

## ارایه روش نوآورانه تحلیل انرژی نیروگاه های زباله سوز با روش معکوس حل برای محاسبه آنالیز شیمیایی زباله

**چکیده:** هدف اصلی این مقاله ارائه یک روش نوین برای تجزیه و تحلیل جامع و دقیق انرژی نیروگاه های زباله سوز می باشد. در تمامی مطالعات انجام شده در این زمینه میانگین عددی آنالیز زباله در طی یک بازه زمانی مورد استفاده قرار گرفته است. استفاده از این عدد باعث ایجاد خطا در داده های تحلیل انرژی خواهد شد. در این مطالعه در ابتدا از روش حل معکوس برای محاسبه آنالیز شیمیایی، دبی جرمی سوخت و هوا استفاده شده است. اندازه گیری دبی سوخت نیز به صورت میانگین گیری در بازه زمانی محاسبه شده که باعث ورود خطا به محاسبات خواهد شد. با محاسبه دبی جرمی زباله به روش معکوس، امکان ورود این خطا به محاسبات نیز سلب می گردد. پس از محاسبه آنالیز زباله، دبی زباله و هوای تازه، تحلیل انرژی دقیق و قابل اعتماد برای کل حجم کنترل نیروگاه زباله سوز ارائه گردیده است. در این روش تعداد ۸ ترم تخریب و ۱۰ ترم تلفات ارائه گردیده است. عوامل ناکارآمدی ارائه شده در این مقاله، کامل ترین عوامل ناکارآمدی در نیروگاه های زباله سوز را ارائه می نماید. روش مذکور در نیروگاه آرادکوه انجام و نتایج نشان می دهد عامل تخریب انرژی توسط گازی ساز دارای بیشترین مقدار تلفات انرژی است. راندمان انرژی محاسبه شده برای نیروگاه معادل ۱۳/۱ درصد محاسبه شده است.

**واژه های راهنما:** تجزیه و تحلیل انرژی، نیروگاه زباله سوز، زباله، روش معکوس، تخریب انرژی، تلفات انرژی

سید محسن  
بنی فاطمه  
دانشجوی دکتری

سید علی  
بهبهانی نیا\*

دانشیار،  
دانشکده مهندسی  
سیستم های انرژی،  
دانشکده مهندسی مکانیک،  
دانشگاه صنعتی خواجه  
نصیرالدین طوسی، تهران

مقاله علمی پژوهشی  
دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۲  
بازنگری: ۱۴۰۳/۰۱/۰۱  
پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۱۸

Mohsen  
Banifateme  
PhD. Student

Ali Behbahania\*

Associate Professor,  
Department of Energy  
System Engineering,  
Faculty of Mechanical  
Engineering, K. N.  
Toosi University of  
Technology, Tehran

## An innovative inverse solution method for exergy analysis of waste-to-energy power plants to calculate waste chemical composition

**Abstract:** The main objective of this article is to present a novel method for comprehensive and accurate exergy analysis of waste-to-energy power plants. In all previous studies conducted in this field, the average numerical value of waste analysis over a specific time period has been used. However, using this value leads to errors in exergy analysis data. In this study, an inverse solution method is initially employed to calculate the chemical composition, mass flow rate of fuel, and air. The measurement of the fuel flow rate is also averaged over the calculation time period, introducing errors into the calculations. By calculating the waste mass flow rate using the inverse method, the possibility of introducing such errors into the calculations is eliminated. After calculating the waste composition, waste and fresh air mass flow rates, a precise and reliable exergy analysis is provided for the entire controlled volume of the waste-to-energy power plant. The method includes 8 degradation terms and 10 loss terms. The inefficiency factors presented in this article represent the most comprehensive inefficiency factors in waste-to-energy power plants. The applied method is implemented for the Aradkuh power plant, and the results demonstrate that the gasifier is the main exergy destruction factor with the highest exergy losses. The calculated exergy efficiency for the power plant is determined to be 1.13%.

**Keywords:** Exergy analysis, Waste-to-energy power plant, Waste, Reverse analysis method, Exergy destruction, Exergy losses.

## ۱- مقدمه

در مطالعه مشابه، سلطانی و همکاران به بررسی آنالیز انرژی پیشرفته برای نیروگاه‌های سیکل ترکیبی توربین گاز، بخار و زیست‌توده پرداخته‌اند. در این مطالعه تحلیل انرژی برای سیستم صورت گرفته و امکان بهبود عملکرد انرژی در کل سیستم مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتیجه این مطالعه نشان داده که امکان بهبود عملکرد انرژی در بویلر بازیاب حرارت بیشتری مقدار را خواهد داشت. در این مطالعه نیز عوامل تلفات و تخریب انرژی معرفی نگردیده است [۶].

مانرینگ و همکاران تحلیل انرژی و انرژی برای نمونه آزمایشی دستگاه راکتور گازی‌ساز به همراه موتور احتراق داخلی را مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه پارامترهای مورد نیاز اندازه‌گیری در شرایط عملکردی برق تولیدی ۴، ۶، ۸ و ۱۰ کیلووات استخراج شده است. تحلیل انرژی و انرژی از روش تلفات در این مطالعه ارائه و عوامل ناکارآمدی سیستم به طور مفصل مورد بررسی قرار گرفته است. برای تحلیل انرژی و انرژی عوامل ناکارآمدی از جمله تلفات انرژی در موتور احتراق داخلی، تلفات انرژی در راکتور گازی‌ساز، تلفات انرژی در رادیاتور موتور و تلفات انرژی توسط دود خروجی ارائه گشته است. این مطالعه نیز با توجه به ثابت بودن آنالیز سوخت ورودی از نظر تحلیل انرژی متفاوت با نیروگاه‌های زیاله‌سوز خواهد بود [۷].

در ادامه به بررسی مطالعاتی که به مدلسازی سیکل تولید گاز سنتز از زیست‌توده و در نهایت تحلیل انرژی به‌وسیله داده‌های حاصل از مدل‌سازی پرداخته خواهد شد.

در مطالعه‌ای، مدل‌سازی و شبیه‌سازی فرآیند تبدیل به گاز زیست‌توده با در نظر گرفتن ۲۳ نوع مختلف از منابع زیست‌توده توسط مهریویا و همکاران مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است. در این مطالعه شبیه‌سازی سیستم مورد نظر در نرم افزار اسپین انجام و مسئله برای سوخت‌های زیست‌توده متفاوت انجام شده است. در این مطالعه تاثیرپذیری شدید راندمان انرژی و انرژی توسط پارامتر رطوبت موجود در سوخت زیست‌توده مورد مشخص گردیده است. این تاثیرپذیری شدید نشان دهنده مهم بودن آنالیز سوخت ورودی در تحلیل انرژی خواهد بود [۸].

پلگرینی و الیویرا مدل تعادلی از گازی‌سازی زیست‌توده نیشکر ارائه نمودند. همچنین یک مطالعه پارامتری با هدف تأیید تأثیر بسیاری از متغیرهای ذاتی مدل از جمله: دمای گازی‌سازی، محتوای رطوبت، دمای هوا و غیره انجام شده است. پس از مطالعه پارامتری، یک تحلیل انرژی به منظور ارزیابی برگشت‌ناپذیری‌های مرتبط با فرآیند و تأثیر دما، رطوبت، تولید زغال چوب و تلفات حرارتی بر روی آن‌ها انجام شده است. راندمان انرژی در این مطالعه برای راکتور گازی‌ساز برابر ۳۰

رشد سریع جمعیت، شهرنشینی و صنعتی‌شدن به طور قابل توجه، تولید زیاله جامد را افزایش می‌دهند [۱]. زیاله خود نوعی زیست‌توده محسوب می‌گردد. زیست‌توده مجموعه مواد آلی است که از منابع زنده، مانند گیاهان، جانوران و میکروارگانیسم‌ها، به دست می‌آید. از روش‌های نوین امحای زیاله، می‌توان به روش تولید انرژی از زیاله در نیروگاه زیاله‌سوز نام برد [۲]. دنیا به سمت تولید انرژی در کنار امحای زیاله و رساندن آسیب به طبیعت به کمترین حد ممکن است. در نتیجه، تجزیه و تحلیل انرژی و انرژی در این نوع نیروگاه‌ها باید به صورت دقیق مدنظر قرار گیرد [۳].

با شروع بحران انرژی در دهه ۷۰ میلادی در دنیا، تحلیل انرژی در رأس تحقیقات ترمودینامیکی سه دهه اخیر قرار گرفته است. تحلیل انرژی، بر مبنای قانون اول و دوم ترمودینامیک بنا شده است. انرژی حداکثر کار مفید است که از مقدار مشخص انرژی یا جریانی از مواد حاصل می‌شود [۴].

در بحث تحلیل انرژی، هدف تعیین مقدار، محل و عوامل موثر بر تولید بازگشت‌ناپذیری‌ها در طی فرآیندهای مختلف سیکل ترمودینامیکی است [۵].

اصلی‌ترین مشکل در تحلیل انرژی نیروگاه‌های زیاله‌سوز، محاسبه انرژی زیاله به عنوان سوخت ورودی است. با توجه به ناهمگن بودن سوخت زیاله، عمل نمونه برداری از این نوع سوخت متفاوت خواهد بود. در این نیروگاه زیاله در منبع ذخیره موجود و عمل تزریق سوخت به راکتور با جرثقیل‌های سقفی انجام می‌پذیرد. آنالیز زیاله موجود در هر چنگک جرثقیل با چنگک دیگر متفاوت خواهد بود. این بدان معنی است که آنالیز زیاله در هر نمونه با نمونه دیگر متفاوت است.

در تحلیل انرژی انواع این نیروگاه‌ها با توجه به اینکه زیاله خود نوعی زیست‌توده است که دارای آنالیز ناهمگن است، در ابتدا به بررسی تحلیل انرژی نیروگاه‌های تولید انرژی از زیست‌توده پرداخته شده است. در مطالعه‌ای اطهری و همکاران یک سیکل ترکیبی با توربین گاز، بخار و یک سیستم زیست‌توده چوب به عنوان سوخت مدل‌سازی و آنالیز انرژی به روش عددی انجام شده است [۳]. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بیشترین پتانسیل کاهش تلفات و تخریب انرژی در بویلر بازیاب حرارت و کمترین آن در کندانسور سیکل بخار خواهد بود. در این مطالعه با توجه به ثابت بودن آنالیز شیمیایی چوب، آنالیز انرژی با دقت بسیار بالا قابل انجام خواهد بود. در این مطالعه در تحلیل انرژی به ارائه عدد برای راندمان بسنده گردیده است.

گزارش شده است. از ضعف‌های این مطالعه می‌توان به در نظر گرفته نشدن ترم تلفات حاصل از رطوبت موجود در سوخت اشاره کرد. همچنین در نظر گرفتن آنالیز ثابت برای سوخت زباله که خود ترکیبی ناهمگن است فرض درستی نبوده است. [۱۵].

لطفی و همکاران در مطالعه‌ای تحلیل انرژی برای بویلر بازیاب و راکتور گازی‌ساز نیروگاه زباله‌سوز ارائه نمودند. در این مطالعه نیز عوامل مختلف ناکارآمدی سیستم مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله به منظور جلوگیری از وابستگی محاسبه انرژی زباله به آنالیز شیمیایی زباله از رابطه تقریبی انرژی زیست‌توده وابسته به ظرفیت ویژه حرارتی استفاده شده است. استفاده از این روابط تقریبی باعث اضافه شدن خطا به روش تحلیل خواهد شد [۱۶].

به طور خلاصه، تمام مطالعات موجود در زمینه تحلیل انرژی و انرژی نیروگاه‌های زباله‌سوز دارای دو ضعف اساسی است.

۱- استفاده از آنالیز میانگین زباله که باعث ایجاد خطا در محاسبات تحلیل انرژی خواهد شد.

۲- عدم ارائه تحلیل کامل و دقیق برای کل حجم کنترل نیروگاه زباله‌سوز با محاسبه تمامی عوامل ناکارآمدی انرژی.

برای رفع این دو ضعف اساسی در تحلیل نیروگاه‌های زباله‌سوز، این مقاله رویکردی نوآورانه بر اساس روش حل معکوس ارائه می‌دهد. در این مطالعه ابتدا با روش حل معکوس آنالیز شیمیایی زباله محاسبه خواهد شد. در مرحله بعد تحلیل دقیق انرژی برای کل نیروگاه زباله‌سوز انجام و منابع تعداد ۸ عبارت برای تخریب و ۱۰ عبارت برای تلفات انرژی ارائه گشته است. در نهایت این روش با انجام داده‌برداری در نیروگاه زباله‌سوز آرادکوه در تهران به عنوان مطالعه موردی انجام شده است.

## ۲- شرح مسئله

مسئله مورد بررسی در این تحقیق ارائه روشی دقیق و قابل اطمینان برای تحلیل انرژی با محاسبه تمامی عوامل ناکارآمدی است. در نیروگاه‌های زباله‌سوز به دلیل ناهمگن بودن سوخت زباله استفاده از نمونه‌برداری باعث ایجاد خطاهای با اندازه بزرگ به تحلیل انرژی خواهد شد. در این مطالعه سعی در حل این مشکل و ارائه روش قابل اطمینان برای تحلیل انرژی شده است.

## ۳- روش حل

روش‌شناسی مورد استفاده در این مطالعه در الگوریتم ارائه شده در شکل (۱) نشان داده شده است. در مرحله اول داده‌های مورد نیاز از نیروگاه آرادکوه تهران برای حل معکوس و همچنین تحلیل

درصد محاسبه شده است. در این مطالعه نیز اثر درصد رطوبت بر راندمان سوخت مشخص گردید [۹].

کارامارکوویچ و همکاران نیز یک مدل تعادلی برای راکتور گازی‌ساز با سوخت زیست‌توده  $CH_{1.4}O_{0.59}N_{0.0017}$  ارائه نموده‌اند. با مدلسازی راکتور در درصد رطوبت‌های متفاوت سوخت زیست‌توده در محدوده دمایی ۹۰۰-۱۳۷۳ کلوین مشخص گردید که افزایش رطوبت در زیست‌توده به کاهش راندمان فرآیندهای مورد بررسی می‌شود. در این مطالعه نیز فقط راندمان انرژی مورد محاسبه قرار گرفته است [۱۰].

مولر و همکاران یک نیروگاه سیکل ترکیبی راکتور گازی‌ساز با سوخت زیست‌توده، پیل سوختی و میکروتوربین را مورد بررسی قرار داده‌اند. تحلیل انرژی و انرژی با سوخت زیست‌توده به صورت گرفته و مشخص گردیده که بیشترین ترم تخریب انرژی مربوط به راکتور گازی‌ساز است [۱۱].

ونایی و همکاران یک تحلیل کامل انرژی، انرژی، انرژی-اقتصادی، انرژی-محیط زیستی برای نیروگاه‌های ترکیبی زباله سوز با سیکل رانکین آلی ارائه نمودند [۱۲، ۱۳].

در ادامه به انواع تحلیل انرژی که در مورد سوخت زباله انجام شده است پرداخته خواهد شد. چن و همکاران طرح یک سیستم ترکیبی نیروگاه زغال سنگ سوز تولید بخار به همراه یک نیروگاه زباله‌سوز را ارائه نمودند. در این مطالعه نیروگاه مورد ارزیابی انرژی قرار گرفت. در این ارزیابی آنالیز شیمیایی زباله ثابت فرض شده است که فرضی بسیار نادرست خواهد بود [۱].

سلهمزید و همکاران نیز تحلیل انرژی و انرژی برای یک نیروگاه زباله‌سوز در کشور نروژ ارائه نمودند. در این مطالعه رابطه‌ای بر مبنای آنالیز شیمیایی زباله ارائه گردیده است. برای تحلیل انرژی و انرژی در این از آنالیز زباله میانگین ارائه شده برای کشور نروژ استفاده گردیده است که این آنالیز زباله متفاوت با آنالیز زباله مورد استفاده در لحظه داده برداری خواهد بود. این عملیات باعث ورود خطای بسیار محسوس به محاسبات خواهد شد [۱۴].

اعظمی و همکاران تحلیل انرژی و انرژی نیروگاه‌های زباله‌سوز از نوع گازی‌ساز با سیکل رانکین را ارائه نمودند. برای آنالیز زباله نیز سه منطقه از کلان شهر تهران انتخاب و از میانگین ترکیب شیمیایی زباله‌های انباشته شده، آنالیز زباله میانگین مورد محاسبه قرار گرفت. سپس آنالیز انرژی و انرژی برای همه اجزا و بویلر بازیاب انجام شد. نتایج این مطالعه نشان داد که بازگشت‌ناپذیری در بویلر بازیاب با  $52617/3$  کیلووات منبع اصلی تخریب انرژی بوده است. همچنین بازده کلی انرژی و انرژی بویلر بازیاب مورد مطالعه به ترتیب  $78/7$  و  $16/0$  درصد

اگرژی کل جریان سیال شامل اگرژی شیمیایی و فیزیکی، با استفاده از معادله (۳) محاسبه می‌شود. در اینجا مقادیر اگرژی شیمیایی مولی استاندارد از مرجع [۱۸] استخراج شده است.

$$\dot{E}_i = \left( \left( \frac{\dot{m}_i}{MW_i} \right) \bar{e}_i^{ch} + \dot{m}_i e_i^{ph} \right) \quad (3)$$

### ۳-۱- اگرژی سوخت

همانطور که بیان شد، سوخت زباله خود جریان جرمی جامد تراکم‌ناپذیر محسوب می‌شود. برای محاسبه اگرژی فیزیکی جریان‌های جرمی زیست‌توده جامد تراکم‌ناپذیر، معادله زیر قابل استفاده است [۱۹].

$$e_{fuel}^{ph} = c_p(T - T_0 - \ln(T/T_0)) \quad (4)$$

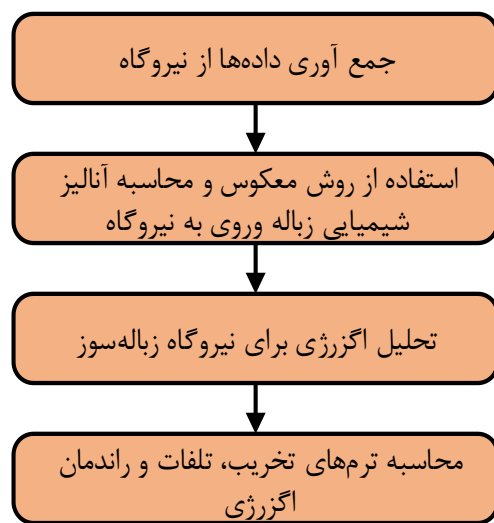
اگرژی شیمیایی زباله بر مبنای آنالیز شیمیایی زباله مطابق رابطه (۵) قابل محاسبه خواهد بود [۲۰].

$$e_{fuel}^{ch} = LHV \left( \frac{1}{0.412} + \frac{1}{2160} \frac{x_{H2}}{x_C} - \frac{1}{2499} \frac{x_{O2}}{x_C} \left( 1 + \frac{1}{7884} \frac{x_{H2}}{x_C} \right) + 0.0450 \frac{x_{N2}}{x_C} \right) \left( 1 - \frac{0}{3035} \frac{x_{O2}}{x_C} \right)^{-1} \quad (5)$$

### ۳-۲- محاسبه آنالیز شیمیایی زباله به روش معکوس

روش معکوس برای تخمین ترکیب زباله‌های جامد شهری نسبت به روش‌های سنتی نمونه‌برداری چندین مزیت را داراست. با استفاده از تکنیک‌ها و روش‌های ریاضی و محاسباتی، این روش نیاز به نمونه‌برداری و تحلیل فیزیکی زباله‌های جامد شهری را که نیازمند صرف زمان، نیرو و هزینه است را از بین می‌برد [۲۱]. روش معکوس به‌ویژه در نیروگاه‌های زباله‌سوز بسیار ارزشمند است، زیرا داشتن اطلاعات دقیق درباره ترکیب زباله‌های جامد شهری برای بهینه‌سازی تولید انرژی بسیار حائز اهمیت است. با تخمین آنالیز شیمیایی زباله به‌صورت غیرمستقیم از طریق تحلیل گازهای خروجی دودکش و سایر اندازه‌گیری‌ها، روش معکوس به نیروگاه‌ها امکان می‌دهد تصمیمات معقول درباره پارامترها و مدیریت نیروگاه را اتخاذ کنند. این موضوع می‌تواند

اگرژی نیروگاه جمع‌آوری می‌گردد. سپس آنالیز شیمیایی زباله، دبی جرمی زباله و دبی جرمی هوا با استفاده از روش حل معکوس مورد محاسبه قرار می‌گیرد. در این مرحله به دلیل عدم وجود امکان اندازه‌گیری برخی از پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل اگرژی نیروگاه (کار فن و کار پمپ)، نیروگاه در نرم‌افزار ترموفلو مدل‌سازی و داده‌های مورد نیاز توسط نرم‌افزار استخراج می‌گردد. پس از انجام این مراحل، تمامی پارامترهای مورد نیاز برای تجزیه و تحلیل کامل اگرژی در دسترس بوده و پس از اعمال تجزیه و تحلیل اگرژی برای کل نیروگاه، پارامترهای تخریب، اتلاف و راندمان اگرژی مورد محاسبه قرار می‌گیرند.



شکل ۱ الگوریتم حل مسئله تحلیل اگرژی در نیروگاه زباله‌سوز با استفاده از روش معکوس

تجزیه و تحلیل اگرژی، توصیف واقعی‌تر از عملکرد سیستم نسبت به تجزیه و تحلیل انرژی ارائه می‌دهد. همچنین منابع، مکان‌ها و مقادیر ناکارآمدی‌های ترمودینامیکی واقعی را ارائه می‌کند. اولین گام در انجام تجزیه و تحلیل اگرژی، محاسبه اگرژی جریان برای تمام جریان‌های نشان داده شده است. اگرژی جریان شامل چهار جزء اگرژی شیمیایی، فیزیکی، جنبشی و پتانسیل است. در این مطالعه از دو مورد آخر به عنوان فرض ساده‌کننده صرف‌نظر شده است. بنابراین، مجموع اگرژی‌های فیزیکی و شیمیایی، مقدار اگرژی هر جریان در سیستم را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که اگرژی‌های شیمیایی مولی استاندارد برای مواد مختلف معمولاً بر واحد مول اجزا ارائه می‌شود [۱۷].

$$e_i^{ph} = (h_i - h_0) - T_0(s_i - s_0) \quad (1)$$

$$\bar{e}_i^{ch} = \sum \bar{x}_j \bar{e}_j^{ch} + \bar{R}T_0 \sum \bar{x}_j \ln \bar{x}_j \quad (2)$$

$$x = \begin{bmatrix} C \\ O \\ H \\ W \\ N \\ S \\ Ash \\ \dot{m}_a \\ \alpha \\ \dot{m}_f \end{bmatrix} \quad (8)$$

ماتریس حساسیت (A) به عنوان معادلاتی تعریف می‌گردد که معلومات و مجهولات مسئله را به هم وابسته می‌سازد. در این مطالعه با توجه به ثابت بودن مسئله به عنوان یک نیروگاه زباله‌سوز این ماتریس همانند ماتریس مطالعه بنی‌فاطمه و همکاران خواهد بود [۲۱]. در این قسمت مسئله معکوس با کمک روش خطی‌سازی و تبدیل مسئله غیر خطی به خطی حل می‌گردد. همچنین به منظور تضمین پایداری و قابلیت اعتماد جواب بدست آمده از روش تنظیم‌کننده برای پایداری جواب نیز استفاده می‌شود. با تعیین یک پارامتر تنظیم‌کننده مناسب، روش معکوس دقت حل به اندازه کافی افزایش خواهد یافت [۲۱].

### ۳-۳- تلفات و تخریب اگزوزی

حجم کنترل مورد نظر برای تحلیل اگزوزی این مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است. در این بخش عوامل تلفات و تخریب اگزوزی به تفکیک مورد بحث قرار گرفته و روابط مربوطه برای محاسبه عوامل ناکارآمدی مورد نیاز آورده شده‌اند.

#### ۳-۳-۱- تلفات اگزوزی ناشی از شیرابه

در نیروگاه‌های زباله‌سوز، زباله‌ها قبل از ورود به راکتور به منظور از دست دادن رطوبت موجود در یک مخزن ذخیره زباله انباشته می‌شوند. زباله ورودی معمولاً ۵ تا ۷ روز مورد استفاده قرار نگرفته و درصد زیادی از رطوبت موجود در زیر مخزن زباله جمع خواهد شد [۲۲]. در زیر مخزن زباله، مخزن شیرابه وجود دارد که شیرابه خارج شده از زباله در آن جمع‌آوری می‌گردد. خارج شدن جریان جرمی شیرابه خود نوعی تلفات انرژی محسوب می‌شود که بر طبق رابطه (۹) و (۱۰) مورد محاسبه قرار می‌گیرند. به عنوان فرض ساده‌کننده، شیرابه زباله را رطوبت خالص در نظر گرفته و از دیگر اجزای آن صرف‌نظر می‌شود. فرض یاد شده به دلیل تشکیل بیش از ۹۰ درصدی شیرابه از رطوبت، فرض درست و منطقی خواهد بود [۲۳].

منجر به بهبود کارایی انرژی، کاهش آلاینده‌ها و بهبود عملکرد کلی سیستم تولید انرژی از زباله شود.

برای محاسبه ترکیب شیمیایی زباله‌های جامد شهری از روش معکوس ارائه شده توسط بنی‌فاطمه و همکاران استفاده شده است [۲۱]. در روش معکوس ارائه شده عوامل قابل اندازه‌گیری زیر به عنوان ورودی روش معرفی خواهند شد.

- مولفه‌های گاز خروجی و درصد جرمی آن‌ها، از جمله اکسیژن، دی‌اکسیدکربن و دی‌اکسید سولفور و غیره.
- درصد جرمی کربن و نرخ جریان جرمی خاکستر.
- فشار و دمای گاز سینتری ورودی به واحد بازیابی حرارت، بخار تولیدی و گاز خروجی دودکش.
- پارامترهای زیر نیز توسط الگوریتم روش حل معکوس قابل تعیین هستند:

- محتوای زباله‌های جامد شهری که شامل درصد جرمی هیدروژن، اکسیژن، کربن، رطوبت، سولفور و سایر عناصر در سوخت می‌باشد.
- ارزش حرارتی زباله‌های جامد شهری
- نرخ جریان جرمی هوا

روش معکوس با تعریف بردار B به عنوان بردار پارامترهای اندازه‌گیری آغاز می‌شود. در ادامه ماتریس ضرایب A که از روابط واکنش‌های احتراق موجود در نیروگاه مورد محاسبه قرار خواهد گرفت. در این قسمت بردار x که بردار پارامترهای مجهول در مسئله معکوس است تعریف می‌گردد. بردار x از رابطه زیر قابل محاسبه است [۲۱].

$$Ax = B \quad (6)$$

بردار (B) به عنوان بردار پارامترهای قابل اندازه‌گیری به صورت زیر نشان داده شده است [۲۱].

$$B = \begin{bmatrix} CO_2 \\ CO \\ O_2 \\ H_2O \\ SO_2 \\ N_2 \\ Q \\ \dot{m}_{fg} - \dot{m}_r \\ \dot{m}_r \\ 100 \end{bmatrix} \quad (7)$$

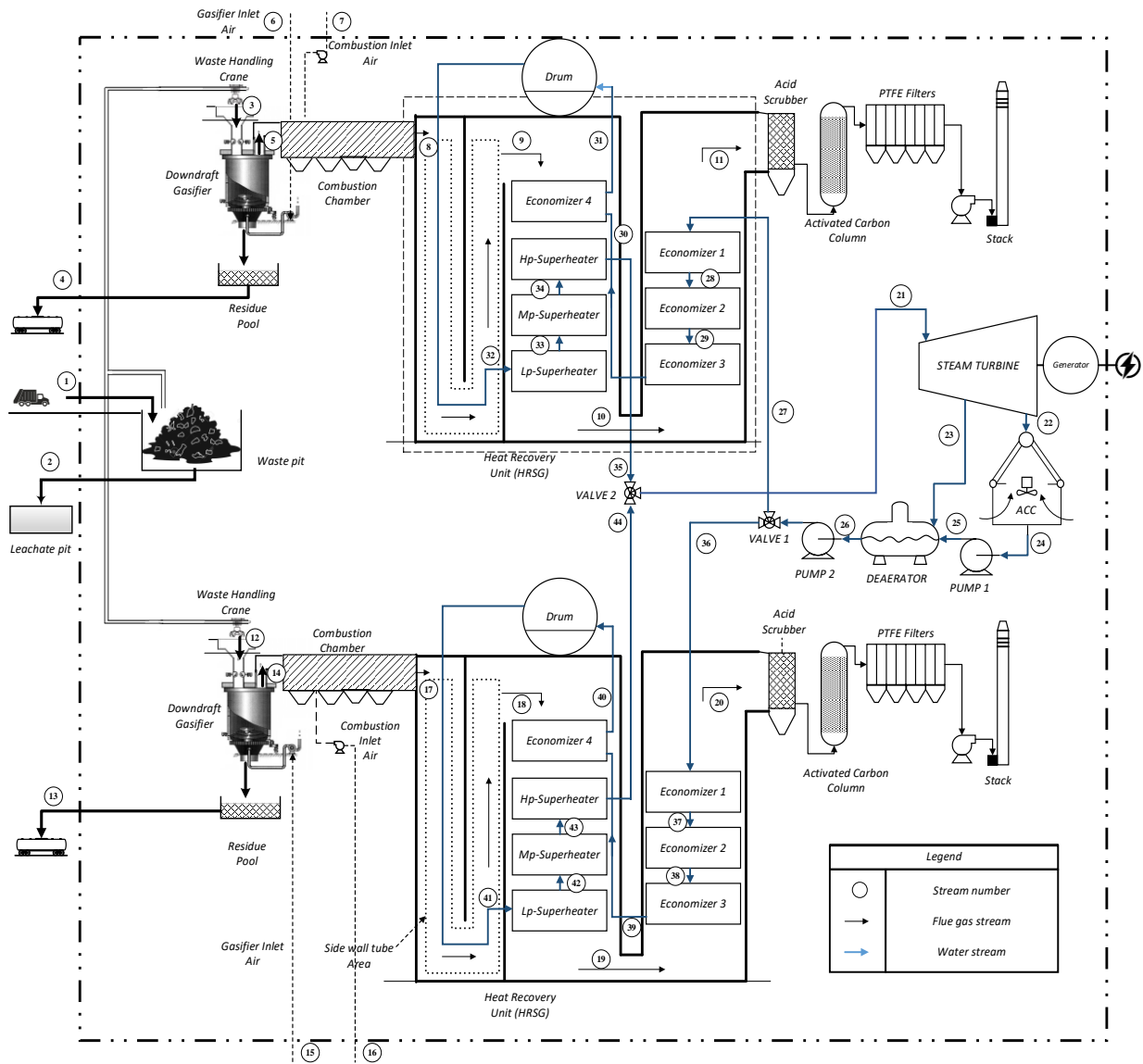
همچنین بردار (x) به عنوان بردار مجهولات از معادله (۶) محاسبه می‌گردد. بردار (x) به صورت زیر نمایش داده می‌شود [۲۱].

مقدار خاکستر باقیمانده نسبت به دبی سوخت ورودی در این نو از نیروگاه‌ها، معمولاً عدد بالاتر نسبت به نیروگاه‌های معمول خواهد داشت [۲۴]. در روش ارائه شده در این مطالعه مقدار عددی تلفات انرژی خاکستر باقیمانده به دو پارامتر مستقل انرژی فیزیکی و شیمیایی خاکستر خروجی تقسیم شده است. تلفات انرژی فیزیکی جریان خاکستر طبق رابطه (۱۲) محاسبه خواهد شد [۲۵].

$$EL_1 = \dot{m}_3 e_3^{ph} \quad (9)$$

$$EL_2 = \frac{\dot{m}_3}{MW_{H_2O}} \bar{e}_{H_2O}^{ch} \quad (10)$$

### ۳-۳-۲- تلفات انرژی ناشی از خاکستر باقیمانده



شکل ۲ دیاگرام جریانی نیروگاه زباله‌سوز آرادکوه به منظور تحلیل انرژی سیستم

ترم تلفات انرژی شیمیایی جریان خاکستر نیز با استفاده از رابطه (۱۴) محاسبه خواهد شد [۱۶].

$$EL_4 = \left( \frac{\dot{m}_6}{MW_6} \right) [(\bar{x}_{C6} \bar{e}_C^{ch} + \bar{x}_{Ash6} \bar{e}_{Ash}^{ch}) + RT_0 (\bar{x}_{C6} \ln \bar{x}_{C6} + \bar{x}_{Ash6} \ln \bar{x}_{Ash6})] \quad (14)$$

$$e_6^{ph} = c_{P6} \left( T_6 - T_0 - T_0 \ln \frac{T_6}{T_0} \right) \quad (12)$$

برای محاسبه ظرفیت گرمایی ویژه جریان خاکستر رابطه (۱۳) مورد استفاده قرار خواهد گرفت [۱۶].

$$c_{P6} = (0.594 + 5.86 \times 10^{-4} T) \quad (13)$$

با تشکیل کربن مونواکسید مقدار آگزرژی بیشتری از حجم کنترل خارج خواهد شد. دو ترم تلفات آگزرژی شیمیایی و فیزیکی از روابط (۱۹) و (۲۰) محاسبه خواهند شد [۲۶].

$$EL_7 = \dot{m}_{13}(e_{13}^{ph}) \quad (19)$$

$$EL_8 = \dot{m}_{13}(e_{13}^{ch}) - \dot{E}L_3 \quad (20)$$

مقدار ترم تلفات آگزرژی تشکیل کربن مونواکسید متناسب با اختلاف آگزرژی شیمیایی استاندارد کربن مونواکسید و کربن دی اکسید است. مقدار این پارامتر از رابطه (۲۱) محاسبه خواهد شد [۲۷].

$$EL_9 = \frac{\dot{m}_8 \bar{x}_{CO} (\bar{e}_{CO}^{ch} - \bar{e}_{CO_2}^{ch})}{MW_2} \quad (21)$$

### ۳-۳-۵- تخریب آگزرژی در گازی ساز و محفظه احتراق

برای محاسبه تخریب آگزرژی در گازی ساز و محفظه احتراق به صورت جدا، نیاز به دستگاه آنالیزور گاز سنتز خواهد بود. در صورت دسترسی به چنین دستگاهی، می توان مقدار آگزرژی تخریب شده را برای این دو جز به تفکیک محاسبه نمود. در این مطالعه با توجه به عدم دسترسی به دستگاه مذکور، دو ترم تخریب در هم ادغام شده و ترم تخریب گازی ساز و محفظه احتراق را تشکیل خواهند داد [۲۶].

$$ED_1 = \dot{E}_2 + \dot{E}_4 + \dot{E}_7 - \dot{E}_6 - \dot{E}_8 - (EL_5 + EL_6) \quad (22)$$

### ۳-۳-۶- تخریب آگزرژی در بویلر بازیاب حرارت

دومین ترم تخریب آگزرژی در بویلر بازیاب حرارت رخ خواهد داد. این ترم تخریب در نتیجه انتقال حرارت بین دو جریان جرمی آب ورودی به بویلر بازیاب حرارت و دود تولید شده در محفظه احتراق رخ خواهد داد [۲۶].

$$ED_2 = \dot{E}_8 + \dot{E}_{15} - \dot{E}_{21} - \dot{E}_{13} - (EL_5 + EL_6) \quad (23)$$

### ۳-۳-۷- تخریب آگزرژی در توربین بخار

برای توربین بخار همانطور که از شکل (۲) مشخص است، ترم تخریب آگزرژی به توسط رابطه (۲۴) محاسبه می شود. برای

به منظور فرض ساده کننده مقدار آگزرژی شیمیایی و جرم مولی خاکستر به ترتیب برابر با ۹۹۹۵۰ کیلوژول بر کیلومول و ۷۶ کیلوگرم بر مول در نظر گرفته شده است [۲۶].

### ۳-۳-۳- تلفات آگزرژی ناشی از تشعشع و همرفت

تلفات آگزرژی حرارتی ناشی از تشعشع و همرفت دیواره ها با استفاده از معادله های (۱۵) و (۱۶) محاسبه خواهند شد. لازم به ذکر است که این پارامترها به طور جداگانه برای گازی ساز، محفظه احتراق و بویلر بازیاب حرارت تشکیل خواهد شد. مجموع این مقادیر کل تلفات ناشی از تابش یا همرفت را تشکیل خواهد داد [۲۷].

$$EL_5 = A q_r \left( 1 - \frac{4}{3} \times \frac{T_0}{T_s} + \frac{1}{3} \times \left( \frac{T_0}{T_s} \right)^4 \right) \quad (15)$$

$$EL_6 = A q_c \left( 1 - \frac{T_0}{T_s} \right) \quad (16)$$

$$q_c = 0.174 \left[ \left( \frac{T_s - 460}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0 - 460}{100} \right)^4 \right] \quad (17)$$

$$q_r = 0.296(T_s - T_0)^{1.25} \sqrt{\frac{196.85V_w + 68.9}{68.9}} \quad (18)$$

در معادلات بالا  $q_r$  و  $q_c$  به ترتیب شارهای حرارتی همرفتی و تابشی به محیط هستند و  $A$  مساحت جانبی بویلر در تماس با محیط خواهد بود. علاوه بر این،  $T_s$  و  $V_w$  به ترتیب دمای سطح دیوار بویلر و سرعت باد را نشان می دهند.

### ۳-۳-۴- تلفات آگزرژی ناشی از خروج گاز آگزوز

جریان دود خروجی بویلر بازیاب حرارت از سه منبع ناکارآمدی آگزرژی فیزیکی دود خروجی، آگزرژی شیمیایی دود خروجی و آگزرژی ایجاد کربن مونواکسید تشکیل می شود [۲۸]. تلفات حاصل از آگزرژی فیزیکی بدین معنی است که جریان جرمی مذکور همچنان توانایی تولید کار را داشته و به تعادل ترمودینامیکی با محیط دست نیافته است. تلفات حاصل از آگزرژی شیمیایی تا رسیدن جریان جرمی به تعادل مرده با محیط ادامه خواهد یافت. ترم سوم تلفات آگزرژی در جریان جرمی دود مربوط به احتراق ناقص در محفظه احتراق است. آگزرژی شیمیایی کربن مونواکسید بالاتر از کربن دی اکسید بوده و

### ۳-۴- محاسبه بازده اگزرژی

اکنون با ارائه تمامی منابع برگشت‌ناپذیر و تلفات احتمالی که ممکن است در ناکارآمدی سیستم نقش داشته باشند، از روش تلفات برای محاسبه راندمان کل نیروگاه زباله‌سوز استفاده می‌شود. در اینجا مجموع تمام ترم‌های تلفات و تخریب اگزرژی بر اگزرژی سوخت تقسیم می‌گردد. عدد بدست آمده از مقدار واحد کم شده و راندمان اگزرژی طبق رابطه (۳۰) محاسبه خواهد شد [۲۷].

$$\psi_I = \left( 1 - \frac{(\sum_{i=1}^{10} EL_i + \sum_{k=1}^6 ED_k)}{\dot{m}_f e_f^{ch}} \right) \times 100 \quad (30)$$

مقدار دبی جرمی زباله در معادله بالا نیز از روش معکوس تخمین زده خواهد شد که از مزایای استفاده از روش معکوس برای تحلیل اگزرژی نیروگاه زباله‌سوز خواهد بود.

### ۴- تحلیل نتایج

برای حل این مسئله ابتدا تمامی پارامترهای مورد نیاز برای حل معکوس در نیروگاه زباله‌سوز آرادکوه اندازه‌گیری شده است. برای حل دقیق و نزدیکتر به واقعیت تعداد ۵ دسته داده اندازه‌گیری و میانگین آنها برای حل معکوس مورد استفاده قرار گرفته است. این داده‌ها در جدول (۱) نشان داده شده‌اند. با استفاده از معادلات حل معکوس (روش ارائه شده توسط بنی‌فاطمه و همکاران [۲۱]) آنالیز زباله ورودی به نیروگاه بر طبق جدول (۲) مورد محاسبه قرار می‌گیرد.

همانطور که از جدول (۲) مشخص است بیشتر درصد جرمی زباله از اکسیژن تشکیل شده است. همچنین به وسیله روش معکوس پارامترهای دبی جرمی زباله و هوا که اندازه‌گیری آنها با خطای بسیار بالا همراه است نیز مورد محاسبه قرار خواهد گرفت که در جدول (۲) آورده شده است.

در ادامه با توجه به عدم امکان اندازه‌گیری بعضی از پارامترهای مورد نیاز در فرآیند تحلیل اگزرژی، نیروگاه در نرم‌افزار ترموفلو مدل شده و داده‌های مورد نیاز کامل می‌گردد.

پارامترهای کار پمپ و فن از نرم‌افزار محاسبه و در جدول (۳) نشان داده شده است. پارامترهای دبی، دما، فشار برای جریان‌های جرمی سیستم در جدول (۴) آورده شده است.

توربین بخار ترم تلفات از دیواره نیز موجود است که به دلیل مقدار عددی بسیار پایین از آن صرف نظر شده است [۲۶].

$$ED_3 = \dot{E}_{21} - \dot{E}_{22} - \dot{E}_{23} - \dot{W}_{shaft} \quad (24)$$

### ۳-۳-۸- تخریب و تلفات اگزرژی در کندانسور

برای کندانسور سیکل تولید توان یک ترم تخریب و یک ترم تلفات اگزرژی در نظر گرفته خواهد شد. ترم تلفات مربوط به جریان جرمی هوای خنک کننده خواهد بود. ترم تخریب نیز از معادله بالانس اگزرژی محاسبه خواهد شد [۲۶].

$$EL_{10} = \dot{m}_{46}(e_{46}^{ph}) - \dot{m}_{47}(e_{47}^{ph}) \quad (25)$$

$$ED_4 = \dot{E}_{22} + \dot{E}_{46} - \dot{E}_{24} - \dot{E}_{47} \quad (26)$$

### ۳-۳-۹- تخریب اگزرژی در پمپ

برای پمپ‌ها نیز ترم تخریب اگزرژی ارائه می‌شود که در روابط (۲۷) و (۲۸) به تفکیک نشان داده شده است [۲۹].

$$ED_5 = \dot{E}_{26} - \dot{E}_{27} + \dot{W}_{pump,1} \quad (27)$$

$$ED_6 = \dot{E}_{24} - \dot{E}_{25} + \dot{W}_{pump,2} \quad (28)$$

### ۳-۳-۱۰- تخریب اگزرژی در دی‌اریتور

همانطور که پیش‌تر توضیح داده شد، دی‌اریتور نقش هوازادایی را دارد و ترم تخریب اگزرژی حاصل از اختلاط جریان‌ها را داراست [۲۶].

$$ED_7 = \dot{E}_{23} + \dot{E}_{25} - \dot{E}_{26} \quad (29)$$

### ۳-۳-۱۱- تخریب اگزرژی ژنراتور

برای محاسبه تخریب اگزرژی ژنراتور کافی است تفاضل مقدار جریان‌ها کار ورودی توسط شفت از برق تولیدی محاسبه گردد [۲۶].

$$ED_8 = \dot{W}_{shaft} - \dot{W}_{electricity} \quad (30)$$

جدول ۱ داده‌های اندازه‌گیری مربوط به تست نیروگاه زباله‌سوز آزادکوه

شماره	متغیر	واحد اندازه‌گیری	مقدار				
			تست ۱	تست ۲	تست ۳	تست ۴	تست ۵
۱	کربن دی‌اکسید	درصد حجمی گاز	۱۱/۱۶	۱۰/۳	۹/۷۲	۱۱/۳۵	۱۱/۰۲
۲	کربن مونواکسید	درصد حجمی گاز	۰/۱۱۶۷	۰/۱۰۷۷	۰/۱۰۱۶	۰/۱۱۸۷	۰/۱۱۵۲
۳	اکسیژن	درصد حجمی گاز	۷/۴۴	۸/۱۲	۸/۶۶	۸/۴۴	۷/۹۷
۴	رطوبت	درصد حجمی گاز	۱۳/۴۹	۱۳/۲۱	۱۱/۸۱	۹/۶۳	۱۱/۴۲
۵	سولفور دی‌اکسید	درصد حجمی گاز	۰/۰۴۵۵	۰/۰۴۳۵	۰/۰۴۰۴	۰/۰۴۹۵	۰/۰۵۳۰
۶	دبی جرمی بخار	کیلوگرم بر ثانیه	۰/۸۲۱۰	۰/۹۸۸۳	۱/۰۶۸۴	۰/۹۹۲۴	۰/۸۹۷۱
۷	دبی خاکستر خروجی گازی‌ساز	کیلوگرم بر ثانیه	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵	۰/۱۵
۸	دبی خاکستر خروجی از بویلر	کیلوگرم بر ثانیه	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۲
۹	درصد کربن موجود در خاکستر	درصد جرمی خاکستر	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲	۰/۰۲
۱۰	دمای آب تغذیه بویلر	سانتیگراد	۷۱/۸	۷۲/۹	۷۲/۴	۷۳/۵	۷۴/۲
۱۱	دمای بخار تولیدی بویلر	سانتیگراد	۴۳۷/۵۵	۴۳۷/۴۵	۴۳۶/۷۵	۴۳۶/۲۵	۴۳۲/۴۵
۱۲	دمای گاز ورودی به بویلر	سانتیگراد	۹۷۴/۰۱	۹۴۲/۰۳	۹۹۹/۷۸	۹۷۸/۶۸	۹۹۳/۴
۱۳	دمای گاز خروجی از بویلر	سانتیگراد	۲۰۲/۸	۲۰۳/۴	۲۰۵/۳	۲۰۶/۱	۲۰۶/۰
۱۴	فشار آب تغذیه	کیلوپاسکال	۲۲۴۲	۲۱۹۷	۲۲۴۱	۲۳۳۴	۲۴۲۰
۱۵	فشار بخار تولیدی	کیلوپاسکال	۲۳۳۰	۲۳۰۰	۲۳۰۰	۲۴۰۰	۲۴۹۰

اگرزری، تمامی عوامل ناکارآمدی محاسبه و در جدول (۶) آورده شده است.

جدول ۳ پارامترهای محاسبه شده کار فن و پمپ‌ها توسط نرم‌افزار ترموفلکس

پارامتر	مقدار (کیلووات)
کار فن	۹۶/۵۱
کار پمپ ۱	۱۴۲/۱
کار پمپ ۲	۱/۸

در شکل (۳) سهم هر یک از عوامل ناکارآمدی سیستم قابل مشاهده است. همانطور که در این شکل مشخص است، بیشترین مقدار تخریب و تلفات اگرزری مربوط به ترم تخریب اگرزری در گازیساز و محفظه احتراق برابر با ۵۸ درصد از مقدار کل تخریب و تلفات خواهد بود. در مرتبه دوم اگرزری فیزیکی دود خروجی با مقدار ۱۷ درصد از کل تخریب تلفات اگرزری سیستم خواهد بود. همچنین در رتبه سوم ترم تخریب اگرزری در توربین بخار قرار خواهد گرفت. مقدار راندمان اگرزری این نیروگاه برابر با ۱۳/۱ درصد محاسبه شده است.

جدول ۲ آنالیز زباله محاسبه شده در نیروگاه زباله‌سوز آزادکوه

ردیف	متغیر	واحد اندازه‌گیری	محاسباتی
۱	درصد جرمی کربن	درصد جرمی	۲۷/۱۴
۲	درصد جرمی اکسیژن	درصد جرمی	۳۳/۲۹
۳	درصد جرمی هیدروژن	درصد جرمی	۳/۱۶
۴	درصد جرمی رطوبت	درصد جرمی	۱۵/۴۱
۵	درصد جرمی سولفور	درصد جرمی	۰/۳
۶	درصد جرمی خاکستر	درصد جرمی	۲۰/۲۱
۷	دبی جرمی زباله	کیلوگرم بر ثانیه	۰/۴۷۸۷
۸	دبی جرمی هوا	کیلوگرم بر ثانیه	۴۲۹۱/۴

با استفاده از اعداد دبی، دما، فشار و روابط ارائه شده در این مقاله اگرزری فیزیکی، شیمیایی و در نتیجه اگرزری هر جریان در جدول (۵) آورده شده است. با استفاده از اعداد محاسبه شده در جدول (۵) و روابط موجود برای عوامل تلفات و تخریب

جدول ۴ داده‌های دمایی و فشاری جریان‌های سیال موجود در نیروگاه زباله‌سوز آرادکوه

شماره جریان	نوع جریان	دما	فشار	دبی
۲	شیرابه زباله	۲۵/۰۰	۱۰۰/۰	۰/۰۲۰۰
۳	زباله	۲۵/۰۰	۱۰۰/۰	۰/۴۷۸۷
۴	خاکستر زباله	۴۰۵/۲۰	۱۰۰/۰	۰/۱۲۰۵
۵	گاز سنتز	-	۱۰۰/۰	-
۶	هوا	۲۵/۰۰	۱۰۰/۰	-
۷	هوا	۲۵/۰۰	۱۰۰/۰	-
۸	دود	۹۷۷/۴۵	۱۰۰/۰	۲/۹۴۱۰
۱۱	دود	۲۰۴/۶۵	۱۰۰/۰	۲/۹۴۱۰
۲۱	بخار	۴۳۵/۸۵	۲۲۸۶/۸	۰/۹۵۳۴
۲۲	بخار	۴۲/۰۰	۱۰/۷	۰/۸۶۵۴
۲۳	بخار	۱۸۶/۸	۱۱۹/۶	۰/۰۷۶۷
۲۴	بخار	۴۷/۲۲	۱۰/۷	۰/۸۶۵۴
۲۵	بخار	۴۷/۲۶	۳۴۰/۵	۰/۸۶۵۴
۲۶	بخار	۱۰۳/۹	۱۱۶/۱	۰/۹۵۹۲
۲۷	بخار	۱۰۴/۳	۲۵۹۷/۰	۰/۹۵۲۹
۴۶	هوا	۲۵/۰۰	۱۰۰/۰	۳/۱۳۹۰
۴۷	هوا	۳۹/۰۰	۱۰۰/۰	۳/۱۳۹۰

جدول ۵ اگزورژی فیزیکی، شیمیایی و جریانی جریان‌های جرمی موجود در نیروگاه زباله‌سوز آرادکوه

شماره جریان	نوع جریان	اگزورژی فیزیکی (کیلوژول بر کیلوگرم)	اگزورژی شیمیایی (کیلوژول بر کیلوگرم)	اگزورژی جریان (کیلووات)
۲	شیرابه	۰/۰۰۰	۴۹/۹۵۸	۰/۹۹۹
۳	زباله	۰/۰۰۰	۹۲۳۷/۳۸۶	۴۶۰۶/۲۳۰
۴	خاکستر	۱۰۸/۰۸۱	۱۴۶۰/۰۰۷	۱۸۸/۹۲۳
۵	گاز سنتز	-	-	-
۶	هوا	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۷	هوا	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۸	دود	۶۴۳/۵۳۹	۷۱/۶۱۳	۲۱۰۳/۳۷۵
۱۱	دود	۲۳۵/۲۵۰	۷۱/۶۱۳	۹۰۲/۴۸۹
۲۱	بخار	۱۱۸۷/۸۱۴	۹۵۰۰/۰۰۰	۱۶۳۵/۲۹۳
۲۲	بخار	۱۳۰/۱۵۶	۹۵۰۰/۰۰۰	۶۱۵/۴۲۰
۲۳	بخار	۵۵۸/۵۴۵	۹۵۰۰/۰۰۰	۵۴۵/۶۲۴
۲۴	بخار	۳/۲۰۹	۹۵۰۰/۰۰۰	۵۰۵/۵۶۰
۲۵	بخار	۳/۵۵۰	۹۵۰۰/۰۰۰	۵۰۵/۸۵۶
۲۶	بخار	۳۷/۳۷۲	۹۵۰۰/۰۰۰	۵۳۸/۶۳۱
۲۷	بخار	۴۰/۱۶۳	۹۵۰۰/۰۰۰	۵۴۱/۳۰۷
۴۶	هوا	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰	۰/۰۰۰
۴۷	هوا	۰/۳۲۹	۰/۰۰۰	۴۵/۸۳۵

#### ۴- اعتبارسنجی

به دلیل نوین بودن مطالعه حاضر، اعتبارسنجی آن متفاوت از روش‌های معمول و با مقایسه راندمان انرژی محاسبه شده از روش مستقیم با مقدار محاسبه شده روش معکوس صورت پذیرفته است. رابطه (۳۰) محاسبه راندمان به روش مستقیم را نشان می‌دهد. جدول (۷) مقدار توان تولیدی نیروگاه، راندمان محاسبه شده از روش مستقیم را در زمان آزمایش نشان می‌دهد.

$$\psi_D = \left( \frac{\dot{W}}{\dot{m}_f e_f h} \right) \times 100 \quad (30)$$

جدول ۷ محاسبه راندمان به روش مستقیم

مقدار برق تولیدی (کیلووات)	پارامتر
۶۲۰	تست ۱
۵۹۰	تست ۲
۶۵۰	تست ۳
۶۰۰	تست ۴
۵۵۰	تست ۵

میانگین راندمان برق تولیدی نیروگاه، مقدار ۶۰۲ کیلووات محاسبه شده است. با استفاده از رابطه (۳۰) مقدار راندمان ۱۳/۰۷ درصد قابل محاسبه است. مقدار خطای نسبی در محاسبه راندمان قابل قبول و برابر با ۰/۲۳ درصد است.

#### ۶- حساسیت‌سنجی پارامترها

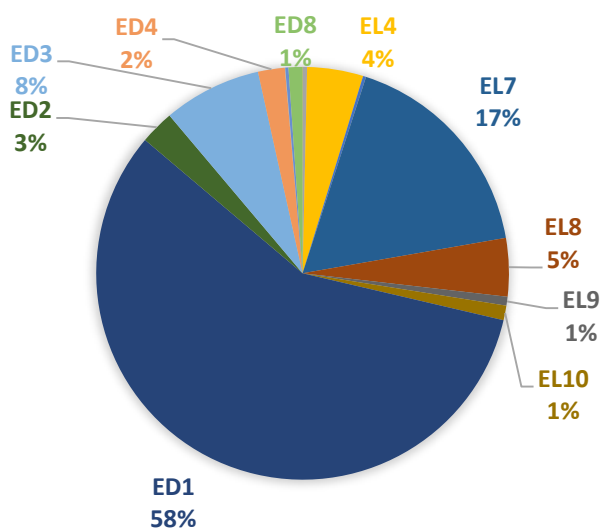
در این قسمت تاثیر پارامترهای آنالیز شیمیایی زباله بر راندمان نیروگاه مورد بررسی قرار گرفته است.

جدول ۸ آنالیز زباله محاسبه شده از روش معکوس

عنصر آنالیز شیمیایی	درصد خطا اولیه	درصد خطای محاسباتی در راندمان انرژی
کربن	۵±	۱۲/۰۱
هیدروژن	۵±	۶/۵۶
اکسیژن	۵±	۵/۵۵
رطوبت	۵±	۵/۴۲
گوگرد	۵±	۴/۷۳
خاکستر	۵±	۴/۷۷

جدول ۶ ترم‌های تلفات و تخریب انرژی نیروگاه زباله‌سوز آرادکوه

نماد	تعریف	مقدار (کیلووات)
EL <sub>1</sub>	تلفات انرژی فیزیکی شیرابه زباله	۰/۰۰۰۰
EL <sub>2</sub>	تلفات انرژی شیمیایی شیرابه زباله	۰/۹۹۹۲
EL <sub>3</sub>	تلفات انرژی فیزیکی خاکستر خروجی راکتور	۱۳/۰۲۱۶
EL <sub>4</sub>	تلفات انرژی شیمیایی خاکستر خروجی راکتور	۱۷۵/۹۰۱۶
EL <sub>5</sub>	تلفات انرژی تشعشعی از دیواره‌ها	۹/۰۹۵۳
EL <sub>6</sub>	تلفات انرژی همرفت از دیواره‌ها	۰/۲۶۲۶
EL <sub>7</sub>	تلفات انرژی فیزیکی دود خروجی	۶۹۱/۸۷۴۵
EL <sub>8</sub>	تلفات انرژی شیمیایی دود خروجی	۱۸۲/۹۱۳۹
EL <sub>9</sub>	تلفات انرژی ناشی از واکنش احتراق ناقص	۲۷/۷۰۰۳
EL <sub>10</sub>	تلفات انرژی در کندانسور	۴۵/۸۳۴۹
ED <sub>1</sub>	تخریب انرژی راکتور گازی‌ساز و محفظه احتراق	۲۳۰۳/۶۷۴۶
ED <sub>2</sub>	تخریب انرژی در بویلر بازیاب حرارت	۱۰۶/۸۰۱۵
ED <sub>3</sub>	تخریب انرژی توربین بخار	۳۰۷/۷۳۲۴
ED <sub>4</sub>	تخریب انرژی کندانسور	۸۴/۱۲۵۱
ED <sub>5</sub>	تخریب انرژی پمپ ۱	۰/۸۷۲۳
ED <sub>6</sub>	تخریب انرژی پمپ ۲	۰/۲۰۹۳
ED <sub>7</sub>	تخریب انرژی دی‌اریتور	۱۰/۰۶۵۳
ED <sub>8</sub>	تخریب انرژی ژنراتور	۴۳/۸۰۰۰



شکل ۳ ترم‌های تلفات و تخریب انرژی نیروگاه آرادکوه

اگرزری در گازی‌ساز و تلفات اگرزری فیزیکی دود خروجی را کاهش داده و باعث افزایش راندمان اگرزری نیروگاه گردد. تجزیه و تحلیل جامع اگرزری انجام شده در این مطالعه، با مشخص نمودن تمامی عوامل تخریب و اتلاف اگرزری با دقت بسیار بالا، کمک قابل توجهی در شناسایی فرصت‌های بهبود سیستم ارائه می‌دهد. در ادامه توجه به این نکته ضروری است نتایج درست و با دقت بالا به کمک روش حل معکوس بدست آمده است.

#### ۸- تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از آقای مهندس ابولقاسمی و شرکت تی‌تی‌اس جهت انجام هر چه بهتر این مطالعه تشکر و قدردانی می‌نمایند.

#### ۹- فهرست علائم و اختصارات

##### علائم انگلیسی

A	مساحت ( $m^2$ )
$c_p$	ظرفیت گرمایی ویژه ( $kJ/kg.k$ )
e	جریان اگرزری مولی ( $kJ/kg.kmol$ )
E	جریان اگرزری ( $kJ/kg$ )
$\dot{E}D$	تخریب اگرزری ( $kJ/s$ )
$\dot{E}L$	تلفات اگرزری ( $kJ/s$ )
LHV	ارزش حرارتی پایین سوخت ( $kJ/kg$ )
$\dot{m}$	دبی جرمی ( $kg/s$ )
MW	جرم مولی ( $kg/kmol$ )
q	شار حرارتی ( $W/m^2$ )
T	دما ( $K$ )
v	سرعت ( $m/s$ )
$\dot{W}$	کار ( $kJ/s$ )

##### علائم یونانی

$\psi$	راندمان اگرزری
زیرنویس‌ها	
c	انتقال حرارت همرفت
ch	شیمیایی
D	روش محاسبه راندمان مستقیم
f	سوخت
I	روش تلفات محاسبه راندمان
ph	فیزیکی
r	انتقال حرارتی تشعشی
w	باد

#### ۱۰- مراجع

[1] Y. Chen, M. Guo, Y. Liu, D. Wang, Z. Zhuang, and M. Quan, "Energy, exergy, and economic analysis of

به منظور حساسیت‌سنجی برای هر پارامتر مقدار خطای ۵ درصد در نظر گرفته شد و خطای محاسباتی در مقدار راندمان مورد محاسبه قرار گرفت که نتایج در جدول (۸) نشان داده شده است. همانطور که از مقادیر این جدول مشخص است، بیشترین حساسیت محاسبه راندمان نیروگاه مربوط به ترکیب درصد جرمی کربن در زباله خواهد بود.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این مطالعه رویکرد نوآورانه بر اساس روش حل معکوس برای تجزیه و تحلیل دقیق اگرزری یک نیروگاه زباله‌سوز ارائه گردیده است. استفاده از روش معکوس برای محاسبه آنالیز شیمیایی زباله و ارائه تمامی عوامل تخریب و تلفات اگرزری یک نیروگاه زباله‌سوز، این مطالعه را از مطالعات قبلی در این زمینه متمایز می‌سازد. نوآوری‌های موجود برای این مطالعه عبارت‌اند از:

- محاسبه دقیق اگرزری سوخت زباله مصرفی نیروگاه زباله‌سوز با استفاده از روش معکوس، که باعث تفاوت این مطالعه با مقادیر میانگین استفاده شده در مطالعات دیگر در تجزیه و تحلیل زباله می‌شود.
- شناسایی تمامی منابع مختلف ناکارآمدی، از جمله تخریب و اتلاف اگرزری به همراه تأثیر آنها بر کل سیستم که به شناسایی روش‌های افزایش راندمان نیروگاه منجر خواهد گشت.

به عنوان تفسیر فیزیکی نتایج می‌توان به مقادیر عددی عوامل تخریب و تلفات اگرزری توجه شود. بیشترین مقدار تخریب و تلفات اگرزری در راکتور گازی‌ساز و محفظه احتراق رخ داده است. در این فرآیند عمل گازی‌سازی و احتراق گاز حاصل رخ داده است که از بالاترین درجه تخریب اگرزری در روش‌های تخریب اگرزری است. در این نیروگاه حدود ۵۸ درصد از اگرزری وارد شده به عنوان سوخت به نیروگاه در حال اتلاف در این بخش بوده است. برای افزایش راندمان در این نیروگاه می‌توان نوع راکتور گازی‌ساز را تغییر و از راکتوری با تخریب اگرزری کمتر استفاده کرد. از راه‌های افزایش راندمان در نیروگاه موجود می‌توان پیش‌گرمایش سوخت ورودی را نیز پیشنهاد داد. همچنین پیش‌گرمایش هوای تاز ورودی می‌تواند روش مناسب برای کاهش این مقدار بالای تخریب اگرزری باشد. در رده بعدی تلفات اگرزری توسط اگرزری فیزیکی دود خروجی خواهد بود. این مقدار ۱۷ درصد از اگرزری ورودی را می‌توان با قرار دادن یک مبدل حرارتی پیش‌گرمکن هوا با دود به مقدار پایین‌تر کاهش داد. این مبدل توانایی کاهش هر دو عامل تخریب

- [10] R. Karamarkovic and V. Karamarkovic, "Energy and exergy analysis of biomass gasification at different temperatures," *Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 537-549, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.022>.
- [11] C. Bang-Møller, M. Rokni, and B. Elmegaard, "Exergy analysis and optimization of a biomass gasification, solid oxide fuel cell and micro gas turbine hybrid system," *Energy*, vol. 36, no. 8, pp. 4740-4752, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.05.005>.
- [12] P. Vanaei, B. Jalili, M. Hosseinzadeh, and P. Jalili, "Efficiency Optimization Thermal Analysis and Power Output of a Modified Incinerator Plant Using Organic Rankine Cycle," *International Journal of Engineering*, vol. 36, no. 7, pp. 1300-1309, 2023, doi: <https://doi.org/10.5829/IJE.2023.36.07A.11>.
- [13] P. Vanaei, B. Jalili, M. Hosseinzadeh, and P. Jalili, "4E analysis of a municipal incinerator power plant with an ORC and optimization," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 45, no. 10, p. 544, 2023, doi: <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04430-4>.
- [14] T. Solheimslid, H. K. Harneshaug, and N. Lømmen, "Calculation of first-law and second-law-efficiency of a Norwegian combined heat and power facility driven by municipal waste incineration—A case study," *Energy conversion and management*, vol. 95, pp. 149-159, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.026>.
- [15] S. Azami, M. Taheri, O. Pourali, and F. Torabi, "Energy and exergy analyses of a mass-fired boiler for a proposed waste-to-energy power plant in Tehran," *Applied Thermal Engineering*, vol. 140, pp. 520-530, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.05.045>.
- [16] M. L. Hejrandoost, F. Fazelpour, and A. Saraei, "A new method to overcome difficulties of measurements for energy and exergy auditing of municipal solid Waste-to-Energy plants," *Energy Conversion and Management*, vol. 255, p. 115275, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115275>.
- [17] A. Farsi, I. Dincer, and G. F. Naterer, "Second law analysis of CuCl<sub>2</sub> hydrolysis reaction in the Cu-Cl thermochemical cycle of hydrogen production," *Energy*, vol. 202, p. 117721, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117721>.
- [18] I. Dincer and M. A. Rosen, *Exergy: energy, environment and sustainable development*. Newnes, 2012.
- a centralized solar and biogas hybrid heating system for rural areas," *Energy Conversion and Management*, vol. 276, p. 116591, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116591>.
- [2] A. Xu *et al.*, "Exergy, economic, exergoeconomic and environmental (4E) analyses and multi-objective optimization of a PEMFC system for coalbed methane recovery," *Energy Conversion and Management*, vol. 297, p. 117734, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117734>.
- [3] H. Athari, S. Soltani, A. Bölükbaşı, M. A. Rosen, and T. Morosuk, "Comparative exergoeconomic analyses of the integration of biomass gasification and a gas turbine power plant with and without fogging inlet cooling," *Renewable energy*, vol. 76, pp. 394-400, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.064>.
- [4] H. Baehr, "The exergy method of thermal plant analysis: By TJ Kotas; published by Butterworths, London, Boston, Durban, Singapore, Sydney, Toronto, Wellington, 1985; price£ 45.00; ISBN 408-01350-8," ed: Elsevier, 1987.
- [5] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. J. Moran, *Thermal Design and Optimization* (Wiley-Interscience publication). Wiley, ISBN: 978-0-471-58467-4 1995, <https://www.wiley.com/en-us/Thermal+Design+and+Optimization-p-9780471584674>.
- [6] S. Soltani, S. Mahmoudi, M. Yari, and M. Rosen, "Thermodynamic analyses of an externally fired gas turbine combined cycle integrated with a biomass gasification plant," *Energy Conversion and Management*, vol. 70, pp. 107-115, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.03.002>.
- [7] T. Maneerung, X. Li, C. Li, Y. Dai, and C.-H. Wang, "Integrated downdraft gasification with power generation system and gasification bottom ash reutilization for clean waste-to-energy and resource recovery system," *Journal of cleaner production*, vol. 188, pp. 69-79, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.287>.
- [8] M. Mehrpooya, M. Khalili, and M. M. M. Sharifzadeh, "Model development and energy and exergy analysis of the biomass gasification process (Based on the various biomass sources)," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, pp. 869-887, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.076>.
- [9] L. F. Pellegrini and S. de Oliveira Jr, "Exergy analysis of sugarcane bagasse gasification," *Energy*, vol. 32, no. 4, pp. 314-327, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.028>.

- vol. 144, no. 6, p. 062101, 2022, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4051760>.
- [25] Y. A. Cengel, M. A. Boles, and M. Kanoğlu, *Thermodynamics: an engineering approach*. McGraw-hill New York, 2011, [https://archive.org/details/thermodynamicsen0000ceng\\_ed03/mode/2up](https://archive.org/details/thermodynamicsen0000ceng_ed03/mode/2up).
- [26] A. Bejan, G. Tsatsaronis, and M. J. Moran, *Thermal design and optimization*. John Wiley & Sons, 1995, <https://archive.org/details/thermaldesignopt0000bejan/page/n1/mode/2up>.
- [27] A. Sohrabi, A. Behbahaninia, S. Sayadi, and M. Banifateme, "Advanced exergy-based audit of heat recovery steam generators: a case study," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 144, no. 1, p. 012106, 2022, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4052467>.
- [28] J. Zueco, D. López-Asensio, F. Fernández, and L. M. López-González, "Exergy analysis of a steam-turbine power plant using thermocombustion," *Applied Thermal Engineering*, vol. 180, p. 115812, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115812>.
- [29] Y. Zhang, X. Wei, and X. Qin, "Experimental study on energy, exergy, and exergoeconomic analyses of a novel compression/ejector transcritical CO<sub>2</sub> heat pump system with dual heat sources," *Energy Conversion and Management*, vol. 271, p. 116343, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116343>.
- [19] B. Ma *et al.*, "Exergy loss analysis on diesel methanol dual fuel engine under different operating parameters," *Applied Energy*, vol. 261, p. 114483, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114483>.
- [20] S. Piazza, F. Patuzzi, and M. Baratieri, "Energy and exergy analysis of different biomass gasification coupled to Fischer-Tropsch synthesis configurations," *Energy*, vol. 249, p. 123642, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.123642>.
- [21] M. Banifateme, A. Behbahaninia, and G. Pignatta, "Estimating the chemical composition of municipal solid waste using the inverse method," *Journal of Cleaner Production*, vol. 393, p. 136156, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136156>.
- [22] S. Naderi, M. Banifateme, O. Pourali, A. Behbahaninia, I. MacGill, and G. Pignatta, "Accurate capacity factor calculation of waste-to-energy pow plants based on availability analysis and design/off-design performance," *Journal of cleaner production*, vol. 275, p. 123167, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123167>.
- [23] M. Banifateme, A. Behbahaninia, and S. Sayadi, "Development of a loss method for energy and exergy audit of condensing hot water boilers," *Journal of Energy Resources Technology*, vol. 143, no. 5, p. 052104, 2021, doi: <https://doi.org/10.1115/1.4049415>.
- [24] A. Behbahaninia, M. Banifateme, M. H. Azmayesh, S. Naderi, and G. Pignatta, "Markov and monte carlo simulation of waste-to-energy power plants considering variable fuel analysis and failure rates," *Journal of Energy Resources Technology*,