



بررسی راندمان منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید در تصفیه فاضلاب های نفتی با استفاده از روش تاگوچی

سید مهدی حسینی¹، محمد مهدی سالاری راد²، سید محمدرضا علوی مقدم³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران- محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

2- استادیار دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

3- دانشیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

salari@aut.ac.ir

خلاصه

امروزه فاضلاب های نفتی حاصل از فعالیت صنایع مختلف، نقش عمده ای را در آلودگی های گوناگون محیط زیست ایفا می کنند. بنابراین بررسی روش های مختلف کاهش آلودگی این فاضلاب ها از اهمیت به سزایی برخوردار است. هدف از انجام این تحقیق، بررسی راندمان حذف آلاینده های نفتی توسط روش انعقاد و لخته سازی با استفاده از منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید (PACl) می باشد. پلی آلومینیوم کلراید ماده ای پلیمری است که استفاده از آن در سال های اخیر به علت کارایی بالا، تولید لجن پایین و مقدار مصرف کم به عنوان یک منعقد کننده مناسب در صنعت تصفیه آب و فاضلاب گسترش یافته است. در این تحقیق، آزمایشات جار تست با استفاده از منعقد کننده پلی آلومینیوم کلراید بر روی امولسیون گازوئیل در آب با سه غلظت 500، 1000 و 1500 میلی گرم بر لیتر به عنوان فاضلاب نفتی شبیه سازی شده انجام گرفت. همچنین جهت پایداری امولسیون گازوئیل در آب از امولسیفایر (Tween 80) استفاده گردید. طراحی آزمایش ها بر اساس الگوریتم تاگوچی انجام شد. بر این اساس، از طریق تحلیل آماری نتایج بدست آمده، اثر غلظت اولیه امولسیون گازوئیل در آب، pH و غلظت منعقد کننده بر حذف کدورت ارزیابی و شرایط بهینه فرآیند تعیین شد.

کلمات کلیدی: تصفیه، فاضلاب های نفتی، پلی آلومینیوم کلراید، تاگوچی

1. مقدمه

گسترش روزافزون صنایع پالایش هیدروکربن ها و کاربرد وسیع تولیدات مرتبط با نفت در بسیاری از بخش های صنعتی (صنایع اتومبیل، هواپیما، صنایع شیمیایی، تعمیرگاه های ماشین و غیره)، مخاطرات آلودگی های نفتی در محیط زیست را افزایش داده اند. غلظت نفت در فاضلاب های خروجی از منابع صنعتی مختلف از چند میلی گرم در لیتر تا حدود 40000 میلی گرم در لیتر متفاوت است. برخلاف نفت آزاد یا شناور تخلیه شده در دریاها، دریاچه ها یا رودخانه ها، اکثر فاضلاب های صنعتی در میان آلاینده های اصلی خود حاوی امولسیون های نفت در آب می باشند. به دلیل نیروهای دافعه الکترواستاتیکی، در قطرات نفت امولسیون شده با قطره های حدود میکرومتر جهت تبدیل آنها به ذرات بزرگتر انعقاد خودبخودی صورت نمی گیرد، در نتیجه جداسازی نفت توسط روش های ثقلی ساده یک فرآیند سخت و زمان بر است [1].

فرآیند انعقاد و لخته سازی یکی از روش هایی است که می توان برای جداسازی نفت-آب به کار برد. این فرآیند با ناپایدار نمودن امولسیون ها و افزایش تجمع قطرات نفت روی لخته ها موجبات حذف متعاقب آنها را از طریق ته نشینی یا شناورسازی فراهم می آورد. تجمع قطرات هنگامی رخ می دهد که نیروهای وندروالسی جاذبه در محیط وجود داشته باشند. در طی ناپایدارسازی امولسیون نفت-آب، تجمع قطرات ابتدا با کاهش بار سطحی خالص به یک مقدار معین رخ می دهد که در آن قطراتی که قبلاً توسط دافعه الکترواستاتیکی پخش شده اند، بتوانند تا حدی به یکدیگر نزدیک شوند که نیروهای وندروالسی آنها را در کنار هم نگه داشته و فرصت تجمع را بوجود آورند [2]. عملیات انعقاد معمولاً از طریق افزودن منعقد کننده های معدنی از قبیل نمک های آلومینیوم یا آهن، یا پلیمرهای آلی مصنوعی که به عنوان پلی الکترولیت شناخته می شوند، انجام می گیرد [3]. این مواد شکستن امولسیون ها را به دلیل کاهش بارهای سطحی قطرات افزایش می دهند و در نتیجه موجب انعقاد قطرات نفت و سپس جداسازی فازهای آبی و نفتی به وسیله ته نشینی متعارف یا فلو تاسیون با هوای محلول می شوند [2].



در سال‌های اخیر، منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید (PACl) به طور گسترده‌ای در تصفیه آب و فاضلاب مورد استفاده قرار گرفته است. از مزایای پلی‌آلومینیوم کلراید نسبت به منعقدکننده‌هایی از قبیل آلوم و کلرید فریک می‌توان به خاصیت اسیدی کمتر، غلظت کمتر مورد نیاز، تشکیل سریع لخته‌های متراکم‌تر و تولید لجن کمتر اشاره نمود. با این وجود، از نظر ساختار و مشخصات منعقدکنندگی و لخته‌سازی، پلی‌آلومینیوم کلراید در وضعیتی بین نمک‌های فلزی رایج و لخته‌سازهای آلی قرار می‌گیرد. این ترکیب کمپلکس‌های آبی را در محیط‌های آبی تشکیل می‌دهد که به توانایی منحصر به فرد این منعقدکننده در فرآیند انعقاد منجر می‌شود [4، 5].

در سال 2005، Mohammed و همکاران تصفیه فاضلاب‌های نفتی را با استفاده از انعقاد-لخته‌سازی و ته‌نشینی مورد بررسی قرار دادند. آنها چهار منعقدکننده آلوم، کلریدفریک، رس و اکسید کلسیم را برای تصفیه فاضلاب نفتی با غلظت‌های اولیه مختلف نفت به کار بردند. مشاهده گردید که راندمان حذف نفت تابعی از غلظت‌های مواد منعقدکننده و غلظت اولیه نفت است و هنگامی که غلظت اولیه نفت افزایش می‌یابد، راندمان جداسازی نفت کاهش پیدا می‌کند [6]. Ahmad و همکاران در سال 2006، انعقاد ذرات معلق و نفت باقیمانده را در فاضلاب خروجی کارخانه روغن نخل توسط چیتوسان¹، آلوم و پلی‌آلومینیوم کلراید مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از آلوم و پلی‌آلومینیوم کلراید با غلظت‌های بهینه به ترتیب برابر 6/0 و 8/0 g/l و pH برابر 4/5، درصد حذف نفت باقیمانده در حدود 95 درصد بدست آمد [7]. همچنین، در تحقیقی که در سال 2008 توسط Puskarewicz انجام شد، حذف ترکیبات نفتی از آب با استفاده از فرآیند انعقاد مورد بررسی قرار گرفت. انعقاد مواد نفتی توسط کلریدفریک و آلوم بسیار موثر بود، اما جهت تحقق آن غلظت‌های بالایی از مواد منعقدکننده (حدود 220-320 mg/l) مورد نیاز بود [8].

بهینه‌سازی فرآیندهای انعقاد و لخته‌سازی برای دستیابی به کیفیت مناسب پساب خروجی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روش‌های گوناگونی را می‌توان جهت بهینه‌سازی این فرآیندها به کار برد. از این میان، به کارگیری روش‌های طراحی آزمایش می‌تواند دستیابی به نتایج دقیق‌تر را محقق سازد. به طور کلی روش‌های آماری و طراحی آزمایش به منظور بهینه‌سازی عوامل فرآیند به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. تاگوجی یکی از روش‌های طراحی آزمایشات است که می‌تواند جهت بهینه نمودن عوامل موثر در سیستم به کار رود. در روش تاگوجی، کیفیت پاسخ آزمایشگاهی به عنوان نسبت عوامل مطلوب به عوامل غیر قابل کنترل بیان می‌گردد. همچنین تحلیل واریانس² برای هر پاسخ به طور مجزا انجام می‌گیرد تا اهمیت نسبی هر یک از عوامل موثر در فرآیند از لحاظ آماری برآورد شود [9].

در این تحقیق، تصفیه امولسیون گازوئیل در آب با استفاده از فرآیند انعقاد و لخته‌سازی و متعاقب آن ته‌نشینی مورد بررسی قرار می‌گیرد و اهداف زیر دنبال می‌شود: 1) تعیین شرایط بهینه برای حذف کدورت از امولسیون‌های نفتی، 2) تعیین اثر هر یک از عوامل مورد بررسی شامل غلظت منعقدکننده، pH و غلظت آلاینده ورودی بر راندمان حذف. روش طراحی آزمایش عواملی را که بر پاسخ (در اینجا کدورت) تأثیرگذار هستند را بهینه‌سازی نموده و تعداد آزمایش‌هایی که جهت یافتن شرایط بهینه لازم است، را کاهش می‌دهد.

2. مواد و روش‌های آزمایشگاهی

گازوئیل ترکیب هیدروکربنی بود که به عنوان فاز نفتی مورد استفاده قرار گرفت، و به دلیل اینکه در حین عملیات انعقاد و لخته‌سازی آن تبخیر رخ نمی‌دهد و حلالیت آن در آب ناچیز است، برای آماده‌سازی امولسیون‌ها انتخاب گردید. ساخت امولسیون گازوئیل در آب با سه غلظت مختلف 500، 1000 و 1500 mg/L انجام شد. سورفکتانت غیر یونی تووین³ 80 نیز به عنوان امولسیفایر مورد استفاده قرار گرفت. غلظت تووین در سیستم‌های امولسیون تهیه شده، برابر 4% حجمی مقدار گازوئیل اضافه شده بود [10]. منعقدکننده پلی‌آلومینیوم کلراید (PACl) نیز با خلوص صنعتی تهیه گردید. تنظیم pH امولسیون‌ها از طریق افزودن HCl یا NaOH انجام گرفت.

آماده‌سازی امولسیون‌های نفت در آب مطابق روش زیر انجام گرفت: مقدار معینی از گازوئیل بر حسب غلظت مورد نظر 500، 1000 و 1500 mg/lit و پس از آن سورفکتانت غیر یونی تووین 80، به میزان 4% حجمی گازوئیل به کار رفته برای تهیه غلظت مورد نظر، به بشر حاوی 1500 میلی‌لیتر آب افزوده شدند. سپس این مخلوط با استفاده یک همزن مکانیکی در دور 1500 rpm به مدت 15 min آماده‌سازی گردید و امولسیون پایداری تشکیل شد.

¹ chitosan

² ANOVA

³ Tween 80



تمامی آزمایش‌ها در یک واحد جارتست 6 سلولی مدل زاگ شیمی و مطابق استاندارد ASTM 2001، در شرایط یکسان اختلاط سریع با سرعت 120 rpm به مدت 1 دقیقه، سپس اختلاط کند با سرعت 30 rpm به مدت 20 دقیقه و متعاقب آن ته‌نشینی به مدت 15 دقیقه انجام شده و در انتها نمونه‌برداری از پساب تصفیه شده جهت تعیین کدورت آن صورت گرفت.

اندازه‌گیری کدورت نمونه‌ها به عنوان شاخصی از آلاینده‌های نفتی موجود در امولسیون‌های تهیه شده با استفاده از کدورت‌سنج مدل HACH 2100 با حداکثر حساسیت 0/01 NTU انجام شد. کارایی جداسازی گازوئیل امولسیون شده توسط انعقاد و لخته‌سازی و سپس رسوب-گذاری به وسیله درجه تصفیه (Re%) ارزیابی شد که با استفاده از رابطه (1) محاسبه می‌گردید:

$$Re\% = [(T_0 - T)/T_0] \times 100 \quad (1)$$

که در آن T_0 و T به ترتیب کدورت‌های اولیه و نهایی و Re درصد حذف کدورت امولسیون‌های حاوی گازوئیل می‌باشند.

3. آزمایش‌های طراحی شده با استفاده از روش تاگوچی

مراحل انجام روش تاگوچی شامل انتخاب یک طرح مناسب برای انجام آزمایش‌ها با توجه به تعداد عوامل و سطوح آنها و سپس تحلیل نتایج جهت تعیین بهترین ترکیب از عوامل و سطوح آنها می‌باشد [9]. با در نظر گرفتن سه غلظت مختلف امولسیون گازوئیل در آب 500، 1000 و 1500 میلی گرم بر لیتر که به عنوان فاضلاب نفتی شبیه‌سازی شده تهیه گردید، انتخاب سطوح دیگر عوامل موثر در فرآیند یعنی pH و غلظت پلی‌آلومینیوم کلراید با توجه به آزمایش‌های اولیه و نیز محدوده‌های عملیاتی متداول که در منابع مختلف ذکر شده، انجام گرفت. pH و غلظت ماده شیمیایی افزودنی عوامل مهمی هستند که اثر قابل توجهی بر راندمان جداسازی دارند. همواره یک غلظت بهینه برای مواد شیمیایی افزودنی در یک محدوده بهینه pH فاضلاب وجود دارد [1]. تحقیقات نشان می‌دهد که راندمان فرآیندهای شکستن امولسیون‌ها مستقیماً به غلظت وابسته نبوده، بلکه به مجموع عوامل غلظت آلومینیوم و pH بستگی دارد. همچنین مقدار آلومینیوم لازم برای ناپایدارسازی امولسیون با غلظت نفت متناسب است [11]. بر این اساس، آزمایشات بعدی برای یافتن ترکیب بهینه عوامل (غلظت آلاینده ورودی، میزان pH و غلظت منعقدکننده)، که سطح بالایی از حذف آلاینده نفتی را نتیجه می‌دهد، طراحی گردید. بنابراین با بررسی نتایج این آزمایش‌ها، محدوده موثر pH و غلظت منعقدکننده در تصفیه سه غلظت مختلف امولسیون گازوئیل در آب بدست آمد و با توجه به این محدوده، سه سطح پایین، متوسط و بالا برای هر یک از این عوامل جهت تعیین شرایط بهینه حذف کدورت در نظر گرفته شد. سطوح عوامل بررسی شده در جدول 1 ارائه شده است.

جدول 1- عوامل مورد بررسی و سطوح متناظر آنها

عامل	سطح 1	سطح 2	سطح 3
غلظت آلاینده ورودی (ppm)	500	1000	1500
pH	4	6	8
غلظت پلی‌آلومینیوم کلراید (mg/l)	30	50	70

سپس طراحی آزمایش‌ها با سه عامل مذکور و هر یک دارای سه سطح به کمک نرم افزار Minitab 14 انجام گرفت. جهت استفاده از روش تحلیل نسبت سیگنال به نویز، که روش بسیار دقیق و مطمئن‌تری است، آزمایش‌ها باید بیش از یک بار انجام گیرند در غیر این صورت نمی‌توان از این روش استفاده نمود و تنها روش متوسط داده‌ها را می‌توان به کار برد [9]. به همین دلیل در این مطالعه تعداد تکرار آزمایش‌ها برابر 3 در نظر گرفته شد. آزمایش‌های طراحی شده با آرایه L_9 در جدول 2 ارائه شده است.



جدول 2- آزمایش‌های طراحی شده با آرایه متعامد و L

نسبت S/N	درصد حذف کدورت			غلظت پلی - آلومینیوم کلراید (mg/l)	pH	غلظت اولیه گازوئیل (ppm)	شماره آزمایش
	تکرار سوم	تکرار دوم	تکرار اول				
37/04	68/9	74/7	70/2	30	4	500	1
39/82	97/8	98/6	97/5	50	6	500	2
39/30	96/4	94/1	87/0	70	8	500	3
36/71	71/6	64/6	69/7	50	4	1000	4
39/81	98/8	97/1	97/5	70	6	1000	5
39/23	90/7	90/6	93/3	30	8	1000	6
35/36	58/1	63/2	55/4	70	4	1500	7
39/69	96/1	96/2	97/1	30	6	1500	8
39/77	97/6	98/3	96/4	50	8	1500	9

4. نتایج و بحث

1.4. تحلیل نسبت سیگنال به نویز

به منظور ارزیابی اثر هر عامل انتخابی روی پاسخ‌ها، نسبت سیگنال (عوامل مطلوب) به نویز (عوامل غیر قابل کنترل) که به اختصار نسبت S/N ¹ نامیده می‌شود، باید برای هر عامل کنترلی مورد محاسبه قرار گیرد. سیگنال‌ها اثر روی میانگین پاسخ‌ها را نشان می‌دهند و نویزها با تاثیر بر انحراف از پاسخ‌های میانگین محاسبه می‌شوند که حساسیت خروجی آزمایش را نسبت به عوامل اغتشاش بیان می‌کند. استفاده از تحلیل نسبت S/N انتخاب بهینه‌ترین سطوح بر مبنای حداقل تغییرات حول نقطه هدف و همچنین حول مقدار میانگین را ممکن می‌سازد [9]. در این تحقیق، نسبت S/N مطابق با معیار "هر چه بیشتر بهتر"²، به منظور پیشینه کردن پاسخ‌ها انتخاب گردید. بنابراین هدف جدید در مسئله، پیشینه‌سازی این معیار می‌باشد. نسبت S/N برای هدف "هر چه بیشتر بهتر"، برای همه پاسخ‌ها طبق رابطه (2) محاسبه گردید [3]:

$$S/N = -10 \log \left(\sum \left(\frac{1}{y_n^2} \right) / n \right) \quad (2)$$

که در آن y_n مقدار پاسخ اندازه‌گیری شده برای هر آزمایش در هر آزمون، و n تعداد تکرار آزمایش‌ها (در اینجا برابر با 3) می‌باشد. نسبت S/N اثر سطوح هر عامل را روی پاسخ (در اینجا کدورت) به طور مستقل نشان می‌دهد. این نسبت با محاسبه میانگین مقادیر نسبت S/N همه آزمایش‌هایی که در آنها سطح مورد نظر آن عامل مورد استفاده قرار گرفته است، بدست می‌آید [3]. مطابق با معیار انتخابی یعنی "هر چه بیشتر بهتر"، افزایش نرخ S/N نشان دهنده بهتر شدن شرایط است، همچنین بیشترین مقدار S/N شرایط بهینه را در بین سطوح مختلف هر عامل نشان می‌دهد. با استفاده از اطلاعات فوق و معادله ارائه شده برای محاسبه نسبت S/N ، نتایج آزمایش به روش تاگوشی در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3- مقادیر پاسخ برای نسبت‌های S/N در سطوح مختلف عوامل

نسبت S/N			عوامل
سطح 3	سطح 2	سطح 1	
38/27	38/58	38/72	غلظت اولیه گازوئیل
39/43	39/77	36/37	pH
38/16	38/77	38/65	غلظت پلی آلومینیوم کلراید

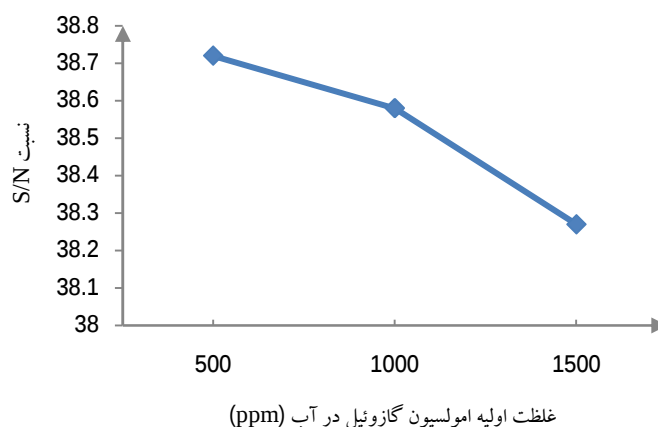
¹ Signal to noise ratio

² Larger is better



2.4. اثر غلظت اولیه گازوئیل

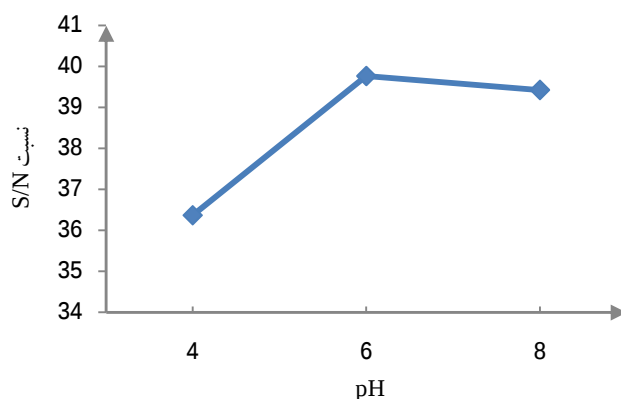
در این تحقیق، سه غلظت مختلف گازوئیل در آب برابر با 500، 1000 و 1500 ppm به عنوان آلاینده نفتی در نظر گرفته شد. با بررسی نسبت S/N در هر سطح به عنوان شاخصی از پاسخ سیستم به تغییرات غلظت اولیه گازوئیل، مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت ورودی، نسبت S/N کاهش می‌یابد. همان‌گونه که در شکل 1 نیز مشاهده می‌شود، بیشترین نسبت S/N برای غلظت 500 ppm گازوئیل در آب بدست آمده است. با افزایش غلظت گازوئیل و در نتیجه افزایش بار آلاینده ورودی، راندمان حذف کدورت کاهش می‌یابد که این کاهش پاسخ سیستم می‌تواند به دلیل کمتر شدن توانایی پلی‌آلومینیوم کلراید در منعقد نمودن بارهای شدید آلاینده ورودی باشد.



شکل 1- اثر سطوح مختلف غلظت اولیه امولسیون گازوئیل در آب بر راندمان حذف کدورت

3.4. اثر pH

شکستن امولسیون‌ها معمولاً به وسیله تغییر میزان pH (در این تحقیق توسط اسید کلریدریک) یا با افزودن سایر مواد شیمیایی، از قبیل نمک‌های آهن یا آلومینیوم انجام می‌گیرد [1]. شکل 2 نسبت S/N را به عنوان شاخصی از پاسخ سیستم به تغییرات مقدار pH و تأثیر آن بر راندمان حذف کدورت را نشان می‌دهد. با افزایش pH از سطح اول یعنی pH برابر 4 به سطح دوم یعنی pH برابر 6، نسبت S/N نیز افزایش می‌یابد که نشان دهنده افزایش راندمان حذف کدورت است. اما با افزایش بعدی میزان pH از 6 به 8، نسبت S/N کاهش می‌یابد. در نتیجه همان‌گونه که در شکل زیر نیز مشاهده می‌شود، pH بهینه برای عملیات انعقاد و لخته‌سازی قطرات هیدروکربنی موجود در امولسیون گازوئیل در آب توسط پلی‌آلومینیوم کلراید در حدود 6 بدست می‌آید.

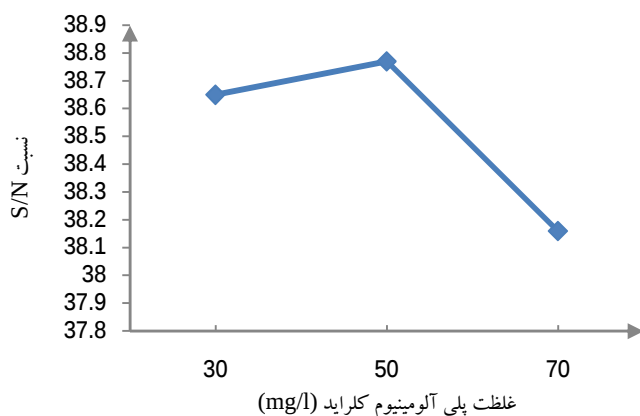


شکل 2- اثر سطوح مختلف pH بر راندمان حذف کدورت



4.4. اثر غلظت پلی آلومینیوم کلراید

افزودن منعقدکننده پلی آلومینیوم کلراید در کاهش دادن یا غلبه نمودن بر موانع الکترواستاتیکی به منظور فراهم کردن امکان برخورد ذرات مجزا به یکدیگر و در نتیجه منعقدشدن آنها بسیار سودمند می باشد [1]. همان گونه که در شکل 3 نشان داده شده است، با افزایش غلظت منعقدکننده از سطح اول یعنی 30 mg/l به سطح میانی یعنی 50 mg/l، نسبت S/N افزایش می یابد که بیانگر روند افزایشی راندمان حذف کدورت در این محدوده است. سپس با افزایش بیشتر غلظت پلی آلومینیوم کلراید از 50 به 70 mg/l، از میزان نسبت S/N کاسته می شود که نشان دهنده کاهش راندمان حذف کدورت می باشد. بنابراین غلظت بهینه پلی آلومینیوم کلراید جهت انعقاد و لخته سازی قطرات موجود در امولسیون گازوئیل در آب حدود 50 mg/l بدست می آید.



شکل 3- اثر سطوح مختلف غلظت پلی آلومینیوم کلراید بر راندمان حذف کدورت

با توجه به نتایج تحلیل نسبت S/N، می توان شرایط بهینه نسبی را جهت دستیابی به بیشترین درصد حذف کدورت از فاضلاب نفتی تهیه شده بدست آورد. همان گونه که در جدول 4 ارائه گردیده است، با استفاده از سطحی از هر عامل که دارای بیشترین نسبت S/N نسبت به دیگر سطوح آن عامل است، بهترین پاسخ بدست می آید. بنابراین، با به کارگیری غلظت اولیه گازوئیل 500 ppm، pH برابر 6 و غلظت پلی آلومینیوم کلراید 50 mg/l، راندمان حذف کدورت به حداکثر میزان خود خواهد رسید.

جدول 4- شرایط بهینه بدست آمده از تحلیل نسبت های S/N

عامل	سطح	مقدار پاسخ میانگین	مقدار پاسخ S/N
غلظت اولیه گازوئیل	1	87/24	38/72
pH	2	97/41	39/77
غلظت پلی آلومینیوم کلراید	2	88/01	38/77

5.4. تحلیل واریانس

تحلیل واریانس جهت برآورد واریانس خطا و نیز تعیین اهمیت نسبی عوامل مختلف مورد استفاده قرار می گیرد. این تحلیل اثر هر یک از عوامل بررسی شده را بر معیار بهینه سازی نشان می دهد [3]. این امر با تقسیم مجموع تغییرپذیری نسبت های S/N که به وسیله مجموع مربع انحرافات از میانگین کل نسبت های S/N تعیین می شود، بر سهم هر عامل موثر در فرآیند و خطا انجام می شود [9]. همچنین تحلیل واریانس نشان می دهد که آیا واریانس مشاهده



شده در پاسخ به علت تغییر میزان سطح است یا ناشی از خطاهای استاندارد آزمایشگاهی می‌باشد. در تحلیل واریانس، مقادیر مجموع مربعات، درجه آزادی، میانگین مربعات (واریانس) و آزمون F^1 اهمیت محاسبه می‌شوند. مجموع مربعات (SS) عامل A مطابق رابطه (3) بدست می‌آید [3]:

$$SS_A = \left[\sum_{i=1}^{K_A} \left(\frac{A_i^2}{n_{A_i}} \right) \right] - \frac{T^2}{N} \quad (3)$$

که در آن K_A تعداد سطوح فاکتور A (در این تحقیق برای همه عوامل $K_A = 3$)، n_{A_i} تعداد مشاهدات در سطح i ام عامل A (در این تحقیق برابر 3)، A_i مجموع همه مشاهدات سطح i ام عامل A، N تعداد همه آزمایش‌ها و T مجموع همه مشاهدات است. تعداد درجات آزادی یک عامل برابر است با تعداد سطوح منهای یک. واریانس نیز از تقسیم مجموع مربعات به درجه آزادی متناظر با آن بدست می‌آید [9].

مقدار F آزمون نسبت واریانس مدل به واریانس باقیمانده (خطا) می‌باشد. این مقدار با تقسیم واریانس عامل مورد مطالعه بر واریانس خطا بدست می‌آید. اگر مقدار F محاسبه شده از مقدار F_0 (استخراج شده از جداول استاندارد توزیع F) مربوط به یک محدوده اطمینان α بزرگتر باشد، اثر مربوطه از نظر آماری معنی‌دار تلقی می‌شود. معمولاً سطح اهمیت یا همان محدوده اطمینان α برابر 0/05 در نظر گرفته می‌شود. مقدار P نشان دهنده احتمال دستیابی به یک مقدار مشخص در توزیع F با $k-1$ متغیر و $k(n-1)$ درجه آزادی بزرگتر یا مساوی F_0 می‌باشد. با استفاده از مقدار P، ارزیابی متغیرهای مستقل و برهم‌کنش آنها و نیز میزان اثر آنها امکان‌پذیر می‌گردد. $Prob > F$ احتمال عدم وجود اثر عامل مورد بررسی بر روی پاسخ می‌باشد. اگر $Prob > F$ بسیار کم باشد (معمولاً کمتر از 0/05)، آن عامل مشخص در مدل اثر مهمی روی پاسخ دارد [12].

نتایج حاصل از تحلیل واریانس بدست آمده بر حسب نسبت‌های S/N در جدول 5 ارائه شده است. در این جدول درجه آزادی (Df)، مجموع مربعات (S)، واریانس (V)، آزمون F و مقدار P یا احتمال اهمیت جهت ارزیابی اثرات حائز اهمیت هر عامل ذکر شده است. نتایج تحلیل واریانس نشان می‌دهد که تنها pH دارای اثر معنی‌دار بر روی پاسخ با سطح اطمینان 95 درصد است، زیرا $Prob > F$ آن 0/037 و کوچکتر از محدوده اطمینان 0/05 می‌باشد. همچنین نتایج بیانگر این مطلب است که پس از pH که مهمترین عامل اثرگذار بر پاسخ است، غلظت پلی‌آلومینیوم کلراید دارای مرتبه بعدی اهمیت بوده و پس از آن غلظت اولیه گازوئیل با کمترین درجه اهمیت و اثرگذاری بر پاسخ قرار می‌گیرد.

جدول 5- نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای نسبت‌های S/N

عامل	Df	S	V	F	P
غلظت اولیه گازوئیل	2	0/31	0/16	0/38	0/724
pH	2	21/06	10/53	25/73	0/037
غلظت پلی‌آلومینیوم کلراید	2	0/63	0/32	0/77	0/564
خطا	2	0/82	0/41		
مجموع	8	22/82			

5. نتیجه‌گیری

مهمترین نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از:

- 1- به کارگیری روش تاگوشی جهت تعیین شرایط بهینه فرآیند انعقاد و لخته‌سازی امولسیون‌های حاوی گازوئیل در آب در دستگاه جارتست نشان داد که میزان pH مهمترین عامل در افزایش راندمان حذف کدورت می‌باشد.
- 2- نتایج بدست آمده برای نرخ‌های S/N در سطوح مختلف عوامل نشان داد که در سه غلظت اولیه امولسیون گازوئیل در آب مورد بررسی، شرایط بهینه حذف کدورت در غلظت امولسیون گازوئیل در آب برابر با 500 ppm، pH برابر با 6 و غلظت پلی‌آلومینیوم کلراید برابر با 50 mg/l بدست می‌آید.
- 3- نتایج تحلیل واریانس بیانگر این مطلب است که pH تنها عامل معنی‌دار موثر بر پاسخ (با سطح اطمینان 95 درصد) می‌باشد. همچنین از لحاظ درجه اهمیت بر پاسخ پس از pH، به ترتیب غلظت پلی‌آلومینیوم کلراید و غلظت اولیه گازوئیل قرار می‌گیرند.

¹ Fisher test



6. مراجع

1. Zouboulis, A.I. and Avranas, A., (2000), "Treatment of oil-in-water emulsions by coagulation and dissolved-air flotation," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 172, pp 153-161.
2. Hempoonsert, J., Tansel, B. and Laha, S., (2010), "Effect of temperature and pH on droplet aggregation and phase separation characteristics of flocs formed in oil-water emulsions after coagulation," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 353, pp 37-42.
3. Aber, S., Salari, D. and Parsa, M.R., (2010), "Employing the Taguchi method to obtain the optimum conditions of coagulation-flocculation process in tannery wastewater treatment," *Chemical Engineering Journal* 162, pp 127-134.
4. Gao, B.Y., Yue, Q.Y. and Wang, Y., (2007), "Coagulation performance of polyaluminum silicate chloride (PASiC) for water and wastewater treatment," *Separation and Purification Technology* 56 (2), pp 225-230.
5. Yarahmadi, M., Hossieni, M., Bina, B. and Mahmoudian, M.H., (2009), "Application of Moringa Oleifer Seed Extract and Polyaluminum Chloride in Water Treatment," *World Applied Sciences Journal* 7 (8), pp 962-967.
6. Mohammed, T. J., Hashim, M. and Al-Abideen, E.H.Z., (2007), "Treatment of Oily Wastewater," *Eng. & Technology* 25 (3), pp 407-421.
7. Ahmad, A.L., Sumathi, S. and Hameed, B.H., (2006), "Coagulation of residue oil and suspended solid in palm oil mill effluent by chitosan, alum and PAC," *Chemical Engineering Journal* 118, pp 99-105.
8. Puzkarewicz, A., (2008), "Removal of petroleum compounds from water in coagulation process," *Environment Protection Engineering* 34 (1), pp 5-14.
9. Roy, R.K., (1990), "A primer on the Taguchi method," Van Nostrand Reinhold International Company, USA.
10. Wang, D., Silbaugh, T., Pfeffer, R. and Lin, Y.S., (2010), "Removal of emulsified oil from water by inverse fluidization of hydrophobic aerogels," *Powder Technology* 203, pp 298-309.
11. Cañizares, P., Martínez, F., Jiménez, C., Sáez, C. and Rodrigo, M.A., (2008), "Coagulation and electrocoagulation of oil-in-water emulsions," *Journal of Hazardous Materials* 151 (1), pp 44-51.
12. Brereton, R.G., (1990), "Chemometrics Application of Mathematics and Statistics to Laboratory Systems," Ellis Horwood, England.