



Gonbad Kavous University  
Journal of New Approaches in  
Water Engineering and Environment  
Volume 2, Issue 1

## **Chemical removal of calcium sulfate deposits from irrigation water transmission pipelines (Case study: Sedimentation of water transmission line from Sarcheshmeh copper complex tailing dam for agricultural use in downstream areas)**

**Anita Afkhami<sup>1</sup>, Mehran Espahbodi<sup>2</sup>, Farhad Mahmoudi<sup>3</sup>, Fatemeh Khalili<sup>4</sup>, Anis Rizvani<sup>5</sup>, Abolfazl Bayat<sup>6</sup>**

<sup>1</sup>PhD in Watershed Science and Engineering, Ministry of Energy, Tehran Regional Water Company, Iran

<sup>2</sup> Head of water and environment department of research and development affairs of Sarcheshme copper complex in Kerman, Iran

<sup>3</sup>Water and environment department expert for research and development affairs of Sarcheshme copper complex in Kerman, Iran

<sup>4</sup>Water and environment department expert for research and development affairs of Sarcheshme copper complex in Kerman, Iran

<sup>5</sup>Water and environment department expert for research and development affairs of Sarcheshme copper complex in Kerman, Iran

<sup>6</sup>Water and environment department expert for research and development affairs of Sarcheshme copper complex in Kerman, Iran

Received:04.04.2023; Accepted:11.07.2023

### **Abstract**

Clogging and blockage of water transmission pipelines is one of the problems that reduce discharge downstream by creating various sediments. The aim of this study was to identify and remove the constraints caused by sediment in the water transmission lines of Sarcheshmeh copper complex to agricultural lands of downstream areas. First, the formed sediment was identified through XRF and XRD experiments and then optimized by using different concentrations of 30, 35, 40, 45 and 50% sodium hydroxide to remove the sediment. The results of sediment analysis showed that the predominant hardened sediment around the inner wall of the pipelines is calcium sulfate. The results of titration of the remaining solution from laboratory reactions also showed that 10 to 21% of sodium hydroxide with a concentration of 30 to 50% is used to separate more than 80% of the sediment adhering to the pipelines, which is 50% in real conditions. Also, the optimal amount of sodium hydroxide in this study was about 35% in 72 hours for complete separation of sediment from pipelines. However, due to the availability of sodium hydroxide with a concentration of 31% in the market and the no need to dilute its higher concentrations in the operating conditions, the proposed amount of sodium hydroxide for the removal of Sarcheshmeh copper pipeline to downstream 31% with an efficiency of more than 87% estimated. It is also recommended that acid neutralization operations be performed to discharge significant amounts of residual calcium hydroxide in solution at pH above 12 before release into the environment.

**Keywords:** Sediment removal, Calcium sulfate, Titration, Sodium hydroxide, Water transmission lines

**Summary**

---

\*. Corresponding author, Email: Anita.Afkhami1984@gmail.com



دانشگاه گنبد کاووس

نشریه "رویکردهای نوین در مهندسی آب و محیط زیست"

دوره دوم، شماره اول

<http://Nawee.gonbad.ac.ir>

## حذف شیمیایی رسوب سولفات کلسیم از خطوط لوله انتقال آب آبیاری (مطالعه موردی: رسوب خط انتقال آب ارسالی از سد رسوبگیر مجتمع مس سرچشمه برای مصارف کشاورزی در مناطق پایین دست)

آنیته افخمی<sup>۱</sup>، مهرا ن اسپهبدی<sup>۲</sup>، فرهاد محمودی<sup>۳</sup>، فاطمه خلیلی<sup>۴</sup>، انیس رضوانی<sup>۵</sup>، ابوالفضل بیات<sup>۶</sup>

<sup>۱</sup> دکترای علوم و مهندسی آبخیزداری، وزارت نیرو، شرکت آب منطقه ای تهران

<sup>۲</sup> رئیس بخش آب و محیط زیست امور تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه کرمان

<sup>۳</sup> کارشناس بخش آب و محیط زیست امور تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه کرمان

<sup>۴</sup> کارشناس بخش آب و محیط زیست امور تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه کرمان

<sup>۵</sup> کارشناس بخش آب و محیط زیست امور تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه کرمان

<sup>۶</sup> کارشناس بخش آب و محیط زیست امور تحقیق و توسعه مجتمع مس سرچشمه کرمان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۵؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۰

### چکیده

گرفتگی و انسداد خطوط لوله انتقال آب از جمله مشکلاتی است که با ایجاد رسوبات مختلف باعث کاهش آبدهی در پایین دست می گردد. در مطالعه حاضر که با هدف شناسایی و رفع محدودیت ناشی از ایجاد رسوب در خطوط انتقال آب مجتمع سرچشمه به اراضی کشاورزی مناطق پایین دست انجام گرفت، ابتدا رسوب پدید آمده از طریق آزمایش XRF و XRD شناسایی و سپس با استفاده از غلظت-های مختلف ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درصد قلیای مناسب هیدروکسید سدیم جهت پاکسازی رسوب اقدام به بهینه سازی گردید. نتایج بدست آمده از آنالیز رسوب نشان داد رسوب سخت شده غالب در اطراف جداره داخلی خطوط لوله سولفات کلسیم می باشد. نتایج تیتراسیون محلول باقیمانده حاصل از واکنش های آزمایشگاهی نیز نشان داد مقادیر ۱۰ تا ۲۱ درصد هیدروکسید سدیم با غلظت ۳۰ تا ۵۰ درصد برای جداسازی بیش از ۸۰ درصد رسوب چسبیده به خطوط لوله مصرف می شود که این میزان در شرایط واقعی حدود ۵۰ درصد است. همچنین در این تحقیق مقدار بهینه هیدروکسید سدیم برای جدایش کامل رسوب از خطوط لوله حدود ۳۵ درصد طی ۷۲ ساعت تخمین زده شد. با توجه به اینکه در شرایط اجرایی نیاز است غلظت های ۵۰ درصد موجود در بازار جهت رسیدن به مقدار بهینه رقیق سازی شود و از طرفی هیدروکسید سدیم با غلظت ۳۱ درصد در بازار موجود می باشد پیشنهاد گردید جهت عملیات اجرایی حذف رسوب خطوط لوله مس سرچشمه به اراضی پایین دست به جای غلظت بهینه ۳۵ درصد از غلظت ۳۱ درصد موجود استفاده گردد که البته کارایی این مقدار در پاکسازی جداره لوله بیش از ۸۷ درصد تخمین زده شد. همچنین توصیه گردید جهت تخلیه مقادیر قابل توجه هیدروکسید کلسیم باقیمانده در محلول با pH بالای ۱۲ عملیات خنثی سازی با اسید قیل از رهاسازی به محیط زیست انجام گیرد. واژه های کلیدی: حذف رسوب، سولفات کلسیم، تیتراسیون، هیدروکسید سدیم، خطوط انتقال آب

### مقدمه

چند سال یک‌بار اتفاق بیفتد و تعویض خطوط طی بازه‌های کوتاه مدت منطقی به نظر نمی‌رسد. لذا انجام فرآیند رسوب‌زدایی و پاکسازی خطوط لوله به مراتب بیشتر مورد توجه بهره‌برداران قرار می‌گیرد. استفاده از مواد حلال رسوب یکی از روش‌های حذف رسوبات تجمع یافته در لوله-هاست، اما آنچه حائز اهمیت است، نوع حلال مورد استفاده، تغییر کیفیت آب توسط مواد حل شده، حجم دوغاب حاصل از حل رسوب و مکان تخلیه محلول حاصل از شستشو است. به طوری که چنانچه خطوط انتقال آب جهت تامین مصارف کشاورزی یا صنعت طراحی گردیده باشد، باید دقت شود دفع یکجا مواد محلول ناشی از کنده شدن رسوب در زمان رسوب‌زدایی بر روی ساختمان، بافت خاک و گیاه در بخش کشاورزی و همچنین ادوات، تجهیزات و ماشین آلات در بخش صنعت تاثیر نامناسبی نداشته باشد و همچنین در صورت تخلیه ضایعات رسوبی در طول مسیر نیز منجر به مخاطرات زیست‌محیطی نگردد. بررسی‌های متفاوتی در زمینه پاکسازی رسوب انجام شده که البته اکثر مطالعات انجام شده در این زمینه، بیشتر جهت رفع گرفتگی رسوبات در قطره‌چکان‌های مورد استفاده در آبیاری قطره‌ای انجام شده است.

Taherpoor (2016) عوامل شیمیایی مربوط به کیفیت آب آبیاری را در گرفتگی و رسوبگذاری خروجی‌ها مورد بررسی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد مهمترین عامل که خطر گرفتگی در خروجی‌ها را ایجاد می‌کند تغییرات pH است و ترکیبات شیمیایی کربنات کلسیم و سولفات کلسیم عامل مهم ایجاد رسوب شیمیایی می‌باشد. Rahsepar et al (2019) به بررسی وضعیت کیفی آب‌های سطحی استان گیلان از جهت گرفتگی شیمیایی قطره‌چکان‌ها پرداختند. نتایج در اکثر نمونه‌های برداشت شده بر اساس شاخص اشباع لائزیرل دارای تمایل به رسوب بودند که جهت رفع معضل فوق بر ضرورت تمهیدات لازم در طرح‌های اجرا شده یا در حال طراحی تاکید شد. Mazloumi et al (2013) مقدار رسوبگذاری در آب شهری چند روستا از توابع شهرستان آشتیان را در لوله‌های پلی‌اتیلنی پیش‌بینی کردند. نتایج بر اساس شاخص‌های لائزیرل و رایزنز تمایل آب به رسوبگذاری را نشان داد. در ادامه محققین جهت حذف رسوبات تشکیل شده روش‌های

یکی از عوامل مهم در انسداد خطوط انتقال آب پدیده نشست و سخت‌شدگی رسوب است که به مرور زمان این پدیده منجر به گرفتگی و یا کاهش میزان آبدهی در خروجی لوله می‌گردد. رسوبگذاری در لوله‌های خطوط انتقال می‌تواند ناشی از واکنش‌های شیمیایی، فیزیکی و بیولوژی باشد که بسته به کیفیت آب انتقال یافته، دما، PH، سرعت آب، شیب خطوط لوله و حلالیت رسوب متفاوت می‌باشد (Pitts et al., 1990). رسوبات تشکیل شده در این فرایند معمولاً شامل یک ترکیب معدنی از جنس کربنات و یا سولفات کلسیم و منیزیم است که همراه با مواد دیگر از قبیل ذرات شن و ماسه مشاهده می‌شود (Asian Development Bank., 2006; Dehghani et al., 2010; Goodrich et al., 1999; Wasco and Alquist., 1946). اغلب موارد جنس ترکیبات موجود و ترکیب غالب با استفاده از آنالیز XRF و XRD براحتی قابل تشخیص است. رسوبات ایجاد شده در صورت انباشت به مرور باعث کاهش دبی عبوری از خطوط لوله شده و به مرور زمان انسداد و گرفتگی در مسیر انتقال را نیز ایجاد می‌کند که این عامل مشکلاتی را برای بهره‌برداران ایجاد خواهد نمود. در واقع آبی با پتانسیل رسوبگذاری می‌تواند تولید لایه‌های رسوب در قسمت داخلی لوله‌ها کند که منجر به کاهش قطر داخلی لوله‌ها می‌گردد. تشکیل و ریزش مداوم رسوب در لوله‌های پلی‌اتیلن نیز باعث ایجاد مشکلاتی از قبیل تجمع لایه‌های رسوب در اتصالات، پشت شیرهای آب و غیره می‌گردد (Mazloumi et al., 2013). بنابراین کنترل و پایش کیفیت آب امری ضروری است و روش‌هایی که برای رسوب‌زدایی و تخلیه آن انجام می‌شود باید متناسب با نوع رسوب، طول مسیر انتقال، نحوه اتصالات، جنس لوله، میزان گرفتگی لوله و مکان مناسب تخلیه تعیین گردد. در حال حاضر به منظور رفع مشکل فوق دو راهکار پیشنهاد می‌گردد که شامل تعویض خطوط لوله و دیگری رسوب‌زدایی و شستشوی دوره‌ای مجاری است. بررسی‌ها نشان می‌دهد تعویض خطوط لوله، به‌ویژه خطوطی که به‌صورت زیرزمینی اجرا و تعبیه شده است نسبت به شیوه دیگر مقرون به صرفه نبوده و همراه با هزینه‌های زیاد و سختی عملیات اجرایی به خصوص در نواحی با توپوگرافی صعب‌العبور است. از طرفی تشکیل رسوب فرآیندی است که در طول زمان می‌تواند هر

شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب نشان داد که با افزایش عمق از سطح، شاخص رسوبگذاری برای رسوبات کلسیم سولفات نیمه آب دار (همی‌هیدرات) و رسوب کلسیم سولفات آبدار (ژپیس) و استرانسیم سولفات در طول چاه تقریباً در تمام عمق‌ها منفی است و در نتیجه می‌توان گفت که احتمال تشکیل این رسوبات در اعماق مختلف این چاه وجود ندارد. اما در نزدیکی سطح زمین شاخص اشباع رسوب ژپس مثبت و کمی بزرگتر از صفر می‌باشد که نشان‌دهنده احتمال تشکیل رسوب ژپس در این محدوده عمقی است.

Hills et al (1989) تأثیر چهار ترکیب مختلف آب آبیاری را بر گرفتگی شیمیایی قطره چکان‌ها مورد ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که با افزایش یون‌های کلسیم، منیزیم، بیکربنات و pH آب آبیاری، رسوب کربنات کلسیم و منیزیم بیشتر شده که این امر منجر به افزایش گرفتگی قطره چکان‌ها و کاهش دبی آنها گردیده است. Lowental et al (2004) در مطالعه‌ای در کشور آفریقای جنوبی گزارش کردند که خوردگی و رسوبگذاری از مشکلات عمده در خطوط انتقال و توزیع آب‌های زیرزمینی است و مکانیزم اثر و شدت آن به دو عامل کیفیت آب و جنس لوله بستگی دارد. Ozekici (2006) Bozkurt and تحقیقی اثر کود آبیاری را بر گرفتگی قطره چکان‌ها بررسی نمودند. نتایج نشان داد کودهایی که هم شامل کلسیم و هم شامل سولفات بودند، نسبت به سایر کودها، باعث گرفتگی بیشتر قطره چکانها و کاهش عملکرد سامانه شدند. Liu and Huang (2008) نیز رسوب شیمیایی آب به دلیل pH بالا و غلظت بالای یون‌ها مخصوصاً در پساب تصفیه شده فاضلاب را دلیل اصلی گرفتگی قطره چکان‌ها بوده است. Silva et al (2017) به بررسی و ارزیابی وضعیت انسداد در سیستم‌های آبیاری قطره‌ای در صورت استفاده از فاضلاب در کشاورزی پرداختند. نتایج تحقیق این محققان نشان داد pH، جامدات معلق، کل آهن و کلی فرم‌های تیمارهای تالاب خطر شدید انسداد در قطره چکان را ایجاد می‌کند. Yao et al (2021) به بررسی دلایل انسداد و رفع مشکل آن در یک سیستم آبیاری زیر سطحی با ساطع کننده‌های سرامیکی متخلخل پرداختند و دلایل گرفتگی قطره چکان

تعدیل pH و شستشوی اسیدی دوره‌ای را بهترین گزینه معرفی نمودند. (Zamaniyan and Fatahi (2014) عامل انسداد قطره چکان‌ها را در سامانه آبیاری در ۶۰ درصد از موارد پیش‌بینی پتانسیل گرفتگی قطره چکان‌ها مربوط به عوامل شیمیایی و در سایر موارد مربوط به تأثیر توأم عوامل سه‌گانه (عوامل فیزیکی - شیمیایی - بیولوژیکی) دانستند و عامل اصلی آن را عدم بکارگیری اقدامات پیشگیرانه شامل تزریق اسید و کلرزنی در صورت لزوم به‌داخل سامانه و از همه مهمتر عدم بکارگیری صحیح کودهای شیمیایی همراه با آب آبیاری به دلیل نوع، نحوه، زمان و میزان تزریق غیر اصولی آن به شبکه بیان نمودند. Azari Nazemi et al (2016) پتانسیل خوردگی و رسوبگذاری منابع آب شرب شهر شاهرود را با استفاده از شاخص‌های پایداری بررسی نمودند. نتایج به دست آمده از این مطالعه نشان داد آب شهر شاهرود دارای رسوبگذاری و خاصیت خوردگی است، بنابراین پیشنهاد شد منابع تامین آب شهر پیوسته بررسی گردد و تلاش شود تا با تعدیل pH و کنترل سایر فاکتورهای موثر بر خوردگی از جمله غلظت‌های کلرید، اکسیژن محلول و سولفات میزان خوردگی کاهش داده شود. Kardan Moghadam et al (2016) بهینه سازی فرایند حذف رسوب در خطوط آبرسانی قنات روستای اسفزار شهرستان سربیشه را انجام دادند. نتایج تحقیق جهت نشان داد بهترین شرایط جهت ترسیب کربنات کلسیم با استفاده از عامل منعقد کننده سولفات آهن III و تنظیم pH برابر ۹/۵ با استفاده از اکسید کلسیم می‌باشد. Bijani and Khamechi (2019) پتانسیل خوردگی و رسوبگذاری در خطوط لوله انتقال پساب و لوله‌های مغزی چاه تزریق پساب واحد نمک‌زدایی رگ سفید را بررسی و پیش‌بینی نمودند. بر اساس نتایج، میزان تمایل رسوبگذاری انواع رسوبات معدنی با توجه به شاخص رسوبگذاری و فوق اشباع شدگی، نشان دهنده تشکیل شدن رسوبات کربنات کلسیم (کلسیت) در سرچاه و ته چاه می‌باشد و با افزایش ترکیب درصد آب همراه نفت (آب سازند) و آب تازه برای جداسازی نمک از نفت، میزان تمایل رسوبگذاری رو به کاهش می‌گذارد. نتایج حاصل از مدل‌سازی Khamechi et al (2020) بر روی یکی از چاه‌های نفتی تحت نظر

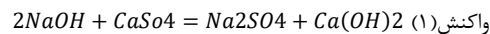
جهت تعویض مناسب نمی باشد لذا پروژه فوق به منظور شناسایی و امکان رسوب‌دایی از این خطوط انتقال آب انجام گردید.

### مواد و روش‌ها

به‌منظور انجام مطالعه حاضر، ابتدا مقداری از رسوب تشکیل شده در خطوط لوله برداشت و جهت اطلاع از ترکیب اولیه مقداری از این ماده به آزمایشگاه جهت آنالیز XRF و XRD ارسال گردید. در ادامه به‌منظور شبیه‌سازی شرایط واقعی سعی گردید رسوب مورد آزمایش از دیواره لوله جدا نشده تا آزمایش‌ها در شرایط واقعی‌تر انجام شود. لذا به این منظور بخش کوتاهی از خط لوله انتقال که حاوی رسوب بود از مسیر خط لوله جدا و به آزمایشگاه منتقل شد. نمونه لوله جدا شده، لوله‌ای به قطر ۱۱ سانتی‌متر بود که رسوب داخلی آن هم جنس و هم ضخامت با رسوب موجود در لوله‌های ۱۰ اینچی می‌باشد. لوله به برش‌هایی با طول تقریبی ۱۰ سانتی‌متر تقسیم و جهت انجام آزمایش‌ها از رسوب چسبیده به همراه لوله استفاده گردید.

#### استفاده از هیدروکسید سدیم به عنوان رسوب‌زدا

با توجه به نتایج حاصل از شناسایی رسوب که سولفات کلسیم تشخیص داده شده و همچنین قابلیت هیدروکسید سدیم به عنوان یک قلیای قوی در واکنش با سولفات کلسیم (۲۱) طبق واکنش ۱ در این پژوهش از غلظت‌های مختلف این ماده جهت رسوب‌دایی استفاده گردید.



#### سناریوی‌های مورد استفاده

در پژوهش حاضر از دو سناریو جهت حذف رسوب سولفات کلسیم استفاده گردید که سناریوی اول به منظور ارزیابی و بهینه‌سازی غلظت رسوب‌زدا و سناریوی دوم جهت صحت‌سنجی سناریوی اول انجام شد.

#### سناریوی اول - بهینه‌سازی غلظت هیدروکسید

##### سدیم به عنوان رسوب‌زدا

به این منظور از ۵ غلظت مختلف هیدروکسید سدیم شامل ۳۰، ۳۵، ۴۰، ۴۵ و ۵۰ درصد در سه تکرار استفاده گردید. با توجه به اینکه هیدروکسید سدیم موجود در بازار بیش‌تر شامل غلظت‌های ۳۱ و ۵۰ درصد وزنی است لذا

ها با استفاده از داده‌های عملیاتی ۲ ساله در باغ سیب مورد بررسی قرار گرفت. دلیل اصلی انسداد قطره چکان، مواد ته نشین شده در ورودی قطره چکان از قبیل سیلیس و کربنات کلسیم می باشد که در نهایت با شستشو تحت فشار ۱۰۰ کیلوپاسکال با محلول اسیدی به مدت ۱۵ دقیقه میزان گرفتگی به حداقل می‌رسد.

در پژوهش حاضر، معضل گرفتگی رسوبات در مسیر خطوط لوله انتقال آب از سد رسوبگیر به دشت رفسنجان منجر به کاهش آبدهی در پایین دست برای کشاورزان گردیده است. به‌منظور رفع مشکل ایجاد شده در خطوط لوله و در راستای حذف رسوب فوق، تحقیقات آزمایشگاهی در آزمایشگاه آب و محیط زیست امور تحقیق و توسعه انجام گرفت که نتایج به‌دست آمده با دید زیست‌محیطی و به‌منظور ایجاد کم‌ترین خسارات به خاک و پوشش گیاهی و در عین حال ارائه یک روش کاربردی و مقرون به صرفه، انجام شده است.

### منطقه مورد مطالعه

معدن مس سرچشمه به‌عنوان بزرگ‌ترین و مهم‌ترین ذخیره مس پورفیری در ایران به شمار می‌رود. این معدن با مختصات "۲۰° ۵۲' ۵۵" طول شرقی و "۴۰° ۵۶' ۲۹" در ۱۶۰ کیلومتری جنوب غرب استان کرمان و در فاصله ۵۰ کیلومتری شهرستان رفسنجان واقع شده است. به منظور استفاده مجدد از پساب کارخانه و همچنین جمع‌آوری رواناب‌های حوزه بالادست و رودخانه شور در پایین دست معدن دو سد رسوبگیر و آبی احداث شده که از ذخایر این سدها بخشی به عنوان حق‌آبه دشت رفسنجان در اختیار کشاورزان حوزه پایین دست جهت آبیاری باغات پسته قرار می‌گیرد.

فرآیند انتقال آب از سد به این اراضی، با استفاده از یک خط لوله از جنس پلی اتیلن به قطر ۱۰ اینچ و به طول تقریبی ۲۲ کیلومتر و به‌صورت زیر زمینی انجام می‌شود. بررسی دبی ورودی و خروجی خط در سال ۱۳۹۹ و مقایسه آن با مقادیر پیشین، کاهش میزان آبدهی در خروجی را نشان داد که بخشی از معضل فوق ناشی از تجمع رسوب بر دیواره داخلی لوله باشد. جهت رفع مشکل فوق، راهکار تعویض خطوط لوله به دلیل هزینه بالا و مدت زمان طولانی

خریداری شده انجام شد. نکته حایز اهمیتی که جهت محاسبه و آماده سازی غلظت‌های مختلف اندازه‌گیری و در محاسبات لحاظ گردید. به این ترتیب ۵ غلظت مختلف هیدروکسید سدیم در سه تکرار آماده گردید. سپس نمونه‌های رسوب چسبیده به لوله داخل ظروف نمونه قرار گرفت و با محلول‌های آماده شده با غلظت‌های مختلف متناسب با حجم رسوب به ظروف اضافه گردید و فرآیند رسوبزایی طی ۷۲ ساعت پایش شد. در ادامه میزان جدایش رسوب از دیواره و غلظت هیدروکسید سدیم مصرفی هر ۲۴ ساعت-ارزیابی و اندازه‌گیری شد (شکل ۱).



شکل ۱- نمونه‌های آماده شده رسوب در غلظت‌های مختلف محلول

برای آماده سازی محلول و ایجاد غلظت‌های دلخواه عملیات رقیق سازی با استفاده از هیدروکسید سدیم ۵۰ درصد هیدروکسید سدیم باید در نظر گرفته شود مربوط به دانسیته متفاوت هیدروکسید سدیم در غلظت‌های مختلف است. به‌عنوان مثال دانسیته هیدروکسید سدیم ۳۰ درصد حدود ۱٫۳ گرم بر میلی‌لیتر است که این مقدار در محاسبات لحاظ می‌گردد. در ادامه جهت اطمینان از نرمالیت هیدروکسید سدیم خریداری شده، نمونه‌ای از هیدروکسید سدیم ۵۰ درصد که ۲۰ برابر رقیق شده بود برای تعیین نرمالیت به آزمایشگاه منتقل شد و نتایج حاصل با نتایج محاسباتی مقایسه گردید. سپس نرمالیت هیدروکسید سدیم در تمام غلظت‌های مورد آزمایش در آزمایشگاه

لوله بعد از تخلیه خشک و وزن گردید و وزن رسوب باقیمانده بر دیواره اندازه‌گیری شد.

#### روش‌های ارزیابی نتایج

به منظور ارزیابی نتایج از دو فاکتور میزان حل شدگی و درصد هیدروکسید سدیم باقیمانده در محلول استفاده گردید.

#### میزان حل شدگی رسوب در حلال

جهت محاسبه فاکتور فوق وزن اولیه رسوب و وزن رسوب بعد از قرار گرفتن در مجاور حلال اندازه‌گیری شده و میزان حل شدگی مطابق رابطه (۱) محاسبه می‌گردد:

$$\text{رابطه (۱)} \quad \%S = \frac{W_i - W_s}{W_i} \times 100$$

$W_i$  = وزن رسوب اولیه

$W_s$  = وزن رسوب باقیمانده بعد از واکنش با حلال

#### سناریوی دوم-استفاده از مقادیر بهینه هیدروکسید سدیم در بخشی از لوله به طول ۱۷۳ سانتی‌متر (پایلوت آزمایشی)

به‌منظور بررسی عملکرد هیدروکسید سدیم در شرایط واقعی‌تر و صحت‌سنجی با غلظت بهینه بدست آمده از مرحله قبل، یک لوله به طول ۱۷۳ سانتی‌متر حاوی رسوب به ضخامت یک سانتی‌متر تهیه و به آزمایشگاه منتقل گردید. سپس با غلظت بهینه بدست آمده پر گردید. دمای محیط لوله متناسب با شرایط بیرون آزمایشگاه در نظر گرفته شده و لوله بعد از آب‌بندی از دو طرف، در یک شیب ملایم به مدت زمان ۷۲ ساعت قرار گرفت. در این بازه هر ۲۴ ساعت، یک نمونه جهت تیتراسیون گرفته و بعد از ۷۲ ساعت لوله جهت مشاهده نتیجه واکنش باز گردید. جهت محاسبه درصد جدا شده رسوب از جداره، محتویات داخل

S = درصد حل شدگی

### میزان سدیم هیدروکسید باقیمانده در محلول

#### حاصل از حل رسوب

در بحث استفاده از هیدروکسید سدیم به عنوان رسوب‌زدا فاکتور مهمی که باید مورد توجه قرار گرفت، میزان باقیمانده آن در محلول نهایی جهت تصمیم‌گیری مکان تخلیه و آگاهی از میزان باقیمانده در محلول است. در واقع ثابت شدن میزان هیدروکسید سدیم باقیمانده در محلول طی زمان، نشان‌دهنده اتمام واکنش و حل شدن کامل رسوب است و میزان نرمالیت هیدروکسید سدیم باقیمانده، نشانگر شدت و ضعف محلول باقیمانده جهت ادامه واکنش و همچنین میزان خطر پذیری جهت تخلیه اولیه محیط زیست است. در پژوهش حاضر تعیین غلظت هیدروکسید سدیم باقیمانده در محلول، به روش تیتراسیون و با استفاده از محلول اسید کلریدریک با غلظت ۱/۱۷۶ نرمال انجام گرفت. شایان ذکر است در تمام نمونه‌ها طی بازه زمانی ۲۴ ساعت مقدار هیدروکسید سدیم مصرف شده به روش تیتراسیون تعیین گردید.

#### روش تیتراسیون

برای تعیین غلظت مقدار هیدروکسید سدیم باقیمانده، از تیتراسیون اسیدکلریدریک استفاده شد. با توجه به غلظت بالای هیدروکسید سدیم و مصرف زیاد اسید، رقیق‌سازی نمونه هیدروکسید سدیم تا ۲۰ برابر انجام شد. به این منظور نخست مقدار پنج میلی‌لیتر از محلول هیدروکسید سدیم را با پی‌پت برداشت و در بالن ژوژه ۱۰۰ میلی‌لیتر ریخته شد و سپس با آب مقطر یا آب

معمولی (در صورت عدم داشتن تاثیر بر نتیجه) به حجم رسانده شد. به عبارت دیگر با این کار نمونه محلول هیدروکسید سدیم ۲۰ برابر رقیق گردید. پس از رقیق‌سازی و هم زدن محتویات بالن، مقدار پنج میلی‌لیتر با پی‌پت برداشت و به درون بشر ریخته شد. به بشر چند قطره محلول شناساگر فنل فتالئین افزوده و سپس با محلول اسیدکلریدریک با غلظت مشخص تیتراسیون انجام گردید. تیتراژ کردن تا بی‌رنگ شدن محلول که نشان‌دهنده پایان تیتراسیون است، ادامه یافت. سپس مقدار اسیدکلریدریک مصرف شده یادداشت شد (شکل ۲). با استفاده از رابطه ۲ غلظت هیدروکسید سدیم محاسبه می‌شود.

$$N_1 \times V_1 = N_2 \times V_2$$

$N_1$  نرمالیت هیدروکسید،  $V_1$  حجم اسید،  $N_2$  غلظت هیدروکسید سدیم که مجهول است و  $V_2$  حجم هیدروکسید سدیم می‌باشد.

با توجه به اینکه محلول هیدروکسید سدیم ۲۰ برابر رقیق شد، نتیجه به دست آمده برای غلظت هیدروکسید سدیم در ضریب رقت (۲۰) ضرب گردید. میزان هیدروکسید سدیم مصرفی نیز از رابطه ۳ محاسبه گردید.

$$\%n = \frac{N_i - N_f}{N_i} \times 100$$

$\%n$  = میزان درصد هیدروکسید سدیم مصرفی در

پایان هر مرحله واکنش

$N_i$  = نرمالیت اولیه هیدروکسید سدیم در غلظت‌های

مختلف

$N_f$  = نرمالیت هیدروکسید سدیم بعد از انجام واکنش

در غلظت‌های مختلف



شکل ۲- نمونه‌گیری از محلول جهت انجام تیتراسیون انجام آزمایش‌های لازم برای رها سازی رسوب و محلول شستشو به محیط زیست

لیچینگ وجود دارد و از طرفی جهت افزایش PH اسیدی آب جهت استفاده مجدد در مدار به طور مرتب آهک به آب اضافه می‌گردد که این امر منجر به تشکیل سولفات کلسیم دو آب یا ژپس مطابق با واکنش (۲) می‌گردد.

$$\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{CaCO}_3 = \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$$

واکنش (۲)

در ادامه سولفات کلسیم که یک ماده با حلالیت بسیار پایین یا نامحلول در آب بوده، به مرور زمان بر سطح داخلی لوله نشست کرده و منجر به ایجاد یک ترکیب سخت و نامحلول می‌گردد و به تدریج با کاهش قطر داخلی لوله می‌تواند منجر به کاهش دبی پایین دست گردد.

نتایج حاصل از نرمالیزه هیدروکسید سدیم در

به‌منظور بررسی جنس و ماهیت رسوبات ناشی از واکنش سولفات کلسیم و هیدروکسید سدیم، محلول نهایی داخل لوله بعد از کنده شدن رسوب از صافی عبور داده شد و بعد از خشک شدن مقداری از رسوب به آزمایشگاه برای انجام آنالیز XRD و XRF منتقل شد.

#### نتایج و بحث نتایج آنالیز رسوب

نتایج اولیه آنالیز نمونه رسوب در لوله‌ها نشان داد عمده ترکیب موجود در این رسوبات سولفات گچ دوآبه ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) موسوم به ژپس است. تشکیل رسوب ژپس با توجه به ترکیب موجود در آب پشت سد یک امر طبیعی است. چرا که در ترکیب آب موجود در سد از یک طرف، مقادیری اسید سولفوریک مورد استفاده در کارخانه



برابر رقیق شده بود برای تعیین نرمالیت به آزمایشگاه مرکزی مجتمع مس سرچشمه منتقل شد. نتایج این آنالیز در جدول (۱) آورده شده است. مقدار بدست آمده نرمالیت هیدروکسید سدیم ۵۰ درصد در آزمایشگاه ۱۸/۲۰ تخمین زده شد.

**غلظت های مختلف و مقایسه آن با میزان نرمالیت محاسباتی**

جهت اطمینان از نرمالیت هیدروکسید سدیم ۵۰ درصد خریداری شده، نمونه‌ای از هیدروکسید سدیم که ۲۰

جدول ۱- نتیجه مربوط به نرمالیت هیدروکسید سدیم مایع ۵۰ درصد

| نرمالیت واقعی | نرمالیت حاصل از آزمایش | نمونه                |
|---------------|------------------------|----------------------|
| N*20          | N                      |                      |
| NaOH          | NaOH                   |                      |
| 18.20         | 0.91                   | محلول هیدروکسید سدیم |

هیدروکسید سدیم ۵۰ درصد مطابق با رابطه ۴ محاسبه گردید

از طرفی با توجه به اینکه مولاریته هیدروکسید سدیم برابر با نرمالیت آن می‌باشد، مقدار محاسباتی نرمالیت

$$\frac{500gr(NaOH)}{1000gr(Solution)} \times \frac{1.5gr}{1cm^3} \times \frac{1000cm^3}{1li} \times \frac{1mol}{40gr} = 18.75mol/lit \quad \text{رابطه (۴)}$$

میزان هیدروکسید سدیم مصرفی در محلول قرار گرفت. جدول ۲ نتایج نرمالیت غلظت های مختلف هیدروکسید سدیم را نشان می دهد.

همان‌طور که مشاهده می‌شود نتیجه آنالیز نرمالیت هیدروکسید سدیم ۵۰ درصد حدود ۱۸/۲۰ است که این مقدار موید مقدار محاسبه شده با رابطه (۳) است که معادل ۱۸/۷۵ می‌باشد. با توجه به نتایج بدست آمده، نرمالیت هیدروکسید سدیم در غلظت های مختلف نیز در آزمایشگاه سنجیده و مقادیر بدست آمده مبنای محاسبات

جدول ۲- نتیجه مربوط به نرمالیت هیدروکسید سدیم در غلظت های مختلف

| سناریو | غلظت (%) | نرمالیت (mol/lit) |
|--------|----------|-------------------|
| ۱      | ۳۰       | ۱۱/۲۵             |
| ۲      | ۳۵       | ۱۳/۱۳             |
| ۳      | ۴۰       | ۱۵/۰۰             |
| ۴      | ۴۵       | ۱۶/۸۸             |
| ۵      | ۵۰       | ۱۸/۷۵             |

جدول ۳ و شکل ۳ نتایج حاصل از سناریوی اول عملکرد هیدروکسید سدیم در غلظت‌های مختلف را نمایش می‌دهد.

**نتایج حاصل از بهینه سازی هیدروکسید سدیم در سناریوی اول**

جدول ۳- مقادیر به دست آمده از غلظت‌های وزنی هیدروکسید سدیم مایع در مجاور رسوب

| سناریوی ۳۰٪ | ضخامت رسوب بعد از ۲۴ ساعت | نمونه | میزان مصرف اسید ۲۴ ساعت |                                | نرمالیت هیدروکسید سدیم ۲۴ ساعت |                         | درصد هیدروکسید سدیم مصرفی      |                           | میزان مصرف اسید ۴۸ ساعت |                                | نرمالیت هیدروکسید سدیم ۴۸ ساعت |      | درصد هیدروکسید سدیم مصرفی |      |
|-------------|---------------------------|-------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|---------------------------|------|
|             |                           |       | میزان مصرف اسید ۲۴ ساعت | نرمالیت هیدروکسید سدیم ۲۴ ساعت | درصد هیدروکسید سدیم مصرفی      | میزان مصرف اسید ۴۸ ساعت | نرمالیت هیدروکسید سدیم ۴۸ ساعت | درصد هیدروکسید سدیم مصرفی | میزان مصرف اسید ۷۲ ساعت | نرمالیت هیدروکسید سدیم ۷۲ ساعت | درصد هیدروکسید سدیم مصرفی      |      |                           |      |
| ۲۰          | ۰/۵                       | ۱     | ۴۴                      | ۱۰/۳                           | ۸/۰                            | ۴۶                      | ۱۰/۸                           | ۳/۸                       | ۴۲                      | ۹/۹                            | ۱۲/۲                           | ۱۲/۲ | ۱۲/۲                      | ۱۲/۲ |
|             | ۰/۶                       | ۲     | ۴۶                      | ۱۰/۸                           | ۳/۸                            | ۴۲                      | ۹/۹                            | ۱۲/۲                      | ۴۰                      | ۹/۴                            | ۱۶/۴                           | ۱۶/۴ | ۱۶/۴                      |      |
|             | ۰/۵                       | ۳     | ۴۴                      | ۱۰/۳                           | ۸/۰                            | ۴۴                      | ۱۰/۳                           | ۸/۰                       | ۴۴                      | ۱۰/۳                           | ۸/۰                            | ۸/۰  | ۸/۰                       |      |
| Ave         |                           |       |                         |                                | ۶/۶                            |                         |                                | ۸/۰                       |                         |                                | ۱۲/۲                           |      |                           |      |
| SD          |                           |       |                         |                                | ۲/۴۱                           |                         |                                | ۴/۱۸                      |                         |                                | ۴/۱۸                           |      | ۴/۱۸                      |      |
| ۲۵          | ۰/۳                       | ۱     | ۵۲                      | ۱۲/۲                           | ۶/۸                            | ۵۰                      | ۱۱/۸                           | ۱۰/۴                      | ۴۸                      | ۱۱/۳                           | ۱۴/۰                           | ۱۴/۰ | ۱۴/۰                      |      |
|             | ۰/۳                       | ۲     | ۵۲                      | ۱۲/۲                           | ۶/۸                            | ۵۰                      | ۱۱/۸                           | ۱۰/۴                      | ۵۰                      | ۱۱/۸                           | ۱۰/۴                           | ۱۰/۴ | ۱۰/۴                      |      |
|             | ۰/۴                       | ۳     | ۵۲                      | ۱۲/۲                           | ۶/۸                            | ۵۰                      | ۱۱/۸                           | ۱۰/۴                      | ۵۰                      | ۱۱/۸                           | ۱۰/۴                           | ۱۰/۴ | ۱۰/۴                      |      |
| Ave         |                           |       |                         |                                | ۶/۸                            |                         |                                | ۱۰/۴                      |                         | ۱۱/۶                           |                                | ۱۱/۶ |                           |      |
| SD          |                           |       |                         |                                | ۰/۰                            |                         |                                | ۰/۰                       |                         | ۲/۰۷                           |                                | ۲/۰۷ |                           |      |
| ۴۰          | ۰/۲۵                      | ۱     | ۵۴                      | ۱۲/۷                           | ۱۵/۳                           | ۵۴                      | ۱۲/۷                           | ۱۵/۳                      | ۵۰                      | ۱۱/۸                           | ۲۱/۶                           | ۲۱/۶ | ۲۱/۶                      |      |
|             | ۰/۲                       | ۲     | ۵۸                      | ۱۳/۶                           | ۹/۱                            | ۵۴                      | ۱۲/۷                           | ۱۵/۳                      | ۵۲                      | ۱۲/۲                           | ۱۸/۵                           | ۱۸/۵ | ۱۸/۵                      |      |
|             | ۰/۳                       | ۳     | ۶۰                      | ۱۴/۱                           | ۵/۹                            | ۵۸                      | ۱۳/۶                           | ۹/۱                       | ۵۴                      | ۱۲/۷                           | ۱۵/۳                           | ۱۵/۳ | ۱۵/۳                      |      |
| Ave         |                           |       |                         |                                | ۱۰/۱                           |                         |                                | ۱۳/۲                      |                         | ۱۸/۵                           |                                | ۱۸/۵ |                           |      |
| SD          |                           |       |                         |                                | ۴/۷۹                           |                         |                                | ۳/۶۲                      |                         | ۳/۱۴                           |                                | ۳/۱۴ |                           |      |
| ۴۵          | ۰/۷                       | ۱     | ۶۴                      | ۱۵/۱                           | ۱۰/۸                           | ۶۴                      | ۱۵/۱                           | ۱۰/۸                      | ۶۶                      | ۱۵/۵                           | ۸/۰                            | ۸/۰  | ۸/۰                       |      |
|             | ۰/۷                       | ۲     | ۶۴                      | ۱۵/۱                           | ۱۰/۸                           | ۶۶                      | ۱۵/۵                           | ۸/۰                       | ۶۴                      | ۱۵/۱                           | ۱۰/۸                           | ۱۰/۸ | ۱۰/۸                      |      |
|             | ۰/۷                       | ۳     | ۶۴                      | ۱۵/۱                           | ۱۰/۸                           | ۶۸                      | ۱۶/۰                           | ۵/۲                       | ۶۴                      | ۱۵/۱                           | ۱۰/۸                           | ۱۰/۸ | ۱۰/۸                      |      |
| Ave         |                           |       |                         |                                | ۱۰/۸                           |                         |                                | ۸/۰                       |                         | ۹/۹                            |                                | ۹/۹  |                           |      |
| SD          |                           |       |                         |                                | ۰/۰                            |                         |                                | ۲/۷۹                      |                         | ۱/۶۱                           |                                | ۱/۶۱ |                           |      |
| ۵۰          | ۰/۶                       | ۱     | ۷۰                      | ۱۶/۵                           | ۱۲/۲                           | ۷۰                      | ۱۶/۵                           | ۱۲/۲                      | ۶۲                      | ۱۴/۶                           | ۲۲/۲                           | ۲۲/۲ | ۲۲/۲                      |      |
|             | ۰/۶                       | ۲     | ۷۲                      | ۱۶/۹                           | ۹/۷                            | ۷۰                      | ۱۶/۵                           | ۱۲/۲                      | ۶۴                      | ۱۵/۱                           | ۱۹/۷                           | ۱۹/۷ | ۱۹/۷                      |      |
|             | ۰/۶                       | ۳     | ۷۰                      | ۱۶/۵                           | ۱۲/۲                           | ۷۲                      | ۱۶/۹                           | ۹/۷                       | ۶۲                      | ۱۴/۶                           | ۲۲/۲                           | ۲۲/۲ | ۲۲/۲                      |      |
| Ave         |                           |       |                         |                                | ۱۱/۴                           |                         |                                | ۱۱/۴                      |                         | ۲۱/۴                           |                                | ۲۱/۴ |                           |      |
| SD          |                           |       |                         |                                | ۱/۴۵                           |                         |                                | ۱/۴۵                      |                         | ۱/۴۵                           |                                | ۱/۴۵ |                           |      |

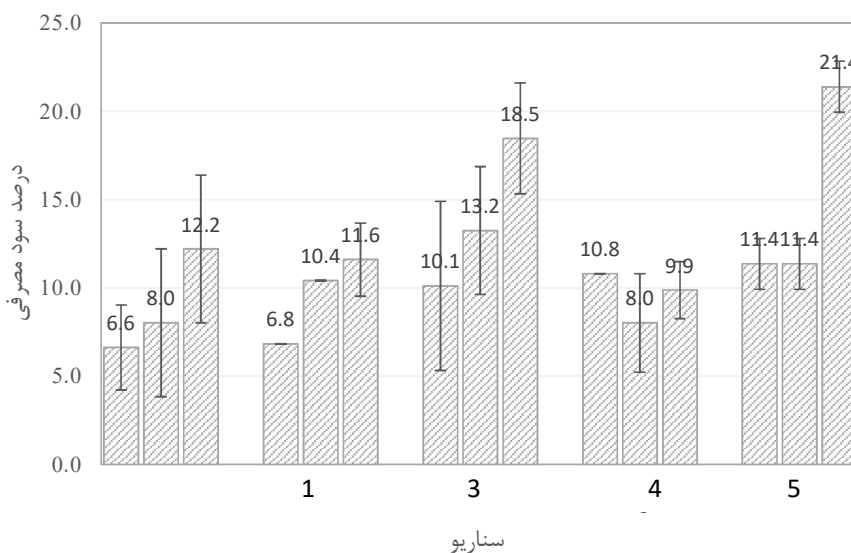
واکنش بیش‌تر از غلظت‌های ۴۵ و ۵۰ درصد گزارش شد که این نتیجه به وضوح با مشاهده میزان ضخامت باقیمانده رسوب بر روی دیواره بعد از گذشت ۲۴ ساعت نیز مشهود است. متوسط ضخامت باقیمانده رسوب در غلظت‌های ۳۰،

آنچه از نتایج عینی این سناریو نیز مشاهده شد، کنده شدن کامل رسوب از دیواره لوله بعد از ۷۲ ساعت غوطه‌وری در محلول رسوب‌زدا بود. اما میزان جدا شدن رسوب از دیواره در غلظت‌های ۳۰، ۳۵ و ۴۰ درصد در ۲۴ ساعت اول

است، مناسب‌ترین غلظتی که می‌تواند با اطمینان بالا حاکی از گنده شدن کامل رسوب طی بازه کم‌تر از ۷۲ ساعت باشد و از طرفی از لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشد، غلظت ۳۰ تا ۳۵ درصد وزنی از هیدروکسید سدیم می‌باشد. لذا این غلظت به دلیل جداسازی مناسب رسوب در تمام مراحل و سناریوها از یک طرف و توجیه اقتصادی از طرف دیگر، نسبت به غلظت‌های پایین‌تر و بالاتر به‌عنوان غلظت بهینه تعیین می‌گردد.

همان‌طور که در شکل ۳ نیز مشاهده می‌شود درصد هیدروکسید سدیم مصرفی در نمونه‌ها نیز مقادیر متفاوتی گزارش شده است به طوری که این مقدار با توجه به مقادیر به‌دست آمده از جدول (۳) محاسبه و مقدار آن به طور متوسط در نمونه (۱) بین ۶/۶ تا ۱۲/۲، در نمونه (۲) بین ۶/۸ تا ۱۱/۶، در نمونه (۳) بین ۱۰/۱ تا ۱۸/۵، در نمونه (۴) بین ۸ تا ۱۰/۸ و در نمونه (۵) بین ۱۱/۴ تا ۲۱/۴ به دست آمد که این مقادیر در اکثر موارد با گذشت زمان روند صعودی داشته و کاملاً منطقی می‌باشد.

۰/۷، ۰/۲۵، ۰/۳۳، ۰/۵۳ درصد به ترتیب ۴۵ و ۵۰ درصد به ترتیب ۰/۶ و ۰/۳۵، ۴۰ و ۳۵ درصد تاثیر هیدروکسید سدیم بر گنده شدن رسوب بیش‌تر از غلظت‌های ۴۵ و ۵۰ درصد وزنی است که این عامل می‌تواند به دلیل ویسکوزیته بالای هیدروکسید سدیم در غلظت‌های بالا و کاهش میزان نفوذ محلول به درون رسوب باشد. در ادامه، بعد از گذشت ۴۸ ساعت رسوب لوله‌های غوطه ور در محلول قلیایی رسوب‌زدا با غلظت‌های ۳۵ و ۴۰ درصد به‌صورت کامل (از دیواره جدا) گردید. در حالی که در نمونه‌های ۳۰ درصد لایه بسیار نازکی از رسوب و در غلظت ۴۵ و ۵۰ درصد میزان بیشتری رسوب باقی ماند که با توجه به غلظت کم‌تر هیدروکسید سدیم در نمونه ۳۰ درصد و ویسکوزیته بالا در نمونه‌های ۴۵ و ۵۰ درصد و عدم سهولت نفوذ هیدروکسید سدیم به درون بافت رسوب این نتیجه قابل توجیه است. به هر حال بعد از گذشت ۷۲ ساعت کل رسوب در تمام ظروف نمونه از جداره لوله جدا گردید. لذا با توجه به اینکه در تمام غلظت‌ها بعد از گذشت ۷۲ ساعت جدایی کامل رسوب صورت گرفته



شکل ۳- مقادیر متوسط درصد سود مصرفی در غلظت‌های مختلف

طی ۷۲ ساعت اتفاق افتاده که معادل ۲۱٪ است. در حالی- که در بقیه غلظت‌ها، مقادیر کم‌تر از این مقدار بوده و آنچه مسلم است باقیماندن بیش از ۸۰ درصد هیدروکسید سدیم

آنچه از مقادیر گزارش شده استنباط می‌شود، بیش‌ترین مصرف هیدروکسید سدیم در غلظت ۵۰ درصد و

به طول ۱۷۳ سانتیمتر تزریق گردید. با توجه به موجودیت سود ۵۰ درصد در آزمایشگاه جهت آماده سازی غلظت ۳۱ درصد هیدروکسید سدیم میزان حجم سود و آب جهت تهیه ۱۰۰۰ لیتر محلول ۳۱٪ از رابطه (۵) محاسبه گردید.

$$N_1V_1 = N_2V_2$$

$$18.75 \times X = 11.62 \times 1000$$

$$X = 620NaOH \text{ and } 380H_2O$$

مطابق رابطه (۵) جهت رقیق سازی هیدروکسید سدیم ۵۰ درصد به هیدروکسید سدیم ۳۱ درصد، حجم آب مورد نیاز ۳۸۰ سی سی و حجم سود ۵۰ درصد ۶۲۰ سی سی برآورد گردید.

مقادیر جدول ۴ نیز نتایج حاصل از انجام واکنش در لوله را نشان می دهد. مطابق با نتایج بدست آمده حجم قابل توجه رسوب که حدود ۷۸ درصد است از جداره لوله جدا شده و تنها لایه نازکی از رسوب که معادل ۱۳ درصد است بر دیواره لوله باقیمانده است.

در تمام غلظت های بکار برده شده است که این میزان قابل توجه می باشد و این نکته بسیار مهم و ضروری است که قبل از تخلیه محلول رسوب، تمهیدات لازم از قبیل خنثی سازی با اسید بر روی آن انجام شده و سپس در شرایط و مکان ایمن تخلیه گردد.

### نتایج حاصل از عملکرد هیدروکسید سدیم بهینه

#### بر روی رسوب داخل لوله در سناریوی دوم

همانطور که قبلا نیز بیان شد دو غلظت هیدروکسید سدیم موجود در بازار جهت فاز اجرایی ۵۰ و ۳۱ درصد می باشد. از طرفی غلظت بهینه سود در سناریوی قبل ۳۵ درصد تعیین گردید. با توجه به اینکه غلظت ۳۱ درصد وزنی در بازار موجود بوده و نیاز به تجهیزات رقیق سازی ۵۰ درصد به ۳۵ درصد را در شرایط اجرایی مرتفع می سازد و در کاهش هزینه ها موثر بوده و از طرفی غلظت ۳۰ درصد نیز از عملکرد قابل قبولی در جدایش رسوب از دیواره برخوردار بوده است لذا در این سناریو به منظور بررسی ساز کار محلول هیدروکسید سدیم ۳۱ درصد، این محلول به لوله ای

جدول ۴- نتایج حاصل از عملکرد هیدروکسید سدیم مایع ۳۱٪ بر روی رسوب داخل لوله

| طول لوله (cm) | وزن لوله با رسوب (kg) | وزن کل (kg) | وزن لوله با رسوب باقیمانده بعد از ۷۲ ساعت (kg) | وزن رسوب طی ۷۲ ساعت دوم (%) | درصد رسوب باقیمانده در لوله طی ۷۲ ساعت (%) |
|---------------|-----------------------|-------------|--|-----------------------------|--|
| ۱۷۳           | ۱۸٫۴۸                 | ۱۲٫۹        | ۱۳٫۶۳  | ۴٫۸۵                        | ۸۷٪  |

در سناریوی دوم است. به عبارت دیگر قطر دو لوله در دو سناریو یکسان و تنها طول آنها متفاوت است. با توجه به اینکه مقاطع با طول ۱۰ سانتی متری در سناریوی اول که داخل ظروف نمونه قرار گرفته، ابتدا و انتهای مقطع آن باز می باشد و همچنین بین دیواره خارجی لوله با ظروف نمونه نیز فضایی وجود دارد لذا حجم آب درون ظرف نمونه بیش تر از حجم آبی است که می توانست فقط در درون لوله قرار گیرد، بنابراین در این شرایط در واقع حجم محلول بیش تری در ازای هر سانتی متر رسوب وجود خواهد داشت و به دنبال آن عملکرد بهتری در جدا شدن رسوب خواهد داشت. در حالی که در لوله مورد آزمایش در سناریوی دوم به دلیل اینکه ابتدا و انتهای لوله کاملا مسدود است حجم

مقایسه نتایج استفاده از سود ۳۵ درصد در سناریوی اول و استفاده از سود ۳۱ درصد در سناریوی دوم نشان می دهد که محلول ۳۵ درصد در فاز آزمایشگاهی در سناریوی اول به خوبی طی ۷۲ ساعت منجر به جدا شدن کامل رسوب از دیواره لوله گردیده است در حالی که در سناریوی دوم اندکی از رسوب بر دیواره لوله باقیمانده است که این میزان تنها ۱۳٪ از رسوب کل لوله می باشد.

نکته حائز اهمیت که منجر به این اختلاف در دو سناریو شده بیشتر از اینکه به دلیل اختلاف ۴ درصدی غلظت سود باشد مربوط به حجم آب قرار گرفته شده در مجاور رسوب است. در سناریوی اول حجم آبی که در مجاور هر واحد از سطح مقطع رسوب قرار دارد تقریباً دو برابر میزان حجم آب

پیش‌بینی می‌گردد هیدروکسید سدیم مایع در خطوط انتقال آب ۱۰ اینچی عملکرد به نسبت بهتری نسبت به لوله‌های ۴ اینچی که آزمایش بر روی آنها انجام گرفته داشته باشد.

در ادامه نتایج مربوط به تیتراسیون هیدروکسید سدیم مصرفی در سناریوی دوم در جدول (۵) آورده شده است.

هیدروکسید سدیم مایع فقط متناسب با فضای داخلی لوله بوده و بالتبع میزان محلول در ازای هر سانتی‌متر رسوب از سناریوی قبل کم‌تر است. همین عامل نقش به‌سزایی در میزان جدا شدن رسوب خواهد داشت. اما با توجه به اینکه خط لوله‌های انتقال آب از سد به رفسنجان حدود ۱۰ اینچ قطر دارد و حجم لوله ۱۰ اینچی نسبت به حجم لوله ۴ اینچی (۱۱ سانتی‌متری) حدود پنج برابر است بنابراین

جدول ۵- نتایج حاصل از هیدروکسید سدیم مصرفی در لوله مورد استفاده در سناریوی دوم

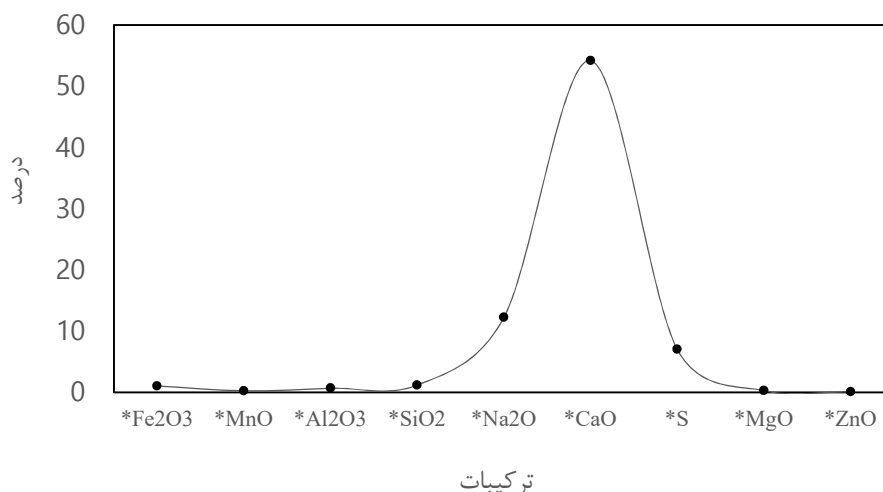
| زمان | میزان اسید ۲۴ ساعته | نرمالیت هیدروکسید سدیم | درصد هیدروکسید سدیم مصرفی (%) |
|------|---------------------|------------------------|-------------------------------|
| ۲۴   | ۴۲                  | ۸٫۲                    | ۹٫۲                           |
| ۴۸   | ۵۴                  | ۱۰٫۵۴                  | ۲۹٫۴                          |
| ۷۲   | ۳۰                  | ۵٫۸۶                   | ۵۰                            |

#### نتایج XRF و XRD محلول باقیمانده از پایان

##### واکنش به منظور رهاسازی در محیط زیست

به‌منظور بررسی جنس و ماهیت رسوبات ناشی از واکنش سولفات کلسیم و هیدروکسید سدیم، رسوب حاصل از محلول نهایی داخل لوله بعد از خشک شدن مورد آنالیز XRD و XRF قرار گرفت. نتایج مربوط به دو آنالیز در جدول ۶ و شکل ۴ آورده شده است.

نتایج مربوط به جدول (۵) نشان می‌دهد با گذشت ۷۲ ساعت از ابتدای واکنش حدود ۵۰ درصد هیدروکسید سدیم در محلول مصرف و ۵۰ درصد آن باقی مانده است که این نتیجه از سود مصرفی با توجه به قرارگیری حجم کمتر سود داخل لوله در ازای هر سانتیمتر مربع رسوب در سناریوی دوم نسبت به سناریوی اول قابل توجیه است.



شکل ۴- نتایج حاصل از آنالیز XRF رسوب کنده شده از دیواره لوله با محلول هیدروکسید سدیم

می‌دهد درصد غالب ترکیب را در درجه اول اکسید کلسیم

نتایج حاصل از XRF نمونه رسوب کنده شده، نشان

و سپس اکسید سدیم و گوگرد تشکیل می‌دهد. همچنین مقدار افت حرارتی (LOI) ترکیب که ناشی از مواد فرار از قبیل آب و گازها می‌باشد حدود  $22.76\%$  می‌باشد.

جدول ۶- نتایج حاصل از آنالیز XRD نمونه رسوب کنده شده از دیواره لوله با محلول هیدروکسید سدیم

| شماره   | ترکیبات موجود در نمونه                  | درصد نیمه کمی |
|---------|---|---------------|
| SAMPLE1 | Thenardite<br>$\text{Na}_2\text{SO}_4$  | 31.1          |
|         | Portlandite<br>$\text{Ca}(\text{OH})_2$ | 65.8          |
|         | Amorph                                  | 3.1           |

بنابراین ماده فوق نباید در شرایطی که خنثی نشده و یا رقیق نشده وارد آب یا زهکشی‌ها شده و چنانچه خنثی نگردد اکیداً توصیه می‌شود در محیط زیست رها نگردد. با توجه به مطالب بیان شده لازم است مواد جدا شده از دیواره لوله در مرحله نخست در محیط زیست رها نگردد و در موارد ضروری ابتدا محلول رقیق شده و بعد از خنثی سازی با توجه به شرایط محیطی رهاسازی انجام گیرد.

### نتیجه‌گیری

با توجه به هدف پژوهش حاضر که رسوب‌زدایی از مسیر خط لوله انتقال آب از سد رسوبگیر به دشت رفسنجان می‌باشد و همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی سناریوهای مختلف در شرایط آزمایشگاهی، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مواد قلیا و محیط قلیایی جهت رسوب‌زدایی سولفات کلسیم دوآبه یک محیط مناسب می‌باشد. به‌طوری که با بررسی میزان درجه نرم شدگی و کاهش استقامت رسوب و همچنین میزان خردشدگی آن در مجاور محلول‌های قلیایی، به وضوح تاثیر و کارایی استفاده از سدیم هیدروکسید نسبت به اثبات رسید.

با توجه به عملکرد نتایج در سناریوهای مختلف و موجودیت هیدروکسید سدیم با غلظت حداقلی ۳۱ درصد وزنی به‌عنوان غلظت بهینه و مناسب از دو جنبه عملکرد و توجیه اقتصادی در شرایط اجرایی پیشنهاد می‌گردد. جهت عملیات اجرایی رسوب‌زدایی از مسیر خطوط لوله پیشنهاد

نتایج آنالیز XRD نمونه رسوب بعد از حل شدن نیز نشان می‌دهد عمده ماده تشکیل شده رسوب باقیمانده سولفات سدیم و هیدروکسید کلسیم است که به ترتیب با ۳۱ و ۶۶ درصد رسوب را شامل می‌شود.

۱- سدیم سولفات ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )، نمک سدیم سولفوریک اسید است که در صورتی که بی‌آب باشد کریستالی سفید بوده که آن را تناردیت نیز می‌نامند. سدیم سولفات یکی از عمومی‌ترین مواد بسیاری از آب‌های معدنی همانند آب دریا است، همچنین سدیم سولفات در ریزش‌های جوی وجود داشته و یکی از اصلی‌ترین محلول‌های موجود در برف و باران می‌باشد. بسیاری از دریاچه‌های شور در سرتاسر دنیا نیز مقادیر مختلفی سولفات سدیم دارند. این ماده از نظر شیمیایی بسیار پایدار است که البته به‌عنوان یک ماده معدنی در طبیعت نیز یافت می‌شود. سولفات سدیم در رده مواد شیمیایی غیرسمی در شرایط عادی قرار دارد اما اکیداً توصیه می‌گردد این ماده شیمیایی وارد محیط زیست نگردد زیرا در محیط زیست باقی می‌ماند.

۲- کلسیم هیدروکسید نیز یک ترکیب شیمیایی با فرمول  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  و مشابه کلسیم اکسید است. از این ترکیب در ساخت و ساز به‌عنوان مصالح با نام آهک شکفته استفاده می‌شود. هیدروکسید کلسیم یک ترکیب معدنی است که به‌دلیل داشتن ضریب انحلال‌پذیری پایین از نظر شیمیایی تقریباً در آب نامحلول است. با این وجود با فراهم کردن شرایط لازم، کلسیم هیدروکسید (پورتلندیت) در آب خالص حل شده و محلولی با PH برابر ۱۲/۴ ایجاد می‌کند.

می‌باشد، به طور حتم انجام گیرد. به این منظور لازمه مدیریت تخلیه رسوب باقیمانده انجام آزمایش تیتراسیون محلول بعد از انجام واکنش با هدف آگاهی از میزان هیدروکسید سدیم مصرفی و باقیمانده در محلول است.

#### سپاسگزاری

این مطالعه در قالب طرح پژوهشی مصوب و با حمایت مجتمع مس سرچشمه انجام گرفته است. نگارندگان بر خود لازم می‌دانند از واحدهای مختلف مجتمع از جمله امور تحقیقات و توسعه بخش آب و محیط زیست و طرح جامع آب که در انجام این پروژه مساعدت و همکاری لازم را به عمل آوردند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایند.

می‌گردد خطوط لوله کیلومتر به کیلومتر از زمین خارج گردد تا عملیات رسوب‌زدایی با محلول رسوب‌دای سدیم هیدروکسید ۳۱ درصد انجام گیرد. به این منظور با نصب و بستن شیر فلکه‌های موقت در ابتدا و انتهای خطوط جدا شده، محلول پیشنهادی به مدت ۷۲ ساعت به داخل لوله‌ها شارژ و سپس تحت حداکثر فشار ممکن جریان، رسوب حل شده آبشویی گردد. با توجه به آنالیز نتایج رسوب کنده شده و اهمیت شرایط ایمنی محیط زیست، توصیه می‌گردد بعد از اتمام واکنش حتی المقدور رسوب باقیمانده به محیط تخلیه نگردد ولی در صورت ضرورت به‌خصوص در نواحی صعب العبور عملیات خنثی سازی محلول باقیمانده هیدروکسید سدیم که به شدت قلیایی بوده و دارای pH بالا

## منابع

- Azari Nazemi A S., Kavandi B., Rostgar A. 2016. Investigating the corrosion and sedimentation potential of drinking water sources in Shahrood using sustainability indicators. *Journal of Sabzevar University of Medical Sciences*, 22(6), pp. 944-954. (In Persian)
- Bijani M., Khamechi A., 2019. Investigating and predicting the potential of corrosiveness and sedimentation in the wastewater transfer pipelines and brain pipes of the wastewater injection well of Veh Veh Desalination Unit. *Oil Research*, 29(3-98), pp. 119-106. (In Persian)
- Khamechi A., Dolat Yari A., Bijani M. 2020. Presenting a method of predicting the formation of mineral sediments related to changes in temperature and pressure of the production well using marching algorithm: a case study of one of the oil wells in the southwest of Iran. *Oil Research*, 30(5-99), pp. 16-29. (In Persian)
- Rahsepar S., Rezaei M., Shahnazari A., Khaledin M.R., Furqani A. 2019. Water quality in the central Gilan region from the point of view of chemical clogging of drippers. The first national conference on coastal land water resources management, Department of Water Engineering, Sari University of Agricultural Sciences and Natural Resources. (In Persian)
- Zamanian M., Fatahi Nafchi R.A. 2014. Comparison of the quality characteristics of water and chemical sediments causing blockage of drippers in drip irrigation systems of the country. *Scientific Research Journal of Irrigation and Water Engineering of Iran*. 22;4(3), pp.64-75. (In Persian)
- TaherPoor kalantari, M.R. 2016. Investigating the causes of outlet clogging in drip irrigation and its relationship with water quality in Rafsanjan and Jahrom regions. Master's Thesis, Department of Irrigation and Development Engineering, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University. (In Persian)
- Kardan Moghadam H., Akbarpour A., Hosseini Bejd s., Rahimzadeh Kivi. 2016. Optimization of sediment removal process in water supply lines (Case study: Aqueduct of Esfazar village-Serbisheh city. *Water and Wastewater Journal*, 27(1), pp.93-96. (In Persian)
- Mazloumi S., Heydari S.A., Mohovi A.H., Nouri Sepehr M., Khodayari M. 2013. Predicting and measuring the amount of deposition in polyethylene pipes using stability and corrosion tests and providing effective solutions. *Journal of health and health*, 4(2), pp.156-164. (In Persian)
- Asian Development Bank. 2006. United Nations Development Programme, United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Social Commission for Asia and the Pacific and World Health Organization. *Asia water watch 2015: Are Countries in Asia on Track to Meet Target 10 of the Millennium Development Goals?* Philippines, World Health Organization, pp17-23.
- Bozkurt S., Ozekici B., 2006. The effects of fertigation managements on clogging of in-line emitters. *Journal of Applied Sciences*, 6(15), pp. 3026-3034
- Dehghani M., Tex F., Zamanian Z. 2010. Assessment of the Potential of Scale Formation and Corrosivity of Tap Water Resources and the Network Distribution System in Shiraz, South Iran. *Pakistan Journal*, 1;13(2), pp.88-92.
- Goodrich J. A., Lykins B.W., Haught R.C., Li S.Y. 1999. Providing Safe Drinking Water in Small Systems. In: *Bag Filtration for Small Systems*. Washington DC: Lewis Publisher, pp.265-272.
- Hills D. J., Nawar F M., Waller P. M. 1989. Effects of chemical clogging on drip-tape irrigation uniformity. *Transactions of ASAE*, 32(4), pp.1202-1206.
- Liu H., Huang G. 2008. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. *Agricultural Water Management*, 96(5), pp. 745-756.
- Lowental R., Morison I., Wentzel M., 2004. Control of corrosion and aggresion in drinking water system. *Water Science & Technology*, 49(2), pp.9-18.
- Pitts D.J., Hamman D.Z., Smajstrla A.G.1990. Causesand Prevention of Emitter Plogging in Microirrigation Systems", University of florida. *Bulletin*, 258.
- Silva P.F.D., Matos R.M.D., Lima S.C.D., Dantas J., Lima. V.L.A.D.2017. Obstruction and uniformity in drip irrigation systems by applying treated wastewater. *Revista Ceres*, 64, pp.344-350.
- Wasco J.L., Alquist F.N. 1946. Chemical Removal of Calcium Sulfate Scale. *Industrial & Engineering Chemistry*, 38(4), pp.394-397.
- Yao C., Zhang L., Wu P., Liu Y., Cai Y., and Zhou W. 2021. Clogging formation and an anti-clogging method in subsurface irrigation system with porous ceramic emitter. *Agricultural Water Management*, 1 (250), 106770.