

Investigating air pollution caused by the ferrosilicon industry (Case study: Iran Ferroalloy Factory, Lorestan)

Farzad Mehrjo^{1*} , Mohammadsaber Baghkhani pour¹, Amir Alam¹

1. *Corresponding Author*, Research and Technology Center of Science and Development, University of Science & Technology, Iran

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:

Received: 08 October 2022

Revised: 03 June 2023

Accepted: 20 June 2023

Keywords:

Ferrosilicon, Air pollutants,
Filter, Baghouse, Green Space.

ABSTRACT

Ferrosilicon is used in the production of steel and cast iron as a modifier. The most important pollutants in the ferrosilicon industry are particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀) and dust, carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), nitrogen oxides (NO_x), and sulfur oxides (SO_x). The purpose of this study was to investigate the environmental status of air pollution in Iran's ferroalloy industry by examining air pollutant control equipment. Iran's ferroalloy factory with a production capacity of 60 thousand tons of ferrosilicon is located in Lorestan province and air pollutants were measured in the years 2020 and 2021. The exhaust gases and dust were measured with the XL 350 and Westech portable particle detectors and environmental particulate matter with the Dust Trak 8520, respectively. The data analysis was done using SPSS and Excel software. So that the normality of the data was reviewed using the Kolmogorov-Smirnov test and the average of the data was compared with the pollution standards using the one-sample t-test. The results showed that all measured parameters of flue gases, dust, and ambient particulate matter PM_{2.5} and PM₁₀ during the studied years 2020 and 2021 were according to the standard and there was no polluted air in the factory. Having suitable environmental equipment, including U-shaped pipes to cool the transfer smoke-containing gases from the furnace area to the dust collection hall (Baghouse), a cyclone separator for dust removal and the collection of particle matter (PM), and bag filters in the dust collection hall (Baghouse) have been used for collecting particle matter (PM) and filtering dust. Also, the green space, with more than 60% of the factory space, has played a very influential role in reducing the air pollution of the factory.

Cite this article: Mehrjo, F., Baghkhani pour, M., & Alam, A. (2023). Investigating air pollution caused by the ferrosilicon industry (Case study: Iran Ferroalloy Factory, Lorestan). *Journal of Natural Environmental Hazards*, 12(37), 117-132. DOI: 10.22111/jneh.2023.43635.1923



© Farzad Mehrjo

Publisher: University of Sistan and Baluchestan

DOI: 10.22111/jneh.2023.43635.1923

* Corresponding Author Email: Elmotosee@iust.ac.ir

مجله علمی پژوهشی مخاطرات محیط طبیعی، دوره ۱۲، شماره ۳۷، مهر ۱۴۰۲

بررسی آلودگی هوای ناشی از صنعت فروسیلیس (مطالعه موردی: کارخانه فروآلیاژ ایران، لرستان)

فرزاد مهرجو^{۱*}، محمدصابر باغخانی پور^۱، امیر علم^۱

۱. مرکز پژوهش و فناوری علم و توسعه، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران (نویسنده مسئول)

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>نوع مقاله: مقاله پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۱۶</p> <p>تاریخ ویرایش: ۱۴۰۲/۰۳/۱۳</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۳/۳۰</p> <p>واژه‌های کلیدی: فروسیلیسیم، آلاینده هوا، فیلتر، سالن غبارگیر، فضای سبز.</p>	<p>فروسیلیسیم در تولید فولاد و چدن به عنوان اصلاح کننده استفاده می‌شود. از مهم‌ترین آلاینده‌های صنایع تولید کننده فروسیلیسیم می‌توان به ذرات معلق (PM2.5 و PM10) و گرد و غبار، گازهای مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید کربن (CO2)، اکسیدهای نیتروژن (NOx) و اکسیدهای گوگرد (SOx) اشاره کرد. هدف از این مطالعه بررسی وضعیت محیط‌زیستی آلودگی هوای کارخانه فروآلیاژ ایران با بررسی تجهیزات کنترل کننده آلاینده‌های هوا بوده است. کارخانه فروآلیاژ ایران با ظرفیت تولید ۶۰ هزارتن فروسیلیسیم در استان لرستان واقع بوده و آلاینده‌های هوا در سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ اندازه‌گیری شدند. گازها و گرد و غبار خروجی از دودکش به ترتیب با دستگاه‌های XL 350 و سنجش ذرات پرتابل Westech و ذرات معلق محیطی با دستگاه Dust Trak 8520 اندازه‌گیری شدند. سپس تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS و Excel انجام شدند. به طوری که بررسی نرمال بودن داده‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف و مقایسه میانگین داده‌ها با استانداردهای آلودگی با استفاده از آزمون t تک نمونه صورت گرفت. نتایج نشان دادند که تمامی پارامترهای اندازه‌گیری شده شامل گازهای خروجی از دودکش و گرد و غبار و ذرات معلق محیطی PM2.5 و PM10 در طی سال‌های مورد مطالعه ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ طبق استاندارد بوده و هیچ گونه آلودگی هوا در کارخانه وجود نداشته است. داشتن تجهیزات محیط‌زیستی مناسب از جمله لوله‌های U شکل برای خنک کردن دود انتقالی حاوی گازها از قسمت کوره به بخش سالن غبارگیر، جداکننده سیکلونی برای غبارگیری و جمع‌آوری ذرات معلق و فیلترهای کیسه‌ای در سالن غبارگیر برای جمع‌آوری ذرات و فیلتر کردن غبار بوده است. همچنین فضای سبز با تشکیل بیش از ۶۰ درصد از فضای کارخانه، نقش بسیار مؤثری در کاهش آلودگی هوای کارخانه داشته است.</p>

استناد: مهرجو، فرزاد، باغخانی پور، محمدصابر، علم، امیر. (۱۴۰۲). بررسی آلودگی هوای ناشی از صنعت فروسیلیس (مطالعه موردی: کارخانه فروآلیاژ

ایران، لرستان). مخاطرات محیط طبیعی، ۱۲(۳۷)، ۱۳۲-۱۱۷. DOI: 10.22111/jneh.2023.43635.1923



© فرزاد مهرجو*، محمدصابر باغخانی پور، امیر علم.

ناشر: دانشگاه سیستان و بلوچستان

مقدمه

فروآلیاژها به عنوان آلیاژهای حاوی آهن با نسبت بالایی از یک یا چند عنصر دیگر مانند منگنز، کروم، سیلیسیم، مولیبدن و غیره تعریف می‌شوند. آن‌ها به عنوان افزودنی‌های آلیاژی در فولاد برای بهبود خواص، به ویژه استحکام کششی، سایش، خوردگی و مقاومت استفاده می‌شوند. صنعت آهن و فولاد مصرف کننده اصلی فروآلیاژ می‌باشد، بنابراین تولید فروآلیاژ ارتباط تنگاتنگی با تولید فولاد دارد. فروآلیاژهای اصلی عبارتند از فروکروم، سیلیکومنگنز، فروسیلیسیم، فرومنگنز، فرونیکل، فرومولیبدن، فروتیتانیوم، فروونگستن و فرووانادیوم. در حال حاضر تولید فروسیلیسیم در صنایع فروآلیاژ در دنیا با استفاده از روش کوره‌های قوس الکتریکی^۱ تولید می‌شوند. فروسیلیسیم آلیاژی از آهن و سیلیسیم است که بین ۱۵ تا ۹۰ درصد سیلیسیم دارد. آلیاژ فروسیلیسیم در صنعت فولاد و ریخته‌گری به عنوان اکسیژن‌زدا و یک جزء آلیاژی در تولید فولاد و چدن به عنوان اصلاح کننده استفاده می‌گردد که در فرآیند ذوب اضافه می‌شود (حاقو^۲ و نورگیت^۳، ۲۰۱۳؛ هایسنار^۴ و همکاران، ۲۰۱۴).

در این راستا آلودگی هوا از مهمترین مسائل محیط‌زیستی این صنایع به شمار می‌رود (فریدی^۵ و همکاران، ۲۰۱۸؛ کریمی^۶ و همکاران، ۲۰۱۹). از جمله آلاینده‌های هوای تولید شده در صنعت تولید فروسیلیسیم می‌توان به ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$)، ذرات گرد و غبار، گازهای مونوکسید کربن (CO)، دی‌اکسید کربن (CO_2)، اکسیدهای نیتروژن (NO_x) و اکسیدهای گوگرد (SO_x) اشاره کرد. ذرات معلق (PM_{10} و $PM_{2.5}$) عمدتاً در مراحل تخلیه و ذخیره‌سازی مواد اولیه، انتقال مواد اولیه به محل دیو و نگهداری در کارخانه، انتقال مواد اولیه به کوره، فرآیند کوره، ذوب‌گیری، فرآیند تصفیه، فرآیند ریخته‌گری و پالایش، خردکردن، غربال کردن و بسته‌بندی محصول تولید می‌شوند. مهم‌ترین آلاینده هوا ناشی از فعالیت واحد تولید فروسیلیسیم ذرات و غبار موجود در دود تولیدی از کوره‌ها می‌باشند. البته با توجه به نوع فرآیند تولید فروسیلیسیم و استفاده از زغال سنگ و کک، احتمال انتشار مقادیری ناچیز از اکسیدهای نیتروژن (NO_x) و اکسیدهای گوگرد (SO_x) وجود دارد. ذرات معلق تولید شده در فیلترهای کیسه‌ای که به طور تجاری میکروسلیکا نامیده می‌شود، که اغلب برای استفاده به عنوان ماده پرکننده بتن و به منظور استفاده در صنایع سیمان و بتن، صنایع نسوز و سرامیک، صنایع شیمیایی و پلیمر و انواع کاربردهای دیگر فروخته می‌شوند. دیگر آلاینده احتمالی موجود در دود خروجی عبارت است از مونوکسید کربن (CO) که به طور کلی ۷۰ درصد گازها را در صنعت تولید فروسیلیسیم تشکیل می‌دهد و می‌تواند از طریق احیاء کننده‌ها، الکترودها و خمیر کربن منتشر شود. همچنین احتمال انتشار گاز دی‌اکسید گوگرد (SO_2) از طریق احیاء کننده‌ها و اکسیدهای نیتروژن (NO_x) از طریق احتراق وجود خواهد داشت (کرو^۷ و همکاران، ۲۰۱۷؛ پانجوانی^۸ و همکاران، ۲۰۲۰؛ سائوآرسدوتیر^۹ و همکاران، ۲۰۲۱).

1- Electric Arc Furnace
 2- Haque
 3- Norgate
 4- Hycnar
 5- Faridi
 6- Karimi
 7- Kero
 8- Panjwani
 9- Saevarsdotir

از جمله تحقیق‌های صورت گرفته در ایران مرتبط با این مطالعه می‌توان به برخی از آن‌ها اشاره کرد. غیاث‌الدین و همکاران (۱۳۸۰) بررسی ضرایب انتشار آلاینده‌های هوا ناشی از صنایع شیمیایی در محدوده تهران را مورد بررسی قرار دادند و نوع و میزان تولیدات سالانه هر کارخانه و میزان تولید سالانه آلاینده‌ها و ضرایب انتشار هر یک از کارخانجات محاسبه شد. آقاملایی و همکاران (۱۳۹۴) ارزیابی آلودگی هوا ناشی از کارخانه سیمان کرمان را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اگرچه غلظت گردوغبار در برخی از سال‌ها بیش از حدود استاندارد بوده، ولی در مجموع می‌توان غلظت غبار خروجی و محیط را به‌خصوص در سال ۹۲ قابل قبول ارزیابی کرد. رشیدی‌فرد و همکاران (۱۳۹۷) مدل‌سازی انتشار و محاسبه ریسک آلاینده‌های هوای ناشی از مجتمع فولاد را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین افرادی که در خطر انتشار قرار دارند، کارگران می‌باشند. از سوی دیگر به دلیل نزدیک بودن روستاهای اطراف به محدوده فلرها در اراضی جنوبی سایت، ساکنین این روستاها در معرض مقادیر زیادی از آلاینده‌ها می‌باشند. کریمی‌قوزلو و همکاران (۱۴۰۰) ارزیابی ذرات معلق محیطی PM_{10} و $PM_{2.5}$ با روش شاخص کیفیت هوا را در مجتمع صنعتی سیمان تهران را مورد بررسی قرار دادند و نتیجه گرفتند که وضعیت کیفیت هوا با میانگین غلظت $106/2$ میلی‌گرم بر مترمکعب در صنعت سیمان تهران در طبقه‌بندی ناسالم برای گروه‌های حساس قرار گرفته است.

از جمله تحقیق‌های صورت گرفته در خارج از ایران مرتبط با این مطالعه نیز می‌توان به برخی از آن‌ها اشاره کرد. پانجوانی^۱ و اولسن^۲ (۲۰۱۳) مدلی برای پیش‌بینی و افزایش درک احتراق و تشکیل NO_x در کوره‌های قوس الکتریکی مورد استفاده برای تولید فروسیلیسیم و سیلیسیم را مورد بررسی قرار دادند و نشان دادند که انتشار NO_x در هنگام استفاده از مواد خام مرطوب در مقایسه با استفاده از مواد خام خشک کاهش می‌یابد. کرو و همکاران (۲۰۱۵) توزیع اندازه انتشار ذرات از صنایع فروآلیاژ (سیلیکومنگنز و فروسیلیسیم) توسط ضربه‌گیر فشار پایین الکتریکی را بررسی کردند که توانستند ذرات معلق تولید شده در هوای داخلی مراکز تولید متالورژی را شناسایی کنند. نیگارد^۳ و همکاران (۲۰۱۹) جذب کربن در نمک‌های مذاب را به عنوان روشی برای جذب CO_2 از انواع گازهای دودکش مربوط به تولید برق و فرآیندهای صنعتی با انرژی بالا در تولید فروسیلیسیم را بررسی کردند و دریافتند که روش مورد بررسی، یک فناوری جایگزین رقابتی امیدوارکننده برای جذب CO_2 در مقیاس کامل برای تولید فروسیلیسیم با هدف بازیافت انرژی است. ژانگ^۴ و همکاران (۲۰۲۲) مشخصات فیزیکی و شیمیایی انتشار ذرات معلق فرار را در صنایع آهن و فولاد را در چین مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که عوامل انتشار در توالی نزولی کارخانه‌های فولادسازی، پخت، آهن‌سازی و کک‌سازی بوده و اندازه ذرات از $0/1$ تا 716 میکرومتر هستند.

آلودگی هوا از مهم‌ترین مسائل محیط‌زیستی صنایع تولیدکننده فروسیلیسیم به شمار می‌رود و یکی از الزامات این صنایع بررسی وضعیت آلاینده‌های هوا و کاهش این آلاینده‌ها می‌باشد. از این‌رو، هدف از این مطالعه بررسی وضعیت

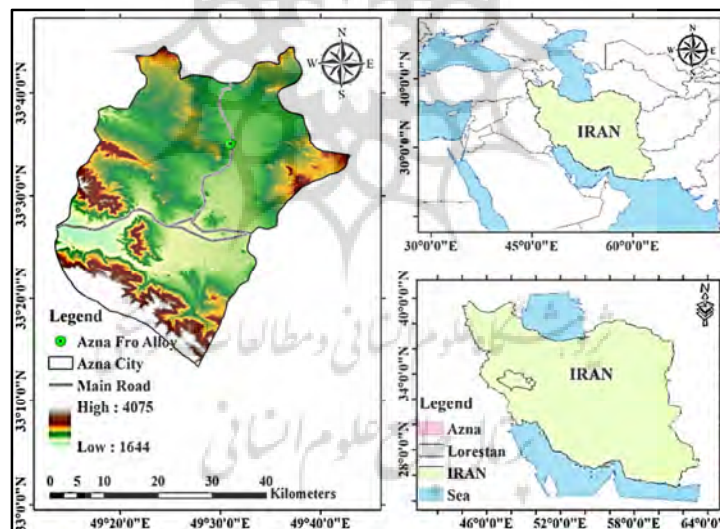
1- Panjwani
2- Olsen
3- Nygard
4- Zhang

محیط‌زیستی آلودگی هوای صنعت فروسیلیس با تمرکز بر کارخانه فروآلیاژ ایران با بررسی تجهیزات کنترل کننده آلاینده‌های هوا می‌باشد.

داده‌ها و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه:

کارخانه فروآلیاژ ایران در قسمت جنوب غربی شهر مؤمن‌آباد از توابع شهرستان ازنا در استان لرستان و کیلومتر ۲۰ جاده ازنا - اراک واقع شده است. در شکل ۱ موقعیت جغرافیایی کارخانه فروآلیاژ ایران نسبت به شهر ازنا، استان لرستان و ایران نشان داده شده است. این کارخانه با هدف تولید فروسیلیسیم به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مواد اولیه راهبردی صنایع فولاد و چدن در سال ۱۳۶۵ در زمینی به مساحت ۷۰ هکتار تأسیس شد و عملیات اجرای فاز اول آن در بهمن‌ماه ۱۳۷۲ رسماً مورد بهره‌برداری قرار گرفت. در حال حاضر کارخانه با تولید سالانه ۶۰ هزارتن فروسیلیسیم و ۲۰ هزارتن پودر میکروسیلیکا با سه کوره بزرگترین تولیدکننده و صادرکننده فروسیلیسیم در ایران و غرب آسیا است. این کارخانه یکی از بزرگترین تولیدکننده فروسیلیسیم در جهان می‌باشد و به‌طور تقریبی ۶۰ درصد از تولیدات مجموعه در بازارهای داخلی عرضه و مابقی به بیش از ۲۵ کشور از جمله ترکیه، آلمان، ایتالیا، چک، فرانسه، یونان، صربستان، هند، پاکستان و غیره صادر می‌شود.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی کارخانه فروآلیاژ ایران

اندازه‌گیری آلاینده‌های هوا:

آلاینده‌های هوا شامل گازها و گرد و غبار خروجی از دودکش و ذرات معلق محیطی در کارخانه فروآلیاژ ایران، که به صورت نتایج خوداظهاری محیط‌زیستی بوده، هر سه ماه یک‌بار (به‌صورت فصلی) برای سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ بر اساس ضوابط و استانداردهای محیط‌زیستی سازمان حفاظت محیط‌زیست اندازه‌گیری شدند. تعداد برداشت‌ها برای گازها و گرد و غبار خروجی از دودکش از هر ۳ کوره انجام شد که کوره ۱ دارای ۲ خروجی و کوره‌های ۲ و ۳ هر کدام دارای ۳ خروجی بودند. همچنین تعداد برداشت‌های ذرات معلق محیطی در ۸ نقطه از کارخانه بوده که موقعیت آن‌ها در شکل ۲ نشان داده شده است. زمان برداشت نمونه‌های گازها و گرد و غبار خروجی از دودکش و ذرات معلق

محیطی برای سال ۱۳۹۹ در چهار فصل بهار (۱۷ اردیبهشت ماه)، تابستان (۲۰ مرداد ماه)، پاییز (۲۸ آبان ماه) و زمستان (۱۳ بهمن ماه) و سال ۱۴۰۰ نیز در چهار فصل بهار (۱۸ خرداد ماه)، تابستان (۱۴ شهریور ماه)، پاییز (۲۴ آبان ماه) و زمستان (۱۸ اسفند ماه) نمونه برداری شدند. گازها و گرد و غبار خروجی از دودکش با حدود مجاز انتشار آلاینده‌های هوا در صنایع (سایر واحدهای صنعتی با هر روند تولید که کارخانه فروآلیاژ ایران در این گروه جای دارد) بر اساس تصویب نامه دولت (در سال ۱۳۹۵) در مورد تعیین حد مجاز استانداردهای خروجی از کارخانه‌ها و کارگاه‌های صنعتی به پیشنهاد سازمان حفاظت محیط زیست و به استناد ماده (۱۵) قانون نحوه جلوگیری از آلودگی هوا مصوب ۱۳۷۴ مقایسه شدند (برای کارخانه فروآلیاژ ایران بر اساس استاندارد درجه ۱ برای ذرات گرد و غبار برابر با $100 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ و گازهای SO_2 برابر با 280 ppm ، NO_x برابر با 390 ppm و CO برابر با 560 ppm). همچنین مقادیر اندازه‌گیری شده ذرات معلق محیطی با استاندارد کیفیت هوای آزاد منطبق بر استانداردهای سازمان محیط زیست (برای $\text{PM}_{2.5}$ برابر با $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ و PM_{10} برابر با $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) مقایسه شدند.

الف- گازهای خروجی از دودکش: گازهای خروجی از دودکش‌ها با استاندارد ASTM D-6522-EPA CTM-030 و با دستگاه گازسنج XL 350 از شرکت تستو^۱ اندازه‌گیری گردیدند. این دستگاه توسط شرکت سازنده تحت شرایط استاندارد (دما- فشار- رطوبت) توسط سیلندرهای گاز با خلوص بالا تنظیم و کالیبره می‌گردند و به صورت دوره‌ای توسط نمایندگی‌های شرکت در ایران کالیبره می‌شود. همچنین قبل از هر اندازه‌گیری دستگاه به صورت خودکار اقدام به صفر کردن خودکار سنسورها می‌نماید. این دستگاه گازهای خروجی از دودکش‌ها را از محل نمونه برداری به وسیله پراب با تحمل دمایی بالا (۱۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) توسط پمپ به سمت حسگرهای موجود در دستگاه مکش کرده و هر حسگر گاز مخصوص به خود را قرائت کرده و داده‌های آن را تحلیل می‌نماید. محل نمونه برداری در موقعیتی از انتهای دودکش بوده که خمیدگی و زانویی وجود نداشته و دودکش به صورت مستقیم باشد. به میزان دو برابر قطر دودکش از انتهای آن پائین آمده و دو برابر قطر دودکش از ابتدای دودکش (محل ورودی فن به دودکش) نیز بالاتر رفته و نمونه برداری صورت گرفت. ارتفاع دودکش‌ها از محل ورود گازها $34/3$ متر و ارتفاع محل نمونه برداری از محل ورود گاز $31/3$ متر بوده است.

ب- گرد و غبار خروجی از دودکش: گرد و غبار خروجی از دودکش‌ها با استاندارد ایزو ۹۰۹۶ و توسط دستگاه سنجش ذرات پرتابل وستچ^۲ ساخت کشور انگلستان به روش وزن سنجی و به صورت ایزوکننتیک اندازه‌گیری شدند. در این روش ابتدا توسط دیتا لاگر^۳ پارامترهای اولیه شامل دما، فشار، سرعت گاز خروجی و رطوبت محاسبه شدند. همچنین قطر دودکش نیز جداگانه اندازه‌گیری شد. سپس با توجه به پارامترهای به دست آمده و روابط موجود، میزان حجم گاز مورد نیاز، اندازه نازل و تعداد نقاط نمونه برداری (بر اساس استاندارد متد^۴) تعیین شد. دستگاه دیتا لاگر نازل مناسب جهت نصب روی پراب و نیز فاصله نقاط بر روی قطر داخلی دودکش و زمان لازم جهت نمونه برداری را بر اساس استاندارد متد تعیین می‌نماید. پس از آن تست نشت یابی^۵ از سیستم اندازه‌گیری انجام شده و دستگاه، نازل

1- Testo
2- Westech
3- Data Logger
4- EPA Method 1
5- Leak Test

مناسب جهت نصب روی پراب و نیز فاصله نقاط بر روی قطر داخلی دودکش و زمان لازم جهت نمونه برداری را بر اساس استاندارد تعیین می‌نماید. سپس فیلتر توزین شده بر روی پراب نصب و پراب به پمپ و متعلقات آن شامل سیلیکا ژل و ایمپینجر متصل گردید، در نهایت دستگاه روشن و از محل نمونه برداری حجم معینی از هوا توسط دستگاه در زمان معین برای اندازه‌گیری گرد و غبار نمونه برداری شد.

پ- ذرات معلق محیطی: ذرات معلق محیطی با استاندارد BS-EN-12341 که با دستگاه سنجش ذرات معلق محیطی Dust Trak 8520 از شرکت تسی^۱ اندازه‌گیری شدند. عملکرد دستگاه به صورت وزنی و قرائت مستقیم مبتنی بر روش ارسال پرتوهای لیزری بوده که ذرات معلق هوا (PM_{10} و $PM_{2.5}$) را مورد سنجش قرار داده و اندازه‌گیری به روش کاهش جذب اشعه بتا صورت پذیرفت. در این روش دستگاه در موقعیت مناسب و ترجیحاً کمی بالاتر از سطح زمین (در ارتفاع ۱/۵ متری از سطح زمین) قرار گرفته و نازل‌های مربوط (۲/۵ و ۱۰ میکرون) بر روی دستگاه نصب شدند. سپس با توجه به موقعیت محل، فلوی دستگاه تنظیم شد. قبل از انجام نمونه برداری کالیبراسیون دستگاه انجام شد. جهت این کار دستگاه را در سطح افقی قرار داده سپس فیلتر صفر^۲ را بر روی دستگاه نصب کرده و دستگاه به صورت خودکار اقدام به کالیبره شدن می‌نماید. این عمل ۱۰ تا ۳۰ ثانیه به طول انجامید. چنانچه عدد نمایش داده شده $-۰/۰۰۱$ و $+۰/۰۰۱$ را نشان دهد کالیبراسیون انجام پذیرفته است. بعد از کالیبره کردن دستگاه، نمونه برداری در زمان مشخص انجام شده و با توجه به قابلیت دستگاه، میزان متوسط ذرات معلق موجود در هوای محیط در واحد حجم (میکروگرم بر مترمکعب) محاسبه و ارائه شدند. تصویری از محل‌های نمونه برداری از ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده در کارخانه و اطراف آن شامل ۸ نقطه برداشت (از A تا H) در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: محل‌های نمونه برداری از ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده برای ذرات معلق محیطی (PM_{10} و $PM_{2.5}$)

ت- تجزیه و تحلیل داده‌ها: پس از اندازه‌گیری داده‌های آلاینده‌های هوا طی سال‌های مورد مطالعه، تجزیه و تحلیل داده‌ها با استفاده از نرم‌افزارهای SPSS ورژن ۲۲ و Excel انجام شدند. به طوری که بررسی نرمال بودن داده‌ها با

1- Tsi

2- Zero filter

استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف^۱ و مقایسه میانگین داده‌ها با استانداردهای آلودگی با استفاده از آزمون t تک نمونه^۲ در محیط نرم‌افزار SPSS صورت گرفت.

یافته‌های تحقیق

گازها و گرد و غبار خروجی از دودکش:

نتایج گازهای خروجی از دودکش کارخانه فروآلیاژ ایران برای سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در جدول‌های ۱ و ۲ نشان داده شد است همچنین نتایج گرد و غبار در شکل‌های ۳ و ۴ نشان داده شده است.

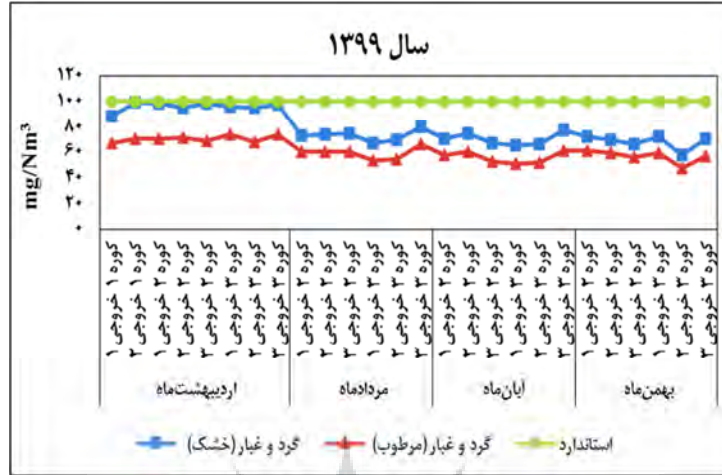
جدول ۱: نتایج گازهای خروجی از دودکش کارخانه فروآلیاژ ایران با سوخت قوس الکتریک (سال ۱۳۹۹)

زمان نمونه‌برداری	محل نمونه‌برداری	CO ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	SO ₂ ppm	H ₂ S ppm	دمای گاز دودکش
اردیبهشت‌ماه	کوره ۱ خروجی ۱	۲/۱	۱۹	۹	۰/۵	۱۲	۰	۱۴۲
	کوره ۱ خروجی ۲	۱/۹	۲۵	۱۴	۰/۴	۱۵	۰	۱۳۹
	کوره ۲ خروجی ۱	۱/۷	۲۲	۱۸	۲/۱	۷	۱	۱۱۷
	کوره ۲ خروجی ۲	۰/۸	۲۰	۱۹	۲/۴	۸	۱	۱۱۴
	کوره ۲ خروجی ۳	۰/۹	۳۰	۱۶	۲/۱	۱۰	۱	۱۰۹
	کوره ۳ خروجی ۱	۱/۱	۱۹	۱۷	۲	۱۲	۱	۱۱۴
	کوره ۳ خروجی ۲	۱/۶	۲۱	۱۷	۲/۴	۱۲	۱	۱۱۲
	کوره ۳ خروجی ۳	۱/۷	۳۴	۱۹	۱/۸	۸	۱	۱۱۷
مردادماه	کوره ۲ خروجی ۱	۰/۶	۱۰	۶	۰/۳	۴	۰	۱۱۸
	کوره ۲ خروجی ۲	۰/۹	۱۰	۴	۰/۶	۷	۰	۱۱۴
	کوره ۲ خروجی ۳	۲/۱	۷	۱۰/۲	۱/۴	۳	۰	۱۰۹
	کوره ۳ خروجی ۱	۰/۲	۱۲	۵	۰/۹	۴	۰	۱۲۱
	کوره ۳ خروجی ۲	۰/۱	۷	۹	۰/۸	۵	۰	۱۱۵
	کوره ۳ خروجی ۳	۰/۳	۸	۸	۸	۳	۰	۱۲۸
آبان‌ماه	کوره ۲ خروجی ۱	۱/۶	۱۵	۹	۱/۲	۴	۱	۱۰۹
	کوره ۲ خروجی ۲	۱/۴	۸	۷	۱/۳	۷	۱	۱۰۷
	کوره ۲ خروجی ۳	۰/۷	۶	۱۱	۲/۳	۷	۰	۱۱۲
	کوره ۳ خروجی ۱	۰/۳	۸	۱۰	۱/۳	۹	۰	۱۲۱
	کوره ۳ خروجی ۲	۰/۵	۱۲	۹	۱	۹	۰	۱۱۶
	کوره ۳ خروجی ۳	۱/۱	۱۰	۶	۰/۳	۸	۱	۱۱۴
بهمن‌ماه	کوره ۲ خروجی ۱	۰/۹	۹	۶	۰/۴	۶	۰	۱۰۱
	کوره ۲ خروجی ۲	۱	۶	۴	۰/۸	۹	۰	۱۱۴
	کوره ۲ خروجی ۳	۰/۵	۱۰	۹	۱/۷	۹	۰	۱۰۴
	کوره ۳ خروجی ۱	۰/۲	۱۲	۷	۱/۸	۵	۰	۱۰۹
	کوره ۳ خروجی ۲	۰/۳	۱۱	۱۰	۲/۱	۱۲	۱	۱۰۶
	کوره ۳ خروجی ۳	۰/۱	۸	۸	۱/۵	۱۰	۱	۹۹

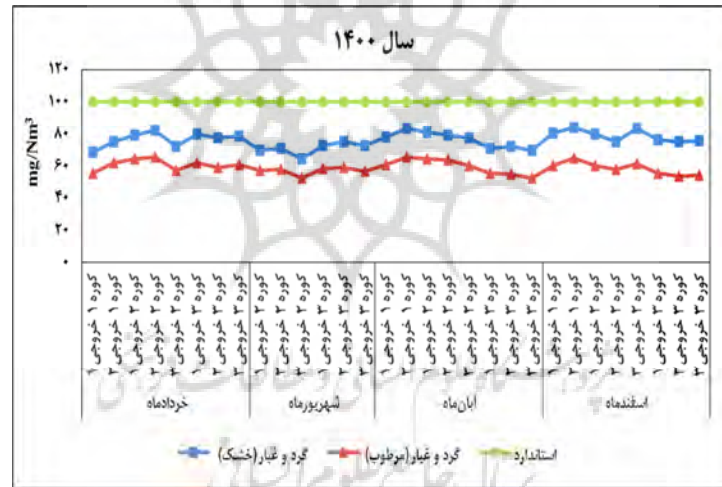
1 Kolmogorov-Smirnov
2 One Sample t-Tset

جدول ۲: نتایج گازهای خروجی از دودکش کارخانه فروآلیاژ ایران با سوخت فوس الکتریک (سال ۱۴۰۰)

زمان نمونه برداری	محل نمونه برداری	CO ₂ %	CO ppm	NO ppm	NO ₂ ppm	SO ₂ ppm	H ₂ S ppm	دمای گاز دودکش
خردادماه	کوره ۱ خروجی ۱	۱/۶	۱۱	۱۷	۱/۲	۶	۰	۱۵۷
	کوره ۱ خروجی ۲	۲	۱۶	۱۲	۰/۷	۱۰	۰	۱۵۱
	کوره ۲ خروجی ۱	۲/۶	۱۹	۱۴	۱/۵	۴	۰	۱۲۵
	کوره ۲ خروجی ۲	۱	۱۷	۱۲	۱/۳	۴	۰	۱۲۷
	کوره ۲ خروجی ۳	۰/۷	۲۵	۱۸	۲/۴	۸	۰	۱۱۴
	کوره ۳ خروجی ۱	۰/۲	۱۷	۱۱	۰/۹	۱۰	۰	۱۳۱
	کوره ۳ خروجی ۲	۰/۸	۱۸	۱۰	۱	۹	۰	۱۲۸
	کوره ۳ خروجی ۳	۱/۱	۲۴	۲۰	۱/۶	۱۱	۰	۱۲۹
شهریورماه	کوره ۲ خروجی ۱	۲/۱	۱۵	۱۲	۰/۹	۶	۰	۱۱۶
	کوره ۲ خروجی ۲	۰/۶	۱۱	۹	۰/۶	۶	۰	۱۱۱
	کوره ۲ خروجی ۳	۱	۱۹	۱۰	۰/۶	۹	۰	۱۰۴
	کوره ۳ خروجی ۱	۰	۱۴	۸	۰/۴	۶	۰	۱۱۹
	کوره ۳ خروجی ۲	۰/۱	۱۶	۷	۰/۳	۵	۰	۱۱۵
	کوره ۳ خروجی ۳	۰	۱۹	۱۰	۰/۴	۴	۰	۱۱۴
	کوره ۱ خروجی ۱	۲	۱۵	۱۵	۰/۹	۸	۰	۱۴۸
آبان ماه	کوره ۱ خروجی ۲	۱/۸	۲۱	۸	۰/۴	۱۲	۰	۱۵۹
	کوره ۲ خروجی ۱	۲/۷	۱۲	۱۹	۱/۹	۸	۰	۱۳۸
	کوره ۲ خروجی ۲	۰/۴	۱۸	۱۱	۰/۹	۱۰	۰	۱۴۰
	کوره ۲ خروجی ۳	۰/۷	۲۶	۱۶	۱/۱	۱۱	۰	۱۳۶
	کوره ۳ خروجی ۱	۰	۲۰	۶	۰	۸	۰	۱۲۷
	کوره ۳ خروجی ۲	۰	۲۰	۶	۰	۸	۰	۱۲۷
	کوره ۳ خروجی ۳	۰	۱۵	۶	۰	۶	۰	۱۳۳
	کوره ۱ خروجی ۱	۲/۱	۲۱	۱۱	۰/۴	۴	۰	۱۳۰
اسفندماه	کوره ۱ خروجی ۲	۲/۳	۱۶	۵	۰/۱	۹	۰	۱۳۴
	کوره ۲ خروجی ۱	۲/۲	۱۸	۱۴	۱/۳	۱۰	۰	۱۲۵
	کوره ۲ خروجی ۲	۰/۷	۲۲	۹	۰/۷	۷	۰	۱۲۸
	کوره ۲ خروجی ۳	۰/۲	۲۳	۱۴	۱/۶	۶	۰	۱۲۱
	کوره ۳ خروجی ۱	۰	۱۵	۱۱	۱/۲	۳	۰	۱۰۴
	کوره ۳ خروجی ۲	۰	۱۵	۱۸	۱/۷	۱	۰	۱۰۱
	کوره ۳ خروجی ۳	۰	۱۱	۹	۰/۷	۰	۰	۱۱۴



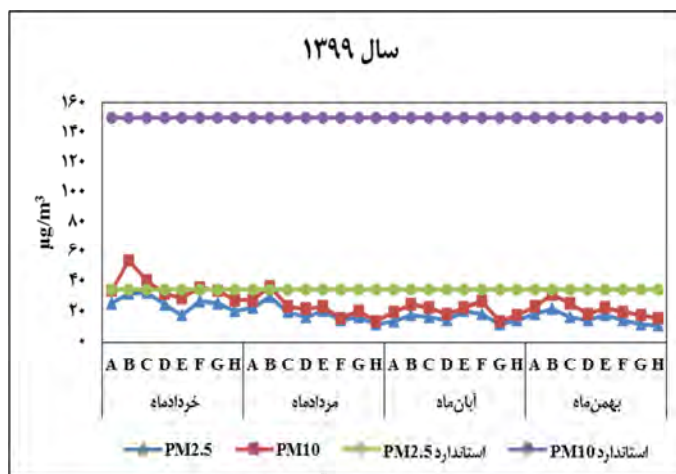
شکل ۳: نتایج گرد و غبار خروجی از دودکش کارخانه فروآلیاژ ایران (سال ۱۳۹۹)



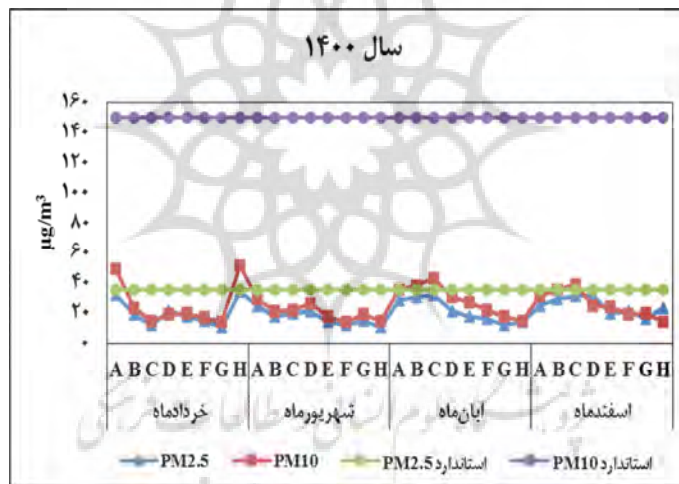
شکل ۴: نتایج گرد و غبار خروجی از دودکش کارخانه فروآلیاژ ایران (سال ۱۴۰۰)

ذرات معلق محیطی:

تغییرات مقادیر ذرات معلق محیطی (PM_{10} و $PM_{2.5}$) برای کارخانه فروآلیاژ ایران برای سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵: نتایج ذرات معلق محیطی کارخانه فروآلیاز ایران (سال ۱۳۹۹)



شکل ۶: نتایج ذرات معلق محیطی کارخانه فروآلیاز ایران (سال ۱۴۰۰)

آزمون‌های کولموگروف-اسمیرنوف و t تک نمونه:

بررسی نرمال بودن داده‌های گازها و گرد و غبار خروجی از دودکش و ذرات معلق محیطی با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف با سطح اطمینان ۹۵ درصد با استفاده از نرم‌افزار SPSS ورژن ۲۲ صورت گرفت و نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. در این آزمون اگر مقدار Sig (معنی‌داری) بیشتر از سطح معنی‌داری ۰/۰۵ باشد، آن‌گاه داده‌ها نرمال هستند و در صورتی که کمتر از ۰/۰۵ باشد، داده‌ها نرمال نیستند (میشرا^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). که با توجه به اینکه مقادیر Sig (معنی‌داری) برای تمامی داده‌ها بزرگتر از سطح معنی‌داری ۰/۰۵ بوده، نشان دهنده نرمال بودن داده‌ها می‌باشد.

همچنین نتایج مقایسه میانگین داده‌ها با استانداردهای آلودگی با استفاده از آزمون t تک نمونه در سطح اطمینان ۹۵ درصد در جدول ۴ نشان داده شده است. آزمون t تک نمونه زمانی مورد استفاده قرار می‌گیرد که یک نمونه از جامعه را داریم و می‌خواهیم میانگین آن را با یک حالت معمول و رایج استاندارد مقایسه کنیم. از جمله مفروضات این آزمون، نرمال بودن داده‌ها می‌باشد که توزیع نرمال آن‌ها با استفاده از آزمون کولموگروف-اسمیرنوف با سطح اطمینان ۹۵ درصد انجام شد (جدول ۳). در این تحقیق میانگین مقادیر داده‌های گازها و گرد و غبار خروجی از دودکش و ذرات معلق محیطی با استانداردهای آلودگی هر کدام مقایسه شد. در این آزمون فرض H_0 را برای برابری میانگین‌های پارامترها با مقدار استاندارد و فرض H_1 را برای نابرابری میانگین‌های پارامترها با مقدار استاندارد در نظر گرفته و به بررسی این موضوع پرداخته شد که آیا بین میانگین‌های دو روش اختلاف معنی‌داری وجود دارد یا خیر. که در صورتی که مقدار Sig (معنی‌داری) حاصل از این آزمون کمتر از سطح معنی‌داری ۰/۰۵ باشد، پس می‌توان نتیجه گرفت که تفاوت آماری معنی‌دار بین دو میانگین واقعی (پارامتر) و مفروض (استاندارد آلودگی) وجود دارد (لیانگا^۱ و همکاران، ۲۰۱۹). با توجه به اینکه میانگین تمامی پارامترها از میانگین استاندارد آن‌ها کمتر بوده و مقدار Sig (معنی‌داری) برای آن‌ها مقدار (۰/۰۰۰) و کمتر از سطح معنی‌داری ۰/۰۵ بوده، لذا فرض H_0 برای تمامی آن‌ها رد خواهد شد و بین میانگین‌های آن‌ها اختلاف معنی‌دار وجود دارد.

جدول ۳: بررسی نرمال بودن داده‌ها توسط آزمون کولموگروف-اسمیرنوف

آزمون کولموگروف-اسمیرنوف			انحراف معیار	میانگین	تعداد نمونه	مقادیر
Sig (معنی‌داری)	درجه آزادی (df)	آمار				
۰/۲۰۰	۵۵	۰/۰۹۱	۲/۹۲	۷/۵۳	۵۶	SO ₂
۰/۰۵۱	۵۵	۰/۱۱۹	۴/۸۷	۱۲/۳۳	۵۶	NO _x
۰/۰۷۷	۵۵	۰/۱۱۳	۶/۲۸	۱۵/۸۷	۵۶	CO
۰/۲۰۰	۵۶	۰/۰۲۶	۷/۹۷	۷۹/۳۸	۵۶	گرد و غبار خشک
۰/۲۰۰	۵۶	۰/۰۸۸	۵/۵۶	۵۹/۹۸	۵۶	گرد و غبار مرطوب
۰/۲۰۰	۶۲	۰/۰۶۶	۵/۹۹	۱۹/۷۹	۶۴	PM _{2.5}
۰/۲۰۰	۶۲	۰/۰۵۰	۸/۴۹	۲۵/۱۴	۶۴	PM ₁₀

جدول ۴: آماره آزمون t برای مقایسه میانگین داده‌ها با استانداردهای آلودگی

میانگین مینا	بیشترین	کمترین	اختلاف از میانگین	Sig (معنی‌داری)	درجه آزادی (df)	عدد t	مقادیر
۲۸۰	-۲۷۱/۶۸	-۲۷۳/۲۶	-۲۷۲/۴۷	۰/۰۰۰	۵۵	-۶۹۱/۰۶	SO ₂
۳۹۰	-۳۷۸/۳۵	-۳۷۸/۹۴	-۳۷۷/۶۷	۰/۰۰۰	۵۵	-۵۷۵/۵۰	NO _x
۵۶۰	-۵۴۲/۴۳	-۵۴۵/۸۳	-۵۴۴/۱۳	۰/۰۰۰	۵۵	-۶۴۲/۲۰	CO
۱۰۰	-۱۸/۴۷	-۲۲/۷۷	-۲۰/۶۲	۰/۰۰۰	۵۵	-۱۹/۱۹	گرد و غبار خشک
۱۰۰	-۳۸/۵۳	-۴۱/۵۱	-۴۰/۰۲	۰/۰۰۰	۵۵	-۵۳/۸۳	گرد و غبار مرطوب
۳۵	-۱۳/۴۹	-۱۶/۵۶	-۱۵/۰۲	۰/۰۰۰	۶۳	-۱۹/۵۴	PM _{2.5}
۱۵۰	-۱۲۲/۳۲	-۱۲۶/۷۶	-۱۲۴/۵۴	۰/۰۰۰	۶۳	-۱۱۲/۱۴	PM ₁₀

¹ Lianga

بحث

تمامی نتایج گازها و ذرات گرد و غبار بر اساس استاندارد بوده و هیچ گونه آلودگی در خصوص این پارامترها وجود نداشته است. که آزمون t تک نمونه برای مقایسه میانگین گازها و ذرات گرد و غبار با استانداردهای آلودگی آنها، نیز این موضوع را ثابت کرد. برای مقایسه بیشترین مقدار گرد و غبار خشک در تمامی سال‌های اندازه‌گیری برابر با $99/8 \text{ mg/Nm}^3$ در کوره ۱ خروجی ۲ در اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۹ (شکل ۲) و کمترین مقدار $58/1 \text{ mg/Nm}^3$ در کوره ۳ خروجی ۲ در بهمن‌ماه سال ۱۳۹۹ (شکل ۲) بوده است. همچنین بیشترین مقدار گرد و غبار مرطوب در تمامی سال‌های اندازه‌گیری برابر با $74/1 \text{ mg/Nm}^3$ در کوره ۳ خروجی ۱ در اردیبهشت‌ماه سال ۱۳۹۹ (شکل ۲) و کمترین مقدار $47/6 \text{ mg/Nm}^3$ در کوره ۳ خروجی ۲ در بهمن‌ماه سال ۱۳۹۹ (شکل ۲) بوده است. دلایل این موضوع را می‌توان به متفاوت بودن سیستم کانال کشی انتقال دود از قسمت تپینگ و باز و بسته کردن دریچه دمپر کوره‌ها نسبت داد، که در برخی از قسمت‌های کوره ۱ شاهد فرسودگی این سیستم می‌باشیم.

در تمامی ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده برای سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰، مقادیر اندازه‌گیری شده ذرات معلق محیطی (PM_{10} و $\text{PM}_{2.5}$) کمتر از حد مجاز استاندارد بوده است. که آزمون t تک نمونه برای مقایسه میانگین ذرات معلق محیطی (PM_{10} و $\text{PM}_{2.5}$) با استانداردهای آلودگی آنها، نیز این موضوع را ثابت کرد. کمترین مقدار ذرات معلق محیطی $\text{PM}_{2.5}$ در تمامی سال‌های اندازه‌گیری برابر با $11 \mu\text{g/m}^3$ در ایستگاه‌های H (بهمن‌ماه سال ۱۳۹۹) و G (خردادماه ۱۴۰۰) و بیشترین مقدار برابر با $34 \mu\text{g/m}^3$ در ایستگاه H در خردادماه سال ۱۴۰۰ بوده است. همچنین کمترین مقدار ذرات معلق محیطی PM_{10} در تمامی سال‌های اندازه‌گیری برابر با $14 \mu\text{g/m}^3$ در ایستگاه‌های H (مردادماه سال ۱۳۹۹) و اسفندماه سال ۱۴۰۰) و G (خردادماه سال ۱۴۰۰) و بیشترین مقدار برابر با $54 \mu\text{g/m}^3$ در ایستگاه B در خردادماه سال ۱۳۹۹ بوده است. در تمامی ایستگاه‌های اندازه‌گیری شده برای سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰، مقادیر اندازه‌گیری شده ذرات معلق محیطی (PM_{10} و $\text{PM}_{2.5}$) کمتر از حد مجاز استاندارد بوده و هیچ آلودگی برای این ذرات در این سال‌ها در کارخانه فروآلیاژ ایران مشاهده نشد که می‌توان غلظت ذرات معلق محیطی در این سال‌ها را قابل قبول ارزیابی کرد. در مطالعه‌ای مشابه پتروو^۱ و موجان^۲ (۲۰۱۷) تأثیر تولید کارخانه فروآلیاژ تیخووین^۳ واقع در کشور روسیه را بر اجزای محیط‌زیست و جوامع انسانی ارزیابی کردند که تجزیه و تحلیل داده‌های پایش اجتماعی و بهداشتی نشان داد که پس از شروع تولید فروآلیاژ در کارخانه فروآلیاژ تیخووین، تعداد بروز بیماری در بین جمعیت شهری افزایش قابل توجهی داشته است، در صورتی که نتایج این مطالعه نشان داد که هیچ‌گونه آلودگی برای پارامترهای اندازه‌گیری شده کارخانه فروآلیاژ ایران مشاهده نشد.

در کارخانه فروآلیاژ ایران سری تجهیزات برای کنترل و تصفیه ذرات از دود خروجی (حاوی گازها) تعبیه شده است. این تجهیزات محیط‌زیستی برای کنترل آلاینده‌های هوا شامل لوله‌های U شکل برای خنک کردن دود انتقالی حاوی گازها از قسمت کوره به بخش سالن غبارگیر، جداکننده سیکلونی دستگاهی برای غبارگیری و جمع‌آوری ذرات معلق در گازها (جداسازی سیکلونی یک روش مکانیکی جهانی است که جداسازی با استفاده از نیروی گریز از مرکز حاصل از چرخش سیال انجام می‌شود. بدین‌صورت که جریان گاز حامل غبار از جدار بالایی بدنه سیکلون که استوانه‌ای

1- Petrov
2- Movchan
3- Tikhvin

شکل بوده و به یک مخروط ناقص منتهی می‌شود، وارد سیکلون گردیده و به طرف پایین جریان می‌یابد. ذرات غبار پس از تماس با جدار سیکلون و جدا شدن از جریان گازی، توسط نیروی گرانش به قسمت پایین سیکلون ریزش کرده و از طریق قسمت خروجی از سیکلون خارج می‌شوند (هالین^۱ و همکاران، ۲۰۱۲) و ۵۷۴۸ فیلتر کیسه‌ای (فیلترهای کیسه‌ای متداول برای جمع‌آوری ذرات و برای فیلتر کردن غبار موجود در گاز استفاده می‌شود. در این سیستم تخلیه غبار از کیسه‌ها از طریق لوله‌هایی به روش تزریق هوای فشرده و به صورت هوشمند و با در نظر گرفتن اختلاف فشار موجود در محفظه اعمال می‌شود و تخلیه غبار از سطح کیسه صورت می‌گیرد. این فیلترها، ذرات کوچک در حدود میکرون را با راندمان بیش از ۹۹ درصد جدا می‌کنند (کاناکا^۲، ۲۰۱۹)، در سالن غبارگیر (که در هر سالن به تعداد ۱۴ عدد کامپارتمان که هر کامپارتمان ۱۲۱ عدد فیلتر کیسه‌ای دارد) و کوره‌ها برای جدا کردن ذرات بسیار ریز می‌باشد. فیلترهای کیسه‌ای از نوع فیلتر مدیا^۳ فرانسه می‌باشد که جنس آن‌ها از نوع فایبرگلاس می‌باشد و دمای بین ۲۰۰ الی ۲۶۰ درجه سانتی‌گراد را تحمل می‌کنند. عمر مفید و کارایی این فیلترها ۱۰ سال می‌باشد. که در مطالعه‌ای مشابه نیز الس^۴ و همکاران (۲۰۱۰) با نصب سالن غبارگیر حاوی کیسه‌های فیلتر غشایی و یک خنک کننده حاوی لوله‌های U شکل در کارخانه فروآلیاژ چلیابینسک^۵ در روسیه سیستم کنترل دود کوره را بهبود بخشیدند که شامل جذب مؤثر بخار و گرمای تولید شده در هود کوره، فیلتر کردن ذرات از جریان گاز و به حداقل رساندن انتشار گازهای گلخانه‌ای به جو بود، که با نتایج این مطالعه هم‌خوانی داشته است. عمل جداسازی ذرات علاوه بر کمک به حفظ محیط‌زیست، از اتلاف پودر میکروسیلیکا به همراه دود جلوگیری کرده و محصول جانبی را که دارای ارزش اقتصادی بسیار بالایی می‌باشد و کاربردهای صنعتی قابل توجهی را دارا می‌باشد، تولید می‌نماید. در مطالعه‌ای توسط رحمان^۶ و همکاران (۲۰۲۰) ذرات بسیار ریز میکروسیلیکا را به عنوان پرکننده‌ای که می‌توانند در فضای بین ذرات سیمان قرار گیرند مورد بررسی قرار گرفتند که پودر میکروسیلیکا توانایی قابل توجهی در جایگزینی جزئی سیمان در بتن و بهبود خواص مکانیکی و دوام را دارا بود. در سالن غبارگیری دود حاوی غبار پس از عبور از سیکلون‌ها و فیلترهای کیسه‌ای و حذف ذرات و غبار آن از دود درون کیسه‌ها خارج گردیده و به سمت بالای سالن حرکت کرده و از طبقات بالا و از دریچه‌های موجود در بالاترین قسمت سالن خارج می‌شود. دبی دود خروجی از کوره ۱ در حدود ۲۰۶ هزار مترمکعب در ساعت در شرایط معمول بوده و باید دارای دمای حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد. برای خنک کردن و انتقال آن به سالن غبارگیر، دو عدد فن این دود را به سالن منتقل و دبی آن را به حدود ۳۲۵ هزار مترمکعب در ساعت در شرایط معمول می‌رساند. در سالن غبارگیری کوره دمای گاز در هنگام ترک محفظه فیلترها کمتر از ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. دبی دود خروجی در هر کدام از کوره‌های ۲ و ۳ در حدود ۱۵۰ هزار مترمکعب در ساعت در شرایط نرمال بوده و باید دارای دمای حدود ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد، که برای خنک کردن و انتقال آن به سالن غبارگیر ۲ عدد فن این دود را به سالن منتقل و دبی آن را به حدود ۲۳۶۶۵۰ مترمکعب در ساعت در شرایط نرمال رسانده و در سالن غبارگیری کوره دمای گاز در هنگام ترک محفظه فیلترها

1- Hualin
 2- Kanaoka
 3- Filter media
 4- Els
 5- Chelyabinsk
 6- Rahman

کمتر از ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد بوده است. همان‌طور که مشخص شد، لوله‌های خنک‌کننده U شکل شامل یک سری لوله و خم‌های عمودی هستند که ناحیه انتقال حرارت تابشی ایجاد می‌کند که موجب کاهش دمای دود انتقالی حاوی گازها از قسمت کوره به بخش سالن غبارگیر شده و عملکرد ایمنی فیلترهای کیسه‌ای را فراهم کرده است (مک دوغال^۱، ۲۰۱۳). گیاهان می‌توانند آلاینده‌های خاصی را از طریق جذب، جذب سطحی و متابولیسم فیلتر کنند. بنابراین، گیاهان به عنوان یک جاذب مهم آلاینده‌های هوا عمل می‌کنند که فیلترهای زیستی بسیار خوبی در مقابل آلودگی هوا می‌باشند و توانایی آن‌ها در تحمل آلاینده‌های هوا به ویژگی‌های بیوشیمیایی، فیزیولوژیکی و مورفولوژیکی آن‌ها بستگی دارد (شریستا^۲ و همکاران، ۲۰۲۱). در زمینه نوع و گونه‌های فضای سبز در کارخانه فروآلیاژ ایران، با توسعه پوشش گیاهی، اقدامات بسیار مناسبی برای کاهش آلودگی هوا با ایجاد کمربند فضای سبز و کاشت نهال صنوبر جهت جلوگیری از نشت آلودگی هوا به روستاهای اطراف در حاشیه کارخانه و توسعه سالیانه فضای سبز در معدن کارخانه صورت گرفته است. در این کارخانه بیش از ۶۰ درصد از مساحت کارخانه را فضای سبز تشکیل داده که در پنج سال اخیر بیش از ۱۰ درصد افزایش یافته است.

نتیجه‌گیری

این مطالعه با هدف بررسی وضعیت محیط‌زیستی آلودگی هوای کارخانه فروآلیاژ ایران با بررسی تجهیزات کنترل‌کننده آلاینده‌های هوا بوده است. نتایج نشان دادند که تمامی پارامترهای اندازه‌گیری شده گازهای خروجی از دودکش و گرد و غبار و ذرات معلق محیطی طی سال‌های ۱۳۹۹ و ۱۴۰۰ طبق استانداردهای سازمان محیط‌زیست بودند. به طوری که آزمون t تک نمونه نیز کمتر بودن و اختلاف معنی‌دار داشتن میانگین گازهای خروجی و ذرات گرد و غبار از دودکش و ذرات معلق محیطی با استانداردهای آلودگی آن‌ها را نشان داد. دلیل این موضوع در کارخانه فروآلیاژ ایران، داشتن تجهیزات محیط‌زیستی مناسب برای کنترل آلاینده‌ها و کاشت فضای سبز مناسب با گونه‌های درختی و درختچه‌ای متنوع می‌باشد. این تجهیزات شامل کنترل و تصفیه ذرات از دود خروجی برای کنترل آلاینده‌های هوا شامل لوله‌های U شکل برای خنک کردن دود انتقالی حاوی گازها از قسمت کوره به بخش سالن غبارگیر، جداکننده سیکلونی برای غبارگیری و جمع‌آوری ذرات معلق در گازها و فیلترهای کیسه‌ای در سالن غبارگیر برای جمع‌آوری ذرات و فیلتر کردن غبار موجود در گاز بوده است. از این رو می‌توان گفت که هیچ گونه آلودگی برای پارامترهای بررسی شده در کارخانه فروآلیاژ ایران مشاهده نشده و کارخانه در راستای رسیدن به صنعت سبز گام بر می‌دارد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از مرکز پژوهش و فناوری علم و توسعه دانشگاه علم و صنعت ایران و شرکت صنایع فروآلیاژ ایران به خاطر همکاری در انجام این پژوهش را اعلام می‌نمایند.

منابع

- آقاملایی، ایمان؛ لشکری پور، غلامرضا؛ غفوری، محمد. (۱۳۹۴). ارزیابی آلودگی هوا ناشی از صنعت سیمان: مطالعه موردی کارخانه سیمان کرمان. *دوماهنامه سلامت کار ایران*، ۱۲(۲)، ۸۰-۹۲. <http://ioh.iums.ac.ir/article-1-1314-en.html>
- رشیدی فرد، مارال؛ رشیدی، یوسف؛ امیری، مجید. (۱۳۹۷). مدل سازی انتشار و محاسبه ریسک آلاینده های هوای ناشی از مجتمع فولاد. *فصلنامه بهداشت در عرصه*، ۶(۳)، ۲۷-۳۵. <https://journals.sbmu.ac.ir/en-jhf/article/view/24322/0>
- قانون نحوه جلوگیری از آلودگی هوا. (۱۳۷۴). مصوب مجلس شورای اسلامی ایران.
- تصویب نامه در خصوص تعیین حد مجاز استانداردهای خروجی از کارخانجات و کارگاه های صنعتی. (۱۳۹۵). مصوبات هیات وزیران.
- غیاث الدین، منصور؛ مصدافی نیا، علیرضا؛ شریعت، سید محمود؛ نظم آرا، شاهرخ. (۱۳۸۰). بررسی ضرایب انتشار آلاینده های هوا ناشی از صنایع شیمیایی در محدوده تهران. *نشریه تحقیقات و نظام سلامت حکیم*، ۴(۱)، ۶۹-۷۶.
- کریمی قوزلو، رضا؛ احمدی، آیدا؛ عباسپور، مجید؛ عباس زاد، نصرت الله. (۱۴۰۰). ارزیابی ذرات معلق محیطی PM₁₀ و PM_{2.5} با روش شاخص کیفیت هوا (مطالعه موردی: مجتمع صنعتی سیمان تهران). *نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست*، ۲۳(۸)، ۱۵۵-۱۶۷. <https://doi.org/10.30495/jest.2020.30146.3867>
- Els, L., Fereday, F., Vorster, O. (2010). Major ferroalloy producer improves the furnace fume control system by installing baghouse with membrane filter bags. <https://www.pyro.co.za/InfaconXII/155-Els.pdf>
- Faridi, S., Shamsipour, M., Krzyzanowski, M., Künzli, N., Amini, H., Azimi, F., Naddafi, K. (2018). Long-term trends and health impact of PM_{2.5} and O₃ in Tehran, Iran, 2006–2015. *Environment International*, 114, pp 37-49. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.02.026>
- Haque, N., Norgate, T. (2013). Estimation of greenhouse gas emissions from ferroalloy production using life cycle assessment with particular reference to Australia. *Journal of cleaner production*, 39, pp 220-230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.010>
- Hualin, W., Zhang, Y., Jiangang, W., Honglai, L.I.U. (2012). Cyclonic separation technology: researches and developments. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20(2), pp 212-219. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(12\)60381-4](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(12)60381-4)
- Hycnar, J.J., Borowski, G., Jozefiak, T. (2014). Conditions for the preparation of stable ferrosilicon dust briquettes. *Inzynieria mineralna*, p 15.
- Karimi, A., Shirmardi, M., Hadei, M., Birgani, Y. T., Neisi, A., Takdastan, A., Goudarzi, G. (2019). Concentrations and health effects of short-and long-term exposure to PM_{2.5}, NO₂, and O₃ in ambient air of Ahvaz city, Iran (2014–2017). *Ecotoxicology and environmental safety*, 180, pp 542-548. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.026>
- Kanaoka, C. (2019). Fine particle filtration technology using fiber as a dust collection medium. *KONA Powder and Particle Journal*, 36, pp 88-113. <https://doi.org/10.14356/kona.2019006>
- Kero, I., Naess, M. K., Tranell, G. (2015). Particle size distributions of particulate emissions from the ferroalloy industry evaluated by electrical low-pressure impactor (ELPI). *Journal of Occupational and environmental hygiene*, 12(1), pp 37-44. <https://doi.org/10.1080/15459624.2014.935783>
- Kero, I., Gradahl, S., Tranell, G. (2017). Airborne emissions from Si/FeSi production. *Jom*, 69, pp 365-380. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2149-x>
- Liang, G., Fu, W., Wang, K. (2019). Analysis of t-test misuses and SPSS operations in medical research papers. *Burns & Trauma*, 7(31), pp. 1-5. <https://doi.org/10.1186/s41038-019-0170-3>
- Mc Dougall, I. (2013). Ferroalloys processing equipment. In *Handbook of Ferroalloys* (pp. 83-138). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097753-9.00004-6>
- Mishra, P., Pandey, C. M., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., Keshri, A. (2019). Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of cardiac anesthesia*, 22(1), p. 67. https://doi.org/10.4103%2Faca.ACA_157_18
- Nygaard, H.S., Meyer, J., Di Felice, L., Eldrup, N.H., Haug, A.T., Olsen, E. (2019). Techno-economic study of the CCMS Technology for CO₂ capture from ferrosilicon production.
- Panjwani, B., Pettersen, T., Wittgens, B. (2020). Controlling Flue Gas Temperature From Ferro Silicon Submerged Arc Furnaces (SAF) Using Flue Gas Recirculation (FGR). In *14th International Conference On CFD In 6 Oil & Gas, Metallurgical And Process Industries Sintef, Trondheim, Norway, October 12–14, 2020*. Sintef Academic Press.
- Panjwani, B., Olsen, J.E. (2013). Combustion and mechanisms for NO_x formation in ferrosilicon electric arc furnaces. In *European combustion meeting, ECM 2013 (Vol. 7)*.
- Petrov, D., Movchan, I. (2017). A comprehensive evaluation of anthropogenic load on environment components under conditions of ferroalloy manufacture. *Ecology, Environment and Conservation*. 23, pp 539-543.
- Rahman, M.A., Zawad, M.F.S., Priyom, S.N. (2020). Potential use of micro silica in concrete: a critical.

- Sævarsdóttir, G., Kvande, H., Magnusson, T. (2021). Greenhouse gas emissions from silicon production-development of carbon footprint with changing energy systems. Available at SSRN 3926088. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3926088>
- Shrestha, S., Baral, B., Dhital, N.B., Yang, H.H. (2021). Assessing air pollution tolerance of plant species in vegetation traffic barriers in Kathmandu Valley, Nepal. Sustainable Environment Research, 31(1), pp 1-9. <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00076-2>
- Zhang, H., Sun, W., Li, W., Wang, Y. (2022). Physical and chemical characterization of fugitive particulate matter emissions of the iron and steel industry. Atmospheric Pollution Research, 13(1), p 101272. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101272>.



References

References (in Persian)

- Aghamolaie, I., Lashkaripour, G. R., Ghafoori, M. (2015). Assessment of air pollution from the cement industry. *Iran Occupational Health*, 12(2), pp. 79-92 [in Persian]. <http://ioh.iuums.ac.ir/article-1-1314-en.html>
- Approval of the letter regarding the determination of the permissible limit of output standards from factories and industrial workshops. (2015). Council of Minister's approvals [in Persian].
- Fard, M. R., Rashidi, Y., Amiri, M. (2018). Modeling the emission and calculation of the risk of steelmaking contaminants using the AERMOD model. *Journal of Health in the Field*, 6(3), pp. 27-35 [in Persian].
- Ghiyasaldin, M., Masadaghinia, A., Shariat, S. M., Nazm Ara, S. (1380). Investigating the emission coefficients of air pollutants caused by chemical industries in Tehran. *Hakim Research and Health System Journal*, 4(1), pp. 69-76 [in Persian]. <https://journals.sbmu.ac.ir/en-jhf/article/view/24322/0>
- Karimi Ghoozlou, R., Ahmadi, A., Abbaspour, M., Abbaszadeh, N. (2021). Assessment of Environmental Pollutant Particles PM₁₀ and PM_{2.5} with Air Quality Index Method (Case Study: Tehran Industrial Cement Complex). *Journal of Environmental Science and Technology*, 23(8), pp. 155-167 [in Persian]. <https://doi.org/10.30495/jest.2020.30146.3867>
- The law on how to prevent air pollution. (2005). Approved by the Islamic Council of Iran [in Persian]

References (in English)

- Els, L., Fereday, F., Vorster, O. (2010). Major ferroalloy producer improves the furnace fume control system by installing baghouse with membrane filter bags. <https://www.pyro.co.za/InfaconXII/155-Els.pdf>
- Faridi, S., Shamsipour, M., Krzyzanowski, M., Künzli, N., Amini, H., Azimi, F., Naddafi, K. (2018). Long-term trends and health impact of PM_{2.5} and O₃ in Tehran, Iran, 2006–2015. *Environment International*, 114, pp 37-49. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.02.026>
- Haque, N., Norgate, T. (2013). Estimation of greenhouse gas emissions from ferroalloy production using life cycle assessment with particular reference to Australia. *Journal of cleaner production*, 39, pp 220-230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.010>
- Hualin, W., Zhang, Y., Jiangang, W., Honglai, L.I.U. (2012). Cyclonic separation technology: researches and developments. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 20(2), pp 212-219. [https://doi.org/10.1016/S1004-9541\(12\)60381-4](https://doi.org/10.1016/S1004-9541(12)60381-4)
- Hycnar, J.J., Borowski, G., Jozefiak, T. (2014). Conditions for the preparation of stable ferrosilicon dust briquettes. *Inzynieria mineralna*, p 15.
- Karimi, A., Shirmardi, M., Hadei, M., Birgani, Y. T., Neisi, A., Takdastan, A., Goudarzi, G. (2019). Concentrations and health effects of short-and long-term exposure to PM_{2.5}, NO₂, and O₃ in ambient air of Ahvaz city, Iran (2014–2017). *Ecotoxicology and environmental safety*, 180, pp 542-548. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.05.026>
- Kanaoka, C. (2019). Fine particle filtration technology using fiber as a dust collection medium. *KONA Powder and Particle Journal*, 36, pp 88-113. <https://doi.org/10.14356/kona.2019006>
- Kero, I., Naess, M. K., Tranell, G. (2015). Particle size distributions of particulate emissions from the ferroalloy industry evaluated by electrical low-pressure impactor (ELPI). *Journal of Occupational and environmental hygiene*, 12(1), pp 37-44. <https://doi.org/10.1080/15459624.2014.935783>
- Kero, I., Gradahl, S., Tranell, G. (2017). Airborne emissions from Si/FeSi production. *Jom*, 69, pp 365-380. <https://doi.org/10.1007/s11837-016-2149-x>
- Liang, G., Fu, W., Wang, K. (2019). Analysis of t-test misuses and SPSS operations in medical research papers. *Burns & Trauma*, 7(31), pp. 1-5. <https://doi.org/10.1186/s41038-019-0170-3>
- Mc Dougall, I. (2013). Ferroalloys processing equipment. In *Handbook of Ferroalloys* (pp. 83-138). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097753-9.00004-6>
- Mishra, P., Pandey, C. M., Singh, U., Gupta, A., Sahu, C., Keshri, A. (2019). Descriptive statistics and normality tests for statistical data. *Annals of cardiac anesthesia*, 22(1), p. 67. https://doi.org/10.4103/2Faca.ACA.157_18
- Nygard, H.S., Meyer, J., Di Felice, L., Eldrup, N.H., Haug, A.T., Olsen, E. (2019). Techno-economic study of the CCMS Technology for CO₂ capture from ferrosilicon production.
- Panjwani, B., Pettersen, T., Wittgens, B. (2020). Controlling Flue Gas Temperature From Ferro Silicon Submerged Arc Furnaces (SAF) Using Flue Gas Recirculation (FGR). In 14th International Conference On CFD In 6 Oil & Gas, Metallurgical And Process Industries Sintef, Trondheim, Norway, October 12–14, 2020. Sintef Academic Press.
- Panjwani, B., Olsen, J.E. (2013). Combustion and mechanisms for NO_x formation in ferrosilicon electric arc furnaces. In European combustion meeting, ECM 2013 (Vol. 7).
- Petrov, D., Movchan, I. (2017). A comprehensive evaluation of anthropogenic load on environment components under conditions of ferroalloy manufacture. *Ecology, Environment and Conservation*, 23, pp 539-543.
- Rahman, M.A., Zawad, M.F.S., Priyom, S.N. (2020). Potential use of micro silica in concrete: a critical.
- Sævarsdottir, G., Kvande, H., Magnusson, T. (2021). Greenhouse gas emissions from silicon production-development of carbon footprint with changing energy systems. Available at SSRN 3926088. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3926088>

- Shrestha, S., Baral, B., Dhital, N.B., Yang, H.H. (2021). Assessing air pollution tolerance of plant species in vegetation traffic barriers in Kathmandu Valley, Nepal. Sustainable Environment Research, 31(1), pp 1-9. <https://doi.org/10.1186/s42834-020-00076-2>
- Zhang, H., Sun, W., Li, W., Wang, Y. (2022). Physical and chemical characterization of fugitive particulate matter emissions of the iron and steel industry. Atmospheric Pollution Research, 13(1), p 101272. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2021.101272>.

