

Targeting of water reuse in the Midrex unit of Chadormalou using pinch analysis

Mozaffar Bagheri¹, Majid Emami Meybodi^{2*}, Ruhollah Sadeghi³

¹MSc, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Ardakan, Ardakan, Iran.

²Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering and Technology, University of Ardakan, Ardakan, Iran.

³Assistant Professor Department of Chemical Engineering, Jahad Daneshgahi Institute of Higher Education (Isfahan Branch), Isfahan, Iran

Corresponding Author's E-mail: emami@ardakan.ac.ir

Received: 13 May 2026 Accepted: 24 June 2026
Revised: 18 June 2026 Published: 22 Sep. 2024



Homepage: ijwer.uoz.ac.ir

Abstract: Water savings were investigated in the Midrex unit of the Chadormaloo Mining and Industrial Complex, located in the Yazd desert region, in order to reduce fresh water consumption. The return flow of the cooling gas scrubber was selected to be 100 m³/h and the return flow of the overhead gas scrubber to be 200 m³/h. As a result, although the concentrations increase to an acceptable level, much more water can be saved than the amount returned. For example, the concentration of stream 513 increases from 70 ppm to 270 ppm. Instead, it can save up to 600 m³/h. Assuming the specified clarifier inlet flow rates, the minimum required treatment diagram is drawn. Assuming a removal ratio of 98%, if the return flow of stream 508 to stream 503, exceeds 200 m³/h, the clarifier cannot treat up to 50 ppm and is not suitable.

Keywords: Targeting Water reuse, MIDREX process, Pinch analysis, Recycle streams.

Introduction: The steel industry is a driver of economic growth in the world. The advanced Midrex technology is highly efficient in the production of sponge iron. In the Midrex process, the furnace exhaust gases contain suspended particles and gaseous pollutants that require purification (Kiventerä et al., 2016). The purification process is based on the direct reduction of iron ore with reducing gases (hydrogen and carbon monoxide); and demands a significant volume of water (Ramezani Moziraji et al., 2024).

The Chadormalu Mining and Industrial Complex, located in the desert region of Yazd province, uses Midrex technology for production (Jiang et al., 2013). Declining groundwater resources, increasing salinity of existing waters, and high costs of supplying water from distant sources are among the main problems of this unit, which highlight the need for optimal water resource management.

Optimization models can provide solutions to improve system efficiency by analyzing operational data, such as pollutant concentrations, water flow, and energy costs (Zaccara et al., 2022). Indirect approach such as energy recovery from Midrex wastewater using the Kalina cycle (Salemi et al. n.d.), increasing water productivity and reducing operational downtime by implementing Integrated Water Management Systems (IPS) (Colla et al. (n.d.)), optimizing water networks by using flow-based modeling (Zaccara et al. (2022) applied for reducing demand of water in Chadormalu Project. However, limited studies have specifically addressed the optimization of the water network using return flows and pinch analysis. In this study, the role of return flow to scrubbers in optimizing water consumption is investigated.

Methodology: Operating data were collected from the process flow chart of the 194 tph Midrex unit. These data included flow rates, suspended solids concentrations, and the inlet and outlet characteristics of the overhead and cooling gas, as well as the clarifier.

The key system streams were initially identified as follows: stream 503 (freshwater inlet to overhead gas scrubber), 508 (overhead gas scrubber outlet), 513 (freshwater inlet to cooling gas scrubber), 515 (cooling gas scrubber

outlet), and the clarifier inlet streams (531, 528, 594, 518, 556, 555, 540, 536, 573, 574).

Then, the suspended solids concentrations in the inlet streams to the scrubbers were taken as the maximum allowable limit and at the clarifier outlet as the maximum allowable outlet limit (50 ppm). Later, different local recovery schemes were investigated in each scrubber separately and simultaneously. For the top gas scrubber, the recovery was assumed to be from 508 to 503 and for the cooling gas scrubber, the recovery was assumed to be from 515 to 513. Mass balances for each case were used to obtain new concentrations to determine the freshwater savings and concentration changes. Afterward, the minimum freshwater consumption and minimum effluent treatment were targeted using pinch point analysis. Combination plots were drawn to identify pinch points.

Pinch point calculations were performed using MATLAB code, the accuracy of which was verified by reproducing solved examples from the book Chemical Process Design and Integration (Robin Smith, 2015). The output of these calculations shows the minimum freshwater flow rate required.

Results and Discussion: Fig. 4 is related to top gas scrubber. The left-hand graph of Fig. 4 shows the water savings in terms of the return water flow rate of streams 508 and 503. The dotted line is simply the effect of the return water and the solid line is obtained from the pinch calculations. For example, where we are only allowed to use the return flow at an inlet flow rate of about 400 m³/h, the savings are the same 400 m³/h. On the other hand, if the required amount of water is provided from other processes, there will be more savings than the recycle method. For example, at a flow rate of about 400 m³/h, the savings are about 600 m³/h.

Fig. 5 is related to the cooling gas scrubber. The left-hand graph of Fig. 5 (comparison of water savings) shows that at the same flow rate (e.g. 200 cubic meters per hour), the solid line method saves up to 600 cubic meters per hour of water, while the dashed line method only saves 200 cubic meters

Fig. 6 assumes a constant cooling gas return flow rate of 100 tph and a variable top gas return flow rate. Pinch calculations show a synergistic effect.

Fig. 7 shows the graph of minimum treated flow rate versus return flow rate of 508 to 503 (with a constant flow of 100 m³/h from 515 to 513), assuming a 98% removal ratio in the clarifier. According to this graph, an increase in return flow rate of more than 200 m³/h will increase the clarifier outlet concentration beyond the 50 ppm limit.

Conclusion: For example, a suitable recommendation based on the results of pinch calculations, which is proposed for operational evaluation and economic estimation, is as follows. The return flow of the cooling gas scrubber set at 100 cubic meters per hour and the return flow of the top gas scrubber set at 200 cubic meters per hour. In this case, although the concentrations increase to an acceptable level, theoretically much more water can be saved than the return value. For example, the concentration of stream 513 from 70 ppm reaches 270 ppm. Instead, it can save up to 600 cubic meters per hour. Based on the specified clarifier inlet flows, the minimum required treatment diagram is drawn. Assuming a removal ratio of 98%, if the return flow rate from 508 to 503 exceeds 200 m³/h, the clarifier cannot treat to 50 ppm and is not suitable.



هدف‌گیری صرفه جویی مصرف آب در واحد میدرکس چادرملو با استفاده از تحلیل نقطه پینچ

مظفر باقری^۱، مجید امامی میبدی^{۲*}، روح الله صادقی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.

^۲ دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اردکان، اردکان، ایران.

^۳ استادیار، گروه مهندسی شیمی، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی (شعبه اصفهان)، اصفهان، ایران

پست الکترونیکی نگارنده مسئول: emami@ardakan.ac.ir

وبگاه نشریه: ijwer.uoz.ac.ir



تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۲/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۳

تاریخ ویرایش: ۱۴۰۵/۰۳/۲۸ تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۰۷/۰۱

چکیده: هدف‌گیری صرفه جویی استفاده از آب در واحد میدرکس^۱ مجتمع معدنی و صنعتی چادرملو واقع در منطقه کویری یزد، به‌منظور کاهش مصرف آب تازه انجام شده است. برآورد اقتصادی نهایی مربوط به فاز طراحی می‌شود که باید براساس، محاسبات هدف‌گیری (موضوع این تحقیق) و نیز لوله کشی فرآیند موجود انجام شود و به پژوهشهای آینده موکول می‌شود. برای مثال، یک توصیه مناسب بر مبنای نتایج محاسبات پینچ^۲، که جهت ارزیابی عملیاتی و برآورد اقتصادی پیشنهاد می‌شود به صورت زیر است. دبی برگشتی اسکرابر^۳ گاز خنک‌کننده ۱۰۰ مترمکعب بر ساعت و دبی برگشتی اسکرابر گاز بالاسر ۲۰۰ مترمکعب بر ساعت باشد. در این صورت هرچند تا حد قابل قبول غلظتها بالا می‌روند، از لحاظ نظری بسیار بیشتر از مقدار برگشتی می‌توان در مصرف آب صرفه جویی کرد. برای مثال، غلظت جریان ۵۱۳ از ۷۰ ppm، به ۲۷۰ ppm می‌رسد. در عوض می‌تواند تا ۶۰۰ مترمکعب بر ساعت صرفه‌جویی داشته باشد. با فرض جریان‌های مشخص ورودی کلاریفایر^۴، نمودار حداقل تصفیه مورد نیاز رسم شده است. با فرض نسبت زدایش^۵ ۹۸٪ اگر دبی جریان برگشتی ۵۰۸ به ۵۰۳ از ۲۰۰ مترمکعب بر ساعت بیشتر شود، کلاریفایر نمی‌تواند تا ۵۰ ppm تصفیه کند و مناسب نیست.

کلیدواژه‌ها: هدف‌گیری صرفه جویی مصرف آب، فرایند میدرکس، تحلیل نقطه پینچ، جریان برگشتی.

۱- مقدمه

این صنعت نه تنها محرک رشد اقتصادی و اشتغال‌زایی است، بلکه به دلیل تولید محصولات استراتژیک مانند آهن

صنعت فولاد به‌عنوان یکی از ستون‌های اصلی توسعه صنعتی، نقش کلیدی در اقتصاد جهانی و ایران ایفا می‌کند.

⁵ removal ratio

¹ midrex

² pinch

³ scrubber

⁴ clarifier

باید صرفه جویی یا مدیریت بهتری انجام شود. در عین حال، اعمال مقررات سخت گیرانه تر در مورد تخلیه فاضلاب، هزینه های تصفیه پساب را افزایش داده است (Paraschiv et al., 2023).

مجتمع معدنی و صنعتی چادرملو، واقع در منطقه کویری استان یزد، یکی از بزرگ ترین واحدهای تولید آهن اسفنجی در ایران است که از فناوری میدرکس برای تولید استفاده می کند. فرایندهای تولید در واحد میدرکس به حجم بالایی از آب با کیفیت بالا وابسته است که در بخش های مختلف نظیر خنک سازی تجهیزات، شست و شوی گازهای خروجی و تامین آب مورد نیاز واکنش های شیمیایی مورد استفاده قرار می گیرد (Jiang et al., 2013). کاهش منابع آب زیرزمینی، افزایش شوری آب های موجود و هزینه های بالای تامین آب از منابع دوردست، از جمله مشکلات اصلی این واحد هستند که ضرورت مدیریت بهینه منابع آبی را بیش از پیش برجسته می کند. فرایند تصفیه آب در واحد میدرکس با مشکلات متعددی مواجه است. آب ورودی در واحد میدرکس معمولاً حاوی املاح معدنی (مانند کلسیم، منیزیم و سدیم)، فلزات سنگین (مانند آهن و منگنز) و مواد آلی است که منجر به رسوب گذاری در تجهیزات، خوردگی لوله ها و مبدل های حرارتی و کاهش راندمان فرایندهای تولید می شود. این مسائل نه تنها هزینه های نگهداری و تعمیرات را افزایش می دهند، بلکه بر کیفیت محصول نهایی (آهن اسفنجی) و پایداری زیست محیطی تاثیر منفی می گذارند. یکی دیگر از چالش های اصلی، فقدان یک مدل بهینه سازی جامع برای فرایند تصفیه آب در واحد میدرکس است. مدل های بهینه سازی می توانند با تحلیل داده های عملیاتی، مانند غلظت آلاینده ها، دبی آب و هزینه های انرژی، راهکارهایی برای بهبود کارایی سیستم ارائه دهند (Zaccara et al., 2022). هدف اصلی، بهینه سازی فرایند تصفیه آب در واحد میدرکس چادرملو، کاهش مصرف و در عین حال کیفیت مطلوب آب خروجی و کاهش اثرات زیست محیطی است.

آب در فرایند میدرکس نقش حیاتی در خنک سازی تجهیزات، تولید بخار برای ریفرمینگ و شست و شوی

اسفنجی، در زنجیره تامین صنایع خودروسازی، ساخت و ساز و تولید تجهیزات صنعتی جایگاه ویژه ای دارد (González & Kamiński, 2011). با این حال، مصرف بالای منابع طبیعی، به ویژه آب این صنعت را با چالش های زیست محیطی و اقتصادی جدی مواجه کرده است. در ایران که با بحران کم آبی و محدودیت منابع آبی دست و پنجه نرم می کند، مدیریت بهینه آب در صنایع آب بر مانند فولادسازی به یک ضرورت ملی تبدیل شده است (Fani et al., 2016).

فرایند میدرکس، یکی از فناوری های پیشرفته در تولید آهن اسفنجی، به دلیل کارایی بالا در بسیاری از واحدهای فولادسازی جهان، از جمله مجتمع معدنی و صنعتی چادرملو در ایران، مورد استفاده قرار می گیرد. این فرایند که بر پایه احیای مستقیم سنگ آهن با گازهای احیایی عمل می کند، به حجم قابل توجهی آب برای خنک سازی تجهیزات، تصفیه گازهای خروجی و سایر فرایندهای جانبی نیاز دارد (Ramezani Moziraji et al., 2024).

از این رو، بهینه سازی فرایندهای تصفیه و بازیافت آب در فولاد می تواند مصرف آب را کاهش داده و پایداری زیست محیطی و اقتصادی را ارتقا دهد (Branca et al., 2020). همچنین، روش میدرکس یکی از پرکاربردترین روش های احیای مستقیم سنگ آهن برای تولید آهن اسفنجی است که در آن گازهای احیایی (هیدروژن و مونوکسید کربن) در کوره های احیا استفاده می شوند (Ramezani Moziraji et al., 2024).

در فرایند میدرکس، گازهای خروجی کوره حاوی ذرات معلق و آلاینده های گازی هستند که نیاز به تصفیه دارند. اسکرابر های مرطوب با استفاده از آب به عنوان حلال، ذرات و آلاینده ها را جدا می کنند. مصرف آب در این اسکرابر ها به عوامل متعددی از جمله نوع اسکرابر، دبی گاز ورودی، غلظت آلاینده ها و استانداردهای زیست محیطی بستگی دارد (Kiventerä et al., 2016). در گذشته، آب به عنوان یک منبع کم هزینه و نامحدود در نظر گرفته می شد. با این حال، اکنون آگاهی فزاینده ای از خطر استخراج بیش از حد آب برای محیط زیست وجود دارد. در برخی مناطق، به دلیل کمبود آب، نمی توان مصرف آب را در آینده بیشتر کرد و

هدف‌گیری برای بهینه‌سازی شبکه آب در واحد میدرکس مجتمع معدنی و صنعتی چادرملو انجام شده است. هدف اصلی، حداقل‌سازی مصرف آب تازه و حداقل تصفیه پساب با استفاده از جریان‌های برگشتی موضعی و یکپارچه‌سازی جریان‌های آبی است. داده‌های عملیاتی از دیاگرام فرآیندی واحد میدرکس با ظرفیت تولید ۱۹۴ تن بر ساعت جمع‌آوری شد. این داده‌ها شامل دبی، غلظت مواد جامد معلق و مشخصات جریان‌های ورودی و خروجی اسکرابرهای گاز بالاسری و گاز خنک‌کننده و همچنین کلاریفایر است. ابتدا، جریان‌های کلیدی سیستم شناسایی شدند:

جریان ۵۰۳ (آب تازه ورودی به اسکرابر گاز بالاسری)، ۵۰۸ (خروجی اسکرابر گاز بالاسری)، ۵۱۳ (آب تازه ورودی به اسکرابر گاز خنک‌کننده)، ۵۱۵ (خروجی اسکرابر گاز خنک‌کننده) و جریان‌های ورودی به کلاریفایر (۵۳۱، ۵۲۸، ۵۹۴، ۵۱۸، ۵۵۶، ۵۵۵، ۵۴۰، ۵۳۶، ۵۷۳، ۵۷۴).

نسبت زدایش در واحد تصفیه که در این تحقیق ۹۸٪ فرض می‌شود به صورت (۱) تعریف می‌شود

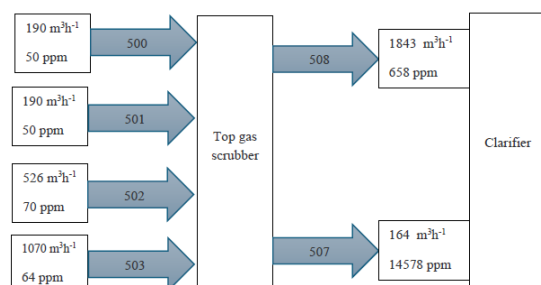


Fig. 1 The streams related to the top gas scrubber

شکل ۱ جریان‌های مربوط به اسکرابر گاز بالاسر

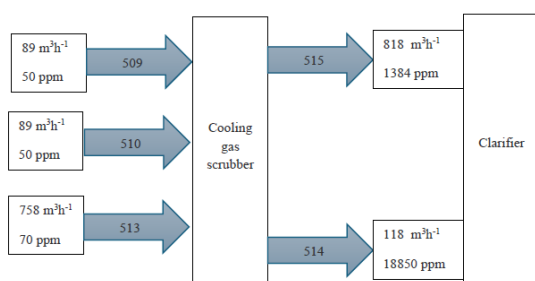


Fig. 2 The streams related to the cooling gas scrubber

شکل ۲ جریان‌های مربوط به اسکرابر گاز خنک‌کننده

گازهای خروجی دارد (Suvio et al., 2012). سالمی و همکاران (Salemi et al., n.d.) با بررسی بازیابی انرژی از پساب‌های میدرکس با استفاده از چرخه کالینا، نشان دادند که بیش از ۲ مگاوات برق قابل تولید است و دوره بازگشت سرمایه کمتر از ۹ سال خواهد بود. این رویکرد به طور غیرمستقیم مصرف آب را بهینه می‌کند. همچنین، کولا و همکاران (Colla et al., n.d.) با پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت آب یکپارچه (IPS) در صنایع فولاد، بهره‌وری آب را افزایش و توقف‌های عملیاتی را کاهش دادند. زاکارا و همکاران (Zaccara et al., 2022) با مدل‌سازی جریان‌محور در بخش فولاد، شبکه‌های آب را بهینه کرده و مصرف را تا ۲۲٪ کاهش دادند. با این حال، مطالعات محدودی به طور خاص به بهینه‌سازی شبکه آب در واحد میدرکس چادرملو با استفاده از جریان‌های برگشتی و تحلیل پینچ پرداخته‌اند.

اگر میزانی از آزادی برای تغییر شرایط عملیات وجود داشته باشد، موارد زیر توصیه می‌شود (Robin Smith, 2015)

♦ پیرامون عملیات شستشو یا یک اسکرابر، یک جریان برگشتی موضعی در نظر گرفته شود.

♦ آب اضافه فرایندها کامل جدا شوند، یا فرایند اسکرابری که برای جدا کردن آلاینده آلی استفاده می‌شود با فرایند کندانس جایگزین شود، یا یک فرایند استخراج با آب جایگزین شود با تبلور سرمایشی

♦ تعداد مراحل اضافه شود تا آب مصرفی کم شود.

♦ برای شستشوی تجهیزات از مراحل چندگانه استفاده شود که مراحل اولیه با آب نسبتاً آلوده باشد و مراحل نهایی با آب کیفیت بالا.

♦ در فرایندهای چند محصولی، زمان بندی فرایندها به گونه‌ای انجام شود که کمترین جابه جایی و شستشو نیاز باشد.

♦ از تمیز کردن مکانیکی استفاده شود.

با توجه به موارد فوق، اضافه کردن جریان برگشتی به اسکرابرها در این تحقیق بررسی می‌شوند.

۲- روش‌شناسی

این پژوهش بر پایه رویکرد تحلیل نقطه پینچ و محاسبات

و تغییرات غلظت تعیین گردد. در مرحله بعد، با استفاده از تحلیل نقطه پینچ، حداقل مصرف آب تازه و حداقل تصفیه پساب هدف‌گیری شد. نمودارهای ترکیبی رسم گردید تا نقاط پینچ شناسایی شوند.

اصول یکپارچه‌سازی فرایند و قواعد سرانگشتی فو (Foo, 2024) در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند که عبارتند از جداسازی منابع، کاهش دبی ورودی، حداکثر کردن غلظت آلاینده ورودی و استفاده از جریان برگشتی موضعی.

۳- نتایج و بحث

اثر جریان برگشتی اسکرابر گاز بالاسر

نمودار سمت راست **شکل ۴** غلظت‌های جریانهای ورودی و خروجی را نشان می‌دهد با فرض اینکه بالا رفتن غلظت ورودی صرفاً غلظت ۵۰۸ را اضافه کند و بر غلظت ۵۰۷ اثر نداشته باشد. البته فرض بدبینانه است. با توجه به غلظت بسیار بالای جریان ۵۰۷، تغییر غلظت ورودی قطعاً اثر قابل توجهی بر کیفیت پساب از جهت اینکه برای دفع در واحد تصفیه مشکلی ایجاد شود، وجود نخواهد داشت. لذا اگر با این فرض بدبینانه عملیاتی بودن فرآیند اثبات شود، قطعاً در شرایط واقعی نیز مشکلی نخواهد بود. بنابراین مهم بررسی غلظت جریان ۵۰۸ می‌باشد. جرم گرد و غبار گرفته شده با استفاده $1070 \text{ ton/h} \times \text{gr/ton}$ به دست می‌آید و با فرض اینکه همین مقدار گرد و غبار در حالت استفاده از جریان برگشتی از هوا زدوده می‌شود و به آب وارد می‌شود برای دبی برگشتی $\text{FR m}^3/\text{h}$ ، غلظت جریان ۵۰۸ از **رابطه (۳)** محاسبه می‌شود:

$$x_{508} = \frac{(658-64)1070}{1070-F_R} + 64 \quad (3)$$

به همین ترتیب غلظت جریان ورودی ۵۰۳ از **رابطه (۴)** به دست می‌آید:

$$x_{503} = \frac{(1070-F_R)64+F_R x_{508}}{1070} \quad (4)$$

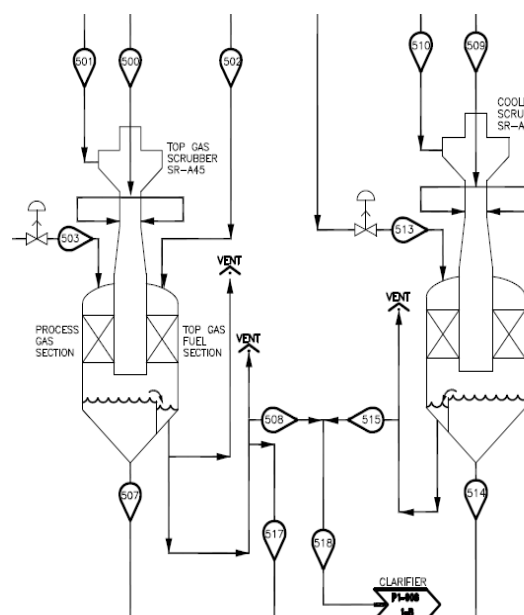


Fig. 3 Process flow diagram (PFD) of scrubbers

شکل ۳ دیاگرام جریانی فرایند (PFD) مربوط به اسکرابرها

$$R = \frac{m_{w.in} C_{in} - m_{w.out} C_{out}}{m_{w.in} C_{in}} \quad (1)$$

اگر دبی‌های ورودی و خروجی (mw) برابر باشد، غلظت ورودی با **رابطه (۲)** به غلظت خروجی ارتباط می‌یابد.

$$C_{in} = \frac{C_{out}}{1-R} \quad (2)$$

محاسبات نقطه پینچ با استفاده از کد متلب انجام شده که درستی آن از بازتولید مثال‌های حل شده کتاب طراحی و یکپارچه‌سازی فرایند شیمیایی نوشته رابین اسمیت (Robin Smith, 2015)، تایید شد. خروجی این محاسبات حداقل دبی آب تازه مورد نیاز را به دست می‌دهد.

غلظت مواد جامد معلق در جریان‌های ورودی به اسکرابرها به‌عنوان محدودیت حداکثر و در خروجی کلاریفایر به‌عنوان محدودیت حداکثر خروجی (ppm) ۵۰ (در نظر گرفته شد. سپس، طرح‌های مختلف جریان برگشتی موضعی در هر اسکرابر به طور جداگانه و نیز هم‌زمان بررسی گردید. برای اسکرابر گاز بالاسری، جریان برگشتی از ۵۰۸ به ۵۰۳ و برای اسکرابر گاز خنک‌کننده، جریان برگشتی از ۵۱۵ به ۵۱۳ در نظر گرفته شد. موازنه جرم برای هر حالت برای به دست آمدن غلظت‌های جدید استفاده شد تا صرفه‌جویی در آب تازه

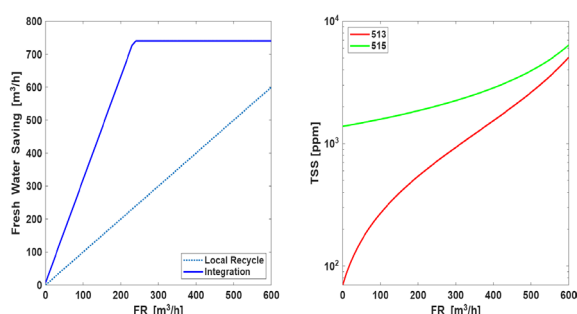


Fig. 5 The effect of cooling gas scrubber recycle

شکل ۵ اثر جریان برگشتی گاز خنک‌کننده

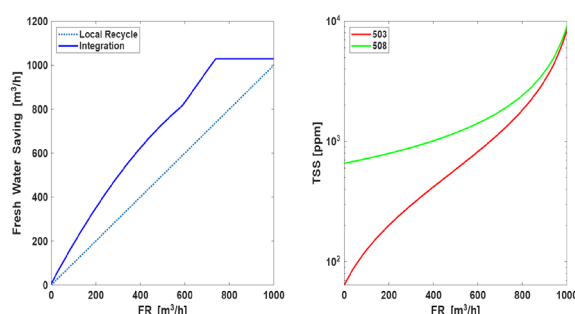


Fig. 4 The effect of top gas scrubber recycle

شکل ۴ اثر جریان برگشتی اسکرابر گاز بالاسر

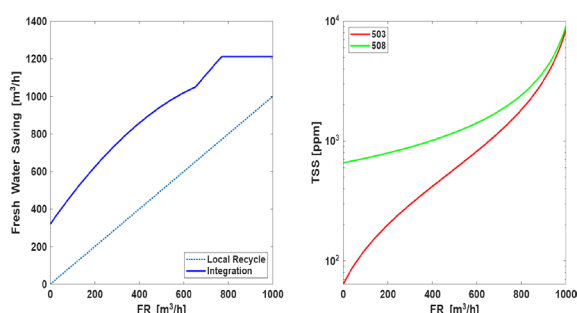


Fig. 6 The effect of both scrubber recycle

شکل ۶ اثر جریان برگشتی روی هر دو اسکرابر

نمودار سمت چپ [شکل ۴](#) میزان صرفه‌جویی آب را بر حسب دبی آب برگشتی جریان شماره ۵۰۸ و ۵۰۳ نشان می‌دهد. نقطه چین صرفاً اثر برگشت آب هست و خط ممتد از محاسبات پینچ به دست آمده است. به‌عنوان مثال، در جایی که فقط مجاز به استفاده از جریان برگشتی هستیم در نرخ جریان ورودی حدود ۴۰۰ مترمکعب در ساعت، صرفه‌جویی همان ۴۰۰ مترمکعب در ساعت است یعنی به‌ازای هر مترمکعب افزایش در FR، یک مترمکعب آب تازه صرفه‌جویی می‌شود. در مقابل اگر از میزان آب موردنیاز از فرایندهای دیگر تامین شود، صرفه‌جویی بیشتری نسبت به روش جریان برگشتی خواهد داشت. برای مثال، در دبی حدود ۴۰۰ مترمکعب بر ساعت میزان صرفه‌جویی حدوداً ۶۰۰ می‌باشد.

۱-۳- اثر جریان برگشتی گاز خنک‌کننده

محاسبات گاز خنک‌کننده مشابه گاز بالاسر است. غلظت جریان خروجی ۵۱۵ از [رابطه \(۵\)](#) به دست می‌آید:

$$x_{515} = \frac{(1384-70)758}{758-F_R} + 70 \quad (5)$$

به همین ترتیب غلظت جریان ورودی ۵۱۳ از [رابطه \(۶\)](#) به دست می‌آید:

$$x_{513} = \frac{(758-F_R)70 + F_R x_{515}}{758} \quad (6)$$

نمودار سمت چپ [شکل ۵](#) (مقایسه صرفه‌جویی آب) در دبی یکسان (مثلاً ۲۰۰ مترمکعب بر ساعت)، روش خط ممتد تا

۶۰۰ مترمکعب بر ساعت صرفه‌جویی آب دارد، درحالی‌که روش خط چین تنها ۲۰۰ مترمکعب صرفه‌جویی می‌کند.

۲-۳- اثر همزمان جریان برگشتی روی گاز بالاسر و گاز خنک‌کننده

[شکل ۶](#) دبی جریان برگشتی گاز خنک‌کننده را برابر ۱۰۰ تن بر ساعت ثابت در نظر گرفته و دبی جریان برگشتی گاز بالاسر را متغیر فرض می‌کند. محاسبات پینچ اثر هم‌افزایی نشان می‌دهد

۳-۳- بررسی امکان کاهش تصفیه

[شکل ۷](#) با فرض نسبت زدایش ۹۸٪ در کلاریفایر، نمودار حداقل دبی تصفیه‌شده بر حسب دبی جریان برگشتی ۵۰۸ به ۵۰۳ (با جریان ثابت ۱۰۰ مترمکعب بر ساعت از ۵۱۵ به ۵۱۳) را نشان می‌دهد. طبق این نمودار افزایش دبی برگشتی بیش از ۲۰۰ مترمکعب بر ساعت، غلظت خروجی کلاریفایر را از حد مجاز ۵۰ ppm فراتر می‌برد.

۴- نتیجه گیری

هنگام استفاده همزمان از هر دو جریان برگشتی، اثر همافزایی مشاهده شد و صرفه جویی کل بیش از جمع جداگانه بود. پیشنهاد بهینه شامل جریان برگشتی ۲۰۰ مترمکعب بر ساعت در اسکرابر گاز بالاسری و ۱۰۰ مترمکعب بر ساعت در اسکرابر گاز خنک کننده است که منجر به صرفه جویی ۶۰۰ مترمکعب بر ساعت می شود. در این حالت، غلظت جریان ۵۰۳ از ۶۴ به ۲۰۰ ppm، جریان ۵۰۸ از ۶۵۸ به ۷۹۵ ppm، جریان ۵۱۳ از ۷۰ به ۲۷۰ ppm و جریان ۵۱۵ از ۱۳۸۴ به ۱۶۰۰ ppm افزایش یافت. که همچنان در محدوده قابل قبول عملیاتی قرار دارد. محاسبات حداقل تصفیه در کلاریفایر با نسبت زدایش ۹۸٪ نشان داد که افزایش دبی جریان برگشتی ۵۰۸ به ۵۰۳ بیش از ۲۰۰ مترمکعب بر ساعت، غلظت خروجی را از حد مجاز ۵۰ ppm فراتر می برد؛ بنابراین، دبی برگشتی باید کنترل شود تا کیفیت پساب حفظ گردد.

5- List of Symbols

C (kg m ⁻³)	concentration
FR (m ³ h ⁻¹)	Recycle flow rate
mw (m ³ h ⁻¹)	Flow rate
R	Removal ratio
X503	concentration of stream 503

Acknowledgments

We would like to thank the Midrex unit of the Chadormalou Complex for providing the process diagram.

Credit Authorship Contribution Statement

Conceptualization, M.E. and R.S.; Methodology, M.B. M.E. and R.S.; Software, M.B. M.E. and R.S.; data analysis, M.B. M.E. and R.S.; Writing-Original Draft Preparation, M.B.; Writing-Review and Editing, M.E. and R.S.; Supervision, M.E).

All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding

No financial support has been received.

Data Availability Statement

Raw data can only be obtained from the corresponding author.

Conflicts of Interest

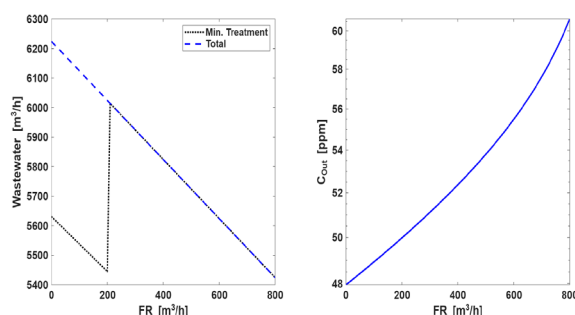


Fig. 7 Clarifier outlet concentration using removal ratio assumed as 98%

شکل ۷ غلظت خروجی واقعی کلاریفایر با استفاده از نسبت زدایش مفروض ۹۸٪

به عنوان یک پیشنهاد، جریان برگشتی ۲۰۰ مترمکعب بر ساعت در اسکرابر گاز بالاسری و ۱۰۰ مترمکعب بر ساعت در اسکرابر گاز خنک کننده که منجر به صرفه جویی ۶۰۰ مترمکعب بر ساعت در مصرف آب تازه می شود.

The authors declare no conflict of interest.

References

- Branca, T. A., Matino, I., Colla, V., Petrucciani, A., Singh, A. K. M., Zaccara, A., Beone, T., De Cecco, L., Hakala, V., Lorito, D., Moreira, S., & Piras, E. (2020). Paving the way for the optimization of water consumption in the steelmaking processes: barriers, analysis and KPIs definition. *Matériaux & Techniques*, 108(5–6), 510. <https://doi.org/10.1051/MATTECH/2021006>
- Colla, V., Matino, I., Branca, T., Fornai, B., Water, L. R., & 2017, undefined. (n.d.). Efficient use of water resources in the steel industry. *Mdpi.ComV Colla, I Matino, TA Branca, B Fornai, L Romaniello, F RositoWater, 2017•mdpi.Com*. Retrieved May 12, 2026, from <https://www.mdpi.com/2073-4441/9/11/874>.
- Fani, A., Ghazi, I., & Malekian, A. (2016). Challenges of Water Resource Management in Iran. *American Journal of Environmental Engineering*, 6(4), 123–128. <https://doi.org/10.5923/J.AJEE.20160604.03>
- Foo, D. C. Y. (2024). Process Integration for Resource Conservation. *Process Integration for*

- Resource Conservation*. <https://doi.org/10.1201/9781003173977/process-integration-resource-conservation-dominic-foo>
- González, I. H., & Kamiński, (2011). *The iron and steel industry: a global market perspective*. <https://gsm.min-pan.krakow.pl/The-iron-and-steel-industry-a-global-market-perspective,96900,0,2.html>
- Jiang, X., Wang, L., & Shen, F. M. (2013). Shaft Furnace Direct Reduction Technology - Midrex and Energiron. *Advanced Materials Research*, 805–806, 654–659. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.805-806.654>
- Kiventerä, J., Leiviskä, T., Keski-Ruismäki, K., & Tanskanen, J. (2016). Characteristics and settling behaviour of particles from blast furnace flue gas washing. *Journal of Environmental Management*, 172, 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.037>
- Paraschiv, S., Paraschiv, L. S., & Serban, A. (2023). An overview of energy intensity of drinking water production and wastewater treatment. *Energy Reports*, 9, 118–123. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.08.074>
- Ramezani Moziraji, M., Amani Tehrani, A., Reshadi, M. A. M., & Bazargan, A. (2024). Natural gas as a relatively clean substitute for coal in the MIDREX process for producing direct reduced iron. *Energy for Sustainable Development*, 78. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2023.101356>
- Robin Smith. (2015). *Chemical process: Design and integration*. John Wiley & Sons.
- Salemi, S., Torabi, M., Energy, A. H.-, & 2022, undefined. (n.d.). Technoeconomical investigation of energy harvesting from MIDREX® process waste heat using Kalina cycle in direct reduction iron process. *ElsevierS Salemi, M Torabi, AK HaghparastEnergy, 2022•Elsevier*. Retrieved May 12, 2026, from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544221025706>
- Suvio, P., Van Hoorn, A., Szabo, M., & Ekdahl, Å. (2012). Water management for sustainable steel industry. *Journals.Sagepub.ComP Suvio, A van Hoorn, M Szabo, Å EkdahlIronmaking & Steelmaking, 2012•journals.Sagepub.Com, 39(4), 263–269. https://doi.org/10.1179/030192311X13135947813898*
- Zaccara, A., Petrucciani, A., Matino, I., Colla, V., Ressegotti, D., Beone, T., Marchiori, F., Mosconi, M., Praolini, F., & Hakala, V. (2022). A flowsheet-based model approach to reduce water consumption and improve water networks management in the steel sector. *IFAC-PapersOnLine*, 55(40), 319–324. <https://doi.org/10.1016/J.IFACOL.2023.01.092>