

از حسابداری آب تا تصمیم‌گیری مدیریتی: ارزیابی تجربی و توسعه کاربرد چارچوب MCA-WAF در یک مجتمع صنعتی - معدنی تحت تنش آبی

سید محمد راه‌دار^۱، علی باقری^{۲*}، مرضیه ثمره هاشمی^۳

چکیده

تشدید تنش‌های آبی در مناطق خشک و نیمه‌خشک، ضرورت استفاده از ابزارهای نظام‌مند برای مدیریت مصرف آب را بیش از پیش آشکار ساخته است. این پژوهش با هدف ارزیابی قابلیت‌ها و محدودیت‌های چارچوب حسابداری آب شورای معدنی استرالیا (MCA-WAF)، این چارچوب را در یک مجتمع صنعتی-معدنی فعال در زنجیره استخراج سنگ آهن تا تولید فولاد با منابع تأمین آب چندگانه پیاده‌سازی کرده است. نوآوری پژوهش در توسعه کاربرد این چارچوب از طریق ارائه شاخص‌های مکمل مبتنی بر شدت مصرف آب، تحلیل کیفیت داده‌ها و تبیین نقش آن در پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی است. روش پژوهش بر بازسازی شبکه جریان آب، تهیه بیلان فیزیکی و استخراج شاخص‌های عملکردی با استفاده از داده‌های عمدتاً اندازه‌گیری‌شده استوار است. نتایج نشان داد مجموع آب ورودی سالانه حدود ۱۸/۹ میلیون مترمکعب است که ۶۷ درصد آن از منابع انتقالی تأمین می‌شود. کارایی عملیاتی آب (بازاستفاده و بازیافت) ۱۴/۹ درصد برآورد شد که پایین‌تر از مقادیر متعارف جهانی بوده و ظرفیت قابل‌توجهی برای توسعه بازچرخانی را نشان می‌دهد. در مقابل، شاخص مصرف آب برای تولید هر تن کنسالتزه سنگ آهن (۰/۶۱ مترمکعب بر تن) کمتر از میانگین جهانی است که بیانگر عملکرد مناسب فرایند تولید و ناکارایی مدیریت چرخه آب در سطح سیستم است. همچنین، حسابداری آب شکاف میان ادراک مدیریتی و واقعیت داده‌محور را آشکار ساخت؛ به گونه‌ای که برآورد اولیه مدیران از میزان بازچرخانی به مراتب بیش از مقدار واقعی بود. یافته‌ها نشان می‌دهد تکمیل چارچوب MCA-WAF با شاخص‌های اقتصادی، آن را به ابزاری مؤثر برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی در مدیریت پایدار منابع آب تبدیل می‌کند.

واژگان کلیدی: حسابداری آب شرکتی، چارچوب حسابداری آب شورای معدنی استرالیا، انتشار اطلاعات، کارایی آب، بازچرخانی، مدیریت منابع آب

^۱ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

^۲ دانشیار گروه مهندسی و مدیریت آب، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. ali.bagheri@modares.ac.ir - نویسنده مسؤول

^۳ استادیار بخش مهندسی آب، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران. samare@uk.ac.ir

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، تشدید فشار بر منابع آب شیرین در نتیجه هم‌زمانی رشد جمعیت، توسعه صنعتی و تغییرات اقلیمی، به یکی از مهم‌ترین چالش‌های توسعه پایدار در سطح جهانی تبدیل شده است. این وضعیت در کشورهای واقع در مناطق خشک و نیمه‌خشک، از جمله ایران، با شدت بیشتری بروز یافته و منجر به افزایش رقابت میان بخش‌های مختلف مصرف‌کننده آب شده است. در این میان، بخش صنعت، به‌ویژه صنایع معدنی و فلزی، به دلیل ماهیت آب‌بر فرایندهای تولید، نقش قابل‌توجهی در الگوهای مصرف آب ایفا می‌کند. وابستگی این صنایع به منابع آب، نه تنها آن‌ها را در معرض ریسک‌های فیزیکی ناشی از کمبود آب قرار می‌دهد، بلکه ریسک‌های اقتصادی، اجتماعی و اعتباری مرتبط با پایداری را نیز تشدید می‌سازد (Northey et al., 2016; 2019). در کشورهایی با اقلیم غالباً خشک نظیر ایران، استقرار صنایع معدنی بزرگ در مناطق کم‌آب، علاوه بر افزایش هزینه‌های تأمین، موجب تشدید تعارضات بین‌بخشی و مواجهه با محدودیت‌های سیاستی شده است. این شرایط، ضرورت بازنگری در شیوه‌های سنتی مدیریت آب و حرکت به سمت رویکردهای مبتنی بر داده، تحلیل و شفافیت را برجسته می‌سازد (Burritt & Christ, 2017).

در پاسخ به این چالش‌ها، رویکردهای نوین مدیریت منابع آب بر گذار از مدیریت عرضه‌محور به مدیریت تقاضا‌محور، افزایش بهره‌وری و بهبود شفافیت اطلاعاتی تأکید دارند (Vardon et al., 2025). تحقق این اهداف، مستلزم دسترسی به اطلاعات دقیق، قابل اتکا و نظام‌مند درباره جریان‌های آب در سطح بنگاه است. در این راستا، مفهوم «حسابداری آب»^۱ به عنوان ابزاری برای کمی‌سازی، تحلیل و گزارشگری جریان‌های آب توسعه یافته است (Molden & Sakthivadivel, 1999). هدف اصلی حسابداری آب، ارائه تصویری شفاف از جریان‌های فیزیکی آب شامل برداشت، مصرف، بازچرخانی، بازیافت و تخلیه در یک محدوده مشخص است تا زمینه تصمیم‌گیری آگاهانه، ارزیابی ریسک و پاسخگویی به ذی‌نفعان فراهم شود (Grafton & Hussey, 2011).

مرور ادبیات نشان می‌دهد که رویکردهای موجود در حوزه حسابداری و ارزیابی آب را می‌توان در سه دسته اصلی طبقه‌بندی کرد: (۱) چارچوب‌های حسابداری آب در مقیاس کلان، (۲) ابزارهای ارزیابی اثرات آب، و (۳) چارچوب‌های حسابداری در سطح بنگاه. چارچوب‌هایی مانند سیستم حسابداری زیست‌محیطی-اقتصادی آب^۲ (UN, 2012) (SEEA-Water)، چارچوب حسابداری آب با هدف عمومی^۳ (Chalmers et al., 2012) (GPWA) و مدل‌های توسعه‌یافته توسط نهاد بین‌المللی مدیریت آب^۴ (Molden, 1997) (IWMI) و حتی نسخه توسعه‌یافته آن^۵ (Batchelor et al., 2016) (WAF) عمدتاً در مقیاس‌های ملی یا حوضه‌ای طراحی شده‌اند و بر ارتباط میان منابع طبیعی و اقتصاد کلان تمرکز دارند. با وجود ارزش بالای این چارچوب‌ها در تحلیل‌های سیاستی، به دلیل فقدان جزئیات عملیاتی، کاربرد آن‌ها در سطح بنگاه محدود است.

در کنار این رویکردها، ابزارهایی نظیر «ردپای آب»^۶ (Hoekstra & Chapagain, 2007) (WFA) و «ارزیابی چرخه عمر»^۷ (Owens, 2002) (LCA) نیز برای سنجش اثرات زیست‌محیطی مصرف آب به کار گرفته شده‌اند. با این حال، این ابزارها عمدتاً بر «اثرگذاری» تمرکز دارند و توانایی محدودی در ارائه بیلان فیزیکی دقیق و ردیابی جریان‌های داخلی آب در سطح سازمان دارند؛ از این‌رو، کاربرد آن‌ها در تصمیم‌گیری‌های عملیاتی محدود است.

در پاسخ به این محدودیت‌ها، چارچوب‌های تخصصی‌تری برای حسابداری آب در سطح بنگاه توسعه یافته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها چارچوب حسابداری آب شورای معدنی استرالیا^۸ (MCA-WAF) است. این چارچوب با تمرکز بر ردیابی دقیق جریان‌های فیزیکی آب، امکان تهیه بیلان آب در سطح



سایت را فراهم کرده و از طریق تفکیک اجزای چرخه آب، ابزار مناسبی برای ارزیابی کارایی مصرف، شناسایی نقاط اتلاف و بهینه‌سازی مدیریت منابع فراهم می‌آورد (Mineral Council of Australia, 2022; Danoucaras & Woodley, 2013).

اگرچه چارچوب‌های مختلف حسابداری آب در سطوح حوضه آبریز، ملی و بنگاهی طی سال‌های اخیر توسعه یافته‌اند، بخش عمده پژوهش‌های موجود بر توسعه روش‌شناختی چارچوب‌ها، ارزیابی عملکرد منابع آب در مقیاس حوضه یا گزارش‌دهی شاخص‌های مصرف متمرکز بوده‌اند. در مقابل، شواهد تجربی درباره نحوه استقرار عملی یک نظام حسابداری آب در سطح بنگاه‌های صنعتی، چگونگی بازسازی بیلان فیزیکی آب با استفاده از داده‌های واقعی، و ظرفیت این چارچوب‌ها برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی همچنان محدود است؛ به‌ویژه در صنایع معدنی و فولادی کشورهای دارای تنش آبی که با منابع تأمین آب متنوع، شبکه‌های پیچیده انتقال و بازچرخانی، و محدودیت‌های داده‌ای مواجه هستند. پژوهش حاضر درصدد است این خلأ را از طریق پیاده‌سازی تجربی چارچوب MCA-WAF در یک مجتمع صنعتی-معدنی، تحلیل کیفیت و عدم قطعیت داده‌ها، استخراج شاخص‌های عملکردی تکمیلی و تبیین مسیر تبدیل اطلاعات حسابداری آب به دانش قابل استفاده در تصمیم‌گیری مدیریتی تا حدی برطرف کند.

بر این اساس، پژوهش حاضر با هدف پر کردن این خلأها، به پیاده‌سازی چارچوب MCA-WAF در یک مجتمع صنعتی-معدنی پرداخته و تلاش می‌کند ضمن ارزیابی قابلیت‌های این چارچوب، زمینه توسعه آن را برای کاربرد در شرایط کم‌آبی فراهم سازد. در راستای این هدف کلی، اهداف مشخص پژوهش به شرح زیر تعریف شده‌اند:

- بازسازی و کمی‌سازی بیلان فیزیکی آب در سطح بنگاه از طریق شناسایی، طبقه‌بندی و اندازه‌گیری جریان‌های ورودی، خروجی و انتقال‌های داخلی؛
 - ارزیابی کارایی مصرف آب در دو سطح فرآیندی و سیستمی با تأکید بر سهم آب جدید، بازاستفاده و بازچرخانی؛
 - تحلیل ساختار تأمین آب و شناسایی ریسک‌های مرتبط با منابع مختلف، به‌ویژه منابع انتقالی و زیرزمینی؛
 - بررسی نقش حسابداری آب در بهبود شفافیت اطلاعات و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی از طریق مقایسه داده‌های واقعی با برآوردهای موجود؛
 - ارزیابی محدودیت‌های چارچوب MCA-WAF و ارائه مسیرهای توسعه آن با تأکید بر یکپارچه‌سازی تحلیل‌های فیزیکی و اقتصادی آب. این اهداف به‌گونه‌ای طراحی شده‌اند که امکان ارزیابی جامع عملکرد آب در سطح بنگاه را فراهم کرده و پیوندی میان تحلیل‌های فنی، مدیریتی و راهبردی برقرار سازند.
- با وجود توسعه چارچوب‌های متنوع حسابداری و ارزیابی آب، هر یک با هدف، مقیاس تحلیل و نوع خروجی متفاوتی طراحی شده‌اند. از این رو انتخاب چارچوب مناسب باید متناسب با هدف پژوهش و مقیاس تصمیم‌گیری انجام شود. جدول (۱) مقایسه‌ای میان مهم‌ترین چارچوب‌های رایج حسابداری آب و جایگاه چارچوب MCA-WAF در ارتباط با اهداف پژوهش حاضر ارائه می‌کند. همان‌گونه که این جدول نشان می‌دهد، اغلب چارچوب‌های موجود یا در مقیاس حوضه آبریز و سیاست‌گذاری کلان توسعه یافته‌اند، یا بر ارزیابی اثرات زیست‌محیطی و ردپای آب محصولات تمرکز دارند. در مقابل، چارچوب MCA-WAF با تمرکز بر بازسازی شبکه جریان آب، تهیه بیلان فیزیکی و مستندسازی کیفیت داده‌ها، امکان تحلیل دقیق عملکرد مدیریت آب در سطح بنگاه را فراهم می‌کند. از آنجا که هدف پژوهش حاضر ارزیابی نظام مدیریت آب یک مجتمع صنعتی-معدنی و شناسایی فرصت‌های بهبود بر پایه داده‌های واقعی بوده است، این چارچوب مناسب‌ترین گزینه برای دستیابی به اهداف پژوهش تشخیص داده شد.

Table 1- Comparison of major water accounting frameworks and rationale for selecting MCA-WAF in this study

جدول ۱- مقایسه چارچوب‌های متداول حسابداری آب و دلایل انتخاب MCA-WAF در پژوهش حاضر

Framework	Primary Scale	Physical Water Accounting	Economic Accounting	Water Balance Reconstruction	Enterprise Decision Support	Basin / Policy Support	Main Application
IWMI Water Accounting	River basin	✓	—	✓	—	✓	Basin-scale water allocation and productivity assessment
WA+	River basin	✓	—	✓	—	✓	Basin water accounting and water productivity assessment
SEEA-Water	National / Regional	✓	✓	Partial	Partial	✓	Environmental-economic accounting and national water statistics
Water Footprint Assessment (WFA)	Product / Process	Partial	—	—	Partial	—	Assessment of direct and indirect water use and sustainability impacts
Life Cycle Assessment (LCA)	Product	Partial	Partial	—	Partial	—	Environmental impact assessment throughout the product life cycle
Corporate Water Accounting	Enterprise	✓	✓	Partial	✓	—	Corporate water reporting and sustainability disclosure
MCA-WAF	Enterprise	✓	—	✓	✓	Partial	Physical water accounting, flow network reconstruction, and operational water management



با وجود توسعه چارچوب‌های مختلف حسابداری آب، اغلب مطالعات موجود بر تهیه گزارش‌های فیزیکی جریان آب یا ارزیابی عملکرد در مقیاس حوضه‌های آبریز متمرکز بوده‌اند و کمتر به نحوه بهره‌گیری از اطلاعات حسابداری آب برای پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی در سطح بنگاه‌های صنعتی پرداخته‌اند. پژوهش حاضر درصدد پر کردن بخشی از این خلأ است. نوآوری این پژوهش را می‌توان در چهار محور اصلی خلاصه کرد: نخست، پیاده‌سازی جامع چارچوب MCA-WAF در یک مجتمع صنعتی-معدنی بزرگ با منابع متعدد تأمین آب، شبکه پیچیده انتقال و بازچرخانی، و فرآیندهای متنوع تولید؛ دوم، توسعه کاربرد این چارچوب از سطح گزارش‌دهی جریان‌های فیزیکی آب به سطح تحلیل مدیریتی از طریق شناسایی جریان‌های پنهان، ارزیابی عملکرد بازچرخانی، تحلیل شدت مصرف آب و آشکارسازی شکاف میان ادراک مدیریتی و واقعیت داده‌محور؛ سوم، ارائه شاخص‌ها و تحلیل‌های تکمیلی برای اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی و بهبود بهره‌وری آب در سطح بنگاه؛ و چهارم، تبیین محدودیت‌های چارچوب MCA-WAF در پشتیبانی از تصمیم‌های اقتصادی و راهبردی و پیشنهاد مسیر توسعه آن از طریق یکپارچه‌سازی با شاخص‌های اقتصادی و زیست‌محیطی. از این منظر، این پژوهش نشان می‌دهد که ارزش واقعی چارچوب MCA-WAF نه صرفاً در تهیه صورت‌های حسابداری آب، بلکه در تبدیل داده‌های پراکنده به اطلاعات قابل اتکا برای تصمیم‌گیری مدیریتی، اولویت‌بندی اقدامات بهبود و پشتیبانی از حکمرانی آب در بنگاه‌های صنعتی نهفته است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- معرفی منطقه مطالعاتی و تعریف مرز سیستم

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، یک مجموعه صنعتی-معدنی واقع در اقلیم خشک و نیمه‌خشک کشور است که با محدودیت‌های جدی در دسترسی به منابع آب سطحی و زیرزمینی مواجه است. ویژگی متمایز این مجموعه، تأمین آب از منابع متنوع و پراکنده در چندین حوضه آبریز و در دو استان مختلف است؛ به گونه‌ای که بخشی از آب مورد نیاز از منابع زیرزمینی محلی، بخشی از منابع سطحی و بخشی نیز از طریق سامانه‌های انتقال و شیرین‌سازی آب دریا تأمین می‌شود. این پراکندگی فضایی منابع آب، استفاده از چارچوب‌های متعارف حسابداری آب در مقیاس حوضه آبریز را با محدودیت مواجه ساخته و ضرورت به کارگیری یک چارچوب بنگاه‌محور و مستقل از مرزبندی‌های هیدرولوژیکی را آشکار می‌سازد. زنجیره تولید در این مجموعه از استخراج سنگ آهن در معادن روباز آغاز شده و پس از مراحل خردایش اولیه، به واحدهای فرآوری منتقل می‌شود. در این واحدها، سنگ آهن طی فرایندهایی نظیر خردایش، آسیاب، جدایش مغناطیسی و در برخی موارد شناورسازی^۹، به کنسانتره^{۱۰} تبدیل می‌گردد. این فرایندها به‌طور قابل توجهی به مصرف آب وابسته‌اند. در ادامه، کنسانتره تولیدی به واحدهای گندله‌سازی^{۱۱} ارسال شده و پس از اختلاط با افزودنی‌ها و آب، به گندله خام و سپس گندله پخته تبدیل می‌شود. در نهایت، محصولات تولیدی به واحدهای فولادسازی^{۱۲} منتقل می‌گردند که اگرچه از نظر مکانی خارج از سایت اصلی قرار دارند، اما به دلیل وابستگی مستقیم به زنجیره تولید و تأمین آب، در محدوده حسابداری آب این پژوهش لحاظ شده‌اند. نکته قابل توجه آن است که مدیریت آب در این مجموعه صرفاً محدود به فرایندهای تولیدی نیست، بلکه شامل تأمین آب برای مصارف جانبی نظیر فضای سبز شهری، مجموعه‌های خدماتی، نیروگاه‌ها، گلخانه‌ها و واحدهای تجاری وابسته نیز می‌شود. این موضوع، پیچیدگی سیستم آب را افزایش داده و لزوم تعریف دقیق مرز سیستم حسابداری را برجسته می‌سازد. بر این اساس، در این پژوهش، مرز سیستم بر مبنای زنجیره ارزش تولید و کلیه جریان‌های آب تحت مدیریت شرکت تعریف شده است.



۲-۲- چارچوب روش‌شناسی: پیاده‌سازی چارچوب MCA-WAF

در این پژوهش، به منظور تحلیل نظام‌مند جریان‌های آب، از چارچوب حسابداری آب شورای معدنی استرالیا (MCA-WAF) استفاده شده است. این چارچوب، با تمرکز بر بیلان فیزیکی آب در سطح بنگاه، امکان ردیابی دقیق جریان‌های ورودی، خروجی و داخلی را فراهم می‌سازد.

مفاهیم کلیدی چارچوب

(۱) **مقیاس^{۱۳}**: هدف از تعریف مقیاس یا محدوده، تبیین مرزبندی مکانی و زمانی حسابداری آب است. این چارچوب توصیه به تمیز دادن تولید و مصرف آب در دو مقیاس سایت‌های عملیاتی و کل مجتمع دارد. همچنین پیشنهاد می‌کند بازه زمانی اعمال نظام حسابداری، متناسب با انتشار داده‌های تولید محصول شرکت باشد. از این‌رو، دوره زمانی تحلیل، یک سال شمسی، منطبق با چرخه گزارشگری شرکت در نظر گرفته شده است.

(۲) **ورودی عملیاتی^{۱۴}، خروجی عملیاتی^{۱۵} و سایر آب‌های مدیریت شده^{۱۶}**: ورودی‌های عملیاتی به حجم آبی اطلاق می‌شود که مستقیم از محیط (مانند دریا یا منابع زیرزمینی) دریافت یا ذخیره و وارد چرخه عملیات یک تأسیسات می‌گردد. در مقابل، خروجی عملیاتی حجم آبی است که پس از استفاده، از محدوده تأسیسات خارج شده و دیگر در دسترس نیست (مانند آب تبخیر شده یا محبوس در مواد خروجی). سایر آب‌های مدیریت شده نیز آب‌هایی هستند که منبع و مصرف آنها در بیلان کلی آب شرکت لحاظ می‌شود، اما در اختیار تأسیسات عملیاتی قرار نمی‌گیرند. در جداول ۲ و ۳، انواع ورودی و خروجی عملیاتی برای تطبیق با شرایط و اطلاعات مجموعه مورد مطالعه، گزارش شده است.

(۳) **تأسیسات عملیاتی^{۱۷}**: به منظور تسهیل رسم دیاگرام مفهومی بیلان آب، شورای معدنی استرالیا معتقد است مجموعه واحدهایی که با هدف یا کارکرد مشابه در حال فعالیت هستند، تجمیع شوند. علاوه بر این، دو کلیدواژه مخزن آب جدید^{۱۸} و ترکیبی^{۱۹} نیز در راهنمای این چارچوب توضیح داده شده‌اند. مخزن آب جدید فقط وظیفه ذخیره و انتقال مستقیم آب به واحدهای عملیاتی را دارد؛ همچنین هر مخزنی که میزبان آب استفاده شده باشد یا مخزن میانی بین مخزن آب جدید و واحد مصرف کننده باشد، مخزن آب ترکیبی نام می‌گیرد.

مراحل پیاده‌سازی چارچوب

شورای معدنی استرالیا، نه مرحله را برای پیاده‌سازی کامل این چارچوب تعریف نموده است:

۱- **ترسیم دیاگرام مفهومی شبکه آب**: در این بخش، شماتیک منابع تأمین و جریان‌های بین مخازن و مصارف آب در محدوده مورد مطالعه با رعایت اصل تجمیع واحدها ترسیم می‌شود. محدوده عملیاتی نیز با هدف جداسازی این محدوده از کل شبکه آب شرکت، روی این شکل مشخص می‌شود.

۲- **ترسیم دیاگرام کمی شبکه آب**: بعد از ترسیم محدوده عملیاتی، جریان‌های مؤثر بر بیلان آب این محدوده به صورت کامل رسم و مسیر حرکت به همراه حجم آب انتقال یافته در این نقشه نمایش داده می‌شود.

۳- **جدول خلاصه داده‌ها**: دسته‌بندی ورودی‌ها و خروجی‌های عملیاتی آب به کیفیت‌های متمایز بر اساس میزان EC، نوع به دست آوردن داده از منظر اندازه‌گیری^{۲۰}، شبیه‌سازی^{۲۱} و تخمینی^{۲۲} و سطح اطمینان از داده در این جدول با عبارات بالا، متوسط و پائین نمایش داده می‌شود.

Table 2- Input Source Categories and Definitions (Mineral's Council of Australia, 2022)
جدول ۲- دسته‌بندی‌ها و تعاریف منابع ورودی عملیاتی (Mineral's Council of Australia, 2022)

Source	Definition	Input Sub-Category	Sub-Category Description
Surface Water	All water naturally open to the atmosphere, except for water from oceans, seas and estuaries.	Precipitation and Runoff	Precipitation is a broader term that includes rainfall, snow and hail.
		Rivers and Creeks	Water extracted from rivers and creeks. May or may not run through the site lease.
		External Surface Water Storages	Water extracted from dams and lakes external to the site.
Groundwater	Water beneath the earth's surface that fills pores or cracks between porous media such as soil, rock, coal, and sand, often forming aquifers.	Dewatering	Groundwater extracted to provide safe access to the ore body as part of mining operations.
		Abstraction from Bore Fields	Groundwater extracted from bores to supply water to be used in a task or stored for use in a task.
		Entrainment	Water in the raw material, typically the ore to be processed.
Sea Water	Water from oceans, seas and estuaries.	Estuary	Water extracted from an estuary.
		Sea / Ocean	Water extracted from the sea or ocean.
Third Party	Water supplied by an entity external to the operational facility. Third-party water contains water from the other three sources. When the source is known, the physical source (surface water, groundwater and sea water) should be noted.	Contract / Municipal	Water that is purchased or supplied from an industrial or municipal water supplier.
		Waste Water	The waste water of an organization or community external to the site.

Table 3- Output Source Categories and Definitions (Mineral's Council of Australia, 2022)
جدول ۳- دسته‌بندی‌ها و تعاریف مقاصد خروجی عملیاتی (Mineral's Council of Australia, 2022)

Source	Definition	Output Sub-Category	Sub-Category Description
Surface Water	All water naturally open to the atmosphere, except for water from oceans, seas and estuaries.	Discharge	Uncontrolled or controlled discharge to surface water.
		Environmental Flows	Discharged water used to support environmental initiatives.
Groundwater	Water beneath the earth's surface that fills pores or cracks between porous media such as soil, rock, coal, and sand, often forming aquifers.	Seepage	Seepage from the site to groundwater.
		Aquifer reinjection	Water that is actively managed (as opposed to natural processes) by the site to recharge an aquifer.
Sea Water	Water to oceans, seas and estuaries.	Estuary	Uncontrolled or controlled discharge to estuary.
		Sea / Ocean	Uncontrolled or controlled discharge to the sea or ocean.
Third Party	Water supplied by an entity external to the operational facility	Third Party	Water supplied to third parties.
Other	Includes evaporation, entrainment, task loss and any other destination that is not covered by the other pathways.	Evaporation	Evaporation from the site, including but not limited to evaporation of water from tailings storage facilities, water stores, and used for dust suppression.
		Entrainment	Water in waste or product streams. Typically, the water in the tailings, coarse rejects, concentrates or product.
		Task Loss	Water removed, not recovered or otherwise lost during a task.



۴- تطبیق معادله بیلان آب: در این بخش پس از جمع داده‌های سایت، بررسی بیلان آب در محدوده عملیاتی صورت می‌پذیرد. تفاوت بین مجموع ورودی‌های عملیاتی و مجموع خروجی‌های عملیاتی باید برابر با تفاوت بین حجم آب ذخیره شده در شروع و پایان دوره حسابداری باشد. اگر این دو برابر نباشند، جمع‌آوری داده‌ها و محاسبات دوباره مورد ارزیابی قرار گرفته تا هرگونه خطا یا تأخیر احتمالی در سیستم که ممکن است در نظر گرفته نشده باشد، بررسی شود.

۵- صورت وضعیت ورودی-خروجی: برخلاف جدول خلاصه داده‌ها که هرکدام از دسته‌بندی‌های آب به چند زیربخش تقسیم شده و حجم کمی آب مورد توجه است، در این بخش، بیلان آب با تمرکز بر کیفیت هر دسته نمایش داده می‌شود. از دیگر تفاوت‌های این دو جدول می‌توان به عدم درج منابع و مقاصد که در منطقه مطالعاتی وجود ندارند در جدول خلاصه داده‌ها اشاره کرد؛ در حالی که تمام منابع و مقاصد موجود در منطقه مطالعاتی باید در جدول صورت وضعیت ورودی-خروجی درج شوند.

۶- ارائه یادداشت‌های انتشار اطلاعات: عدم بهره‌گیری از دانش و مزایای داده‌برداری آب در شرکت‌های تجاری، موجب شده است به طور کامل، داده‌های مورد نیاز برای پیاده‌سازی این چارچوب در اختیار نباشد. از این‌رو، برای اطلاعات درج شده در جدول صورت وضعیت ورودی-خروجی که نیازمند توضیح بیشتر در خصوص مقدار به دست آمده هستند، یادداشت‌هایی ارائه می‌شوند که حاوی نحوه محاسبات و فرایند مورد استفاده برای شبیه‌سازی یا تخمین حجم آب هستند.

۷- صورت وضعیت دقت در داده‌برداری: در این بخش نسبت جریان‌ها بر اساس روش کمی‌سازی (اندازه‌گیری، شبیه‌سازی و تخمینی) و سطح اطمینان از صحت داده‌ها (بالا، متوسط و پائین) خلاصه می‌شود. این تفکیک به خوبی نمایان می‌کند که مدیران باید در چه نقاطی از محدوده و برداشت، کدامیک از جریان‌ها را در راستای تدقیق داده‌ها، بهبود بخشند.

۸- صورت وضعیت کارایی آب در محدوده عملیاتی: در این بخش با استفاده از فرمول‌های تعیین نسبت، مقایسه سهم انواع آب، سهم هر واحد عملیاتی در استفاده از هر نوع آب و در نهایت خلاصه وضعیت کارایی آب نمونه مطالعاتی در پژوهش، مشخص می‌شود.

۹- بیانیه اطلاعات پایه: خلاصه‌ای از اطلاعات کلیدی مورد نیاز برای تفسیر و درک معیارهای حسابداری در قالب این بیانیه نگارش می‌شود. این بیانیه باید اطلاعاتی در مورد مرز سیستم، تأسیسات عملیاتی و هرگونه شرایطی که بر فعالیت‌های مدیریت آب در طول دوره تأثیر گذاشته است، ارائه دهد. این امر، زمینه‌ساز تدوین گزارش پایداری شرکت با دخیل کردن نتایج حسابداری آب در آن است.

۲-۳- داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز

با وجود پراکندگی بالای داده‌های آبی از منظر نحوه داده‌برداری و متولیان این امر در محدوده مورد مطالعه، بررسی‌های اولیه نشان داد اغلب داده‌های مورد نیاز برای تکمیل جداول حسابداری، توسط پیمانکاران و کارشناسان هر واحد برداشت و ثبت می‌شوند. اطلاعات نظری که زیرمجموعه معرفی منطقه مطالعاتی ارائه شد، اغلب از نتایج گزارش‌ها و مطالعات سایر پژوهشگران به دست آمده بود. در کنار آن، طی بازدیدها و جلسات برگزار شده با مدیران و کارشناسان واحدهای مدیریت آب و انرژی، حسابداری صنعتی، دفتر اسناد فنی و تله‌متری آب این اطلاعات تکمیل شده است. عمده داده‌های فیزیکی آب نیز از همین واحدها دریافت شد. مواردی همچون تبخیر از سطح آب نیز با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی این مجموعه محاسبه گردید که در ادامه توضیح داده شده است.



یکی از داده‌های گزارش شده توسط ایستگاه هواشناسی، ارتفاع ستون آب در تشت تبخیر است. با کسر اولین داده ثبت شده در هر روز (ساعت ۰۰:۱۰ بامداد) از داده روز قبل از آن، میزان تبخیر روزانه در منطقه به دست آمد. این اعداد بر اساس ضریب تشت تبخیر بر اساس ماه‌های میلادی، اصلاح شدند. سپس با توجه به آنکه سایر ارقام جداول حسابداری بر اساس ماه‌های شمسی است، جمع ماهانه و سالانه تبخیر محاسبه شد. برای روزهای فاقد داده نیز، میانگین تبخیر روزانه در همان ماه در نظر گرفته شد. در مجموع، از هر مترمربع سطح آزاد آب در این منطقه، ۱۹۰۰ میلی‌متر در این سال تبخیر شده است. در منطقه مورد مطالعه، استخرهای ذخیره، حوضچه باطله و سد رسوبگیر به دلیل روباز بودن، مخازنی هستند که آب موجود در آنها تبخیر شده و باید مقدار آن در قسمت خروج آب از منطقه در جداول حسابداری قید شود که این مقادیر در جدول ۴ آورده شده‌اند. برای محاسبه تبخیر از سطح آب در مخازن مزبور، نظر به آن که استخرهای ذخیره آب دارای سطح ثابت در طول سال هستند، حاصل ضرب ارتفاع ستون تبخیر در سطح آب، حجم تبخیر را نمایان می‌کند؛ اما در خصوص محاسبه تبخیر برای سد رسوبگیر و حوضچه باطله، با توجه به متغیر بودن میزان آب موجود در آنها، ابتدا با استفاده از تصاویر ماهواره سنتینل-۲، سطح آب در طول سال مورد بررسی برآورد و سپس در ارتفاع ستون آب ضرب شد.

Table 4- Yearly volume of Evaporation from the water reservoirs

جدول ۴- حجم تبخیر سالانه از مخازن آب

Name	Reservoirs	Tailing ponds	Sedimentation Pond
Evaporation (m ³)	20140	81680.65	89472.86

مراحل انجام تحقیق در شکل (۱) به نمایش درآمده است.

مفاهیم کلیدی چارچوب

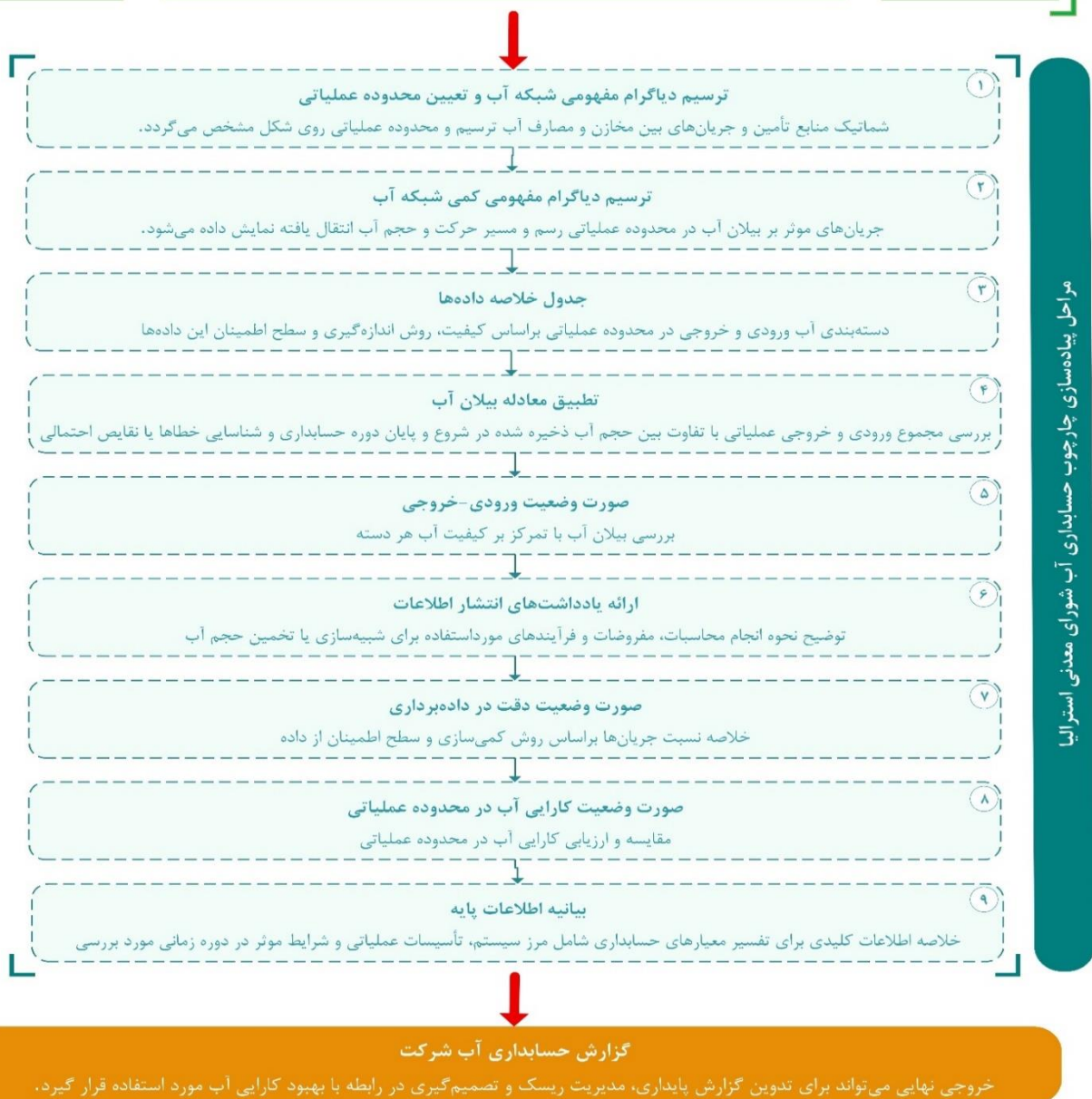


Fig. 1- Flowchart of the research method steps based on MCA-WAF

شکل ۱ - فلوچارت مراحل انجام روش تحقیق براساس MCA-WAF

۳- نتایج و بحث

۳-۱- بازسازی سیستم جریان آب و اعتبارسنجی بیلان

در نخستین گام از پیاده‌سازی چارچوب حسابداری آب، ساختار هیدرولوژیکی-عملیاتی محدوده مورد مطالعه از طریق ترسیم شبکه جریان آب بازسازی شد. این شبکه شامل کلیه منابع تأمین (آب‌های انتقالی، زیرزمینی و آب همراه ماده معدنی)، مخازن ذخیره، واحدهای عملیاتی، مسیرهای بازچرخانی و نقاط دفع یا تلفات است. اهمیت این مرحله در آن است که هرگونه تحلیل کمی بعدی، به دقت در تعریف مرز سیستم و شناسایی کامل جریان‌ها وابسته است.

برای اطمینان از جامعیت مدل، دیاگرام مفهومی شبکه آب (شکل ۲) با اطلاعات جدول ۵ تطبیق داده شد تا تمامی ورودی‌ها و خروجی‌های عملیاتی و جریان‌های مرتبط با مخازن در آن لحاظ شوند. در این شکل، مرز تأسیسات عملیاتی با کادر آبی مشخص شده و واحدهایی که نقشی در فرایند تولید ندارند (نظیر فضای سبز، مجموعه‌های رفاهی و برخی واحدهای جانبی) از محدوده تحلیل خارج شده‌اند.

در گام بعد، با کمی‌سازی جریان‌ها و به‌کارگیری مفاهیم چارچوب MCA-WAF، دیاگرام کمی شبکه آب (شکل ۳) ترسیم شد که مقادیر جریان آب بین اجزای مختلف سیستم را نمایش می‌دهد. یکی از نوآوری‌های این پژوهش، توسعه محدوده ترسیم شبکه از سطح عملیاتی به کل مجموعه است؛ به‌طوری که علاوه بر نمایش بیلان کل، مرز عملیاتی نیز به‌صورت مجزا مشخص شده است.

بر اساس این دیاگرام، آب ورودی از دریا و چاه‌های شماره ۱ به مخزن آب جدید وارد شده و سپس، به‌جز بخشی که مستقیماً به واحد کنسانتره‌سازی ارسال می‌شود، به مخزن آب ترکیبی منتقل می‌گردد. این مخزن علاوه بر دریافت آب از منابع فوق، از چاه‌های شماره ۲ تا ۴ و زهکشی کف معدن نیز تغذیه شده و وظیفه تأمین آب واحدهای اصلی تولید را بر عهده دارد.

در بخش خروجی، جریان‌های اصلی شامل تبخیر از سطح مخازن و سدها، آب محبوس در محصولات و باطله‌ها، و تلفات فرایندی (به‌ویژه در گندله‌سازی و فولادسازی) هستند. همچنین رطوبت موجود در سنگ‌آهن ورودی (حدود ۱ درصد وزن سنگ) به‌عنوان یک ورودی پنهان در نظر گرفته شده و رطوبت محصولات (حدود ۱۰ درصد در کنسانتره و ۲۰ درصد در باطله) نیز در محاسبات لحاظ شده است.

در مجموع، تطبیق بین شبکه جریان و داده‌های کمی نشان داد که بیلان فیزیکی آب با دقت قابل قبولی بسته شده است. این موضوع از منظر روش‌شناسی حائز اهمیت است، زیرا در بسیاری از مطالعات مشابه (مانند Fallahi et al., 2024)، به دلیل محدودیت داده‌ها، بیلان با عدم قطعیت بالایی همراه است.

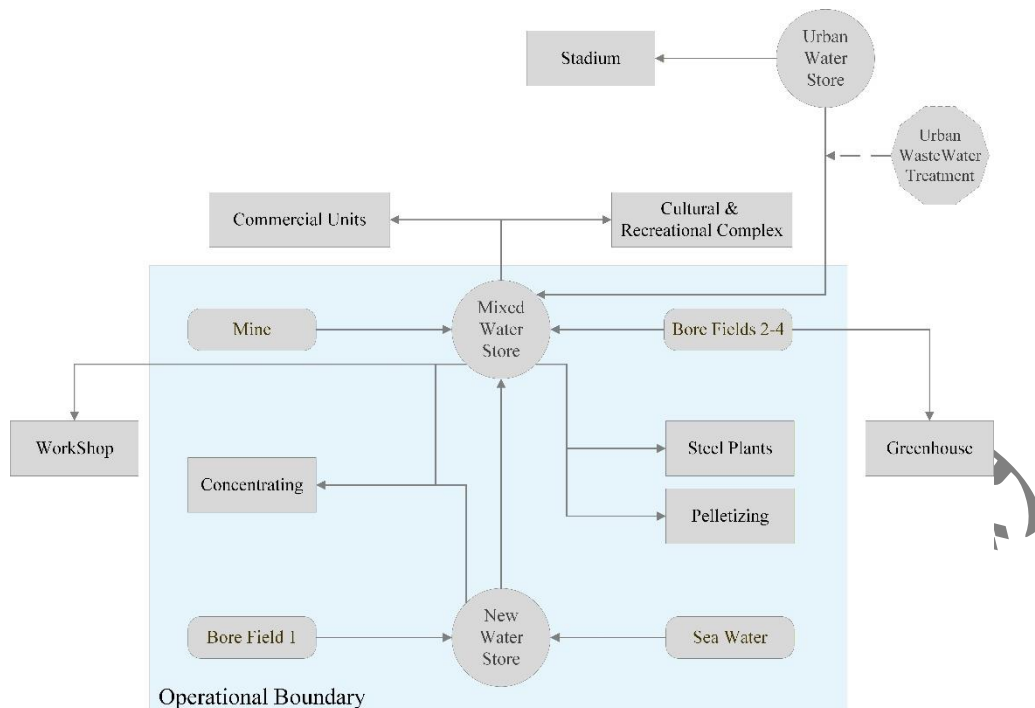


Fig. 2- conceptual Water network diagram of the steel production chain in the studied industrial complex

شکل ۲- دیاگرام مفهومی شبکه آب در زنجیره تولید فولاد مجتمع صنعتی مورد مطالعه

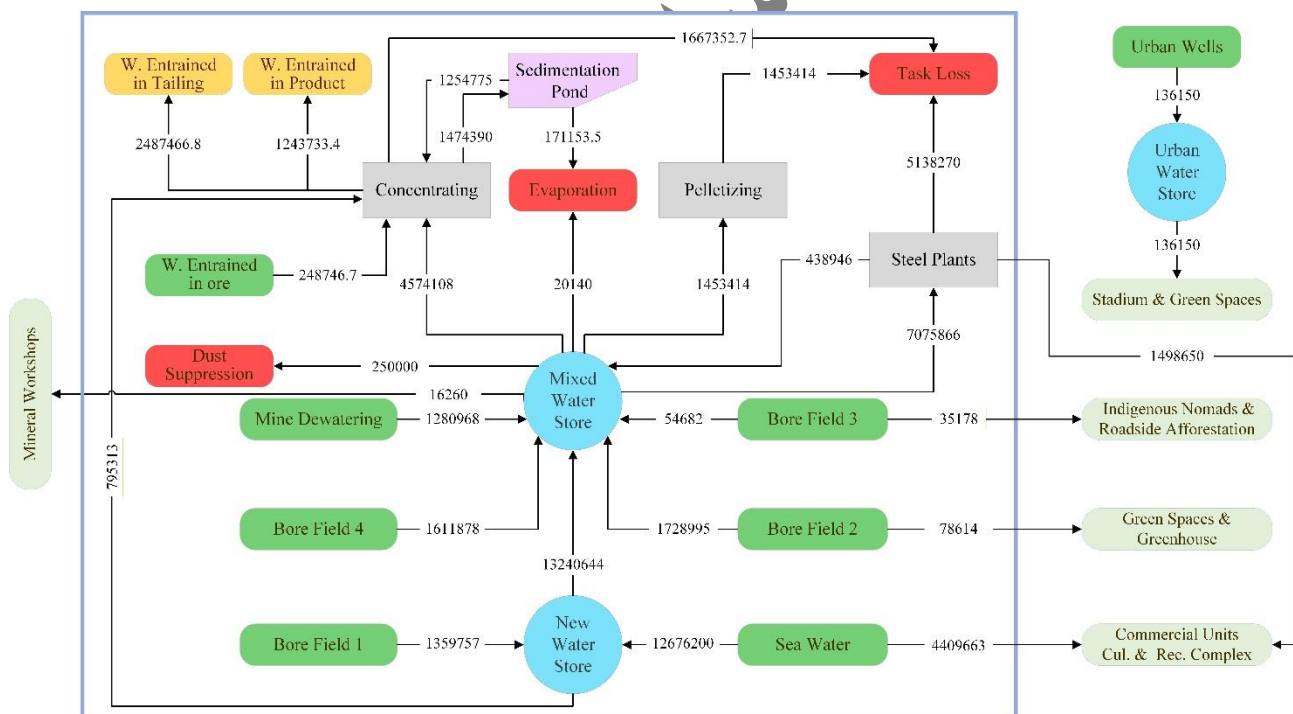


Fig. 3- Quantitative water network diagram of the steel production chain in the studied industrial complex (m^3)

شکل ۳- دیاگرام کمی شبکه آب (m^3) در زنجیره تولید فولاد مجتمع صنعتی مورد مطالعه

۲-۳- تحلیل کمی منابع و مصارف آب

نتایج نشان داد که مجموع آب ورودی به سیستم حدود ۱۸/۹ میلیون مترمکعب در سال است که بخش عمده آن در قالب «آب جدید» وارد چرخه تولید می‌شود. این امر بیانگر وابستگی ساختاری سیستم به منابع اولیه آب و سهم محدود آب‌های بازچرخانی در تأمین نیازها است.

ساختار منابع آب نشان می‌دهد که حدود ۶۷ درصد از آب از طریق انتقال از دریا و مابقی عمدتاً از منابع زیرزمینی (شامل چاه‌ها، زهکشی معدن و آب محبوس در سنگ) تأمین می‌شود. این الگو، علاوه بر تأمین کمی نیاز آب، پیامدهای مهمی از منظر ریسک و پایداری دارد.

تحلیل جدول بیلان ورودی-خروجی (جدول ۵) نشان می‌دهد که با وجود دقت بالای داده‌ها، اختلافی میان مجموع ورودی‌ها و خروجی‌ها وجود دارد که می‌توان آن را ناشی از استفاده مجدد داخلی، عدم پوشش کامل برخی جریان‌ها (به‌ویژه انتقال‌های بین‌واحدی) و محدودیت در اندازه‌گیری برخی مسیرها دانست.

از سوی دیگر، بررسی دقت داده‌ها (جدول ۶) نشان می‌دهد که بیش از ۹۸ درصد اطلاعات از نوع اندازه‌گیری مستقیم است که بیانگر اعتبار بالای نتایج است. با این حال، برخی جریان‌ها نظیر آب مصرفی در آب‌پاشی معادن یا تبخیر از سدها، نیازمند بهبود در سیستم‌های اندازه‌گیری و پایش هستند. در ادامه، جریان‌های آب در سال مورد بررسی در کل منطقه مورد بررسی قرار گرفت و در چهار بخش ورودی عملیاتی، خروجی عملیاتی، سایر آب‌های مدیریت شده، و انتقال‌های داخلی، جدول خلاصه داده‌ها تدوین شد. هدف اصلی جدول خلاصه داده‌ها، بررسی بیلان ورودی و خروجی آب در محدوده عملیاتی شرکت است. این جدول، علاوه بر مقادیر کمی جریان‌های آب، حاوی دسته‌بندی کیفی، نوع برداشت داده و حتی سطح اطمینان از آن است. بنابراین این جدول، اساس صورت وضعیت‌هایی است که در مراحل بعد ارائه شده‌اند. البته با توجه به اینکه صورت وضعیت ورودی-خروجی، کاملاً برگرفته از جدول داده‌هاست، در این بخش به ارائه جدول ۵ بسنده شده است. شرکت مد نظر این پژوهش، کیفیت آب‌ها را به ترتیب به شیرین، لب‌شور و شور تقسیم کرده است. همین نام‌گذاری‌ها مبنای سه دسته کیفی در این جدول هستند.

Table 5- Water Input-Output statement
جدول ۵- صورت وضعیت ورودی-خروجی آب

FLOW	SOURCE/ DESTINATION	SUB- CATEGORY	VOLUME OF WATER BY QUALITY (m ³ /year)			TOTAL VOLUME (m ³)	QUANTIFICATION & CONFIDENCE	NOTES
			CAT. 1	CAT. 2	CAT. 3			
Operational Input	Surface Water		-	-	-	-		
		Bore Fields	1728995	1414439	1611878	4755312	Measured, High	1
	Groundwater	Dewatering			1280968	1280968	Measured, High	2
		Entrainment	-	-	248746.7	248746.68	Estimated, Medium	3
	Sea Water	Sea	12676200	-	-	12676200	Measured, High	4
	Third Party		-	-	-	-		
	Total operational Inputs		14405195	1414439	3141593	18961226.7		
Operational Output	Surface Water		-	-	-	-		
	Groundwater		-	-	-	-		
	Sea Water		-	-	-	-		
	Third Party		-	-	1498650	1498650	Measured, High	5
		Evaporation	15390	4750	421153.5	441293.51	Simulated, Medium	6
	Other	Entrainment	-	1243733	2487466.7	3731200.2	Measured, High	7
		Task Loss	-	-	8259036.7	8259036.7	Measured, High	8
	Total Operational Outputs		15390	1248483	12666307	13930180.4		
Storage	Change in Storage			-		2360		
OMW*	Total OMW Inputs			-		4659605	Measured, High	
	Total OMW Outputs			-		0		
OMW Storage	Change in OMW Storage			-		0		

* Other Managed Water

(CAT. 1: Fresh Water; CAT. 2: Brackish Water; CAT 3: Saline Water)

جدول ۵ بیانگر وابستگی بالا ابتدا به شیرین سازی و انتقال آب از دریا و سپس به کم و کیف منابع زیرزمینی از لحاظ ریسک تأمین است. همچنین با در نظر گرفتن ۲۳۶۰ مترمکعب آبی که در ردیف تغییرات حجم مخازن ثبت شده، باز هم مجموع ورودی و خروجی با یکدیگر فاصله دارند. این اختلاف را می توان ناشی از استفاده مجدد از آب در محدوده عملیاتی و عدم پوشش کامل داده برداری از خروج آب به سطح مجتمع، مخازن میانی و حتی ارسال به کارخانه های دیگر دانست. یادداشت هایی که در ردیف های جدول ۵ نیز دیده می شوند، به شرح زیر هستند:

(۱) تمامی چاه های مجموعه، مجهز به کنتور هستند. پس همگی از منظر نوع داده، در دسته اندازه گیری قرار می گیرند؛ اما کیفیت آب خروجی از این چاه ها به علت EC متفاوت، رده بندی های مختلفی را به خود اختصاص داده است.

(۲) آب حاصل از زهکشی کف معدن، با EC تقریباً ۱۴۰۰۰۰ میکروموس بر سانتی متر، کیفیت بسیار نامناسبی دارد و با توجه به هزینه هنگفت تصفیه آن، بیشتر در سرکوب گرد و غبار در مسیرهای منتهی به معدن کاربرد دارد. از آن جایی که سنجش کمیت این آب به وسیله جریان سنج نصب شده در مسیر ورودی این آب به حوضچه تعبیه شده در گود معدن صورت می گیرد، نوع داده با اندازه گیری نشان داده شده است.

(۳) پیرو آزمایش انجام شده در خصوص تعیین رطوبت مواد در منطقه، یک درصد از وزن سنگ برای تعیین مقدار آب محبوس در سنگ برداشت شده از معدن در نظر گرفته شد.

(۴) آب دریافت شده از دریا، بارها توسط جریان سنج های نصب شده در این مسیر اندازه گیری می شود و EC کمتر از ۱۰۰۰، این آب را در رده بندی کیفی شماره یک قرار داده است.

(۵) این ردیف، میزان فروش پساب واحدهای فولادسازی به شرکت های اطراف را نشان می دهد.

(۶) نحوه محاسبه تبخیر از سطح مخازن و سدها در بخش مواد و روش ها به تفصیل توضیح داده شد.

(۷) نتایج آزمایش های تحقیقی که در مورد ۳ به آن اشاره شد نشان می دهد ۱۰ درصد کنسانتره خارج شده از فرایند و ۲۰ درصد باطله را آب تشکیل می دهد که به نسبت میزان سنگ ورودی به فرایند، این ارقام محاسبه شده اند و برای کیفیت آب محبوس در کنسانتره، رده دو و برای باطله به دلیل همراه شدن با مواد شیمیایی، رده ۳ کیفی در نظر گرفته شده است.

(۸) عمده آبی که به واحدهای گندله سازی و فولادسازی ارسال می گردد، طی این فرایند به دلیل گرمای بالا بخار شده و از دسترس خارج می شود.

در ادامه پیاده سازی مراحل این چارچوب، صورت وضعیت دقت در داده برداری در قالب جدول ۶ آورده شده است. این جدول نشان می دهد با وجود اختلاف فاحش بین مقادیر ورودی و خروجی آب، بیش از ۹۸ درصد داده ها از نوع اندازه گیری مستقیم بوده اند که خود نشانگر اعتبار بالای نتایج است؛ با این حال حجم برداشت آب برای آب پاشی مسیرهای منتهی به معدن از مهم ترین جریان هایی است که ساز و کار برداشت داده و محاسبه رقم دقیق آن باید در دستور کار کارشناسان مربوط قرار گیرد. همچنین با توجه به فقدان ادوات لازم برای سنجش کمیت آب رها شده از کارخانه ها و وارد شده به سدها، این تحقیق از روش شبیه سازی برای محاسبه حجم تبخیر از سطح آب پشت آنها استفاده کرده است که تجهیز مسیر آب تا سد به جریان سنج نیز از اقدامات لازم برای تدقیق حجم تبخیر آب به شمار می رود.



Table 6- Accuracy statement

جدول ۶- صورت وضعیت دقت در داده برداری

Quantification	High		Medium		Low		Total	
	Volume (m ³ /year)	Percent	Volume (m ³ /year)	Percent	Volume (m ³ /year)	Percent	Volume (m ³ /year)	Percent
Measured	36,860,972	99.9	-	-	-	-	36,860,972	98.2
Estimated	-	-	248,747	59.2	250,000	100	498,747	1.3
Simulated	20,140	0.1	171,154	40.8	-	-	191,294	0.5
Total	36,881,112		419,900		250,000		29,246,739	

محتوای جداول ۷ تا ۹، به ترتیب سهم آب جدید و کارشده در کل بیلان شرکت، سهم هر واحد عملیاتی در استفاده از هر نوع آب و خلاصه وضعیت کارایی آب است. همانطور که از عنوان این بخش مشخص است، این جداول میزان استفاده از انواع آب جدید، کارشده و تصفیه شده را به مدیران شرکت نشان می دهند. به عبارت دیگر، هدف از تدوین این جدول، نمایش درصد موفقیت شرکت در کاهش مصرف آب جدید است.

Table 7- Water types in the reservoirs of operational area

جدول ۷- سهم انواع آب در مخازن محدوده عملیاتی

Water Type	Source	Flow (m ³ /year)
New	New Water Store	14035957
	Bore Fields	4676523
	Subtotal New	18712480
Worked	Steel Plants Return Flow	438946
	Subtotal Worked	438946
	Total	19151426

Table 8- water types in the operational tasks

جدول ۸- انواع آب مورد استفاده در واحدهای عملیاتی

Tasks	Source	Flow	Water type (m ³ /year)		
			New	Worked	treated Worked
Concentrating	Water entrained in ore	248,746.7	248,746.7	-	-
	New water store	795,313	795,313	-	-
	Mixed water store	4,574,108	4,135,162	-	438,946
	Tailings & sedimentation pond	1,254,775	-	1,254,775	-
	Water recovery plant	708,712	-	-	708,712
Pelletizing	Mixed water store	1,453,414	1,453,414	-	-
Steel Plants	Mixed water store	7,075,866	7,075,866	-	-
	Totals	16,110,934.7	13,708,501.7	1,254,775.0	1,147,658.0
	Totals (%)		85.1	7.8	7.1

Table 9- Statement of water operational efficiencies

جدول ۹- صورت وضعیت کارایی عملیاتی آب

Total volume to tasks (m ³ /year)	16,110,934.7
Total volume of reused water (m ³ /year)	1,254,775
Reuse Efficiency (%)	7.8
Total volume of recycled water (m ³ /year)	1,147,658
Recycling Efficiency (%)	7.1
Total volume of reused and recycled water (m ³ /year)	2,402,433
Operational Efficiency (%)	14.9

کارایی حدود ۱۵ درصدی آب در این مجموعه، گرچه نشانگر وجود تلاش‌هایی برای توسعه استفاده مجدد از آب در خطوط فراآوری است، اما با توجه به شرایط منابع آب در این منطقه، باید هدف‌گذاری برای دستیابی به کارایی بالاتر در سال‌های آتی با توسعه فناوری‌های تصفیه، استفاده از پساب شهری و بهبود شبکه‌های بازچرخانی صورت پذیرد. برای مقایسه با رقبای جهانی نیز می‌توان به صنعت تولید زغال‌سنگ در کوئینزلند استرالیا اشاره کرد که در عین مشابهت شرایط اقلیمی با مورد مطالعاتی این بررسی، اقدامات بازچرخانی آب از ۵۰٪ در سال ۲۰۲۰ به ۶۵٪ از کل مصرف آب در سال‌های اخیر افزایش یافته است (Fitzroy Partnership for River Health, 2024). همچنین در مقیاس کلان‌تر، میانگین گزارش شده برای شرکت‌های بزرگ معدنی جهان حدود ۵۶٪ بوده و در برخی موارد به بیش از ۸۰٪ نیز رسیده است (Mining Magazine Intelligence, 2024).

با وجود آن‌که در جدول ۹ تمامی انتقال‌های داخلی آب، از جمله استفاده مجدد و بازچرخانی، در قالب جدول خلاصه داده‌ها لحاظ شده‌اند، به نظر می‌رسد در این مرحله از چارچوب حسابداری آب، دو محدودیت اساسی قابل طرح باشد. نخست آن‌که در کنار بیلان آب در محدوده عملیاتی، لازم است بیلان آب کل مجموعه نیز به‌طور مستقل تهیه شود. این اقدام امکان مقایسه نسبت تأمین و مصرف آب در محدوده عملیاتی با کل مجموعه را فراهم کرده و همچنین موجب می‌شود شاخص‌های استخراج‌شده از جدول ۹ در مقیاس کل شرکت نیز محاسبه و تحلیل شوند. محدودیت دوم به تعریف مفهوم کارایی آب بازمی‌گردد. به نظر می‌رسد تفسیر دقیق‌تر و کاربردی‌تر از کارایی آب، نسبت میزان آب مصرف‌شده به ازای تولید هر واحد محصول شرکت باشد. از آن‌جا که برای برآورد میزان آب محبوس در محصولات خروجی شرکت (جدول ۲)، اطلاعات مربوط به مقدار تولید محصولات نیز مورد نیاز است، محاسبه این شاخص به‌سادگی امکان‌پذیر خواهد بود. بر این اساس، با توجه به تولید حدود ۱۳ میلیون تن کنسانتره و ۱۲ میلیون تن گندله توسط این شرکت در سال مورد بررسی، شاخص‌های ارائه‌شده در جدول ۱۰ می‌توانند تصویر دقیق‌تر و معنادارتری از کارایی مصرف آب در سطوح مختلف فعالیت شرکت ارائه دهند. افزودن این جدول به مراحل تدوین این نظام حسابداری، توصیه این پژوهش است. یکی از محدودیت‌های پیش روی این بررسی، عدم دسترسی به میزان تولید فولاد توسط واحدهای فولادسازی بود؛ از این‌رو، حجم آب مصرفی در دوردیف ابتدایی جدول ۱۰ پس از کسر مقدار مصرف آب این واحدها (۷,۰۷۵,۸۶۶ مترمکعب) ثبت شده است. همچنین در محاسبه شاخص آب مصرف شده به ازای تولید گندله، مجموع آب تخصیص داده شده به واحدهای تولید کنسانتره و گندله در نظر گرفته شده است.

Table 10- Statement of water consumption intensity based on production

جدول ۱۰- صورت وضعیت شدت مصرف آب بر اساس میزان تولید

Total company-wide water supply per unit of product (m ³ /Ton)	0.94
Operational boundary water supply per unit of product (m ³ /Ton)	0.48
Water consumption in concentrator plants per unit of concentrate (m ³ /Ton)	0.61
Water consumption in pelletizing plants per unit of pellets (m ³ /Ton)	0.74



بر اساس نتایج گردآوری و تحلیل منابع مختلف، میزان مصرف آب برای تولید کنسانتره آهن در میان معادن جهان به طور میانگین حدود $1/37$ مترمکعب به ازای هر تن محصول گزارش شده است (Meißner, 2021). مقایسه این مقدار با شاخص محاسبه شده برای واحد مطالعاتی این بررسی، نشان می دهد علی رغم آنکه کارشناسان این مجموعه، مقدار کمتری را برای این شاخص متصور بودند، هنوز هم مصرف آب در ازای تولید محصول این شرکت کمتر از میانگین جهانی است. آخرین مرحله پیاده سازی این چارچوب، تنظیم بیانیه اطلاعات پایه و روند پیاده سازی حسابداری در مورد مطالعاتی است. این بیانیه شرایط اولیه شامل نحوه تعیین محدوده، زیرساخت های اصلی آب (مخازن و جریان های اصلی)، اقدامات مدیریت منابع آب، اطلاعات اقلیمی، ورودی ها و خروجی ها و نحوه تخصیص آب به واحدها و محدودیت های آن را توضیح می دهد.

تعیین محدوده

خوراک عملیاتی از گودهای معدن تأمین و به خطوط کنسانتره سازی، بسته به دانه بندی و کیفیت خروجی مطلوب، ارسال می گردد. بخشی جزئی از کنسانتره تولید شده به فروش داخلی یا صادرات و اغلب آن برای تولید گندله، وارد گندله سازی می شود. مشابه کنسانتره، بخشی از گندله به داخل یا خارج از کشور فرستاده می شود و باقی آن، واحدهای فولادسازی را تغذیه می کند. خط انتقال از دریا به عنوان منبع اصلی به همراه برداشت از منابع زیرزمینی، زهکشی آب شور کف گود معدن و البته بازچرخانی و بازیافت آب، منابع تأمین آب این مجموعه به شمار می روند.

آب و هوا

دمای بیشینه و کمینه ثبت شده توسط ایستگاه هواشناسی در سال مورد بررسی به ترتیب 42°C و -7°C درجه سلسیوس و بارش تجمعی $29/5$ میلی متر گزارش شده است. معدود رواناب حاصل شده از بارش در این منطقه به علت راه نیافتن به مخازن آب، در لیست منابع تأمین آب قرار نگرفته اند.

ورودی ها و خروجی ها

آب منتقل شده از دریا به میزان بیش از 12 میلیون مترمکعب، منبع اصلی آب در سایت عملیاتی است که 67% از کل آب تأمین شده برای فعالیت ها را در طول دوره گزارش دهی تشکیل می دهد. باقی مانده سهم تأمین یعنی بیش از 6 میلیون مترمکعب دیگر را نیز منابع زیرزمینی تشکیل داده اند که چاه ها، زهکشی و آب محبوس در سنگ به ترتیب سهم 25% ، 7% و 1% دارند. خروجی های سایت نیز شامل تبخیر از سطح مخازن، آب همراه با محصول و باطله ها و اتلاف در عملیات است. بنابراین، هیچ آبی از محدوده عملیاتی به محیط اطراف تخلیه نشده است. همچنین حدود 15 درصد از آب ورودی، با تصفیه کردن، ارسال به سدهای رسوب گیر یا کارخانه بازیابی آب، مجدد مورد استفاده قرار گرفته اند.

ارزیابی کیفیت داده ها و عدم قطعیت نتایج

یکی از ویژگی های متمایز MCA-WAF، ثبت منشأ و کیفیت داده های مورد استفاده در حسابداری آب از طریق صورت وضعیت دقت داده ها است. این قابلیت امکان ارزیابی میزان اتکاپذیری نتایج و شناسایی منابع اصلی عدم قطعیت را فراهم می کند. در مطالعه حاضر، بیش از 98 درصد حجم جریان های آب بر پایه داده های اندازه گیری مستقیم حاصل از سامانه های پایش و تجهیزات اندازه گیری مجتمع استخراج شده است؛ بنابراین، بخش عمده بیلان فیزیکی آب بر داده های مشاهده ای استوار بوده و وابستگی محدودی به مقادیر برآوردی یا شبیه سازی شده دارد.

جریان های غیراندازه گیری شده عمدتاً شامل تبخیر از مخازن، سد رسوب گیر و حوضچه های باطله و نیز بخشی از آب محبوس در باطله ها هستند که بر اساس روش های استاندارد برآورد شده اند. اگرچه سهم این مؤلفه ها از کل جریان آب نسبتاً محدود است، اما بیشترین منشأ عدم قطعیت باقی مانده در



انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران

تحقیقات منابع آب ایران

حسابداری آب را تشکیل می‌دهند. از این رو، نتایج ارائه شده باید با این ملاحظه تفسیر شوند که عدم قطعیت موجود عمدتاً به جریان‌های اتلاف طبیعی مربوط است و نه به جریان‌های اصلی برداشت، انتقال، مصرف یا بازچرخانی آب.

از منظر مدیریتی، ثبت همزمان مقدار جریان و کیفیت داده‌ها، یکی از مزیت‌های مهم چارچوب MCA-WAF محسوب می‌شود؛ زیرا علاوه بر افزایش شفافیت نتایج، امکان اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری برای ارتقای سامانه‌های اندازه‌گیری و کاهش عدم قطعیت در دوره‌های آبی را فراهم می‌آورد. در نتیجه، چارچوب حسابداری آب صرفاً ابزاری برای گزارش جریان‌های آب نیست، بلکه بستری برای بهبود مستمر کیفیت داده‌ها و افزایش قابلیت اعتماد تصمیم‌های مدیریتی نیز به شمار می‌رود.

زیرساخت‌های آب

مهمترین زیرساخت آبی ساخته شده توسط شرکت، مخزنی است که دریافت کننده آب از خط انتقال از دریا است. یک استخر روباز وظیفه ذخیره آب برای زمان‌های عدم دریافت آب از خط انتقال را بر عهده دارد. سایر مخازن این مجموعه، نقش انتقال و تخصیص آب به واحدهای مختلف را ایفا می‌کنند. سد رسوب‌گیر و حوضچه باطله نیز رسوب‌گیری و بازچرخانی آب را انجام می‌دهند.

مدیریت منابع آب

با توجه به تقاضای بالای آب در این مجموعه و مقایسه آن با میزان آب قابل ذخیره در مخازن، اختلال در دریافت آب از منابع مختلف، تولید این شرکت را با ریسک بالایی مواجه می‌سازد. پیاده‌سازی چارچوب حسابداری آب شورای معدنی استرالیا در این مجموعه صنعتی-معدنی، افزون بر استخراج شاخص‌های کمی مصرف آب، موجب ساماندهی و بازتعریف ساختار داده‌های آبی در سطح واحدهای عملیاتی شد. بستن بیلان فیزیکی آب برای محدوده عملیاتی (جدول ۵) نشان داد که داده‌های ثبت شده در برخی مسیرها از جمله انتقال و بازگشت پساب میان واحدهای کنسانتره‌سازی به‌طور کامل اندازه‌گیری نمی‌شوند. این موضوع به‌صورت اختلاف قابل توجه میان مجموع ورودی‌ها و خروجی‌های ثبت شده در بیلان آب نمایان شد که پیش از به‌کارگیری MCA-WAF در گزارش‌های بهره‌برداری روزمره قابل تشخیص نبود. شناسایی این ناهم‌آهنگی‌ها، ضرورت بازنگری در جانمایی و تکمیل ابزارهای اندازه‌گیری جریان در مسیرهای مشترک و بین‌واحدی را برجسته می‌سازد.

از سوی دیگر، مقایسه انواع آب مورد استفاده در واحدهای مختلف (جدول ۸) نشان داد که سهم بازچرخانی در کنسانتره‌سازی پلاگندله و فولادسازی تفاوت معناداری دارد. برای مثال، در حالی که نرخ بازچرخانی و بازیافت آب در واحدهای کنسانتره‌سازی کمتر از میانگین جهانی است، این معیار برای دو بخش دیگر صفر برآورد شده است. این تفاوت‌ها که در قالب شاخص‌های استاندارد MCA-WAF آشکار شده‌اند، نشان می‌دهند که بخشی از مصرف بالاتر آب تازه ناشی از ویژگی فناوری، بخشی ناشی از کارایی پایین‌تر سامانه‌های بازچرخانی و البته احتمال نقص داده‌برداری در میزان استفاده مجدد از آب است. بدین ترتیب، حسابداری آب شرکتی امکان تفکیک این عوامل و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی نظیر بهبود بازچرخانی پساب یا بهینه‌سازی فرآیند را فراهم می‌کند.

در نهایت اگرچه نظام حسابداری شورای معدنی استرالیا با موفقیت بیلان فیزیکی آب و شاخص‌های کارایی عملیاتی را در سطح این شرکت ترسیم نمود؛ اما تحلیل‌های این مطالعه نشان می‌دهد که تصمیم‌گیری بهینه در شرایط پیچیده کنونی کم‌آبی و نوسانات اقتصادی، مستلزم عبور از حسابداری صرفاً فیزیکی است. نیاز امروز صنایع بزرگ از جمله تعیین سهم واقعی آب در بهای تمام‌شده و ارزش افزوده محصول، ارزیابی ریسک‌های مالی ناشی



از تغییر سیاست‌های یارانه‌ای آب و برق و سنجش وابستگی اقتصادی مجتمع به هریک از منابع آب پریسک، پاسخ خود را در داده‌های اقتصادی جست‌وجو می‌کنند. بنابراین گام تکاملی بعدی، توسعه یک مدل مفهومی تلفیقی آب-اقتصاد در مقیاس یک بنگاه صنعتی است. چنین مدلی، با ترکیب خروجی‌های شفاف این نظام حسابداری فیزیکی با داده‌های هزینه، قیمت و ارزش افزوده شرکت می‌تواند شاخص‌های تصمیم‌ساز جدیدی را تولید کند که مدیریت را در تخصیص بهینه منابع در شرایط بحران یاری رساند. این نیاز مهم‌ترین محدودیت MCA-WAF و در عین حال، چشم‌انداز اصلی برای تکمیل آن در راستای پاسخگویی به چالش‌های مدیریت آب در صنایع ایران محسوب می‌شود.

۳-۳- تحلیل یکپارچه ساختار تأمین، کارایی و پیامدهای مدیریتی آب

ساختار تأمین آب در این مجموعه نشان‌دهنده وابستگی قابل توجه به منابع انتقالی و زیرزمینی است. هرچند این الگو در کوتاه‌مدت پاسخگوی نیاز تولید بوده، اما از منظر پایداری راهبردی با ریسک‌های مهمی همراه است. وابستگی به آب انتقالی، سیستم را در برابر اختلالات زیرساختی، افزایش هزینه انرژی و تغییرات سیاستی آسیب‌پذیر می‌کند. از سوی دیگر، استفاده از منابع زیرزمینی با کیفیت متغیر، علاوه بر پیامدهای زیست‌محیطی، موجب افزایش هزینه‌های تصفیه و ریسک‌های عملیاتی می‌شود. بنابراین، پایداری کمی تأمین آب لزوماً به معنای پایداری راهبردی آن نیست و کاهش وابستگی به منابع پریسک باید در دستور کار قرار گیرد.

در کنار ساختار تأمین، ارزیابی کارایی عملیاتی آب نشان می‌دهد که میزان بازاستفاده و بازیافت آب به ترتیب $7/8$ و $7/1$ درصد بوده و در مجموع، کارایی کل سیستم حدود $14/9$ درصد است. این مقدار اگرچه بیانگر وجود زیرساخت‌های بازچرخانی است، اما در مقایسه با استانداردهای جهانی سطح پایینی محسوب می‌شود. مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد که میانگین بازچرخانی در صنایع معدنی حدود 56 درصد بوده و در برخی موارد به بیش از 80 درصد نیز می‌رسد. این شکاف عملکردی را می‌توان ناشی از محدودیت در زیرساخت‌های تصفیه، عدم یکپارچگی شبکه بازچرخانی و ضعف در سیستم‌های پایش و کنترل جریان دانست.

با این حال، تحلیل همزمان شاخص‌های کارایی نشان می‌دهد که در سطح فرایندی، وضعیت متفاوتی حاکم است. مقدار مصرف آب در واحد کنسانتره‌سازی برابر با $0/61$ مترمکعب به ازای هر تن محصول است که کمتر از میانگین جهانی گزارش شده است. این نتیجه بیانگر آن است که اگرچه فرآیندهای تولید از نظر مصرف آب نسبتاً بهینه عمل می‌کنند، اما در سطح کل سیستم، به دلیل ضعف در بازچرخانی و مدیریت جریان، کارایی کلی کاهش یافته است. به بیان دیگر، مسئله اصلی نه در فناوری تولید، بلکه در مدیریت چرخه آب در مقیاس سیستم نهفته است.

یکی از یافته‌های مهم این پژوهش، شناسایی شکاف میان ادراک مدیریتی و واقعیت داده‌محور است. سهم واقعی آب بازچرخانی (حدود 15 درصد) به مراتب کمتر از برآوردهای اولیه مدیران (**حدود ۶۰ درصد**) بوده که این موضوع می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های نادرست، اولویت‌بندی نامناسب سرمایه‌گذاری‌ها و ارزیابی غیرواقعی از عملکرد زیست‌محیطی منجر شود. این نتیجه، اهمیت استقرار نظام‌های دقیق حسابداری آب را به عنوان ابزار تصمیم‌سازی مبتنی بر داده برجسته می‌کند.

در این راستا، پیاده‌سازی چارچوب MCA-WAF نشان داد که این ابزار فراتر از یک سیستم گزارش‌دهی عمل کرده و قابلیت‌های تحلیلی مهمی را فراهم می‌سازد. از جمله این قابلیت‌ها می‌توان به تفکیک دقیق انواع آب، ردیابی جریان‌ها در سطح واحدهای عملیاتی، شناسایی نقاط اتلاف و فراهم‌سازی مبنای مقایسه عملکرد اشاره کرد. به‌ویژه، این چارچوب امکان تمایز بین اثر فناوری و مدیریت را فراهم کرده و کمک می‌کند تا منشأ ناکارایی‌ها به درستی شناسایی شود.



انجمن علوم و مهندسی منابع آب ایران

تحقیقات منابع آب ایران

با وجود این مزایا، نتایج نشان می‌دهد که اتکای صرف به حسابداری فیزیکی آب برای تصمیم‌گیری در شرایط پیچیده کنونی کافی نیست. محدودیت‌هایی نظیر عدم ارتباط مستقیم با هزینه‌ها، نبود شاخص‌های اقتصادی و ناتوانی در تحلیل ریسک‌های مالی، ضرورت توسعه این چارچوب را آشکار می‌سازد. در این زمینه، یکپارچه‌سازی با چارچوب‌های اقتصادی مانند SEEA-W می‌تواند امکان تحلیل‌هایی نظیر سهم آب در بهای تمام‌شده، ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب و ریسک‌های مالی ناشی از کمبود منابع را فراهم کند.

در مجموع، یافته‌های این بخش نشان می‌دهد که مدیریت پایدار آب در این مجموعه مستلزم تغییر رویکرد از «تأمین‌محوری» به «کارایی‌محوری» است. تمرکز صرف بر توسعه منابع جدید، بدون بهبود بازچرخانی، راهبردی ناپایدار محسوب می‌شود. در مقابل، افزایش کارایی استفاده از آب، کاهش وابستگی به منابع پرریسک، استقرار نظام حسابداری داده‌محور و یکپارچه‌سازی تحلیل‌های فیزیکی و اقتصادی، از مهم‌ترین الزامات بهبود مدیریت منابع آب در این صنعت به شمار می‌روند. علاوه بر این، بهره‌گیری از نتایج حسابداری آب در گزارش‌های پایداری، می‌تواند به ارتقای شفافیت و افزایش اعتماد ذی‌نفعان نیز کمک کند.

نتایج این پژوهش همچنین نشان می‌دهد که ارزش چارچوب MCA-WAF صرفاً در تهیه جداول استاندارد حسابداری آب یا مستندسازی جریان‌های فیزیکی آب خلاصه نمی‌شود. این چارچوب با سازمان‌دهی نظام‌مند داده‌های آب، بازسازی شبکه جریان و بیلان فیزیکی، ارزیابی کیفیت داده‌ها و شناسایی نقاط اتلاف، فرصت‌های بازچرخانی و ریسک‌های تأمین آب، اطلاعات خام را به دانش مدیریتی تبدیل می‌کند. در نتیجه، خروجی‌های حسابداری آب می‌توانند مستقیماً مبنای تصمیم‌گیری‌های عملیاتی، سرمایه‌گذاری و برنامه‌ریزی راهبردی در مدیریت آب قرار گیرند. شکل ۴ مسیر تبدیل داده‌های حسابداری آب به تحلیل‌های مدیریتی و سپس تصمیم‌های اجرایی را به‌صورت مفهومی نشان می‌دهد. این چارچوب مفهومی، نوآوری تحلیلی پژوهش حاضر را نیز نشان می‌دهد و بیانگر نحوه تبدیل خروجی‌های حسابداری آب به اطلاعات تصمیم‌یار مدیریتی است.

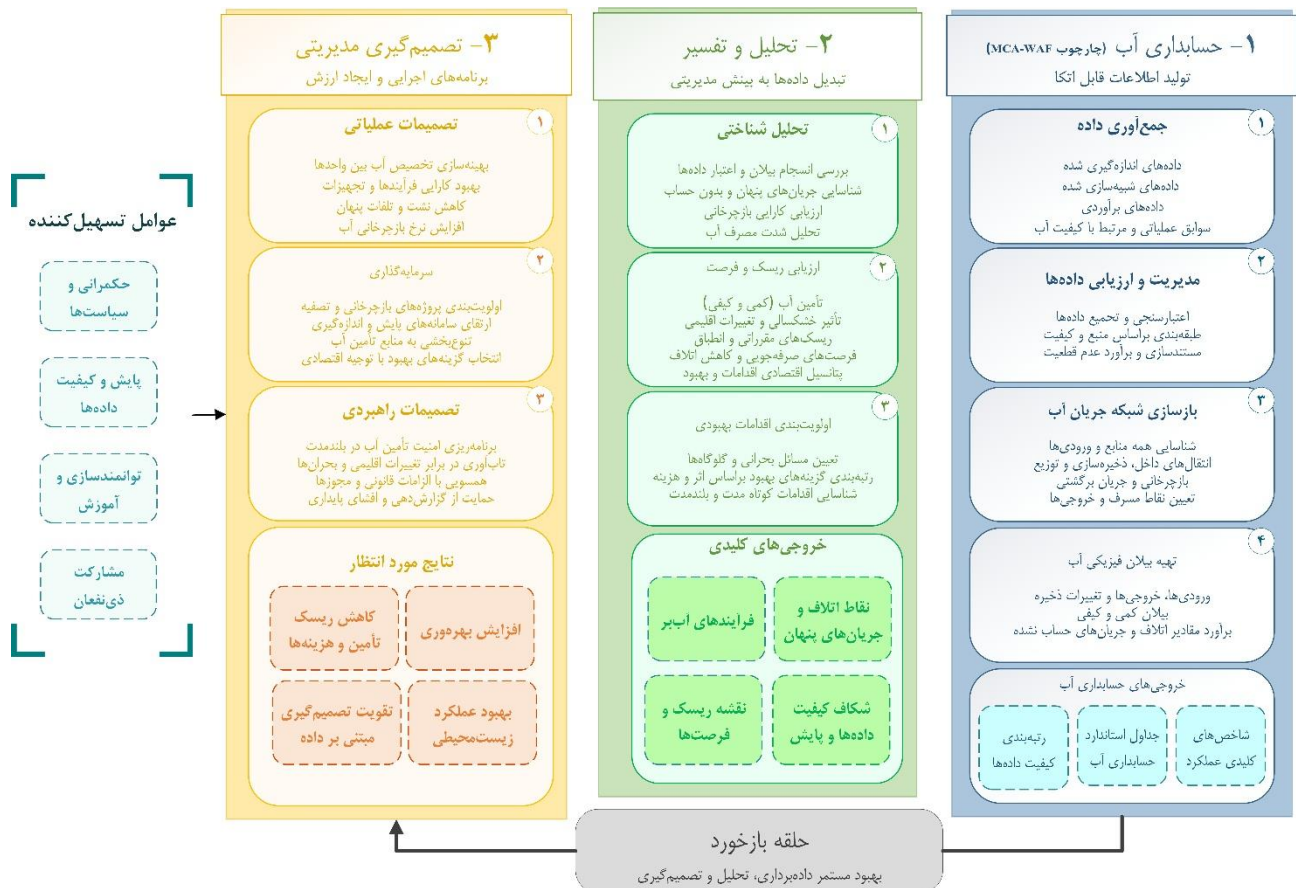


Figure 4- From Water Accounting to Management Decision-Making: The Conceptual Pathway Developed in This Study

شکل ۴- مسیر مفهومی توسعه‌یافته در این پژوهش برای گذار از حسابداری آب به تصمیم‌گیری مدیریتی

این چارچوب مفهومی نشان می‌دهد که فرایند مدیریت داده‌های آب با گردآوری و سازمان‌دهی داده‌های اندازه‌گیری‌شده، برآوردی و شبیه‌سازی‌شده آغاز می‌شود و از طریق بازسازی شبکه جریان آب، تهیه پیلان فیزیکی و ارزیابی کیفیت داده‌ها، به تولید خروجی‌های استاندارد حسابداری آب منجر می‌شود. در مرحله بعد، این خروجی‌ها برای شناسایی اتلاف‌های پنهان، ارزیابی کارایی بازچرخانی، تحلیل ریسک‌های تأمین آب، تعیین فرایندهای پرمصرف و اولویت‌بندی اقدامات اصلاحی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در نهایت، نتایج تحلیل‌ها، مبنای تصمیم‌های مدیریتی در سه سطح عملیاتی، سرمایه‌گذاری و راهبردی قرار گرفته و از طریق یک چرخه بازخورد، به بهبود مستمر کیفیت داده‌ها، نظام پایش و مدیریت منابع آب کمک می‌کنند.

۳-۴- محدودیت‌های پژوهش

اگرچه این پژوهش نشان داد که چارچوب MCA-WAF قابلیت بالایی برای بازسازی پیلان فیزیکی آب، شناسایی جریان‌های پنهان و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی در سطح بنگاه دارد، نتایج آن باید با در نظر گرفتن چند محدودیت تفسیر شود. نخست، این پژوهش بر یک مطالعه موردی در یک مجتمع صنعتی-معدنی مبتنی بر زنجیره تولید سنگ‌آهن تا فولاد متمرکز بوده است. اگرچه روش‌شناسی ارائه‌شده قابلیت انتقال به سایر صنایع آب‌بر را دارد، مقادیر کمی شاخص‌ها، ساختار جریان‌های آب و اولویت‌های مدیریتی ممکن است در صنایع مختلف یا مناطق با شرایط اقلیمی متفاوت، تغییر کند.

دوم، اگرچه بیش از ۹۸ درصد جریان‌های آب بر پایه داده‌های اندازه‌گیری مستقیم استخراج شده‌اند، برآورد برخی مؤلفه‌ها از جمله تبخیر از مخازن و آب محبوس در باطله‌ها ناگزیر بر پایه روش‌های برآوردی انجام شده است. بنابراین بخش محدودی از عدم قطعیت نتایج به این جریان‌ها مربوط



می‌شود. با این حال، چارچوب MCA-WAF با ارائه صورت وضعیت دقت داده‌ها امکان شناسایی منشأ این عدم قطعیت و اولویت‌بندی اقدامات برای ارتقای کیفیت داده‌ها را فراهم می‌کند.

سوم، MCA-WAF عمدتاً بر حسابداری فیزیکی آب استوار است و شاخص‌های اقتصادی، هزینه‌های تأمین آب، ارزش اقتصادی بازچرخانی یا پیامدهای محیط‌زیستی را به صورت درون‌ساختاری در بر نمی‌گیرد. از این رو، اگرچه نتایج این پژوهش مبنای مناسبی برای تصمیم‌گیری مدیریتی فراهم می‌آورد، ارزیابی جامع گزینه‌های مدیریتی مستلزم تلفیق این چارچوب با ابزارهای اقتصادی و محیط‌زیستی مکمل است.

در نهایت، بخشی از تحلیل شکاف میان ادراک مدیریتی و واقعیت داده‌محور بر مصاحبه‌های تخصصی و تجربه عملی حاصل از استقرار نظام حسابداری آب استوار بوده و تنها در برخی موارد امکان مقایسه با برآوردهای کمی اولیه مدیران وجود داشته است. توسعه روش‌های نظام‌مند برای سنجش این شکاف می‌تواند یکی از محورهای مهم پژوهش‌های آینده باشد. بنابراین، تعمیم مستقیم مقادیر کمی ارائه‌شده در این پژوهش به سایر صنایع توصیه نمی‌شود، اما چارچوب روش‌شناختی و منطقی تحلیلی ارائه‌شده قابلیت انتقال به سایر صنایع آب‌بر را دارد.

۳-۵- جایگاه یافته‌های پژوهش در ادبیات حسابداری آب

یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که اگرچه MCA-WAF در بازسازی بیلان فیزیکی آب، شناسایی جریان‌های پنهان و ارزیابی کیفیت داده‌های حسابداری از کارایی بالایی برخوردار است، اما ظرفیت آن زمانی به طور کامل محقق می‌شود که نتایج حسابداری به فرایندهای تصمیم‌گیری مدیریتی و برنامه‌ریزی راهبردی متصل شوند. این نتیجه با مطالعات اخیر در حوزه حسابداری آب همسو است که تأکید می‌کنند ارزش واقعی نظام‌های حسابداری آب نه صرفاً در تولید داده، بلکه در تبدیل داده‌ها به اطلاعات قابل استفاده برای حکمرانی و تصمیم‌گیری نهفته است (Burritt & Christ, 2017; Vardon et al., 2025).

در مقایسه با بسیاری از مطالعات پیشین که عمدتاً بر توسعه چارچوب‌های مفهومی یا کاربرد حسابداری آب در مقیاس حوضه آبریز و سامانه‌های منابع آب متمرکز بوده‌اند، این پژوهش قابلیت استقرار MCA-WAF را در مقیاس یک مجتمع صنعتی-معدنی بزرگ و تحت شرایط تنش آبی نشان می‌دهد. همچنین، نتایج این مطالعه بیانگر آن است که تحلیل همزمان جریان‌های فیزیکی آب، کیفیت داده‌ها و شاخص‌های عملکردی می‌تواند شکاف میان ادراک مدیریتی و واقعیت داده‌محور را آشکار ساخته و زمینه را برای تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد فراهم کند. مطالعه حاضر نشان می‌دهد که ارزش واقعی چارچوب MCA-WAF نه صرفاً در استانداردسازی گزارش‌های حسابداری آب، بلکه در فراهم کردن زیرساخت اطلاعاتی لازم برای تصمیم‌گیری داده‌محور در مدیریت منابع آب نهفته است.



انگن علوم و مژدی منبع آب ایران

۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

این پژوهش با هدف پیاده‌سازی چارچوب حسابداری آب شورای معدنی استرالیا (MCA-WAF) در سطح یک بنگاه صنعتی-معدنی، کمی‌سازی جریان‌های آب، ارزیابی کارایی مصرف و تحلیل ریسک‌های تأمین انجام شد. نتایج کمی نشان داد که مجموع آب ورودی به سیستم حدود ۱۸/۹ میلیون مترمکعب در سال بوده که بخش عمده آن از منابع جدید، به‌ویژه انتقال آب از دریا (حدود ۶۷ درصد)، تأمین می‌شود و مابقی عمدتاً از منابع زیرزمینی با کیفیت متغیر حاصل شده است. در مقابل، کارایی عملیاتی آب شامل بازچرخانی و بازیافت در حدود ۱۵ درصد برآورد شد که در مقایسه با استانداردهای جهانی پایین است. با این حال، شاخص مصرف آب به ازای تولید هر تن کنسانتره (حدود ۰/۶۱ مترمکعب بر تن) کمتر از میانگین جهانی بوده و نشان‌دهنده عملکرد مناسب در سطح فرآیندی است.

در ارتباط با هدف نخست پژوهش (بازسازی و کمی‌سازی بیلان آب)، نتایج نشان داد که چارچوب MCA-WAF توانسته است بیلان فیزیکی آب را با دقت قابل قبول ترسیم کرده و تمامی جریان‌های اصلی ورودی، خروجی و انتقال‌های داخلی را در قالب یک ساختار منسجم یکپارچه کند. تحقق این هدف نه تنها به ارائه تصویری شفاف از چرخه آب منجر شد، بلکه ناهماهنگی‌ها و کاستی‌های موجود در نظام داده‌برداری به‌ویژه در مسیرهای بین‌واحدی و جریان‌های بازگشتی را نیز آشکار ساخت.

در راستای هدف دوم (ارزیابی کارایی مصرف و بازچرخانی آب)، یافته‌ها نشان داد که اگرچه عملکرد فرآیندی واحدهای تولیدی از نظر شدت مصرف آب در سطح مطلوب قرار دارد، اما کارایی کل سیستم به دلیل سهم پایین بازچرخانی محدود باقی مانده است. این امر نشان می‌دهد که هدف ارزیابی کارایی نه تنها محقق شده، بلکه به یک نتیجه تحلیلی مهم منجر شده است: ناکارایی موجود بیشتر ریشه در مدیریت چرخه آب در سطح سیستم دارد تا فناوری تولید.

در ارتباط با هدف سوم (تحلیل ساختار تأمین و ریسک‌های مرتبط)، نتایج نشان داد که وابستگی بالا به منابع انتقالی و زیرزمینی، مجموعه را در معرض ریسک‌های عملیاتی، اقتصادی و سیاستی قرار می‌دهد. بدین ترتیب، هدف تحلیل ریسک با شناسایی منابع آسیب‌پذیری سیستم و تبیین پیامدهای آن تحقق یافته و ضرورت حرکت به سمت تنوع‌بخشی منابع و کاهش وابستگی به منابع پرریسک را آشکار ساخته است.

در راستای هدف چهارم (ارتقاء شفافیت و پشتیبانی از تصمیم‌گیری مدیریتی)، یکی از یافته‌های مهم، شناسایی شکاف میان ادراک مدیریتی و واقعیت داده‌محور بود؛ به‌طوری که سهم واقعی بازچرخانی آب کمتر از برآوردهای اولیه مدیران برآورد شد. این موضوع نشان می‌دهد که پیاده‌سازی چارچوب حسابداری آب توانسته است به‌طور مؤثر عدم قطعیت‌های اطلاعاتی را کاهش داده و مبنای دقیق‌تری برای تصمیم‌گیری فراهم آورد.

از منظر روش‌شناسی، این پژوهش نشان داد که MCA-WAF، علی‌رغم توسعه اولیه برای شرایط استرالیا، قابلیت بالایی برای کاربرد در شرایط اقلیمی خشک و ساختار نهادی ایران دارد و می‌تواند فراتر از یک ابزار گزارش‌دهی، به‌عنوان یک ابزار تحلیلی برای مقایسه عملکرد، شناسایی ناکارایی‌ها و تفکیک اثر فناوری از مدیریت مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، نتایج همچنین نشان داد که برای تحقق کامل اهداف تصمیم‌گیری در شرایط کم‌آبی، این چارچوب نیازمند توسعه است. به‌ویژه، یکپارچه‌سازی آن با داده‌های اقتصادی از جمله هزینه آب، انرژی و ارزش افزوده و بهره‌گیری از چارچوب‌هایی مانند سیستم حسابداری محیط‌زیستی-اقتصادی آب (SEEA-W)، می‌تواند کارایی آن را در تحلیل‌های راهبردی افزایش دهد.

پیامدهای مدیریتی و سیاستی پژوهش



فراتر از نتایج فنی، این پژوهش نشان می‌دهد که استقرار نظام حسابداری آب مبتنی بر MCA-WAF می‌تواند نقش مؤثری در ارتقاء تصمیم‌گیری مدیریتی در صنایع آب‌بر ایفا کند. اطلاعات حاصل از حسابداری آب، مدیران را قادر می‌سازد تا به جای اتکا به برآوردهای ذهنی یا شاخص‌های کلی مصرف آب، تصمیم‌های خود را بر پایه بیلان واقعی جریان‌های آب، کیفیت داده‌ها و سهم هر یک از واحدهای عملیاتی در مصرف، بازچرخانی و اتلاف آب اتخاذ کنند. چنین رویکردی امکان شناسایی گلوگاه‌های اصلی، اولویت‌بندی سرمایه‌گذاری برای ارتقای سامانه‌های پایش، بهبود زیرساخت‌های بازچرخانی و کاهش ریسک‌های ناشی از محدودیت منابع آب را فراهم می‌آورد. بر این اساس، پیشنهادهای مدیریتی این پژوهش شامل: نخست، تکمیل و توسعه سیستم‌های دقیق اندازه‌گیری جریان آب در تمامی مسیرهای ورودی، خروجی و بین‌واحدی به منظور بهبود دقت بیلان؛ دوم، هدف‌گذاری برای افزایش تدریجی کارایی عملیاتی از طریق توسعه بازچرخانی و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های تصفیه؛ سوم، کاهش وابستگی به منابع پرریسک از طریق جایگزینی تدریجی برداشت آب زیرزمینی با پساب تصفیه‌شده؛ و چهارم، توسعه چارچوب‌های یکپارچه حسابداری آب با رویکرد تلفیق داده‌های فیزیکی و اقتصادی است. از این منظر، توسعه آینده نظام‌های حسابداری آب باید از تمرکز صرف بر گزارش‌دهی فیزیکی فراتر رفته و با تلفیق شاخص‌های اقتصادی، محیط‌زیستی و ریسک، به یک سامانه پشتیبان تصمیم برای مدیریت پایدار منابع آب در صنایع آب‌بر تبدیل شود.

در سطح سیاست‌گذاری نیز یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه نظام‌های استاندارد حسابداری آب می‌تواند به عنوان یکی از الزامات حکمرانی آب در صنایع آب‌بر مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس، پیشنهاد می‌شود دستگاه‌های متولی مدیریت منابع آب و بخش صنعت، از جمله وزارت صنعت، معدن و تجارت و وزارت نیرو، تدوین دستورالعمل‌های ملی حسابداری آب را در دستور کار قرار دهند و ارائه گزارش‌های استاندارد حسابداری آب را به یکی از الزامات ارزیابی عملکرد زیست‌محیطی و تمدید مجوز فعالیت صنایع پرمصرف آب تبدیل کنند. چنین اقدامی ضمن افزایش شفافیت مصرف آب، امکان مقایسه عملکرد صنایع، پایش روند بهبود بهره‌وری آب و طراحی سیاست‌های مبتنی بر شواهد را نیز فراهم خواهد کرد.

۵- پی‌نوشت

- 1- Water Accounting
- 2- System of Environmental-Economic Accounting for Water
- 3- General Purpose Water Accounting
- 4- International Water Management Institute
- 5- Water Accounting +
- 6- Water Footprint Accounting
- 7- Life Cycle Assessment
- 8- Minerals Council of Australia Water Accounting Framework
- 9- Flotation
- 10- Concentrate
- 11- Pelletizing
- 12- Steel Plants
- 13- Scope
- 14- Operational Input
- 15- Operational Output
- 16- Other Managed Water
- 17- Operational Facility
- 18- New Water Store

- 19- Mixed Water Store
- 20- Measured
- 21- Simulated
- 22- Estimated

From Water Accounting to Managerial Decision-Making: An Empirical Evaluation and Extension of the MCA-WAF Framework in a Water-Stressed Mining and Industrial Complex

Abstract

Increasing water stress in arid and semi-arid regions has highlighted the need for systematic tools to improve water management. This study evaluates the capabilities and limitations of the Australian Minerals Council Water Accounting Framework (MCA-WAF) through its implementation in an integrated iron ore-to-steel industrial complex supplied by multiple water sources. The study advances the framework by introducing complementary water-intensity indicators, assessing data quality, and demonstrating its role in supporting managerial decision-making. The methodology involved reconstructing the water flow network, preparing a physical water balance, and deriving performance indicators using predominantly measured data. Results show that the facility receives approximately 18.9 million m³ of water annually, of which 67% is supplied from transferred water sources. Operational water efficiency (reuse and recycling) was estimated at 14.9%, substantially below commonly reported international values, indicating considerable potential for improving water recirculation. In contrast, water consumption for iron ore concentrate production was only 0.61 m³ t⁻¹, lower than the global average, suggesting that inefficiencies arise primarily from system-level water management rather than production technology. The accounting process also revealed a significant gap between managerial perceptions and data-driven reality, with managers substantially overestimating the actual recycling rate. The findings indicate that integrating MCA-WAF with economic indicators can transform it from a reporting framework into an effective decision-support tool for sustainable water management.

Keywords: Corporate water accounting, Minerals Council of Australia Water Accounting Framework, Information disclosure, water efficiency, water recycling, water management

- Batchelor, C., Reddy, V. R., Linstead, C., Dhar, M., & Roy, S. (2016). Water accounting plus (WA+): A framework for water accounting and water productivity analysis. *International Water Management Institute*.
- Burritt, R. L., & Christ, K. L. (2017). Water risk in corporate reporting: A review of current practice and future trends. *Journal of Cleaner Production*, 152, 1–15.
- Chalmers, K., Godfrey, J. M., & Potter, B. N. (2012). Water accounting and the construction of governance. *Accounting, Auditing & Accountability Journal*, 25(3), 430–460.
- Danoucaras, N., & Woodley, A. (2013). Development of a water accounting framework for the mining industry. *Journal of Cleaner Production*, 84, 148–156.
- Fallahi, A., Taheriyoun, M., & Asghari, K. (2024). Water footprint assessment in an industrial symbiosis system based on environmental, economic, and social sustainability indices. *Journal of Cleaner Production*, 454, 142227.
- Fitzroy Partnership for River Health. (2024). *Water quality and water use report*. Fitzroy Basin Association.
- Grafton, R. Q., & Hussey, K. (2011). *Water resources planning and management*. Cambridge University Press.
- Hoekstra, A. Y., & Chapagain, A. K. (2007). Water footprints of nations: Water use by people as a function of their consumption pattern. *Water Resources Management*, 21(1), 35–48.
- Meißner, S. (2021). Water consumption in mining industry: A global review. *Resources Policy*, 74, 102287.
- Mineral Council of Australia. (2022). *A practical guide to consistent water accounting (MCA Water Accounting Framework)*. MCA.
- Mining Magazine Intelligence. (2024). *Global mining water performance report*. Aspermont Media.
- Molden, D. (1997). Accounting for water use and productivity. *International Irrigation Management Institute*.
- Molden, D., & Sakthivadivel, R. (1999). Water accounting to assess use and productivity of water. *International Journal of Water Resources Development*, 15(1–2), 55–71.
- Northey, S., Haque, N., & Mudd, G. (2016). Using sustainability reporting to assess the environmental footprint of copper mining. *Journal of Cleaner Production*, 40, 118–128.
- Northey, S., Mudd, G., Werner, T., Jowitt, S., & Haque, N. (2019). The exposure of global base metal resources to water criticality, scarcity and climate change. *Global Environmental Change*, 58, 101979.
- Owens, J. W. (2002). Life cycle assessment in relation to risk assessment: An evolving perspective. *Risk Analysis*, 22(1), 27–36.
- United Nations (2012) System of Environmental-Economic Accounting for Water. New York, US.
- 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.