

مدل بهینه سازی بهره وری تولید با رویکرد هزینه های خارجی انتشار CO₂ در دپارتمان کوره کارخانه سیمان (مطالعه موردی)

احمد نقی لو^{۱*}

naghiloo@iaukhoy.ac.ir

سجاد امامی^۲

عطا چیت ساز خوبی^۳

محمد فتحعلیلو^۴

تاریخ پذیرش: ۹۳/۳/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۲/۴/۶

چکیده

زمینه و هدف: صنعت سیمان یکی از صنایع به شدت انرژی بر می باشد. انرژی مصرفی در این صنعت در قالب حامل های انرژی فسیلی مانند گاز طبیعی و نفت کوره است که منشا عمده انتشار CO₂ می باشد. از آن جا که CO₂ تولیدی صنعت سیمان درصد بالایی از کل انتشارات دی اکسیدکربن دنیا را داراست لذا پتانسیل بسیار زیادی برای کنترل و کاهش آن در صنعت سیمان وجود دارد.

روش بررسی: در این مقاله با توجه به تئوری بنگاه اقتصادی، مدلی جهت بهینه سازی بهره وری تولید در صنعت سیمان با لحاظ هزینه های اجتماعی تولید CO₂ ارائه گردیده است. بدین منظور علاوه بر محدودیت های فنی، رابطه ریاضی تولید CO₂ و مصرف انرژی نیز به عنوان محدودیت زیست محیطی در مدل منظور شده است.

یافته ها و نتایج: در ادامه با حل مدل بهره وری تولید توسط نرم افزار برنامه ریزی ریاضی GAMS، انتشار CO₂ کاهش ۱۵ درصدی و کل هزینه های تولید، کاهش ۶ درصدی را نشان می دهد که رقم بسیار قابل ملاحظه ای می باشد.

واژه های کلیدی: هزینه های خارجی، انتشار CO₂، بهره وری تولید، بهینه سازی، صنعت سیمان.

۱- مربی دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوی، گروه مهندسی مکانیک، خوی، ایران * (مسئول مکاتبات)

۲- مدرس گروه مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوی

۳- دانشجوی مقطع دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز

۴- دانشجوی مقطع دکتری مهندسی مکانیک دانشگاه تبریز

مقدمه

های تولید، هزینه های خارجی (زیست محیطی) نیز در آن منظور گردیده است.

توسعه مفهومی ساختار مدل بهینه سازی بهره وری تولید در

صنعت سیمان با رویکرد زیست محیطی

تولید محصول بواسطه بکارگیری عوامل مختلف تولید میسر است. ترکیب بهینه عوامل تولید بر اساس الگوی رفتاری واحد تولیدی و با عنایت به مجموعه محدودیتهای سامانه تولید شکل می گیرد. رفتار واحد تولیدی بنا بر نقش آن در اقتصاد عینیت پیدا کرده و طبق هنجارهای اقتصادی و اجتماعی سامان می یابد که بر اساس آن حداکثر کردن سود واحد تولیدی موجب می شود تولید با حداکثر کارایی شکل گیرد و منابع طبیعی و اقتصادی به بهترین وجه مورد استفاده واقع شود. حداکثر کردن سود واحد تولیدی با توجه به محدودیت منابع، مدل رفتاری واحد تولیدی را تبیین می کند. بدلیل اینکه بیشینه سازی تابع مطلوبیت تولید یا بهره وری تولید تابعی پیچیده و متشکل از متغیرهای زیادی است به جای آن از حل دوگان آن یعنی مینیمم کردن تابع هزینه استفاده می شود، زیرا مطلوبیت نسبی است و تعریف آن بر اساس پارامترهای فنی و اقتصادی واحد صنعتی بسیار مشکل است. وجه دیگر حداکثر کردن سود، بهینه سازی مصرف منابع برای تحقق مقدار معینی تولید است که تحت عنوان حداقل نمودن هزینه تولید به میزان معین تنظیم می شود. کمینه سازی هزینه تولید وجه ثانویه (دوگان) مدل رفتاری واحد تولیدی است. دوگان بودن دو روش (حداکثر کردن سود و حداقل کردن هزینه) موجب می شود که کاربرد یکی از آنها برای ارزیابی ترکیب بهینه عوامل تولید کفایت نماید. لذا بیشینه سازی (بهره وری) مطلوبیت تولید واحد صنعتی یا کمینه نمودن هزینه تولید روش مناسبی برای شناسایی نقطه بهینه کاری واحد تولیدی محسوب می گردد.

انرژی یک عامل تولید و در عین حال حامل هزینه در واحد تولیدی است. جریان انرژی بطور مستقیم بر هزینه تولید تاثیر گذاشته بطوریکه کمینه شدن هزینه تولید تحت تاثیر جریان انرژی است. از طرفی چون مصرف انرژی (فسیلی) عامل تولید CO₂ می باشد، بنابراین اگر هزینه های خارجی تولید CO₂ را هم در نظر بگیریم، از دو جهت هزینه های تولید را در بر خواهد گرفت. کمینه سازی هزینه تولید بر اساس الگوی معادلات (۱)، (۲) و (۳) انجام می گیرد (۵).

سیستم بازار بر میزان و نحوه بهره برداری از منابع قیمت گذاری شده تاثیر قابل توجهی می گذارد ولی در جهت دهی موسسات و بنگاه های تولیدی جهت استفاده موثر و کارآمد از منابع قیمت گذاری نشده (محیط زیست) ناموفق بوده است. دلیل این عدم موفقیت بازار آن است که بنگاه های اقتصادی تنها زمانی قیمت بازاری یک منبع را مدنظر قرار می دهند که راجع به میزان استفاده از آن تصمیم بگیرند. لذا زمانی که یک موسسه یا بنگاه تولیدی از یک منبع قیمت گذاری نشده محیط زیستی به صورت نامحدود بهره برداری و آن را تخریب می نماید، متضمن هزینه داخلی برای موسسه نبوده اما موجب تحمیل هزینه های خارجی بر دوش جامعه می گردد (۱).

طبق تعریف، هزینه های خارجی آن بخش از هزینه های تولید یک کالا یا خدمات می باشد که در قیمت گذاری آن لحاظ نشده است. دیدگاه بنیادین آثار خارجی بدین صورت است که اقدامات انجام گرفته از سوی یک نفر ممکن است به طرق گوناگون بر روی میزان رفاه افراد دیگر تاثیر بگذارد، به طوری که نتوان هیچ گونه نظم و رویه ای میان طرف های درگیر برقرار کرد (۱).

سابقه محاسبه و برآورد هزینه ای اجتماعی برای اولین بار به سازمان حفاظت محیط زیست آمریکا (EPA) طی سالهای ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۰ بر می گردد (۲). ابتکار عمل ایالات متحده آمریکا در محاسبه و بکارگیری هزینه های محیط زیستی در فرایند قیمت گذاری و خدمات باعث گردید تا این مسئله جایگاه خود را در سایر کشورهای دنیا پیدا کند به طوری که تاکنون چندین کشور و نهاد بین المللی اقدامات زیادی در این زمینه انجام داده اند (۲).

در بخش انرژی، هزینه های خارجی در واقع هزینه هایی هستند که به جامعه و محیط زیست در اثر تولید، انتقال، تبدیل و مصرف انرژی تحمیل شده ولی در قیمت کالا یا خدمات لحاظ نشده اند. صنعت سیمان یکی از صنایع به شدت انرژی بر می باشد به طوری که مصرف انرژی ۳۰ الی ۴۰٪ هزینه های تولید را شامل می شود (۳). بنابراین با توجه به مصرف بالای انرژی، صنعت سیمان یکی از مهم ترین آلوده کنندگان محیط زیست بوده به طوری که این صنعت سهم ۲/۴ درصدی از CO₂ تولیدی جهان را دارد (۴).

از آنجا که صنعت سیمان تاکنون به لحاظ تاثیر هزینه های زیست محیطی بر روی بهره وری تولید، مورد ارزیابی قرار نگرفته است لذا در این مقاله مدلی برای بهینه سازی بهره وری تولید در صنعت سیمان (مطالعه موردی سیمان ارومیه) ارائه شده که علاوه بر هزینه

Z: کل هزینه تولید

P: بردار قیمت های عوامل تولید

X: بردار مقدار مصرف منابع (عوامل تولید)

Q: مقدار محصول

$$\text{Min } z = PX \quad (1)$$

s. t.

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq Q \quad (2)$$

$$x_1, x_2, \dots, x_n \geq 0 \quad (3)$$

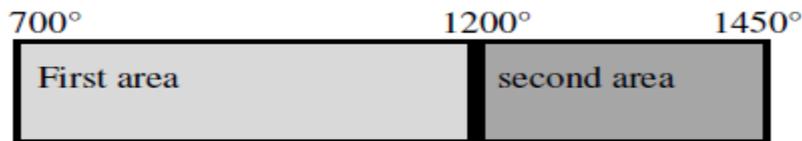
اساس فرایند پخت در کوره های سیمان را به صورت زیر دسته بندی می کنیم :

- ۱- آبیگری از کانی های رسی
 - ۲- تجزیه کربنات کلسیم و منیزیم (کلسیناسیون)
 - ۳- واکنشهای فاز جامد
 - ۴- واکنشهای در حضور فاز مایع
 - ۵- فرایندهای کریستالیزاسیون
- هر فرایند باید با مصرف میزان معینی از انرژی حرارتی در زمان مشخص صورت پذیرد که در این راه باید به سینتیک واکنشها توجه نمود.

مکانیزم بدست آوردن کل تقاضای انرژی حرارتی در کوره دوار بدین صورت است که ابتدا کوره دوار را به دو ناحیه که واکنشهای عمده تشکیل فاز در آن نواحی صورت می گیرد، تقسیم نموده سپس با بدست آوردن مجموع آنتالپی های دو ناحیه کل انرژی حرارتی را که مورد نیاز برای تشکیل فازهای اصلی کلینکر سیمان است مشخص می شود. در این مقاله از واکنشهایی که تغییرات آنتالپی آنها ناچیز است، صرف نظر نموده و صرفاً "واکنشهای اصلی در نظر گرفته شده است.

تقسیم کوره به دو قسمت عمده تشکیل فازهای کلینکر

- ۱- ناحیه اول که عمدتاً "واکنش کلسیناسیون در آن صورت می گیرد از دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد الی ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد می باشد.
- ۲- ناحیه دوم که در آن واکنشهای تشکیل فازهای اصلی سیمان تشکیل می شوند واز ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد تا ۱۴۵۰ درجه سانتیگراد می باشد. شکل ۱ تقسیم بندی ناحیه اول و دوم کوره را نشان می دهد.



شکل ۱- تقسیم بندی کوره

معادله (۵) بیانگر واکنشهای ناحیه دوم و واکنشهای عمده تشکیل فازهای کلینکر سیمان می باشد.

در مدل فوق کل هزینه تولید با توجه به محدودیتهای فنی حاکم بر عملکرد واحد حداقل می شود. هزینه تولید مجموع هزینه های عوامل تولید و هزینه های اجتماعی ناشی از آلودگی های زیست محیطی است که در رابطه مورد اشاره به صورت هزینه های سرمایه، نیروی کار، انرژی، مواد و هزینه های اجتماعی منظور شده است. نرم افزار GAMS برای حل مدلهایی از نوع برنامه ریزی ریاضی مورد استفاده قرار می گیرد. در واقع می توان از GAMS به عنوان بهترین نرم افزار حل مسائل بهینه سازی بسیار بزرگ و پیچیده نام برد که برای حل مسائل برنامه ریزی خطی LP و برنامه ریزی غیرخطی NLP کارایی بسیار بالایی دارد. در این مقاله نیز با توجه به اینکه مسئله از نوع برنامه ریزی ریاضی غیر خطی است از این نرم افزار برای حل مدل بهینه سازی استفاده شده است.

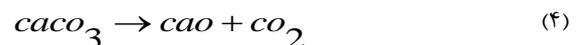
طراحی و توسعه معادلات و نامعادلات مدل

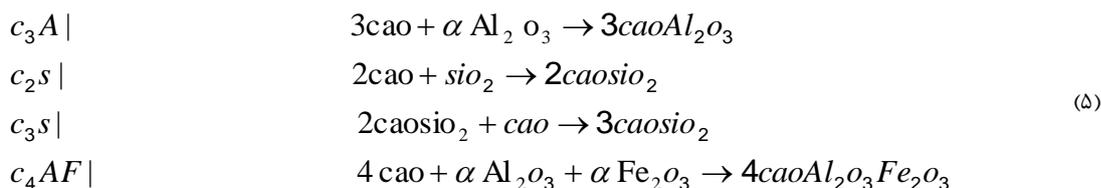
با توجه به اینکه بدست آوردن بسیاری از پارامترهای تعریف شده در معادلات و نامعادلات نیازمند دسترسی به اطلاعات ادواری و اپراتوری است، بنابراین کارخانه سیمان ارومیه به عنوان مطالعه موردی انتخاب شده است.

محدودیت (۱) محاسبه معادله میزان مصرف سوخت در کوره

در صنعت سیمان ترکیبات اصلی $CaCO_3, SiO_2, Fe_2O_3$ و رس در شروع فرایند ($200^\circ C$) ضمن ایجاد ترکیبات واسطه، چهار کانی اصلی (فازهای کلینکر سیمان) یعنی آلایت (C_3S)، بلایت (C_2S)، تری کلسیم آلومینات (C_3A) و کلسیم آلومینات فریت (C_2AF) را بوجود می آورند (۶). بر این

ناحیه اول شامل پری کلسایتر و قسمت ابتدایی کوره است. معادله (۴) واکنش کلسیناسیون که واکنشی گرماگیر می باشد و در آن ناحیه انجام می گیرد را نشان می دهد.





فرضیات اولیه جهت انجام محاسبات ترازجرم و انرژی در کوره طبق معادلات (۶) و (۷) در ذیل آمده است:

$$feed = 209.125 \frac{ton}{hr} = 209.125 \times 10^3 \frac{kg}{hr} \quad \text{مواد اولیه ورودی به کوره} \quad (6)$$

$$product = 119.625 \frac{ton}{hr} = 119.625 \times 10^3 \frac{kg}{hr} \quad \text{محصول (کلینکر) خروجی از کوره} \quad (7)$$

الف) واکنش ناحیه اول (واکنش کلسیناسیون) مقدار گرمای مورد نیاز ناحیه اول را که از ۷۰۰-۱۲۰۰ درجه سانتیگراد می باشد با لحاظ آنتالپی تشکیل به صورت معادله (۸) می باشد..

$$\Delta H_1 = 78422578.8 \text{ kcal} \Rightarrow \text{مجموع گرمای مورد نیاز جهت انجام واکنش کلسیناسیون ناحیه اول کوره} \quad (8)$$

ناحیه دوم، میزان گرماگیر یا گرماده بودن واکنش ها و مجموع گرمای آزاد شده بر اساس آنتالپی واکنش های این ناحیه به صورت معادله (۹) بدست آمده است.

ب) واکنشهای ناحیه دوم کوره (تشکیل فازهای اصلی کلینکر سیمان) ناحیه دوم، از ۱۲۰۰-۱۴۵۰ درجه سانتیگراد، که ناحیه تشکیل فازهای کلینکر سیمان می باشد طبق آنتالپی واکنش ها، جرم مواد ورودی به

$$\Delta H_2 = -3548611.5 \text{ kcal} \Rightarrow \text{مجموع گرمای آزاد شده ناحیه دوم} \quad (9)$$

$$m_{out} \times \Delta H = 74873967.3 \frac{kcal}{hr} \quad (11)$$

$$m_{out} \times \Delta H = m_f \times N.C.V \quad (12)$$

با توجه به اینکه جرم خروجی از دپارتمان کوره ۱۱۹۶۲۵ کیلوگرم بر ساعت می باشد در نتیجه معادلات (۱۳) و (۱۴) مقدار ΔH بر حسب $\frac{Gj}{kg}$ را نشان می دهند.

$$119.625 \times 10^3 \frac{kg}{hr} \times \Delta H = 74873967.3 \frac{kcal}{hr} \rightarrow \Delta H = 625.9 \frac{kcal}{kg} \quad (13)$$

در معادله (۱۵) این مقدار آنتالپی درخواستی توسط کوره با حاصلضرب جرم سوخت مورد مصرفی کارخانه در ارزش حرارتی سوخت، مساوی قرار داده شده و میزان سوخت بهینه مورد نیاز کارخانه را بدست آورده شده است.

بنابراین معادله (۱۰)، مجموع دو ناحیه اول و دوم، کل انرژی حرارتی لازم را برای انجام واکنشها و تشکیل کلینکر را نشان می دهد.

$$\Delta H_2 - \Delta H_1 = 74873967.3 \text{ kcal} \quad (10)$$

با توجه به اینکه تمامی آنتالپی های بدست آمده از دو ناحیه با لحاظ جرم خروجی بدست آمده اند در معادلات (۱۱) و (۱۲) کل انرژی حرارتی لازم را برای انجام واکنشها و تشکیل کلینکر، با سوخت مورد نیاز برای تولید این مقدار انرژی موازنه شده است.

$$625.9 \frac{kcal}{kg} \times 4.18 \frac{kJ}{kcal} \times 10^{-6} = 0.0026 \frac{Gj}{kg} \quad (14)$$

بنابراین حاصلضرب جرم خروجی از کوره در ۰.۰۰۲۶ $\frac{Gj}{kg}$ مقدار انرژی حرارتی برای تشکیل فازهای کلینکر سیمان را بدست می دهد.

برای تولید برق نیز انرژی فسیلی استفاده شده است بنابراین در صورت در نظر گرفتن برق مصرفی در حقیقت تولید دی اکسید کربن ناشی از تولید برق را نیز در نظر گرفته ایم. در این مقاله سعی بر آن است که برای افزایش دقت مدل ارتباط کلینکر تولید شده واحد کوره و برق مصرفی این واحد را از طریق رگرسیون بدست آوریم تا در مدل بهینه سازی بهره وری تولید به عنوان یکی از محدودیتها در نظر گرفته شود. برای اینکه دقت رگرسیون بالا باشد آمار انرژی الکتریکی مصرفی و کیلوگرم کلینکر تولیدی دپارتمان کوره برای سالهای ۸۷، ۸۸ و ۸۹ در نظر گرفته شده است. شکل ۲ نشان دهنده میزان مصرف انرژی الکتریکی و مقدار کلینکر تولیدی در واحد کوره کارخانه سیمان ارومیه می باشد.

$$m_f = \frac{m_{out} \times 0.0026}{N.C.V} \quad (15)$$

$$N.C.V = \text{ارزش حرارتی سوخت مصرفی (مازوت) بر حسب } \frac{Gj}{Kg}$$

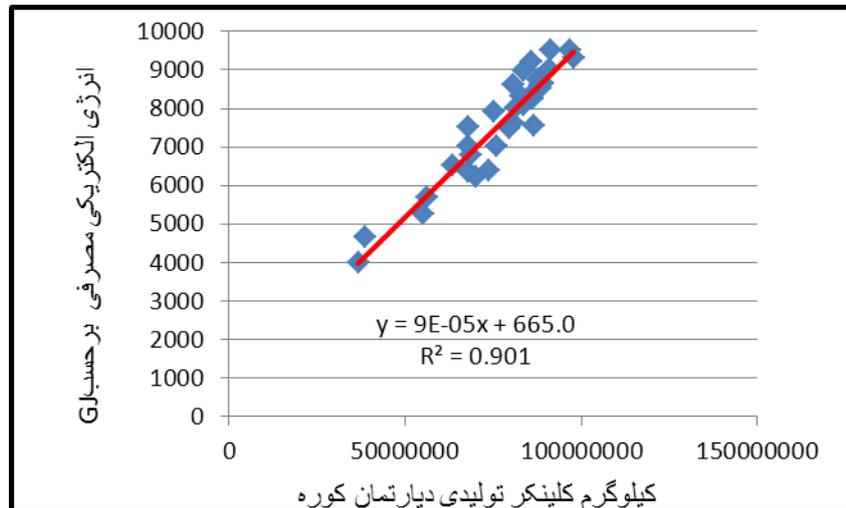
$$m_f = \text{کیلو گرم سوخت مصرفی (مازوت) واحد کوره}$$

$$m_{out} = \text{جرم خروجی از کوره}$$

محدودیت ۲) استخراج تابع ریاضی مصرف انرژی

الکتریکی (E_e) بر حسب مقدار محصول (کلینکر) تولیدی دپارتمان کوره

مصرف انرژی الکتریکی در دپارتمان پخت متاثر از میزان تولید آن می باشد. برق مصرفی دپارتمان کوره کارخانه سیمان ارومیه ۲۰/۹٪ از کل انرژی الکتریکی مصرفی کارخانه است (۷). این مقدار نسبت به انرژی فسیلی مصرف شده در این واحد کم می باشد ولی با توجه به اینکه



شکل ۲- نمودار ارتباط ریاضی میزان مصرف انرژی الکتریکی و مقدار کلینکر تولیدی

معادله (۱۷) مقدار انرژی کل را بدست می دهد. در این معادله ارزش حرارتی خالص برای مازوت که سوخت مصرفی کارخانه سیمان ارومیه می باشد $\frac{Gj}{Kg}$ ۰/۴۱۱۵ است.

$$E_t = (m_f \times N.C.V) + E_e \quad (17)$$

با توجه به اینکه هر دو جزء از این فرمول بر حسب گیگا ژول می باشد بنابراین انرژی کل مصرفی واحد نیز بر حسب گیگاژول خواهد بود.

محدودیت ۴) استخراج تابع ریاضی مصرف انرژی کل (E_t)

بر حسب CO₂ تولیدی دپارتمان کوره

تقریباً نیمی از CO₂ تولید شده در صنعت سیمان حاصل از سوخت و نیمی دیگر حاصل تبدیل مواد خام به کلینکر است. تقریباً تمام سوخت

معادله (۱۶) ارتباط ریاضی بین کیلوگرم کلینکر تولیدی دپارتمان کوره (m_{out}) و مصرف انرژی الکتریکی دپارتمان کوره (E_e) را نشان می دهد.

$$E_e = 9 \times 10^{-5} m_{out} + 665 \quad (16)$$

محدودیت ۳) استخراج تابع ریاضی کل انرژی مصرفی واحد

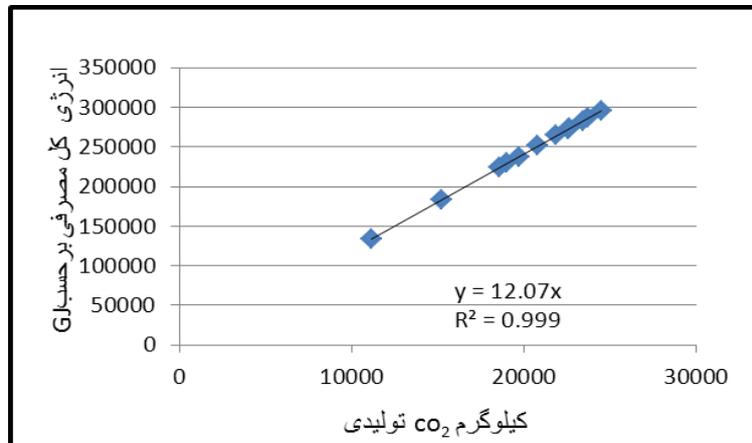
کوره (E_t) بر حسب سوخت مصرفی و انرژی الکتریکی مصرفی

واحد کوره (E_e)

یکی از محدودیتهای که لازم است در مدل بهینه سازی بهره وری تولید اعمال شود معادله انرژی کل مصرفی واحد کوره (E_t) بر حسب سوخت مصرفی و انرژی الکتریکی مصرفی واحد کوره (E_e) می باشد.

شده است. برای بدست آوردن CO₂ تولیدی از انرژی الکتریکی، CO₂ معادل تولیدی به ازای هر kwh برق در نظر گرفته شده است. در این مقاله صرفاً "CO₂ ناشی از مصرف سوخت منظور گردیده است.

مصرف شده در فرایند پخت کلینکر مصرف می شود. برای بدست آوردن رابطه ریاضی مصرف انرژی و تولید دی اکسید کربن در صنعت سیمان، تولید CO₂ از سوخت فسیلی و انرژی الکتریکی در نظر گرفته



شکل ۳- نمودار ارتباط ریاضی میزان مصرف انرژی کل و مقدار CO₂ تولیدی

کارخانه حداقل خواهد شد. در مدل ریاضی بهره وری تولید در کارخانه سیمان، هزینه های تولید مجموع هزینه های عوامل تولید و هزینه های زیست محیطی است که هزینه های عوامل تولید به صورت هزینه نیروی کار، انرژی و مواد اولیه و هزینه های زیست محیطی به صورت هزینه های اجتماعی تولید دی اکسیدکربن منظور شده است. مدل ریاضی بهره وری تولید به صورت معادله (۱۹) ارائه گردیده است:

$$\text{Min cost} = (E_t \times P_E) + (M_i \times P_m) + (M_{CO_2} \times P_{SC}) + N \quad (19)$$

$$M_f = \text{مقدار سوخت مصرفی واحد کوره}$$

$$P_m = \text{قیمت هر کیلوگرم مواد اولیه ورودی به کوره بر حسب ریال}$$

$$P_E = \text{هزینه هر گیگاژول انرژی مصرفی در دپارتمان کوره بر حسب ریال}$$

$$P_{SC} = \text{هزینه اجتماعی متوسط هر تن دی اکسید کربن}$$

$$N = \text{هزینه ماهانه نیروی انسانی شاغل در دپارتمان کوره}$$

ارزیابی و نتیجه گیری شرایط بهینه و کارکرد واقعی کارخانه سیمان ارومیه

مدل بهره وری تولید با نرم افزار برنامه ریزی ریاضی پیشرفته GAMS حل شده و نتایج جهت ارزیابی دو حالت (بهینه و شرایط واقعی کارخانه) در جدول ۱ ارائه شده است. مقدار محصول تولیدی برای یکسال به طور متوسط ۷۷۲۶۸۳/۶ تن می باشد.

بنابراین ارتباط ریاضی تولید CO₂ و مصرف انرژی که به عنوان یکی از محدودیت های مدل مطرح است به صورت معادله (۱۸) می باشد.

$$E_t = 12.07 M_{CO_2} \quad (18)$$

استخراج مدل ریاضی بهره وری تولید در کارخانه سیمان

ارومیه

کمینه سازی بر اساس الگوی معادله (۱) صورت گرفته و کل هزینه های تولید با توجه به محدودیت های فنی، اقتصادی و زیست محیطی

Subject to:

$$M_f = \frac{M_{out} \times 0.0026}{N.C.V} \quad (20)$$

$$E_e = 9 \times 10^{-5} M_{out} + 665 \quad (21)$$

$$E_t = (M_f \times 0.04115) + E_e \quad (22)$$

$$E_t = 12.07 M_{CO_2} \quad (23)$$

$$M_{in} = 1.748 M_{out} \quad (24)$$

معادلات (۲۰)، (۲۱)، (۲۲)، (۲۳) و (۲۴) محدودیت های مدل می باشند.

$$E_t = \text{کل انرژی مصرفی واحد کوره}$$

$$E_e = \text{انرژی الکتریکی مصرفی واحد کوره}$$

$$M_{in} = \text{مقدار مواد اولیه ورودی متوسط به کوره}$$

$$M_{out} = \text{مقدار کلینکر تولیدی}$$

$$M_{CO_2} = \text{مقدار تولیدی دی اکسید کربن}$$

جدول ۱- مقایسه حالات مختلف برای دپارتمان کوره

وضعیت	مقدار مصرف انرژی (GJ)	مقدار تولید CO ₂ (تن)	کل هزینه تولید دپارتمان کوره (میلیون ریال)
شرایط واقعی	۲۶۶۶۷	۲۲۰۹۳/۴	۵۸۴۸/۵
حالت بهینه	۲۲۶۰۳۰	۱۸۷۲۶/۷	۵۴۵۴

منابع

۱. پیرس، دی (نویسنده)، دهقانان، سیاوش (مترجم)، ۱۳۷۵، "اقتصاد محیط زیست، انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد"
2. World Energy Council., 1996, "Energy, Environment and Climate: Economic Instruments", 34 54. James st. London, UK G.11.
3. Szabo L., Hidalgo I., Ciscar J C., Soria A., Russ P., 2003, "Energy Consumption and CO₂ Emissions From the World Cement Industry", European Commission Joint Research Center, Report EUR 20769 EN.
4. Marland, G., Boden T.A., Griffin R.C., Huang S.F., Kanciruk P., 1989, "Estimates of CO₂ Emissions from Fossil Fuel Burning and Cement Manufacturing, Based on the United Nationals Energy Statistics and the U.S. Bureau of Mines Cement Manufacturing Data", Report No. #ORNL/CDIAC-25, Carbon Dioxide Information Analysis Centre, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee, USA.
5. Saboohi Y., 2000, "Energy flow optimization model in industries", Sharif Energy Research Institute.
6. Labahn O., Khlhaas B., 1983, "Cement Engineer's Handbook", Bauverlag.
۷. مالخام، نینوس، ۱۳۸۸، "ممیزی انرژی کارخانه سیمان ارومیه".

با توجه به جدول ۱ در صورت اعمال راهکارهای کاهش مصرف انرژی در دپارتمان کوره و رسیدن به حالت بهینه و درحقیقت بهینه سازی بهره وری تولید، نتایج ذیل قابل دسترسی است.

۱- میزان مصرف انرژی در حالت بهینه، ۲۲۶۰۳۰ GJ می باشد که با توجه به مقدار مصرف انرژی در حالت واقعی، مصرف انرژی ۴۰۶۳۷ GJ (۱۵ درصد) کاهش خواهد یافت.

۲- در صورت رسیدن به حالت بهینه، مقدار تولید CO₂ به میزان قابل توجهی یعنی در حدود ۳۳۶۶/۷ تن در ماه (۱۵ درصد) کاهش خواهد یافت که این رقم در مقیاس سالانه بسیار قابل توجه خواهد بود.

۳- کل هزینه تولید دپارتمان کوره با لحاظ حالت بهینه مصرف انرژی و تولید CO₂، ۶ درصد یعنی حدود ۳۹۴/۵ میلیون ریال در ماه و ۴۷۳۴ میلیون ریال در سال کاهش می یابد.

میزان کاهش در هزینه های انرژی با احتساب قیمت های بین المللی، بیشتر از میزان کاهش ریالی انرژی است و علت آن این است که در داخل کشور قیمت های انرژی واقعی نبوده و دولت برای انرژی یارانه پرداخت کرده که این خود عاملی برای عدم تمایل مدیران در به کارگیری راهکارهای صرفه جویی انرژی و در نتیجه کاهش آلاینده های زیست محیطی است. بنابراین با واقعی شدن قیمت های انرژی و همچنین اخذ جریمه برای تولید آلاینده های زیست محیطی در آینده می تواند در کاهش هزینه های ریالی تولید دی اکسید کربن بسیار موثر باشد.

بنابراین با مشخص شدن نقطه بهینه تولید CO₂ در صنعت سیمان و با توجه به رقم قابل توجه کاهش هزینه های تولید در نقطه بهینه، به کارگیری راهکارهای کاهش مصرف انرژی، بهبود راندمان تجهیزات، استفاده از تکنولوژی های نوین در صنعت سیمان و همچنین استفاده از راهکارهای کنترل تولید CO₂ می تواند در رسیدن به نقطه بهینه موثر باشد.