Environmental Education and Sustainable Development
Second national conference on:
Environmental Science & Engineering and Sustainable Development
2020 , Tehran, Iran
هفدهم بهمن ماه ۱۳۹۸
انجمن علمی آموزش محیط زیست و توسعه پایدار ایران
دومین کنفرانس ملی علوم و مهندسی محیط زیست و توسعه پایدار
دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی

تصفیه فاضلاب معدن زغال سنگ و بازگردان آب به مسیر فرآیند معدن

بهنام فیاض شاهاندشتی[1]، نرگس فلاح[2]، فاطمه السادات حسینیان[3]
[1]دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران،
Asho_behnam@yahoo.com
[2]دانشکده مهندسی شیمی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران
nfallah2001@aut.ac.ir
[3]دانشکده مهندسی معدن و متالوژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی‌تکنیک تهران)، تهران
f_hoseinian@aut.ac.ir

1 چکیده

امروزه، کنترل انواع آلاینده‌هاي معدنی از اهمیت بالائی برخوردار می‌باشد و معادن زغال‌سنگ یکی از آلاینده‌ترین فاضلاب‌های موجود در این صنعت است. این صنعت همچنین میزان بالایی آب را برای فرآوری مصرف می‌کند به نحوی که در مناطق با کمبود آب، فرآیند فرآوری با مشکل جدی مواجه است. بهترین روش بازچرخانی آب از طریق تصفیه پساب خود معدن می‌باشد که روش‌های مختلفی برای تصفیه این پساب ارائه شده است. یکی از مهم‌ترین روش‌های تصفیه پساب معادن زغال‌سنگ ته‌نشینی است که در این پژوهش روش انعقادسازی شیمیایی بررسی شده است. تمامی پارامترهای مؤثر بر کارایی روش با استفاده از فرآیند طراحی آماری آزمایشات (روش غربال‌گری) پلاکت-برمن بررسی شد و مهم‌ترین پارامترهای مؤثر منعقدکننده آهن، کمک منعقدکننده خنثی و زمان همزن در حالت کند به‌دست آمد. نتایج نشان داد بازه بررسی برای پارامترهای غلظت منعقدکننده آهن (75-125 ppm)، کمک منعقدکننده آنیونی (2-4 ppm) و زمان همزن (10-30 min) مناسب است.

کلمات کلیدي

فاضلاب معدن-انعقادسازی شیمیایی-منعقدکننده- زغال‌سنگ-پلاکت برمن.

2 مقدمه

در حال حاضر زغال‌سنگ بزرگترین رشد مصرف را در بین انواع مواد سوختي جهان دارد (ملكي & آگاه, 1393). برمبنای گزارش ارائه شده توسط آژانس بین‌المللی انرژی با عنوان چشم‌انداز انرژی جهان 2017[1]، در سال 2040 علاوه بر سرمایه‌گذاری کشورهای پیشتاز با حمایت‌های دولتی در عرصه منابع انرژی تجدیدپذیر، حداقل تا سه دهه آینده همچنان از سوخت‌های فسیلی از جمله زغال‌سنگ استفاده خواهد شد و این منابع جزو مهمترین منابع تأمین انرژی دنیا باقی می‌مانند. متوسط میزان تولید جهانی از معادن زغال‌سنگ در حال حاضر 0.8 درصد ذخایر معدنی است که این میزان در ایران در حدود 0.1 درصد یا به عبارتی یك‌هشتم تولید جهانی است. بنابراین تا سه دهه آینده، زغال‌سنگ به عنوان یکی از منابع اصلی مورد استفاده در جهان به حساب می‌آید و سرمایه‌گذاری برای استخراج این ماده معدنی همچنان ادامه دارد. (خانی & مقصودی1397)

روند رو به رشد فعالیت‌هاي معادن زغال‌سنگ از یک سو و عدم رعایت الزامات زیست‌محیطی به ویژه در کشورهاي درحال توسعه از سوي دیگر باعث شده تا مقادیر زیادی از آلاینده‌هاي این معادن وارد محیط‌زیست شوند. بخش اصلی فاضلاب‌هاي معدنی، شامل عناصر فلزي سنگین و غیرفلزي است که عموما سمی‌اند و خطرات جدی برای سلامتی انسان، جانداران و محیط‌زیست دارند. در مناطق معدنی

[1] World Energy Outlook 2017, by International Energy Agency (IEA)

مشکلاتی از قبیل پساب‌های اسیدی معدن و مقادیر بالای مواد جامد معلق به عنوان مشکلات عمده آلودگی آب‌ها شناخته شده است. از این رو، تصفیه و حذف آلودگی فاضلاب معادن بسیار ضروری است.

رایج‌ترین روش تصفیه این نوع پساب‌ها استفاده از انواع سلول‌های فلوتاسیون و انواع روش‌های ته‌نشینی مانند تیکنر می‌باشد. یکی از بهترین روش‌های حذف ذرات معلق استفاده از فرآیند انعقادسازی شیمیایی است که یک فرآیند کم هزینه برای جداسازی انواع ذرات معلق و لخته‌ها می‌باشد. لجن تولید شده در فرآیند انعقادسازی شیمیایی به وسیله فرآیندهای ثانویه نظیر ته‌نشینی و یا فیلتراسیون جدا می‌شود که فرآیند ته‌نشینی یک فرآیند فیزیکی است که طی آن ذرات معلقی که دارای چگالی بیشتری نسبت به آب هستند، تحت اثر نیروی جاذبه به سمت پایین سقوط کرده و از جریان فاضلاب حذف می‌شوند. اساس روش ته‌نشینی نیروهای وارده بر ذره می‌باشد، که نیروی اول ناشی از جاذبه زمین است که ذره را به سمت پایین می‌کشد و نیروی دوم ناشی از گرانروی سیال است که در مقابل حرکت رو به پایین ذره مقاومت می‌کند. سرعت ته‌نشینی ذرات با توجه به نیروهای ذکر شده مطابق رابطه استوکس (1-2) بیان می‌شود:

$$\upsilon_p = \frac{(\rho_p - \rho_w)}{18\mu g\, d_p^2} \qquad \textbf{(1-2)}$$

که در این رابطه ρ_p: چگالی ذره برحسب (kg/m^3)، ρ_w: چگالی آب برحسب (kg/m^3)، g: شتاب ثقل برحسب(m/s^2) و d_p: قطر ذره برحسب (m) است.

عوامل با اهمیتی که در ویژگی‌های ذرات کلوئیدی فاضلاب موثر هستند عبارتند از: اندازه و تعداد ذرات، شکل و انعطاف‌پذیری ذره، خصوصیات سطحی ازجمله مربوط به بار الکتریکی، برهم کنش‌های ذره-ذره و برهم کنش‌های ذره-حلال. پارامترهای مؤثر در فرآیند ته‌نشینی در پساب‌های معدنی عبارتند از: pH، نوع پساب، نوع و میزان دوز مواد منعقدکننده و کمک منعقدکننده، سرعت همزن و زمان همزن در حالت‌های تند و کند.

هادي شمس‌پور و همکاران به بررسي رفتار ته‌نشيني ذرات جامد در جريان اسلاري همراه با افزايش غلظت در کارخانه فرآوري سنگ آهن گل‌گهر پرداختند، نتايج نشان داد که با افزايش غلظت، سرعت ته‌نشيني ذرات جامد افت مي‌کند و همچنين اسلاري‌هاي با غلظت بالاتر را مي‌توان بدون ايجاد انسداد در خط لوله، در دبي‌هاي پائين‌تر منتقل نمود (زماني, منصوري, & پور, 1390).

محمد ملکوتیان و همکارانش تحقیقی بر روی حذف مواد آلی و معدنی با انعقاد و فرآیند لخته‌سازی همراه با ترشح شیمیایی در راکتورهای دسته‌ای انجام داده و کاهش پارامترهای کدورت، غلظت فلزات سنگین، رنگ، فسفات، غلظت منعقدکننده،pH ، TSS و COD را مورد بررسی قرار دادند. نتایج تحقیق نشان داد که درصد حذف کروم، نیکل، سرب و روی توسط سولفات فریک همراه با آهک در pH برابر با 10 و زمان 100 دقیقه برابر با 52.65، 96.3، 3.27 و 100 درصد بود. درصد حذف آنها توسط سولفات آلومینیوم همراه با آهک به ترتیب 65/52، 8/97، 37/3 و 88/99 بود. درصد حذفCOD ، TSS، رنگ و کدورت نیز به ترتیب 68.9، 83، 94 و 84 بود و این میزان حذف توسط سولفات آلومینیوم 62، 80، 94 و 73.5 به ترتیب در pH خنثی و غلظت منعقدکننده برابر 150 میلی گرم در لیتر بدست آمد (Malakootian, Toolabi, Derakhshan, & Ghaneian, 2016).

Manjushree Chowdhury و همکارانش طی تحقیقی که انجام دادند، مشاهده کردند که منعقدکننده $FeCl_3$ با دوز 150 میلی گرم در لیتر در نزدیکی pH خنثی، بهترین راندمان حذف را برای پارامترهای اصلی فیزیکی و شیمیایی نشان داد. نتایج تجزیه و تحلیل پساب‌های خام نشان می‌دهد که پسابها به رنگ قهوه‌ای مایل به زرد، دارای pH پایه، دارای مقادیر بسیار بالای TS، TSS، TDS، COD، BOD_5 و غلظت بالایNa، Cr و سایر مواد آلی و معدنی بودند (Chowdhury, Mostafa, Biswas, & Saha, 2013).

در تحقیقی که حسین صمدي بروجني و همکارانش به بررسي سرعت سقوط رسوبات چسبنده پرداختند و دريافتند که در غلظت‌هاي پائين با افزايش غلظت رسوب، سرعت سقوط هم افزايش مي‌يابد ولي در غلظت‌هاي بالا اين رابطه معکوس مي‌شود. همچنين نتايج اين تحقيق نشان داد که علاوه بر غلظت رسوب، تنش برشي جريان نيز بر سرعت سقوط ذرات تأثير قابل ملاحظه دارد. لذا براساس نتايج اين تحقيق رابطه رگرسيون براي محاسبه سرعت سقوط رسوبات چسبنده ارائه شد (حسين & مهدي).

Muhammad Irfan و همکارانش روی ضایعات پالپ که حاویTSS ، COD و رنگ بسیار بالایی بودند. فرآیند انعقاد-لخته سازی برای یافتن عملکرد منعقدکننده‌ها و فلوکولنت‌های مختلف مانند آلوم، کلرید فریک، کلرید آلومینیوم، سولفات آهن، کلرید پلی آلومینیوم[2]، پلیمرهای پلی آکریل‌آمید کاتیونی و آنیونی به شکل‌های فردی و همچنین در ترکیب‌های مختلف انجام شد. اثرات میزان دوز منعقدکننده، زمان ته‌نشینی و pH برای کاهشTSS ، COD و رنگ بررسی شد. منعقدکننده‌های مورد استفاده به صورت ترکیبی به جای استفاده از حالت فردی، در کاهشTSS ، COD و رنگ مؤثرتر بودند. بیشترین نتایج با استفاده از ترکیب کاتیونی و آنیونی پلی آکریل‌آمید با کلرید فریک و کلرید آلومینیوم و کاهش 76٪ TSS ،95٪ COD و 95٪ رنگ درpH <3 مشاهده شد (Irfan et al., 2017).

با توجه به بررسی‌های انجام شده که در مورد فاضلاب صنایع معدنی، خلا وجود ترسیب شیمیایی در این صنعت به صورت یک فرآیند مجزا و مهم مشخص شد از اینرو هدف این تحقیق استفاده مجدد از پساب تولیدی خود معادن و بازگردانی پساب تصفیه شده می‌باشد زیرا در معادن زغال‌سنگ مصرف آب برای فرآوری و شستشوی زغال بسیار بالا است همچنین در مناطق کم‌آب کشور این معادن با مشکل جدی فرآوری روبه‌رو خواهند بود. از اهداف این تحقیق بررسی پارامترهای 11 گانه و تعیین پارامترهای مؤثر و تاثیرگذار بر سرعت ته‌نشینی به واسطه نرم‌افزار دیزاین اکسپرت و روش غربالگری می‌باشد. همچنین تعیین محدوده بهینه برای پارامترهای مؤثر از اهداف این تحقیق می‌باشد.

3 مواد و روش‌ها

پساب مورد استفاده در این تحقیق از معدن زغال‌سنگ البرز شرقی واقع در استان سمنان، شهرستان شاهرود تهیه شده و نمونه‌های پساب گرفته شده از این معدن در ظروف پلاستیکی به حجم‌های 30 لیتر تهیه شده است که در جای خشک، خنک و دور از نور آفتاب نگهداری شدند. کلروفریک[3] و آلوم یا زاج سفید (سولفات آلومینیوم[4]) منعقدکننده‌های مورد استفاده و همچنین کمک منعقدکننده خنثی(Besfloc K300N)، کمک منعقدکننده کاتیونی (Zetafloc 7563) و کمک منعقدکننده آنیونی (megafloc 3045PWG) از جمله کمک منعقدکننده‌هایی می‌باشند که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است.

همانطور که بیان شد به علت زیادی پارامترهای تاثیرگذار بر سرعت ته‌نشینی از روش طراحی آزمایش پلاکت-برمن[5] برای تصحیح پارامترها و تعیین سه پارامتر مؤثر که بیشترین تاثیر را بر انعقادسازی شیمیایی دارند، بکار گرفته شده است. در روش پلاکت-برمن هر متغیر در دو سطح بررسی می‌شود و به همین دلیل پارامترهای موثر به‌صورت علمی انتخاب می‌شوند11 پارامتر تاثیرگذار در محدوده‌های مناسب پرتکرار و با توجه به کارهای انجام شده تعیین شدند که در Error: Reference source not found(آورده شده است.

جدول 3-1: نوع پارامترها و بازه تغییرات در روش پلاکت برمن

[2] PAC
[3] $FeCl_3$
[4] $Al_2(SO_4)_3$
[5] Plackett-Burman

شماره فاکتور پارامتر (واحد)	A pH	B $FeCl_3$ (ppm)	C Anion (ppm)	D Cation (ppm)	E Neutral (ppm)	F High Speed (rpm)	G Low Speed (rpm)	H High speed time (min)	J Low speed time (min)	K Alum (ppm)	L TSS type
بازه تغییرات	4-9	0-100	0-3	0-3	0-3	100-200	10-40	1-4	10-25	0-100	1-2

روش پلاکت-برمن با استفاده از جدول بالا تعداد 12 آزمایش را در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت ویرایش 7[6]، برای تعیین پارامترهای مؤثر تنظیم و ارایه کرده که پاسخ این طراحی آزمایش سرعت ته‌نشینی و واحد آن Cm/min می‌باشد.

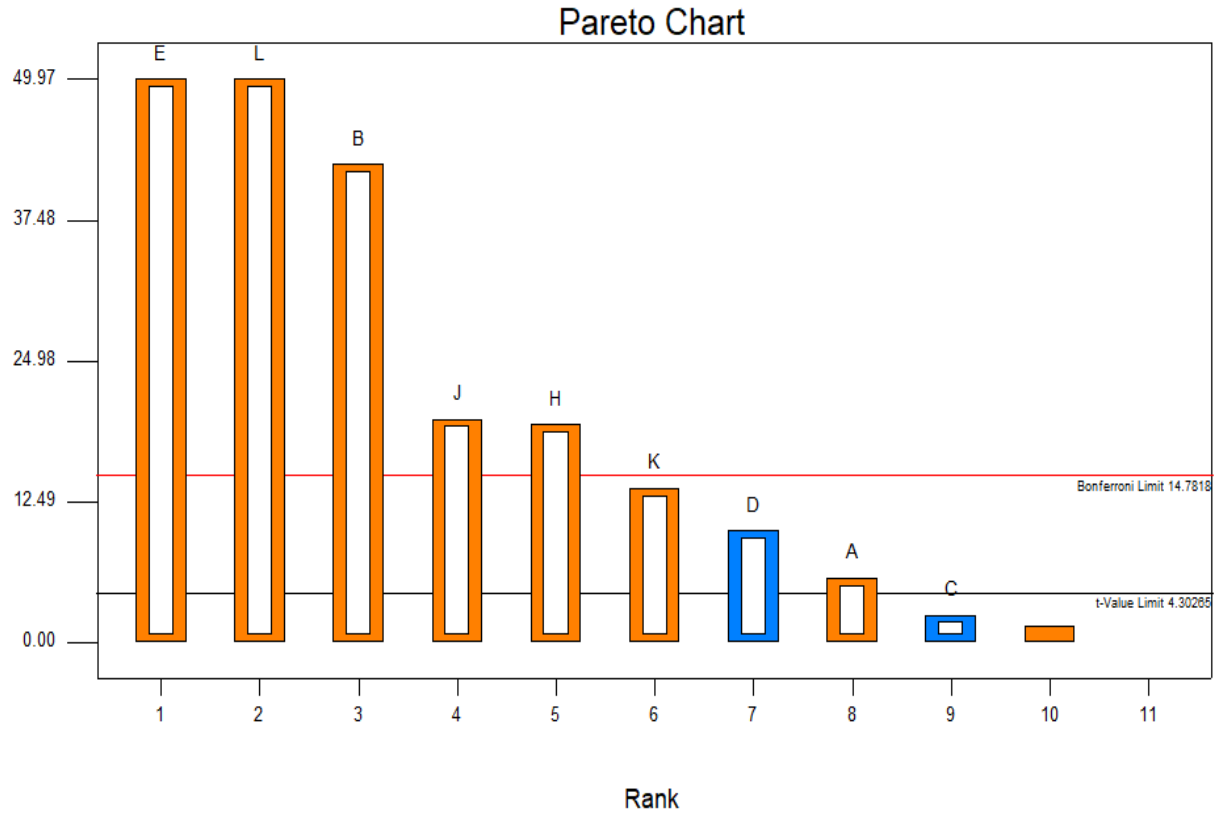
4 بحث و تحلیل نتایج

(Error: Reference source not found) تاثیر پارامترهای عملیاتی بر روی سرعت ته‌نشینی توسط نرم‌افزار دیزاین اکسپرت است که ستون‌های قرمزرنگ نشان‌دهنده تاثیر مثبت پارامترها و ستون‌های آبی‌رنگ نشان‌دهنده تاثیر منفی بر روی سرعت ته‌نشینی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که فاکتورهای B، L، E و J به ترتیب بیشترین تاثیر مثبت را در فرآیند ته‌نشینی می‌گذارند. فاکتور E و B به ترتیب کمک منعقدکننده خنثی و منعقدکننده کلروفریک هستند. فاکتور L نوع پساب معدن زغال‌سنگ می‌باشد که قبل و بعد از واحد فلوتاسیون نمونه‌گیری شده است که با توجه به نیازسنجی، نمونه از قسمت قبل از واحد فلوتاسیون انتخاب شده است. ستون بعدی که بیشترین تاثیر مثبت را دارد فاکتور J است که پارامتر زمان همزن در حالت کند می‌باشد.

تاثیرات منفی و مثبت در این روش به این معنی است که هر چه فاکتورهای ذکر شده با حداکثر تاثیر منفی در رنج پایین‌تری انتخاب شوند، سرعت ته‌نشینی را بهبود می‌بخشند و فاکتورهایی که تاثیر مثبت دارند هر چقدر در رنج بیشتری انتخاب شوند سرعت ته‌نشینی را بهبود می‌بخشند.

[6] Design-Expert 7.0.0

تصویر 4-1: نتایج روش پلاکت-برمن



با توجه به Error: Reference source not found(، Error: Reference source not found(و بازه تغییراتی که برای فاکتورهای C ،F و K در روش پلاکت-برمن تعیین شده است، باید مقادیر فاکتورهای ذکر شده با توجه بـه تاثیر مثبت که دارند، در رنج‌های بالاتری انتخاب شوند تا به سرعت ته‌نشینی بهینه دست یافت. با استفاده از نتایج پلاکت-برمن پارامترهای مهم را تشخیص داده و بازه بهینه برای هر کـدام مطـابق Error: Reference source not found(انتخاب شده است.

جدول 4-2: پارامترها و بازه تغییرات بهینه در روش باکس-بنکن

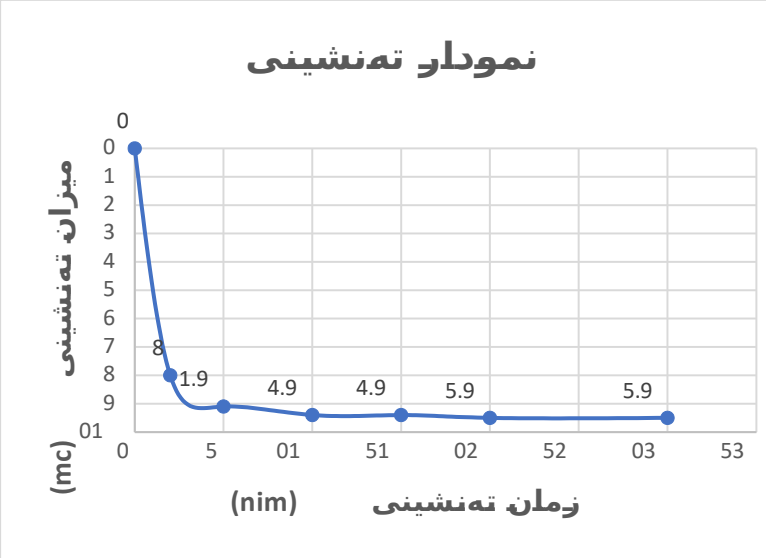
شماره فاکتور پارامترهای بهینه (واحد)	A Neutral (ppm)	B $FeCl_3$ (ppm)	C Low Speed Time (min)
بازه تغییرات بهینه	2-4	75-125	10-30

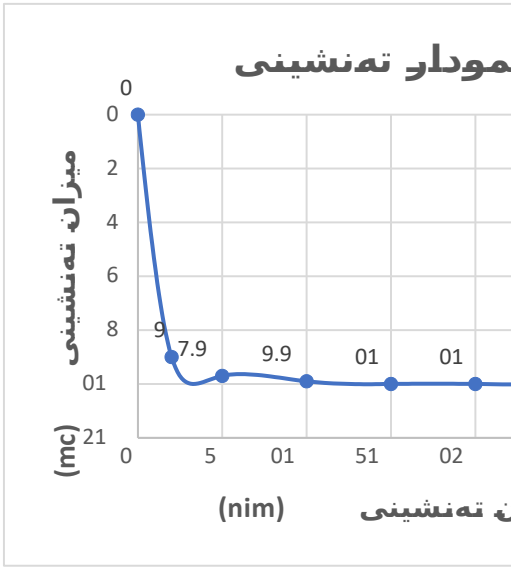
با توجه به Error: Reference source not found(آزمایشاتی در محدوده بهینه انجام شـده کـه در ادامـه تـاثیر فاکتورها به صورت مجزا بررسی شده است.

کمک منعقدکننده خنثی

در این آزمایش کمک منعقدکننده خنثی در غلظت ثابت منعقدکننده آهن $FeCl_3$=125 ppm و زمان همـزن در سرعت پایین برابر 20 دقیقه در دو غلظت 2 و 4 ppm بررسی شده و نتایج آن در تصویر 2-4(و تصویر 3-4(نشان داده شده است.

تصویر 3-4: تاثیر 2 ppm کمک منعقدکننده خنثی **ppm کمک منعقدکننده خنثی**



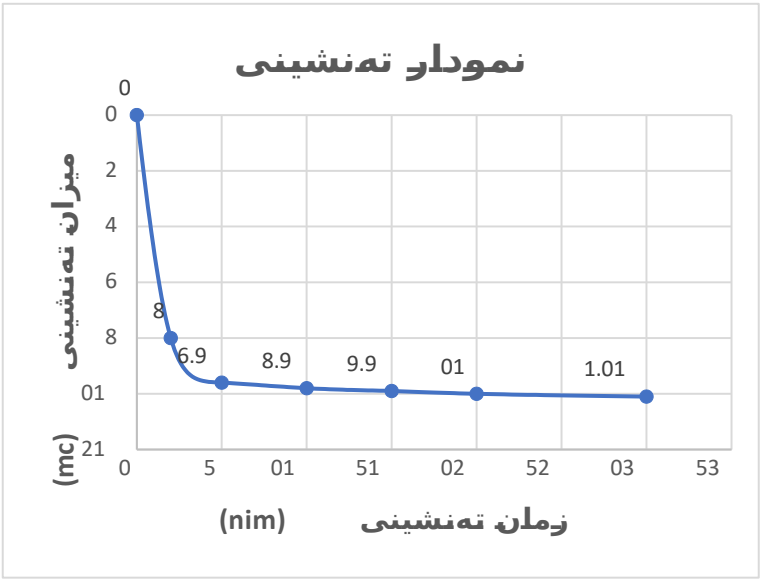


همان‌طور که از تصویر 2-4(و تصویر 3-4(مشخص است با افزایش کمک منعقدکننده خنثی در شرایط ثابت از دو پارامتر دیگر، سرعت ته‌نشینی افزایش یافته است، همچنین در تصویر 3-4(سرعت ته‌نشـینی اولیه از 0.575 به 1.82 cm/s افزایش یافته و برای تصویر 2-4(سـرعت ته‌نشـینی بـه 1.94 cm/s افـزایش یافته است.

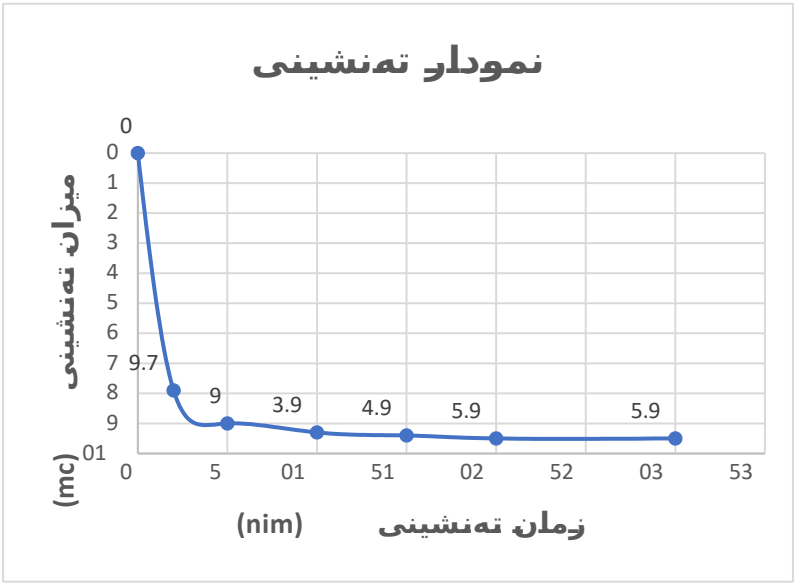
منعقدکننده آهن

در این حالت از سری آزمایشات منعقدکننده آهن و تاثیر آن بر سرعت ته‌نشـینی را بررسـی می‌کـنیم کـه برای این کار ابتدا کمک منعقدکننده خنثی در غلظت ثابت 3 ppm و زمان همزن در سرعت پایین برابر 30 دقیقه در نظر گرفته شده و همچنین منعقدکننده آهن را در دو غلظت 75 و 125 ppm بررسی شده و نتایج آن در تصویر 4-4(و تصویر 5-4(نشان داده شده است.

تصویر 4-4: تاثیر 125 ppm منعقدکننده آهن



تصویر 4-5: تاثیر 75 ppm منعقدکننده آهن

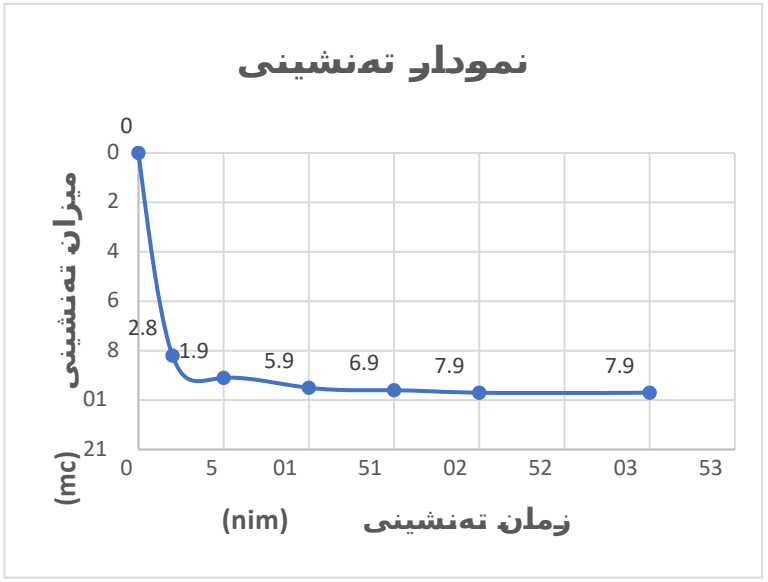


در این قسمت هم مانند بخش)4-1(و همان‌طور که در روش پلاکت-برمن بیان شد کمک منعقدکننده خنثی و منعقدکننده آهن تاثیر مثبت بر روی سرعت ته‌نشینی دارند که این امر بدین معنی است هر چه منعقدکننده آهن در دوز مصرف شده، بیشتر انتخاب شود به نسبت سرعت ته‌نشینی هم در محدوده بالاتری تغییر خواهد کرد. از تصویر 4-4(و تصویر 4-5(مشخص است که با افزایش منعقدکننده آهن در شرایط ثابت از دو پارامتر دیگر، سرعت ته‌نشینی افزایش یافته است، از طرفی سرعت ته‌نشینی اولیه در تصویر 4-4(از 0.575 به 1.92 cm/s افزایش یافته و برای تصویر 4-5(سرعت ته‌نشینی به 1.8 cm/s افزایش یافته است.

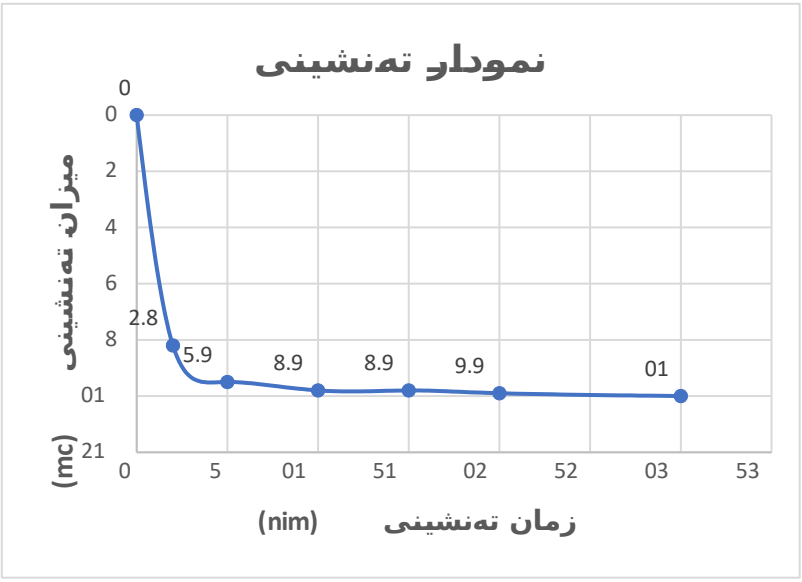
[redacted]زمان همزن در حالت کند

در این قسمت میزان تاثیر زمان همزن در حالت کند بر روی سرعت ته‌نشینی بررسی خواهد شد. در این حالت همانند بخش‌های قبلی دو پارامتر دیگر باید ثابت باشند، در این قسمت یعنی کمک منعقد کننده خنثی که در دوز 2 ppm و منعقدکننده آهن که در دوز 100 ppm ثابت نگه داشته شده‌اند. برای بررسی میزان تاثیر زمان همزن در حالت کند در دو زمان 10 و 30 دقیقه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.

تصویر 4-6: تاثیر 10 دقیقه زمان همزن در حالت کند



تصویر 4-7: تاثیر 30 دقیقه زمان همزن در حالت کند



با توجه به تصویر 4-6(و تصویر 4-7(و آنچه که از روش غربالگری بیان شده بود، مشخص شده است که هر چه زمان همزن در حالت کند بیشتر باشد سرعت ته‌نشینی هم افزایش می‌یابد. همان‌طور که تصویر 4-6(نشان می‌دهد سرعت ته‌نشینی اولیه از 0.575 به 1.82 cm/s افزایش یافته و این مقدار در تصویر 4-7(به 1.9 cm/s رسیده است که نشان‌دهنده تاثیر مثبت این پارامتر بر سرعت ته‌نشینی است.

5 نتیجه

در مطالعه حاضر تصفیه پساب معدن زغال‌سنگ به روش انعقادسازی شیمیایی بررسی شد. تعداد پارامترهای زیاد تاثیرگذار در سرعت ته‌نشینی به روش پلاکت-برمن بررسی شده تا مهم‌ترین و تاثیرگذارترین پارامترها در سرعت ته‌نشینی بدست آید. نتایج روش پلاکت-برمن نشان داد که غلظت منعقدکننده آهن، کمک منعقدکننده خنثی و زمان همزن در حالت کند را تاثیرگذارترین پارامترها شناسایی کرده است. در این مطالعه بیشترین سرعت ته‌نشینی این پساب در شرایط منعقدکننده آهن (ppm75-125)، کمک منعقدکننده خنثی (ppm2-4) و زمان همزن در حالت کند (min10-30) بدست می‌آید. نتایج نشان داد که مدل آماری تطابق بسیار خوبی با داده‌های تجربی دارد.

Chowdhury, M., Mostafa, M., Biswas, T. K., & Saha, A. K. (2013). Treatment of leather industrial effluents by filtration and coagulation processes. *Water Resources and Industry, 3*, 11-22.

Irfan, M., Butt, T., Imtiaz, N., Abbas, N., Khan, R. A., & Shafique, A. (2017). The removal of COD, TSS and colour of black liquor by coagulation–flocculation process at optimized pH, settling and dosing rate. *Arabian journal of chemistry, 10*, S2307-S2318.

Malakootian, M., Toolabi, A., Derakhshan, Z., & Ghaneian, M. T. (2016). Efficiency of Coagulation and Flocculation Process Combined with Chemical Sequestration in Removal of Organic and Inorganic Contaminants from Aautomotive Industry Sewag. *Journal of Community Health Research, 5*(3), 182-194.

حسين, ص. ب., & مهدي, ن. ب. بررسي سرعت سقوط رسوبات چسبنده با استفاده از مطالعات آزمايشگاهي.

خانی, س., & مقصودی, ا. (1397). بررسی چالشهای معدنکاری زغال سنگ ایران. Retrieved from

زماني, ف., منصوري, س. ح., & پور, ه. ش. (1390). بررسي رفتار ته نشيني جريان اسلاري ته ريز تيكنر كارخانه فرآوري شركت معدني و صنعتي گل گهر در لوله، با افزايش غلظت. Paper presented at the فصلنامه پژوهشی, تهران.

ملكي, ا., & آگاه, آ. (1393). بررسی وضعیت زغال سنگ ایران نسبت به جهان. Paper presented at the دومین کنگره ملی زغال سنگ ایران, شاهرود.