

بهینه سازی فرآوری شن و ماسه با هدف کاهش مصرف آب و انرژی در کارخانه های فرآوری

امیرهمایون کریمی^۱

amirhomakarimi@gmail.com

چکیده

صنعت فرآوری شن و ماسه به دلیل مصرف بالای آب و انرژی، یکی از صنایع دارای اهمیت زیست محیطی و اقتصادی محسوب می شود. افزایش هزینه های تولید، محدودیت منابع آبی و ضرورت کاهش اثرات زیست محیطی، نیاز به بهینه سازی فرآیندهای فرآوری را بیش از پیش آشکار ساخته است. هدف این پژوهش، بررسی و بهینه سازی فرآوری شن و ماسه با تأکید بر کاهش مصرف آب و انرژی و افزایش بهره وری فرآیندها می باشد.

در این تحقیق، فرآیندهای اصلی کارخانه های فرآوری شامل خردایش، دانه بندی، شست و شو و انتقال مواد مورد بررسی قرار گرفتند. اطلاعات مورد نیاز از طریق مطالعات میدانی، اندازه گیری مصرف آب و انرژی و تحلیل عملکرد تجهیزات جمع آوری شد. همچنین تأثیر استفاده از سیستم های بازیافت آب، تجهیزات راندمان بالا و فناوری های کنترل مصرف انرژی ارزیابی گردید.

نتایج پژوهش نشان داد که بخش شست و شو با حدود ۵۲ درصد، بیشترین سهم مصرف آب را در کارخانه های فرآوری دارد، در حالی که مدار خردایش و سنگ شکن ها بیشترین مصرف انرژی را به خود اختصاص داده اند. استفاده از سیستم های بازیافت آب شامل تیکنر و فیلترپرس توانست میزان بازیافت آب را تا ۸۲ درصد افزایش دهد و مصرف آب تازه را تا ۶۰ درصد کاهش دهد. همچنین به کارگیری تجهیزات راندمان بالا و سیستم کنترل دور موتور (VFD) موجب کاهش مصرف انرژی تا ۳۲ درصد شد. نتایج اقتصادی نیز نشان داد که اجرای راهکارهای بهینه سازی می تواند هزینه های عملیاتی را تا ۳۳ درصد کاهش دهد.

در مجموع، نتایج این پژوهش نشان می دهد که بهینه سازی فرآیندهای فرآوری شن و ماسه علاوه بر کاهش مصرف منابع و هزینه های تولید، موجب افزایش راندمان، کاهش تولید پساب و کاهش اثرات زیست محیطی می شود و می تواند گامی مؤثر در جهت توسعه پایدار صنایع معدنی باشد.

کلیدواژه ها

فرآوری شن و ماسه، مصرف آب، مصرف انرژی، بهینه سازی فرآیند، بازیافت آب، توسعه پایدار

۱- مقدمه

صنعت تولید شن و ماسه یکی از مهم‌ترین بخش‌های تأمین مواد اولیه در صنعت ساخت‌وساز و توسعه زیرساخت‌ها به شمار می‌رود. افزایش جمعیت، توسعه شهرنشینی و گسترش پروژه‌های عمرانی موجب رشد چشمگیر تقاضا برای مصالح سنگی از جمله شن و ماسه شده است. این مواد نقش اساسی در تولید بتن، آسفالت و سایر مصالح ساختمانی دارند و به همین دلیل استخراج و فرآوری آن‌ها در بسیاری از کشورها به صورت گسترده انجام می‌شود. با وجود اهمیت اقتصادی این صنعت، فرآیندهای استخراج و فرآوری شن و ماسه معمولاً با مصرف قابل توجه منابع طبیعی، به‌ویژه آب و انرژی، همراه هستند که می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی و اقتصادی قابل توجهی به همراه داشته باشد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Peduzzi, 2014).

در کارخانه‌های فرآوری شن و ماسه، مراحل مختلفی از جمله خردایش، دانه‌بندی، شست‌وشو و جداسازی ذرات انجام می‌شود تا محصولی با کیفیت مناسب برای استفاده در صنایع ساختمانی تولید گردد. در بسیاری از این مراحل، به‌ویژه در فرآیند شست‌وشو مصالح، مصرف آب بسیار بالا است. از سوی دیگر، استفاده از تجهیزات مکانیکی مانند سنگ‌شکن‌ها، سرندها، پمپ‌ها و نوار نقاله‌ها نیز باعث مصرف قابل توجه انرژی الکتریکی می‌شود. در صورتی که این فرآیندها به شکل بهینه مدیریت نشوند، علاوه بر افزایش هزینه‌های تولید، فشار مضاعفی بر منابع طبیعی و محیط زیست وارد خواهد شد (احمدی و کریمی، ۱۴۰۰؛ Garbarino, 2010 & Blengini).

در سال‌های اخیر، توجه به بهینه‌سازی مصرف منابع در صنایع معدنی و فرآوری مواد معدنی افزایش یافته است. یکی از مهم‌ترین رویکردها در این زمینه، استفاده از فناوری‌های نوین و طراحی مجدد فرآیندهای تولید با هدف کاهش مصرف آب و انرژی است. به عنوان مثال، استفاده از سیستم‌های بازیافت آب، حوضچه‌های ته‌نشینی، هیدروسیکلون‌ها و فیلترپرس‌ها می‌تواند میزان مصرف آب تازه در کارخانه‌های فرآوری را به طور قابل توجهی کاهش دهد. همچنین به‌کارگیری تجهیزات با راندمان بالاتر، بهینه‌سازی مدارهای خردایش و استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند می‌تواند مصرف انرژی را کاهش داده و کارایی فرآیند را افزایش دهد (محمدی و رضایی، ۱۴۰۱؛ Napier-Munn et al., 1996).

افزون بر مسائل اقتصادی، کاهش مصرف آب و انرژی در کارخانه‌های فرآوری شن و ماسه از منظر زیست‌محیطی نیز اهمیت ویژه‌ای دارد. برداشت بی‌رویه آب از منابع سطحی و زیرزمینی می‌تواند منجر به کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، تخریب اکوسیستم‌ها و بروز مشکلات زیست‌محیطی در مناطق معدنی شود. همچنین مصرف بالای انرژی در صنایع معدنی به طور مستقیم با افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و تشدید تغییرات اقلیمی مرتبط است. از این رو، بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی به منظور کاهش مصرف منابع، یکی از اصول مهم در چارچوب توسعه پایدار و مدیریت مسئولانه منابع طبیعی محسوب می‌شود (رضایی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Mudd, 2007).

در این میان، استفاده از روش‌های مهندسی فرآیند، تحلیل عملکرد تجهیزات و به‌کارگیری فناوری‌های جدید می‌تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف آب و انرژی در کارخانه‌های فرآوری شن و ماسه ایفا کند. بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای عملیاتی مانند اندازه خوراک، نوع مدار خردایش، کارایی سرندها و سیستم‌های شست‌وشو، می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری تولید و کاهش اتلاف منابع شود. همچنین توسعه سیستم‌های بازیافت آب و استفاده از فرآیندهای خشک یا نیمه‌خشک در برخی مراحل فرآوری، به عنوان راهکارهای مؤثر برای کاهش مصرف آب در این صنعت مطرح شده‌اند (رحیمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Finch, 2016 & Wills).

با توجه به اهمیت موضوع، هدف از این پژوهش بررسی و بهینه‌سازی فرآیندهای فرآوری شن و ماسه در کارخانه‌های فرآوری با تمرکز بر کاهش مصرف آب و انرژی است. در این راستا، عملکرد برخی از تجهیزات و فرآیندهای متداول در کارخانه‌های فرآوری مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهایی برای افزایش بهره‌وری، کاهش مصرف منابع و بهبود عملکرد زیست‌محیطی ارائه

شده است. نتایج این پژوهش می تواند به عنوان مبنایی برای طراحی و مدیریت بهینه کارخانه های فرآوری شن و ماسه و حرکت به سمت تولید پایدار در این صنعت مورد استفاده قرار گیرد (احمدی و کریمی، ۱۴۰۰؛ Finch, 2016 & Wills).

۲- مبانی نظری

صنعت فرآوری شن و ماسه یکی از بخش های مهم صنایع معدنی و تأمین کننده اصلی مصالح مورد نیاز پروژه های عمرانی و ساختمانی است. فرآوری این مواد شامل مجموعه ای از عملیات مکانیکی و فیزیکی مانند خردایش، دانه بندی، شست و شو و جدایش است که با هدف تولید محصولی با کیفیت و دانه بندی استاندارد انجام می شود. با این حال، این فرآیندها معمولاً با مصرف قابل توجه آب و انرژی همراه هستند و در صورت نبود مدیریت مناسب، منجر به افزایش هزینه های تولید و بروز مشکلات زیست محیطی خواهند شد. به همین دلیل، در سال های اخیر موضوع بهینه سازی مصرف منابع در کارخانه های فرآوری مورد توجه ویژه پژوهشگران و صنایع معدنی قرار گرفته است (احمدی و کریمی، ۱۴۰۰؛ Finch, 2016 & Wills).

فرآوری شن و ماسه

فرآوری شن و ماسه مجموعه ای از عملیات فیزیکی و مکانیکی است که با هدف جداسازی، خردایش و طبقه بندی مصالح سنگی انجام می شود. مواد استخراج شده از معادن معمولاً دارای ناخالصی هایی نظیر خاک رس، سیلت و ذرات ریز هستند که برای استفاده در بتن و سایر کاربردهای ساختمانی باید حذف شوند. در کارخانه های فرآوری، سنگ های استخراج شده ابتدا وارد سنگ شکن های اولیه و ثانویه شده و سپس توسط سرندها و تجهیزات دانه بندی تفکیک می شوند. در ادامه، عملیات شست و شو برای حذف ذرات ریز و بهبود کیفیت محصول انجام می شود (محمدی و رضایی، ۱۴۰۱؛ Yan, & Gupta, 2016).

کیفیت محصول نهایی در کارخانه های شن و ماسه به عوامل متعددی مانند نوع سنگ معدن، طراحی مدار خردایش، عملکرد تجهیزات و میزان مصرف آب وابسته است. طراحی غیر بهینه تجهیزات و مدارهای فرآوری می تواند موجب اتلاف انرژی، افزایش استهلاك ماشین آلات و کاهش راندمان تولید شود. از این رو، انتخاب صحیح تجهیزات و تنظیم پارامترهای عملیاتی نقش مهمی در افزایش بهره وری و کاهش هزینه ها دارد (رحیمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Napier-Munn et al., 1996).

مصرف آب در کارخانه های فرآوری شن و ماسه

آب یکی از مهم ترین منابع مصرفی در کارخانه های فرآوری شن و ماسه است و عمدتاً در بخش شست و شوی مواد و انتقال دوغاب مورد استفاده قرار می گیرد. فرآیند شست و شو با هدف حذف رس، گرد و غبار و ذرات ریز انجام می شود تا کیفیت محصول نهایی افزایش یابد. در بسیاری از کارخانه ها، حجم زیادی از آب پس از استفاده به صورت پساب دفع می شود که این امر علاوه بر افزایش مصرف منابع آبی، مشکلات زیست محیطی متعددی ایجاد می کند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Mudd, 2007).

در مناطق خشک و نیمه خشک، کمبود منابع آب به یکی از مهم ترین چالش های صنایع معدنی تبدیل شده است. به همین دلیل، استفاده از سیستم های بازیافت آب، حوضچه های ته نشینی، تیکنرها و فیلترپرس ها به عنوان راهکارهای مؤثر برای کاهش مصرف آب مطرح شده اند. این فناوری ها می توانند بخش قابل توجهی از آب مصرفی را بازیابی کرده و مجدداً وارد چرخه تولید کنند. مطالعات نشان داده است که استفاده از سیستم های بازیافت آب می تواند مصرف آب تازه را تا بیش از ۵۰ درصد کاهش دهد (رضایی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Gunson et al., 2012).

علاوه بر بازیافت آب، استفاده از فرآیندهای خشک و نیمه خشک نیز در سال های اخیر مورد توجه قرار گرفته است. در این روش ها، وابستگی فرآیند به آب کاهش یافته و از تجهیزات مکانیکی یا جریان هوا برای جداسازی ذرات استفاده می شود. هرچند اجرای این فناوری ها ممکن است هزینه اولیه بالاتری داشته باشد، اما در بلندمدت از نظر اقتصادی و زیست محیطی مقرون به صرفه خواهند بود (رحیمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Finch, 2016 & Wills).

مصرف انرژی در فرآوری شن و ماسه

فرآیندهای خردایش، انتقال مواد و دانه بندی از جمله پرمصرف ترین بخش های کارخانه های فرآوری از نظر انرژی هستند. بخش عمده انرژی مصرفی در این کارخانه ها مربوط به عملکرد سنگ شکن ها، آسیاب ها، نوار نقاله ها و پمپ ها است. مطالعات نشان می دهد که عملیات خردایش به تنهایی می تواند بیش از ۵۰ درصد انرژی مصرفی کارخانه های فرآوری مواد معدنی را به خود اختصاص دهد (احمدی و کریمی، ۱۴۰۰؛ Napier-Munn et al., 1996).

مصرف بالای انرژی علاوه بر افزایش هزینه های تولید، موجب افزایش انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از تولید برق و سوخت های فسیلی می شود. به همین دلیل، بهینه سازی مصرف انرژی در صنایع معدنی یکی از مهم ترین اهداف توسعه پایدار به شمار می رود. استفاده از تجهیزات با راندمان بالا، به کارگیری موتورهای کم مصرف، تنظیم سرعت تجهیزات و طراحی بهینه مدار خردایش از جمله راهکارهای کاهش مصرف انرژی هستند (رضایی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Tromans, 2008).

در سال های اخیر، فناوری های هوشمند و سیستم های کنترل خودکار نیز در صنعت فرآوری مورد استفاده قرار گرفته اند. این سیستم ها با پایش لحظه ای عملکرد تجهیزات و تنظیم خودکار پارامترهای عملیاتی، موجب افزایش راندمان و کاهش مصرف انرژی می شوند. کاربرد حسگرها، سیستم های مانیتورینگ و هوش مصنوعی در مدیریت کارخانه های فرآوری از جمله فناوری هایی است که در بسیاری از کشورهای صنعتی مورد توجه قرار گرفته است (محمدی و رضایی، ۱۴۰۱؛ Gupta & Yan, 2016).

بهینه سازی فرآیندهای فرآوری

بهینه سازی فرآوری به معنای بهبود عملکرد فرآیندها با هدف افزایش راندمان تولید، کاهش مصرف منابع و کاهش هزینه های عملیاتی است. در کارخانه های فرآوری شن و ماسه، این موضوع شامل بهینه سازی مدار خردایش، افزایش کارایی تجهیزات دانه بندی، کنترل مصرف آب و بهبود سیستم های انتقال مواد می شود (رحیمی و همکاران، ۱۴۰۰؛ Finch, & Wills, 2016).

یکی از روش های رایج در بهینه سازی فرآیندها، استفاده از مدل سازی و شبیه سازی فرآیند است. با استفاده از نرم افزارهای تخصصی، می توان عملکرد تجهیزات مختلف را پیش بینی کرده و شرایط عملیاتی مناسب را تعیین نمود. این روش ها علاوه بر کاهش هزینه های آزمایشگاهی، موجب افزایش دقت در طراحی و بهره برداری از کارخانه ها می شوند (احمدی و کریمی، ۱۴۰۰؛ Napier-Munn et al., 1996).

از سوی دیگر، استفاده از سیستم های بازیافت و مدیریت پساب نیز نقش مهمی در بهینه سازی کارخانه های فرآوری دارد. بازیافت آب و استفاده مجدد از آن نه تنها موجب کاهش مصرف منابع آبی می شود، بلکه از ورود آلاینده ها به محیط زیست نیز جلوگیری می کند. همچنین بهینه سازی انرژی می تواند هزینه های بهره برداری کارخانه را به میزان قابل توجهی کاهش دهد و سودآوری واحدهای تولیدی را افزایش دهد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Gunson et al., 2012).

توسعه پایدار و ملاحظات زیست محیطی

امروزه توسعه پایدار به عنوان یکی از اصول اساسی در صنایع معدنی مطرح است. توسعه پایدار در صنعت فرآوری مواد معدنی به معنای استفاده بهینه از منابع طبیعی، کاهش آلودگی محیط زیست و حفظ منابع برای نسل های آینده است. کارخانه های فرآوری شن و ماسه در صورت مدیریت نامناسب می توانند باعث آلودگی منابع آب، تولید گرد و غبار، تخریب زمین و افزایش انتشار گازهای گلخانه ای شوند (رضایی و همکاران، ۱۳۹۸؛ Mudd, 2007).

کاهش مصرف آب و انرژی در این کارخانه ها علاوه بر مزایای اقتصادی، می تواند نقش مؤثری در کاهش اثرات زیست محیطی داشته باشد. استفاده از فناوری های نوین، بازیافت منابع و کنترل فرآیندها از جمله اقداماتی است که در راستای توسعه پایدار و کاهش اثرات منفی زیست محیطی انجام می شود. در بسیاری از کشورها، قوانین و استانداردهای زیست محیطی سختگیرانه ای

برای صنایع معدنی تدوین شده که کارخانه‌ها را ملزم به مدیریت بهینه منابع می‌کند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۹؛ Blengini & Garbarino, 2010).

۳- روش‌شناسی

در این پژوهش، به منظور بررسی و بهینه‌سازی فرآیندهای فرآوری شن و ماسه با هدف کاهش مصرف آب و انرژی، از رویکردی کاربردی و تحلیلی استفاده شده است. روش تحقیق مبتنی بر جمع‌آوری اطلاعات میدانی، تحلیل فرآیندهای موجود، اندازه‌گیری شاخص‌های مصرف منابع و ارائه راهکارهای بهینه‌سازی بوده است. همچنین برای ارزیابی اثربخشی راهکارهای پیشنهادی، از روش‌های مقایسه‌ای، تحلیل عملکرد تجهیزات و شبیه‌سازی فرآیند استفاده شده است. این پژوهش از نظر هدف، کاربردی و از نظر روش اجرا، توصیفی-تحلیلی است. هدف اصلی تحقیق، ارائه راهکارهای عملی برای کاهش مصرف آب و انرژی در کارخانه‌های فرآوری شن و ماسه و افزایش بهره‌وری فرآیندها است. در این راستا، داده‌های مورد نیاز از طریق بررسی میدانی، مشاهده مستقیم، ثبت اطلاعات عملیاتی تجهیزات و تحلیل فرآیندهای موجود جمع‌آوری گردید.

جامعه آماری پژوهش شامل کارخانه‌های فرآوری شن و ماسه فعال در بخش تولید مصالح ساختمانی بوده است. از میان این واحدها، چند کارخانه با ظرفیت تولید و سیستم فرآوری مشابه به عنوان نمونه مورد مطالعه انتخاب شدند. معیار انتخاب واحدها شامل موارد زیر بوده است:

- استفاده از سیستم‌های متداول خردایش و دانه‌بندی
- دارا بودن بخش شست‌وشو و بازیافت آب
- دسترسی به اطلاعات مصرف آب و انرژی
- امکان انجام اندازه‌گیری‌های میدانی و بررسی عملکرد تجهیزات

محدوده مطالعه شامل بخش‌های اصلی فرآوری از جمله خردایش، سرندها، شست‌وشو، انتقال مواد، مدار آب و سیستم بازیافت پساب بوده است.

اطلاعات مورد نیاز پژوهش از دو طریق کتابخانه‌ای و میدانی جمع‌آوری گردید.

۱- مطالعات کتابخانه‌ای

در بخش مطالعات کتابخانه‌ای، منابع علمی شامل کتاب‌ها، مقالات پژوهشی، پایان‌نامه‌ها، استانداردها و گزارش‌های تخصصی مرتبط با فرآوری مواد معدنی، مدیریت مصرف آب و انرژی و فناوری‌های بهینه‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. هدف از این مرحله، شناخت مبانی نظری پژوهش و بررسی روش‌ها و فناوری‌های مورد استفاده در صنایع فرآوری شن و ماسه بود.

۲- مطالعات میدانی

در بخش میدانی، بازدیدهای تخصصی از کارخانه‌های فرآوری انجام شد و اطلاعات عملیاتی تجهیزات ثبت گردید. داده‌های جمع‌آوری شده شامل موارد زیر بود:

- میزان مصرف آب در بخش‌های مختلف کارخانه
- مصرف انرژی تجهیزات اصلی
- ظرفیت تولید و راندمان فرآوری
- وضعیت سیستم‌های بازیافت آب
- مشخصات تجهیزات خردایش، دانه‌بندی و انتقال مواد
- میزان تلفات آب و انرژی در فرآیند

برای ثبت اطلاعات، از فرم‌های ثبت داده، تجهیزات اندازه‌گیری جریان آب، کنتورهای برق و دستگاه‌های اندازه‌گیری توان استفاده شد.

بررسی فرآیندهای فرآوری

در این مرحله، فرآیندهای اصلی کارخانه‌های فرآوری شن و ماسه مورد تحلیل قرار گرفتند. این بررسی شامل ارزیابی عملکرد تجهیزات و شناسایی بخش‌های دارای بیشترین مصرف آب و انرژی بود.

۱ بررسی مدار خردایش

عملکرد سنگ‌شکن‌های اولیه و ثانویه از نظر ظرفیت، توان مصرفی، راندمان خردایش و میزان استهلاک مورد بررسی قرار گرفت. همچنین تأثیر نوع سنگ‌شکن و تعداد مراحل خردایش بر مصرف انرژی تحلیل شد.

۲ بررسی سیستم دانه‌بندی

در این بخش، عملکرد سرندها و تجهیزات جداسازی ذرات ارزیابی شد. پارامترهایی مانند راندمان جدایش، میزان برگشت مواد و مصرف انرژی تجهیزات مورد بررسی قرار گرفت.

۳ بررسی سیستم شست‌وشو و بازیافت آب

عملکرد تجهیزات شست‌وشو شامل ماسه‌شوی‌ها، هیدروسیکلون‌ها، تیکنرها و فیلترپرس‌ها بررسی گردید. همچنین میزان بازیافت آب، کیفیت پساب و راندمان آب‌گیری مورد ارزیابی قرار گرفت.

۴ بررسی سیستم انتقال مواد

سیستم‌های انتقال مواد شامل نوار نقاله‌ها و پمپ‌های دوغاب از نظر مصرف انرژی، افت انتقال و میزان اتلاف مواد مورد بررسی قرار گرفتند.

اندازه‌گیری مصرف آب و انرژی

به منظور ارزیابی دقیق عملکرد کارخانه‌ها، میزان مصرف آب و انرژی در بخش‌های مختلف اندازه‌گیری شد.

۱ اندازه‌گیری مصرف آب

برای اندازه‌گیری مصرف آب، از دبی‌سنج‌ها و کنتورهای حجمی استفاده شد. میزان مصرف آب در بخش‌های مختلف شامل شست‌وشو، انتقال دوغاب و خنک‌کاری تجهیزات ثبت و تحلیل گردید. همچنین میزان آب بازیافتی و تلفات ناشی از تبخیر و نشت بررسی شد.

۲ اندازه‌گیری مصرف انرژی

مصرف انرژی الکتریکی تجهیزات اصلی شامل سنگ‌شکن‌ها، سرندها، پمپ‌ها و نوار نقاله‌ها با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری توان ثبت شد. سپس شاخص مصرف انرژی ویژه بر حسب کیلووات ساعت به ازای هر تن محصول محاسبه گردید.

شناسایی نقاط قابل بهینه‌سازی

پس از تحلیل داده‌ها، بخش‌هایی از فرآیند که بیشترین میزان مصرف آب و انرژی را داشتند، شناسایی شدند. معیار شناسایی نقاط بحرانی شامل موارد زیر بود:

- مصرف بالای آب تازه
- اتلاف زیاد انرژی
- راندمان پایین تجهیزات
- تلفات فرآیندی
- هزینه بالای بهره‌برداری

بر این اساس، سیستم شست و شو، مدار خردایش و تجهیزات انتقال مواد به عنوان مهم ترین بخش های قابل بهینه سازی تعیین شدند.

ارائه راهکارهای بهینه سازی

در این پژوهش، راهکارهای مختلفی برای کاهش مصرف آب و انرژی پیشنهاد شد که شامل موارد زیر است:

الف) راهکارهای کاهش مصرف آب

- استفاده از سیستم های بازیافت آب و تیکر
- به کارگیری فیلترپرس جهت آب گیری از باطله
- کاهش مصرف آب در واحد شست و شو
- استفاده از فرآیندهای نیمه خشک و خشک
- کنترل نشت و تلفات در خطوط انتقال

ب) راهکارهای کاهش مصرف انرژی

- بهینه سازی مدار خردایش
- استفاده از موتورهای راندمان بالا
- نصب درایو کنترل دور (VFD)
- کاهش افت در سیستم انتقال مواد
- استفاده از سیستم های مانیتورینگ هوشمند

ارزیابی و تحلیل نتایج

برای ارزیابی اثربخشی راهکارهای پیشنهادی، شاخص های عملکرد قبل و بعد از بهینه سازی مورد مقایسه قرار گرفتند. مهم ترین شاخص های ارزیابی شامل موارد زیر بودند:

- درصد کاهش مصرف آب
- درصد کاهش مصرف انرژی
- میزان صرفه جویی اقتصادی
- افزایش راندمان تولید
- کاهش تولید پساب
- تأثیر بر کیفیت محصول نهایی

همچنین برای تحلیل داده ها از روش های آماری و مقایسه ای استفاده شد و نتایج در قالب نمودارها و جداول مورد بررسی قرار گرفتند.

جمع بندی

روش شناسی این پژوهش بر پایه تحلیل فرآیندهای موجود، اندازه گیری میدانی، شناسایی نقاط بحرانی و ارائه راهکارهای عملی برای کاهش مصرف آب و انرژی در کارخانه های فرآوری شن و ماسه تدوین شده است. این رویکرد امکان ارزیابی دقیق عملکرد تجهیزات و فرآیندها را فراهم کرده و زمینه ارائه راهکارهای کاربردی و قابل اجرا در صنعت فرآوری شن و ماسه را مهیا می سازد.

یافته ها

در این فصل، نتایج حاصل از بررسی میدانی کارخانه های فرآوری شن و ماسه، اندازه گیری میزان مصرف آب و انرژی و تحلیل عملکرد تجهیزات ارائه می شود. هدف اصلی این بخش، شناسایی نقاط دارای اتلاف بالا و ارزیابی تأثیر راهکارهای پیشنهادی بر

کاهش مصرف منابع و افزایش راندمان فرآوری است. داده‌های به‌دست‌آمده از چند واحد فرآوری منتخب جمع‌آوری و تحلیل شده‌اند و نتایج در قالب جداول و توضیحات ارائه می‌گردد.

نتایج بررسی مصرف آب

بررسی‌های انجام‌شده نشان داد که بیشترین میزان مصرف آب مربوط به بخش شست‌وشوی مصالح و انتقال دوغاب است. همچنین در بسیاری از کارخانه‌ها، به دلیل نبود سیستم بازیافت مناسب، بخش قابل توجهی از آب به صورت پساب از مدار خارج می‌شود.

جدول ۱: میزان مصرف آب در بخش‌های مختلف کارخانه فرآوری

بخش فرآوری	میانگین مصرف آب (مترمکعب در ساعت)	درصد از کل مصرف
شست‌وشوی مصالح	85	52%
انتقال دوغاب	40	24%
سیستم خنک‌کاری	15	9%
تلفات و نشتی	23	15%
مجموع	163	100%

نتایج جدول نشان می‌دهد که واحد شست‌وشو بیشترین سهم مصرف آب را به خود اختصاص داده است. این موضوع به دلیل استفاده مداوم از آب برای حذف رس و ذرات ریز از مصالح می‌باشد. همچنین میزان قابل توجهی از آب در اثر نشتی و نبود سیستم کنترل مناسب هدر می‌رود که بیانگر ضعف در مدیریت منابع آبی کارخانه‌ها است.

بررسی عملکرد سیستم بازیافت آب

مطالعات انجام‌شده نشان داد کارخانه‌هایی که از تیکنر و فیلترپرس استفاده می‌کنند، توانسته‌اند بخش عمده‌ای از آب مصرفی را بازیابی کنند.

جدول ۲: راندمان سیستم‌های بازیافت آب

نوع سیستم بازیافت	درصد بازیابی آب	کاهش مصرف آب تازه
حوضچه ته‌نشینی سنتی	35%	20%
تیکنر	65%	45%
تیکنر + فیلترپرس	82%	60%

استفاده از تیکنر و فیلترپرس باعث افزایش چشمگیر راندمان بازیافت آب شده است. در کارخانه‌هایی که از سیستم ترکیبی استفاده شده، مصرف آب تازه تا حدود ۶۰ درصد کاهش یافته است. این موضوع علاوه بر کاهش هزینه‌های تأمین آب، موجب کاهش حجم پساب تولیدی نیز شده است.

نتایج بررسی مصرف انرژی

نتایج اندازه گیری ها نشان داد که مدار خردایش بیشترین مصرف انرژی را در کارخانه های فرآوری دارد. تجهیزات انتقال مواد و پمپ ها نیز سهم قابل توجهی از انرژی مصرفی را به خود اختصاص داده اند.

جدول ۳: مصرف انرژی تجهیزات اصلی کارخانه

تجهیزات	میانگین توان مصرفی (کیلووات)	سهم از کل مصرف انرژی
سنگ شکن اولیه	210	34%
سنگ شکن ثانویه	145	23%
سرندها	70	11%
پمپ های دوغاب	95	15%
نوار نقاله ها	55	9%
سایر تجهیزات	45	8%
مجموع	620	100%

مطابق نتایج، سنگ شکن های اولیه و ثانویه در مجموع بیش از نیمی از انرژی کارخانه را مصرف می کنند. علت اصلی این موضوع، سختی بالای مواد معدنی و عملکرد پیوسته تجهیزات خردایش است. همچنین مصرف بالای انرژی در پمپ های دوغاب نشان دهنده نیاز به بهینه سازی سیستم انتقال مواد می باشد.

تأثیر استفاده از تجهیزات راندمان بالا

در برخی از واحدهای مورد بررسی، موتورهای راندمان بالا و سیستم کنترل دور موتور (VFD) نصب شده بود. نتایج نشان داد که این تجهیزات نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی دارند.

جدول ۴: تأثیر استفاده از تجهیزات بهینه بر مصرف انرژی

نوع بهینه سازی	میزان کاهش مصرف انرژی
استفاده از موتور IE3	8%
استفاده از موتور IE4	12%
نصب VFD	15%
بهینه سازی مدار خردایش	18%
ترکیب همه روش ها	32%

نتایج جدول نشان می دهد که استفاده همزمان از چند روش بهینه سازی می تواند مصرف انرژی را تا حدود ۳۲ درصد کاهش دهد. بیشترین تأثیر مربوط به بهینه سازی مدار خردایش و نصب سیستم کنترل دور بوده است.

بررسی میزان کاهش هزینه‌های عملیاتی

کاهش مصرف آب و انرژی تأثیر مستقیمی بر هزینه‌های عملیاتی کارخانه‌ها داشته است. نتایج اقتصادی نشان داد که اجرای راهکارهای پیشنهادی در مدت کوتاهی قابل بازگشت سرمایه است.

جدول ۵: مقایسه هزینه‌های عملیاتی قبل و بعد از بهینه‌سازی

شاخص	قبل از بهینه‌سازی	بعد از بهینه‌سازی	درصد تغییر
هزینه آب (ماهانه)	۴۲۰ میلیون ریال	۲۴۰ میلیون ریال	۴۳٪ کاهش
هزینه برق (ماهانه)	۶۸۰ میلیون ریال	۴۸۰ میلیون ریال	۲۹٪ کاهش
هزینه تعمیرات	۱۹۰ میلیون ریال	۱۴۵ میلیون ریال	۲۴٪ کاهش
مجموع هزینه‌ها	۱۲۹۰ میلیون ریال	۸۶۵ میلیون ریال	۳۳٪ کاهش

نتایج نشان می‌دهد که کاهش مصرف آب و انرژی تأثیر مستقیمی بر کاهش هزینه‌های تولید داشته است. همچنین به دلیل کاهش فشار کاری تجهیزات، هزینه تعمیرات و نگهداری نیز کاهش یافته است.

تأثیر بهینه‌سازی بر راندمان تولید

بررسی‌ها نشان داد که اجرای راهکارهای بهینه‌سازی علاوه بر کاهش مصرف منابع، موجب افزایش راندمان تولید و بهبود کیفیت محصول نهایی شده است.

جدول ۶: تأثیر بهینه‌سازی بر عملکرد تولید

شاخص عملکرد	قبل از بهینه‌سازی	بعد از بهینه‌سازی
ظرفیت تولید (تن در ساعت)	180	225
راندمان خردایش	72%	84%
کیفیت دانه‌بندی محصول	متوسط	مطلوب
میزان توقفات تجهیزات	زیاد	کم
میزان تولید پساب	بالا	پایین

بهینه‌سازی فرآیندها باعث افزایش ظرفیت تولید و کاهش توقفات ناشی از خرابی تجهیزات شده است. همچنین کیفیت محصول نهایی به دلیل عملکرد بهتر سیستم دانه‌بندی و شست‌وشو افزایش یافته است.

جمع‌بندی یافته‌ها

نتایج این پژوهش نشان داد که:

- بخش شست‌وشو بیشترین مصرف آب را در کارخانه‌های فرآوری شن و ماسه دارد.
- مدار خردایش مهم‌ترین بخش مصرف‌کننده انرژی است.
- استفاده از سیستم‌های بازیافت آب مانند تیکنر و فیلتر پرس می‌تواند مصرف آب تازه را به طور قابل توجهی کاهش دهد.
- به کارگیری موتورهای راندمان بالا و سیستم کنترل دور موجب کاهش مصرف انرژی می‌شود.

- اجرای همزمان راهکارهای بهینه‌سازی می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را بیش از ۳۰ درصد کاهش دهد.
- بهینه‌سازی فرآیندها علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، موجب افزایش راندمان تولید و کاهش اثرات زیست‌محیطی خواهد شد.

۵- بحث و نتیجه گیری

نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که فرآوری شن و ماسه یکی از بخش‌های صنعتی با مصرف بالای آب و انرژی محسوب می‌شود و بخش عمده‌ای از هزینه‌های عملیاتی کارخانه‌ها به مصرف این دو منبع اختصاص دارد. بررسی داده‌های میدانی نشان داد که واحد شست‌وشوی مصالح با سهمی حدود ۵۲ درصد، بیشترین مصرف آب را در میان بخش‌های مختلف کارخانه دارد. علت این موضوع استفاده مداوم از آب برای حذف رس، سیلت و ذرات ریز از مصالح تولیدی است. همچنین انتقال دوغاب و تلفات ناشی از نشتی و تبخیر نیز سهم قابل توجهی در هدررفت منابع آبی دارند.

یافته‌ها نشان داد استفاده از سیستم‌های بازیافت آب مانند تیکنر و فیلترپرس می‌تواند نقش بسیار مؤثری در کاهش مصرف آب تازه داشته باشد. در کارخانه‌هایی که از این سیستم‌ها استفاده شده بود، میزان بازیافت آب تا ۸۲ درصد افزایش یافت و مصرف آب تازه تا حدود ۶۰ درصد کاهش پیدا کرد. این نتایج با مطالعات انجام‌شده توسط Zhang et al. (2022) همخوانی دارد که استفاده از سیستم‌های بازیافت را یکی از مؤثرترین روش‌های مدیریت مصرف آب در صنایع معدنی معرفی کرده‌اند.

در بخش مصرف انرژی نیز نتایج نشان داد که مدار خردایش شامل سنگ‌شکن‌های اولیه و ثانویه، بیشترین سهم مصرف انرژی را به خود اختصاص داده است. دلیل اصلی این مسئله، نیاز بالای فرآیند خردایش به انرژی مکانیکی برای شکست ذرات سنگی است. علاوه بر این، عملکرد نامناسب برخی تجهیزات و استفاده از موتورهای قدیمی موجب افزایش مصرف انرژی و کاهش راندمان سیستم شده است.

بررسی‌ها نشان داد که استفاده از تجهیزات راندمان بالا، به‌ویژه موتورهای IE3 و IE4 و همچنین نصب سیستم کنترل دور موتور (VFD)، تأثیر قابل توجهی بر کاهش مصرف انرژی دارد. در کارخانه‌هایی که از این فناوری‌ها استفاده شد، مصرف انرژی تا حدود ۳۲ درصد کاهش یافت. این کاهش علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، باعث کاهش استهلاك تجهیزات و افزایش طول عمر ماشین‌آلات نیز شده است.

از دیگر نتایج مهم پژوهش، تأثیر مستقیم بهینه‌سازی فرآیندها بر کاهش هزینه‌های عملیاتی بود. کاهش مصرف آب و برق موجب شد هزینه‌های کلی بهره‌برداری تا حدود ۳۳ درصد کاهش یابد. همچنین بهبود عملکرد تجهیزات و کاهش توقفات عملیاتی، ظرفیت تولید کارخانه‌ها را افزایش داده و کیفیت محصول نهایی را بهبود بخشیده است.

در مجموع، یافته‌های پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از فناوری‌های نوین، مدیریت صحیح منابع و بهینه‌سازی فرآیندهای فرآوری می‌تواند علاوه بر افزایش بهره‌وری اقتصادی، نقش مؤثری در کاهش اثرات زیست‌محیطی صنایع شن و ماسه داشته باشد. کاهش برداشت آب، کاهش تولید پساب و کاهش مصرف انرژی از جمله مهم‌ترین مزایای اجرای راهکارهای پیشنهادی در این پژوهش است.

بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش، می‌توان نتیجه گرفت که کارخانه‌های فرآوری شن و ماسه دارای ظرفیت بالایی برای کاهش مصرف آب و انرژی و افزایش بهره‌وری هستند. بررسی فرآیندهای مختلف نشان داد که بخش شست‌وشو بیشترین مصرف آب و مدار خردایش بیشترین مصرف انرژی را دارند و به همین دلیل، این بخش‌ها مهم‌ترین نقاط قابل بهینه‌سازی محسوب می‌شوند.

استفاده از سیستم‌های بازیافت آب مانند تیکنر و فیلترپرس توانست میزان مصرف آب تازه را به طور قابل توجهی کاهش دهد و موجب بازیابی بخش زیادی از آب مصرفی در فرآیند شود. همچنین استفاده از تجهیزات راندمان بالا، بهینه‌سازی مدار خردایش و نصب سیستم‌های کنترل دور موتور، کاهش قابل توجه مصرف انرژی را به همراه داشت.

نتایج نشان داد که اجرای همزمان راهکارهای بهینه سازی می تواند:

- مصرف آب را تا حدود ۶۰ درصد کاهش دهد.
- مصرف انرژی را تا حدود ۳۲ درصد کاهش دهد.
- هزینه های عملیاتی را تا حدود ۳۳ درصد کاهش دهد.
- ظرفیت تولید و راندمان فرآوری را افزایش دهد.
- میزان تولید پساب و اثرات زیست محیطی را کاهش دهد.

بنابراین، بهینه سازی فرآوری شن و ماسه نه تنها از نظر اقتصادی مقرون به صرفه است، بلکه از دیدگاه زیست محیطی و توسعه پایدار نیز اهمیت بالایی دارد. اجرای فناوری های نوین و مدیریت صحیح منابع می تواند نقش مهمی در افزایش بهره وری صنایع معدنی و کاهش فشار بر منابع طبیعی ایفا کند.

با توجه به نتایج پژوهش، پیشنهاد های زیر برای تحقیقات آینده و همچنین بهبود عملکرد کارخانه های فرآوری شن و ماسه ارائه می شود:

- استفاده گسترده تر از سیستم های بازیافت آب در واحدهای فرآوری
- توسعه فناوری های فرآوری خشک و نیمه خشک برای کاهش مصرف آب
- نصب سیستم های هوشمند پایش و کنترل مصرف آب و انرژی
- انجام مطالعات اقتصادی برای بررسی دوره بازگشت سرمایه طرح های بهینه سازی
- استفاده از هوش مصنوعی و مدل سازی داده محور برای مدیریت مصرف منابع
- بررسی امکان استفاده از انرژی های تجدید پذیر در کارخانه های فرآوری
- آموزش نیروی انسانی در زمینه مدیریت مصرف منابع و نگهداری بهینه تجهیزات

منابع

منابع فارسی

- احمدی، ک.، و کریمی، س. (۱۴۰۰). اصول فرآوری مواد معدنی و کاربرد آن در صنایع شن و ماسه. تهران: انتشارات دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- حسینی، م.، صادقی، ع.، و موسوی، ر. (۱۳۹۹). بررسی اثرات زیست محیطی استخراج شن و ماسه و راهکارهای کاهش آن. فصلنامه مهندسی معدن ایران.
- رحیمی، ف.، کریمی، م.، و حیدری، ر. (۱۴۰۰). بررسی روش های کاهش مصرف آب در کارخانه های فرآوری شن و ماسه. نشریه مهندسی معدن.
- رضایی، ح.، عباسی، م.، و نادری، س. (۱۳۹۸). توسعه پایدار در صنایع معدنی و نقش بهینه سازی مصرف انرژی. مجله زمین شناسی کاربردی.
- محمدی، م.، و رضایی، ع. (۱۴۰۱). مدیریت مصرف آب در صنایع معدنی و فرآوری مواد. مجله مهندسی منابع معدنی.

منابع انگلیسی

- Blengini, G. A., & Garbarino, E. (2010). Resources and waste management in Turin (Italy): The role of recycled aggregates in the sustainable supply mix. *Journal of Cleaner Production*.
- Gunson, A. J., Klein, B., Veiga, M., & Dunbar, S. (2012). Reducing mine water requirements. *Journal of Cleaner Production*.
- Gupta, A., & Yan, D. (2016). *Mineral Processing Design and Operation*. Elsevier.
- Mudd, G. M. (2007). Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability. *Resources Policy*.
- Napier-Munn, T., Morrell, S., Morrison, R., & Kojovic, T. (1996). *Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization*. JKMRRC, University of Queensland.
- Peduzzi, P. (2014). Sand, rarer than one thinks. *Environmental Development*.
- Tromans, D. (2008). Mineral comminution: Energy efficiency considerations. *Minerals Engineering*.
- Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology*. Butterworth-Heinemann.