مدیریت منابع و اصلاح الگوی مصرف آب در بخش معدن و صنایع معدنی ایران
(بخش اول)

کد موضوعی: ۳۱۰
شماره مسلسل:۱۶۴۵۵
خردادماه ۱۳۹۸

معاونت پژوهش‌های زیربنایی و امور تولیدی
دفاتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن
مطالعات زیربنایی

به‌نام خدا

فهرست مطالب

چکیده ۱
مقدمه ۳
۱. مدیریت منابع آب در معادن و صنایع معدنی دنیا ۴
۱-۱. کیفیت‌وکمیّت مدیریت منابع آب در دنیا ۴
۱-۲. آهن و فولاد ۶
۱-۳. صنایع مس و طلا ۹
۱-۴. آلومینیم ۱۲
۱-۵. سیمان ۱۴
۱-۶. شن و ماسه ۱۵
۱-۷. استاندارد آب مصرفی در صنایع معدنی در کشورهای دنیا ۱۵
۲. بررسی کمّی‌وکیفی استفاده از منابع آب در بخش معدن و صنایع معدنی ایران ۱۷
۲-۱. مصارف آب در دنیا ۱۷
۲-۲. کمّیت مصرف آب در صنایع معدنی کشور ۱۸
۳. نمونه‌هایی از مدیریت موفق منابع آب در بخش معادن و صنایع معدنی دنیا ۲۲
۳-۱. معادن شیلی ۲۳
۳-۲. معادن پرو ۲۴
۳-۳. بازیابی آب در معدن الماس استرالیا ۲۴
۳-۴. معادن زغال‌سنگ منطقه غرب استرالیا ۲۵
۳-۵. واحد فراوری اورانیم نامیبیا ۲۵
۳-۶. فناوری‌های مورد استفاده برای مدیریت و بازیافت منابع آب در معادن و صنایع معدنی ۲۶
۴. خلاصه مدیریتی ۴۸
۵. جمع‌بندی و ارائه راهکار ۵۰
۵-۱. چالش‌های عمده مدیریت منابع آب در بخش معدن و صنایع معدنی ۵۰
۵-۲. راهکارهای پیشنهادی ۵۱
منابع و مآخذ ۵۶

مدیریت منابع و اصلاح الگوی مصرف آب در بخش معدن و صنایع معدنی ایران (بخش اول)

چکیده

مدیریت منابع و مصرف آب در کشور جز موضوعات راهبردی و اولویت‌دار به ویژه در اسناد بالادستی محسوب می‌شود. معادن و صنایع معدنی نیز به عنوان یکی از بخش‌های مصرف‌کننده منابع آب نیازمند سیاستگذاری و انجام اقدامات نظارتی، اجرایی و تقنینی به منظور رفع چالش‌ها و آسیب‌های ایجاد شده در اثر الگوهای نامناسب مصرف آب و مدیریت پساب است.

در طرح حاضر به بررسی و ارزیابی مدیریت منابع و اصلاح الگوی مصرف آب در بخش معدن و صنایع معدنی پرداخته شده است. در این گزارش ضمن بررسی کیفیت‌وکمّیت منابع آب در صنایع معدنی دنیا مشخص شده است که از میان فلزات و آلیاژهای آهن، فولاد، طلا، مس، آلومینیم، محصولات سیمانی و شن و ماسه، بیش‌ترین مصرف آب مربوط به تولید فلز طلا و پس از آن تولید فلز مس است. در مقابل صنعت شن و ماسه و سیمان کم‌ترین میزان مصرف آب را به خود اختصاص داده‌اند. در بخش دیگر این گزارش، کیفیت‌وکمّیت منابع آب در معادن و صنایع معدنی کشور بررسی و با استانداردهای جهانی مقایسه شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد که کارخانه‌های تولید فولاد و گندله‌سازی در کشور نیازمند بازنگری اساسی در زمینه مدیریت منابع آب و اصلاح فرایندهای مصرف و بازیافت آب هستند. در مقابل کارخانه‌های تولید مس در بخش تغلیظ و حل‌سازی تا حد زیادی توانسته‌اند میزان مصرف آب را مدیریت کرده و عملکرد خود را به استانداردهای جهانی نزدیک کنند. در مورد فلز طلا، مصرف آب در ایران حدود پنج برابر مصرف جهانی است و باید به سرعت طرح‌های ویژه‌ای تدوین و اجرا شود.

به طور کلی دو راهکار عمده و اصلی برای مدیریت منابع آب وجود دارد. گزینه اول استفاده از آب شور دریا به جایِ آب شیرین (شیرین‌سازی آب دریا) و گزینه دوم استفاده از فرایندهای بازیافت آب در کارخانه‌های صنعتی- معدنی از جمله استفاده از تیکنرهای آبی و فیلتراسیون است که هر کدام به طور کامل در گزارش اشاره شده است. از مهم‌ترین چالش‌های این حوزه می‌توان به عدم اصلاح قیمت آب و نبود برنامه مشخص برای واقعی کردن نرخ آن، فقدان سیاست‌ها و برنامه‌های آمایش سرزمین برای مشخص شدن اولویت‌های بهره‌برداری از منابع آب در معادن و صنایع معدنی، مصرف غیر بهینه آب برای تولید محصولات معدنی و پایین بودن نرخ بهره‌وری، فقدان نگرش اقتصادی به آب در کشور، محدودیت

منابع مالی برای تأمین آب مورد نیاز صنعتی و معدنی، فقدان نظام مدیریت یکپارچه منابع آب، کمبود خدمات و صنایع پشتیبانی بخش آب، عدم خوداتکایی مالی و رشد خصلت‌های بنگاهداری اقتصادی در نظام مدیریتی آب، آلودگی منابع آب مصرفی در بخش صنعتی به واسطه انواع پساب‌ها و پسماندهای دارای منشأ صنعتی و معدنی، عدم استفاده مجدد از پساب‌های گوناگون در بخش معدن و صنایع معدنی، بی‌توجهی به میزان و نوع مصارف آب در صنایع معدنی از دیدگاه اقتصاد آب، کمبود و ناهماهنگی در قوانین، ضوابط و روش‌های اجرایی در زمینه‌های مرتبط با آب، استفاده از مواد شیمیایی نامناسب و تخلیه آلودگی‌های ناشی از آنها در منابع آب، نامناسب شدن کیفیت آب آشامیدنی در اثر تغییرات اکولوژیک و زیست‌محیطی و دفع فاضلاب و زباله‌ها و عدم رشد کافی و هماهنگ تجهیزات مرتبط، چالش تأمین آب سالم برای روستاییان در مراکز جمعیتی کوچک و پراکنده نزدیک معادن و واحدهای صنعتی و معدنی، ناکافی بودن الگوهای مصرف مناسب آب و کمبود تأسیسات و زیرساخت‌ها برای مقابله با بحران‌ها در زمان‌های خشکسالی، کمبود امکانات در زمینه سنجش آلاینده‌ها در منابع آب، آلودگی رودخانه‌ها و منابع آب زیرزمینی به ویژه به دلیل گسترش صنعتی – معدنی غیر اصولی روی سفره‌های آب و عدم بهره‌گیری از فناوری‌های روز به منظور هوشمندسازی مدیریت منابع آب در بخش معدن و صنایع معدنی کشور اشاره کرد.

به منظور مدیریت کارآمد منابع و اصلاح الگوی مصرف آب در معادن و صنایع معدنی راهکارهای مختلف فنی و اجرایی، تقنینی، نظارتی و سیاستگذاری وجود دارد که می‌توان با توجه به تجربه کشورهای موفق دنیا و بومی‌سازی این روش‌ها، گام مهمی در مدیریت منابع و اصلاح الگوی مصرف آب در حوزه معدن و صنایع معدنی برداشت. نگاه ملی به مسئله آب و ایجاد درک مشترک و هماهنگی میان دستگاه‌ها و نهادهای دخیل در این موضوع، آمایش سرزمین، تدوین برنامه راهبردی مدیریت منابع آب، اصلاح قیمت آب، حمایت از پژوهش‌های دانشگاهی فناورانه و ایجاد ارتباط تنگاتنگ با صنعت، نظارت و پایش مستمر کیفیت‌وکمّیت مصرف آب در معادن و صنایع معدنی، آموزش و استانداردسازی، انجام اقدامات فنی – مهندسی در محیط معادن و واحدهای فراوری از جمله راهکارهای عمده مدیریت منابع و اصلاح الگوی مصرف آب در حوزه معدن و صنایع معدنی هستند.

مقدمه

قانون برنامه ششم توسعه، موضوعات خاص راهبردی در مورد آب و محیط‌زیست را به عنوان یکی از مسائل محوری این برنامه عنوان کرده است و بر اساس آن، دولت موظف است طرح‌های مرتبط با مسائل محوری و همچنین مصوبات ستاد فرماندهی اقتصاد مقاومتی را در بودجه سالیانه اعمال کند. بر اساس ماده (۳۵) این قانون، دولت مکلف است به منظور مقابله با بحران کم‌آبی، رهاسازی حقابه‌های زیست‌محیطی برای پایداری سرزمین، پایداری و افزایش تولید در بخش کشاورزی، تعادل‌بخشی به سفره‌های زیرزمینی و ارتقای بهره‌وری و جبران تراز آب، به میزانی که در سال پایانی اجرای قانون برنامه، یازده میلیارد مترمکعب شود اقداماتی را انجام دهد که «تغییر ساختار مصرف آب شرکت‌های فولادی، آلیاژی و معدنی و اصلاح سامانه (سیستم) خنک‌کنندگی و شست‌وشوی مواد خام تا پایان سال چهارم اجرای قانون برنامه» از جمله تکالیف تصریح شده در این بند از قانون برنامه ششم توسعه کشور است. همچنین ماده (۳۷) این قانون دولت را به «تکمیل و اجرای تأسیسات جمع‌آوری، تصفیه، بازچرخانی و مدیریت پساب و فاضلاب در شهرها و شهرک‌های صنعتی و خدماتی و سایر واحدهایی که فاضلاب با آلایندگی بیش از حد مجاز از استانداردهای ملی تولید می‌نمایند» مکلف کرده است. ماده (۳۹) این برنامه نیز با هدف ارتقای عدالت اجتماعی، افزایش بهره‌وری در مصرف آب و انرژی و هدفمندکردن یارانه‌ها در جهت افزایش تولید و توسعه نقش مردم در اقتصاد، به دولت اجازه داده است تا قیمت آب و حامل‌های انرژی و سایر کالاها و خدمات یارانه‌ای را با رعایت ملاحظات اجتماعی و اقتصادی و حفظ مزیت نسبی و رقابتی برای صنایع و تولیدات، به تدریج تا پایان سال ۱۴۰۰ با توجه به مواد (۱)، (۲) و (۳) قانون هدفمندکردن یارانه‌ها مصوب ۱۳۸۸/۱۰/۱۵ اصلاح و از منابع حاصل به صورت هدفمند برای افزایش تولید، اشتغال، حمایت از صادرات غیرنفتی، بهره‌وری، کاهش شدت انرژی، کاهش آلودگی هوا و ارتقای شاخص‌های عدالت اجتماعی، حمایت‌های اجتماعی از خانوارهای نیازمند و تأمین هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری شرکت‌های ذی‌ربط در قالب بودجه‌های سنواتی بهره ببرد.

با توجه به موارد ذکر شده، اختیارات و الزامات قانونی مورد نیاز برای مصرف مدیریت شده و بهینه آب در کشور به دولت داده شده است. بخش معدن و صنایع معدنی نیز به عنوان یکی از حوزه‌های مهم و اثرگذار در اقتصاد کشور، نیازمند بهینه‌سازی الگوهای مصرف آب است که با استفاده از تجربیات جهانی و فناوری‌های روز دنیا امکان مدیریت بهینه منابع آب در معادن و صنایع معدنی وجود دارد. در بخش معدن و صنایع معدنی، مصرف عمده آب در واحدهای فراوری مواد معدنی (مانند کنسانتره‌سازی، گندله‌سازی، فلوتاسیون و ...) و واحدهای تولید در زنجیره ارزش محصولات معدنی و فلزی (مانند آهن و فولاد، مس، آلومینیم، سرب و روی و ...) به عنوان آب فرایندی و آب مورد نیاز برای ایجاد بستر انتقال مواد معدنی، خنک‌کاری و کنترل دماست.

استفاده بهینه از منابع آبِ در دسترس، اصلاح الگوهای مصرف آب با استفاده از فناوری‌های نوین و بازیافت آب و پساب‌ها در فعالیت‌های معادن و صنایع معدنی از راهکارهای عمده مدیریت منابع آب در این حوزه است. همچنین آمایش سرزمینی برای شناخت مزیت‌های منطقه‌ای و صدور مجوز برای فعالیت‌های معدنی و صنایع معدنی بر اساس این آمایش یکی دیگر از راهکارهای مدیریت منابع آب در کشور است.

در این گزارش تصویری از روش‌های مدیریت منابع آب در معادن و صنایع معدنی دنیا ارائه و آخرین پژوهش‌های انجام شده در این حوزه به همراه فناوری‌های نوین مرتبط با بازیافت و اصلاح الگوی مصرف آب در بخش معدن و صنایع معدنی بررسی شده است. بررسی نمونه‌هایی از فرایندهای موفقیت‌آمیز در دنیا بخش دیگری از این گزارش را تشکیل داده است. پرداختن به محدودیت‌ها و چالش‌های مهم در زمینه مدیریت منابع آب کشور، بررسی روند کمّی‌وکیفی مصرف آب و ارائه پیشنهادهایی برای مجموعه اقدامات و راهکارها برای مدیریت منابع آب در معادن و صنایع معدنی در ایران، از جمله سایر موارد مطرح شده در این گزارش است. در بخش دوم این گزارش که منتشر خواهد شد اطلس آب در بخش معدن و صنایع معدنی بر مبنای آمایش سرزمین ارائه خواهد شد.

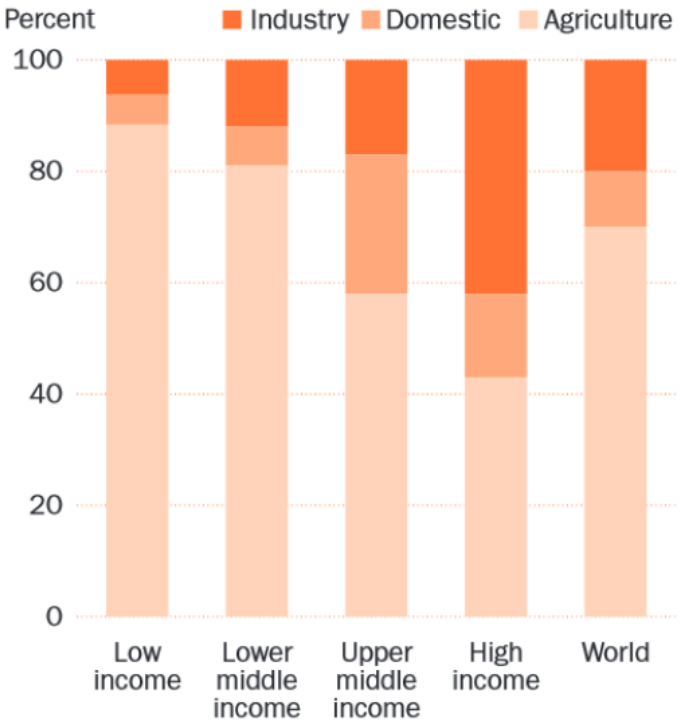
۱. مدیریت منابع آب در معادن و صنایع معدنی دنیا

۱-۱. کیفیت‌وکمیّت مدیریت منابع آب در دنیا

هزینه مصرف آب در صنعت نسبت به کل هزینه‌های تولید آن در بخش‌های مختلف از جمله کشاورزی، بخش کوچکی را به خود اختصاص می‌دهد، اما توجه به کاهش آن می‌تواند ارزش قابل توجهی را در هزینه‌های به جامانده از آن ایجاد کند. اگر رقابت برای دسترسی به آب در یک بازار آزاد انجام شود، کاربردهای صنعتی آب به دلیل هزینه‌های ورودی کم‌تر و ارزش‌افزوده بالاتر، رقابتی خواهد شد. هزینه‌های اضافی که برای تأمین امنیت آب در صنعت انجام می‌گیرد و به تولیدکنندگان و صنعت‌گران اجازه داده است تا در یک حاشیه امن و بدون توجه به اهمیت صرفه‌جویی در مصرف آب به فعالیت بپردازند، به ایجاد حاشیه امن در قدرت تولید منجر شده است. در این خصوص پرسش کلیدی که همواره مطرح است، این است که آیا موانعی برای بازار رقابتی آب مصرفی در صنعت وجود دارد؟ در مناطق روستایی و یا حتی شهری، مصرف صنعتی آب عموماً تحت فشار جامعه انسانی قرار می‌گیرد. در این موارد به ویژه فعالیت‌های کشاورزی که فشار زیادی به مصرف آب صنعتی وارد می‌کند، معمولاً با خرید پروانه بهره‌برداری صنعتی، تا حدودی بر این فشار غلبه می‌شود. پروانه بهره‌برداری از منابع آب برای مصرف صنعتی، بخش کوچکی از اجازه‌های کلی است که صنعت به آن نیاز دارد.

نمودار ۱ میزان مصرف آب در سه بخش کشاورزی، صنعت و خانگی را در کشورهای مختلف با سطح درآمدی کم، متوسط و بالا نشان داده است. تعیین میزان آب مصرفی در صنایع مختلف معدنی نیازمند بررسی عوامل مختلفی است که فرایند پیچیده‌ای دارد. انتظار می‌رود مصرف سالیانه آب در صنعت از ۷۲۵,۰۰۰ مترمکعب در سال ۱۹۹۵ به ۱,۱۷۰,۰۰۰ مترمکعب در سال ۲۰۲۵ برسد.

نمودار ۱. مصرف آب در بخش‌های مختلف کشاورزی، صنعت و خانگی در کشورهای با سطح درآمدی مختلف[1]



نمودار ۱ نشان می‌دهد که به طور متوسط بیش از ۷۰ درصد مصرف آب در بخش کشاورزی و ۲۰ درصد آن در بخش صنعت است. آب مصرفی در صنعت در کشورهای با درآمد بالا به مراتب بیش‌تر از کشورهای با درآمد پایین است. بسیاری از صنایع از آب شهری استفاده می‌کنند که به خاطر مصرف خانگی محدودیت‌هایی در مصرف آن اعمال می‌شود.

از جمله اقدامات انجام شده در دنیا برای مدیریت مصرف آب در معادن و صنایع معدنی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- اصلاح قیمت آب
- نظارت بر نحوه استفاده از منابع آب
- ایجاد شفافیت در میزان آب مصرفی در تمامی مراحل عملیات از اکتشاف تا تولید محصول

1. Bank, 2010.

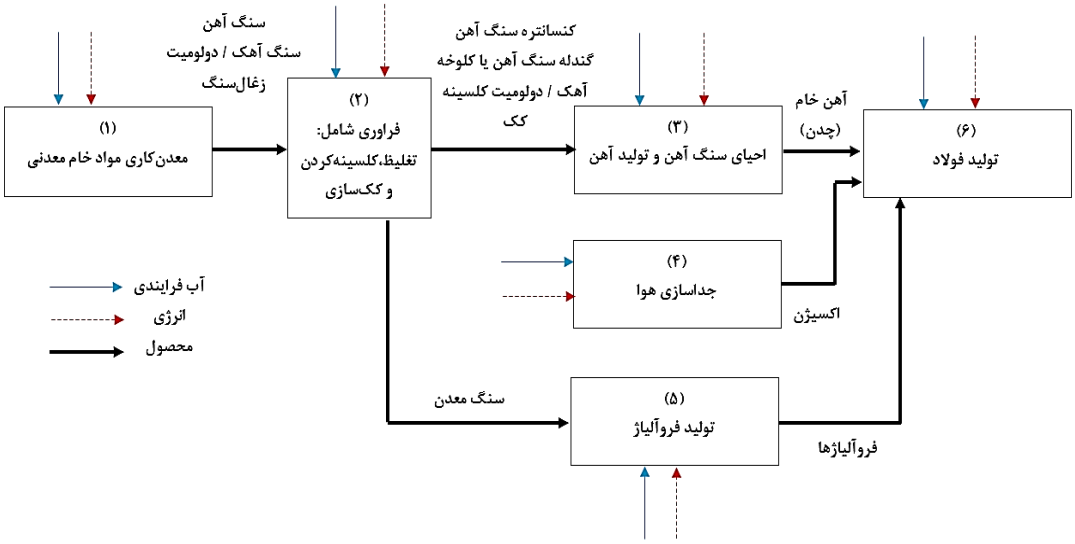
- جلوگیری از آلودگی آب
- تعامل با ذی‌نفعان محلی و رقبا (به خصوص بخش کشاورزی)
- بازیافت و استفاده مجدد از آب
- شیرین‌سازی آب و استفاده از آن به عنوان یکی از منابع تأمین آب معادن و صنایع معدنی

همواره باید در نظر داشت که پژوهش‌های مختلفی در دنیا در خصوص میزان آب مصرفی در صنایع مختلف انجام شده است که هر کدام تابع عوامل مختلفی از جمله زمان، نوع تکنولوژی، نوع ماده معدنی و سایر عوامل مهم است. لذا باید توجه کرد که این امر سبب گردآوری مجموعه‌ای از اطلاعات نسبتاً متفاوت خواهد شد، ولی در این گزارش سعی شده است که از معتبرترین منابع بدین منظور استفاده شود.

۲-۱. آهن و فولاد

کشورهای عمده تولیدکننده فولاد مانند چین و هند، صنایع فولاد خود را در نزدیکی آب‌ها احداث کرده‌اند تا هم آب مورد نیاز این صنایع تأمین شود و هم دسترسی به بازارهای صادراتی وجود داشته باشد. شکل ۱ نقاطی را نشان می‌دهد که در آن به مدار تولید فولاد، آب اضافه شده است. خطوط آبی رنگ این نقاط را به خوبی نشان می‌دهند.

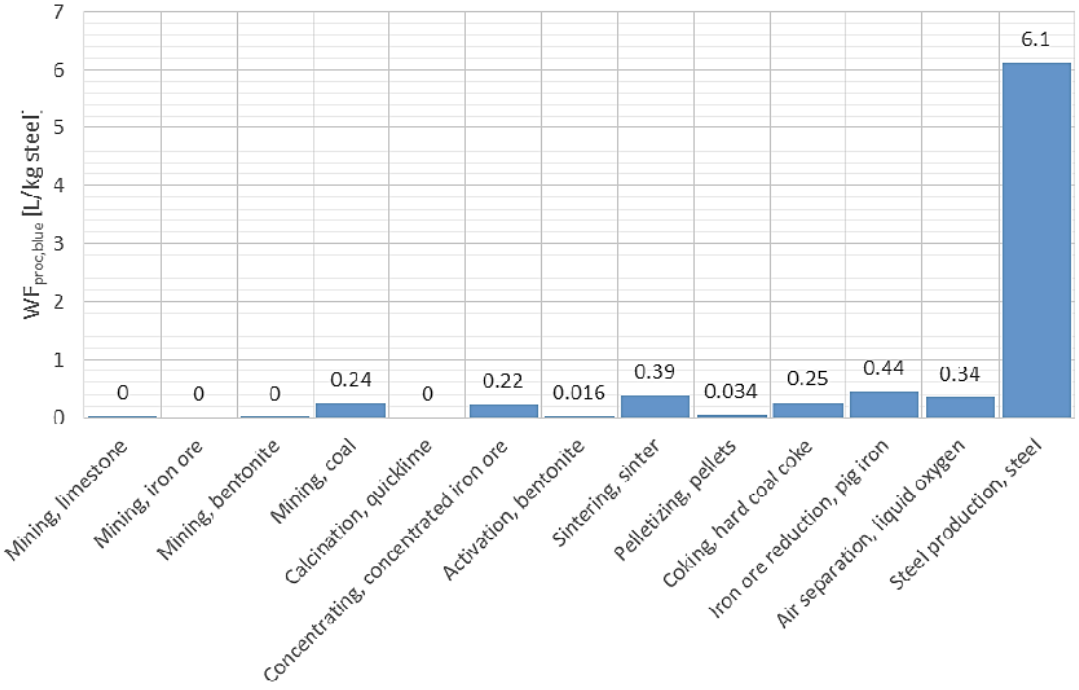
شکل ۱. آب مصرفی در مدار تولید فولاد از سنگ معدن در کوره بلند[1]



1. Busman, 2016.

نمودار ۲ میزان مصرف آب در فرایند تولید فولاد غیرآلیاژی از سنگ معدن و بر اساس واحدهای مختلف تولیدکننده را نشان می‌دهد.

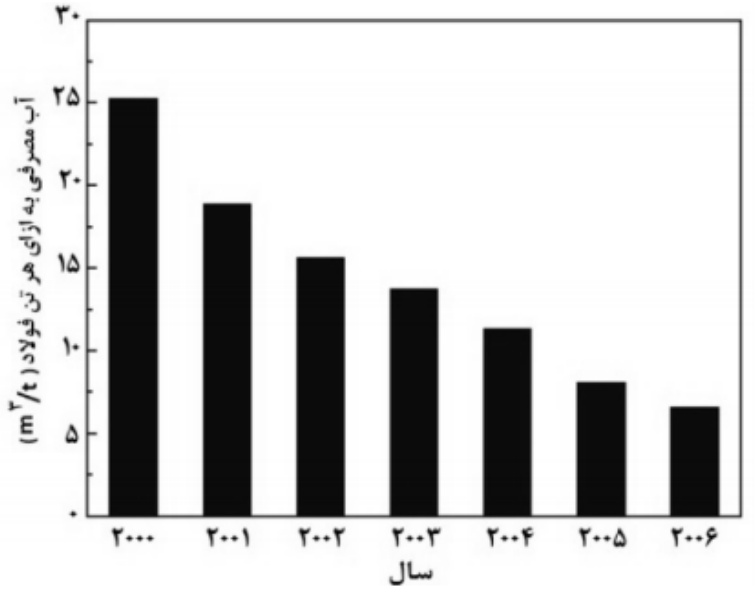
نمودار ۲. میزان مصرف آب در فرایند تولید فولاد غیرآلیاژی از سنگ معدن و بر اساس واحدهای مختلف تولیدکننده (مترمکعب آب مصرفی به ازای هر تن فولاد تولیدی)[1]



پژوهشی دیگر[2] نشان می‌دهد که به طور متوسط به ازای تولید هر تن فولاد، ۲۵ مترمکعب آب مورد نیاز است. در سال ۲۰۰۸، پژوهشی در کشور چین به عنوان مهم‌ترین تولیدکننده فولاد انجام گرفت که میزان آب مصرفی به ازای هر تن فولاد بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ را محاسبه کرده است. نمودار ۳ آب مصرفی به ازای هر تن فولاد تولیدی را بین سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶ نشان می‌دهد.

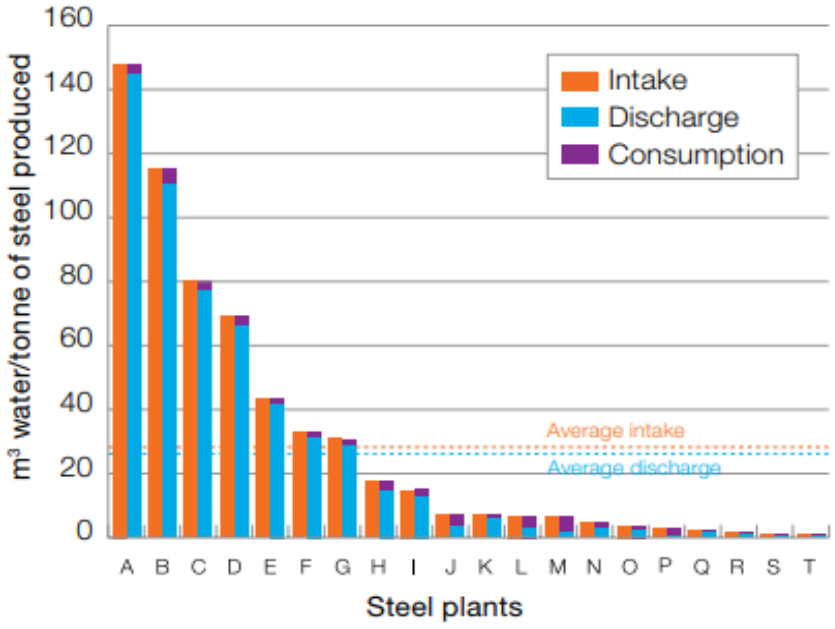
1. Busman, 2016.
2. Walling, 2008.

نمودار ۳. آب مصرفی به ازای هر تن فولاد در سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۶[۱]



در سال ۲۰۱۵ مطالعاتی بر ۲۰ کارخانه تولید فولاد در جهان انجام شد تا میانگین آب مصرفی در صنعت فولاد برآورد شود. نمودار ۴ نتایج این مطالعات و ارزیابی آن را در قالب نمودار نشان می‌دهد.

نمودار ۴. آب مصرفی در ۲۰ کارخانه تولید فولاد در جهان[۲]



Intake: آب ورودی، **Discharg**: آب خروجی، **Consumption**: آب مصرفی

۱. همان

2. WMSA, 2015.

نمودار فوق نشان می‌دهد که به طور متوسط برای تولید یک تن فولاد حدود ۲۸/۶ مترمکعب آب وارد مجموعه کارخانه شده که به طور متوسط حدود ۲۵/۳ مترمکعب از آن بدون مصرف از محیط خارج شده است. به عبارتی به طور میانگین حدود ۳/۳-۱/۶ مترمکعب از آب ورودی در یک کارخانه تولید فولاد مصرف می‌شود و مابقی آن هدر رفته است. همان‌طور که مشاهده شد به طور متوسط در یک کارخانه تولید فولاد حدود ۲۵ تا ۲۸ مترمکعب آب مصرف می‌شود و امکان دارد که این میزان برای برخی از کارخانه‌ها به مقادیر بالاتر هم برسد. به طوری‌که کارخانه A در نمودار ۴ حدود ۱۴۰ مترمکعب آب به ازای هر تن فولاد خام مصرف کرده است.

۳-۱. صنایع مس و طلا

میزان آب مورد نیاز برای فراوری سنگ معدن سولفیدی مس در روش کنسانتره‌سازی از طریق خردایش در آسیاب در محدوده ۱/۵ تا ۳/۵ مترمکعب آب به ازای هر تن سنگ معدن است. در جنوب غربی ایالات متحده آمریکا، میزان آب مصرفی برای فراوری هر تن سنگ معدن سولفیدی مس بین ۲/۵ تا ۳ مترمکعب است که تقریباً دارای محتوای ۰/۵درصد مس است. بالاترین میزان آب مورد نیاز برای فراوری ۱ تن سنگ معدن مس، بین ۴ تا ۵ مترمکعب برآورد شده است. در یک مطالعه که در سال ۲۰۱۳ انجام شد، میزان آب مصرفی برای تولید فلز مس و فلز طلا بر اساس نوع فرایند تولید و نوع سنگ معدن بررسی شده است که خلاصه آن در جدول ۱ آمده است.

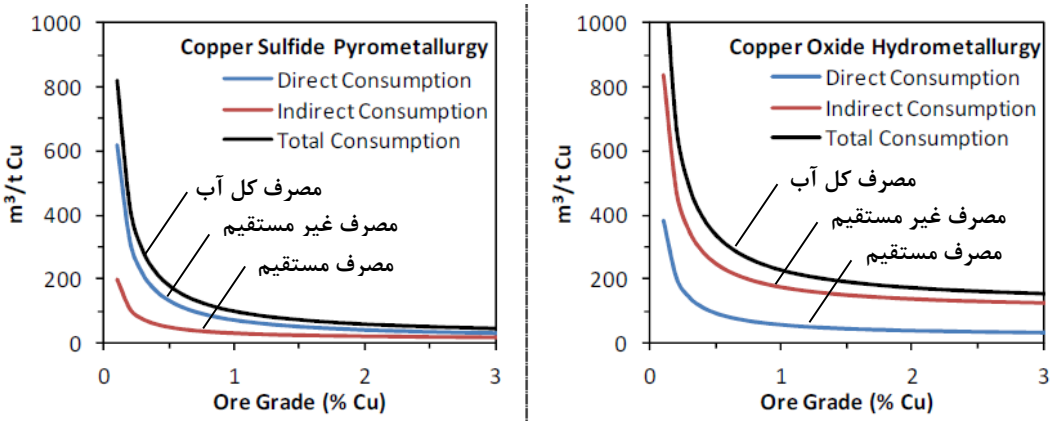
جدول ۱. میزان آب مصرفی تخمینی برای تولید فلز مس و فلز طلا بر اساس نوع فرایند تولید و نوع سنگ معدن[1]

ردیف	نوع سنگ معدن	فرایند تولید	مقدار آب مصرفی (مترمکعب بر تن فلز)
۱	کنسانتره سولفیدی مس با عیار ۰/۷۵ درصد	پیرومتالورژی: معدنکاری- تغلیظ- ذوب- خالص‌سازی	۱۲۸
۲	کنسانتره اکسیدی مس با عیار ۰/۷۵ درصد	هیدرومتالورژی: معدنکاری- هیپ لیچینگ- استخراج حلالی- الکتروویننینگ	۲۶۷
۳	طلای آزاد با عیار ppm ۳/۵	معدنکاری- سیانوراسیون- کربن فعال- الکتروویننینگ- ذوب- خالص سازی	۳۱۴,۰۰۰
۴	طلای غیرآزاد با عیار ppm ۳/۵	معدنکاری- فلوتاسیون تحت فشار اکسیداسیون- سیانوراسیون- کربن فعال- الکتروویننینگ- ذوب- خالص‌سازی	۴۳۳,۰۰۰

1. Haque, 2013.

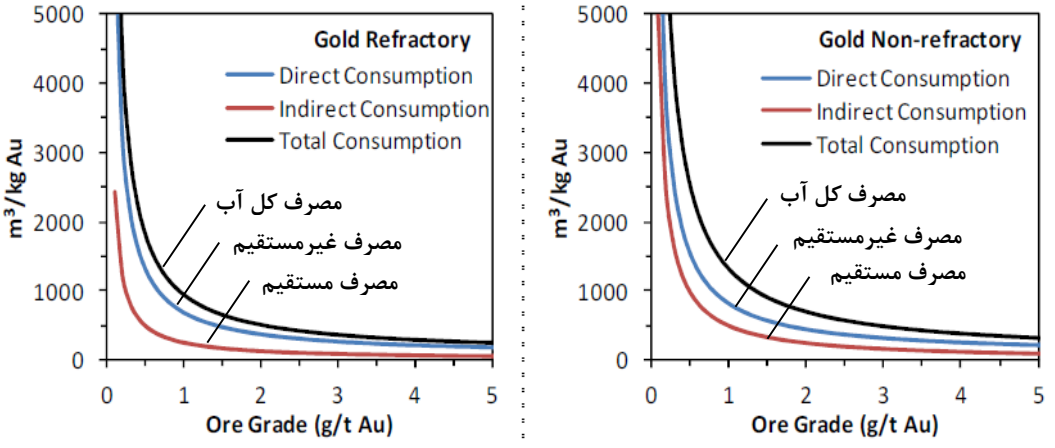
همان‌طور که مشاهده شد تولید یک تن فلز طلا نیاز به آب فرایندی بیش‌تری نسبت به فلز مس دارد. بر اساس همین تخمین نمودار ۵ میزان مصرف آب را به ازای تولید هر تن فلز مس بر حسب عیارهای مختلف سنگ معدن نشان می‌دهد.

نمودار ۵. مصرف آب به ازای تولید هر تن فلز مس بر حسب عیارهای مختلف سنگ معدن[1]



همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود، با افزایش عیار سنگ معدن، میزان مصرف آب کاهش می‌یابد. نمودار ۶ میزان مصرف آب را به ازای تولید هر کیلوگرم فلز طلا بر حسب عیارهای مختلف سنگ معدن نشان می‌دهد.

نمودار ۶. مصرف آب به ازای تولید هر کیلوگرم فلز طلا بر حسب عیارهای مختلف سنگ معدن[2]



1 . Busman, 2016.

۲. همان.

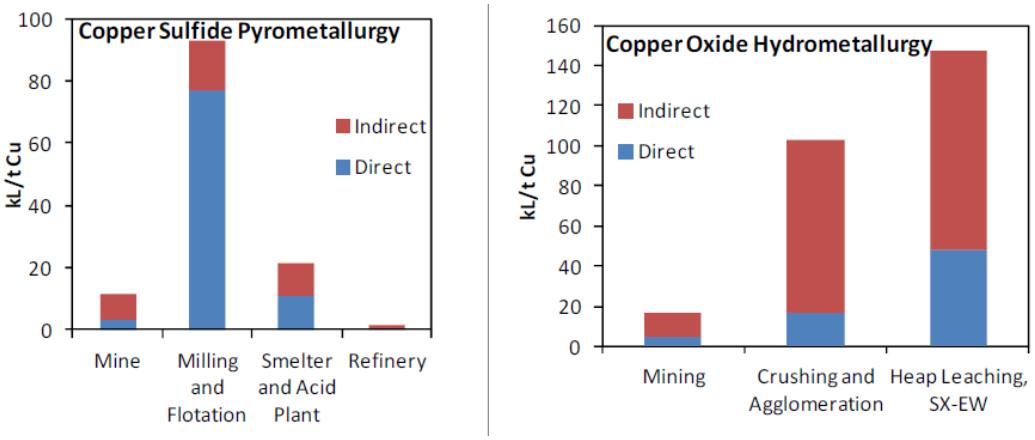
در ادامه میزان مصرف آب بر اساس واحدهای تشکیل‌دهنده در فرایندهای تولید فلز مس و فلز طلا اشاره شده است (نمودار ۷ و ۸). واحدهای تشکیل‌دهنده در مدار تولید فلز مس به روش حرارتی عبارتند از:

- معدنکاری
- خردایش و فلوتاسیون
- ذوب و کارخانه اسید
- خالص‌سازی

واحدهای تشکیل‌دهنده در مدار تولید فلز مس به روش شیمیایی عبارتند از:

- معدنکاری
- خردایش و آگلومراسیون
- لیچینگ، استخراج حلالی، الکتروویننینگ

نمودار ۷. مصرف آب به ازای تولید هر تن فلز مس بر حسب واحدهای مختلف فرایند تولید[۱]



همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان مصرف آب در روش هیدرومتالورژی به مراتب بیش‌تر از روش پیرومتالورژی است. واحدهای تشکیل‌دهنده در مدار تولید فلز طلا در سنگ با طلای آزاد عبارتند از:

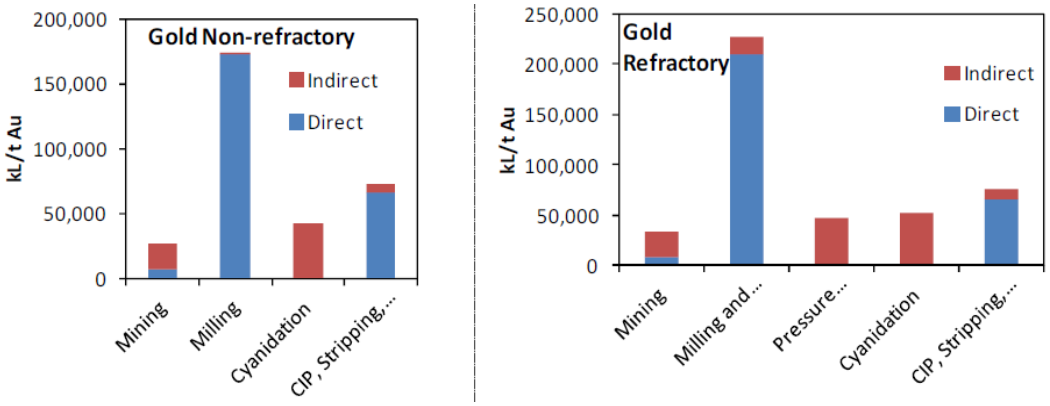
- معدنکاری
- خردایش
- سیانوراسیون
- کربن فعال، ذوب، خالص‌سازی

۱. همان.

واحدهای تشکیل‌دهنده در مدار تولید فلز طلا در سنگ با طلای غیرآزاد عبارتند از:

- معدنکاری
- خردایش
- فلوتاسیون تحت فشار اکسیداسیونی
- سیانوراسیون
- کربن فعال، الکتروویننگ، ذوب، خالص‌سازی

نمودار ۸. مصرف آب به ازای تولید هر تن فلز طلا بر حسب واحدهای مختلف فرایند تولید[۱]



۴-۱. آلومینیم

در بررسی میزان مصرف آب در تولید آلومینیم پایه موارد زیر لحاظ شده است:

- اطلاعات ارائه شده بر اساس فرایند تولید در کشور چین (GLO)[۲] و یا فرایند تولید در کشورهای دیگر بجز چین (RoW)[۳] تقسیم‌بندی شدند
- آب مستقیم[۴] در فرایند تولید شامل آبی است که در معدنکاری، کارخانه تغلیظ، کارخانه خالص‌سازی و کارخانه ذوب آلومینیم استفاده می‌شود.
- آب غیر مستقیم[۵] در فرایند تولید، شامل آبی است که به فرایندهای تولید لوازم و موارد جانبی از جمله منبع انرژی کمک می‌کند.
- **رویکرد اول:** بدون درنظر گرفتن فرایندهای چندمنظوره، برای مثال تخصیص کل مصرف آب به تولید برق
- **رویکرد دوم:** با درنظر گرفتن فرایندهای چندمنظوره

---

۱. همان.

2. Global Aluminium Including China
3. Rest of World
4. Direct Water
5. Indirect Water

بر این اساس جدول ۲ میزان مصرف آب در فرایند تولید آلومینیم پایه بر اساس واحدهای مختلف تولید برای GLO و RoW را نشان می‌دهد.

جدول ۲. میزان مصرف آب در فرایند تولید آلومینیم پایه بر اساس فاکتورهای مختلف تولید برای GLO و RoW و با رویکرد دوم[1]

ردیف	واحد تولید	مقدار مصرف / مترمکعب به ازای هر تن فلز آلومینیم (کشور چین)	مقدار مصرف / مترمکعب به ازای هر تن فلز آلومینیم (بجز کشور چین)
۱	آب مستقیم استفاده شده در کارخانه	۲/۱۴	۱/۱۲
۲	منابع تأمین الکتریسیته	۱۴/۲	۶/۶
۳	سایر مصارف غیرمستقیم	۱/۸۸	۱/۸۸
۴	**مجموع**	**۱۸/۲**	**۹/۶**

همان‌طور که مشاهده شد میزان مصرف آب در فرایند تولید هر تن فلز آلومینیم در کشور چین حدود ۱۸/۲ مترمکعب و در سایر کشورها بجز چین حدود ۹/۶ مترمکعب برآورد شده است. به منظور بررسی دقیق‌تر، اطلاعات در قالب جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. جزئیات میزان مصرف آب در فرایند تولید آلومینیم پایه بر اساس فاکتورهای مختلف تولید برای GLO و RoW و با رویکرد دوم[2]

ردیف	واحد تولید	مقدار مصرف / مترمکعب به ازای هر تن فلز آلومینیم (کشور چین)	مقدار مصرف / مترمکعب به ازای هر تن فلز آلومینیم (بجز کشور چین)
۱	آب مستقیم استفاده شده در کارخانه	۲/۱۴	۱/۱۲
۲	الکتریسته تأمین شده با انرژی آبی	۱/۵۳	۲
۳	الکتریسته تأمین شده با انرژی زغال	۱۱/۹	۳/۴
۴	الکتریسته تأمین شده با انرژی نفت	۰/۰۱	۰/۰۱
۵	الکتریسته تأمین شده با انرژی گاز	۰/۲۳	۰/۴۳
۶	الکتریسته تأمین شده با انرژی هسته‌ای	۰/۴۷	۰/۸۷
۷	سوخت	۰/۹۵	۰/۹۵
۸	مواد کمکی	۰/۷۶	۰/۷۶
۹	حمل‌ونقل	۰/۱۷	۰/۱۷
۱۰	**مجموع**	**۱۸/۲**	**۹/۶**

1. Thylmann, 2016.

۲. همان

جدول ۴ به بررسی میزان مصرف آب در واحدهای مختلف کارخانه تولید آلومینیم اشاره دارد.

جدول ۴. میزان مصرف آب در واحدهای مختلف کارخانه تولید آلومینیم برای GLO و RoW و بر اساس رویکرد دوم[۱]

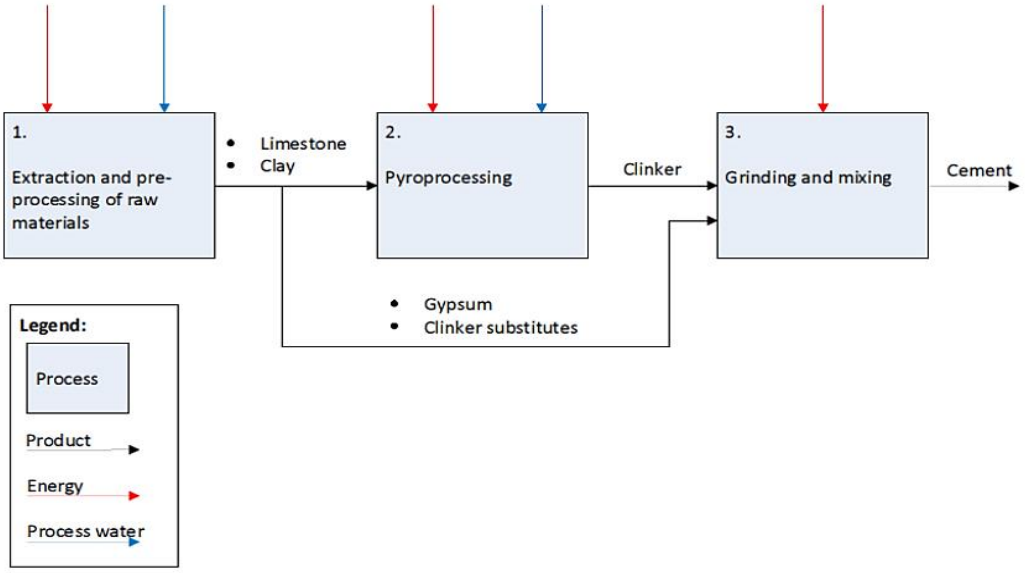
ردیف	واحد تولید	مقدار مصرف / مترمکعب به ازای هر تن فلز آلومینیم (کشور چین)	مقدار مصرف / مترمکعب به ازای هر تن فلز آلومینیم (بجز کشور چین)
۱	معدنکاری بوکسیت	۰/۲۳	۰/۲۳
۲	خالص‌سازی آلومینا	۱/۸۷	۰/۸۴
۳	کارخانه ذوب، آند و ریخته‌گری	۰/۰۴	۰/۰۴۳
۴	**مجموع**	**۲/۱۴**	**۱/۱۲**

همان‌طور که مشاهده شد بیش‌ترین سهم مصرف آب در کارخانه آلومینیم در واحد خالص‌سازی آلومینا قرار دارد.

۵-۱. سیمان

مصرف آب برای تولید هر تن سیمان پورتلند حدود ۲/۶-۲ مترمکعب است. شکل ۲ نقاطی را که طی آن به مدار تولید سیمان آب اضافه شده است، نشان می‌دهد. خط آبی رنگ قسمت‌هایی را نشان داده است که طی مراحل تولید سیمان به آن آب تزریق شده است.

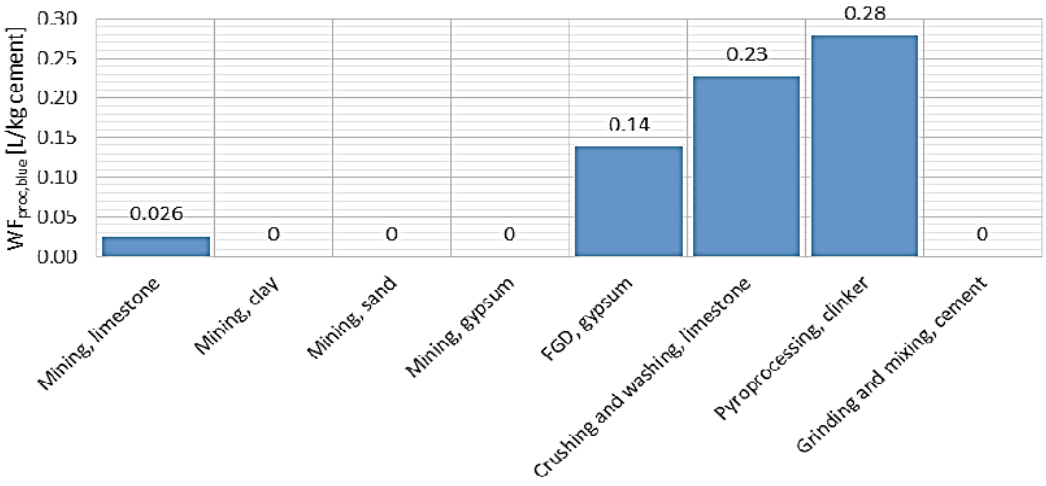
شکل ۲. آب مصرفی در فرایند تولید سیمان از سنگ معدن[۲]



۱. همان

2. Busman, 2016.

نمودار ۹. میزان مصرف آب در فرایند تولید سیمان پورتلند معمولی از سنگ معدن و بر اساس واحدهای مختلف تولید در دنیا[1]



۱-۶. شن و ماسه

میزان آب مصرفی در صنعت شن و ماسه بسیار متغیر و تابع ظرفیت ورودی است. بنابر مطالعات انجام شده مقدار آب مصرفی در ماسه‌شویی‌های معمولی بسته به ظرفیت ورودی آن می‌تواند بین ۳۰۰ تا ۱۵۰۰ مترمکعب بر ساعت متغیر باشد[2].

۱-۷. استاندارد آب مصرفی در صنایع معدنی در کشورهای دنیا

اگر مصرف آبِ یک شرکت یا مجتمع معدنی به طور نامتعارف و غیربهینه بوده و یا بر کیفیت آب تأثیر منفی بگذارد موجب بروز درگیری با سایر بخش‌های صنعتی به خصوص کشاورزی و جوامع محلی و مشکلات اقتصادی می‌شود. این مسئله بدان معناست اگرچه دولت‌ها و یا مقامات محلی مسئول تنظیم مصرف آب هستند، اما ضروری است تا شرکت‌های معدنی نیز فراتر از مقررات موجود نسبت به مصرف آب حساسیت نشان دهند، به خصوص که در این بخش ظرفیت کنترل و نظارت دولتی محدود است. تصفیه زهاب‌ها و پساب‌های معدنی حاصل از عملیات فراوری و استخراج معادن امری ضروری است، زیرا روی آبخوان‌های محلی اثرگذار است و می‌تواند آثار نامطلوبی در سطح محلی داشته باشد. نقشی که این شرکت‌ها می‌توانند در تأمین جوامع آب محلی، چه از طریق مشارکت با سازمان‌های غیردولتی و یا با استفاده از امکانات خود ایفا کنند، بسیار قابل توجه است. شورای جهانی کسب‌وکار برای توسعه پایدار مجموعه‌ای از ۱۸۰ شرکت بین‌المللی است که در یک تعهد جامع شریک هستند و آن تعهد به اصول توسعه پایدار از طریق رعایت همزیستی سه رکن رشد اقتصادی، تعادل زیست‌محیطی و پیشرفت اجتماعی است.

---

۱. همان

2. CDE, 2015.

همان‌طور که در بخش‌های قبل شرح داده شد، میزان مصرف آب در کارخانه‌های مختلف دارای ارقام و اعداد متغیری است و به پارامترهای متعددی وابسته است. مقادیر مصرف آب که در بخش قبل برای مواد معدنی مختلف بیان شد می‌تواند به خودی خود جزء شرایط استاندارد برای تحلیلگران در کشور قرار گیرد. در ادامه شرایط استاندارد مصرف آب در معادن و صنایع معدنی بر اساس مطالعات انجام گرفته توسط آقای کومی[1] در جدول ۵ آمده است که می‌تواند به نوبه خود به تحلیلگران و تصمیم‌گیران در این عرصه کمک کند.

جدول ۵. استانداردهای مصرف آب در معادن و صنایع معدنی[2]

ردیف	فعالیت معدنی	میزان مصرف آب	واحد	آب بازیافتی (درصد)
۱	اکتشاف - حفاری	۸-۲۰	لیتر بر متر گمانه	ناچیز
۲	استخراج معادن	۰-۱۰	درصد از آب کل مصرفی در خط تولید	---
۳	خردایش و آسیاب	۲-۲/۸	مترمکعب بر تن محصول	۸۰-۱۰۰
۴	سرند تر	۰/۱-۱	مترمکعب بر تن ورودی	۹۸-۱۰۰
۵	خردایش سنگ سخت	۱/۵-۲	مترمکعب بر تن ورودی	۸۰-۱۰۰
۶	جداکننده مغناطیسی تر	۱/۵-۲	مترمکعب بر تن ورودی	۸۰-۱۰۰
۷	جدایش ثقلی تر	۱/۵-۲	مترمکعب بر تن ورودی	۸۰-۱۰۰
۸	تغلیظ مس	۱/۱	مترمکعب بر تن ورودی	۸۰
۹	فلوتاسیون مس	۱/۵-۳	مترمکعب بر تن ورودی	۸۰
۱۰	هیدرومتالورژی مس	۰/۳	مترمکعب بر تن ورودی	۸۰
۱۱	زغال‌شویی	۱	مترمکعب بر تن محصول	۸۰
۱۲	کنسانتره و ککسازی	۳/۵	مترمکعب بر تن محصول	۸۰
۱۳	فلوتاسیون سنگ آهن	۳/۸	مترمکعب بر تن ورودی	۸۰-۹۵
۱۴	سنگ ساختمانی (فراوری و استخراج)	۰/۱	مترمکعب بر تن ورودی	۵۰
۱۵	شن و ماسه (ماسه‌شویی)	۱	مترمکعب بر تن ورودی	۹۰

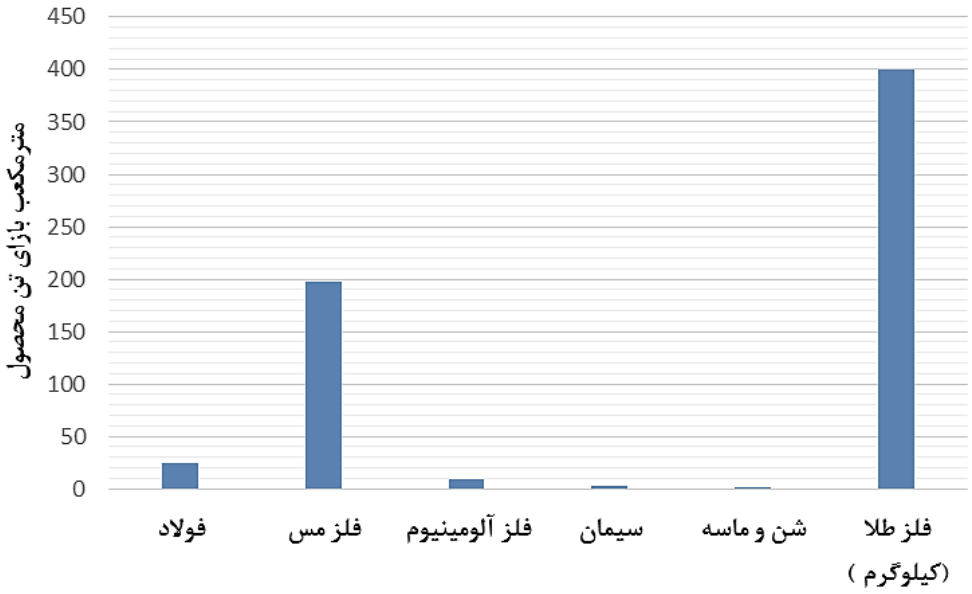
بر اساس اطلاعات ارائه شده در جدول ۵ و همچنین شکل‌ها و جداول بخش‌های قبل، میزان مصرف آب در صنایع مختلف معدنی ذکر شد. لذا بررسی این جداول امکان مقایسه عملکرد کارخانجات و صنایع معدنی کشور با استانداردهای جهانی فراهم می‌شود. در صورت بالا بودن مصرف آب باید اقدامات لازم برای مدیریت منابع و اصلاح الگوی مصرف انجام شود. در این میان مقوله بازیافت آب از این منظر اهمیت دارد که درصد استفاده از آب تازه و اضافه شدن آن به مدار تولید محصولات معدنی را کاهش خواهد داد.

1. J. G. Koomey, 1995.

۲. همان.

نمودار ۱۰ مقایسه‌ای بین میزان مصرف آب به ازای تولید هر تن محصول فلزی مختلف را بر اساس آنچه اشاره شد نشان می‌دهد. شایان ذکر است که در مورد فلز طلا واحد اندازه‌گیری کیلوگرم لحاظ شده است.

نمودار ۱۰. میزان مصرف آب به ازای هر تن محصول فلزی مختلف



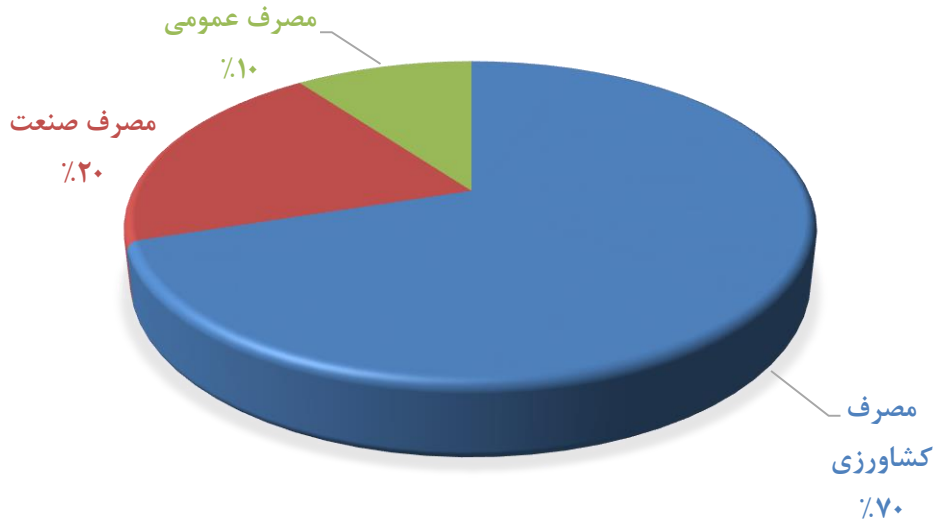
همان طور که مشاهده می‌شود بیش‌ترین مصرف آب مربوط به تولید فلز طلاست و فلز مس در رتبه دوم قرار دارد.

۲. بررسی کمّی‌وکیفی استفاده از منابع آب در بخش معدن و صنایع معدنی ایران

۲-۱. مصارف آب در دنیا

بر اساس آمار جهانی، متوسط مصرف آب در جهان شامل حدود ۷۰ درصد در بخش کشاورزی، ۲۰ درصد در صنایع و انرژی و بقیه مصارف عمومی است و سهم معدن حدود ۰/۲ درصد دیده شده است. ۳۳ کشور در جهان با بحران آب روبه‌رو هستند که ۱۴ کشور در خاورمیانه قرار دارند در حالی که با افزایش رشد جمعیت و توسعه شهرها و زیرساخت‌ها برای محصولات فلزی، افزایش تقاضا در بازار وجود خواهد داشت و به دنبال آن نیز افزایش مصرف و تقاضای آب مطرح می‌شود و ایران نیز جزء کشورهایی است که با بحران جدی آب روبه‌رو است.

نمودار ۱۱. سهم حوزه‌های مختلف در مصرف آب در دنیا



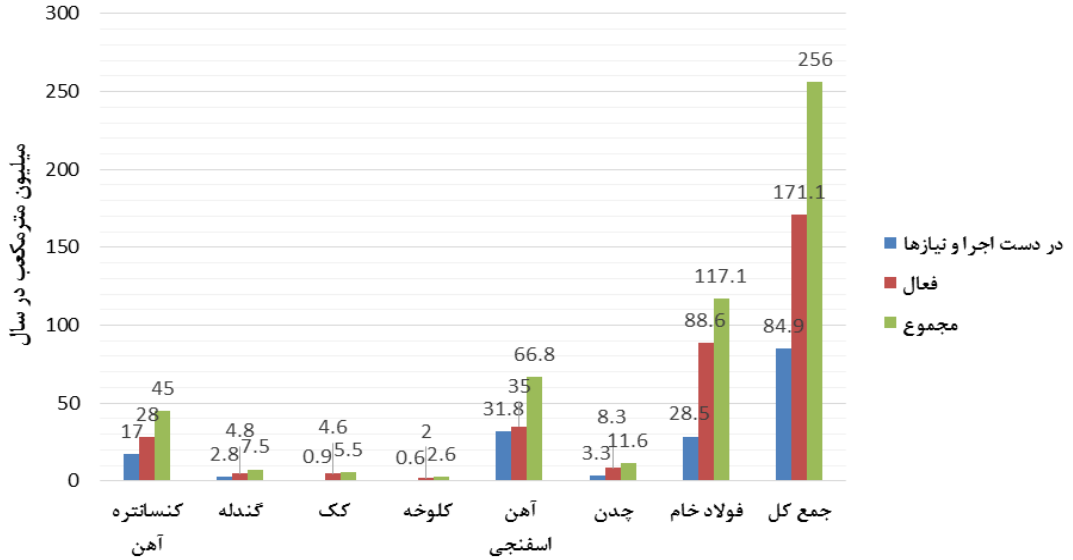
۲-۲. کمّیت مصرف آب در صنایع معدنی کشور

۲-۲-۱. زنجیره فولاد

بر اساس چشم‌انداز افق ۱۴۰۴ که برای تولید برخی محصولات همچون فولاد برنامه‌ریزی شده است، نیاز مبرم به مواد اولیه و آب وجود دارد و این در حالی است که کشور با کمبود آب روبه‌روست. در حال حاضر و با توجه به آمارهای موجود، ظرفیت تولید کنسانتره حدود ۵۰ میلیون تن، گندله حدود ۴۷/۵ میلیون تن، آهن اسفنجی حدود ۳۰ میلیون تن و فولاد حدود ۳۲ میلیون تن است که این ظرفیت‌ها برای سال ۱۴۰۴ برای کنسانتره به حدود ۸۶ میلیون تن، برای گندله ۸۰ میلیون تن، برای آهن اسفنجی به ۵۲ میلیون تن و برای فولاد به ۵۵ میلیون تن برسد.

بر اساس گزارش طرح جامع مطالعات زنجیره فولاد کشور، نمودار ۱۲ میزان آب مصرفی در واحدهای فعال تولیدی زنجیره فولاد در سال ۱۳۹۶ و آب مورد نیاز جهت تحقق ۵۵ میلیون تن فولاد خام در سال ۱۴۰۴ را نشان می‌دهد. به منظور تحقق چشم‌انداز ۲۰ ساله در افق ۱۴۰۴ برای تولید ۵۵ میلیون تن فولاد خام، سالیانه ۲۵۷ میلیون مترمکعب آب نیاز است که حدود ۱/۵ برابر مقدار آب مصرفی فعلی است. کل نیاز آبی طرح‌های محتمل، در دست اجرا و تکمیل زنجیره ۸۵ میلیون مترمکعب در سال است. واحدهای در نظر گرفته شده در این طرح به دو بخش استان‌های مجاور دریای جنوب و غیرمجاور آن تقسیم شده‌اند. استان‌های مجاور دریای جنوب را خوزستان، بوشهر، هرمزگان، سیستان و بلوچستان تشکیل داده‌اند که بالغ بر ۱۴ میلیون مترمکعب در سال (۱۷درصد) مصرف دارند. این در حالی است که مصرف استان‌های غیرمجاور در حدود ۷۱ میلیون مترمکعب (۸۳درصد) است. برای مثال، در حال حاضر مصرف آب کارخانه ذوب آهن اصفهان، شامل کارخانه و پالایشگاه قطران و دیگر شرکت‌های واقع در مجموعه، به طور متوسط ۶۰ هزار مترمکعب در شبانه‌روز است.

نمودار ۱۲. میزان آب مصرفی در واحدهای فعال تولیدی زنجیره فولاد در سال ۱۳۹۶ و آب مورد نیاز جهت تحقق ۵۵ میلیون تن فولاد خام در سال ۱۴۰۴[۱]



جدول ۶ میزان مصرف آب در کارخانه فولاد مبارکه اصفهان در بخش‌های مختلف از جمله گندله‌سازی، آهن اسفنجی، فولاد خام و محصولات فولادی را بین سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۶ نشان می‌دهد.

جدول ۶. میزان مصرف آب در فولاد مبارکه اصفهان در بخش‌های مختلف بین سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۶ (مترمکعب به ازای تن محصول تولیدی)[۲]

سال	گندله‌سازی		آهن اسفنجی		فولاد خام		محصولات فولادی	
	تولید (میلیون تن)	مصرف آب	تولید (میلیون تن)	مصرف آب	تولید (میلیون تن)	مصرف آب	تولید (میلیون تن)	مصرف آب
۱۳۹۲	۷/۱۴۱	۰/۳۶	۶/۵	۱/۷۶	۵/۴	۱/۶۶	۵/۱۵	۰/۳
۱۳۹۳	۷/۲	۰/۰۹	۶/۵	۱/۴	۵/۴۸	۱/۵۱	۵/۲۵	۰/۲۷
۱۳۹۴	۷/۴۵	۰/۰۶	۶/۲۸	۱/۴۳	۵/۱۹۱	۱/۳۲	۴/۸۵	۰/۳
۱۳۹۵	۷/۳	۰/۰۶	۷/۴۹	۱/۵	۵/۶۵	۱/۲۵	۴/۹۸	۰/۲۵
۱۳۹۶	۷/۳	۰/۰۵	۷/۳۲	۱/۲۵	۶/۴۶	۱/۲۴	۵/۲۳	۰/۳

همان‌طور که مشاهده می‌شود، بیش‌ترین میزان مصرف آب در بخش‌های تولید آهن اسفنجی و تولید فولاد خام است، لذا باید با مدیریت صحیح در این بخش‌ها الگوهای مناسبی ارائه شود. شایان ذکر است که آمارها نشان می‌دهد که میزان مصرف آب به ازای تولید هر تن گندله، آهن اسفنجی و فولاد خام تولیدی از سال ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۶ کاهش داشته است.

۱. طرح مطالعات جامع فولاد کشور ،سال۱۳۹۶
۲. آمار شرکت فولاد مبارکه اصفهان

۲-۲-۲. طلای موته

جدول ۷ میزان مصرف آب در مجتمع طلای موته طی سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۶ را بر اساس استعلام از این مجتمع نشان می‌دهد.

جدول ۷. میزان مصرف آب سالیانه در مجتمع طلای موته طی سال‌های ۱۳۹۲ تا ۱۳۹۶[1]

سال	میزان خاک فراوری شده در سال (تن)	میزان مصرف آب سالیانه (مترمکعب)	مصرف آب به ازای هر تن خاک فراوری شده (مترمکعب بر تن)
۱۳۹۲	۲۲۳,۲۸۵	۲۳,۴۹۳	۱/۱
۱۳۹۳	۲۱۹,۵۹۷	۳۲,۹۴۰	۱/۵
۱۳۹۴	۲۲۰,۸۴۷	۳۳,۱۲۷	۱/۵
۱۳۹۵	۲۳۴,۰۱۰	۳۵,۱۰۲	۱/۵
۱۳۹۶	۲۳۴,۴۳۰	۳۵,۱۶۵	۱/۵

همان‌طور که مشاهده شد مصرف آب به ازای هر تن خاک ورودی برای استحصال طلا در بین سال‌های مختلف رقم یکسان ۱/۵ مترمکعب به ازای خاک ورودی را نشان داد. با فرض عیار متوسط ۱ گرم بر تن طلا در خاک ورودی مشاهده می‌شود که در حدود ۲۰۰ کیلوگرم در سال طلا تولید خواهد شد. لذا به طور متوسط مصرف آب به ازای تولید هر کیلوگرم طلا در سال برابر ۱۵۰۰ مترمکعب است. شایان ذکر است در حال حاضر حدود ۱۰ درصد از آب مصرفی در کارخانه بازچرخانی شده و دوباره در چرخه مصرف فرایند کارخانه قرار می‌گیرد. از مهم‌ترین اقدامات انجام شده در زمینه اصلاح الگوی مصرف و کاهش مصرف آب در این مجتمع که هم اکنون در دست اقدام است، ساخت مدار آبگیری کارخانه و سیستم تیکنر و فیلتر است که پس از آن در حدود ۸۵ درصد آب بازیابی خواهد شد.

۳-۲-۲. مس سرچشمه

جدول ۸ میزان مصرف آب در سه بخش تولیدی تغلیظ، لیچینگ و پالایشگاه را به ازای محصول تولیدی آن بین سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ نشان می‌دهد.

۱. آمار مجتمع طلای موته

جدول ۸. میزان مصرف آب در مجتمع مس سرچشمه در سال‌های ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷[۱]

سال	واحد تغلیظ (مترمکعب به ازای تن محصول)	واحد لیچینگ (مترمکعب به ازای تن محصول)	پالایشگاه (مترمکعب به ازای تن محصول)
۱۳۹۳	۱۵/۵	۱۷/۸۴	۱/۸۵
۱۳۹۴	۱۵/۴۳	۱۳/۲۳	۱/۸۰
۱۳۹۵	۱۵/۳۷	۱۳/۱۰	۲/۴۳
۱۳۹۶	۱۵/۳۶	۱۲/۱۴	۲/۱۳
۱۳۹۷	۱۳/۹۲	۱۲/۶۸	۱/۶۴

میزان مصرف آب در سه بخش ذکر شده از سال ۱۳۹۳ تا ۱۳۹۷ روند کاهشی داشته است و این کاهش در سال ۱۳۹۷ چشمگیرتر بوده است.

۴-۲-۲. مقایسه مصرف آب در معادن و صنایع معدنی ایران با استانداردهای جهانی

نمودار ۱۳ میزان مصرف آب برخی صنایع معدنی مهم کشور را با دنیا مقایسه کرده است.

نمودار ۱۳. میزان مصرف آب در کشور و مقایسه آن با دنیا در صنایع معدنی عمده کشور

(مترمکعب آب مصرفی به ازای تن محصول- مترمکعب بر کیلوگرم طلا)

همان‌طور که مشاهده شد در بخش کارخانجات فولاد خام و گندله نیاز است تا تدابیر لازم جهت صرفه‌جویی و یا مدیریت منابع آب صورت گیرد. مصرف آب در کارخانجات تغلیظ و لیچینگ مس به استانداردهای جهانی نزدیک شده است. اقدامات جامع انجام شده جهت مدیریت منابع آب در مجتمع مس

۱. آمار مجتمع مس سرچشمه – شرکت ملي صنايع مس ايران

سرچشمه شامل مشارکت با شرکت‌های معدنی و سرمایه‌گذاری در طرح ملی انتقال آب خلیج فارس به صنایع جنوب شرق کشور با هزینه بیش از ۶,۴۷۰ میلیارد تومان برای فاز اول بوده است. احداث تصفیه‌خانه بند انحرافی و تصفیه‌خانه شهر مس از اقدامات صورت گرفته است که نتایج زیر را به دنبال داشته است:

- ورود سالیانه ۶/۵ میلیون مترمکعب آب خام به سیستم،
- کاهش استخراج آب از منابع آب زیرزمینی،
- جلوگیری از انتقال آب به پایین دست و بازگشت مجدد آن،
- افزایش بهره‌وری،
- تصفیه آب و کاهش آلاینده‌های آن و جلوگیری از انتشار آلودگی به پایین‌دست

ساخت سد آبی یکی دیگر از اقدام‌های اصلاحی انجام شده است که مزایای زیر را دارد:

- ذخیره‌سازی و جلوگیری از ورود سالیانه ۳ میلیون مترمکعب آب به دریاچه سد رسوبگیر،
- کاهش میزان تبخیر و افزایش بهره‌وری آب و انرژی،
- افزایش ضریب پایداری سد رسوبگیر.

در خصوص واحدهای تولید طلا، مصرف آب در ایران تقریباً پنج برابر مصرف جهانی است و باید اقدامات لازم برای رفع این چالش انجام شود. شایان ذکر است که در حال حاضر طرح بازیافت آب در مجموعه طلای موته در حال انجام است که بر اساس اظهارات مدیران اجرایی مجموعه موته، پس از آغاز طرح، امکان بازیابی بیش از ۸۵ درصد از آب مصرفی وجود خواهد داشت، این در حالی است که در حال حاضر تنها ۱۰ درصد از آب مصرفی به مدار بازگردانده می‌شود. در ادامه ضمن بررسی نمونه‌های موفق مدیریت آب در دنیا، به فناوری‌هایی که در این خصوص مورد استفاده قرار می‌گیرند اشاره خواهد شد.

۳. نمونه‌هایی از مدیریت موفق منابع آب در بخش معادن و صنایع معدنی دنیا

در این بخش به طور مختصر چند نمونه از طرح‌های موفق در زمینه بازیافت آب و استفاده از آن در بخش معادن و صنایع معدنی در کشورهای مختلف اشاره شده است[1]. این موارد عبارتند از:

- معادن مس و طلا در کشور شیلی
- معادن مس و مولیبدن در کشور پرو
- معدن الماس شرکت ریوتینتو در استرالیا
- معدن زغال‌سنگ واقع در غرب استرالیا
- کارخانه فراوری اورانیم نامیبیا

1. ICMM, 2012.

۱-۳. معادن شیلی

معادن مس و طلای مینرا اسپرانزا[1]در ۱۸۰ کیلومتری شهر آنتوفاگاستا[2] در کشور شیلی قرار دارد. انتظار می‌رود در ۱۰سال اول بهره‌برداری از این معادن، حدود ۱۹۰ هزار تن کنسانتره مس و ۲۳۰ هزار اونس طلا تولید شود. عمر این معدن حدود ۱۵ تا ۲۰ سال تخمین زده شده است. این معدن در یکی از خشک‌ترین مناطق کویری در دنیا قرار داشته و سالیانه ۲۰ میلیون مترمکعب آب نیاز دارد که مشکل تأمین آب این طرح با انتقال آب از دریا برطرف شده است. در این طرح، خط انتقال آب دریا از اقیانوس آرام به طول ۱۴۵ کیلومتر به محل کارخانه انجام شده و از آب دریا به عنوان آب فرایندی استفاده شده است. در ابتدای خط انتقال آب، تجهیزات فیلتراسیون برای جلوگیری از ورود مواد جامد به خط لوله تعبیه شده و با استفاده از افزودن برخی مواد شیمیایی از خوردگی لوله‌های انتقال آب جلوگیری می‌شود و در طول مسیر ۴ ایستگاه پمپاژ با قدرت ۲۰ مگاوات تعبیه شده است. در این واحد معدنی بیش‌ترین مصرف آب مربوط به کارخانه تغلیظ مس است که حجمی بالغ بر ۶۳۰ لیتر بر ثانیه آب نیاز دارد. نیاز بخشی از کارخانه به آب سالم نیز توسط ایستگاه تصفیه آب واقع در این واحد به روش اسمز معکوس تامین می‌شود که بالغ بر ۸ درصد حجم آب انتقالی است.

شکل ۳. پروژه انتقال آب دریا به کارخانه فراوری مس در یک معدن مس در شیلی

1. Minera Esperanza
2. Antofagasta

۲-۳. معادن پرو

عملیات احداث کارخانه آب شرب و بازیافت آب از فاضلاب در معدن مس و مولیبدن واقع در ۲۰ مایلی جنوب غربی شهر آریکویپا[1] در کشور پرو انجام شده است. این منطقه به دلیل خشکسالی و داشتن آب و هوای گرم دارای بحران تأمین آب لازم برای صنایع خود است. دولت برای تأمین آب شرب مردم منطقه و جلوگیری از ورود پساب به محیط‌زیست، اقدام به تأسیس دو واحد به منظور تأمین آب شرب و تصفیه فاضلاب کرد. این واحد قادر است که فاضلاب مناطق مسکونی و صنعتی را تصفیه کرده و با نرخ یک مترمکعب بر ثانیه به کارخانه و معدن ارسال کند. در مورد فرایند و روش تصفیه آب اطلاعات خاصی وجود ندارد؛ ولی می‌توان عنوان کرد که این پروژه یکی از موفق‌ترین پروژه‌های استفاده از فرایندهای بازیافت آب در معادن است.

شکل ۴. احداث کارخانه تصفیه فاضلاب برای تأمین آب کارخانه فراوری مس- مولیبدن در کشور پرو

۳-۳. بازیابی آب در معدن الماس استرالیا

بازیابی آب در معدن الماس آرجایل شرکت ریوتینتو در استرالیا یکی دیگر از نمونه‌های مدیریت منابع آب در معادن است. این معدن یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان الماس در جهان است. این شرکت به منظور انجام عملیات معدنکاری در سال ۲۰۰۵ میلادی ناچار به مصرف ۳۵۰۰ میلیون لیتر از آب دریاچه آرجایل بود و این در حالی است که دریاچه آرجایل در فهرست تالاب‌های حفاظت‌شده قرار داشت. بدین منظور برای مدیریت مصرف آب، مقدار آبی که در مرحله شستشوی الماس مصرف می‌شد دوباره در طبیعت

1. Arequipa

رهاسازی نشد و به واحد تصفیه لجن ارسال شد. این شرکت پس از مطالعه و ارزیابی اقتصادی توانست ۴۰ درصد از آب مورد استفاده را مجدداً در عملیات معدنی استفاده کند. با پیاده‌سازی این روش از سال ۲۰۰۵ میلادی به بعد، این معدن توانست ۹۵ درصد مصرف آب از منابع دریاچه مذکور را کاهش دهد.

۳-۴. معادن زغال‌سنگ منطقه غرب استرالیا

یکی دیگر از نمونه‌های بازیافت آب، معدن زغال‌سنگ واقع در غرب استرالیاست. شکل زیر شماتیک سیستم بازیابی آب در این معدن را نشان می‌دهد. آب بازیافتی توسط این تجهیزات قابلیت استفاده به عنوان آب شستشو و همچنین آبی که با پاشیدن آن مانع از گرد و غبار در محیط شود را دارد. تجهیزات بازیافت آب شامل سیکلون‌ها و جداکننده‌های مواد روغنی، سیستم فیلتراسیون، کنترل‌کننده‌های کلر و پی‌اچ و مخزن آب است.

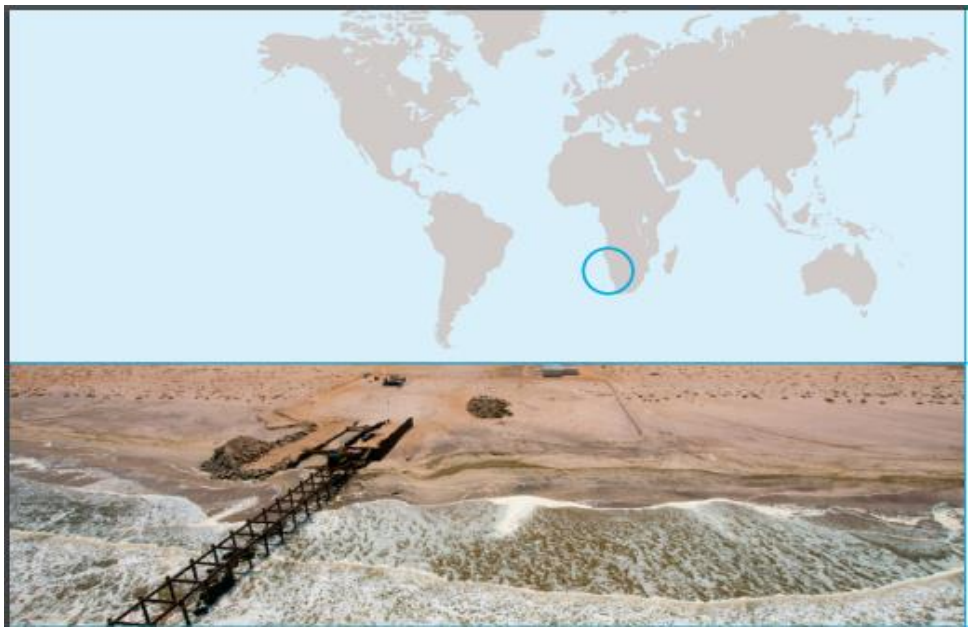
شکل ۵. شماتیک سیستم بازیافت آب در یک معدن زغال‌سنگ واقع در غرب استرالیا

۳-۵. واحد فراوری اورانیم نامیبیا

استفاده از آب دریا به عنوان تأمین‌کننده آب فعالیت‌های معدنی در کارخانه فراوری اورانیم نامیبیا نیز انجام شده است (شکل ۶). این معدن در ۶۵ کیلومتری شمال اسواکوپموند[1] در غرب کشور نامیبیا قرار دارد. عمر این معدن حدود ۱۲ سال پیش‌بینی شده است. مقدار آبی که برای انجام عملیات استخراج و فراوری و فرایندهای خردایش و حل‌سازی انباشته‌ای مصرف می‌شود، حدود ۱۴ میلیون مترمکعب در سال است. در آغاز این طرح آب مصرفی واحد، از آبخوان‌های موجود در اطراف معدن تأمین شد، اما به دلیل چالش‌های ایجاد شده و در راستای مدیریت بهینه منابع آب، دولت تصمیم به احداث کارخانه‌های آب شیرین‌کن برای شیرین کردن آب دریا گرفت.

1. Swakopmund

شکل ۶. پروژه انتقال آب دریا به یک واحد فراوری اورانیم در کشور نامیبیا



۶-۳. فناوری‌های مورد استفاده برای مدیریت و بازیافت منابع آب در معادن و صنایع معدنی

مطالعات مختلف نشان داده است که همواره در زنجیره محصولات معدنی که شامل محصولات بالادستی در معادن تا محصولات پایین‌دستی در کارخانجات است، آب فرایندی استفاده خواهد شد. آب مورد استفاده در این فرایندها اغلب به صورت فیزیکی آلوده می‌شود و لذا می‌توان با تمهیداتی ابتدا از هدررفت آب جلوگیری کرد و در ادامه به بازیافت و بازگرداندن آب به چرخه تولید کمک کرد. برخی از راه‌حل‌ها بر این نکته تأکید می‌کنند که به جای آب از ماده دیگری در صنایع معدنی استفاده شود، ولی باید مد نظر داشت که تقریباً هیچ ماده‌ای در دنیا ویژگی‌های آب را ندارد و به اندازه آب مقرون به صرفه نیست، لذا می‌توان نتیجه گرفت که فرضیه جایگزینی آب با ماده یا ترکیبی دیگر عملاً غیرممکن است. فرضیه دوم تولید آب با ویژگی‌های موجود است که این پدیده هم بسیار هزینه‌بر بوده و در حال حاضر امکانپذیر نیست. فرضیه سوم بازیافت آب است که به عنوان مناسب‌ترین گزینه در حال حاضر در دنیا مطرح شده است. فرضیه آخر نیز استفاده از آب دریا در صنایع معدنی است که امروزه جای بحث بسیاری دارد. لذا به طور خلاصه مهم‌ترین گزینه‌های پیشنهادی برای مدیریت منابع آب در صنایع معدنی را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

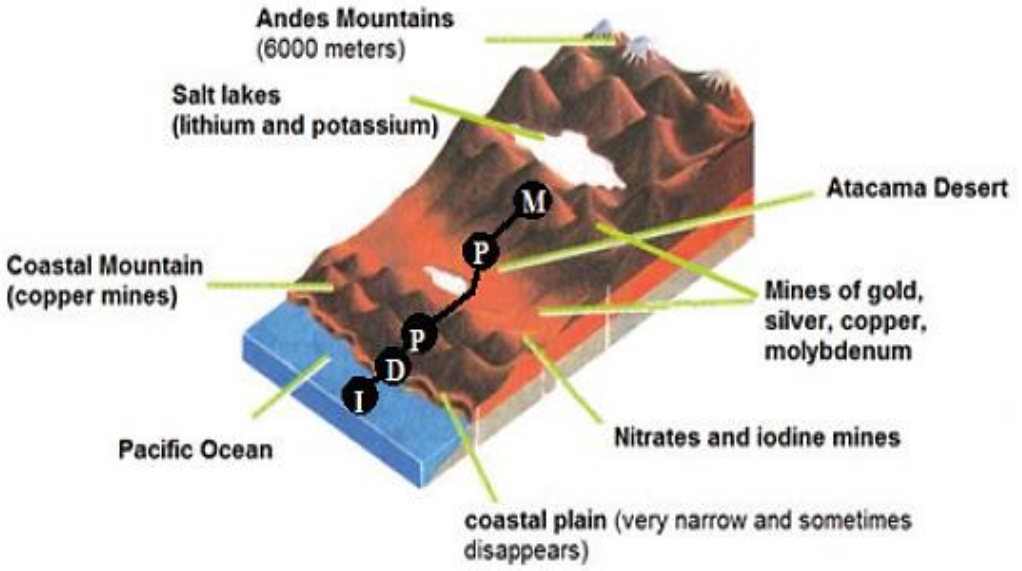
۱. استفاده از ماده جایگزین به جای آب (تقریباً غیرممکن)
۲. تولید آب با ویژگی‌های موجود (پرهزینه و تقریباً غیرممکن)
۳. بازیافت آب (مناسب‌ترین روش)
۴. استفاده از آب دریا (روش نو و پرکاربرد)

۱-۶-۳. استفاده از آب دریا در معادن و صنایع معدنی

در این بخش به اهمیت و نقش استفاده از آب دریا در معادن و صنایع معدنی با تمرکز بر طرح‌های عملیاتی شده در کشور شیلی به عنوان یکی از پیشتازان این عرصه اشاره خواهد شد[1]. شکل ۷، منطقه معدنی آنتوفاگاستا در کشور شیلی را نشان می‌دهد که مهم‌ترین ناحیه معدنی در این کشور است.

شکل ۷. منطقه معدنی آنتوفاگاستا در کشور شیلی

(تأمین آب:I، کارخانه آب شیرین کن:D، سیستم پمپاژ:P، معدن:M)

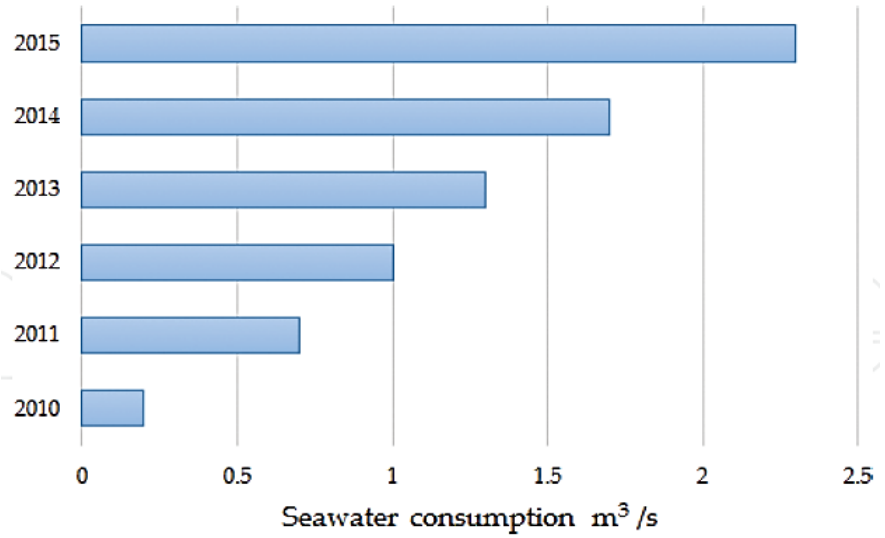


همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود، آب دریا در کارخانه‌های آب شیرین‌کن واقع در ناحیه D نمک‌زدایی شده و توسط واحدهای پمپاژ واقع در ناحیه P به معادن واقع در ناحیه M ارسال می‌شود. پس از عبور از ساحل دریا و سپس گذر از امتداد دشت، منطقه نسبتاً مرتفعی وجود دارد که حداقل ارتفاع آن از سطح دریا حدود ۸۰۰ متر است و معادن مس در آن منطقه قرار دارند. لذا برای انتقال آب به ارتفاعات ۲۰۰۰ متری بالاتر از سطح آب دریا نیاز به ایستگاه‌های پمپاژ بسیار قوی است.

مصرف آب‌های سطحی در این معادن بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۱۵ از ۵/۹ به ۵/۶ مترمکعب بر ثانیه کاهش داشته و در مقابل مصرف آب‌های زیرزمینی از ۶/۲ به ۶/۴ مترمکعب بر ثانیه افزایش داشته است. با این حال استفاده از آب دریا در همان بازه زمانی از ۱/۳ به ۲/۳ مترمکعب بر ثانیه افزایش داشته است. نمودار ۱۴ میزان مصرف آب دریا بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵ را در معادن شیلی نشان می‌دهد.

1. Galvez, 2017.

نمودار ۱۴. مصرف آب دریا در معادن شیلی بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۵



نمودار فوق نشان می‌دهد که میزان استفاده از آب دریا بین این سال‌ها همواره یک روند صعودی داشته است.

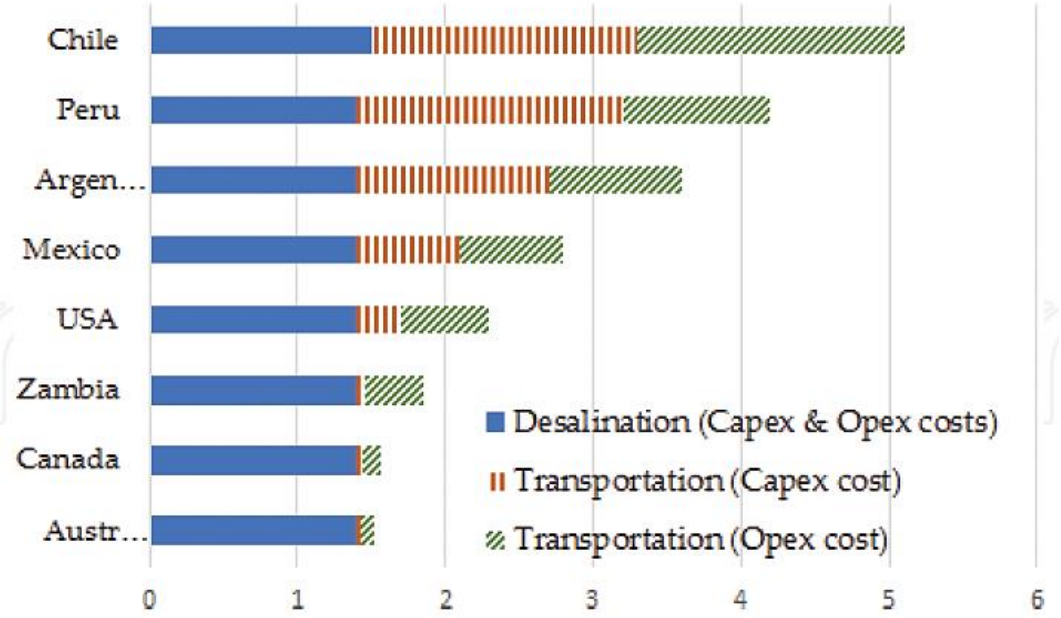
استفاده از آب دریا در صنایع معدنی به دلیل وجود برخی ترکیبات و املاح که در آن وجود دارد، دارای مزایا و معایبی است. از جمله معایب آن خوردگی تجهیزات معدنی به علت وجود یون کلرید در آب دریاست. در مقابل هزینه‌های شیرین کردن آب در این مراحل حذف خواهد شد. برای مثال در این منطقه تأمین انرژی برق توسط سوخت‌های فسیلی انجام می‌شود، لذا وقتی از ایستگاه‌های آب شیرین‌کن استفاده شود هم هزینه‌بر است و هم مخاطرات زیست‌محیطی را پدید می‌آورد[1]. روش اسمز معکوس که در این منطقه برای شیرین کردن آب استفاده می‌شود آبی تولید خواهد کرد که دو برابر آب دریا شوری دارد و این هم یکی از مخاطرات استفاده از آب شیرین‌کن است. به طور کل باید عنوان کرد که آب دریا و آب شیرین شده دریا هر دو در صنایع معدنی قابل استفاده هستند، ولی قبل از استفاده از آنها باید خصوصیات سنگ معدنی، نوع تجهیزات معدنی، هزینه‌های اجرایی و شرایط محیط زیست منطقه به طور کامل بررسی شود[2].

نمودار ۱۵ هزینه‌های سرمایه‌گذاری و اجرایی مربوط به شیرین‌سازی آب دریا و انتقال آن بر اساس واحد مترمکعب آب تولیدی در کشورهای مختلف را نشان می‌دهد.

1. Elimelech M, 2011.
2. Schorr M, 2011.

نمودار ۱۵. هزینه‌های مربوط به شیرین‌سازی آب دریا و انتقال آن

(دلار به ازای مترمکعب آب تولیدی)[1] سرمایه‌گذاری:Capex، اجرایی: Opex

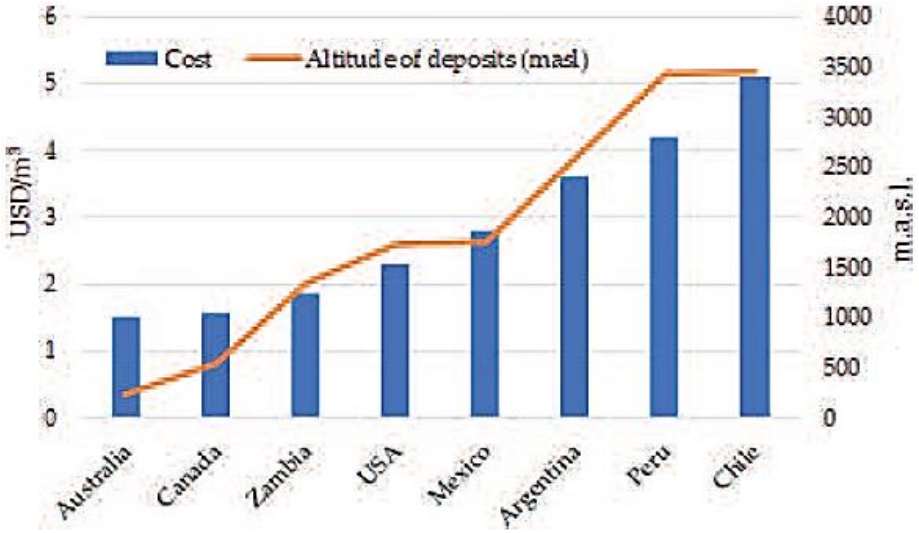


همان‌طور که مشاهده شد، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و اجرایی واحدهای آب شیرین‌کن در کشورهای مختلف نسبت یکسانی دارند و در حدود ۱/۵ دلار به ازای هر مترمکعب آب شیرین شده برآورد شده است. ولی در مقابل هزینه‌های سرمایه‌گذاری و اجرایی انتقال آب کاملاً متغیر است و در کشور شیلی از سایر کشورها بالاتر است. یکی از علت‌های اصلی آن ارتفاع نسبتاً بالای مناطق معدنی در کشور شیلی نسبت به سطح دریاست که باعث شده تا هزینه‌های انتقال آب افزایش یابد.

نمودار ۱۶ هزینه‌های سرمایه‌گذاری و انتقال آب شیرین بر اساس ارتفاع مناطق معدنی از سطح دریا را نشان می‌دهد.

1. Elimelech M, 2011.

نمودار ۱۶. هزینه‌های مربوط به شیرین‌سازی آب دریا و انتقال آن بر اساس ارتفاع مناطق معدنی (متر) از سطح دریا[1] (واحد: دلار به ازای مترمکعب آب تولیدی)



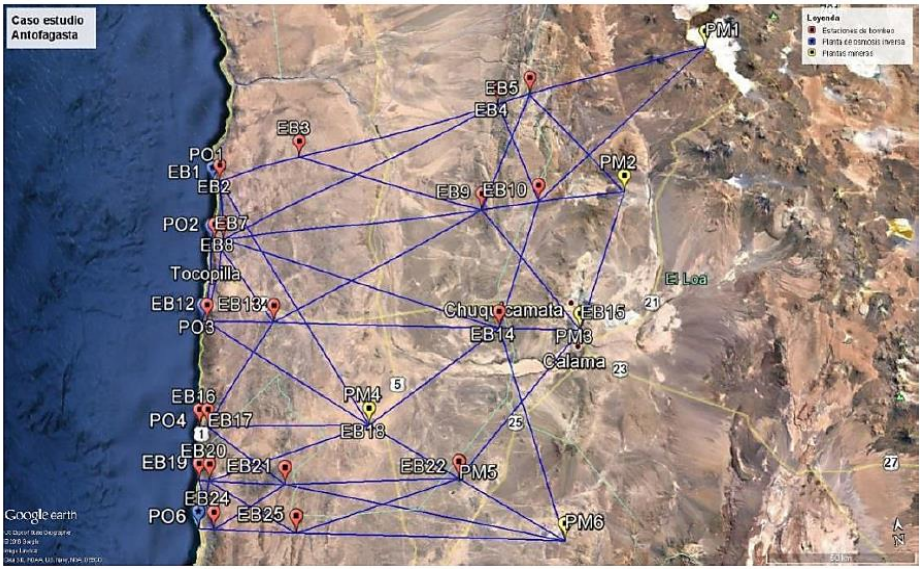
همان طور که مشاهده می‌شود، کانسارهای معدنی در کشور شیلی در ارتفاع بالاتری از سطح دریا قرار دارند که در ارتفاع متوسط ۳۵۰۰ متر واقع شده‌اند. مناطق معدنی در استرالیا در ارتفاع بالای ۵۰۰ متر از آب دریا قرار گرفته‌اند و این موضوع باعث شده است که هزینه‌های انتقال آب در کم‌ترین مقدار خود باشد، به عبارتی در استرالیا تنها هزینه‌های مربوط به کارخانه آب شیرین‌کن، عمده هزینه‌ها را به خود اختصاص داده است.

معادن واقع در منطقه آنتوفاگاستای شیلی که توسط سیستم ذکر شده آبرسانی می‌شوند بین چند کیلومتر تا ۲۰۰ کیلومتر از ساحل فاصله دارند. در حال حاضر حدود ۴۰ واحد معدنی در این منطقه فعال هستند که مهم‌ترین آنها در ارتفاع بین ۶۰۰ تا ۴۰۰۰ متر از سطح دریا قرار گرفته‌اند. مشکل اصلی در سیستم توزیع بدین صورت است که هر مجموعه معدنی به تنهایی و به صورت مجزا اقدام به احداث شبکه توزیع آب کرده است و لذا هیچ سیستم واحد و یکپارچه‌ای در این منطقه وجود ندارد. لذا با توجه به موقعیت توپوگرافی این منطقه اگر قرار باشد که هر مجموعه به صورت مجزا اقدام به تهیه آبِ شیرین از دریا نماید دچار چالش‌های زیادی خواهد شد. برای مثال شکل ۸ سیستم توزیع آب بین ۶ واحد معدنی واقع در این منطقه را نشان می‌دهد.

1. Elimelech M, 2011.

شکل ۸. سیستم توزیع آب بین شش واحد معدنی واقع در منطقه معدنی شیلی

(PO: کارخانه اسمز معکوس- PE: ایستگاه پمپاژ- PM: مجموعه معدنی)



سیستم توزیع آب در این منطقه به دلیل توپوگرافی ویژه آن دچار مشکلات فنی، اقتصادی و محیط زیستی از قبیل انرژی بالای مورد نیاز برای تأمین کارخانه‌های آب شیرین‌کن شده است. مطالعات[1] نشان داده است که در معادنی که ارتفاع آنها کم‌تر از ۱۰۰۰ متر از سطح دریاست، هزینه سرمایه‌گذاری کارخانه آب شیرین‌کن برابر با هزینه سرمایه‌گذاری سیستم پمپاژ و انتقال آب است، در مقابل اگر ارتفاع معادن از سطح آب دریا بیش از ۳۵۰۰ متر باشد هزینه‌های سرمایه‌گذاری انتقال آب در حدود ۲ تا ۵ برابر بیش‌تر از هزینه‌های سرمایه‌گذاری کارخانه آب شیرین‌کن است. جدول ۹ هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی ۶ مجموعه معدنی واقع در شمال شیلی را نشان می‌دهد.

جدول ۹. هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی ۶مجموعه معدنی واقع در شمال شیلی[2]

ظرفیت (لیتر بر ثانیه)	ارتفاع (متر)	هزینه سرمایه‌گذاری (میلیون دلار)		هزینه عملیاتی (میلیون دلار)	
		آب شیرین‌کن	انتقال	آب شیرین‌کن	انتقال
۱۰۰۰	۴۱۵۰	۲۶۴/۴	۴۲۸/۳	۲۲/۴	۶۵
۵۵۰	۴۴۰۰	۱۹۰/۸	۴۱۲/۴	۱۶/۸	۴۷/۵
۱۸۰	۸۳۰	۱۴۷/۲	۳۲۸/۷	۱۳/۲	۳۵/۹
۷۰۰	۳۶۵۰	۲۷/۹	۲۹/۱	۳/۲۴	۱/۶۸
۵۰۰	۵۰۰	۶۳/۴	۱۶۳/۴	۱۱/۶	۱۶/۹
۲۷۱	۴۱۰۰	۴۲/۸	۴۸/۹	۶/۶۸	۵/۱۶

1. Guerra P, 2009.
2. Ordoriez JI, 2013.

همان‌طور که مشاهده شد با افزایش ارتفاع و ظرفیت تولید، میزان سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی افزایش داشته است. در ادامه برای بهینه‌سازی سیستم توزیع آب در این ۶ واحد معدنی یک مدل طراحی و ارائه شد که در شکل ۹ مشاهده می‌شود.

شکل ۹. مدل سیستم توزیع آب بهینه شده بین شش واحد معدنی واقع در منطقه آنتوفاگاستای شیلی

(PO: کارخانه اسمز معکوس- PE: ایستگاه پمپاژ- PM: مجموعه معدنی)

همان طور که مشاهده می‌شود، در مدل اجرایی قبلی برای هر مجموعه معدنی یک واحد آب شیرین‌کن وجود داشت، ولی در این مدل تنها یک واحد آب شیرین‌کن با روش اسمز معکوس وجود دارد. ظرفیت آب تولیدی به روش اسمز معکوس در مدل جدید به مراتب بالاتر از ظرفیت کارخانه‌های پیشین است. نتایج نشان داد که به طور کلی درصد هزینه‌های هر بخش از مراحل این طرح به صورت جدول ۱۰ است.

جدول ۱۰. تفکیک هزینه‌های واحدهای مختلف در طرح بهینه‌سازی توزیع آب شش واحد معدنی در منطقه معدنی واقع در شیلی

ردیف	واحد	مقدار درصد از کل هزینه طرح
۱	کارخانه آب شیرین‌کن	۲۹-۳۲
۲	ایستگاه پمپاژ	۴۰-۵۲
۳	خطوط لوله	۲۰-۲۷

همان طور که مشاهده شد پرهزینه‌ترین بخش را واحد پمپاژ و کم‌هزینه‌ترین بخش را خطوط لوله آبرسانی تشکیل می‌دهند. در طرح بهینه مدار تولید جریان آب پس از اینکه در اولین معدن مصرف شد، بلافاصله به دو شاخه تقسیم می‌شود تا به معادن مورد نظر آبرسانی کند. با این‌کار تعداد ایستگاه‌های پمپاژ آب نسبت به حالت قبلی کاهش چشمگیری داشتند.

۱-۱-۶-۳. روش‌های نوین در طرح‌های آبرسانی

الف) بایوتکنولوژی در آب دریا

یکی از مشکلاتی که استفاده مستقیم از آب دریا در صنایع معدنی ایجاد می‌کند وجود املاحی مانند منیزیم و کلسیم در آب است. لذا منطقی به نظر می‌رسد که ابتدا از روش‌های انتخابی برای حذف این یون‌ها استفاده کرد. در عین حال این روش‌ها باید کاملاً دوستدار محیط زیست بوده و برتری قابل توجهی نسبت به روش اسمز معکوس داشته باشند. یکی از این روش‌ها استفاده از فرایند بایومینرالیزاسیون[1] یا میکروبیولوژی ترسیب کربنات است که در آن یون‌های کلسیم و منیزیم طی یک فرایند دوستدار محیط زیست و با هزینه اجرایی کم‌تر نسبت به اسمز معکوس به صورت کاملاً انتخابی از آب حذف خواهند شد. شایان ذکر است این روش در مرحله آزمایشگاهی انجام شده است و نیاز به تحقیقات و اطلاعات کامل‌تری برای پیاده‌سازی در مقیاس صنعتی دارد، لذا اطلاعات زیادی در مورد میزان سرمایه‌گذاری در این طرح وجود ندارد.

ب) نمک‌زدایی با استفاده از دی اکسید کربن (CO_2)

یکی دیگر از گزینه‌های حذف عناصر منیزیم و کلسیم از آب دریا استفاده از ترکیبات قلیایی همزمان با گاز دی اکسید کربن است. در این روش چنانچه دی اکسید کربن تولید شده از نیروگاه‌های تولید برق به روش حرارتی به جای رها شدن در اتمسفر به آب دریا تزریق شود، علاوه بر اینکه موجب تشکیل رسوبات بی‌کربنات و شیرین‌سازی آب شده، سبب جلوگیری از ورود گاز دی اکسیدکربن به اتمسفر و صدمات ناشی از گازهای گلخانه‌ای خواهد شد. توضیح فنی و ارزیابی اقتصادی این طرح جایگزین نیز تنها در مقیاس آزمایشگاهی انجام شده است و نیاز به تحقیقات کامل‌تری دارد.

ج) برخی مطالعات و پژوهش‌های انجام شده در کشور

در مطالعه‌ای[2] به بررسی اثر انجماد غیرمستقیم برای نمک‌زدایی از آب‌های شور پرداخته شده است. یافته‌های حاصل از بررسی نشان می‌دهد که با استفاده از دوبار فرایند انجماد می‌توان از آب‌هایی که کل میزان مواد جامد محلول آن[3] کم‌تر از ۱۹۰۰ میلی‌گرم بر لیتر است، به آب آشامیدنی دست یافت. گرچه با یک بار فرایند انجماد آب شرب حاصل نشده، اما خود این عمل باعث کاهش TDS تا ۸۰ درصد می‌شود که خود می‌تواند به عنوان یک روش پیش‌تصفیه برای دیگر سیستم‌ها مثل اسمز معکوس باشد.

---

1. Biomineralization

۲. علیمحمدی، ۱۳۹۲.

3. Total Dissolved Solids

در مطالعه‌ای[۱] دیگر به ارزیابی اقتصادی انرژی برق خورشیدی و برق فسیلی در یک واحد خانگی در مشهد و با استفاده از نرم‌افزار کامفار پرداخته شده است. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم در حال حاضر به طور کامل قابل رقابت با نیروگاه فسیلی نبوده، ولی در کاهش هزینه‌های پرداختی مصرف‌کننده مناسب است. با گذشت زمان و پیشرفت فناوری و از طرف دیگر گران‌تر شدن سوخت‌های فسیلی، تنها استفاده از منابع تجدیدپذیر توجیه اقتصادی دارد.

در یک مطالعه تحقیقاتی[۲] به ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی تولید انرژی از فاضلاب شهر کرمان پرداخته شده است. نتایج نشان داد که از بین سناریوهای تولید انرژی از بیوگاز بررسی شده، سناریوی فروش برق تولیدی به لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر بوده و از بین سناریوهای جمعیتی، سناریوی جمعیتی ۱۰۰ درصد به جهت تولید بیش‌تر و صرفه نسبت به مقیاس، کارایی بیش‌تری داشته است.

در مقاله‌ای دیگر با عنوان نمک‌زدایی خورشیدی راه‌حلی پایدار برای بحران آب در ایران با بررسی موقعیت جغرافیایی ایران، وضعیت فعلی و چالش‌های کمبود آب و همچنین بررسی انرژی‌های نو در ایران نتیجه شده است که استفاده از انرژی خورشیدی مناسب‌ترین فناوری برای رهبری بخش اقتصادی ایران به سمت ثبات باشد به دلیل اینکه کشور از فراوانی تابش خورشیدی برخوردار است و در نتیجه به تازگی شروع به استفاده از انرژی خورشیدی کرده است. برای تغییر به سمت مقرون به‌صرفه‌ترین و سودمندترین پروژه‌های خورشیدی، شناسایی اولویت‌های موقعیت و محل از نظر دریافت تابش خورشیدی یک موضوع بسیار حیاتی برای انرژی است که باید در نظر گرفته شود.

د) برخی مطالعات و پژوهش‌های بین‌المللی

تیان و همکاران در مطالعه‌ای[۳] به آنالیز مقدماتی اقتصادی برای یک سیستم نمک‌زدایی هسته‌ای با استفاده از یک رآکتور مخزنی عمیق زیرزمینی و در واحد نمک‌زدایی چندتأثیره[۴] و با نرم‌افزار دیپ در چین پرداختند. نتایج نشان داد که رآکتور دارای قابلیت ایمنی بالایی است و نمک‌زدایی در دمای ۷۰ درجه سانتیگراد برای بخار در نظر گرفته شده است که نتایج خوبی حاصل شده و حاکی از تجاری بودن نمک‌زدایی هسته‌ای به عنوان راه‌حل نهایی برای کمبود آب شیرین در مناطق با کمبود آب است.

فورست می یر و همکاران به مطالعه امکان‌سنجی در آب شیرین‌کن‌های بادی با دو روش اسمز معکوس و فشرده‌سازی مکانیکی بخار پرداختند و نتایج حاصل نشان داد که آب شیرین‌کن بادی می‌تواند با دیگر سیستم‌های آب شیرین‌کن برای تأمین آب شیرین و سالم به طور مؤثر و سازگار با محیط زیست رقابت کند. هزینه‌های تولید آب شیرین با استفاده از انرژی بادی به خصوص در مناطقی با منابع خوب انرژی بادی با سیستم‌های نمک‌زدایی معمولی رقابت می‌کند.

---

۱ . قزلباش، ۱۳۹۲.
۲ . زاده، ۱۳۹۳.

3. Jiafu Tian, 2004.
4. Multi Effect Distillation

هلال و همکاران یک مطالعه[1] فنی اقتصادی به منظور امکان‌سنجی اقتصادی از سه طرح جایگزین واحد نمک‌زدایی برای مناطق دورافتاده ابوظبی داشتند. نتایج نشان داد که طرح جایگزین تماماً خورشیدی بدون انرژی کمکی رقابتی است، البته می‌توان هزینه‌های این طرح را با ایجاد مشوق‌هایی برای استفاده از پنل‌های خورشیدی مثل کاهش بهره سرمایه، معافیت از مالیات و کاهش در هزینه زمین، کاهش داد. آل کاراق اویلی و همکاران در ارزیابی فنی و اقتصادی سیستم‌های نمک‌زدایی[2] با محور فتوولتاییک، برق مورد نیاز، هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای و هزینه‌های تولید آب شیرین سیستم‌های مختلف را ارزیابی کردند. نتایج نشان‌دهنده آن است که در حال حاضر سیستم‌های آب شیرین‌کن با مقیاس کوچک در مناطق دورافتاده بدون دسترسی به شبکه برق که در آن کمبود آب یک مشکل عمده است و تابش بالایی دارند مناسب است، اما در مقیاس بزرگ مشکل فنی مثل هزینه‌های سرمایه‌گذاری بالا وجود دارد و نیاز به واحد تحقیق و توسعه قوی برای نصب و راه‌اندازی سیستم‌هاست.

بویچاویی و همکاران در مطالعه‌ای[3] تحت عنوان جنبه‌های ایمنی اقتصادی در نمک‌زدایی هسته‌ای به ارزیابی اقتصادی رآکتور هسته‌ای و سیستم‌های نمک‌زدایی در الجزایر پرداخت. به نظر می‌رسد که آب شیرین‌کن مبتنی بر سوخت رآکتور هسته‌ای راه‌حل بسیار رقابتی نسبت به سیستم‌های مبتنی بر انرژی فسیلی است. بنابراین آب شیرین‌کن هسته‌ای می‌تواند یک راه‌حل جایگزین در مناطق ساحلی باشد و نیازهای خانگی، صنعتی و گاهی اوقات نیازهای آب کشاورزی این مناطق را تأمین کند. داک و همکاران نیز در مطالعه[4] خود به آنالیز اقتصادی و مقایسه فناوری‌های مختلف آب شیرین‌کن پرداختند. هزینه طرح آب شیرین‌کن با در نظرگرفتن قیمت کربن افزایش می‌یابد در این صورت اسمز معکوس دارای کم‌ترین هزینه و از نظر اقتصادی بهترین فناوری است. زمانی که انرژی حرارتی وجود دارد. فناوری غشای تقطیری[5] کم‌ترین هزینه مواد و نیاز کم‌تری به برق دارد و همچنین هنگام تغذیه با بخار روش MSF گران‌ترین، فناوری غشای تقطیری و تقطیر چند تأثیره[6] مشابه یکدیگر و اسمز معکوس از لحاظ اقتصادی مناسب‌ترین است.

۲-۶-۳. بازیافت آب در معادن و صنایع معدنی

در سال‌های اخیر به دلیل توجه فزاینده به مسئله کمبود آب، محدودیت‌های زیست‌محیطی، مدیریت سدهای باطله و موارد دیگر، سرعت پیشرفت فرایندهای آبگیری چشمگیر بوده است. نمود این امر را می‌توان در ساخت دستگاه‌های فیلتراسیون و پارچه‌های جدید و یا تولید مواد شیمیایی مشاهده کرد که امر آبگیری را بهبود می‌بخشند. عموماً بازیافت آب در صنایع معدنی به سه روش زیر صورت می‌پذیرد:

1. Helal, 2008.
2. Al-Karaghouli, 2010.
3. Bouaichaoui, 2012.
4. Kesieme, 2013.
5. Membrane Distillation
6. Multi Effect Distillation

۱. ته‌نشین کردن[1]

۲. فیلتر کردن[2]

۳. خشک‌کردن حرارتی[3]

در شرایطی که اختلاف چگالی کانی مورد نظر و آب زیاد باشد، روش ته‌نشین کردن دارای بهترین بازدهی است و عموماً بعد از این مرحله، درصد جامد پالپ به ۵۵ تا ۶۰ درصد (بسته به بازدهی عملیات) می‌رسد. در مرحله بعدی معمولاً برای سهولت در امر جابه‌جایی کنسانتره به‌دست آمده، یک مرحله فیلتراسیون انجام شده و درصد رطوبت به ۱۰ تا ۲۵ درصد می‌رسد. در صورت لزوم و امکانپذیر بودن، با انجام یک مرحله خشک‌کردن حرارتی، درصد رطوبت به ۵ درصد یا کم‌تر می‌رسد.

طی سال‌ها تولیدکنندگان، انواع مختلفی از تجهیزات جداسازی جامد - مایع را گسترش داده‌اند که متناسب با خصوصیات ماده معدنی از قبیل دانه‌بندی، رطوبت و نوع ماده معدنی مورد استفاده طراحی می‌شوند. این تجهیزات دارای انواع متنوعی هستند که برخی از آنها عبارتند از: تیکنرها[4]، کلاریفایرها[5]، هیدروسیکلون‌ها، فیلترها و غیره.

به طور کلی هدف اساسی در هر فرایند جدایش جامد - مایع، تولید یک مایع شفاف و تولید یک جامد کاملاً شسته شده و آبگیری شده است. پالپ‌های رقیق به نوعی پیش‌تصفیه قبل از آبگیری نهایی نیاز دارند و پالپ‌های غلیظ مستقیماً وارد دستگاه‌های آبگیری نهایی (فیلتر) می‌شوند. برای دسته‌بندی فرایندها و تجهیزات جدایش جامد - مایع از دو روش اصلی استفاده شده است:

۱. فیلتراسیون که در آن مخلوط جامد - مایع به سمت یک «واسط[6]» (سرند، کاغذ، پارچه بافته‌شده و غشا) هدایت می‌شود. در این فرایند فاز مایع یا جریان فیلتر شده از واسط عبور کرده و بخش جامد روی آن و یا درون واسط باقی می‌ماند.

۲. جداسازی به وسیله ته‌نشین کردن (نیروی جاذبه و مواد شیمیایی) یا میدان نیرو (سانتریفیوژ) که در این حالت از تفاوت در وزن مخصوص فاز جامد و مایع استفاده می‌شود.

واضح است که برای بهبود عملیات معمولی در یک فرایند اعم از:

۱. افزایش درصد جامد خوراک اولیه،

۲. انجام عملیات پیش‌تصفیه برای افزایش تفاوت در خصوصیات فازهای موجود،

۳. جداسازی جامد،

۴. آبگیری و شستشو به ترکیبی از تجهیزات و تکنیک‌های موجود نیاز است.

---

1. Sedimentation
2. Filtration
3. Thermal Drying
4. Thickeners
5. Clarifiers
6. Medium

بهینه‌سازی کامل این فرایند در صنعت اگر غیرممکن نباشد، امری بسیار وقت‌گیر و هزینه‌بر است. یکی از موارد مهم در تعیین چگونگی بازیافت آب صنایع معدنی نوع و کیفیت آب از لحاظ املاح و مواد موجود در آن است. شایان ذکر است که آب معادن مختلف کاملاً با هم متفاوت هستند، ولی به طور مثال آب آلوده که از معدنکاری زیرزمینی پدید می‌آید دارای خصوصیات زیر است:

- جامد حل شده (۵۰۰ تا ۲۰۰۰ میلیگرم بر لیتر)
- سختی بالا (۵۰۰ تا ۲۰۰۰ میلیگرم بر لیتر به عنوان کربنات کلسیم)
- اکسیژن محلول مصرف شده توسط میکروارگانیسم‌ها در اکسیداسیون بیوشیمیایی مواد آلی (۵ میلیگرم بر لیتر)
- میزان اکسیژن موجود (۱۰ تا ۱۰۰ میلیگرم بر لیتر)
- پی‌اچ نزدیک به خنثی (۷ تا ۹/۵)
- رسانش بالا (۶۰۰ تا ۱۰۰۰۰ میکروثانیه بر سانتیمتر)

همچنین می‌توان کیفیت آب حاصل از فرایندهای صنایع معدنی و فراوری مواد معدنی را به شرح ذیل اعلام کرد:

- سوسپانسیون با جامد بالا (۵۰۰ تا ۲۰۰۰ میلیگرم بر لیتر)
- پی‌اچ نزدیک به خنثی (۷ تا ۹/۵)
- متوسط جامد حل شده (۱۰۰ تا ۵۰۰ میلیگرم بر لیتر به عنوان کربنات کلسیم)

۱-۲-۶-۳. روش فیلتراسیون

فیلتراسیون فرایند جدایش و حذف ذرات جامد، میکروارگانیسم‌ها و یا ناخالصی‌ها از مایع یا گاز با به دام انداختن آنها در یک واسطه فیلتر[1] بوده که نسبت به فاز سیال مخلوط مورد جدایش، نفوذپذیر است. ذرات جداشده بر سطح واسطه فیلتر و یا داخل آن انباشته می‌شود. گذر فاز مایع از واسط در فیلترها به گرادیان فشار بستگی دارد. در تمامی انواع فرایندهای فیلتراسیون، جداسازی فازها به صورت کامل انجام نمی‌شود؛ فاز مایع به ذرات جامد چسبیده (رطوبت باقی‌مانده در کیک) و مایع فیلترشده همواره حاوی مقادیری از ذرات جامد است. به علت کم هزینه بودن، ظرفیت بالا و آسانی کار با تیکنرها معمولاً از آنها برای عملیات آبگیری در کارخانه‌های فراوری استفاده می‌شود؛ اما گاهی اوقات به دلایلی از قبیل ته‌نشین نشدن ذرات به علت اختلاف کم چگالی ذرات جامد و آب، نیاز به محصولی با رطوبت کم‌تر و محدودیت در بحث اندازه سد باطله، به جای تیکنر و یا در کنار آن از سیستم فیلتراسیون استفاده می‌شود.

هدف از فیلتراسیون ممکن است تصفیه فاز مایع و یا بازیابی فاز جامد و یا هر دو باشد. در بحث تصفیه، فاز مایع جداشده عموماً یک محصول ارزشمند بوده و فاز جامد بخش کم‌تر را تشکیل می‌دهند

1. Filter Medium or Septum

و معمولاً بدون انجام عملیات دوباره، دور ریخته می‌شوند. ولی اگر نیاز به بازیابی فاز جامد باشد، بعد از جداسازی باید مجدداً شسته، آبگیری و خشک شود. فیلتراسیون را می‌توان بر اساس شرایط متفاوت به گروه‌های مختلفی تقسیم کرد:

- **محل انباشت ذرات**

- ذرات می‌توانند بر سطح خارجی واسطه فیلتر (فیلتراسیون سطحی[۱]، فیلتراسیون کیکی[۲]) و یا داخل واسطه فیلتر (فیلتراسیون عمقی[۳]، فیلتراسیون در عمق بستر[۴]) انباشته شوند.

- **اختلاف فشار**

- فیلتراسیون فشاری[۵]، فیلتراسیون خلأ[۶]، فیلتراسیون گرانشی[۷] و فیلتراسیون سانتریفوژی[۸]

- **وضعیت عملیاتی**

- ناپیوسته، پیوسته، نیمه‌پیوسته، فیلتراسیون پویا[۹] و فیلتراسیون ایستا[۱۰]. در بحث فیلتراسیون پویا، در طول فرایند با فعال شدن یک مکانیسم خودکار، مبادرت به کم کردن ضخامت کیک فیتلرشده می‌کند. شناخته‌شده‌ترین نوع فیلتراسیون پویا، فیلتراسیون جریان متقابل[۱۱] است.

- **کاربرد**

- برای مثال تصفیه آب

فیلتراسیون توسط اعمال فشارهای متفاوت که می‌تواند به وسیله سیال تحت فشار، یک پمپ خلأ، نیروی گرانش و یا نیروی گریز از مرکز باشد، تأثیر پذیرد. فیلتراسیون فشاری عموماً به یک پمپ برای انتقال سوسپانسیون به فیلتر نیاز دارد. فیلتراسیون خلأ نیاز به یک پمپ خلأ دارد. این پمپ، فاز گازی را در مخزن مخصوص سیال فیلتر شده از سیال جدا می‌کند. در بعضی از موارد، فاز مایع اجازه دارد توسط نیروی گرانش، از میان واسطه فیلتر عبور کند (فیلتراسیون گرانشی). در فیلتراسیون سانتریفوژی، فرایند فیلتراسیون از طریق روتورهای سوراخ‌دار سانتریفوژی صورت می‌پذیرد.

در فیلترهای خلأ به راحتی می‌توان به کیک دسترسی داشت. این امر تخلیه خودکار کیک را سرعت می‌بخشد. با این حال، فیلترهای خلأ در شرایطی که دمای فاز مایع بالا یا حلال‌ها با فشار بخار زیاد باشد کارایی ندارد. تفاوت میان میزان خلأ ایجاد شده در بین انواع مختلف فیلترهای خلأ محدود بوده و رطوبت

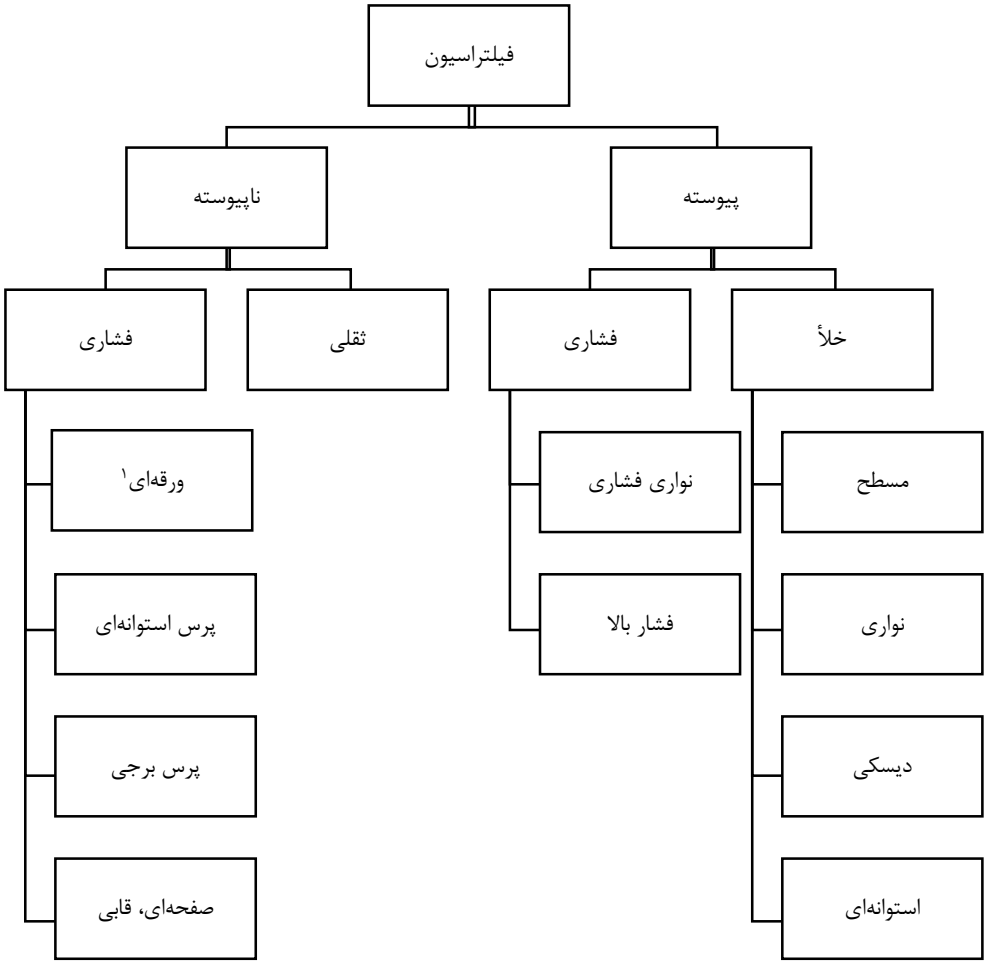
1. Surface Filtration
2. Cake Filtration
3. Depth Filtration
4. Deep Bed Filtration
5. Pressure Filtration
6. Vacuum Filtration,
7. Gravity Filtration
8. Centrifugal Filtration
9. Dynamic Filtration
10. Dynamic Static
11. Cross-flow Filtration

نهایی کیک نیز بالاتر از فیلترهای فشاری است. فیلتراسیون فشاری امکان اعمال گستره زیادی از فشارهای مختلف را به کاربر می‌دهد. از این نوع روش بیش‌تر در مواقعی استفاده می‌شود که نیاز است که محصول به‌دست آمده با توجه به ملاحظات ایمنی در محیط بسته باشد و نیاز درصد رطوبت نهایی از اهمیت بیش‌تری برخوردار است. به وضوح در این روش مدیریت کیک فیلتر شده سخت‌تر خواهد بود. فیلتراسیون سانتریفوژی به تجهیزات پیچیده مکانیکی زیادی احتیاج دارد، اما در نتیجه، جامد با درصد رطوبت پایین‌تری در اختیار قرار می‌دهد.

طی فرایند فیلتراسیون پویا، ذرات جامد حاصل‌شده روی واسطه فیلتر به طور مداوم در حال زدوده شدن هستند که معمولاً این عمل از طریق یک جریان مماسی که از روی واسطه فیلتر عبور می‌کند انجام می‌شود(فیلتراسیون جریان متقابل). فیلتراسیون جریان متقابل یک فرایند استاندارد بوده که از غشأها به عنوان واسطه فیلتر استفاده می‌کند. جریان موازی با واسطه فیلتر، ضخامت کیک تشکیل‌شده را به صورت مدام کاهش و یا در سطح معینی نگه می‌دارد. در نتیجه امکان داشتن یک جریان فیلتر شده به صورت نیمه‌پیوسته برای یک مدت زمان طولانی وجود دارد.

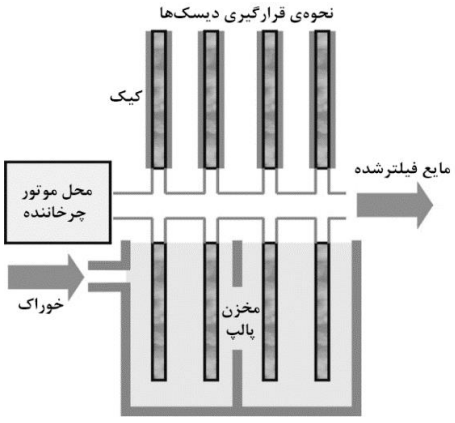
فیلتر از سطح متخلخلی تشکیل شده است که منافذ آن برای عبور مایع مناسب بوده، ولی از عبور دانه‌های جامد جلوگیری می‌کند. عبور مایع از سطح فیلتر در اثر ایجاد اختلاف فشار در دو طرف آن انجام می‌شود (در سیستم‌های جدید فیلتراسیون، نیازی به استفاده از اختلاف فشار نبوده و با استفاده از امواج مکانیکی فرایند فیلتراسیون انجام می‌گیرد). مواد به صورت پالپ از سمتی که فشار بیش‌تر است با این سطح در تماس قرار می‌گیرند. در نهایت آب موجود در پالپ از منافذ این سطوح عبور کرده و دانه‌های جامد به صورت کیک بر روی آن باقی می‌مانند. اختلاف فشار ممکن است صرفاً ناشی از وزن پالپ موجود بر سطح فیلتر، ایجاد فشار اضافی بر سطح فیلتر، کاهش فشار در سمت دیگر فیلتر و نیروی گریز از مرکز باشد. شکل ۱۰ به طور کلی طبقه‌بندی انواع فیلترها در صنایع معدنی را نشان می‌دهد.

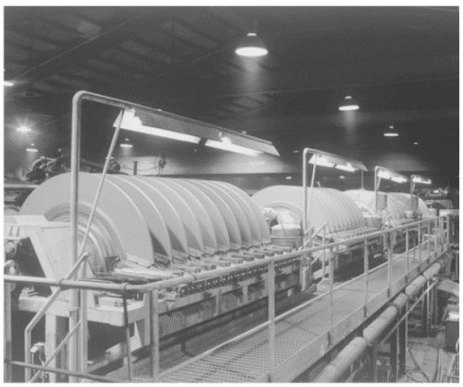
شکل ۱۰. طبقه‌بندی انواع فیلترها در صنایع معدنی



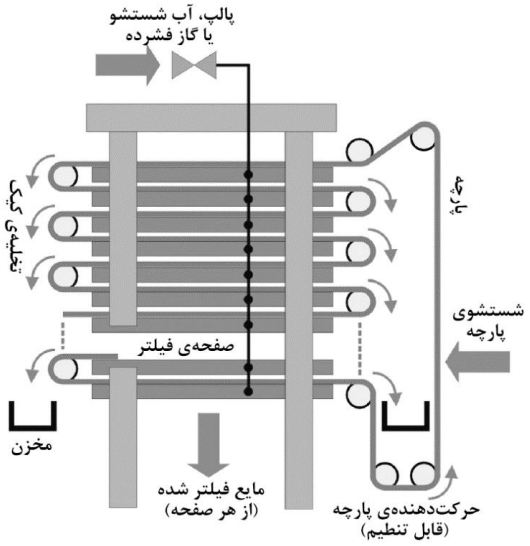
شکل‌های زیر نمونه‌هایی از فیلترهای مورد استفاده در صنعت را نشان می‌دهند.

شکل ۱۱. فیلتر دیسکی سرامیکی نصب‌شده در یک کارخانه فراوری (راست)، نمای شماتیک از فیلتر خلأ دیسکی (چپ)





شکل ۱۲. نمای شماتیک از یک فیلتر دیافراگمی عمودی فشاری (چپ)، فیلتر نصب شده در واحد فراوری مواد معدنی (راست)



با استفاده از روش فیلتراسیون در حذف آب از باطله‌ها می‌توان از مزایای زیر بهره برد:

۱. بازیافت بخش اعظم آب مصرفی در طول عملیات فراوری برای استفاده مجدد از آن؛

۲. حمل‌ونقل آسان باطله‌ها بعد از فیلتراسیون به محل سد باطله؛

۳. کاهش هزینه انتقال به دلیل حذف پمپ‌های انتقال پالپ و جایگزینی آنها با نوار نقاله یا کامیون‌ها؛

۴. کاهش حجم سد باطله؛

۵. کاهش ریسک خطرات زیست‌محیطی ناشی از سدهای باطله؛

۶. برداشت کم‌تر آب از منابع زیرزمینی؛

۲-۲-۶-۳. روش‌های استفاده از تیکنر

تیکنر کردن یک روش جدید نیست و به طور قطع در آمریکا کشف نشده است. هر زمان که مردم به تغلیظ کانسنگ پرداخته‌اند از دو فرایند جداناپذیر خردایش و شستشو استفاده کرده‌اند. مدارکی از آثار باستانی مصر مربوط به سلسله چهارم (حدود ۲۵۰۰ سال قبل از میلاد مسیح) از طلا شستشو شده موجود است. همچنین مدارکی از شستشوی طلا در سلسله دوازدهم در سودان نیز موجود است. با این حال از منابع نوشته شده مربوط به خردایش و شستشو در مصر می‌توان به اثر یک جغرافی‌دان یونانی که حدود ۲۰۰ سال قبل از مسیح زندگی می‌کرده است به نام آقاتارچیدز[1] اشاره کرد. آردیلون[2] در کتابی به نام «Les mines du Laurion dans l’antiquité» به تشریح فرایندهای استفاده شده

1. Agatharchides
2. Ardillon

در تأسیسات بزرگ خردایش و شستشو در یونان بین قرن‌های پنجم و سوم قبل از میلاد مسیح پرداخته است. ویلسون[1] به تشریح معدنکاری مس و طلا در اطراف دریای مدیترانه از زمان سقوط سلسله مصر تا قرون وسطی و رنسانس پرداخته است.

مدارکی از این منابع مربوط به استفاده از فرایندهای شستشو و الک کردن از یونان و مصر کهن تا قرون وسطی آلمان و کورنیشمن[2] که به تأثیر نیروی گرانش ویژه برای ترکیبات متفاوت یک کانسنگ و ته‌نشینی استفاده شده در عملیات پی برد. جدیداً به عنوان طبقه‌بندی، شفاف‌سازی و تیکنر کردن شناخته می‌شود. همچنین مدارک موجود در سال‌های اخیر از عدم تفاوت بین این سه عملیات حکایت دارد.

هازارد[3] اولین شخصی بود که در سال ۱۹۰۴ به تحلیل ته‌نشینی ذرات در سوسپانسیون رقیق پرداخت. وی نشان داد که برای طراحی تانک‌های ته‌نشینی، زمان توقف پارامتر مؤثری نیست، ولی جامد حذف‌شده با سطح تانک متناسب است و نسبت معکوسی با نرخ جریان موجود در تانک دارد.

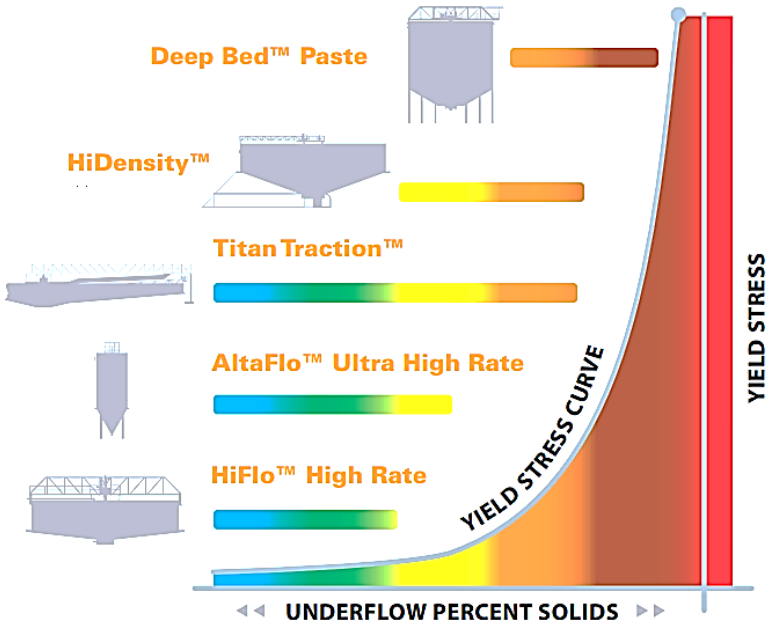
اختراع تیکنر دور[4] در سال ۱۹۰۵ یک نقطه شروع برای تولید تیکنرهای پیشرفته شد. با این کار آبگیری پیوسته پالپ رقیق امکانپذیر شد که باعث تولید پالپ غلیظ شده با غلظت یکسان و سرریزی با محلول شفاف می‌شد. تیغه‌های خراشنده یا پاروها با یک مکانیسم مناسب هدایت شده و به‌آرامی در ته تانک می‌چرخید که معمولاً باعث ایجاد یک شیبی به سمت مرکز می‌شد که باعث حرکت مواد با همان سرعت ته‌نشینی بدون اغتشاشی که با ته‌نشینی تداخل داشته باشد.

ته‌ریز تیکنرهای نرخ بالا به صورت دوغاب بوده و دارای حداقل تنش تسلیم است. در صورتی که ته‌ریز تیکنرهای خمیری به صورت جامدهای با غلظت بالا و در یک محدوده تنش تسلیم به‌کار می‌روند. مواد موجود در این محدوده از تنش می‌تواند در سیستم‌های پشته‌سازی و پرکردن سطح مفید باشد. به این ترتیب برای محلول‌های با تنش کم از واژه تیکنر کردن باطله و برای محلول‌های با تنش تسلیم بالاتر از واژه خمیر استفاده می‌شود. تنش تسلیم تابعی از غلظت جامد ته‌ریز برای تیکنرهای مختلف است که در نمودار ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود تیکنرهای نرخ بالا دارای کم‌ترین غلظت جامد ته‌ریز و کم‌ترین تنش تسلیم هستند در حالی که تیکنرهای خمیری دارای بیش‌ترین میزان غلظت ته‌ریز و تنش تسلیم هستند.

1. Wilson
2. Cornishmen
3. Hazard
4. Dorr

نمودار ۱۷. تنش تسلیم تابعی از غلظت ته‌ریز برای تیکنرهای مختلف

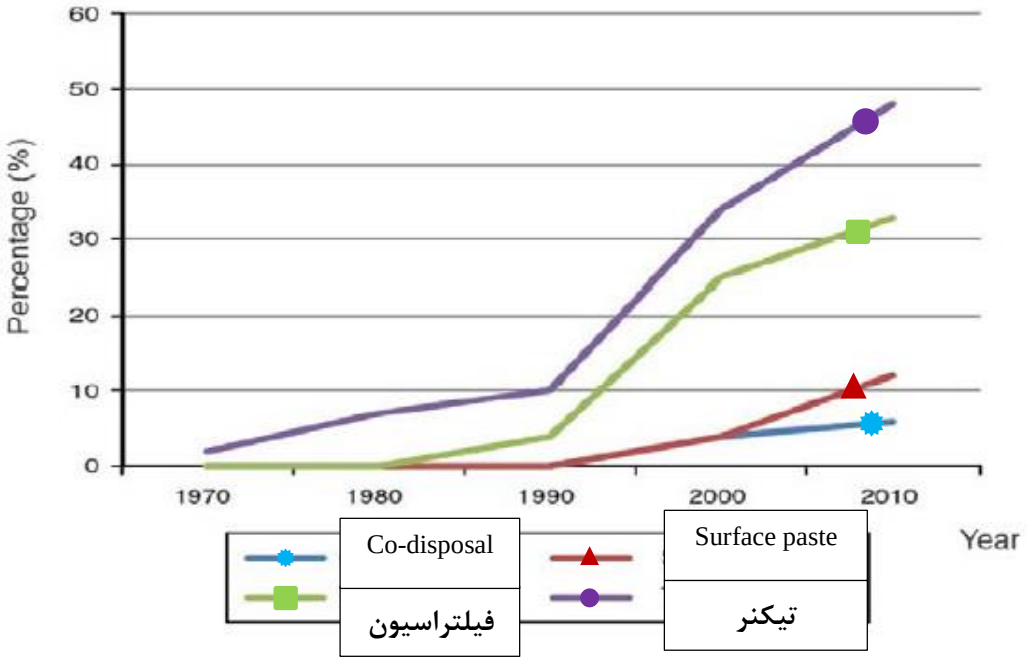
(HIGH RATE: نرخ بالا- Rakeless Ultra : فوق نرخ بالا- Traction: کششی- High Density: چگالی بالا- Deep Cone: عمق زیاد)



شکل فوق عملکرد انواع تیکنرها را نسبت به میزان درصد جامدی که تولید می‌کند نشان می‌دهد. به عبارتی چنانچه یک تیکنر محصول با درصد جامد بالاتری تولید کند توانسته است که مقدار آب بیش‌تری را بازیابی کند.

تیکنرهای Deep Cone باطله با درصد جامد بالاتری تولید می‌کنند لذا مقدار آب بیش‌تری را بازیافت و به چرخه تولید باز می‌گردانند. در مقابل تیکنرهای با نرخ بالا (High rate) باطله با درصد جامد کم‌تری تولید می‌کنند. در شکل بالا رنگ آبی نشان درصد جامد کم‌تر و رنگ قرمز بیانگر درصد جامد بیش‌تر است. نمودار زیر روند تغییرات جهانی در استفاده از روش‌های مختلف آبگیری و فیلتراسیون باطله‌های معدنی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود در سال ۲۰۱۰ حدود ۳۵ درصد فرایندهای صنعتی آبگیری از تکنولوژی فیلتراسیون باطله‌ها جهت آبگیری مؤثرتر ذرات و بازیابی مناسب آب بهره‌گیری کرده‌اند. همچنین مشاهده شد که بیش‌ترین اقبال صنعتگران در آبگیری مربوط به صنایع معدنی به حوزه تیکنر برمی‌گردد.

نمودار ۱۸. روند تغییرات جهانی در استفاده از روش‌های مختلف آبگیری و فیلتراسیون باطله‌های معدنی



۳-۶-۳. بررسی آخرین پژوهش‌ها و دستاوردهای فناورانه بازیافت آب در بخش معدن و صنایع معدنی

۱-۳-۶-۳. الکترو باکتری

محققان اروپایی در اسپانیا مشغول آزمایش روی این موضوع هستند که چگونه می‌توان با استفاده از الکتروباکتری روش‌هایی برای تصفیه آب صنعتی پیدا کرد که با محیط زیست سازگار باشد. باکتری‌هایی را که ضمن تجزیه مواد آلی زائد الکتریسیته تولید می‌کنند، می‌توان در تصفیه آب صنعتی به‌کار برد. الکتروباکتری‌ها وقتی از محیط خارج شود، قادرند آب را ۱۰ برابر سریع‌تر از معمول تصفیه کنند. به همین دلیل هم محل تصفیه آب به جای شن با موادی پر شده است که هادی جریان الکتریسیته هستند.

در این روش پساب‌های صنعتی وارد سیستم می‌شود. به هیچ منبع خارجی برای تأمین انرژی نیاز نیست. الکتروباکتری‌هایی که می‌توانند الکتریسیته تولید کنند وارد واکنش با این مواد می‌شوند. این باکتری‌ها سطح مواد هادی الکتریسیته را می‌پوشانند. این مواد مانند یک تکیه‌گاه فیزیکی عمل کرده و همزمان باعث تسریع فرایند متابولیک پالایش آب می‌شود. نتیجه، آب کاملاً پالایش شده‌ای است که بدون مصرف انرژی به‌دست می‌آید. فاضلاب صنعتی پس از خروج از مخزن سپتیک، از فیلترهای گیاهی عبور داده می‌شود که می‌تواند تا ۲۵هزار لیتر آب مناسب برای بازگشت به فرایند در روز تولید کند. اولین سیستم‌هایی از این نوع در اسپانیا، مکزیک، آرژانتین و دانمارک در حال ساخت است. شایان ذکر است که این روش در کشور ایران تا به حال بررسی نشده است.

استفاده از این فناوری تنها منحصر به یک کشور خاص نمی‌شود و می‌توان آن را در سراسر جهان به کار برد. همان‌طور که ثابت شده است این روش در مناطقی که آب و هوای سرد دارند بدون هیچ

مشکلی کار می‌کند. محققان این طرح اروپایی در دانمارک بر روی مواد مختلف رسانای الکتریسیته کار می‌کنند که هم جریان الکتریسیته را به خوبی از خود عبور دهد و هم ارزانقیمت باشد. ماده‌ای که در این روش به‌کار برده می‌شود پسماند نفتی است. باکتری‌های الکتریکی به سطح آن می‌چسبد. این ماده یک رساناست، در نتیجه جریان الکتریسیته در سطح آن به تجزیه و شکستن مواد آلی کمک می‌کند. محققان با کمک الکترودهای شیشه‌ای جریان برق تولید شده را اندازه‌گیری می‌کنند. آنها هم‌چنین نمونه‌های مختلفی از آب پالایش شده را بررسی می‌کنند تا ببینند آب تا چه میزان پاک شده است.

همان طور که ذکر شد این طرح در کشور انجام نشده است اما باید خاطر نشان کرد که امکان و قابلیت اجرایی شدن این طرح در کشور وجود دارد، زیرا همواره استفاده از باکتری‌ها در هضم فلزات مختلف معدنی در مقیاس آزمایشگاهی در کشور انجام شده است و با صرف هزینه‌های زمانی و مالی می‌توان به این تکنولوژی دست یافت. از آنجایی که یکی از کاربردهای این باکتری‌ها حذف فلزات سنگین است، لذا در تمام معادن و کارخانجاتی که در پسآب‌های خود فلزات سنگین از قبیل سرب، جیوه، کادمیم، نیکل و ... دارند کاربرد دارد.

۲-۳-۶-۳. الکتروکئوگولاسیون

یک روش نوین دیگر برای تصفیه آب صنعتی تبدیل فاضلاب‌های صنعتی با روش الکتروکئوگولاسیون به آب غیر قابل شرب است که قادر است دوباره به چرخه تولید بازگردد. الکتروکئوگولاسیون روش جدیدی است که با ترکیب چند فرایند در یک راکتور، با راندمان بالا می‌تواند برای تصفیه فاضلاب‌های صنعتی و معدنی به‌کار رود. به دلیل اینکه فاضلاب‌های صنعتی به روش‌های معمولی قابل تصفیه نیستند، از روش الکتروکئوگولاسیون که دارای سه فرایند است به تصفیه فاضلاب صنعتی کارخانجات می‌پردازند. این روش با جریان برق با دو الکترود و یون آلومینیم انجام می‌گیرد که به دلیل وجود الکترودهای آهن و آلومینیم در سیستم تصفیه‌کننده، فرایند انعقاد و لخته‌سازی فاضلاب رخ می‌دهد و فاضلاب ته‌نشین می‌شود که با ته‌نشین شدن مواد سنگین و با تجزیه فاضلاب، گازهای هیدروژن و اکسیژن تولید و سبب شناورسازی و حذف آلاینده‌ها از فاضلاب می‌شود. در مرحله بعد به دلیل تولید انواع اکساینده‌ها در فرایند تصفیه، ترکیبات کلر، رادیکال هیدروکسیل، پراکسید هیدروژن و ازن از ترکیب پراکسید هیدروژن و ازن فرایند اکسیداسیون پیشرفته تشکیل می‌شود و بعد از آن گندزدایی فاضلاب انجام می‌شود. بعد از این روش‌های تصفیه فاضلاب، آب غیر قابل شربی به‌وجود می‌آید که می‌توان از آن برای مصارف مختلف استفاده کرد. راندمان بالای تصفیه فاضلاب، کاهش هزینه‌های تصفیه فاضلاب‌های صنعتی بسیار آلوده، عدم نیاز به مواد شیمیایی، قابلیت بهره‌برداری به صورت ناپیوسته از مزایای استفاده از روش الکتروکئوگولاسیون به‌شمار می‌رود.

در این راستا تکنولوژی‌های متعددی قابل پیشنهاد است و یکی از این روش‌های پیشنهادی، روش الکتروشیمی است. طبقه‌بندی روش‌های الکتروشیمیایی برای حذف آلاینده‌ها عبارتند از: فرایندهای الکترولیز مستقیم، فرایندهای الکترولیز غیرمستقیم که روش الکتروکئوگولاسیون یکی از روش‌های

الکترولیز غیرمستقیم است. در کشور ایران طرح‌های پژوهشی در دانشگاه‌ها و مراکز تحقیقاتی انجام گرفته است، ولی در مقیاس صنعتی برنامه‌ای وجود نداشته است. شایان ذکر است که قابلیت بازیافت آب در تمامی معادن و کارخانجات معدنی توسط این روش وجود دارد.

۳-۳-۶-۳. لخته‌سازی ارتوتکنتیک

بهینه‌سازی رفتار آبگیری باطله‌های رس نیز از طریق شیمی بین وجوه، لخته‌سازی ارتوتکنتیک و برش کنترل شده انجام شد. در این مطالعه تأثیر برش در آبگیری و فعل و انفعالات ذرات رس‌های تبادل‌کننده سدیم اسمکتیت و کائولینیت پراکنده در pH برابر با ۷/۵ بررسی شده و از یون‌های فلزی کلسیم و منگنز قابل هیدرولیز به عنوان منعقدکننده و فلوکولانت‌های پلی آکریل آمید آنیونی PAM_A و غیریونی PAM_N و پلی اتیل اکسید PEO با وزن مولکولی بالا استفاده شده است. در شرایط بهینه میزان رسوب با فلوکولانت‌های PAM_A و PEO سریع‌تر از PAM_N است. ضمن اینکه پالپ‌های کائولینیت دارای نرخ تشینی بیش‌تری نسبت به پالپ‌های اسمکتیت هستند. تفاوت رفتار فلوکولانت‌ها به طور گسترده به زنجیرهای هیدروکربنی PAM_A و PEO نسبت به PAM_N ربط داده شده و گفته شده که شفافیت سریع پالپ کائولینیت‌دار به دلیل قدرت ساختار شبکه پلی بین ذرات و فلوکولانت است. تنش تسلیم در حالت پالپ با PAM_A کم‌تر از بقیه است که گفته شده نشانگر شکست غیرقابل برگشت پلیمرهای واقع شده در بین ساختار شبکه فلوکولانت و ذره می‌باشد. به طور کلی رابطه واضحی بین تأثیر برش، شیمی داخل مواد و ساختار پلیمر وجود دارد که بر روی فعل و انفعالات ذرات پالپ و آبگیری مؤثر است.

شایان ذکر است که استفاده از فلوکولانت‌های مختلف برای لخته‌سازی ذرات معلق در آب به طور گسترده در کشور انجام گرفته است. با این حال بهینه‌سازی استفاده از این ترکیبات و یا استفاده از فلوکولانت‌های جدیدتر باید در دستور کار واحدهایای صنعتی معدنی قرار گیرد.

۴-۳-۶-۳. تأثیر چگالش ذرات

در مطالعه‌ای به تأثیر چگالش تجمع ذرات روی کارایی تیکنر پرداخته شد. در این مطالعه به مقایسه بیش‌ترین نرخ جامد تهریز پیش‌بینی شده برای دو حالت با چگالش و بدون چگالش و تأثیر چگالش روی ارتفاع بستر و زمان ماند بررسی شده است. محققان دریافتند که در حالت چگالش، افزایش قابل توجه در نرخ جامد ته‌ریز و کاهش در زمان ماند و ارتفاع بستر مشاهده شد. این نتیجه در حالت برابر بودن حجم قسمت جامد ته‌ریز نسبت به حجم جامد در تجمع به‌دست می‌آید به طوری که اگر این مقدار بزرگ‌تر باشد تجمع به صورت روی هم افتاده و یا در هم نفوذ کرده در نظر گرفته می‌شود. و به طور کلی تأثیر چگالش تجمع روی کارایی تیکنر ناچیز است.

گروهی دیگر از محققان نیز به آنالیز تئوری چگالش تجمع (تأثیر آن روی کارایی تیکنر) برای پیش‌بینی اثر چگالش تجمع روی خصوصیات مواد معدنی که توصیف‌کننده آبگیری است، پرداخته‌اند. پیش‌بینی شد که کاهش در اندازه و افزایش غلظت تجمع باعث افزایش نرخ ته‌نشینی مورد انتظار می‌شود.

علاوه بر این مشخص شد که مواد روی جامدهای با غلظت بیش‌تر رسوب می‌کنند. اثر این تغییرات روی کارایی تیکنرهای از نوع گرانشی مدل‌سازی شده و نتایج این مدل‌سازی پیش‌بینی می‌کند که اثر این تغییرات می‌تواند مؤثر باشد.

شایان ذکر است که بهینه‌سازی تیکنر در قالب تئوری چگالش در کشور به طور جدی پیگیری نشده است، ولی قابلیت انجام این روش در کشور به راحتی و برای کلیه واحدهای صنعتی وجود دارد.

۵-۳-۶-۳. ارائه روش خاکستری

محققان در سال ۲۰۱۲ به معرفی روش خاکستری برای بهینه کردن چندهدف پارامترهای تیکنر در مقیاس آزمایشگاهی پرداخته‌اند. در این مطالعه پارامترهای عملیاتی تیکنر شامل جریان خوراک، درصد جامد، مقدار فلوکولانت و ارتفاع چاهک بر اساس ویژگی‌های عملکرد چندگانه بهینه‌سازی شده است.

۱۶ آزمایش با روش خاکستری برای بهینه‌سازی پارامترهای تیکنر آزمایشگاهی به خصوص دو ویژگی مناسب (درصد جامد ته‌ریز و ارتفاع بستر تیکنر) انجام گرفته و اهمیت پارامترها و ترکیب آنها مشخص شده است. نتایج تحلیل دو آزمایش تأییدی با استفاده از پارامترهای بهینه فرایند نشان می‌دهد که ویژگی‌های عملکردی بالا در آبگیری باطله می‌تواند با استفاده از این روش بهبود یابد.

شایان ذکر است که بهینه‌سازی تیکنر بر اساس پارامترهای تأثیرگذار موجود بر فرایند در واحدهای معدنی کشور همواره در حال انجام شدن است. طراحی تیکنرهای خمیری در کشور یکی از این دستاوردها به حساب می‌آید که قادر است محصول با درصد جامد بالاتری را در اختیار واحدهای آبگیری قرار دهد.

۶-۳-۶-۳. عوامل فلوکولانتی

گروهی از محققان به مطالعه تأثیر سن محلول فلوکولانت پلی‌آکریل‌آمید روی کارایی فلوکولانت در سال ۲۰۰۲ پرداخته‌اند. در این مطالعه از فلوکولانت‌هایی که به مدت یک ساعت تا ۶ روز به حالت محلول بوده‌اند استفاده شده است. مشخص شد که مقدار فلوکولانت مورد نیاز برای تولید لخته قابل اندازه‌گیری با افزایش مدت زمان انحلال کاهش می‌یابد و بهترین حالت در ۷۲ ساعت به‌دست آمده است. بر اساس نتایج به‌دست آمده مدت زمان انحلال تأثیر قابل توجهی بر چگالی تجمع شکل گرفته نداشته و فقط روی تأثیر زنجیرهای پلیمر مجزا در فرایند لخته‌سازی مؤثر است.

۷-۳-۶-۳. اولتراسیون

گروهی دیگر از محققان به مطالعه تأثیر عوامل اولتراسیونی روی افزیش غلظت بستر تیکنر در سال ۲۰۱۴ پرداخته‌اند. آنها با اعمال نیروی فراصوت به صورتی که باعث پراکندگی بستر ترسیب یافته نشده، اما برای باز کردن ساختار شبکه‌ای بسته کافی باشد، به این نتیجه رسیدند که با اعمال این نیرو چگالی بستر از ۳۳/۷۲ به ۳۷/۴۸ درصد افزایش می‌یابد. میزان این نیرو برابر ۲۸ کیلو هرتز در نظر گرفته شده است. در این مقاله از Cryo-SEM نیز برای تصویر برداری و آنالیز ترکیب نیروی فراصوت و پارو استفاده شده که ساختار انتقال زون دوباره مرتب یافته از حالت E-E به F-F را نشان می‌دهد. این حالت

نشان‌دهنده توانایی نیروهای فراصوت برای شکستن انجمن‌های E-E و E-F و تجمع به صورت F-F با غلظت بیش‌تر است. با اندازه‌گیری تنش برشی بر جا این یافته‌ها تأیید شده است. به طور کلی این تکنولوژی برای مدیریت باطله‌هایی که بهبود غلظت بستر از نظر محیط‌زیستی و اقتصادی مطرح باشد می‌تواند بسیار مهم و مفید باشد.

۸-۳-۶-۳. مدل ریاضی آبگیری

مطالعه‌ای در سال ۲۰۱۴ روی بهینه‌سازی سیستم‌های آبگیری در فراوری مواد معدنی انجام شد. در این مطالعه از مدل ریاضی برای مشخص کردن بیش‌ترین نرخ بازیابی آب، مشخص کردن سیستم و اندازه دستگاه و به حداقل رساندن هزینه دستگاه‌ها به ازای نرخ بازیابی آب استفاده شده است. مدل ارائه شده بر اساس برنامه‌ریزی غیرخطی عدد مختلط بوده که روی چندین مطالعه موردی انجام شده است به طوری که مدل ارائه شده با نتایج مطالعات آزمایشگاهی سیستم‌های آبگیری واقعی در کارخانه کنسانتره مس مطابقت دارد.

۴. خلاصه مدیریتی

در پژوهش پیش رو به بررسی مدیریت منابع و اصلاح الگوی مصرف آب در بخش معدن و صنایع معدنی ایران پرداخته شده است. در بخش اول کیفیت‌وکمّیت منابع آب در صنعت معدنی دنیا بررسی شده به طوری که نتایج تحقیقات نشان داد از میان فلزات آهن، فولاد، طلا، مس، آلومینیم، محصولات سیمانی و شن و ماسه، بیش‌ترین مصرف آب مربوط به تولید فلز طلا و پس از آن تولید فلز مس است. در مقابل صنعت شن و ماسه و سیمان کم‌ترین میزان مصرف آب را به خود اختصاص داده است. برای تولید یک کیلوگرم فلز طلا از خاک طلا در حدود ۴۰۰ مترمکعب آب نیاز است و این رقم برای تولید هر تن فلز مس به حدود ۲۰۰ مترمکعب می‌رسد. میزان مصرف آب برای تولید هر تن سیمان معمولی در حدود ۲/۶ مترمکعب است. شایان ذکر است که در این بخش به طور کامل به میزان مصرف آب در هر یک از واحدهای تشکیل‌دهنده کارخانه نیز اشاره شده است.

در بخش دوم به کیفیت‌وکمّیت منابع آب در صنعت معدنی کشور اشاره شده است. مطالعات پژوهشی و میدانی در زمینه میزان مصرف آب در صنایع تولید فولاد خام و گندله‌سازی، کارخانجات تغلیظ و لیچینگ مس و کارخانه تولید فلز طلا انجام گرفته است. آمار و مقایسه آن با استانداردهای موجود در دنیا نشان داد که کارخانجات تولید فولاد و گندله‌سازی در کشور نیازمند بازنگری اساسی در زمینه مدیریت منابع آب و اصلاح فرایندهای مصرف و بازیافت آب هستند. در مقابل کارخانجات تولید مس در بخش تغلیظ و لیچینگ تا حد زیادی توانسته‌اند میزان مصرف آب را مدیریت کرده و عملکرد خود را به استانداردهای جهانی نزدیک کنند. در مورد طلا باید گفت که مصرف در ایران تقریباً پنج برابر

مصرف جهانی است و باید اقدامات لازم در جهت رفع این مشکل لحاظ شود. شایان ذکر است که در حال حاضر طرح بازیافت آب در مجموعه طلای موته در حال انجام است که بنا به اظهارات مدیران اجرایی مجموعه موته پس از آغاز طرح، امکان بازیابی بیش از ۸۵ درصد از آب مصرفی وجود خواهد داشت، این در حالی است که در حال حاضر تنها ۱۰ درصد از آب مصرفی به مدار بازگردانده می‌شود.

در بخش سوم نمونه‌هایی از مدیریت موفق منابع آب در کشورهای دنیا آورده شد. به طور کلی دو راهکار عمده و اصلی برای مدیریت منابع آب وجود دارد. گزینه اول استفاده از آب شور دریا به‌جای آب شیرین و یا شیرین‌سازی آب دریا و گزینه دوم استفاده از فرایندهای بازیافت آب در کارخانه‌های صنعتی- معدنی از جمله استفاده از تیکنرهای آبی و استفاده از فرایند فیلتراسیون است. کشورهای استرالیا، کانادا، آمریکا، مکزیک، آرژانتین، پرو و شیلی از جمله کشورهای پیشرو در زمینه شیرین‌سازی و انتقال آب دریا به کارخانه‌های معدنی هستند. بررسی‌ها نشان داد که هزینه شیرین‌سازی آب دریا در تمامی این کشورها مقدار نسبتاً ثابتی دارد به طوری که برای تولید هر مترمکعب آب شیرین از آب دریا در حدود ۱/۵ دلار هزینه خواهد شد. اما هزینه‌های انتقال آب در کشورهای مختلف متفاوت است به طوری که تابعی از موقعیت قرارگیری کارخانه از کارخانه آب شیرین‌کن خواهد بود و از ۰/۵ تا ۴ دلار به ازای انتقال هر مترمکعب آب انتقال داده شده متغیر است.

در بخش بعدی به فناوری‌های بازیافت آب از جمله تیکنر و فیلتراسیون و همچنین فناوری‌های نو اشاره شد. یکی دیگر از راهکارهای مناسب در مقوله بازیافت آب استفاده از تیکنرهای نسل نو (تیکنرهای خمیری) است که قادر است بیش از ۸۰ درصد از آب مصرفی در فرایندهای تولید مواد معدنی را به مدار بازگرداند. لذا با برنامه‌ریزی‌های دقیق و تدوین قانون می‌توان کلیه کارخانجات معدنی کشور را ملزم به رعایت این راهکار کرد. روش و فرایندهای جدیدی نیز در دنیا بر روی مقوله بازیافت و یا شیرین‌سازی آب دریا در حال انجام است که اکثر آنها در مرحله مقدماتی، آزمایشگاهی و یا پایلوت هستند. از این جمله می‌توان به استفاده از میکرو ارگانیسم‌ها و گاز دی اکسیدکربن در شیرین‌سازی آب دریا، استفاده از پانل‌های خورشیدی در تأمین انرژی شیرین‌سازی آب دریا در مناطق دورافتاده، استفاده از فرایند انجماد غیرمستقیم، استفاده از الکتروباکتری در تصفیه پساب‌های معدنی، استفاده از لخته‌سازی و فلوکولانت‌ها در سیستم‌های تصفیه و بازیافت آب اشاره کرد. شایان ذکر است که کلیه فرایندهای نو ذکر شده در مرحله امکان‌سنجی هستند و کشورهای پیشرفته به سرعت بر روی این موضوع در حال فعالیت و گسترش دانش فنی هستند. اما این موضوع چندان در کشور ما مورد اهمیت قرار نگرفته و به صورت پراکنده کارهایی انجام شده است.

۵. جمع‌بندی و ارائه راهکار

۵-۱. چالش‌های عمده مدیریت منابع آب در بخش معدن و صنایع معدنی

لزوم مدیریت مصرف آب در معدنکاری و واحدهای فراوری مواد معدنی امری ضروری است، زیرا از یک طرف تناسب بین نیاز واقعی در برداشت آب از منابع محلی را تنظیم می‌کند که این امر امکان دسترسی بیش‌تر برای مصرف در بخش‌های دیگر را فراهم کرده و از طرف دیگر موجب کاهش ورود پساب‌های معدنی به محیط اطراف شده و هزینه حفاظت از آبخوان‌ها و آبریزها را کاهش می‌دهد. موارد زیر دغدغه‌های مهم مدیریت منابع آب در بخش معدن و صنایع معدنی است:

- کاهش میزان برداشت آب از منابع محلی در دسترس
- افزایش امکان در دسترس بودن آب برای بخش‌های دیگر محلی و منطقه‌ای
- افزایش راندمان بهره‌وری آب به ازای هر تن محصول تولید شده
- کاهش حجم پساب‌های معدنی و فراوری و کاهش درجه ریسک ورود آنها به محیط زیست

در بررسی چالش‌های مرتبط با آلودگی آب در صنایع معدنی و ضرورت بازیافت آن، دو رویکرد عمده مطرح است: اول، جلوگیری از مصرف بیش از حد آب و آلودگی آن در منبع که به معنی کاهش حجم پساب و در نتیجه آلودگی حاصل از آن است. دوم، جمع‌آوری پساب و تصفیهٔ آن برای استفاده مجدد یا تخلیه در محیط زیست. لازمه پرداختن به این رویکردها، تعیین استانداردها و مقررات لازم برای تصفیه پساب است. بر اساس گزارش برنامه محیط زیست سازمان ملل متحد، انتخاب روش تصفیه پساب بستگی به نوع اقلیم منطقه، دسترسی به منابع آب شیرین، سطح توسعه اقتصادی منطقه، نوع فعالیت‌های اقتصادی و الگوهای سکونتگاهی دارد که هر کدام به نوعی بر چالش‌های پیش‌روی تصفیه پساب و مدیریت کیفی آب تأثیر دارد.

در یک جمع‌بندی موارد زیر به عنوان اهم چالش‌های مدیریت منابع و بازیافت آب در مفهوم کلی مطرح هستند:

- عدم اصلاح قیمت آب و نبود برنامه مشخص برای واقعی کردن آن
- فقدان سیاست‌ها و برنامه‌های آمایش سرزمین برای مشخص شدن اولویت‌های بهره‌برداری از منابع آب در معادن و صنایع معدنی
- مصرف غیر بهینه آب برای تولید محصولات معدنی و پایین بودن نرخ بهره‌وری
- فقدان نگرش اقتصادی به آب در کشور
- محدودیت منابع مالی برای تأمین آب مورد نیاز صنعتی و معدنی
- فقدان نظام مدیریت یکپارچه منابع آب
- کمبود خدمات و صنایع پشتیبانی بخش آب

- عدم خوداتکایی مالی و رشد خصلت‌های بنگاهداری اقتصادی در نظام مدیریتی آب
- آلودگی منابع آب مصرفی در بخش صنعتی به واسطه انواع پساب‌ها و پسماندهای دارای منشأ صنعتی و معدنی
- عدم استفاده مجدد از پساب‌های گوناگون در بخش معدن و صنایع معدنی
- بی‌توجهی به میزان و نوع مصارف آب در صنایع معدنی از دیدگاه اقتصاد آب
- کمبود و ناهماهنگی در قوانین، ضوابط و روش‌های اجرایی در زمینه‌های مرتبط با آب
- استفاده از مواد شیمیایی نامناسب و تخلیه آلودگی‌های ناشی از آنها در منابع آب
- نامناسب شدن کیفیت آب آشامیدنی در اثر تغییرات اکولوژیک و زیست‌محیطی و دفع فاضلاب و زباله‌ها و عدم رشد کافی و هماهنگ تجهیزات مرتبط
- چالش تأمین آب سالم برای روستاییان در مراکز جمعیتی کوچک و پراکنده نزدیک معادن و واحدهای صنعتی و معدنی
- ناکافی بودن الگوهای مصرف مناسب آب و کمبود تأسیسات و زیرساخت‌ها برای مقابله با بحران‌ها در زمان‌های خشکسالی
- کمبود امکانات در زمینه سنجش آلاینده‌ها در منابع آب
- آلودگی رودخانه‌ها و منابع آب زیرزمینی به ویژه به دلیل گسترش صنعتی – معدنی غیر اصولی روی سفره‌های آب
- عدم بهره‌گیری از فناوری‌های روز به منظور هوشمندسازی مدیریت منابع آب در بخش معدن و صنایع معدنی کشور

۲-۵. راهکارهای پیشنهادی

معادن و صنایع معدنی به صورت پراکنده در سطح کشور توزیع شده‌اند و توجه به موقعیت این واحدهای معدنی و صنعتی از منظر دسترسی به منابع آب حائز اهمیت است. برای نمونه کارخانه‌های فراوری مواد معدنی، بیش‌تر در استان‌های میانی کشور مانند کرمان، خراسان رضوی و جنوبی، یزد و بخش‌هایی از تهران و استان‌های مرکزی قرار گرفته‌اند. بخش عمده‌ای از کارخانه‌های فراوری نیز در مناطقی قرار گرفته‌اند که افت مخازن آب‌های زیرزمینی در آنها مشاهده شده است. در این نواحی با توجه به آب و هوای خشک و شرایط هیدرولوژیکی حاکم بر آن‌ها، برداشت آب عمدتاً از منابع آب زیرزمینی انجام می‌شود و این در حالی است که در بخش‌های شمالی و غربی کشور روان آب‌های سطحی نقش پیشرو در منابع تأمین‌کننده آب ایفا می‌کنند.

بهره‌برداری از معادن، ابتدا در قسمت‌های پرعیار کانسارها آغاز شده و به‌تدریج با کاهش ذخایر پرعیار، استفاده از مواد معدنی کم‌عیار مورد توجه قرار گرفته است و معدنکاران مجبور به استفاده از

روش‌های مختلف کانه‌ارایی شده‌اند. در بیش‌تر روش‌های کانه‌ارایی، آب عامل اصلی و تعیین‌کننده است. در ایران منابع آب محدود بوده و در پاره‌ای موارد در نزدیکی معادن امکان دسترسی به منابع آب وجود ندارد. در نتیجه باید از فواصل دور تا محل معدن حمل شود. بنابراین در این معادن هزینه‌های تأمین آب بهره‌برداران معادن را برای کانه‌ارایی و تهیه مواد قابل عرضه به بازار، مجبور به استفاده بهینه از منابع آب می‌کند و به سمت بازیابی آب و روش‌هایی که آب کم‌تری مصرف می‌شود حرکت می‌کنند. اما در مناطقی که آب در دسترس معدن‌کاران و کارخانه‌های فراوری است، در حال حاضر به دلیل عدم اصلاح قیمت آب، نیروی محرکه کافی برای حرکت به سمت مدیریت منابع و اصلاح الگوی مصرف ایجاد نشده است و لازم است تا در این خصوص برنامه‌ریزی شود.

به طور کلی راهکارهای کاهش و تأمین آب تازه مصرفی در معادن و واحدهای فراوری مواد معدنی را می‌توان به دو بخش تقسیم کرد. ۱) کنترل و بازیابی، ۲) استفاده از منابع جایگزین

در بخش کنترل و بازیابی به‌کارگیری شبکه کنترل و اندازه‌گیری آب ورود به کارخانه، استفاده از تینکرها با کارایی مناسب و استفاده از آب برگشتی و بازیابی آب از باطله‌ها و سدهای باطله انجام می‌شود. در بخش استفاده از منابع جایگزین، استفاده مجدد از فاضلاب شهری، احداث واحدهای آب شیرین‌کن و استفاده مستقیم از آب دریا جزء مواردی است که می‌توان به آن توجه کرد. این موارد نیازمند سیاست‌گذاری، نظارت و انجام برخی اقدامات اجرایی است که در این بخش مورد توجه قرار گرفته است.

۱-۲-۵. اقدامات از نوع سیاستگذاری

- نگاه ملی به مسئله مدیریت منابع و اصلاح الگوی مصرف آب و ایجاد درک مشترک و هماهنگی میان دستگاه‌ها، سازمان‌ها و نهادهای دخیل مانند وزارت جهاد کشاورزی، وزارت نیرو، وزارت صنعت، معدن و تجارت، سازمان برنامه و بودجه و سازمان حفاظت محیط‌زیست به منظور تسریع در اجرای آمایش سرزمین و پتانسیل‌یابی منابع آب برای فعالیت‌های معادن و صنایع معدنی مطابق ماده (۱۰) قانون تشکیل وزارت جهاد کشاورزی
- آمایش سرزمین و پتانسیل‌یابی مناطق مستعد برای فعالیت‌های معدن و صنایع معدنی از دیدگاه مصرف آب و تجدید نظر در فرایندهای صدور مجوز برای واحدهای معدنی و صنعتی بر مبنای سند ملی آمایش سرزمین
- تدوین برنامه راهبردی مدیریت منابع آب در بخش معادن و صنایع معدنی بر اساس اسناد بالادستی و قوانین برنامه‌های توسعه کشور و هدف‌گذاری کمی برای هر حوزه، به طوری که این هدف‌گذاری در زنجیره ارزش محصولات معدنی و فلزی در مدت زمان مشخص انجام شود و بر این اساس اقدامات نظارتی و اجرایی صورت گیرد. معادن و صنایع معدنی (اعم از واحدهای فراوری، واحدهای تولید مواد خام و نیمه خام و صنایع پایین‌دستی) طراحی، نوسازی و بازسازی واحدهای معدنی و صنعتی را بر اساس هدف‌گذاری برنامه راهبردی انجام داده و مکلف به ارائه برنامه مدون فنی و مدیریتی شوند.

- اصلاح قیمت آب بر اساس برنامه مدون و اعلام این برنامه به فعالان بخش معدن و صنایع معدنی برای ایجاد انگیزه و تحرک به منظور افزایش بهره‌وری، مدیریت منابع و اصلاح الگوی مصرف آب. اصلاح قیمت باید با در نظر گرفتن مزیت‌های کشور و حفظ توان رقابت‌پذیری معادن و صنایع معدنی انجام شود و برای واحدهای صنعتی و معدنی پرمصرف عوارض و جریمه مصوب شود.
- سیاستگذاری به منظور استفاده بهینه از منابع آزاد شده از اصلاح قیمت آب و عوارض آب در بخش معدن و صنایع معدنی و تخصیص این منابع به وزارت صمت به منظور:

- بازسازی و نوسازی سیستم‌های آبیاری و آبرسانی کشور برای افزایش راندمان و کاهش تلفات در بخش‌های مختلف
- تأمین مالی طرح‌های آبرسانی و شیرین‌سازی آب دریا به صورت مشارکت سازمان‌های توسعه‌ای صنعت و معدن با بخش خصوصی
- تعریف و حمایت از پروژه‌های کاربردی در مراکز پژوهشی و دانشگاهی به منظور ارتقای توان فنی – مهندسی کشور برای مدیریت منابع آب، شیرین‌سازی آب دریا و بازچرخانی آب مورد استفاده در بخش صنعت و معدن

۲-۲-۵. اقدامات نظارتی و اجرایی

- تدوین استانداردهای فنی برای مدیریت مصرف آب در معادن و صنایع معدنی
- تعریف معیارهای علمی شفاف برای نظارت بر مصرف آب و فاضلاب‌ها و پساب‌های تولیدی و حذف برخوردهای سلیقه‌ای و غیرعلمی
- الزام واحدهای معدنی و صنایع معدنی به منظور ارائه برنامه مدیریت منابع، اصلاح الگوی مصرف آب، مدیریت پساب و فاضلاب در قالب طرح جامع توسعه پایدار قبل از اعطای مجوز بهره‌برداری به طوری که در این برنامه میزان مصرف آب سالیانه، منبع تامین آب و فناوری‌ها و روش‌های مورد استفاده به منظور بازیافت آب بر اساس استاندارد فنی و برنامه واحد صنعتی برای بهینه‌سازی مصرف آب مشخص شده باشد.
- دسترسی به اطلاعات و نظارت بر میزان مصرف آب و تولید پساب در معادن و صنایع معدنی با طراحی سیستم‌های هوشمند به همراه خوداظهاری مصرف‌کنندگان و ایجاد سیستم نظارت مستمر الکترونیکی
- نظارت به صورت نمونه‌برداری از آب‌های زیرزمینی و مدل‌سازی در حین برداشت آب
- اعطای معافیت حقوق دولتی برای معادن و معافیت‌ها و مشوق‌های مالیاتی برای صنایع معدنی که از روش‌های خشک به منظور فراوری مواد معدنی و تولید محصولات استفاده می‌کنند.
- اعطای تسهیلات ارزان قیمت، یارانه سود تسهیلات، امکان واردات بدون تعرفه ماشین‌آلات و تجهیزات دست دوم تصفیه و شیرین‌سازی آب برای معادن و واحدهای فراوری که از آب شور به منظور تامین آب موردنیاز خود استفاده می‌کنند.

- اختصاص بخشی از درآمدهای حاصل از حقوق دولتی به نظام مهندسی معدن برای تقویت نظارت بر مصرف آب و مدیریت فاضلاب و پساب‌های معادن و واحدهای فراوری و مطالعه و پژوهش به منظور ارائه راهکارهای فنی بروز و کارآمد
- تقویت جایگاه نظام مهندسی معدن در بعد فنی و نظارتی و آموزش مسوولین فنی معادن و واحدهای فراوری در زمینه مدیریت منابع آب، اصلاح الگوی مصرف و مدیریت پساب
- فعال شدن سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور به منظور پتانسیل‌یابی آب‌های کارستی برای تامین آب بخش معدن و صنایع معدنی بر اساس اهداف پیش‌بینی شده در نقشه راه معدن و صنایع معدنی (۱۴۰۰ – ۱۳۹۷)

۳-۲-۵. اقدامات فنی در معادن و واحدهای فراوری

الف) محیط معدن

- به‌کارگیری روش اتاق و پایه با انفجار در سطح آزاد در معادن زیرزمینی به منظور به حداقل رساندن نشت و ترک‌خوردگی سنگ‌های پوشش و ممانعت از فعال شدن پدیده تراوش آب در سنگ‌های پوشش.
- برداشت‌های ژئوفیزیکی برای تعیین موقعیت فضایی گسل‌ها و شکستگی‌ها. این زون‌ها به خصوص وقتی خطرناک هستند که به عنوان مجرایی برای آب سطحی و زیرزمینی عمل کرده و آب وارد بخش استخراج می‌شود که تراوش آب زیرزمینی را سهولت بخشیده و بر حسب گسترش، مناطق آلوده به آب‌های اسیدی می‌شوند.
- حفاری زیرزمینی افقی وقتی انجام می‌شود که جبهه کار معدنکاری ۵۰۰ متر دورتر از پهنه شکستگی‌های آشکار شده به روش ژئوفیزیکی است. با این نگرش که جریان آب سطحی و زیرزمینی به زیرزمین در حد امکان جلوگیری شود.
- پر کردن گمانه‌های حفر شده با سیمان در طول فاز اکتشاف و توسعه معدن برای جلوگیری از ورود آب به زیرزمین
- عایق بندی ساختارهایی که در طول توسعه معدن در محیط شناسایی می‌شود مانند شکستگی‌ها، گسل‌ها و دایک‌ها که قبلاً با روش‌های ژئوفیزیکی آشکار نشده است.
- نظارت بر آثار انفجارهای معدنی زیرا موج لرزه‌ای حاصل از آنها در محیط زیرزمینی موجب بازشدگی فضاهای درز و شکاف می‌گردد.
- محاسبه دبی جریان آب زیرزمینی از طریق نصب یک ساعت در پمپ‌هایی که در مکان‌های مختلف زیرزمین واقع شده‌اند.
- نصب هیدرومتر در لوله‌های آبو استفاده از داده‌های حاصل برای تعیین وضعیت آب معدن
- نصب گیج باران‌سنج برای ثبت ریزش‌های جوی در مکان‌های استراتژیک در محدوده معدن به منظور استفاده از داده‌ها برای وضعیت آب در معدن

- نصب یک خط کش تراز در همه مخازن آب به منظور ایجاد همبستگی بین تراز آب مخازن و جریانات فرعی پمپ شده از باران و زیرزمین.
- نصب شبکه هیدرومتر برای نظارت بر تراز سطح آب زیرزمینی به منظور ایجاد همبستگی بین سطح تراز آن و جریانات فرعی پمپ شده از آب باران و زیرزمین.
- نصب ناودانی در همه آبراهه‌های سطحی برای اندازه‌گیری جریانات به منظور ایجاد همبستگی بین سطح تراز آن و جریانات فرعی پمپ شده از آب باران و زیرزمین.

ب) واحدهای فراوری

- مصرف حداکثر آب در فراوری مواد از بی‌کیفیت‌ترین منابع آب ممکن در منطقه (چه سطحی و چه زیرزمینی)
- سرمایه‌گذاری لازم برای بسته بودن سیستم آب مصرفی در فرایند فراوری مواد با کم‌ترین مقدار ورودی و کم‌ترین مقدار خروجی پساب و زهاب معدنی.
- تخلیه کنترل شده مواد باطله حاصل از فعالیت‌های فراوری
- ساخت مخازن و فیلترهای مناسب برای سهولت بخشی به فرایند پالایش و تصفیه پساب‌ها و زهاب‌های معدنی.
- استفاده از سیستم‌های ژئوممبرین برای جلوگیری از نفوذ پساب و آلاینده‌ها به آب‌های سطحی و زیرزمینی

منابع و مآخذ

۱. ایسنا، منابع آب ایران گرفتار قوانین فرسوده، ۱۳۹۶.

۲. زاده، م. ارزیابی اقتصادی و زیست‌محیطی تولید انرژی از فاضلاب شهر کرمان، ۱۳۹۳.

۳. علیمحمدی، م .م . شیرین‌سازی آب‌های شور و لب شوردست‌ساز با استفاده از تکنولوژی انجماد، ۱۳۹۲.

۴. قزلباش، س. ارزیابی اقتصادی انرژی برق خورشیدی (فتوولتائیک) و برق فسیلی در یک واحد خانگی در شهرستان مشهد، ۱۳۹۲.

5. Al-Karaghouli, A. R. (2010). Technical and Economic Assessment of Photovoltaic-driven Desalination Systems.
6. Bank, W. (2010).
7. Bouaichaoui, Y. B. (2012). Economic and Safety Aspects in Nuclear Seawater Desalination.
8. Busman, R. (2016). Water Footprint of Widely Used Construction Material.
9. CDE. (2015). Efficient Sand Washing with Little or no Water.
10. Gálvez, E. D. (2017). Innovative Solutions for Seawater Use in Mining Operations.
11. Guerra P, G. S. (2009). Water Supply for Mining Projects in Arid Regions.
12. Haque, S. A. (2013). Life Cycle Based Water Footprint of Selected Metal Production.
13. Helal, A. A.-M.-K. (2008). Economic Feasibility of Alternative Designs of a PV-RO Desalination Unit for Remote Areas in the United Arab Emirates.
14. ICMM. (2012). Water Management In Mining: A Selection of Case Studies
15. J. G. Koomey, C. D. (1995). The Effect of Efficiency Standards on Water Use and Water-heating Energy Use in the US: A Detailed End-use Treatment. Energy, vol. 20.
16. Jiafu Tian., J. Z. (2004). Pre-feasibility Study of a Deep-pool Reactor for Seawater Desalination.
17. Kesieme, U. K. (2013). Economic Analysis of Desalination Technologies in the Context of Carbon Pricing, and Opportunities for Membrane Distillation.
18. Ordóñez JI, M. L. (2013). Seawater Leaching of Caliche Mineral in Column Experiments Hydrometallurgy.
19. Schorr M, V. B. (2011). Corrosion Control in the Desalination Industry.
20. Thylmann. (2016). Water Scarcity Footprint of Primary Aluminium. Int J Life Cycle Assess.
21. WALLING, F. B. (2008). Water Requirements of the Iron and Steel Industry. Geological Survey Water-Supply Paper.
22. Wmsa. (2015). Water Management in The Steel Industry. World Steel Association.

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی

شناسنامه گزارش	شماره مسلسل: ۱۶۴۵۵

عنوان گزارش: مدیریت منابع و اصلاح الگوی مصرف آب در بخش معدن و صنایع معدنی ایران (بخش اول)

نام دفاتر: مطالعات انرژی، صنعت و معدن، مطالعات زیربنایی (گروه معدن و صنایع معدنی، گروه آب و محیط‌زیست)

مدیران مطالعه: بابک بهادری، جمال محمدولی سامانی

تهیه و تدوین‌کنندگان: مهدی قراباغی، مسعود پوررحیم

ناظران علمی: حسین افشین، علی‌اصغر اژدری، محمدتقی فیاضی

ویراستار تخصصی: ـــــــ

ویراستار ادبی: ـــــــ

واژه‌های کلیدی:

۱. معدن

۲. صنایع معدنی

۳. منابع آب

۴. الگوی مصرف

۵. بازیافت

تاریخ انتشار: ۱۳۹۸/۳/۲۵