Journal of Research in Environmental Health
Volume 11, Issue 4

The Key Role of Online Monitoring System in Monitoring and Controlling Air Pollution (Case Study: Entekhab Polystyrene Petrochemical)

Nahid Hajeb
Master's student, HSE group, Institute of Higher Education, Bushehr, Iran.
Talieh Abdolkhaninejad
* HSE group, Institute of Higher Education, Bushehr, Iran.
(Corresponding Author)
Talieh_abdolkhani2011@yahoo.com
Ghafour Noorian
HSE group, Institute of Higher Education, Bushehr, Iran.

Abstract

Background and Objective: The polystyrene petrochemical industry is one of the energy-intensive sectors and a significant source of air pollutants and industrial wastewater. Due to the high sensitivity of pollutants generated during polystyrene production, real-time monitoring is essential for immediate and precise control. This study investigates the performance of the online pollutant monitoring system and its integration with the self-reporting mechanism in Polystyrene Petrochemical Company Entekhab.

Materials and Methods: The required data were collected through sampling of stack emissions and compared with the outputs of the online monitoring system. Key pollution parameters, including carbon monoxide, oxygen, and flow rate, were evaluated in accordance with environmental standards (e.g., WHO and national environmental regulations).

Results: The results confirmed the accuracy and reliability of the online monitoring system. Data analysis demonstrated the system's capability to detect variations in combustion efficiency and pollutant levels. Furthermore, the system enabled effective monitoring under different operational conditions. Findings indicate that implementing and integrating the online monitoring system with the self-reporting process represents a key strategy for achieving effective environmental management, continuous process improvement, and progress toward sustainable development.

Conclusion: The present study showed that the online pollutant monitoring system, when combined with the self-reporting mechanism, can serve as an effective hybrid approach for environmental management in petrochemical industries. The analysis revealed that this integration not only enhances accuracy and transparency in real-time pollutant monitoring but also provides opportunities for optimizing operational processes and reducing environmental costs.

Keywords: Continuous Monitoring, Environmental Self-Reporting, Process Optimization, Combustion, Sustainable Development

Open Access Policy: This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy ofthis licence, visit https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Received: 2025/05/31
Accepted: 2025/11/03
Doi:10.22038/jreh.2026.27479

Citation: Hajeb N, Abdolkhaninejad T, Noorian GH. The key Role of Online Monitoring System in Monitoring and Controlling air Pollution (Case Study: Entekhab Polystyrene Petrochemical). *Journal of Research in Environmental Health.* 11(4):82-97.

نقش کلیدی سیستم پایش آنلاین در پایش و کنترل آلودگی هوا (مطالعه موردی: پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب)

ناهید حاجب
دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه HSE، موسسه آموزش عالی خرد، بوشهر، ایران
طلیعه عبدالخانی‌نژاد
* گروه HSE، موسسه آموزش عالی خرد، بوشهر، ایران. **(نویسنده مسئول)**
Talieh_abdolkhani2011@yahoo.com
غفور نوریان
گروه HSE، موسسه آموزش عالی خرد، بوشهر، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰
تاریخ پذیرش:۱۴۰۴/۰۸/۱۱
نوع مقاله:پژوهشی

چکیده

زمینه و هدف: صنعت پتروشیمی پلی‌استایرن یکی از صنایع پرمصرف انرژی و تولیدکننده آلاینده‌های هوا و پساب صنعتی است. ضرورت پایش بلادرنگ به‌دلیل حساسیت بالای آلاینده‌های ناشی از فرآیند تولید پلی‌استایرن، نیاز به کنترل فوری و دقیق وجود دارد. این پژوهش به بررسی عملکرد سامانه پایش آنلاین آلاینده‌ها و تلفیق آن با سیستم خود اظهاری در شرکت پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب می‌پردازد.

مواد و روش‌ها: داده‌های مورد نیاز از طریق نمونه‌برداری از گازهای خروجی دودکش‌ها و مقایسه با خروجی سامانه پایش آنلاین گردآوری شد. پارامترهای کلیدی آلایندگی شامل منواکسیدکربن، اکسیژن و دبی جریان، اکسیژن و نرخ جریان، مطابق با استانداردهای زیست‌محیطی (مانند مقررات زیست‌محیطی سازمان بهداشت جهانی و ملی) ارزیابی شدند.

یافته‌ها: نتایج، دقت و قابلیت اطمینان سامانه پایش آنلاین را تأیید نمود. تحلیل داده‌ها نشان داد که سامانه‌ی مذکور توانایی شناسایی تغییرات در کارایی احتراق و سطوح آلایندگی را دارا است. هم‌چنین، امکان پایش شرایط عملیاتی مختلف از طریق این سامانه به‌خوبی میسر گردید. یافته‌ها حاکی از آن است که پیاده‌سازی و تلفیق سامانه پایش آنلاین با فرآیند خوداظهاری، راهبردی کلیدی برای دستیابی به مدیریت زیست‌محیطی اثربخش، بهبود مستمر فرآیندها و حرکت در مسیر توسعه پایدار است.

نتیجه‌گیری: پژوهش حاضر نشان داد که سامانه پایش آنلاین آلاینده‌ها در کنار سیستم خوداظهاری می‌تواند به‌عنوان یک رویکرد ترکیبی مؤثر در مدیریت زیست‌محیطی صنایع پتروشیمی عمل کند. نتایج تحلیل‌ها بیانگر آن است که این تلفیق نه‌تنها موجب افزایش دقت و شفافیت در پایش بلادرنگ آلاینده‌ها می‌شود، بلکه زمینه را برای بهینه‌سازی فرآیندهای عملیاتی و کاهش هزینه‌های زیست‌محیطی فراهم می‌آورد.

کلید واژه‌ها: پایش آنلاین، خوداظهاری زیست‌محیطی، بهینه‌سازی فرآیند، احتراق، توسعه پایدار

استناد: حاجب ن، عبدالخانی‌نژاد ط، نوریان غ. نقش کلیدی سیستم پایش آنلاین در پایش و کنترل آلودگی هوا (مطالعه موردی: پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب). *فصلنامه‌ی پژوهش در بهداشت محیط*. زمستان ۱۴۰۴؛۱۱(۴): ۸۲-۹۷.

مقدمه

صنعت پتروشیمی به‌عنوان یکی از مهم‌ترین بخش‌های توسعه‌دهنده و ارزش افزا، در ادامه‌ی زنجیره صنایع نفت و گاز قرار دارد. جهت بیان اهمیت صنعت پتروشیمی، ذکر این نکته کافی است که در میان صنایع موجود با فعالیت زنجیره‌ای، این صنعت طولانی‌ترین زنجیره‌یی تولید محصولات (مشتق شده نفتی) را به‌خود اختصاص داده است. ارزانی و فراوانی مواد اولیه، ایجاد فرصت‌های شغلی، انتقال فناوری‌های پیشرفته و مهم‌تر از همه ارزش‌افزوده چشمگیر باعث شده است که در برنامه‌های توسعه اقتصادی و اجتماعی به این صنعت توجه بیشتری شده و احداث مجتمع‌های پتروشیمی در اولویت قرار گیرد (۱). بااین‌حال، فعالیت‌های این صنعت در صورت عدم مدیریت صحیح، می‌تواند پیامدهای زیست‌محیطی قابل‌توجهی به همراه داشته باشد. در این میان، شرکت پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب به‌عنوان یکی از واحدهای پیشرو در تولید محصولات پلیمری، مسئولیت خطیری در حفاظت از محیط‌زیست و سلامت جامعه بر عهده دارد (۲).

اقدامات لازم در صنعت پتروشیمی (مانند پلی‌استایرن انتخاب) برای کنترل آلودگی‌های هوا، آب‌وخاک، باید دو سیستم پایش آنلاین لحظه‌ای و خوداظهاری منظم را با هم ترکیب و اجرا کند (ماده ۱۹۲ بند "ب" قانون برنامه پنجم توسعه). امروزه دیگر رویکردهای منفعلانه و واکنشی در قبال آلودگی‌های زیست‌محیطی کارایی ندارند و گذار به سمت راهبردهای پیشگیرانه و هوشمند، یک ضرورت اجتناب‌ناپذیر است. در این مسیر، تلفیق دو سامانه پایش آنلاین زیست‌محیطی و خوداظهاری داوطلبانه، به‌عنوان چشم‌انداز کلیدی مدیریت نوین زیست‌محیطی در صنایع پتروشیمی شناخته می‌شود (۳). بر اساس گزارش‌های رسمی دریافتی از سازمان حفاظت محیط‌زیست، صنایع پتروشیمی به‌عنوان یکی از منابع اصلی انتشار آلاینده‌های هوا، آب‌وخاک در مناطق صنعتی شناخته می‌شوند. این گزارش‌ها حاکی از آن است که فعالیت‌های واحدهای تولیدی در این حوزه، در صورت عدم نظارت و کنترل مستمر، می‌توانند تأثیرات نامطلوب و گسترده‌ای بر سلامت عمومی و اکوسیستم‌های پیرامونی بر جای گذارند (۴). سیستم پایش آنلاین، با ارائه‌ی داده‌های معتبر و لحظه‌ای، امکان نظارت مستمر بر خروجی‌های زیست‌محیطی را فراهم می‌آورد. از سوی دیگر فرآیند خوداظهاری، با گردآوری، تحلیل و گزارش‌دهی شفاف این داده‌ها، مبنای علمی برای تصمیم‌سازی، بهبود مستمر فرآیندها و پاسخگویی به ذی‌نفعان را ایجاد می‌کند (۵). در همین راستا، شرکت پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب با هدف پایبندی به الزامات قانونی و تعهدات مسئولیت اجتماعی خود، اقدام به استقرار سامانه‌های پایش آنلاین آلاینده‌های زیست‌محیطی و تدوین برنامه خود اظهاری منظم نموده است (قانون حفاظت و بهسازی محیط‌زیست و قانون هوای پاک و الزامات HSE) (۶). هدف این است که با مدیریت هوشمند، ریسک‌ها کاهش، شفافیت افزایش و فرآیندها بهبود یابند (رویکرد سازمان حفاظت محیط‌زیست). در پایش آلاینده‌های زیست‌محیطی پتروشیمی، دستگاه‌های اندازه‌گیری آنلاین (CEMS)[1] نقش کلیدی و محوری دارند زیرا قادرند در کسری از ثانیه افزایش خطرناک آلایندگی را که می‌تواند منجر به آلودگی گسترده شود، تشخیص دهند. اندازه‌گیری‌های آن‌ها برخلاف گزارش‌های ذهنی افراد استاندارد و قابل استناد است و هم‌چنین امکان کنترل و مداخله خودکار در فرآیند را فراهم می‌کنند که در صنایع پرخطر مانند پتروشیمی برای جلوگیری از فجایع ضروری است.

دستگاه‌های اندازه‌گیری مداوم آلایندگی (CEMS) حسگرهای بسیار دقیقی هستند که به‌صورت ۲۴ ساعته بر خروجی دودکش‌ها، فاضلاب‌ها و نقاط حساس دیگر نصب می‌شوند تا غلظت آلاینده‌ها و ذرات معلق را اندازه‌گیری و ثبت کنند (۶). خوداظهاری به‌عنوان یک پشتیبان و تکمیل‌کننده‌ی حیاتی عمل می‌کند و جنبه‌های کیفی، نگهداری و گزارش‌دهی انسانی را پوشش می‌دهد که سنسورها از درک آن عاجزند (۷). در عمل، موفقیت ایمنی محیط‌زیست در پتروشیمی به یکپارچگی داده‌های CEMS با گزارش‌های خود اظهاری بستگی دارد (۷و۸). برای این منظور سیستم‌های اندازه‌گیری آنلاین و خود اظهاری را با هم مورد مقایسه و تحلیل قرار می‌دهیم. این مقاله با هدف تبیین نقش هم‌افزای این دو سامانه در شرکت پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب تدوین شده است

[1] Continuous Emission Monitoring System

(۹). عامل اصلی آلودگی هوا CO_2 است (۱۰). در صورت کم شدن اکسیژن آلودگی ناشی از سوختن از کربن‌دی‌اکسید، به کربن‌مونوکسید تبدیل‌شده که کربن‌مونوکسید یک ماده‌ی واکنش‌دهنده‌ی نسبتاً فعال است و وقتی وارد جو زمین می‌شود در اثر رعد و برق مقدار انرژی برای ایجاد پیوند جدید را کسب کرده و پیوند خود را شکسته و با مواد دیگر در جو پیوند داده و باعث آلودگی NOx و ... می‌شود (۱۱و۱۲). در سیستم‌های احتراق (مانند بویلرها یا کوره‌ها)، سطح اکسیژن (O_2) در گازهای خروجی (دودکش) یک شاخص حیاتی برای کارایی احتراق و مصرف سوخت است (۱۳). O_2 بالا نشان‌دهنده‌ی اکسیژن اضافی[1] بیش از حد نیاز است. این امر باعث کاهش راندمان (زیرا انرژی برای گرم کردن این هوای اضافی تلف می‌شود) و هم‌چنین افزایش آلاینده‌های NOx (در دماهای بالا) می‌شود (۱۴). O_2 پایین، نشان‌دهنده‌ی اکسیژن ناکافی است که می‌تواند منجر به احتراق ناقص (تشکیل CO و دوده)، از دست‌دادن بیشتر گرما و در نتیجه کاهش راندمان و افزایش خطرات ایمنی گردد (۱۵).

مقاله‌ی حاضر با استناد به داده‌های معتبر و گزارش‌های پایشی، به بررسی نقش این دو ساز و کار در کاهش آلاینده‌های هوا و دستیابی به اهداف توسعه پایدار در شرکت پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب می‌پردازد. در شرکت پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب یک دستگاه پایش آنلاین جهت سنجش و کنترل آلاینده‌های زیست‌محیطی وجود دارد که جهت اندازه‌گیری آلاینده‌های هوا مورداستفاده قرار می‌گیرد. **جداول ۱ و ۲** دقیقاً زمینه‌سازی می‌کنند که چرا چنین ترکیبی در ایران (با پوشش پایین CEMS) ضروری است و چگونه می‌تواند به استانداردهای جهانی نزدیک شود. به‌نظر می‌رسد که پارامترهای عملیاتی شامل دمای گاز خروجی[2]، سرعت گاز خروجی[3] و دبی جریان گاز[4] در محدوده بهینه عمل کرده و پارامترهای آلایندگی شامل منواکسید کربن[5]، دبی جریان[6] و اکسیژن[7] با استانداردهای زیست‌محیطی مطابقت دارد.

روش‌کار

منطقه موردمطالعه

پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب در استان بوشهر و بندر عسلویه، در موقعیت جغرافیایی طول ۵۲/۵۵۰۱۴۰ و عرض ۲۷/۵۶۱۳۳۰ واقع‌شده است. بندر عسلویه به دلیل غیراقتصادی بودن و بحران‌زا بودن این صنعت در حوزه محیط شبه پیرامون به مرکز استان منطقه پیامدهای زیست‌محیطی قابل‌توجهی به همراه داشته است (۱۶). این منطقه به‌عنوان قلب صنایع پتروشیمی ایران شناخته می‌شود و بخش عمده‌ای از تولیدات شیمیایی و پلیمری کشور را تأمین می‌کند (۱۷). منطقه‌ی ویژه اقتصادی انرژی پارس (عسلویه) میزبان ۲۷ مجتمع پتروشیمی فعال و نیمه فعال است که بیش از ۵۰٪ از ظرفیت تولید پتروشیمی ایران را در خود جای‌داده‌اند (۱۸). نزدیکی به خلیج‌فارس و تراکم بالای مجتمع‌های صنعتی، اهمیت زیست‌محیطی ویژه‌ای به این منطقه بخشیده است؛ به‌گونه‌ای که پایش دقیق و بلادرنگ آلاینده‌ها برای جلوگیری از اثرات منفی بر اکوسیستم دریایی و جوّی ضروری است (۱۹). مطالعات متعدد نشان می‌دهد که فعالیت‌های پتروشیمی در این منطقه، بدون مدیریت صحیح پسماند و آلاینده‌ها، می‌تواند منجر به تجمع فلزات سنگین در رسوبات خلیج‌فارس و افزایش غلظت آلاینده‌های گازی در جو منطقه گردد (۲۰). انتخاب این منطقه به‌عنوان مطالعه موردی، علاوه بر نشان دادن چالش‌های واقعی در مدیریت آلاینده‌ها، می‌تواند الگویی برای سایر صنایع پتروشیمی در مسیر حرکت به‌سوی توسعه پایدار و مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی باشد. نزدیکی به خلیج‌فارس و تراکم بالای مجتمع‌های صنعتی، اهمیت زیست‌محیطی ویژه‌ای به این منطقه بخشیده است؛ به‌گونه‌ای که پایش دقیق و بلادرنگ آلاینده‌ها برای جلوگیری از اثرات منفی بر اکوسیستم دریایی و جوّی ضروری است. **شکل ۱** منطقه‌ی مورد مطالعه را نشان می‌دهد.

[1] Excess Air
[2] Tg
[3] Vg
[4] Q
[5] CO
[6] Flow
[7] O_2

جدول ۱. تعداد سامانه‌های پایش آنلاین در صنایع ایران (۱۳۹۵ تا ۱۴۰۴)

حوزه	تعداد اعلامی	زمان	منبع
واحدهای اولویت‌دار	۱۸۳۵ واحد	۹۶-۹۵	دفتر پایش فراگیر سازمان حفاظت محیطزیست
فاز اول	۴۳۳ واحد	۹۵	دفتر پایش فراگیر سازمان حفاظت محیطزیست
درصد صنایع بزرگ مجهز شده	۲۴ درصد	۹۶-۹۵	سازمان حفاظت محیطزیست (نفت، گاز، پالایش و پتروشیمی)

جدول ۲. تعداد سامانه‌های پایش آنلاین در صنایع جهان(۱۹۸۰ تا۲۰۲۰ میلادی)

معیار	آمار	کاربرد	منبع
ارزش کل بازار CEMS	حدود ۳/۷۸ تا ۴/۷ میلیارد دلار (USD)	صنایع بزرگ (نیروگاه، نفت، گاز، پتروشیمی و...)	گزارش‌های Fortune Business Insights و Market.us
بزرگ‌ترین سهم بازار	تولید برق(Power Generation))، حدود ۴۰٪	به دلیل قوانین سخت‌گیرانه و حجم بالای انتشار	Market Report Analytics
دومین سهم بازار	نفت و گاز(Oil & Gas))، حدود ۲۵٪	شامل پالایشگاه‌ها و عملیات بالادستی	Market Report Analytics
سریع‌ترین رشد	منطقه آسیا-اقیانوسیه	دلیل صنعتی شدن سریع و وضع قوانین جدید	Mordor Intelligence

شکل ۱. نقشه منطقه مورد مطالعه

به‌منظور ارزیابی دقت سیستم‌های پایش آنلاین آلاینده‌های زیست‌محیطی، نمونه‌برداری از گازهای خروجی دو دودکش در سطح سایت انجام شد و با فرآیند نمونه‌برداری از طریق سیستم پالایش آنلاین در یک بازه‌ی زمانی (۱۱ ساعته) مقایسه گردید (۲۱). نمونه‌برداری از گازهای خروجی دو دودکش با استفاده از یک دستگاه آنالایزر گاز قابل‌حمل[1] انجام شد که کم حجم بوده و وزن کمی دارد و امکان اندازه‌گیری به‌صورت ساده را فراهم می‌کند (۲۲). پارامترهای کلیدی شامل مونوکسیدکربن (CO)، اکسیژن (O_2) و دبی جریان (Flow) با بهره‌گیری از روش الکتروشیمیایی اندازه‌گیری شدند. در این روش، دستگاه آنالایزر مورد استفاده برای سنجش گازهای خروجی دودکش دستگاه قابل‌حمل است که کم‌حجم بوده و وزن کمی دارد و امکان اندازه‌گیری به‌صورت ساده را فراهم می‌کند. این دستگاه ساخت شرکت SYSTRONIK آلمان است و از سنسورهای شیمیایی ویژه‌ای که قادر به تشخیص و اندازه‌گیری انتخابی هر یک از این گازها از طریق واکنش‌های الکتروشیمیایی در سطح سلول سنسور استفاده می‌کند.

روش استاندارد پایش گازهای خروجی از منابع ثابت

برای پایش گازهای خروجی ابتدا بر اساس متد 1EPA (در فاصله‌ای بین 2d از محل ورود گازها و 0.5d از بالادست جریان) محل دقیق نمونه‌برداری بر روی بدنه Stack انتخاب می‌شود. سپس بر اساس متد[2] سرعت و فلوی خروجی تعیین می‌شود. بر اساس **جدول ۳** استاندارد 1EPA سه نقطه روی قطر دودکش در فاصله‌های ۱۶/۷،

[1] Portable

[2] 2EPA

۵۰/۳، ۸۳/۳ درصد کل قطر داخلی دودکش تعیین‌شده و در این سه نقطه اندازه‌گیری انجام می‌شود. سپس با انجام test-post از صحت داده‌ها اطمینان حاصل می‌شود. پس از ثبت نتایج میزان غلظت گازها بر اساس اکسیژن مرجع وابسته به نوع سوخت مصرفی اصلاح می‌شود (۲۳).

جدول ۳. استاندارد 1EPA دو نقطه روی قطر دودکش

ردیف	تاریخ نمونه‌برداری	نمونه	فاکتورهای موردسنجش و نتایج آزمایش														Flue
			O_2 %	Co_2 %	CO ppm	NO ppm	NO_2 ppm	NO_X ppm	H_2S ppm	SO_2 ppm	E-Air	Effg %	DK cm	Vg m/s	Ta C°	Tg C°	Q m3/min	
۱	۱۴۰۴/۰۳/۱۳	بویلرA	۶	۸/۴	۱۱	۴۵	۰	۴۵	-	۰	۱/۴	۹۴	۶۰	۳/۷	۴۲	۱۵۱	۶۲/۷	گاز طبیعی
	غلظت تصحیح‌شده برحسب میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب		-	-	۱۶/۵	۷۲/۴	۰	۷۲/۴	-	0	-	-	-	-	-	-	-	
	طول جغرافیایی: ۵۲/۵۵۰۱۴۰ عرض جغرافیایی: ۲۷/۵۶۱۳۳۰ ارتفاع دودکش از محل ورود گازها:۱۰m ارتفاع محل نمونه‌برداری از محل ورود گازها:۷m																	
۲	۱۴۰۴/۰۳/۱۳	بویلرC	۷/۹	۷/۴	۷	۳۵		۳۵	-	۰	۱/۶	۶۲	۶۰	۳/۴	۴۲	۱۷۴	۵۷/۶	گاز طبیعی
	غلظت تصحیح‌شده برحسب میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب		-	-	۱۲/۱	۶۴/۵		۶۴/۵۴	-	0	-	-	-	-	-	-	-	
	طول جغرافیایی: ۵۲/۵۵۰۱۴۰ عرض جغرافیایی: ۲۷/۵۶۱۳۳۰ ارتفاع دودکش از محل ورود گازها: m ۱۰ ارتفاع محل نمونه‌برداری از محل ورود گازها: ۷m																	

محاسبه میانگین ساعتی (تجمعی/نقطه‌ای)

برای رسم یک خط در نمودار، ابتدا داده‌ها باید خلاصه‌سازی شوند تا در هر نقطه زمانی (ساعت) یک مقدار واحد برای هر دودکش داشته باشیم. این کار با گرفتن میانگین (Average) تمام اندازه‌گیری‌های Flow و CO که در یک ساعت مشخص (مثلاً ساعت ۱۰:۰۰) برای یک دودکش خاص ثبت‌شده‌اند، انجام می‌شود (۲۴و۲۵).

$$Avg = \frac{1}{N_{h,ID}} \sum_{i=1}^{N_{h,ID}} x_{i,(h,ID)}$$

Avg : میانگین غلظت Flow و CO در ساعت h برای دودکش‌های هر دو بویلر

$x_{i,(h,ID)}$ **:** i امین مقدار اندازه‌گیری شده Flow و CO در آن ساعت

$N_{h,ID}$ **:** تعداد اندازه‌گیری‌ها در ساعت h بردودکش‌های هر دو بویلر

اگرچه رسم نمودار اکسیژن نمودار همبستگی را به‌صورت بصری نشان می‌دهد اما برای اثبات آماری این موضوع از ضریب همبستگی پریسون استفاده می‌شود تا نشان دهد آیا تغییرات در دودکش یک با تغییرات در دودکش دو ارتباط خطی دارد یا خیر.

$$r = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}$$

مونوکسید کربن

برای تحلیل و رسم نمودار داده‌های غلظت مونوکسیدکربن (CO) برحسب ساعت و دودکش، از ابزار python استفاده شد. در ابتدا میانگین غلظت CO را در هر ساعت برای هر یک از دودکش‌ها محاسبه کرده و در نهایت نمودار خطی مربوطه رسم شد (**نمودار ۱**).

با توجه به این‌که داده‌ها شامل غلظت‌های مختلف و پارامترهای عملیاتی (مثل Q دبی جریان و راندمان حرارتی یا جداسازی گازها Effg) هستند، راندمان حرارتی را بر اساس پارامتر Effg استخراج کرده و سپس نتایج غلظت‌ها را تحلیل شدند.

۱- دودکش اختصاصی بویلر A

*میانگین غلظت CO: تقریباً ۲۳/۵۸ میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب.

*حداکثر غلظت: ۴۶/۹۲ میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب.

*این دودکش سطوح بسیار بالاتری از CO را در مقایسه با دودکش اختصاصی بویلر C نشان می‌دهد و نوسانات بیشتری را در طول ساعات ثبت کرده است.

۲- دودکش اختصاصی بویلر C

میانگین غلظت CO تقریباً ۲/۴۲ میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب است. حداکثر غلظت ۳/۰ میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب است. این دودکش غلظت CO بسیار پایینی دارد و روند آن تقریباً در تمام ساعات پایدار و با نوسان بسیار کم است.

اندازه‌گیری دبی (Flow)

برای تحلیل دقیق دبی (Flow) دودکش‌ها برحسب ساعت، میانگین، حداقل و حداکثر دبی هر دودکش را محاسبه شد و نمودار ۲ شامل دو خط مجزا است که روند دبی (Flow) را در طول ساعات ۱ تا ۱۱ برای دودکش بویلر A و بویلر C نشان می‌دهد. همانند میانگین CO، ساعتی دبی برای هر دو دودکش محاسبه شده تا روند آن در طول زمان مشخص شود. تحلیل بر اساس مقایسه مقادیر آماری ساده انجام‌شده است. پایداری: (نوسان بسیار کم دودکش بویلر C) از طریق محاسبه انحراف‌معیار یا مشاهده‌ی بازده تغییرات کوچک دبی در طول ساعات مختلف مشخص شده است.

اکسیژن دودکش (O2)

تحلیل و رسم نمودار اکسیژن، این نمودار هم یک نمودار خطی است که روند تغییرات میانگین درصد اکسیژن را در طول ساعات نشان می‌دهد. همان فرمول میانگین ساعتی برای محاسبه درصد اکسیژن، در هر ساعت برای هر دودکش استفاده شده است.

ابتدا داده‌های راندمان‌ها با استفاده از Python استخراج شد و سپس یک نمودار مقایسه‌ای از مهم‌ترین آلاینده‌ها CO و NOx رسم شد. در جدول، ستونی با عنوان Effg وجود دارد که راندمان احتراق یا راندمان حرارتی است (با واحد درصد). NOx و CO آلاینده‌های اصلی هستند که در این اندازه‌گیری‌ها قابل‌مشاهده‌اند.

یافته‌ها

همان‌طور که در (**نمودار ۱**) و داده‌های **جدول ۴** مشاهده می‌شود، روند تغییرات غلظت CO در دو دودکش بویلر A و بویلر C مقایسه شده است. تفاوت قابل‌توجهی در میزان غلظت CO بین این دو دودکش وجود دارد. در دودکش بویلر A: میانگین غلظت CO برابر ۲۳/۵۸ میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب است که نشان‌دهنده‌ی سطح بسیار بالای آلایندگی CO و احتمال احتراق ناقص در این واحد است. هم‌چنین نوسانات بسیار گسترده در غلظت CO این دودکش (طبق نمودار) مشهود است. دودکش بویلر C: با میانگین غلظت ۲/۴۲ میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب در محدوده‌ی کاملاً قابل‌قبول و پایدار قرار دارد که نشان از احتراق بهینه و کارایی بالای سیستم در این واحد است. نوسانات گسترده: (دودکش بویلر A) از طریق محاسبه‌ی بازه تغییرات و نوسان بالا در نمودار مشاهده‌شده است. سوخت مصرفی، گاز طبیعی است. میزان آلاینده‌های (دی‌اکسید گوگرد) و (سولفید هیدروژن) در هر دو نمونه بویلر صفر است.

جدول ۴. داده‌های CO دو دودکش در ساعات مختلف

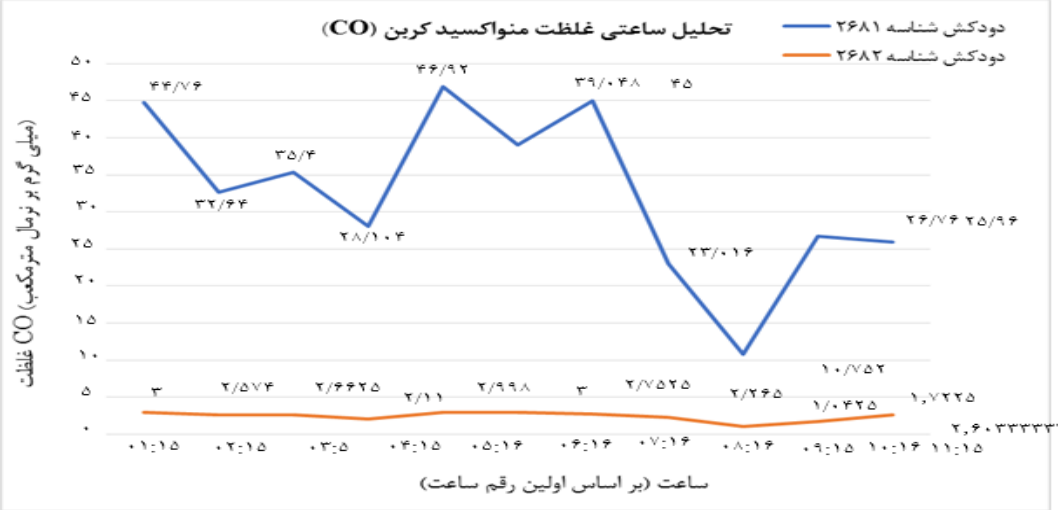
تاریخ	مقدار دودکش ۲۶۸۲	مقدار دودکش ۲۶۸۱
۰۱:۱۶	۳	۴۴/۷۶
۰۲:۱۶	۲/۵۷۴	۳۲,۶۴
۰۳:۱۵	۲/۶۶۲۵	۳۵/۴
۰۴:۱۶	۲/۱۱	۲۸/۱۰۴
۰۵:۱۶	۲/۹۹۸	۴۶/۹۲
۰۶:۱۶	۳	۳۹/۰۸۴
۰۷:۱۶	۲/۷۵۲۵	۴۵
۰۸:۱۶	۲/۲۶۵	۲۳/۰۱۶
۰۹:۱۶	۱/۰۴۲۵	۱۰/۷۵۲
۱۰:۱۶	۱/۷۲۲۵	۲۶/۷۶
۱۱:۱۶	۲/۶۰۳۳۳	۲۵/۹۶

بررسی روند تغییرات دبی (Flow) در دو دودکش بویلر A و C

۱- دودکش بویلر A (دبی متغیر)

سطح دبی: دبی این دودکش بسیار بالاتر از دودکش بویلر C بوده و تغییرات قابل‌توجهی در طول ساعات نشان می‌دهد. شروع (ساعت ۱ تا ۵): دبی از حدود ۵۸۶

شروع‌شده و تا ۶۲۱ در ساعت ۵ افزایش می‌یابد. افت اولیه (ساعت ۶ تا ۷): دبی به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای افت کرده و در ساعت ۷ به پایین‌ترین سطح خود در نیمه اول روز (حدود ۵۲۶) می‌رسد. اوج (ساعت ۸): دبی به شدت افزایش یافته و به بالاترین نقطه خود در کل دوره یعنی ۶۶۶/۷۷ مترمکعب بر ساعت می‌رسد. افت شدید (ساعت ۹ تا ۱۰): پس از اوج ساعت ۸، دبی افت شدیدی را تجربه می‌کند، به‌طوری‌که در ساعت ۱۰ به کمترین مقدار خود (حدود ۵۱۰) می‌رسد. در پایان دوره (ساعت ۱۱): دبی کمی



نمودار ۱. غلظت مونوکسید کربن (CO) برحسب ساعت

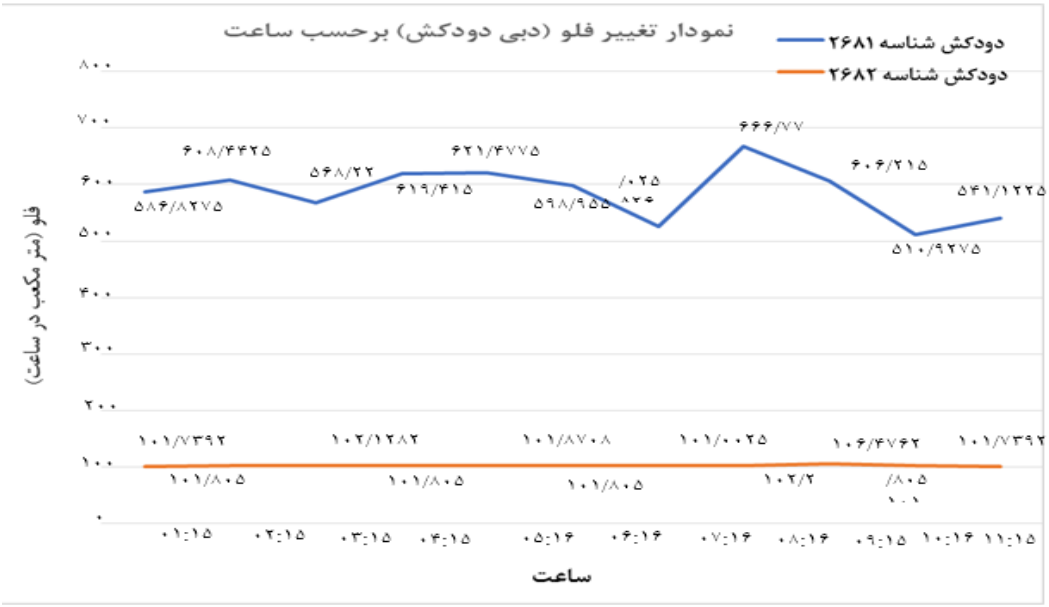
بهبود یافته و به حدود ۵۴۱ می‌رسد. **نمودار ۲** به وضوح نشان می‌دهد که در حالی که دودکش بویلر C یک خط افقی تقریباً مسطح را تشکیل می‌دهد، دودکش بویلر A یک روند سینوسی یا موجی با نوسانات گسترده (بیش از ۱۵۰ واحد اختلاف بین مینیمم و ماکسیمم) در طول ساعات صبحگاهی دارد.

۲- دودکش بویلر C (دبی نسبتاً ثابت)

سطح دبی: دبی این دودکش در تمام ساعات اندازه‌گیری شده (از ساعت ۱ تا ۱۱) تقریباً در سطح پایین و بسیار پایداری قرار دارد. میانگین دبی این دودکش در این بازه زمانی بین ۱۰۱/۷۴ تا ۱۰۲/۲۰ مترمکعب بر ساعت نوسان داشته است. این نشان می‌دهد که این واحد احتمالاً دارای یک جریان خروجی ثابت و کنترل شده است که تحت تأثیر تغییرات ساعتی قرار نگرفته است. جدول ۵ تغییرات فلو (دبی دودکش) را نشان می‌دهد.

جدول ۵. داده‌های Flow دو دودکش در ساعات مختلف

مقدار دودکش ۲۶۸۱	مقدار دودکش ۲۶۸۲	ساعت
۵۸۶/۸۲۷۵	۱۰۱/۷۳۹۲	۰۱:۱۶
۶۰۸/۴۴۲۵	۱۰۱/۸۰۵	۰۲:۱۶
۵۶۸/۲۲	۱۰۲/۱۲۸۲	۰۳:۱۵
۶۱۹/۴۱۵	۱۰۱/۸۰۵	۰۴:۱۶
۶۲۱/۴۷۷۵	۱۰۱/۸۷۰۸	۰۵:۱۶
۵۹۸/۹۵۵	۱۰۱/۸۰۵	۰۶:۱۶
۵۲۶/۰۲۵	۱۰۲/۰۰۲۵	۰۷:۱۶
۶۶۶/۷۷	۱۰۲/۲	۰۸:۱۶
۶۰۶/۲۱۵	۱۰۶/۴۷۹۲	۰۹:۱۶
۵۱۰/۹۲۷۵	۱۰۱/۸۰۵	۱۰:۱۶
۵۴۱/۱۲۲۵	۱۰۱/۷۳۹۲	۱۱:۱۶



نمودار ۲. دبی (Flow) برحسب ساعت

نتایج مقایسه کلی رفتار دو دودکش

همان‌طور که **نمودار ۳** نشان داده می‌شود؛ در دودکش بویلر A به‌طور مداوم میزان بالاتری از اکسیژن (O_2) مشاهده می‌شود. بالاترین میانگین اکسیژن (O_2) ۴/۰۵٪ است، این مقدار تقریباً ۰/۴۳٪ بیشتر از دودکش دیگر است. این امر نشان می‌دهد که نسبت هوا به سوخت در این مسیر بالاتر است. بنابراین میزان نشت هوای محیطی بیشتری وجود دارد. دودکش بویلر C با میانگین ۳/۶۲٪، در سطح اکسیژن پایین‌تری کار می‌کند. پایین‌ترین مقدار (۳/۰۵۷۵٪) نیز در این دودکش ثبت شده است.

روند و نوسانات در طول زمان

در بازه‌ی زمانی مورد بررسی (ساعت ۱:۰۰ تا ۱۱:۰۰):

تغییرات غلظت O_2 در بویلر A و بویلر C همبستگی مثبتی نشان می‌دهد. ضریب همبستگی پیرسون بین دو سری زمانی برابر با ۰/۵۸۹ است. (p-value ≈۰/۰۵۷ > ۰/۰۵ است). در بیشتر نقاط، وقتی غلظت O_2 در یک دودکش افزایش (یا کاهش) می‌یابد، در دودکش دیگر نیز تمایل مشابهی مشاهده شد. از ۱۰ تغییر متوالی، ۹ مورد تغییر جهت (صعودی یا نزولی) در هر دو دودکش یکسان بوده است. این همبستگی ناشی از عوامل مشترک عملیاتی، تغییرات بار بویلر، نوسانات در ترکیب سوخت (گاز طبیعی)، تنظیمات نسبت هوا به سوخت، و شرایط کلی سیستم احتراق است.

بررسی نوسانات و روندهای کلیدی

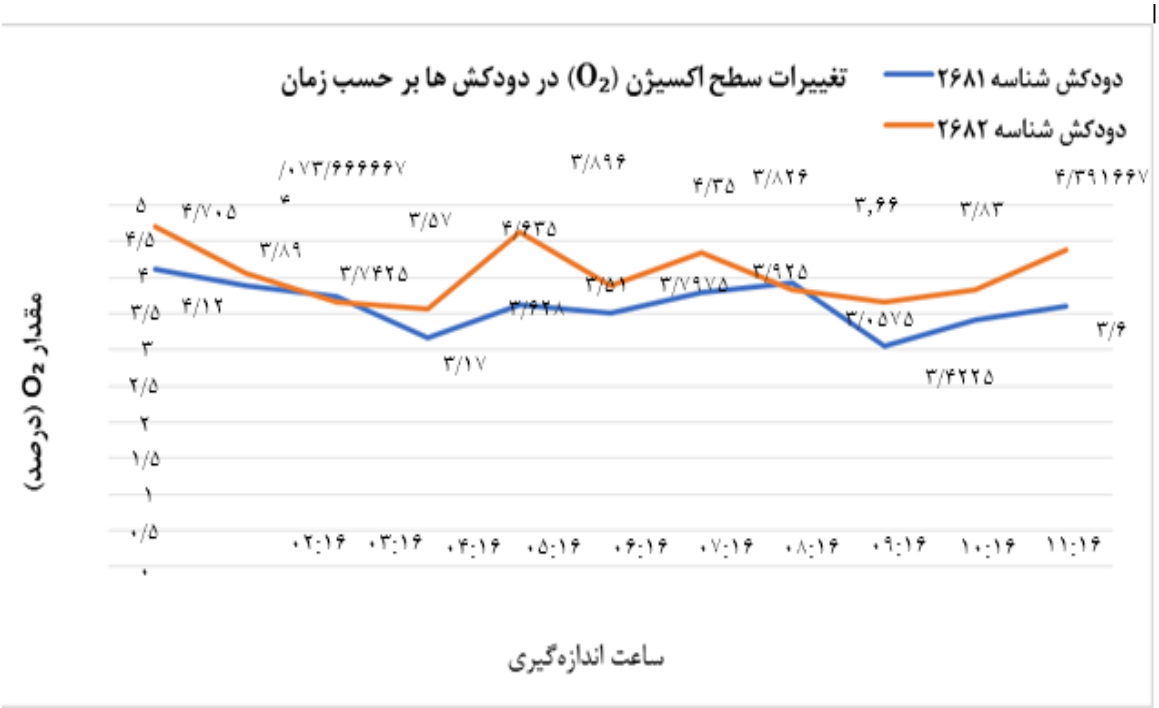
افزایش شدید در ابتدای شیفت هر دو دودکش بین ساعات ۱:۱۵ تا حدود ۵:۱۵ افزایش قابل‌توجهی را تجربه می‌کنند و به اوج محلی می‌رسند (بالاترین مقدار در دودکش ۲۶۸۱ حدود ۴/۷۰۵٪ در ساعت ۱:۱۵ و در دودکش ۲۶۸۲ حدود ۴/۱۲٪ در همان بازه). کاهش چشم‌گیر حوالی ساعت ۹:۰۰ هر دو دودکش در ساعت ۹:۱۵ به پایین‌ترین سطح می‌رسند؛ پایین‌ترین مقدار برای دودکش ۲۶۸۲ برابر ۳/۰۵۷۵٪ ثبت شده است. این کاهش می‌تواند ناشی از افزایش بار سیستم، غنی‌تر شدن مخلوط هوا-سوخت (کاهش نسبت هوا) یا تنظیمات بهینه‌سازی احتراق باشد. وضعیت انتهایی در ساعت ۱۱:۱۵، غلظت O_2 در هر دو دودکش دوباره افزایش یافته و به مقادیر نسبتاً بالایی رسیده است (۴/۳۹٪ در دودکش ۲۶۸۱ و ۳/۶٪ در دودکش ۲۶۸۲). محدوده کلی غلظت O_2مقادیر در هر دو دودکش عمدتاً بین ۳٪ تا ۴/۷٪ قرار دارند. این محدوده نسبتاً پایین است. برای بویلرهای گازسوز تحت بار متوسط تا سنگین، معمولاً مناسب تلقی می‌شود. با این‌حال، در دودکش بویلر (۲۶۸۲) C مقادیر گاهی به نزدیکی ۳٪ می‌رسد (۳/۰۵۷۵٪) که مرز حساس برای جلوگیری از احتراق ناقص و تولید CO بالا محسوب می‌شود. **نمودار ۳** روند تغییرات غلظت اکسیژن دو دودکش را برحسب ساعت را نشان می‌دهد. نتایج نوسانات همزمان و نقاط بحرانی (به‌ویژه کاهش ساعت ۹:۰۰) را

نشان می‌دهد. **جدول ۶** تغییرات غلظت O_2 در دو دودکش در ساعات مختلف را نشان می‌دهد.

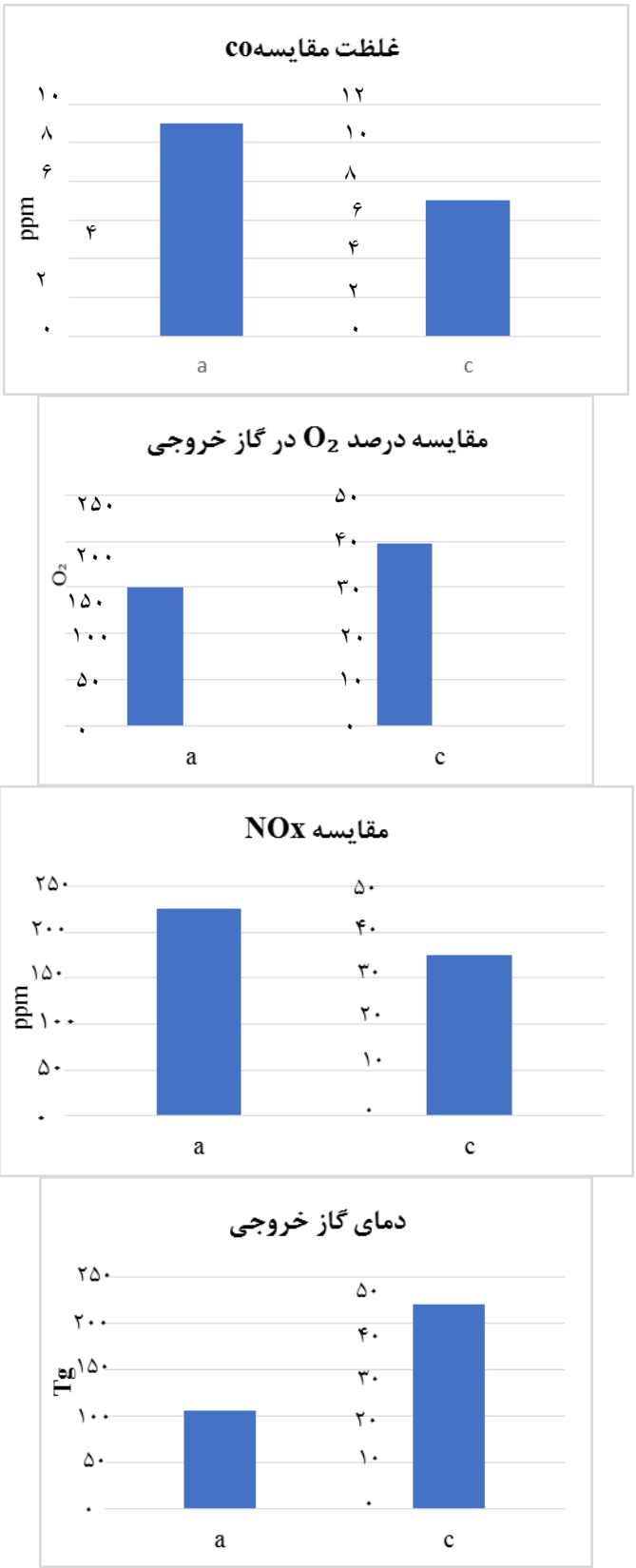
نمودار ۴ نمودار مقایسه‌ی پارامترهای کلیدی احتراق، بازده، و آلاینده‌ها را بین بویلر A و بویلر C را نشان می‌دهد.

جدول ۶. داده‌های O2 دو دودکش در ساعات مختلف

ساعت	دودکش ۲۶۸۱	دودکش ۲۶۸۲
۱۱:۱۵	۴/۳۹۱۶۶۶	۳/۶
۱۰:۱۵	۳/۸۳	۳/۴۲۲۵
۹:۱۵	۳/۶۶	۳/۰۵۷۵
۸:۱۵	۳/۸۲۶	۳/۹۲۵
۷:۱۵	۴/۳۵	۳/۷۹۷۵
۶:۱۵	۳/۸۹۶	۳/۵۱
۵:۱۵	۴/۶۳۵	۳/۶۲۸
۴:۱۵	۳/۵۷	۳/۱۷
۳:۱۵	۳/۶۶۶۶۶	۳/۷۴۲۵
۲:۱۵	۴/۰۷	۳/۸۹
۱:۱۵	۴/۷۰۵	۴/۱۲



نمودار ۳. اکسیژن دودکش برحسب ساعت



نمودار ۴. مقایسه‌ی پارامترهای کلیدی احتراق، بازده، و آلاینده‌ها را بین بویلر A و بویلر C

بحث

صنعت پتروشیمی پلی‌استایرن یکی از صنایع پرمصرف انرژی و تولیدکننده آلاینده‌های هوا است. ضرورت پایش به‌دلیل حساسیت بالای آلاینده‌های ناشی از فرآیند تولید پلی‌استایرن، نیاز به کنترل فوری و دقیق وجود دارد. این مطالعه به بررسی عملکرد سامانه پایش آنلاین آلاینده‌ها و تلفیق آن با سیستم خود اظهاری در شرکت پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب پرداخته شده است. نتایج این بررسی نشان داد مقادیر غلظت O_2 در هر دو دودکش بین ۳٪ تا ۴/۷٪ قرار دارند. این محدوده نسبتاً کم تلقی می‌گردد. در بویلرهای گازسوز شرایط متفاوت است. در این‌گونه بویلرها بارهای متوسط تا سنگین مناسب ارزیابی می‌شود. نتایج ارائه‌شده در دودکش بویلر C (۲۶۸۲) نشان داد غلظت O_2 به بیش از ۳٪ رسیده است (۳/۰۵۷۵٪). بنابراین مرز حساس جهت جلوگیری از احتراق ناقص و تولید CO بالا محسوب می‌شود. توصیه می‌شود در چنین شرایطی نسبت هوا/سوخت به‌دقت مانیتور و تنظیم تا از افت زیر ۳٪ جلوگیری شود.

نتایج نشان می‌دهد، بویلر C کارایی احتراق بالاتر و انتشار آلاینده کمتر دارد، در حالی‌که بویلر A نیاز به بررسی تنظیم نسبت هوا به سوخت دارد. بویلر A با بازده احتراق قابل توجه ۹۴ درصدی، عملکرد مطلوبی در زمینه بهره‌وری انرژی از خود نشان می‌دهد. این امر مرهون کنترل دقیق اکسیژن اضافی در سطح ۶ درصد است. با این وجود، این بویلر در مقایسه با بویلر C از لحاظ انتشار آلاینده NOx در موقعیت ضعف‌تری قرار دارد. در مقابل، بویلر C اگرچه به لحاظ زیست‌محیطی با انتشار کمتر آلاینده‌های NOx و CO، برتری نسبی دارد، اما این مزیت با کاهش بازده به ۹۲ درصد همراه شده است. افزایش اکسیژن اضافی به میزان ۷/۹ درصد و دمای بالای گازهای خروجی (۱۷۴ درجه سانتی‌گراد) ازجمله دلایل اصلی این کاهش بازده محسوب می‌شوند.

برای بویلر C، باید سیستم کنترل احتراق (مشعل و دمپر هوا) تنظیم شود تا میزان هوای اضافی کاهش یابد و به محدوده بویلر A نزدیک شود. علاوه بر این، باید علت بالا بودن دمای گاز خروجی (Tg) بررسی شود؛ این می‌تواند نشانه‌ای از رسوب در سطوح حرارتی بویلر یا نیاز به تنظیمات بهتر تبادل حرارت باشد، که هر دو مورد، بازده کلی بویلر را به شدت کاهش داده‌اند. بویلر C درصد اکسیژن بیشتری دارد (۷/۹٪ در مقابل ۶/۰٪) که نشان‌دهنده‌ی احتراق کامل‌تر است. در بویلر A مقدار CO و NOx بیشتر است؛ یعنی میزان آلاینده‌ها بالاتر و احتراق ناقص‌تر است. دمای گاز خروجی بویلر C کمی بیشتر از A است (۱۷۴ در مقابل ۱۵۱ درجه)، احتمالاً به‌دلیل راندمان احتراق بهتر است. E-Air در هر دو بویلر بالا نیست، اما C با ۱/۶٪ نسبت به A با ۱/۴٪ هوای اضافی بیشتری دارد. غلظت تصحیح‌شده آلاینده‌ها میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب در بویلر C نیز کمتر است؛ بنابراین عملکرد زیست‌محیطی آن بهتر می‌باشد.

CO (منواکسید کربن) ۷/۱۱ قسمت در میلیون هر دو بویلر مقادیر بسیار پایینی از CO دارند. CO پایین (به‌ویژه قسمت در میلیون ۷، در بویلر C) نشان‌دهنده‌ی احتراق کاملاً مطلوب و عدم وجود احتراق ناقص جدی است.

CO (غلظت تصحیح‌شده) ۱۲/۰۵، ۱۶/۵۲ میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب غلظت تصحیح‌شده CO در بویلر C پایین‌تر است که نشان می‌دهد با وجود هوای اضافی بیشتر، تشکیل CO کمتری دارد.

NOx (اکسیدهای نیتروژن) ۴۵/۳۵ قسمت در میلیون بویلر C با ۳۵ قسمت در میلیون انتشار NOx کمتری نسبت به بویلر A با ۴۵ قسمت در میلیون دارد.

NOx (غلظت تصحیح‌شده) ۶۴/۵۴، ۷۲/۴۰ میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب غلظت تصحیح‌شده NOx در بویلر C (۶۴/۵۴) بهتر از بویلر A (۷۲/۴۰) است. نتایج ارائه شده نشان می‌دهد که حدود مجاز آلاینده‌های هوا در صنایع: پالایشگاه‌ها و صنایع پتروشیمی با استانداردهای زیست‌محیطی مطابقت دارد (۲۸).

SO_2, H_2S قسمت در میلیون ۰/۰۰۰ است که صفر بودن SO_2 و H_2S در هر دو نمونه تایید می‌کند که سوخت مصرفی، گاز طبیعی است و عاری از ترکیبات سولفور است.

Tg (دمای گاز خروجی) ۱۷۴/۰ درجه بویلر A و ۱۵۱/۰ درجه بویلر C، بویلر C با دمای دود C° ۱۷۴، اتلاف حرارتی بالاتری دارد. این دما بالاتر از دمای دود بویلر (۱۵۱ درجه سانتی‌گراد) A است و این اختلاف دمای بالا یکی از دلایل اصلی افت بازده در بویلر C است. دمای دود

بالاتر نشان می‌دهد که تبادل حرارت در بویلر C به خوبی بویلر A انجام نمی‌شود.

جدول ۷. حدود مجاز آلاینده‌های هوا در صنایع: پالایشگاه ها و صنایع پتروشیمی

منبع آلاینده	آلاینده	واحد اندازه‌گیری	حد مجاز انتشار		توضیحات
		واحد	درجه ۱	درجه ۲	
دودکش منابع احتراقی	NOX	میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب	۳۷۶	۶۵۸	با سوخت گاز
		میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب	۲۸۲	۵۶۴	با سوخت مازوت
	SO2	میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب	۷۵۲	۱۳۰۸	با سوخت گاز
		میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب	۱۱۷۷	۱۵۲۰	با سوخت مازوت
	ذرات	میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب	۱۰۰	۲۰۰	
	CO	میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب	۵۰۰	۷۰۰	

Vg (سرعت گاز خروجی) متر بر ثانیه ۴/۳ تا ۷/۳ سرعت‌های خروجی در یک محدوده قابل قبول هستند و نشان‌دهنده‌ی عملکرد متوازن فن‌ها بین ۴/۳ تا ۷/۳ هستند.

Q (دبی جریان گاز) متر مکعب بر ساعت ۵۷/۶، ۶۲/۷ ، بویلر A دبی گاز بالاتری دارد. ممکن است بویلر A در زمان نمونه‌برداری با بار کاری بالاتری نسبت به بویلر C کار می‌کرده است.

از آن‌جا که عملکرد سیستم پایش آنلاین در اندازه‌گیری آلاینده‌های موردمطالعه مطلوب و میزان پارامترهای خروجی با استانداردهای سازمان (تجزیه‌وتحلیل و نمودارها منطبق بر خود اظهاری بود و نمودار در ساعت ۹ الی ۱۰ که نمونه‌برداری انجام گرفته دقیقا منطبق با سیستم پایش آنلاین بوده است.

آژانس حفاظت از محیط‌زیست آمریکا EPA US) AAEE, ۲۰۲۳، ۲۰۲۲) تأیید شده است (۲۶، ۲۷).

صنایع پلی‌استایرن ازجمله منابع انتشار آلاینده‌های خطرناک هوا محسوب می‌شوند. این آلاینده‌ها شامل ترکیبات آلی فرار (VOCs)، استایرن‌مونومر و ذرات معلق[1] هستند که همان‌طور که سازمان بهداشت جهانی (WHO،۲۰۲۱) هشدار داده است (۲۹)، اثرات زیان‌باری بر سلامت انسان و محیط‌زیست دارند. پیش از نصب سیستم پایش آنلاین، روش متداول در این شرکت مبتنی بر نمونه‌برداری دستی و تجزیه و تحلیل در آزمایشگاه‌های خارجی بود.

همان‌طور که انجمن مهندسان محیط‌زیست آمریکا خاطر نشان کرده است. پیش از این، سیستم پایش آلاینده‌ها با محدودیت‌های متعددی روبرو بود. بر اساس استاندارد ISO ۱۷۰۲۵ (۲۰۲۰)، دریافت نتایج آزمایشگاهی با تأخیر زمانی ۷ تا ۲۱ روزه همراه بود و امکان پایش مستمر و بلادرنگ آلاینده‌ها وجود نداشت. هم‌چنین مطابق مطالعات جانسون و همکاران (۳۴)، این روش از دقت کافی در شناسایی نشت‌های لحظه‌ای برخوردار نبود (۳۰). با راه‌اندازی سیستم پایش آنلاین (CEMS) مطابق با استاندارد ISO 14001:2015، تحول اساسی در مدیریت زیست‌محیطی شرکت ایجاد شد. بر اساس راهنمای فنی EPA (۲۰۲۲)، این سیستم امکان پایش مداوم ۲۴ ساعته پارامترهای کلیدی آلایندگی، ثبت داده‌ها با فرکانس بالا و انتشار هشدارهای فوری در صورت عبور از حدود مجاز را فراهم می‌کند (۳۱، ۳۲). این تحولات علاوه بر بهبود شاخص‌های زیست‌محیطی، منجر به ارتقای قابل توجه ایمنی و بهداشت شغلی نیز شده است. بر اساس استاندارد OHSAS ۱۸۰۰۱ (۲۰۰۷)، پیاده‌سازی این سیستم موجب کاهش ۶۰ درصدی مواجهه شغلی با آلاینده‌ها و بهبود شرایط محیط کار شده است که این موضوع توسط وزارت کار در سال ۲۰۲۳ مورد تأیید قرار گرفته است، در ادامه یافته‌های این پژوهش با تحقیقات و استانداردهای موجود در این حوزه مقایسه می‌شود. این پژوهش نشان می‌دهد که استقرار سیستم پایش آنلاین (CEMS) امکان نظارت مستمر و دقیق بر آلاینده‌های خروجی از دودکش‌ها را فراهم کرده است. این قابلیت، هسته مرکزی مزایای CEMS است که توسط سازمان حفاظت محیط‌زیست آمریکا به‌عنوان یک

[1] PM

ضرورت برای انطباق با قوانین و مدیریت مؤثر آلاینده‌ها برشمرده شده است (۳۳). یکی از یافته‌های کلیدی این تحقیق، شناسایی اختلاف عملکرد چشمگیر بین دو دودکش بویلر A و بویلر C است، به‌طوری‌که دودکش بویلر A با میانگین غلظت CO برابر (۲۳/۵۸ میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب)، نشانه‌های واضح احتراق ناقص را نشان می‌داد. این یافته به‌طور تجربی تأیید می‌کند که CENS ها چگونه می‌توانند ناکارآمدی‌های خاص در فرآیند را که پیش از این ممکن بود ناشناخته بمانند، آشکار سازند؛ قابلیتی که جانسون و همکاران به‌عنوان یکی از دلایل اصلی برای سرمایه‌گذاری در این سیستم‌ها عنوان کرده‌اند (۳۴). در مقابل، دودکش بویلر C با غلظت پایین و پایدار (۲/۴۳CO میلی‌گرم بر نرمال مترمکعب)، نشان‌دهنده‌ی احتراق بهینه است. تحلیل چنین داده‌هایی از CEMS دقیقاً همان چیزی است که چن و وانگ از آن برای توسعه مدل‌های بهینه‌سازی برای بویلرهای صنعتی استفاده کردند و نشان دادند که چگونه می‌توان با تحلیل همزمان O_2 و CO، راندمان را به حداکثر رساند (۳۵).

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که تلفیق داده‌های CEMS با فرآیند خوداظهاری، مبنای علمی برای تصمیم‌سازی و بهبود مستمر فرآیندها ایجاد می‌کند. این رویکرد یکپارچه، انعکاس عینی از الزامات استاندارد بین‌المللی ISO 14001:2015 است که بر پایش، اندازه‌گیری و بهبود مستمر در چارچوب یک سیستم مدیریت زیست‌محیطی تأکید می‌ورزد (۳۶). یکی از دستاوردهای گزارش‌شده، کاهش ۶۰ درصدی مواجهه شغلی با آلاینده‌ها پس از استقرار CEMS است. در حالی‌که پژوهش جانسون و همکاران عمدتاً بر مزایای زیست‌محیطی کلان تمرکز داشت (۳۴)، این پژوهش نیز با ارائه‌ی این داده‌ی کمی، به شکلی ملموس، یکی از مهم‌ترین مزایای CEMS یعنی ارتقای ایمنی و بهداشت شغلی (HSE) را که اغلب در مقالات آکادمیک کمتر به آن پرداخته می‌شود، برجسته ساخته است (۱۷). در نهایت، پژوهش حاضر استقرار CEMS را نه‌تنها یک الزام نظارتی، بلکه یک سرمایه‌گذاری استراتژیک در مسیر توسعه پایدار می‌داند. این دیدگاه کاملاً با تحلیل‌های نهادهای بین‌المللی مانند آژانس بین‌المللی انرژی و یافته‌های (جانسون و همکاران، ۲۰۲۱) همسو است. هرگونه اقدام عملیاتی برای بهینه‌سازی میزان CO و O_2 (تنظیم هوای مازاد) می‌تواند تأثیر مستقیم و معکوسی بر غلظت NOx داشته باشد (۳۷).

نتیجه‌گیری

این بررسی در مورد نقش کلیدی سیستم پایش آنلاین در پایش و کنترل آلودگی هوا در پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب انجام شده است. این بررسی در مورد نقش CEMS در دستیابی به اهداف پایداری را در بستر خاص یک صنعت پتروشیمی در ایران تأیید و تقویت کرده است. بررسی نشت هوا نشان داد که تفاوت مداوم بین O_2 در دودکش بویلر A و بویلر C (تقریباً ۰/۴٪) می‌تواند ناشی از تفاوت در نشت هوای محیطی به گازهای خروجی[1] در طول مسیر دودکش بویلر A باشد. بنابراین توصیه می‌شود سیستم بویلر A برای شناسایی و رفع نشت هوا بررسی شود. ارتباط با بار سیستم داده‌های O_2 باید با داده‌های بار بویلر (Load) در همان ساعات مقایسه شود تا مشخص شود آیا کاهش در O_2 (مانند ساعت ۹:۰۰) نتیجه‌ی مستقیم افزایش بار است یا تغییر عمدی در کنترل احتراق است. اگر هدف، افزایش راندمان باشد، باید تنظیمات احتراق را به گونه‌ای دقیق‌تر کرد که O_2 در هر دو دودکش به‌صورت پایدار به نزدیک‌ترین نقطه به ۳/۵٪ تا ۴٪ برسد، اما هرگز از ۳٪ پایین‌تر نرود. اگرچه تمرکز اصلی این پژوهش بر روی سه پارامتر کلیدی O_2 , Flow و CO است، اما شایان ذکر است که مبنای این انتخاب، در نظر گرفتن چارچوب جامع حاکم بر پایش آلایندگی بوده است. در این چارچوب، این سه پارامتر در یک رابطه‌ی تعادلی کلیدی با پارامتر مهم دیگری به نام اکسیدهای نیتروژن (NOx) قرار دارند هرگونه اقدام عملیاتی برای بهینه‌سازی میزان CO و O_2 می‌تواند تأثیر مستقیم یا معکوسی بر غلظت NOx داشته باشد. بنابراین، اگرچه NOx به‌طور مستقیم در مدلسازی این مقاله گنجانده نشده، اما آگاهی از نقش آن در این سیستم، معیار انتخاب هوشمندانه پارامترهای موردمطالعه و تضمین‌کننده‌ی ارتباط یافته‌ها با شرایط عملیاتی واقعی است. پیشنهاد می‌گردد برای کاهش مونوکسیدکربن تولیدشده در سر دودکش‌ها سیستمی تعبیه شود که این ماده واکنش‌دهنده نسبتا فعال جذب و یا خنثی شود.

[1] Air In-leakage

تشکر و قدردانی: بدین‌وسیله از جناب آقای مهندس عطاالله علیخانی مدیریت محترم واحد HSE پتروشیمی پلی‌استایرن انتخاب که با مساعدت‌ها و دقت علمی خویش، راهگشای مراحل مختلف این پژوهش بودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

تعارض منافع: نویسندگان اظهار می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع با یکدیگر ندارند.

حمایت مالی: هیچ‌گونه حمایت مالی برای این مطالعه وجود ندارد.

ملاحظات اخلاقی: نویسندگان تمام نکات اخلاقی شامل عدم سرقت ادبی، انتشار دوگانه، تحریف داده‌ها و داده‌سازی را در این مقاله رعایت کرده‌اند. هم‌چنین هر گونه تضاد منافع حقیقی یا مادی که ممکن است بر نتایج یا تفسیر مقاله تأثیر بگذارد را رد می‌کنند.

سهم نویسندگان: این مقاله بخشی از تحقیق دانشجویی کارشناسی‌ارشد با راهنمایی سرکار خانم دکتر طلیعه عبدالخانی‌نژاد است. طراح ایتدایی این مطالعه به عهده‌ی استاد راهنما و قسمت‌هایی از تحلیل و آنالیز بویلرها بر عهده‌ی جناب آقای دکتر غفور نوریان بوده است. قسمت عملی کار، جمع‌آوری داده‌ها و نگارش مقاله بر عهده‌ی خانم مهندس ناهید حاجب است. در نهایت بازبینی و تکمیل تحلیل داده‌های محاسبه‌شده با راهنمایی سرکار خانم دکتر طلیعه عبدالخانی‌نژاد انجام شده است.

Reference

1. Karimi, Hanieh. (2017). Examining the Role of the Petrochemical Industry in Iran’s Economic Development. Second Annual Conference on Economics, Management and Accounting, Ahvaz. (Persian)
2. ISO 14001:2015 — Environmental Management Systems Requirements.
3. European Commission (2021). Best Available Techniques for Large Volume Organic Chemical Industry.
4. Air Pollution Yearbook and Emission Sources in the Country’s Petrochemical Industries. (2022). National Environmental Organization. (Persian)
5. Ministry of Cooperatives, Labour and Social Welfare. (2021). Guideline for Online Environmental Monitoring of Energy-Intensive Industries. (Persian)
6. Iran Department of Environment. (2019). Technical Guideline for Testing and Standards of Continuous Emission Monitoring Systems (CEMS). Tehran: Comprehensive Monitoring Office. (Persian)
7. U.S. Environmental Protection Agency. Compliance Assurance Monitoring Rulemaking (40 CFR Parts 64, 70, and 71). Response to Comments; 1997.
8. Jahani, A., & Kazemi, M. (2017). The Role of Integrated Environmental Information Systems in Sustainable Industrial Management (Case Study: Petrochemical Industry). Quarterly Journal of Environmental Science and Technology. (Persian)
9. Pars Petrochemical Company. (2023). Sustainability Report 2023. Tehran: Pars Petrochemical Company. (Including sections on online pollutant monitoring and self-reporting). (Persian)
10. Mackenzie, L. D., & Cornwell, D. A. (1998). Introduction to Environmental Engineering.
11. Kamali, Gholamali. (2004). Atmosphere and Climatology. Tehran: University of Tehran Press. (This book is a primary academic source in Iran for atmospheric chemistry and the role of lightning in NOx formation.) (Persian)
12. Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (1998). Atmospheric Chemistry and Physics.
13. Vahdat, Mahmoud. (2005). Principles and Applications of Combustion in Boilers. Tehran: Academic Jihad Press. (Persian)
14. Borman, G. L., & Ragland, K. W. (1998). Combustion Engineering.
15. Turns, S. R. (2000). An Introduction to Combustion: Concepts and Applications
16. Mokhtari A, Ramavandi B. Analysis of the Development of the Petrochemical Industry in Iran and Associated Environmental Effects. Journal of Industrial Sociology. 2025 Aug 23;1(2):59-80. (Persian)
17. Heydari, M., & Mousavi, S. (2020). Environmental Impact Assessment of Petrochemical Industry Development in the Asaluyeh Special Zone on the Persian Gulf Ecosystem. Quarterly Journal of Environmental Science and Technology, 22(8), 45–62. (Persian)
18. National Petrochemical Company of Iran. (2023). Comprehensive Map of Iran’s

Petrochemical Industries. Tehran: Planning and Development Deputy. (Persian)
19. Nouri, J., et al. (2019). Monitoring and Modeling of Air Pollutant Dispersion in the Pars Special Energy Economic Zone. Journal of Environmental Research, 10(19), 113–128. (Persian)
20. Pars Special Economic Energy Zone Organization. (2022). Annual Performance Report of Asaluyeh Petrochemical Complexes. Bushehr: Department of Planning and Statistics. (Persian)
21. Iranian Association of Environmental Engineers. (2022). Analysis of the Efficiency of Online Monitoring Systems in Southern Petrochemical Industries. (Persian)
22. Determination of the performance of portable gas analyzers. European Committee for Standardization.
23. Standard Methods for the Examination of Air and Emissions. American Public Health Association.
24. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). *40 CFR Part 60, Appendix B – Performance Specification 2 (PS-2) for SO_2 and NO_x Continuous Emission Monitoring Systems*
25. Iran Department of Environment. Guideline/Instruction for Online Monitoring of Stack Emission Pollutants in Industries (or Self-Reporting Guideline in Environmental Monitoring). Tehran: Department of Environment. (Persian)
26. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). Air Quality System (AQS) Data Mart. 2023.
27. American Academy of Environmental Engineers & Scientists (AAEES). Annual Report 2022.
28. https://qavanin.ir/Law/TreeText/?IDS=278504 3637728041440
29. World Health Organization (WHO). New WHO Global Air Quality Guidelines aim to save millions of lives from air pollution. 22 September 2021.
30. IoT-based air quality monitoring systems for smart cities: A systematic mapping study" International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)
31. ISO 14001:2015 – Environmental management systems
32. EPA Guidance Note on CEMS Maintenance and Operation (AG13, 2021/2022)
33. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2022). *Air Emission Measurement Center (EMC) Continuous Emission Monitoring Systems (CEMS).
34. Johnson, M. et al. (2021). The Role of Continuous Emission Monitoring Systems (CEMS) in Achieving Regulatory Compliance and Environmental Sustainability in the Chemical Industry. *Journal of Environmental Management*, 285, 112-125
35. Chen, L., & Wang, H. (2020). Data Analytics for Performance Optimization of Industrial Boilers Using Continuous Emission Monitoring Data. *Energy*, 213, 118-129.
36. International Organization for Standardization (ISO). (2015). *ISO 14001:2015 Environmental management systems — Requirements with guidance for use*.
37. Borman, G., & Ragland, K. (1998). Combustion Engineering. McGraw-Hill.