

بهبود پایداری در تولید سیمان از طریق بازیابی حرارت تلف شده

مطالعه موردی: کارخانه سیمان خاش

سمیه منصوری^۱، فرهاد شهرکی^{۲*}، جعفر صادقی^۳، محمدرضا سردشتی بیرجندی^۴، اسماعیل کوهستانیان^۵

^۱ دکتری، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^۲ استاد، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^۳ دانشیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^۴ استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^۵ استادیار گروه مهندسی شیمی، واحد ایرانشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، ایرانشهر، ایران

*نویسنده مسئول: سیستان و بلوچستان، زاهدان، استاد، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، گروه مهندسی شیمی

آدرس پست الکترونیک: fshahraki@eng.usb.ac.ir

Improving Sustainability in Cement Manufacturing through Waste Heat Recovery, Case Study: Khash Cement Company

Somayeh Mansouri¹, Farhad Shahraki^{2*}, Jafar Sadeghi³, Mohammad Reza Sardashti Birjandi⁴,

Esmail Koohestanian⁵

¹PhD, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering,
University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

²Professor, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering,
University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

³Associate Professor, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of
Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

⁴Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Shahid Nikbakht Faculty of Engineering,
University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

⁵Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Iranshahr Branch, Islamic Azad
University, Iranshahr, Iran

چکیده

در این مطالعه، بازیافت حرارت از کوره دوار سیمان خاش با ظرفیت ۲۶۰۰ تن در روز کارخانه سیمان خاش بررسی شد. در ابتدا موازنه جرم و انرژی بر روی داده‌های عملیاتی کارخانه انجام گردید. نتایج نشان داد که تقریباً ۴۰ درصد کل انرژی ورودی از طریق سوخت توسط اتلاف حرارتی هدر می‌رود. این اتلاف انرژی عبارت است از: گازهای خروجی از پیش‌گرمکن (۲۸/۸ درصد)، هوای داغ خروجی از گریت‌کولر (۳/۶ درصد) و بدنه کوره (۵ درصد شامل تشعشع به همراه جابجایی) است. دو راهکار جهت بازیابی اتلاف انرژی در فرآیند تولید کلینکر بررسی شد (۱) استفاده از گازهای خروجی پیش‌گرم‌کننده و خنک‌کننده از طریق سیستم بازیابی حرارت اتلافی (WHRS) جهت تولید برق، و (۲) بازیابی حرارت از سطح کوره با استفاده از مبدل حرارتی. پیاده‌سازی این راهکارها می‌تواند بهره‌وری حرارتی سیستم را از ۵۰/۶ درصد به ۶۷/۵ درصد افزایش دهد که نقش قابل توجهی در صرفه‌جویی انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و پایداری محیط زیستی دارد.

کلمات کلیدی: کوره دوار سیمان، موازنه جرم و انرژی، اتلاف حرارت، کارخانه سیمان

Abstract

In this study, the potential for waste heat recovery in the 2600-ton-per-day rotary kiln system of Khash Cement Plant was investigated. A comprehensive mass and energy balance was conducted using operational data. Results indicate that around 40% of the input energy is lost through heat dissipation. The main sources of energy loss are: preheater exhaust gases (28.8%), hot air discharged from the grate cooler (3.6%), and radiation and convection losses from the kiln surface (5%). Two recovery strategies were evaluated: (1) utilizing preheater and cooler exhaust gases through a Waste Heat Recovery System (WHRS) to generate electricity, and (2) recovering heat from the kiln surface using a heat exchanger. Implementing these solutions could increase the thermal efficiency of the system from 50.6% to 67.5%, contributing significantly to energy conservation, operational cost reduction, and environmental sustainability.

Keywords: Cement rotary kiln, Mass and energy balance, Waste heat recovery, Energy efficiency, Sustainability

۱- مقدمه

صنعت سیمان، یکی از صنایع انرژی‌بر و آلاینده است. با این حال، با استفاده از فناوری‌های نوین و راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی، می‌توان به آینده‌ای پایدارتر برای این صنعت دست یافت. بازیافت حرارت از مهم‌ترین راهکارهای کاهش مصرف انرژی در صنعت سیمان است و نقشی کلیدی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفاظت از محیط زیست ایفا می‌کند. سیمان به عنوان اصلی‌ترین مصالح ساختمانی در جهان تقریباً در همه کشورها تولید می‌شود. پس از صنعت فولاد، صنعت سیمان یکی از پرمصرف‌ترین صنایع انرژی است و ایران با تولید سالانه سیمان ۷۵ میلیون تن پس از چین، هند و ایالات متحده، در رتبه چهارم قرار دارد [۱]. انرژی حرارتی شامل ۲۰-۲۵ درصد هزینه تولید سیمان است [۲]. بطور معمول مصرف انرژی الکتریکی در یک کارخانه سیمان در حدود ۱۱۰-۱۲۰ کیلو وات ساعت به ازای هر تن سیمان است [۳]. قسمت عمده انرژی حرارتی، به کمک سوخت‌های فسیلی مانند مازوت یا زغال سنگ تأمین می‌شود که طی فرآیند تولید کلینکر استفاده می‌شود، در حالیکه بیشترین مصرف انرژی الکتریکی در فرآیند خردایش است [۴].

تولید سیمان فرآیند پیچیده‌ای است که با استخراج و خردایش مواد معدنی خام، عمدتاً سنگ آهک و خاک رس، شروع و پس از خردایش به پودر همگنی به نام خوراک کوره تبدیل می‌شود. سپس در معرض حرارت بالا در یک کوره دوار قرار می‌گیرد تا پس از انجام مجموعه‌ای از واکنش‌های شیمیایی ترکیب دانه‌بندی شده به نام کلینکر تولید شود [۵]. در کوره دوار دمای لازم جهت آماده‌سازی فاز در کلینکر در حدود ۱۴۵۰ درجه سلسیوس است. فازهای اصلی کلینکر تری کلسیم آلومینات (C_3A)، تتر کلسیم آلومینیوم فریت (C_4AF)، دی کلسیم سیلیکات (C_2S) و تری کلسیم سیلیکات (C_3S) است. برای تولید سیمان پرتلند کلینکر و سنگ گچ به نسبت‌های معین در آسیاب سیمان پودر شده تا سیمان پرتلند معمولی تولید شود [۶].

کوره‌های دوار سیمان به طور گسترده‌ای برای تبدیل مواد خام به کلینکر استفاده می‌شود. کوره سیمان حیاتی‌ترین بخش یک کارخانه سیمان است و خروجی آن کلینکر نامیده می‌شود [۷]. کوره دوار سیمان استوانه‌ای فلزی است که

با شیب ۳ الی ۴ درجه نسبت به افق قرار گرفته و با سرعت ۰/۵ الی ۳ دور بر دقیقه حول محور خود می‌چرخد. طول کوره‌های دوار معمولاً بین ۴۰ تا ۱۲۰ متر و قطر آن‌ها ۱/۵ تا ۵ متر است. مواد اولیه شامل سنگ آهک، آلومین و سنگ آهن آسیاب شده و بعنوان خوراک وارد کوره می‌شوند و مواد پخته شده با نام کلینکر از کوره خارج می‌گردند. درصد اختلاط این مواد بر اساس نوع سیمان تولیدی تعیین می‌شود [۸].

کوره دوار سیمان تابع پارمترهای گوناگونی همچون برهم‌کنش بین مواد بستر و جریان گاز داغ و چرخش کوره انتقال حرارت هدایت، همرفت و تشعشعی است. به دلیل مجموعه معادلات غیرخطی حاصل از متغیرهای یاد شده، مدلسازی کوره دوار سیمان بسیار پیچیده است. اولین موازنه جرم و انرژی به منظور صرفه جویی در مصرف انرژی توسط لایونز^۱ صورت پذیرفت [۹]. اولین مدلسازی کوره دوار سیمان توسط بلومبرگ^۲ بصورت یک بعدی انجام شد که توسط این مدل یک دستگاه معادلات جبری غیرخطی به منظور دستیابی به نمودار توزیع دمای جریان‌های گاز و مواد جامد به دست آمد [۱۰]. موازنه جرم و انرژی با در نظر گرفتن معادله‌های انرژی برای جریان گاز، دیواره کوره، خوراک کوره و موازنه جرم در حالت ناپایا توسط پژوهشگران بعدی انجام شد که به دستگاه معادلات دیفرانسیل پاره ایی غیرخطی منجر گردید [۱۱-۱۳]. مطالعه انتقال حرارت در کوره بصورت دو بعد از طریق معادلات ریاضی توسط لایونز صورت پذیرفت [۱۴]. بازیابی حرارت از گازهای داغ کوره کارخانه سیمان و تحلیل انرژی آن، نشان می‌دهد که به ازای هر کیلوگرم کلینکر، ۸۰۸,۹ کیلوژول انرژی حرارتی تلف می‌شود. همچنین، اکسرژی تلف شده در پیش‌گرمکن و کولر به ترتیب ۱۹۱۹ و ۱۴۹۰ کیلوژول برای هر کیلوگرم کلینکر است [۱۵]. در سال ۲۰۱۸ انواع سیستم‌های بازیابی حرارت در کارخانه سیمان از نظر تولید برق و بازده انرژی بررسی شد. نتایج نشان داد که در شرایط دمای بالا، سیکل آلی رانکین با بازیافت حرارتی (Regenerative ORC) بالاترین بازده انرژی را داشته و توانایی تولید حدود ۷ مگاوات برق را دارد. در بخش دمای پایین نیز ORC نسبت به سیکل CO₂ برتری دارد، اگرچه توان تولیدی آن کمتر و حدود ۳۰۰ کیلووات است [۱۶]. نتایج ارزیابی عملکرد فنی و اقتصادی سیستم‌های بازیابی حرارت تلف شده (WHR) در صنعت

¹ Lyons

² Blumberg

سیمان، نشان می‌دهد که WHR می‌تواند انرژی مورد نیاز تولید را بدون سوخت اضافی و گازهای گلخانه‌ای تأمین کند و بهره‌وری انرژی را افزایش دهد. اگرچه پیش‌بینی‌های اولیه از نظر مالی ناکارآمد بودند، اما با داده‌های واقعی و به‌روز، این سیستم به گزینه‌ای اقتصادی و جذاب تبدیل شده است [۱۷]. در سال ۲۰۲۱ در یک کارخانه سیمان سفید، بر روی شش طرح شامل سیکل‌های رانکین بخار، آلی و ترکیبی (S-ORC) به منظور بازیابی حرارت تلف‌شده برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌ها؛ تحقیق شد. نتایج ترمودینامیکی و اقتصادی نشان داد که سیکل ترکیبی S-ORC با بازده حرارتی ۴۱٫۶۹٪ و توان خالص بالاتر (تا ۴۴۸۳ کیلووات ساعت) عملکرد برتری نسبت به سیکل بخار سنتی دارد. بین سیالات کاری، اسپایروپنتان بهترین عملکرد را داشت اما سیکلوپنتان به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری کمتر و دسترسی بهتر، گزینه عملی‌تر است. بنابراین، S-ORC گزینه‌ای بهینه برای بازیابی حرارت دمای بالا در صنعت سیمان است که بهره‌وری حرارتی و بازده اقتصادی قابل‌توجهی فراهم می‌کند [۱۸]. در مطالعه‌ای دیگر رضایی و همکاران مدل ریاضی توزیع غلظت مواد و فازهای تشکیل دهنده کلینکر با توجه به معادله پیوستگی و سینتیک واکنش‌های شیمیایی در نقطه‌های گوناگون کوره در راستای طول را مورد بررسی قرار دادند. مدل سازی در حالت پایدار با حفظ اصول فیزیکی و شیمیایی فرایند و اثر وجود کوتینگ مورد بحث قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد تطابق مناسبی کمتر از ۳٪ بین مدل و داده‌های تجربی می‌باشد [۱۹]. در مطالعه‌ای دیگر زنجانی و همکاری بهینه سازی کوره سیمان را با استفاده از الگوریتم‌های ژنتیک مورد بررسی قرار دادند. به منظور تولید سیمان با کیفیت خاص پارمترهای بهینه فرآیند با استفاده از این الگوریتم بدست آمد [۲۰]. در مطالعه‌ای دیگر فرزندگان و همکاران شبیه‌سازی کامپیوتری مدارهای خردایش کلینکر کارخانه سیمان اردبیل را با استفاده از نرم افزار BMCS مورد بحث و بررسی قرار دادند. هدف از این مطالعه مدل‌های ریاضی آسیاب‌های گلوله‌ای و منحنی جدایش برای شبیه سازی شبکه‌های میانی و جدا کننده‌های هوای بوده است. نتایج این مطالعه نشان داد همخوانی نزدیکی بین نتیجه‌های شبیه سازی و داده‌های تجربی دارد که این نشان دهنده دقت نمونه برداری و اعتبار مدل مورد استفاده و صحت پیش بینی توسط شبیه ساز می‌باشد [۲۱].

۲- بررسی و محاسبه اتلاف حرارتی

تولید سیمان شامل دو فرآیند اصلی است: ابتدا کلینکر در دمای ۱۴۵۰ درجه سلسیوس تولید و سپس به همراه سایر افزودنی‌ها آسیاب می‌شود که محصول نهایی سیمان نام دارد [۱۰]. کارخانه سیمان خاش دارای ظرفیت تولید سیمان ۳۰۰۰ تن در روز است. کوره دوار این کارخانه استوانه‌ای فلزی با طول ۶۰ و قطر ۴/۲ متر است که با شیب حدود ۳/۵ درصد نسبت به افق روی چند پایه در حال چرخش است. مشعل کوره در انتهای خروجی آن قرار دارد که با مازوت کار کرده و حرارت لازم برای پختن مواد را تامین می‌کند. جهت جریان مواد خام از انتهای کوره (ورودی کوره) به سمت جلو (در جهت سرازیری) و جریان گاز حاصل از سوختن، در خلاف جهت حرکت مواد است. جریان گاز به سمت عقب کوره ناشی از وجود یک مکنده (فن) بسیار قوی در عقب کوره است که مکش لازم را ایجاد می‌کند. حرکت مواد به سمت جلوی کوره نیز به علت شیب کوره و حرکت دورانی آن است [۲۲].

۲-۱- موازنه جرم

هدف از انجام موازنه جرم مشخص شدن وضعیت کلیه جریان‌های ورودی و خروجی از سیستم پخت است. جریان‌های ورودی شامل جریان خوراک کوره، جریان سوخت (مازوت) و جریان هوای خشک است. جریان‌های خروجی شامل جریان کلینکر، جریان گازهای خروجی، غبار خروجی از پیش‌گرمکن و بخار آب و دی اکسید کربن است. مبنای محاسبات نیز ۱ کیلوگرم کلینکر است. کلیه داده‌ها از اطلاعات اتاق کنترل و گزارش ممیزی انرژی استخراج گردیده است. در جدول ۱ ترکیب خوراک کوره، کلینکر و مازوت گزارش شده است.

جدول ۱. ترکیب خوراک کوره، کلینکر و مازوت

Table 1. Composition of kiln feed, clinker and fuel oil

Component	IUPAC nomenclature	Kiln Feed (%)	Clinker (%)	Mazut (%)
SiO ₂	Silicon dioxide	13.87	22.15	-
Al ₂ O ₃	Aluminum oxide	3.68	5.32	-
Fe ₂ O ₃	Iron (III) oxide	2.60	3.80	-
CaO	Calcium oxide	41.98	64.56	-

MgO	Magnesium oxide	1.52	2.10	-
SO ₃	Sulfur trioxide	0.44	0.72	-
K ₂ O	Potassium oxide	0.53	0.70	-
Na ₂ O	Sodium oxide	0.49	0.68	-
L.O.I	Ignition loss	34.68	0.05	-
Cl	Chlorine	0.029	0.008	-
C	Carbon	-	-	85.8
H ₂	Dihydrogen	-	-	11.6
S	Sulfur	-	-	2.6

بر اساس داده‌های استخراج‌شده از اتاق کنترل و کتاب راهنما [۲۳]، مقادیر به شرح زیر است:

خوراک کوره: برای تولید هر کیلوگرم کلینکر، به طور متوسط ۱,۷۳ کیلوگرم خوراک وارد سیستم می‌شود.

سوخت مصرفی: مجموع سوخت مصرفی در مشعل اصلی و کلساینر برابر با ۰,۰۸۱ کیلوگرم مازوت به ازای هر کیلوگرم کلینکر است. این مقدار بر اساس دبی‌های ۴۱۳۰ و ۵۳۷۰ لیتر بر ساعت و چگالی ۰,۸۸۵ کیلوگرم بر لیتر محاسبه شده است.

هوای خشک ورودی: شامل سه بخش می‌باشد:

هوای اولیه مشعل‌ها برابر ۰,۱۳ کیلوگرم بر کیلوگرم کلینکر،

هوای ورودی از طریق فن‌های گریت‌کولر معادل ۲,۶۶ کیلوگرم بر کیلوگرم کلینکر،

و هوای کاذب ناشی از نشتی‌ها در پیش‌گرمکن برابر ۰,۵۵ کیلوگرم بر کیلوگرم کلینکر.

بنابراین، کل هوای خشک ورودی به سیستم حدود ۳,۳۴ کیلوگرم بر کیلوگرم کلینکر می‌باشد.

خروجی‌ها شامل:

کلینکر تولیدی: ۱ کیلوگرم (مبنای محاسبات)،

گازهای خشک خروجی: ترکیب گازهای خروجی از پری‌هیتر و گریت‌کولر که مجموعاً ۳,۴ کیلوگرم بر کیلوگرم کلینکر می‌باشد،

غبار خروجی از پری‌هیتر: برابر با ۰,۱۳ کیلوگرم بر کیلوگرم کلینکر،

بخار آب و دی اکسید کربن خروجی: ناشی از تجزیه مواد خام و LOI، حدود ۰,۶۰ کیلوگرم بر کیلوگرم کلینکر برآورد شده است.

در جدول ۲ جریان های ورودی و خروجی درج شده است. میزان خطا برابر ۰/۴ درصد است. این خطا شامل خطاهای سیستم توزین خوراک کوره، کنتورهای سوخت، دستگاه های اندازه گیری ممیزی انرژی و خطای حاصل از توزین کلینکر است.

همانگونه که در جدول ۲ نشان شده است خوراک، هوای ورودی و سوخت بعنوان ورودی سامانه در نظر گرفته شده است. کلینکر، گازهای خروجی، غبار خروجی از پیشگرمکن، بخار آب و دی اکسید کربن خروجی های فرآیند هستند. کلیه ورودی ها و خروجی ها بر مبنای یک کیلوگرم در ساعت کلینکر تولیدی در نظر گرفته شده است.

جدول ۲. خلاصه محاسبات مربوط به موازنه جرم روی کوره بر مبنای یک کیلوگرم کلینکر

Table 2. Summary of calculations related to the mass balance on the kiln based on one kilogram of clinker

Material flow	Output		input	
	kg/kg Clinker	kg/hr	kg/kg Clinker	kg/hr
Kiln Feed	-	-	1.73	180000
Dry incoming air	-	-	3.34	347620
Fuel	-	-	0.081	8428
Production clinker	1.00	104046	-	-
Exhaust gases	3.40	353850	-	-
Dust from preheater	0.13	13442	-	-
Water vapor and carbon dioxide	0.60	62428	-	-
Total	5.13		5.15	

۲-۲- موازنه انرژی

در این بخش، موازنه انرژی سامانه پخت شامل کوره و پیش گرمکن (شکل ۱) انجام و انرژی های ورودی و خروجی آن بر اساس روابط جدول ۳ محاسبه شد.

جدول ۳. معادلات استفاده شده در موازنه انرژی

Table 3. Equations used in energy balance

Input energy	Equations used	DATA
Complete combustion of fuel (Mazut)	$Q = m_c \times C_v$	$m_c = 0.081 \text{ kg/kcal clinker}$ $\text{kJ/kg} = 41217 \text{ CV}$ $m_f = 180 \text{ ton/hr}$
Thermal energy of input feed	$Q = m_f \times C_{pf} \times (T - T_f)$	$C_{pf} = 0.912 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ $T = 50 \text{ } ^\circ\text{C}, T_f = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ $m = 163.8 \text{ ton/hr}$
Sensible thermal energy of the air accompanying the Kiln feed	$Q = m \times C_p \times (T - T_f)$	$C_p = 1.305 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ $T = 50 \text{ } ^\circ\text{C}, T_f = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$
Output energy		
Thermal energy of clinker formation [10]	$Q = (32 \text{ CaO} + 27.1 \text{ MgO} - 21.4 \text{ SiO}_2 - 2.5 \text{ Fe}_2\text{O}_3 + 17.2 \text{ Al}_2\text{O}_3) * \dot{m}_{\text{clinker}}$	Available in Table 1 $m = 104.046 \text{ ton/hr}$
Sensitive thermal energy of clinker	$Q = m \times C_p \times (T - T_f)$	$C_p = 0.778 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ $T = 180 \text{ } ^\circ\text{C}, T_f = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ $T_s = 561 \text{ K}, A = 870.41 \text{ m}^2, h = 6.35 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}, \beta = \frac{0.00231}{\text{K}}, D = 4.2 \text{ m}, T_f = 298 \text{ K}, N_{uD} = 746.14$
Heat loss from the rotary kiln body (convection)	$Q = hA(T_s - T_f)$	
Heat loss from the rotary kiln body (radiation)	$Q = \sigma \epsilon_{\text{rad}} A (T_s^4 - T_f^4)$	$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4, \epsilon = 0.78$ $m = 254.2 \text{ ton/hr}$
Sensitive thermal energy of the gases exiting the preheater	$Q = m \times C_p \times (T - T_f)$	$C_p = 1.3 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ $T = 335 \text{ } ^\circ\text{C}, T_f = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$ $m = 13442 \text{ ton/hr}$
Sensitive thermal energy of the dust returned from the preheater	$Q = m \times C_p \times (T - T_f)$	$C_p = 0.912 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ $T = 335 \text{ } ^\circ\text{C}, T_f = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$

Sensitive thermal energy of the hot air exiting the grate cooler	$Q=m \times C_p \times (T-T_f)$	$m = 99.65 \text{ ton/hr}$ $C_p = 1.021 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$ $T = 150 \text{ } ^\circ\text{C}, T_f = 25 \text{ } ^\circ\text{C}$
--	---------------------------------	--

تمامی محاسبات انرژی بر مبنای دمای مرجع، ۲۵ درجه سلسیوس انجام شده‌اند. سایر داده‌ها نیز از اطلاعات اتاق

کنترل، گزارش ممیزی انرژی و کتاب راهنما [۲۴] استخراج شده است.

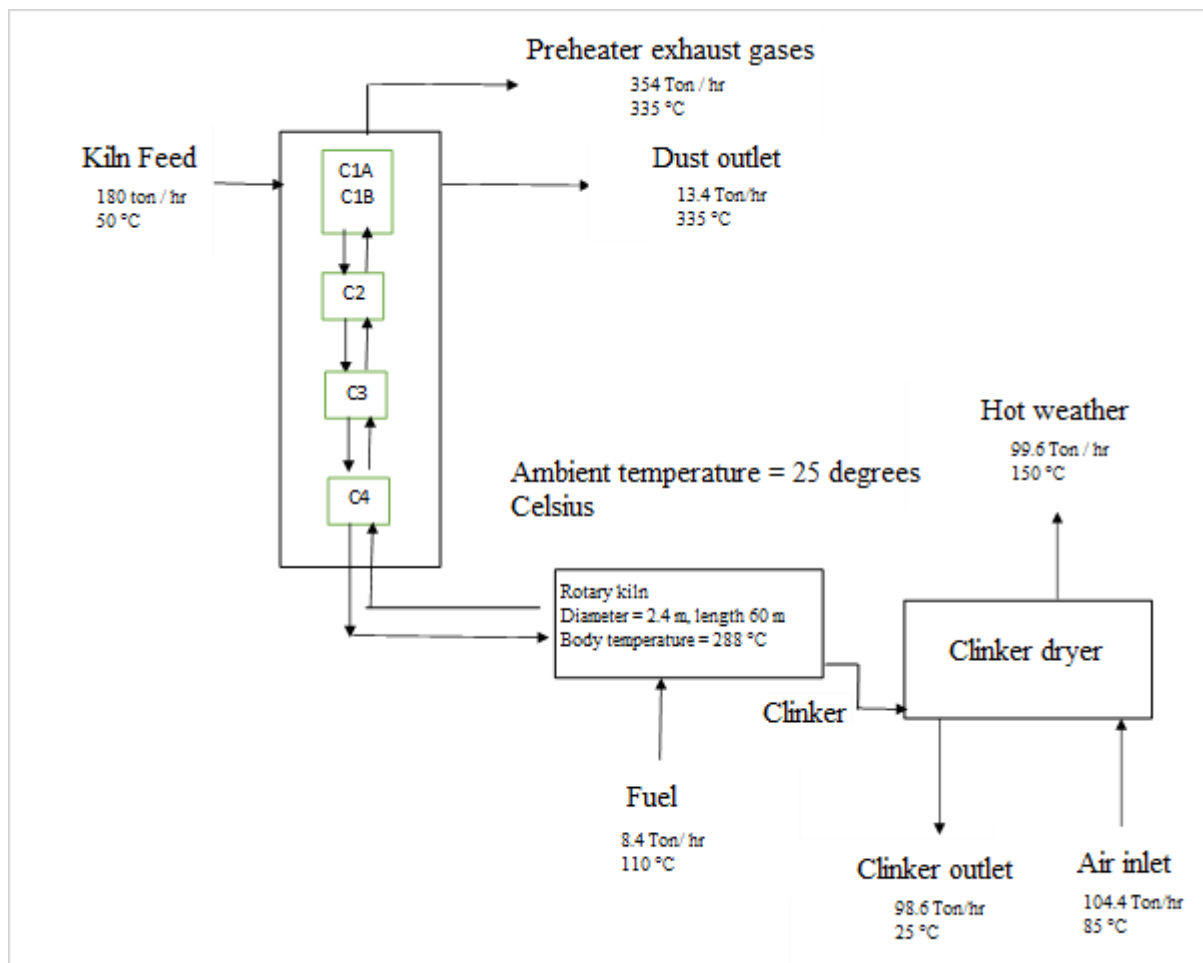
جهت تحلیل ترمودینامیکی نیز فرضیات زیر در نظر گرفته شد [۲۵]:

- جریان گازی در حالت پایا است.

- دمای محیط ۲۵ درجه سلسیوس در نظر گرفته شده است.

- ترکیبات مواد خام در طول زمان تغییر نمی‌کند.

- دمای متوسط سطح کوره (۲۸۸ درجه سلسیوس) تغییر نمی‌کند.



شکل ۱. حجم کنترل در نظر گرفته شده

Figure 1. Intended control volume

در شکل ۱، حجم کنترل مربوط به سامانه پخت شامل پیش گرم کن، کوره دوار و خنک کن نمایش داده شده است. در این شکل، حرف لاتین C نمایانگر سیکلون است. بعنوان مثال C2 به معنی سیکلون شماره ۲ و C1A و C1B نشان دهنده سیکلون دوقلوی شماره ۱ هستند. بر اساس محاسبات انجام شده در زمینه موازنه انرژی حرارتی، خلاصه نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. مطابق با داده‌های این جدول ۹۷/۳۴ درصد از کل انرژی ورودی به سامانه از طریق احتراق کامل سوخت تأمین می‌شود.

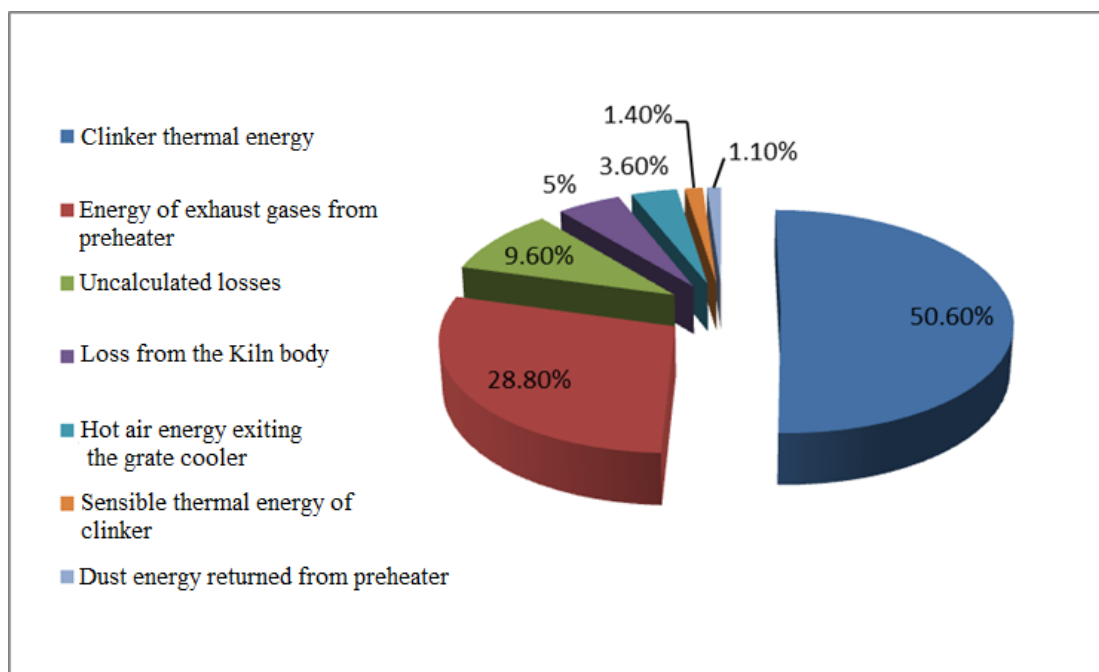
شایان ذکر است که ۹/۶ درصد از کل انرژی خروجی به عنوان اتلاف‌های حرارتی محاسبه نشده در نظر گرفته شده است. این اتلاف‌ها شامل تلفات ناشی از جایجایی حرارتی از بدنه گریت کولر و پیش گرم کن، و همچنین تلفات ناشی از تشعشع حرارتی از همین اجزا می‌باشد.

جدول ۴. خلاصه نتایج موازنه انرژی

Table 4. Summary of energy balance results

Input energy	kW	%
Thermal energy from complete combustion of fuel	96259	97.35
Thermal energy of input feed	1140	1.15
Sensitive thermal energy of air accompanying the kiln feed	1485	1.50
Sensitive thermal energy of input air	0	0
Total	9884	100
Output energy	kW	%
Thermal energy of clinker formation	50029	50.6
Sensitive thermal energy of clinker	1349	1.4
Heat loss from the rotary kiln body (radiation and convection)	4963	5.0
Sensitive thermal energy of exhaust gases from the preheater	28456	28.8
Sensitive thermal energy of dust returned from the preheater	1056	1.1
Sensitive thermal energy of hot air exiting the grate cooler	3533	3.6
Uncalculated losses	9498	9.7
Total	98884	100

بر اساس نمودار دایره‌ای انرژی‌های خروجی ارائه شده در شکل ۲، مشخص می‌گردد که ۵۰/۶ درصد از کل انرژی خروجی، صرف فرآیند تبدیل مواد خام به کلینکر می‌شود. علاوه بر این، ۲۸/۸ درصد از انرژی خروجی به صورت اتلاف حرارتی از طریق گازهای خروجی پیش گرم کن و ۳/۶ درصد نیز به صورت هوای داغ خروجی از خنک کننده دفع می‌شود. در مجموع، این دو منبع اتلاف، معادل تقریبی ۳۳ درصد از کل انرژی خروجی را شامل می‌شوند که میزان قابل توجهی از انرژی مصرفی را تشکیل می‌دهد و نیازمند بررسی دقیق تر جهت بهینه سازی مصرف انرژی در سامانه است.



شکل ۲. نمودار دایره ای انرژی های خروجی

Figure 2. Pie chart of output energies

۳- بازیافت انرژی

چند منبع اصلی اتلاف انرژی شناسایی شده است که قابلیت بازیابی انرژی از آنها وجود دارد. این منابع شامل موارد زیر می باشند:

۱- گاز های خروجی از پیش گرمکن با سهم ۲۸/۸ درصد

۲- هوای داغ خروجی از خنک کن کلینکر با سهم ۳/۶ درصد

۳- انتقال حرارت ناشی از تشعشعی و جابجایی از سطح کوره با سهم ۵ درصد

در ادامه، به بررسی و ارائه راهکارهای بازیافت انرژی از این منابع پرداخته خواهد شد.

۳-۱- بازیافت انرژی از گازهای خروجی از پیش گرمکن و خنک کن

امکان بازیابی حرارت اتلافی در کارخانه وجود دارد. ظرفیت اسمی کوره ۲۶۰۰ تن کلینکر در روز است به طور متوسط ۸۰۰۰ ساعت کاری در سال برای آن منظور شده است. بازده کلی سامانه پخت به صورت ذیل تعریف می‌شود که معادل ۵۰/۶ درصد است.

$$\eta = Q_c / Q_{total} = (50029/98884) \times 100 = 50.6 \% \quad (۱)$$

در رابطه ۱ داریم:

η : بازده سامانه پخت

Q_c : انرژی کلینکراسیون

Q_{tot} : کل انرژی

بازده کلی سامانه پخت را می‌توان از طریق بازیابی بخشی از اتلافات حرارتی بهبود بخشید. انرژی بازیابی شده می‌تواند در مصارفی همچون تولید برق، تأمین آب گرم و سایر نیازهای حرارتی مورد استفاده قرار گیرد. به منظور افزایش راندمان، دو رویکرد اصلی وجود دارد: بازیابی انرژی‌های اتلافی و کاهش یا جلوگیری از اتلاف بیشتر آن‌ها. بر اساس داده‌های جدول ۴، بیشترین میزان اتلاف حرارتی در فرآیند پخت مربوط به گازهای خروجی از پیش‌گرمکن است که معادل ۲۸,۸ درصد از کل انرژی ورودی را شامل می‌شود. همچنین، مجموع اتلاف حرارتی از بدنه کوره و هوای داغ خروجی از گریت کولر برابر با ۸,۶ درصد گزارش شده است. این ارقام نشان‌دهنده اهمیت بالای مدیریت بهینه و هدفمند در زمینه بازیابی انرژی‌های اتلافی است. در این میان، به‌صرفه‌ترین منابع حرارت اتلافی شامل گازهای خروجی از پیش‌گرمکن و هوای داغ خروجی از گریت کولر هستند که می‌توان از گرمای آن‌ها جهت تولید برق یا سایر کاربردهای صنعتی بهره‌برداری نمود. با توجه به مفهوم تولید همزمان انرژی، بازدهی تولید همزمان کوره مطابق فرمول ۲-۴ تعریف می‌گردد:

$$\eta_{com} = \frac{Q_C + Q_{HRSG}}{Q_{tot}} * 100 = 67.5 \% \quad (2)$$

در رابطه ۲ داریم:

η_{com} : بازده تولید همزمان کوره

Q_C : انرژی کلینکراسیون

مجموع انرژی‌های قابل بازیافت (شامل انرژی حرارتی محسوس گازهای خروجی از پیش‌گرمکن و گریت کولر) : Q_{HRSG}

بازدهی کلی کوره بدون بازیابی ۵۰/۶ درصد به دست آمد. در حالیکه اگر از یک سیستم بازیابی حرارتی استفاده شود، مقدار بازدهی کلی حدود ۱۷ درصد افزایش می‌یابد، که نشانگر تأثیر قابل توجه آن در بهینه‌سازی مصرف انرژی است. روش کار سامانه‌ی پیشنهادی به این صورت است که، تلفات حرارتی در پیش‌گرمکن و خنک‌کن کلینکر به سمت دستگاه بویلر هدایت شده که ضمن جذب بخشی از بخار موجود باعث گرم شدن آب در بویلر می‌گردد. بویلرها مجهز به فیلتر می‌باشند تا غبار هوای گرم خروجی نیز جداسازی گردد. این آب بصورت بخار به سمت پره‌های توربین و ژنراتور هدایت می‌گردد تا انرژی الکتریکی تولید شود. سپس بخار آب موجود پس از عبور از کندانسور مجدداً به سمت بویلر هدایت می‌شود.

دلایل اصلی توصیه به به‌کارگیری سامانه بازیابی حرارت در صنایع سیمان عبارتند از:

- ❖ کاهش وابستگی به منابع سوخت‌های فسیلی در تولید انرژی برق، که منجر به افزایش امنیت انرژی کشور از طریق تنوع‌بخشی به منابع و چرخه‌های تولید انرژی می‌شود.
- ❖ ارتقاء سطح مدیریت بهره‌وری انرژی و بازیافت حرارت در صنعت سیمان با اعمال فناوری‌های نوین و پیشرفته.
- ❖ تقویت مزیت‌های فناورانه و بهبود کارایی فرآیندهای تولید سیمان از طریق پیاده‌سازی سامانه‌های بازیابی حرارت در واحدهای تولیدی.

❖ کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای با اجتناب از تولید برق مبتنی بر سوخت‌های فسیلی در شبکه برق سراسری، که تأثیر مثبت بر کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی دارد.

❖ تطابق با استانداردهای ملی و بین‌المللی مرتبط با مدیریت انرژی، از جمله استاندارد ملی ایران (استاندارد ملی ایران به شماره ISO 7873 و الزامات سامانه مدیریت انرژی ISO50001).

❖ کاهش میزان وقفه‌های تولید ناشی از قطعی برق، به ویژه در فصول با مصرف بالای انرژی که همزمان با افزایش تقاضای بازار سیمان نیز همراه است.

البته موانعی نیز در راستای عدم استفاده از سیستم WHR وجود دارد که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

۱- عدم آشنایی تصمیم‌گیران صنعت سیمان با مزایا و همچنین وضعیت فناوری در دنیا.

۲- ارزان بودن حامل‌های انرژی در کشور و تأثیر آن در عدم توجه پذیری طرح‌های صرفه‌جویی انرژی.

۳- میزان سرمایه‌گذاری اولیه بالا.

همچنین جهت بهره‌گیری از حرارت تلف شده دیواره کوره بررسی‌های متعددی به عمل آمده است. یک راه‌کار جهت بازیافت این انرژی طراحی و نصب مبدل بازیافت حرارت به منظور استفاده در سیستم گرمایش ساختمان‌ها است. این مبدل در گرم‌ترین منطقه کوره که بیشترین انتقال حرارت را داراست، یعنی انتهای منطقه پخت، قبل از منطقه خنک‌کن‌ها، نصب می‌شود. اتلاف گرما از سطح کوره ناشی از انتقال گرمای تشعشی و جابجایی است که در مجموع ۵ درصد کل انرژی خروجی از سامانه است.

۳-۳- بازیافت انرژی از بدنه کوره

برای بهره‌گیری از حرارت تلف‌شده از دیواره کوره، بررسی‌های متعددی صورت گرفته است. همان‌طور که در فصل دوم اشاره شد، یکی از راهکارهای مؤثر برای بازیافت این انرژی، طراحی و نصب مبدل حرارتی بازیافتی با هدف استفاده در سیستم گرمایش ساختمان‌ها می‌باشد. این مبدل در گرم‌ترین ناحیه کوره — یعنی انتهای منطقه پخت و پیش از منطقه خنک‌کن‌ها — نصب می‌گردد، چراکه در این ناحیه بیشترین میزان انتقال حرارت رخ می‌دهد.

اتلاف حرارت از سطح کوره ناشی از ترکیب دو مکانیزم تشعشع و جابجایی آزاد است که در مجموع حدود ۵ درصد کل انرژی خروجی سیستم را شامل می‌شود.

در مدل ارائه شده، فرضیات زیر در نظر گرفته شده‌اند:

- بین بدنه کوره و مبدل حرارتی هیچ گونه تماس مستقیمی وجود ندارد.
- جریان حرارتی روی سطح کوره صرفاً از نوع جابجایی آزاد می‌باشد.
- اثر حرکتی چرخشی کوره نادیده گرفته می‌شود، هرچند این حرکت می‌تواند در افزایش بازیافت حرارت مؤثر باشد [۲۶].

دمای هوای بین بدنه کوره و مبدل حرارتی (که به عنوان دمای فیلم در نظر گرفته می‌شود)، از متوسط دمای سطح کوره دوار (۵۶۱ کلوین) و دمای محیط بیرون (۲۹۸ کلوین) بدست می‌آید که برابر ۴۳۰ کلوین می‌باشد. دمای سطح داخلی لوله (T_{in}) که سیال در آن جریان می‌یابد با استفاده از رابطه ۳ مقدار ۲۶۵ درجه سانتیگراد بدست آمده است.

$$Q = \frac{T_s - T_{in}}{\frac{1}{2\pi kL} \ln \frac{r_{in}}{r_o}} \quad (۳)$$

فرض می‌شود آب با دبی دبی ۱۰/۸ تن در ساعت (معادل ۳ کیلوگرم بر ثانیه) و دمای ۲۲ درجه سلسیوس وارد لوله‌ها شود. همچنین فرض شده است که جریان آب درون لوله‌ها آرام و پایدار می‌باشد. خواص فیزیکی آب در دمای ۲۹۵ کلوین به شرح زیر است:

جدول ۵. خواص فیزیکی آب در دمای ۲۹۵ کلوین [۲۶]

Table 5. Physical properties of water at 295 °K [23]

T(°K)	C_p (KJ/Kg. K)	$\mu \times 10^7$ (N.S/m ²)	$\nu \times 10^6$ (m ² /s)	$K \times 10^3$ (W/m. K)	Pr
295	4.181	959	1.002	606	6.62

بنابراین دمای متوسط سیال خروجی از فرمول ذیل به دست می‌آید.

$$Q = \dot{m}C_p(T_{in} - T_{flow}) \quad (۴)$$

مقدار ΔT_{lm} (اختلاف درجه حرارت متوسط لگاریتمی) سیال نیز از رابطه ۵ به دست می‌آید. دماهای ورودی و خروجی سیال گرم و سرد در جدول ۶ درج شده است.

جدول ۶. دماهای ورودی و خروجی سیال گرم و سرد

Table 6. Hot and cold fluid inlet and outlet temperatures

Fluid type	Converter outlet temperature (degrees Celsius)	Inlet temperature to the converter (degrees Celsius)
Hot fluid (air)	150	265
Cold fluid (water)	130	22

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} = \frac{(265 - 22) - (150 - 130)}{\ln \frac{(265 - 22)}{(150 - 130)}} = 90 \quad (5)$$

۴- نتیجه گیری

با انجام موازنه انرژی و شناسایی نقاط اتلاف انرژی در واحدهای تولید سیمان، می‌توان به شکل قابل توجهی بهره‌وری انرژی را افزایش داد و هزینه‌های تولید را کاهش داد. بازیابی انرژی تلف‌شده گامی مهم در راستای توسعه پایدار صنعت سیمان و حفاظت از محیط زیست محسوب می‌شود. این فرآیند امکان تعیین دقیق میزان انرژی حرارتی از دست‌رفته و شناسایی نقاط عمده اتلاف در سامانه پخت را فراهم می‌آورد تا بتوان هدف‌گذاری موثری برای کاهش تلفات انجام داد.

در این مطالعه، موازنه جرم و انرژی سامانه پخت واحد ۲۶۰۰ تنی کارخانه سیمان خاش نشان داد که حدود ۲۸/۸ درصد از انرژی حرارتی ورودی از طریق گازهای خروجی پیش‌گرمکن، ۵ درصد از طریق بدنه کوره و ۳/۶ درصد از طریق هوای داغ خروجی از گریت کولر تلف می‌شود. با توجه به قابلیت بازیابی این اتلافات حرارتی، انرژی بازیابی‌شده می‌تواند در تولید برق، تأمین آب گرم و سایر مصارف مورد استفاده قرار گیرد.

بر این اساس، راهکارهای پیشنهادی برای بازیافت انرژی تلف‌شده شامل موارد زیر می‌باشد:

❖ بازیافت گرما از گازهای خروجی پیش‌گرمکن و هوای داغ خروجی گریت کولر

❖ بازیافت گرما از سطح کوره

دو راهکار اصلی جهت بازیافت حرارت اتلافی در سیستم پخت بررسی شدند. نخست، با نصب سیستم تولید انرژی الکتریکی می‌توان از گرمای گازهای خروجی پیش‌گرمکن و هوای داغ خروجی گریت کولر برای تولید برق بهره‌برداری کرد. دوم، با نصب مبدل حرارتی روی بدنه کوره می‌توان از گرمای اتلافی ناشی از انتقال حرارت تشعشعی و جابجایی آزاد استفاده نمود.

- [1] Taeb A, Kohi F, (1995). Cement, Cement Research Center, Iran University of Science and Technology, first edition.
- [2] Rad, E.A. and S. Mohammadi. (2018). Energetic and exergetic optimized Rankine cycle for waste heat recovery in a cement factory. *Applied thermal engineering*. 132: p. 410-422.
- [3] Madloul, N.A., Saidur, R., Hossain, M.S., Rahim, N.A., (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and sustainable energy reviews*. 15 (4): p. 2042-2060.
- [4] Lasserre, P., (2007). The global cement industry, global strategic management mini cases series. Globalisation Cement Industry.
- [5] Khurana, S., R. Banerjee, and U. Gaitonde. (2002). Energy balance and cogeneration for a cement plant. *Applied thermal engineering*. 22 (5): p. 485-494.
- [6] Fierro, J.J., Escudero-Atehortua, A., Nieto-Londoño, C., Giraldo, M., Jouhara, H., C. Wrobel, L., (2020). Evaluation of waste heat recovery technologies for the cement industry. *International Journal of Thermofluids*. 7 :p. 100040.
- [7] Mittal, A. and D. Rakshit, (2020). Energy audit and waste heat recovery from kiln hot shell surface of a cement plant. *Thermal Science and Engineering Progress*. 19: p. 100599.
- [8] Mujumdar, K.S., Ganesh, K.V., Kulkarni, S.B., Ranade, V.V., (2007). Rotary Cement Kiln Simulator (RoCKS) .Integrated modeling of pre-heater calciner, kiln and clinker cooler. *Chemical Engineering Science*. 62 (9): p. 2590-2607.
- [9] Bogue, R.H., (1955). The chemistry of Portland cement. Vol. 79. LWW.
- [10] Lyons, J.W., Min, H.S., Parisot, P.E., Paul, J.F., (1962). Experimentation with a wet-process rotary cement kiln via the analog computer. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. 1 (1): p. 29-33.
- [11] Blumberg, J.M. (1970). Modelling and Control of the Cement Manufacturing Process: The University of Manchester (United Kingdom).
- [12] Goshayeshi, H.R. and F.K. Poor, (2016). Modeling of rotary kiln in cement industry. *Energy and Power Engineering*. 8 (01): p. 23.
- [13] Wang, S., Lu, J., Li, W., Li, J., Hu, Z., (2006). Modeling of pulverized coal combustion in cement rotary kiln. *Energy & Fuels*. 20 (6): p .2350- 2356.
- [14] Zhang, Y., Xue Cao, S., Shao, S., Chen, Y., Ling Liu, S., Shen Zhang, S., (2011). Aspen Plus-based simulation of a cement calciner and optimization analysis of air pollutants emission. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 13 (3): p. 459-468.
- [15] Ghoshdastidar, P. and V.A. (1996). Unni, Heat transfer in the non-reacting zone of a cement rotary kiln.
- [16] Model, U.F.A.-O. (2023). A policy roadmap for a sustainable transition to very low energy buildings (EC++) in Tehran. *Policy*. 26 (2): p. 9.
- [17] Mohammadi, A., M.A. Ashjari, and A. Sadreddini. (2018). Exergy analysis and optimisation of waste heat recovery systems for cement plants. *International Journal of Sustainable Energy*. 37 (2): p. 115-133.
- [18] Scripcariu, M., Gheorghiu. C., Gheorghiu, M., Gabriela, A., (2021). Improving energy performance of a Cement Manufacturing factory by using Waste Heat Recovery Systems, Estimated vs. Actual achievements. in *E3S Web of Conferences*. EDP Sciences.
- [19] Rezaei S. Hosseini A A. (2018). Mathematical modeling of the constituent phases of cement clinker the study of operating influencing parameters in steady state, *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 37 (3), 183-193.
- [20] Zanjani Thabit, A., Thabiti, M T., (2010). optimization of cement rotary kiln with help of genetic algorithm, *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 55 (10), 4-15.

- [21] Farzangan, A., Ghasemi Erdi, E., Valian, A., Hassanzadeh, V., (2012). Computer Simulation of clinker cutting circuits of Ardabil cement factory, *Iranian Journal of Chemical Engineering*, 68 (2).
- [22] Khater, A., Soliman, A., Ahmed, T.S., Ismail, I.M., (2021). Power generation in white cement plants from waste heat recovery using steam-organic combined Rankine cycle. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 4: p. 100138.
- [23] Okoji, A.I. Anozie, A. N., Omoleye, J.A., Taiwo, A., Osuolale, F.N., (2022). Energetic assessment of a precalcining rotary kiln in a cement plant using process simulator and neural networks. *Alexandria Engineering Journal*. 61 (7): p. 5097-5109.
- [24] Peray, K.E. (1979). Cement manufacturer's handbook.
- [25] Engin, T. and V. Ari. (2005). Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems— A case study. *Energy conversion and management*. 46 (4): p. 551-562.
- [26] Söğüt, Z., Z. Oktay, and H. Karakoç. (2010). Mathematical modeling of heat recovery from a rotary kiln. *Applied thermal engineering*. 30(8-9): p. 817-825.