Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

Journal of Water and Soil Conservation

Print ISSN: 2322-2069
Online ISSN: 2322-2794

(OPEN ACCESS)

Evaluating the Operational Efficiency of the Concentration Section of the Sarcheshmeh Copper Complex in the Use of Reclaimed Water

Elnaz Eghlidi[1], Marzie Samare-Hashemi[*2], Kourosh Qaderi[3], Mehran Espahbodi[4]

1. Ph.D. Student in Water Structure, Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman (UK), Kerman, Iran. E-mail: elnazeghlidi1991@agr.uk.ac.ir
2. Corresponding Author, Assistant Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman (UK), Kerman, Iran. E-mail: samare@uk.ac.ir
3. Associate Prof., Dept. of Water Engineering, Faculty of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman (UK), Kerman, Iran. E-mail: kouroshqaderi@uk.ac.ir
4. Head of Water and Environment Research Department, Sarcheshmeh Copper Complex, NICICO, Rafsanjan, Kerman, Iran. E-mail: espahbodi@nicico.com

Article Info

Article type:
Research Full Paper

Article history:
Received: 06.28.2025
Revised: 09.04.2025
Accepted: 09.30.2025

Keywords:
High-Rate thickeners,
Mining industries,
Water accounting,
Water management,
Water recycling

ABSTRACT

Background and Objectives: Water scarcity is one of the most critical environmental and economic challenges in Iran, if not the most pressing one. Limitations in water supply have created serious challenges not only for the mining industry but also for many other sectors of the country. One such case is the Sarcheshmeh Copper Complex, the largest and one of the most significant copper extraction and processing centers in Iran, located in a hot and semi-humid region. Therefore, the sustainable and optimal management of water resources in this industrial complex is a prerequisite for the continuity of operations and regional development. At the same time, a precise understanding and control of industrial water consumption and the inflows and outflows of water-particularly in the concentration stage of mineral processing, which is one of the most fundamental and water-intensive operations of the complex-is of vital importance. This study focuses on monitoring and optimizing water productivity in the concentration stage of the Sarcheshmeh Copper Complex. For the first time, the SEEA-W (System of Environmental-Economic Accounting for Water) framework has been applied to map the internal water flows of the complex and to quantify volumes of water consumed, recycled, and lost. At the core of water accounting lies the recognition that, to date, no study has specifically examined water productivity in the mineral concentration process. In this study, the SEEA-W classification standard for water resources was employed to accurately identify different categories of water use and to track the inflows, consumption, recycling, and losses with precision.

Materials and Methods: The data used in this study were obtained from multiple sources, including volumetric records from fixed flowmeters installed at various points in the plant, field measurements using portable flowmeters, and volumetric calculations based on technical reports and operational records. The focus of this study is on data from the year 2023

(1402 in the Iranian calendar), in order to provide an up-to-date and accurate assessment of water use in the concentration process. The SEEA-W framework, recognized as an international standard for water resource accounting, enabled a comprehensive and precise evaluation of water flows. Within this framework, water inflows are categorized into two main groups: (1) water abstracted from the environment, including surface water, groundwater, seawater, and soil moisture; and (2) water abstracted from the economy, which refers to water transferred from other units or sections of the Sarcheshmeh Copper Complex to the concentration plant. Correspondingly, water outflows are divided into two categories: water returned to the environment and water transferred to other economic units.

Results: A considerable portion of the water is directed, along with the tailings, to the thickeners, where it is further concentrated and subsequently returned to the consumption cycle. In this study, water consumption is defined as the volume of water that is lost during industrial use-namely, the amount of water entering the concentration plant that does not return to the environment, the sea, or other economic units. The findings revealed that the majority of the water used in the concentration process is derived from recycling and reuse, as approximately 78% of the water entering the thickeners is collected and reused. Only 19% of the total water flow was recorded as final consumption, which is considered as water lost. The water recycling rate from the total water inflow to the thickeners was estimated at 93.82%, a relatively high figure. This outcome is encouraging for water resource management and efficiency in water use. Moreover, the results went beyond the initial data, showing that the largest share of water consumption was attributable to the tailings thickeners, with a share of 21.64%, followed by the paste thickeners with 12.94%. A comparison of water consumption per ton of feed input further indicated that less than 20% of the total water consumed per ton fell into the category of ineffective consumption. Therefore, the majority of the water entering the production process cycle is effectively returned.

Conclusion: These results highlight the plant's strong capacity in water use efficiency and underscore the importance of recycling and improving water consumption practices. The application of the SEEA-W framework in this study not only enabled transparent tracking of water flows but also helped identify critical points and opportunities for improving water use across different stages of the process. Although SEEA-W was originally designed for macro-level and national studies, its application at the industrial and operational level in this research provided accurate and valuable insights into water consumption, recycling, and losses. Furthermore, this system facilitates the assessment of the environmental and economic impacts of water use, thereby supporting the development of effective management strategies and policies. The findings were also compared with international reports, particularly ICMM reports on the copper industry in Chile, and demonstrated a relative alignment of the Sarcheshmeh Copper Complex with global standards for responsible and sustainable water use. Ultimately, this study offers a practical and reliable model for other water-intensive industries and mining operations in the country. The integration of combined frameworks, precise data, and innovative approaches can play a key role in reducing environmental impacts and improving the sustainability of water resources. Therefore, this approach can contribute significantly to achieving sustainable development, water

security, and effective management of environmental and economic challenges related to water. Moreover, the findings of this study can support decision-makers and water resource managers in the mining sector in adopting informed and long-term strategies-strategies that prioritize reducing consumption, increasing recycling, and enhancing the management of water resources. In this way, the research not only provides a scientific and practical method for assessing and improving industrial water use but also represents a meaningful step toward protecting the nation's valuable water resources.

Cite this article: Eghlidi, Elnaz, Samare-Hashemi, Marzie, Qaderi, Kourosh, Espahbodi, Mehran. 2026. Evaluating the Operational Efficiency of the Concentration Section of the Sarcheshmeh Copper Complex in the Use of Reclaimed Water. *Journal of Water and Soil Conservation*, 32 (4), 1-27.

© The Author(s).
DOI: 10.22069/jwsc.2025.23816.3815
Publisher: Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک

شاپا چاپی: ۲۳۲۲-۲۰۶۹
شاپا آنلاین: ۲۳۲۲-۲۷۹٤

بررسی راندمان عملیاتی امور تغلیظ مجتمع مس سرچشمه در استفاده از آب‌های برگشتی

الناز اقلیدی[۱]، مرضیه ثمره‌هاشمی*[۲]، کورش قادری[۳]، مهران اسپهبدی[٤]

۱. دانشجوی دکتری سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: elnazeghlidi1991@agr.uk.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: samare@uk.ac.ir

۳. دانشیار گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: kouroshqaderi@uk.ac.ir

٤. رئیس تحقیقات آب و محیط‌زیست، مجتمع مس سرچشمه، رفسنجان، کرمان، ایران. رایانامه: espahbodi@nicico.com

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله کامل علمی- پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱٤۰٤/۰٤/۰۷
تاریخ ویرایش: ۱٤۰٤/۰٦/۱۳
تاریخ پذیرش: ۱٤۰٤/۰۷/۰۸

واژه‌های کلیدی:
بازگردانی آب،
حسابداری آب،
صنایع معدنی،
غلیظ‌کننده‌های باطله،
مدیریت آب

چکیده

سابقه و هدف: کم‌آبی یکی از مهم‌ترین مسائل زیست‌محیطی و اقتصادی در ایران به شمار می‌رود، اگر نگوییم مهم‌ترین آن‌هاست. محدودیت در تأمین آب نه‌تنها صنعت معدن، بلکه بسیاری از بخش‌های دیگر کشور را نیز با چالش‌های جدی مواجه کرده است. یکی از این بخش‌ها، مجتمع مس سرچشمه است که به‌عنوان بزرگ‌ترین و یکی از مهم‌ترین مراکز استخراج و فرآوری مس در کشور، در منطقه‌ای گرم و نیمه‌مرطوب واقع شده است. ازاین‌رو، مدیریت بهینه و پایدار منابع آب در این مجتمع صنعتی، شرطی ضروری برای تداوم فعالیت‌های شرکت و رشد منطقه‌ای محسوب می‌شود. در عین‌حال، درک دقیق و کنترل میزان مصرف آب صنعتی و فرآیندهای ورود و خروج آب، به‌ویژه در مرحله تغلیظ مواد معدنی که یکی از اساسی‌ترین و پرمصرف‌ترین فرآیندهای مجتمع محسوب می‌شود، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، موضوع موردبررسی پایش و بهینه‌سازی مصرف آب در مرحله تغلیظ مجتمع مس سرچشمه است. برای نخستین بار، چارچوب حسابداری محیط‌زیستی- اقتصادی برای آب (SEEA-W) به‌منظور ترسیم دقیق جریان‌های آبی درون مجتمع و تعیین حجم آب مصرفی، بازیافتی و تلف‌شده به‌کار گرفته شده است. در قلب مسأله حسابداری آب واقعیتی نهفته است که تاکنون هیچ مطالعه‌ای به‌طور مشخص به بررسی بهره‌وری آب در فرآیند تغلیظ مواد معدنی نپرداخته است. در این مطالعه، استاندارد طبقه‌بندی منابع آبی (SEEA-W) برای شناسایی دقیق دسته‌های مختلف مصرف آب و ردیابی صحیح جریان‌های ورودی، مصرفی، میزان بازیافت و تلفات آن‌ها مورداستفاده قرارگرفته است.

مواد و روش‌ها: داده‌های مورداستفاده در این مطالعه از منابع مختلفی به‌دست آمده‌اند که شامل اطلاعات حجمی از دبی‌سنج‌های ثابت نصب‌شده در نقاط مختلف کارخانه، ثبت‌های میدانی با

استفاده از دبی‌سنج‌های پرتابل، و محاسبات حجمی مبتنی بر گزارش‌ها و سوابق فنی می‌باشند. تمرکز این مطالعه بر روی داده‌های سال ۱۴۰۲ بوده است تا وضعیت به‌روز و دقیق بهره‌برداری از آب در فرآیند تغلیظ مورد ارزیابی قرار گیرد. چارچوب (SEEA-W)، به‌عنوان یک استاندارد بین‌المللی شناخته‌شده در زمینه حسابداری منابع آب، امکان ارزیابی جامع و دقیق جریان‌های آبی را فراهم کرده است. در این چارچوب، جریان‌های ورودی آب به دو دسته اصلی تقسیم می‌شوند: ۱. آب برداشت‌شده از محیط، که شامل آب‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، آب دریا و رطوبت خاک است. ۲. آب برداشت‌شده از اقتصاد، که به آب انتقال‌یافته از سایر واحدها یا بخش‌های موجود در مجتمع مس سرچشمه به بخش تغلیظ اطلاق می‌شود. به‌طور متناظر، جریان‌های خروجی آب نیز به دو دسته تقسیم می‌شوند: آبی که به محیط بازگردانده می‌شود و آبی که به سایر واحدهای اقتصادی منتقل می‌شود.

یافته‌ها: مقدار زیادی از آب به همراه باطله‌ها به‌سمت غلیظ‌کننده‌ها هدایت می‌شود، جایی که دوباره تغلیظ شده و به چرخه مصرف بازمی‌گردد. در این مقاله، مصرف آب به‌عنوان مقدار آبی تعریف شده است که در فرآیند استفاده صنعتی از بین می‌رود؛ یعنی آبی که وارد واحد تغلیظ می‌شود اما به محیط‌زیست، دریا یا سایر واحدهای اقتصادی بازنمی‌گردد. مطالعه نشان داد بیش‌تر آب مورداستفاده حاصل بازیافت و استفاده مجدد است؛ زیرا حدود ۷۸ درصد آب واردشده به تغلیظ‌کننده‌ها مجدداً جمع‌آوری شده و مورد استفاده قرار گرفته است. تنها ۱۹٪ از کل جریان آب به‌عنوان مصرف نهایی ثبت‌شده که به‌عنوان مصارف تلف‌شده در نظر گرفته می‌شود. نرخ بازیافت آب از کل میزان آب ورودی به تغلیظ‌کننده‌ها، ۸۲/۹۳٪ برآورد شده که عدد نسبتاً بالایی است. این موضوع نشان‌دهنده وضعیت مطلوبی برای مدیریت منابع آب و بهره‌وری در مصرف آن به‌شمار می‌رود. نتایج این پژوهش حتی فراتر از داده‌های اولیه رفت و مشخص کرد که بیش‌ترین سهم از مصرف آب مربوط به غلیظ‌کننده‌های باطله با سهم ٦٤/٢١٪ بوده است و پس‌ازآن تغلیظ‌کننده‌های خمیری با ۱۲/۹٤٪ قرار دارند. با انجام مقایسه‌ای در خصوص میزان مصرف آب به‌ازای هر تن خوراک ورودی، مشخص شد که کم‌تر از ۲۰٪ از کل مصرف آب به ازای هر تن، جزء مصرف غیرمؤثر بوده است. بنابراین، بیش‌تر آب واردشده به چرخه فرآیند تولید بازمی‌گردد.

نتیجه‌گیری: این نتایج نشان‌دهنده مهارت بالای این کارخانه در استفاده از آب و هم‌چنین تأکید بر ضرورت بازیافت و بهبود مصرف آب هستند. استفاده از چارچوب (SEEA-W) در این مطالعه نه‌تنها امکان ردیابی شفاف جریان‌های آبی را فراهم کرد، بلکه به شناسایی نقاط کلیدی و فرصت‌هایی برای بهبود در مصرف آب در مراحل مختلف فرآیند کمک نمود. درحالی‌که چارچوب (SEEA-W) در ابتدا برای مطالعات کلان و در سطح ملی طراحی شده بود، در این پژوهش در سطح واحد صنعتی و عملیاتی مورد استفاده قرار گرفت و توانست اطلاعات دقیق و مفیدی درباره مصرف، بازیافت و اتلاف آب ارائه دهد. هم‌چنین این سیستم کمک می‌کند تا تأثیرات مصرف آب بر محیط‌زیست و اقتصاد بررسی شود که می‌تواند در تدوین سیاست‌ها و راهکارهای مدیریتی مؤثر باشد. یافته‌های این مطالعه با گزارش‌های بین‌المللی، به‌ویژه گزارش‌های

ICMM درباره صنعت مس در شیلی، مقایسه شده و تطابق نسبی عملکرد مجتمع مس سرچشمه با استانداردهای جهانی در زمینه مصرف مسئولانه و پایدار آب را نشان می‌دهد. درنهایت، این پژوهش یک الگوی کاربردی و قابل‌اطمینان برای سایر صنایع آب‌بر و فعالیت‌های معدنی کشور فراهم می‌کند. استفاده از چارچوب‌های ترکیبی، داده‌های دقیق و رویکردهای نوآورانه می‌تواند نقش مهمی در کاهش آسیب‌های زیست‌محیطی و بهبود پایداری منابع آبی ایفا کند. بنابراین، این رویکرد می‌تواند نقش مؤثری در دستیابی به توسعه پایدار، امنیت آبی و مدیریت مؤثر چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی مرتبط با آب داشته باشد. علاوه‌بر این، یافته‌های این مطالعه می‌تواند به تصمیم‌گیرندگان و مدیران منابع آب و بخش معدن در اتخاذ تصمیمات هوشمندانه و بلندمدت کمک کند؛ تصمیماتی که بر کاهش مصرف، افزایش بازیافت و بهبود مدیریت منابع آبی تمرکز دارند. ازاین‌رو، این پژوهش نه‌تنها یک روش علمی و عملی برای ارزیابی و بهبود مصرف آب در صنایع ارائه می‌دهد، بلکه گامی مؤثر در جهت حفاظت از منابع آبی ارزشمند کشور نیز به‌شمار می‌آید.

استناد: اقلیدی، الناز، ثمره‌هاشمی، مرضیه، قادری، کورش، اسپهبدی، مهران (۱۴۰۴). بررسی راندمان عملیاتی امور تغلیظ مجتمع مس سرچشمه در استفاده از آب‌های برگشتی. *پژوهش‌های حفاظت آب و خاک*، ۳۲ (۴)، ۲۷-۱.

DOI: 10.22069/jwsc.2025.23816.3815

ناشر: دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

© نویسندگان.

مقدمه

آب یکی از مهم‌ترین نهاده‌های تولید در صنایع مختلف، به‌ویژه صنعت معدن، محسوب می‌شود و در کنار سایر عوامل تولید مانند نیروی کار، سرمایه و انرژی، نقشی کلیدی در فرآیندهای استخراج و فرآوری مواد معدنی ایفا می‌کند (۱). در دهه‌های اخیر، کاهش منابع آب و رشد تقاضا، بهینه‌سازی و مدیریت پایدار آب را به چالشی اساسی برای صنایع تبدیل کرده است. در سال ۲۰۱۵ نیز مجمع جهانی اقتصاد، بحران آب را به‌عنوان بزرگ‌ترین خطر سیستماتیک از نظر تأثیر معرفی کرد. (۲). مدیریت مسئولانه منابع آب نه‌تنها به‌عنوان یک مؤلفه کلیدی در استراتژی‌های پایداری شناخته شده، بلکه به یکی از شاخص‌های عملکردی مهم در گزارش‌های پایداری صنایع تبدیل شده است (۳ و ٤). بسیاری از شرکت‌های معدنی در کشورهای پیشرو، از جمله استرالیا، به استفاده از چارچوب‌های استاندارد حسابداری آب[1] متعهد شده‌اند که امکان پایش دقیق و گزارش‌دهی مستمر مصرف آب را فراهم می‌کند. این چارچوب‌ها شامل تعیین شاخص‌های کلیدی مصرف آب، محاسبه بازده استفاده مجدد آب و تدوین گزارش‌های استاندارد مدیریتی هستند. بررسی‌ها در استرالیا نشان داده‌اند که حسابداری آب می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف آب و ارتقای ارتباط میان صنایع و محیط‌زیست ایفا کند (۵).

مطالعات انجام‌شده در کشورهای اسپانیا و بوتسوانا نیز نشان می‌دهند که به‌کارگیری حسابداری آب در سطوح ملی و صنعتی منجر به بهبود مدیریت منابع و بهینه‌سازی مصرف آب در شرایط کم‌آبی شده است (٦ و ۷). در حوزه فناوری، رویکردهای نوینی مانند ترکیب فناوری‌های غشایی برای بازیافت آب و کاهش اثرات زیست‌محیطی در صنعت معدن مس موردتوجه قرار گرفته است (۸). در حوضه معدن، دناکاروس و همکاران (۲۰۱٤) چارچوب حسابداری آب مواد معدنی استرالیا را ارائه دادند که به کمک آن، صنعت معدن می‌تواند حسابداری دقیق‌تری از مصرف آب داشته باشد و اهمیت تبخیر در عملیات معدنی که در گزارش‌های پیشین کم‌تر پوشش داده شده است را برجسته کنند (۹).

در ایران، پژوهش‌های متعددی در زمینه حسابداری آب و مدیریت منابع آبی انجام شده است. به‌عنوان مثال، دلاور و همکاران (۲۰۲۰) با بهره‌گیری از چارچوب (WA^+) و مدل هیدرولوژیکی SWAT تأثیر تغییرات اقلیمی بر مدیریت منابع آب در حوضه کرخه را بررسی کردند و نشان دادند که کاهش بارندگی در دوره‌های خشک باعث کاهش تبخیر و تعرق طبیعی، اما افزایش تبخیر و تعرق کشاورزی و کاهش روان‌آب شده است که فشار بیش‌تری بر منابع آب زیرزمینی وارد می‌کند (۱۰). باقری و بابائیان نیز آسیب‌پذیری سیستم اقتصادی- اجتماعی و منابع آب دشت رفسنجان را با چارچوب (SEEA-W) ارزیابی کردند و دریافتند که بخش کشاورزی با وجود مصرف بالای آب، بهره‌وری اقتصادی کم‌تری نسبت به بخش‌های شهری و صنعتی دارد (۱۱). علی‌پور و رضایی (۲۰۱۵) نیز در مطالعه‌ای سیستم حسابداری اقتصادی- زیست‌محیطی آب را معرفی کردند که نشان می‌دهد بخش عمده‌ای از منابع آب قابل‌تجدید ایران در بخش کشاورزی مصرف می‌شود (۱۲). هم‌چنین، کریمی و همکاران (۲۰۱۳) کاربرد چارچوب WA^+ را در حوضه‌های رودخانه‌ای بررسی کردند و تأکید کردند که این چارچوب اطلاعات مکانی دقیق و جامع درباره کاهش آب و برداشت خالص را در سیستم‌های آبی پیچیده ارائه می‌دهد (۱۳).

صنایع معدنی، به‌ویژه در فرآیندهای استخراج، تغلیظ، ذوب و تصفیه فلزاتی مانند مس، آهن و آلومینیوم، به حجم قابل‌توجهی از آب نیاز دارند (۱٤). براساس گزارش‌های بین‌المللی، مصرف کل آب در بخش معدن در جهان حدود هفت تا نه میلیارد مترمکعب در سال برآورد شده است (۱۵). در بسیاری از کشورها، سیاست‌گذاران بر اهمیت به‌کارگیری چارچوب‌های استاندارد حسابداری آب به‌عنوان ابزاری برای مدیریت بهینه منابع تأکید دارند. این چارچوب‌ها

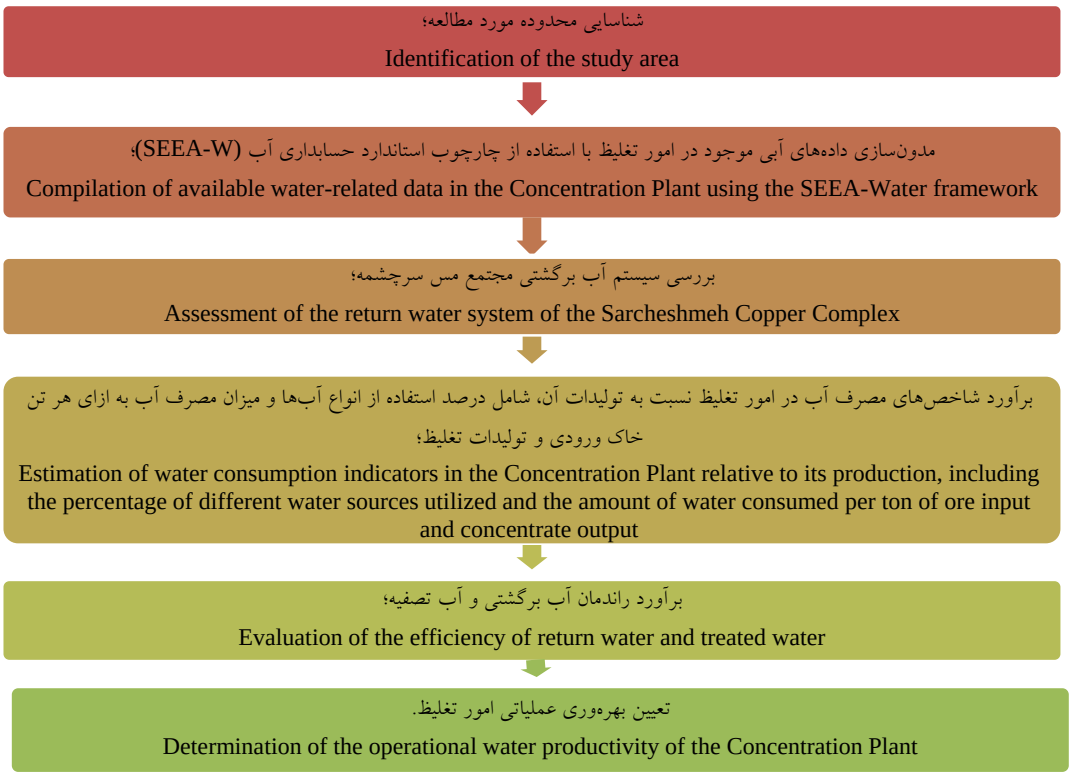
1- Water accounting

مزایایی مانند افزایش شفافیت مصرف آب، بهبود مدیریت منابع و تسهیل گزارش‌دهی در صنایع معدنی دارند (١٦ و ١٧). حسابداری آب به‌عنوان یکی از مهم‌ترین ابزارهای مدیریتی مطرح است که امکان بررسی و ارزیابی الگوی مصرف، شناسایی چالش‌ها و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی را فراهم می‌آورد (١٨). افزایش کارایی مصرف آب نه‌تنها به کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک می‌کند، بلکه در راستای توسعه پایدار[1] و حفظ منابع آبی منطقه نقش مهمی ایفا می‌کند.

مجتمع مس سرچشمه، یکی از بزرگ‌ترین واحدهای تولیدی و صنعتی کشور، به دلیل وسعت عملیات استخراج و فرآوری، مصرف آب بالایی دارد. با توجه به وابستگی بالای فعالیت‌های معدنی به منابع آبی، مدیریت بهینه مصرف آب در این مجتمع از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این پژوهش بر بررسی حجم آب برگشتی در فرآیند تغلیظ مجتمع مس سرچشمه در سال ١٤٠٢ متمرکز است. با توجه به این‌که بخش تغلیظ حدود ٨٠ درصد از کل مصرف آب مجتمع را به خود اختصاص می‌دهد، این پژوهش بر همین بخش تمرکز دارد. هدف تعیین سهم آب برگشتی و ارزیابی بهره‌وری عملیاتی آن است. برای این منظور از چارچوب (SEEA-W)[2] استفاده شده که یک سیستم استاندارد برای جمع‌آوری و تحلیل داده‌های مصرف و بازچرخانی آب در صنایع است (١٩).

مواد و روش‌ها

روش‌شناسی پژوهش: پژوهش حاضر شامل مراحل زیر است:

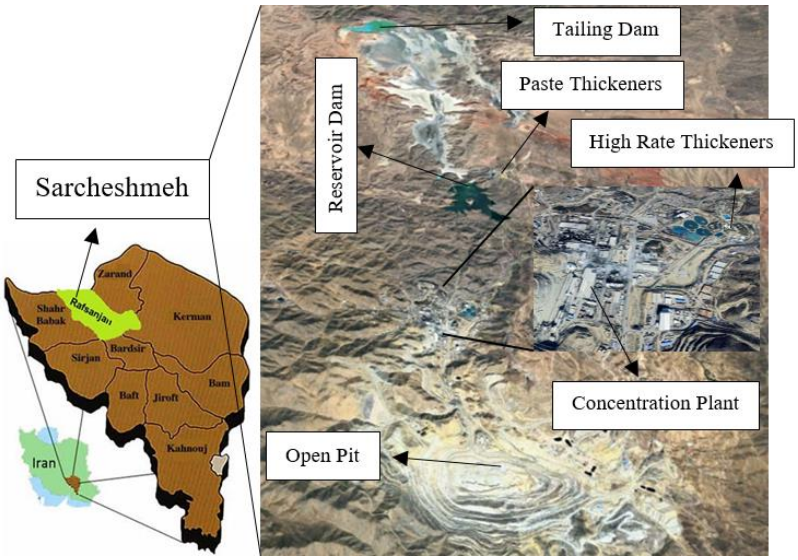


شکل ١- مراحل اجرای پژوهش حاضر.

Figure 1. Steps of the Research Implementation.

1- Sustainable development
2- System of Environmental-Economic Accounting for Water

منطقه مورد مطالعه: مجتمع مس سرچشمه یکی از بزرگ‌ترین مجتمع‌های صنعتی معدنی جهان و بزرگ‌ترین تولیدکننده مس در ایران است که در ناحیه مرکزی رشته‌کوه زاگرس، در فاصله ۱۶۰ کیلومتری جنوب غرب کرمان و ۵۰ کیلومتری جنوب رفسنجان واقع شده است. این معدن حاوی مقادیر قابل‌توجهی مولیبدن، طلا و سایر فلزات کمیاب می‌باشد (۲۰). شکل ۲ موقعیت مکانی مجتمع مس سرچشمه را نشان می‌دهد.



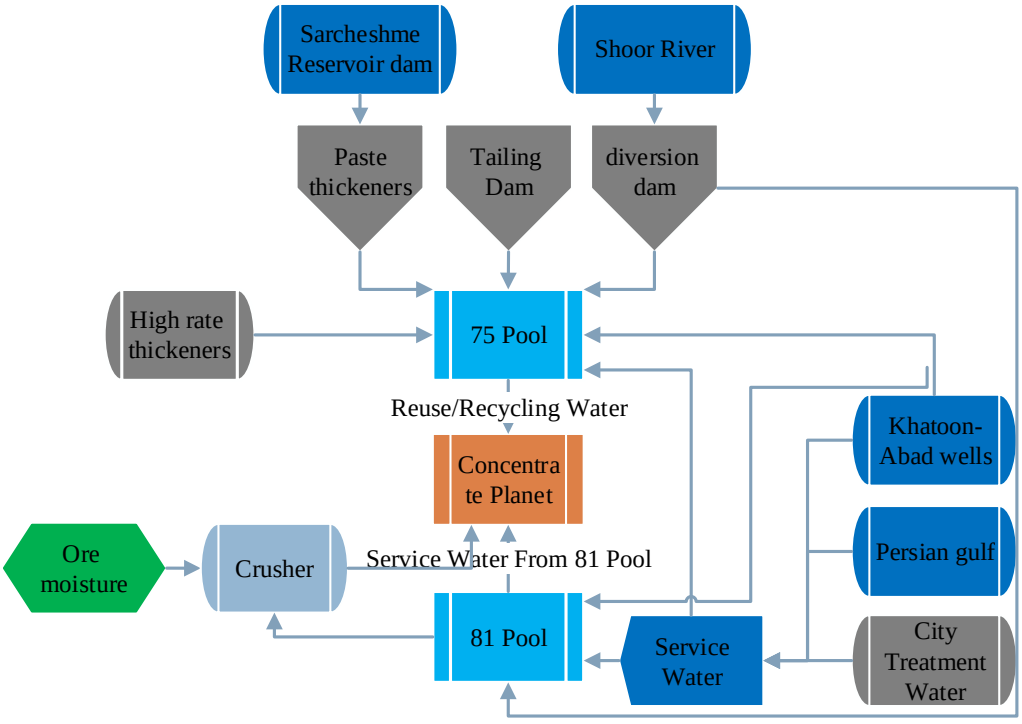
شکل ۲- موقعیت مکانی مس سرچشمه بر روی نقشه و رشته کوه زاگرس.

Figure 2. Geographical location of Sarcheshmeh Copper Complex on the map and the Zagros mountain range.

عرضه و مصرف آب در مجتمع

آب برگشتی: به‌منظور تأمین آب مورد نیاز برای تولید کنسانتره مس- مولیبدن، منابع آبی مختلف شامل منابع سطحی (رودخانه شور)، زیرزمینی (چاه‌های خاتون‌آباد) و آب دریا (خلیج‌فارس) از محیط‌زیست برداشت می‌شود. تأمین آب در مجتمع مس سرچشمه بر عهده طرح جامع آب است. با توجه به بحران آب و خشکسالی‌های اخیر، بازیافت آب از باطله‌های خروجی کارخانه‌های تغلیظ و انتقال آب از دریا در دستور کار قرار گرفته است. در این راستا، طرح جامع آب وظیفه تأمین آب و مدیریت انباشت باطله را برای طرح‌های توسعه‌ای بر اساس استانداردهای بین‌المللی زیست‌محیطی در مجتمع‌های مرتبط بر عهده دارد. آب برگشتی شامل آب‌های بازیافت‌شده از غلیظ‌کننده‌ها و دیگر واحدهای اقتصادی به‌صورت مستقیم است. شکل ۳ به‌صورت شماتیک انواع منابع ورودی آب به فرایند تغلیظ و مبدأ آن‌ها را نشان می‌دهد.

غلیظ‌کننده‌ها: غلیظ‌کننده‌ها تجهیزاتی هستند که در صنایع مختلف، به‌ویژه در صنایع معدنی، برای آب‌گیری و جداسازی ذرات معلق از مایعات به‌کار می‌روند. عملکرد این دستگاه‌ها بر پایه نیروی جاذبه است؛ به این صورت که ذرات معلق ته‌نشین شده و آب نسبتاً زلال از بخش فوقانی دستگاه خارج می‌شود. هدف اصلی غلیظ‌کننده‌ها کاهش میزان آب موجود در دوغاب و بازیابی آب برای استفاده مجدد است. در مجتمع مس سرچشمه، فرآیند آب‌گیری از دوغاب در دو مرحله و توسط دو نوع غلیظ‌کننده انجام می‌شود:



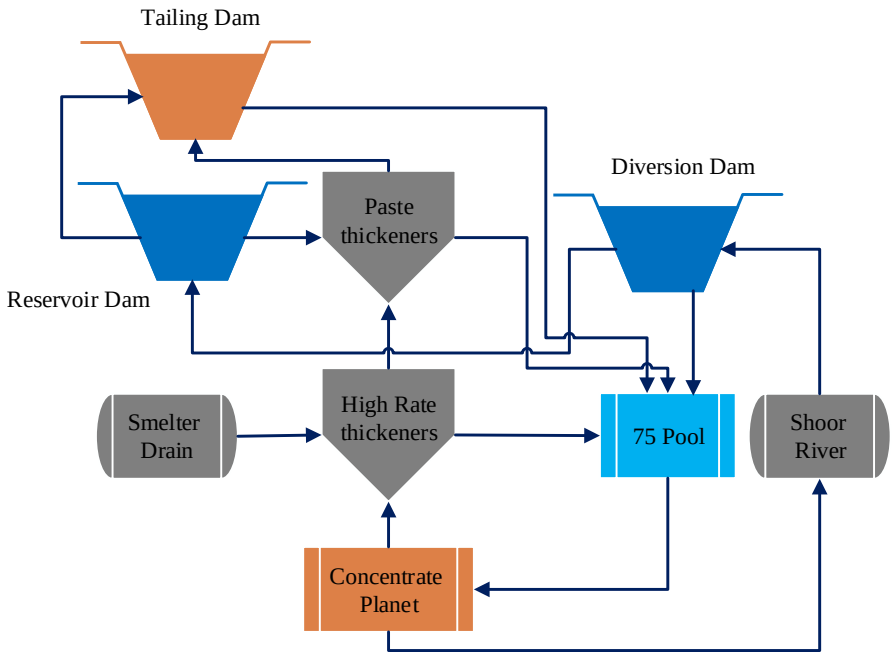
شکل ۳- انواع آب‌های ورودی از منابع مختلف به کارخانه تغلیظ.

Figure 3. Types of incoming water from various sources to the concentrator plant.

ب) غلیظ‌کننده‌های خمیری[1]: این غلیظ‌کننده‌ها در خارج از سایت تغلیظ و در مجاورت سد باطله قرار دارند. این بخش شامل ۱۲ دستگاه غلیظ‌کننده خمیری به قطر ۲٤ متر و ارتفاع تقریبی ۱۹ متر است. خوراک این غلیظ‌کننده‌ها نیز از طریق مقسم وارد دستگاه شده و پس از فرآیند ته‌نشینی، آب زلال به‌صورت سرریز و باطله غلیظ‌شده با درصد جامد حدود ٦۰ تا ٦۱٪ تخلیه و به سمت سد باطله هدایت می‌شود.

به‌طورکلی، فرآیند آب‌گیری با استفاده از غلیظ‌کننده‌ها در مجتمع مس سرچشمه، علاوه‌بر کاهش حجم باطله، نقش مؤثری در بازیابی آب و حفاظت از منابع آبی زیرزمینی دارد. مسیر کامل جریان و فرآیند آب‌گیری در شکل ٤ نمایش داده شده است.

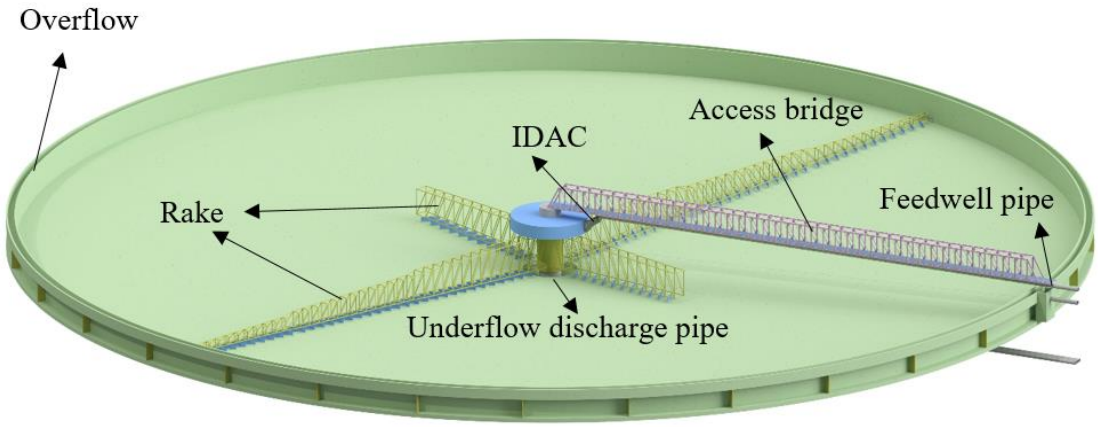
1- Paste Thickeners



شکل ٤- مسیر آب برگشتی.

Figure 4. Return water pathway.

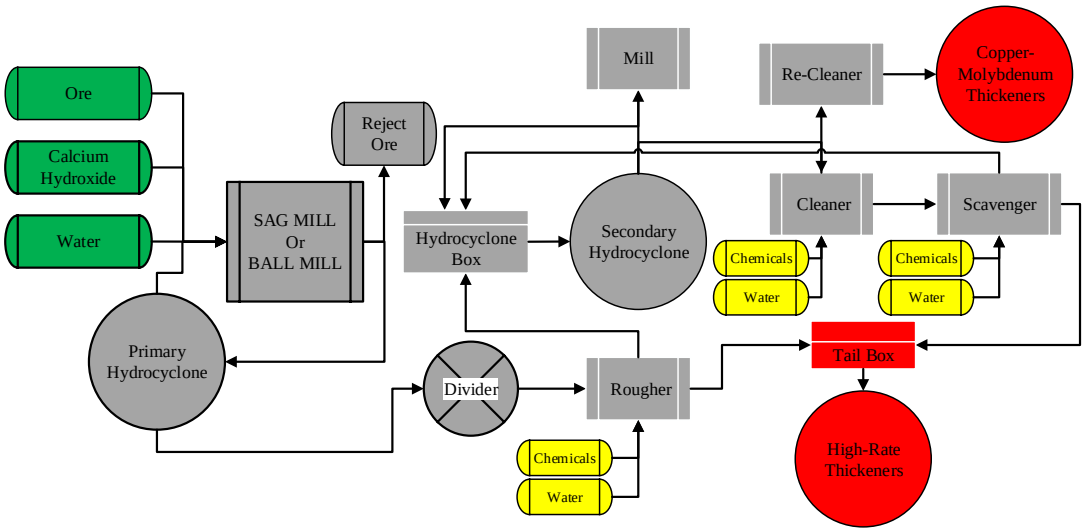
باطله‌های کارخانه تغلیظ به‌عنوان خوراک وارد غلیظ‌کننده می‌شوند. در صورت نیاز، آب رقیق‌سازی و لخته‌ساز به خوراک اضافه می‌شود تا لخته‌سازی و ته‌نشینی سریع‌تر انجام گیرد. رسوبات لخته‌شده در کف غلیظ‌کننده متراکم شده و از طریق ته‌ریز خارج می‌گردند، در حالی‌که آب زلال به سمت بالا حرکت کرده، در لاندر جمع‌آوری می‌شود و برای استفاده مجدد به مخزن ذخیره منتقل می‌گردد. شکل ٥ نمای کلی و اجزای تشکیل‌دهنده غلیظ‌کننده باطله را نمایش می‌دهد.



شکل ٥- شکل شماتیک یک غلیظ‌کننده باطله و اجزای تشکیل‌دهنده آن.

Figure 5. Schematic diagram of a tailings thickener and its components.

امور تغلیظ: در حال حاضر، روزانه حدود ۹۰ هزار تن سنگ معدن وارد کارخانه تغلیظ می‌شود که از این مقدار، حدود ۳ درصد کنسانتره و ۹۷ درصد آن باطله است. فرآیند تغلیظ مجتمع در دو بخش انجام می‌پذیرد: بخش نخست شامل کارخانه تغلیظ شماره یک و دو است که در آن تولید کنسانتره مس- مولیبدن انجام می‌شود و بخش دوم، کارخانه مولیبدن است که مولیبدنیت را از کنسانتره جدا می‌کند. فرآیند تغلیظ با ورود خاک معدن به سنگ‌شکن اولیه آغاز شده و با ارسال کنسانتره مس به کارخانه ذوب خاتمه می‌یابد. فرآیند تغلیظ به‌صورت شماتیک در شکل ٦ نشان داده شده است.



شکل ٦- فرایند تغلیظ.

Figure 6. Concentration process.

به‌طورکلی، شکل ٦ فلوچارت شبکه تولید کنسانتره مس- مولیبدن از ابتدا تا انتهای فرآیند در کارخانه تغلیظ شماره یک را نشان می‌دهد. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، هر بخش با رنگی مشخص نمایش داده شده که این رنگ‌ها طبق استانداردهای شورای مواد معدنی استرالیا تعریف شده‌اند:

١. سبز: ورودی‌های عملیات
٢. قرمز: خروجی‌های عملیات
٣. زرد: سایر آب‌های درون عملیات
٤. آبی: منابع ذخیره
٥. خاکستری: عملیات و فرآیند
٦. بنفش: آب تصفیه‌شده (٢١).

حسابداری آب: حسابداری آب مکانیزمی است برای ترکیب داده‌های گردآوری‌شده از منابع مختلف به‌منظور تدوین مجموعه‌ای یکپارچه از اطلاعات. مراحل اجرای این رویکرد شامل استخراج داده‌های مهم از منابع آب و اقتصاد، دسته‌بندی آن‌ها در قالب حساب‌های مختلف، کنار هم قرار دادن حساب‌ها و ایجاد بستری مناسب برای استخراج شاخص‌های تحلیلی است تا بتوان منطقه مورد مطالعه را بر اساس سیستم منابع آب موجود، ارزیابی کرد. این علم در پاسخ به نیاز مبرم به اطلاعات شفاف و با هدف مدیریت کارایی آب ایجاد شده است. هم‌چنین، پاسخگویی مدیران به سهامداران و جامعه در سطح وسیع‌تر از دیگر دلایل پیدایش حسابداری آب بوده

است (۲۲). سه مفهوم کلیدی و مهم در جداول حسابداری آب که تمامی تحلیل‌ها و شاخص‌ها بر اساس آن‌ها تعریف می‌شود، عبارتند از:

۱. استفاده آب[1]: شامل تمامی آب‌های ورودی به سیستم است که در مسیر تولید محصول و در بخش‌های مختلف عملیاتی مصرف می‌شود.

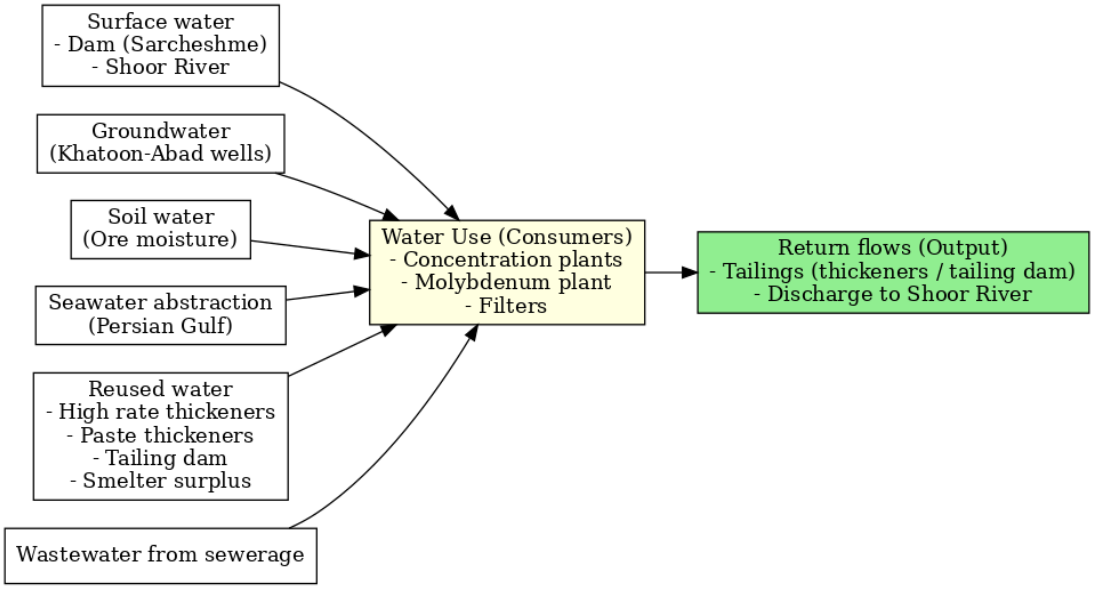
۲. عرضه آب[2]: شامل تمامی آب‌های خروجی از سیستم است که پس از اتمام فرآیند در هر بخش، از سیستم خارج شده و یا به چرخه طبیعت بازگشته یا به‌عنوان آب بازیافتی مجدداً وارد سیستم می‌شود.

۳. مصرف آب[3]: آبی است که در طی عملیات تولید به‌طور کامل از دسترس خارج شده و به سیستم بازگردانده نمی‌شود، مانند تبخیر، بخار، فرونشست و هدررفت (۲۳).

چارچوب (SEEA-W) سیستم حسابداری زیست‌محیطی- اقتصادی سازمان ملل متحد (UN-SEEA) مبتنی بر سیستم حساب‌های ملی (SNA) است که بخشی از آن به حسابداری آب با عنوان «حسابداری زیست‌محیطی- اقتصادی برای آب یا (SEEA-W) اختصاص یافته است (۲٤). این چارچوب در سال ۲۰۰۷ تکمیل شده و برای مخاطبان متعددی شامل صنایع، شرکت‌ها، سازمان‌ها، مسئولان سیاست‌گذاری در سطح کلان و وزارتخانه‌های دولتی طراحی شده است (۲۵، ۲٦ و ۲۷).

چارچوب (SEEA-W) یکی از پرکاربردترین چارچوب‌های حسابداری آب در جهان است (۱۹). این چارچوب شامل مجموعه‌ای از جداول استاندارد اصلی با تمرکز بر اطلاعات هیدرولوژیکی و اقتصادی و جداول تکمیلی است که جنبه‌های اجتماعی مرتبط را پوشش می‌دهند. این جداول امکان تجزیه و تحلیل تعاملات بین آب و اقتصاد را فراهم می‌کنند. هم‌چنین، طراحی این جداول به گونه‌ای است که تسهیل‌کننده تدوین حساب‌ها در مقیاس ملی و امکان جمع‌آوری داده‌های قابل مقایسه بین کشورها و در طول زمان باشد (۲۸). همه تعاریف، مفاهیم، طبقه‌بندی‌ها و جداول ارائه‌شده در (SEEA-W) پس از آزمایش‌های متعدد، مورد تأیید مجامع بین‌المللی قرار گرفته‌اند و سازمان ملل متحد تأکید زیادی بر استفاده از این چارچوب دارد. یکی از اجزای اصلی این چارچوب، جداول جریان آب هستند که با هدف نمایش میزان مصرف و عرضه آب توسط بخش‌های مختلف اقتصادی طراحی شده‌اند. مهم‌ترین این جداول، جداول استفاده و عرضه فیزیکی آب که امکان تجزیه و تحلیل کمی جریان‌های ورودی و خروجی آب در سطح سیستم‌های اقتصادی و زیست‌محیطی را فراهم می‌کنند و در این پژوهش از این دو جدول خاص استفاده شده است. متغیرهای ورودی و خروجی استفاده شده در جداول در شکل ۷ آورده شده است.

1- Use water
2- Supply water
3- Consum



شکل ۷- نمودار شماتیک عرضه، مصرف و بازگشت فیزیکی آب بر اساس چارچوب (SEEA-W) در مجتمع مس سرچشمه.

Figure 7. Schematic diagram of physical water supply, use, and return flows based on the SEEA-W framework in the Sarcheshmeh Copper Complex.

در این حساب‌ها، بر اساس طبقه‌بندی ISIC[1] که منطبق با سیستم حسابداری مالی است، فعالیت‌های اقتصادی به شش گروه کلی تقسیم می‌شوند. در این پژوهش، گروه‌هایی که مورد استفاده قرار گرفته‌اند شامل موارد زیر هستند:

۱. گروه‌های ۳۳ و ٤١-٤٣: فعالیت‌های معدنی، اکتشاف و استخراج سنگ‌های معدنی

۲. گروه ۳۵: فعالیت‌های الکتریسیته، کار و تهویه هوا

۳. گروه ٣٦: فعالیت‌های مربوط به استخراج و عرضه آب

٤. گروه ۳۷: فعالیت‌های مربوط به فاضلاب و تصفیه آب (٢٤).

هم‌چنین چارچوب حسابداری آب باید با یک گزارش اطلاعات متنی همراه باشد که اطلاعات اضافی مربوط به محیط عملیاتی و منابع آب در منطقه یا حوضه وسیع‌تر را شرح دهد. به عبارت دیگر حسابداری راهی برای ادغام داده‌ها است و گزارشگری راهی برای انتقال این اطلاعات فراهم می کند. استفاده از این چارچوب، علاوه بر شفاف‌سازی میزان مصرف و بازیافت آب، امکان مقایسه کارایی مجتمع مس سرچشمه با استانداردهای بین‌المللی و صنایع مشابه را فراهم می‌آورد. نتایج پژوهش می‌تواند به مدیران مجتمع در اتخاذ راهکارهای بهینه برای مصرف آب کمک کرده و الگویی برای سایر صنایع معدنی کشور جهت ارتقای پایداری منابع آبی فراهم کند.

جمع‌آوری و اعتبارسنجی داده‌ها: این مطالعه بر جمع‌آوری داده‌های فیزیکی مرتبط با آب ورودی، خروجی و مصرفی در کارخانه تغلیظ مجتمع مس سرچشمه در سال ١٤٠٢ تمرکز دارد. منابع اصلی داده‌ها شامل موارد زیر است:

۱. گزارش‌های عملیاتی: این گزارش‌ها شامل اطلاعات ثبت‌شده درباره برداشت، مصرف و بازیافت آب در بخش‌های مختلف کارخانه تغلیظ است. داده‌ها به‌صورت روزانه توسط اپراتورها ثبت و در سامانه مدیریت منابع آبی مجتمع ذخیره می‌شوند.

1- International Standard Industrial Classification

۲. اندازه‌گیری‌های میدانی: اندازه‌گیری مستقیم دبی جریان آب در نقاط کلیدی کارخانه، از جمله ورودی‌ها، خروجی‌ها و واحدهای بازیافت، با استفاده از دبی‌سنج‌های اولتراسونیک برند اندرس‌هاوزر[1] با دقت اندازه‌گیری ±۰/۵٪ انجام شده است. این اندازه‌گیری‌ها به‌صورت ماهیانه انجام و با مقادیر ثبت‌شده در گزارش‌های عملیاتی تطابق داده شده‌اند.

پس از جمع‌آوری داده‌های جریان آب از گزارش‌های عملیاتی و اندازه‌گیری‌های میدانی، فرآیند پردازش داده‌ها با یک روش ساختاریافته به‌منظور تضمین یکنواختی و دقت انجام شد. مراحل پردازش شامل موارد زیر بود:

الف) تجمیع داده‌ها:

۱. تمام مقادیر ثبت‌شده از گزارش‌های عملیاتی و اندازه‌گیری‌های میدانی در یک پایگاه داده یکپارچه گردآوری شدند؛

۲. واحدهای اندازه‌گیری به مترمکعب بر ساعت (m^3/h) استانداردسازی شدند تا هماهنگی بین منابع مختلف داده حفظ شود.

ب) محاسبه بیلان آبی[2]: برای بررسی یکنواختی بین آب ورودی، خروجی و مصرفی، معادله تراز آبی زیر اعمال شد:

(۱) کل برداشت آب + آب دریافتی از سایر واحدهای اقتصادی = عرضه آب به سایر واحدهای اقتصادی + کل آب برگشتی + مصرف آب

ج) دسته‌بندی جریان‌های آبی: مصارف آبی بر اساس منبع و وضعیت تصفیه به سه دسته تقسیم شدند:

۱. آب آبی[3]: آب شیرین از منابع طبیعی

۲. آب خاکستری[4]: آب بازیافتی یا تصفیه‌شده

۳. آب سبز[5]: رطوبت موجود در خاک معدنی

از دیدگاه صنعتی نیز آب شامل سه دسته کلی می‌شود:

۱. آب کارشده[6]: آب داخل صنعت که بدون تصفیه مجدد پس از یک چرخه کار دوباره استفاده می‌شود (مثل آب سرریز غلیظ‌کننده‌ها).

۲. آب تصفیه‌شده[7]: آب‌هایی که پس از تصفیه مجدداً وارد سیستم یا مخازن صنعتی می‌شوند (آب تصفیه‌خانه بند انحرافی و تصفیه‌خانه شهرک).

۳. آب خام[8]: آب تازه برداشت‌شده از منابع طبیعی بدون هیچ فرایند صنعتی (آب تازه خاتون‌آباد، سد آبی و خلیج‌فارس).

در این مجتمع، آب در دو دسته اصلی گزارش می‌شود: آب برگشتی که شامل آب در گردش است و آب خدماتی که از چاه‌های خاتون‌آباد، خلیج‌فارس و آب تصفیه‌شده شهری تأمین می‌شود. برای انطباق با (SEEA-W)، هر منبع به‌طور جداگانه تفکیک و سهم مربوطه آن اختصاص داده شد و جداول حسابداری با این داده‌های اصلاح‌شده تکمیل گردید. شفافیت این جداول حسابداری سپس طراحی جداول شاخص‌ها را امکان‌پذیر ساخت، به‌گونه‌ای که داده‌ها به‌طور مستقیم برای تحلیل به آن‌ها منتقل شدند. این بهبودها تغییرات عملیاتی مستقل را مستند می‌کنند؛ چارچوب (SEEA-W) صرفاً برای ثبت و تحلیل به‌کار گرفته شد و نه برای هدایت مداخلات لحظه‌ای. این تمایز ارزش علمی مطالعه را برجسته می‌سازد، زیرا

1- Endress+Hauser
2- Water balance

3- Blue water
4- Grey water
5- Green water
6- Worked Water
7- Recycling Water
8- Fresh Water

رویکردی شفاف و قابل رهگیری برای ارزیابی مصرف آب ارائه می‌دهد.

روش‌های آماری و برآورد عدم قطعیت: برای شاخص‌ها و درصدهای محاسبه‌شده در این مطالعه، داده‌های جمع‌آوری‌شده ابتدا بررسی و اعتبارسنجی شدند تا از صحت و دقت آن‌ها اطمینان حاصل شود. سپس مقادیر شاخص‌ها با استفاده از میانگین، حداقل، حداکثر و انحراف معیار تحلیل شدند تا پراکندگی و تغییرات داده‌ها مشخص گردد. در مواردی که داده‌ها محدود بودند، تخمین‌های اولیه از عدم قطعیت مقادیر ارائه شد تا دامنه قابل اعتماد نتایج مشخص شود. این رویکرد امکان ارائه نتایج با اعتماد بیش‌تر و تحلیل کمی قابل‌قبول برای تصمیم‌گیری در مدیریت آب کارخانه تغلیظ را فراهم می‌کند.

محدودیت‌های تحقیق: از آن‌جا که این پژوهش نخستین مطالعه حسابداری آب در صنعت معدنی ایران به‌شمار می‌رود، نمونه مشابه داخلی برای مقایسه وجود نداشت. بنابراین، در تدوین جداول و شاخص‌ها از دستورالعمل‌های (SEEA-W) و هم‌چنین گزارش‌های (ICMM) مربوط به معدن مس شیلی بهره گرفته شد. علاوه‌بر این، چارچوب (SEEA-W) عموماً در سطح ملی و کلان مورد استفاده قرار می‌گیرد، در حالی‌که در این پژوهش برای نخستین بار در سطح خرد یک واحد صنعتی و معدنی (امور تغلیظ مجتمع مس سرچشمه) به‌کار گرفته شد. این موضوع با چالش‌های متعددی همراه بود، زیرا لازم بود چارچوب مذکور متناسب با شرایط عملیاتی بازنویسی و بومی‌سازی شود.

نتایج و بحث

استفاده مجدد از آب در صنایع به روش‌های مختلفی انجام می‌شود که به نوع صنعت و نیازهای خاص آن بستگی دارد. هدف از انجام این پژوهش به‌دست‌آوردن بهره‌وری عملیاتی بخش تغلیظ مجتمع مس سرچشمه در سال ١٤٠٢ است. بدین‌منظور برای مرتب کردن داده‌های آبی از چارچوب حسابداری آب استفاده شد و در نهایت شاخص‌ها، استفاده و مصرف آب به ازای هر تن ورودی و خروجی امور تغلیظ برآورد شد. پس از شناخت دقیق سیستم آبی تغلیظ در مرحله ابتدایی، جداول (SEEA-W) اختصاصی این سیستم مبتنی بر دسته‌بندی (ISIC) توسعه داده شدند. داده‌های آبی ثبت شده جمع‌آوری و پس از صحت‌سنجی و محاسبات تفکیکی بر اساس استاندارد حسابداری (SEEA-W) در جداول مربوطه جایگذاری شدند. جداول استفاده و عرضه فیزیکی آب و جداول هیبریدی برای سال ١٤٠٢ تکمیل گردید و به ترتیب در جدول‌های ١ و ٢ آورده شده است.

همان‌طور که در جدول ١ نشان داده شده است، میزان استفاده هر بخش از فرآیند تغلیظ و نوع آب به تفکیک مشخص شده است. منظور از آب گرفته شده از محیط، آب منابع طبیعی شامل آب‌های سطحی، زیرزمینی، دریا و رطوبت خاک است و آب گرفته شده از اقتصاد منظور آب‌هایی است که از دیگر واحدها یا کارخانه‌های موجود در مجتمع مس سرچشمه، به بخش تغلیظ وارد شده است. جدول ٢ میزان عرضه آب‌هایی که پس از اتمام فرآیند، از تغلیظ خارج می‌شوند، این آب‌ها می‌تواند به محیط (آب‌های سطحی، زیرزمینی، دریا و آب خاک) و یا دیگر واحدهای مجتمع مس سرچشمه وارد شوند. در این بخش آب برگردانده شده به دیگر واحدهای اقتصادی، آبی است که همراه باطله‌ها به بخش غلیظ‌کننده‌ها وارد می‌شود تا پس از عملیات آبگیری مجدد درون چرخه باز گردد. میزان کل آب عرضه شده توسط تغلیظ نیز در ردیف ٦ مشخص می‌شود.

مفهوم مصرف آب نشان‌دهنده میزان آبی است که در حین استفاده (فرآیند) توسط واحد اقتصادی، از دست می‌رود (تبخیر، نشست و غیره)، به این معنا که آب وارد واحد اقتصادی شده است اما نه به منابع آبی و نه به دریا و نه به سایر واحدهای اقتصادی بازنگشته است. تفاوت بین استفاده آب (ردیف ۳ در جدول ۱) و عرضه آب (ردیف ٦ در جدول ۲)، مصرف آب (ردیف ۷ در جدول ۲) نامیده می‌شود. در مجتمع مس سرچشمه، آب خاک به‌عنوان رطوبت طبیعی موجود در سنگ معدن در نظر گرفته شد. پس از استخراج، سنگ معدن به سنگ‌شکن اولیه منتقل می‌شود، جایی که فرآیند خردایش اولیه و شستشو انجام می‌گیرد. محصول خردشده سپس از طریق نوار نقاله به سنگ‌شکن‌های ثانویه و ثالثیه منتقل می‌شود. رطوبت سنگ معدن در هر مرحله از فرآیند خردایش با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری رطوبت به‌طور مستمر ثبت و پایش می‌شود.

مصرف آب را می‌توان برای هر واحد اقتصادی و برای کل سیستم اقتصادی محاسبه کرد. مفهوم مصرف آب که در (SEEA-W) استفاده می‌شود با مفهوم هیدرولوژیکی مطابقت دارد. با این‌حال، با مفهوم مصرفی که در حساب‌های ملی استفاده می‌شود، متفاوت است. این مفاهیم و تعاریف با شکلی متفاوت در صنعت وجود دارد که اساس این پژوهش تلقیح این چارچوب به شکلی قابل فهم برای صنعت است. دو مفهوم اساسی در استفاده از آب برای صنعت موجود است: ۱- آب برگشتی، که شامل آب‌های آبگیری شده توسط غلیظ‌کننده‌ها و دیگر واحدهای اقتصادی به‌طور مستقیم است و ۲- آب جبرانی، که شامل آب‌های گرفته شده از بند انحرافی، خاتون‌آباد، خلیج‌فارس و دیگر آب‌های طبیعی است.

به‌کارگیری چارچوب (SEEA-W) در بخش تغلیظ نه تنها سازمان‌دهی نظام‌مند داده‌های موجود را امکان‌پذیر ساخت، بلکه شکاف‌های مهم داده‌ای را نیز آشکار کرد. با ساختاردهی اطلاعات در قالب جداول استاندارد، امکان ردیابی این موضوع فراهم شد که چه نوع آب‌هایی از چه منابعی تأمین می‌شوند و چگونه در مراحل مختلف فرایند تخصیص می‌یابند. در این مسیر مشخص شد که برخی جریان‌ها به‌طور منظم اندازه‌گیری یا ثبت نمی‌شوند. این محدودیت از طریق انجام پایش کوتاه‌مدت با استفاده از دبی‌سنج قابل‌حمل و به‌دنبال آن نصب دبی‌سنج‌های دائمی برای تضمین اندازه‌گیری پیوسته جریان‌هایی که پیش‌تر ثبت نمی‌شدند، برطرف گردید.

فراتر از بهبود جامعیت و دقت مطالعه حاضر، این تجربه نکته‌ای کلی‌تر را نیز برجسته می‌کند: فرایند به‌کارگیری یک چارچوب حسابداری آب می‌تواند خود به‌عنوان ابزاری تشخیصی عمل کند، ضعف‌های موجود در سامانه‌های پایش صنعتی را آشکار سازد و اقدامات اصلاحی را برانگیزد.

جدول ۱- استفاده فیزیکی آب در امور تغلیظ (سال ١٤٠٢).

Table 1. Physical water use in concentration operations (Year 1402).

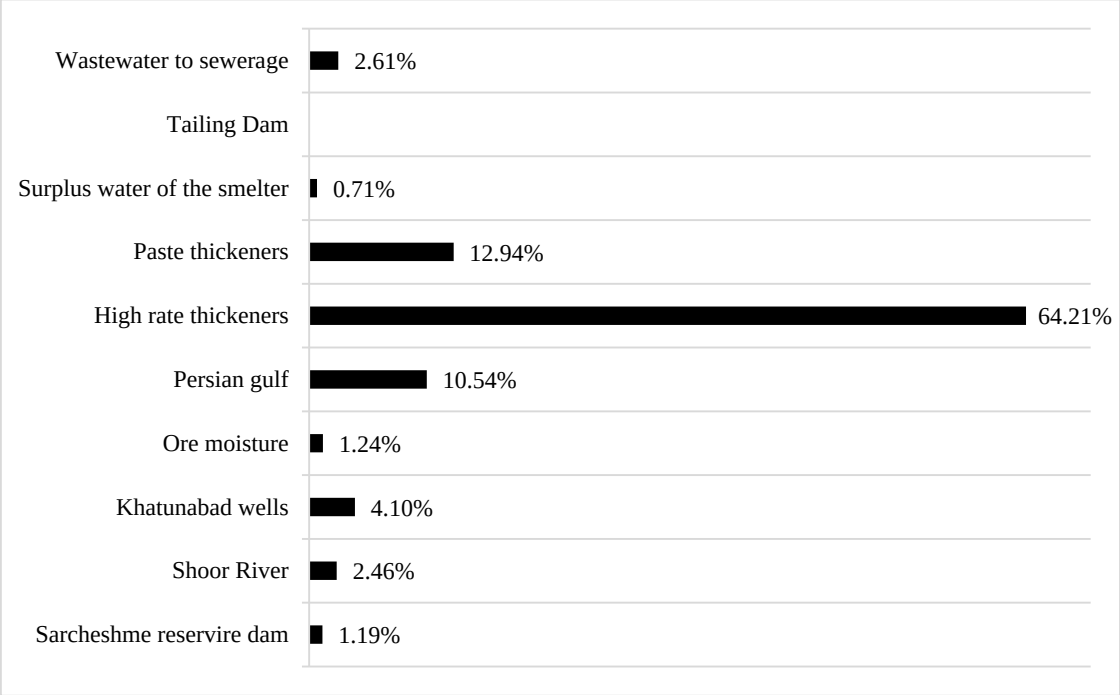
	Cubic meter per year	Industries (by ISIC category)					
		5-33 ,41-43		35	36	37	Total
		Mining and quarrying					
		Condensation					
		Concentration Plant	Molybdenum and filters Plant	Water cooling cycle	Supply and treatment of water	sewerage	
From the environment	1. Total abstraction (= 1.i +1.ii)	14,948,226	2,289,051	267,288	2,492,746	0	19,997,310
	1.i. From inland water resources:	6,022,469	597,976	89,423	2,492,746		9,202,613
	1.i.1. Surface water	1,217,704	0	25,769	2,492,746		3,736,219
	1.i.1.i. Dam (Sarcheshme copper complex dam)	1,217,704					1,217,704
	1.i.1.2. River (Shoor River)			25,769	2,492,746		2,518,514
	1.i.2. Groundwater (Khatoon-Abad wells)	3,537,759	597,976	63,654			4,199,389
	1.i.3. Soil water (Ore moisture)	1,267,006					
	1.ii. Abstraction from the sea (Persian Gulf)	8,925,757	1,691,075	177,865			10,794,697
Within the economy	2. Use of water received from other economic units of which:	79,708,410	0	30,689	2,644,770		82,383,869
	2.a. Reused water	79,708,410					79,708,410
	2.a.1. High rate thickeners	65,735,340					65,735,340
	2.a.2. Paste thickeners	13,249,533					13,249,533
	2.a.3. Tailing Dam	0					0
	2.a.4. Surplus water of the smelter	723,537					723,537
	2.b. Wastewater to sewerage			30,689	2,644,770		2,675,459
	3. Total use of water (= 1 + 2)	94,656,636	2,289,051	297,976	5,137,516	0	102,381,179

جدول ۲- عرضه فیزیکی آب در امور تغلیظ (سال ۱۴۰۲).

Table 2. Physical water supply in concentration operations (Year 1402).

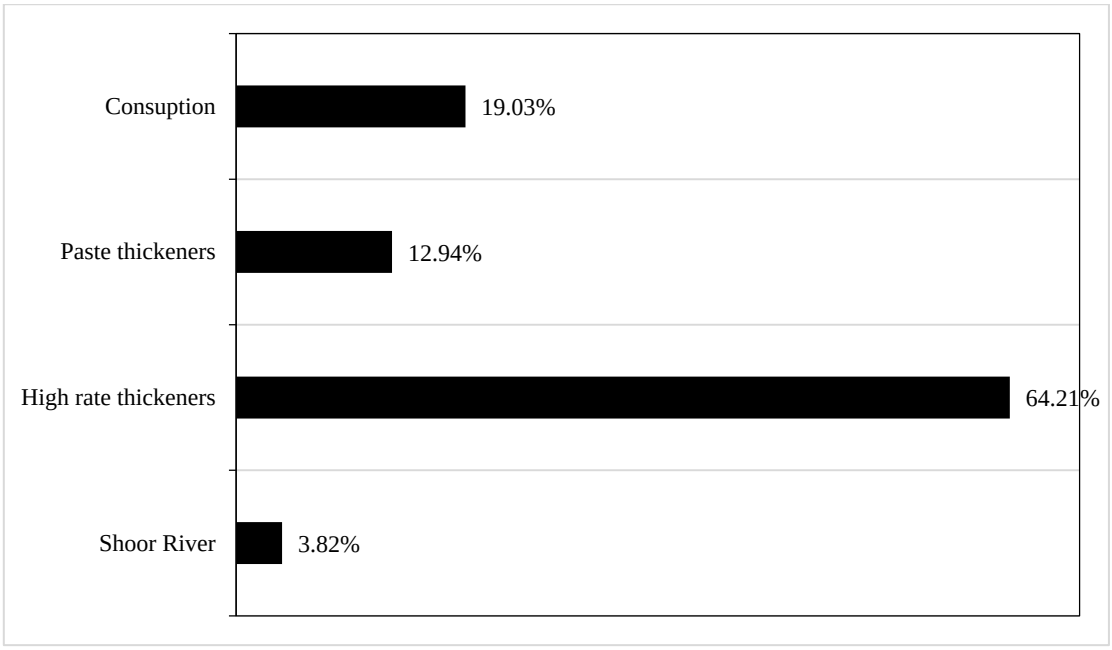
	Cubic meter per year	Industries (by ISIC category)					
		41-43 ،5-33		35	36	37	
		Mining and quarrying					
		Condensation					
		Concentration factories	Molybdenum and filters factory	Water cooling cycle	Supply and treatment of water	sewerage	Total
Within the economy	4. Supply of water to other economic units of which:	0	0	0	0	78,984,873	0
	4.a. Reused water						0
	4.a.1. High rate thickeners					65,735,340	
	4.a.2. Paste thickeners					13,249,533	
	4.b. Wastewater to sewerage						
Into the environment	5. Total returns (=5.a+5.b)						0
	5.a. To inland water resources	0	0	0	3,908,990		3,908,990
	5.a.1. Surface water (Shoor river)						0
	5.a.2. Groundwater	0			3,908,990		3,908,990
	5.a.3. Soil water						0
	5.b. To other sources (e.g., sea water)	0					0
	6. Total supply of water (=4+5)	0	0	0	3,908,990	78,984,873	82,893,863
	7. Consumption (=3-6)	94,656,636	2,289,051	297,976	1,228,526	-78,984,873	19,487,316

با استفاده از جدول یک درصد استفاده، عرضه و مصرف آب به تفکیک نوع آب در تغلیظ مشخص گردید که در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب نمایش داده شده است.



شکل ۸- درصد تمامی آب‌های استفاده شده در کارخانه تغلیظ.

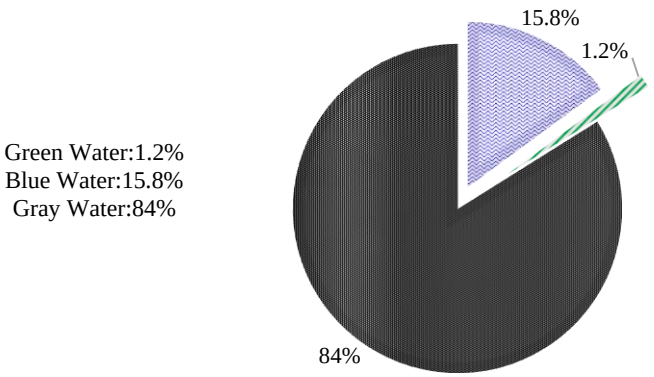
Figure 8. Percentage of all water used in the concentration plant.



شکل ۹- درصد تمامی آب‌های عرضه و مصرف شده در کارخانه تغلیظ.

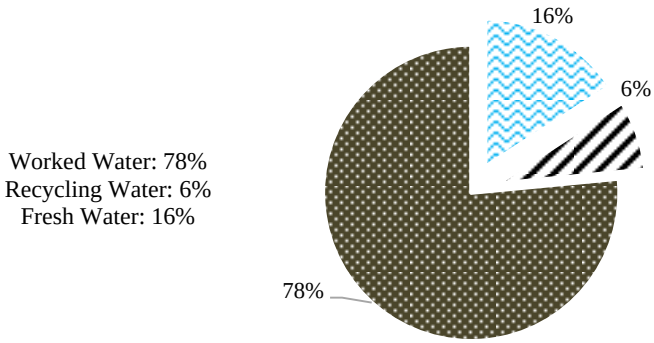
Figure 9. Percentage of all water supplied and consumed in the concentration plant.

همان‌طور که در شکل ۸ مشخص است بیش‌ترین درصد آب استفاده شده در کارخانه تغلیظ در وهله اول مربوط به غلیظ‌کننده‌های باطله و پس از آن غلیظ‌کننده‌های خمیری، به ترتیب با ٦٤/٢١ و ١٢/٩٤ درصد و سایر منابع شامل آب خلیج فارس (١٠/٥٤ درصد)، چاه‌های خاتون‌آباد (٤/١ درصد)، پساب به فاضلاب یا آب‌های صنعتی تصفیه‌شده (٢/٦١ درصد)، آب رودخانه شور (٢/٤٦ درصد)، رطوبت سنگ معدن (١/٢٤ درصد)، سد آبی سرچشمه (١/١٩ درصد)، آب ثقلی کارخانه ذوب (٠/٧١ درصد) و در نهایت آب سد باطله (صفر درصد) است. به‌طورکلی با توجه به شکل ۹ بیش‌ترین درصد مربوط به آب‌های خاکستری و بازگردانی است. هم‌چنین با توجه به شکل شش از ۱۰۰ درصد آب ورودی به تغلیظ تنها ۱۹ درصد آن مصرف می‌شود و ۸۱ درصد آن مجدداً به چرخه کار و مسیر فرایند بازمی‌گردد، حدود ۷۷ درصد توسط غلیظ‌کننده‌ها و چهار درصد آن از طریق کانال‌های زهکشی به رودخانه و در نهایت به بندانحرافی می‌ریزد و سپس طی مراحل تصفیه مجدداً مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به ماهیت (آب سبز، آبی و خاکستری) آن‌ها درصد هرکدام تجمیع شده و در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- استفاده از انواع آب با توجه به ماهیت آن‌ها در کارخانه تغلیظ.

Figure 10. Use of different types of water according to their nature in the concentration plant.



شکل ۱۱- درصد نوع آب استفاده شده در امور تغلیظ از دیدگاه صنعتگران (آب کار شده، تصفیه‌شده و خام).

Figure 11. Percentage of water types used in concentration operations from the industry perspective (processed, treated, and raw water).

همان‌طورکه در شکل ۱۰ نشان داده است سهم قابل‌توجهی از آب مورداستفاده تغلیظ را آب خاکستری تشکیل می‌دهد یعنی ۸٤ درصد که با توجه به شکل ۸، ۷۷/۱۵ درصد از آن مطعلق به آب آبگیری شده توسط غلیظ‌کننده‌ها است. این درصدهای نشان داده شده بیانگر استفاده بهینه و بهره‌وری از آب در فرایند تغلیظ و تلاش برای بازگردانی حجم بیش‌تری از آب در چرخه به‌منظور صرفه‌جویی در استفاده از آب جبرانی یا طبیعی است.

کارخانه هر سال در تیرماه اورهال انجام می‌دهد و طی این عملیات، مجموعه‌ای از اقدامات فنی انجام می‌شود که منجر به افزایش نرخ بازیافت آب برگشتی می‌شود. علاوه‌بر این، هر سال مقدار و نوع پودر لخته‌ساز مورد مطالعه قرار می‌گیرد و بهترین گزینه از نظر کارایی انتخاب می‌شود. با توجه به این‌که مجتمع مس سرچشمه دارای یک سیستم یکپارچه از غلیظ‌کننده‌ها و تصفیه‌خانه برای بازیافت فاضلاب است، سایر صنایع بزرگ معدنی با قابلیت‌های مشابه نیز می‌توانند از این تجربه بهره‌مند شوند. چارچوب (SEEA-W) نشان داده است که حسابداری آب می‌تواند در سطح جزئی و دقیق به‌کار گرفته شود و صنایع کوچک‌تر می‌توانند اجزای آن را متناسب با شرایط عملیاتی خاص خود تطبیق و سفارشی‌سازی کنند.

در صنعت هدف از تحلیل و حسابرسی داده‌های آبی ایجاد یک ارتباط معنادار با اقتصاد است که این ارتباط وابسته به تولیدات می‌باشد. بدین منظور جهت ایجاد ارتباط بین تولیدات و جداول حسابداری آب و هم‌چنین درک بهتر آن‌ها، استفاده و مصرف آب به‌ازای هر تن محصولات برآورد شد. به‌عبارت‌دیگر با توجه به جداول حسابداری آب و تحلیل و بررسی‌های صورت گرفته بر روی آنها شاخص‌هایی استخراج شد که یکی از مهم‌ترین شاخص‌ها حجم آب استفاده شده و مصرف شده به ازای هر تن تولید است (جدول ۳).

جدول ۳- استفاده و مصرف آب به ازای هر تن خاک ورودی و تولیدات تغلیظ.

Table 3. Water use and consumption per ton of input ore and concentration products.

Cubic meter per ton	Input soil	Copper-Molybdinum Concentrate	Finak Copper concentrate
Water use per ton	3.33	137.51	640.63
Water consumption per ton	0.63	26.17	121.94

با توجه به جدول ۳ کاملاً مشخص است که آب مصرف شده به‌ازای هر تن خاک ورودی و تولیدات تغلیظ کم‌تر از یک پنجم کل آب استفاده شده به ازای هر تن است و مابقی آب به چرخه کار بازگشته است.

مفهوم بهره‌وری عملیاتی بسیار بیش‌تر از صرفاً کاهش هزینه است. بهره‌وری عملیاتی به معنای حداکثر کردن کارایی و اثربخشی فرآیندها و منابع در یک سازمان یا صنعت است. این مفهوم شامل استفاده بهینه از منابع، کاهش هزینه‌ها و افزایش کیفیت تولید می‌شود. برای تکمیل بیانیه بهره‌وری عملیاتی، از حجم آب کارکرده یا تصفیه شده طی یک بازه زمانی از منابع آبی مختلف استفاده می‌شود. این بیانیه از حجم آبی که استفاده مجدد یا راندمان استفاده مجدد، حجم آب بازیافتی و یا راندمان بازیافت را فهرست می‌کند تشکیل شده است (۲۹). بهره‌وری عملیاتی، درجه‌ای را توصیف می‌کند که آب در طی چرخه کار یا تولید "مورد استفاده مجدد" و "بازیافت" می‌شود و نیاز به ورودی‌های عملیاتی اضافی (آب‌های طبیعی یا جبرانی) را کاهش می‌دهد (جدول ٤).

جدول ٤- بهره‌وری عملیاتی.

Table 4. Operational Efficiency.

Year	Operational Efficiency	Recycling Efficiency	Reuse Efficiency
1402	5.07 %	77.85 %	82.93 %

همان‌طورکه در جدول ٤ مشخص است کارایی استفاده مجدد که مربوط به آبگیری غلیظ‌کننده‌ها است ۷۷/۸۵ درصد از کل است که عملکرد خوب غلیظ‌کننده‌ها در بازگردانی آب رانشان می‌دهد. هم‌چنین بهره‌وری عملیاتی ۸۲/۹۳ درصد است که این درصد نیز مصرف درست و بهینه از آب‌های طبیعی را به نمایش می‌گذارد. مطابق با الزامات حداقلی گزارش‌دهی شورای بین‌المللی معدن و فلزات (ICMM[1])، مطالعه موردی در زمینه حسابداری آب برای یک معدن مس در شمال شیلی انجام شد. این ارزیابی براساس یک رویکرد پنج‌مرحله‌ای جهت گردآوری دقیق و منسجم داده‌های مربوط به جریان‌های آب در سطح سایت صورت گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که بهره‌وری عملیاتی مصرف آب در این معدن برابر با ٨٤ درصد بوده است (۲۱)، که نشان‌دهنده عملکرد مطلوب در استفاده بهینه از منابع آبی است.

در مقایسه با این نمونه بین‌المللی، معدن مس سرچشمه نیز تحت ارزیابی حسابداری آب قرار گرفت و بهره‌وری عملیاتی آن معادل ۸۳ درصد محاسبه شد. این نتیجه بیانگر آن است که عملکرد سرچشمه از منظر بهره‌وری مصرف آب در سطحی نزدیک به استانداردهای بین‌المللی و نمونه‌های موفق جهانی قرار دارد، و نشان‌دهنده گام‌های مثبت این مجموعه در راستای مدیریت پایدار منابع آبی است.

نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش، کاهش مصرف آب در صنایع معدنی با تمرکز بر مجتمع مس سرچشمه موردبررسی قرار گرفت. کاهش مصرف آب از هر مسیر ممکن، منافع گسترده‌ای را برای صنعت، جامعه و اقتصاد کشور به همراه دارد. یکی از راهکارهای اصلی برای مقابله با بحران کم‌آبی و خشکسالی، بازیافت و استفاده مجدد از پساب‌های صنعتی است. در صنایع معدنی، بازیافت و بازچرخانی آب در چرخه تولید، اقتصادی‌تر از بازگرداندن پساب برای تغذیه مصنوعی آبخوان است و موجب کاهش برداشت از منابع طبیعی و افزایش کارایی مصرف آب می‌شود.

در همین راستا، با هدف ارزیابی بهره‌وری مصرف آب، داده‌های آبی بخش تغلیظ مجتمع مس سرچشمه (به‌عنوان آب‌برترین بخش این مجتمع) گردآوری و ساماندهی شد. براساس داده‌های طبقه‌بندی‌شده، شاخص‌هایی تحلیلی استخراج گردید که وضعیت موجودِ استفاده، عرضه و مصرف آب را بر اساس نوع منبع (آب سطحی، زیرزمینی، دریا، آب برگشتی و غیره) و نوع آب (آبی، سبز، خاکستری) به‌صورت دقیق و قابل‌فهم برای مدیران و تصمیم‌گیران نمایش می‌دهند.

این شاخص‌ها با واقعیت‌های عملیاتی نیز تطابق دارند. به‌عنوان نمونه، داده‌ها نشان دادند که بیش از ۷۷ درصد آب تغلیظ از طریق بازیافت و بازگردانی تأمین می‌شود. هم‌چنین، کاهش مصرف آب به‌ازای هر تن مولیبدن محتوی در کنسانتره، به افزایش عیار مولیبدن در اعماق پایین‌تر معدن نسبت داده شد، که خود به‌خوبی در شاخص‌ها و داده‌های میدانی منعکس‌شده است. شاخص‌ها هم‌چنین بهبود عملکرد غلیظ‌کننده‌ها و استفاده از آب دریای خلیج‌فارس به‌جای آب

1- International Council on Mining and Metals

زیرزمینی چاه‌های خاتون‌آباد را نیز تأیید می‌کنند. پس از تحلیل داده‌ها، اقداماتی مانند نصب یا تعویض چند دبی‌سنج به‌عنوان بخشی از راهکارهای بهینه‌سازی عملیاتی در دستور کار قرار گرفت. به‌طورکلی، استفاده گسترده از آب برگشتی در مجتمع سرچشمه مزایای متعددی به همراه داشته است، از جمله:

١. صرفه‌جویی در منابع آب طبیعی؛

٢. کاهش آلودگی زیست‌محیطی ناشی از تخلیه پساب؛

٣. بهبود پایداری زیست‌محیطی و حفظ اکوسیستم‌ها؛

٤. افزایش بهره‌وری فرایندهای صنعتی؛

٥. بهبود تصویر اجتماعی صنعت در جامعه؛

٦. گام مؤثر در راستای توسعه پایدار.

در نهایت، بهره‌وری عملیاتی مصرف آب در مجتمع مس سرچشمه معادل ۸۲/۹۳ درصد محاسبه شد. این مقدار بیانگر عملکرد موفق مجتمع در مدیریت بهینه منابع آبی است. مقایسه این عدد با برخی معادن بزرگ جهانی، از جمله معدن مس واقع در شمال شیلی که طبق گزارش ICMM دارای بهره‌وری ٨٤ درصدی است، نشان می‌دهد که مجتمع سرچشمه از نظر بهره‌وری آب، در سطحی قابل‌رقابت با نمونه‌های بین‌المللی قرار دارد و در مسیر تحقق اهداف توسعه پایدار گام‌های مؤثری برداشته است.

نکته دارای اهمیت آن است که این پژوهش، نخستین بار در ایران چارچوب حسابداری آب را در سطح یک بخش عملیاتی از یک معدن مس پیاده‌سازی کرده است .با توجه به موفقیت این تجربه، می‌توان این چارچوب را در سایر صنایع آب‌بر کشور، به‌ویژه صنعت فولاد که سهم قابل‌توجهی در مصرف منابع آبی دارد، تعمیم داد. اجرای چنین رویکردهایی در صنایع دیگر می‌تواند نقش مهمی در ارتقاء بهره‌وری، کاهش فشار بر منابع آبی و تحقق توسعه پایدار ایفا کند.

واژه‌نامه

تعاریف تمامی واژه‌های به‌کاربرده شده در متن در زیر آورده شده است.

١. کنسانتره: کنسانتره به موادی خالص و متراکم اشاره دارد که در اثر فرآیندهایی، غلیظ می‌شوند.

٢. هیدروسیکلون: هیدروسیکلون‌ها دستگاه‌هایی هستند که برای جدا کردن ذرات درشت و ریز در صنعت فرآوری مورد استفاده قرار می‌گیرد.

٣. فلوتاسیون: فلوتاسیون در اصطلاح به معنای شناورسازی می‌باشد و یکی از راه‌های تغلیظ در صنعت یا بالا بردن عیار مواد معدنی (پرعیارسازی مواد) است. فلوتاسیون مهم‌ترین روش تغلیظ است که به‌منظور فرآوری فلزات پایه به‌کار گرفته می‌شود.

٤. سلول‌های رافر: رافر یک سلول فلوتاسیون است که بعد از اضافه کردن مواد شیمیایی به خوراک، از سلول اولیه به این سلول هدایت می‌شوند. در این مرحله مواد با ارزش درون حباب‌ها گیر می‌افتد و از طریق هوادهی که از کف سلول رخ می‌دهد حباب‌ها به سمت بالای سلول می‌روند.

٥. کلینر و ری کلینر: حباب‌های خارج شده از سلول فلوتاسیون رافر و اسکاونجر وارد سلول دیگر می‌شوند که به آن کلینر گفته می‌شود. همان‌طورکه از نام آن بر می‌آیند این مرحله، محصولی که از طریق حباب‌ها جمع‌آوری‌شده سرریز آن‌ها به سلول‌های ری کلینر منتقل می‌شود.

٦. اسکاونجر: اسکاونجر که به اصلاح رمق‌گیر هم گفته می‌شود، ته ریز سلول‌های کلینر به سلول دیگر به‌نام اسکاونجر هدایت می‌شوند. در اسکاونجر همین اعمالی که در رافر رخ داده بود دوباره انجام می‌شوند. اما چون اصل عنصر مورد نظر در مرحله اول گرفته شده است، کار اسکاونجر راحت‌تر از رافر است.

٧. لوله خوراک و ایداک: لوله خوراک زیر پل دسترسی آویزان شده است و از دیواره مخزن تا

خوراک‌دهنده امتداد دارد و ایداک نیز قسمتی از لوله خوراک ورودی است که رسوب ورودی را به خوراک‌دهنده منتقل می‌کند. لوله خوراک و ایداک ورودی از پل آویزان هستند. کابل‌های الکتریکی و لوله فلوکولنت بر روی پل قرار گرفته‌اند.

۸. لاندر: لاندر یک مخزن استوانه‌ای با کف مخروطی متصل به سرریز غلیظ‌کننده‌ها است جهت انتقال آب به درون لوله‌های برگشتی.

۹. لخته‌ساز: در این فرایند از یک پودر سفید رنگ برای تسریع در عملیات ته‌نشینی استفاده می‌شود. ذرات ریز می‌توانند به‌وسیله فلوکولاسیون (لخته‌سازی) به یکدیگر بچسبند. به همین علت سرعت سقوط ذرات پیوسته، بیشتر از سرعت تک تک ذرات خواهد بود.

تقدیر و تشکر

بدین‌وسیله از سردبیر محترم و داوران ارجمند مجله پژوهش‌های حفاظت آب و خاک که با دقت نظر و صرف وقت ارزشمند خود در ارزیابی این مقاله همکاری نمودند، صمیمانه قدردانی می‌شود. هم‌چنین از اساتید محترم، سرکار خانم دکتر ثمره‌هاشمی و جناب آقای دکتر قادری، به‌واسطه راهنمایی‌ها و حمایت‌های علمی ارزشمندشان سپاسگزاری می‌گردد. قدردانی ویژه نیز از مدیریت و کارشناسان محترم مجتمع مس سرچشمه به‌منظور همکاری و حمایت از اجرای این پژوهش به‌عمل می‌آید.

داده‌ها و اطلاعات

اطلاعات و داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از داده‌های ثبتی و عملیاتی مجتمع مس سرچشمه استخراج شده‌اند. این داده‌ها به‌دلیل ملاحظات محرمانگی صنعتی، در دسترس عموم قرار ندارند.

تعارض منافع

نویسندگان اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع مالی، علمی یا شخصی در ارتباط با نگارش و انتشار این مقاله وجود ندارد.

مشارکت نویسندگان

الناز اقلیدی: تحقیق و بررسی، طراحی و تدوین طرح پژوهش، نگارش نسخه اولیه مقاله، مفهوم‌سازی، گردآوری و تحلیل داده‌ها، اعتبارسنجی، و تدوین روش‌شناسی.

دکتر مرضیه ثمره‌هاشمی: طراحی پژوهش، بازبینی و ویرایش مقاله، اعتبارسنجی، و تدوین روش‌شناسی.

دکتر کوروش قادری: بازبینی و ویرایش مقاله.

دکتر مهران اسپهبدی: مدیریت پروژه.

اصول اخلاقی

اطلاعات و داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از داده‌های ثبتی و عملیاتی مجتمع مس سرچشمه استخراج شده‌اند. این داده‌ها به‌دلیل ملاحظات محرمانگی صنعتی، در دسترس عموم قرار ندارند.

حمایت مالی

این پژوهش با حمایت مالی دانشگاه شهید باهنر کرمان و همکاری مجتمع مس سرچشمه انجام شده است.

منابع

1. Gibson, D., Moran, C., Schofield, S. A., Bailey, G., Cummings, J., Edebone, M., ... & Williams, D. (2008). Water management: leading practice sustainable development program for the mining industry **https://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:342943.**
2. Gore, C. (2015). The post-2015 moment: Towards Sustainable Development Goals and a new global development paradigm. *Journal of International Development*, 27(6), 717-732. **https://doi.org/10.1002/jid.3109.**
3. Hussey, K., & Dovers, S. (2006). Trajectories in Australian water policy. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 135(1), 36-50. **https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2006.mp135001005.x.**
4. Zhang, X., Gao, L., Barrett, D., & Chen, Y. (2014). Evaluating water management practice for sustainable mining. *Water*, 6(2), 414-433. **https://doi.org/10.3390/w6020414.**
5. Cote, C. M., Moran, C. J., Cummings, J., & Ringwood, K. (2009). Developing a water accounting framework for the Australian minerals industry. *Mining Technology*, 118(3-4), 162-176. **https://doi.org/10.1179/174328610X12682159814948.**
6. Contreras, S., & Hunink, J. E. (2015). Water accounting at the basin scale: Water use and supply (2000–2010) in the Segura River basin using the SEEA framework. *Future Water: Cartagena, Spain*. Report Future Water: 138.
7. Setlhogile, T., Arntzen, J., & Pule, O. B. (2017). Economic accounting of water: The Botswana experience. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 100, 287-295. **10.1016/j.pce.2016.10.007.**
8. Santoro, S., Estay, H., Avci, A. H., Pugliese, L., Ruby-Figueroa, R., Garcia, A., ... & Curcio, E. (2021). Membrane technology for a sustainable copper mining industry: The Chilean paradigm. *Cleaner Engineering and Technology*, 2, 100091. **10.1016/j.clet.2021.100091.**
9. Danoucaras, A. N., Woodley, A. P., & Moran, C. J. (2014). The robustness of mine water accounting over a range of operating contexts and commodities. *Journal of cleaner production*, 84, 727-735. **https:// doi.org/ 10.1016/ j.jclepro.2014.07.078.**
10. Delavar, M., Morid, S., Morid, R., Farokhnia, A., Babaeian, F., Srinivasan, R., & Karimi, P. (2020). Basin-wide water accounting based on modified SWAT model and WA+ framework for better policy making. *Journal of Hydrology*, 585, 124762. **https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124762.**
11. Bagheri, A., & Babaeian, F. (2020). Assessing water security of Rafsanjan Plain, Iran-Adopting the SEEA framework of water accounting. *Ecological Indicators*, 111, 105959. **https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105959.**
12. Alipour, M. S., & Rezaei, Z. (2015). An analysis of the System of Environmental-Economic Accounting for Water (SEEA-W) and assessment of water consumption in the agriculture, industry, and domestic sectors. The 4th Conference on the Application of the Input-Output Model in Economic and Social Planning, Tehran. [In Persian]
13. Karimi, P., Bastiaanssen, W. G., & Molden, D. (2013). Water Accounting Plus (WA+)–a water accounting procedure for complex river basins based on satellite measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(7), 2459-2472. **https://doi.org/10.5194/hess-17-2459-2013.**
14. Ministry of Energy (Iran). (2008). Guideline for the classification of raw water quality, wastewaters, and return flows for industrial and recreational uses (Publication No. 462). [In Persian]
15. Sethi, S. P. (2011). Globalization and self-regulation: The crucial role that corporate codes of conduct play in global business. *S. P. Sethi (Ed.). New*

York: Palgrave Macmillan. (pp. 161-188). **https://doi.org/10.1057/9780230348578.**

16. Godfrey, J. M., & Chalmers, K. (Eds.). (2007). Globalisation of accounting standards. *Edward Elgar Publishing.*
17. Godfrey, J. M., & Chalmers, K. (Eds.). (2012). Water accounting: International approaches to policy and decision-making. *Edward Elgar Publishing*.
18. Vardon, M. J., Le, T. H. L., Martinez-Lagunes, R., Pule, O. B., Schenau, S., May, S., & Grafton, R. Q. (2025). Accounting for water: A global review and indicators of best practice for improved water governance. *Ecological Economics*, 227, 108396. **https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108396.**
19. Vardon, M. J., Le, T. H. L., Martinez-Lagunes, R., Pule, O. B., Schenau, S., May, S., & Grafton, R. Q. (2023). Water accounts and water accounting. *Global Commission on the Economics of Water: Paris, France*.
20. Statistical Center of Iran. (2016). National Population and Housing Census. [In Persian]
21. International council on mining and metals sustainable development framework (ICMM). (2021). Water Reporting: Good practice guide (2nd Edition).
22. Hopwood, A. G., & Miller, P. (Eds.). (1994). Accounting as social and institutional practice (Vol. 24). Cambridge University Press.
23. United Nation (UN). (2012). SEEA-Water: System of Environmental-Economic Accounting for Water (SEEA-W). Department of Economic and Social Affairs.
24. United Nations Statistics Division (UNCD). (2007a). About the system of national. accounts [online]. **Available from: nhttp://unstats.un.org/unsd/sna1993/ introduction.aspm [Accessed: 5 December 2007].**
25. United Nations Statistics Division (UNCD). (2007b). System of environmental economic accounting for water (SEEA-W) [online]. **Available from: nhttp:// unstats.un.org/ unsd/ envAccounting/ seeaw.aspm [Accessed: 5 December 2007].**
26. United Nations Statistics Commission (UNCD). (2007c). System of environmental-accounting for water: Final draft [online]. **Available from: nhttp:// unstats.un.org/unsd/envaccounting/EnvAcc_Brochure_FINAL1.pdfm [Accessed: 5 December 2007].**
27. Brandt, P., Ernst, A., Gralla, F., Luederitz, C., Lang, D. J., Newig, J., ... & Von Wehrden, H. (2013). A review of transdisciplinary research in sustainability science. *Ecological economics*, 92, 1-15. **https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.04.008.**
28. Borrego-Marín, M. M., Perales, J. M., Posadillo, A., Gutiérrez-Martín, C., & Berbel, J. (2015, March). Analysis of Guadalquivir droughts 2004–2012 based on SEEA-W tables. In *DROUGHT: Research and Science-Policy Interfacing, Proceeding of the International Conference on DROUGHT: Research and Science-Policy Interfacing* (pp. 79-84). Leiden, the Netherlands: CRC Press.
29. Coelli, T. J., Prasada Rao, D. S., O'donnell, C. J., & Battese, G. E. (2005). *An introduction to efficiency and productivity analysis*. Boston, MA: Springer US. **https://doi.org/10.1007/b136381.**