

چالش عدم مصرف RDF^۱ در صنعت سیمان ایران (بخش سوم)

نویسنده: علی‌اکبر کفash بازاری Kafash@Tehrancement.co.ir؛ رئیس آزمایشگاه مرکز تحقیق و توسعه کارخانه سیمان تهران

چکیده:

بر اساس نقشه جهانی صنعت سیمان و نیز کاهش منابع انرژی، استفاده از سوخت‌های جایگزین موردنیاز است که علی‌رغم مطالعات متعدد انجام شده، بهره‌گیری از RDF در صنعت سیمان ایران مغفول مانده است. در بخش‌های قبلی این مقاله ضمن معرفی RDF، انواع آن و تحقیقات انجام شده در این زمینه، به برخی تجربیات و اقدامات عملیاتی سایر کشورها در به کارگیری این فناوری پرداخته شد و نکته بسیار مهم در این چالش، حمایت‌های دولتی جهت تسهیل در اجرای این فناوری می‌باشد. در این بخش از مقاله با توجه به نگرانی‌های موجود بر چگونگی مصرف، احتمال آلایندگی‌های خود RDF و اثرات کیفی بر سیمان مطالبی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: RDF، سیمان، صنعت، محیط‌زیست.

احتمال انتشار برخی آلاینده‌های اتمسفری حین سوزاندن RDF و نیز احتمال ایجاد تغییرات در کیفیت سیمان تولیدی را می‌توان نام برد که در این مقاله به اختصار پرداخته می‌شود.

۱. مقدمه:

نقشه راه جهانی صنعت سیمان^۲، سند بسیار مهمی برای تولیدکنندگان سیمان سراسر جهان می‌باشد که توسط شورای جهانی تجارت جهت توسعه پایدار (WBCSD)^۳ پایه‌گذاری شده است. بر اساس این نقشه، راهکارهای اصلی کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای چهار شاخص: ۱- مصرف موثر انرژی؛ ۲- سوخت‌های جایگزین؛ ۳- جایگزینی کلینکر؛ ۴- بازیافت و ذخیره کربن (CCS)^۴ می‌باشند ۱-۲ [در این راستا، مصرف سوخت‌های جایگزین بهویشه RDF، روش نسبتاً آسانی است که در کشور ایران کمتر مورد توجه بوده است. از مهم‌ترین دغدغه‌های این موضوع، چگونگی مصرف،

۲. چگونگی مصرف RDF در کوره سیمان:

حداکثر مقدار جایگزینی سوخت‌های اوپله (زغال‌سنگ، کک و سوخت‌های نفتی سنگین) در کوره‌های قدیمی سیمان (فاقد پیش‌گرمکن) حدود ۳۰٪ است، حال آنکه در خود پیش‌گرمکن می‌توان این جایگزینی را تا ۱۰۰٪ رساند (اشنايدر و همکاران، ۲۰۱۲) [۳]. باید مذکور شد که SRF یک زیرگروه از RDF است و همان‌طور که در استاندارد CEN TC ۲۴۲ تعریف شده است، فقط سوخت جامد تهیه شده از زباله‌های غیر خطرناک بوده است و برای تولید انرژی با بالاترین بازده انرژی ممکن، استفاده می‌شود.

1 Refuse Derived Fuel (RDF)

2 Global roadmap cement

3 World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)

4 Carbon capture and storage (CCS),

سوزاندن در کوره سیمان باید مدنظر باشد تا کمترین مشکلات را تحمل نمود. در جداول ۱-۳ برخی شاخصه‌های استاندارد و ضوابط مهم برای مصرف RDF^۵ و CF^۶ دیده می‌شود. استاندارد EN ۱۵۳۵۹-۲۰۱۱^۷ مشخصات فنی و طبقه‌بندی RDF را نشان می‌دهد.

البته باید دقت نمود که ارزش حرارتی سوخت جایگزین، اهمیت بسیار بالائی در مسائل اقتصادی و بهره‌برداری دارد. جدول ۴ مقایسه حدودی ارزش حرارتی سوخت‌های رایج و جایگزین در صنعت سیمان را نشان می‌دهد.

مطابق دستورالعمل بهره‌برداری و استفاده از سوخت‌های مشتق شده از پسماند (RDF) که توسط دولت جمهوری اسلامی ایران تصویب شده است، شروط کیفی تولید RDF به شرح ذیل می‌باشد:

الف - حداقل رطوبت قابل قبول $\geq 20\%$ می‌باشد:

ب- ارزش حرارتی (LHV) نباید کمتر از 2900 KCal/Kg و برای مصرف در صنایع سیمان

نباید کمتر از 4000 KCal/Kg باشد؛

ج- میزان ترکیبات کلر موجود در RDF نباید

از 7% درصد وزنی بیشتر باشد؛

د- RDF تولیدی باید به صورت خرد شده و

دارای ابعاد تا 40 میلی‌متر و به صورت بسته‌بندی در اختیار مصرف‌کننده قرار بگیرد؛

ه- حدود مجاز آالایز شیمیائی برای فلزات

به صورت جدول ۵ می‌باشد [۹].

طبقه‌بندی RDF بر اساس دانه‌بندی شامل:

درشت (Coarse): درصد کمتر از 150 میلی‌متر؛

کرک (Fluff): درصد کمتر از 50 میلی‌متر؛

پودر شده (Powdered): درصد کمتر از $1,7$ میلی‌متر؛

متراکم (Densified): فشرده شده به گلوله،

بریکت یا فرم مشابه؛ می‌باشد که تاکنون بیشترین استفاده از RDF به صورت کرک بوده است

(پامبرگر، 2007 ؛ لوبر و همکاران، 2012)^۸

10 . بررسی‌ها نشان داده که برای بالا بودن ارزش

حرارتی، کاهش رطوبت، کیفیت یکنواختی ذرات و کاهش مواد غیرقابل احتراق اهمیت زیادی دارد.

معمولًا، تقاضا برای RDF با ارزش حرارتی بالا

مطابق با فهرست اروپا، محصولات RDF و SRF توسط دو کد زباله طبقه‌بندی می‌شوند: ۱۰-۱۲-۱۹: (با کیفیت مطمئن) زباله‌های قابل احتراق (به عنوان مثال SRF)؛ ۱۹-۱۲-۱۰: پسماندهای دیگر (از جمله مواد مخلوط) حاصل از تصفیه مکانیکی پسماندها یعنی (RDF) شکل ۱) [۴]. بنابراین در گام اول تهیه RDF با کیفیت مناسب جهت مصرف در کوره‌های سیمان بسیار مهم است.



▲ شکل ۱- RDF برای صنعت سیمان (سمت چپ: SRF خوب برای مشعل تصویب شده است، شروط کیفی تولید RDF به شرح ذیل می‌باشد؛ اصلی؛ سمت راست: SRF درشت برای پیش گرمن)

▼ جدول ۱- برخی شاخصه‌های کیفی استاندارد RDF در ایتالیا، فلاند، اسپانیا، اتحادیه اروپا [۷] (EURITS)

| Parameters | Unit | Dry CF | General Standards | | | Cement Kiln Standards | |
|---------------------|-----------------------|---------|-------------------|---------|-----------------|-----------------------|-------------|
| | | | Italy | Finland | Spain Quality I | EURITS | Switzerland |
| Moisture | % | 0 | <25 | | <1 | | <10 |
| Net Calorific Value | MJ·kg ⁻¹ | 20.6 | 15 | | | 15 | 25.1 – 31.4 |
| | keal·kg ⁻¹ | 5,101.7 | 3,588 | | >5,000 | 3,588 | 6,005-7,512 |
| Ash content | % | 10.69 | 20 | | <<10 | 5 | 0.6-0.8 |
| Cl | ‰ (m/m) | 0.335 | 0.9 | <0.15 | | 0.5 | <1 |
| S | ‰ (m/m) | 0.103 | 0.6 | <0.20 | <3 | 0.4 | <0.5 |
| N | ‰ (m/m) | 0.901 | | <1.0 | <3 | 0.7 | |
| F | ‰ (m/m) | 0.0062 | | | | 0.1 | |
| K, Na | ‰ (m/m) | | | <0.20 | | | |
| Hg | mg·kg ⁻¹ | 82.66 | | <0.1 | | | <5 |
| Cd | mg·kg ⁻¹ | 9.80 | | <1.0 | | | <5 |
| Pb | mg·kg ⁻¹ | 63.86 | 200 | | <2.50 | | <100 |
| Cu | mg·kg ⁻¹ | 108.92 | 300 | | 0 | | |
| Mn | mg·kg ⁻¹ | 136.27 | 400 | | | | |
| Cr | mg·kg ⁻¹ | 135.49 | 100 | | <1.50 | | <30 |
| Zn | mg·kg ⁻¹ | | 500 | | | 500 | <2,000 |
| Ni | mg·kg ⁻¹ | 19.92 | 40 | | | | <10 |
| As | mg·kg ⁻¹ | 21.411 | 9 | | | | |
| Ba | mg·kg ⁻¹ | | | <5.00 | 0 | | |
| Cd+Hg | mg·kg ⁻¹ | 92.46 | 7 | | | | |
| Br/Ti | mg·kg ⁻¹ | | | | 0,01 | | |
| Hg/Ti | mg·kg ⁻¹ | | | | 2 | | |
| As, Se (Te), | mg·kg ⁻¹ | 87.06 | | | | 10 | |

▼ جدول ۲- طبقه‌بندی کیفی RDF بر اساس سه شاخص ارزش حرارتی، کلر و جیوه [۷]

| Classification property | Statistics measure | EN 15359 Classes | | | | | |
|--|--------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | Dry CF |
| Net Calorific Value (MJ·kg ⁻¹) | Average | ≥ 25 | ≥ 20 | ≥ 15 | ≥ 10 | ≥ 3 | 20.6 |
| Cl (%) | Average | ≤ 0.2 | ≤ 0.6 | ≤ 1.0 | ≤ 1.5 | ≤ 3.0 | 0.335 |
| Hg (mg·MJ ⁻¹) | Average | ≤ 0.02 | ≤ 0.03 | ≤ 0.08 | ≤ 0.15 | ≤ 0.50 | 4.06 |
| | Median | ≤ 0.04 | ≤ 0.06 | ≤ 0.16 | ≤ 0.30 | ≤ 1.00 | 4.59 |
| | 80% percentile | | | | | | |

از این رو واضح است که شاخصه‌های کیفی RDF مناسب برای

6 combustible fraction (CF)

7 (Pomberger, 2007; Lorber et al., 2012).

مکانیکی، تثبیت بیولوژیکی (خشک کردن بیولوژیکی) و به دنبال آن تثبیت مکانیکی - فیزیکی وجود دارد. بخش تثبیت شده بیولوژیکی که در حال حاضر برای پوشش دفن زباله استفاده می‌شود، می‌تواند در کوره‌های سیمان استفاده شود [۱۲]. از سوخت مشتق شده با مقادیر حرارتی زیر ۲۰ مگاژول برای یک کیلوگرم و اندازه ذرات درشت در دمای آدیاباتیک زیر ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد باید خودداری کرد [۱۳].

۱. تعیین محل تغذیه RDF:

شرایط فرایند انتخابی برای استفاده از سوخت‌های ضایعاتی در فرایند کلینکر را می‌توان به شرح زیر خلاصه کرد (مطابق با منابع اروپایی تولید سیمان: EC - BREF):

- الف - حداکثر دمای گاز حدود ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد (مشعل اصلی، دمای شعله) در کوره‌های دوار،
- ب - زمان نگهداری گاز حدود ۸ ثانیه در دمای بالاتر از ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در کوره‌های دوار،
- ج - زمان احتباس گاز در سیستم اشتعال ثانویه، بیش از ۲ ثانیه، در دمای بالاتر از ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد.

یک دلیل فنی و محدودیت قانونی وجود دارد که محل قرارگیری دریچه‌های تغذیه سوخت در سیستم کوره را محدود می‌کند: «طبق دستورالعمل EU ۷۵/۲۰۱۰ در مورد انتشار گازهای گلخانه‌ای صنعتی (EC)^۸، پیماند سوخت باید در دمای بیش از ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد با حداقل زمان ماند ۲ ثانیه سوزانده شود. همان‌طور که در شکل ۲ نشان‌داده شده است، می‌توان از محل‌های مختلف، تغذیه برای شارژ سوخت RDF در کوره استفاده کرد.

ورودی‌های بالقوه تغذیه در یک کارخانه تولید سیمان عبارت‌اند از:

۱- از طریق مشعل اصلی در انتهای خروجی کوره دوار، SRF که اندازه ذرات (d₉₅) < ۳۵ میلی‌متر و ارزش حرارتی LHV < ۱۸ MJ / kgOS باشد؛

۲- از طریق مشعل‌های ثانویه به کanal رایزر ورودی کوره، RDF، لاستیک‌های قراضه؛

۳- از طریق مشعل‌های پیش‌گرمکن به سمت پیش‌گرمکن، SRF با d₉₅ > ۸۰ میلی‌متر و LHV < ۱۸-۱۲ MJ / kgOS؛

۴- از طریق دریچه تغذیه به پیش‌گرمکن، برای سوخت درشت SRF که d₉₅ > ۳۰۰ میلی‌متر و LHV < ۱۸-۱۲ MJ / kgOS [۱۲].

رایج‌ترین راه سوزاندن ذرات RDF آن است که در کیسه ۸ European Commission (EC)

جدول ۳- مقایسه میزان انتشارات جوی با استفاده از سوخت‌های متداول و سوخت‌های جایگزین [۷]

| Atmospheric Emissions | Anthracite | Lignite | DryCF |
|-----------------------|--|--|--|
| | VOLUME (Nm ³ ·Mcal ⁻¹) | VOLUME (Nm ³ ·Mcal ⁻¹) | VOLUME (Nm ³ ·Mcal ⁻¹) |
| CO ₂ | 0.2123 | 0.1962 | 0.2011 |
| SO ₂ | 0.0007 | 0.0018 | 0.0001 |

جدول ۴- ارزش حرارتی سوخت‌های قابل استفاده و رایج در کوره سیمان [۸]

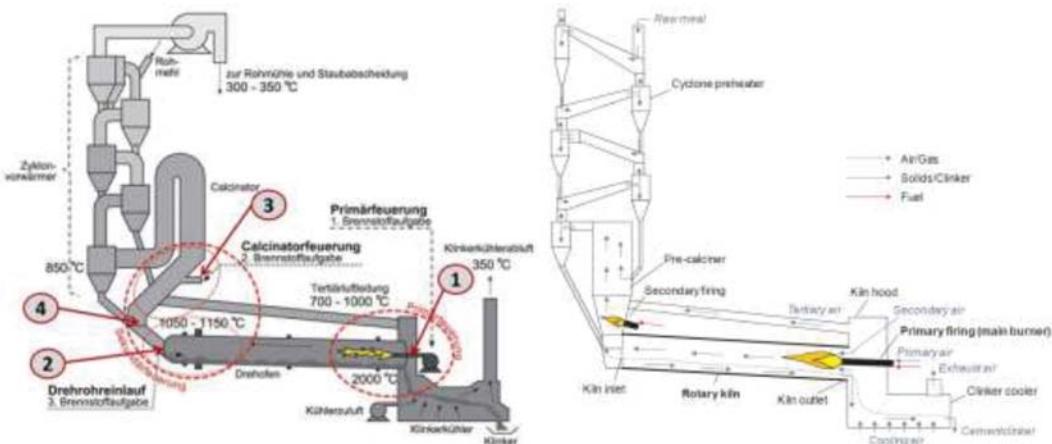
| نوع سوخت | جاگزین | | | رایج و اصلی | | |
|-----------------------|------------|------------|------------|-------------|----------------|-----------|
| | ۲ درجه RDF | ۲ درجه RDF | ۱ درجه RDF | گاز نفتی | زغال‌سنگ صنعتی | گاز طبیعی |
| کیلوکالوری بر کیلوگرم | ۳۰۰۰ | ۲۷۵۰ | ۴۵۰۰ | ۳۶۰۰ | ۸۰۰۰ | ۸۹۰۰ |

جدول ۵- حدود معجاز فلزات در RDF مطابق دستورالعمل ایران [۹]

| فلزات | مقادیر معجاز* |
|-------|---------------|
| (Mn) | ۴۰۰ |
| (Cr) | ۲۰۰ |
| (Cd) | ۱۰ |
| (Pb) | ۱۰۰ |
| (Ni) | ۱۵۰ |
| (Zn) | ۲۰۰ |
| (Cu) | ۵۰۰ |
| (Hg) | ۱ |
| (As) | ۱۰ |
| (Co) | ۲۰۰ |
| (Se) | ۱۰ |
| (Tc) | ۱۰ |
| (Sb) | ۵۰ |
| (V) | ۱۰۰ |
| (Mo) | ۲۰ |
| (Be) | ۱ |
| (Tl) | ۱۰ |

* هر کیلوگرم در هر کیلوگرم ماده خشک

زیاد است؛ بنابراین، خشک بودن ضایعات کم کالری (به عنوان مثال ضایعات صنایع کاغذسازی، مواد تصفیه‌خانه‌های مکانیکی، پسماندهای بیولوژیکی و غیره با مقدار کالری کمتر از MJ/kgOS) اهمیت پیدا می‌کند. خشک کردن RDF، باعث افزایش مقدار ارزش حرارتی و استفاده آن در کوره دوار سیمان می‌شود. در حال حاضر ضایعات و زباله‌ها به عنوان یک SRF با کالری متوسط استفاده می‌شود و حتی می‌تواند پس از خشک شدن به کیفیت سوخت‌های جایگزین با ارزش حرارتی بالا (بیش از MJ/kgOS) بررسنده. اولین موضوع آن، همگنی ضایعات است. چندین روش برای خشک کردن زباله وجود دارد. از یک طرف، گرمای هدررفته از کوره سیمان را می‌توان برای خشکاندن سوخت‌های جایگزین متوسط و با کالری بالا در صنعت (به عنوان مثال صنعت سیمان و کاغذ) استفاده نمود. از طرف دیگر، امکان خشک شدن ضایعات



شکل ۲- مکان‌های بالقوه تغذیه برای مصرف RDF در کوره سیمان [۱۲]

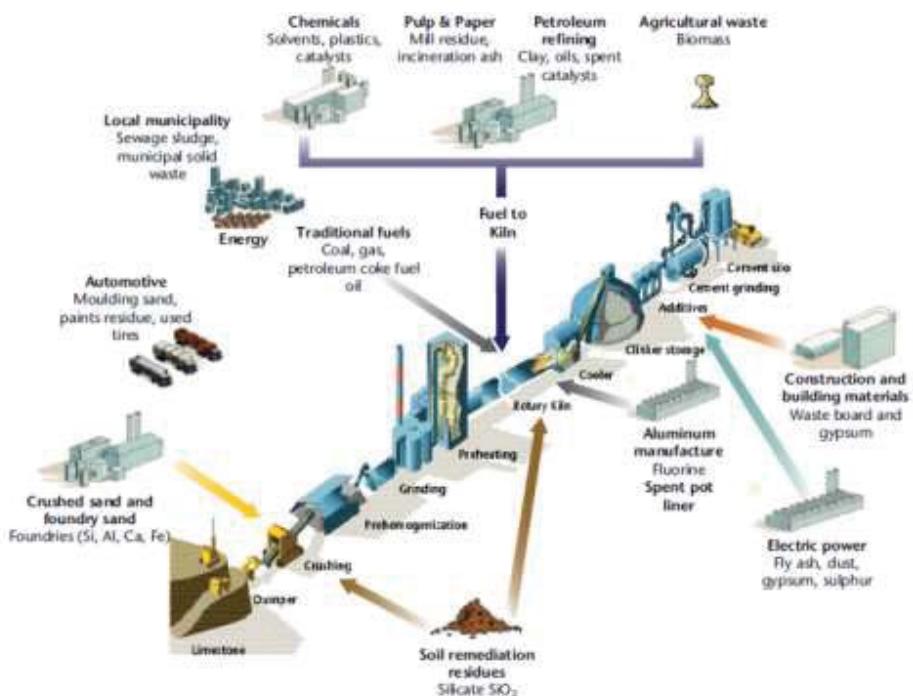
.۳.

برای فرآوری RDF از زباله‌های جامد شهری (MSW)^{۱۰} نیاز به تناسب فنی کوره سیمان می‌باشد. ویژگی‌های مختلفی در کوره‌ها وجود دارند (مانند دمای بالا و مدت زمان ماند مواد) که منجر به حذف آلاینده‌های مختلف می‌شود. به طور معمول، کوره‌های سیمان در ازین برد دیوکسین‌ها و فوران‌ها، ترکیبات آلی فرار (VOC) و انتشار فلزات سنگین در مقایسه با سایر فناوری‌های تصفیه پسماندهای حرارتی (مانند سوزاندن) کمتر موفق هستند. جاهایی که به فرایند تصفیه پسماند نیاز است، کوره‌ها در دمای بالا کار می‌کنند. در کوره‌های سیمان حدود دما برای مشعل اصلی ۲۰۰۰ درجه سانتی‌گراد یا بالاتر، ۱۴۵۰ درجه سانتی‌گراد در مواد برای تولید کلینکر و ۱۰۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتی‌گراد در منطقه پیش‌گرمکن است. به طور معمول مدت زمان ماند RDF در کوره، در دمای بالاتر از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد با گازهای احتراقی بیش از پنج ثانیه است. در مقابل، زمان ماند گاز در یک کوره زباله‌سوز معمولی دو ثانیه است. زمان ماند برای مواد خام بسته به فرایند

بسته‌بندی شود و در کوره تزریق گردد. لوله جداگانه نزدیک مشعل اصلی نیز مناسب است. گرینه بعدی سوزاندن در محافظه انتقال بین کوره و برج پیش‌گرم کن می‌باشد. می‌توان از سوخت جایگزین در پیش‌گرم کن استفاده نمود و بر میزان انتشار NO_x و CO تاثیر مثبت گذاشت. در این زمینه شرکت پلیزیوس سیستم Repol MSC^۱ (احتراق چند مرحله‌ای) را طراحی نموده است. در این سیستم به علت قابلیت احتراق پائین در سوخت‌های جایگزین، محافظه احتراق جداگانه تعییه شده است. این سیستم بر اساس سوخت دهی دوم مرحله‌ای، هوای ثالثیه و مواد خام می‌باشد. مطابق تجربیات تعداد زیادی کارخانه که سیستم MSC در آنها نصب شده است، میزان انتشار NO_x حداقل تا ۵۰٪ کاهش می‌یابد که البته این مقدار وابسته به نوع سوخت است. همچنین جهت سهولت در کار، کاهش مشکلات آلاینده‌گی، ریسک و هزینه‌ها، کمپانی F.L.SMITH کیت استارتر فیستر سوخت‌های جایگزین (Pfister AF) را طراحی نموده است که شامل فیدر، هاپر، انتقال پنوماتیکی به مشعل، فیلتر و دمنده می‌باشد [۱۴] (شکل



شکل ۳- تجهیزات و سایت پیشنهادی شرکت FLSMITH برای مصرف RDF [۱۴]



▲ شکل ۴- نمونه‌ای از نقاط تغذیه‌ای RDF در کوره سیمان (WBCSD، CSI-۲۰۱۴، [۱۲])

زیر است (GIZ, Holcim, ۲۰۰۶):

- ۱- از طریق مشعل اصلی در انتهای خروجی کوره دوار از طریق یک دریچه تغذیه در محفظه انتقال در انتهای ورودی کوره دوار برای سوخت درشت)،
 - ۲- از طریق مشعل های ثانویه به کانال رایزر،
 - ۳- از طریق مشعل های پیش گرمکن به پیش گرمکن
 - ۴- از طریق یک شوت (ناودان) تغذیه به پیش گرمکن (برای سوخت درشت)،
 - ۵- از طریق دریچه میانی کوره در مورد کوره های بلندتر و خشک (برای سوخت درشت).

روش تغذیه RDF در کوره های سیمان همان روشنی است که برای سوخت های استاندارد و مواد اولیه استفاده می شود. با این حال، برای RDF حاوی ترکیبات آلی فرار (VOC)^{۱۳} نباید از طریق منبع مواد خام تغذیه شود.

۲. تغییرات پا به روزرسانی احتمالی کوره های سیمانی

نیاز به اصلاح یا روز رسانی فناوری یک کوره سیمان، به فناوری فعلی کوره، نوع و مشخصات RDF و همچنین به میزان جایگزینی سوخت بستگی دارد (Pomberger and Sarc, ۲۰۱۴). در تجزیه و تحلیل مصرف RDF در کارخانه‌های سیمان، موارد زیر در مورد انطباق فنی کوره با شرایط آماده‌سازی آن مطرح است:

سیمان از ۲۰ دقیقه تا یک ساعت متغیر است (WBCSD CSIBC). هنگام شناسایی نقاط تغذیه برای RDF در فرایند پخت کلینکر باید کلیه شرایط و فاکتورهای مذکور در نظر گرفته شود. پس از شناسایی مشخصات و کیفیت RDF مورداستفاده در کوره سیمان، مرحله دوم، شناسایی نقاط تغذیه با توجه به مشخصات RDF و پارامترهای فرایند است. برای حصول اطمینان از احتراق کامل و جلوگیری از آلایندگی ناخواسته، شناخت اختلاف دما مابین قسمت‌های مختلف فرایند (پیش‌گرمکن و مشعل اصلی)، اهمیت زیادی دارد. به عنوان مثال ممکن است RDF در مشعل اصلی، اواسط کوره، در مجرای رایزر یا در پیش‌گرمکن با ترکیبات آلی فرار (VOC)^{۱۵} وارد واکنش شود. شکل ۳ نقاط تغذیه احتمالی یک کوره سیمان استاندارد را نشان می‌دهد.

نقاط تغذیه مناسب با توجه به خصوصیات فیزیکی و شیمیایی RDF مورداستفاده، انتخاب می‌گردد. همان‌طور که قبلاً اشاره شد، RDF نقاط تغذیه باید در مناطق احتراق با دمای بالای کوره باشند. خوب بالارزش حرارتی بالا، در مشعل اصلی استفاده می‌شود، در حالی که RDF درشت بالارزش گرمایی متوسط در مشعل پیش گر مکن سوزانده می‌شود. با این حال، اگر RDF حاوی مواد سمی باشد، باید در مشعل اصلی تغذیه شود تا از احتراق کامل به دلیل درجه حرارت بالا و ماند طولانی اطمینان حاصل شود. بر اساس پیشنهادهای لسم، متداول تر: ۱۰ شاه، مصطفی بهصفه و است.

¹¹ The World Business Council for Sustainable Development (WBCSD)

12 Volatile organic compounds (VOC)



◀ شکل ۵- محل و جزئیات محفظه قبل از احتراق، سیستم هات دیسک (پومبرگر و سارک، ۲۰۱۴) [۱۲]

سیمان در کشورهای در حال توسعه بهینه است. شکل ۴، توسعه فناوری و استفاده از سیستم هات دیسک در صنعت سیمان را نشان می‌دهد. این فناوری برای اولین بار برای تولید هم‌زمان سوخت‌های جایگزین توسط کارخانه سیمان هولسیم (اسلوواکی)^{۱۷} استفاده شد. در این کارخانه SRF با اندازه ذرات بزرگ 80 میلی متر مصرف می‌شود. فناوری هات دیسک امکان استفاده از ضایعات بازیافتی کمتر فراهم می‌کند؛ بنابراین ویژگی‌های خاص مواد موردنیاز برای مصرف (بهویژه ارزش حرارتی و اندازه دانه‌ها) را می‌توان با چند مرحله پردازش، ایجاد نمود.

بنابراین، نیاز به کیفیت سوخت در احتراق ثانویه کمتر از اشتعال اولیه است که به مقدار حرارت بالاتر (به عنوان مثال بیش از $30 > 495 \text{ MJ/kgOS}$) و اندازه دانه کوچک‌تر (به عنوان مثال 18 میلی متر) نیاز دارد. محفظه قبل از احتراق هات دیسک در منطقه مبدل حرارتی سیکلون کوره دور نصب شده است. سپس، RDF از طریق سیستم دمپر باردهی می‌شود و احتراق روی صفحه دور آسترنسوز انجام می‌گردد که از طریق جریان گازهای خروجی کوره عبور می‌کند. گازهای خروجی احتراق مواد خام را گرم کرده و از فرایند پیش‌گرمکن پشتیبانی می‌کند (Pomberger and Sarc, ۲۰۱۴).

14 Combustion chamber

15 HOTDISC

16 PREPOL

17 Holcim Rohožník

۳. آلایندگی کوره سیمان در سوزاندن RDF:

در هشتمین سمپوزیوم بین‌المللی "منابع ضایعاتی - ۲۰۱۹" در هانوفر آلمان، حدود ۲۰۰ شرکت کننده از ۳۲ کشور آخرين تحولات و تجربیات خود را در زمینه مدیریت پسماند در سراسر جهان ارائه دادند که یکی از مباحث مهم آن، آلایندگی کوره سیمان حین سوزاندن RDF بوده است. البته این موضوع چندان مشکلی نداشته و هم‌اکنون کارخانه سیمان نیشر در تل آویو اسرائیل، در حال طراحی و توسعه بزرگ‌ترین تأسیسات تولید RDF (از زباله‌های جامد شهری) در خاورمیانه با ظرفیت سالانه چهارصد هزار تن می‌باشد [۱۶]. سوزاندن RDF در مقایسه با مواد قابل سوزاندن معمولی (زغال‌سنگ و غیره)، امکان کاهش حدود $1/61$ کیلوگرم CO₂ در هر کیلوگرم RDF مورداستفاده را فراهم می‌کند [۱۷]. به نظر می‌رسد که سوخت‌های جایگزین لزوماً باعث افزایش انتشار آلایندگان نمی‌شوند، زیرا آنها با محتوای مواد فرار بالا باعث کاهش NO_x می‌شوند [۱۸].

لازم به ذکر است که نحوه تعذیب سوخت به کوره بسیار مهم است، زیرا این امر می‌تواند تأثیر مستقیمی بر انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. مطابق مرجع EC - BREF - تولید سیمان، مطمئن‌ترین راه برای انجام این کار به این صورت است که گازهای حاصل از سوخت، از بالاترین دمای کوره (تا 2000 درجه سانتی‌گراد) عبور کنند، یعنی تعذیب RDF از طریق مشعل اصلی باشد [۱۹-۲۱].

طبق مطالعه‌لی و همکاران (۲۰۱۵) موافنه جرم دیوکسین‌ها بر روی یک کوره سیمان در چین، اختلاف قابل ملاحظه‌ای در آلایندگی مابین وجود یا عدم وجود RDF در سوخت مصرفی وجود نداشته است [۲۲]. معقولاً وقتی از RDF در کوره‌های سیمان استفاده می‌شود، هیچ افزایشی در آلایندگان گوگرد و نیتروژن مشاهده نمی‌شود. از طرف دیگر، مقدار کلر در RDF نسبتاً زیاد است و این منجر به مقدار نسبتاً بالای HCl در گازهای دودکش می‌شود. تجربه اردن در مصرف RDF با 1% کلر وجود دارد که $2/27$ تن در ساعت CO₂ از کوره خارج شده است [۲۳]. در مطالعات زمبا و همکاران (۲۰۱۲) آلایندگی سوخت‌های جایگزین (انتشار فلزات سنگین، دی‌اکسین‌ها و فوران‌های دی‌بنزو پلی کلرینه^{۱۸} (PCDD/Fs)) پایش شدند که البته در این مطالعات نرخ جایگزینی این سوخت‌ها بیش از 30% نبوده است. در این مطالعه، بر اساس نتایج بیش از 150 آزمایش آلایندگی

۱۸ آلایندگان محبطی با ماندگاری بالا که اثرات سمی آنها بر انسانها و حیوانات شناخته شده است

۱۹ Polychlorinated dibenzo-p-dioxins and polychlorinated dibenzo-p-furans (PCDD/Fs)

از ۲/۳ تا بیش از ۴۰ نانوگرم در مترمکعب و شاخص معادل سمعی بین المللی نانو^{-۳} * ۹۰,۸ ~ ۹,۳ گرم بر مترمکعب بود که کمتر از استانداردهای آلایندگی چین (معادل سمعی بین المللی ۱۰ نانوگرم بر مترمکعب) بوده است. طبق مشاهدات این محققان هنگامی که پسماندهای جامد (سوخت حاصل از زباله و مواد زائد جامد شهری) و زباله‌های خطرناک (DDT و POPs) به عنوان سوخت‌های اضافی مصرف می‌شود، هیچ تفاوتی در پروفایل مشابه وجود نداشته است. علاوه بر این، به دلیل تنوع در ظرفیت تولید، اختلاف معنی‌داری در میزان انتشار دیوکسین‌ها و فوران‌ها مشاهده نکردند [۲۶].

پوداسینی و همکاران (۲۰۰۹) مشخصات آلایندگی سه کوره سیمان تجاری در حال کار با سوخت‌های را بررسی نمودند. در این مطالعه برای فلزات سنگین (روی (Zn)، نیکل (Ni)، کروم (Cr)، سرب (Pb)، کادمیوم (Cd) و آرسنیک (As) راندمان حذف ۹۸/۵٪ و برای جیوه (Hg) دفعه بیش از ۶۰٪ توسط بگ فیلتر بوده است. به طور متوسط ۳/۳٪ از فلزات سنگین با سمیت متوسط و کم (سرب، نیکل و کروم) وارد بگ فیلتر شده‌اند. در عبور از بگ فیلتر، نسبت جیوه اکسید شده در همه موارد افزایش داشت. ترکیبات آلی فرار شناسایی شده در گازهای منتشر شده شامل تولوئن، اکریلونیتریل بنزن، استایرن، ۱،۳-بوتان و متیلن کلرید بودند. در این مطالعه آلایندگی‌های خطرناک هوا حین سوزاندن زباله‌های فرآوری شده در حدود مجاز بوده است [۲۷].

سلامونی و همکاران (۲۰۲۰) با مصرف MRDF^{۲۱} (سوخت حاصل از زباله شهری و حاوی خاکستر برنج)، بهبود احتراق کوره و انتشار گازهای آلایندگی را مشاهده کردند [۲۸].

۴. کیفیت سیمان با مصرف RDF:

در مصرف RDF دو عنصر بیشترین نگرانی در بحث کیفی را ایجاد می‌نمایند: خاکستر و کلر.

خاکستر: خاکستر RDF باید در توزین ماده اولیه گنجانده شود و اگر بر اساس همان ورودی حرارتی باشد، مقدار بیشتری مواد معدنی مانند خاکستر در RDF وجود دارد. نسبت فلزات سنگین در سوخت از اهمیت زیادی برای کیفیت کلینکر برخوردار است. با این حال آزمایش‌ها نشان می‌دهند که حتی در هنگام سوزاندن ۳۰ درصد RDF توجه خاصی لازم نیست و هیچ تفاوتی در آنالیز شیمیایی و فیزیکی کلینکر تولید شده مشاهده نمی‌شود. این نتیجه به آزمایشات فیزیکی که روی سیمان و بتون انجام شده، اشاره دارد.

21 municipal refuse-derived fuel (MRDF) (RDF combined with rice husks at different percentages)

از دو کوره در یک کارخانه تولید سیمان پرتلند واقع در پرتغال، میزان انتشار بسیاری از آلایندگی‌ها هنگامی که از زغال‌سنگ (به جای کک نفتی) به عنوان سوخت اصلی کوره استفاده شده، بیشتر بوده است. با این حال، استفاده از انواع سوخت‌های مکمل تأثیر کمی در آلایندگی داشته است و مشخص شده که همه مقادیر اندازه‌گیری شده، در حدود قابل اجرا هستند. تجزیه و تحلیل رگرسیون چندگانه نشان داده که بخش کوچکی از تغییر میزان انتشار برخی آلایندگی‌ها مربوط به استفاده از برخی سوخت‌های خاص (مثل احتراق زباله‌های خطرناک) است و به نظر می‌رسد منجر به انتشار بیشتر جیوه در یک کوره می‌شود. در مجموع نتایج همه ۱۵۰ آزمایش آلایندگی در حد استاندارد آلایندگی اتحادیه اروپا بوده است [۲۴]. رابرت النز و روسکا (۲۰۱۲) یک مطالعه کاربردی بر مشکلات انتشار گازهای آلایندگی حین سوزاندن همزمان سوخت‌های جایگزین در کوره خشک واقع در لهستان طی سال‌های ۲۰۱۲-۱۹۹۸ داشتند. در این مطالعه نظارت مستمری بر انتشار NOx، SO2، گردوغبار، CO، HCl، HF، کربن آلی و همچنین فلزات سنگین (V, Hg, Cd, Tl, Sb, As, Pb, Cr, Co, Cu, Mn, Ni) دیوکسین‌ها و فوران‌ها شده است. در سال ۲۰۱۲ حدود ۷۸٪ از کل سوخت در این کوره جایگزین شده است. در این کارخانه طی سال ۲۰۰۸ مقدار گردوغبار با میزان مجاز انطباق نداشته و لذا غبار گبر الکترواستاتیکی (Electro filter) با نوع پارچه‌ای (Bag House) جایگزین شده که آلایندگی غبار به میزان نیاز کاهش نشان داده است. میانگین غلظت فلزات سنگین (به جز جیوه) در گازهای منتشر شده طی این دوره اندازه‌گیری، کمتر از ۱۵٪ حد انتشار مجاز، و میانگین غلظت دی‌اکسین‌ها و فوران‌ها کمتر از ۴۰٪ از حد انتشار بوده است. افزایش مقدار سوخت‌های جایگزین در کوره سیمان ممکن است منجر به کاهش انتشار اکسیدهای نیتروژن (NOx) شود. مقادیر بیشتر کلر در سوخت‌های جایگزین نسبت به سوخت‌های متداول، خطر افزایش انتشار کلرید هیدروژن (HCl) TOC^{۲۰} را به همراه دارد. مشکل بعدی در این کارخانه، افزایش (کربن آلی) به ازای افزایش سهم سوخت‌های جایگزین بوده است. البته در قسمت نتیجه‌گیری این مطالعه اشاره شده که این مشکلات را می‌توان با ساخت‌گیری در کیفیت RDF مصرفی مرتفع نمود [۲۵].

چن و همکاران (۲۰۱۴) نمونه‌های گاز دودکش از پنج کوره سیمان معمولی طی دوازده مرحله اجرا را جمع‌آوری و آلایندگی آنها را ارزیابی کردند. مقادیر دی‌اکسین‌ها و فوران‌ها (۱۳۶ ترکیب)

20 Total organic carbon (TOC)

جدول ۶- نتایج آنالیز شیمیائی نمونه سیمان‌های تولید شده با مقادیر مختلف [۳۰] RDF

| Component & modules | 0% RDF + 100% Petrocoke | 8% RDF + 92% Petrocoke | 12% RDF + 88% Petrocoke | 15% RDF + 85% Petrocoke | Limit value ^a |
|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------|
| CaO, % | 66.24 | 66.29 | 66.41 | 66.61 | 60-67 |
| SiO ₂ , % | 21.27 | 20.95 | 20.88 | 21.09 | 17-25 |
| Al ₂ O ₃ , % | 4.83 | 4.81 | 4.89 | 4.84 | 3-8 |
| Fe ₂ O ₃ , % | 3.57 | 3.62 | 3.64 | 3.53 | 0.5-6 |
| MgO, % | 1.19 | 1.17 | 1.38 | 1.15 | 0.1-4 |
| K ₂ O, % | 0.81 | 0.80 | 0.77 | 0.82 | 0.2-1.3 |
| Cl, % | 0.0268 | 0.0275 | 0.0366 | 0.0314 | Max. 0.1 |
| Na ₂ O, % | 0.3576 | 0.3500 | 0.4233 | 0.3642 | 0.2-1.3 |
| TiO ₂ , % | 0.29 | 0.29 | 0.30 | 0.29 | |
| SO ₃ , % | 1.14 | 1.18 | 1.07 | 1.09 | 1-3 |
| MnO, % | 0.05 | 0.05 | 0.05 | 0.05 | |
| Undeterminable | 0.22 | 0.46 | 0.15 | 0.13 | |
| Total | 99.78 | 99.54 | 100.00 | 99.87 | |
| LS (lime standard) | 98.10 | 99.41 | 99.72 | 99.36 | 92-96% |
| LSF (lime saturation factor) | 0.97 | 0.98 | 0.96 | 0.98 | |
| Silica module | 2.53 | 2.49 | 2.45 | 2.52 | 2.3-2.7 |
| Aluminium module | 1.35 | 1.33 | 1.34 | 1.37 | 1.3-1.6 |
| Hydraulic module | 2.23 | 2.26 | 2.26 | 2.26 | |
| Free lime | 1.86 | 1.60 | 1.76 | 1.78 | Max. 2 |
| Density, g/l | 1,284 | 1,244 | 1,249 | 1,290 | 1,200-1,300 |
| Liquid phase ^b , % | 26.00 | 26.06 | 26.49 | 25.90 | 25-27 |

جدول ۷- نتایج آزمایش‌های مکانیکی نمونه سیمان‌های تولید شده با مقادیر مختلف [۳۰] RDF

| Experiment code and date | Fineness | | | Setting time (min) | | | Water demand (%) | Specific gravity (g/cm ³) | Le Chatelier (mm) | Compressive strength (MPa) | | |
|--------------------------|----------|-------|--------|----------------------|--------------------|--------|------------------|---------------------------------------|-------------------|----------------------------|--------------|---------|
| | 45 µm | 90 µm | Blaine | Initial setting time | Final setting time | 2 days | | | | 2 days | 7 days | 28 days |
| 0%+100% Petrocoke | 22.7 | 4.1 | 2,970 | 122 | 179 | 23.6 | 3.18 | 3 | 20.9 | 36.3 | 50.8 | |
| 8%+92% Petrocoke | 23 | 4.2 | 3,140 | 116 | 167 | 23.8 | 3.16 | 2 | 23.4 | 39.6 | 51.4 | |
| 12%+88% Petrocoke | 24.7 | 3.8 | 2,960 | 139 | 192 | 23.6 | 3.16 | 2 | 18.5 | 33.8 | 47.0 | |
| 15%+85% Petrocoke | 21.5 | 2.9 | 3,270 | 137 | 195 | 23.6 | 3.16 | 1 | 25.7 | 41.9 | 52.6 | |
| TS EN 197/1 | - | - | - | ≥60 | - | - | - | ≤10 | ≥20.0 | - | ≥42.5 ≤62.55 | |

Note. There is no Turkish standard for fineness. But preferred minimum fineness for produced Portland cement according to ASTM C-204 is 2800 cm²/g.

جدول ۸- نتایج انتشار گاز خروجی اندازه‌گیری شده از دودکش کوره سیمان (گردوغبار، TOC و هالوژن‌ها) [۳۰]

| Parameter | 0% RDF + 100% Petrocoke | | 8% RDF + 92% Petrocoke | | 12% RDF + 88% Petrocoke | | 15% RDF + 85% Petrocoke | |
|--|-------------------------|----------------------------|------------------------|---------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | Measurement result | C limit value ^a | Measurement result | C limit value | Measurement result | C limit value | Measurement result | C limit value |
| CO ₂ , % | 7.7 | 9.3 | 11.7 | 8.2 | | | | |
| CO, mg/Nm ³ | 122.7 | 900.2 | 2,268 | 2,503 | | | | |
| SO ₂ , mg/Nm ³ | 14.27 | <0.286 | <0.286 | <0.286 | 293.511 | <0.286 | 292.019 | |
| NO, mg/Nm ³ | 1,191 | 1,045 | 506 | 475.8 | | | | |
| NO _x , mg/Nm ³ , NO ₂ | 1,880 | 1,639 | 1,262.592 | 1,241.633 | 733.2 | 1,228.169 | | |
| Dust, mg/Nm ³ | 14.37 | 20.3 | 116.259 | 114.160 | 22.47 | 112.817 | | |
| HCl, mg/Nm ³ | 1.81 | 1.21 | 31.247 | 31.947 | 1.80 | 32.394 | | |
| HF, mg/Nm ³ | 0.16 | 0.15 | 4.958 | 4.935 | 0.13 | 4.920 | | |
| Total organic carbon (TOC), mg/Nm ³ | 19.86 | 18.33 | 288.362 | 281.832 | 14.62 | 277.653 | | |
| PAH | 6.332 | 3.844 | 1.972 | 2.680 | | | | |

^aCalculated using Turkish Directives about General Rules for the Use of Wastes as an Supplemental Fuel (Anonymous, 2005).

اگر بیش از ۱۵ درصد سوزانده شود، برای استخراج بخشی از کلر، ممکن است لازم باشد یک سیستم عبور گاز که به محفظه انتهای تغذیه (ورودی) متصل است، در کوره نصب شود [۲۹]. مطالعه‌ای توسط مرکز تحقیقات مارمارا، شرکت‌های ایستاک و آکانسای ترکیه برای تولید کلینکر با استفاده از نسبت‌های مختلف RDF در یک کوره سیمان دوار با هدف ارزیابی اثر RDF بر شرایط RDF ایجاد شده از دودکش کوره بود. برای این منظور، به میزان کلر پسماند، به طور معمول تا ۳۰ درصد کل متر acum می‌شوند. محتواهای سردردتر پیش‌گرمکن (سیکلون) تبخیر می‌شوند و در قسمت‌های سردردتر پیش‌گرمکن (سیکلون) دارند در سیستم باقی بمانند. آنها در نزدیکی منطقه پخت کوره RDF متر acum می‌شوند. محتواهای این عناصر جزئی (به غیراز کلر) در کم است. چرخه کلر در سیستم کوره بیشتر از هر عنصر دیگری است. بسته به میزان کلر پسماند، به طور معمول تا ۱۰ درصد کل RDF مصرف سوخت را می‌توان با RDF بدون تأثیر بر کیفیت سیمان تأمین کرد. طبق تجربه، درصد معمول جایگزینی RDF با سوخت رایج، (بدون هیچ‌گونه مشکل انسداد) حدود ۱۰ تا ۵ درصد است.

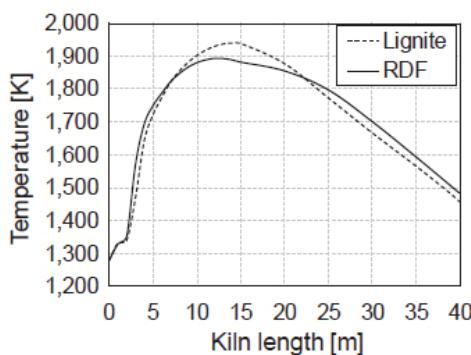
▼ جدول ۹- نتایج انتشار گاز خروجی اندازه‌گیری شده از دودکش کوره سیمان (فلزات سنگین) [۳۰]

| Heavy metal | % 0 RDF + % 100 Petrocoke | 8% RDF + 92% Petrocoke | | 12% RDF + 88% Petrocoke | | 15% RDF + 85% Petrocoke | |
|---|------------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| | | Measurement result | C limit value ^a | Measurement result | C limit value | Measurement result | C limit value |
| Thallium and compounds (as TI), mg/Nm ³ | 0.084 | 0.014 | Total 0.098 | 0.006 | Total 0.097 | 0.008 | Total 0.096 |
| Cadmium and compounds (as Cd), mg/Nm ³ | 0.003 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 | <0.001 |
| Mercury and compounds (as Hg), mg/Nm ³ | <0.001 | <0.001 | Total 0.098 | <0.001 | Total 0.097 | <0.001 | Total 0.096 |
| Chromium and compounds (as Cr), mg/Nm ³ | 0.023 | 0.010 | Total 0.979 | 0.005 | Total 0.968 | <0.003 | Total 0.960 |
| Copper and compounds (as Cu), mg/Nm ³ | 0.003 | 0.006 | | 0.004 | | 0.003 | |
| Cobalt and compounds (as Co), mg/Nm ³ | <0.003 | 0.003 | | 0.003 | | <0.003 | |
| Manganese and compounds (as Mn), mg/Nm ³ | 0.035 | 0.031 | | <0.027 | | 0.028 | |
| Nickel and compounds (as Ni), mg/Nm ³ | 0.023 | 0.005 | | <0.003 | | 0.003 | |
| Lead and compounds (as Pb), mg/Nm ³ | 0.004 | 0.003 | | 0.003 | | 0.003 | |
| Antimony and compounds (as Sb), mg/Nm ³ | <0.001 | <0.001 | | <0.001 | | <0.001 | |
| Tin and compounds (as Sn), mg/Nm ³ | <0.015 | <0.013 | | <0.014 | | <0.013 | |
| Arsenic and compounds (as As), mg/Nm ³ | <0.007 | <0.007 | | <0.007 | | <0.007 | |
| Vanadium and compounds (as V), mg/Nm ³ | 0.004 | 0.014 | | 0.004 | | <0.001 | |
| Dioxin and Furan, ng/Nm ³ | 0.00176 | 0.00154 | 0.1 | 0.00112 | 0.1 | 0.00074 | 0.1 |

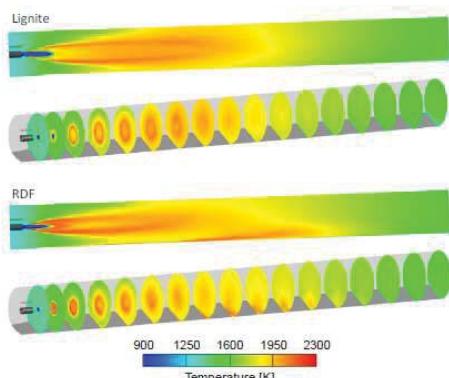
^aCalculated using Turkish Directives about General Rules for the Use of Wastes as an Supplemental Fuel (Anonymous, 2005).

اشاره نمود. برای مکانیابی محل تغذیه RDF در خط تولید سیمان، عوامل تاثیرگذار شامل کیفیت RDF، فناوری پخت، دما و زمان ماند سوخت در محل احتراق بسیار مهم می‌باشد که حداقل چهار محل مشعل اصلی، مشعل ثانویه به رایزر، مشعل پیش‌گرمکن و دریچه تغذیه به پیش‌گرمکن پیشنهاد می‌شود. بنابراین به روزرسانی و اصلاحات در فرایند موردنیاز می‌باشد. در این زمینه شرکت‌های فعال، فناوری‌های مختلفی همچون هات‌دیسک، پریل، اتاق احتراق و غیره را معرفی نموده‌اند. مطالعات و تجربیات مختلفی در زمینه

در مقاله پایپر و همکاران (۲۰۲۰) بر اساس نتایج شبیه‌سازی مصرف RDF در کوره، تغییر شکل شعله و تبدیل سوخت و همچنین اثرات حاصل در انتقال فاز کلینکر تجزیه و تحلیل و بحث شده است. آنها اثرات احتراق RDF در توزیع دما و تشکیل فازهای کلینکر در کوره دوار را بررسی نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که احتراق هم‌زمان RDF می‌تواند منجر به کاهش دمای گاز و کلینکر در منطقه پخت شود و خواص کلینکر را تحت تأثیر قرار دهد. بر اساس نتایج حاصل از مدل تکبعدي این مطالعه، به دلیل دمای



▲ شکل ۶- جریان جرم وزنی، میانگین شعاعی دمای گاز (چپ) و غلظت O₂ (راست) در امتداد کوره [۳۱]



▲ شکل ۷- مقایسه وضعیت توزیع دما در کوره با سوخت زغال‌سنگ و RDF [۳۱]

پایین‌تر در منطقه پخت، مقدار آلت کمتر و افزایش آهک آزاد وجود دارد (شکل‌های ۴ و ۵) [۳۱].

۵. جمع‌بندی:

جهت مصرف بهینه RDF در کوره سیمان باید به کیفیت RDF و یکنواختی آن دقت زیادی نمود که شاخص‌های مهم آن در بخش دو معرفی شدند. از مهم‌ترین آنها می‌توان به ارزش حرارتی، درصد رطوبت، اندازه دانه‌ها، مقادیر کلر، فلزات سنگین و خاکستر

Instn Mech Engrs Vol 207 Part A. Journal of Power and Energy.

- [11] R. Sarc & K.E. Lorber. "Production, quality and quality assurance of Refuse Derived Fuels (RDFs)". Waste Management 33 (2013) 1825–1834
- [12] Feasibility study to use waste as fuel for cement factories, Reference number: 2015-036/MOZ-01, Output 1: "Report on the technical feasibility study for RDF production and its use as fuel in cement factories". The Climate Technology Centre and Network (CTCN), UNEP 2010.
- [13] J Haas & R Weber. "Co-firing of refuse derived fuels with coals in cement kilns: combustion conditions for stable sintering". Journal of the Energy Institute Volume 83, 2010 - Issue 4.
- [14] "FLSmidth introduces Pfister Plug and Play solution to 'test drive' alternative fuels" ZKG Cement, Lime, Gypsum Magazine, Feb 2019
- [15] The World Business Council for Sustainable Development (2009) "Guidelines for Co-Processing Fuels and Raw Materials in Cement Manufacturing". Cement Sustainability Initiative (CSI)
- [16] "MVW Lechtenberg & Partner appointed as owner's engineers for biggest mechanical and biological treatment plant in the Middle East". ZKG Cement, Lime, Gypsum Magazine, Feb 2021.
- [17] G. Genon & E. Brizio. (2007). "Perspectives and limits for cement kilns as a destination for RDF". Waste Management 28 (2008) 2375–2385.
- [18] Matthias Mersmann (2020). "Alternative fuels, emissions" – the hot topics of the cement industry". ZKG Cement, Lime, Gypsum Magazine, March 2020.
- [19] Roland Pomberger & Karl E. Lorber. (1990). "Refuse Derived Fuels - solid recovered fuels for the cement industry". From: www.wtert.net
- [20] Pomberger, R. & Sarc, R. 2014: "Use of Solid Recovered Fuels in the Cement Industry"; Waste Management, Volume 4., pp. 471-488
- [21] R Sarc, KE Lorber, R Pomberger, M Rogetzer, EM Sipple. 2014: "Design, quality, and quality assurance of solid recovered fuels for the substitution of fossil feedstock in the cement industry"; Waste Management & Research 2014, Vol. 32, pp. 565-585
- [22] Yeqing Li & Tong Chen b & Jiang Zhang & Weijie Meng & Mi Yan & Huanzhong Wanga & Xiaodong Li. (2014). "Mass balance of dioxins over a cement kiln in China". Waste Management 36 (2015) 130–135
- [23] Antonio Gallardo & Mar Carlos & M.D. Boveac & Francisco J. Colomerd & Fernando Albarráne. (2014). "Analysis of refuse-derived fuel from the municipal solid waste reject fraction and its compliance with quality standards. Journal of cleaner production.
- [24] Zemba S. Et al.: "Emissions of metals and polychlorinated dibenzo (p) dioxins and furans (PCDD/

آلایندگی سوزاندن RDF وجود دارد که غالباً نشان می‌دهند در صورت وجود یا عدم وجود RDF در سوخت، تفاوت چندانی در آلایندگی کوره سیمان و نیز کیفیت کلینکر تولیدی دیده نمی‌شود. البته در این زمینه شاخص‌های کیفی RDF و نحوه سوزاندن آن نیز بسیار اهمیت دارد.

۶. قدردانی:

از آقای مهندس امینی یکتا و نیز مدیران، کارشناسان و تکنسین‌های محترم شرکت سیمان تهران بسیار سپاسگزارم.

۷. منابع:

- [1] - Avier Farfan & Mahdi Fasihi & Christian Breyer. (2019) "Trends in the global cement industry and opportunities for long-term sustainable CCU potential for Power-to-X". Journal of Cleaner Production, Volume 217, 20 April 2019, Pages 821-835.
- [۲] - کفاش بازاری علی‌اکبر، سرخان پور مهدی. (۱۳۹۸). "نقشه راه جهانی سیمان - بخش اول". ماهنامه علمی تخصصی فناوری سیمان، ۱۲۵، صفحات ۲-۶.
- [3] Schneider M., Romer M., Tschudin M., Bolio H. "Sustainable cement production present and future". Cement and Concrete Research, vol. 41, 2011, pp. 642–650.
- [4] Martin Frankenhaeuser. (2011). "European standardization of Solid Recovered Fuels". Workshop: Processing routes for Solid Recovered Fuels, 20 October, 2011, Dublin
- [5] Kuntum Khoiro Ummatin & Qurrotin A. M. O. Arifanti & Aulia Hani & Yulis Annissa. (2016). "Quality Analysis of Refused-Derived Fuel as Alternative Fuels in the Cement Industry and Its Evaluation on Production". Second International Conference on Science Technology Engineering and Management (ICONSTEM).
- [6] EN 15359-2011. "Solid recovered fuels. Specifications and classes".
- [7] Safwat Hemidat & Motasem Saidan & Salam Al-Zu'bi & Mahmoud Irshidat & Abdallah Nassour & Michael Nelles. (2019) "Potential Utilization of RDF as an Alternative Fuel to be Used in Cement Industry in Jordan". Sustainability 2019, 11, 5819.
- [8] Central Public Health and Environmental Engineering Organisation (CPHEEO). (Oct 2018). "Guidelines on Usage of Refuse Derived Fuel in Various Industries".
- [۹] دستورالعمل بهره‌برداری و استفاده از سوخت‌های مشتق شده از پسماند (RDF) مصوبه هیئت دولت جمهوری اسلامی ایران (۱۳۹۴)
- [10] F C Lockwood & J J OU. (1993) "Review : burning refuse-derived fuel in a rotary cement kiln". Proc

- [28] AbdeL-Hay R. El-Salamony & Hamada M. Mahmoud & Nabila Shehata & Kattameya. (2020). "Enhancing the efficiency of a cement plant kiln using modified alternative fuel". Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management.
- [29] Environment Agency. (February 2008). "The use of substitute fuels in the UK cement and lime industries, Science Report: SCO30168"
- [30] Mustafa Kara & Esin Günay & Yasemin Tabak & Ufuk Durgut & Şenol Yıldız & Volkan Enç. (2009). "Development of Refuse Derived Fuel for Cement Factories in Turkey". Combustion Science and Technology, (CST), Volume 183, 2010, Issue 3 Pages 203-219
- [31] C. Pieper & B. Liedmanna & S. Wirtza & V. Scherera & N. Bodendiekb & S. Schaeferb. (2020). "Interaction of the combustion of refuse derived fuel with the clinker bed in rotary cement kilns: A numerical study". Fuel 266 (2020) 117048

Fs) from Portland cement manufacturing plants: Inter-kiln variability and dependence on fuel-types." Science of the Total Environment, vol. 409, 2011, pp. 4198–4205.

- [25] Robert Oleniacz & Magdalena Gruszka " Co-incineration of large quantities of alternative fuels in a cement kiln – the problem of air pollutant emissions". Geomatics and Environmental Engineering · December 2012
- [26] Chen T, Guo Y, Li X, Lu S, Yan J. "Emissions behavior and distribution of polychlorinated dibenz-p-dioxins and furans (PCDD/Fs) from cement kilns in China Environ Sci Pollut Res Int. 2014 Mar;21(6):4245-53.
- [27] Deepak Pudasainee & Jeong-Hun Kim & Sang-Hyeob Lee & Sung-Jin Cho & Geum-Ju Song1 & Yong-Chil Seo. (2009). "Hazardous Air Pollutants Emission Characteristics from Cement Kilns Co-burning Wastes". Environ. Eng. Res 2009 December, 14(4): 212-219



مقالات

رسانه تخصصی توسعه پایدار با رویداد
حفظ محیط زیست و آگو سیستم
بهینه سازی مصرف آب و انرژی
و توسعه انرژی های پاک در ایران

آخرین اخبار، محیط زیست، انرژی های تجدید پذیر، توسعه پایدار در

www.toseesabz.ir

Email: tosehsabz.magazine@gmail.com

شماره تلگرام وواتس‌آپ: ۰۹۲۲۶۴۰۹۶۱۲ = ۶۶۵۲۱۸۳

جهت ارسال مقاله، خبر، گزارش و سفارش آنها:

تلگرام وواتس‌آپ: ۰۹۳۴۵۶۲۶۳۱

مارادر شبکه های اجتماعی دنبال کنید:

tosesabz @tosesabz
tosesabz tosesabz

www.fanahoosh.ir

73 شماره ۱۰ بهار ۱۴۰۰

INDUSTRY 4.0

فناوری صنعتی

fanahoosh.ir

رسانه تخصصی انقلاب صنعتی چهارم
با رویکرد کاربرد در صنعت، معدن و کسب و کارها