علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره نوزدهم، ویژه نامه شماره۴، بهار۱۳۹۶

بررسی فنی و اقتصادی استفاده ازدورریز پسماندهای شهر تهران به عنوان سوخت کوره‌های سیمان

آزاده پناهنده [۱]

غلامرضا اسدالله فردی [۲*]

fardi@khu.ac.ir

محسن میرمحمدی [۳]

تاریخ دریافت: ۱۲۹۳/۰۹/۱۲ **تاریخ پذیرش:۱۳۹۴/۰۹/۱۰**

چکیده

زمینه و هدف: روزانه ۷۵۰۰ تن پسماند جامد شهری در تهران تولید و پس از پردازش، ۴۰۰۰ تن آن‌ها بعنوان دورریز باقی می‌ماند. استفاده مجدد از پسماند برای حفظ منابع و کاهش آلودگی‌های زیست محیطی ضروری است. هدف این مقاله بررسی امکان فنی و اقتصادی استفاده از دورریز پسماندهای تهران در کوره‌های سیمان است.

روش بررسی: مقدار دورریزهای پسماند از سازمان مدیریت پسماند اخذ و ارزش حرارتی آن‌ها با فرمول Dulong محاسبه شد. سپس مشخصات فیزیکی و شیمیایی دورریزها به کمک تحلیل‌های نهایی به دست آمد. در نهایت، هزینه تولید یک تن کلینکر با مصرف سوخت گاز ، مازوت و پسماند، همچنین هزینه‌های صرفه‌جویی شده با مصرف پسماند در کوره شماره ۸ کارخانه سیمان تهران نیز محاسبه شد.

یافته‌ها: دورریز پسماندهای تهران با فرمول شیمیایی $C_{۷۱}H_{۱۰.۷}O_{۳۲}NS_{۰/۰۷}$ دارای ۲۴/۷۲٪ رطوبت،۲۱٪ خاکستر و ۲۱/۴-۲۳/۶ MJ/kg ارزش حرارتی است. بنابراین می‌توان ۳۶۱۳/۵۴ tons/day سوخت پسماند با ارزش حرارتی ۱۹/۶۳ MJ/kg و ۲۰٪ رطوبت تولید کرد. همچنین جایگزینی ۱۰٪ از ارزش حرارتی مورد نیاز کوره ۸ کارخانه سیمان تهران با سوخت پسماند به جای مازوت سالانه ۴/۱۶ میلیارد ریال درآمد و ۲۸۲/۶ میلیون ریال صرفه‌جویی در هزینه دفن پسماند دارد.

بحث و نتیجه‌گیری: مقدار ارزش حرارتی و گوگرد دورریزهای پسماند تهران مطابق الزامات یک سوخت جایگزین است؛اما کاهش مقدار خاکستر، رطوبت و اندازه پسماند، همچنین افزایش ارزش حرارتی دورریزهای پسماند ضروری است.

واژه‌های کلیدی: دورریز پسماند، سوخت جایگزین، سیمان.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران-محیط زیست، دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

۲*- (مسوول مکاتبات): استاد مهندسی عمران-محیط زیست، دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه خوارزمی، کرج، ایران.

۳- استادیار گروه مهندسی عمران - محیط زیست، دانشکده محیط زیست دانشگاه تهران، تهران، ایران.

J.Env. Sci. Tech., Vol 19, Special No.4, Spring 2017

Technical and economic study of using Tehran rejected solid waste as a fuel in cement kilns

Azadeh Panahandeh [1]
Gholamreza Asadollahfardi [2*]
fardi@khu.ac.ir
Mohsen Mirmohammadi [3]

Abstract

Background and Objective: Daily 7500 tons of municipal solid waste generated in Tehran and after processing, 4000 tons of them remain as rejected waste. Reuse of waste to conserve resources and reduce environmental pollution is necessary. The objective of this study was to investigate the technical and economic possibilities of using Tehran rejected waste in cement kilns.
Method: The amount of rejected waste was askesd from the Waste Management Organization and their heat value was computed using the Dulong Formula. Then, physical and chemical characteristics of the rejected waste were computed using ultimate analysis. Finally, the cost of producing 1 ton of clinker using gas, Mazut and waste fuel, as well as the cost saving by using waste in kiln No. 8 of the Tehran cement factory were calculated.
Findings: Tehran rejected waste contains chemical formulas of $C_{71}H_{107}O_{32}NS_{0.07}$, 24.72% moisture, 21% ash content and 21.4-23.6 MJ/kg heating value. Therefore, we can produce 3613.54 tons/day of waste fuel with a heat value of 19.63 MJ/kg and 20% moisture content. Also, replacement of 10% of the heating value used in kiln NO. 8 of the Tehran cement factory with waste instead of Mazut will result in a 4.16 billion Rial annual revenue and 282.6 million Rial saving in the cost of waste landfilling.
Conclusion: The heating value and sulfur content of Tehran rejected waste meet the requirements of alternative fuel; however, reduction of ash, moisture content and size of waste, as well as increase of heating value of the rejected waste is necessary.

Keywords: Rejected waste, Alternative fuel, Cement.

1- MSc Student in Civil and Environmental Engineering, Kharazmi University, Karaj, Iran.
2- Professor of Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Engineering, Kharazmi University, Karaj, Iran.* *(Corresponding Author)*
3- Assistant Professor of Civil Engineering - Environmental Department, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran.

مقدمه

امروزه دفع پسماندهای جامد شهری(MSW[1]) یکی از مشکلات جدی درکشورهایی است که دارای تراکم جمعیتی بالا و فضای محدود برای دفن پسماند هستند(۱). دفن پسماند اگرچه باعث آلودگی آب‌های زیرزمینی، انتشار بو و آلودگی خاک می‌شود، اما روشی متداول برای دفع پسماندهای جامد غیرقابل بازیافت در جهان و به ویژه در شهر تهران است(۱). در حال حاضر روزانه بیش از ۷۵۰۰ تن پسماند شهری در تهران تولید شده که پس از پردازش، نزدیک به ۴۰۰۰ تن آن به عنوان پسماند جامد غیرقابل بازیافت یا دورریز[2] باقی می‌ماند(۲). دفن این مقدار پسماند می‌تواند باعث بروز مشکلات زیست محیطی جدی و اشغال ۵۲۰۰ m^3 زمین($m^3/tons$ ۱/۳(۳)) شود. یکی از راه‌های بهینه دفع پسماندها در جهان تولید سوخت مشتق از پسماند(RDF[3]) و بازیابی انرژی حاصل از سوزاندن آن‌ها در کوره‌های سیمان است که علاوه بر کاهش انتشارات ناشی از دفن پسماند، باعث جلوگیری از اتلاف انرژی موجود در مواد و حفظ منابع انرژی فسیلی نیز می‌شود(۱).

صنایع سیمان با چالش بزرگ انتشار CO_2 خود مواجه هستند؛ به طوری که تولید هر تن سیمان ۰/۹۵-۰/۶۵ تن CO_2 آزاد می‌کند(۴). هر ۱۰٪ کاهش در شدت انتشار CO_2 کارخانه‌های سیمان تا سال ۲۰۵۰ می‌تواند انتشار حدود ۰/۴ گیگا تن CO_2 جلوگیری کرده و در نتیجه باعث کند شدن تغییرات اقلیمی شود(۴).جایگزینی سوخت پسماند با سوخت‌های فسیلی به عنوان یک منبع انرژی تجدیدپذیر، انتشارات کربن را با جبران نیاز انرژی از منابع فسیلی و کاهش دفن پسماند کاهش می‌دهد(۵).از سوی دیگر براساس تجربیات جهانی، استفاده از RDF در کوره‌های سیمان می‌تواند باعث ذخیره سرمایه گردد(۱). کارا و همکاران(۲۰۰۸) سوزاندن RDF پسماندهای شهر استانبول در کوره سیمان را موفقیت آمیز و دارای منافع اقتصادی بیان کردند(۶). گارگ و همکاران(۲۰۰۹) نیز نتیجه سوزاندن RDF به همراه زغال در کوره سیمان را ذخیره سرمایه، سوخت فسیلی و کاهش انتشار گاز گلخانه‌ای دانستند(۷). محمدی و همکاران(۲۰۱۲) با نمونه‌گیری از پسماندهای شهر ارومیه ارزش حرارتی این پسماندها را با رطوبت ۵۴٪ و خاکستر ۱۰/۴ ٪ به وسیله فرمول Dulong، ۲۲ MJ/kg محاسبه کرده و بازیابی انرژی این پسماندها را پیشنهاد کردند(۸). اصغری و همکاران(۱۳۹۲) با بررسی پسماندها و تایرهای فرسوده شهر تبریز به این نتیجه رسیدند که جایگزینی آن‌ها با سوخت کارخانه سیمان خوی(آذربایجان غربی) باعث کاهش هزینه حامل‌های انرژی و کاهش انتشار آلودگی کارخانه سیمان می‌شود(۹).

صنایع سیمان تهران با میانگین تولید بیش از ۳,۷۰۰,۰۰۰ تن انواع سیمان در سال، نیازمند بیش از ۳ میلیون تن بشکه نفت خام می‌باشد(۱۰). چنانچه تنها ۱۰٪ از این سوخت با RDF جایگزین گردد، سالانه در مصرف ۳۰۰ هزار بشکه نفت خام صرفه جویی می‌شود.

از آنجایی که کشور ایران در سال ۲۰۱۰ نهمین تولید کننده گاز گلخانه‌ای در جهان بوده(۱۱) و صنایع سیمان مسئول ۴۰٪ انتشار CO_2 و مراکز دفع پسماند تولید کننده بیش از ۵۰٪ گاز متان در ایران هستند لذا کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای از این دو منبع ضروری است(۱۲). از این رو به هدف بهره مندی شهر تهران از مزایای استفاده از سوخت های جایگزین،دراین مقاله مقدار دورریز پسماندهای شهر تهران از سازمان مدیریت پسماند اخذ و به کمک فرمول ارزش حرارتی Dulong و تحلیل نهایی،مشخصات فیزیکی و شیمیایی آن‌ها بررسی و با استانداردهای یک سوخت جایگزین مقایسه شد. سپس مقایسه‌ای ساده بین هزینه مصرف سوخت RDF، گاز طبیعی و مازوت برای تولید یک تن کلینکر سیمان انجام شد و هزینه صرفه‌جویی شده در اثر استفاده از سوخت RDF در کوره شماره ۸ کارخانه سیمان تهران محاسبه شد.

روش بررسی

مهمترین ویژگی یک سوخت جایگزین مقدار ارزش حرارتی، رطوبت، خاکستر، ترکیب شیمیایی و مقدار در دسترس آن

1-Municipal Solid Waste
2-Reject
3-Refuse Delivered Fuel

است. از این رو در گام اول مقدار دوریز پسماندهای خطوط پردازش و پالایش شهر تهران (مطابق جدول ۱) از سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران اخذ شد(۲). مقدار کل این دوریزها بین ۳۰۰۰ تا ۴۰۰۰ تن در روز متغییر بوده که با توجه به روند افزایشی تولید پسماند در شهر تهران، در این مقاله مقدار آن‌ها، ۴۰۰۰ تن در روز در نظر گرفته شد. همچنین به منظور ساده‌سازی محاسبات، پسماندهای مشمع، پت، گونی-های پلاستیکی و فوم جز انواع پلاستیک‌ها دسته‌بندی گردید.

جدول ۱-درصد دوریزهای پسماند شهر تهران(۲)

Table 1- Percentage of Tehran rejected waste

مواد تشکیل‌دهنده دوریز پسماند	مقدار دوریزها(٪)[1]
انواع پلاستیک	۲۹/۵۶
کاغذ و مقوا	۱۵/۷
فلزات	۲/۴
پارچه	۶/۷۷
شیشه	۶/۶۵
چوب	۲/۷۳
لاستیک	۰
چرم	۱/۲۳
خاک و نخاله	۴/۵۵
پسماند تر	۳۰/۵
مجموع	۱۰۰

سپس مقدار ارزش حرارتی، رطوبت، خاکستر و ترکیب شیمیایی دوریزها به روش‌های زیر محاسبه و با استانداردهای یک سوخت جایگزین مقایسه شد.

۱) **ارزش حرارتی:** ارزش حرارتی پسماند را می‌توان با استفاده از بمب کالوریمتر، جداول ارزش حرارتی و یاروابط ریاضی محاسبه کرد(۱۳). مزیت اینگونه روابط پرهیز از تکیه بیش از اندازه بر تکنیک‌های آزمایشگاهی و محاسبه ارزش حرارتی هر پسماند براساس ترکیب شیمیایی آن است(۱۴، ۱۵). یکی از رایج‌ترین روابط ریاضی برای محاسبه ارزش حرارتی، فرمول اصلاح شده Dulong و به صورت رابطه ۱ است(۳، ۸، ۱۳، ۱۴، ۱۵):

$$HHV\left(\frac{kJ}{kg}\right) = ۳۳۷C + ۱۴۱۹\left(H_۲ - \frac{O_۲}{۸}\right) + ۹۳S + ۲۳N \quad (۱)$$

که در آن C، H، O، S و N به ترتیب درصد وزن(خشک) کربن، هیدروژن، اکسیژن، گوگرد و نیتروژن است(۱۴).

در صنایع مختلف دو نوع ارزش حرارتی استفاده می‌شود که بالاترین ارزش حرارتی(HHV[1]) و پایین‌ترین ارزش حرارتی(LHV[2]) نام دارد(۱۴). HHV گرمای نهان تبخیر آب را در فراورده‌های احتراق به حساب می‌آورد ولی LHV فرض می‌کند که گرمای نهان تبخیر آب در سوخت و فراورده‌های واکنش بازیابی نمی‌شود.ارزش حرارتی RDF براساس LHV محاسبه می‌گردد، زیرا بعد از سوختن پسماند، گرمای نهان تبخیر آب آن بازیابی نمی‌شود (۱۴). LHV به صورت رابطه ۲ محاسبه می‌شود:

$$LHV\left(\frac{MJ}{kg}\right) = HHV\left(\frac{MJ}{kg}\right) - ۰/۰۲۴۴(W + ۹H)$$

در رابطه ۲، W درصد وزنی آب و Hدرصد وزنی هیدروژن است(۱۴).

۲) **رطوبت:** مقدار رطوبت پسماند «بر پایه وزن مرطوب» یا «بر پایه وزن خشک»آن محاسبه می‌گردد(۱۳). در روش وزن مرطوب، رطوبت پسماند به عنوان درصدی از وزن مرطوب یا اولیه مواد و در روش دوم رطوبت به عنوان درصدی از وزن خشک مواد بیان می‌شود. روش وزن مرطوب در بخش مدیریت پسماند رایج‌تر است(۱۳). رابطه ۳ نحوه محاسبه مقدار رطوبت بر پایه وزن مرطوب را نشان می‌دهد(۱۳).

$$M = \frac{(W - d) * ۱۰۰}{W} \quad (۳)$$

M مقدار رطوبت (٪) ،W وزن اولیه پسماند (tons) و d وزن خشک پسماند (tons) است (۱۳).

۳) **ترکیب شیمیایی پسماند:** تجزیه و تحلیل گروهی(Proximate) و نهایی(Ultimate) دو روش برای

1-Higher Heating Value
2-Lower Heating Value

شناسایی ترکیب شیمیایی پسماند هستند(۱۳). در تحلیل گروهی مقدار رطوبت، ترکیبات فرار، مقدار کربن ثابت و خاکستر و در تحلیل نهایی مقدار کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن، گوگرد و خاکستر محاسبه می‌گردد. در این مقاله براساس روش تچوبنگلوس و همکاران (۱۹۹۳) از نتایج تحلیل نهایی رایج پسماندهای جامد(جدول ۲) برای به دست آوردن ترکیب شیمیایی دورریزهای پسماند شهر تهران استفاده شد(۱۳). به این ترتیب که وزن خشک هر یک از مواد تشکیل-دهنده دورریزهای پسماند در درصد وزنی کربن، هیدروژن، اکسیژن و گوگرد همان ماده(که در جدول ۲ آمده) ضرب شد و ترکیب شیمیایی هر ماده و در نهایت کل دورریزهای پسماند به دست آمد. همچنین وزن مولی عناصر برای به دست آوردن فرمول شیمیایی دورریزهای پسماند محاسبه شد.

جدول ۲-داده‌های رایج تحلیل نهایی پسماندهای جامد(۱۳)

Table 2- Common data for Ultimate analysis of solid waste (13)

نوع پسماند	خاکستر٪	گوگرد٪	نیتروژن٪	اکسیژن٪	هیدروژن٪	کربن٪
پلاستیک	۱۰	_	_	۲۲/۸	۷/۲	۶۰
کاغذو مقوا	۵/۵	۰/۲	۰/۳	۴۴/۵	۵/۸	۴۳/۲
فلز	۹۰/۵	_	۰/۱	۴/۳	۰/۶	۴/۵
منسوجات	۳/۲	۰/۲	۲/۲	۴۰	۶/۴	۴۸
شیشه	۹۸/۹	_	۰/۱	۰/۴	۰/۱	۰/۵
چوب	۱/۵	۰/۱	۰/۲	۴۲/۷	۶	۴۹/۵
لاستیک	۲۰	۱/۶	_	_	۸/۷	۶۹/۷
چرم	۱۰	۰/۴	۱۰	۱۱/۶	۸	۶۰
خاک	۶۸	۰/۲	۰/۵	۲	۳	۲۶/۳
زائدات غذایی	۵	۰/۴	۲/۶	۳۷/۶	۶/۴	۴۸

یافته‌ها

ملاحظات فنی

نتایج این بررسی(که در جداول ۳، ۴، ۵ و۶ آمده) نشان داد که دورریزهای پسماند شهر تهران با ۲۴/۷۲٪ رطوبت و ۲۱٪ خاکستر در حالت خشک، دارای فرمول شیمیایی $C_{۷۱}H_{۱۰۷}O_{۳۲}NS_{۰/۰۷}$ هستند. همچنین پایین‌ترین ارزش حرارتی دورریزهای پسماند ۲۱/۴ MJ/kg و بالاترین ارزش حرارتی آن‌ها ۲۳/۶ MJ/kg است. براساس داده‌های سازمان مدیریت پسماند، دورریزهای پسماند شهر تهران به طور متوسط رطوبتی در حدود ۳۰٪ دارد(۲)که نزدیکی خوبی با نتیجه رطوبت به دست آمده در این مطالعه نشان می‌دهد.

از آنجایی که آب موجود در پسماند برای محاسبه ارزش حرارتی آن لحاظ نمی‌گردد(۳، ۱۳)، در اولین گام محاسبات، وزن خشک دورریزهای پسماند محاسبه شد.

جدول ۳-وزن کل و وزن خشک دورریزهای پسماند شهر تهران

Table 3- Total weight and dry weight of Tehran rejected waste

مواد تشکیل‌دهنده دورریزهای پسماند	مقداردورریزها(٪)*	وزن اولیه دورریزها(tons)	مقدار رطوبت(٪)**	وزن خشک دورریزها(tons)
انواع پلاستیک	۲۹/۵۶	۱۱۸۲/۴	۲	۱۱۵۸/۷۵
کاغذ و مقوا	۱۵/۷	۶۲۸	۵/۵	۵۹۳/۴۶
فلزات	۲/۴	۹۶	۳	۹۳/۱۲
پارچه	۶/۷۷	۲۷۰/۸	۱۰	۲۴۳/۷۲
شیشه	۶/۵۶	۲۶۲/۴	۲	۲۵۷/۱۵
چوب	۲/۷۳	۱۰۹/۲	۲۰	۸۷/۳۶
لاستیک	۰	۰	۲	۰
چرم	۱/۲۳	۴۹/۲	۱۰	۴۴/۲۸
خاک و نخاله	۴/۵۵	۱۸۲	۸	۱۶۷/۴۴
پسماند تر	۳۰/۵	۱۲۲۰	۷۰	۳۶۶
مجموع	۱۰۰	۴۰۰۰		۳۰۱۱/۲۸

* از جدول ۱

** مقدار رطوبت متداول اجزای پسماند(۱۳)

در گام بعدی، وزن خشک هر یک از اجزای پسماند(از جدول ۳) در درصد وزنی عناصر تشکیل‌دهنده همان جزء(از جدول ۲) ضرب شد تا ترکیب شیمیایی دورریزهای پسماند مطابق جدول ۴ به دست آید. برای مثال ۶۰٪ از ۱۱۵۸/۷۵ تن پلاستیک (یعنی ۶۹۵/۲۵ تن) کربن است.

جدول ۴-ترکیب شیمیایی دورریزهای پسماند شهر تهران

Table 4- Chemical composition of Tehran rejected waste

اجزای تشکیل دهنده دورریز پسماند	خاکستر(tons)	گوگرد(tons)	نیتروژن(tons)	اکسیژن(tons)	هیدروژن(tons)	کربن(tons)
پلاستیک	۱۱۵/۸۸	۰	۰	۲۶۴/۲	۸۳/۴۳	۶۹۵/۲۵
کاغذ و مقوا	۳۲/۶۴	۱/۱۹	۱/۷۸	۲۶۴/۰۹	۳۴/۴۲	۲۵۶/۳۷
فلزات	۸۴/۲۷	۰	۰/۰۹	۴	۰/۵۶	۴/۱۹
پارچه	۷/۸	۰/۴۹	۵/۳۶	۹۷/۴۹	۱۵/۶	۱۱۶/۹۹
شیشه	۲۵۴/۳۲	۰	۰/۲۶	۱/۰۳	۰/۲۶	۱/۲۹
چوب	۱/۳۱	۰/۰۹	۰/۱۷	۳۷/۳	۵/۲۴	۴۳/۲۴
لاستیک	۰	۰	۰	۰	۰	۰
چرم	۴/۴۳	۰/۱۸	۴/۴۳	۵/۱۴	۳/۵۴	۲۶/۵۷
خاک و نخاله	۱۱۳/۸۶	۰/۳۳	۰/۸۴	۳/۳۵	۵/۰۲	۴۴/۰۴
پسماند تر	۱۸/۳	۱/۴۶	۹/۵۲	۱۳۷/۶۲	۲۳/۴۲	۱۷۵/۶۸
مجموع	۶۳۲/۸۱	۳/۷۴	۲۲/۴۵	۸۱۴/۲۱	۱۷۱/۵	۱۳۶۳/۶۲

به منظور مدیریت و کاهش مقدار خاکستر سوخت پسماند، شناسایی موادی که خاکستر بیشتری تولید می‌کنند، ضروری است. از این رو در جدول ۵ سهم هر یک از مواد تشکیل‌دهنده دورریز پسماند در تولید خاکستر محاسبه شد.

جدول ۵-مقدار و درصد وزنی خاکستر دورریزهای پسماند تهران

Table 5- The amount and weight percent of Tehran rejected waste ash

مواد تشکیل دهنده دورریز پسماند	وزن خاکستر دورریزها*(tons)	مقدار خاکستر دورریزها (٪)**	مقدار خاکستر هر ماده (٪)***
انواع پلاستیک	۱۱۵/۸۸	۱۰	۱۸/۳۱
کاغذ و مقوا	۳۲/۶۴	۵/۵	۵/۱۶
فلزات	۸۴/۲۷	۹۰/۵	۱۳/۳۲
پارچه	۷/۸	۳/۲	۱/۲۳
شیشه	۲۵۴/۳۲	۹۸/۹	۴۰/۱۹
چوب	۱/۳۱	۱/۵	۰/۲۱
لاستیک	۰	_	۰
چرم	۴/۴۳	۱۰	۰/۷
خاک و نخاله	۱۱۳/۸۶	۶۸	۱۷/۹۹
پسماند تر	۱۸/۳	۵	۲/۸۹
مجموع	۶۳۲/۸۱	۲۱/۰۱۴۶	۱۰۰

* مقدار به دست آمده در جدول ۴

** حاصل تقسیم «وزن خاکستر دورریزها» به «وزن خشک همان دورریز»(در جدول ۳)

*** حاصل تقسیم «وزن خاکستر هر دورریز» به ۶۳۲/۸۱

در گام سوم، وزن مولی اجزای تشکیل‌دهنده دورریز پسماند شهر تهران(برای فرمول شیمیایی) محاسبه شد. همچنین به منظور ساده‌سازی محاسبات از مقدار خاکستر صرفه‌نظر و وزن مولی هر عنصر بر وزن مولی نیتروژن تقسیم شد. مقدار هر یک از عناصر تشکیل‌دهنده پسماند نیز(برای فرمولDulong) در جدول ۶ محاسبه شد.

جدول ۶-وزن مولی و سهم اجزای تشکیل‌دهنده پسماند برای فرمول شیمیایی و فرمول Dulong

Table 6- Molar weight and share of waste components for chemical and Dulong furmula

عناصر	وزن مولکولی(kg/mole)	وزن کل*(tons)	مقدار هر عنصر(٪)**	وزن مولی***(10^3mole)	وزن مولی با فرض ۱ =N(mole)
کربن	۱۲	۱۳۶۳/۶۲	۵۷/۴۰	۱۱۳/۶۳	۷۱
هیدروژن	۱	۱۷۱/۵	۷/۲۲	۱۷۱/۵	۱۰۷
اکسیژن	۱۶	۸۱۴/۲۱	۳۴/۲۸	۵۰/۸۹	۳۲
نیتروژن	۱۴	۲۲/۴۵	۰/۹۴	۱/۶	۱
گوگرد	۳۲	۳/۷۴	۰/۱۶	۰/۱۲	۰/۰۷
مجموع		۲۳۷۵/۵۱	۱۰۰		

* مقادیر جدول ۴

** حاصل تقسیم وزن کل هر عنصر به ۲۳۷۵/۵۱

*** حاصل تقسیم وزن کل هر عنصر به وزن مولکولی آن

براساس مطالعه رضایی و همکاران(۱۳۸۷) حداکثر زمانی که در طول آن تجهیزات تولید RDF بیشترین بازده تولید را دارد، حدود ۲۰ ساعت در روز است(۱۶). در نتیجه اگر ظرفیت کارخانه تولید RDF تهران را ۱۳۰۰ تن در روز با سه خط پردازش(یعنی در مجموع، پردازش ۳۹۰۰ تن دورریز پسماند در روز)، با سه شیفت کاری ۷ ساعت(عملیات ۲۱ ساعته تجهیزات) در نظر بگیریم، حداکثر راندمان تولید RDF به دست می‌آید.

با توجه به استاندارد سوخت‌های جایگزین برای کارخانه سیمان، سوخت RDF می‌تواند تا ۲۰٪ وزن خشک خود رطوبت داشته باشد(۳). در این مطالعه وزن خشک دورریزهای پسماند ۳۰۱۱/۲۸ تن در روز محاسبه شد. مطابق رابطه ۴ با افزودن ۲۰٪ وزن خشک پسماند، مقدار دورریز پسماند در دسترس برای تولید RDF، ۳۶۱۳/۵۴ تن در روز خواهد بود. همچنین از آنجایی که مقدار رطوبت پسماند با ارزش حرارتی آن رابطه عکس دارد با افزایش ۲۰٪ رطوبت پسماند، بالاترین ارزش حرارتی آن(یعنی ۲۳/۶ MJ/kg) نیز به نسبت ۲۰٪ کاهش خواهد یافت(۳)(رابطه ۵).

$$۳۰۱۱/۲۸\ (۱+۰/۲) = ۳۶۱۳/۵۴\ \text{tons} \quad (۴)$$

$$۲۳/۶\left(\frac{۳۰۱۱/۲۸}{۳۰۱۱/۲۸\left(۱+۰/۲\right)}\right) = ۱۹/۶۳\ \text{MJ/kg} \quad (۵)$$

به این ترتیب کارخانه تولید RDF شهر تهران می‌تواند روزانه ۳۶۱۳/۵۴ تن RDF با ارزش حرارتی ۱۹/۶۳MJ/kg (۴۶۹۱/۵۷ kcal/kg) از ۴۰۰۰ تن دورریز پسماند تولید کند. مقدار ارزش حرارتی RDF شهر تهران(۴۶۹۱/۵۷ kcal/kg) با ارزش حرارتی RDF تولید شده توسط Kara و همکاران(۲۰۰۹) از دورریز پسماندهای شهر استانبول ترکیه(با مقدار۴۰۰۰ kcal/kg)، کارخانه تولید RDF در هند(با مقدار۴۰۰۰ kcal/kg) و کارخانه Chianti ایتالیا(با مقدار۴۱۰۸/۱۴۹ kcal/kg) قابل مقایسه است(۱).

ملاحظات اقتصادی

هزینه تولید هر کیلوگرم RDF در ابتدای سال ۱۳۹۲ در حدود ۶۰۰ ریال برآورد گردید(۱۷). براساس اعلام بانک مرکزی نرخ تورم در سال ۱۳۹۳ نسبت به سال ۱۳۹۲، ۲۵/۳٪ بوده(۱۸) لذا می‌توان قیمت هر کیلوگرم RDF را ۷۵۱/۸ ریال در سال ۱۳۹۳ در نظر گرفت. از سوی دیگر قیمت هر لیتر سوخت مازوت و هر متر مکعب گاز طبیعی در سال ۱۳۹۳ (برای کارخانه‌های سیمان گازسوز) به ترتیب به ۲۰۰۰ و ۷۰۰ ریال است(۱۷).

در جدول ۷ مقایسه اقتصادی بین هزینه مصرف سوخت گاز، مازوت و RDF حاصل از دورریزهای پسماند شهر تهران برای تولید ۱ تن کلینکر(بدون احتساب هزینه حمل سوخت) با متوسط مصرف ۸۷۰ kcal انرژی حرارتی به ازای تولید هر کیلوگرم کلینکر در ایران(۱۷) انجام شد.

جدول ۷-مقایسه اقتصادی بین هزینه مصرف سوخت گاز، مازوت و RDF برای تولید ۱ تن کلینکر

Table 7- Economic comparison between gas, mazut and RDF fuel consumption for the production of 1 ton clinker

نوع سوخت	واحد	ارزش حرارتی (kcal بر واحد سوخت)	قیمت (ریال بر واحد سوخت)	مقدار مصرف سوخت	هزینه سوخت (هزار ریال)
گاز طبیعی	m^3	*۸۴۰۰	۷۰۰	۱۰۳/۶	۷۲/۵
مازوت	litre	*۹۷۹۰	۲۰۰۰	۸۸/۸۷	۱۷۷/۷۳
RDF	kg	۴۶۹۱/۵۷	۷۵۱/۸	۱۸۵/۴۴	۱۳۹/۴۱

* براساس مرجع ۱۷

همانطور که در جدول ۷ نشان داده شد، استفاده از سوخت RDF در کوره‌های سیمان برای تولید یک تن کلینکر، اقتصادی‌تر از مصرف سوخت مازوت است. اما در مقایسه با سوخت گاز طبیعی به دلیل ارزش حرارتی پایین RDF نسبت به گاز و در نتیجه مقدار مصرف بیشتر RDF، اقتصادی نیست.

در تهران استفاده از سوخت‌های جایگزین در کوره شماره ۸ کارخانه سیمان تهران به دلیل داشتن پیشرفته‌ترین تکنولوژی فیلتراسیون، پریکلساینر و کنارگذر امکان‌پذیر است. این کوره دارای ظرفیت ۳۴۰۰ تن کلینکر در روز و مصرف انرژی حرارتی ۷۶۳ kcal/kg کلینکر می‌باشد(۱۹). سوخت اصلی کارخانه سیمان تهران گاز طبیعی است، اما در صورت کمبود سوخت به خصوص در فصل زمستان از سوخت کمکی مازوت نیز استفاده می‌شود. حال اگر تنها ۱۰٪ از انرژی حرارتی موردنیاز کوره شماره ۸ با RDF پسماندهای شهر تهران جایگزین شود، هزینه صرفه‌جویی شده حاصل از عدم مصرف سوخت گاز و مازوت به صورت جدول ۸ خواهد بود.

جدول ۸-هزینه صرفه جویی شده حاصل از عدم مصرف سوخت گاز و مازوت برای ۱۰٪ بار حرارتی در کوره شماره ۸

Table 8- The cost savings from the don't consumption of gas and mazut for 10% of heating value in kiln NO. 8

نوع سوخت	واحد	میزان سوخت صرفه‌جویی شده*	هزینه روزانه صرفه‌جویی شده(میلیون ریال)	هزینه سالانه صرفه‌جویی شده (میلیارد ریال)
گاز طبیعی	m^3	۳۰۸۸۳/۳۳	۲۱/۶۲	۷/۹
مازوت	litre	۲۶۴۹۸/۴۷	۵۲/۹۹۷	۱۹/۳۴۴

* ۱۰٪ ارزش حرارتی این کوره معادل ۲۵۹۴۲۰۰۰۰ kcal می‌باشد.

همچنین این کوره برای تامین ۱۰٪ بار حرارتی مورد نیاز خود در روز به ۵۵/۳ تن سوخت RDF شهر تهران نیاز دارد که هزینه آن ۴۱/۶ میلیون ریال می‌شود. بدین‌ترتیب کارخانه سیمان تهران در صورت مصرف کمک سوخت RDF به جای مازوت ۱۱/۴ میلیون ریال در روز و ۴/۱۶ میلیارد ریال در سال درآمد خواهد داشت.

به علاوه از آنجایی که هزینه روزانه دفن هر تن پسماند در مرکز دفن تهران ۱۴ هزار ریال است، در صورت عدم دفن ۵۵/۳ تن پسماند، روزانه ۷۷۴/۲ هزار ریال و سالانه ۲۸۲/۶ میلیون ریال(تنها هزینه دفن پسماند بدون در نظر گرفتن ارزش زمین) برای سازمان مدیریت پسماند شهر تهران نیز صرفه‌جویی مالی به عمل خواهد آمد.

بحث و نتیجه‌گیری

سوخت جایگزین در صنایع سیمان ماده‌ای با ارزش حرارتی حداقل ۱۵ MJ/kg است که از پسماندهای دورریز یا محصولات جانبی صنایع دیگر بدست آمده و با در نظر گرفتن صرفه اقتصادی می‌توان آن را جایگزین سوخت‌های فسیلی رایج درفرآیند پخت سیمان کرد(۷). کوره سیمان به دلیل داشتن درجه حرارت بالا(1450^oC)، زمان ماند طولانی مواد در کوره(بیش از ۲ ثانیه)، محیط قلیایی(برای خنثی سازی گازهای اسیدی حاصل از احتراق پسماند)، حداقل پسماند حاصل از سوزاندن مواد(به دلیل ترکیب شدن خاکستر سوخت با کلینکر)، استفاده از امکانات و شرایط موجود در یک منطقه (در نتیجه عدم احداث زباله سوزها) یکی از بهترین روش‌های دفع مواد زائداست(۲۰).

در جدول ۹ ویژگی‌های دورریز پسماند شهر تهران با استانداردهای یک سوخت جایگزین در کوره سیمان مقایسه شد.

جدول ۹-مقایسه ویژگی‌های دورریز پسماند تهران با استانداردهای یک سوخت جایگزین در کوره سیمان

Table 9- Comparison of Tehran rejected waste with the standards of an alternative fuel in cement kiln

پارامتر	دورریز پسماند شهر تهران	مقدار استاندارد**
LHV(MJ/kg)	۲۱/۴	>۱۵
مقدار رطوبت(٪)	۲۴/۷۲	۲۰ -۲۵
مقدار خاکستر٪(بر پایه وزن خشک)	۲۱	<۱۵
اندازه سوخت(mm)	متغییر(اندازه دورریزهای خطوط پردازش بزرگتر از۷۰ mm و خطوط پالایش ۱۵ mm است(۲))	<۳۰
مقدار گوگرد(٪)	*۰/۱۲۴	<۰/۵

* حاصل تقسیم وزن کل گوگرد(۳/۷۴ تن) بر وزن خشک پسماند(۳۰۱۱/۲۸)

** براساس مراجع ۳ و ۲۱

با توجه به جدول ۹، دورریزهای پسماند تهران دارای ارزش حرارتی و مقدار گوگرد مناسب جهت استفاده در کوره‌های سیمان هستند؛ اما به دلیل بالا بودن مقدار رطوبت، خاکستر و اندازه مواد پسماند(از حدود استاندارد)، نمی‌توان آن‌ها را به صورت خام و بدون پردازش در کوره‌های سیمان مصرف کرد. برای بهبود کیفیت دورریزها، می‌توان به کمک تجهیزات تولید RDF یعنی سرندها، آهنرباها، خردکن‌ها، واحدهای خشک‌کن، جداکننده‌هاو عدل‌بندی پسماندهای شهری با حذف مواد خنثی، کاهش رطوبت و اندازه پسماند، آن‌ها را به سوختی استاندارد با ویژگی‌های قابل کنترل تبدیل کرد(۱۶).

همچنین مقدار خاکستر دورریز پسماندهای شهر تهران ۲۱٪ و بیش از حد استاندارد است. برای کاهش این مقدار خاکستر می‌توان با کاهش یا حذف مواد خنثی پسماند که قابلیت احتراق بالایی ندارند مانند شیشه، خاک و نخاله و فلزات که بیشترین مقدار خاکستر را به ترتیب با ۴۰/۱۹٪، ۱۸٪ و ۱۳/۳۲٪ دارا هستند، میزان خاکستر کل را به ۶٪ رساند(حذف پلاستیک‌ها با وجود درصد بالای تولید خاکستر به دلیل ارزش حرارتی بالا پیشنهاد نمی‌گردد).

کامکار در سال ۱۳۸۸ امکان تولید RDF از پسماندهای شهر شیراز را در سه سناریو ۱) استفاده ۱۰۰٪ از پسماند مواد غذایی، ۲) ترکیب مواد غذایی و پلاستیک‌ها و ۳) ترکیب مواد غذایی، پلاستیک و کاغذ بررسی کرد. سپس با محاسبه ارزش حرارتی RDF تولیدی در هر سه سناریو، تولید RDF از ترکیب مواد غذایی و پلاستیک‌ها را بهترین گزینه بیان کرد. با توجه به این نکته که پلاستیک و کاغذ جزء ارزشمند پسماند بوده و قابلیت بازیافت دارند، در مقاله حاضر تنها استفاده از پسماندهای غیرقابل بازیافت پیشنهاد شد. این کار علاوه بر درآمدزایی(حاصل از فروش مواد بازیافتی) باعث کاهش تخریب منابع طبیعی برای تولید مواد پلاستیکی و کاغذ جدید نیز می‌شود. هر چند شرایط اقلیمی، موقعیت جغرافیایی، عادت های مردمی و به تبع آن‌ها مقدار و کیفیت پسماندهای شهر تهران و شیراز با یکدیگر متفاوت است، در نتیجه بهترین روش مدیریت پسماند نیز در این دو شهر متفاوت خواهد بود. در پژوهشی دیگر که توسط محمدی و همکاران(۲۰۱۲) بر روی پسماندهای شهر ارومیه انجام شد، ترکیب شیمیایی پسماند با روش ASTM محاسبه و بازیابی انرژی پسماند به وسیله جمع‌آوری گاز محل های دفن پیشنهاد شد. از آنجایی که دفن پسماند روش مناسبی برای مدیریت پسماندهای شهری نیست، در مقاله حاضر تولید سوخت پسماند، تنها از دورریزهای پسماند شهر تهران پیشنهاد گردید. با این روش اجازه بازیافت و تولید کود از پسماندهای تر (به عنوان بهترین روش‌های مدیریت پسماند) داده شده و در نهایت برای پسماندهای غیرقابل بازیافت، سوختن در کوره‌های سیمان(که بهترین شرایط را برای سوزاندن پسماند و مواد آلی دارد) انجام می‌شود.

نتایج بررسی دورریزهای پسماند شهر تهران در این مطالعه نشان داد که این دورریزها قابلیت تبدیل شدن به یک سوخت

جایگزین استاندارد برای صنایع سیمان را دارد. کاهش مقدار رطوبت این مواد با جداسازی پسماندهای تر از پسماندهای ورودی به تجهیزات پردازش پسماند، می‌تواند نقش به‌سزایی در افزایش ارزش حرارتی سوخت RDF تولیدی و در نتیجه اقتصادی شدن استفاده از RDF در صنایع سیمان داشته باشد. همچنین اختلاط تایرهای فرسوده با دورریزهای پسماند نیز راهکاری مناسب برای افزایش ارزش حرارتی سوخت‌های پسماند است. از سوی دیگر با ذخیره کربن در صنایع سیمان و بخش مدیریت پسماند می توان از کمک-های مالی جهان به عنوان «طرح اعتبار کربن» برای توسعه تجهیزات تولید RDF و تجهیز کارخانه‌های سیمان نیز استفاده کرد. در نهایت هرچند استفاده از سوخت پسماند در کوره‌های سیمان مزایای متعددی مانند حفظ منابع انرژی تجدیدناپذیر، کاهش تغییرات اقلیمی، کاهش آلودگی آب‌های زیرزمینی ناشی از نشت شیرابه‌های محل‌های دفن پسماند، عدم اشغال زمین‌های با ارزش و ذخیره سرمایه دارد اما عملی سازی این طرح نیاز به بررسی دقیق‌تر آلودگی‌های احتمالی زیست‌محیطی و هزینه تولید و مصرف RDF در کوره‌های سیمان دارد.

منابع

1- Kara, M.,Gunay, E.,Tabak, Y.,Yildiz, S., 2009. Perspectives for pilot scale study of RDF in Istanbul.Turkey, Journal of Waste management, vol.29, pp.2976-2982.

۲- سازمان مدیریت پسماند شهرداری تهران.

۳- کامکار،زهرا، ۱۳۸۸، «بررسی امکانپذیری تولید سوخت جایگزین صنایع سیمان با استفاده از قرص-های سوختی تولید شده از پسماندهای شهری(RDF) شهر شیراز. مطالعه موردی صنایع سیمان مجموعه شرکت سیمان فارس و خوزستان»، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.

4- Kara, M., 2012. Environmental and economic advantages associated with the use of RDF in cement kilns. Journal of Resources Conservation and Recycling, vol. 68, pp. 21-28.

۵- حاجی باقری، هدا، ۱۳۹۲، «مقایسه گزینه های بازیابی انرژی از پسماندهای شهری با استفاده از روش ارزیابی چرخه حیات: مطالعه موردی شهر تهران»، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران.

6- Kara, M.,Gunay, E.,Tabak, Y.,Yildiz, S.,Enc, Vo., 2008.“The usage of refuse derived fuel from urban solid waste in cement industry as an alternative fuel”, 6th IASME/WSEAS International Conference on heat transfer, thermal engineering and environment, Rhodes, Greece.

7- Garg, A., Smith, R., Hill, D., Long, H., P.J, P., S.J.T., S., N.J., 2009. An integrated appraisal of energy recovery options in the United Kingdom using solid recovered fuel derived from municipal solid waste. Journal of Waste Management, vol. 29, pp.2289-2297.

8- Mohammadi, A.,Ebrahimi, A., Amin, M., 2012. Feasibility energy recovery potential of municipal solid waste in Northwest of Iran.Journal of Environmental health engineering, vol.1, pp. 71-74.

۹- اصغری، علیرضا، هراتی، حبیبه، سربازان، محمد، ۱۳۹۲، «بررسی استفاده از پسماندهای محصولات جانبی کارخانه کود آلی(RDF) و تایرهای فرسوده(TDF) بهعنوان سوخت جایگزین در صنعت سیمان(مطالعه موردی: سیمان خوی)»، شانزدهمین همایش ملی بهداشت محیط ایران، تبریز.

۱۰- کارگزاری بورس آتل، ۱۳۹۳. تحلیل شرکت سیمان تهران-سهامی عام(ستران)، www.aselbroker.com.

11- International energy agency, 2014. CO2 emissions from fuel combustion (high lights), see information in: www.iea.org.

12- National climate change office. Iran's second National communication to UNFCCC.Tehran: Department of environment of Islamic republic of Iran; 2010,P. 50 and 57.

13- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigill, S. Integrated solid waste management (Engineering Principles and Management Issues). Singapore: McGraw-Hill; 1993, Chapter4.

14- Nithikul, J., 2007,"Potential of refuse derived fuel production from Bangkok municipal solid waste", degree of master of engineering in environmental engineering and management, Chulalongkorn University, Thailand.

15- Kathiravale, S.,Yunus, M.,Sopian, K., Samsuddin, A.H., Rahman, R.A., 2003.Modeling the heating value of Municipal Solid Waste. Journal of Fuel, vol. 82, pp.1119-1125.

۱۶- رضایی، مهدی، ایزدخواست، پژمان، ۱۳۸۷، «طراحی مسیر زباله و خط تولید RDF برای یک نیروگاه زباله‌سوز با ظرفیت ۱۲۰۰ تن در روز از زباله شهر تهران»، چهاردهمین همایش ملی مدیریت پسماند، مشهد.

۱۷- رکنی زاده، جلیل، نجاتی، وحید، ۱۳۹۳، «بررسی فنی و اقتصادی ورود سوخت حاصل از زباله و تایر فرسوده در صنایع سیمان ایران»، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۷، شماره ۱، صفحه ۱۱۱ تا ۱۲۸.

۱۸- بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران، ۱۳۹۳. نرخ تورم در تیر ماه ۱۳۹۳ اعلام شد، www.cbi.ir.

۱۹- دفتر فنی و برنامه‌ریزی سیمان تهران، ۱۳۹۳، گزارش مقایسه واحدهای ۴، ۶ و ۸ از نظر فنی و تولیدی،www.cementevhnology.ir.

۲۰- طلاقت، علیرضا، ۱۳۹۳. آشنایی با تکنولوژی مدیریت ضایعات در کوره‌های سیمان، www.irancement.com.

21- Thomanetz, E., 2012. Solid recovered fuels in the cement industry with special respect to hazardous waste. Journal of Waste management & research, vol.4, pp.404-412.