزنی متخلخل در طی فرایند شکل‌گیرند. در واقع به دلیل عدم نیاز به لخته‌های بزرگ در شناورسازی زمان لخته‌سازی این روش نسبت به روش‌های ته‌نشین‌کننده کمتر است. مطالعات انجام شده نشان داد که بهترین زمان لخته‌سازی جهت این فرایند بین ۵ تا ۲۰ دقیقه می‌باشد (Karhu & Tankanen 2014). در پژوهشی در سال ۱۹۹۵ نیز نشان داده شد که زمان لخته‌سازی ۱۰ دقیقه می‌تواند بهترین کارایی در حذف را ایجاد نماید (Edzwald 1995).



**Fig. 5.** Effect of flocculation time on Aniline and its resulting COD removal using the dissolved air flotation process (pH=6, Aniline concentration = 100 mg/L, initial COD concentration = 179 mg/L, PAC=20 mg/L, flotation time = 5 sec, and saturation pressure = 3.5 atm)

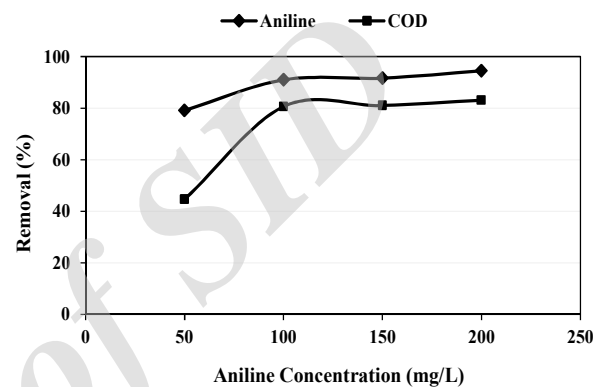
**شکل ۵-** اثر زمان‌های مختلف لخته‌سازی در حذف آنیلین و COD ناشی از آن با استفاده از فرایند شناورسازی با هوای محلول (pH=۶، غلظت آنیلین = ۱۰۰ میلی‌گرم بر لیتر و COD اولیه ۱۷۹ میلی‌گرم در لیتر غلظت PAC=۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، زمان شناورسازی ۵ ثانیه و فشار اشباع ۳/۵ اتمسفر)

**۳-۴- بررسی اثر زمان‌های مختلف شناورسازی بر حذف آنیلین در فرایند DAF**  
تأثیر زمان شناورسازی از ۵ تا ۲۰ ثانیه در شرایط غلظت بهینه

پژوهش‌های انجام شده در مورد حذف آرسنیک با روش شناورسازی با هوای محلول نشان داد که افزایش غلظت موجب افزایش حذف شده است (Adames & Josef 1999).

### ۳-۳- بررسی اثر زمان‌های مختلف لخته‌سازی بر حذف آنیلین در فرایند DAF

همانطور که در شکل ۵ نیز مشخص است تأثیر زمان لخته‌سازی در این مطالعه از ۵ تا ۲۰ دقیقه در کارایی حذف آلاینده‌ها بررسی شد.

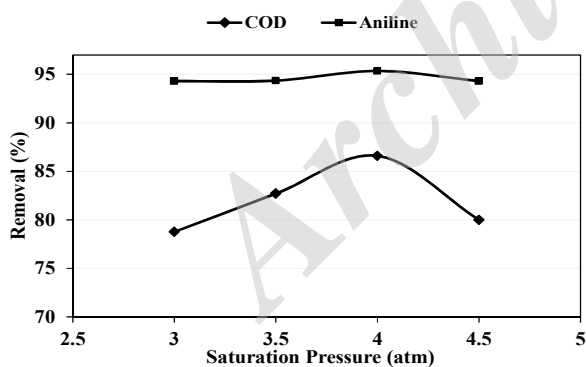


**Fig. 4.** Effect of Aniline concentration on Aniline and the resulting COD removal using the dissolved air flotation process

**شکل ۴-** اثر غلظت‌های مختلف آنیلین در حذف آنیلین و COD ناشی از آن با استفاده از فرایند شناورسازی با هوای محلول

طبق شکل در غلظت PAC برابر ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان شناورسازی ۵ ثانیه و فشار اشباع ۳/۵ اتمسفر در غلظت بهینه آنیلین ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر بیشترین راندمان حذف در زمان لخته‌سازی ۱۰ دقیقه رخ داد. به طوری که میزان حذف آلاینده‌های آنیلین و COD ناشی از آن به ترتیب برابر ۹۵/۴۱ درصد و ۸۵/۳۶ درصد می‌باشد. در ادامه با افزایش زمان ماند راندمان حذف آنیلین کاهش یافت. اثر زمان‌های مختلف لخته‌سازی در حذف آنیلین در شکل ۵ بیانگر این است که افزایش زمان لخته‌سازی از ۱۰ به ۲۰ دقیقه باعث کاهش حذف آنیلین از ۹۵/۴۱ درصد به ۹۴/۵ درصد شده است. علت را می‌توان چنین بیان داشت که با افزایش زمان لخته‌سازی، لخته‌های با قطر بزرگ‌تر ایجاد شده که قدرت شناور شدن نداشته و باعث کاهش راندمان شده‌اند. بنابراین روش

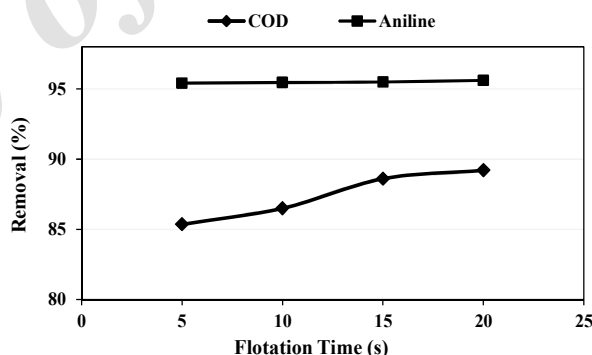
۴/۵ اتمسفر انجام گرفته، در غلظت آنیلین ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان لخته‌سازی ۱۰ دقیقه و زمان شناورسازی ۲۰ ثانیه، بیشترین راندمان حذف برای آلاینده‌ها در فشار ۴ اتمسفر رخ داد. به‌طوری که حداکثر حذف آنیلین برابر ۹۵ درصد و COD ناشی از آن ۸۶/۶ درصد بود اما در ادامه با افزایش فشار اشباع تا ۴/۵ اتمسفر موجب کاهش کارایی حذف آنیلین شده است. در واقع با افزایش فشار اشباع، اندازه قطر حباب‌ها کوچک‌تر شده و در نتیجه راندمان حذف کاهش یافته است. طبق مطالعه‌ای که ادوارد با هدف اصول و کاربرد شناورسازی با هوای محلول انجام داد، مشاهده شد که فشارهای بالاتر تولید حباب‌های کوچک‌تر می‌نمایند که به‌صورت کروی تحت شرایط جریان لایه‌ای و مطابق قانون استوکس صعود می‌نمایند و بر عکس در فشارهای اشباع سازی کم، فرایند شناورسازی با هوای محلول تولید حباب با قطر بزرگ‌تر می‌نمایند، که سرعت برخاستن بالایی دارند و به‌صورت بیضوی‌اند و باعث شکسته شدن لخته‌ها می‌شود. به‌منظور اطمینان از تشکیل حباب‌های کوچک‌تر، در اندازه قطر ۱۰ تا ۱۰۰ میکرون، فشار اشباع ساز ۴ تا ۶ اتمسفر توصیه می‌شود (Malley & Edzwald 1990). شناورسازی با هوای محلول هنگامی مؤثر است که حجم حباب‌ها خیلی بیشتر از حجم ذرات باشد و این باعث جمع‌آوری مؤثر ذرات به‌وسیله حباب‌ها و پایین آوردن دانسیته لخته می‌شود. همچنین



**Fig. 7.** Effect of saturation pressures on Aniline and its resulting COD removal using the dissolved air flotation process (PAC concentration = 20 mg/L, flocculation time = 10min, and flotation time = 20 sec)

شکل ۷- اثر فشارهای اشباع‌سازی متفاوت در حذف آنیلین و COD ناشی از آن با استفاده از فرایند شناورسازی با هوای محلول (غلظت PAC=۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، زمان لخته‌سازی ۱۰ دقیقه، زمان شناور سازی ۲۰ ثانیه)

منعقدکننده ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان لخته‌سازی ۱۰ دقیقه و فشار اشباع ۳/۵ اتمسفر مورد بررسی قرار گرفت. طبق شکل ۶ بهترین زمان شناورسازی با توجه به محدوده‌های مورد نظر در زمان ۲۰ ثانیه رخ داد، اگرچه با افزایش زمان ماند، راندمان حذف آنیلین نیز افزایش می‌یابد، اما افزایش آن با شیب ملایمی است. همچنین همانطور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل نشان داد که افزایش زمان شناورسازی از ۵ ثانیه به ۲۰ ثانیه، باعث افزایش حذف در همه شاخص‌ها می‌شود و بر روند حذف همه این شاخص‌ها تأثیر مثبت داشته است و در مواقعی که زمان شناورسازی کمتر بوده است، میزان حذف آنیلین کاهش یافته است. در این مطالعه بیشترین راندمان حذف آنیلین در زمان ۲۰ ثانیه برابر ۹۵ درصد و COD ناشی از آن برابر ۸۹ درصد بود. در زمان شناورسازی طولانی‌تر، به دلیل وجود زمان کافی برای اتصال حباب به ذره و تولید حباب‌های بزرگ‌تر میزان بالا آمدن حباب- ذره بیشتر است پژوهش انجام شده در سال ۲۰۱۴ نشان داد که بیشترین راندمان حذف در زمان شناورسازی ۲۷ ثانیه بوده است (Peavy & Rowe 1985).



**Fig. 6.** Effect of flotation times on Aniline and its resulting COD removal using the dissolved air flotation process (PAC concentration = 20 mg/L, flocculation time = 10 min, and saturation pressure = 3.5 atm)

شکل ۶- اثر زمان‌های مختلف شناورسازی در حذف آنیلین و COD ناشی از آن با استفاده از فرایند شناورسازی با هوای محلول (غلظت PAC=۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، زمان لخته‌سازی ۱۰ دقیقه و فشار اشباع ۳/۵ اتمسفر)

۳-۵- بررسی اثر فشار اشباع‌سازی بر حذف آنیلین در فرایند DAF مطابق شکل ۷ و طبق آزمایش‌هایی که در فشارهای ۰.۳، ۰.۳/۵، ۰.۴

سیستم شناورسازی با هوای محلول قادر به کاهش مطلوب بسیاری از مواد موجود در آب است. در این میان مواد معلق به اندازه قابل توجهی کاهش می‌یابند و مواد محلول، در مقایسه با مواد معلق، کاهش زیادی ندارد. در مطالعه‌ای که توسط جعفرزاده و همکاران درباره کاربرد شناورسازی با هوای محلول برای پیش تصفیه آب رودخانه کارون صورت گرفت، مشخص شد که سیستم شناورسازی با هوای محلول بدون استفاده از سیستم‌های پیش‌ته‌نشینی فاقد کارایی لازم در حذف کدورت است (Malley & Edzwald 1990).

#### ۴- نتیجه‌گیری

این تحقیق نشان داد که فرایند شناورسازی با هوای محلول می‌تواند کارایی مناسبی در حذف آنیلین داشته باشد.

شرایط بهینه حاصل از این مطالعه برای پارامترهای COD ناشی از آنیلین و راندمان حذف آنیلین به ترتیب به میزان ۸۶/۶ درصد و ۹۵ درصد در pH برابر ۶، غلظت اولیه آنیلین معادل ۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان لخته سازی ۱۰ دقیقه، زمان شناورسازی ۲۰ ثانیه، فشار اشباع ۴ اتمسفر و غلظت ۲۰ میلی‌گرم در لیتر PAC می‌باشد. فرایند شناورسازی با هوای محلول تحت تأثیر پارامترهای مختلفی قرار دارند. محدوده pH بهینه برای حذف آنیلین توسط پلی‌آلومینیوم کلراید در فرایند انعقاد و شناورسازی با هوای محلول برابر ۶ در نظر گرفته شد ولی لازم است تحقیق بیشتری در رابطه با تأثیر pH محیط بر حذف آنیلین صورت گیرد. همچنین نتایج این تحقیق حاکی از آن است که فرایند شناورسازی با هوای محلول نسبت به انعقاد نیازمند دز مصرفی کمتر پلی‌آلومینیوم کلراید است و با افزایش غلظت PAC میزان حذف آنیلین در فرایند شناورسازی با هوای محلول کاهش می‌یابد.

شرایط بهینه در بهره‌برداری از سیستم شناورسازی با هوای محلول با زمان شناورسازی ۲۰ ثانیه و فشار اشباع سازی ۴ اتمسفر می‌تواند تأثیر زیادی بر حذف غلظت آنیلین در آب داشته باشد. همچنین می‌توان چنین استنباط نمود که راندمان حذف آنیلین در فرایند شناورسازی با هوای محلول مستقل از مقدار کدورت ورودی به پایلوت بوده و این فرایند قادر است، کدورت را تا مقدار مشخصی کاهش دهد. استفاده از شناورسازی با هوای محلول برای آب‌ها با کدورت خیلی بالا (> ۱۰۰ NTU) از نظر عملی قابل قبول نیست.

غلظت کافی حباب‌ها باعث ایجاد تصادم‌های خوب ما بین ذرات و حباب‌ها شده و در نتیجه باعث پایین آوردن دانسیته لخته می‌شوند (Adames & Josef 1999).

#### ۳-۶- بررسی اثر کدورت‌های مختلف بر حذف آنیلین در فرایند DAF

بررسی اثر کدورت‌های مختلف در pH بهینه و غلظت پلی‌آلومینیوم کلراید ۲۰ میلی‌گرم در لیتر، زمان لخته‌سازی ۱۰ دقیقه، زمان شناورسازی ۲۰ ثانیه و فشار اشباع ۴ اتمسفر در شکل ۸ بیان‌گر آن است که افزایش کدورت باعث کاهش راندمان حذف آنیلین شده است و بیشترین راندمان حذف COD ناشی از آن در کدورت ۱۰ NTU برابر ۵۹ درصد است. همچنین راندمان حذف آنیلین از ۱۰ NTU با ۹۳/۳۲ درصد به ۹۱/۴ درصد در کدورت ۶۰ NTU کاهش یافته است. مطالعات انجام شده نشان داد که این فرایند مناسب حذف آب‌هایی با کدورت کم می‌باشد و افزایش کدورت باعث کاهش کارایی حذف خواهد شد (Park et al. 2002). با توجه به مکانیسم شناورسازی با هوای محلول که نیاز به فلوک‌های نوک سوزنی متخلخل دارد، افزایش مقدار کدورت می‌تواند مانع از ایجاد تشکیل این فلوک و شکستگی لخته‌ها شود که باعث کاهش میزان شناوری لخته‌ها می‌شود (Adames & Josef 1999).

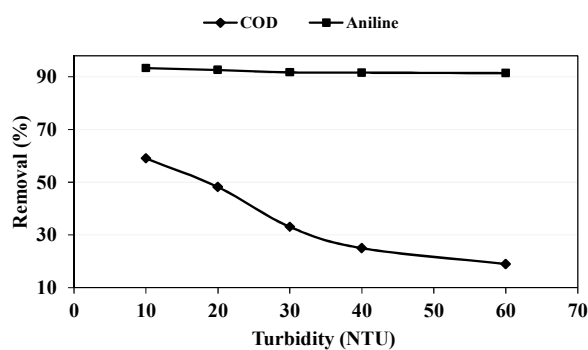


Fig. 8. Effects of turbidity on Aniline and its resulting COD removal using dissolved the air flotation process (PAC concentration = 20 mg/L, flocculation time = 10 min, flotation time = 20 sec, and saturation pressure = 4 atm)

شکل ۸- اثر کدورت‌های مختلف بر راندمان حذف آنیلین و COD ناشی از آن با استفاده از فرایند شناورسازی با هوای محلول غلظت PAC = ۲۰ میلی‌گرم بر لیتر، زمان لخته‌سازی ۱۰ دقیقه، زمان شناورسازی ۲۰ ثانیه و فشار اشباع سازی ۴ اتمسفر)



## ۵- قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه علوم پزشکی زاهدان در قالب طرح پایان‌نامه با شماره ۷۱۷۵ در سال ۹۴ انجام گرفته است. لذا از این معاونت، به خاطر حمایت مالی و همکاری صمیمانه‌شان قدردانی می‌شود.

## References

- Adames, C. & Josef, J., 1999, "Design and performance of physical-chemical and activated sludge treatment or an edible oil plant", *Proc. of the at30<sup>th</sup> Annual Purdue Industrial Waste Conf.*, Purdue University, Purdue.
- APHA, 1993, *Standard methods for examination of water and wastewaters*, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation: American Public Health Association, Washington, DC.
- Edzwald, J. K., 1995, "Principles and applications of dissolved air flotation", *Water Science and Technology*, 3(3-4), 1-23.
- Edzwald, J.K., Tobiason, J. E., Amato, T. & Maggi, L., 1999, "Integrating high-rate DAF technology into plant design", *Journal of American Water Works Association*, 91, (12), 41-53.
- Edzwald, J.K., Walsh, J.P., Kaminski, G. S. & Dunn, H., 1992, "Flocculation and air requirements for dissolved air flotation", *Journal of American Water Works Association*, 84(3), 92-100.
- Gomez, J.L. L.G., Hidalgo, A.M., Gomez, M., Murcia, M.D. & Grinan, G., 2009, "Application of reverse osmosis to remove aniline from wastewater", *Desalination*, 245, 187-193.
- Goncharuk, V.V., Kucheruk, D.D., Kochkodan, V.M. & Badekha, V.P., 2002, "Removal of organic substances from aqueous solutions by reagent enhanced reverse osmosis", *Desalination*, 143(1), 45-51.
- Han, X.Y., Chen, S., Zhao, H., Cui, C. & Zhao, Y., 2005, "Electrochemically enhanced adsorption of aniline on activated carbon fibers", *Separation and Purification Technology*, 50, 365-372.
- Han, M. K.W. & Dockko, S., 2001, "Collision efficiency factor of bubble and particle (abp) in DAF: Theory and experimental verification", *Water Science and Technology*, 43(8), 139-144.
- Han, Y. Q.X., Chen, S., Zhao, H., Cui, C. & Zhao, Y., 2006, "Electrochemically enhanced adsorption of aniline on activated carbon fibers", *Separation and Purification Technology*, 50(3), 365-372.
- Kakavandi, B., Jafari, A., Kalantary, R., Nasser, S., Ameri, A. & Esrafil, A., 2013, "Synthesis and properties of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-activated carbon magnetic nanoparticles for removal of aniline from aqueous solution: Equilibrium, kinetic and thermodynamic studies", *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(1), 10-19.
- Karhu, M. L.T. & Tanskanen, J., 2014, "Enhanced DAF in breaking up oil-in-water emulsions", *Separation and Purification Technology*, 122, 231-241.
- Kawamura, S., 2000, *Integrated design and operation of water treatment facilities*, John Wiley and Sons Inc., N.Y.
- Kiuru, H., 2001, "Development of dissolved air flotation technology from the first generation to the newest (third) one (DAF) in turbulent flow condition", *Wat. Sci. Tech.*, 43(8), 1-7.
- Kord Mostafapoor, F. B.E. & Kamani, H., 2010, "Survey of arsenic removal from water by coagulation and dissolve air floatation method Iran", *Journal of Health and Environment*, 3, 310-317.

- Malley, J. & Edzwald, J., 1990, "Laboratory comparison of DAF with conventional treatment", *Journal of American Water Works Association*, 83, 56-61.
- Park, J. J.Y., Han, M. & Lee, S., 2002, "Simultaneous removal of cadmium and turbidity in contaminated soil washing water by DAF and electro flotation", *Wat. Sci. Tech.*, 46(11-12), 225-230.
- Peavy, S.H. & Rowe, R.D., 1985, *Environmental engineering*, McGraw – Hill Publications, N.Y.
- Pithan, F. & Lichtenthaler, R.N., 2002, "Synthesis of highly fluorinated polyimide membranes for the removal of high boiling organics from process water and wastewater by pervaporation", *Desalination*, 148, 1-4.
- Rappoport, Z., 2007, *The chemistry of anilines*, John Wiley and Sons Ltd., London.
- Reali, M.A. & Cind Marchetto, M., 2001, "High-rate dissolved air flotation for water treatment", *Wat. Sci. Tech.*, 43 (8), 43-49.
- Sena, R.F. T.J., Genena, A.K., Moreira, A.K., Schroder, H. & Jose, H., 2009, "Treatment of industry wastewater using dissolved air flotation and advanced oxidation processes monitored by GC-MS and LC-MS", *Chemical Engineering Journal*, 152, 151-157.
- Vakili, B., 1997, "Use of local plants as natural polyelectrolyte in water treatment process and its comparison with synthetic polyelectrolyte to view point economically", MSc. Thesis, Isfahan University of Medical Sciences, Isfahan. (In Persian)
- Wu, G-Q., Zhang, X., Hui, H., Yan, J., Zhang, Q-S. & Wan, J-L., 2012, "Adsorptive removal of aniline from aqueous solution by oxygen plasma irradiated bamboo based activated carbon", *Chemical Engineering Journal*, 185, 201-210.
- Xiao, C. N.J., Yan, H., Sun, X. & Hu, J., 2009, "Biodegradation of aniline by a newly isolated *Delftia* sp. XYJ6", *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 17, 500-505.