مجله محیط زیست و توسعه فرابخشی
Journal homepage: https://www.envjournal.ir

مدلسازی حسابداری جریان هزینه-مواد و تحلیل چرخه عمر واحد کنسانتره صنعت ذوب روی ایران به منظور کاهش آلودگی‌های محیط‌زیستی

حمید سرخیل*[۱]، مهدیه رضازاده بلگوری[۲]، روانبخش شیردم[۳]، یوسف عظیمی[۳]

۱*- گروه زمین شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران (مسؤول مکاتبات)

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی -HSE، گروه محیط زیست انسانی، دانشکده محیط زیست، کرج، ایران

۳- گروه مهندسی محیط زیست و پایش آلاینده ها، پژوهشکده محیط زیست و توسعه پایدار، سازمان حفاظت محیط زیست، تهران، ایران

نوع مقاله:
پژوهشی

تاریخچه مقاله:
دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۸
پذیرش: ۱۴۰۲/۰۱/۲۰

کلمات کلیدی:
مدلسازی حسابداری جریان هزینه- مواد، چرخه عمر فرآیند، ذوب روی، آلودگی محیط‌زیستی، سیما پرو

چکیده

پیشینه و هدف: طیف گسترده‌ای از مزایای استفاده از حسابداری جریان هزینه- مواد در کشورهای در حال توسعه قابل مشاهده است. به‌طوری‌که به شرکت‌ها کمک می‌کند تا هزینه‌های پنهان خود را شناسایی نمایند، تلفات، ضایعات و اثرات محیط‌زیستی را کاهش دهند و باعث افزایش کیفیت و رقابت پذیری محصول، بهبود فرآیندها و همچنین بهره‌وری منابع شوند. معدن‌کاری روی و صنایع مرتبط به آن مانند تولید کنسانتره و ذوب روی به دلیل آلودگی‌های فراوان ازجمله آلودگی آب‌های سطحی و زیرزمینی به واسطه عناصر سنگین موجود در شیرابه، نیازمند تحلیل چرخه عمر فرآیندی دارند. به‌طوری‌که با شناسایی دقیق فرآیندهای جاری در این حوزه، با بهره‌گیری از روش مدلسازی حسابداری جریان هزینه-مواد می‌توان ورودی وخروجی‌ها را به صورت دقیق مورد ارزیابی اقتصادی و تحلیل اثرات محیط‌زیستی قرار داد.

مواد و روش‌ها: در این تحقیق ضمن بازدید از واحدهای صنعتی ذوب روی و دریافت نظر کارشناسان و تلفیق با پایگاه داده نرم افزار سیما پرو، مدل چرخه حیات و شبکه چرخه عمر محصول و تأثیرات محیط‌زیستی آن تهیه شده است. با تحلیل چرخه حیات صنعت ذوب روی ایران و با استفاده از بهره‌وری سبز و محاسبه جریان هزینه - مواد در واحد نمونه انتخابی، به ردیابی جریان مواد پرداخته شده و مدلی برای چرخه حیات روی ارائه شده است. به‌طوری‌که از اطلاعات دریافتی از صنعت ذوب روی ایران و هم‌چنین اطلاعات پایگاه داده نرم افزار سیما پرو و پیاده سازی مدل MFCA بر روی داده‌های مرتبط با تولید کنسانتره و ذوب روی استفاده شده است. در این مدل فرآیندهای ذوب روی و تولید کنسانتره روی به عنوان ورودی و انتشار گازهای گلخانه‌ای به عنوان خروجی در نظر گرفته شد.

نتایج: با تحلیل چرخه حیات صنعت ذوب روی ایران و با استفاده از بهره‌وری سبز بر طبق رابطه تعادل مواد ترکیب کلسین با اسید سولفوریک به تولید کیک لیچ، نقره، سرب و آلودگی هوا منجر خواهد شد و برآوردهای تحقیق حاضر نشان می‌دهد که برای تولید یک تن شمش روی، میزان آلودگی هوا ۷ کیلوگرم خواهد بود. حسابداری هزینه جریان مواد در واحد لیچینگ مجموعه صنعتی مورد نظر نشان می‌دهد که

* پست الکترونیکی نویسنده مسؤول: Sarkheil@khu.ac.ir

به‌ازاء ۵۰۷۰ کیلوگرم مواد ورودی با هزینه یا بهاء ۱۲،۳۵۰،۰۰۰ تومان، هزینه سیستم ۳۰،۰۰۰،۰۰۰ تومانی و هزینه انرژی ۱،۹۵۰،۰۰۰ تومانی به مقدار تولید ۳۵۴۹ کیلوگرم محصول با هزینه یا بهاء ۹،۱۰۰،۰۰۰ تومان دست می‌یابد، به‌طوری‌که ۱۵۳۶ کیلوگرم هم تولید باطله با هزینه ۳،۲۵۰،۰۰۰ تومان ارزیابی گردیده است.

بحث: با ارائه الگوهای کامل چرخه حیات برای فرآیند ذوب روی و به صورت ویژه فرآیند کنسانتره ذوب روی، ورودی و خروجی‌های زنجیره تولید مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج ارزیابی چرخه عمر و بهره‌وری سبز، نشان می‌دهد که ذوب روی آلودگی بیشتری نسبت به تولید کنسانتره ایجاد می‌نماید. بنابراین با دستیابی دقیق به هزینه جریان مواد اشاره شده، در فرآیند تولید کنسانتره ذوب روی می‌تواند ضمن به حداقل رساندن تلفات، با کاهش میزان آلایندگی محیط‌زیستی، ضمن کاهش هزینه‌های مستقیم، با افزودن بر مقدار ستانده اقتصادی موجب رشد و توسعه مجموعه شود.

مقدمه

روی، فلزی به رنگ سفید مایل به آبی یا نقره‌ای است که در پوسته زمین یافت می‌شود. این فلز به صورت اشکال تجاری متنوعی مانند: شمش، کلوخه ورق و سیم گلوله‌ای، میله‌ای، دانه‌ای و پولکی ارائه می‌گردد. این فلز از آن دسته از با ارزش‌ترین فلزاتی می‌باشد که در صنایع مختلف به کار می‌رود. این فلز در ساختار اقتصادی هر کشور جهت تولید و تکمیل انواع فرآورده‌های صنعتی نقش اساسی دارد. یکی از منابع دستیابی به این عنصر مهم، استخراج از معادن سرب و روی می‌باشد (Sarkheil & Hassani, 2009). به منظور بررسی و کنترل فرآیند ذوب روی می‌توان چرخه عمر فرآیند را مورد پایش قرار داد (Awuah-Offei & Adekpedjou, 2011) و از بهره‌وری سبز جهت دستیابی به سطوح بالاتری از بهره‌وری برای رفع نیازهای جامعه و حفاظت و بهبود محیط‌زیست چه در سطح محلی چه در سطح جهانی استفاده نمود. برای پایداری لازم است تا بهبود بهره‌وری با پیشگیری از آلودگی و برنامه‌های کنترلی یکپارچه شود (Razeghi & Mobaraghi Dinan, 2011). بهره‌وری سبز روشی برای توسعه عملکرد محیط‌زیستی و بهره‌وری برای ایجاد شرایط اجتماعی و اقتصادی پایدار می‌باشد (Kendall, 2012). ایجاد اصول بهره‌وری سبز در سال ۱۹۹۴ در میان برنامه‌ای برای مراقبت از جنبه‌های محیط‌زیستی سازمان‌های تولیدی آسیایی، تحت برنامه‌ریزی و حمایت ویژه‌ای توسط کشور ژاپن آغاز شد. بسیاری از کارشناسان کشورهای آسیایی در پیروی از روش‌شناسی که به بهبود این نوع از بهره‌وری کمک می‌کند، مشارکت دارند. این روش شامل شش مرحله شروع، طرح‌ریزی، تولید و ارزیابی گزینه‌های بهره‌وری سبز، پیاده‌سازی گزینه‌های بهره‌وری سبز، نظارت و بررسی و در نهایت تقویت آن می‌باشد (ISO 14051, 2014).

ارزیابی محیط‌زیستی تولید سرب و روی با استفاده از چرخه عمر (LCA) بسیار با اهمیت می‌باشد. به طوری‌که همراه با شناسایی ریسک‌های فعالیت‌های انجام شده و تعیین ارتباط بین این ریسک‌ها با استفاده از تحلیل بیزین می‌تواند ارتباط مؤثری بین ریسک‌ها و هم‌چنین درجه اولویت آن‌ها پیدا کرد (Magyar, 2018). هم‌چنین می‌توان از سه فاز اصلی فعالیت معدنی در حوزه ارزیابی محیط‌زیستی یعنی بازسازی، بهبود و بازگشت به حالت اول به عنوان گام‌های اساسی چرخه حیات صنعت معدن‌کاری نام برد که در مسیر حرکت به سوی توسعه پایدار خواهد بود (Sarkheil & Rahbari, 2015).

اولین فهرست چرخه حیات عنصر روی در سال ۱۹۹۸ و در اروپای غربی ایجاد شد. هم‌چنین اولین مطالعه چرخه عمر برای فلز روی، با غلظت بالا در سال ۲۰۰۹ انجام شده است (Awuah & Adekpedjou, 2011; Sabol & Fukan, 2013; Khasrin & Bunfill, 2009). بررسی جریان مواد فرآیندها در اواخر دهه ۱۹۹۰ در آلمان توسعه یافت و از سال ۱۹۹۷در ژاپن به طرز گسترده‌ای به اجرا در آمد که بر ردیابی باطله، آلودگی‌ها و محصولات فرعی تمرکز دارد و می‌تواند به افزایش عملکرد اقتصادی و محیط‌زیستی سازمان‌ها کمک کند (Sabol *et al.*, 2013). محاسبه جریان هزینه- مواد ابزاری مدیریتی است، برای افزایش شفافیت جریان مواد که عاملی کلیدی برای حل موفق

مشکلات و بهبود آن‌ها می‌باشد یعنی کارخانه‌ها و سازمان‌ها می‌توانند بهره‌وری منابع‌شان را افزایش داده و هزینه‌ها را هم‌زمان کاهش دهند (ISO 14051, 2014).

در تحقیق دیگری در زمینه چرخه حیات تولید سرب و روی، تولید آن را یکی از فاکتورهای مهم در انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلودگی هوا و مصرف آب دانسته ولی بهره‌وری سبز و هزینه جریان مواد را مورد استفاده قرار نگرفته است (Guo *et al.*, 2002; Pineda-Henson & Culaba, 2004).

بهره‌وری سبز و محاسبه جریان هزینه- مواد در اواخر دهه ۱۹۹۰ در آلمان توسعه یافت و از سال ۱۹۹۷در ژاپن به نوع گسترده‌ای به اجراء در آمد که بر ردیابی باطله، آلودگی‌ها و محصولات جانبی تمرکز دارد و می‌تواند به افزایش عملکرد اقتصادی و محیط‌زیستی سازمان‌ها کمک نماید (Khasreen *et al.*, 2009). رشد بهره‌وری سبز در معادن و صنایع معدنی به عنوان یک راه حل اساسی برای کمک دستیابی به توسعه پایدار می‌باشد که صرفه‌جویی در استفاده از منابع معدنی بسیار کلیدی می‌باشد (Jin *et al.*, 2022). هم‌چنین محاسبات هزینه - منفعت با در نظر گرفتن مباحثی چون مالکیت خصوصی و دولتی و هم‌چنین استراتژی‌های نوآورانه می‌تواند در رشد بهره‌وری سبز و توسعه پایدار صنایع معدنی بسیار مؤثر باشد (Yu *et al.*, 2022)، در بسیاری از سازمان‌ها و صنایع، کاهش اثرات محیط‌زیستی، راهبردی هزینه‌بر تلقی گردیده و اجبار ناشی از مقررات و دستورالعمل‌های ملی و بین‌المللی به عنوان نیروی محرکه اجرای آن‌ها شناخته می‌شوند. بر خلاف این دیدگاه MFCA راهبردی را ارائه می‌نماید که طی آن کاهش اثرات محیط‌زیستی همراه با سود اقتصادی حاصل می‌گردد (Tachikawa, 2014). محاسبه جریان هزینه- مواد ابزاری است مدیریتی برای افزایش شفافیت جریان مواد که عاملی کلیدی برای حل موفق مشکلات و بهبود آن‌ها می‌باشد، یعنی کارخانه‌ها و سازمان‌ها می‌توانند بهره‌وری منابع در اختیار خود را افزایش داده و هزینه‌ها را هم زمان کاهش دهند به‌طوری‌که بهره‌وری افزایش یابد (Genderen *et al.*, 2016). طیف گسترده‌ای از مزایای استفاده از حسابداری جریان هزینه- مواد در کشورهای در حال توسعه قابل مشاهده است. به‌طوری‌که به شرکت‌ها کمک می‌کند تا هزینه‌های پنهان خود را شناسایی نمایند، تلفات، ضایعات و اثرات محیط‌زیستی را کاهش دهند و باعث افزایش کیفیت و رقابت‌پذیری محصول، بهبود فرآیندها و هم‌چنین بهره‌وری منابع شوند (Tran & Herzig, 2020; Burritt *et al.*, 2019). هم‌چنین می‌توان این نوع حسابداری اجزاء هزینه و مواد را یکی از اصول اساسی در دستیابی به فرآیندهای پایدار صنایع به شمار آورد (Chattinnawat *et al.*, 2018).

مطالعات فراوانی با استفاده از ارزیابی چرخه حیات برای شناسایی پیامدهای محیط‌زیستی در زمینه‌های مختلف ازجمله پسماندهای شهری، کشاورزی، ارزیابی چرخه حیات در زمینه تولید فولاد از آهن قراضه انجام شده است. علی‌رغم کاربرد روزافزون ارزیابی چرخه حیات برای ارزیابی مهندسی سیستم‌ها و محصولات، کاربرد ارزیابی چرخه حیات در صنعت معدن محدود است. در این تحقیق با به‌دست آوردن چرخه حیات صنعت ذوب روی ایران و با استفاده از بهره‌وری سبز و محاسبه جریان هزینه - مواد در واحد نمونه کنسانتره ذوب روی انتخابی، به ردیابی جریان مواد پرداخته شده و مدلی برای چرخه حیات و سیاهه حیات عنصر روی ارائه شده است. هم‌چنین در بخش دیگری از تحقیق با استفاده از نرم‌افزار کاربردی سیما پرو، مدل MFCA بر روی داده‌های مرتبط با تولید کنسانتره و ذوب روی پیاده سازی می‌شود.

مواد و روش‌ها

طبق استانداردهای ایزو ۱۴۰۴۰ و ایزو ۱۴۰۴۴، ارزیابی چرخه حیات در چهار مرحله‌ی تعیین هدف و دامنه کاربرد، تجزیه و تحلیل سیاهه، ارزیابی پیامد، تفسیر انجام می‌شود.

در تعیین اهداف تحقیق به چرایی و چگونگی یک مطالعه ارزیابی چرخه حیات پرداخته می‌شود. سیاهه چرخه حیات یا همان فهرست ورودی‌ها و خروجی‌های چرخه حیات که اصطلاحاً به آن یا همان LCI گفته می‌شود. ارزیابی پیامد چرخه حیات، بخشی از ارزیابی چرخه حیات است که هدف آن ارزیابی بزرگی و اهمیت پیامدهای بالقوه محیط‌زیستی یک سیستم به واسطه چرخه حیات آن محصول می‌باشد. نقطه عطف فهرست چرخه حیات

اطلاعاتی است که از سیاهه چرخه حیات بدست می‌آید که این خود مسأله‌ای کلیدی است. تفسیر ارزیابی چرخه حیات آخرین بخش از مطالعه ارزیابی چرخه حیات است که در آن نتایج بدست آمده به صورت ترکیبی منابع بحرانی پیامدها و گزینه‌هایی برای کاهش آن‌ها ارائه می‌دهد (ISO 14040, 2006 & ISO 14044, 2006).

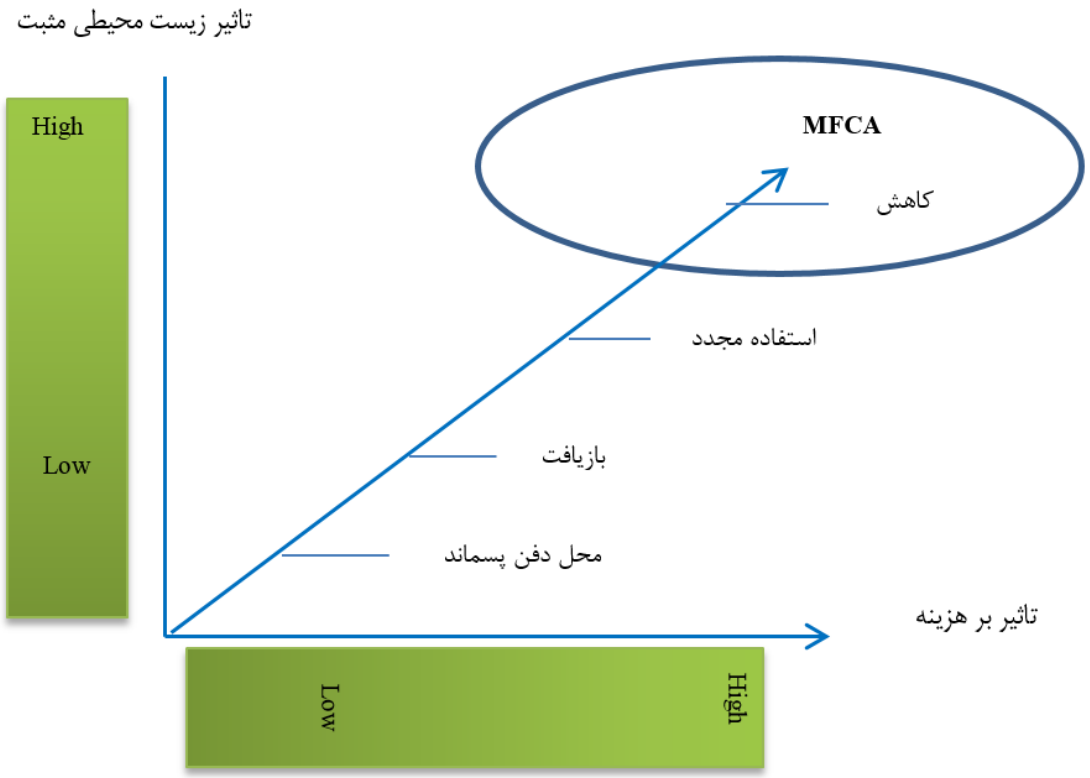
نرم‌افزار سیماپرو در واقع یک نرم‌افزار اقتصادی است که توسط مشاوران شرکت پری هلند ارائه شده است. این نرم افزار ابزارهای حرفه‌ای را برای جمع‌آوری، ارزیابی و پایش کارایی محیط‌زیستی محصولات، فرآیندها و خدمات مهیا می‌کند. این نرم‌افزار شامل گستره نامحدودی از داده‌های فراوان، شفاف و با کیفیتی از اکثر مواد مورد استفاده معمول و فرآیندهای آن‌ها می‌باشد. پایگاه داده اکو اینونت شامل پایگاه داده چند منظوره بیش از ۲۷۰۰ فرآیند می‌باشد. سیماپرو با استفاده از ماتریس معکوس محاسبات مربوط به نظام تولید را انجام می‌دهد. به موجب آن، در نتیجه از الگوریتم‌های با کارایی بسیار بالا استفاده می‌کند که امکان محاسبه هزاران فرآیند در ارتباط با یک محصول را فراهم می‌نماید. نرم‌افزار تجزیه و تحلیل چرخه عمر سیماپرو می‌تواند ردپای کربن در بسیاری از محصولات و سیستم‌ها را محاسبه کند. این نرم‌افزار با استفاده از پارامترهای قابل تنظیم و قابلیت‌های تحلیلی مونت کارلو، حتی می‌تواند تأثیر بالقوه محیطی را که یک سیستم یا خدمات با دقت آماری تولید می‌کند، تعیین نماید.

برنامه‌های بهره‌وری سبز به منظور ارتقاء سطوح بهره‌وری برای حفظ نیازهای جوامع است که همگام با حفاظت و ارتقاء کیفیت محیط زیست به انجام می‌رسد. بهره‌وری سبز صنایع را به رقابت پذیری بیشتر، خلاقیت بالاتر و مسؤولیت‌های محیط‌زیستی بیشتر سوق می‌دهد. از لحاظ محلی، تعیین پیشرفت بهره‌وری سبز از اهمیت حیاتی برخوردار است. بدین سبب وجود شاخص‌های ویژه بسیار حائز اهمیت است. دو شاخص مطرح در مورد بهره‌وری سبز عبارتند از ارزیابی چرخه حیات و حسابداری هزینه جریان مواد (شکل ۱)، در واقع بهره‌وری سبز عبارت است از نسبت بهره‌وری سامانه به اثرات محیط‌زیستی آن سامانه، بهره‌وری برحسب کارایی اقتصادی با استفاده از ارزیابی هزینه کل و اثرات محیط زیستی آن با استفاده از روش‌شناسی استاندارد ارزیابی چرخه حیات به انجام می‌رسد. این نسبت نه تنها هزینه‌ها و منافع را در زمان حال مشخص می‌سازد، بلکه اثرات محیط‌زیستی فعالیت‌ها را نیز مشخص می‌کند. اگر نسبت بهره‌وری سبز بزرگتر از یک باشد، این امر بیانگر آن است که اقدامات جایگزین از اقدامات فعلی از منظر آن مناسب‌تر است (ISO 14051, 2014).

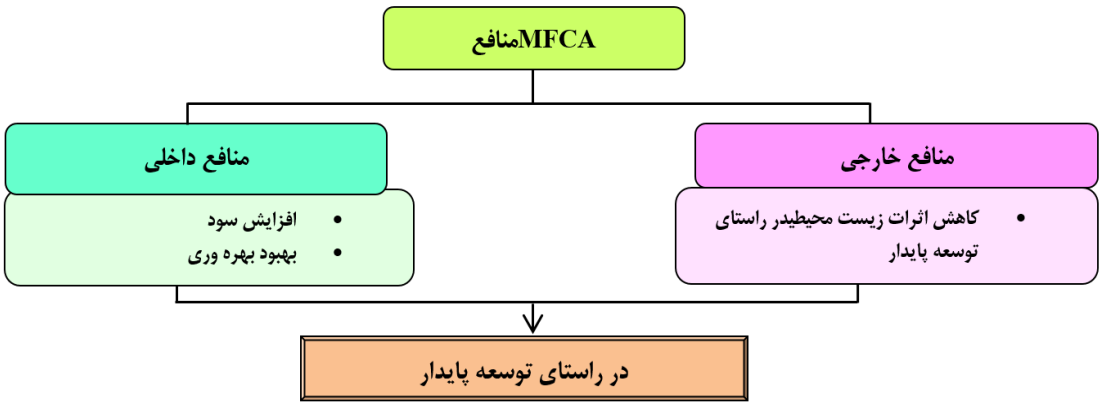
با توجه به تأکید MFCA برکاهش ضایعات که سبب افزایش بهره‌وری مواد و انرژی می‌شود سود حاصل دارای جنبه‌های داخلی و خارجی است (شکل ۲).

به کارگیری حسابداری هزینه جریان مواد برای یک خط تولید، تصویر واضحی از مشکلات کارخانه را نمایان می‌سازد که با حل آن‌ها شرکت می‌تواند میزان پسماند تولیدی را کاهش دهد و بهره‌وری کارخانه خود را بهبود بخشد، بنابراین MFCA فرآیندهای استفاده مجدد و جریان برگشتی انرژی مضاعفی (نیروی انسانی و سایر منابع) نیاز دارند و به تنهایی نمی‌توانند منجر به کاهش پسماند و به صفر رسیدن مواد منتشر شده شوند. کاهش بهترین راه‌حل است؛ چرا که سازمان‌ها نیازی به صرف هزینه‌های دیگر ندارند تا هیچ پسماندی تولید نشود. روش MFCA بر روی جنبه‌های محیط‌زیستی با هدف کاهش قابل توجه هزینه تمرکز می‌کند. موادی که مواد زائد و گاز منتشر شونده را تولید می‌کنند، نباید به عنوان مواد اولیه استفاده شوند (شکل ۳).

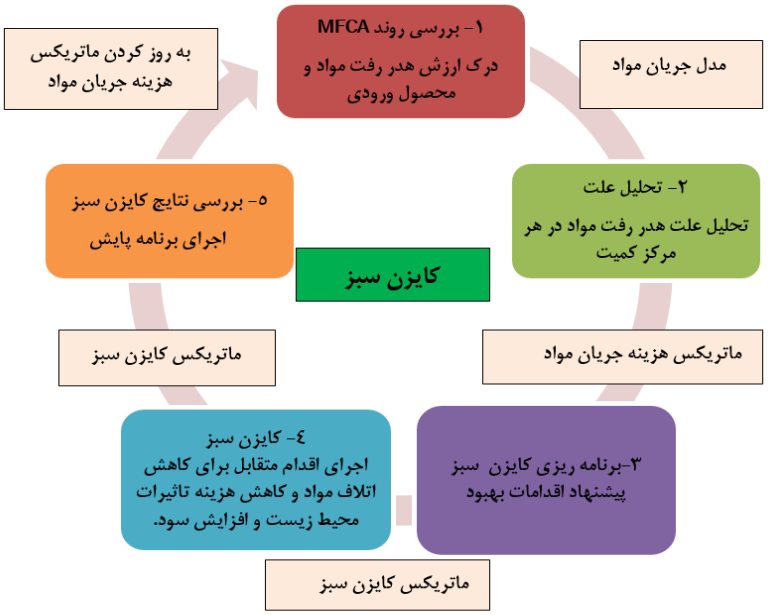
تولید کنسانتره روی: مراحل تولید کنسانتره روی شامل سه فرآیند مهم، معدنکاری، خردایش، فلوتاسیون است (شکل ۴).



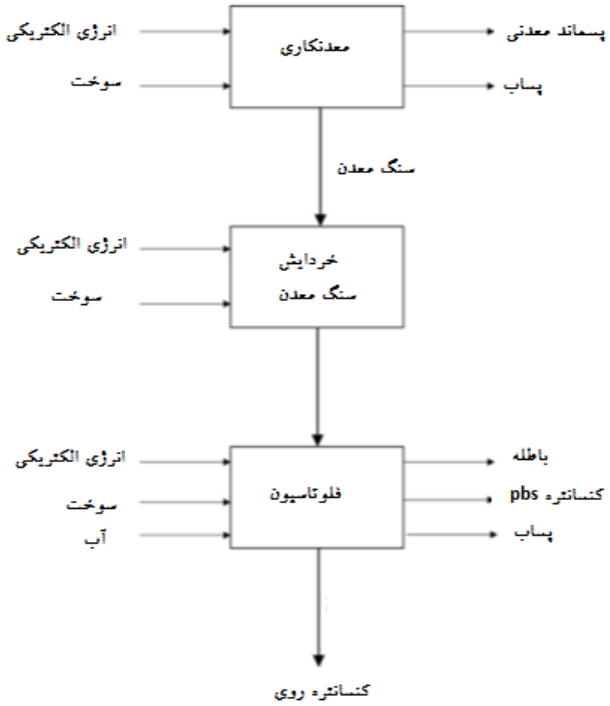
شکل ۱ – حسابداری هزینه جریان مواد



شکل ۲- منافع حسابداری هزینه جریان مواد



شکل ۳- اطلاعات کلیدی لازم برای اجرای موثر MFCA



شکل ۴- مراحل تولید کنسانتره روی

روش هیدرومتالورژی در ذوب روی: این فرآیند به نام روش هیدرومتالورژی، فرآیند Roast-Leach-Electrowin (RLE) یا فرآیند الکترولیتی شناخته می‌شود. فرآیند الکترولیز شامل ۴ مرحله است: لیچینگ، تصفیه، الکترولیز، ذوب و ریخته‌گری (Mehdilo *et al.*, 2013).

در این واحد ابتدا دمای کوره ۸۰۰ الی ۹۰۰ درجه به کمک مشعل‌های گازوئیل سوز پیشگرم خواهد شد. سپس کنسانتره سولفید روی به کمک نوار نقاله به درون واحد

تشویه فرستاده خواهد شد. با انتقال خاک به داخل کوره تشویه، گوگرد موجود در خاک شروع به سوختن کرده و گاز دی‌اکسیدگوگرد تشکیل می‌شود. گاز دی‌اکسیدگوگرد حاصل از سوختن گوگرد توسط مکنده‌های موجود در انتهای واحد از انتهای کوره خارج شده و وارد بویلر بازیافت حرارت می‌گردد و در ادامه در واحد اسیدی تولید سولفوریک اسید می‌کند. خروجی اصلی کوره تشویه خاک حدود ۶۰ درصد عیار (کلسین) می‌باشد که پس از خروج از کوره و عبور از کولر استوانه‌ای به منظور خشک شدن، وارد آسیاب بالمیل می‌شود تا به مش‌بندی مناسب برسد. پس از عبور از آسیاب بالمیل، با استفاده از پمپ‌های پنوماتیکی خاک به سیلوی کلسین با ظرفیت ۳۰۰۰ تن ارسال می‌گردد.

واحد لیچ: در این قسمت ابتدایی فرآیند، خاک مصرفی، اسیدسولفوریک، اسپنت و بخار وارد پالپ شده و سپس فرآیند لیچ اسیدی به منظور انحلال خاک صورت می‌گیرد (در این فرآیند با توجه به ناخالصی‌های موجود در آنالیز خاک مصرفی، مقداری سولفات آهن و در برخی موارد سولفات آلومینیوم تحت pH خاصی شارژ می‌گردد. در فرآیند لیچ خنثی ناخالصی‌ها از محلول سولفات روی حاصله جدا می‌شود (در این مرحله پرمنگنات‌پتاسیم افزوده شده و سپس جهت تنظیم pH محلول خنثی، دوغاب آهک اضافه می‌شود).

فرمول اصلی لیچینگ شیمیایی که این فرآیند را هدایت می‌کند مطابق رابطه ۱ می‌باشد:

$$ZnO+SO_3 \rightarrow ZnSO_4 \qquad (1)$$

این در عمل از طریق فرآیندی به نام لیچینگ مضاعف حاصل می‌شود. ابتدا کالسین در محلول خنثی یا کمی اسیدی (از اسید سولفوریک) شسته می‌شود تا روی از اکسید روی خارج شود.

سپس کلسین باقی‌مانده در اسید سولفوریک قوی شسته می‌شود تا بقیه روی از اکسید روی و فریت روی خارج شود. نتیجه این فرآیند یک جامد و مایع است؛ مایع حاوی روی است و اغلب به آن محصول لیچینگ گفته می شود. جامد به عنوان باقی‌مانده شیرابه گفته می‌شود و حاوی فلزات گرانبها (معمولاً سرب و نقره) است که به عنوان محصول جانبی فروخته می‌شوند. هم‌چنین آهن موجود در محصول لیچینگ از محلول شسته شده اسیدی وجود دارد که در مرحله میانی به شکل گوتیت، ژاروزیت و هماتیت برداشته می‌شود. در ادامه فرآیند، عناصر کادمیوم، مس، آرسنیک، آنتیموان، کبالت، ژرمانیوم، نیکل و تالیم در محصول آبشویی وجود دارد. بنابراین، نیاز به تصفیه دارد.

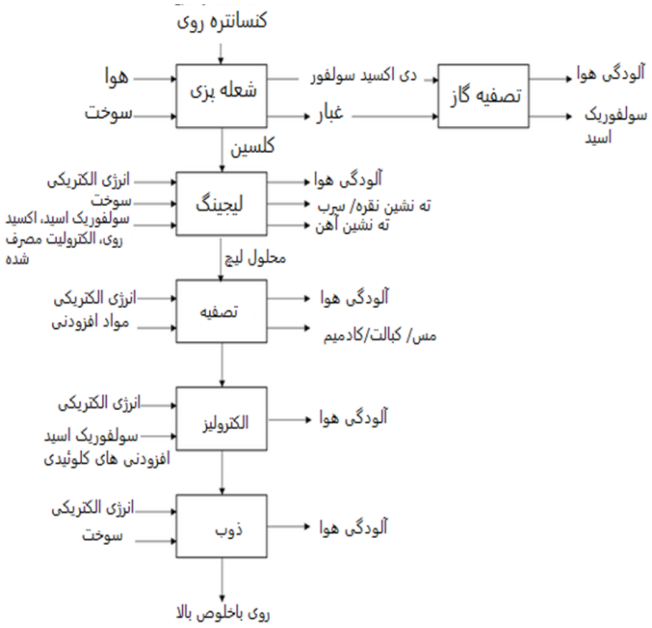
واحد تصفیه: از گرد و غبار روی و بخار برای از بین بردن مس، کادمیوم، کبالت و نیکل استفاده می‌کند و این باعث مداخله در فرآیند الکترولیز می‌شود. پس از تصفیه، غلظت این ناخالصی‌ها به کمتر از ۰/۰۵ میلی‌گرم در لیتر محدود می‌شود. تصفیه معمولاً در مخازن بزرگ همزنی انجام می‌شود. این فرآیند در دماهای بین ۴۰ تا ۸۵ درجه سانتی‌گراد انجام می‌شود و فشارهای مختلف از جو تا ۲/۴ اتمسفر (۲۴۰ کیلو پاسکال) در مقیاس مطلق، متغیر است. محصولات فرعی برای تصفیه بیشتر به فروش می‌رسند. محلول سولفات روی باید کاملاً خالص باشد تا برای الکتروونینگ مؤثر واقع شود.

واحد الکترولیز: محلول سولفات روی به علاوه سایر افزودنی‌ها به واحد الکترولیز فرستاده می‌شود تا از طریق جریان الکتریسیته یون‌های روی مثبت موجود در محلول بر روی کاتد رسوب نمایند. روی از طریق محلول سولفات روی خالص شده از طریق الکتروونینگ که نوعی خاص از الکترولیز است استخراج می‌شود. این فرآیند با عبور یک جریان الکتریکی از طریق محلول در یک سری سلول کار می‌کند. این باعث می‌شود که روی بروی کاتد (ورق‌های آلومینیوم) و اکسیژن بروی آند تشکیل شود. اسید سولفوریک نیز در این فرآیند شکل گرفته و در فرآیند شستشو مجدداً استفاده می‌شود. هر ۲۴ تا ۴۸ ساعت، هر سلول خاموش می‌شود، کاتدهای روی رویی برداشته شده و شستشو می‌شوند و روی به طور مکانیکی از صفحات آلومینیومی جدا می‌شود. ذوب روی الکتریکی حاوی چند صد سلول است. بخشی از انرژی الکتریکی به گرما تبدیل می‌شود که باعث افزایش دمای الکترولیت می‌شود. سلول‌های الکترولیتی در دما از ۳۰ تا ۳۵ درجه سانتی‌گراد و در فشار اتمسفر فعالیت می‌کنند. بخشی از الکترولیت به طور مداوم از طریق برج‌های خنک‌کننده گردش می‌کند تا هم برای خنک‌کردن و هم تغلیظ الکترولیت از طریق

تبخیر آب جریان یابد. سپس الکترولیت خنک و تغلیظ شده به سلول‌ها بازیافت می‌شود. این فرآیند تقریباً یک سوم کل مصرف انرژی هنگام ذوب روی را تشکیل می‌دهد.

واحد ذوب و ریخته‌گری: ورق روی تولید شده در واحد الکترولیز قابلیت فروش در بازار را نداشته و باید مورد عملیات ذوب و ریخته‌گری قرار گرفته و به صورت شمش درآید که این عمل در واحد ذوب صورت می‌گیرد. بسته به نوع محصولات نهایی تولید شده، کاتدهای روی که از دستگاه الکتروونینگ خارج می‌شوند می‌توانند یک مرحله تغییر شکل اضافی در کارخانه ذوب روی را تحمل کنند. کاتدهای روی در کوره های القایی، ذوب شده و به صورت محصولات قابل فروش مانند شمش قالب زده می‌شوند. سایر فلزات و اجزای آلیاژ ممکن است برای تولید آلیاژهای حاوی روی مورد استفاده در ریخته‌گری یا برنامه‌های گالوانیزه عمومی اضافه شوند. سرانجام، ممکن است روی مذاب با استفاده از ظروف عایق‌بندی شده با طراحی خاص به کارخانه‌های تبدیلی و یا اشخاص ثالث منتقل شود.

همان‌طور که در شکل ۵، مشاهده می‌شود تمامی ورودی‌ها و خروجی‌ها برای تولید روی به روش هیدرومتالورژی نمایش داده شده است.

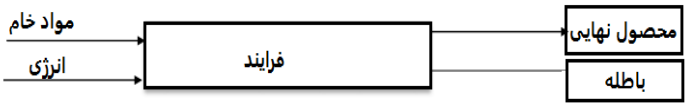


شکل۵- مراحل تولید روی به روش هیدرومتالورژی

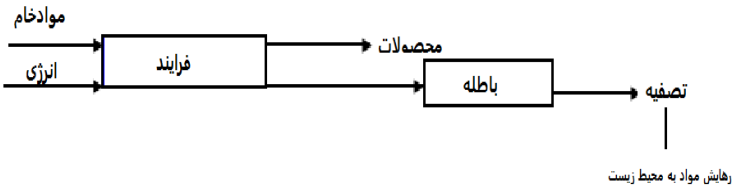
در این مرحله از تحقیق حاضر به بررسی ساختارهای ورودی و خروجی فرآیند از گذشته تا به امروز پرداخته می‌شود.

همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود می‌توان نتیجه گرفت که نداشتن اطلاعات کافی در مورد فرآیندها منجر به تولید باطله و ایجاد آلودگی شده است (شکل ۶).

فرآیندهای اخیر با پیشرفت روش‌های تصفیه ساختار از طریق صرف انرژی و هزینه به کاهش اثرات محیط‌زیستی می‌پردازد (شکل ۷).

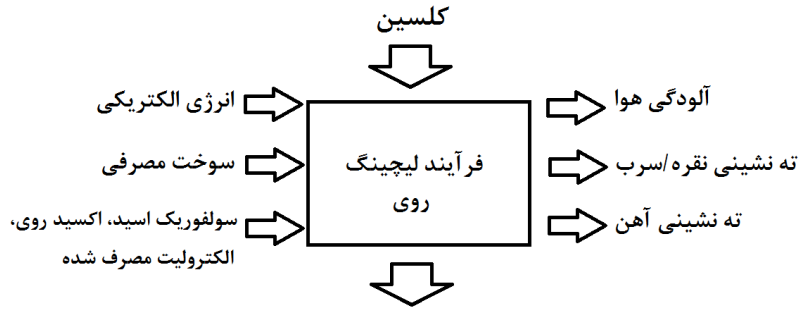


شکل۶ - ساختار فرآیند به شیوه رایج



شکل ۷ – ساختار فرآیند جدید

بر اساس محاسبه جریان هزینه - مواد، جریان‌ها و ذخایر مواد درون سازمان در واحدهای فیزیکی ردیابی و اندازه گیری می‌شوند و هزینه مربوط به آن اختصاص می‌یابد. هم‌چنین تحت محاسبه جریان هزینه - مواد، چهار نوع هزینه تعیین می‌شود: هزینه‌های مواد، هزینه‌های سیستم، هزینه‌های انرژی و هزینه‌های مدیریت پسماند. در این روش محاسباتی، کلیه موادی که به مرکز کمیت وارد می‌شوند و از آن خارج می شوند باید متعادل باشند (شکل ۸). بنابراین، برای به حساب آوردن کلیه مواد در نظر گرفته شده در تجزیه و تحلیل مربوطه، باید ورودی و خروجی مواد را تأیید نمود، در حالی که مقادیر ورودی‌های مواد را به خروجی‌ها و تغییرات موجودی موجود برای مقایسه هرگونه شکاف داده می‌پردازد. مواد مفقود شده یا سایر شکاف‌های داده‌ها می‌توانند سازمان‌ها را به شناسایی نقاط گمشده منجر به بهبود مناطق سوق دهند. همان‌طور که قبلاً بحث شد در بررسی چرخه عمر روی نمودارهای فرآیند ذوب روی تهیه شده است در این مرحله از کار می‌توان با استفاده از داده‌های بدست آمده از مراحل قبلی پروژه به بررسی جریان هزینه- مواد فرآیند ذوب روی پرداخت اما با توجه به مسائلی از قبیل محدودیت زمان و محدودیت داده یکی از فرآیندهای اساسی در ذوب روی را به عنوان مرکز کمیت انتخاب نموده و ورودی‌ها و خروجی‌های آن را از اطلاعات بدست آمده از چرخه حیات جایگذاری نموده و در نهایت مدلی برای جریان هزینه- مواد در آن بخش ارائه می‌گردد.



شکل۸- مرکز کمیت انتخاب شده

نتایج

در این تحقیق با استفاده از اطلاعات جمع آوری شده از واحد های ذوب روی زنجان، شرکت‌های معتبر در زمینه ذوب روی و داده‌های موجود در بخش رویدادهای محیط زیستی سیاهه پایگاه داده، جدول‌های ۵ گانه‌ای طراحی شده است (جدول ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵) و در ادامه سیاهه‌ی چرخه‌ی عمر برای تولید کنسانتره و ذوب روی مطابق جدول ۱ ارائه می‌گردد. به‌طوری‌که جدول شامل نتایج انرژی و روی عنصری به عنوان ورودی و انتشار گازهای گلخانه‌ای به عنوان خروجی می‌باشد.

جدول ۱ – بخشی از سیاهه چرخه حیات تولید روی

سیاهه چرخه حیات	تولید روی	واحد
(انرژی)		
منابع تجدید ناپذیر	۲۷/۳۰۱	مگاژول
نفت خام	-۴/۸۰۲	مگاژول
زغال سنگ	۱۱/۳۴۰	مگاژول
لیگنیت	۳/۱۵۳	مگاژول
گاز طبیعی	۱۱/۰۷۶	مگاژول
ذغال نارس	۲۳۱	مگاژول
اورانیوم	۶/۳۰۴	مگاژول
آهن	$۳/۹\times۱۰^{-۴}$	کیلوگرم
سرب	۰/۱۲۲	کیلوگرم
قلع	$۲/۳۴\times۱۰^{-۴}$	کیلوگرم
وانادیوم	۰/۰۰۵۱۳	کیلوگرم
روی	۰/۱۶۶	کیلوگرم

جدول ۲-آلودگی حاصل از ذوب روی

پارامتر	بیشترین مقدار (میلی گرم بر متر مکعب)
دی اکسید گوگرد	۴۰۰
آرسنیک	۰/۱
کادمیوم	۰/۰۵
مس	۰/۵
سرب	۰/۵
جیوه	۰/۰۵
روی	۱/۰

جدول ۳- پساب حاصل از ذوب روی

پارامتر	بیشترین مقدار (به غیر از pH و دما، سایر مقادیر بر حسب میلی‌گرم بر لیتر می‌باشند)
pH	۶-۹
TSS	۲۰
آرسنیک	۰/۱
کادمیوم	۰/۱
مس	۰/۵
آهن	۳/۵
سرب	۰/۱
جیوه	۰/۰۱
روی	۲/۰
کل فلزات	۵
افزایش دما	$\leq ۳^{o}C$

جدول ۴- مواد لازم برای تولید یک تن شمش

نام ماده	برای یک تن شمش(kg)
کنسانتره روی	۴۳۰۰-۴۲۰۰
سولفوریک اسید	۱۰۰۰-۸۰۰
آهک هیدراته	۲۶۰-۲۵۰
سولفات آهن	۵۰-۴۰
دی اکسید منگنز	۳۵-۳۰
سولفات آلومینیوم	۳۰-۲۵
سولفات مس	۸-۷
سرب برای آند	۳- ۲/۵
نقره برای کاتد	۰/۰۲۵ -۰/۳
سولفات منگنز	۱/۵ -۲
کربنات استرانسیوم	۰/۱۵ -۰/۲
نمک طعام	۱۶۰-۱۵۰
پرمنگنات پتاسیم	۰/۰۸- ۰/۱
پارچه فیلتر پرس	۰/۵۵ -۰/۰۵۵

جدول ۵- مقادیر مواد ورودی وخروجی لیچینگ

اسپنت (m^3)	آهن (kg)	سرب (kg)	نقره (Kg)	کیک لیچ (kg)	سولفوریک اسید(kg)	انرژی الکتریکی (kw/h)	کلسین (kg)
۲۰۰	۱۱۵۰۰	۲۵۰۰	۱۸/۷	۹۴۵۰۰	۲/۳	۰/۶	۱۰۸۵۰۵/۵

بر طبق رابطه تعادل مواد مطابق رابطه زیر، مقادیر بدست آمده جایگزین می‌شود:

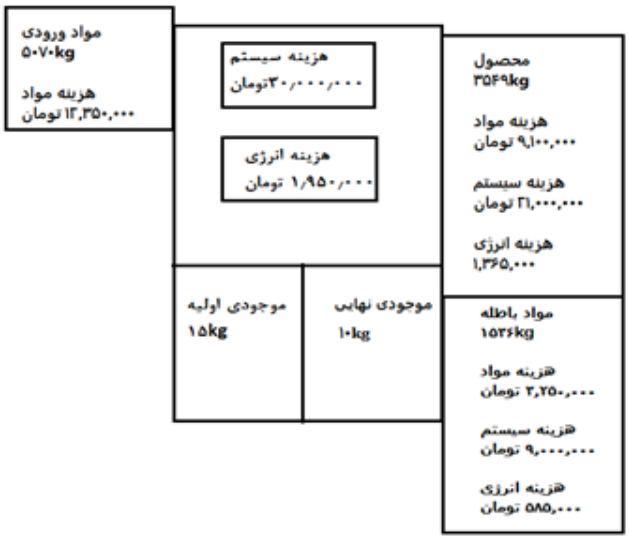
باطله + محصولات = ورودی

آلودگی هوا +سرب + نقره +کیک لیچ = کلسین +اسید سولفوریک

در تحقیق حاضر، بر اساس اطلاعات استخراج شده حاصل از پایگاه داده، میزان آلودگی هوا *kg* ۷/۸ به ازای تولید یک تن شمش روی در هر روز فعالیت تعیین گردید. هم‌چنین مواد ورودی و خروجی استخراج شده در حین فرآیند تولید یک تن شمش روی به دقت مشخص گردید، و مبالغ هزینه‌ای لیست شده از طریق شرکت‌های معتبر در زمینه صنعت ذوب روی دریافت و اعمال گردید. به گونه‌ای که این مبالغ هزینه‌ای در چندین بخش طبقه بندی می‌شوند: مانند بخش‌های مواد، انرژی، نیروی انسانی (نیروهای انسانی این بخش از واحد صنعتی مورد مطالعه، به همراه نیروی نگهداری و تعمیرات در این واحد ۱۲ نفر بودند و حقوق متوسط ماهیانه ۲,۰۰۰,۰۰۰ تومان دریافت می‌کردند) و هم‌چنین فاکتور استهلاک.

همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود مقادیر زیادی از مواد اولیه به تولید باطله ختم شده و از راه‌های مختلفی هدر می‌رود.

با استفاده از الگوی بهره‌وری سبز محاسبه گردید. لازم به ذکر است که می‌توان این محاسبات را در تمامی مراحل یک پروژه پیاده‌سازی کرد که این کار با وجود این که مستلزم زمان و اطلاعات کافی خواهد بود اما می‌تواند به ردیابی هدر رفت اعم از مواد و سرمایه بپردازد. بهره‌وری سبز بر افزایش بهره‌وری و توسعه اجتماعی- اقتصادی و حفاظت و ایمنی محیط‌زیست می‌شود و رقابت را از طریق فناوری‌های جدید افزایش می‌دهد.



شکل ۹- حسابداری هزینه جریان مواد در واحد لیچینگ

بحث

در ارزیابی چرخه عمر با استفاده از نرم‌افزار سیماپرو بار آلودگی گرمایش جهانی، پتانسیل اسیدی شدن و تخریب لایه ازن به ازای هر تن متریک تولید روی به ترتیب مقادیر ۲۶۶۰، ۱۷/۵ و ۸/۳۰ را نشان می‌دهد که نسبت به تولید کنسانتره روی آلودگی بیشتری را نشان داد. همان‌گونه که اشاره شد، فرآیند لیچینگ در صنعت ذوب به عنوان واحد نمونه انتخاب شد و محاسبه جریان هزینه-مواد را در این واحد نمونه مورد محاسبه قرار داده شد. نتایج میزان آلودگی هوا در این واحد ۷/۸ کیلوگرم را نشان داد. حسابداری هزینه جریان مواد در واحد لیچینگ مجموعه صنعتی مورد نظر نشان می‌دهد که بازاء ۵۰۷۰ کیلوگرم مواد ورودی با هزینه یا بهاء ۱۲،۳۵۰،۰۰۰ تومان، هزینه سیستم ۳۰،۰۰۰،۰۰۰ تومانی و هزینه انرژی ۱،۹۵۰،۰۰۰ تومانی به مقدار تولید ۳۵۴۹ کیلوگرم محصول با هزینه یا بهاء ۹،۱۰۰،۰۰۰ تومان دست می‌یابد، به‌طوری‌که ۱۵۳۶ کیلوگرم هم تولید باطله با هزینه ۳،۲۵۰،۰۰۰ تومان ارزیابی گردیده است. بنابراین با دستیابی دقیق به هزینه جریان مواد اشاره شده، در فرآیند تولید کنسانتره ذوب روی می‌تواند ضمن به حداقل رساندن تلفات، با کاهش میزان آلایندگی محیط‌زیستی، ضمن کاهش هزینه‌های مستقیم، با افزودن بر مقدار ستانده اقتصادی موجب رشد و توسعه مجموعه شود.

ارائه راهکارهای بهره‌ور در مجموعه تولید کنسانتره ذوب روی می‌تواند ضمن به حداقل رساندن تلفات، با کاهش میزان آلایندگی محیط‌زیستی، ضمن کاهش هزینه‌های مستقیم، با افزودن بر مقدار ستانده اقتصادی باعث رشد و توسعه مجموعه باشد. هم‌چنین با ارائه الگوهای کامل چرخه حیات برای فرآیند ذوب روی و به‌صورت ویژه فرآیند کنسانتره ذوب روی ورودی و خروجی‌های زنجیره تولید مورد ارزیابی قرار گرفت و در حین بررسی‌های میدانی و محاسباتی مواردی در جهت کاهش اثرات آسیب‌رسان به محیط‌زیست ارائه گردید از قبیل استفاده از شیوه‌های بهره‌ور مدیریت کارخانه، برای به حداقل رساندن تلفات و جلوگیری از انتشار گازهای فرار که در بررسی‌های این تحقیق نیز میزان قابل توجهی را نشان داده است؛ جلوگیری از تلفات و انتشار گرد و غبار با استفاده از ایجاد ساختمان‌های محصور برای مسیر نقاله‌ها و نقاط انتقال و تجهیزات؛ هدایت آب رواناب به حوضچه‌های مرتبط با داشتن شرایط نفوذناپذیری؛ استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت؛ عدم بازیافت میعانات، آب باران و آب فراوری شده اضافی و استفاده از آن‌ها برای شستشو، کنترل گرد و غبار؛ نمونه‌برداری مکرر برای بررسی و کنترل میزان تغییرات انتشار گازهای دی‌اکسیدگوگرد و گرد و غبار؛ کنترل پساب مایعات در دوره‌های روزانه برای pH و کل مواد جامد معلق و هم‌چنین کنترل میزان فلزات سنگین و عناصر سمی برای تمامی ضایعات جامد، باطله‌ها و شیرابه‌های موجود در بخش واحد کنسانتره صنعت ذوب روی.

منابع

1. **Awuah-Offei, K. and Adekpedjou, A., 2011.** Application of life cycle assessment in the mining industry. The International Journal of Life Cycle Assessment. 16. 82-89. https://doi.org/10.1007/s11367-010-0246-6
2. **Burritt, R.L., Herzig, C., Schaltegger, S. and Viere, T., 2022.** Diffusion of environmental management accounting for cleaner production: Evidence from some case studies. J. Clean. Prod., 224, 479–491
3. **Genderen, E. and Wildnauer, M., Santero, N., and Sidi, N., 2016.** A global life cycle assessment for primary zinc production. The International Journal of Life Cycle Assessment. 21. 10.1007/s11367-016-1131-8.
4. **Chattinnawat, W., Suriya, W. and Jindapanpisan, P., 2018.** Application of MFCA with LEAN to improve pajama production process: A case study of Confederate International Co., Ltd. In Accounting for Sustainability: Asia Pacific Perspectives; Lee, K.-H., Schaltegger, S., Eds.; Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018; pp. 209–235. ISBN 978-3-319-70898-0.
5. **Guo, X., Xiao, S., Xiao, X., Li, Q. and Yamamoto. R., 2002.** LCA case study for lead and zinc production by an imperial smelting process in China - A brief presentation. The International Journal of Life Cycle Assessment. 7. 276-276. 10.1007/BF02978887.
6. **ISO 14040, 2006.** Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, ICS /13/13.020 /13.020.10
7. **ISO 14044, 2006.** Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, ICS/13/13.020/13.020.10
8. **ISO 14051: Manual on Material Flow Cost Accounting, 2014.** First published in Japan, Asian Productivity Organization Designed by Expressions, Inc. Printed by Hirakawa Kogyosha Co., Ltd., Japan. P 37. ISBN 978-92-833-2449-2.
9. **Jin, Y., Yu, L. and Wang, Y., 2022.** Green Total Factor Productivity and Its Saving Effect on the Green Factor in China's Strategic Minerals Industry from 1998–2017. Int. J. Environ. Res. Public Health, 19, 14717. https://doi.org/10.3390/ ijerph192214717
10. **Khasreen, M.M., Banfill, P.F.G. and Menzies, G.F., 2009.** Life-Cycle Assessment and the Environmental Impact of Buildings: A Review. Sustainability, 1, 674-701.
11. **Kendall, A., 2012.** Life Cycle Assessment for Pavement: Introduction. Presentation in Minutes, FHWA Sustainable Pavement Technical Working Group Meeting, April 25-26, 2012, Davis, CA.145−156. 10.5277/ppmp130114.
12. **Mehdilo, A., Irannajad, M. and Zarei, H., 2013.** Flotation of zinc oxide ore using cationic and cationic-anionic mixed collectors. Fizykochemiczne Problemy Mineralurgii - Physicochemical Problems of Mineral Processing. 49.
13. **Pineda-Henson, R. and Culaba, A.B., 2004.** Zinc Environmental Profile Life Cycle Assessment: Int J LCA, 9: 379. https://doi.org/10.1007/BF02979081
14. **Magyar, L., 2018.** A Review of the Utility of Bayesian Network Models, the University of Akron, spring 2018.
15. **Razeghi, N. and Mobaraghi Dinan, N., 2011.** Investigation of environmental effects of mining projects and their evaluation methods, Fifth Specialized Conference on Environmental Engineering, Tehran, University of Tehran, Faculty of Environment. (In Persian).
16. **Sarkheil, H. and Hassani, H., 2009.** A new design for geoelectric surveying and inverse 1D and 2D modeling: the case of Karongah lead-zinc mine, 9th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM), Bulgaria, 637-641.
17. **Sarkheil, H. and Rahbari, S., 2015.** RRR (Reclamation, Remediation, and Recovery): Green Phases of Mining and Drilling Lifecycle Influence on and/or Influenced by Sustainable Development, European Online Journal of Natural and Social Sciences, Vol 4, No 4.
18. **Sabol, A., Sander, M. and Fučkan, D., 2013.** The concept of industry life cycle and development of business strategies.
19. **Tachikawa, H., 2014.** Manual on Material Flow Cost Accounting: ISO 14051, Asian productivity organization, p. 25. www.apo-tokyo.org
20. **Tran, T.T. and Herzig, C., 2020.** Material Flow Cost Accounting in Developing Countries: A Systematic Review. Sustainability, 12, 5413. https://doi.org/10.3390/su12135413
21. **Yu, L. and Jin, Y., 2022.** Dynamic characteristics of green development in China's mining industry and policy implications: From the perspective of firm heterogeneity. Resour. Sci. 2022, 44, 554–569. doi: 10.18402/resci.2022.03.10

Environment & Interdisciplinary Development
Journal homepage: https://www.envjournal.ir

Material Flow Cost Accounting Modeling and Life Cycle Analysis of Zinc Smelting Industry Concentrate Unit in Iran to Reduce Environmental Pollution

Hamid Sarkheil [*1], Mahdieh Rezazadeh Belgouri[2], Ravanbakhsh Shirdam[3], Yousef Azimi[3]

1*- Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran (in Charge of Correspondence)
2- Master Student of Chemical Engineering-HSE, Department of Human Environment, College of Environment, Karaj, Iran
3- Research Group of Environmental Engineering and Pollution Monitoring, Research Center for Environment and Sustainable Development, Department of Environment, Tehran, Iran

Original Article

Received: 2022.10.20

Accepted: 2023.04.09

Keywords:
Material Flow Cost Accounting Modeling,
LCA,
Zinc Smelting,
Environmental Pollution,
Sima Pro.

Abstract

Introduction: In developing countries, Material Flow Cost Accounting (MFCA) offers numerous benefits, including the identification of hidden costs, waste reduction, improved environmental outcomes, enhanced product quality and competitiveness, and increased process and resource productivity. The zinc mining industry and related activities, such as concentrate production and zinc smelting, require process life cycle analysis due to the extensive pollution they generate, including contamination of surface and underground water from heavy elements in the leachate. Through the use of MFCA modeling, it is possible to accurately evaluate the inputs and outputs of current processes in this field and analyze them for environmental effects.

Materials and Methods: This study involved visits to industrial smelting units, expert opinions, and integration with the Sima Pro software database to prepare a life cycle model and network of the product life cycle and its environmental effects. By analyzing the life cycle of Iran's zinc smelting industry, green product productivity was used to calculate the cost-material flow in the selected sample unit, track the material flow, and present a model for the life cycle of zinc. This involved utilizing information from Iran's zinc smelting industry, data from the Sima Pro software database, and the implementation of the MFCA model on information related to zinc smelting and concentrate products. In this model, zinc smelting and zinc concentrate production processes were treated as input and greenhouse gas emissions as output.

Results: Based on the material balance relationship, the combination of calcine with sulfuric acid produces leach cake, silver, lead, and air pollution.

* Corresponding Author's email: Sarkheil@khu.ac.ir

The research estimates that for the production of one ton of zinc ingot, the amount of air pollution generated is 7 kg. MFCA analysis of the leaching unit of the industrial research complex indicates that the cost of 5070 kilograms of input materials is 12,350,000 Tomans, the cost of the system is 30,000,000 Tomans, and the cost of energy is 1,950,000 Tomans. The study also found that 3549 kg of product is obtained for 9,100,000 Tomans, while 1536 kg of waste is produced at the cost of 3,250,000 Tomans. This highlights the input values, the primary product, and the secondary product.

Discussion: Through the provision of comprehensive life cycle models for the zinc smelting process, especially the zinc smelting concentrate process, the inputs and outputs of the production chain were evaluated. By accurately determining the flow cost of these materials, the process of zinc smelting concentrate production can be optimized to minimize losses, reduce environmental pollution, lower direct costs, and increase economic output, thereby leading to the growth and development of the industrial complex.